

제 5 장 시설물의 안전성평가

5.1 개 요

5.2 백운1교(부산) 안전성 평가

5.3 백운1교(춘천) 안전성 평가

제 5 장 시설물의 안전성평가

5.1 개 요

구조물의 안전성평가는 그 기능과 역할을 유지할 수 있는 구조적 및 사용성의 안전성에 대한 확보여부를 평가하는 것이므로 설계자료 검토, 시공방법과 사용재료에 대한 검토, 보수·보강이력 분석, 부재별 상태평가 결과 및 각종 계측·측정·조사·시험 등을 통한 기초자료를 확보하여 이를 바탕으로 구조검토를 실시하고 안전성 여부를 판단하여야 한다.

안전성평가는 도로교설계기준의 규정에 따라 허용응력법 및 강도설계법에 따라 검토하였다. 즉, 상부구조의 Steel Box Girder 검토는 허용응력법, 바닥판 및 하부구조는 강도설계법에 근거하여 수행하였다.

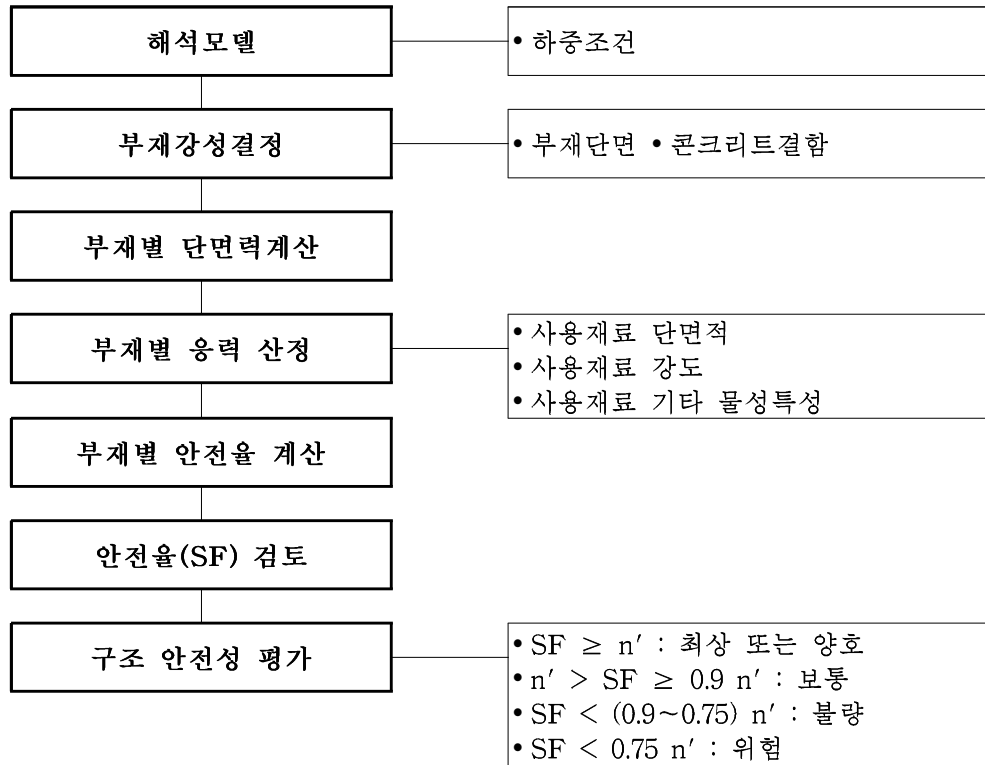
안전성평가 등급은 각 구조요소의 검토방법을 토대로 『안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (2010.12, 국토교통부/한국시설안전공단)』에서 제시하는 등급기준을 적용하였으며, 안전성평가 등급기준은 아래와 같다.

【표 5.1】 구조물의 안전성평가 기준

기 준	안전성평가 기준	비 고
A	$SF \geq 1$	• 허용응력 설계법 $SF(\text{안전율}) = \frac{\text{허용응력}}{\text{발생응력}} = \frac{f_a}{f_d + i}$ • 강도설계법 $SF(\text{안전율}) = \frac{\text{설계강도}}{\text{소요강도}} = \frac{\varphi M_n}{M}$
B	$0.9 \leq SF < 1$ 공용내하력이 설계하중보다 크게 평가된 경우	
C	$0.9 \leq SF < 1$	
D	$0.75 \leq SF < 0.9$	
E	$SF < 0.75$	

주) 기본내하력은 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2010)에 근거하여 평가함.

5.1.1 안전성평가의 방법



【그림 5.1】 안전성평가의 방법

5.1.2 기본내하율(RF) 및 기본내하력(Po) 산정

【표 5.2】 기본내하율(RF) 및 기본내하력(Po) 산정

구 분	기본내하율(RF) 및 기본내하력(Po) 산정	적 용
허용응력법	- 기본내하율 : $RF = \frac{f_a - f_d}{f_l(1+i)}$ 여기서, f_a = 허용응력 f_d = 지속하중에 의한 발생응력 $f_l(1+i)$ = 활하중에 의한 발생응력(충격포함) - 기본내하력 : $P_o = Pr \times RF$ 여기서, Pr = 설계활하중	거 더
강도설계법	- 기본내하율 : $RF = \frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_l M_l(1+i)}$ 여기서, ϕM_n = 극한 저항모멘트 M_d = 지속하중에 의한 모멘트 $M_l(1+i)$ = 활하중에 의한 모멘트(충격포함) γ_l = 활하중 계수 = 2.15 γ_d = 고정하중 계수 = 1.30 - 기본내하력 : $P_o = Pr \times RF$ 여기서, Pr = 설계활하중	바닥판, 하부구조

5.2 백운1교(부산) 안전성평가

5.2.1 개 요

백운1교(부산)는 총연장 180.93m, 총폭 12.6m의 3경간 연속 Steel Arch교량으로서, 좌·우측의 주거더와 가로보, 아치리브와 브레이싱 및 행어가 복합적으로 구성되었으며, 하부구조는 직접(전면) 기초위에 벽식교각과 역T형 교대로 시공되어 있다.

가. 검토구간 선정 및 사유

안전성 평가는 교량의 설계개념을 따라 일관성이 유지되도록 평가하는 것을 원칙으로 하고, 최근 도입되고 있는 신뢰성이론에 의한 평가방법은 충분한 통계자료가 뒷받침되어야 하므로 평가방법은 강교거더는 허용응력법에 의하여, 콘크리트 바닥판 및 교각 부재검토는 강도설계법에 의하여, 전차 정밀안전진단(2011년)에서 수행한 안전성평가 자료를 활용하고, 금회 정밀안전진단(2016년)와 구조적 변화상태에 대하여 비교 하였다.

나. 구조검토 조건

본 교량은 설계 시와 현재의 설계기준을 비교하여 현 기준에 의하여 안전성 검토 및 내하력 평가를 실시하며, 사용재료의 특성 및 철근간격, 피복두께 등을 설계도서와 현장측정 값을 비교하여 적용하였다. 설계시와 금차 정밀안전진단의 비교표는 다음 【표 5.3】과 같다.

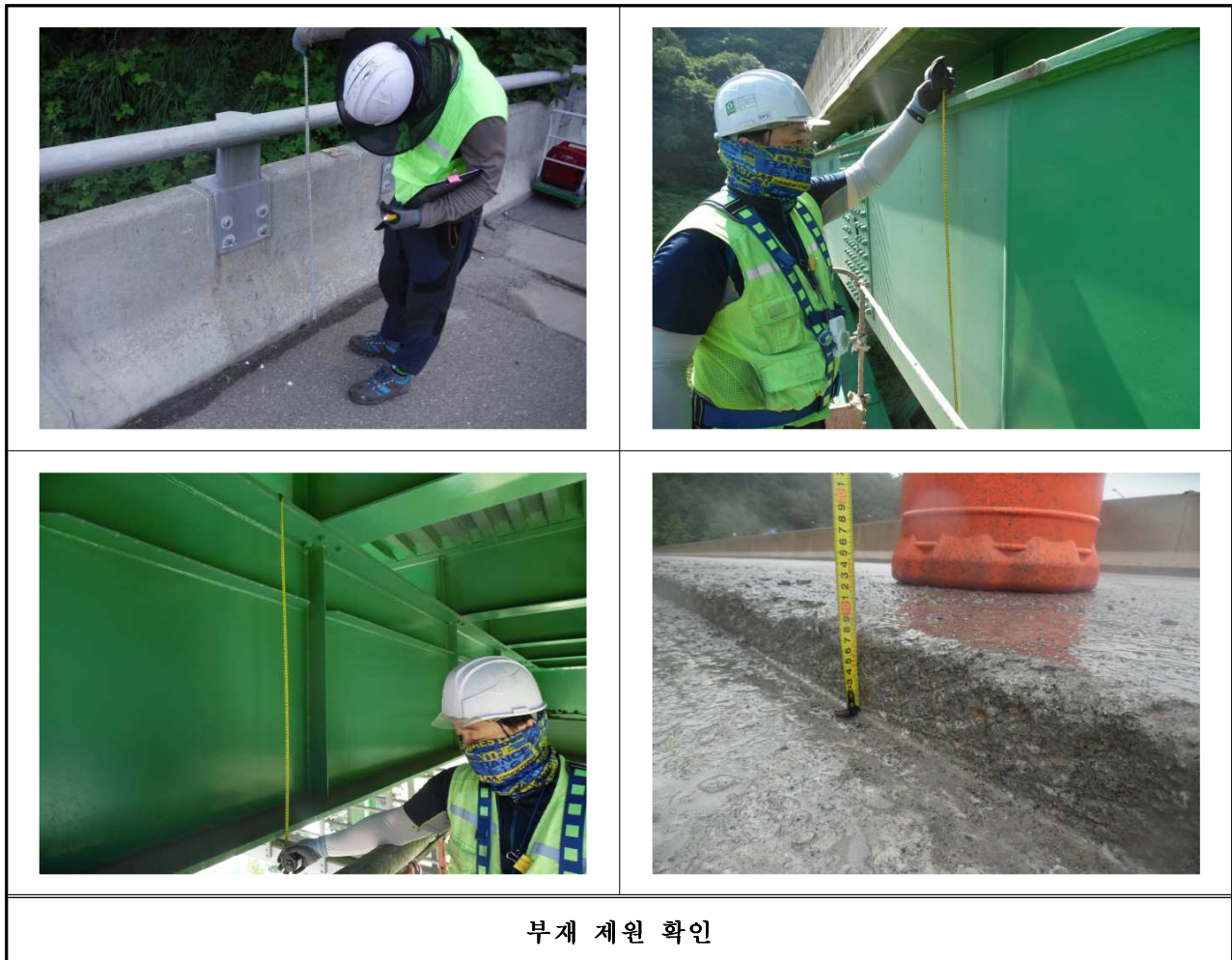
1) 구조검토 조건 비교

【표 5.3】 백운1교(부산) 구조검토 조건 비교

구 분		2000년 설계	2011년 진단	2016년 진단
설계 기준	적용년도	• 콘크리트 표준시방서(1996) • 도로교 표준시방서(1996)	• 콘크리트 구조설계기준(2007) • 도로교 설계기준(2010)	• 콘크리트 구조기준(2012) • 도로교 설계기준(2010)
	주요 하중계수	• 콘크리트 하중조합(1.3D+2.15L)	• 콘크리트 하중조합(1.3D+2.15L)	• 콘크리트 하중조합(1.3D+2.15L)
상부구조 적용하중	바닥판	• 고정하중+활하중	• 고정하중+활하중+차량충돌하중+풍하중	• 고정하중+활하중+차량충돌하중+풍하중
	거더	• 고정하중+활하중+풍화중+온도변화	• 고정하중+활하중+풍화중+온도변화	• 고정하중+활하중+풍하중+온도변화
비교결과		- 설계시 구조검토 조건비교 결과, 교각이 매우 낮고 상대적 높이차이도 없으며, 기초가 경암에 위치한 점을 고려하여 설계 시와 같이 지점침하에 대한 검토를 생략하였음. - 백운1교(부산)은 준공된지 10년이 경과한 구조물로서, 크리프와 건조수축은 진행이 완료된 상태로 판단되어 검토조건에서 생략하였음. - 상부구조 적용하중에서 아스콘포장에서 콘크리트 포장(LMC)으로 재포장 보수를 실시하여 그 실측치를 반영한 안전성평가를 실시함.		

2) 부재제원 확인

시설물을 구성하고 있는 주요부재에 대한 제원 확인을 위해 실측을 실시하고 이를 준공도와 비교·검토하여 주요 부재의 규격을 확인하였다.



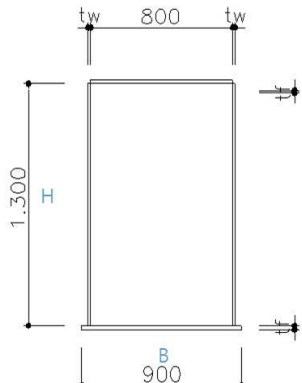
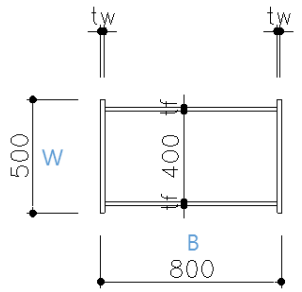
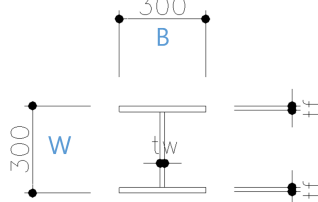
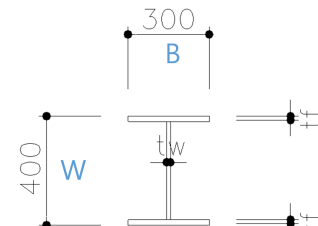
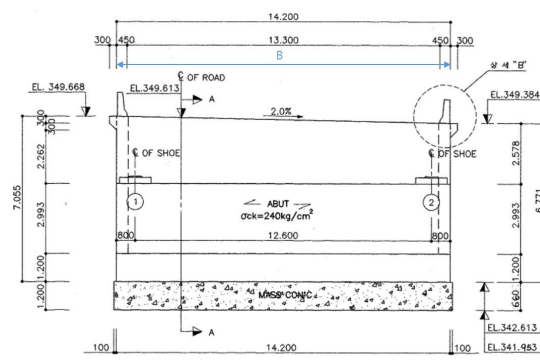
부재 제원 확인

【사진 5.1】 백운1교(부산) 부재 제원 측정

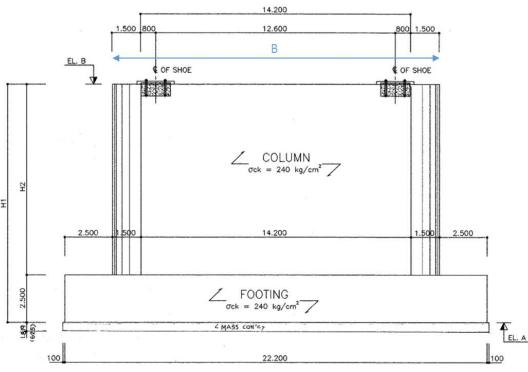
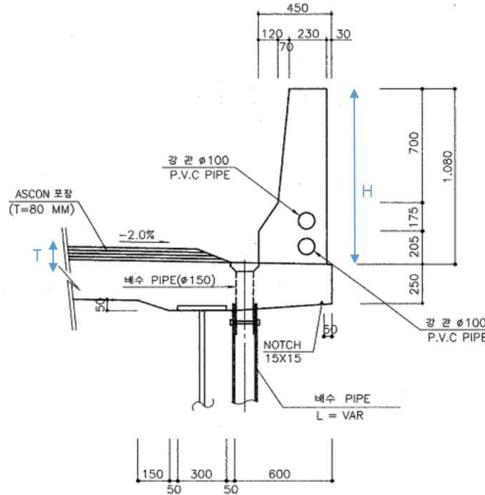
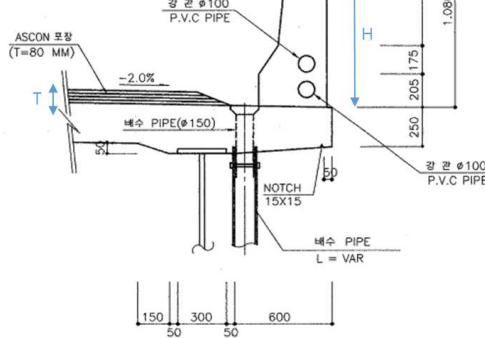
【표 5.4】 백운1교(부산) 부재 제원 확인 결과

구 분		개요도	구분	설계도면	실측결과	비고
상부 구조	보강 거더		H	1.25m	1.25m	일치
			B	0.9m	0.9m	일치

【표 5.4】 백운1교(부산) 부재 제원 확인 결과(계속)

구 분	개요도	구분	설계도면	실측결과	비고
상부 구조		H	1.30m	1.30m	일치
		B	0.9m	0.9m	일치
		W	0.5m	0.5m	일치
		B	0.8m	0.8m	일치
		W	0.3m	0.3m	일치
		B	0.3m	0.3m	일치
		W	0.3m	0.3m	일치
		B	0.3m	0.3m	일치
하부 구조		B	14.2m	14.15	일치

【표 5.4】 백운1교(부산) 부재 제원 확인 결과(계속)

구 분		개요도	구분	설계도면	실측결과	비고
하부 구조	교각		B	14.2m	14.2m	일치
	방호벽		H	1.08m	1.07m	일치
기타 부재	포장 (콘크리트재포장)		T	80mm	80mm	일치
측정결과		- 부재제원의 실측결과, 전반적으로 준공도상의 제원과 일치함. - 포장의 경우 2016년08월29일~9월2일 기간 중 재포장 공사를 실시하여 아스콘 포장에서 콘크리트 포장(LMC)으로 변경되었으며 그 실측치를 반영함.				

3) 현장시험 및 측정자료 분석

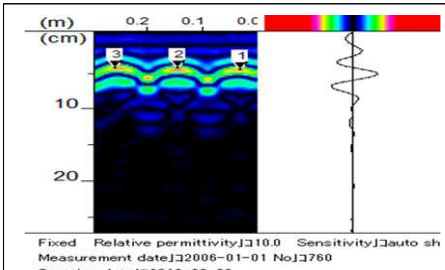
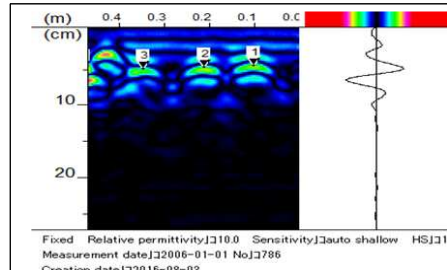
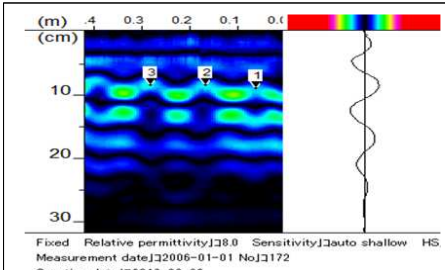
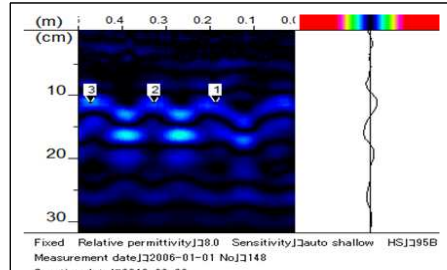
① 사용재료 및 강도

【표 5.5】 백운1교(부산) 사용재료 및 강도

구 분	콘 크 리 트				철 근	
	탄성계수 (MPa)	설계기준강도 (MPa)	현장조사결과 (MPa)	적용강도 (MPa)	철근강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
상부구조	27,804	27.0	27.6~33.1	27.0	400.0	2.0×10^5
하부구조	26,986	24.0	25.3~30.4	24.0	300.0	2.0×10^5
• 콘크리트 강도시험은 반발경도시험 및 초음파시험 결과가 모두 『중양고속도로(제천~원주간) 4차로 확장공사 구조및수리계산서(Ⅲ)』의 설계기준강도 이상이므로 최저값인 설계기준강도를 적용강도로 적용함.						

② 단면제원 및 철근량

【표 5.6】 백운1교(부산) 단면제원 및 철근량

시험위치	단면두께 (mm)	피복두께(mm)			철근(m당 평균)				
		설계값	측정 평균값	검토 적용값	설계값	철근탐사	검토 적용값		
S1 캔틸레버 우측	250.0	42.0	41.0	42.0	H16@125.0	H16@112.5	H16@125.0		
S2 캔틸레버 우측(A1측)	250.0	42.0	40.0	42.0	H16@125.0	H16@110.0	H16@125.0		
S2 캔틸레버 우측(A2측)	250.0	42.0	44.0	42.0	H16@125.0	H16@130.0	H16@125.0		
S3 캔틸레버 우측	250.0	42.0	45.0	42.0	H16@125.0	H16@122.5	H16@125.0		
철근탐사 DATA									
		위치	철근종류	피복두께	철근간격	위치	철근종류	피복두께	철근간격
		S1 캔틸레버	횡방향철근	41.0~43.0	112.5	S3 캔틸레버	횡방향철근	43.0~48.0	110.0~135.0
철근배근 탐사결과 측정부재의 길이 부족으로 인해 횡방향철근에 대해서만 측정이 가능한 상태였으며, 『중앙고속도로 제천-원주간 확장공사 제16공구 실시설계도』에 적용된 설계값과 금회 측정평균값의 차이가 미미하여 안전성 평가시 설계값을 기준으로 적용함.									
P1 기둥	수직철근	3000.0	87.5	87.0	87.5	D32@100.0	D32@100.0	D32@100.0	
	수평철근		112.5	114.0	112.5	D25@150.0	D25@150.0	D25@150.0	
철근탐사 DATA									
		위치	철근종류	피복두께	철근간격	위치	철근종류	피복두께	철근간격
		P1 기둥	수직철근	87.0~88.0	90.0~110.0	P1 기둥	수평철근	113.0~116.0	145.0~155.0
철근배근 탐사결과 『중앙고속도로 제천-원주간 확장공사 제16공구 실시설계도』에 적용된 설계값과 금회 측정평균값의 차이가 미미하여 안전성 평가시 설계값을 기준으로 적용함.									

5.2.2 상부구조 안전성평가

가. 구조검토 조건

1) 교량제원

- ① 교 량 명 : 백운1교(부산)
- ② 교량등급 : 1등급(DB-24, DL-24)
- ③ 교량형식 : 3경간 Steel Arch교
- ④ 교 장 : $50 + 80 + 50 = 180\text{m}$
- ⑤ 교 량 폭 : $B = 12.6\text{m}$
- ⑥ 거더제원 : $B = 0.8\text{m}, H = 1.25\text{m}$
- ⑦ 사 각 : 0.000°
- ⑧ 곡률반경 : ∞

2) 하중

- ① 고정하중
 - 철근콘크리트 : $W_c = 25.00 \text{ kN/m}^3$
 - 포장콘크리트 : $W_a = 23.50 \text{ kN/m}^3 (\text{LMC})$
- ② 활하중
 - DB-24, DL-24
 - 충격계수 : $I = 15 / (40+L) \leq 0.3$

3) 사용재료

- ① 콘크리트
 - ㉠ 설계기준강도 : $f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$
 - ㉡ 허용압축응력 : $f_{cu} = 0.4 \times f_{ck} = 10.8 \text{ MPa}$
 - ㉢ 탄 성 계 수 : $E_c = 28,693.400 \text{ MPa}$
 - ㉣ 전단탄성계수 : $G = 12,297.200 \text{ MPa}$
 - ㉤ 포아송비 : $\nu = 0.167$
 - ㉥ 크리프계수 : $\phi_2 = 2\phi_1 = 2.0$
 - ㉦ 선팽창계수 : $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$
- ② 철근(SD40)
 - ㉧ 항복강도 : $f_y = 400.0 \text{ MPa}$
 - ㉨ 탄성계수 : $E_s = 200,000 \text{ MPa}$

③ 강 재

㉠ 주부재 : SM520 (SWS520) - 보강거더, 아치리브, 가로보

㉡ 부부재 : SM400 (SWS400) - 행거 및 2차 부재

㉢ 탄성계수 : $E_s = 205,000 \text{ MPa}$

㉣ 허용응력

㉤ 허용축방향인장응력 및 허용휨인장응력(MPa)

강 종 판두께(mm)	SS400 SM400 SMA400	SM490	SM490Y SM520 SMA490	SM570 SMA570
40 이하	140	190	215	270
40 초과 75 이하	130	175	200	260
75 초과 100 이하			195	250

㉥ 허용축방향압축응력

$$f_{ca} = f_{cag} \cdot f_{cal} / f_{cao}$$

여기서, f_{ca} : 허용축방향압축응력(MPa) f_{cag} : 국부좌굴을 고려치 않은 허용축방향압축응력(MPa) f_{cal} : 국부좌굴에 대한 허용응력(MPa) f_{cao} : 국부좌굴을 고려치 않은 허용축방향압축응력의 상한값(MPa)

• 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(MPa)

강종 판두께 (mm)	SS400 SM400 SMA400	SM490	SM490Y SM520 SMA490	SM570 SMA570
40 이하	$140 : \ell/r \leq 18.6$ $140-0.84(\ell/r-18.6) : 18.6 < \ell/r \leq 92.8$ $\frac{1,200,000}{6,700+(\ell/r)^2} :$ $92.8 < \ell/r$	$190 : \ell/r \leq 16.0$ $190-1.29(\ell/r-16.0) : 16.0 < \ell/r \leq 80.1$ $\frac{1,200,000}{5,000+(\ell/r)^2} :$ $80.1 < \ell/r$	$215 : \ell/r \leq 15.1$ $215-1.55(\ell/r-15.1) : 15.1 < \ell/r \leq 75.5$ $\frac{1,200,000}{4,400+(\ell/r)^2} :$ $75.5 < \ell/r$	$270 : \ell/r \leq 13.4$ $270-2.19(\ell/r-13.4) : 13.4 < \ell/r \leq 67.1$ $\frac{1,200,000}{3,500+(\ell/r)^2} :$ $67.1 < \ell/r$
40 초과 75 이하	$130 : \ell/r \leq 19.4$ $130-0.75(\ell/r-19.4) : 19.4 < \ell/r \leq 97.0$	$175 : \ell/r \leq 16.6$ $175-1.15(\ell/r-16.6) : 16.6 < \ell/r \leq 82.8$	$200 : \ell/r \leq 15.5$ $200-1.40(\ell/r-15.5) : 15.5 < \ell/r \leq 77.7$ $\frac{1,200,000}{4,700+(\ell/r)^2} :$ $77.7 < \ell/r$	$260 : \ell/r \leq 13.7$ $260-2.07(\ell/r-13.7) : 13.7 < \ell/r \leq 68.6$ $\frac{1,200,000}{3,600+(\ell/r)^2} :$ $68.6 < \ell/r$
75 초과 100 이하	$\frac{1,200,000}{7,300+(\ell/r)^2} :$ $97.0 < \ell/r$	$\frac{1,200,000}{5,300+(\ell/r)^2} :$ $82.8 < \ell/r$	$195 : \ell/r \leq 15.8$ $195-1.35(\ell/r-15.8) : 15.8 < \ell/r \leq 78.9$ $\frac{1,200,000}{4,800+(\ell/r)^2} :$ $78.9 < \ell/r$	$250 : \ell/r \leq 13.9$ $250-1.96(\ell/r-13.9) : 13.9 < \ell/r \leq 69.4$ $\frac{1,200,000}{3,700+(\ell/r)^2} :$ $69.4 < \ell/r$

※ 여기서, ℓ : 부재의 유효좌굴 길이 (mm) r : 부재 종단면의 단면회전반경 (mm)

㉔ 허용휨압축응력(MPa)

- 압축플랜지가 콘크리트 바닥판 등에 직접 고정되어 있는 경우 및 상자형 단면, II 형 단면과 같이 횡좌굴이 일어나기 어려운 경우

강 종 판두께(mm)	SS400 SM400 SMA400	SM490	SM490Y SM520 SMA490	SM570 SMA570
40 이하	140	190	215	270
40 초과 75 이하	130	175	200	260
75 초과 100 이하			195	250

- 위 사항 이외의 경우

강 종 판두께(mm)		SS 400 SM400 SMA 41	SM490	SM490Y SM520 SMA490	SM570 SMA570
Aw/Ac ≤2	40 이하	140 : $\ell/b \leq 4.6$ 140-2.49($\ell/b-4.6$): 4.56 $\ell/b \leq 30$	190 : $\ell/b \leq 4.0$ 190-3.91($\ell/b-4.0$): 4.0 < $\ell/b \leq 30$	215 : $\ell/b \leq 3.8$ 215-4.69($\ell/b-3.8$): 3.8 < $\ell/b \leq 27$	270 : $\ell/b \leq 3.4$ 270-6.64($\ell/b-3.4$): 3.4 < $\ell/b \leq 25$
	40 초과 75 이하	130 : $\ell/b \leq 4.9$	175 : $\ell/b \leq 4.1$	200 : $\ell/b \leq 3.9$ 200-4.24($\ell/b-3.9$): 3.9 < $\ell/b \leq 27$	260 : $\ell/b \leq 3.4$ 260-6.25($\ell/b-3.4$): 3.4 < $\ell/b \leq 25$
	75 초과 100 이하	130-2.21($\ell/b-4.9$): 4.9 < $\ell/b \leq 30$	175-3.48($\ell/b-4.1$): 4.1 < $\ell/b \leq 30$	195 : $\ell/b \leq 3.9$ 195-4.07($\ell/b-3.9$): 3.9 < $\ell/b \leq 27$	250 : $\ell/b \leq 3.5$ 250-5.94($\ell/b-3.5$): 3.5 < $\ell/b \leq 25$
Aw/Ac >2	40 이하	140 : $\ell/b \leq 9.3/K$ 140-1.24(K $\ell/b-9.3$): 9.3/K < $\ell/b \leq 30$	190 : $\ell/b \leq 8.0/K$ 190-1.95(K $\ell/b-8.0$): 8.0/K < $\ell/b \leq 30$	215 : $\ell/b \leq 7.5/K$ 215-2.35(K $\ell/b-7.5$): 7.5/K < $\ell/b \leq 27$	270 : $\ell/b \leq 6.7/K$ 270-3.32(K $\ell/b-6.7$): 6.7/K < $\ell/b \leq 25$
	40 초과 75 이하	130 : $\ell/b \leq 9.7/K$	175 : $\ell/b \leq 8.3/K$	200 : $\ell/b \leq 7.8/K$ 200-2.12(K $\ell/b-7.8$): 7.8/K < $\ell/b \leq 27$	260 : $\ell/b \leq 6.9/K$ 260-3.12($\ell/b-6.9$): 6.9/K < $\ell/b \leq 25$
	75 초과 100이하	130-1.10(K $\ell/b-9.7$): 9.7/K < $\ell/b \leq 30$	175-1.74(K $\ell/b-8.3$): 8.3/K < $\ell/b \leq 30$	195 : $\ell/b \leq 7.9/K$ 195-2.04(K $\ell/b-7.9$): 7.9/K < $\ell/b \leq 27$	250 : $\ell/b \leq 6.9/K$ 250-2.97(K $\ell/b-6.9$): 6.9/K < $\ell/b \leq 25$
비 고		Aw : 복부판의 총 단면적 (mm ²) Ac : 압축플랜지의 총 단면적 (mm ²) ℓ : 압축플랜지의 고정점간의 거리 (mm) b : 압축플랜지의 폭 (mm) K : $\sqrt{(3+Aw/2Ac)}$			

※ TMC 강재일 경우 별도 규정

㉔ 허용전단응력(MPa)

강 종 판두께(mm)	SS400 SM400 SMA400	SM490	SM490Y SM520 SMA490	SM570 SMA570
40 이하	80	110	125	155
40 초과 75 이하	75	100	115	150
75 초과 100 이하			115	145

※ TMC 강재일 경우 별도 규정

㉕ 양연지지판, 자유돌출판, 보강된 판의 국부좌굴에 대한 허용응력

- 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력(MPa)

강 종	판두께(mm)	국부좌굴에 대한 허용응력
SS400 SM400 SMA400	40 이하	140 : $\frac{b}{39.3 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{39.3 \cdot i}$
	40 초과 100 이하	130 : $\frac{b}{41.1 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{41.1 \cdot i}$
SM490	40 이하	190 : $\frac{b}{34.0 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{34.0 \cdot i}$
	40 초과 100 이하	175 : $\frac{b}{35.1 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{35.1 \cdot i}$
SM490Y SM520 SMA520	40 이하	215 : $\frac{b}{32.0 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{32.0 \cdot i}$
	40 초과 75 이하	200 : $\frac{b}{32.9 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{32.9 \cdot i}$
	75 초과 100 이하	195 : $\frac{b}{33.4 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{33.4 \cdot i}$
SM570 SMA570	40 이하	270 : $\frac{b}{28.4 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{28.4 \cdot i}$
	40 초과 75 이하	260 : $\frac{b}{29.1 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{29.1 \cdot i}$
	75 초과 100 이하	250 : $\frac{b}{29.4 \cdot i} \leq t$
		$220,000 \left(\frac{t \cdot i}{b} \right)^2$: $\frac{b}{80 \cdot i} \leq t < \frac{b}{29.4 \cdot i}$

• 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력(MPa)

강 종	판두께(mm)	국부좌굴에 대한 허용응력
SS400 SM400 SMA400	40 이하	140 : $\frac{b}{12.9} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{12.9}$
	40 초과 100 이하	130 : $\frac{b}{13.5} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{13.5}$
SM490	40 이하	190 : $\frac{b}{11.1} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{11.1}$
	40 초과 100 이하	175 : $\frac{b}{11.5} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{11.5}$
SM490Y SM520 SMA520	40 이하	215 : $\frac{b}{10.5} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{10.5}$
	40 초과 75 이하	200 : $\frac{b}{10.8} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{10.8}$
	75 초과 100 이하	195 : $\frac{b}{11.0} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{11.0}$
SM570 SMA570	40 이하	270 : $\frac{b}{9.3} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{9.3}$
	40 초과 75 이하	260 : $\frac{b}{9.5} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{9.5}$
	75 초과 100 이하	250 : $\frac{b}{9.6} \leq t$
		$24,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$: $\frac{b}{16} \leq t < \frac{b}{9.6}$

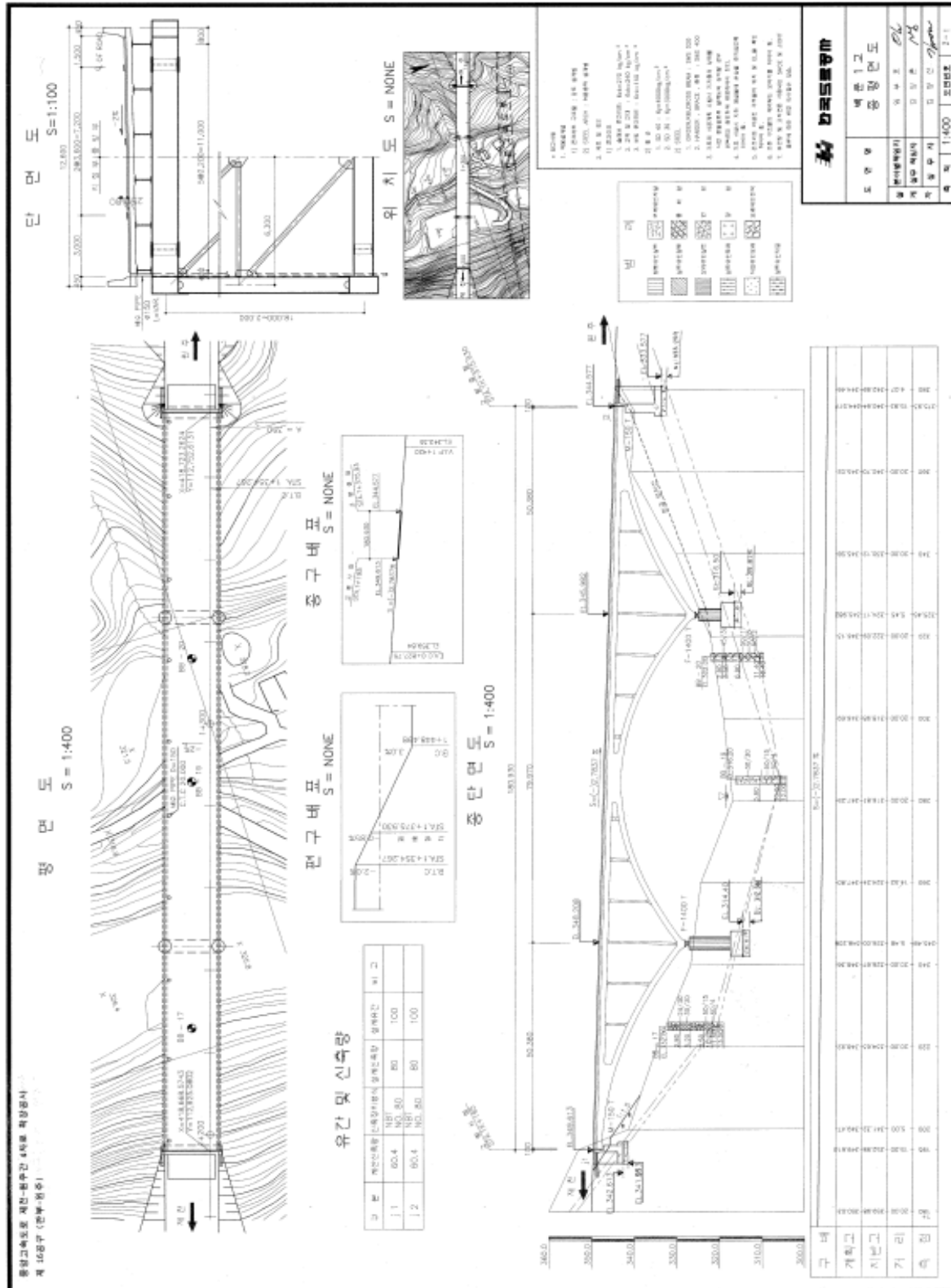
• 보강된 판의 국부좌굴에 대한 허용응력(MPa)

강종	SS400 SM400 SMA400	SM490	SM490Y SM520 SMA520	SM570 SMA570
판 두께 40 이하	$140 : \frac{b}{28in} \leq t$	$190 : \frac{b}{24in} \leq t$	$215 : \frac{b}{22in} \leq t$	$270 : \frac{b}{20in} \leq t$
	$140 - 2.5\left(\frac{b}{tin} - 28\right) : \frac{b}{56in} \leq t < \frac{b}{28in}$	$190 - 3.9\left(\frac{b}{tin} - 24\right) : \frac{b}{49in} \leq t < \frac{b}{24in}$	$210 - 4.7\left(\frac{b}{tin} - 23\right) : \frac{b}{46in} \leq t < \frac{b}{23in}$	$270 - 6.7\left(\frac{b}{tin} - 20\right) : \frac{b}{41in} \leq t < \frac{b}{20in}$
	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{56in}$	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{49in}$	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{46in}$	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{41in}$
판 두께 40 초과 75 이하	$130 : \frac{b}{29in} \leq t$	$175 : \frac{b}{24in} \leq t$	$200 : \frac{b}{24in} \leq t$	$260 : \frac{b}{21in} \leq t$
			$200 - 4.3\left(\frac{b}{tin} - 242\right) : \frac{b}{47in} \leq t < \frac{b}{24in}$	$260 - 6.3\left(\frac{b}{tin} - 21\right) : \frac{b}{42in} \leq t < \frac{b}{21in}$
	$130 - 2.2\left(\frac{b}{tin} - 29\right) : \frac{b}{59in} \leq t < \frac{b}{29in}$	$175 - 3.5\left(\frac{b}{tin} - 25\right) : \frac{b}{50in} \leq t < \frac{b}{25in}$	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{47in}$	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{42in}$
판 두께 75 초과 100 이하			$195 : \frac{b}{24in} \leq t$	$250 : \frac{b}{21in} \leq t$
			$195 - 4.1\left(\frac{b}{tin} - 24\right) : \frac{b}{48in} \leq t < \frac{b}{24in}$	$250 - 6.0\left(\frac{b}{tin} - 21\right) : \frac{b}{42in} \leq t < \frac{b}{21in}$
	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{59in}$	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{50in}$	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{48in}$	$220,000 \left(\frac{tin}{b}\right)^2 : \frac{b}{80in} \leq t < \frac{b}{42in}$

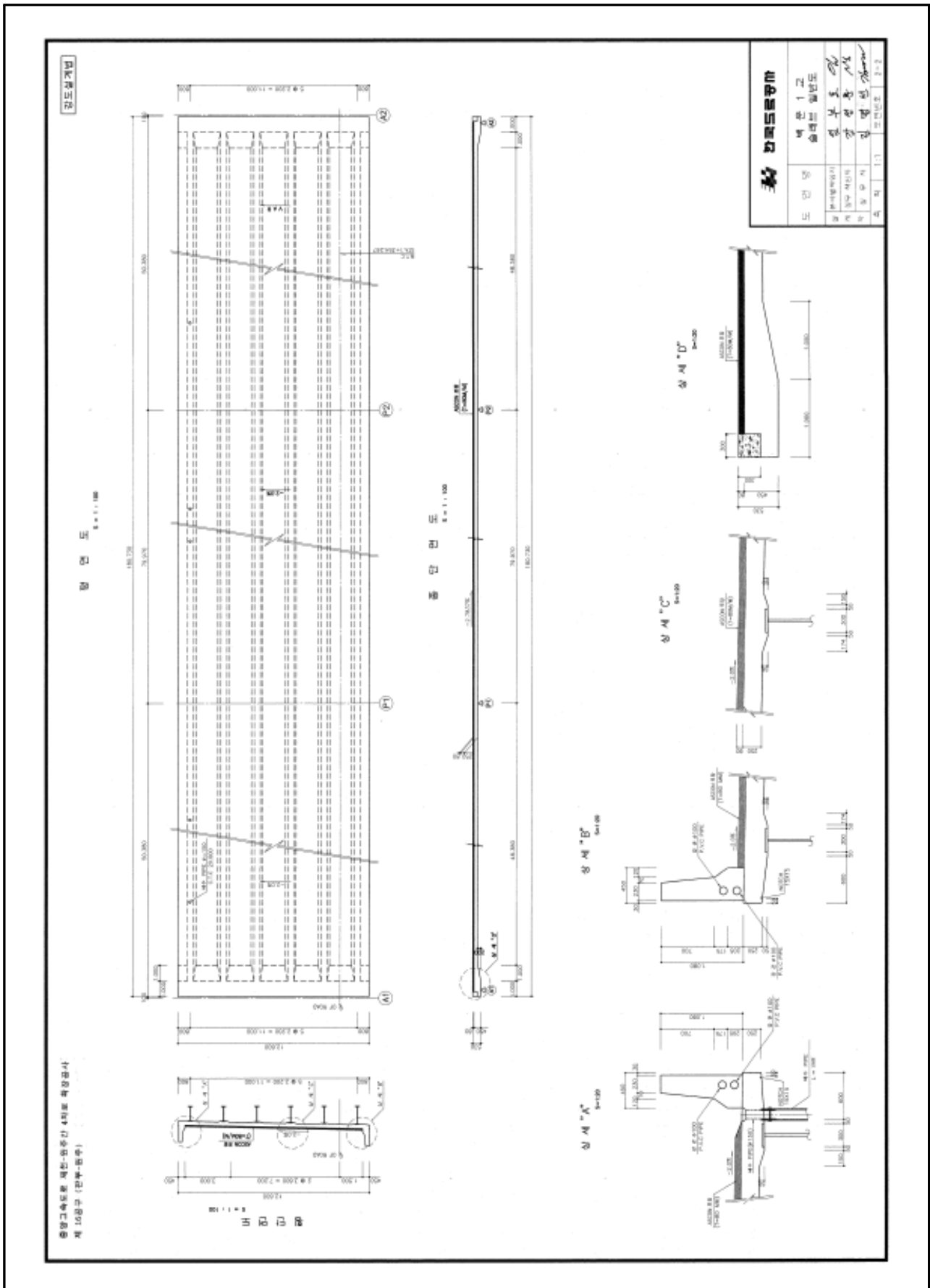
4) 검토방법

- ① 바닥판 : 강도 설계법
- ② Steel Arch교 : 허용응력 설계법

백운1교(부산)의 종·평면도, 슬래브 일반도는 【그림 5.2】 , 【그림 5.3】 과 같다.



【그림 5.2】 백운1교(부산) 종 · 평면도



【그림 5.3】 백운1교(부산) 슬래브 일반도

다. 적용하중

안전성 검토 시 적용하중의 강도와 이에 대한 산정근거를 나타내면 【표 5.7】과 같다.

【표 5.7】적용하중의 강도 및 산정근거

적용 하중		하 중 강 도				산정근거													
주 하 중 (P)	고정 하중 (D)	<table><tr><th>구 분</th><th>철근콘크리트</th><th>강 재</th><th>LMC 포장</th></tr><tr><td>단위질량 (kN/m³)</td><td>25.0</td><td>78.5</td><td>23.5</td></tr></table>				구 분	철근콘크리트	강 재	LMC 포장	단위질량 (kN/m³)	25.0	78.5	23.5	도로교설계기준 (2010) 2.1.2항					
	구 분	철근콘크리트	강 재	LMC 포장															
	단위질량 (kN/m³)	25.0	78.5	23.5															
활 하 중 (L)	• 설계활하중(1등교) : DB-24, DL-24				도로교설계기준 (2010) 2.1.3항														
	충격 (I)	• 충격계수 : $I = \frac{15}{40+L} \leq 0.3$				도로교설계기준 (2010) 2.1.4항													
부 하 중 (S)	풍 하 중 (W)	• 상부구조에 작용하는 풍하중 - 거스트응답계수를 사용한 풍하중과 2주구 트러스에 작용하는 풍하중 중 최대값을 적용함. • 하부구조에 작용하는 풍하중 <table><tr><th colspan="2">구체의 단면형상</th><th>풍 하 중</th></tr><tr><td rowspan="2">원형 및 트랙형</td><td>활하중 재하 시</td><td>1.500×10^{-3}</td></tr><tr><td>활하중 비재하 시</td><td>3.000×10^{-3}</td></tr><tr><td rowspan="2">각형</td><td>활하중 재하 시</td><td>0.750×10^{-3}</td></tr><tr><td>활하중 비재하 시</td><td>1.500×10^{-3}</td></tr></table>				구체의 단면형상		풍 하 중	원형 및 트랙형	활하중 재하 시	1.500×10^{-3}	활하중 비재하 시	3.000×10^{-3}	각형	활하중 재하 시	0.750×10^{-3}	활하중 비재하 시	1.500×10^{-3}	도로교설계기준 (2010) 2.1.11항
	구체의 단면형상		풍 하 중																
원형 및 트랙형	활하중 재하 시	1.500×10^{-3}																	
	활하중 비재하 시	3.000×10^{-3}																	
각형	활하중 재하 시	0.750×10^{-3}																	
	활하중 비재하 시	1.500×10^{-3}																	
	온도변화 (T)	• 선팽창계수 : $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ • 온도변화 : $\Delta T = \pm 15^{\circ}\text{C}$				도로교설계기준 (2010) 2.1.12항													
비교결과		• 상부구조에 거더에 대하여 적용하중 기준에 대하여 비교 검토한 결과, 전반적으로 변화는 없는 상태이나, 고정하중에 아스콘 포장이 LMC 포장으로 개보수가 실시되어 하중 변동이 발생하였음.																	

라. 하중조합

안전성 검토 시 하중의 조합은 도로교설계기준(2010) 2.2.2항, 2.2.3항의 규정을 적용하였으며, 이를 정리하여 나타내면 다음 【표 5.8】과 같다.

1) 사용하중

【표 5.8】용력 검토 시 사용하중 조합경우

조합경우	하 중 조 합	증가계수
Case 1	주하중+주하중에 상당하는 특수하중	1.00
Case 2	주하중+주하중에 상당하는 특수하중+온도변화의 영향	1.15
Case 3	주하중+주하중에 상당하는 특수하중+풍하중	1.25
Case 4	주하중+주하중에 상당하는 특수하중+온도변화의 영향+풍하중	1.35

2) 계수하중

【표 5.9】극한강도 검토 시 계수하중 조합경우

조합경우	고정하중(D)	활하중(L+I)	풍하중(W)	충돌하중(Co)	비 고
Case 1	1.30	2.15	-	-	바닥판 검토 시
Case 2	1.30	-	1.30	-	
Case 3	1.30	1.30	0.65	-	
Case 4	1.30	1.30	-	1.30	
Case 5	1.20	-	-	1.20	
Case 6	1.30	2.15	-	-	하부구조 검토 시
Case 7	1.30	-	1.30	-	
Case 8	1.30	1.30	0.65	-	
Case 9	1.00	2.15	-	-	
Case 10	1.00	-	1.30	-	
Case 11	1.00	1.30	0.65	-	

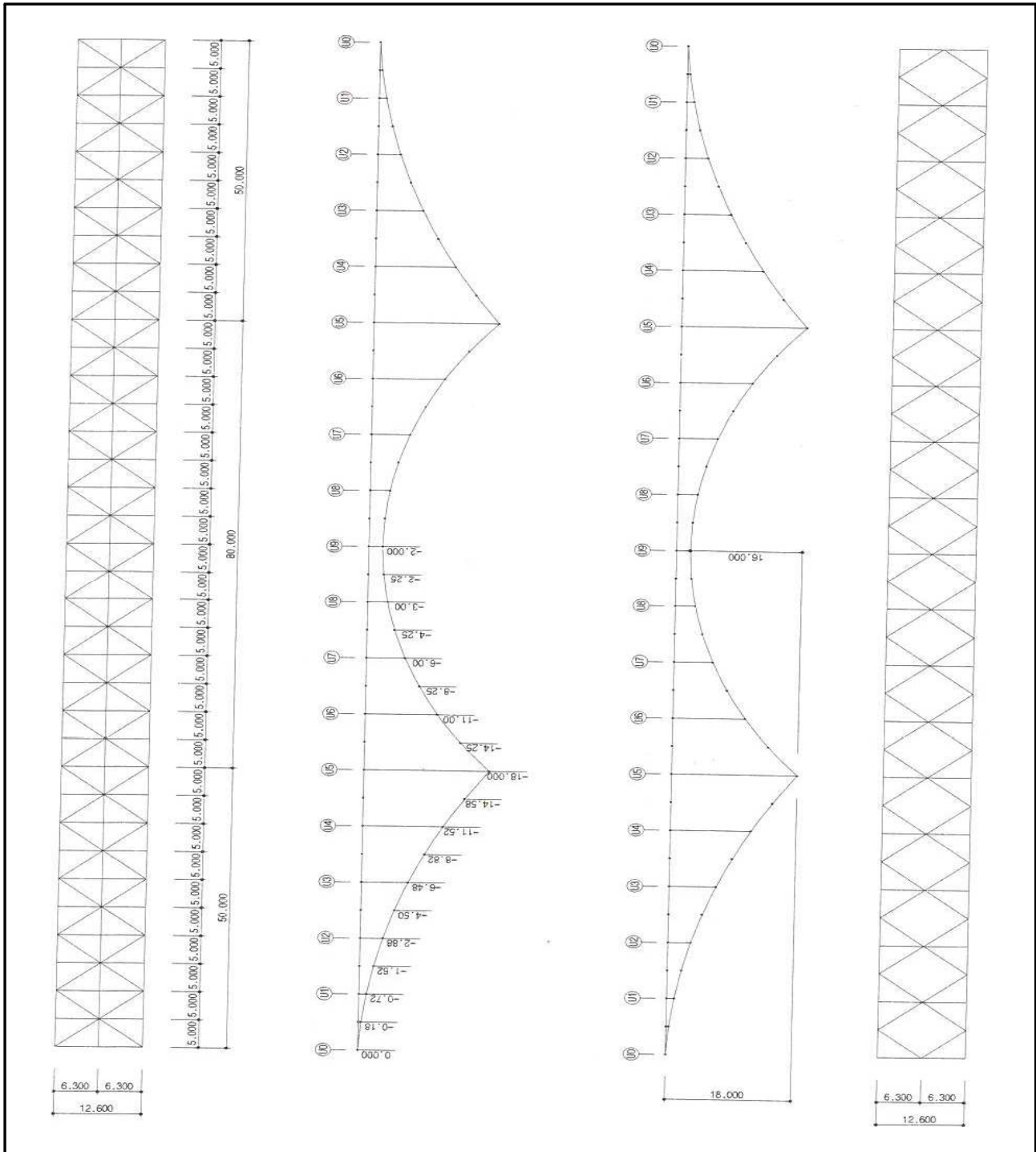
마. 참고문헌

- 도로교설계기준(2010, 국토해양부)
- 콘크리트구조설계기준(2007, 한국콘크리트학회)
- 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2010, 국토해양부)
- 중앙고속도로 제천~원주간 4차선 확장공사 제16공구 : 판부~원주 준공도(한국도로공사)
- 중앙고속도로 제천~원주간 4차선 확장공사 제16공구 : 판부~원주 구조계산서(한국도로공사)

바. 단면상수 산정

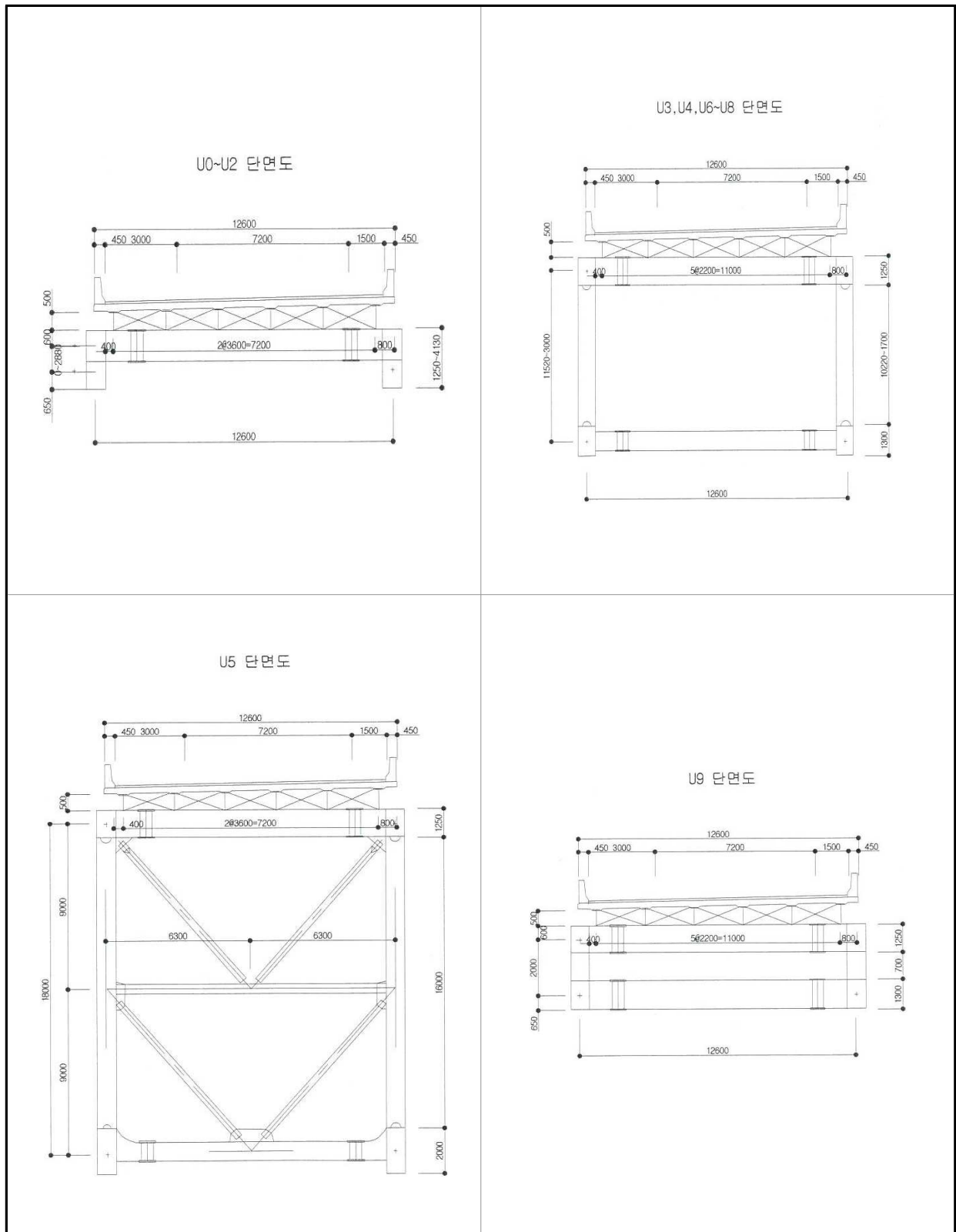
대상교량인 백운1교(부산)는 준공도서가 현존하며, 단면제원을 실측한 결과, 모든 부재는 준공도서와 같은 제원으로 시공된 것을 확인하였다. 이를 근거로 구조해석에 사용된 단면제원 및 단면상수는 다음과 같다.

1) 절점(Joint)과 좌표(Coordinate)



【그림 5.4】 백운1교(부산) 절점과 좌표

2) 절점별 단면도



【그림 5.5】 백운1교(춘천) 절점별 단면도

3) 단면특성

상부구조의 아치(Arch)를 구성하고 있는 주부재 및 부부재의 단면특성은 아래와 같다.

① 부재별 단면제원

【표 5.10】 부재별 단면 제원

보강거더(SEC NO.1~4)	아치리브 (SEC NO. 5~8)	
HANGER (SEC NO.9)	HANGER (SEC NO.10)	SWAY BR. (SEC NO.11)
SWAY BR. (SEC NO.12)	UPP. BR. (SEC NO.13)	LOW. BR. (SEC NO.14)
보강형과 아치리브 연결부 (SEC NO.15~19)	UPP. CROSS BEAM (SEC NO.20)	LOW. CROSS BEAM (SEC NO.21)

② 부재별 단면상수 산정

【표 5.11】 단면 제상수 산정 결과

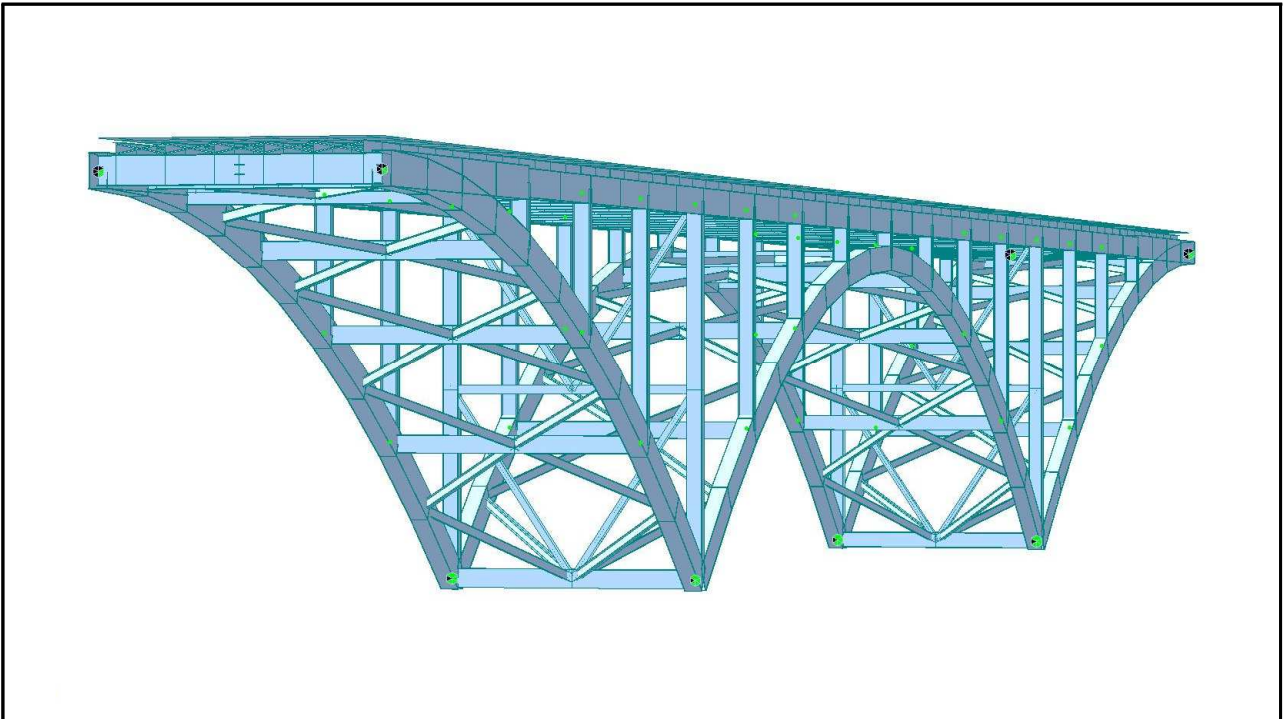
단면구분	tf × tw (H)	A (mm ²)	Ix (mm ⁴)	Iy (mm ⁴)	Iz (mm ⁴)	비 고
1	25×24	102,500	24,651,000,000	12,772,900,000	23,796,300,000	보강거더
2	25×18	87,500	20,204,500,000	10,114,300,000	21,832,000,000	“
3	25×20	92,500	21,776,100,000	10,992,100,000	22,487,200,000	“
4	25×16	82,500	18,708,300,000	9,244,830,000	21,176,300,000	“
5	25×18	89,300	22,232,200,000	10,415,400,000	24,999,100,000	아치리브
6	25×24	104,900	27,238,000,000	13,180,400,000	27,201,600,000	“
7	20×18	80,800	20,543,100,000	9,898,350,000	21,208,600,000	“
8	18×16	72,200	18,129,500,000	87,872,900,00	18,974,100,000	“
9	14×20	41,280	2,783,520,000	4,066,940,000	1,328,840,000	HANGER
10	12×20	29,120	5,865,850	3,481,640,000	416,776,000	“
11	10×12	17,120	555,272,000	450,016,000	358,363,000	SWAY BRACING
12	8×12	10,208	737,869	306,504,000	54,016,000	“
13	8×8	7,072	362,650	36,012,100	117,613,000	상부 BRACING
14	10×10	9,800	330,000	45,031,667	273,926,667	하부 BRACING
15	1,250	90,000	21,357,500,000	10,566,400,000	24,150,000,000	보강형+아치리브
16	1,430	96,480	25,302,000,000	11,650,500,000	32,591,500,000	“
17	1,970	115,920	37,584,500,000	14,903,000,000	67,713,700,000	“
18	2,870	74,160	30,027,400,000	10,161,900,000	82,604,500,000	“
19	4,130	193,680	88,596,400,000	27,912,900,000	405,558,000,000	“
20	25×20	44,000	10,131,700	267,467,000	10,384,200,000	상부CROSS BEAM
21	20×10	24,000	3,858,040	213,400,000	3,116,800,000	하부CROSS BEAM
22	20×10	34,000	2,241,830,000	969,933,000	3,905,130,000	하부CROSS BEAM (지점부)

사. 모델링

1) 구조해석 모델링

구조해석 모델은 보요소를 사용하여 보강거더, 아치리브, 행거, 가로보 및 브레이싱 등으로 이루어진 3차원 격자구조로 이상화하였으며, 모델링 시 주요 고려사항은 다음과 같다.

- 준공도에 근거하여 보강거더와 아치리브, 브레이싱의 연결은 강결로 고려하였으며, 행거는 양단 힌지로 취급하였다.
- 바닥판과 세로보의 연결은 전단연결재가 1.0m간격으로 배치되어 있어 합성효과를 일부 발휘할 것으로 판단되나, 기본적으로 비합성구조로 설계된 교량이므로 구조해석 시 이를 고려하여 안전측의 해석이 되도록 비합성으로 모델링하였다.
- 하중조건은 고정하중과 설계활하중 외 온도변화와 풍하중의 영향을 고려하였으며, 활하중의 재하방법은 해석프로그램 내의 이동하중해석 기능을 사용하였다.
- 지점경계조건은 교량받침의 현장 배치상태를 고려하여 교각 지점을 고정단으로, 교대 지점을 가동단으로 설정하였다.



【그림 5.6】 구조해석 모델링

2) 하중계산

① 고정하중

대상교량에 작용하는 고정하중인 주부재, 부부재의 자중은 프로그램 내에서 자동 입력하였으며 각종 연결재, 보강재 등의 부가 하중을 고려하여 단위중량을 19.8% 할증하였다. 또한 포장, 방호울타리의 고정하중은 바닥판의 횡분배 영향을 반영하여 재하토록 하였다.

㉠ 강재 자중 : 해석프로그램 내에서 자동계산

【표 5.12】 백운1교(부산) 강재 자중

강 종	강재재료표	해석모델 순중량	비 고
SM 520(SWS 520)	8,849.560	7,018.0	보강거더, 아치리브, 가로보
SM 400(SWS 400)	2,837.500	2,738.0	행거 및 브레이싱
계	11,687.06	9,756.0	할증률 : 1.198

㉡ 바닥판 슬래브 : $0.25 \times 25.0 = 6.25 \text{ kN/m}^2$

㉢ 방호울타리 및 포장하중

【표 5.13】 백운1교(부산) 방호울타리 및 포장하중 산정 결과

구 분	하 중 산 정	비 고														
방호울타리	<table><tr><th>단면구분</th><th>작용 하중(kN/m)</th></tr><tr><td>①</td><td>$0.23 \times 0.7 \times 25.0 = 4.025$</td></tr><tr><td>②</td><td>$0.5 \times 0.07 \times 0.7 \times 25.0 = 0.613$</td></tr><tr><td>③</td><td>$0.3 \times 0.38 \times 25.0 = 2.850$</td></tr><tr><td>④</td><td>$0.5 \times 0.12 \times 0.175 \times 25.0 = 0.263$</td></tr><tr><td>⑤</td><td>$0.12 \times 0.205 \times 25.0 = 0.615$</td></tr><tr><td>계</td><td>8.366</td></tr></table>	단면구분	작용 하중(kN/m)	①	$0.23 \times 0.7 \times 25.0 = 4.025$	②	$0.5 \times 0.07 \times 0.7 \times 25.0 = 0.613$	③	$0.3 \times 0.38 \times 25.0 = 2.850$	④	$0.5 \times 0.12 \times 0.175 \times 25.0 = 0.263$	⑤	$0.12 \times 0.205 \times 25.0 = 0.615$	계	8.366	
	단면구분	작용 하중(kN/m)														
	①	$0.23 \times 0.7 \times 25.0 = 4.025$														
	②	$0.5 \times 0.07 \times 0.7 \times 25.0 = 0.613$														
	③	$0.3 \times 0.38 \times 25.0 = 2.850$														
	④	$0.5 \times 0.12 \times 0.175 \times 25.0 = 0.263$														
	⑤	$0.12 \times 0.205 \times 25.0 = 0.615$														
계	8.366															
포 장	$W_a = 0.08 \times 23.5 = 1.88 \text{ kN/m}^2$															

② 활하중

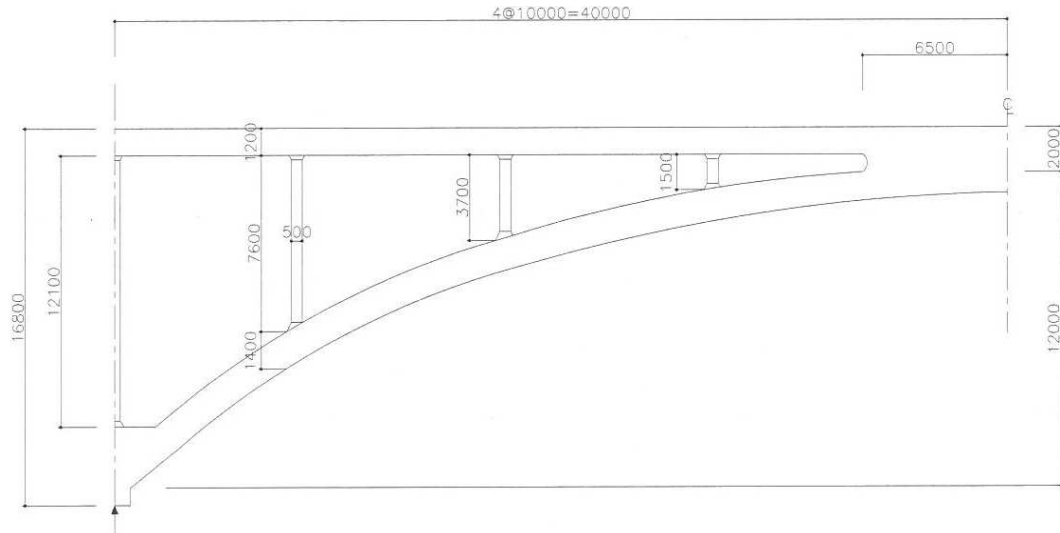
활하중의 재하는 해석프로그램 내의 이동하중해석 옵션을 사용하였으며, 활하중에 대한 이동하중 해석 수행 시 기본 설정내용을 나타내면 【표 5.14】와 같다.

【표 5.14】 백운1교(부산) 이동하중 해석 시 기본 설정내용

구 분	설 정 내 용			
해석지간(L)	$49.88 + 79.97 + 49.88 = 179.730 \text{ m}$			
연석간 교폭(Wc)	$12.6 - 0.45 \times 2 = 11.7 \text{ m}$			
재하차로수(N)	$9.1 \leq Wc < 12.8 \text{ m} \quad \therefore \text{최대 3차로까지 재하가능}$			
설계차로폭(W)	$11.70 / 3 = 3.9 \text{ m} > 3.6 \text{ m} \quad \therefore W = 3.6 \text{ m}$			
활하중 모델 (DL-24, DB-24)	표준차로하중(DL-24)		표준트럭하중(DB-24)	
	Pm	108 kN	전륜(1축)	48 kN
	PS	156 kN	후륜(2축)	192 kN
	등분포하중	12.7 kN/m	후륜(3축)	192 kN
			총 중량	432 kN
충격계수(I)	◎ 보강거더 및 아치 리브 - 제1지간(L = 49.88 m) $\frac{15}{40+L} = \frac{15}{40+49.88} = 0.167 < 0.3 \quad \therefore i = 0.167 \text{ 적용}$ - 제1내부 지점부 $\frac{15}{40+L} = \frac{15}{40+(49.88+79.97)/2} = 0.143 < 0.3 \quad \therefore i = 0.143 \text{ 적용}$ - 제2지간(L = 79.97 m) $\frac{15}{40+L} = \frac{15}{40+79.97} = 0.125 < 0.3 \quad \therefore i = 0.125 \text{ 적용}$ ◎ 행거 및 가로보(L = 12.60 m) $\frac{15}{40+L} = \frac{15}{40+12.6} = 0.285 < 0.3 \quad \therefore i = 0.285 \text{ 적용}$			
재하방법	• DB-24 또는 DL-24하중에 대하여 설정된 1~3개 차로에 지간 및 지점별로 가장 불리한 단면력이 산출되도록 재하됨.			
하중감소	• 최대 단면력이 3차로 이상의 활하중 동시 재하로 발생하는 경우에는 도로교설계기준의 관련규정에 따라 백분율로 감소함.(3차로 동시 재하 시 : 90%)			

③ 풍하중

본 검토에서 풍하중 강도는 거스트 응답계수를 사용하는 방식과 2주구 트러스에 작용하는 풍하중을 비교하여 큰 값을 적용하였다.



- $A_g = (16.8+10.2) \times 1/2 \times 10.0 + (10.2+6.3) \times 1/2 \times 10.0 + (6.3+4.0) \times 1/2 \times 10.0 + (4.0+3.25) \times 1/2 \times 10.0 = 305.25 \text{ m}^2$
- $A_s = (12.1+7.6+3.7+1.5) \times 0.5 + (1.2+1.4) \times 33.5 + 6.5 \times 3.25 = 120.675 \text{ m}^2$
- 충실률 ($\emptyset$) : $\emptyset = A_s/A_g = 120.675 / 305.25 = 0.395$
- 항력계수(C_d)
 - 아치교의 아치리브, 보강거더, 행거 : 1.6(풍상측), 0.8(풍하측)
 - 아치교의 바닥판 : 1.6
- 거스트 응답계수 (G) : 1.9

㉠ 거스트응답계수 적용 시

- 설계기준 풍속 (V_d)

$$V_d = 1.925 \left[\frac{z}{z_G} \right]^\alpha V_{10}, \quad z \geq z_b$$

$$= 1.925 \left[\frac{z_b}{z_G} \right]^\alpha V_{10}, \quad z < z_b$$

$$V_d = 1.925 \left[\frac{30}{600} \right]^{0.16} \times 30 = 35.76 \text{ m/sec}$$

여기서, $z = 30\text{m}$, $z_b = 10\text{m}$, $z_G = 600\text{m}$

$$\alpha = 0.16, \quad V_{10} = 30\text{m/sec}, \quad \rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

- 거스트 응답계수에 의한 풍하중 강도

$$\begin{aligned}
 P1 &= 5 \times 10^{-7} \times \rho \times Vd^2 \times Cd \times G \\
 &= 5 \times 10^{-7} \times 1.225 \times 35.76^2 \times 1.6 \times 1.9 \\
 &= 2.381 \times 10^{-3} \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

- ㉔ 2주구 트러스의 풍하중 강도 적용 시

【표 5.15】 백운1교(부산) 2주구 트러스에 작용하는 풍하중

구 분		풍하중(MPa)	비 고
ARCH 부	활하중 재하시	$1.25 \times 10^{-3} / \sqrt{\emptyset}$	단, $0.1 \leq \emptyset < 0.6$ $\emptyset$: 충실률
	활하중 비재하시	$2.5 \times 10^{-3} / \sqrt{\emptyset}$	
교량의 바닥판	활하중 재하시	1.5×10^{-3}	
	활하중 비재하시	3.0×10^{-3}	

$$P_2 = 2.5 \times 10^{-3} / \sqrt{\emptyset} = 2.5 \times 10^{-3} / \sqrt{0.395} = 3.978 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

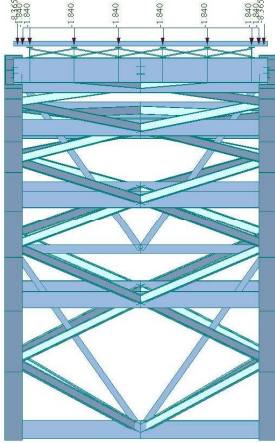
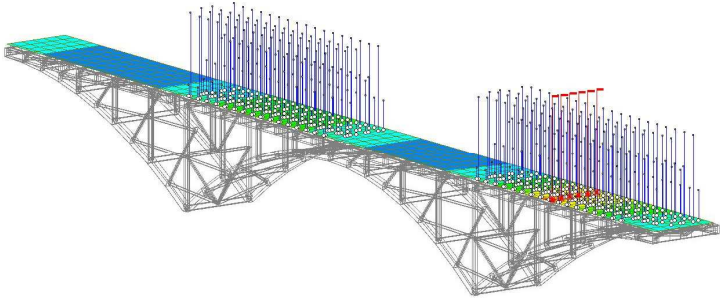
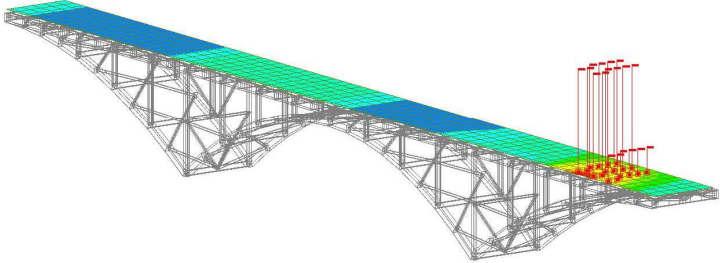
- ㉕ 적용 풍하중 강도(활하중 비재하시)

$$P = \text{Max}[P1, P2] = 3.978 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

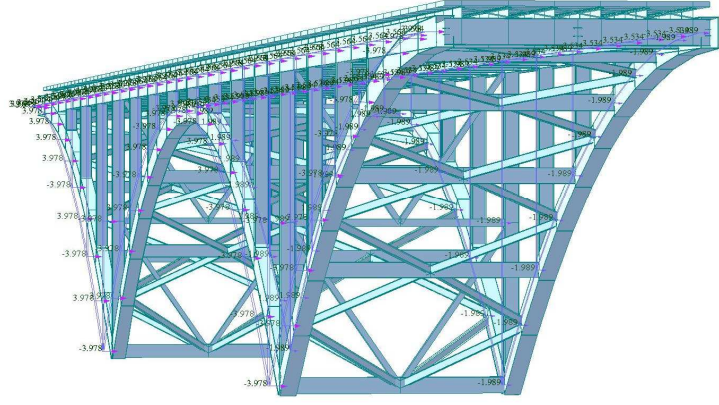
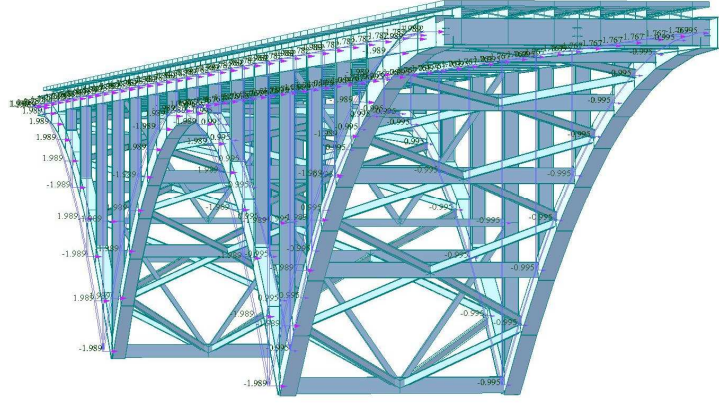
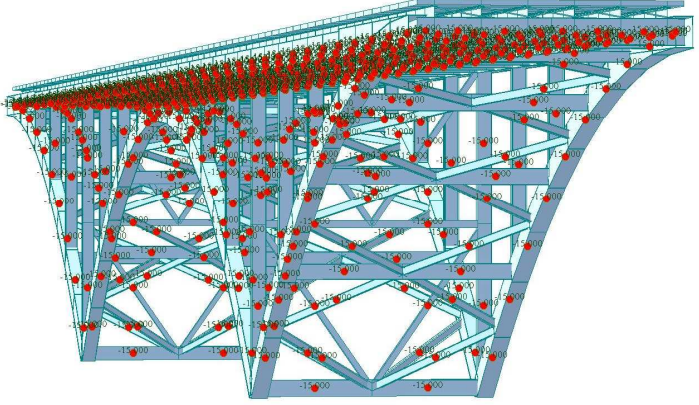
④ 온도변화의 영향

- 선팽창계수 : $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
- 온도변화(Temperature Difference) : $\Delta T = \pm 15 ^\circ\text{C}$

3) 하중재하

구 분	하중조건 모델링	비 고
구조물 자중		• 보강거더 • 아치리브 • 행거 • 브레이싱 • 세로보 • 바닥판 • 포장 및 방호울타리
활 하 중		• 보강거더 최대 모멘트 발생 시
		• 아치리브 최대 모멘트 발생 시

【그림 5.7】 백운1교(부산) 하중조건 모델링

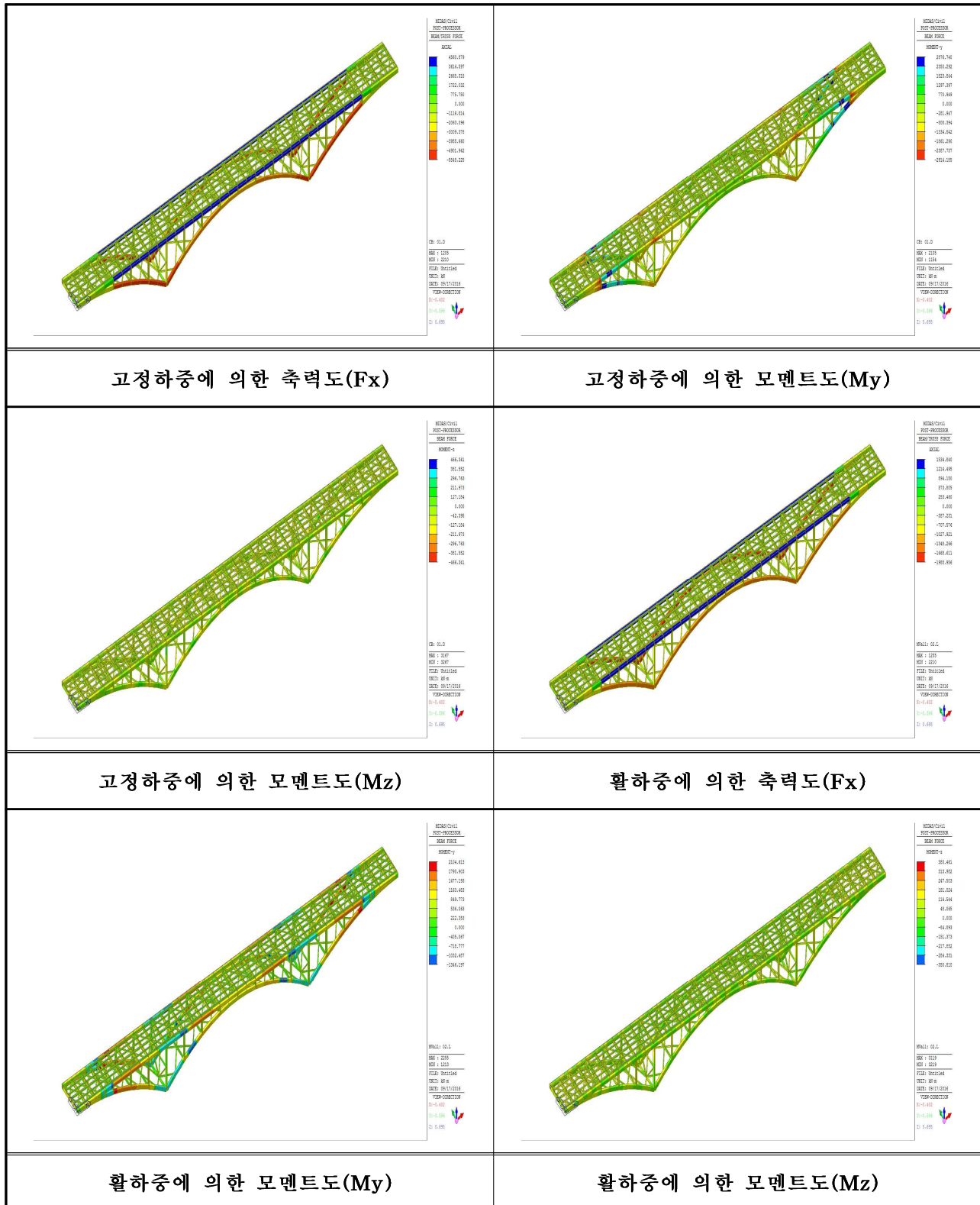
구 분	하중조건 모델링	비 고
풍 하 중		• 활하중 비재하 시
풍 하 중		• 활하중 재하 시
온도하중		• 온도승강 : $\pm 15^{\circ}\text{C}$

【그림 5.7】 백운1교(부산) 하중조건 모델링(계속)

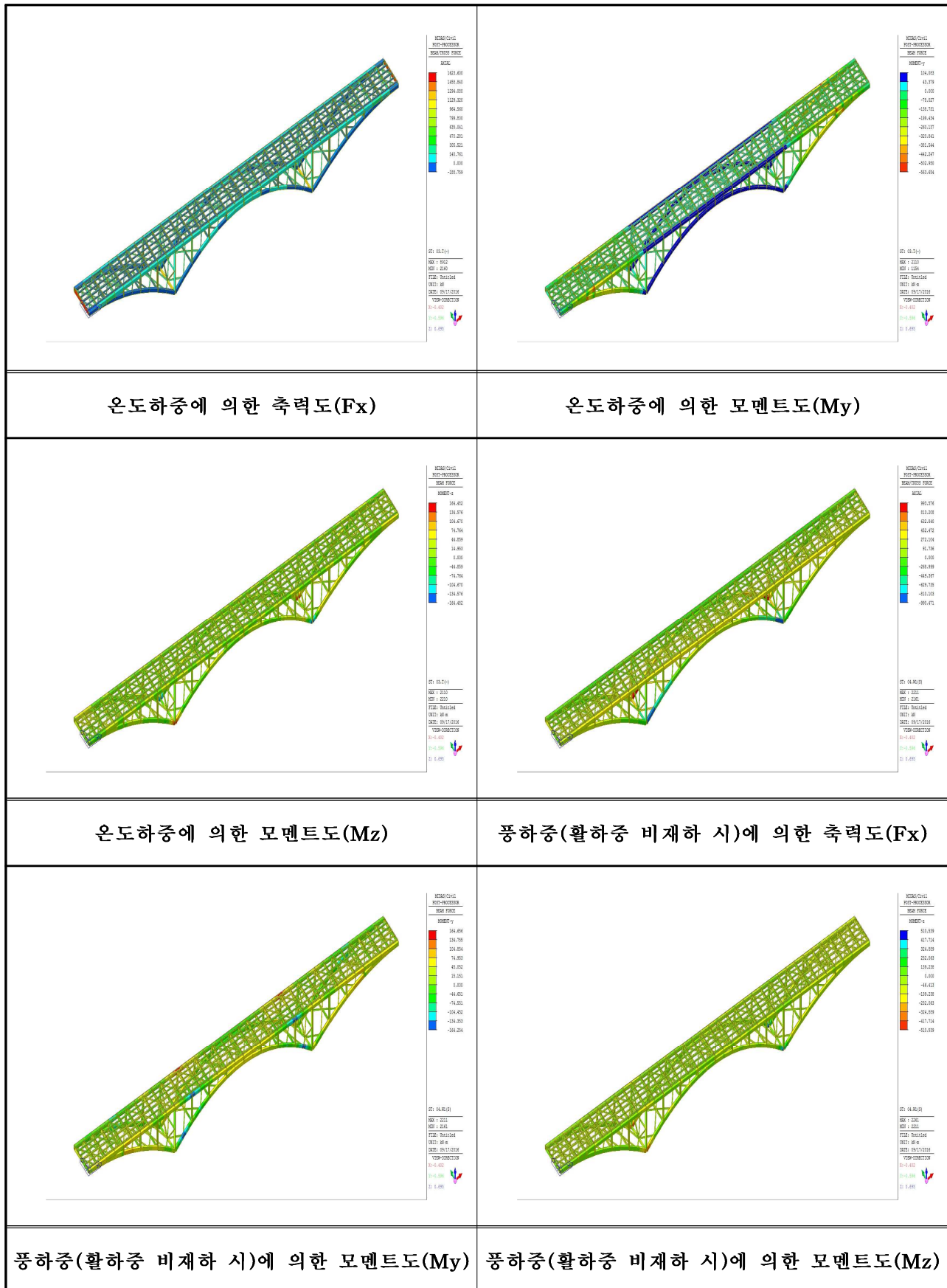
아. 구조해석 결과 및 안전성 검토

1) 해석 결과

① 하중조건별 단면력도



【그림 5.8】 백운1교(부산) 하중조건별 단면력도



【그림 5.8】 백운1교(부산) 하중조건별 단면력도(계속)

② 단면력 산출

【표 5.16】 백운1교(부산) 부재별 최대 단면력 산출 결과

구 분		고정하중 (D)	활하중(L+I)		온도하중 (T)	풍하중 (W)	요소번호
			Max	Min			
보강거더 (단면 1)	Fx (kN)	4560.879	1534.503	-156.292	135.697	-276.482	1206
	My (kN · m)	2539.409	1926.104	-964.359	-258.755	-70.150	
	Mz (kN · m)	-82.374	21.294	-39.475	-1.636	26.838	
아치리브 (단면 6)	Fx (kN)	-5085.549	173.891	-1769.887	-159.094	-95.341	2205
	My (kN · m)	2876.740	2318.635	-1141.552	-274.205	-98.190	
	Mz (kN · m)	-66.826	44.137	-97.852	-15.643	43.465	
행 거 (단면 9)	Fx (kN)	-1339.700	162.746	-539.006	43.901	-545.881	3112
	My (kN · m)	7.786	13.626	-11.809	-1.546	0.138	
	Mz (kN · m)	-70.531	2.877	-51.773	-18.261	-18.423	
상부 가로보 (단면 20)	Fx (kN)	0.000	21.354	-14.125	1623.600	94.811	8857
	My (kN · m)	536.698	952.678	-16.845	-0.201	20.190	
	Mz (kN · m)	0.419	0.405	-0.443	-2.433	-1.913	
하부 가로보 (단면 21)	Fx (kN)	0.000	37.137	-28.990	1254.600	-515.120	7111
	My (kN · m)	-149.156	37.981	-38.049	24.992	-1.804	
	Mz (kN · m)	-5.202	5.812	-5.776	0.362	-0.614	
브레이싱 (단면 14)	Fx (kN)	-118.420	31.366	-58.076	19.966	-364.596	6112
	My (kN · m)	-18.898	5.311	-6.357	1.109	-5.499	
	Mz (kN · m)	-1.079	0.502	-0.818	-0.121	0.464	

2) 응력 검토

① 사용하중조합

【표 5.17】 백운1교(부산) 응력 검토 시 사용하중조합 경우

조합경우	하 중 조 합	허용응력 증가계수
LCS 1	주하중(D + L + I)	1.00
LCS 2	주하중+온도변화의 영향(D + L + I + T)	1.15
LCS 3	주하중+풍하중(D + L + I + W)	1.25
LCS 4	주하중+풍하중(D + W)	1.25
LCS 5	주하중+온도변화의 영향+풍하중(D + L + I + T + W)	1.35

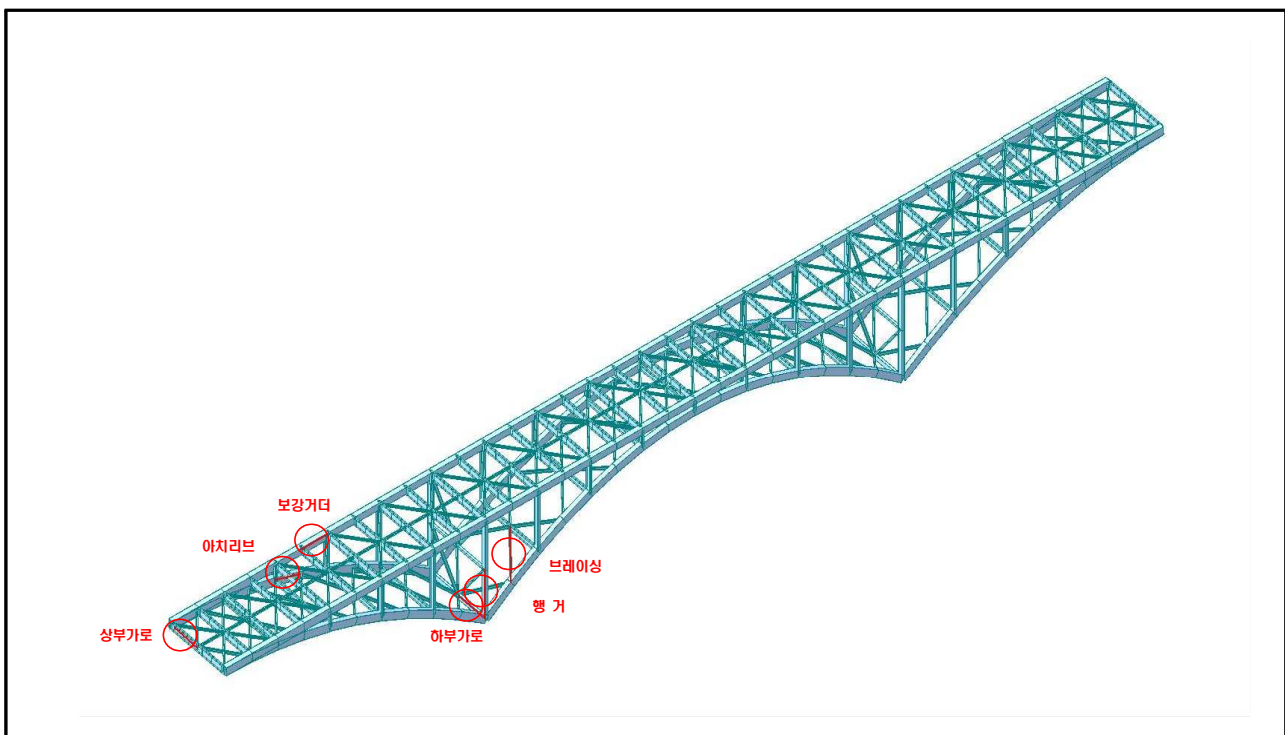
여기서, D : 고정하중

L+I : 활하중(충격포함)

W : 풍하중

T : 온도변화

② 검토 위치



【그림 5.9】 백운1교(부산) 응력 검토 위치

③ 축방향력 및 휨모멘트를 받는 부재의 검토

대상교량의 주부재인 보강거더와 아치리브는 축방향력과 휨모멘트를 동시에 받는 부재이므로 도로교설계기준 3.4.3항에 근거하여 검토하였으며, 기타 부재도 관련규정을 준용하여 검토하였다.

㉠ 축방향력이 인장인 경우

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$- \frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$- f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

㉡ 축방향력이 압축인 경우

$$\frac{f_c}{f_{caz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq 1$$

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal}$$

여기서, f_t, f_c : 각각 단면에 작용하는 축방향력에 의한 인장 및 압축응력(MPa)

f_{bty}, f_{btz} : 각각 강축 및 약축 둘레에 작용하는 휨모멘트에 의한 인장응력(MPa)

f_{bcy}, f_{bcz} : 각각 강축 및 약축 둘레에 작용하는 휨모멘트에 의한 압축응력(MPa)

f_{ta} : 허용 축방향인장응력(MPa)

f_{caz} : 약축 둘레의 허용 축방향압축응력(MPa)

f_{bagy} : 국부좌굴을 고려하지 않은 강축 둘레의 허용 휨압축응력(MPa)

f_{bao} : 양연지지판, 자유둘출판 및 보강된 판에 대한 국부좌굴응력의 허용응력(MPa)

f_{Ey}, f_{Ez} : 각각 강축 둘레 및 약축 둘레에 대한 허용오일러 좌굴응력(MPa)

$$f_{Ey} = 12,000,000 / \left(\frac{l}{r_y} \right)^2$$

$$f_{Ez} = 12,000,000 / \left(\frac{l}{r_z} \right)^2$$

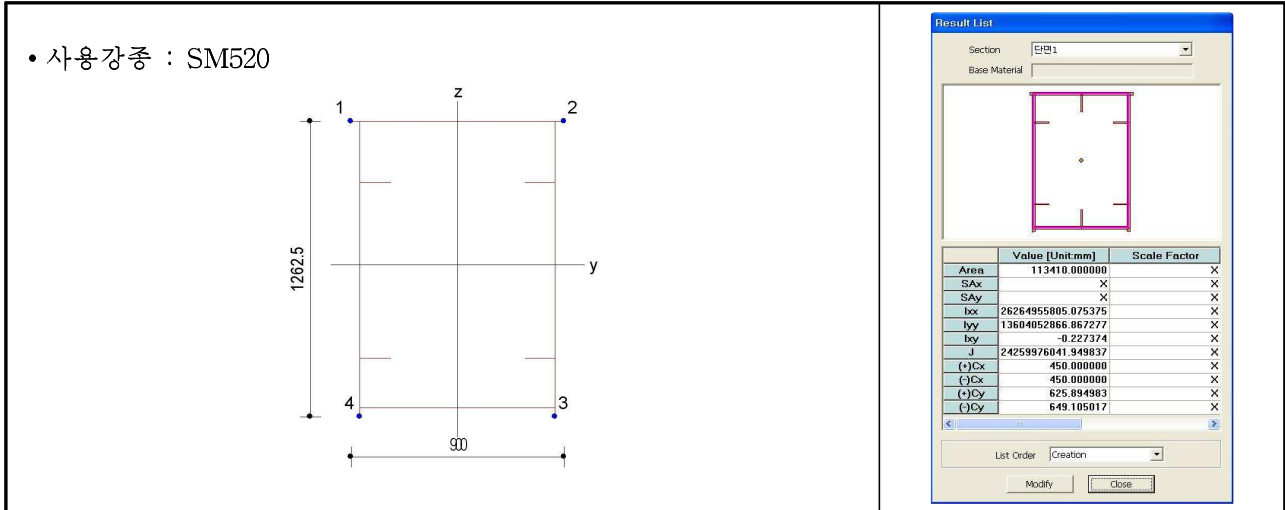
l : 각 장에 규정되어 있는 유효 좌굴길이(mm)

r_y, r_z : 각각 y축 및 z축 둘레의 단면2차반경(mm)

④ 보강거더 검토

㉠ 검토 조건

㉡ 단면 조건



【그림 5.10】 백운1교(부산) 보강거더 단면조건

㉢ 부호규약

(+) : 인장, (-) : 압축

㉣ 적용 사용하중

【표 5.18】 백운1교(부산) 보강거더 적용 사용하중

구 분	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN · m)	M_y (kN · m)	M_z (kN · m)	비 고
LCS1	6,095.718	-76.801	770.575	491.639	4,465.512	-273.872	Max M_y

㉤ 응력검토

㉡ 허용휨인장응력(fts)

【표 5.19】 백운1교(부산) 보강거더 허용휨인장응력(fts)

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	215.000
Bottom Flange	40 이하	215.000
Left Web	40 이하	215.000
Right Web	40 이하	215.000

⑤ 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(f_{ca})

• y축에 대한 유효좌굴길이

- 부재의 유효좌굴길이 : $\ell_y = 5000.000 \text{ mm}$
- 부재 종단면의 단면회전반경 : $r_y = 481.241 \text{ mm}$
- 세장비 : $\ell_y/r_y = 10.390$

• z축에 대한 유효좌굴길이

- 부재의 유효좌굴길이 : $\ell_z = 5000.000 \text{ mm}$
- 부재 종단면의 단면회전반경 : $r_z = 346.345 \text{ mm}$
- 세장비 : $\ell_z/r_z = 14.436$

• 세장비 검토

- 세장비 : $\ell/r = 14.436 \leq 200.000 \quad \therefore \text{OK}$

【표 5.20】 백운1교(부산) 보강거더 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(f_{ca})

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 216.029$
Bottom Flange	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 216.029$
Left Web	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 216.029$
Right Web	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 216.029$
Top Flange	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		$F_{cay} = 215.000$
Bottom Flange	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		$F_{cay} = 215.000$
Left Web	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		$F_{cay} = 215.000$
Right Web	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		$F_{cay} = 215.000$

⑥ 허용휨압축응력(f_{bagg})

- Top Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5000.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 900.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 60600.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 22500.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.693 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 5.556, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.085$$

【표 5.21】 백운1교(부산) 보강거더 상부플랜지 허용휨압축응력(fb_{agy})

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$7.5/K < \ell/b \leq 27$
		$215 - 2.35 \times (K \times \ell/b - 7.5) = 205.402$

- Bottom Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5000.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 824.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 60600.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 20600.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.942 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 6.068, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.114$$

【표 5.22】 백운1교(부산) 보강거더 하부플랜지 허용휨압축응력(fb_{agy})

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$7.5/K < \ell/b \leq 27$
		$215 - 2.35 \times (K \times \ell/b - 7.5) = 202.480$

• Left Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5000.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 1262.500 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 43100.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 30300.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 1.422 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 3.960, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.926$$

【표 5.23】 백운1교(부산) 보강거더 좌측 복부 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$3.8 < \ell/b \leq 27$
		$215 - 4.69 \times (\ell/b - 3.8) = 214.250$

• Right Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5000.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 1262.500 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 43100.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 30300.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 1.422 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 3.960, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.926$$

【표 5.24】 백운1교(부산) 보강거더 우측 복부 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$3.8 < \ell/b \leq 27$
		$215 - 4.69 \times (\ell/b - 3.8) = 214.250$

㉔ 허용 오일러 좌굴응력

【표 5.25】 백운1교(부산) 보강거더 허용 오일러 좌굴응력

단위 : MPa

f_{Ey}	$1200000/(I_y/r_y)^2$	11116.480
f_{Ez}	$1200000/(I_z/r_z)^2$	5757.841

㉔ 허용전단응력(v_a)【표 5.26】 백운1교(부산) 보강거더 허용전단응력(V_a)

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	125.000
Bottom Flange	40 이하	125.000
Left Web	40 이하	125.000
Right Web	40 이하	125.000

㉕ 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력

- 압축응력을 받는 자유돌출판의 최소두께

- Top Flange(L)

$$t_{\min} = b / 16 = 26.0/16.0 = 1.625 \text{ mm} \leq t_f = 25.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Top Flange(R)

$$t_{\min} = b / 16 = 26.0/16.0 = 1.625 \text{ mm} \leq t_f = 25.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Left Web(B)

$$t_{\min} = b / 16 = 25.0/16.0 = 1.563 \text{ mm} \leq t_f = 24.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Right Web(B)

$$t_{\min} = b / 16 = 25.0/16.0 = 1.563 \text{ mm} \leq t_f = 24.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

- Top Flange(L)

$$t = 25.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 26.0/10.5 = 2.476 \text{ mm}$$

【표 5.27】 백운1교(부산) 보강거더 자유돌출판(Top Flange(L))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520	
40 이하	$b/10.5 \leq t$	
	215.000	

- Top Flange(R)

$$t = 25.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 26.0/10.5 = 2.476 \text{ mm}$$

【표 5.28】 백운1교(부산) 보강거더 자유돌출판(Top Flange(R))의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Left Web(B)

$$t = 24.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 25.0/10.5 = 2.381 \text{ mm}$$

【표 5.29】 백운1교(부산) 보강거더 자유돌출판(Left Web(B))의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Right Web(B)

$$t = 24.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 25.0/10.5 = 2.381 \text{ mm}$$

【표 5.30】 백운1교(부산) 보강거더 자유돌출판(Right Web(B))의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

⑧ 보강된 판 및 양면지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력

• Top Flange

- 보강된 판의 두께 : $t = 25.0 \text{ mm}$
- 보강된 판의 폭 : $b = 800.0 \text{ mm}$
- 종방향보강재에 의해 구분되는 패널의 수($n \geq 2$) : 2ea
- 응력구배계수 : $i = 0.65 (\phi/n)^2 + 0.13 (\phi/n) + 1.0 = 1.010$
- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 0.118$
- 판의 양면에서의 응력 : $f_1 = -58.346 \text{ MPa}$, $f_2 = -51.476 \text{ MPa}$
- 압축응력을 받는 보강된 판의 최소두께
 $t \leq 40\text{mm}$
 $t_{\min} = b / 46in = 800.0/92.9 = 8.6 \leq t=25.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$

【표 5.31】 백운1교(부산) 보강거더 보강된 판(Top Flange)의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/23in \leq t$
	215.000

• Bottom Flange

- 판의 양면에서의 응력 : $f_1 = 156.485 \text{ MPa}$, $f_2 = 149.615 \text{ MPa}$
- 판의 양면에서의 응력이 인장이므로 압축응력을 받는 보강된 판 검토에서 제외.

• Left Web

- 보강된 판의 두께 : $t = 24.0 \text{ mm}$
- 보강된 판의 폭 : $b = 1200.0 \text{ mm}$
- 종방향보강재에 의해 구분되는 패널의 수($n \geq 2$) : 3ea
- 응력구배계수 : $i = 0.65 (\phi/n)^2 + 0.13 (\phi/n) + 1.0 = 1.200$
- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 1.390$
- 판의 양면에서의 응력 : $f_1 = 149.615 \text{ MPa}$, $f_2 = -58.346 \text{ MPa}$
- 압축응력을 받는 보강된 판의 최소두께
 $t \leq 40\text{mm}$
 $t_{\min} = b / 46in = 1200.0/165.6 = 7.2 \leq t=24.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$

【표 5.32】 백운1교(부산) 보강거더 보강된 판(Left Web)의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/23in \leq t$
	215.000

• Right Web

- 보강된 판의 두께 : $t = 24.0 \text{ mm}$
- 보강된 판의 폭 : $b = 1200.0 \text{ mm}$
- 종방향보강재에 의해 구분되는 패널의 수($n \geq 2$) : 3ea
- 응력구배계수 : $i = 0.65 (\phi/n)^2 + 0.13 (\phi/n) + 1.0 = 1.185$
- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 1.329$
- 판의 양면에서의 응력 : $f_1 = 156.485 \text{ MPa}$, $f_2 = -51.476 \text{ MPa}$
- 압축응력을 받는 보강된 판의 최소두께

$$t \leq 40\text{mm}$$

$$t_{\min} = b / 46in = 1200.0/163.5 = 7.3 \leq t=24.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.33】 백운1교(부산) 보강거더 보강된 판(Right Web)의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/23in \leq t$
	215.000

① 허용응력 요약

【표 5.34】 백운1교(부산) 보강거더 허용응력 요약

구 분	fta	fcaz	fbagy	Va	fcal
Top Flange	215.000	216.029	205.402	125.000	215.000
Bottom Flange	215.000	216.029	202.480	125.000	인장발생
Left Web	215.000	216.029	214.250	125.000	215.000
Right Web	215.000	216.029	214.250	125.000	215.000

여기서, $f_{ca} = f_{cag} \cdot f_{cal} / f_{cao}$

① 축방향력 및 휨모멘트를 받는 부재의 허용응력 검토

- 축방향력에 의한 응력

$$f_c = P / A = 6095.718 \times 10^3 / 1.0125 \times 10^5 = 59.470 \text{ MPa}$$

- 휨모멘트에 의한 응력

$$f_{by1} = M_y \times Z_1 / I_{yy} = -117.228 \text{ MPa}, \quad f_{bz1} = M_z \times y_1 / I_{zz} = -9.649 \text{ MPa}$$

$$f_{by2} = M_y \times Z_2 / I_{yy} = -117.228 \text{ MPa}, \quad f_{bz2} = M_z \times y_2 / I_{zz} = 9.649 \text{ MPa}$$

$$f_{by3} = M_y \times Z_3 / I_{yy} = 122.033 \text{ MPa}, \quad f_{bz3} = M_z \times y_3 / I_{zz} = 9.091 \text{ MPa}$$

$$f_{by4} = M_y \times Z_4 / I_{yy} = 122.033 \text{ MPa}, \quad f_{bz4} = M_z \times y_4 / I_{zz} = -9.091 \text{ MPa}$$

- Position 1(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$59.470 + (-117.228) + (-9.649) = -67.406 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{59.470}{215.000} + \frac{-117.228}{205.402} + \frac{-9.649}{215.000} = -0.339 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 2(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$59.470 + (-117.228) + 9.649 = -48.108 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{59.470}{215.000} + \frac{-117.228}{205.402} + \frac{9.649}{215.000} = -0.249 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$59.470 + 122.033 + 9.091 = 190.595 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$59.470 + 122.033 + (-9.091) = 172.413 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 1(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$59.470 + (-9.649) + (-117.228) = -58.663 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{59.470}{215.000} + \frac{-9.549}{214.248} + \frac{-117.228}{215.000} = -0.314 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 2(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$59.470 + 9.649 + (-117.228) = -48.108 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{59.470}{215.000} + \frac{9.649}{214.250} + \frac{-117.228}{215.000} = -0.224 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 3(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$59.470 + 9.091 + 122.033 = 190.595 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 4(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$59.470 + (-9.091) + 122.033 = 172.413 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

① 전단응력에 대한 검토

$$v_z = F_z / A_w + v_T$$

$$= 770.575 \times 10^3 / 60600.000 + 0.924$$

$$= 12.716 \text{ MPa} \leq v_a = 125.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$v_y = F_y / A_f + v_T$$

$$= -76.801 \times 10^3 / 43100.000 + 0.046$$

$$= -1.778 \text{ MPa} \leq v_a = 125.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

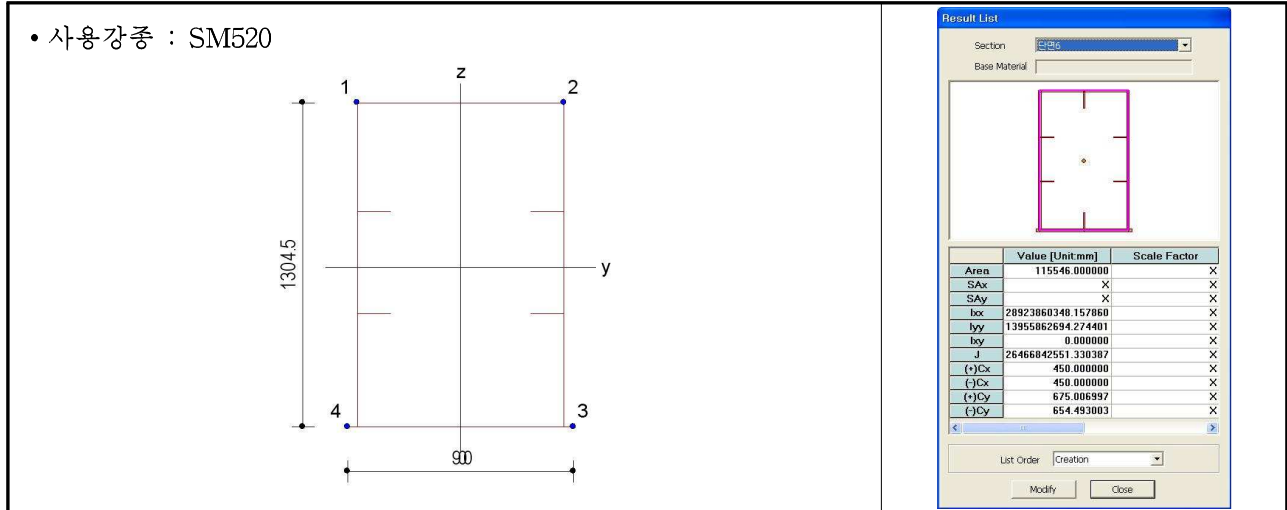
② 합성응력에 대한 검토

$$\left(\frac{f_b}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{v_b}{v_a}\right)^2 = \left(\frac{131.125}{215.0}\right)^2 + \left(\frac{12.716}{125.0}\right)^2 = 0.382 < 1.200 \quad \therefore \text{OK}$$

⑤ 아치리브 검토

㉠ 검토 조건

㉡ 단면 조건



【그림 5.11】 백운1교(부산) 아치리브 단면조건

㉢ 부호규약

(+) : 인장, (-) : 압축

㉣ 적용 사용하중

【표 5.35】 백운1교(부산) 아치리브 적용 사용하중

구 분	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN · m)	M_y (kN · m)	M_z (kN · m)	비 고
LCS1	-7,837.180	-99.554	614.872	-407.885	4,981.352	-307.038	Max M_y

㉤ 응력검토

㉡ 허용휨인장응력(fta)

【표 5.36】 백운1교(부산) 아치리브 허용휨인장응력(fta)

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	215.000
Bottom Flange	40 이하	215.000
Left Web	40 이하	215.000
Right Web	40 이하	215.000

⑥ 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

- y축에 대한 유효좌굴길이
 - 부재의 유효좌굴길이 : $\ell_y = 5255.892 \text{ mm}$
 - 부재 종단면의 단면회전반경 : $r_y = 500.324 \text{ mm}$
 - 세장비 : $\ell_y/r_y = 10.505$
- z축에 대한 유효좌굴길이
 - 부재의 유효좌굴길이 : $\ell_z = 5255.892 \text{ mm}$
 - 부재 종단면의 단면회전반경 : $r_z = 347.537 \text{ mm}$
 - 세장비 : $\ell_z/r_z = 15.123$
- 세장비 검토
 - 세장비 : $\ell/r = 15.123 \leq 120.000 \quad \therefore \text{OK}$

【표 5.37】 백운1교(부산) 아치리브 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 214.964$
Bottom Flange	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 214.964$
Left Web	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 214.964$
Right Web	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 214.964$
Top Flange	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		$F_{cay} = 215.000$
Bottom Flange	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		$F_{cay} = 215.000$
Left Web	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		$F_{cay} = 215.000$
Right Web	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		$F_{cay} = 215.000$

㉔ 허용휨압축응력(fbagy)

• Top Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5255.892 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 824.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 62616.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 20600.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 3.040 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 6.379, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.126$$

【표 5.38】 백운1교(부산) 아치리브 상부플랜지 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$7.5/K < \ell/b \leq 27$
		$215 - 2.35 \times (K \times \ell/b - 7.5) = 200.755$

• Bottom Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5255.892 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 900.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 62616.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 22500.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.783 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 5.840, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.096$$

【표 5.39】 백운1교(부산) 아치리브 하부플랜지 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$7.5/K < \ell/b \leq 27$
		$215 - 2.35 \times (K \times \ell/b - 7.5) = 203.866$

• Left Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5255.892 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 1304.500 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 43100.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 31308.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 1.377 \leq 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 4.029, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.921$$

【표 5.40】 백운1교(부산) 아치리브 좌측 복부 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$3.8 < \ell/b \leq 27$
		$215 - 4.69 \times (\ell/b - 3.8) = 213.926$

• Right Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5255.892 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 1304.500 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 43100.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 31308.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 1.377 \leq 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 4.029, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.921$$

【표 5.41】 백운1교(부산) 아치리브 우측 복부 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$3.8 < \ell/b \leq 27$
		$215 - 4.69 \times (\ell/b - 3.8) = 213.926$

④ 허용 오일러 좌굴응력

【표 5.42】 백운1교(부산) 아치리브 허용 오일러 좌굴응력

단위 : MPa

f_{Ey}	$1200000/(I_y/r_y)^2$	10874.025
f_{Ez}	$1200000/(I_z/r_z)^2$	5246.762

㉔ 허용전단응력(v_a)【표 5.43】 백운1교(부산) 아치리브 허용전단응력(V_a)

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	125.000
Bottom Flange	40 이하	125.000
Left Web	40 이하	125.000
Right Web	40 이하	125.000

㉕ 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력

- 압축응력을 받는 자유돌출판의 최소두께

- Bottom Flange(L)

$$t_{\min} = b / 16 = 26.0/16.0 = 1.625 \text{ mm} \leq t_f = 25.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Bottom Flange(R)

$$t_{\min} = b / 16 = 26.0/16.0 = 1.625 \text{ mm} \leq t_f = 25.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

- Bottom Flange(L)

$$t = 25.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 26.0/10.5 = 2.476 \text{ mm}$$

【표 5.44】 백운1교(부산) 아치리브 자유돌출판(Bottom Flange(L))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Bottom Flange(R)

$$t = 25.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 26.0/10.5 = 2.476 \text{ mm}$$

【표 5.45】 백운1교(부산) 아치리브 자유돌출판(Bottom Flange(R))의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

⑧ 보강된판 및 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력

• Top Flange

- 보강된 판의 두께 : $t = 25.0 \text{ mm}$
- 보강된 판의 폭 : $b = 800.0 \text{ mm}$
- 종방향보강재에 의해 구분되는 패널의 수($n \geq 2$) : $2e_a$
- 응력구배계수 : $i = 0.65 (\phi/n)^2 + 0.13 (\phi/n) + 1.0 = 1.003$
- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 0.039$
- 판의 양연에서의 응력 : $f_1 = -170.552 \text{ MPa}$, $f_2 = -163.868 \text{ MPa}$
- 압축응력을 받는 보강된 판의 최소두께

$$t \leq 40\text{mm}$$

$$t_{\min} = b / 46\text{in} = 800.0/92.3 = 8.7 \leq t=25.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.46】 백운1교(부산) 아치리브 보강된 판(Top Flange)의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/23\text{in} \leq t$
	215.000

• Bottom Flange

- 판의 양연에서의 응력 : $f_1 = 60.423 \text{ MPa}$, $f_2 = 53.738 \text{ MPa}$
- 판의 양연에서의 응력이 인장이므로 압축응력을 받는 보강된 판 검토에서 제외.

• Left Web

- 보강된 판의 두께 : $t = 24.0 \text{ mm}$
- 보강된 판의 폭 : $b = 1292.0 \text{ mm}$
- 종방향보강재에 의해 구분되는 패널의 수($n \geq 2$) : $3e_a$
- 응력구배계수 : $i = 0.65 (\phi/n)^2 + 0.13 (\phi/n) + 1.0 = 1.182$

- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 1.315$
- 판의 양면에서의 응력 : $f_1 = -170.552 \text{ MPa}$, $f_2 = 53.738 \text{ MPa}$
- 압축응력을 받는 보강된 판의 최소두께
 $t \leq 40\text{mm}$
 $t_{\min} = b / 46\text{in} = 1292.0/163.1 = 7.9 \leq t=24.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$

【표 5.47】 백운1교(부산) 아치리브 보강된 판(Left Web)의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/23\text{in} \leq t$
	215.000

• Right Web

- 보강된 판의 두께 : $t = 24.0 \text{ mm}$
- 보강된 판의 폭 : $b = 1292.0 \text{ mm}$
- 종방향보강재에 의해 구분되는 패널의 수($n \geq 2$) : 3ea
- 응력구배계수 : $i = 0.65 (\phi/n)^2 + 0.13 (\phi/n) + 1.0 = 1.195$
- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 1.369$
- 판의 양면에서의 응력 : $f_1 = -163.868 \text{ MPa}$, $f_2 = 60.423 \text{ MPa}$
- 압축응력을 받는 보강된 판의 최소두께
 $t \leq 40\text{mm}$
 $t_{\min} = b / 46\text{in} = 1292.0/164.9 = 7.8 \leq t=24.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$

【표 5.48】 백운1교(부산) 아치리브 보강된 판(Right Web)의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/23\text{in} \leq t$
	215.000

⑨ 허용응력 요약

【표 5.49】 백운1교(부산) 아치리브 허용응력 요약

구 분	fta	fca	fbagy	Va	fcal
Top Flange	215.000	214.964	200.758	125.000	215.000
Bottom Flange	215.000	214.964	203.866	125.000	인장발생
Left Web	215.000	214.964	213.926	125.000	215.000
Right Web	215.000	214.964	213.926	125.000	215.000

여기서, $f_{ca} = f_{cag} \cdot f_{cal} / f_{cao}$

① 축방향력 및 휨모멘트를 받는 부재의 허용응력 검토

• 축방향력에 의한 응력

$$f_c = P / A = -7,837.180 \times 10^3 / 1.049E+05 = -74.711 \text{ MPa}$$

• 휨모멘트에 의한 응력

$$f_{by1} = M_y \times Z_1 / I_{yy} = -122.203 \text{ MPa}, \quad f_{bz1} = M_z \times y_1 / I_{zz} = -9.877 \text{ MPa}$$

$$f_{by2} = M_y \times Z_2 / I_{yy} = -122.203 \text{ MPa}, \quad f_{bz2} = M_z \times y_2 / I_{zz} = 9.877 \text{ MPa}$$

$$f_{by3} = M_y \times Z_3 / I_{yy} = 120.440 \text{ MPa}, \quad f_{bz3} = M_z \times y_3 / I_{zz} = 10.483 \text{ MPa}$$

$$f_{by4} = M_y \times Z_4 / I_{yy} = 120.440 \text{ MPa}, \quad f_{bz4} = M_z \times y_4 / I_{zz} = -10.483 \text{ MPa}$$

• Position 1(y-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal}$$

$$-74.711 + \frac{-122.203}{(1 - \frac{-74.711}{10,874.025})} + \frac{-9.877}{(1 - \frac{-74.711}{5,246.762})}$$

$$= -205.819 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa}$$

∴ OK

$$\frac{f_c}{f_{caz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq 1.0$$

$$\frac{-74.711}{214.964} + \frac{-122.203}{200.758(1 - \frac{-74.711}{10,874.025})} + \frac{-9.877}{215.000(1 - \frac{-74.711}{5,246.762})}$$

$$= -0.997 \leq 1.0$$

∴ OK

- Position 2(y-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal}$$

$$-74.711 + \frac{-122.203}{(1 - \frac{-74.711}{10,874.025})} + \frac{9.877}{(1 - \frac{-74.711}{5,246.762})}$$

$$= -186.342 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$\frac{f_c}{f_{caz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq 1.0$$

$$\frac{-74.711}{214.964} + \frac{-122.203}{200.758(1 - \frac{-74.711}{10,874.025})} + \frac{9.877}{215.000(1 - \frac{-74.711}{5,246.762})}$$

$$= -0.907 \leq 1.0 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(y-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal}$$

$$-74.711 + \frac{120.440}{(1 - \frac{-74.711}{10,874.025})} + \frac{10.483}{(1 - \frac{-74.711}{5,246.762})}$$

$$= 55.243 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(y-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal}$$

$$-74.711 + \frac{120.440}{(1 - \frac{-74.711}{10,874.025})} + \frac{-10.483}{(1 - \frac{-74.711}{5,246.762})}$$

$$= 34.572 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 1(z-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} \leq f_{cal}$$

$$-74.711 + \frac{-9.877}{\left(1 - \frac{-74.711}{5246.762}\right)} + \frac{-122.203}{\left(1 - \frac{-74.711}{10874.025}\right)}$$

$$= -171.148 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$\frac{f_c}{f_{cay}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagz} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}}\right)} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}}\right)} \leq 1.0$$

$$\frac{-74.711}{215.000} + \frac{-9.877}{213.926 \left(1 - \frac{-74.711}{5,246.762}\right)} + \frac{-122.203}{215.000 \left(1 - \frac{-74.711}{10,874.025}\right)}$$

$$= -0.958 \leq 1.0 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 2(z-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcz}}{\left(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}}\right)} + \frac{f_{bcy}}{\left(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}}\right)} \leq f_{cal}$$

$$-74.711 + \frac{9.877}{\left(1 - \frac{-74.711}{5,246.762}\right)} + \frac{-122.203}{\left(1 - \frac{-74.711}{10,874.025}\right)}$$

$$= -186.342 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$\frac{f_c}{f_{cay}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagz} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}}\right)} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}}\right)} \leq 1.0$$

$$\frac{-74.711}{215.000} + \frac{9.877}{213.926 \left(1 - \frac{-74.711}{5246.762}\right)} + \frac{-122.203}{215.000 \left(1 - \frac{-74.711}{10874.025}\right)}$$

$$= -0.866 \leq 1.0 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(z-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcz}}{\left(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}}\right)} + \frac{f_{bcy}}{\left(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}}\right)} \leq f_{cal}$$

$$-74.711 + \frac{10.483}{\left(1 - \frac{-74.711}{5,246.762}\right)} + \frac{120.440}{\left(1 - \frac{-74.711}{10,874.025}\right)}$$

$$= 55.243 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(z-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} \leq f_{cal}$$

$$-74.711 + \frac{-10.483}{(1 - \frac{-74.711}{5,246.762})} + \frac{120.440}{(1 - \frac{-74.711}{10,874.025})}$$

$$= 34.572 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- ① 전단응력에 대한 검토

$$v_z = F_z / A_w + v_T$$

$$= 614.872 \times 10^3 / 62616.000 + -2.080$$

$$= 9.820 \text{ MPa} \leq v_a = 125.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$v_y = F_y / A_f + v_T$$

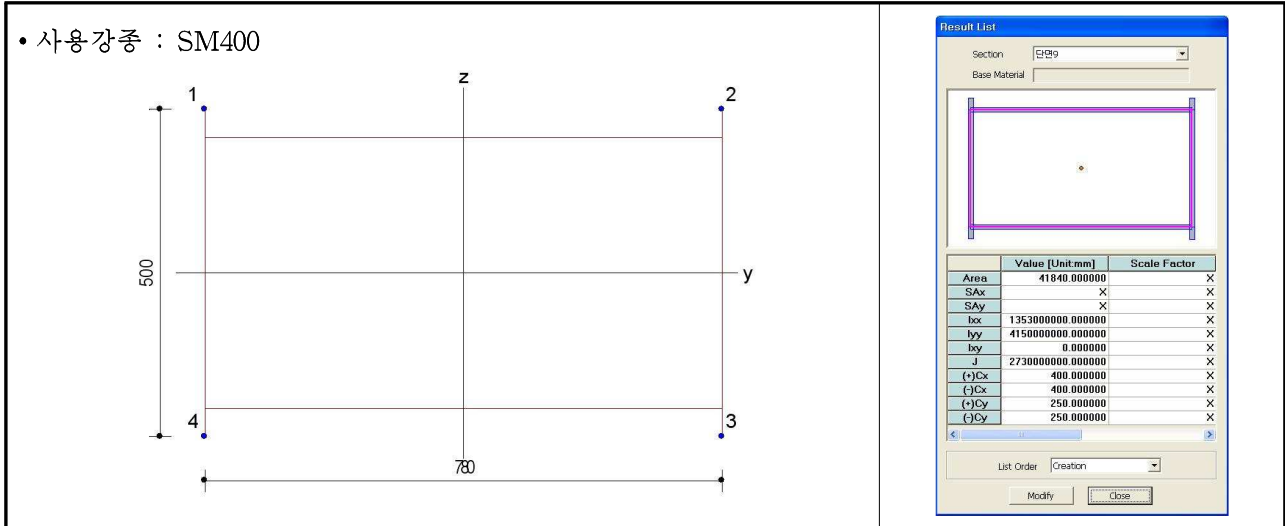
$$= -99.554 \times 10^3 / 43100.000 + -1.997$$

$$= -2.305 \text{ MPa} \leq v_a = 125.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- ② 합성응력에 대한 검토

$$\left(\frac{f_b}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{v_b}{v_a}\right)^2 = \left(\frac{-130.923}{215.000}\right)^2 + \left(\frac{9.820}{125.000}\right)^2 = 0.377 < 1.200 \quad \therefore \text{OK}$$

- ⑥ 행거 검토
 ㉠ 검토 조건
 ㉡ 단면 조건



【그림 5.12】 백운1교(부산) 행거 단면조건

- ㉢ 부호규약
 (+) : 인장, (-) : 압축
 ㉣ 적용 사용하중

【표 5.50】 백운1교(부산) 행거 적용 사용하중

구 분	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN · m)	M_y (kN · m)	M_z (kN · m)	비 고
LCS1	-2002.373	-97.625	-2.485	-3.036	-21.413	-694.702	Max F _y

- ㉤ 응력검토
 ㉡ 허용휨인장응력(fta)

【표 5.51】 백운1교(부산) 행거 허용휨인장응력(fta)

단위 : MPa

구 분	SM400	
Top Flange	40 이하	140.000
Bottom Flange	40 이하	140.000
Left Web	40 이하	140.000
Right Web	40 이하	140.000

⑥ 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

- y축에 대한 유효좌굴길이
 - 부재의 유효좌굴길이 : $\ell_y = 7950.000 \text{ mm}$
 - 부재 종단면의 단면회전반경 : $r_y = 179.816 \text{ mm}$
 - 세장비 : $\ell_y/r_y = 44.212$
- z축에 대한 유효좌굴길이
 - 부재의 유효좌굴길이 : $\ell_z = 7950.000 \text{ mm}$
 - 부재 종단면의 단면회전반경 : $r_z = 314.938 \text{ mm}$
 - 세장비 : $\ell_z/r_z = 25.243$
- 세장비 검토
 - 세장비 : $\ell/r = 44.212 \leq 120.000 \quad \therefore \text{OK}$

【표 5.52】 백운1교(부산) 행거 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

단위 : MPa

구 분		SM400
Top Flange	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 134.553$
Bottom Flange	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 134.553$
Left Web	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 134.553$
Right Web	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 134.553$
Top Flange	40 이하	$20 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{cay} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 118.998$
Bottom Flange	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{cay} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 118.998$
Left Web	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{cay} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 118.998$
Right Web	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{cay} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 118.998$

㉔ 허용휨압축응력(fbagy)

• Top Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 7950.000 \text{ mm}$ - 압축플랜지 폭 : $b = 780.000 \text{ mm}$ - 복부판의 총단면적 : $A_w = 20000.000 \text{ mm}^2$ - 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 10920.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 1.832 \leq 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 10.192$$

【표 5.53】 백운1교(부산) 행거 Top Flange 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$4.6 < \ell/b \leq 30$
		$140 - 2.49 \times (\ell/b - 4.6) = 126.075$

• Bottom Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 7950.000 \text{ mm}$ - 압축플랜지 폭 : $b = 780.000 \text{ mm}$ - 복부판의 총단면적 : $A_w = 20000.000 \text{ mm}^2$ - 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 10920.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 1.832 \leq 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 10.192$$

【표 5.54】 백운1교(부산) 행거 Bottom Flange 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$4.6 < \ell/b \leq 30$
		$140 - 2.49 \times (\ell/b - 4.6) = 126.075$

• Left Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 7950.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 500.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 21840.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 10000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.184 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 15.900, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.023$$

【표 5.55】 백운1교(부산) 행거 Left Web 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$9.3/K < \ell/b \leq 30$
		$140 - 1.24 \times (K \times \ell/b - 9.3) = 111.649$

• Right Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 7950.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 500.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 21840.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 10000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.184 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 15.900, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.023$$

【표 5.56】 백운1교(부산) 행거 Right Web 허용휨압축응력(fbagy)

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$9.3/K < \ell/b \leq 30$
		$140 - 1.24 \times (K \times \ell/b - 9.3) = 111.649$

④ 허용 오일러 좌굴응력

【표 5.57】 백운1교(부산) 행거 허용 오일러 좌굴응력

단위 : MPa

f_{Ey}	$1200000/(I_y/r_y)^2$	613.909
f_{Ez}	$1200000/(I_z/r_z)^2$	1883.203

㉔ 허용전단응력(v_a)【표 5.58】 백운1교(부산) 행거 허용전단응력(V_a)

단위 : MPa

구 분	SM400	
Top Flange	40 이하	80.000
Bottom Flange	40 이하	80.000
Left Web	40 이하	80.000
Right Web	40 이하	80.000

㉕ 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

- 압축응력을 받는 자유돌출판의 최소두께

- Left Web(T)

$$t_{min} = b / 16 = 36.0/16.0 = 2.250 \text{ mm} \leq t_f = 20.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Left Web(B)

$$t_{min} = b / 16 = 36.0/16.0 = 2.250 \text{ mm} \leq t_f = 20.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Right Web(T)

$$t_{min} = b / 16 = 36.0/16.0 = 2.250 \text{ mm} \leq t_f = 20.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Right Web(B)

$$t_{min} = b / 16 = 36.0/16.0 = 2.250 \text{ mm} \leq t_f = 20.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

- Left Web(T)

$$t = 20.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 12.9 = 36.0/12.9 = 2.791 \text{ mm}$$

【표 5.59】 백운1교(부산) 행거 자유돌출판(Left Web(T))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/12.9 \leq t$
	140.000

- Left Web(B)

$$t = 20.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 12.9 = 36.0/12.9 = 2.791 \text{ mm}$$

【표 5.60】 백운1교(부산) 행거 자유돌출판(Left Web(B))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/12.9 \leq t$
	140.000

- Right Web(T)

$$t = 20.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 12.9 = 36.0/12.9 = 2.791 \text{ mm}$$

【표 5.61】 백운1교(부산) 행거 자유돌출판(Left Web(T))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/12.9 \leq t$
	140.000

- Right Web(B)

$$t = 20.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 12.9 = 36.0/12.9 = 2.791 \text{ mm}$$

【표 5.62】 백운1교(부산) 행거 자유돌출판(Left Web(B))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/12.9 \leq t$
	140.000

㉔ 보강된 판 및 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력

• Top Flange

$$\text{- 판두께} : t = 14.0 \text{ mm}$$

$$\text{- 판의 고정연 사이의 거리} : b = 760.0 \text{ mm}$$

$$\text{- 응력구배계수} : i = 0.65 \phi^2 + 0.13 \phi + 1.0 = 2.125$$

$$\text{- 응력구배} : \phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 1.219$$

$$\text{- 판의 양연에서의 응력} : f_1 = -110.009 \text{ MPa}, f_2 = 24.117 \text{ MPa}$$

- 압축응력을 받는 양연지지판의 최소두께

$$t \leq 40\text{mm}$$

$$t_{\min} = b / 56i = 760.0/118.985 = 6.4 \leq t=14.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.63】 백운1교(부산) 행거 Top Flange 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/12.9 \leq t$
	140.000

• Bottom Flange

- 판두께 : $t = 14.0 \text{ mm}$
- 판의 고정연 사이의 거리 : $b = 760.0 \text{ mm}$
- 응력구배계수 : $i = 0.65 \phi^2 + 0.13 \phi + 1.0 = 2.125$
- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 1.219$
- 판의 양연에서의 응력 : $f_1 = -110.009 \text{ MPa}, f_2 = 24.117 \text{ MPa}$
- 압축응력을 받는 양연지지판의 최소두께

$$t \leq 40\text{mm}$$

$$t_{\min} = b / 56i = 760.0/118.985 = 6.6 \leq t=14.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.64】 백운1교(부산) 행거 Bottom Flange 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/39.3i \leq t$
	140.000

• Left Web

- 판의 양연에서의 응력 : $f_1 = 24.117 \text{ MPa}, f_2 = 24.117 \text{ MPa}$
- 판의 양연에서의 응력이 인장이므로 압축응력을 받는 양연지지판 검토에서 제외.

- Right Web

- 판두께 : $t = 20.0 \text{ mm}$
- 판의 고정연 사이의 거리 : $b = 400.0 \text{ mm}$
- 응력구배계수 : $i = 0.65 \phi^2 + 0.13 \phi + 1.0 = 1.000$
- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 0.000$
- 판의 양면에서의 응력 : $f_1 = -110.009 \text{ MPa}$, $f_2 = -110.009 \text{ MPa}$
- 압축응력을 받는 양면지지판의 최소두께

$$t \leq 40\text{mm}$$

$$t_{\min} = b / 56i = 400.0/56 = 7.4 \leq t=20.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.65】 백운1교(부산) 행거 보강된 판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/39.3i \leq t$
	140.000

㉠ 허용응력 요약

【표 5.66】 백운1교(부산) 행거 허용응력 요약

구 분	f_{ta}	f_{caz}	f_{cay}	f_{bagy}	Va	f_{cal}
Top Flange	140.000	134.553	118.998	126.075	80.000	140.000
Bottom Flange	140.000	134.553	118.998	126.075	80.000	140.000
Left Web	140.000	134.553	118.998	111.649	80.000	인장발생
Right Web	140.000	134.553	118.998	111.649	80.000	140.000

여기서, $f_{ca} = f_{cag} \cdot f_{cal} / f_{cao}$

㉡ 축방향력 및 휨모멘트를 받는 부재의 허용응력 검토

- 축방향력에 의한 응력

$$f_c = P / A = -2,026.373 \times 10^3 / 4.1280\text{E}+04 = -49.088 \text{ MPa}$$

- 휨모멘트에 의한 응력

$$f_{by1} = M_y \times Z_1 / I_{yy} = -4.029 \text{ MPa}, \quad f_{bz1} = M_z \times y_1 / I_{zz} = 68.327 \text{ MPa}$$

$$f_{by2} = M_y \times Z_2 / I_{yy} = -4.029 \text{ MPa}, \quad f_{bz2} = M_z \times y_2 / I_{zz} = -68.327 \text{ MPa}$$

$$f_{by3} = M_y \times Z_3 / I_{yy} = 4.029 \text{ MPa}, \quad f_{bz3} = M_z \times y_3 / I_{zz} = -68.327 \text{ MPa}$$

$$f_{by4} = M_y \times Z_4 / I_{yy} = 4.029 \text{ MPa}, \quad f_{bz4} = M_z \times y_4 / I_{zz} = 68.327 \text{ MPa}$$

- Position 1(y-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal}$$

$$-49.088 + \frac{-4.029}{(1 - \frac{-49.088}{613.910})} + \frac{68.327}{(1 - \frac{-49.088}{1883.208})}$$

$$= 13.772 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 2(y-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal}$$

$$-49.088 + \frac{-4.029}{(1 - \frac{-49.088}{613.909})} + \frac{-68.327}{(1 - \frac{-49.088}{1,883.203})}$$

$$= -119.410 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$\frac{f_c}{f_{caz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq 1.0$$

$$\frac{-49.088}{134.553} + \frac{-4.029}{118.998(1 - \frac{-49.088}{613.909})} + \frac{-49.088}{140.000(1 - \frac{-49.088}{1,883.203})}$$

$$= -0.872 \leq 1.0 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(y-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal}$$

$$-49.088 + \frac{4.029}{(1 - \frac{-49.088}{613.909})} + \frac{-68.327}{(1 - \frac{-49.088}{1883.203})}$$

$$= -111.949 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$\frac{f_c}{f_{caz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq 1.0$$

$$\frac{-49.088}{134.553} + \frac{4.029}{126.075(1 - \frac{-49.088}{613.909})} + \frac{-68.327}{140.000(1 - \frac{-49.088}{1,883.203})}$$

$$= -0.811 \leq 1.0 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(y-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} \leq f_{cal}$$

$$-49.088 + \frac{4.029}{(1 - \frac{-49.088}{613.909})} + \frac{68.327}{(1 - \frac{-49.088}{1,883.203})}$$

$$= 21.233 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 1(z-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} \leq f_{cal}$$

$$-49.088 + \frac{68.327}{(1 - \frac{-49.088}{1883.203})} + \frac{-4.029}{(1 - \frac{-49.088}{613.909})}$$

$$= 13.772 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 2(z-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} \leq f_{cal}$$

$$-49.088 + \frac{-68.327}{(1 - \frac{-49.088}{1,883.208})} + \frac{-4.029}{(1 - \frac{-49.088}{613.909})}$$

$$= -119.410 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$\frac{f_c}{f_{cay}} + \frac{f_{bcz}}{f_{baqz}(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} \leq 1.0$$

$$\frac{-49.088}{118.998} + \frac{-68.327}{111.647(1 - \frac{-49.088}{1,883.203})} + \frac{-4.029}{140.000(1 - \frac{-49.088}{613.910})}$$

$$= -1.036 \leq 1.0 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(z-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} \leq f_{cal}$$

$$-49.088 + \frac{-68.327}{(1 - \frac{-49.088}{1,883.203})} + \frac{4.029}{(1 - \frac{-42.088}{613.909})}$$

$$= -111.949 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$\frac{f_c}{f_{cay}} + \frac{f_{bcz}}{f_{baqz}(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} \leq 1.0$$

$$\frac{-49.088}{118.998} + \frac{-68.327}{111.649(1 - \frac{-49.088}{1,883.208})} + \frac{4.029}{140.000(1 - \frac{-49.088}{613.909})}$$

$$= -0.932 \leq 1.0 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(z-direction) 응력 검토

$$f_c + \frac{f_{bcz}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}})} + \frac{f_{bcy}}{(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}})} \leq f_{cal}$$

$$-49.088 + \frac{68.327}{(1 - \frac{-49.088}{1,883.203})} + \frac{4.029}{(1 - \frac{-49.088}{613.909})}$$

$$= 21.233 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- ① 전단응력에 대한 검토

$$v_z = F_z / A_w + v_T$$

$$= -2.485 \times 10^3 / 20000.000 + 0.069$$

$$= -0.124 \text{ MPa} \leq v_a = 80.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$v_y = F_y / A_f + v_T$$

$$= -97.625 \times 10^3 / 21840.000 + 0.099$$

$$= -4.470 \text{ MPa} \leq v_a = 80.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

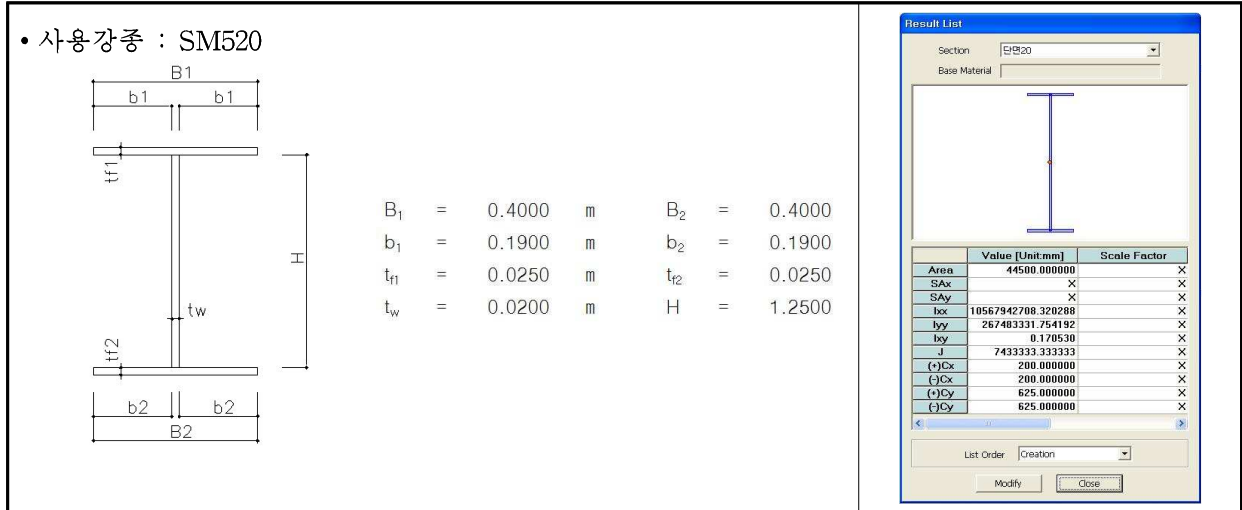
- ② 합성응력에 대한 검토

$$\left(\frac{f_b}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{v_b}{v_a}\right)^2 = \left(\frac{-64.298}{140.000}\right)^2 + \left(\frac{-0.124}{80.000}\right)^2 = 0.211 < 1.200 \quad \therefore \text{OK}$$

⑦ 상부가로보 검토

㉠ 검토 조건

a 단면 조건



【그림 5.13】 백운1교(부산) 상부가로보 단면조건

b 부호규약

(+) : 인장, (-) : 압축

c 적용 사용하중

【표 5.67】 백운1교(부산) 상부가로보 적용 사용하중

구 분	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN · m)	M_y (kN · m)	M_z (kN · m)	비 고
LCS1	1432.400	-1.206	48.695	0.036	1379.023	1.355	Max M_y

㉡ 응력검토

a 허용휨인장응력(fta)

【표 5.68】 백운1교(부산) 상부가로보 허용휨인장응력(fta)

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	215.000
Bottom Flange	40 이하	215.000
Left Web	40 이하	215.000

⑥ 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

- y축에 대한 유효좌굴길이
 - 부재의 유효좌굴길이 : $\ell_y = 1,100.000 \text{ mm}$
 - 부재 종단면의 단면회전반경 : $r_y = 485.802 \text{ mm}$
 - 세장비 : $\ell_y/r_y = 2.264$
- z축에 대한 유효좌굴길이
 - 부재의 유효좌굴길이 : $\ell_z = 1,100.000 \text{ mm}$
 - 부재 종단면의 단면회전반경 : $r_z = 77.967 \text{ mm}$
 - 세장비 : $\ell_z/r_z = 14.109$
- 세장비 검토
 - 세장비 : $\ell/r = 14.109 \leq 200.000 \quad \therefore \text{OK}$

【표 5.69】 백운1교(부산) 행거 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

단위 : MPa

구 분		SM400
Top Flange	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		Fcaz = 215.000
Bottom Flange	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		Fcaz = 215.000
Left Web	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		Fcaz = 215.000
Right Web	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		Fcaz = 215.000
Top Flange	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		Fcay = 215.000
Bottom Flange	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		Fcay = 215.000
Left Web	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		Fcay = 215.000
Right Web	40 이하	$\ell/r \leq 15.1$
		Fcay = 215.000

㉔ 허용휨압축응력(fbagy)

• Top Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 1100.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 400.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 24000.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 10000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.400 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 2.750, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.049$$

【표 5.70】 백운1교(부산) 상부가로보 상부플랜지 허용휨압축응력(fbagy))

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$\ell/b \leq 7.5/K$
		215.000

• Bottom Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 1100.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 400.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 24000.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 10000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.400 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 2.750, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.049$$

【표 5.71】 백운1교(부산) 상부가로보 하부플랜지 허용휨압축응력(fbagy))

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$\ell/b \leq 7.5/K$
		215.000

• Left Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 1100.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 1200.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 20000.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 24000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 0.833 \leq 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 0.917, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.848$$

【표 5.72】 백운1교(부산) 상부가로보 좌측 복부 허용휨압축응력(fbagy))

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$\ell/b \leq 3.8$
		215.000

㉔ 허용 오일러 좌굴응력

【표 5.73】 백운1교(부산) 상부가로보 허용 오일러 좌굴응력

단위 : MPa

f_{Ey}	$1200000/(I_y/r_y)^2$	234,053.343
f_{Ez}	$1200000/(I_z/r_z)^2$	6,028.550

㉕ 허용전단응력(v_a)

【표 5.74】 백운1교(부산) 상부가로보 허용전단응력(Va)

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	125.000
Bottom Flange	40 이하	125.000
Left Web	40 이하	125.000

㉖ 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력

- 압축응력을 받는 자유돌출판의 최소두께

- Top Flange(L)

$$t_{\min} = b / 16 = 190.0/16.0 = 11.875 \text{ mm} \leq t_f = 25.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Top Flange(R)

$$t_{\min} = b / 16 = 190.0/16.0 = 11.875 \text{ mm} \leq t_f = 25.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Bottom Flange(L)

$$t_{\min} = b / 16 = 190.0/16.0 = 11.875 \text{ mm} \leq t_f = 25.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Bottom Flange(R)

$$t_{\min} = b / 16 = 190.0/16.0 = 11.875 \text{ mm} \leq t_f = 25.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

- Top Flange(L)

$$t = 25.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 190.0/10.5 = 18.095 \text{ mm}$$

【표 5.75】 백운1교(부산) 상부가로보 자유돌출판(Top Flange(L))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Top Flange(R)

$$t = 25.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 190.0/10.5 = 18.095 \text{ mm}$$

【표 5.76】 백운1교(부산) 상부가로보 자유돌출판(Top Flange(R))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Bottom Flange(L)

$$t = 25.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 190.0/10.5 = 18.095 \text{ mm}$$

【표 5.77】 백운1교(부산) 상부가로보 자유돌출판(Bottom Flange(L))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Bottom Flange(R)

$$t = 25.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 190.0/10.5 = 18.095 \text{ mm}$$

【표 5.78】 백운1교(부산) 상부가로보 자유들출판(Bottom Flange(R))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

㉔ 보강된판 및 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력

• Left Web

- 판두께 : $t = 20.0 \text{ mm}$

- 판의 고정연 사이의 거리 : $b = 1200.0 \text{ mm}$

- 응력구배계수 : $I = 0.65 \phi^2 + 0.13 \phi + 1.0 = 3.860$

- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 2.000$

- 판의 양연에서의 응력 : $f_1 = 91.392 \text{ MPa}$, $f_2 = -91.392 \text{ MPa}$

- 압축응력을 받는 보강된 판의 최소두께

$$t \leq 40 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = b / 46i = 1200/177.56 = 6.8 \leq t = 20.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.79】 백운1교(부산) 상부가로보 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/32.0i \leq t$
	215.000

㉕ 허용응력 요약

【표 5.80】 백운1교(부산) 상부가로보 허용응력 요약

구 분	f_{ta}	f_{caz}	f_{cay}	V_a	f_{cal}
Top Flange	215.000	215.000	215.000	125.000	215.000
Bottom Flange	215.000	215.000	215.000	125.000	215.000
Left Web	215.000	215.000	215.000	125.000	215.000

여기서, $f_{ca} = \min [f_{bagy}, f_{cal}]$

① 축방향력 및 휨모멘트를 받는 부재의 허용응력 검토

- 축방향력에 의한 응력

$$f_c = P / A = -1,432.400 \times 10^3 / 4.4000E+04 = 32.555 \text{ MPa}$$

- 휨모멘트에 의한 응력

$$f_{by1} = M_y \times Z_1 / I_{yy} = -83.000 \text{ MPa}, \quad f_{bz1} = M_z \times y_1 / I_{zz} = 1.013 \text{ MPa}$$

$$f_{by2} = M_y \times Z_2 / I_{yy} = -83.000 \text{ MPa}, \quad f_{bz2} = M_z \times y_2 / I_{zz} = -1.013 \text{ MPa}$$

$$f_{by3} = M_y \times Z_3 / I_{yy} = 83.000 \text{ MPa}, \quad f_{bz3} = M_z \times y_3 / I_{zz} = -1.013 \text{ MPa}$$

$$f_{by4} = M_y \times Z_4 / I_{yy} = 83.000 \text{ MPa}, \quad f_{bz4} = M_z \times y_4 / I_{zz} = 1.013 \text{ MPa}$$

- Position 1(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$32.555 + (-83.000) + (-1.013) = -49.432 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{32.555}{215.000} + \frac{-83.000}{215.000} + \frac{1.013}{215.000} = -0.230 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 2(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$32.555 + (-83.000) + (-1.013) = -51.459 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{32.555}{215.000} + \frac{-83.00}{215.000} + \frac{-1.013}{215.000} = -0.239 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$32.555 + 83.000 + (-1.013) = 114.541 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$32.555 + 83.000 + 1.013 = 116.568 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 1(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$32.555 + 1.013 + -83.000 = -49.432 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{32.555}{215.000} + \frac{1.013}{215.000} + \frac{-83.000}{215.000} = -0.230 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 2(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$32.555 + (-1.013) + (-83.000) = -51.459 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{32.555}{215.000} + \frac{-1.013}{215.000} + \frac{-83.000}{215.000} = -0.239 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 3(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$32.555 + (-1.013) + 83.000 = 114.541 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 4(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$32.555 + 1.013 + 83.000 = 116.568 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

① 전단응력에 대한 검토

$$v_z = F_z / A_w + M_x \times t / K$$

$$= 48.695 \times 10^3 / 25,000.000 + 0.036 \times 10^6 \times 2.000\text{E}+01 / 7.4333\text{E}+06$$

$$= 2.044 \text{ MPa} \leq v_a = 125.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$v_y = F_y / A_f + M_x \times t / K$$

$$= -1.206 \times 10^3 / 13,333.333 + 0.036 \times 10^6 \times 2.500\text{E}+01 / 7.4333\text{E}+06$$

$$= 0.030 \text{ MPa} \leq v_a = 125.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

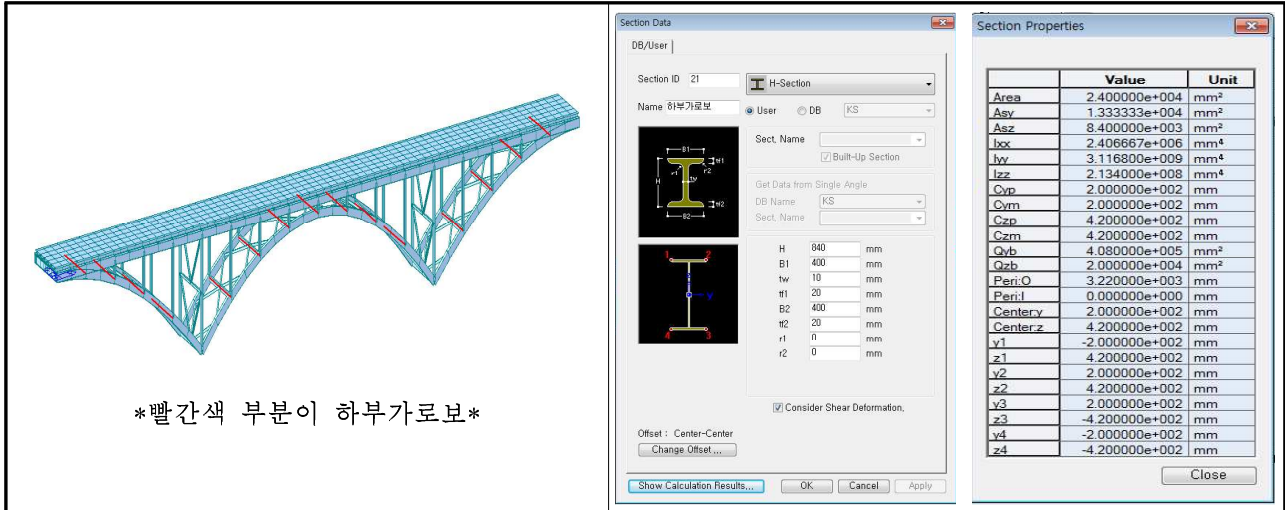
② 합성응력에 대한 검토

$$\left(\frac{f_b}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{v_b}{v_a}\right)^2 = \left(\frac{-84.014}{215.000}\right)^2 + \left(\frac{2.044}{125.000}\right)^2 = 0.153 < 1.200 \quad \therefore \text{OK}$$

⑧ 하부가로보 검토

㉠ 검토 조건

㉡ 단면 조건



【그림 5.14】 백운1교(부산) 하부가로보 단면조건

㉢ 부호규약

(+) : 인장, (-) : 압축

㉣ 적용 사용하중

【표 5.81】 백운1교(부산) 하부가로보 적용 사용하중

구 분	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN.m)	M_y (kN.m)	M_z (kN.m)	비 고
LCS1	151.193	-0.002	-23.528	-0.010	-104.668	-1.375	

㉤ 응력검토

㉡ 허용휨인장응력(fta)

【표 5.82】 백운1교(부산) 하부가로보 허용휨인장응력(fta)

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	215.000
Bottom Flange	40 이하	215.000
Left Web	40 이하	215.000

⑥ 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

• y축에 대한 유효좌굴길이

$$\text{- 부재의 유효좌굴길이} : \ell_y = 6300.000 \text{ mm}$$

$$\text{- 부재 종단면의 단면회전반경} : r_y = 360.370 \text{ mm}$$

$$\text{- 세장비} : \ell_y/r_y = 17.482$$

• z축에 대한 유효좌굴길이

$$\text{- 부재의 유효좌굴길이} : \ell_z = 6300.000 \text{ mm}$$

$$\text{- 부재 종단면의 단면회전반경} : r_z = 194.296 \text{ mm}$$

$$\text{- 세장비} : \ell_z/r_z = 66.811$$

• 세장비 검토

$$\text{- 세장비} : \ell/r = 66.811 \leq 200.000 \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.83】 백운1교(부산) 하부가로보 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 134.848$
Bottom Flange	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 134.848$
Left Web	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{caz} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 134.848$
Top Flange	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{cay} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 211.308$
Bottom Flange	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{cay} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 211.308$
Left Web	40 이하	$15.1 < \ell/r \leq 75.5$
		$F_{cay} = 215 - 1.55 \times (\ell/r - 15.1) = 211.308$

㉔ 허용휨압축응력(fbagy)

• Top Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 6,300.000 \text{ mm}$

- 압축플랜지 폭 : $b = 400.000 \text{ mm}$

- 복부판의 총단면적 : $A_w = 8,000.000 \text{ mm}^2$

- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 8,000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 1.000 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 15.750, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.871$$

【표 5.84】 백운1교(부산) 하부가로보 상부플랜지 허용휨압축응력(fbagy))

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$3.8 < \ell/b \leq 27.0$
		$215 - 4.69 \times (\ell/b - 3.8) = 158.955$

• Bottom Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 6,300.000 \text{ mm}$

- 압축플랜지 폭 : $b = 400.000 \text{ mm}$

- 복부판의 총단면적 : $A_w = 8,000.000 \text{ mm}^2$

- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 8,000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.000 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 15.750, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.871$$

【표 5.85】 백운1교(부산) 하부가로보 하부플랜지 허용휨압축응력(fbagy))

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$3.8 < \ell/b \leq 27.0$
		$215 - 4.69 \times (\ell/b - 3.8) = 158.955$

• Left Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 6,300.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 800.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 16,000.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 8,000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.000 \leq 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 7.875, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.000$$

【표 5.86】 백운1교(부산) 하부가로보 좌측 복부 허용휨압축응력(fbagy))

단위 : MPa

구 분		SM520
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$3.8 < \ell/b \leq 27.0$
		$215 - 4.69 \times (\ell/b - 3.8) = 195.888$

㉔ 허용 오일러 좌굴응력

【표 5.87】 백운1교(부산) 하부가로보 허용 오일러 좌굴응력

단위 : MPa

f_{Ey}	$1200000/(I_y/r_y)^2$	3,926.430
f_{Ez}	$1200000/(I_z/r_z)^2$	268.833

㉕ 허용전단응력(v_a)

【표 5.88】 백운1교(부산) 하부가로보 허용전단응력(Va)

단위 : MPa

구 분	SM520	
Top Flange	40 이하	125.000
Bottom Flange	40 이하	125.000
Left Web	40 이하	125.000

㉖ 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력

- 압축응력을 받는 자유돌출판의 최소두께

- Left Web(T)

$$t_{\min} = b / 16 = 195.0/16.0 = 12.188 \text{ mm} \leq t_f = 20.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Left Web(B))

$$t_{\min} = b / 16 = 195.0/16.0 = 12.188 \text{ mm} \leq t_f = 20.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Right Web(T)

$$t_{\min} = b / 16 = 195.0/16.0 = 12.188 \text{ mm} \leq t_f = 20.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Right Web(B)

$$t_{\min} = b / 16 = 195.0/16.0 = 12.1888 \text{ mm} \leq t_f = 20.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

- Left Web(T)

$$t = 20.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 195.0/10.5 = 18.571 \text{ mm}$$

【표 5.89】 백운1교(부산) 하부가로보 자유돌출판(Left Web(T))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Left Web(B)

$$t = 20.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 195.0/10.5 = 18.571 \text{ mm}$$

【표 5.90】 백운1교(부산) 하부가로보 자유돌출판(Left Web(B))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Right Web(T)

$$t = 20.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 195.0/10.5 = 18.571 \text{ mm}$$

【표 5.91】 백운1교(부산) 하부가로보 자유돌출판(Right Web(T))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Right Web(B)

$$t = 20.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 10.5 = 195.0/10.5 = 18.571 \text{ mm}$$

【표 5.92】 백운1교(부산) 하부가로보 자유들출판(Right Web(B))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

㉔ 보강된판 및 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력

• Left Web

- 판두께 : $t = 10.0 \text{ mm}$

- 판의 고정연 사이의 거리 : $b = 800.0 \text{ mm}$

- 응력구배계수 : $i = 0.65 \phi^2 + 0.13 \phi + 1.0 = 2.382$

- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 1.361$

- 판의 양연에서의 응력 : $f_1 = 19.732 \text{ MPa}$, $f_2 = -7.133 \text{ MPa}$

- 압축응력을 받는 보강된 판의 최소두께

$$t \leq 40 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = b / 46i = 800/109.566 = 7.3 \leq t = 10.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.93】 백운1교(부산) 하부가로보 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM520
40 이하	$b/80.0i \leq t < b/32.i$
	$220,000 \times (t_i / b)^2 = 195.018$

㉕ 허용응력 요약

【표 5.94】 백운1교(부산) 하부가로보 허용응력 요약

구 분	f_{ta}	f_{caz}	f_{cay}	f_{bagy}	V_a	f_{cal}
Top Flange	215.000	134.848	211.308	158.955	125.000	215.000
Bottom Flange	215.000	134.848	211.308	158.955	125.000	215.000
Left Web	215.000	122.315	211.308	195.888	125.000	195.018

여기서, $f_{ca} = f_{cag} \cdot f_{cal} / f_{cao}$

① 축방향력 및 휨모멘트를 받는 부재의 허용응력 검토

- 축방향력에 의한 응력

$$f_c = P / A = 151.193 \times 10^3 / 2.4000 \times 10^4 = 6.300 \text{ MPa}$$

- 휨모멘트에 의한 응력

$$f_{by1} = M_y \times Z_1 / I_{yy} = 14.104 \text{ MPa}, \quad f_{bz1} = M_z \times y_1 / I_{zz} = -1.289 \text{ MPa}$$

$$f_{by2} = M_y \times Z_2 / I_{yy} = 14.104 \text{ MPa}, \quad f_{bz2} = M_z \times y_2 / I_{zz} = 1.289 \text{ MPa}$$

$$f_{by3} = M_y \times Z_3 / I_{yy} = -14.104 \text{ MPa}, \quad f_{bz3} = M_z \times y_3 / I_{zz} = 1.289 \text{ MPa}$$

$$f_{by4} = M_y \times Z_4 / I_{yy} = -14.104 \text{ MPa}, \quad f_{bz4} = M_z \times y_4 / I_{zz} = -1.289 \text{ MPa}$$

- Position 1(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$6.300 + 14.104 + (-1.289) = 19.115 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 2(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$6.300 + 14.104 + 1.289 = 21.693 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$6.300 + (-14.104) + 1.289 = -6.516 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{6.300}{215.000} + \frac{-14.104}{158.955} + \frac{1.289}{215.000} = -0.053 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$6.300 + (-14.104) + (-1.289) = -9.094 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{6.300}{215.000} + \frac{-14.104}{158.955} + \frac{-1.289}{215.000} = -0.065 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 1(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$6.300 + (-1.289) + 14.104 = 19.115 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 2(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$6.300 + 1.289 + 14.104 = 21.693 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$6.300 + (-1.289) + (-14.104) = -6.516 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{6.300}{215.000} + \frac{1.289}{195.888} + \frac{-14.104}{215.000} = -0.030 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$6.300 + (-1.289) + (-14.104) = -9.094 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 215.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{6.300}{215.000} + \frac{-1.289}{195.888} + \frac{-14.104}{215.000} = -0.043 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

㉠ 전단응력에 대한 검토

$$v_z = F_z / A_w + M_x \times t / K$$

$$= -23.528 \times 10^3 / 8,400.000 + (-0.010) \times 10^6 \times 1.000\text{E}+01 / 2.4067\text{E}+06$$

$$= -2.844 \text{ MPa} \leq v_a = 125.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$v_y = F_y / A_f + M_x \times t / K$$

$$= -0.002 \times 10^3 / 10,666.667 + (-0.010) \times 10^6 \times 2.000\text{E}+01 / 2.4067\text{E}+06$$

$$= -0.086 \text{ MPa} \leq v_a = 125.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

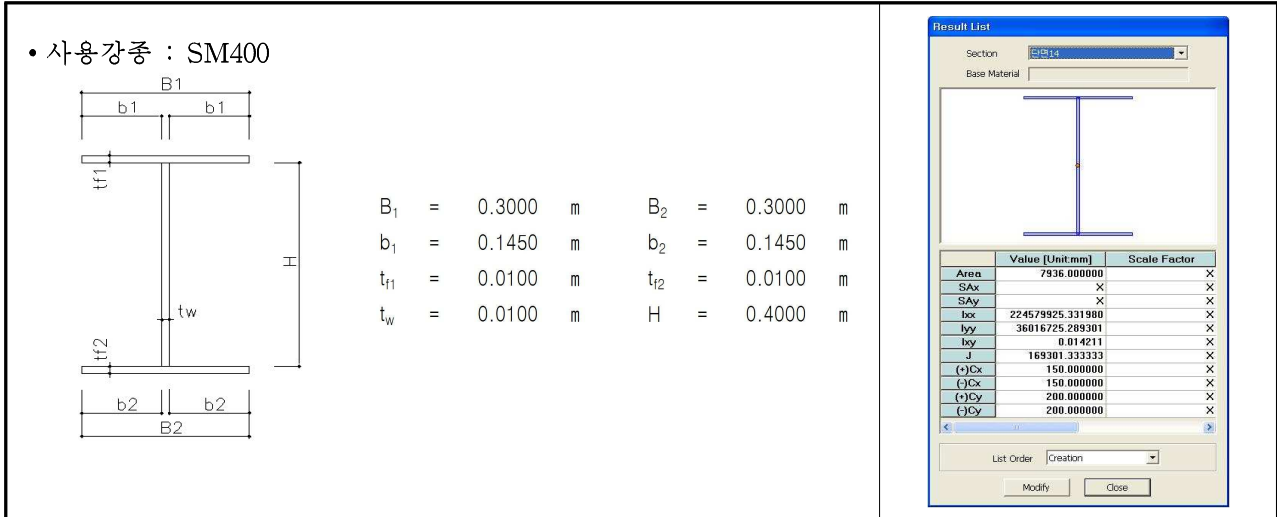
㉡ 합성응력에 대한 검토

$$\left(\frac{f_b}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{v_b}{v_a}\right)^2 = \left(\frac{-15.393}{215.000}\right)^2 + \left(\frac{-2.844}{125.000}\right)^2 = 0.006 < 1.200 \quad \therefore \text{OK}$$

⑨ 브레이싱 검토

㉠ 검토 조건

㉡ 단면 조건



【그림 5.15】 백운1교(부산) 브레이싱 단면조건

㉢ 부호규약

(+) : 인장, (-) : 압축

㉣ 적용 사용하중

【표 5.95】 백운1교(부산) 브레이싱 적용 사용하중

구 분	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN.m)	M_y (kN.m)	M_z (kN.m)	비 고
LCS1	322.624	0.217	0.202	0.001	38.562	0.379	

㉤ 응력검토

㉡ 허용휨인장응력(f_{ta})【표 5.96】 백운1교(부산) 브레이싱 허용휨인장응력(f_{ta})

단위 : MPa

구 분	SM400	
Top Flange	40 이하	140.000
Bottom Flange	40 이하	140.000
Left Web	40 이하	140.000

⑤ 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

• y축에 대한 유효좌굴길이

$$\text{부재의 유효좌굴길이} : \ell_y = 5,000.000 \text{ mm}$$

$$\text{부재 종단면의 단면회전반경} : r_y = 130.735 \text{ mm}$$

$$\text{세장비} : \ell_y/r_y = 38.245$$

• z축에 대한 유효좌굴길이

$$\text{부재의 유효좌굴길이} : \ell_z = 5,000.000 \text{ mm}$$

$$\text{부재 종단면의 단면회전반경} : r_z = 73.910 \text{ mm}$$

$$\text{세장비} : \ell_z/r_z = 67.650$$

• 세장비 검토

$$\text{세장비} : \ell/r = 67.650 \leq 200.000 \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.97】 백운1교(부산) 브레이싱 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(fca)

단위 : MPa

구 분	SM400	
Top Flange	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 99.779$
Bottom Flange	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 99.779$
Left Web	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 99.779$
Top Flange	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{cay} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 123.891$
Bottom Flange	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{cay} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 123.891$
Left Web	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{cay} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 123.891$

㉔ 허용휨압축응력(fbagy)

• Top Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5,000.000 \text{ mm}$ - 압축플랜지 폭 : $b = 300.000 \text{ mm}$ - 복부판의 총단면적 : $A_w = 2,240.000 \text{ mm}^2$ - 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 3,000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 0.747 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 16.667, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.871$$

【표 5.98】 백운1교(부산) 브레이싱 상부플랜지 허용휨압축응력(fbagy))

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$4.6 < \ell/b \leq 30.0$
		$140 - 2.49 \times (\ell/b - 4.6) = 109.954$

• Bottom Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5,000.000 \text{ mm}$ - 압축플랜지 폭 : $b = 300.000 \text{ mm}$ - 복부판의 총단면적 : $A_w = 2,240.000 \text{ mm}^2$ - 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 3,000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 0.747 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 16.667, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.871$$

【표 5.99】 백운1교(부산) 브레이싱 하부플랜지 허용휨압축응력(fbagy))

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$4.6 < \ell/b \leq 30.0$
		$140 - 2.49 \times (\ell/b - 4.6) = 109.954$

• Left Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 5,000.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 280.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 6,000.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 2,240.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 2.679 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 17.857, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 2.083$$

【표 5.100】 백운1교(부산) 브레이싱 좌측 복부 허용휨압축응력(fb_{ag}y))

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} > 2.0$	40 이하	$9.3/K < \ell/b \leq 30.0$
		$140 - 1.24 \times (K \times \ell/b - 9.3) = 105.406$

㉔ 허용 오일러 좌굴응력

【표 5.101】 백운1교(부산) 브레이싱 허용 오일러 좌굴응력

단위 : MPa

f_{Ey}	$1200000/(I_y/r_y)^2$	3,926.430
f_{Ez}	$1200000/(I_z/r_z)^2$	268.833

㉕ 허용전단응력(v_a)

【표 5.102】 백운1교(부산) 브레이싱 허용전단응력(Va)

단위 : MPa

구 분	SM400	
Top Flange	40 이하	80.000
Bottom Flange	40 이하	80.000
Left Web	40 이하	80.000

㉖ 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력

- 압축응력을 받는 자유돌출판의 최소두께

- Top Flange(L)

$$t_{\min} = b / 16 = 146.0/16.0 = 9.125 \text{ mm} \leq t_f = 10.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Top Flange(R)

$$t_{\min} = b / 16 = 146.0/16.0 = 9.125 \text{ mm} \leq t_f = 10.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Bottom Flange(L)

$$t_{\min} = b / 16 = 146.0/16.0 = 9.125 \text{ mm} \leq t_f = 10.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Bottom Flange(R)

$$t_{\min} = b / 16 = 195.0/16.0 = 9.125 \text{ mm} \leq t_f = 10.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

- Top Flange(L)

$$t = 10.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 16.0 = 146.0/16.0 = 9.125 \text{ mm}$$

$$t_2 = b / 12.9 = 146.0/12.9 = 11.318 \text{ mm}$$

【표 5.103】 백운1교(부산) 브레이싱 자유돌출판(Top Flange(L))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/16.0 \leq t < b/12.9$
	$24,000 \times (t / b)^2 = 112.591$

- Top Flange(R)

$$t = 10.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 16.0 = 146.0/16.0 = 9.125 \text{ mm}$$

$$t_2 = b / 12.9 = 146.0/12.9 = 11.318 \text{ mm}$$

【표 5.104】 백운1교(부산) 브레이싱 자유돌출판(Top Flange(R))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/16.0 \leq t < b/12.9$
	$24,000 \times (t / b)^2 = 112.591$

- Bottom Flange(L)

$$t = 10.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 16.0 = 146.0/16.0 = 9.125 \text{ mm}$$

$$t_2 = b / 12.9 = 146.0/12.9 = 11.318 \text{ mm}$$

【표 5.105】 백운1교(부산) 브레이싱 자유돌출판(Bottom Flange(L))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

- Bottom Flange(R)

$$t = 10.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 16.0 = 146.0/16.0 = 9.125 \text{ mm}$$

$$t_2 = b / 12.9 = 146.0/12.9 = 11.318 \text{ mm}$$

【표 5.106】 백운1교(부산) 브레이싱 자유돌출판(Bottom Flange(R))의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/10.5 \leq t$
	215.000

㉔ 보강된 판 및 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력

• Left Web

- 판의 양연에서의 응력 : $f_1 = 19.732 \text{ MPa}$, $f_2 = -7.133 \text{ MPa}$

- 판의 양연에서의 응력이 인장이므로, 압축응력을 받는 양연지지판 검토에서 제외

【표 5.107】 백운1교(부산) 브레이싱 양연지지판(Left Web)의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/80.0i \leq t < b/32.i$
	$220,000 \times (t_i / b)^2 = 195.018$

㉕ 허용응력 요약

【표 5.108】 백운1교(부산) 브레이싱 허용응력 요약

구 분	fta	fcaz	fcay	fbagy	Va	fcal
Top Flange	140.000	99.779	123.891	109.954	80.000	112.591
Bottom Flange	140.000	99.779	123.891	109.954	80.000	112.591
Left Web	140.000	99.779	123.891	105.406	80.000	195.018

여기서, $f_{ca} = f_{cag} \cdot f_{cal} / f_{cao}$

① 축방향력 및 휨모멘트를 받는 부재의 허용응력 검토

- 축방향력에 의한 응력

$$f_c = P / A = 322.624 \times 10^3 / 8.2400 \times 10^3 = 39.153 \text{ MPa}$$

- 휨모멘트에 의한 응력

$$f_{by1} = M_y \times Z_1 / I_{yy} = -41.072 \text{ MPa}, \quad f_{bz1} = M_z \times y_1 / I_{zz} = 1.263 \text{ MPa}$$

$$f_{by2} = M_y \times Z_2 / I_{yy} = -41.072 \text{ MPa}, \quad f_{bz2} = M_z \times y_2 / I_{zz} = -1.263 \text{ MPa}$$

$$f_{by3} = M_y \times Z_3 / I_{yy} = 41.072 \text{ MPa}, \quad f_{bz3} = M_z \times y_3 / I_{zz} = -1.263 \text{ MPa}$$

$$f_{by4} = M_y \times Z_4 / I_{yy} = 41.072 \text{ MPa}, \quad f_{bz4} = M_z \times y_4 / I_{zz} = 1.263 \text{ MPa}$$

- Position 1(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$39.153 + (-41.072) + 1.263 = -0.655 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 112.591 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{39.153}{140.000} + \frac{-41.072}{109.954} + \frac{1.263}{140.000} = -0.085 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 2(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$39.153 + (-41.072) + (-1.263) = -3.182 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 112.591 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{39.153}{140.000} + \frac{-41.072}{109.954} + \frac{-1.263}{140.000} = -0.103 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$39.153 + (-41.072) + (-1.263) = 78.962 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$39.153 + 41.072 + 1.263 = 81.489 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 1(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$39.153 + 1.263 + (-41.072) = -0.655 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 112.591 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{39.153}{140.000} + \frac{1.263}{105.406} + \frac{-41.072}{140.000} = -0.002 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 2(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$39.153 + (-1.263) + (-41.072) = -3.182 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 112.591 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{39.153}{140.000} + \frac{-1.263}{105.406} + \frac{-41.072}{140.000} = -0.026 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 3(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$39.153 + (-1.263) + 41.072 = 78.962 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 4(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$39.153 + 1.263 + 41.072 = 81.489 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

① 전단응력에 대한 검토

$$v_z = F_z / A_w + M_x \times t / K$$

$$= 0.202 \times 10^3 / 2,400.000 + 0.001 \times 10^6 \times 8.000\text{E}+00 / 2.4949\text{E}+05$$

$$= 0.121 \text{ MPa} \leq v_a = 80.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$v_y = F_y / A_f + M_x \times t / K$$

$$= 0.217 \times 10^3 / 4,000.000 + 0.001 \times 10^6 \times 1.000\text{E}+01 / 2.4949\text{E}+05$$

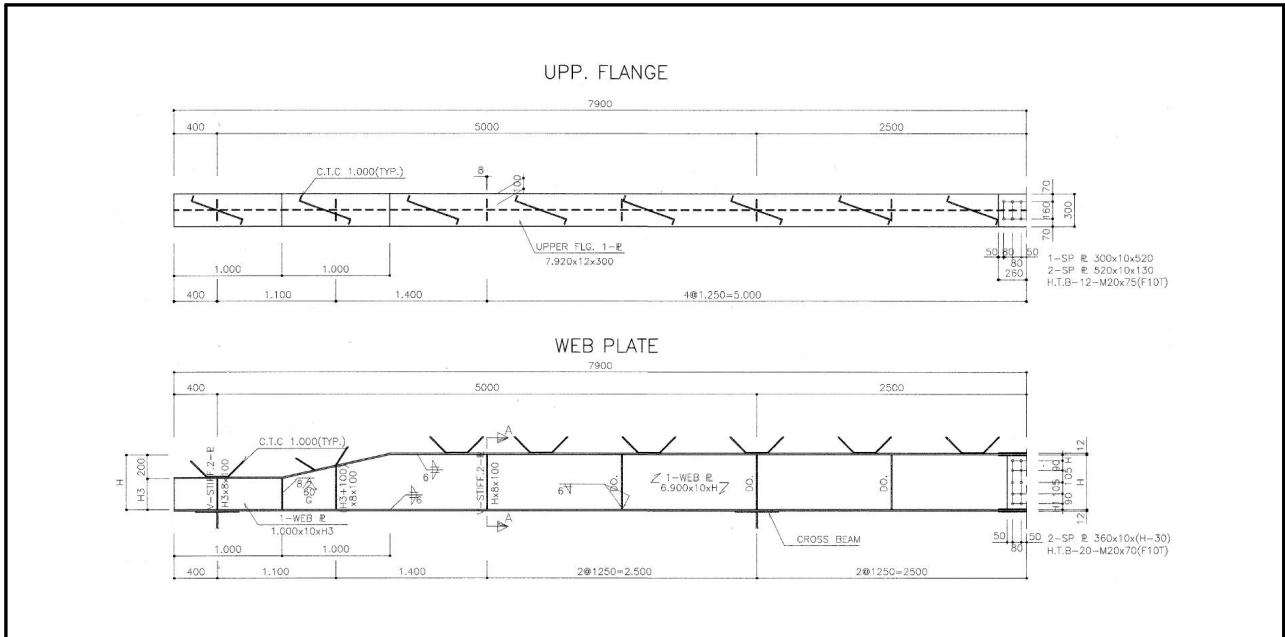
$$= 0.101 \text{ MPa} \leq v_a = 80.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

② 합성응력에 대한 검토

$$\left(\frac{f_b}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{v_b}{v_a}\right)^2 = \left(\frac{-42.335}{140.000}\right)^2 + \left(\frac{0.121}{80.000}\right)^2 = 0.091 < 1.200 \quad \therefore \text{OK}$$

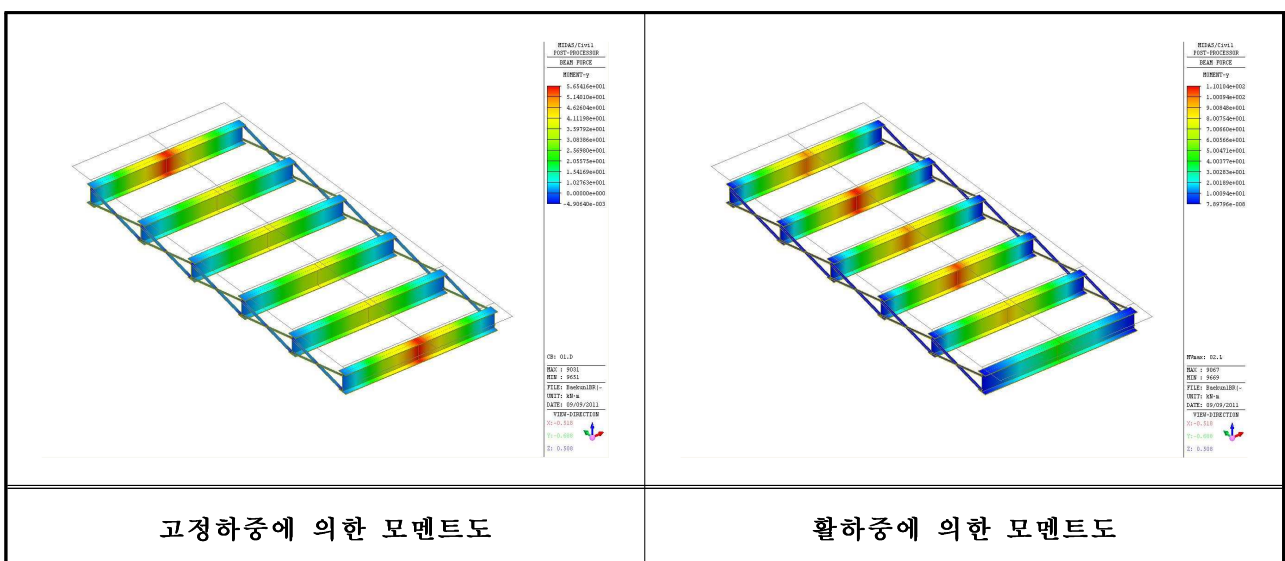
⑩ 세로보 응력 검토

바닥판과 세로보의 연결은 전단연결재가 1.0m간격으로 배치되어 있어 합성효과를 일부 발휘할 것으로 판단되나 기본적으로 비합성구조로 설계된 교량이므로 구조해석 시 이를 고려하여 안전측의 비합성 구조로 검토하였다. 또한 설계 시 세로보를 단순보로 가정하여 계산하였으므로 본 과업에서도 안전측의 검토가 되도록 단순보로 취급하였으며 바닥판과는 비합성 구조로 검토하였다.



【그림 5.16】 백운1교(부산) 세로보 전단연결재 배치도

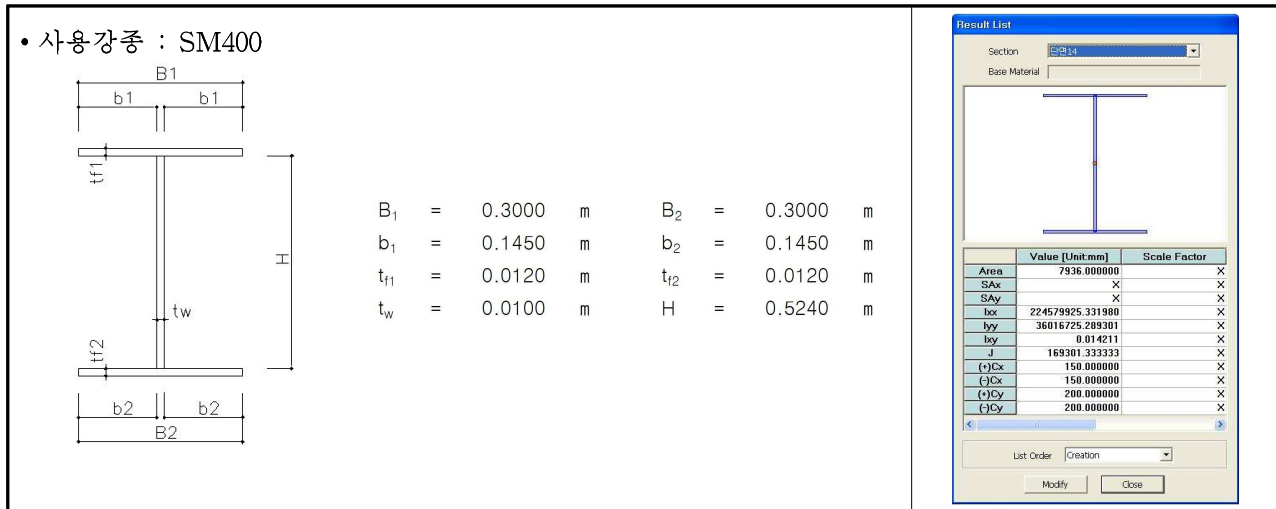
㉠ 단면력 산출



【그림 5.17】 백운1교(부산) 세로보 하중조건별 단면력도

㉞ 검토 조건

㉠ 단면 조건



【그림 5.18】 백운1교(부산) 세로보 단면조건

㉡ 부호규약

(+) : 인장, (-) : 압축

㉢ 적용 사용하중

【표 5.109】 백운1교(부산) 세로보 적용 사용하중

구 분	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN.m)	M_y (kN.m)	M_z (kN.m)	비 고
LCS1	-	-	106.975	0.007	98.187	-	Min Fz

㉤ 응력검토

㉠ 허용휨인장응력(f_t)【표 5.110】 백운1교(부산) 세로보 허용휨인장응력(f_t)

단위 : MPa

구 분	SM400	
Top Flange	40 이하	140.000
Bottom Flange	40 이하	140.000
Left Web	40 이하	140.000

⑥ 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(f_{ca})

• y축에 대한 유효좌굴길이

$$\text{- 부재의 유효좌굴길이} : \ell_y = 2,500.000 \text{ mm}$$

$$\text{- 부재 종단면의 단면회전반경} : r_y = 217.307 \text{ mm}$$

$$\text{- 세장비} : \ell_y/r_y = 11.504$$

• z축에 대한 유효좌굴길이

$$\text{- 부재의 유효좌굴길이} : \ell_z = 2,500.000 \text{ mm}$$

$$\text{- 부재 종단면의 단면회전반경} : r_z = 66.556 \text{ mm}$$

$$\text{- 세장비} : \ell_z/r_z = 37.563$$

• 세장비 검토

$$\text{- 세장비} : \ell/r = 37.563 \leq 200.000 \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.111】 백운1교(부산) 세로보 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(f_{ca})

단위 : MPa

구 분		SM400
Top Flange	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 124.451$
Bottom Flange	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 124.451$
Left Web	40 이하	$18.6 < \ell/r \leq 92.8$
		$F_{caz} = 140 - 0.82 \times (\ell/r - 18.6) = 124.451$
Top Flange	40 이하	$\ell/r \leq 18.6$
		$F_{cay} = 140.000$
Bottom Flange	40 이하	$\ell/r \leq 18.6$
		$F_{cay} = 140.000$
Left Web	40 이하	$\ell/r \leq 18.6$
		$F_{cay} = 140.000$

㉔ 허용휨압축응력(fb_{agy})

• Top Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 2,500.000 \text{ mm}$ - 압축플랜지 폭 : $b = 300.000 \text{ mm}$ - 복부판의 총단면적 : $A_w = 5,000.000 \text{ mm}^2$ - 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 3,600.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 1.389 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 8.333, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.922$$

【표 5.112】 백운1교(부산) 세로보 상부플랜지 허용휨압축응력(fb_{agy})

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$4.6 < \ell/b \leq 30.0$
		$140 - 2.49 \times (\ell/b - 4.6) = 130.704$

• Bottom Flange

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 2,500.000 \text{ mm}$ - 압축플랜지 폭 : $b = 300.000 \text{ mm}$ - 복부판의 총단면적 : $A_w = 5,000.000 \text{ mm}^2$ - 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 3,600.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 0.747 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 16.667, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.871$$

【표 5.113】 백운1교(부산) 세로보 하부플랜지 허용휨압축응력(fb_{agy})

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$4.6 < \ell/b \leq 30.0$
		$140 - 2.49 \times (\ell/b - 4.6) = 130.704$

• Left Web

- 압축플랜지 고정점간 거리 : $\ell = 2,500.000 \text{ mm}$
- 압축플랜지 폭 : $b = 500.000 \text{ mm}$
- 복부판의 총단면적 : $A_w = 7,200.000 \text{ mm}^2$
- 압축플랜지 총단면적 : $A_c = 5,000.000 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_w}{A_c} = 1.440 > 2.000, \quad \frac{\ell}{b} = 5.000, \quad K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} = 1.929$$

【표 5.114】 백운1교(부산) 세로보 좌측 복부 허용휨압축응력(fbagy))

단위 : MPa

구 분		SM400
$\frac{A_w}{A_c} \leq 2.0$	40 이하	$4.6 < \ell/b \leq 30.0$
		$140 - 2.49 \times (\ell/b - 4.6) = 139.004$

㉔ 허용 오일러 좌굴응력

【표 5.115】 백운1교(부산) 세로보 허용 오일러 좌굴응력

단위 : MPa

f_{Ey}	$1200000/(I_y/r_y)^2$	9,066.685
f_{Ez}	$1200000/(I_z/r_z)^2$	850.492

㉕ 허용전단응력(Va)

【표 5.116】 백운1교(부산) 세로보 허용전단응력(Va)

단위 : MPa

구 분	SM400	
Top Flange	40 이하	80.000
Bottom Flange	40 이하	80.000
Left Web	40 이하	80.000

㉖ 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력

- 압축응력을 받는 자유돌출판의 최소두께

- Top Flange(L)

$$t_{\min} = b / 16 = 145.0/16.0 = 9.063 \text{ mm} \leq t_f = 12.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Top Flange(R)

$$t_{\min} = b / 16 = 145.0/16.0 = 9.063 \text{ mm} \leq t_f = 12.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Bottom Flange(L)

$$t_{\min} = b / 16 = 145.0/16.0 = 9.063 \text{ mm} \leq t_f = 12.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- Bottom Flange(R)

$$t_{\min} = b / 16 = 195.0/16.0 = 9.063 \text{ mm} \leq t_f = 12.000 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

- 자유돌출판의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

- Top Flange(L)

$$t = 12.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 12.9 = 145.0/12.9 = 11.240 \text{ mm}$$

【표 5.117】 백운1교(부산) 세로보 자유돌출판(Top Flange(L))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/12.9 \leq t$
	140.000

- Top Flange(R)

$$t = 12.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 12.9 = 146.0/12.9 = 11.240 \text{ mm}$$

【표 5.118】 백운1교(부산) 세로보 자유돌출판(Top Flange(R))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/12.9 \leq t$
	140.000

- Bottom Flange(L)

$$t = 12.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 12.9 = 146.0/12.9 = 11.240 \text{ mm}$$

【표 5.119】 백운1교(부산) 세로보 자유돌출판(Bottom Flange(L))의 국부좌굴에 대한 허용응력(f_{cal})

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/12.9 \leq t$
	140.000

- Bottom Flange(R)

$$t = 12.000 \text{ mm}$$

$$t_1 = b / 12.9 = 145.0/12.9 = 11.240 \text{ mm}$$

【표 5.120】 백운1교(부산) 세로보 자유돌출판(Bottom Flange(R))의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/12.9 \leq t$
	140.000

㉔ 보강된 판 및 양연지지판의 국부좌굴에 대한 허용응력

• Left Web

- 판두께 : $t = 10.0 \text{ mm}$

- 판의 고정연 사이의 거리 : $b = 500.0 \text{ mm}$

- 응력구배계수 : $i = 0.65 \phi^2 + 0.13 \phi + 1.0 = 3.860$

- 응력구배 : $\phi = (f_1 - f_2) / f_1 = 2.000$

- 판의 양연에서의 응력 : $f_1 = 42.608 \text{ MPa}$, $f_2 = -42.608 \text{ MPa}$

- 압축응력을 받는 보강된 판의 최소두께

$$t \leq 40\text{mm}$$

$$t_{\min} = b / 56i = 500/216.200 = 2.3 \leq t = 10.0 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK}$$

【표 5.121】 백운1교(부산) 세로보 양연지지판(Left Web)의 국부좌굴에 대한 허용응력(fcal)

단위 : MPa

구 분	SM400
40 이하	$b/39..i \leq t$
	140.000

㉕ 허용응력 요약

【표 5.122】 백운1교(부산) 세로보 허용응력 요약

구 분	fta	fcaz	fcay	fbagy	Va	fcal
Top Flange	140.000	124.451	140.000	130.704	80.000	140.000
Bottom Flange	140.000	124.451	140.000	130.704	80.000	140.000
Left Web	140.000	124.451	140.000	139.004	80.000	140.000

여기서, $f_{ca} = f_{cag} \cdot f_{cal} / f_{cao}$

① 축방향력 및 휨모멘트를 받는 부재의 허용응력 검토

- 축방향력에 의한 응력

$$f_c = P / A = 0.000 \times 10^3 / 8.2400E+03 = 0.000 \text{ MPa}$$

- 휨모멘트에 의한 응력

$$f_{by1} = M_y \times Z_1 / I_{yy} = -44.653 \text{ MPa}, \quad f_{bz1} = M_z \times y_1 / I_{zz} = 0.000 \text{ MPa}$$

$$f_{by2} = M_y \times Z_2 / I_{yy} = -44.653 \text{ MPa}, \quad f_{bz2} = M_z \times y_2 / I_{zz} = 0.000 \text{ MPa}$$

$$f_{by3} = M_y \times Z_3 / I_{yy} = 44.653 \text{ MPa}, \quad f_{bz3} = M_z \times y_3 / I_{zz} = 0.000 \text{ MPa}$$

$$f_{by4} = M_y \times Z_4 / I_{yy} = 44.653 \text{ MPa}, \quad f_{bz4} = M_z \times y_4 / I_{zz} = 0.000 \text{ MPa}$$

- Position 1(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$0.000 + (-44.653) + 0.000 = -44.653 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{0.000}{140.000} + \frac{-44.653}{130.704} + \frac{0.000}{140.000} = -0.342 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 2(y-direction) 응력 검토

$$-f_t + f_{bcy} + f_{bcz} \leq f_{cal}$$

$$0.000 + (-44.653) + 0.000 = -44.653 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{0.000}{140.000} + \frac{-44.653}{130.704} + \frac{-1.263}{140.000} = -0.342 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 3(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$0.000 + 44.653 + 0.000 = 44.653 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 4(y-direction) 응력 검토

$$f_t + f_{bty} + f_{btz} \leq f_{ta}$$

$$0.000 + 44.653 + 0.000 = 44.653 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

- Position 1(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$0.000 + 0.000 + (-44.653) = -44.653 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{0.000}{140.000} + \frac{0.000}{139.004} + \frac{-44.653}{140.000} = -0.319 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 2(z-direction)

$$-f_t + f_{bcz} + f_{bcy} \leq f_{cal}$$

$$0.000 + 0.000 + (-44.653) = -44.653 \text{ MPa} \leq f_{cal} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$-\frac{f_t}{f_{ta}} + \frac{f_{bcz}}{f_{bagy}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bao}} \leq 1.0$$

$$\frac{0.000}{140.000} + \frac{0.000}{139.004} + \frac{-44.653}{140.000} = -0.319 \leq 1.000 \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 3(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$0.000 + 0.000 + 44.653 = 44.653 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

• Position 4(z-direction)

$$f_t + f_{btz} + f_{bty} \leq f_{ta}$$

$$0.000 + 0.000 + 44.653 = 44.653 \text{ MPa} \leq f_{ta} = 140.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

① 전단응력에 대한 검토

$$v_z = F_z / A_w + M_x \times t / K$$

$$= 106.975 \times 10^3 / 5,240.000 + 0.007 \times 10^6 \times 1.000\text{E}+01 / 5.1627\text{E}+05$$

$$= 20.556 \text{ MPa} \leq v_a = 80.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$v_y = F_y / A_f + M_x \times t / K$$

$$= 0.000 \times 10^3 / 4,800.000 + 0.007 \times 10^6 \times 1.200\text{E}+01 / 5.1627\text{E}+05$$

$$= 0.169 \text{ MPa} \leq v_a = 80.000 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

② 합성응력에 대한 검토

$$\left(\frac{f_b}{f_a} \right)^2 + \left(\frac{v_b}{v_a} \right)^2 = \left(\frac{-44.653}{140.000} \right)^2 + \left(\frac{20.556}{80.000} \right)^2 = 0.168 < 1.200 \quad \therefore \text{OK}$$

3) 피로응력 검토

① 검토 조건

㉠ 응력반복 회수

【표 5.123】 백운1교(부산) 도로종류에 따른 응력반복횟수

도로의 종류	DB-24	DL-24	비 고
고속도로, 국도등 주간선도로	200만	50만	적용
기타도로	50만	10만	

㉡ 응력의 종류 및 범주

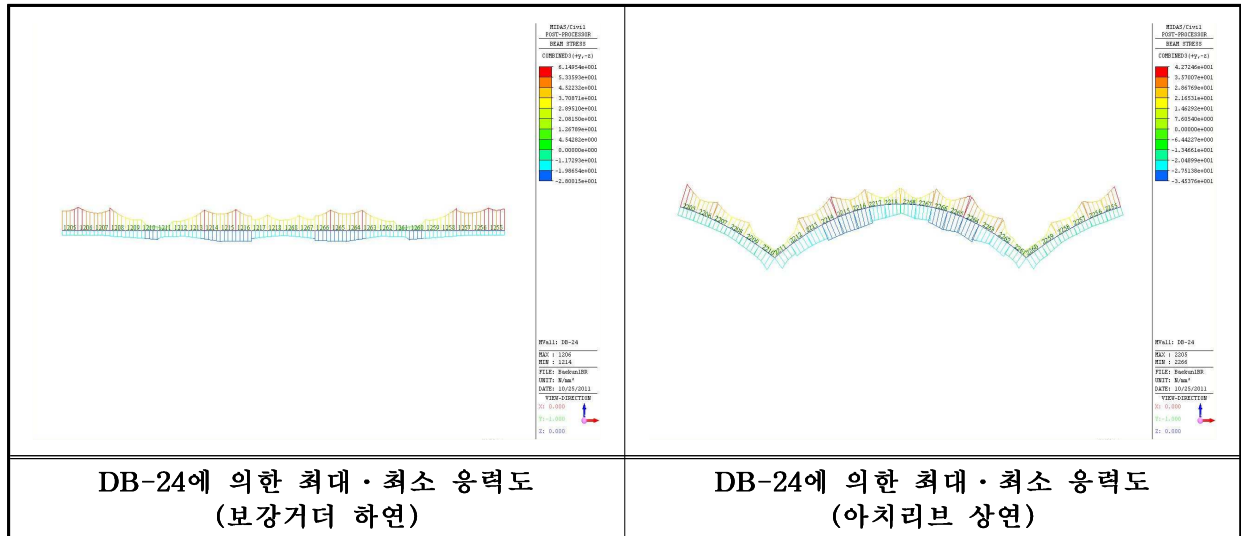
- 조 립 부 재 : 응력방향에 평행한 완전 연속 용입흡용접
- 흡용접 이음 : 용접부를 응력방향으로 연마하고 비파괴 시험을 실시한 완전용입 흡용접을 한 이음부나 그 인접부의 모재와 용접금속
- 응 력 범 주 : B

㉢ 허용피로응력 범위

【표 5.124】 백운1교(부산) 허용피로응력범위

재하경로	상세범주	허용피로응력범위 fsr(MPa)				비 고
		10만회	50만회	200만회	200만회이상	
단재하경로 구 조 물	A	351	203	168	168	
	B	274	161	112	112	적용
	B'	218	126	77	77	
	C	196	112	70	63	

② 피로응력 검토



【그림 5.19】 백운1교(부산) 활하중에 의한 최대 · 최소 응력도

㉠ 보강거더

㉠ DB-24 재하 시

- $\Delta f_{su} = 28.483 - (-49.719) = 78.202 \text{ MPa} < f_{sr} = 112.0 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$
- $\Delta f_{sl} = 54.970 - (-26.528) = 81.498 \text{ MPa} < f_{sr} = 112.0 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$

㉠ DL-24 재하 시

- $\Delta f_{su} = 55.881 - (-54.857) = 110.738 \text{ MPa} < f_{sr} = 161.0 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$
- $\Delta f_{sl} = 65.577 - (-36.485) = 102.062 \text{ MPa} < f_{sr} = 161.0 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$

㉠ 아치리브

㉠ DB-24 재하 시

- $\Delta f_{su} = 18.163 - (-57.650) = 75.813 \text{ MPa} < f_{sr} = 112.0 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$
- $\Delta f_{sl} = 39.389 - (-31.315) = 70.704 \text{ MPa} < f_{sr} = 112.0 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$

㉠ DL-24 재하 시

- $\Delta f_{su} = 32.278 - (-65.754) = 98.032 \text{ MPa} < f_{sr} = 161.0 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$
- $\Delta f_{sl} = 54.259 - (-61.378) = 115.637 \text{ MPa} < f_{sr} = 161.0 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$

4) 바닥판 검토

본 교량의 콘크리트 바닥판에 대한 안전성 평가는 도로교설계기준에 따라 강도설계법으로 검토하였으며, 세부 검토 과정은 다음과 같다.

① 바닥판 검토

㉠ 하중 산정

a) 캔틸레버부

- 고정하중

【표 5.125】 백운1교(부산) 고정하중 산정 결과(단위폭당)

NO.	작용하중(kN)	거리(m)	모멘트(kN·m)	
①	$0.23 \times 0.7 \times 25.0 = 4.025$	0.580	2.335	
②	$0.5 \times 0.07 \times 0.7 \times 25.0 = 0.613$	0.442	0.271	
③	$0.3 \times 0.38 \times 25.0 = 2.850$	0.545	1.553	
④	$0.5 \times 0.12 \times 0.175 \times 25.0 = 0.263$	0.355	0.093	
⑤	$0.12 \times 0.205 \times 25.0 = 0.615$	0.335	0.206	
⑥	$0.65 \times 0.25 \times 25.0 = 4.063$	0.325	1.320	
⑦	$0.5 \times 0.6 \times 0.05 \times 25.0 = 0.375$	0.250	0.094	
⑧	$0.05 \times 0.05 \times 25.0 = 0.063$	0.025	0.002	
⑨	$0.075 \times 0.3 \times 25.0 = 0.563$	0.038	0.021	
⑩	$0.275 \times 0.08 \times 23.0 = 0.506$	0.138	0.070	
계	13.936		5.965	

• 설계활하중

설계활하중은 【표 5.125】에 나타난 바와 같이 검토 단면에 영향을 주지 않으므로 캔틸레버 검토 시에는 이를 제외하였다.

• 차량충돌하중

- 수평충돌력 H가 노면상 1m 높이에 교축을 따라 1m마다 작용 시

$$H = \left(\frac{v}{60} \right)^2 \times 7500 + 2500 = \left(\frac{100}{60} \right)^2 \times 7500 + 2500 = 23333.333 \text{ N/m} = 23.333 \text{ kN/m}$$

$$M_{col} = H \times h = 23.333 \times 1.08 = 25.200 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

여기서, $V(\text{설계속도}) = 100 \text{ km/h}$

$$h(\text{작용높이}) = 1.0 + 0.08(\text{포장두께}) = 1.08 \text{ m}$$

- 방호벽 상단에 횡방향으로 $H = 10 \text{ kN/m}$ 의 수평하중이 작용 시

$$M_{co2} = H \times h = 10 \times 1.08 = 10.800 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$$M_{co} = \text{Max}[M_{co1}, M_{co2}] = 25.200 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$\Rightarrow$ 곡선반경이 $R > 200 \text{ m}$ 이므로 M_{co1} 과 M_{co2} 중에서 최대값 적용

• 풍하중

$$P_w = 3.00 \times 1.0 = 3.000 \text{ kN/m}$$

$$M_w = 3.00 \times 0.58 = 1.740 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

⑥ 중앙부

• 고정하중

$$\text{바닥판} : 0.25 \times 25.0 = 6.25 \text{ kN/m}$$

$$\text{아스콘포장} : 0.08 \times 23.5 = 1.880 \text{ kN/m}$$

$$M_d = \frac{wL^2}{10} = \frac{(6.25 + 1.88) \times 2.2^2}{10} = 3.935 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

• 설계활하중(DB-24 : $P_r = 96 \text{ kN}$)

$$i = \frac{15}{(40 + L)} = \frac{15}{(40 + 2.2)} = 0.355 > 0.3 \quad \therefore i = 0.3 \text{ 적용}$$

$$M_{l+i} = \frac{(L + 0.6)P_{24}}{9.6} = \frac{(2.2 + 0.6) \times 96}{9.6} \times 1.3 = 36.400 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$\Rightarrow$ 연속바닥판이므로 $M_{l+i} = 36.4 \times 0.8 = 29.120 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$

【표 5.126】 백운1교(부산) 바닥판 하중 산정 결과

단위:kN · m

구 분	고정하중 (M_d)	활하중 (M_{l+i})	차량충돌하중 (M_{co})	풍하중 (M_w)	비 고
캔틸레버	5.965	-	25.200	1.740	
중 앙 부	3.935	29.120	-	-	

㉞ 단면력 조합

【표 5.127】 백운1교(부산) 하중조합 결과

구 분		적용하중 조합	비 고
캔틸레버	계수하중	LCU1 : 1.2Md + 1.2Mco = 37.398 kN · m	
	사용하중	LCS 1 : Md + Mco = 20.777 kN · m	31.165/1.5
중 앙 부	계수하중	LCU1 : 1.3Md + 2.15MI+i = 67.724 kN · m	
	사용하중	LCS 1 : Md + MI+i = 33.055 kN · m	

㉟ 안전성검토 결과

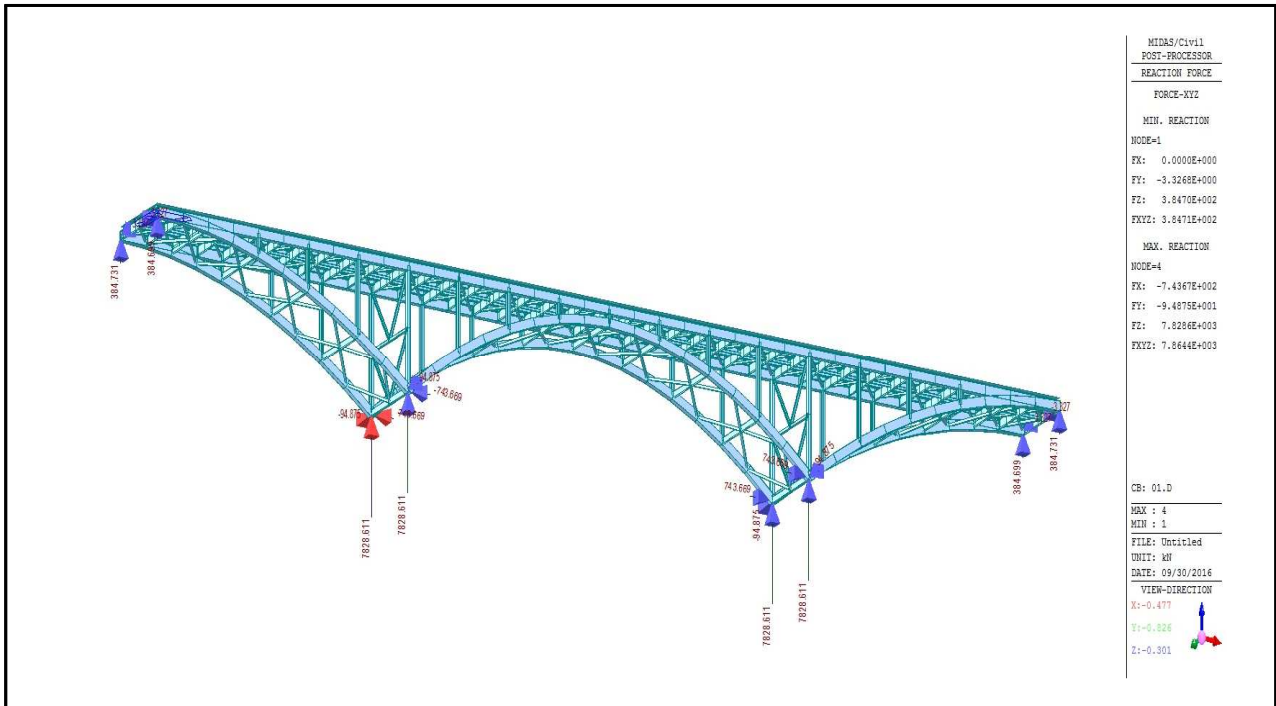
바닥판의 휨강도는 계수하중에 대해서 안전성을 확보하고 있으며, 또한 관련 사용성기준을 만족하는 것으로 나타났다. 단면별 검토 결과를 나타내면 【표 5.128】 과 같다.

【표 5.128】 백운1교(부산) 바닥판 안전성검토 결과

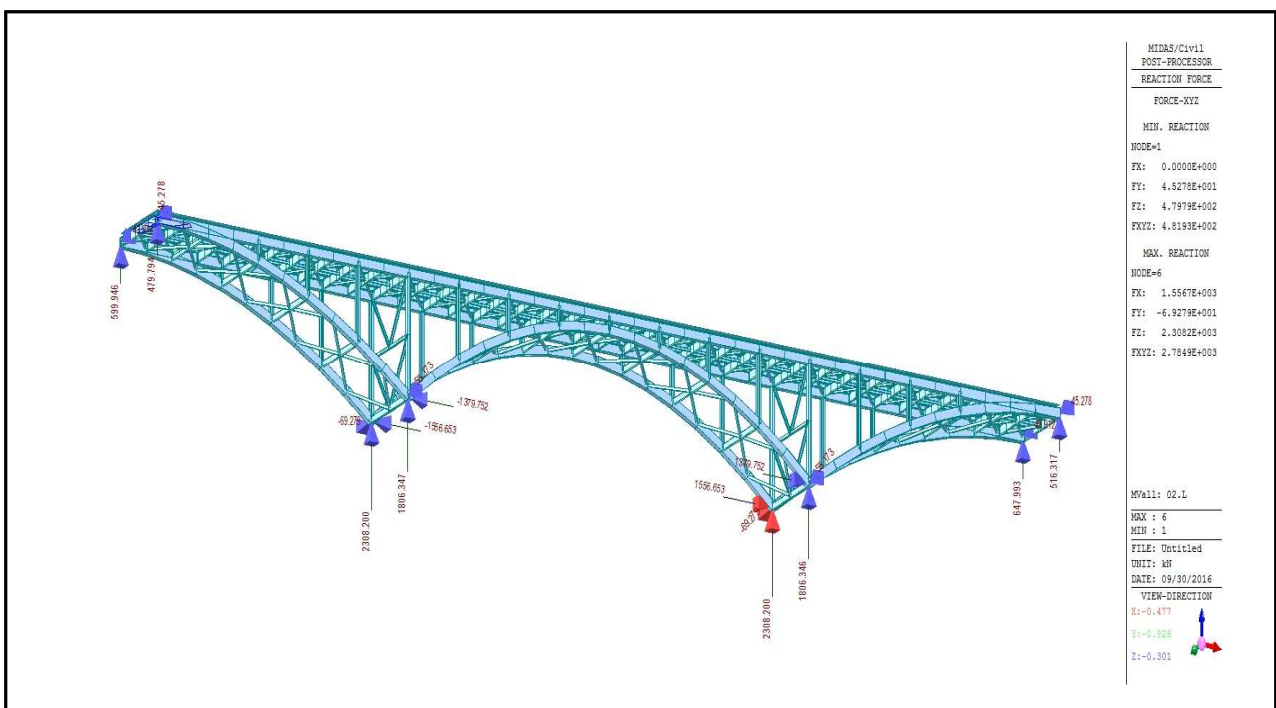
구 분	캔틸레버	중양부	비 고
설계기준강도(fck)	27	27	MPa
인장철근항복강도(fy)	400	400	MPa
단면높이(h)	300	250	mm
사용인장철근(As)	H16@125=1588.8	H16@125=1588.8	mm ²
인장철근중심까지의 거리(dc)	50	40	mm
피복두께(Cc)	42.05	32.05	mm
유효높이(d)	250	210	mm
■ 휨강도 검토			
설계휨강도(φMn)	127.569	105.961	kN · m
계수모멘트(Mu)	37.398	67.724	kN · m
검 토 결 과	OK (SF=3.411)	OK (SF=1.565)	
■ 사용성 검토			
사용모멘트(Ms)	20.777	33.055	kN · m
철근응력(fs)	57.212	109.078	MPa
허용인장철근간격(sa)	1101.175	577.569	mm
검 토 결 과	OK	OK	

5) 교량받침 검토

교량받침의 안전성을 확인하기 위해 하중조건별 반력을 산출하였으며 이를 나타내면 【그림 5.20】 및 【그림 5.21】과 같다. 검토 결과 최대 연직반력은 10116.777kN로 산출되었으며, 전 지점에서 허용반력(교대 : 1500 kN, 교각 : 14000 kN) 이하로 나타났다.



【그림 5.20】 백운1교(부산) 고정하중에 의한 받침반력도



【그림 5.21】 백운1교(부산) 활하중에 의한 받침반력도

【표 5.129】 백운1교(부산) 받침반력 산출 결과

단위:kN

구 분		고정 하중 (D)	활하중 (L)		계		받침 용량	검토 결과
			Max	Min	Max	Min		
A1	Sh1	384.731	479.793	-190.446	864.524	194.285	1,500	OK
	Sh2	384.699	599.944	-197.999	984.643	186.700	1,500	OK
P1	Sh1	7,828.611	1,806.329	-103.904	9,634.940	7,724.707	14,000	OK
	Sh2	7,828.611	2,308.215	-91.040	10,136.826	7,737.571	14,000	OK
P2	Sh1	7,828.611	1,806.329	-103.904	9,634.940	7,724.707	14,000	OK
	Sh2	7,828.611	2,308.215	-91.040	10,136.826	7,737.571	14,000	OK
A2	Sh1	384.699	516.318	-190.446	901.017	194.253	1,500	OK
	Sh2	384.731	647.992	-197.999	1032.723	186.732	1,500	OK

5.2.3 내하력 평가

가. 개 요

- 구조물이 현재 보유하고 있는 실제 내하력 및 안전도를 추정하기 위한 내하력 평가는 유지관리 체계의 핵심이 되는 중요한 분야로서 그 분석 및 평가방법의 합리성과 결과의 신뢰도가 중요한 문제로 된다. 현재 사용되고 있는 교량의 내하력 평가기법은 공용하중에 대한 내하율(Rating Factor)을 구하기 위한 허용응력개념(Working Stress Rating)이나 강도 또는 하중저항계수개념(Load and Resistance Factor Design)에 의한 방법으로 대별될 수 있다.
- 본 구조물은 내하력 평가는 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 따라 허용응력법 및 강도설계법에 따라 검토하였다. 즉, 가로보 및 세로보의 검토는 허용응력법을 적용하고, 바닥판은 강도설계법에 근거하여 수행하였다. 한편, 내하력 평가방법에서 휨과 축방향력을 동시에 받는 부재의 경우는 현재까지 공인된 내하력 평가 방법이 정립되지 않아 주 부재인 보강거더, 아치리브 및 행거에 대한 평가는 본 과업에서 제외하였다.

나. 바닥판

【표 5.130】 백운1교(부산) 바닥판 내하력 평가

구 분		내하율 계산	내하율 (RF)	기본내하력	비 고
강아치교	바닥판	$\frac{105.961 - 1.3 \times 3.935}{2.15 \times 29.120}$	1.611	DB-24이상	강도설계법

다. 거더(Steel-Arch)

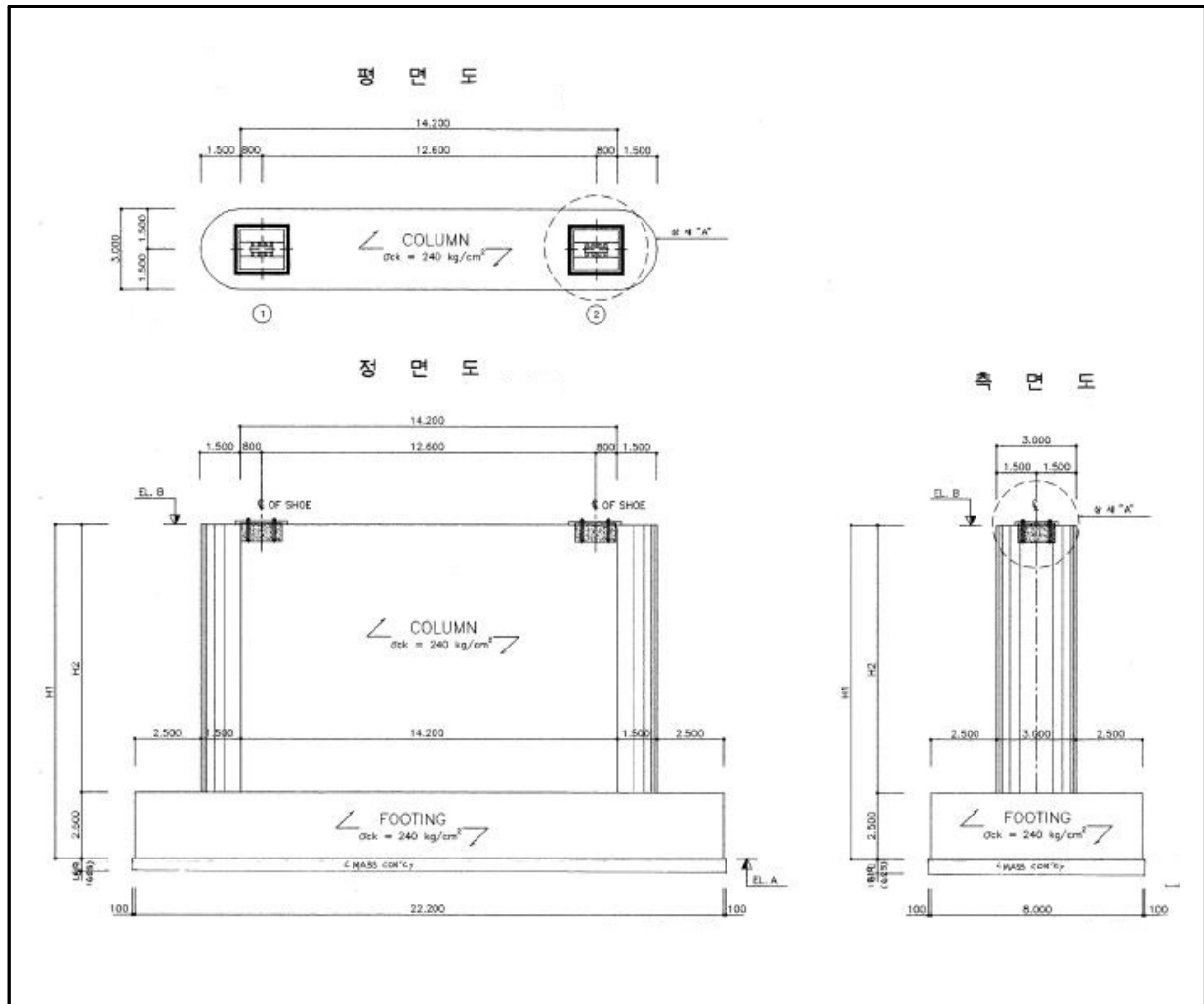
【표 5.131】 백운1교(부산) 거더(Steel-Arch) 내하력 평가

구 분		내하율 계산	내하율 (RF)	기본내하력	비 고
강아치교	가로보	$\frac{140.000 - 48.262}{57.354}$	1.600	DB-24이상	허용응력법
	세로보	$\frac{140.000 - 52.015}{51.933}$	1.694		

5.2.4 하부구조 안전성평가

하부구조에 대한 안전성검토는 예비 구조해석을 수행하여 가장 불리한 단면력 발생이 예상되는 교각1(P1)을 선정하여 수행하였다. 안전성검토시 고려된 하중은 고정하중, 설계활하중(DB-24, DL-24)과 풍하중이며, 해석단면의 제원은 【그림 5.22】에 나타내었다.

가. 검토 단면



【그림 5.22】 백운1교(부산) 하부구조 해석단면 제원(교각 P1)

나. 하중 산정

① 상부하중 산정

【표 5.132】 백운1교(부산) 교각1(P1) 받침반력 산출 결과

단위 : kN

구 분	위 치		Sh 1	Sh 2	비 고
	하 중				
연직반력	고정하중(D)		7,808.562	7,808.562	
	활 하 중 (충격제외)	L1	1,569.882	2,005.914	Max
		L2	-89.550	-78.771	Min
	풍 하 중(W)		1,364.547	-1,364.432	활하중 비재하시
수평반력 (교축방향)	고정하중	D	-741.813	-741.813	
	활 하 중 (충격제외)	L1	1,037.374	1,187.052	Max
		L2	-1,183.335	-1,334.225	Min
	풍 하 중(W)		441.716	-441.971	활하중 비재하시
수평반력 (교축직각방향)	고정하중	D	94.645	-94.645	
	활 하 중 (충격제외)	L1	48.172	30.867	Max
		L2	-37.197	-60.249	Min
	풍 하 중(W)		683.115	710.953	활하중 비재하시

② 하부구조 자중

- $W = 25.0 \text{ kN/m}^3$ (해석프로그램 자중옵션 적용)

③ 풍하중

【표 5.133】 백운1교(부산) 하부구조에 작용하는 단위 풍하중

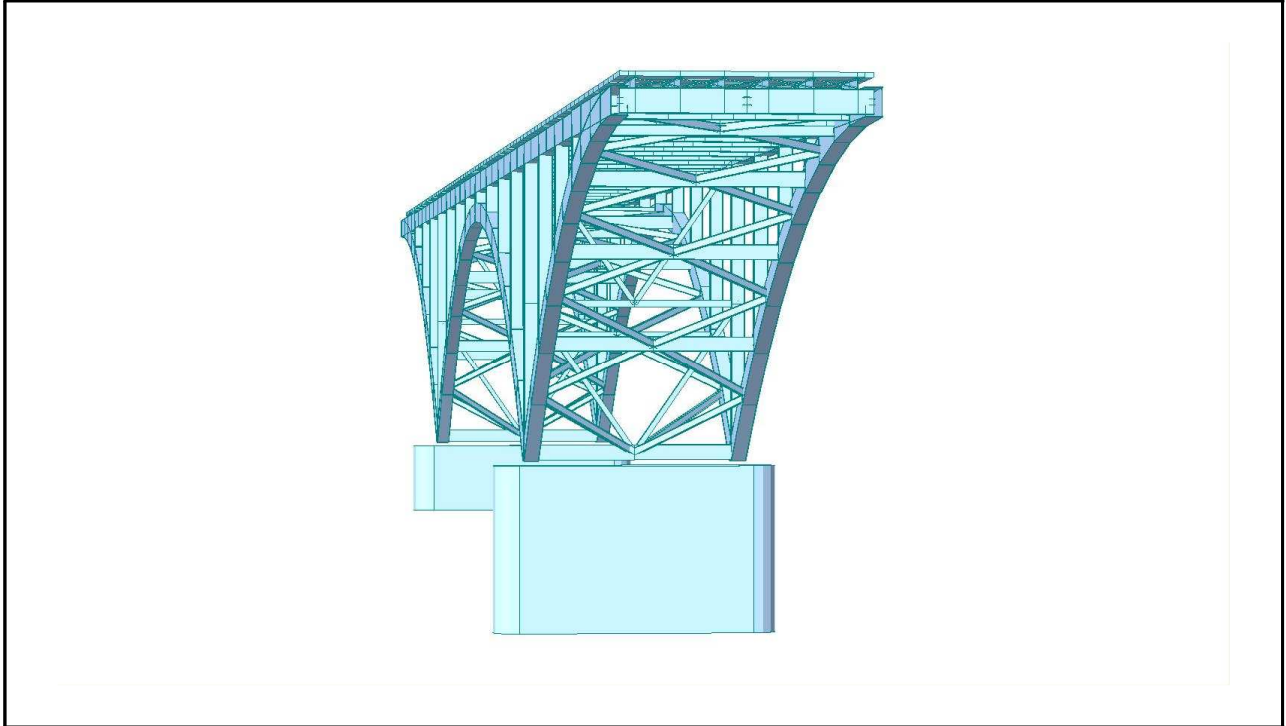
단위 : MPa

구 분		풍하중	비 고
교축방향	활하중 재하 시	1.500×10^{-3}	각 형
	활하중 비재하 시	3.000×10^{-3}	
교축직각방향	활하중 재하 시	0.750×10^{-3}	원 형
	활하중 비재하 시	1.500×10^{-3}	

다. 모델링

1) 해석모델

교각은 보요소를 이용하여 이상화하였으며 적용된 해석모델은 【그림 5.23】 과 같다.



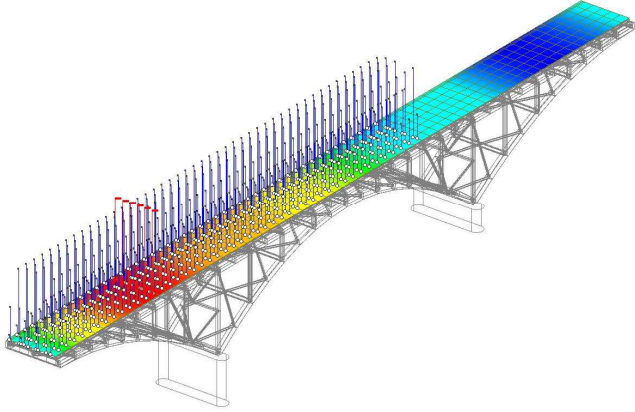
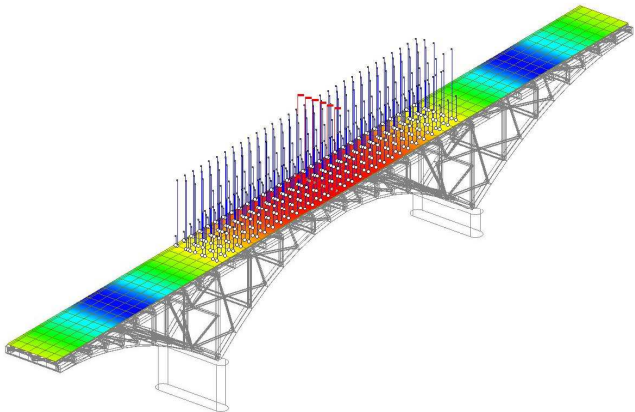
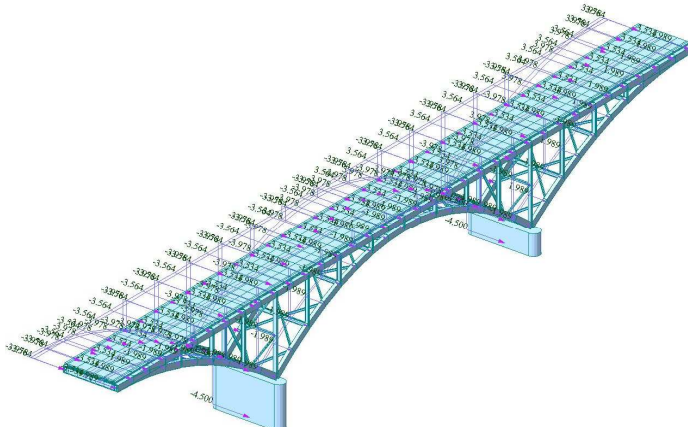
【그림 5.23】 백운1교(부산) 교각 해석모델

2) 하중재하

【표 5.134】 백운1교(부산) 하부구조 하중조건 모델링

구 분	하중조건 모델링	비 고
구조물 자중		

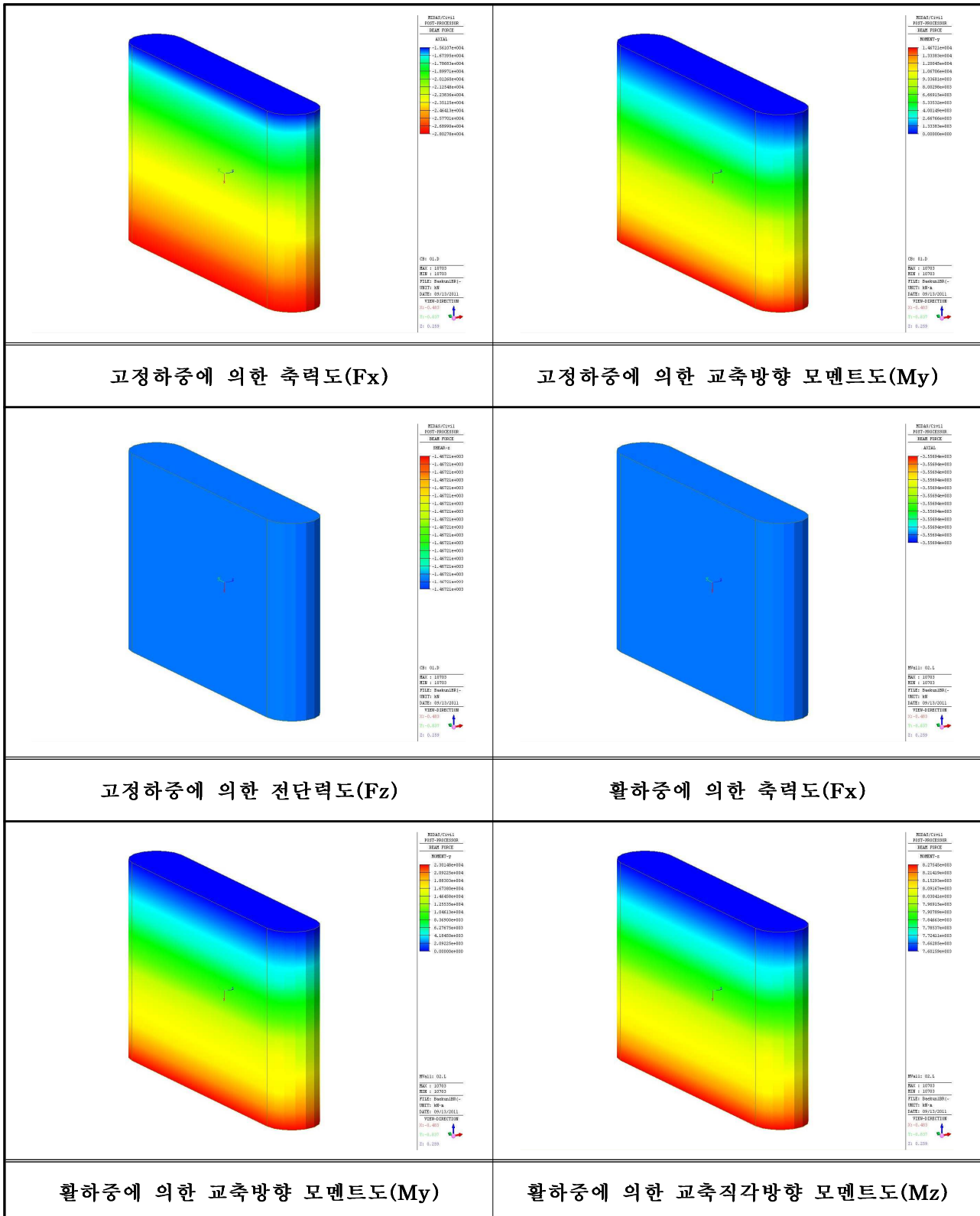
【표 5.134】 백운1교(부산) 하부구조 하중조건 모델링(계속)

구 분	하중조건 모델링	비 고
활 하 중		• 최대 축력 발생 시
		• 최대 모멘트 발생 시 (교축방향)
풍 하 중		• 교축방향 (활하중 비재하 시)

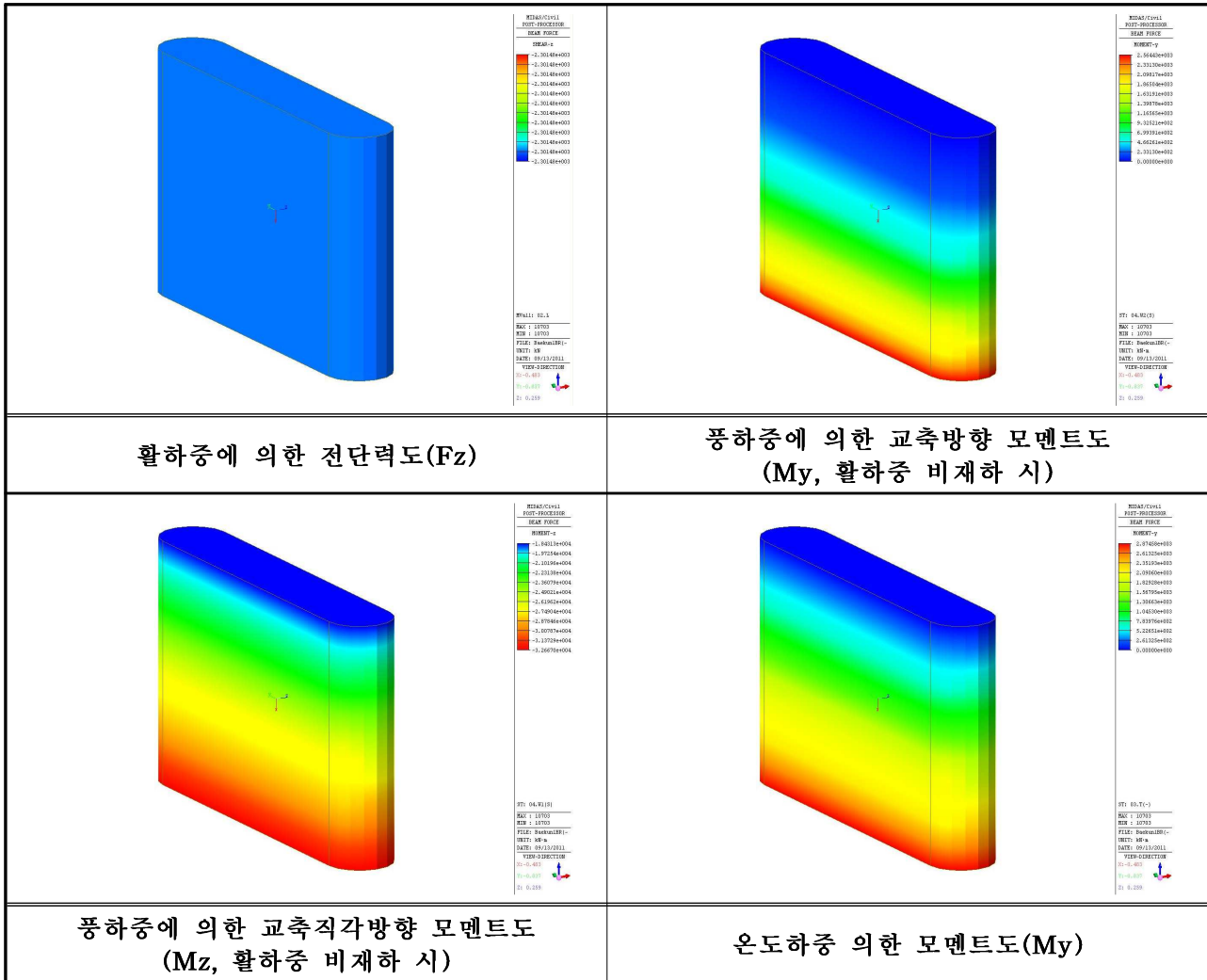
라. 구조해석 결과 및 안전성 검토

1) 해석 결과

① 하중조건별 단면력도



【그림 5.24】 백운1교(부산) 하부구조 하중조건별 단면력도



【그림 5.24】 백운1교(부산) 하부구조 하중조건별 단면력도(계속)

② 하중조건별 단면력 산출

【표 5.135】 백운1교(부산) 하중조건별 단면력 산출 결과

위치		기둥상단			기둥하단		
하중	단면력	축력	휨모멘트 (교축)	휨모멘트 (교축직각)	축력	휨모멘트 (교축)	휨모멘트 (교축직각)
고정 하중(D)		-15610.655	0.000	0.005	-28027.801	14672.137	0.005
활하중(L)	Max	142.538	0.000	7601.593	142.538	23014.756	8275.452
	Min	-3556.936	0.000	-4429.642	-3556.936	-20816.356	-4880.86
풍하중(W)	교축직각	-0.115	0.000	-18431.274	-0.115	2.526	-32667.044
	교축	0.537	0.000	0.000	0.537	2564.434	0.000

2) 적용 하중조합

【표 5.136】 백운1교(부산) 극한강도 검토 시 하중조합 경우

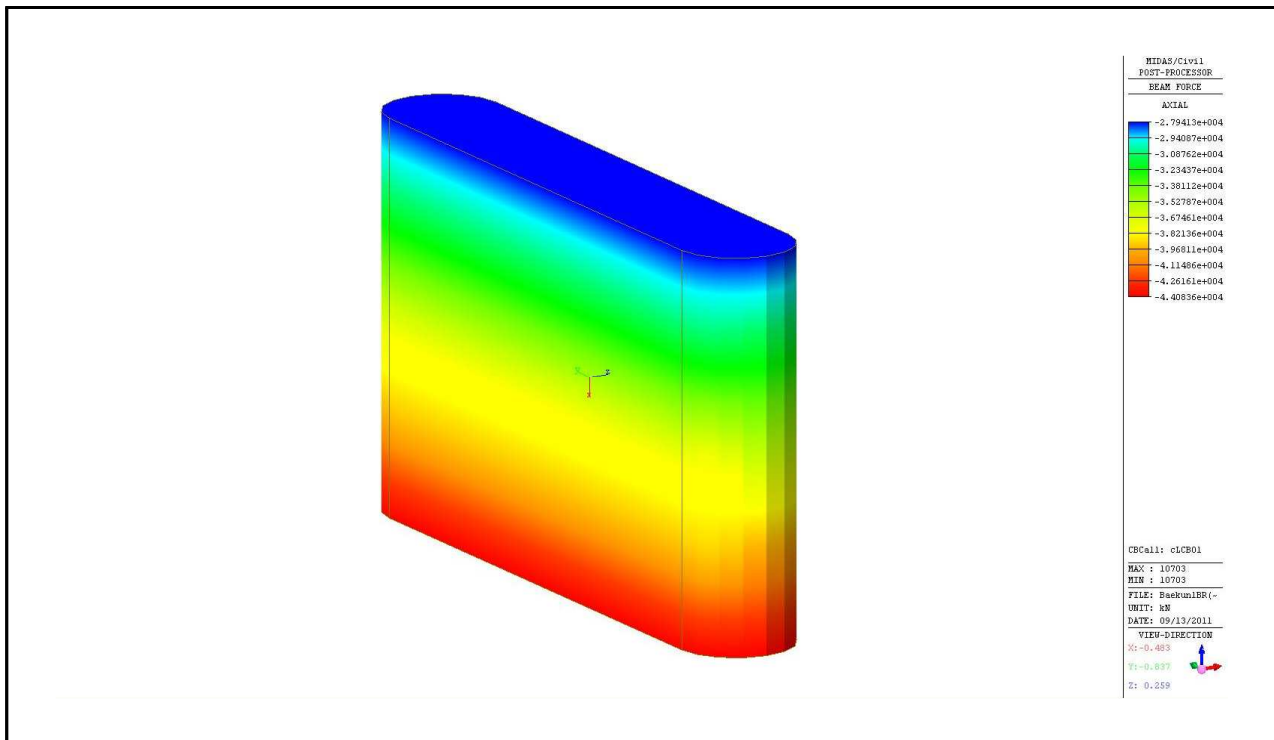
조합경우	하 중 조 합			비 고
	고정하중(D)	활하중(L)	풍하중(W)	
LCU 1	1.30	2.15	-	
LCU 2	1.30	-	1.30	
LCU 3	1.30	1.30	0.65	
LCU 4	1.00	2.15	-	
LCU 5	1.00	-	1.30	
LCU 6	1.00	1.30	0.65	

3) 기둥 검토

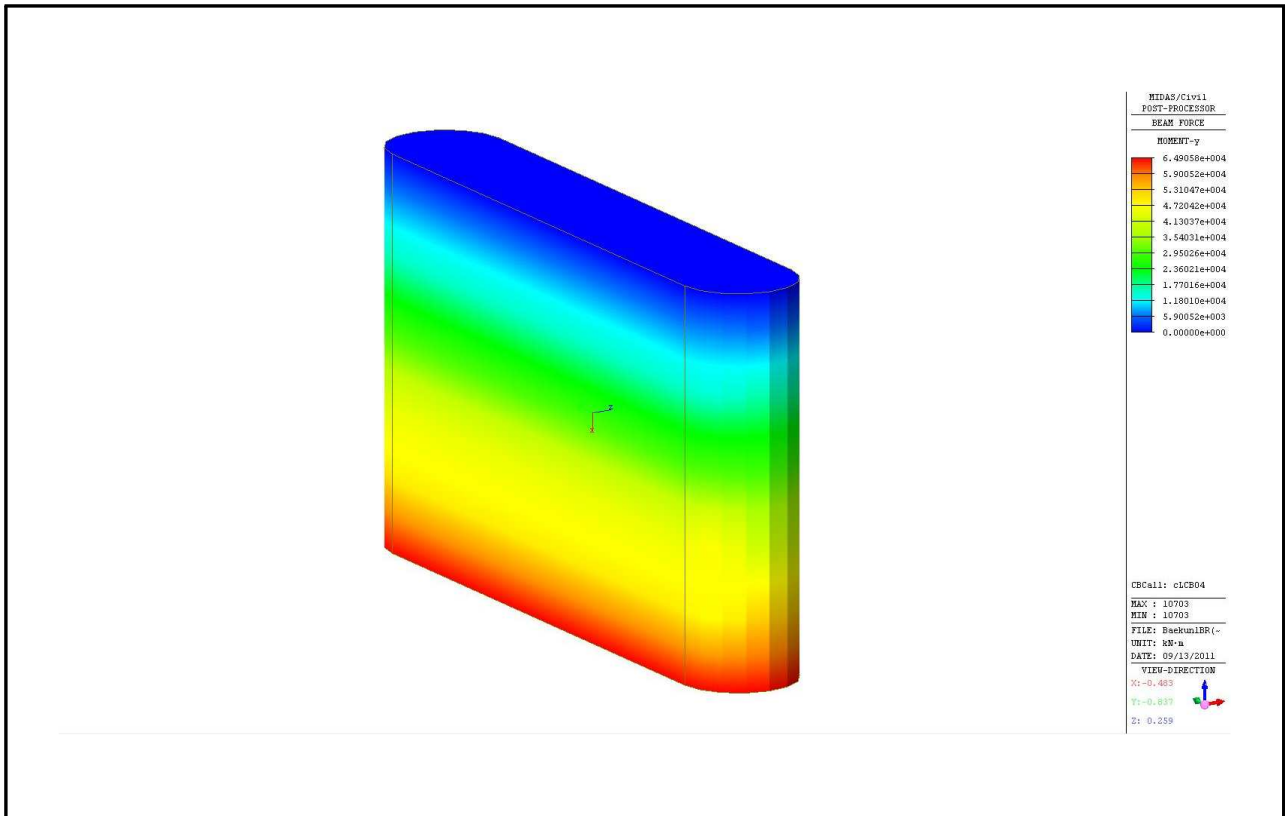
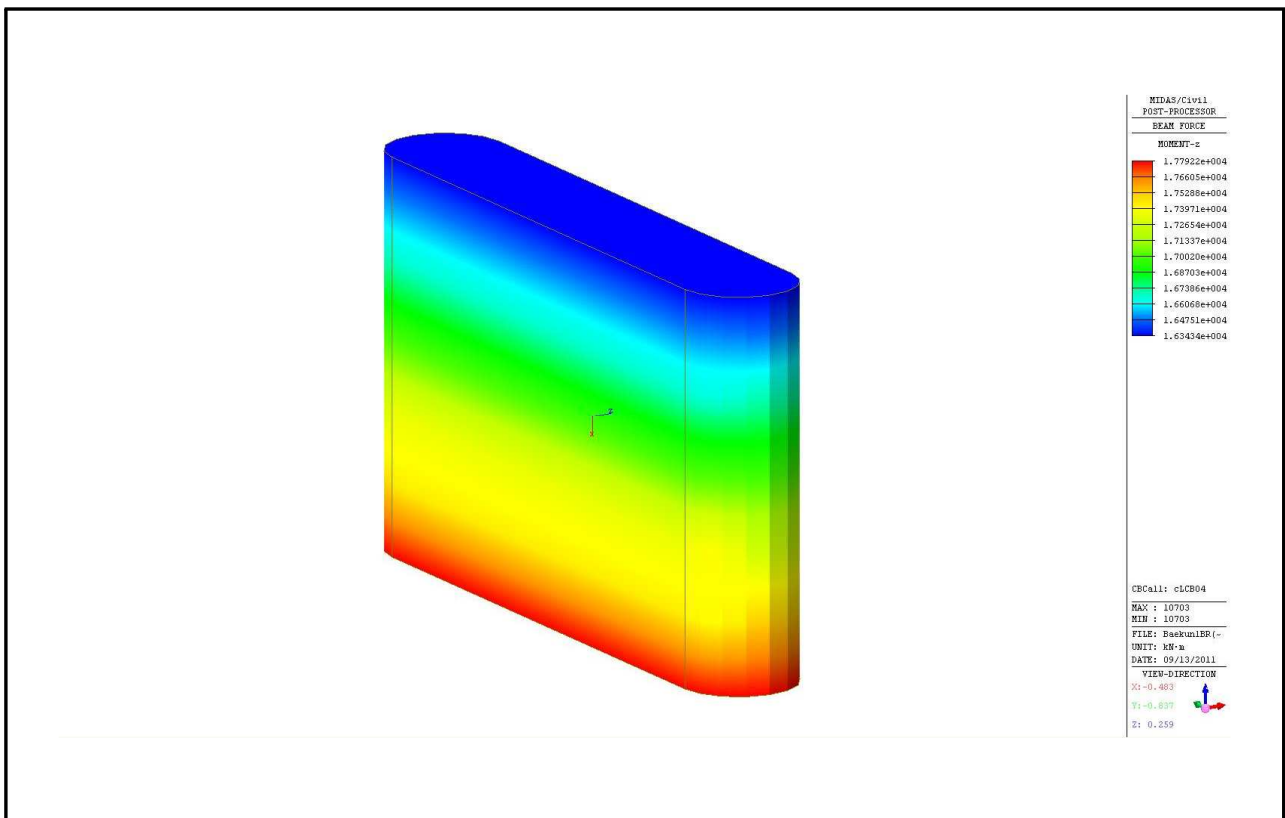
① 계수하중 산출

하부구조의 극한강도를 검토하기 위해 【표 5.136】에 나타난 하중계수를 이용하여 계수하중을 산출하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

㉠ 계수하중 단면력도



【그림 5.25】 백운1교(부산) 계수하중에 의한 축력(Fx)도

【그림 5.26】 백운1교(부산) 계수하중에 의한 교축방향 휨모멘트(M_y)도【그림 5.27】 백운1교(부산) 계수하중에 의한 교축직각방향 휨모멘트(M_z)도

㉞ 계수하중 산출

【표 5.137】 백운1교(부산) 기동 계수하중 산출 결과

조합경우	기동상단			기동하단			비 고
	Pu (kN)	Muy (kN · m)	Muz (kN · m)	Pu (kN)	Muy (kN · m)	Muz (kN · m)	
LCU 1	-19987.396	0.000	16343.431	-36129.685	68555.504	17792.230	Max
	-27941.265	0.000	-9523.725	-44083.554	-25681.387	-10493.842	Min
LCU 2	-20293.154	0.000	0.006	-36435.444	22407.543	0.007	
LCU 3	-20108.204	0.000	9882.077	-36250.494	50659.844	10758.095	Max
	-24917.520	0.000	-5758.529	-41059.810	-6320.602	-6345.111	Min
LCU 4	-16277.997	0.000	16343.430	-28695.143	64905.763	17792.229	Max
	-24231.866	0.000	-9523.726	-36649.012	-29331.128	-10493.843	Min
LCU 5	-16584.603	0.000	-23960.651	-29001.748	15427.321	-42467.152	
LCU 6	-16398.805	0.000	9882.076	-28815.951	47010.102	10758.094	Max
	-21208.121	0.000	-5758.530	-33625.267	-9970.344	-6345.112	Min

② 단면 검토

㉟ 검토 조건

- 콘크리트 설계기준강도(f_{ck}) : 24.0 MPa
- 콘크리트 탄성계수(E_c) : 26986 MPa
- 철근 항복강도(f_y) : 300.0 MPa
- 철근 탄성계수(E_s) : 200000.0 MPa
- 단면적(A_g) : 49668583.471 mm²
- 단면2차모멘트(I) : 35.926078 m⁴ (y축)
1140.025371 m⁴ (z축)
- 비지지길이(lu) : 10.0 m (y축)
10.0 m (z축)
- 사용철근량(A_{use}) : 284ea-D32 + 88ea-D32 (1단철근)
284ea-D32 + 84ea-D32 (2단철근)

㉠ 단면력 산정

【표 5.138】 백운1교(부산) 단면력 산정 결과 요약

구 분		Pu (kN)	Mu (kN · m)				Vu (kN)
			Top		Bottom		
			Sway	Non Sway	Sway	Non Sway	
LCU 1	y축	19987.396	0.000	0.000	0.000	68555.504	2568.138
	z축		0.000	16343.431	0.000	17792.223	125.527
LCU 4	y축	16277.997	0.000	0.000	0.000	64905.763	2933.112
	z축		0.000	16343.430	0.000	17792.223	125.527

㉡ 확대모멘트 산정

㉢ 횡구속여부 결정

검토 교각은 수평하중의 변형에 대하여 구속력이 없으므로 횡방향 상대변위가 방지되지 않은 부재로 취급하여 검토하였으며, 기둥의 유효좌굴계수(k)는 2를 적용하였다.

㉣ 임계하중 산정

【표 5.139】 백운1교(부산) 임계하중 산정 결과

구 분	교축방향(y)				교축직각방향(z)			
	k	β_d	EI(kN · m ²)	Pc(kN)	k	β_d	EI(kN · m ²)	Pc(kN)
LCU 1	2.0	0.6	242373651	5980330	2.0	0.6	7691129261	189771008
LCU 4	2.0	0.6	242373651	5980330	2.0	0.6	7691129261	189771008
$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(k \cdot l_u)^2}$ $EI = \frac{0.4 E_c I_g}{1 + \beta_d}$ β_d : 0.6 (고정하중에 의한 전체축력/전체 계수축력) EI : 휨강성 Ec : 탄성계수 k : 유효좌굴길이계수 I : 단면2차모멘트 lu : 비지지길이								

㉤ 비횡구속 골조인 경우의 확대모멘트

• 세장비 검토

【표 5.140】 백운1교(부산) 세장비 검토 결과

구 분	교축방향(y)				교축직각방향(z축)			
	k	(k · lu)/r	한계세장비	판단	k	(k · lu)/r	한계세장비	판단
LCU 1	2.0	23.516	22.000	장주	2.0	4.175	22.000	단주
LCU 4	2.0	23.516	22.000	장주	2.0	4.175	22.000	단주

- 확대모멘트계수 산정

【표 5.141】 백운1교(부산) 확대모멘트계수 산정 결과

구 분	교축방향(y축)			교축직각방향(z축)		
	$\Sigma P_u(kN)$	$\Sigma P_c(kN)$	δ_s	$\Sigma P_u(kN)$	$\Sigma P_c(kN)$	δ_s
LCU 1	-	-	1.000	-	-	1.000
LCU 4	-	-	1.000	-	-	1.000

$$\delta_s = \frac{1}{1 - Q}$$

$$Q_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma P_u}{0.75 \Sigma P_c}} \geq 1.0$$

여기서, $Q < 0.6$, $\delta_s < 2.5$

ΣP_u : 해당층의 모든 수직하중의 합

ΣP_c : 해당층의 횡변위를 지지하는 기둥들의 임계하중의 합

- 비행구속 골조인 경우의 확대모멘트 산정

【표 5.142】 백운1교(부산) 확대모멘트 산정 결과

구 분		δ_s	M_2 (kN · m)	검 토	C_m	P_u (kN)	δ_{ns}	M_c (kN · m)
y축	LCU 1	1.0	68555.504	이하	-	-	-	68555.504
	LCU 4	1.0	64905.763	이하	-	-	-	64905.763
z축	LCU 1	1.0	17792.223	이하	-	-	-	17792.223
	LCU 4	1.0	17792.223	이하	-	-	-	17792.223

$$M_2 = M_{2ns} + \delta_s \cdot M_{2s}$$

만일 $\frac{l_u}{r} > \frac{35}{\sqrt{P_u / (f_{ck} \cdot A_g)}}$ 이면, 추가 확대

이때, $\delta_{ns} = \frac{C_m}{1 - P / (0.75P)} \geq 1.0$

$$C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2} \geq 0.4$$

$$M_c = \delta_{ns} \cdot M_2$$

- 확대모멘트 산정

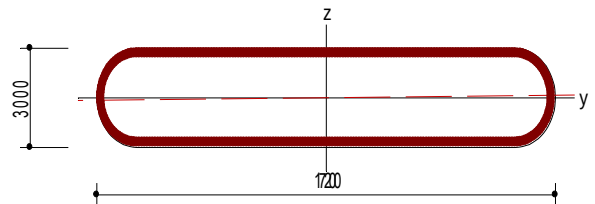
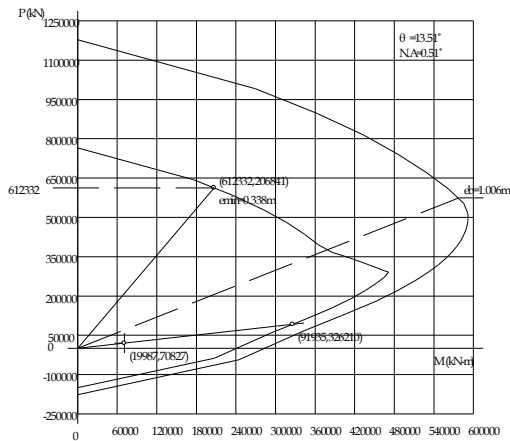
【표 5.143】 백운1교(부산) 확대모멘트 산정 결과 요약

구 분	P_u (kN)	M_{cy} (kN · m)	M_{cz} (kN · m)	M_c (kN · m)	비 고
LCU 1	19987.396	68555.504	17792.223	70826.692	
LCU 4	16277.997	64905.763	17792.223	67300.232	

• 기둥 안전성 검토

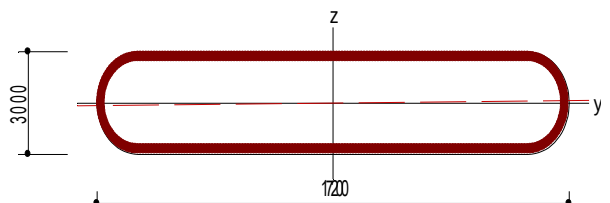
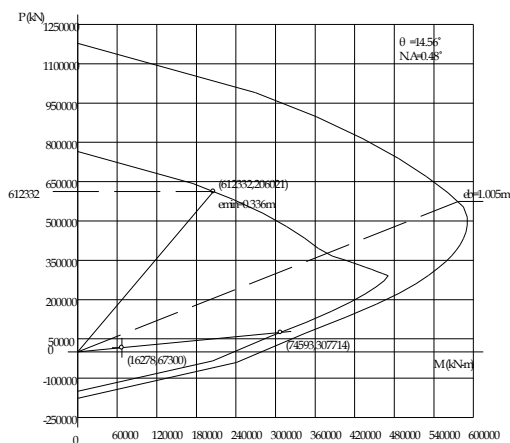
■ 하중조합 : LCU 1

- $e = 3.548 \text{ m}$
- $\Phi P_n = 91935.160 \text{ kN} > P_u = 19987.396 \text{ kN} \quad \therefore \text{OK}$
- $\Phi M_n = 326210.033 \text{ kN}\cdot\text{m} > M_u = 70826.692 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad \therefore \text{OK}$



■ 하중조합 : LCU 4

- $e = 4.125 \text{ m}$
- $\Phi P_n = 74592.735 \text{ kN} > P_u = 16277.997 \text{ kN} \quad \therefore \text{OK}$
- $\Phi M_n = 307714.179 \text{ kN}\cdot\text{m} > M_u = 67300.232 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad \therefore \text{OK}$



【그림 5.28】 백운1교(부산) P-M 상관도에 의한 기둥 안전성 검토 결과

5.2.5 안전성평가 결과 요약

가. 바닥판

- 고정하중 및 DB-24의 설계하중이 작용하는 경우에 대해 현 설계기준을 적용하여 구조해석을 실시한 결과, 켄틸레버 및 중앙부 모두 안전한 것으로 평가되었으며 외관조사 결과 구조적 손상은 조사되지 않아 검토대상 구조물은 설계하중에 대해 소요의 안전도를 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 기본 내하력 산정 결과 DB-24이상으로 도로교 설계기준상의 1등급 정도의 내하력은 가지고 있는 것으로 판단된다.

나. 거더(Steel-Box)

- 설계하중 및 건조수축, 크리트, 온도영향을 고려하여 지점부 및 중앙부에 대한 구조해석을 실시한 결과, 검토항목 모두 안전한 것으로 평가되었으며, 외관조사 결과 구조적 손상은 조사되지 않아 검토대상 구조물은 설계하중에 대해 소요의 안전도를 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 기본 내하력 산정 결과 DB-24이상으로 도로교 설계기준상의 1등급 정도의 내하력은 가지고 있는 것으로 판단된다.

다. 교각 검토

- 외관조사 결과 코핑부 전에 수직균열($cw=0.1\sim0.2mm$)이 발생되어 현설계기준에 대한 안전성 및 사용성 검토결과 소요의 안전성은 확보하는 것으로 검토되었으나 균열제어를 위한 철근간격 검토결과 수평철근의 간격은 다소 넓은 것으로 평가되었다.
- 따라서 발생한 균열은 건조수축 및 수화열 등이 원인이며 받침하단 및 단면변화부에서 지압·응력집중 효과가 더해진 것으로 판단된다.
- 공용하중에 대해 철근량이 충분하고 균열진행성이 없으므로 손상규모에 따라 보수 및 주의관찰 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

라. 해석결과 집계표

1) 상부구조 안전성평가 결과

① 강아치(Steel-Arch)

【표 5.144】 백운1교(부산) 상부구조 강아치(Steel-Arch) 안전성평가 결과

단위 : MPa

구 분	축방향력 및 휨모멘트 응력			전단응력			안전성 평가결과
	검토응력	허용응력	안전율	검토응력	허용응력	안전율	
보강거더	172.413	215.000	1.00이상	12.716	125.000	1.00이상	a
아치리브	34.572	215.000	1.00이상	9.820	125.000	1.00이상	a
행거	13.772	140.000	1.00이상	-0.124	80.000	1.00이상	a
상부가로보	114.541	215.000	1.00이상	0.030	125.000	1.00이상	a
하부가로보	-6.516	215.000	1.00이상	-0.086	125.000	1.00이상	a
브레이싱	-3.182	112.591	1.00이상	0.121	80.000	1.00이상	a
세로보	44.653	140.000	1.00이상	0.169	80.000	1.00이상	a

② 바닥판

【표 5.145】 백운1교(부산) 상부구조 바닥판 안전성평가 결과

구 분		Mu(kN·m)	ΦMn(kN·m)	안전율	안전성 평가결과
바닥판	캔틸레버	37.398	127.569	1.00이상	a
	중양부	67.724	105.961	1.00이상	a

2) 하부구조의 안전성평가 결과

【표 5.146】 백운1교(부산) 하부구조 교각 안전성평가 결과

단 면	축력 검토		안전율	모멘트 검토		안전율	안전성 평가 결과
	Pu(kN)	ΦPn(kN)		Mu(kN·m)	ΦMn(kN·m)		
교각	19,987.396	91,935.160	1.00이상	70,826.692	326,210.033	1.00이상	a

마. 기존 진단결과와의 비교·분석

【표 5.147】 백운1교(부산) 안전성평가 결과 비교·분석

구 분	2013년 정밀안전진단	2016년 정밀안전진단
해석조건	- 상부 3차원 격자해석 - 준공도에 근거하여 보강거더와 아치리브, 브레이싱의 연결은 강결로 고려하였으며 행거는 양단 힌지로 취급함. - 바닥판과 세로보의 연결은 전단연결재가 1.0m간격으로 배치되어 있어 합성효과를 일부 발휘할 것으로 판단되나 기본적으로 비합성구조로 설계된 교량이므로 구조해석 시 이를 고려하여 안전측의 해석이 되도록 비합성으로 모델링함. - 하중조건은 고정하중과 설계활하중 외 온도 변화와 풍하중의 영향을 고려하였으며, 활하중의 재하방법은 해석프로그램 내의 이동하중해석 기능을 사용함. - 지점경계조건은 교량받침의 현장 배치상태를 고려하여 교각 지점을 고정단으로, 교대 지점을 가동단으로 설정함.	- 상부 3차원 격자해석 - 준공도에 근거하여 보강거더와 아치리브, 브레이싱의 연결은 강결로 고려하였으며 행거는 양단 힌지로 취급함. - 바닥판과 세로보의 연결은 전단연결재가 1.0m간격으로 배치되어 있어 합성효과를 일부 발휘할 것으로 판단되나 기본적으로 비합성구조로 설계된 교량이므로 구조해석 시 이를 고려하여 안전측의 해석이 되도록 비합성으로 모델링함. - 하중조건은 고정하중과 설계활하중 외 온도 변화와 풍하중의 영향을 고려하였으며, 활하중의 재하방법은 해석프로그램 내의 이동하중해석 기능을 사용함. - 지점경계조건은 교량받침의 현장 배치상태를 고려하여 교각 지점을 고정단으로, 교대 지점을 가동단으로 설정함. - 풍하중 고려
안전율	거더 최소 안전율 : 1.320 바닥판 최소 안전율 : 1.565 하부구조 최소 안전율 : 4.600	거더 최소 안전율 : 1.247 바닥판 최소 안전율 : 1.565 하부구조 최소 안전율 : 4.600
안전성평가 결과	A	A
총 평	- 금회 정밀안전진단은 자료분석, 현장조사 및 시험을 통한 분석결과, 제원 및 품질저하 요인이 조사되지 않아 전차 진단인 2011년 정밀안전진단의 안전성 평가를 인용하여 평가하였음. - 공용 내하력은 DB-24 이상으로 나타나 설계활하중에 대한 안전성을 확보한 것으로 판단됨. - 기존 정밀안전진단(2013)에 비해 안전율과 내하율이 하향으로 나타난 이유는 금회 진단에서 변경된 포장하중 적용으로 인한 고정하중이 증가되어 안전율과 내하율이 상향된 것으로 판단됨. - 또한, 하부구조에 대한 검토는 금회 상부구조의 적용된 포장하중으로는 하부구조에 수직력이 미미한 것으로 판단되어 전차 진단보고서(2011년)를 내용을 인용함.	

5.3 백운1교(춘천) 안전성평가

5.3.1 개 요

백운1교(춘천)는 고속도로 55호선(중앙선, 이정 301.9km)으로 강원도 원주시 판부면 금대리에 위치하며, 1995년 10월 01일에 준공된 1종 교량이다. 본 교량의 총연장은 151.4m (35.7+80.0+35.7), 폭 21.51m로 상부구조는 3경간 연속의 AR거더 형식이며, 하부구조는 역T형(교대) 및 구형(교각), 교량받침은 스페리칼 받침(교대) 및 롤러받침(교각), 신축이음장치는 New모노셀조인트(A1, A2)로 시공되었다.

가. 검토구간 선정 및 사유

안전성 평가는 교량의 설계개념을 따라 일관성이 유지되도록 평가하는 것을 원칙으로 하고, 최근 도입되고 있는 신뢰성이론에 의한 평가방법은 충분한 통계자료가 뒷받침되어야 하므로 평가방법은 RC거더 및 콘크리트 바닥판, 교각 부재검토는 강도설계법에 의하며, 전차 정밀안전진단(2013년)에서 수행한 안전성평가 자료를 활용하고, 금회 정밀안전진단(2016년)와 구조적 변화상태에 대하여 비교하였다.

나. 구조검토 조건

본 교량은 설계 시와 현재의 설계기준을 비교하여 현 기준에 안전성 검토 및 내하력 평가를 실시하며, 사용재료의 특성 및 철근간격, 피복두께 등을 설계도서와 현장측정 값을 비교하여 적용하였다. 설계시와 금회 정밀안전진단의 비교표는 다음 【표 5.48】와 같다.

1) 구조검토 조건 비교

【표 5.148】 백운1교(춘천) 구조검토 조건 비교

구 분		2013년 진단	2016년 진단	비 고
설계기준	적용년도	• 콘크리트 구조설계기준(2012) • 도로교 설계기준(2010)	• 콘크리트 구조설계기준(2012) • 도로교 설계기준(2010)	
	주요 하중계수	• 콘크리트 하중조합(1.3D+2.15L)	• 콘크리트 하중조합(1.3D+2.15L)	
상부구조 적용하중	바닥판	• 고정하중+활하중	• 고정하중+활하중+풍하중	
	거더	• 고정하중+활하중+크리프 및 건조수축+온도변화	• 고정하중+활하중+크리프 및 건조수축+온도변화+풍하중	
비교결과		• 설계시 구조검토 조건비교 결과, 교각이 매우 낮고 상태덕으로 높이차이도 없으며, 기초가 경암에 위치한 점을 고려하여 과업대상시설물에 인접해 있는 백운1교(부산)의 구조계산서를 참조하여 지점침하에 대한 검토를 생략하였음. • 상부구조 적용하중에서 풍하중이 누락되어 있는 것으로 확인되어 금회 진단에서 하중을 적용하여 안전성평가를 실시함.		

2) 부재재원 확인

시설물을 구성하고 있는 주요부재에 대한 재원 확인을 위해 실측을 실시하고 이를 준공도와 비교·검토하여 주요부재의 규격을 확인하였다.

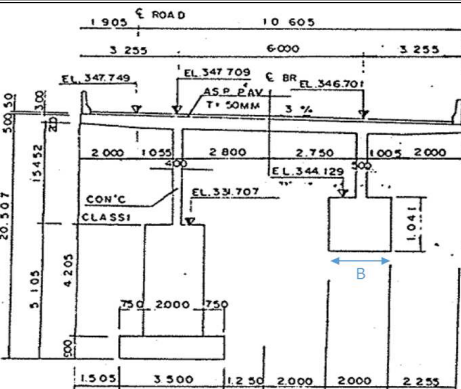
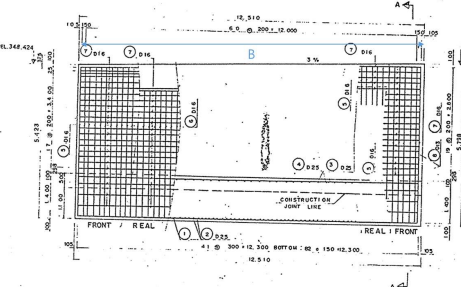
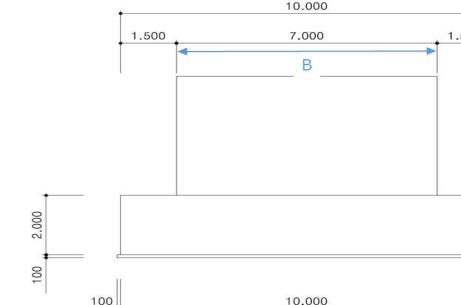
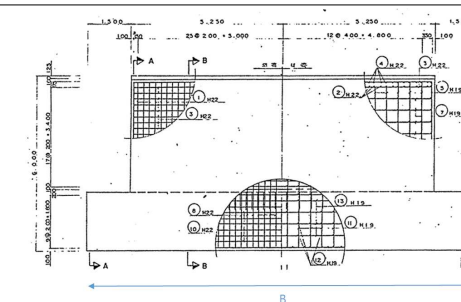
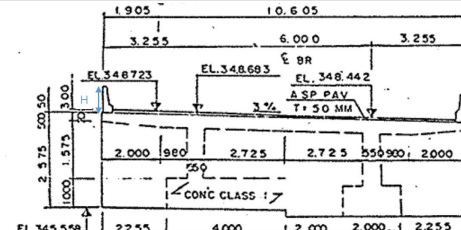
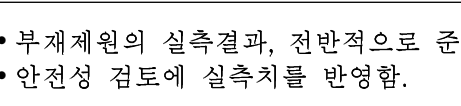


【사진 5.2】 백운1교(춘천) 부재 재원 측정

【표 5.149】 백운1교(춘천) 부재 재원 확인 결과

구분		개요도	구분	설계도면	실측결과	비고
상부 구조	바닥판		B	12.51m	12.50m	일치

【표 5.149】 백운1교(춘천) 부재 제원 확인 결과(계속)

구분		개요도	구분	설계도면	실측결과	비고
상부 구조	아치 리브		B	2.0m	2.0m	일치
	교대		B	12.51m	12.40m	일치
하부 구조	교각 (P1)		B	7.0m	7.0m	일치
	교각 (P2)		B	13.5m	13.4m	일치
기타 부재	방호벽		H	1.08m	1.06m	일치
	포장		T	50mm	50mm	일치
측정결과		• 부재제원의 실측결과, 전반적으로 준공도상의 제원과 일치함. • 안전성 검토에 실측치를 반영함.				

3) 현장시험 및 측정자료 분석

① 사용재료 및 강도

【표 5.150】 백운1교(춘천) 사용재료 및 강도

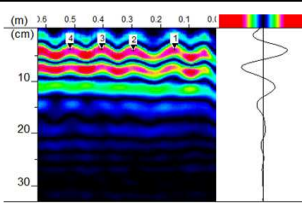
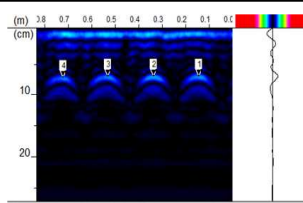
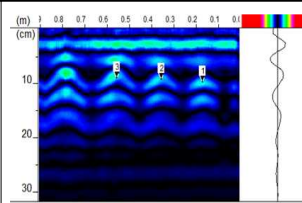
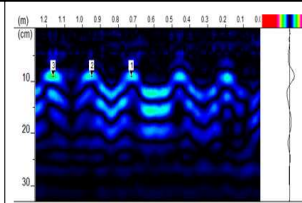
구 분	콘 크 리 트				철 근	
	탄성계수(MPa)	설계기준강도(MPa)	현장조사결과(MPa)	적용강도(MPa)	철근강도(MPa)	탄성계수(MPa)
상부구조	28,693	27.0	27.5~30.6	27.0	400.0	2.0×10^5
하부구조	26986	24.0	24.6~31.2	24.0	300.0	2.0×10^5

• 콘크리트 강도시험은 반발경도시험 및 초음파시험 결과가 모두 『원주천교 등 11개소 정밀안전진단 (2013.12, (재)한국재난연구원, 케이에스엠기술(주))』에 적용된 설계기준강도 이상이므로 최저값인 설계 기준강도를 적용강도로 적용함.

② 단면제원 및 철근량

【표 5.151】 백운1교(춘천) 단면제원 및 철근량

시험위치		단면 두께 (mm)	피복두께(mm)			철근(m당 평균)		
			설계값	측정 평균값	검토 적용값	설계값	철근탐사	검토 적용값
바닥판 하면	종방향철근	500.0	37.5	33.0~38.0	37.5	H25@125.0	H25@122.0~133.7	H25@125.0
	횡방향철근		62.5	62.0~69.0	62.5	H22@200.0 +H25@200.0	H22@192.5~210.0 +H25@192.5~210.0	H22@200.0 +H25@200.0
하부거더 (교대부)	종방향철근	1193.0	34.0	-	34.0	H32@300.0	-	H32@300.0
	횡방향철근		66.0	-	66.0	H22@252.0	-	H22@252.0
하부거더 (교각부)	종방향철근	4205.0	39.0	-	39.0	H22@300.0	-	H22@300.0
	횡방향철근		61.0	-	61.0	H22@149.0	-	H22@149.0
하부거더 (중양부)	종방향철근	1068.0	34.0	-	34.0	H32@100.0	-	H32@100.0
	횡방향철근		66.0	-	66.0	H22@294.0	-	H22@294.0
A1 구체	수직철근	900.0	90.5	93.0	90.5	D19@200.0	D19@193.0	D19@200.0
	수평철근		109.5	109.0	109.5	D25@200.0	D25@200.0	D25@200.0
A2 구체	수직철근	900.0	90.5	90.0	90.5	D19@200.0	D19@218.0	D19@200.0
	수평철근		109.5	117.0	109.5	D25@200.0	D25@200.0	D25@200.0
P1 기둥	수직철근	5600.0	89.0	90.0	89.0	H22@200.0	H22@218.0	H22@200.0
	수평철근		111.0	110.0	111.0	H22@200.0	H22@210.0	H22@200.0
P2 롤러	수직철근	6000.0	92.0	93.0	92.0	D16@200.0	D16@198.0	D16@200.0
	수평철근		108.0	105.0	108.0	D16@200.0	D16@203.0	D16@200.0

위치	철근종류	피복두께	철근간격	위치	철근종류	피복두께	철근간격	위치	철근종류	피복두께	철근간격	위치	철근종류	피복두께	철근간격
S3 바닥판	종방향 철근	37.0~ 40.0	110.0~ 144.0	S3 바닥판	횡방향 철근	69.0~ 70.0	190.0~ 195.0	A1 구체	수직철근	90.0~ 97.0	185.0~ 200.0	A2 구체	수직철근	91.0	216.0~ 221.0

• 철근배근 탐사결과 “대구-춘천간 고속도로 건설공사 제7공구 구조도(준공도)”에 적용된 설계값과 금회 측정평균값의 차이가 미미하여 안전성 평가시 설계값을 기준으로 적용함.

5.3.2 상부구조 안전성평가

가. 구조검토 조건

1) 교량제원

- ① 교 량 명 : 백운1교(춘천)
- ② 교량등급 : 1등급(DB-24, DL-24)
- ③ 교량형식 : 3경간 RC Arch교
- ④ 교 장 : $35.6 + 80.0 + 35.6 = 151.4\text{m}$
- ⑤ 교 량 폭 : $B = 12.51\text{m}$
- ⑥ 거더제원 : $H = 1.041\text{m}$, $B = 2.0\text{m}$
- ⑦ 사 각 : 0.000°
- ⑧ 곡률반경 : $R = 1,300$

2) 하중

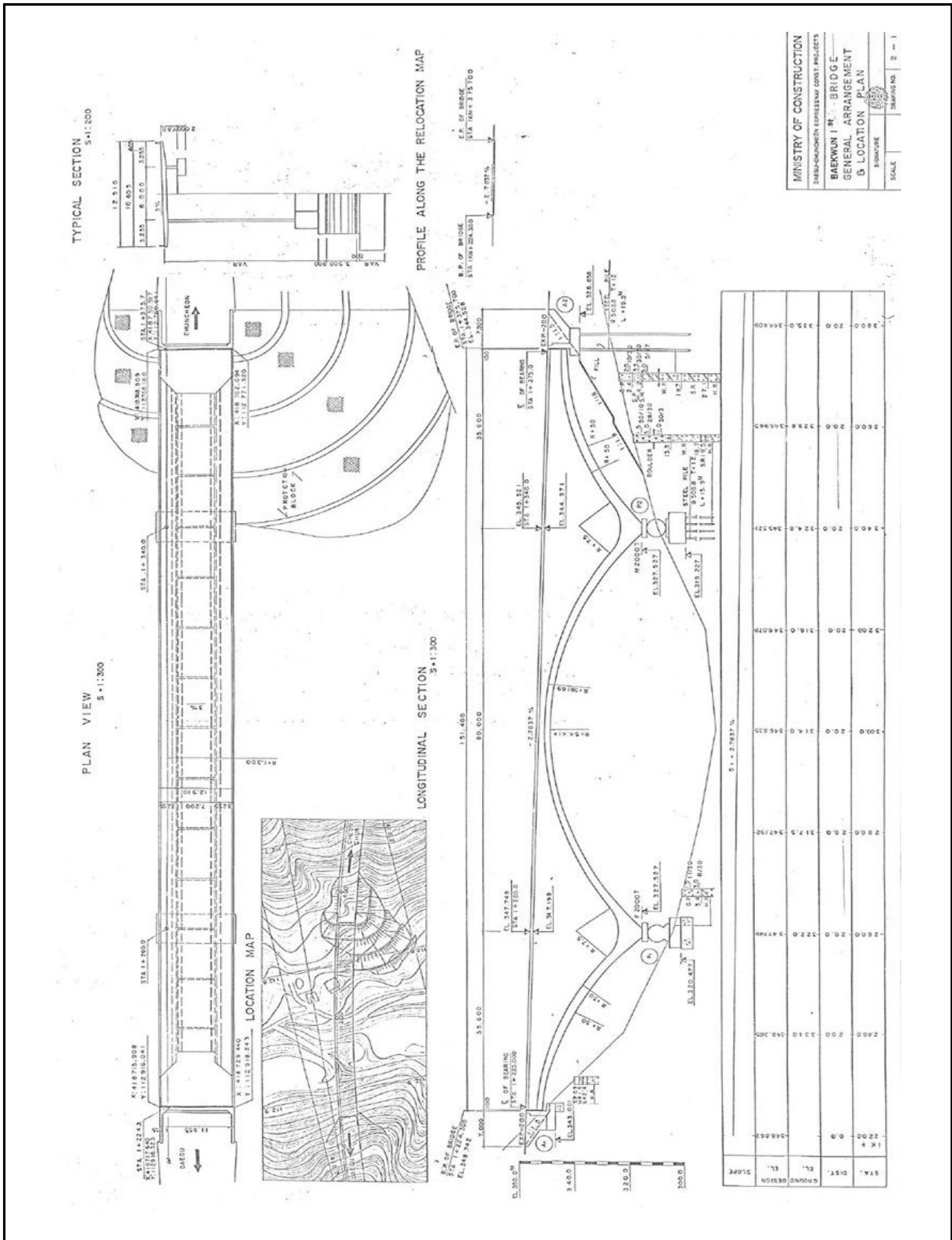
- ① 고정하중
 - 철근콘크리트 : $W_c = 25.00 \text{ kN/m}^3$
 - 포장콘크리트 : $W_a = 23.00 \text{ kN/m}^3$ (아스팔트 포장)
- ② 활하중
 - DB-24, DL-24
 - 충격계수 : $I = 15 / (40+L) \leq 0.3$

3) 사용재료

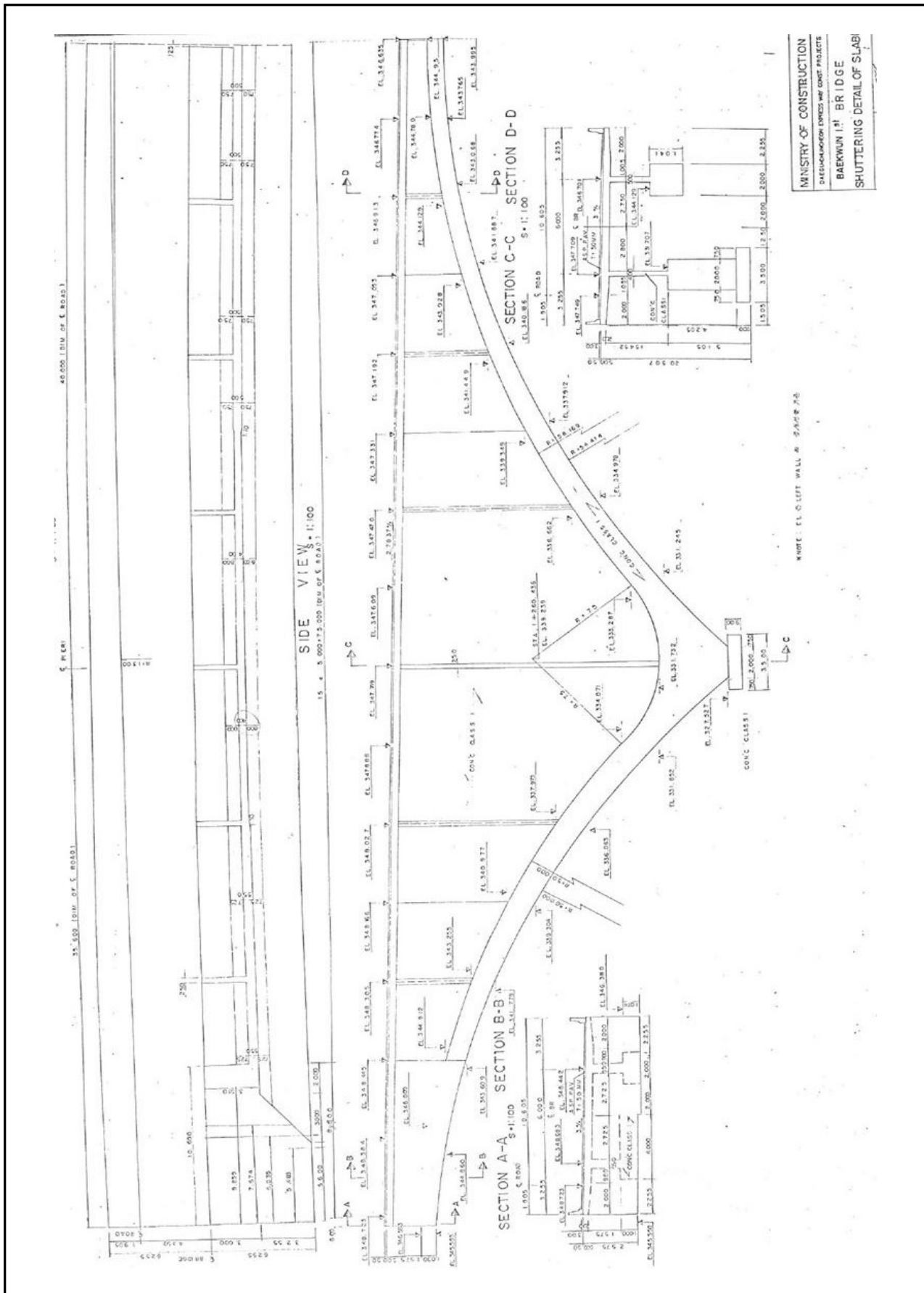
- ① 콘크리트
 - ㉠ 설계기준강도 : $f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$
 - ㉡ 탄 성 계 수 : $E_c = 28,693.400 \text{ MPa}$
 - ㉢ 전단탄성계수 : $G = 12,297.200 \text{ MPa}$
 - ㉣ 포아송비 : $\nu = 0.167$
 - ㉤ 크리프계수 : $\phi_2 = 2\phi_1 = 2.0$
 - ㉥ 선팽창계수 : $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$
- ② 철근(SD40)
 - ㉦ 항복강도 : $f_y = 400.0 \text{ MPa}$
 - ㉧ 탄성계수 : $E_s = 200,000 \text{ MPa}$

나. 종·평면도

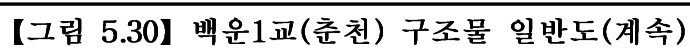
검토 대상교량인 백운1교(춘천)의 교량 종평면도는 아래 그림과 같다.



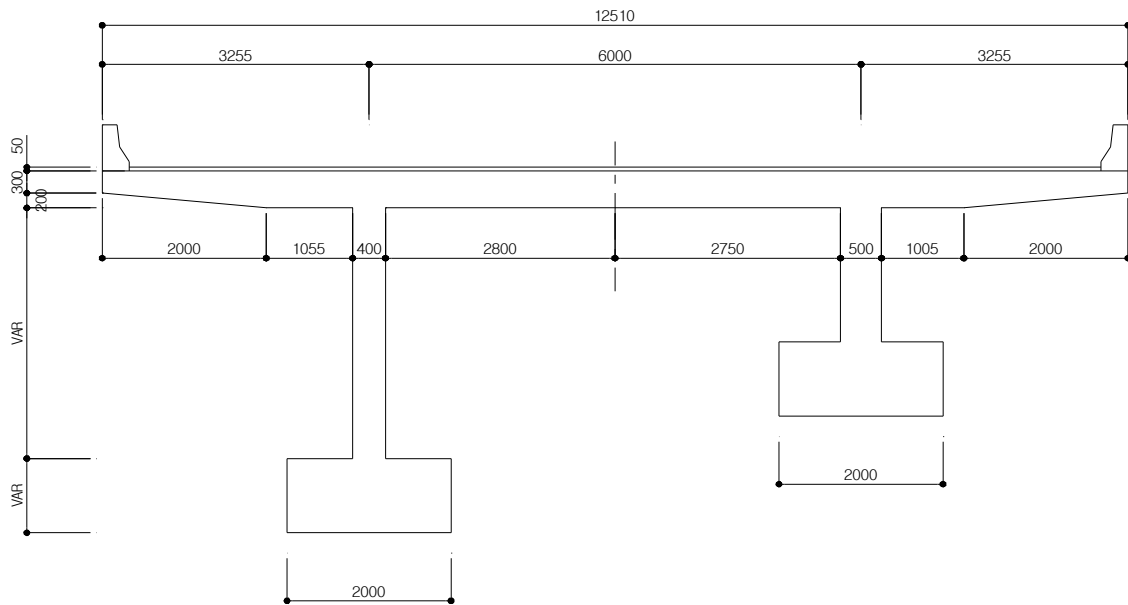
【그림 5.29】 백운1교(춘천) 종·평면도



【그림 5.30】 백운1교(춘천) 구조물 일반도



다. 단면제원



【그림 5.31】 백운1교(춘천) 단면제원

라. 단면상수

【표 5.152】 백운1교(춘천) 단면상수

절	점	A (㎡)	Iyy (mm ⁴)	비고
1	31	11.604	16.04056	
2	30	12.831	23.03213	
3	29	13.350	33.95107	
4	28	15.202	56.81766	
5	27	17.584	100.01101	
6	26	20.625	184.63711	
7	25	23.192	327.22235	
8	24	32.540	589.29859	
9	23	22.955	350.27574	
10	22	21.800	230.00403	
11	21	18.662	131.64132	
12	20	15.614	75.61058	
13	19	15.050	53.12239	
14	18	14.639	44.92639	
15	17	13.308	30.54850	
16		13.073	28.55332	

마. 적용하중

안전성 검토 시 적용하중의 강도와 이에 대한 산정근거를 나타내면 【표 5.153】와 같다.

【표 5.153】적용하중의 강도 및 산정근거

적용하중		하 중 강 도				산정근거																				
	고정하중 (D)	<table><tr><th>구 분</th><th>철근콘크리트</th><th>강 재</th><th>포 장</th></tr><tr><td>단위중량 (kg/m³)</td><td>2,500</td><td>7,850</td><td>2,300</td></tr></table>				구 분	철근콘크리트	강 재	포 장	단위중량 (kg/m³)	2,500	7,850	2,300	도로교설계기준 (2010) 2.1.2 항												
		구 분	철근콘크리트	강 재	포 장																					
단위중량 (kg/m³)	2,500	7,850	2,300																							
주하중 (P)	활하중 (L)	• 콘크리트 자중(단위 중량) : 25.000 kN/m³ • 아스팔트포장 하중 : 23.000 kN/m³ × 0.050m = 1.150 kN/m³ • 방호벽 하중 : 5.015 N/m • 설계활하중(1등교) : DB-24, DL-24 - 설계 활하중의 경우 크게 DB하중과 DL하중으로 구분되며 DB하중과 DL하중을 재하하여 설계부재에 불리한 응력을 주는 것을 선택함. 충격계수 (i) = $\frac{15}{40 + L} \leq 0.3$ 설계차선평(w) 여기서, w_c : 연석간의 교폭, w : 설계차선평, - N : 설계차선의 수 (12.8 ≤ w_c < 16.4 일 때 4차선) - w = 11.610 / 3 = 3.87m 이므로, 차선평 3.6m(3차선) 적용 - DB-24 : Pr = 96.0 kN, Pf = 24.0 kN - DL-24 : Wl = 12.7 kN/m, Pm = 108.0 kN, Ps = 156.0 kN				도로교설계기준 (2010) 2.1.3항, 2.1.4 항																				
부하중 (S)	풍하중 (W)	<table><tr><th colspan="2" rowspan="2">부재의 단면형상</th><th colspan="2">풍 하 중(kN/m²)</th></tr><tr><th>풍상측 부재</th><th>풍하측 부재</th></tr><tr><td rowspan="2">원형</td><td>활하중 재하시</td><td>0.75×10⁻³</td><td>0.75×10⁻³</td></tr><tr><td>활하중 비재하시</td><td>1.50×10⁻³</td><td>1.50×10⁻³</td></tr><tr><td rowspan="2">각형</td><td>활하중 재하시</td><td>1.50×10⁻³</td><td>0.75×10⁻³</td></tr><tr><td>활하중 비재하시</td><td>3.00×10⁻³</td><td>1.50×10⁻³</td></tr></table>				부재의 단면형상		풍 하 중(kN/m²)		풍상측 부재	풍하측 부재	원형	활하중 재하시	0.75×10 ⁻³	0.75×10 ⁻³	활하중 비재하시	1.50×10 ⁻³	1.50×10 ⁻³	각형	활하중 재하시	1.50×10 ⁻³	0.75×10 ⁻³	활하중 비재하시	3.00×10 ⁻³	1.50×10 ⁻³	도로교설계기준 (2010) 2.1.11 항
		부재의 단면형상		풍 하 중(kN/m²)																						
				풍상측 부재	풍하측 부재																					
원형	활하중 재하시	0.75×10 ⁻³	0.75×10 ⁻³																							
	활하중 비재하시	1.50×10 ⁻³	1.50×10 ⁻³																							
각형	활하중 재하시	1.50×10 ⁻³	0.75×10 ⁻³																							
	활하중 비재하시	3.00×10 ⁻³	1.50×10 ⁻³																							
온도변화 (T)	• 바닥판 : 1.240m² × 3.000kN/m² = 3.720kN/m 적용함. • 거 더 : 1.500kN/m² 적용함. • 선팽창계수 : a = 0.0001 • 종방향 온도변화(Global) : Δt = ±10℃				도로교설계기준 (2010) 2.1.12 항																					
크리프 및 건조수축	• 간경과에 따른 크리프 계수와 건조수축 변형률 산정 • 시멘트 : 보통(1종) 시멘트 - 지속하중 지재하시의 콘크리트 재령 : to = 5일 - 상대습도 : 70%				도로교설계기준 (2010) 2.1.7 항																					
특수하중 (PP)	지점침하 (SD)	• 교각이 매우 낮고 상대적 높이차이도 없으며, 기초가 경암에 위치한 점과 인접 시설인 백운1교(부산)의 구조계산서를 참조하여 지점침하에 대한 검토를 생략하였음.				-																				

바. 하중조합

1) 계수하중 하중조합

【표 5.154】 백운1교(춘천) 계수하중 하중조합

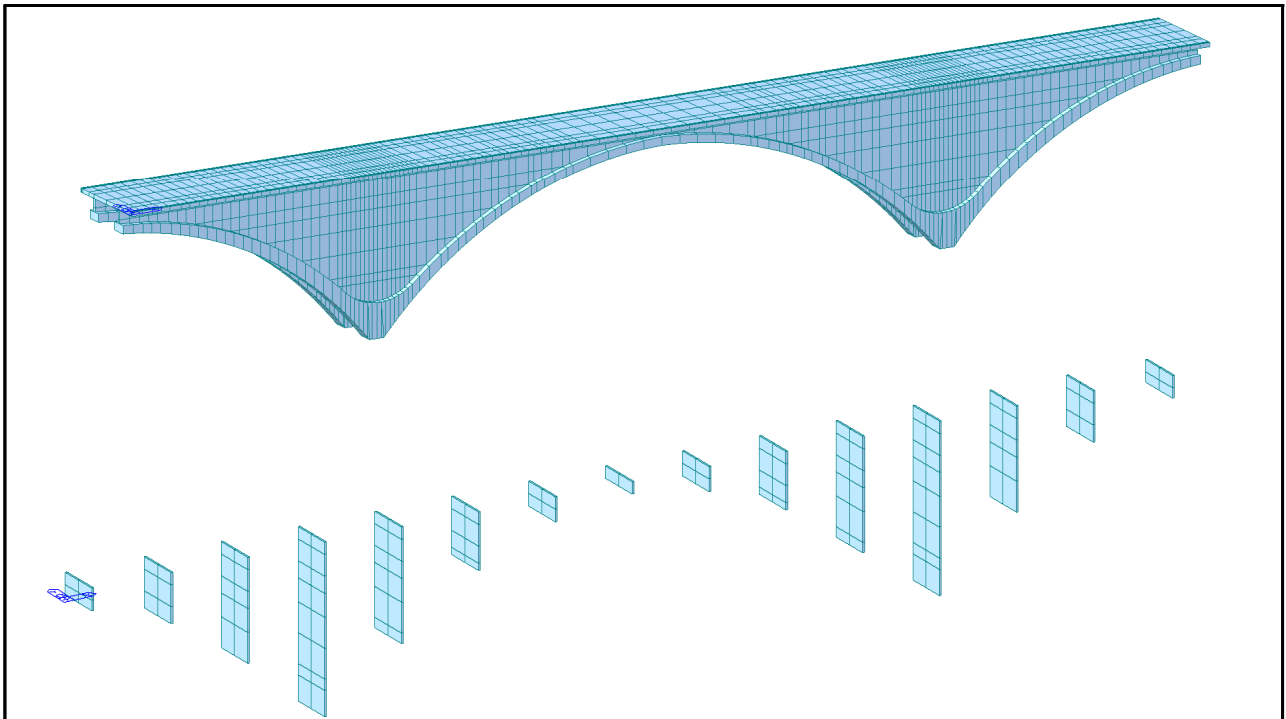
Load Case	하 중 조 합					건조수축
	고정 하중	활 하중	풍 하중	온도하중		
				(+)	(-)	
Case 1	1.30	2.15	1.30			
Case 2	1.30	1.30		1.30		
Case 3	1.30	1.30	1.30		1.30	1.30
Case 4	1.25		1.25	1.25		
Case 5	1.25		1.25		1.25	1.25
Case 6	1.25	1.25	1.25	1.25		
Case 7	1.25	1.25	1.25		1.25	1.25

2) 사용하중 하중조합

【표 5.155】 백운1교(춘천) 사용하중 하중조합

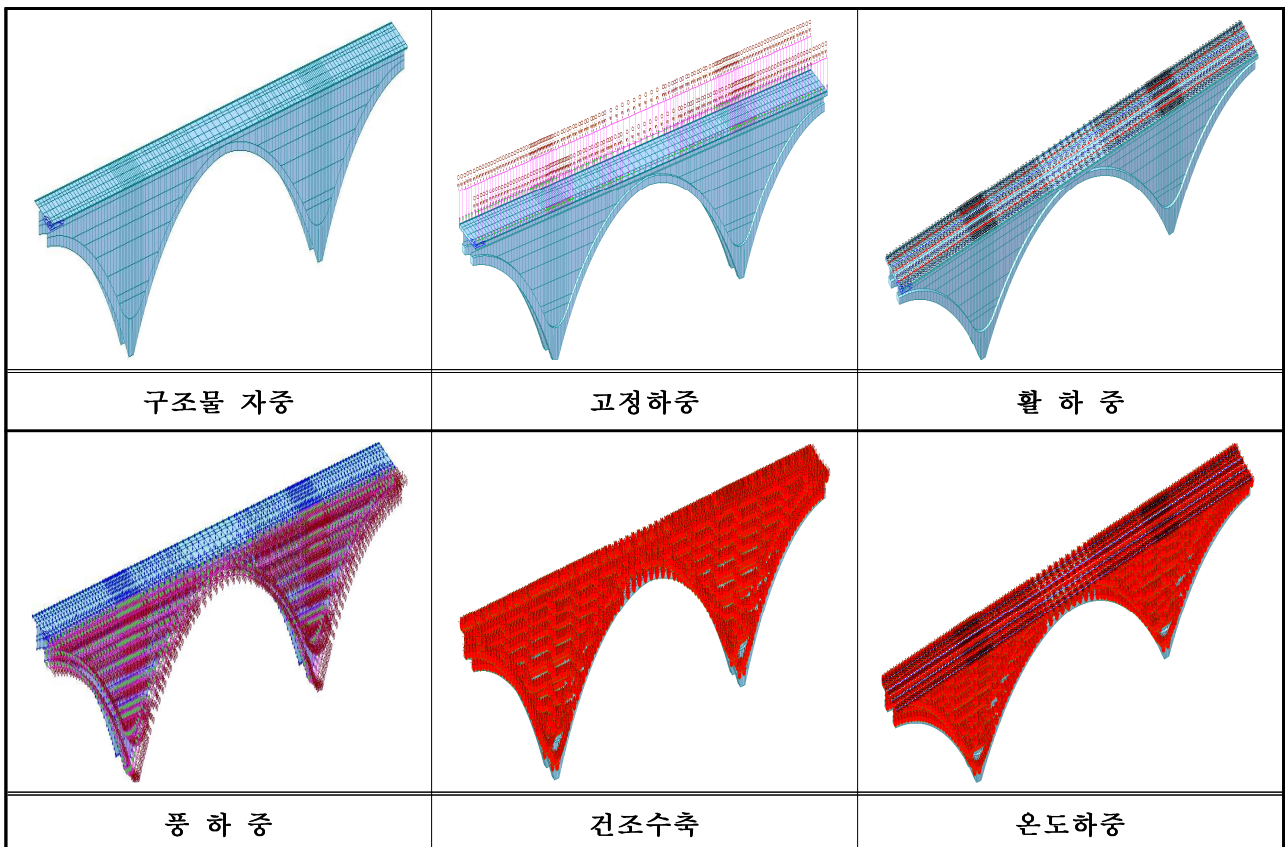
Load Case	하 중 조 합					건조수축
	고정하중	활하중	풍하중	온도하중		
				(+)	(-)	
Case 1	1.00	1.00	1.00	1.00		
Case 2	1.00	1.00		1.00		
Case 3	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00
Case 4	1.00		1.00	1.00		
Case 5	1.00		1.00		1.00	1.00
Case 6	1.00	1.00	1.00	1.00		
Case 7	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00

사. 해석모델링



【그림 5.32】 백운1교(춘천) 해석단면

아. 하중재하도

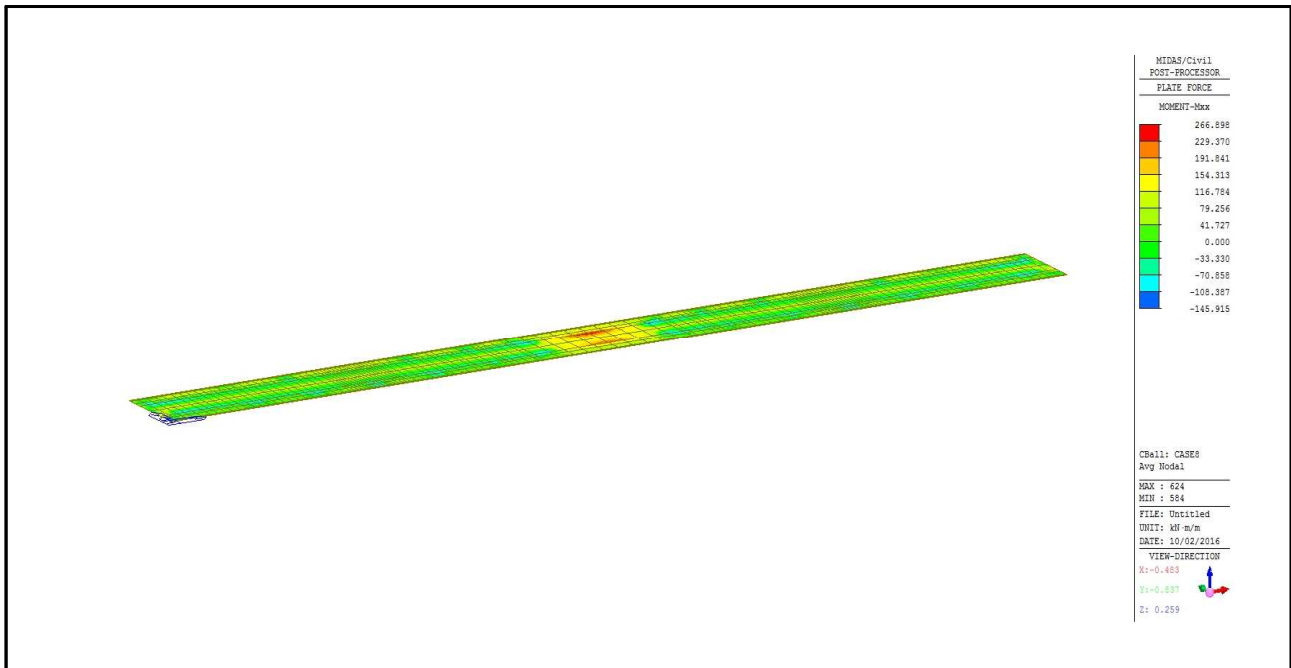
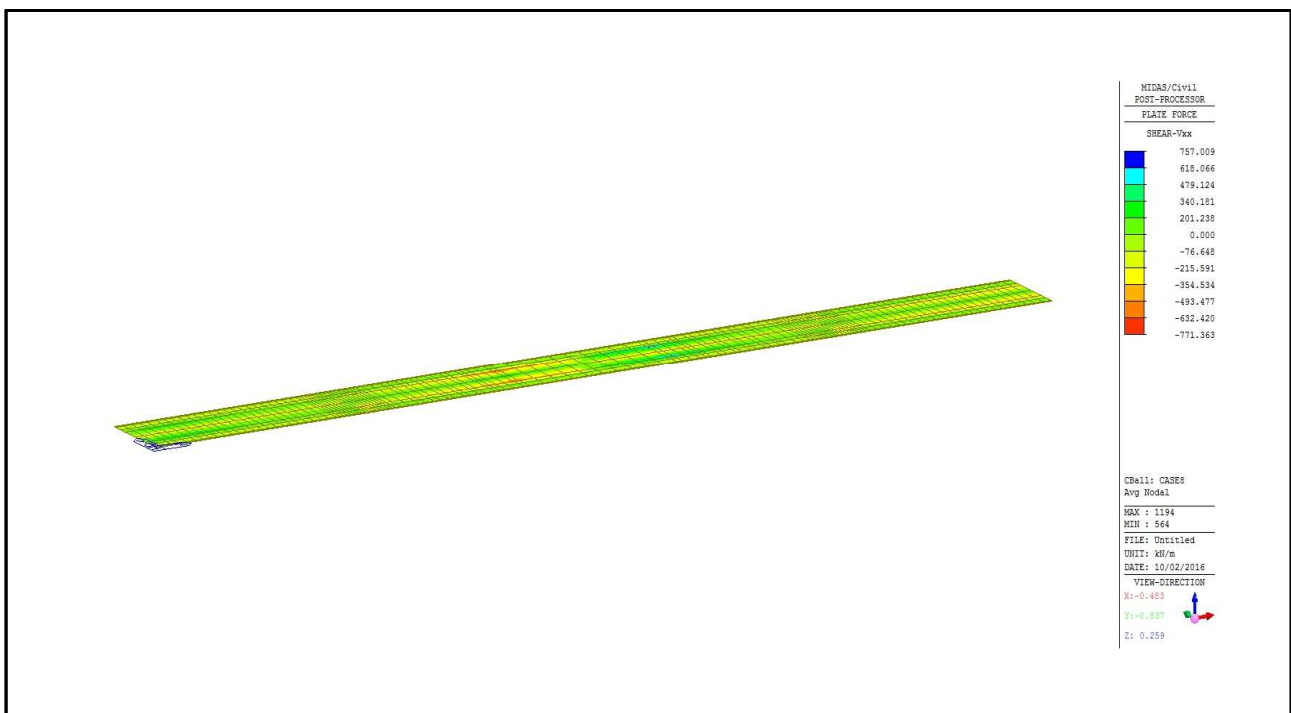


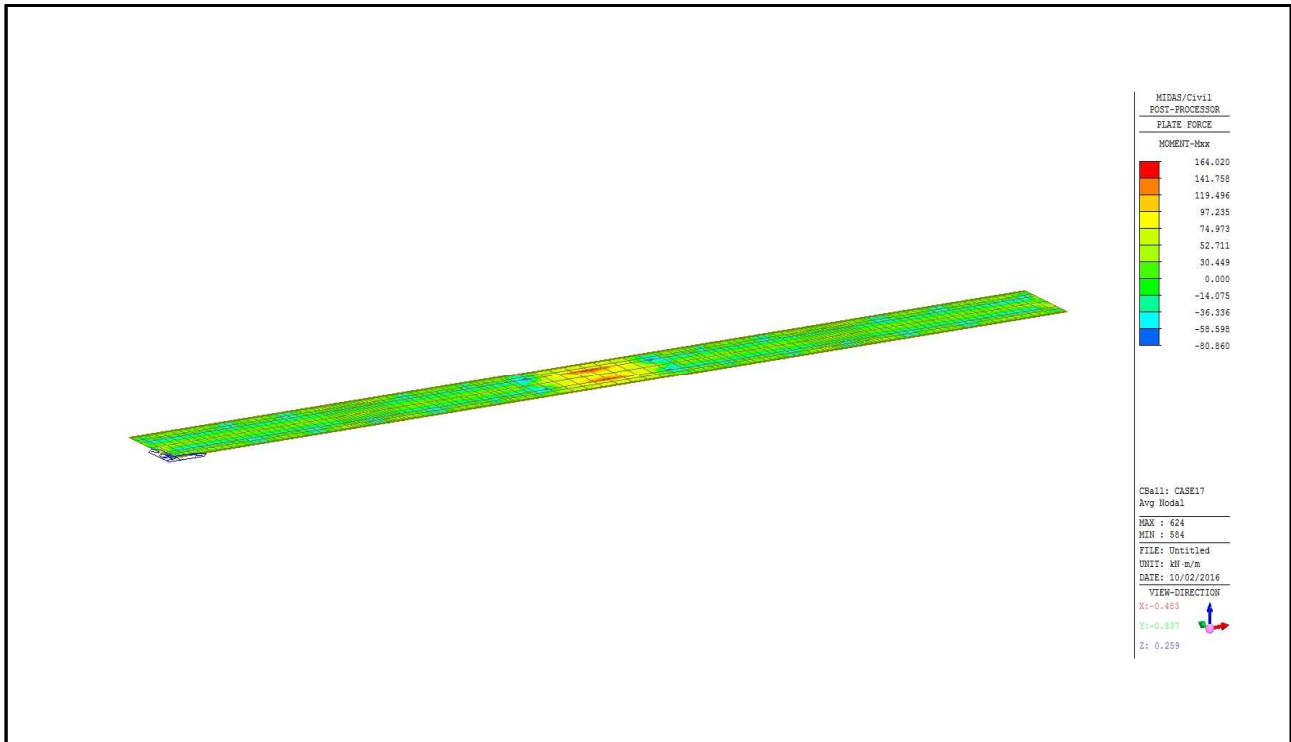
【그림 5.33】 백운1교(춘천) 하중재하도

자. 단면력 산정

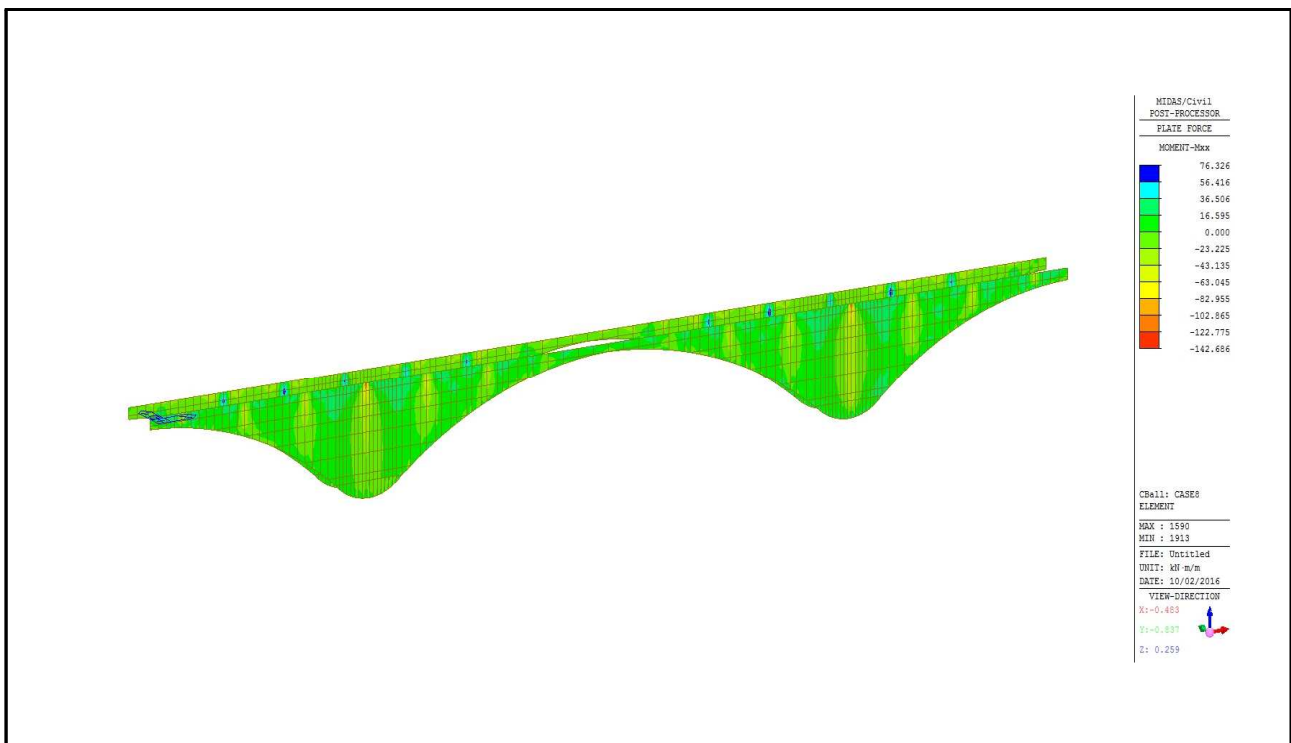
1) 부재별 단면력도

① 상부바닥판

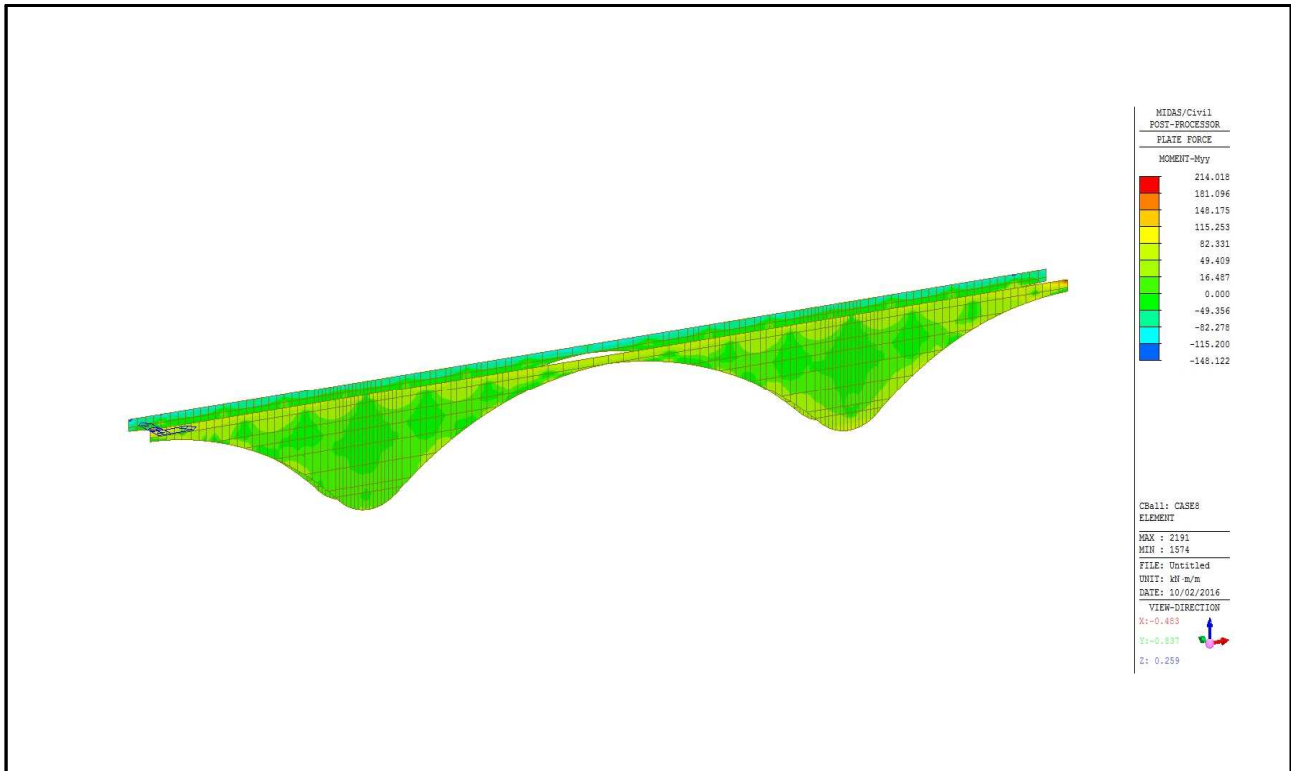
㉠ 계수휨모멘트(M_{xx})【그림 5.34】 백운1교(춘천) 상부바닥판 휨모멘트도(M_{xx})㉡ 전단력(S_{xx})【그림 5.35】 백운1교(춘천) 상부바닥판 전단력도(S_{xx})

㉔ 사용휨모멘트(M_{xx})【그림 5.36】 백운1교(춘천) 상부바닥판 사용휨모멘트(M_{xx})

② 연직재

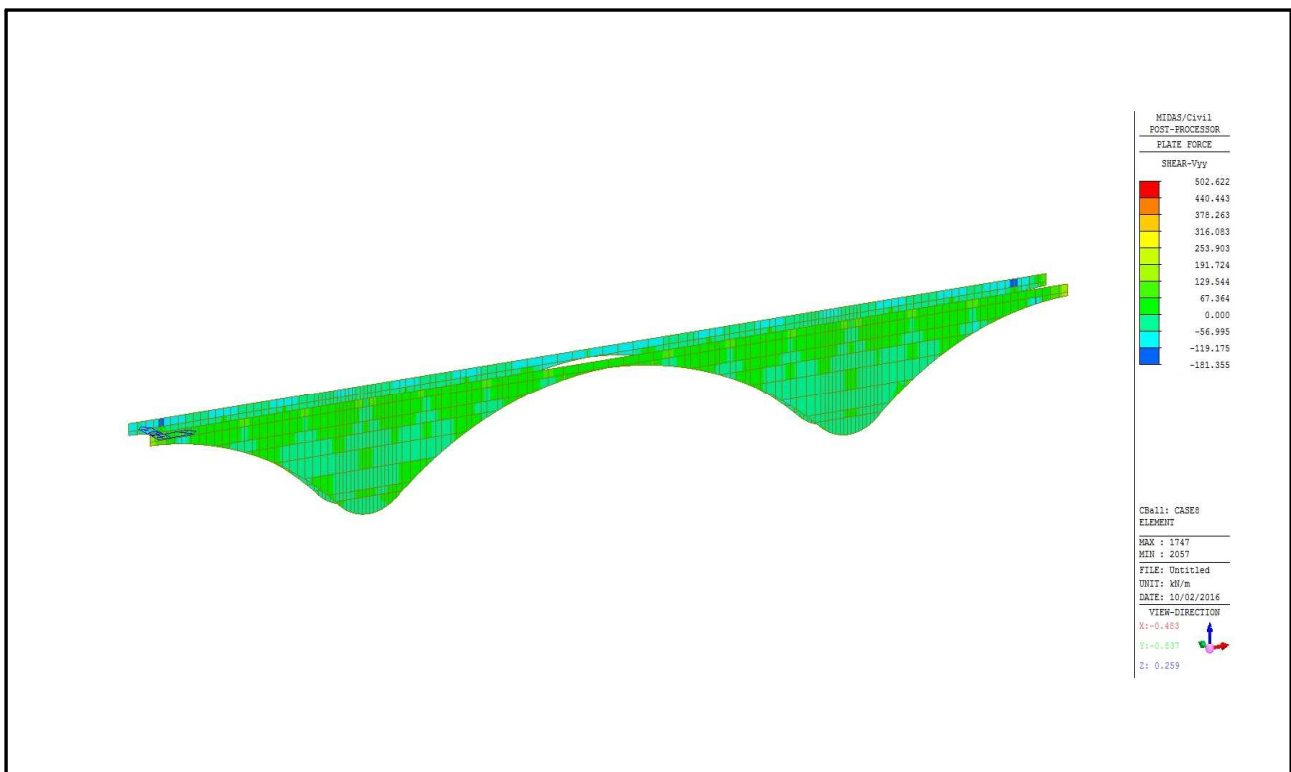
㉕ 계수휨모멘트(M_{xx})【그림 5.37】 백운1교(춘천) 연직재 휨모멘트도(M_{xx})

㉠ 계수휨모멘트(Myy)



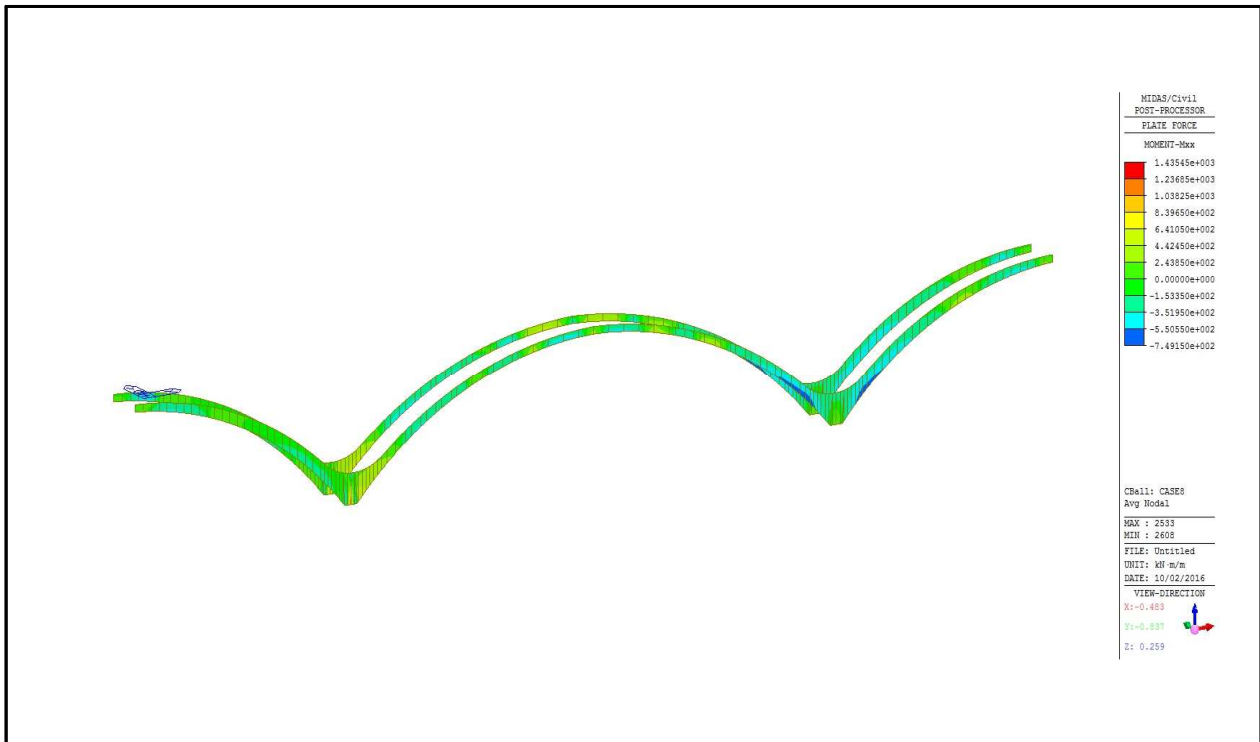
【그림 5.38】 백운1교(춘천) 연직재 계수휨모멘트도(Myy)

㉡ 전단력(Syy)



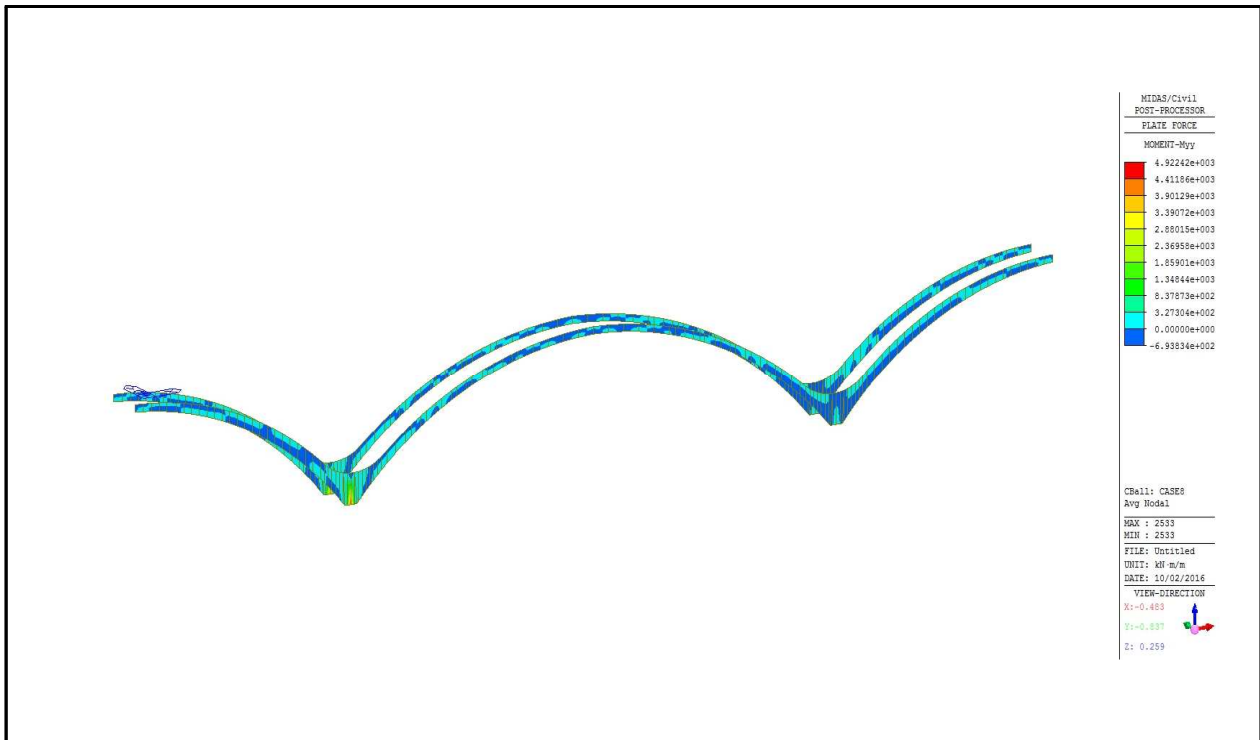
【그림 5.39】 백운1교(춘천) 연직재 전단력도(Syy)

- ③ 하부거더 (아치리브)
㉠ 계수휨모멘트(M_{xx})



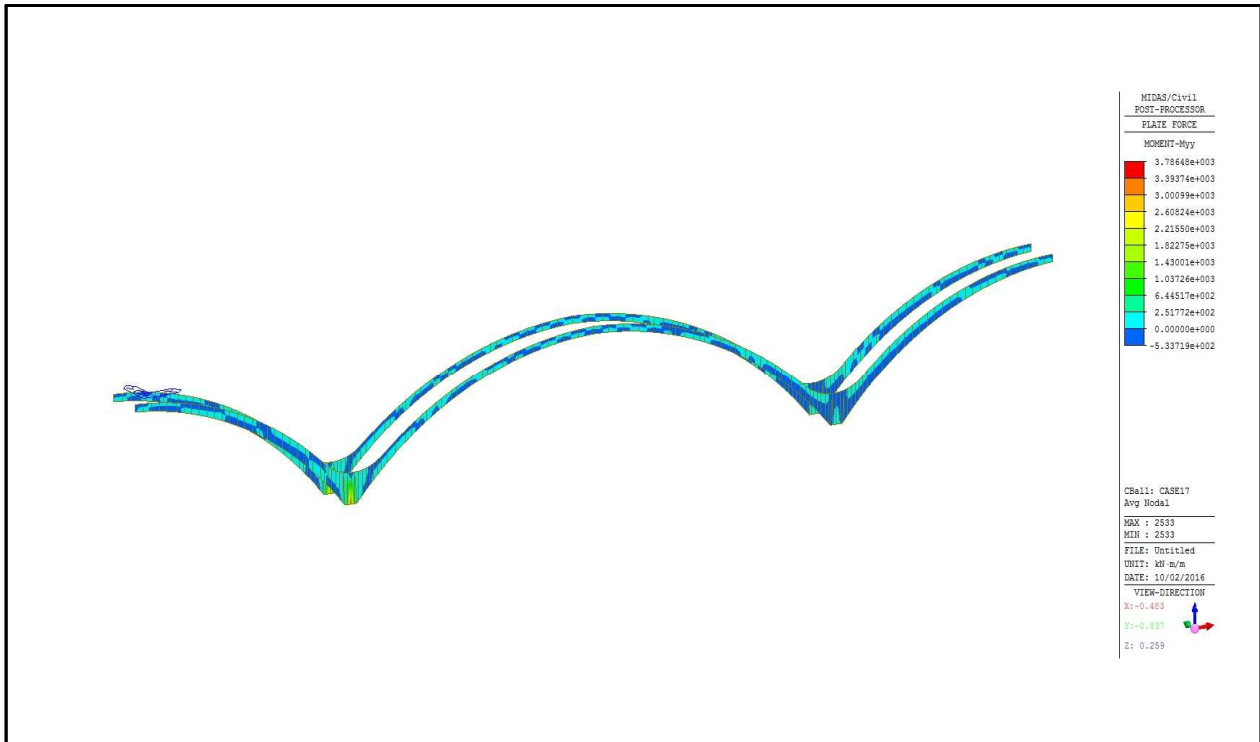
【그림 5.40】 백운1교(춘천) 하부거더(아치리브) 계수휨모멘트도(M_{xx})

- ㉡ 계수휨모멘트(M_{yy})



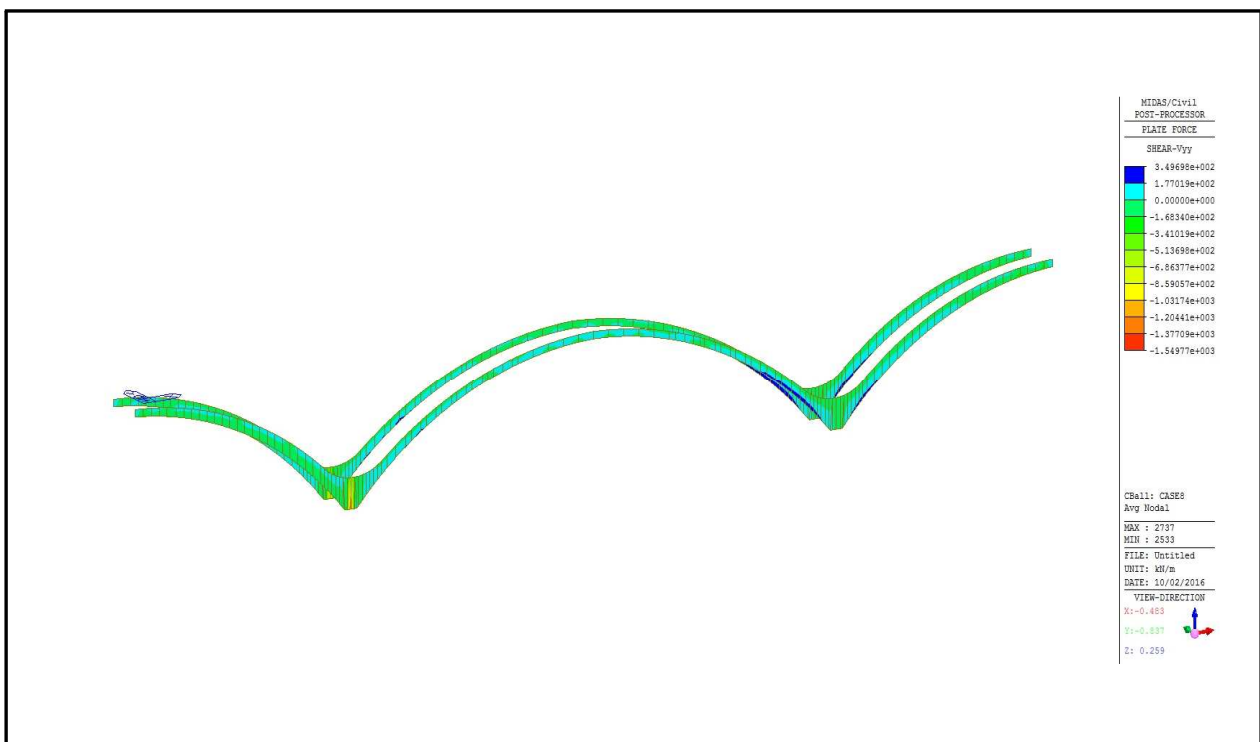
【그림 5.41】 백운1교(춘천) 하부거더(아치리브) 계수휨모멘트도(M_{yy})

㉔ 전단력(Syy)



【그림 5.42】 백운1교(춘천) 하부거더(아치리브) 전단력도(Syy)

㉕ 사용휨모멘트(Myy)



【그림 5.43】 백운1교(춘천) 하부거더(아치리브) 사용휨모멘트도(Myy)

차. 단면력 집계

【표 5.156】 백운1교(춘천) 부재별 단면력 집계표

구 분			계수모멘트 (kN · m)	전단력 (kN)	사용모멘트 (kN · m)	축력 (kN)
교대부	상부바닥판	캔틸레버부 (좌측)	-88.693	-152.195	-45.386	
		슬래브 중앙부	131.677	-98.817	59.992	
		캔틸레버부 (우측)	-58.648	112.407	-46.173	
	연직재	좌측	141.680	-56.419	95.343	-968.864
		우측	258.820	298.745	207.001	944.769
	하부거더 (아치리브)	좌측	-306.678	-49.503	-215.585	
		우측	368.315	-124.899	286.652	
교각부	상부바닥판	캔틸레버부 (좌측)	88.808	-146.666	36.780	
		슬래브 중앙부	97.211	-113.829	-53.504	
		캔틸레버부 (우측)	-53.657	169.447	-53.504	
	연직재	좌측	171.348	-158.561	-113.667	2,613.728
		우측	194.122	-354.291	-139.805	1,774.485
	하부거더 (아치리브)	좌측	655.346	480.914	524.473	
		우측	905.136	-449.244	696.259	
중앙부	상부바닥판	캔틸레버부 (좌측)	107.854	-77.443	68.576	
		슬래브 중앙부	268.973	-53.671	165.616	
		캔틸레버부 (우측)	81.788	77.225	65.430	
	연직재	좌측	-117.703	-120.703	-70.543	695.525
		우측	82.191	87.776	65.752	-1,188.828
	하부거더 (아치리브)	좌측	486.355	-338.228	276.248	
		우측	-466.835	-276.190	-318.276	

카. 단면력 검토

1) 교대부 단면검토

① 상부바닥판

【표 5.157】 백운1교(춘천) 교대부 상부바닥판 단면검토

검 토 조 건	$f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$ $f_y = 400.0 \text{ MPa}$ $\lambda = 1.00$ $\beta_1 = 0.850$ $\phi_f = 0.85$ $\phi_v = 0.75$ $p_{min} = \max(0.25\sqrt{(f_{ck})/f_y}, 1.4/f_y) = 0.00350$ 계수 모멘트 $M_u = 131.677 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 계수 전단력 $V_u = 152.195 \text{ KN}$ 단면의 두께 $H = 500.000 \text{ mm}$ 단 면 폭 $B = 1000.000 \text{ mm}$ 유효 깊이 $D = 450.000 \text{ mm}$ 피 복 두께 $D_c = 50.000 \text{ mm}$
휨모멘트 검 토	- 휨강도 검토 사용철근량 = H25 @ 200.00 mm ($D_c = 50.00 \text{ mm}$) + H22 @ 200.00 mm ($D_c = 50.00 \text{ mm}$) = 4469.000 mm ² $\therefore P = A_s/(B\cdot D) = 0.00993$ 공칭강도시 등가응력깊이 $a = (A_s\cdot f_y) / (0.85\cdot f_{ck}\cdot B) = 77.891 \text{ mm}$ 최외단 인장철근 변형률 $\epsilon_t = 0.01173 \geq 0.004 \dots \therefore \text{O.K}$...여기서 $\epsilon_t = 0.003\cdot(H - a/\beta_1 - D_{c_min}) / (a/\beta_1)$ $0.005 \leq \epsilon_t$ 이므로 인장지배단면, $\phi_f = 0.85$ 를 적용함. $\phi M_n = \phi_f\cdot f_y\cdot A_s\cdot (D - a/2) = 624580800.000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ = 624.581 KN·m $\geq M_u = 131.677 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}$ - 필요철근량 및 철근비 검토 소요등가응력깊이 $a = 15.259 \text{ mm}$ 로 가정 $A_s = M_u / (\phi_f\cdot f_y\cdot (D - a/2)) = 875.477 \text{ mm}^2$ $a = (A_s\cdot f_y) / (0.85\cdot f_{ck}\cdot B) = 15.259 \text{ mm} \therefore$ 가정과 비슷함 O.K $P_{req} = [M_u / (\phi_f\cdot f_y\cdot (D - a/2))] / (B\cdot D) = 0.00195 \Rightarrow 4/3 P_{req} = 0.00259$ $\therefore$ 필요철근량 $req.A_s = P_{req} \times (B\cdot D) = 875.477 \text{ mm}^2 \leq$ 사용철근량...O.K 철근비검토 : $P_{min} \leq P \dots \therefore \text{O.K}$
전단력 검 토	$\phi_v\cdot V_c = \phi_v\cdot 1/6\cdot \lambda\sqrt{f_{ck}}\cdot B\cdot d / 1000 = 292.284 \text{ KN}$ $\phi_v\cdot V_c = 292.284 \text{ KN} > V_u = 152.195 \text{ KN} \dots \therefore$ 전단철근 필요없음.
균 열 검 토	$M_o = 59.992 \text{ KN}\cdot\text{m}$ (사용하중 모멘트) $n = E_s/E_c = 200000 / \{0.077 \text{ mc}^{1.5} * \sqrt{(F_{ck} + \Delta f)}\} = 7$ $p = A_s/(B\cdot D) = 0.00993$ $k = -np + \sqrt{((np)^2 + 2np)} = 0.310$ $j = 0.897$ $x = k\cdot d = 139.402 \text{ mm}$ $f_c = 2\cdot M_o / (B\cdot x\cdot (D - x/3)) = 2.133 \text{ MPa}$ $f_s = M_o / (A_s\cdot (D - x/3)) = 33.266 \text{ MPa}$ $f_{st} = f_s\cdot (H - D_{c_min} - x) / (D - x) = 33.266 \text{ MPa}$ 최외단철근 소요중심간격 $s = \text{Min} [375\cdot (210/f_{st}) - 2.5C_c, 300\cdot (210/f_{st})] = 1893.81 \text{ mm}$...여기서.. $C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 37.50 \text{ mm}$ 최외단철근 평균배근간격 = 200.00 mm $\leq 1893.81 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$

② 연직재

【표 5.158】 백운1교(춘천) 교대부 연직재 단면검토

검 토 조 건	재 료 강 도 : $f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$ $f_y = 400.0 \text{ MPa}$ 재료저항계수 : $\phi_c = 0.650$ $\phi_s = 0.90$ $f-\epsilon$곡선계수 : $n\epsilon = 2.000$ $\epsilon_{co} = 0.00200$ $\epsilon_{cu} = 0.00330$ $\alpha = 0.798$ $\beta = 0.412$ 극한 모멘트 $M_u = 258.820 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 극 한 축 력 $P_u = 968.864 \text{ KN}$ 단면의 두께 $H = 550.000 \text{ mm}$ 단 위 폭 $B = 1,000.000 \text{ mm}$ 유효 깊이 $D = 500.000 \text{ mm}$ 피 복 두께 $D_c = 50.000 \text{ mm}$ 작 용 편 심 $e = 267.138 \text{ mm}$ 인장축 철근 $A_{st} = 3,871.000 \text{ mm}^2$ 1단 ($d_c = 50 \text{ mm}$) : H 22 @ 100 mm 압축축 철근 $A_{sc} = 3,871.000 \text{ mm}^2$ 1단 ($d_c = 50 \text{ mm}$) : H 22 @ 100 mm
평 형 상 태 검 토	$c = \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_{yd}) \cdot d = 323.529 \text{ mm}$ $C_{ck} = 0.85 \cdot f_{ck} \cdot B \cdot H = 6,547,125.0 \text{ N}$ 소성중심 $x = (C_{ck} \cdot H/2 + f_y \cdot A_{sc} \cdot d_c + f_y \cdot A_{st} \cdot d) / (C_{ck} + f_y \cdot A_{sc} + f_y \cdot A_{st})$ $= 275.00 \text{ mm}$ 콘크리트 $C_c = 0.85 \cdot f_{ck} \cdot a \cdot b = 3,851,250.0 \text{ N}$ 압축철근 $C_s = (f_s - 0.85 \cdot f_{ck}) \cdot A_{sc} = 1,335,814.0 \text{ N}$ ($\epsilon_{sc} > \epsilon_y \rightarrow f_s = f_y = 360.00 \text{ MPa}$) 인장철근 $T_s = f_y \cdot A_{st} = 1,393,560.0 \text{ N}$ 평형축력 $P_b = C_c + C_s - T_s = 3,793,504.0 \text{ N}$ 평형모멘트 $M_b = C_c(x-a/2) + C_s(x-d_c) + T_s(d-x) = 1,160,133,000.0 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 평형편심 $e_b = M_b / P_b = 305.821 \text{ mm}$ $e < e_b \rightarrow$ 압축파괴영역
강 도 검 토	작용편심 $e = 99.008 \text{ mm} > e_{\min} = 20.000 \text{ mm}$ $\rightarrow$ 기둥강도를 Trial & Error Method로 계산함. 중립축 $c = 430.742 \text{ mm}$로 가정하면... $f_{sc} = 360.00 \text{ MPa}$ (압축), $f_{st} = 310.40 \text{ MPa}$ (인장) 콘크리트 $C_c = C_{c1} + C_{c2} = 2,049,679 \text{ N} + 1,998,437 \text{ N}$ (응력변화부+일정부) 압축철근 $C_s = A_{sc} \times (f_{sc} - \phi_c 0.85 f_{ck}) = 1,335,814 \text{ N}$ ($f_{sc} \leq \phi_s \cdot f_y$) 인장철근 $T_s = A_{st} \times f_{st} = 1,201,543 \text{ N}$ ($f_{st} \leq \phi_s \cdot f_y$) $P_r = C_{c1} + C_{c2} + C_s - T_s$ $= 2,049,679 + 1,998,437 + 1,335,814 - 1,201,543 = 4,182,388 \text{ N}$ $M_r = M_{c1} + M_{c2} + M_s + M_t$ $= 130,658,900 + 415,708,900 + 300,558,200 + 270,347,100 = 1,117,273,000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ $e' = M_r / P_r = 267.138 \text{ mm} \approx e = 267.138 \text{ mm} \rightarrow \text{say O.K.}$ $P_r = 4,182.387 \text{ KN} \geq P_u = 968.864 \text{ KN} \quad \therefore \text{O.K}$ $M_r = 1,117.273 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 258.820 \text{ KN}\cdot\text{m} \quad \therefore \text{O.K}$
전 단 력 검 토	$\kappa = 1 + \sqrt{(200/D)} = 1.632 \leq 2.0$ $f_n = P_u / A_g = 1.762 \text{ MPa} \leq 0.2\phi_c \cdot f_{ck} = 3.510 \text{ MPa}$ (작은값 적용) $f_{ctk} = 0.7 \times 0.3 \times (f_{ck} + \Delta f)^{2/3} = 2.072 \text{ MPa}$ $V_c = [0.85 \phi_c \cdot \kappa \cdot (p f_{ck})^{1/3} + 0.15 f_n] B \cdot D / 1000 = 399.757 \text{ KN}$ $V_{cd, \min} = (0.4 \phi_c \cdot f_{ctk} + 0.15 f_n) B \cdot D / 1000 = 401.522 \text{ KN}$ $\therefore V_{cd} = \text{Max}(V_c, V_{cd, \min}) = 401.522 \text{ KN} \geq V_u = 298.745 \text{ KN} \dots \therefore \text{전단철근 필요없음.}$

③ 하부거더(아치리브)

【표 5.159】 백운1교(춘천) 교대부 하부거더(아치리브) 단면검토

검 토 조 건	$f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$ $f_y = 400.0 \text{ MPa}$ $\lambda = 1.00$ $\beta_1 = 0.850$ $\phi_f = 0.85$ $\phi_v = 0.75$ $p_{min} = \max(0.25\sqrt{(f_{ck})/f_y}, 1.4/f_y) = 0.00350$ 계수 모멘트 $M_u = 368.315 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 계수 전단력 $V_u = 124.899 \text{ KN}$ 단면의 두께 $H = 1193.000 \text{ mm}$ 단 면 폭 $B = 2000.000 \text{ mm}$ 유효 깊이 $D = 1143.000 \text{ mm}$ 피 복 두 께 $D_c = 50.000 \text{ mm}$
휨모멘트 검 토	- 휨강도 검토 사용철근량 = H32 $\times 6.00 \text{ EA}$ ($D_c = 50.00 \text{ mm}$) $= 4765.200 \text{ mm}^2$ $\therefore P = A_s/(B\cdot D) = 0.00208$ 공칭강도시 등가응력깊이 $a = (A_s\cdot f_y) / (0.85\cdot f_{ck}\cdot B) = 41.527 \text{ mm}$ 최외단 인장철근 변형률 $\epsilon_t = 0.06719 \geq 0.004 \dots \therefore \text{O.K}$...여기서 $\epsilon_t = 0.003\cdot(H - a/\beta_1 - D_{c_min}) / (a/\beta_1)$ $0.005 \leq \epsilon_t$ 이므로 인장지배단면, $\phi_f = 0.85$ 를 적용함. $\phi M_n = \phi_f\cdot f_y\cdot A_s\cdot (D - a/2) = 1,818,212,000.000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ $= 1818.212 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 368.315 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}$ - 필요철근량 및 철근비 검토 소요등가응력깊이 $a = 8.063 \text{ mm}$ 로 가정 $A_s = M_u / \{\phi_f\cdot f_y\cdot (D - a/2)\} = 925.283 \text{ mm}^2$ $a = (A_s\cdot f_y) / (0.85\cdot f_{ck}\cdot B) = 8.063 \text{ mm} \therefore$ 가정과 비슷함 O.K $P_{req} = [M_u / \{\phi_f\cdot f_y\cdot (D - a/2)\}] / (B\cdot D) = 0.00040 \Rightarrow 4/3 P_{req} = 0.00054$ $\therefore$ 필요철근량 $req.A_s = P_{req} \times (B\cdot D) = 925.283 \text{ mm}^2 \leq$ 사용철근량...O.K 철근비검토 : $4/3 P_{req} \leq P \leq P_{min} \dots \therefore \text{O.K}$
전단력 검 토	$\phi_v\cdot V_c = \phi_v\cdot 1/6\cdot \lambda\sqrt{f_{ck}}\cdot B\cdot d / 1000 = 1,484.801 \text{ KN}$ $1/2\cdot \phi_v\cdot V_c = 742.400 \text{ KN} > V_u = 124.899 \text{ KN} \dots \therefore$ 전단철근 필요없음.
균 열 검 토	$M_o = 286.652 \text{ KN}\cdot\text{m}$ (사용하중 모멘트) $n = E_s/E_c = 200000 / \{0.077 \text{ mc}^{1.5} \cdot \sqrt[3]{(F_{ck} + \Delta f)}\} = 7$ $p = A_s/(B\cdot D) = 0.00208$ $k = -np + \sqrt{((np)^2 + 2np)} = 0.157$ $j = 0.948$ $x = k\cdot d = 179.293 \text{ mm}$ $f_c = 2\cdot M_o / (B\cdot x\cdot (D - x/3)) = 1.476 \text{ MPa}$ $f_s = M_o / (A_s\cdot (D - x/3)) = 55.533 \text{ MPa}$ $f_{st} = f_s\cdot (H - D_{c_min} - x) / (D - x) = 55.533 \text{ MPa}$ 최외단철근 소요중심간격 $s = \text{Min} [375\cdot (210/f_{st}) - 2.5C_c, 300\cdot (210/f_{st})] = 1134.46 \text{ mm}$...여기서, $C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 34.00 \text{ mm}$ 최외단철근 평균배근간격 = $333.33 \text{ mm} \leq 1134.46 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$

2) 교각부 단면검토

① 상부바닥판

【표 5.160】 백운1교(춘천) 교각부 상부바닥판 단면검토

검 토 조 건	$f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$ $f_y = 400.0 \text{ MPa}$ $\lambda = 1.00$ $\beta_1 = 0.850$ $\phi_f = 0.85$ $\phi_v = 0.75$ $p_{min} = \max(0.25\sqrt{(f_{ck})/f_y}, 1.4/f_y) = 0.00350$ 계수 모멘트 $M_u = 97.211 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 계수 전단력 $V_u = 169.447 \text{ KN}$ 단면의 두께 $H = 500.000 \text{ mm}$ 단 면 폭 $B = 1000.000 \text{ mm}$ 유효 깊이 $D = 450.000 \text{ mm}$ 피 복 두 께 $D_c = 50.000 \text{ mm}$
휨모멘트 검 토	- 휨강도 검토 사용철근량 = H25 @ 200.00 mm ($D_c = 50.00 \text{ mm}$) + H22 @ 200.00 mm ($D_c = 50.00 \text{ mm}$) = 4469.000 mm ² $\therefore P = A_s/(B \cdot D) = 0.00993$ 공칭강도시 등가응력깊이 $a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 77.891 \text{ mm}$ 최외단 인장철근 변형률 $\epsilon_t = 0.01173 \geq 0.004 \dots \therefore \text{O.K}$...여기서 $\epsilon_t = 0.003 \cdot (H - a/\beta_1 - D_{c_min}) / (a/\beta_1)$ $0.005 \leq \epsilon_t$ 이므로 인장지배단면, $\phi_f = 0.85$ 를 적용함. $\phi M_n = \phi_f \cdot f_y \cdot A_s \cdot (D - a/2) = 624,580,800.000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ = 624.581 KN·m $\geq M_u = 97.211 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}$ - 필요철근량 및 철근비 검토 소요등가응력깊이 $a = 11.214 \text{ mm}$ 로 가정 $A_s = M_u / \{\phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2)\} = 643.382 \text{ mm}^2$ $a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 11.214 \text{ mm} \therefore$ 가정과 비슷함 O.K $P_{req} = [M_u / \{\phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2)\}] / (B \cdot D) = 0.00143 \Rightarrow 4/3 P_{req} = 0.00191$ $\therefore$ 필요철근량 $req.A_s = P_{req} \times (B \cdot D) = 643.382 \text{ mm}^2 \leq$ 사용철근량...O.K 철근비검토 : $p_{min} \leq P \dots \therefore \text{O.K}$
전단력 검 토	$\phi_v \cdot V_c = \phi_v \cdot 1/6 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d / 1000 = 292.284 \text{ KN}$ $\phi_v \cdot V_c = 292.284 \text{ KN} > V_u = 169.447 \text{ KN} \dots \therefore$ 전단철근 필요없음.
균 열 검 토	$M_o = 171.262 \text{ KN}\cdot\text{m}$ (사용하중 모멘트) $n = E_s/E_c = 200000 / \{0.077 \text{ mc}^{1.5} \cdot \sqrt[3]{(F_{ck} + \Delta f)}\} = 7$ $p = A_s/(B \cdot D) = 0.00993$ $k = -np + \sqrt{((np)^2 + 2np)} = 0.310$ $j = 0.897$ $x = k \cdot d = 139.402 \text{ mm}$ $f_c = 2 \cdot M_o / (B \cdot x \cdot (D - x/3)) = 1.902 \text{ MPa}$ $f_s = M_o / (A_s \cdot (D - x/3)) = 29.669 \text{ MPa}$ $f_{st} = f_s \cdot (H - D_{c_min} - x) / (D - x) = 29.669 \text{ MPa}$ 최외단철근 소요중심간격 $s = \text{Min} [375 \cdot (210/f_{st}) - 2.5C_c, 300 \cdot (210/f_{st})] = 2,123.46 \text{ mm}$...여기서, $C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 37.50 \text{ mm}$ 최외단철근 평균배근간격 = 200.00 mm $\leq 2,123.46 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$

② 연직재

【표 5.161】 백운1교(춘천) 교각부 연직재 단면검토

검 토 조 건	재 료 강 도 : $f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$ $f_y = 400.0 \text{ MPa}$ 재료저항계수 : $\phi_c = 0.650$ $\phi_s = 0.90$ $f-\epsilon$곡선계수 : $n\epsilon = 2.000$ $\epsilon_{co} = 0.00200$ $\epsilon_{cu} = 0.00330$ $\alpha = 0.798$ $\beta = 0.412$ 극한 모멘트 $M_u = 194.122 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 극 한 축 력 $P_u = 2,613.728 \text{ KN}$ 단면의 두께 $H = 400.000 \text{ mm}$ 단 위 폭 $B = 1,000.000 \text{ mm}$ 유효 깊 이 $D = 350.000 \text{ mm}$ 피 복 두 께 $D_c = 50.000 \text{ mm}$ 작 용 편 심 $e = 74.270 \text{ mm}$ 인장축 철근 $A_{st} = 1,935.500 \text{ mm}^2$ 1단 ($d_c = 50 \text{ mm}$) : H 22 @ 200 mm 압축축 철근 $A_{sc} = 1,935.500 \text{ mm}^2$ 1단 ($d_c = 50 \text{ mm}$) : H 22 @ 200 mm
평 형 상 태 검 토	$c = \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_{yd}) \cdot d = 226.471 \text{ mm}$ $C_{ck} = 0.85 \cdot f_{ck} \cdot B \cdot H = 4,761,545.0 \text{ N}$ 소성중심 $x = (C_{ck} \cdot H/2 + f_y \cdot A_{sc} \cdot d_c + f_y \cdot A_{st} \cdot d) / (C_{ck} + f_y \cdot A_{sc} + f_y \cdot A_{st})$ $= 200.00 \text{ mm}$ 콘크리트 $C_c = 0.85 \cdot f_{ck} \cdot a \cdot b = 2,695,875.0 \text{ N}$ 압축철근 $C_s = (f_s - 0.85 \cdot f_{ck}) \cdot A_{sc} = 667,907.0 \text{ N}$ ($\epsilon_{sc} > \epsilon_y \rightarrow f_s = f_y = 360.00 \text{ MPa}$) 인장철근 $T_s = f_y \cdot A_{st} = 696,780.0 \text{ N}$ 평형축력 $P_b = C_c + C_s - T_s = 2,667,002.0 \text{ N}$ 평형모멘트 $M_b = C_c(x-a/2) + C_s(x-d_c) + T_s(d-x) = 492,473,800.0 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 평형편심 $e_b = M_b / P_b = 184.654 \text{ mm}$ $e < e_b \rightarrow$ 압축파괴영역
강 도 검 토	작용편심 $e = 99.008 \text{ mm} > e_{\min} = 20.000 \text{ mm}$ $\rightarrow$ 기둥강도를 Trial & Error Method로 계산함. 중립축 $c = 340.456 \text{ mm}$로 가정하면... $f_{sc} = 360.00 \text{ MPa}$ (압축), $f_{st} = 18.50 \text{ MPa}$ (인장) 콘크리트 $C_c = C_{c1} + C_{c2} = 2,052,023 \text{ N} + 2,000,722 \text{ N}$ (응력변화부+일정부) 압축철근 $C_s = A_{sc} \times (f_{sc} - \phi_c 0.85 f_{ck}) = 667,907 \text{ N}$ ($f_{sc} \leq \phi_s \cdot f_y$) 인장철근 $T_s = A_{st} \times f_{st} = 35,809 \text{ N}$ ($f_{st} \leq \phi_s \cdot f_y$) $P_r = C_{c1} + C_{c2} + C_s - T_s$ $= 2,052,023 + 2,000,722 + 667,907 - 35,809 = 4,684,842 \text{ N}$ $M_r = M_{c1} + M_{c2} + M_s + M_t$ $= -23,589,140 + 265,976,800 + 100,186,100 + 5,371,392 = 347,945,200 \text{ N}\cdot\text{mm}$ $e' = M_r / P_r = 74.270 \text{ mm} \approx e = 74.270 \text{ mm} \rightarrow \text{say O.K.}$ $P_r = 4,684.842 \text{ KN} \geq P_u = 2,613.728 \text{ KN} \quad \therefore \text{O.K}$ $M_r = 347.945 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 194.122 \text{ KN}\cdot\text{m} \quad \therefore \text{O.K}$
전 단 력 검 토	$\kappa = 1 + \sqrt{(200/D)} = 1.756 \leq 2.0$ $f_n = P_u / A_g = 2.378 \text{ MPa} \leq 0.2\phi_c \cdot f_{ck} = 3.510 \text{ MPa}$ (작은값 적용) $f_{ctk} = 0.7 \times 0.3 \times (f_{ck} + \Delta f)^{2/3} = 2.072 \text{ MPa}$ $V_c = [0.85 \phi_c \cdot \kappa \cdot (p f_{ck})^{1/3} + 0.15 f_n] B \cdot D / 1000 = 364.412 \text{ KN}$ $V_{cd, \min} = (0.4 \phi_c \cdot f_{ctk} + 0.15 f_n) B \cdot D / 1000 = 372.858 \text{ KN}$ $\therefore V_{cd} = \text{Max}(V_c, V_{cd, \min}) = 372.858 \text{ KN} \geq V_u = 354.291 \text{ KN} \dots \therefore \text{전단철근 필요없음.}$

③ 하부거더(아치리브)

【표 5.162】 백운1교(춘천) 교각부 하부거더(아치리브) 단면검토

검 토 조 건	$f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$ $f_y = 400.0 \text{ MPa}$ $\lambda = 1.00$ $\beta_1 = 0.850$ $\phi_f = 0.85$ $\phi_v = 0.75$ $p_{min} = \max(0.25\sqrt{(f_{ck})/f_y}, 1.4/f_y) = 0.00350$ 계수 모멘트 $M_u = 905.136 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 계수 전단력 $V_u = 480.914 \text{ KN}$ 단면의 두께 $H = 4205.000 \text{ mm}$ 단 면 폭 $B = 2000.000 \text{ mm}$ 유효 깊 이 $D = 4155.000 \text{ mm}$ 피 복 두께 $D_c = 50.000 \text{ mm}$
휨모멘트 검 토	- 휨강도 검토 사용철근량 = $H22 \times 6.00 \text{ EA}$ ($D_c = 50.00 \text{ mm}$) $= 2,322.600 \text{ mm}^2$ $\therefore P = A_s/(B \cdot D) = 0.00028$ 공칭강도시 등가응력깊이 $a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 20.241 \text{ mm}$ 최외단 인장철근 변형률 $\epsilon_t = 0.52047 \geq 0.004 \dots \therefore \text{O.K}$...여기서 $\epsilon_t = 0.003 \cdot (H - a/\beta_1 - D_{c_min}) / (a/\beta_1)$ $0.005 \leq \epsilon_t$ 이므로 인장지배단면, $\phi_f = 0.85$ 를 적용함. $\phi M_n = \phi_f \cdot f_y \cdot A_s \cdot (D - a/2) = 3273146000.000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ $= 3,273.146 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 905.136 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}$ - 필요철근량 및 철근비 검토 소요등가응력깊이 $a = 5.587 \text{ mm}$ 로 가정 $A_s = M_u / \{\phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2)\} = 641.145 \text{ mm}^2$ $a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 5.587 \text{ mm} \therefore \text{가정과 비슷함 O.K}$ $P_{req} = [M_u / \{\phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2)\}] / (B \cdot D) = 0.00008 \Rightarrow 4/3 P_{req} = 0.00010$ $\therefore \text{필요철근량 } req.A_s = P_{req} \times (B \cdot D) = 641.145 \text{ mm}^2 \leq \text{사용철근량} \dots \text{O.K}$ 철근비검토 : $4/3 P_{req} \leq P \leq P_{min} \dots \therefore \text{O.K}$
전단력 검 토	$\phi_v \cdot V_c = \phi_v \cdot 1/6 \cdot \lambda \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d / 1000 = 5,397.503 \text{ KN}$ $1/2 \cdot \phi_v \cdot V_c = 2,698.752 \text{ KN} > V_u = 480.914 \text{ KN} \dots \therefore \text{전단철근 필요없음.}$
균 열 검 토	$M_o = 696.259 \text{ KN}\cdot\text{m}$ (사용하중 모멘트) $n = E_s/E_c = 200000 / \{0.077 \text{ mc}^{1.5} * \sqrt[3]{(F_{ck} + \Delta f)}\} = 7$ $p = A_s/(B \cdot D) = 0.00028$ $k = -np + \sqrt{(np)^2 + 2np} = 0.061$ $j = 0.980$ $x = k \cdot d = 251.907 \text{ mm}$ $f_c = 2 \cdot M_o / (B \cdot x \cdot (D - x/3)) = 0.679 \text{ MPa}$ $f_s = M_o / (A_s \cdot (D - x/3)) = 73.636 \text{ MPa}$ $f_{st} = f_s \cdot (H - D_{c_min} - x) / (D - x) = 73.636 \text{ MPa}$ 최외단철근 소요중심간격 $s = \text{Min} [375 \cdot (210/f_{st}) - 2.5C_c, 300 \cdot (210/f_{st})] = 855.56 \text{ mm}$...여기서.. $C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 39.00 \text{ mm}$ 최외단철근 평균배근간격 = $333.33 \text{ mm} \leq 855.56 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$

3) 중앙부 단면검토

① 상부바닥판

【표 5.163】 백운1교(춘천) 중앙부 상부바닥판 단면검토

검 토 조 건	$f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$ $f_y = 400.0 \text{ MPa}$ $\lambda = 1.00$ $\beta_1 = 0.850$ $\phi_f = 0.85$ $\phi_v = 0.75$ $p_{min} = \max(0.25\sqrt{(f_{ck})/f_y}, 1.4/f_y) = 0.00350$ 계수 모멘트 $M_u = 268.973 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 계수 전단력 $V_u = 77.443 \text{ KN}$ 단면의 두께 $H = 500.000 \text{ mm}$ 단 면 폭 $B = 1000.000 \text{ mm}$ 유효 깊이 $D = 450.000 \text{ mm}$ 피 복 두께 $D_c = 50.000 \text{ mm}$
휨모멘트 검 토	사용철근량 = H25 @ 200.00 mm ($D_c = 50.00 \text{ mm}$) + H22 @ 200.00 mm ($D_c = 50.00 \text{ mm}$) = 4469.000 mm² $\therefore P = A_s/(B\cdot D) = 0.00993$ 공칭강도시 등가응력깊이 $a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 77.891 \text{ mm}$ 최외단 인장철근 변형률 $\epsilon_t = 0.01173 \geq 0.004 \dots \therefore \text{O.K}$...여기서 $\epsilon_t = 0.003 \cdot (H - a/\beta_1 - D_{c_min}) / (a/\beta_1)$ $0.005 \leq \epsilon_t$ 이므로 인장지배단면, $\phi_f = 0.85$를 적용함. $\phi M_n = \phi_f \cdot f_y \cdot A_s \cdot (D - a/2) = 624,580,800.000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ = 624.581 KN·m $\geq M_u = 268.973 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}$ - 필요철근량 및 철근비 검토 소요등가응력깊이 $a = 22.058 \text{ mm}$로 가정 $A_s = M_u / (\phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2)) = 1,822.303 \text{ mm}^2$ $a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 22.058 \text{ mm} \therefore$ 가정과 비슷함 O.K $P_{req} = [M_u / (\phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2))] / (B \cdot D) = 0.00405 \Rightarrow 4/3 P_{req} = 0.00540$ $\therefore$ 필요철근량 $req.A_s = P_{req} \times (B \cdot D) = 1,822.303 \text{ mm}^2 \leq$ 사용철근량...O.K 철근비검토 : $P_{min} \leq P \dots \therefore \text{O.K}$
전단력 검 토	$\phi_v \cdot V_c = \phi_v \cdot 1/6 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d / 1000 = 292.284 \text{ KN}$ $\phi_v \cdot V_c = 292.284 \text{ KN} > V_u = 77.443 \text{ KN} \dots \therefore$ 전단철근 필요없음.
균 열 검 토	$M_o = 165.616 \text{ KN}\cdot\text{m}$ (사용하중 모멘트) $n = E_s/E_c = 200000 / \{0.077 \text{ mc}^{1.5} * \sqrt[3]{(F_{ck} + \Delta f)}\} = 7$ $p = A_s/(B \cdot D) = 0.00993$ $k = -np + \sqrt{((np)^2 + 2np)} = 0.310$ $j = 0.980$ $x = k \cdot d = 139.402 \text{ mm}$ $f_c = 2 \cdot M_o / (B \cdot x \cdot (D - x/3)) = 5.888 \text{ MPa}$ $f_s = M_o / (A_s \cdot (D - x/3)) = 91.836 \text{ MPa}$ $f_{st} = f_s \cdot (H - D_{c_min} - x) / (D - x) = 91.836 \text{ MPa}$ 최외단철근 소요중심간격 $s = \text{Min} [375 \cdot (210/f_{st}) - 2.5C_c, 300 \cdot (210/f_{st})] = 686.01 \text{ mm}$...여기서, $C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 39.00 \text{ mm}$ 최외단철근 평균배근간격 = 200.00 mm $\leq 686.01 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$

② 연직재

【표 5.164】 백운1교(춘천) 중앙부 연직재 단면검토

검 토 조 건	재 료 강 도 : $f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$ $f_y = 400.0 \text{ MPa}$ 재료저항계수 : $\phi_c = 0.650$ $\phi_s = 0.90$ $f-\epsilon$곡선계수 : $n\epsilon = 2.000$ $\epsilon_{co} = 0.00200$ $\epsilon_{cu} = 0.00330$ $\alpha = 0.798$ $\beta = 0.412$ 극한 모멘트 $M_u = 117.703 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 극 한 축 력 $P_u = 1,188.828 \text{ KN}$ 단면의 두께 $H = 500.000 \text{ mm}$ 단 위 폭 $B = 1,000.000 \text{ mm}$ 유효 깊 이 $D = 450.000 \text{ mm}$ 피 복 두 께 $D_c = 50.000 \text{ mm}$ 작 용 편 심 $e = 99.008 \text{ mm}$ 인장축 철근 $A_{st} = 3,096.800 \text{ mm}^2$ 1단 ($d_c = 50 \text{ mm}$) : H 22 @ 125 mm 압축축 철근 $A_{sc} = 3,019.800 \text{ mm}^2$ 1단 ($d_c = 50 \text{ mm}$) : H 22 @ 125 mm
평 형 상 태 검 토	$c = \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_{yd}) \cdot d = 291.177 \text{ mm}$ $C_{ck} = 0.85 \cdot f_{ck} \cdot B \cdot H = 5,951,932.0 \text{ N}$ 소성중심 $x = (C_{ck} \cdot H/2 + f_y \cdot A_{sc} \cdot d_c + f_y \cdot A_{st} \cdot d) / (C_{ck} + f_y \cdot A_{sc} + f_y \cdot A_{st})$ $= 250.00 \text{ mm}$ 콘크리트 $C_c = 0.85 \cdot f_{ck} \cdot a \cdot b = 3,466,125.0 \text{ N}$ 압축철근 $C_s = (f_s - 0.85 \cdot f_{ck}) \cdot A_{sc} = 1,068,652.0 \text{ N}$ ($\epsilon_{sc} > \epsilon_y \rightarrow f_s = f_y = 360.00 \text{ MPa}$) 인장철근 $T_s = f_y \cdot A_{st} = 1,114,848.0 \text{ N}$ 평형축력 $P_b = C_c + C_s - T_s = 3,419,928.0 \text{ N}$ 평형모멘트 $M_b = C_c(x-a/2) + C_s(x-d_c) + T_s(d-x) = 887,644,600.0 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 평형편심 $e_b = M_b / P_b = 259.551 \text{ mm}$ $e < e_b \rightarrow$ 압축파괴영역
강 도 검 토	작용편심 $e = 99.008 \text{ mm} > e_{\min} = 20.000 \text{ mm}$ $\rightarrow$ 기둥강도를 Trial & Error Method로 계산함. 중립축 $c = 430.742 \text{ mm}$로 가정하면... $f_{sc} = 360.00 \text{ MPa}$ (압축), $f_{st} = 29.51 \text{ MPa}$ (인장) 콘크리트 $C_c = C_{c1} + C_{c2} = 2,596,202 \text{ N} + 2,531,297 \text{ N}$ (응력변화부+일정부) 압축철근 $C_s = A_{sc} \times (f_{sc} - \phi_c 0.85 f_{ck}) = 1,068,652 \text{ N}$ ($f_{sc} \leq \phi_s \cdot f_y$) 인장철근 $T_s = A_{st} \times f_{st} = 91,378 \text{ N}$ ($f_{st} \leq \phi_s \cdot f_y$) $P_r = C_{c1} + C_{c2} + C_s - T_s$ $= 2,596,202 + 2,531,297 + 1,068,652 - 91,378 = 6,104,773 \text{ N}$ $M_r = M_{c1} + M_{c2} + M_s + M_t$ $= -45,647,490 + 418,061,000 + 213,730,300 + 18,275,560 = 604,419,400 \text{ N}\cdot\text{mm}$ $e' = M_r / P_r = 99.008 \text{ mm} \approx e = 99.008 \text{ mm} \rightarrow \text{say O.K.}$ $P_r = 6,104.773 \text{ KN} \geq P_u = 1,188.828 \text{ KN} \quad \therefore \text{O.K}$ $M_r = 604.419 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 117.703 \text{ KN}\cdot\text{m} \quad \therefore \text{O.K}$
전 단 력 검 토	$\kappa = 1 + \sqrt{(200/D)} = 1.667 \leq 2.0$ $f_n = P_u / A_g = 2.378 \text{ MPa} \leq 0.2\phi_c \cdot f_{ck} = 3.510 \text{ MPa}$ (작은값 적용) $f_{ctk} = 0.7 \times 0.3 \times (f_{ck} + \Delta f)^{2/3} = 2.072 \text{ MPa}$ $V_c = [0.85 \phi_c \cdot \kappa \cdot (p f_{ck})^{1/3} + 0.15 f_n] B \cdot D / 1000 = 396.947 \text{ KN}$ $V_{cd, \min} = (0.4 \phi_c \cdot f_{ctk} + 0.15 f_n) B \cdot D / 1000 = 402.955 \text{ KN}$ $\therefore V_{cd} = \text{Max}(V_c, V_{cd, \min}) = 402.955 \text{ KN} \geq V_u = 120.703 \text{ KN} \dots \therefore \text{전단철근 필요없음.}$

③ 하부거더(아치리브)

【표 5.165】 백운1교(춘천) 중앙부 하부거더(아치리브) 단면검토

검 토 조 건	$f_{ck} = 27.0 \text{ MPa}$ $f_y = 400.0 \text{ MPa}$ $\lambda = 1.00$ $\beta_1 = 0.850$ $\phi_f = 0.85$ $\phi_v = 0.75$ $p_{min} = \max(0.25\sqrt{(f_{ck})/f_y}, 1.4/f_y) = 0.00350$ 계수 모멘트 $M_u = 486.355 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 계수 전단력 $V_u = 338.228 \text{ KN}$ 단면의 두께 $H = 1068.000 \text{ mm}$ 단 면 폭 $B = 2000.000 \text{ mm}$ 유효 깊 이 $D = 1018.000 \text{ mm}$ 피 복 두 께 $D_c = 50.000 \text{ mm}$
휨모멘트 검 토	- 휨강도 검토 사용철근량 = $H32 \times 18.00 \text{ EA}$ ($D_c = 50.00 \text{ mm}$) $= 14,295.600 \text{ mm}^2$ $\therefore P = A_s/(B \cdot D) = 0.00702$ 공칭강도시 등가응력깊이 $a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 124.580 \text{ mm}$ 최외단 인장철근 변형률 $\epsilon_t = 0.01784 \geq 0.004 \dots \therefore \text{O.K}$...여기서 $\epsilon_t = 0.003 \cdot (H - a/\beta_1 - D_{c_min}) / (a/\beta_1)$ $0.005 \leq \epsilon_t$ 이므로 인장지배단면, $\phi_f = 0.85$ 를 적용함. $\phi M_n = \phi_f \cdot f_y \cdot A_s \cdot (D - a/2) = 4,645,231,000.000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ $= 4,645.231 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 486.355 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}$ - 필요철근량 및 철근비 검토 소요등가응력깊이 $a = 12.320 \text{ mm}$ 로 가정 $A_s = M_u / \{\phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2)\} = 1,413.717 \text{ mm}^2$ $a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 12.320 \text{ mm} \therefore$ 가정과 비슷함 O.K $P_{req} = [M_u / \{\phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2)\}] / (B \cdot D) = 0.00069 \Rightarrow 4/3 P_{req} = 0.00093$ $\therefore$ 필요철근량 $req.A_s = P_{req} \times (B \cdot D) = 1,413.718 \text{ mm}^2 \leq$ 사용철근량...O.K 철근비검토 : $P_{min} \leq P \dots \therefore \text{O.K}$
전단력 검 토	$\phi_v \cdot V_c = \phi_v \cdot 1/6 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d / 1000 = 1,322,421 \text{ KN}$ $1/2 \cdot \phi_v \cdot V_c = 661.210 \text{ KN} > V_u = 338.228 \text{ KN} \dots \therefore$ 전단철근 필요없음.
균 열 검 토	$M_o = 318.276 \text{ KN}\cdot\text{m}$ (사용하중 모멘트) $n = E_s/E_c = 200,000 / \{0.077 \text{ mc}^{1.5} \cdot \sqrt{f_{ck} + \Delta f}\} = 7$ $p = A_s/(B \cdot D) = 0.00702$ $k = -np + \sqrt{(np)^2 + 2np} = 0.268$ $j = 0.911$ $x = k \cdot d = 273.035 \text{ mm}$ $f_c = 2 \cdot M_o / (B \cdot x \cdot (D - x/3)) = 1.258 \text{ MPa}$ $f_s = M_o / (A_s \cdot (D - x/3)) = 24.017 \text{ MPa}$ $f_{st} = f_s \cdot (H - D_{c_min} - x) / (D - x) = 24.017 \text{ MPa}$ 최외단철근 소요중심간격 $s = \text{Min} [375 \cdot (210/f_{st}) - 2.5C_c, 300 \cdot (210/f_{st})] = 2,623.09 \text{ mm}$...여기서, $C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 34.00 \text{ mm}$ 최외단철근 평균배근간격 = $111.11 \text{ mm} \leq 2,623.09 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$

타. 단면력 검토결과

1) 바닥판

【표 5.166】 백운1교(춘천) 바닥판의 단면력 검토결과

구 분	모 멘 트 (kN·m)			전 단 력 (kN)			비 고
	Mu (kN·m)	ΦM_n (kN·m)	안전율 (S·F)	Vu (kN)	ΦV_n (kN)	안전율 (S·F)	
교 대 부	131.677	624.581	4.743	152.195	292.284	1.920	
교 각 부	97.211	624.581	7.192	169.447	292.284	1.725	
중 앙 부	268.973	624.581	2.322	77.443	292.284	3.774	

2) 연직재

【표 5.167】 백운1교(춘천) 연직재의 단면력 검토결과

구 분	모 멘 트 (kN·m)			축 력 (kN)			비 고
	Mu (kN·m)	ΦM_n (kN·m)	안전율 (S·F)	Pu (kN)	ΦP_n (kN)	안전율 (S·F)	
교 대 부	258.820	1,117.273	4.156	968.860	4,182.387	4.317	
교 각 부	194.122	347.945	1.792	2,613.728	4,684.840	1.792	
중 앙 부	117.703	604.419	5.135	1,188.828	6104.773	5.135	

3) 거 더(아치리브)

【표 5.168】 백운1교(춘천) 거더의 단면력 검토결과

구 분	모 멘 트 (kN·m)			전 단 력 (kN)			비 고
	Mu (kN·m)	ΦM_n (kN·m)	안전율 (S·F)	Vu (kN)	ΦV_n (kN)	안전율 (S·F)	
교 대 부	368.315	1818.212	5.074	124.899	742.400	5.944	
교 각 부	905.136	3273.146	3.616	480.914	2698.752	5.612	
중 앙 부	486.355	4645.231	9.551	338.228	661.210	1.955	

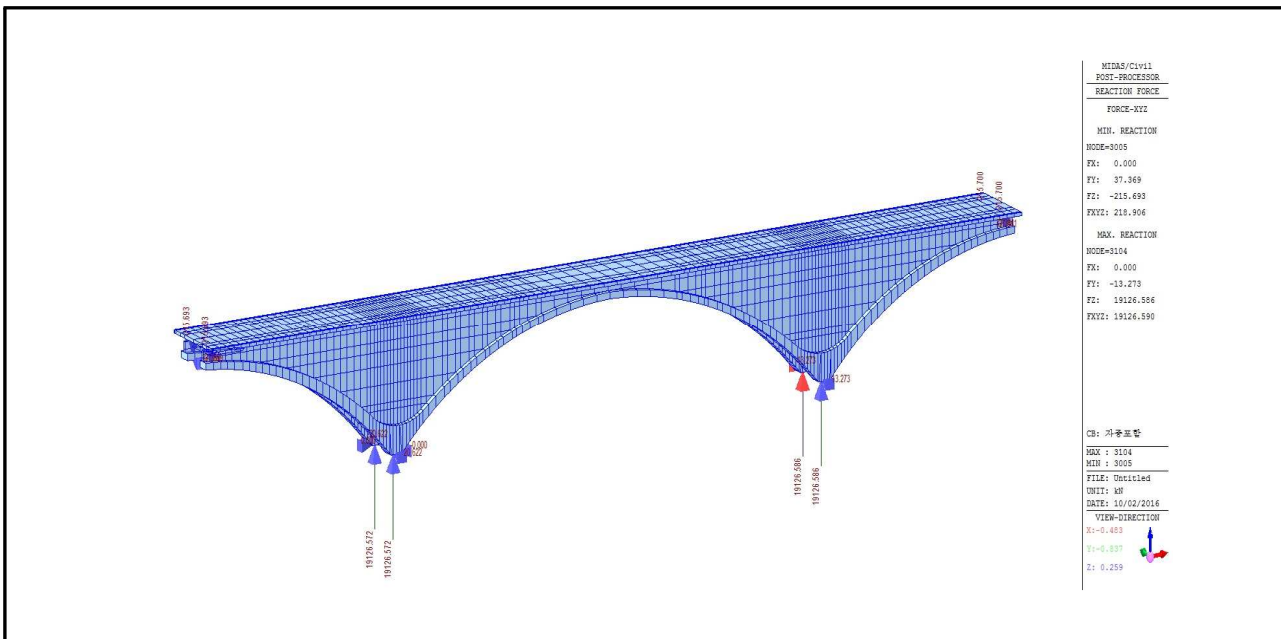
RC ARCH에 대한 안전성 검토결과, 안전율이 1.0이상(최소안전율 1.725)으로 나타나 모든 부재가 안전한 것으로 검토되었다.

파. 받침 검토

1) 받침 검토결과

【표 5.169】 백운1교(춘천) 받침 검토결과

구 분	고정하중	활하중	합 계	받침 용량	검토결과
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
교 대(max)	215.693	793.558	1,009.251	4,000	O.K
교 각(max)	19,126.586	2,258.266	21,384.852	37,000	O.K



【그림 5.44】 백운1교(춘천) 받침 반력검토 결과

2) 받침 검토결과 분석

백운1교(춘천)에 받침을 검토한 결과, 받침에 반력하중은 교대 1,009.251 kN, 교각 21,384.852 kN로 확인되었으며, 이를 교대는 4000kN, 교각은 37,000kN의 받침허용치와 비교한 결과 전체적으로 만족하는 것으로 검토되었다.

5.3.3 내하력 평가

가. 개 요

구조물이 현재 보유하고 있는 실제 내하력 및 안전도를 추정하기 위한 내하력 평가는 유지관리 체계이 핵심이 되는 중요한 분야로서 그 분석 및 평가방법의 합리성과 결과의 신뢰도가 중요한 문제로 된다. 현재 사용되고 있는 교량의 내하력 평가기법은 공용하중에 대한 내하율(Rating Factor)을 구하기 위한 허용응력개념(Working Stress Rating)이나 강도 또는 하중저항계수개념(Load and Resistance Factor Design)에 의한 방법으로 대별될 수 있다. 본 구조물은 철근콘크리트 아치교로 강도설계법에 의하여 내하력을 평가하였다.

나. 바닥판(강도설계법)

【표 5.170】 백운1교(춘천) 바닥판 내하력 평가

구 분	$\phi M_n(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_d(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_l(\text{kN} \cdot \text{m})$	기본 내하율	기본 내하력
캔틸레버부	624.581	38.400	49.727	5.375	DB-24 이상
중앙부	624.581	80.497	74.040	3.266	DB-24 이상

다. 거더(RC-Arch)(강도설계법)

【표 5.171】 백운1교(춘천) 거더(RC-Arch) 내하력 평가

구 분	$\phi M_n(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_d(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_l(\text{kN} \cdot \text{m})$	기본 내하율	기본 내하력
정모멘트 (S1)	1,818.212	88.134	98.259	8.064	DB-24 이상
정모멘트 (S2)	4,645.231	33.571	103.303	20.718	DB-24 이상
부모멘트	3,273.146	122.627	198.230	7.306	DB-24 이상

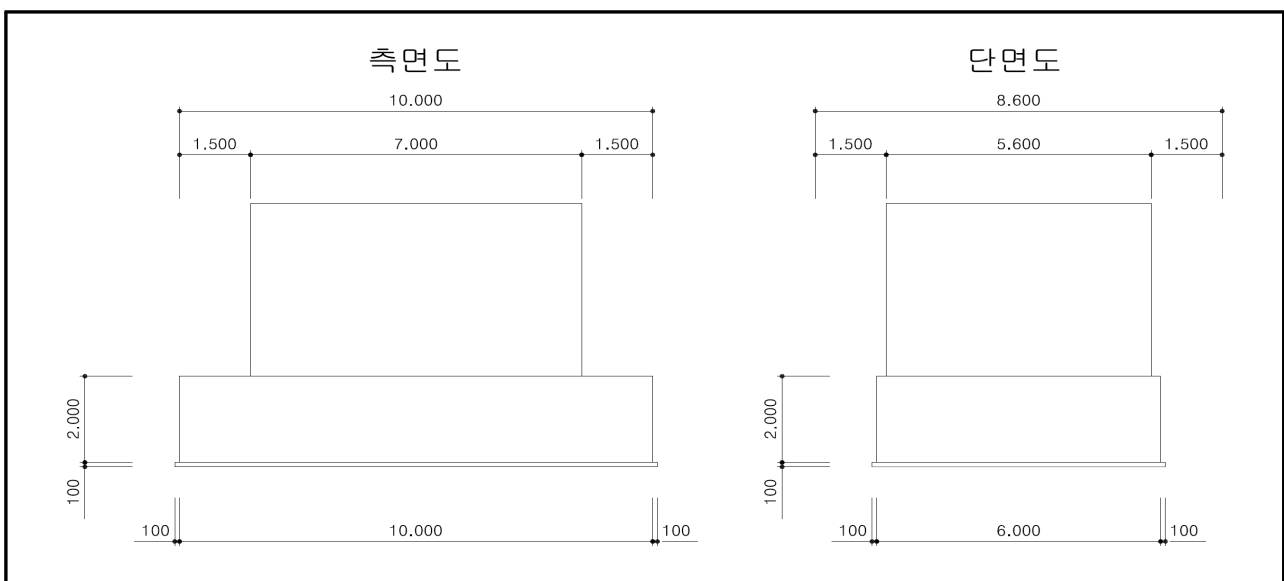
5.3.4 하부구조 구조검토

가. 교각 검토

본 교량의 교각은 2개소로 P1(폭5.6m, 길이7.0m, 높이4.0m), P2(폭6.0m, 길이13.5m, 높이3.0m)는 높이가 낮고 폭과 넓이가 큰 벽식 형식의 교각으로 지중에 매립되어 있어 기둥에 대한 안전성은 충분히 확보하고 있을 것으로 판단되어 기초에 대해서만 안전성 검토를 수행하였다.

1) 교각(P1)

① 기초제원



【그림 5.45】 백운1교(춘천) 교각(P1) 기초제원

② 사용하중 요약

【표 5.172】 백운1교(춘천) 교각(P1) 사용하중 요약

구 분	수 직 력(V)	수 평 력(H)	Mr	Mo
	kN	kN	kN · m	kN · m
상시	45,151	1,525	2,308	56,587

③ 안정검토 요약

【표 5.173】 백운1교(춘천) 교각(P1) 안정검토 요약

구 분	안 전 검 토	판정기준	비 고
전도에 대한 안정	$2,308.3 / 56,587.1 = 0.041$	$B / 6 = 1.0 \geq e$	O.K
활동에 대한 안정	$38,007 / 1,525 = 24.918$	$H_u/H \geq 1.5$	O.K
지지력에 대한 안정	$800.0 / 760.8 = 1.051$	$Q_{max}/Q_a \geq 1.0$	O.K

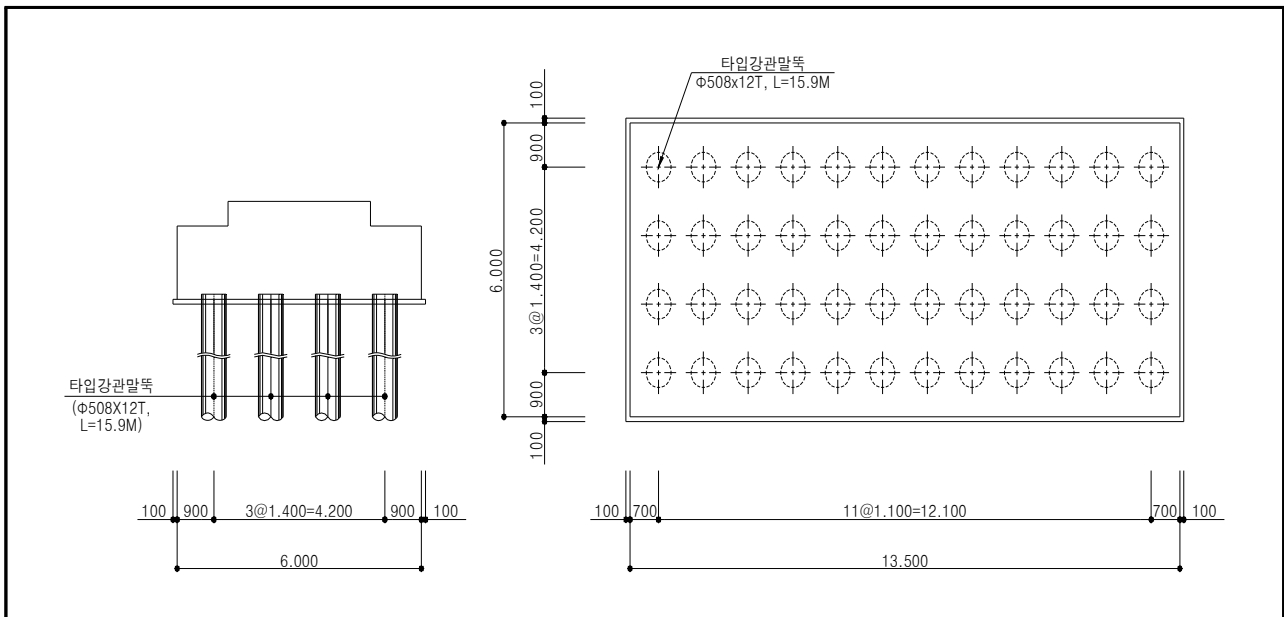
④ 기초단면검토 요약

【표 5.174】 백운1교(춘천) 교각(P1) 기초단면검토 요약

구 분	깊이 H(mm)	Req. As (mm ²)	Use. As (mm ²)	Mu (kN.m)	ΦMn (kN.m)	안전도	비 고
기 초	1,900	754.821	1935.500	485.926	1239.233	2.55	O.K

2) 교각(P2)

① 말뚝 배치도 및 제원



【그림 5.46】 백운1교(춘천) 교각(P2) 말뚝배치도 및 제원

② 말뚝제원 및 사용계수

【표 5.175】 백운1교(춘천) 교각(P2) 말뚝제원 및 사용계수

말뚝 종류	직경(mm)	두께(mm)	부식두께(mm)	길이(m)
타입강관말뚝	508	12	2	15.900

- 말뚝의 탄성계수 $E = 210,000.0 \text{ MPa}$
- 말뚝의 단면2차모멘트 $= \pi/64 \times (0.504^4 - 0.484^4) = 0.000474 \text{ m}^4$
- 말뚝 머리의 평균 N치 $N = 10$
- 말뚝 선단 지지층 조건 : 경암층 $q = 5,000 \text{ kN/m}^2$
- 말뚝 선단의 근입깊이 $Df = 1.0 \text{ m}$

③ 말뚝 검토결과

【표 5.176】 백운1교(춘천) 교각(P2) 말뚝 검토결과

구 분		허용값	발생값	비 고
지지력	허용지지력(kN/EA)	1585.900	1351.556	O.K
	허용인발력(kN/EA)	-	-	-
허용응력	휨응력(kN)	133.000	90.64	O.K
	전단응력(kN)	80.000	0.72	O.K
	수평변위(mm)	15.000	0.06	O.K

3) 검토결과 분석

교각에 대해서 안전성을 검토한 결과 검토대상 하중조합에 대하여 기둥부의 축력 및 모멘트, 기초부의 지지, 전도, 활동에 대하여 안전율을 만족시키고 있음을 확인하였다.

나. 교대 검토

1) 해석조건

① 일반조건

【표 5.177】 백운1교(춘천) 교대 해석 일반조건

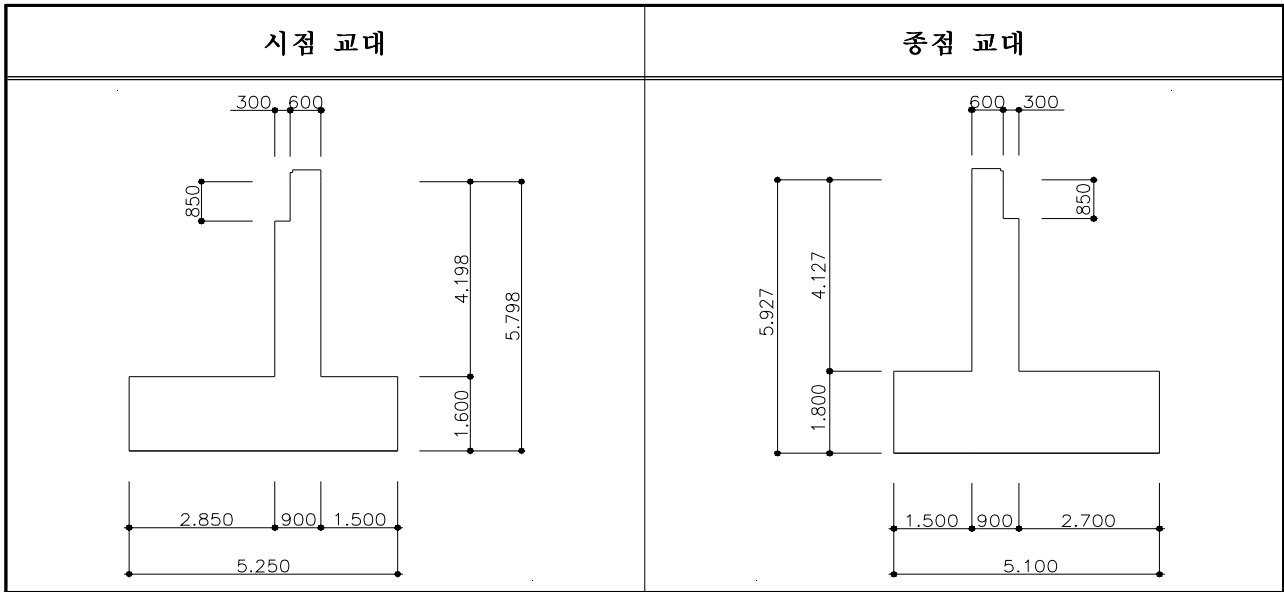
교량등급	1등급	상부형식	RC ARCH교
연 장	151.40 m	사 각	-
교대형식	역T형 교대	기초형식	직접기초, 말뚝기초
교대높이	H = 5.798~5.927 m	교대길이	B = 12.51 m
기초폭	Bf = 5.25~5.10m	기초길이	Lf = 12.51 m

② 사용재료 및 강도

【표 5.178】 백운1교(춘천) 교대 해석 사용재료 및 강도

구 분	교대구체		기초	
	콘크리트	철근	콘크리트	철근
단위질량 (kg/m^3)	2,500	7,850	2,500	7,850
항복강도 (MPa)	24	300	24	300

③ 검토단면



【그림 5.47】 백운1교(춘천) 교대 해석 단면

2) 하중조건

① 시점교대

【표 5.179】 백운1교(춘천) 시점교대 하중조건

구 분	수 직 력(V)	수 평 력(H)	Mr	Mo
	kN	kN	kN · m	kN · m
콘크리트 자중	298.080	-	721.094	-
재하토사 자중	244.386	-	926.744	-
토 압	-	91.102	-	176.070
과 재 하 중	31.500	15.713	115.762	45.552
합 계	573.966	106.815	1,763.600	272.858

② 종점교대

【표 5.180】 백운1교(춘천) 종점교대 하중조건

구 분	수 직 력(V)	수 평 력(H)	Mr	Mo
	kN	kN	kN · m	kN · m
콘크리트 자중	315.983	-	751.955	-
재하토사 자중	227.958	-	847.192	-
토 압	-	95.200	-	188.083
과 재 하 중	30.000	16.062	108.000	47.600
합 계	573.941	111.262	1,707.147	235.683

3) 안정검토

구조해석에서 계산한 상부구조반력과 교대자중 및 토압을 바탕으로 기초의 안정성을 검토하였다.

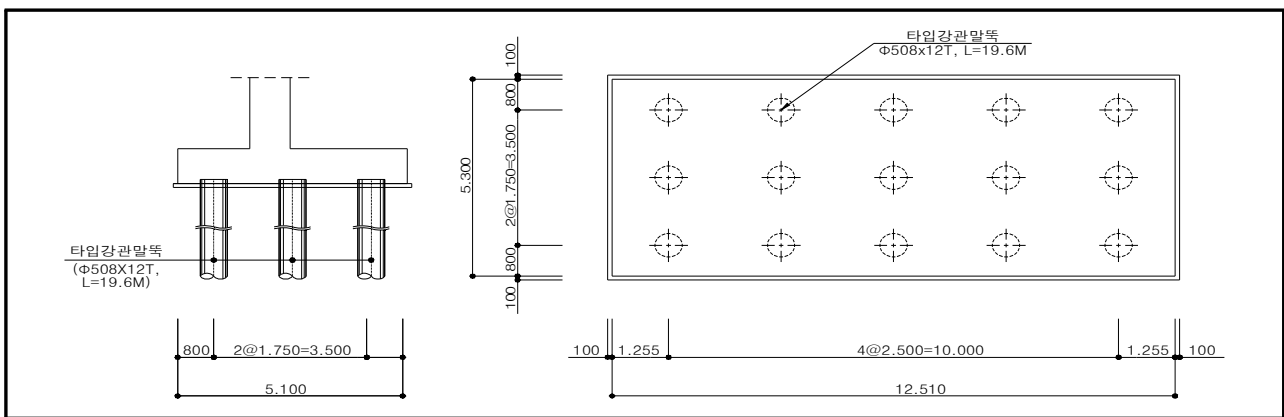
① 시점교대

【표 5.181】 백운1교(춘천) 시점교대 안정조건

구 분	안 정 검 토	판정기준	비 고
전도에 대한 안정	$1763.60 / 221.622 = 7.958$	$M_r/M_o \geq 2.0$	O.K
활동에 대한 안정	$257.137 / 106.815 = 1.65$	$H_u/H \geq 1.5$	O.K
지지력에 대한 안정	$600.0 / 101.63 = 5.90$	$Q_{max}/Q_a \geq 1.0$	O.K

② 종점교대

㉠ 말뚝 배치도 및 제원



【그림 5.48】 백운1교(춘천) 종점교대 말뚝 배치도 및 제원

㉡ 말뚝제원 및 사용계수

【표 5.182】 백운1교(춘천) 종점교대 말뚝제원 및 사용계수

말뚝 종류	직경(mm)	두께(mm)	부식두께(mm)	길이(m)
타입강관말뚝	508	12	2	19.500

- 말뚝의 탄성계수 $E = 210,000.0 \text{ MPa}$
- 말뚝의 단면2차모멘트 $I = \pi/64 \times (0.504^4 - 0.484^4) = 0.0004736 \text{ m}^4$
- 말뚝 머리의 평균 N치 $N = 10$
- 말뚝 선단의 지지층 조건 : 연 암
- 말뚝 선단의 근입깊이 $D_f = 1.0 \text{ m}$
- 원지반으로부터 돌출된 길이 $h = 0.0 \text{ m}$

㉔ 말뚝 검토결과

【표 5.183】 백운1교(춘천) 종점교대 말뚝 검토결과

구 분		허용값	발생값	비 고
지지력	허용지지력(kN/EA)	798.015	551.150	O.K
허용응력	휨응력 (MPa)	133.000	84.460	O.K
	전단응력 (MPa)	76.000	11.955	O.K
	수평변위(mm)	15.000	4.660	O.K

4) 단면검토

① 단면검토를 위한 부재력 산정

【표 5.184】 백운1교(춘천) 종점교대 단면검토를 위한 부재력 산정

구 분	시점교대		종점교대		비 고
	전단력(kN)	모멘트(kN.m)	전단력(kN)	모멘트(kN.m)	
벽 체	91.186	139.874	88.420	133.500	
앞 급 판	144.525	108.833	235.495	160.459	
뒷 급 판	117.681	189.997	117.708	287.589	

② 단면검토

【표 5.185】 백운1교(춘천) 종점교대 단면검토

구 분		깊이 H(mm)	Req. As (mm ²)	Use. As (mm ²)	Mu (kN.m)	ΦMn (kN.m)	안전율	비 고
A1	앞 급 판	1,600	284.930	5,067.000	108.833	1,889.988	%,	O.K
	뒷 급 판	1,600	497.939	2,533.500	189.997	957.029	%,	O.K
	벽 체	900	690.032	2,865.000	139.874	569.070	%,	O.K
A2	앞 급 판	1,800	393.996	5,067.000	160.459	2,019.196	%,	O.K
	뒷 급 판	1,800	665.327	2,533.500	287.589	1,086.237	%,	O.K
	벽 체	900	658.395	2,865.000	133.500	569.070	%,	O.K

5) 검토결과

교대에 대해서 안전성을 검토한 결과 기초부가 지지, 전도, 활동에 대하여 안전율을 만족시키고 있으며, 기초 압굽 및 뒷굽의 단면검토에서도 안전한 것으로 확인되었다. 또한, 벽체부와 흙벽의 단면검토 결과도 모두 소요강도를 확보한 것으로 파악되었다.

5.3.5 안전성평가 결과 요약

가. 바닥판

- 고정하중 및 DB-24의 설계하중이 작용하는 경우에 대해 현 설계기준을 적용하여 구조해석을 실시한 결과 캔틸레버 및 중앙부 모두 안전한 것으로 평가되었으며, 외관조사 결과 구조적 손상은 조사되지 않아 검토대상 구조물은 설계하중에 대해 소요의 안전도를 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 기본내하력 산정 결과 DB-24이상으로 도로교 설계기준상의 1등급 정도의 내하력은 가지고 있는 것으로 판단된다.

나. 거더(RC Arch)

- 설계하중 및 건조수축, 크리프, 온도영향을 고려하여 연직재 및 아치리브에 대한 구조해석을 실시한 결과 검토항목 모두 안전한 것으로 평가되었으며, 외관조사 결과 구조적 손상은 조사되지 않아 검토대상 구조물은 설계하중에 대해 소요의 안전도를 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 공용내하력 산정 결과 DB-24이상으로 도로교 설계기준상의 1등급 정도의 내하력은 가지고 있는 것으로 판단된다.

다. 교각 및 교대 검토

- 외관조사 결과 교각 및 교대 벽체부에 수직균열($cw=0.1\sim0.2mm$) 및 철근노출이 발생되어 현 설계기준에 대한 안전성 및 사용성 검토결과 소요의 안전성은 확보하는 것으로 검토되었다.
- 따라서 발생한 균열은 건조수축 및 수화열 등이 원인이며 받침하단 및 단면변화부에서 지압·응력집중 효과가 더해진 것으로 판단되며, 철근노출은 피복부족에 의한 것으로 시공불량이 원인으로 판단된다.
- 공용하중에 대한 안전성을 확보하고 균열진행성이 없으므로 손상규모에 따라 보수 및 주의관찰 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

라. 해석결과 집계표

1) 상부구조 안전성평가 결과

【표 5.186】 백운1교(춘천) 상부구조 안전성평가 결과

구 분	모 멘 트 (kN·m)			전 단 력 (kN)			안전성 평가등급
	Mu (kN·m)	ΦMn (kN·m)	안전율	Vu (kN)	ΦVn (kN)	안전율	
바 닥 판	97.211	624.581	7.912	169.447	292.284	1.725	a
연 직 재	194.122	347.945	1.792	2,613.728	4,684.842	1.792	a
아치리브	905.136	3,273.146	3.616	480.914	2,698.752	5.612	a

2) 하부구조의 안전성평가 결과

① 교 대

【표 5.187】 백운1교(춘천) 하부구조 교대 안전성평가 결과

단 면		Mu (kN · m/m)	ΦMn (kN · m/m)	안전율	안전성 평가 등급
A1	앞 굽 판	108.833	1,889.988	17.366	a
	뒷 굽 판	189.997	957.029	5.037	a
	벽 체	139.874	569.070	4.068	a
A2	앞 굽 판	160.459	2,019.196	12.584	a
	뒷 굽 판	287.589	1,086.237	3.777	a
	벽 체	133.500	569.070	4.263	a

② 교 각

【표 5.188】 백운1교(춘천) 하부구조 교각 안전성평가 결과

단 면			Qmax (MPa)	Qa (MPa)	안전율	안전성 평가 등급
교각	P1	기 초	760.871	800.000	1.05	a
	P2	기 초	1351.556	1585.900	1.17	a

마. 기존 진단결과와의 비교·분석

【표 5.189】 백운1교(춘천) 안전성평가 결과 비교·분석

구 분	2008년 정밀안전진단	2013년 정밀안전진단	2016년 정밀안전진단
해석조건	- 상부 2차원 격자해석 - 바닥판, 연직재, 아치리브가 하나의 부재로 모델링	- 상부 3차원 판해석 - 바닥판, 연직재, 아치리브를 개별적으로 모델링	- 상부 3차원 판해석 - 바닥판, 연직재, 아치리브를 개별적으로 모델링 - 풍하중 고려
안전율	거더 최소 안전율 1.003	거더 최소 안전율 1.221	거더 최소 안전율 1.792
특이사항	교각(P2) 말뚝지지력 부족 $Q_a = 1,301\text{MPa} < Q_{\text{max}} = 1,758\text{MPa}$	교각(P2) 말뚝지지력 만족 $Q_a = 1,585\text{MPa} > Q_{\text{max}} = 1,351\text{MPa}$	교각(P2) 말뚝지지력 만족 $Q_a = 1,585\text{MPa} > Q_{\text{max}} = 1,351\text{MPa}$
안전성평가 결과	A	A	A
총 평	- 금회 정밀안전진단은 자료분석, 현장조사 및 시험을 통한 분석결과, 제원 및 품질저하 요인이 조사되지 않아 전차 진단인 2013년 정밀안전진단의 안전성 평가를 인용하여 평가하였음. - 공용 내하력은 DB-24 이상으로 나타나 설계활하중에 대한 안전성을 확보한 것으로 판단됨. - 기존 정밀안전진단(2013)에 비해 안전율과 내하율이 상향으로 나타난 이유는 전차 진단에서 누락된 풍하중 적용으로 인한 연직재 및 하부거더의 수평력 증가로 축력이 감소되어 안전율과 내하율이 상향된 것으로 판단됨. - 또한, 교각(P2)에 대한 지지력 검토결과, 금회 상부구조의 적용된 풍하중으로는 하부구조에 수직력 및 수평력이 미미한 것으로 판단되어, 하부구조 검토는 전차 진단보고서(2013년)를 내용을 인용하였으며, 교대 및 교각의 안전성과 말뚝기초에 지지력은 확보된 것으로 검토됨.		