

제5장 시설물의 안전성평가

5.1 개요

5.2 구조해석 및 안전성 검토

5.3 종방향 해석 및 검토

5.4 횡방향 해석 및 검토

5.5 안전성평가 결과

제 5 장 시설물의 안전성평가

5.1 개요

구조물의 안전성평가는 그 기능과 역할을 유지할 수 있는 구조적 및 사용상의 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.

계남고가교는 도심지에 위치한 도로교량으로 총 연장 250.0m, 폭 23.5m의 P.S.C Box Girder로 시공되었다. 금회 안전성평가는 2021년 정밀안전진단 시 수행한 안전성평가 결과를 활용하여 검토하였으며, 그 결과를 본 편에 수록하였다.

5.1.1 안전성평가 기준

본 구조물의 안전성평가는 허용응력설계법 및 강도설계법에 의한 구조해석 및 검토를 통해 각 부재 및 경간의 발생응력과 소요강도를 확인하여 허용응력 및 설계강도 대비 안전율을 산정하고 이를 통해 평가기준에 따른 안전성을 평가한다.

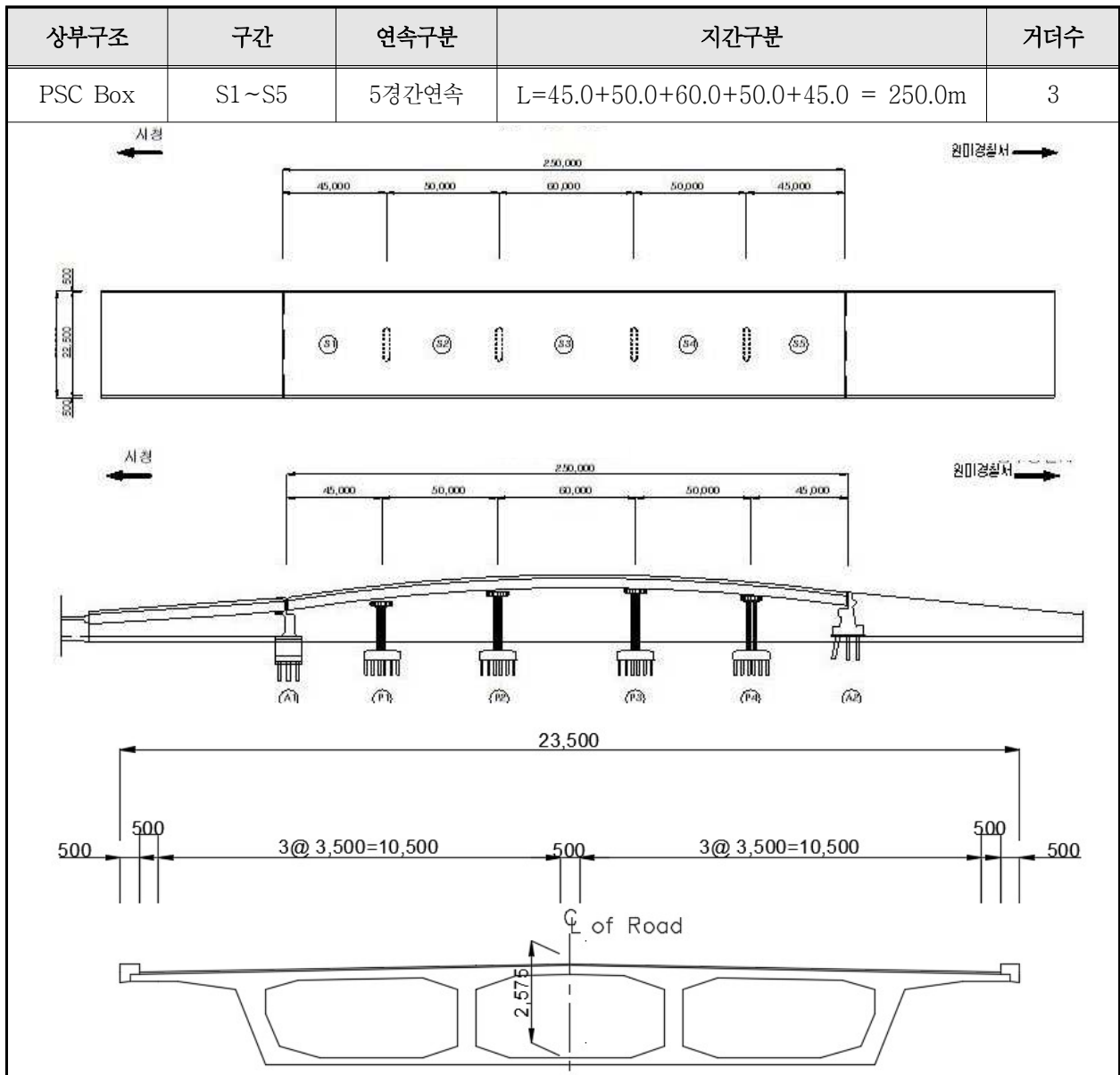
【표 5.1】 안전성평가 기준

기 준	안전성평가 기준	비 고
A	$SF \geq 1.0$	◦강도설계법 $SF(\text{안전율}) = \frac{\text{설계강도}}{\text{소요강도}} = \frac{\phi M_n}{M_u}$ ◦허용응력설계법 $SF(\text{안전율}) = \frac{\text{허용응력}}{\text{발생응력}} = \frac{f_a}{f_{d+l}}$
B	$0.9 \leq SF < 1.0$ 이나, 공용내하력이 설계하중보다 크게 평가된 경우	
C	$0.9 \leq SF < 1.0$	
D	$0.75 \leq SF < 0.9$	
E	$SF < 0.75$	

5.1.2 구조형식

- 1) 교량등급 : 1등급(DB-24, DL-24)
- 2) 교량형식 : P.S.C Box Girder(5경간 연속)
- 3) 교 장 : $45.0+50.0+60.0+50.0+45.0 = 250.0\text{m}$
- 4) 교 량 폭 : $B = 23.50\text{m}$
- 5) 가설공법 : F.S.M공법(Full Staging Method)
- 6) 사 각 : 0°

5.1.3 검토단면



5.2 구조해석 및 안전성 검토

5.2.1 사용재료

가. 콘크리트

1) 재료적 특성

콘크리트의 압축강도는 구조요소별 실측 비파괴강도가 설계기준강도 이상으로 평가되어 설계도서 상의 설계기준강도를 적용하였다.

【표 5.2】 콘크리트의 재료적 특성

구 분	설계기준강도 (MPa)	탄성계수(MPa)		비 고
		설계기준	적 용	
상부구조	40.0	$0.077m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}$	30,867	$m_c = 2,300\text{kg/m}^3$ $f_{cu} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}$
하부구조	24.0		26,964	

※ 콘크리트구조설계기준(2012) 3.4.3항의 일반적인 골재를 사용한 콘크리트의 탄성계수식 적용

2) 허용응력

콘크리트의 허용응력은 도로교설계기준(2010) 4.6.3.3항의 규정에 근거하여 결정하였으며 이를 정리하여 나타내면 아래의 표와 같다.

【표 5.3】 콘크리트의 허용응력(포스트텐션 부재)

구 분	프리스트레스 도입 직후	사용하중 작용시	비 고
압축응력	$0.60f_{ci}' = 19.20 \text{ MPa}$	$0.45f_{ck} = 18.000 \text{ MPa}^{(주1)}$ $0.60f_{ck} = 24.000 \text{ MPa}^{(주2)}$	$f_{ci}' = 32.0 \text{ MPa}$
인장응력	$0.25 \sqrt{f_{ci}'} = 1.414 \text{ MPa}$	$0.5 \sqrt{f_{ck}} = 3.162 \text{ MPa}$	

주1) 유효프리스트레스 + 지속하중 작용시

주2) 유효프리스트레스 + 전체하중 작용시

나. PS강재

1) 기본 제원

- 사용기준 : KSD 7002, SWPC 7B - $\phi 12.7\text{mm}$ (0.5" strand)
- 단 면 적 : $A_p = 98.71\text{mm}^2$
- 항복강도 : $P_y = 158\text{kN/strand}$ ($f_{py} = 1,600 \text{ MPa}$)
- 인장강도 : $P_u = 188\text{kN/strand}$ ($f_{pu} = 1,900 \text{ MPa}$)
- 탄성계수 : $E_p = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$
- 릴랙세이션 : 5%

2) 사용 텐던단위

- 5"-19(φ12.7mm-19) : 종방향 텐던(웹브내부)
- 5"-7(φ12.7mm-7) : 종방향 텐던(거더 상면 교각부)
- 5"-12(φ12.7mm-12) : 횡방향 텐던 (교대부 및 교각부)

3) 마찰계수

- 곡률마찰계수 : $\mu = 0.25/\text{rad}$
- 파상마찰계수 : $\kappa = 0.005/\text{m}$

4) 정착장치의 활동

- 정착시 슬립량 : $\Delta s = 6 \text{ mm}$

5) 허용응력

PS 강재의 허용응력은 도로교설계기준(2010) 2.2.2.4항의 규정에 근거하여 결정하였으며 이를 나타내면 아래의 표와 같다.

【표 5.4】 PS강연선의 허용응력(포스트텐션 부재)

구 분	설계기준	적용허용응력 (MPa)	비 고
긴장시	Min. [0.80fpu, 0.94fpy]	1,520	
프리스트레스 도입 직후	Min. [0.74fpu, 0.82fpy]	1,312	
정착구와 커플러의 위치에서 PS도입직후	0.7fpu	1,330	

다. 철근

【표 5.5】 철근의 재료적 특성

구 분	사용기준	항복강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	비 고
상부구조	SD 40	400	2.0×10^5	
하부구조	SD 30	300		

5.2.2 하중조건

구조해석 및 검토시, 적용 하중의 강도와 이에 대한 산정 근거는 다음과 같다.

가. 적용하중

【표 5.6】 적용하중 및 산정근거

적용하중		하 중 강 도						산정 근거																
주하중 (P)	고정하중 (D)	<table><tr><th colspan="2">구 분</th><th colspan="2">철근콘크리트</th><th colspan="2">포 장</th><th colspan="2">난간</th></tr><tr><td colspan="2">단위중량 (kN/m³)</td><td colspan="2">25.0</td><td colspan="2">23.0</td><td colspan="2">1.0</td></tr></table>						구 분		철근콘크리트		포 장		난간		단위중량 (kN/m ³)		25.0		23.0		1.0		도로교설계기준 2.1.2 항
	구 분		철근콘크리트		포 장		난간																	
	단위중량 (kN/m ³)		25.0		23.0		1.0																	
	활하중 (L)	•설계활하중(1등급) : DB-24, DL-24 •연석간 교폭(Wc) : 22.5m •재하차로수(N) : 20.1≤Wc<23.8m ∴6차로 재하 •재하차로폭(W) : 22.5/6=3.75 > 3.6m ∴3.6m 재하						도로교설계기준 2.1.3 항																
	충격 (I)	•충격계수 : $I = \frac{15}{40+L} \leq 0.3$ <table><tr><td>위치</td><td>S1/S5 (45m)</td><td>P1/P4 (47.5m)</td><td>S2/S4 (50m)</td><td>P2/P3 (55.0m)</td><td>S3 (60m)</td></tr><tr><td>i</td><td>0.176</td><td>0.171</td><td>0.167</td><td>0.158</td><td>0.150</td></tr></table>						위치	S1/S5 (45m)	P1/P4 (47.5m)	S2/S4 (50m)	P2/P3 (55.0m)	S3 (60m)	i	0.176	0.171	0.167	0.158	0.150	도로교설계기준 2.1.4 항				
	위치	S1/S5 (45m)	P1/P4 (47.5m)	S2/S4 (50m)	P2/P3 (55.0m)	S3 (60m)																		
	i	0.176	0.171	0.167	0.158	0.150																		
프리스트레스 (PS)	•도입긴장력 : Pj = 0.72 Pu						도로교설계기준 2.1.4 항																	
크리프 (CR)	•크리프계수 : Φ = 3.4						도로교설계기준 2.1.7 항																	
건조수축 (SH)	•건조수축률 : εs = 27×10-5						도로교설계기준 2.1.7 항																	
부하중 (S)	풍하중 (W)	•상부구조 W = [4.0 - 0.2 × (B/D)] × D kN/m ≥ 6 •하부구조(활하중 비재하시) 각형 : 3.00 × 10-3 MPa 원형 : 1.50 × 10-3 MPa •활하중에 작용하는 풍하중 WL = 1.50 kN/m						도로교설계기준 2.1.11 항																
	온도변화 (T)	•선팽창계수 : α = 1.0×10-5/℃ •상·하연 온도차 : ΔTD = 5℃						도로교설계기준 2.1.12 항																
특수하중 (PP)	부등침하 (GD)	•Δs = 10mm						도로설계편람 제5편																

나. 하중조합

구조물에 작용하는 하중의 조합은 도로교설계기준의 관련규정에 따라 수행하였으며 이를 정리하면 다음과 같다.

1) 사용하중

응력 검토시 사용하중의 조합 경우 및 이에 따른 허용응력 증가율을 정리하여 나타내면 아래의 표와 같다.

【표 5.7】 사용하중 조합경우

조합경우	하 중 조 합	증가계수 ^{주)}
LCBS-1	주하중+주하중에 해당하는 특수하중	1.00
LCBS-2	주하중+주하중에 해당하는 특수하중+온도변화의 영향	1.15
LCBS-3	주하중+주하중에 해당하는 특수하중+풍하중	1.25
LCBS-4	주하중+주하중에 해당하는 특수하중+온도변화의 영향+풍하중	1.35

※ 도로교설계기준 2.2.2.2항에 의거 허용인장응력에 대한 할증은 고려하지 않음

2) 계수하중

극한강도 검토는 아래 표의 하중계수를 사용하여 하중조합을 수행한 후 이에 따른 계수하중을 적용하여 수행하였다.

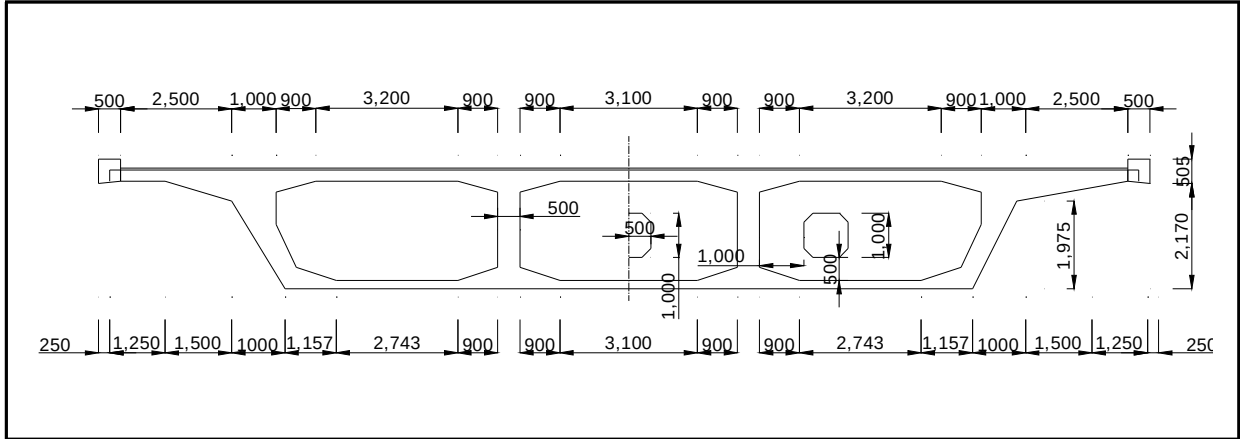
【표 5.8】 계수하중 조합경우

조합경우	고정하중 (D)	프 리 스트레스 (PS)	활하중 (L)	풍하중 (W)	부등침하 크리프 건조수축 온도변화 (G)	비 고
LC-01	1.30	1.00	2.15	—	—	
LC-02	1.30	1.00	—	1.30	—	
LC-03	1.30	1.00	1.30	0.65	—	
LC-04	1.30	1.00	1.30	—	1.30	
LC-05	1.25	1.00	—	1.25	1.25	
LC-06	1.25	1.00	1.25	0.625	1.25	

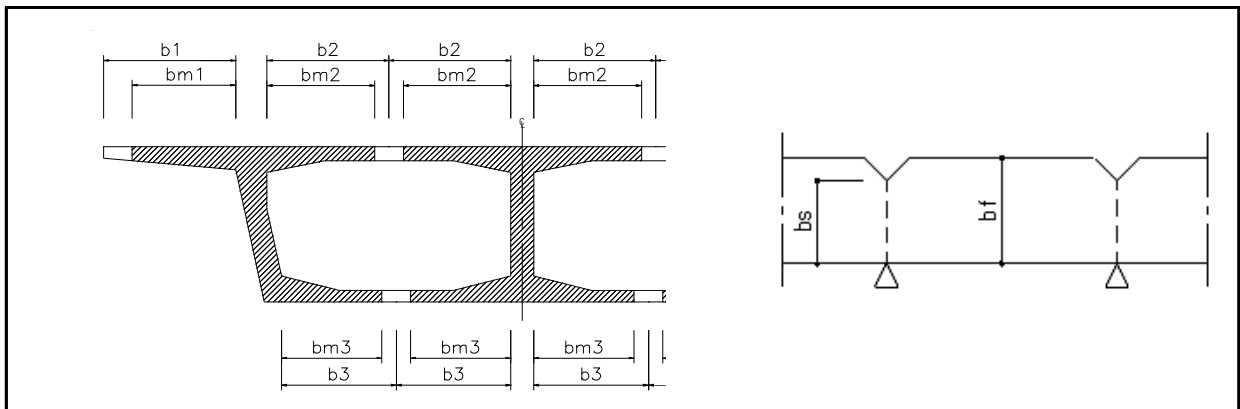
5.3 종방향 해석 및 검토(기 정밀안전진단 결과 검토)

5.3.1 단면 제상수 산정

가. 유효폭 산정



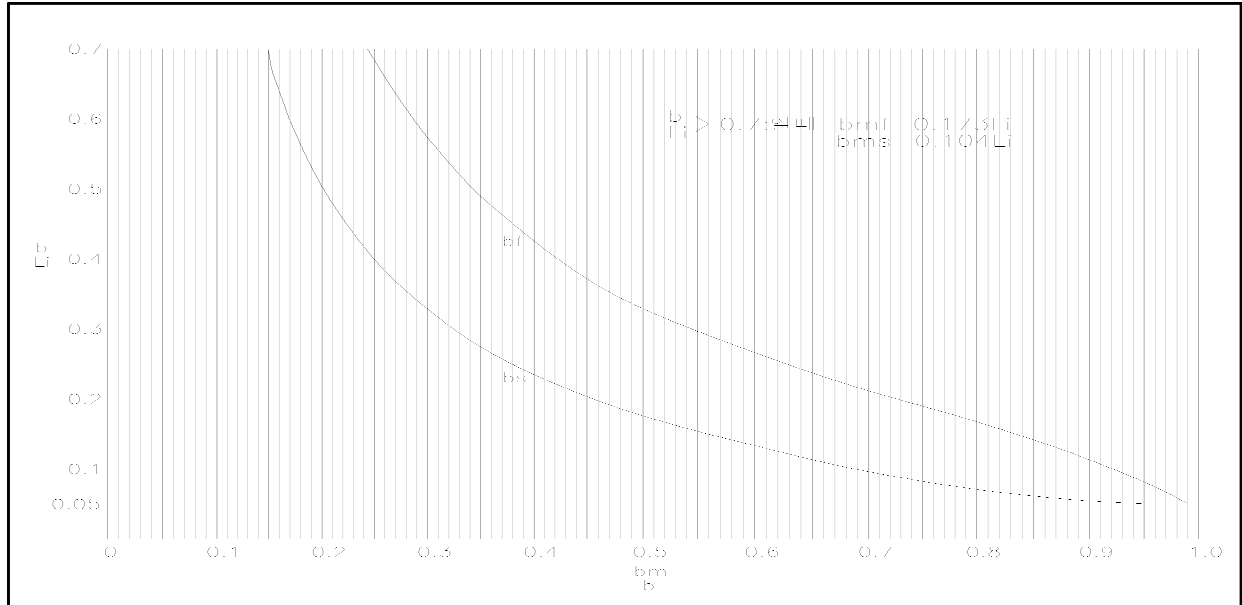
【그림 5.1】 횡단면 상세 치수



【그림 5.2】 유효플랜지폭 산정을 위한 제원

【표 5.9】 유효폭 산정을 위한 정수값 정리

구 분	s1/s5	p1/p4	s2/s4	p2/p3	s3	비 고
L	45.0	—	50.0	—	60.0	—
Li	36.0	33.0	30.0	33.0	36.0	—
b1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	칸틸레버부
b2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	상부플랜지
b3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	하부플랜지



【그림 5.3】 유효플랜지폭 계수

【표 5.10】 유효폭 산정 결과(단위 : m)

구 분		L	Li	b	b/Li	bs-ratio	bf-ratio	Bs	Bf
S1/S5	bm1	45.0	36.0	3.0	0.083	—	0.947	—	2.841
	bm2	45.0	36.0	2.5	0.069	—	0.969	—	2.423
	bm3	45.0	36.0	2.4	0.067	—	0.973	—	2.335
S2/S4	bm1	50.0	30.0	3.0	0.100	—	0.920	—	2.841
	bm2	50.0	30.0	2.5	0.083	—	0.947	—	2.368
	bm3	50.0	30.0	2.4	0.080	—	0.953	—	2.287
S3	bm1	65.0	36.0	3.0	0.083	—	0.947	—	2.841
	bm2	65.0	36.0	2.5	0.069	—	0.969	—	2.423
	bm3	65.0	36.0	2.4	0.067	—	0.973	—	2.335
P1/P4	bm1	—	33.0	3.0	0.091	0.729	—	2.187	—
	bm2	—	33.0	2.5	0.076	0.797	—	1.993	—
	bm3	—	33.0	2.4	0.073	0.812	—	1.949	—
P2/P3	bm1	—	33.0	3.0	0.091	0.729	—	2.187	—
	bm2	—	33.0	2.5	0.076	0.797	—	1.993	—
	bm3	—	33.0	2.4	0.073	0.812	—	1.949	—

5.3.2 하중 산정

가. 고정하중

1) 자중

• 거더 및 격벽 : 해석프로그램내에서 자동계산($W_c = 25.0 \text{ kN/m}^3$)

2) 2차 고정하중

$$\text{연석 : } (0.25 \times 0.5) \times 2.5 = 0.313 \text{ tonf/m}$$

$$\text{난간 : } 0.1 \times 1 \text{ea} = 0.100 \text{ tonf/m}$$

$$0.413 \text{ tonf/m}$$

$$\text{포장 : } 0.05 \times 1.0 \times 23.0 = 0.115 \text{ tonf/m}$$

$$0.115 \text{ tonf/m}$$

나. 프리스트레스

【표 5.11】 프리스트레스에 의한 응력

(단위 : MPa, (+)인장 (-)압축)

구 분	s1/s5	P1/P4	s2/s4	P2/P3	s3	비 고
상 연	0.871	-10.6	-0.72	-11.5	0.10	
하 연	-9.950	2.11	-6.57	3.32	-8.89	

다. 크리프 및 건조수축

• 크리프계수 : $\phi = 3.4$

• 건조수축률 : $\epsilon_s = 27 \times 10^{-5}$

라. 활하중

활하중 재하는 해석프로그램 내의 Moving Load Analysis 옵션을 사용하였으며 활하중에 대한 이동하중해석 수행시 기본 설정내용은 다음과 같다.

【표 5.12】 이동하중해석시 적용 사항(1)

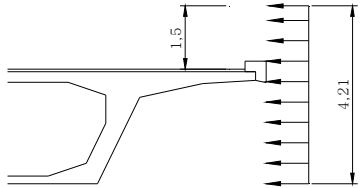
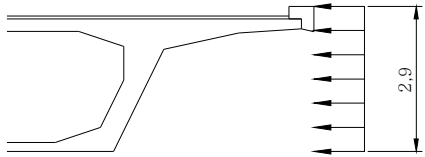
구 분	적 용 사 항
해석지간(L)	$L = 45.0 + 50.0 + 60.0 + 50.0 + 45.0 = 250.0 \text{ m}$
연석간 교폭(W_c)	$23.5 - 0.5 \times 2 = 22.5 \text{ m}$

【표 5.13】 이동하중해석시 적용 사항(2)

구 분	적 용 사 항			
재하차로수(N)	•재하차로수(N) : $20.1 \leq W_c < 23.8m \therefore 6$ 차로 재하			
설계차로폭(W)	•재하차로폭(W) : $22.5/6=3.75 > 3.6m \therefore 3.6m$ 재하			
활하중 모델	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	$I = \frac{15}{40 + 45} = 0.176$ (외측경간)			
	$I = \frac{15}{40 + 50} = 0.167$ (제1내측경간)			
	$I = \frac{15}{40 + 60} = 0.150$ (제2내측경간)			
하중 감소	3차로 동시 재하시 90%, 4차로 동시 재하시 75% 적용			

마. 풍하중

【표 5.14】 풍하중 산정 결과

구 분	풍하중 검토	
형 식	플레이트 거더교 또는 2주구 트러스 이외의 교량	
각 형	활하중 재하시	활하중 비재하시
풍 하 중 강 도	$1.5 \times 10^{-3} \text{ MPa}$	$3.0 \times 10^{-3} \text{ MPa}$
재 하 도		
풍하중(W) (kN/m)	$4.21 \times 1.5 = 6.315 \text{ kN/m}$	$2.90 \times 3.0 = 8.70 \text{ kN/m}$

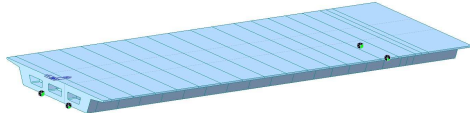
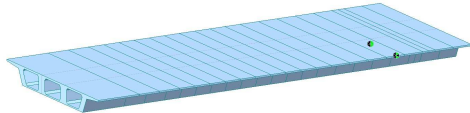
바. 온도하중

- 1) 선팽창계수 : $\alpha = 1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
- 2) 상·하연 온도차 : $\pm 5^\circ\text{C}$
- 3) 종방향 온도변화 : $\pm 15^\circ\text{C}$

사. 지점 부등침하의 영향

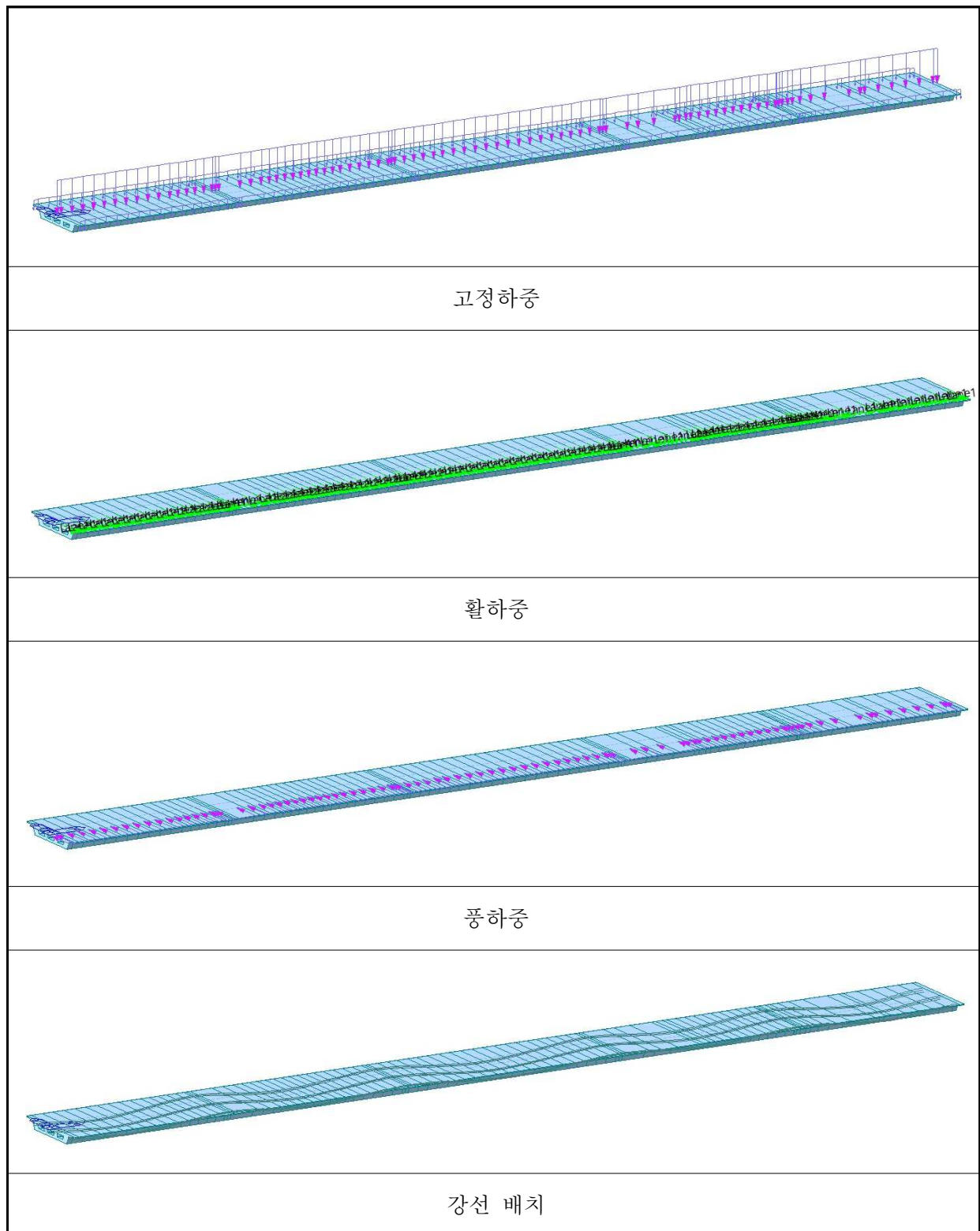
- 부등침하량 : $\delta_s = 10 \text{ mm}$ (도로 설계 편람 제 5편 참조)

5.3.3 해석 모델링

구 분	해석 모델링	
해석모델		
경계 조건 설정		• Node : 109 EA • Frame Element : 94 EA
거더 단면		

【그림 5.4】 해석 모델링

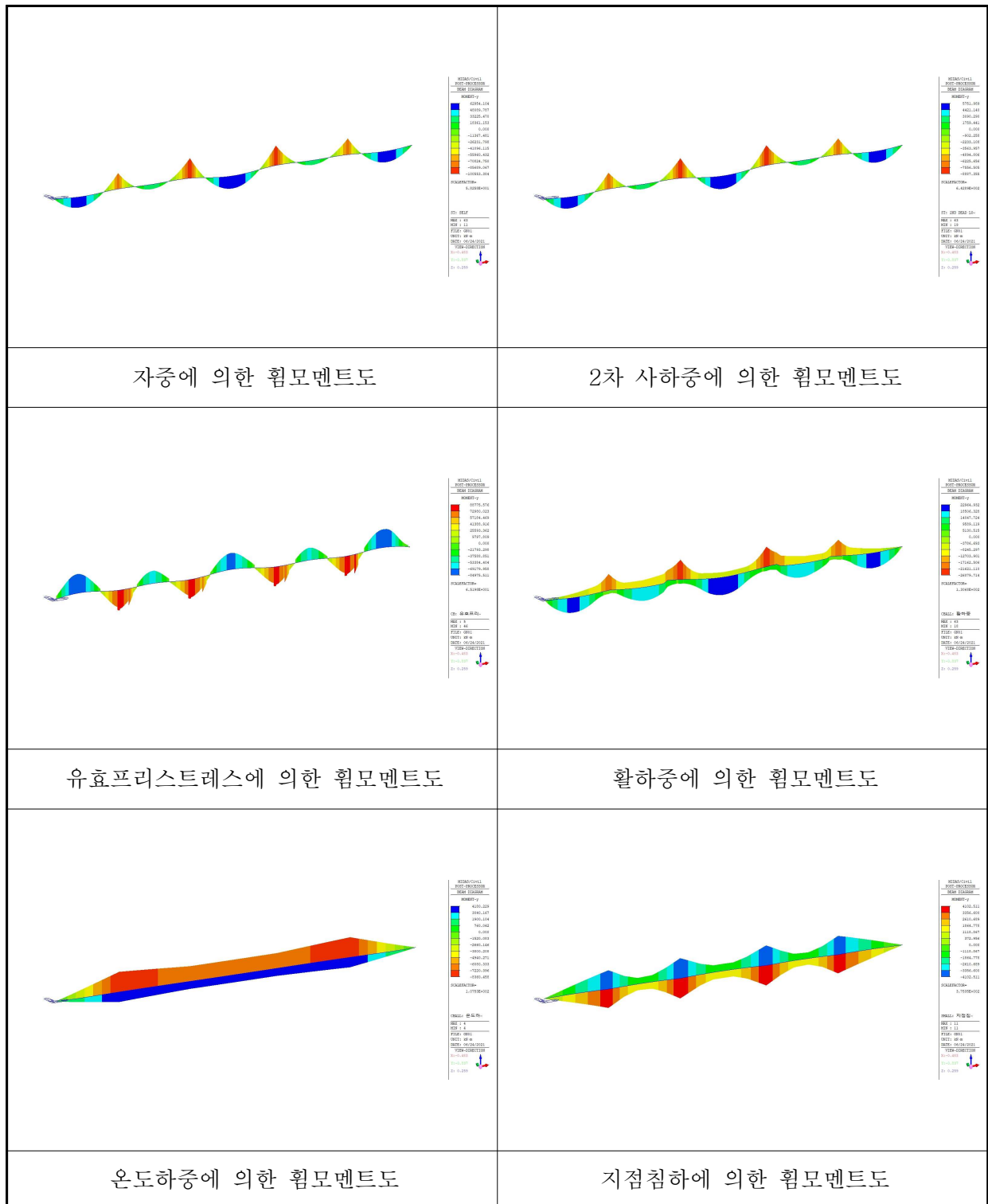
5.3.4 하중 및 강선 배치



【그림 5.5】 하중 재하 및 강선 배치

5.3.5 구조해석 및 검토결과

가. 하중조건별 단면력도(사용하중)

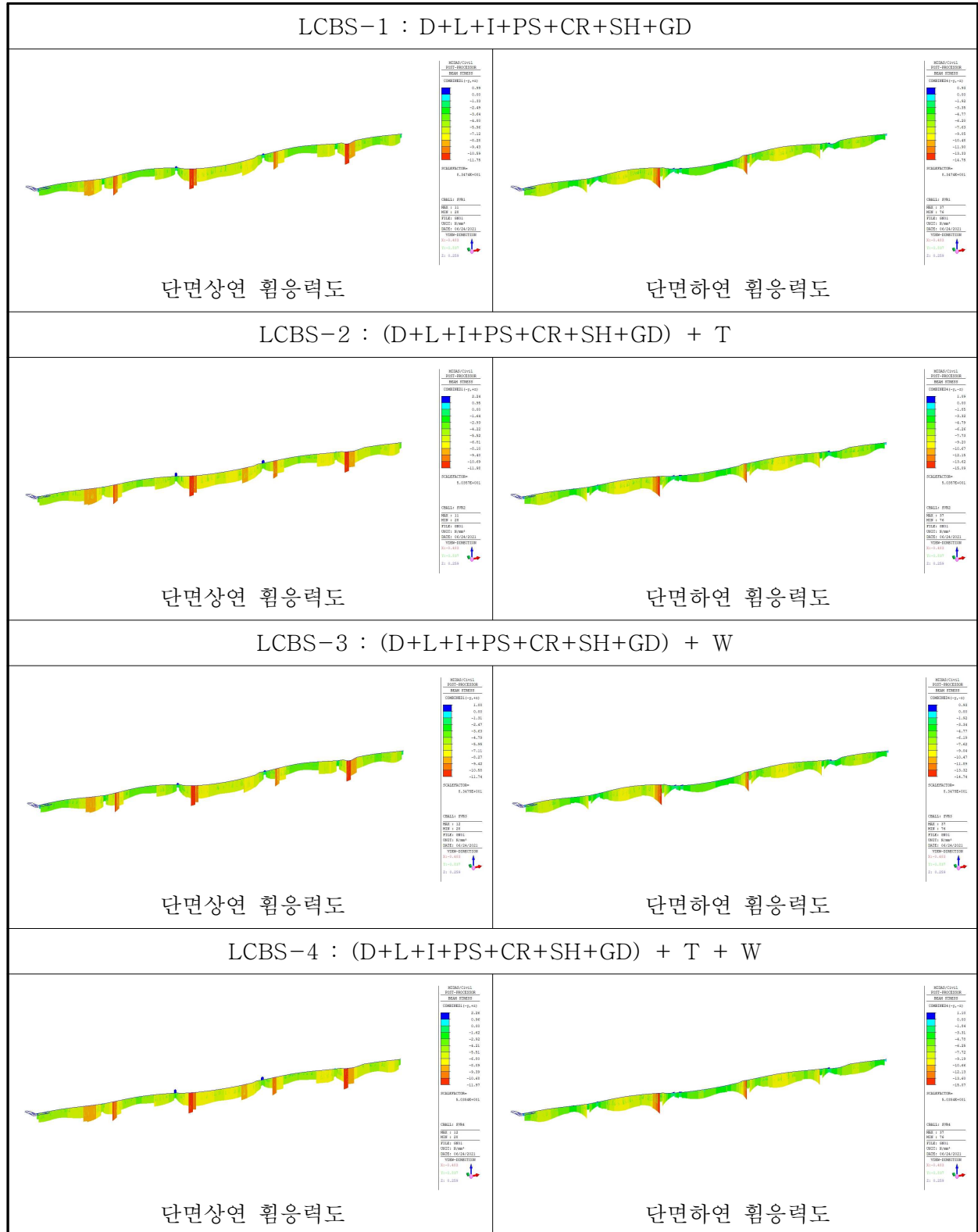


【그림 5.6】 하중조건별 단면력도(사용하중)

나. 단면 상·하연 휨응력도

사용하중조합에 따른 단면 상·하연 발생 휨응력은 아래의 그림과 같다.

(+ : 인장, - : 압축, 단위 : MPa)



【그림 5.7】 사용하중조합에 의한 단면 상·하연 휨응력도

다. 응력검토 요약

단면 상·하연의 최대 휨응력은 허용응력보다 작게 발생되어 사용하중에 대해 안전성을 확보하고 있는 것으로 검토되었으며, 전체 부재에 대한 검토 결과는 다음 표와 같다.

【표 5.15】 최대 휨응력 검토 결과 (사용하중조합1)

구 분		발생 응력		허용 응력		검 토
		최대	최소	인장	압축	
S1 제1경간 중앙부	상연	-6.31	-8.94	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.59	-8.47	3.16	-24.00	
P1 지점부 (교각1)	상연	-1.52	-7.43	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.16	-9.97	3.16	-24.00	
S2 제2경간 중앙부	상연	-9.20	-10.86	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.68	-9.45	3.16	-24.00	
P2 지점부 (교각2)	상연	0.99	-5.54	3.16	-24.00	OK
	하연	-9.68	-14.75	3.16	-24.00	
S3 제3경간 중앙부	상연	-9.73	-11.59	3.16	-24.00	OK
	하연	0.70	-6.05	3.16	-24.00	
P3 지점부 (교각3)	상연	0.83	-5.89	3.16	-24.00	OK
	하연	-8.46	-14.10	3.16	-24.00	
S4 제4경간 중앙부	상연	-7.76	-9.93	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.68	-9.62	3.16	-24.00	
P4 지점부 (교각4)	상연	-1.40	-6.83	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.78	-10.58	3.16	-24.00	
S5 제5경간 중앙부	상연	-9.85	-11.75	3.16	-24.00	OK
	하연	0.93	-7.80	3.16	-24.00	

【표 5.16】 최대 휨응력 검토 결과 (사용하중조합 2)

구 분		발생 응력		허용 응력		검 토
		최대	최소	인장	압축	
S1 제1경간 중앙부	상연	-5.97	-8.81	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.44	-10.77	3.16	-24.00	
P1 지점부 (교각1)	상연	0.50	-5.00	3.16	-24.00	OK
	하연	-4.76	-4.56	3.16	-24.00	
S2 제2경간 중앙부	상연	-9.12	-11.00	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.44	-15.28	3.16	-24.00	
P2 지점부 (교각2)	상연	2.32	-3.57	3.16	-24.00	OK
	하연	-8.83	-6.77	3.16	-24.00	
S3 제3경간 중앙부	상연	-9.60	-11.96	3.16	-24.00	OK
	하연	-1.82	-14.62	3.16	-24.00	
P3 지점부 (교각3)	상연	2.17	-3.58	3.16	-24.00	OK
	하연	-8.19	-6.61	3.16	-24.00	
S4 제4경간 중앙부	상연	-7.63	-10.17	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.45	-11.39	3.16	-24.00	
P4 지점부 (교각4)	상연	0.69	-4.66	3.16	-24.00	OK
	하연	1.17	-4.22	3.16	-24.00	
S5 제5경간 중앙부	상연	-9.75	-11.66	3.16	-24.00	OK
	하연	0.12	-7.86	3.16	-24.00	

【표 5.17】 최대 휨응력 검토 결과 (사용하중조합 3)

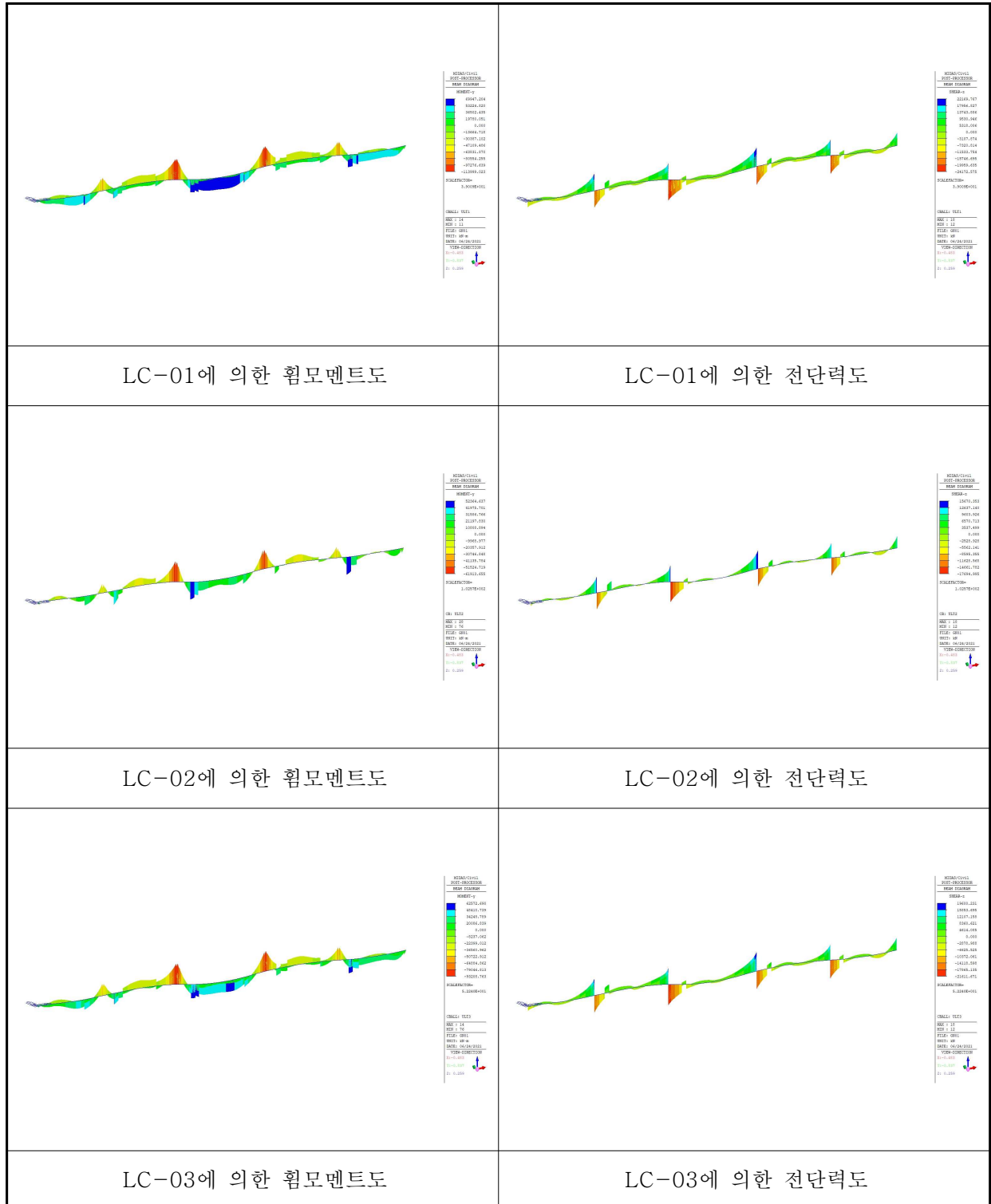
구 분		발생 응력		허용 응력		검 토
		최대	최소	인장	압축	
S1 제1경간 중앙부	상연	-6.30	-8.94	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.61	-9.96	3.16	-24.00	
P1 지점부 (교각1)	상연	-1.60	-3.46	3.16	-24.00	OK
	하연	0.44	-4.18	3.16	-24.00	
S2 제2경간 중앙부	상연	-9.19	-10.85	3.16	-24.00	OK
	하연	-9.05	-14.74	3.16	-24.00	
P2 지점부 (교각2)	상연	1.01	-1.83	3.16	-24.00	OK
	하연	0.71	-6.53	3.16	-24.00	
S3 제3경간 중앙부	상연	-9.72	-11.58	3.16	-24.00	OK
	하연	-8.44	-14.08	3.16	-24.00	
P3 지점부 (교각3)	상연	0.85	-2.18	3.16	-24.00	OK
	하연	-0.33	-6.38	3.16	-24.00	
S4 제4경간 중앙부	상연	-7.75	-9.19	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.77	-10.56	3.16	-24.00	
P4 지점부 (교각4)	상연	-1.23	-3.20	3.16	-24.00	OK
	하연	0.93	-3.84	3.16	-24.00	
S5 제5경간 중앙부	상연	-9.84	-11.74	3.16	-24.00	OK
	하연	-4.28	-7.81	3.16	-24.00	

【표 5.18】 최대 휨응력 검토 결과 (사용하중조합 4)

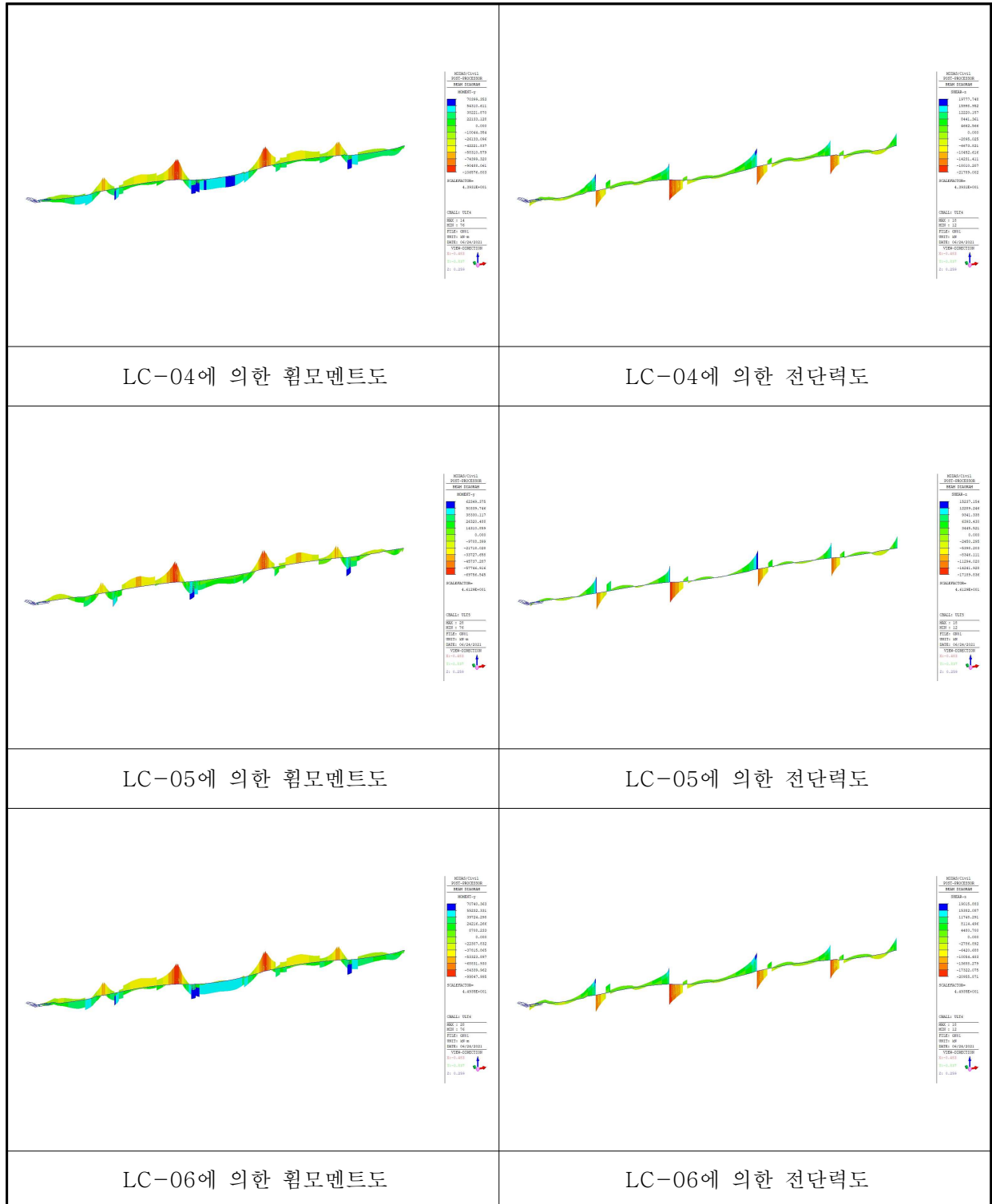
구 분		발생 응력		허용 응력		검 토
		최대	최소	인장	압축	
S1 제1경간 중앙부	상연	-6.17	-9.22	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.46	-10.75	3.16	-24.00	
P1 지점부 (교각1)	상연	0.52	-4.89	3.16	-24.00	OK
	하연	0.47	-4.55	3.16	-24.00	
S2 제2경간 중앙부	상연	-3.78	-10.99	3.16	-24.00	OK
	하연	-8.79	-15.27	3.16	-24.00	
P2 지점부 (교각2)	상연	2.34	-3.20	3.16	-24.00	OK
	하연	-3.40	-6.75	3.16	-24.00	
S3 제3경간 중앙부	상연	-9.59	-11.85	3.16	-24.00	OK
	하연	0.83	-14.60	3.16	-24.00	
P3 지점부 (교각3)	상연	2.19	-3.50	3.16	-24.00	OK
	하연	-3.23	-6.60	3.16	-24.00	
S4 제4경간 중앙부	상연	-7.62	-10.16	3.16	-24.00	OK
	하연	-5.47	-11.37	3.16	-24.00	
P4 지점부 (교각4)	상연	0.70	-4.65	3.16	-24.00	OK
	하연	1.17	-4.21	3.16	-24.00	
S5 제5경간 중앙부	상연	-9.74	-11.95	3.16	-24.00	OK
	하연	-4.22	-7.87	3.16	-24.00	

5.3.6 극한강도 검토

가. 하중조합에 의한 단면력도



【그림 5.8】 하중조합에 의한 단면력도(1)



【그림 5.9】 하중조합에 의한 단면력도(2)

나. 하중조합 결과 검토

【표 5.19】 하중조합 결과 검토

하중 조합	하중조합					중앙부	지점부		비 고
	D	PS	L	W	G	Mu (kN·m)	Mu (kN·m)	Vu (kN)	
LC-01	1.30	1.00	2.15	—	—	69,948	-113,999	24,172	
LC-02	1.30	1.00	—	1.30	—	52,362	-61,913	17,695	
LC-03	1.30	1.00	1.30	0.65	—	62,573	-93,209	21,612	
LC-04	1.30	1.00	1.30	—	1.30	70,400	-106,577	21,789	
LC-05	1.25	1.00	—	1.25	1.25	62,347	-69,756	17,190	
LC-06	1.25	1.00	1.25	0.625	1.25	70,738	-99,848	20,956	

여기서, D : 자중, 2차고정하중
 PS : 프리스트레스
 L : 충격을 포함한 활하중
 W : 풍하중
 G : 지점침하, 크리프, 건조수축, 온도하중

5.3.7 휨강도 검토

가. 경간 중앙부

•PS강재의 응력(부착된 부재) (← 2011 보고서 참조)

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p}{\kappa_1} \left(P_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} + \frac{d}{d_p} \left(P \frac{f_y}{f_{ck}} - P' \frac{f_y}{f_{ck}} \right) \right) \right)$$

$$f_{ps} = 19000 \left(1 - \frac{0.4}{0.76} \left(0.00165 \frac{1900}{400} + \frac{256}{235} \left(0.000681 \frac{4000}{400} - 0.000783 \frac{4000}{400} \right) \right) \right)$$

$$= 18932 \text{ kgf/cm}^2 = 1,893 \text{ MPa}$$

$$\gamma_p = 0.4 \left(\frac{f_{py}}{f_{pu}} = 0.85 \right)$$

$$\kappa_1 = 0.85 - 0.05 \frac{400}{70} = 0.76 \geq 0.65$$

$$P_p = \frac{A_p}{bd_p} = \frac{600 \cdot 157}{1550 \times 235} = 0.00165$$

$$P = \frac{A_s}{bd} = \frac{270 \cdot 096}{1550 \times 256} = 0.000681$$

$$P' = \frac{A_{s'}}{bd} = \frac{289 \cdot 956}{1550 \times 256} = 0.000731$$

•중립축 검토

$$1.4d_p \times P_p \times f_{ps} / f_{ck} = 1.4 \times 235 \times 0.00165 \times 18932 / 400 = 257 \text{ mm} > 250 \text{ mm}$$

∴ 구형단면으로 계산

$$\bullet \Phi M_n = \Phi (A_p f_{ps} d_p (1 - 0.59 \frac{P_p f_{ps}}{f_{ck}}))$$

$$= 0.85 (337.588 \times 18884 \times 160 (1 - 0.59 \frac{0.0021 \times 18884}{400}))$$

$$= 21,650 \text{ tonf-m} = 216,500 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_u = 70,400 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \therefore \text{OK}$$

나. 지점부

•PS강재의 응력(부착된 부재) (← 2011 보고서 참조)

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{r_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} \right] = 1900.00 \times \left[1 - \frac{0.4}{0.766} \times 0.004401 \times \frac{1900.0}{40.0} \right] = 1,693 \text{ MPa}$$

•중립축 검토

$$a = \frac{A_p \cdot f_{ps}}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b} = \frac{82521.6 \times 1693}{0.85 \times 40 \times 8000} = 513 \text{ mm} > t = 200 \text{ mm} \quad \therefore \text{플랜지를 갖는 단면}$$

• 설계휨강도 산정

$$\begin{aligned}
\phi M_n &= \phi \left[A_{pw} f_{ps} d_p \left\{ 1 - 0.59 \frac{A_{pw} f_{ps}}{b_0 d_p f_{ck}} \right\} + 0.85 f_{ck} (b - b_o) t (d_p - 0.5t) \right] \\
&= 0.85 \times \left[60023.535 \times 1692.590 \times 2343.8 \times \left\{ 1 - 0.59 \times \frac{60023.535 \times 1692.590}{2400 \times 2343.8 \times 40} \right\} \right. \\
&\quad \left. + 0.85 \times 40 \times (8000 - 2400) \times 200 \times (2343.8 - 0.5 \times 200) \right] \times 10^{-6} \\
&= 221,109 \text{ kN}\cdot\text{m} > M_u = 113,999 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad \therefore \text{OK}
\end{aligned}$$

$$\text{여기서, } A_{pf} = \frac{0.85 f_{ck} (b - b_w) t}{f_{ps}} = \frac{0.85 \times 40 \times (8000 - 2400) \times 200}{1692.590} = 22,498 \text{ mm}^2$$

$$A_{pw} = A_p - A_{pf} = 82,522 - 22,498 = 60,024 \text{ mm}^2$$

5.3.8 전단강도 검토

가. 콘크리트가 부담하는 전단강도 산정

• 휨 전단강도(V_{ci})

$$V_{ci} = 0.05 \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d + \frac{V_u \cdot M_{cr}}{M_u} \geq 0.14 \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d$$

$$\text{여기서, } f_{ck} = 40.0 \text{ MPa}$$

$$b_w = 500 \times 4 = 2000 \text{ mm}$$

$$d = 0.8h = 0.8 \times 3500 = 2800 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = \frac{I_g}{y_t} (0.5 \sqrt{f_{ck}} + f_{pe})$$

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A_g} + P_e \cdot e_p \cdot \frac{y_t}{I_g}$$

$$y_t = 1,600 \text{ mm}$$

$$I_g = 14.413 \times 10^{13} \text{ mm}^4$$

$$P_e = 75,463 \text{ kN} \quad (\leftarrow 2011 \text{ 보고서 참조})$$

$$A_g = 14.040 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$e_p = d_p - y_t = 2350 - 1600 = 750 \text{ mm} \quad \text{이므로,}$$

$$f_{pe} = 11.658 \text{ Mpa}$$

$$M_{cr} = 133,501 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\therefore V_{ci} = 28,309 \text{ kN}$$

· 복부전단강도

$$V_{cw} = (0.29 \sqrt{f_{ck}} + 0.3f_{pc})b_w d + V_p$$

$$f_{pc} = \frac{P_e}{A_g} = \frac{7,546 \times 10^3}{14.040 \times 10^4} = 53.7 \text{ kgf/cm}^2 = 5.37 \text{ MPa}$$

$$V_p \doteq 0 \text{ (PS의 연직방향 성분)}$$

$$\therefore V_{cw} = 19,301 \text{ kN}$$

$$\therefore \text{콘크리트가 부담하는 전단력}(V_c) \text{ 는, Min.}[V_{ci}, V_{cw}] \text{이므로, } V_c = 19,301 \text{ kN}$$

나. 전단철근이 부담하는 전단강도(V_s)

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

$$V_{s, \max} = \frac{2}{3} \sqrt{f_{ck}} b_w \cdot d$$

$$A_v = 1548 \text{ mm}^2 \text{ (← 2011 보고서 참조)}$$

$$s = 125 \text{ mm} \text{ (← 2011 보고서 참조)}$$

$$\therefore V_s = 13,874 \text{ kN}$$

$$\therefore V_{s, \max} = 23,612 \text{ kN}$$

$$\therefore \text{전단철근이 부담하는 전단력}(V_s) \text{ 는, Min.}[V_s, V_{s, \max}] \text{이므로, } V_s = 13,874 \text{ kN}$$

다. 설계전단강도 산정

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) = 0.8 \times (19,301 + 13,874) = 26,540 \text{ kN} > V_u = 24,172 \text{ kN} \quad \therefore \text{OK}$$

5.3.9 종방향 검토 결과

가. 응력 검토

【표 5.20】 응력 검토 결과

(+) : 인장, (-) : 압축

구 분	단면상면 휨응력(MPa)			단면하면 휨응력(MPa)			비 고
	발생응력	허용응력	안전율	발생응력	허용응력	안전율	
중앙부	-9.85	-24.00	2.437	0.93	3.16	3.398	OK
				-15.28	-24.00	1.571	OK
지점부	2.32	3.16	1.362	1.17	3.16	2.701	OK
	-10.85	-24.00	2.212	-14.75	-24.00	1.627	OK
검토 결과	◦사용하중상태에서 거더 상·하면의 최대 휨응력은 허용응력범위 내에서 발생하고 있으며 사용하중에 대해서 최소 1.0 이상의 안전율을 확보하고 있는 것으로 평가되었음.						

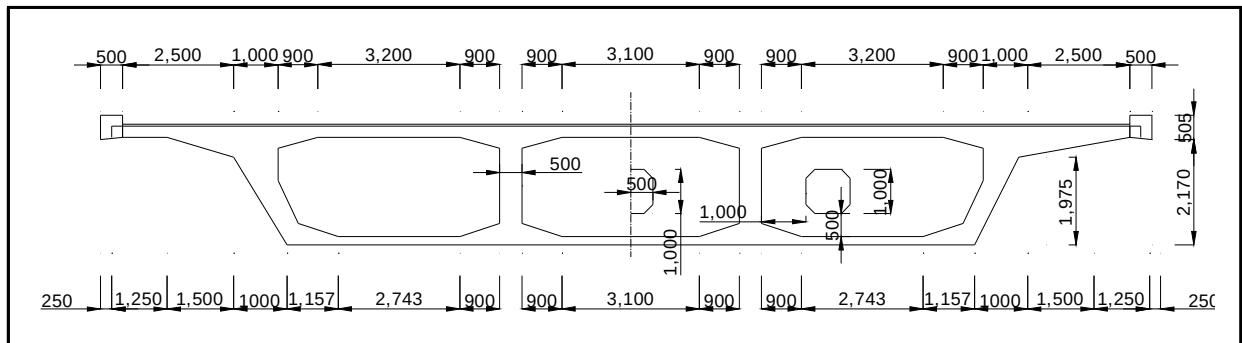
나. 극한강도 검토

【표 5.21】 극한강도 검토 결과

구 분	휨강도(kN·m)			전단강도(kN)			비 고
	소요강도	설계강도	안전율	소요강도	설계강도	안전율	
중앙부	70,400	216,500	3.075	-	-	-	OK
지점부	113,999	221,109	1.940	24,172	26,540	1.098	OK
검토 결과	◦휨강도 : 하중조합에 의한 모멘트에 대해서 1.0 이상의 안전율을 확보하고 있으며 안전성에 문제가 없는 것으로 확인되었음. ◦전단강도 : 하중조합에 의한 전단력에 대해서 1.0 이상의 안전율을 확보하고 있는 것으로 평가되었음.						

5.4 횡방향 해석 및 검토(기 정밀안전진단 결과 검토)

5.4.1 검토단면



【그림 5.10】 검토단면(경간 중앙부)

5.4.2 하중 산정

가. 자중

1) 자중

• 거더 및 격벽 : 해석프로그램내에서 자동계산($W_c = 25.0 \text{ kN/m}^3$)

2) 2차 고정하중

$$\text{연석 : } (0.25 \times 0.5) \times 2.5 = 0.313 \text{ tonf/m}$$

$$\text{난간 : } 0.1 \times 1 \text{ea} = 0.100 \text{ tonf/m}$$

$$0.413 \text{ tonf/m}$$

$$\text{포장 : } 0.05 \times 1.0 \times 23.0 = 0.115 \text{ tonf/m}$$

$$0.115 \text{ tonf/m}$$

3) 활하중

횡방향 해석시 활하중은 판요소를 사용한 3차원 해석모델을 통해 횡방향으로 재하 가능한 차량 대수인 6대를 재하하여 단면력을 산출하였다.

【표 5.22】 표준트럭하중(DB-24) 축중량

하중등급	W (kN)		비 고
표준트럭하중 (DB-24)	전륜(1축)	48	
	후륜(2축)	192	
	후륜(3축)	192	
	총 중량	432	

4) 차륜하중의 접지폭

차륜하중은 접지압을 고려하여 분포하중으로 재하하였으며, 차륜의 접지면은 DB하중의 각 차륜에 대해 면적이 $500/0.36P(\text{mm}^2)$ 인 하나의 직사각형단면으로 간주하였다. 또한 이 직사각형의 폭과 길이의 비는 2.5:1로 하여 접지압(0.72 MPa)이 접지면에 균일하게 분포하는 것으로 가정하였다.

•차륜하중 ($P=96\text{kN}$)의 경우

$$\text{접지면적} : A = 2.5l \times l = \frac{500}{0.36} \times 96 = 133,333 \text{ mm}^2$$

$$\text{접지길이} : l = \sqrt{\frac{133,333}{2.5}} = 231 \text{ mm}$$

$$\text{접지폭} : b = 2.5 \times l = 578 \text{ mm}$$

【표 5.23】 접지폭 산정 결과

구 분	전륜 ($P_f = 24 \text{ kN}$)		후륜 ($P_r = 96 \text{ kN}$)		비 고
	접지길이 (l)	접지폭 (b)	접지길이 (l)	접지폭 (b)	
DB-24	115 mm	288 mm	231 mm	578 mm	

5) 충격계수 산정

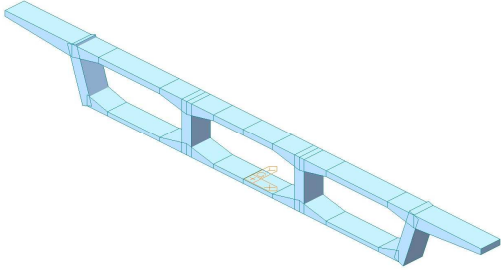
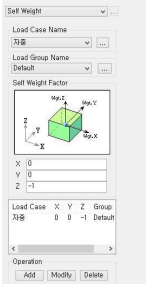
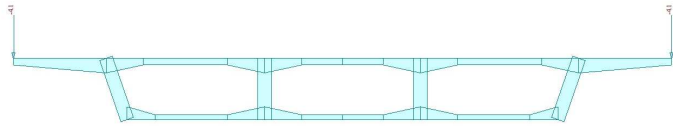
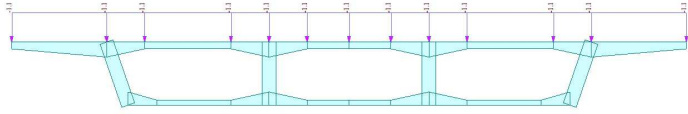
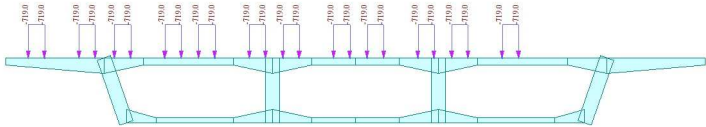
【표 5.24】 충격계수 산정 결과

구 분	캔틸레버부	중양부	비 고
지간장	3.000 m	4.900 m	
산정 충격계수	$\frac{15}{40+3.00} = 0.349$	$\frac{15}{40+4.90} = 0.334$	Max. [0.30]
적용 충격계수	0.30	0.30	

6) 단위폭당 재하되는 최대 활하중 산정

$$\begin{aligned} \text{충격을 고려한 차륜하중} &= P_r \times \text{접지길이} \times (1+0.3) = 96 \times 0.231 \times 1.30 \\ &= 28.83 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

5.4.3 해석 모델링 및 하중재하

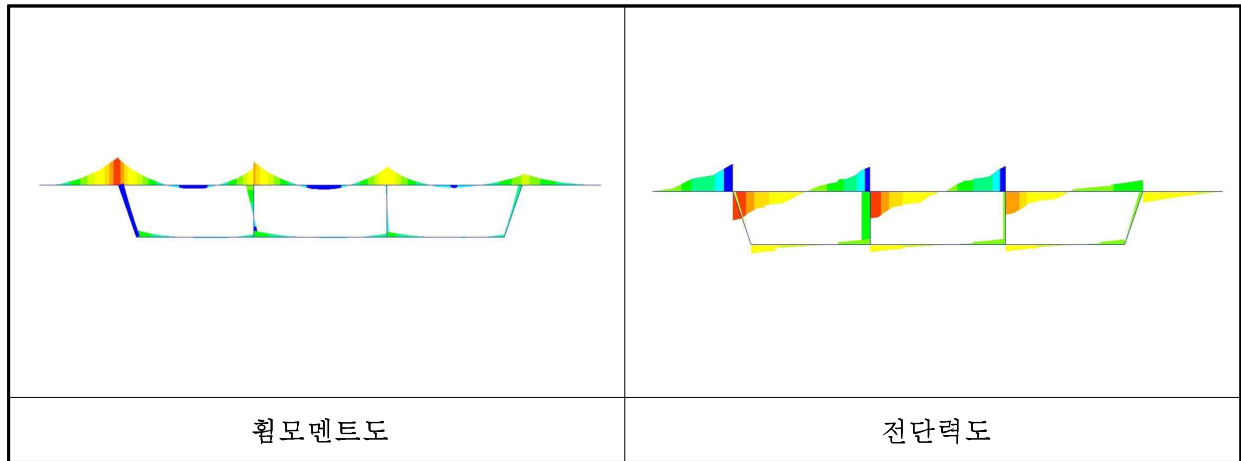
구 분	모 델 링	비 고
해석모델		• Node : 24 EA • Frame Element : 26 EA • 단위폭으로 고려
고정하중		
2차사하중		연석+난간하중 = 4.13 kN/m
		포장 = 1.15 kN/m
활하중		Pr=28.83 kN/m (6차로 재하)

【그림 5.11】 해석 모델링 및 하중재하

5.4.4 구조해석 및 검토결과

가. 구조해석 결과

하중조합 [1.3D+2.15(L+I)]에 의한 단면력도는 다음과 같다.



【그림 5.12】 하중조합에 의한 단면력도

나. 단면력 검토

다음과 같은 절차에 의해 각 부위별 단면력을 검토하였다.

1) 검토 조건

- 검토 단면 : 외측지점부
- 설계기준강도 : $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$
- 인장철근항복강도 : $f_y = 400 \text{ MPa}$
- 단면폭(b) : 1000.0 mm
- 단면높이(h) : 250.0 mm
- 사용철근량(A_s) : H22@150 = 2,582 mm²
- 피복두께(d_c) : 50.0 mm
- 유효깊이(d) : 250 + 200/3(현치) - 50 = 366.67 mm
- 단면력 : $M_u = 194.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_s = 58.520 \text{ kN}\cdot\text{m}$

2) 강도 검토

▷ 휨모멘트 검토

$$\text{사용철근량} = H22 \times 6.67 \text{ EA} \quad (D_c = 5.00 \text{ cm})$$

$$= 25.820 \text{ cm}^2 \quad \therefore P = A_s / (B \cdot D) = 0.00645$$

$$\text{공칭강도시 등가응력깊이 } a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 3.038 \text{ cm}$$

$$\text{최외단 인장철근 변형률 } \epsilon_t = 0.02726 \geq 0.004 \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\dots \text{여기서 } \epsilon_t = 0.003 \cdot (H - a/\beta_1 - D_{c_min}) / (a/\beta_1)$$

$$0.005 \leq \epsilon_t \text{ 이므로 인장지배단면, } \phi_f = 0.85 \text{ 를 적용한다.}$$

$$\phi M_n = \phi_f \cdot f_y \cdot A_s \cdot (D - a/2) = 3378132.000 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$= 33.781 \text{ tf} \cdot \text{m} \geq M_u = 19.490 \text{ tf} \cdot \text{m} \dots \therefore \text{O.K}$$

- 필요철근량 및 철근비 검토

$$\text{소요등가응력깊이 } a = 1.723 \text{ cm로 가정}$$

$$A_s = M_u / \{ \phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2) \} = 14.646 \text{ cm}^2$$

$$a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot B) = 1.723 \text{ cm} \quad \therefore \text{가정과 비슷함 O.K}$$

$$P_{req} = [M_u / \{ \phi_f \cdot f_y \cdot (D - a/2) \}] / (B \cdot D) = 0.00366 \Rightarrow 4/3 P_{req} = 0.00488$$

$$\therefore \text{필요철근량 } req.A_s = P_{req} \times (B \cdot D) = 14.646 \text{ cm}^2 \leq \text{사용철근량} \dots \text{O.K}$$

$$\text{철근비검토 : } P_{min} \leq P \dots \therefore \text{O.K}$$

▷ 전단력 검토

$$\text{단면의 두께 } H = 25.000 \text{ cm (현치제외), 유효 깊이 } D = 20.000 \text{ cm}$$

$$\phi_v \cdot V_c = \phi_v \cdot 0.53 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d / 1000 = 16.960 \text{ tonf}$$

$$1/2 \cdot \phi_v \cdot V_c = 8.480 \text{ tonf} \leq V_u \leq \phi_v \cdot V_c \quad \therefore \text{최소전단철근을 배근하는것이 좋다.}$$

$$req.A_v = 3.5 \cdot B \cdot s / f_y = 2.625 \text{ cm}^2$$

$$\text{Used } A_v = H16 \times 2.00 \text{ ea/m} = 3.972 \text{ cm}^2 \geq req.A_v \quad \therefore \text{O.K}$$

$$\phi_v \cdot V_s = \phi_v \cdot A_v \cdot f_y \cdot D / (s \times 1000) = 8.474 \text{ tonf}$$

$$\phi_v \cdot V_n = \phi_v \cdot V_c + \phi_v \cdot V_s = 25.434 \text{ tonf} \geq V_u \dots \therefore \text{O.K}$$

▷ 사용성 검토 (균열 검토)

$$M_o = 10.000 \text{ tf} \cdot \text{m} \quad (\text{사용하중 모멘트})$$

$$n = E_s / E_c = 200000 / \{ 8500 \cdot (F_{ck}/10 + 8)^{(1/3)} \} = 6$$

$$p = A_s / (B \cdot D) = 0.00645$$

$$k = -np + \sqrt{((np)^2 + 2np)} = 0.242 \quad j = 0.919$$

$$x = k \cdot d = 9.691 \text{ cm}$$

$$f_c = 2 \cdot M_o / (B \cdot x \cdot (D - x/3)) = 56.129 \text{ kgf/cm}^2$$

$$f_s = M_o / (A_s \cdot (D - x/3)) = 1053.319 \text{ kgf/cm}^2$$

$$f_{st} = f_s \cdot (H - D_{c_min} - x) / (D - x) = 1053.319 \text{ kgf/cm}^2$$

최외단철근 소요중심간격

$$s = \text{Min} [375 \cdot (2100/f_{st}) - 2.5C_c, 300 \cdot (2100/f_{st})] = 598.11 \text{ mm}$$

$$\dots \text{여기서..} C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 39.00 \text{ mm}$$

$$\text{최외단철근 평균배근간격} = 149.93 \text{ mm} \leq 598.11 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$$

다. 검토 결과 요약

횡방향 검토 결과, 각 단면의 설계 휨강도는 극한 하중조합에 대해서 안전율을 확보하고 있으며, 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.

【표 5.25】 휨강도 검토 결과

구 분		Mu (kN · m)	Req' d As (mm ²)	φ Mn (kN · m)	Used As (mm ²)	안전율	검 토
바닥판	외측지점부	194.9	685	337.8	2582 (H22@150)	1.733	OK
	중앙부	23.7	331	162.2	2582 (H22@150)	6.844	OK
	내측지점부	154.4	2382	293.9	2582 (H22@150)	1.903	OK
거더 하부플랜지		43.0	551	145.1	1325 (H16@150)	3.374	OK
거더 복부		51.9	725	199.2	1325 (H16@150)	3.838	OK

【표 5.26】 전단력 검토 결과

구 분		Vu (kN)	φ Vn (kN)	안전율	비 고
바닥판	외측지점부	112.5	169.6	1.508	OK
	내측지점부	107.3	190.8	1.778	OK
거더 하부플랜지		38.5	110.2	2.862	전단철근 불필요
거더 복부		36.9	110.2	2.986	전단철근 불필요

5.5 안전성평가 결과

【표 5.27】 종방향 검토 결과(응력 검토)

구 분	단면상연 휨응력(MPa)			단면하연 휨응력(MPa)			안전성 평 가
	발생응력	허용응력	안전율	발생응력	허용응력	안전율	
중앙부	-9.85	-24.00	2.437	0.93	3.16	3.398	A
				-15.28	-24.00	1.571	
지점부	2.32	3.16	1.362	1.17	3.16	2.701	
	-10.85	-24.00	2.212	-14.75	-24.00	1.627	

【표 5.28】 종방향 검토 결과(극한강도 검토)

구 분	휨강도(kN·m)			전단강도(kN)			안전성 평 가
	소요강도	설계강도	안전율	소요강도	설계강도	안전율	
중앙부	70,400	216,500	3.075	-	-	-	A
지점부	113,999	221,109	1.940	24,172	26,540	1.098	

【표 5.29】 횡방향 검토 결과(휨강도)

구 분		소요강도	설계강도	안전율	안전성 평 가
바닥판	외측지점부	194.9	337.8	1.733	
	중앙부	23.7	162.2	6.844	A
	내측지점부	154.4	293.9	1.903	
거더 하부플랜지		43.0	145.1	3.374	
거더 복부		51.9	199.2	3.838	

【표 5.30】 횡방향 검토 결과(전단강도)

구 분		소요강도	설계강도	안전율	안전성 평 가
바닥판	외측지점부	112.5	169.6	1.508	A
	내측지점부	107.3	190.8	1.778	
거더 하부플랜지		38.5	110.2	2.862	
거더 복부		36.9	110.2	2.986	