

제5장 시설물의 안전성평가

5.1 안전성평가 개요

5.2 안전성검토

5.3 콘크리트 라이닝 해석

5.4 안전성평가 결과

제5장 시설물의 안전성평가

5.1 안전성평가 개요

5.1.1 터널개요

가. 터널현황

문수터널(부산, 포항)은 터널시점 울산광역시 울주군 청량면, 터널종점 울산광역시 울주군 범서읍(부산울산선 부산<44.45km>, 포항<44.47km>지점)에 위치하고 있고, 2008년도 12월에 준공되어 약 10년 정도의 공용기간이 경과한 상태이며, 위치상으로 영취산(352m)의 동쪽 자락을 남북으로 가로지르게 시공된 편도 3차로 터널이다.

본 터널의 제원은 총연장 536.0m(부산), 1,599.0m(포항)이며, 폭 10.8m, 높이 8.2m이고, 종단구배는 0.500%로 시공되었으며, 터널 본선은 NATM으로 시공된 굴착터널로서 구분되며 갱문형식은 벨마우스식(마제형)으로 시공되어 있고, 환기방식은 강제환기(제트팬) 방식이다.

본 과업은 준공도서(부산~울산간 고속도로 건설공사, 터널해석보고, 제9공구 두현~굴화(준공분), 2008.12)를 활용하여 안정성평가를 실시하였다.

나. 설계 당시 구조계산서 활용 적정성 검토

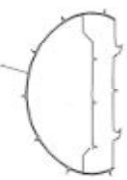
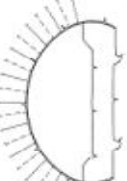
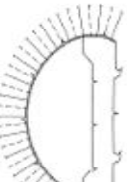
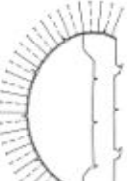
본 터널은 공용중인 시설물로서 설계 당시와 현재의 설계기준의 변경, 공용중 성능개선(보강) 등을 통한 구조계의 변경 등을 검토하여 준공도서 작성 당시의 구조계산서 활용 여부를 판단하고자 한다.

〈표 5.1〉 설계 당시와 현재 비교

구 분	준공도서 작성 당시(2008년)	현재(2018년)	비 고
설계 기준	• 콘크리트구조설계기준 (1999)	• KDS 14 20 00 콘크리트구조설계(강도설계법)(2018)	• 전단강도감소계수가 설계당시 0.8에서 현재 0.75로 강화되었으나 예외조항에 기존 구조물검토 시에는 0.8을 적용할 수 있으므로 적정.
적용 하중	• 자중(LF=1.54) • 이완토압(LF=1.54) • 수압(LF=1.8) • 온도(LF=1.3)	• 자중(LF=1.2) • 연직토압(LF=1.4) • 수압(LF=1.3) • 온도(LF=1.2)	• 전반적으로 현 기준에 비해 준공도서 작성 당시의 하중계수가 크므로 준공도서를 통한 안정성 평가 적정.
사용 재료	• 라이닝콘크리트 fck=240kg/cm ²	• 라이닝콘크리트 비파괴강도시험결과 fck=24.8~31.8MPa	• 비파괴 시험 결과치가 설계강도를 상회하므로 설계강도 적용 적정.
기타			• 추가 보강 등의 구조계 변경 없음

설계 당시와 현재의 설계기준, 하중, 사용재료, 기타 구조계의 변경 등을 검토한 결과 터널 안전율에 영향을 줄 수 있는 변경사항은 없는 것으로 판단되어 준공도서를 활용하여 구조안전성능 평가 실시하고자 한다.

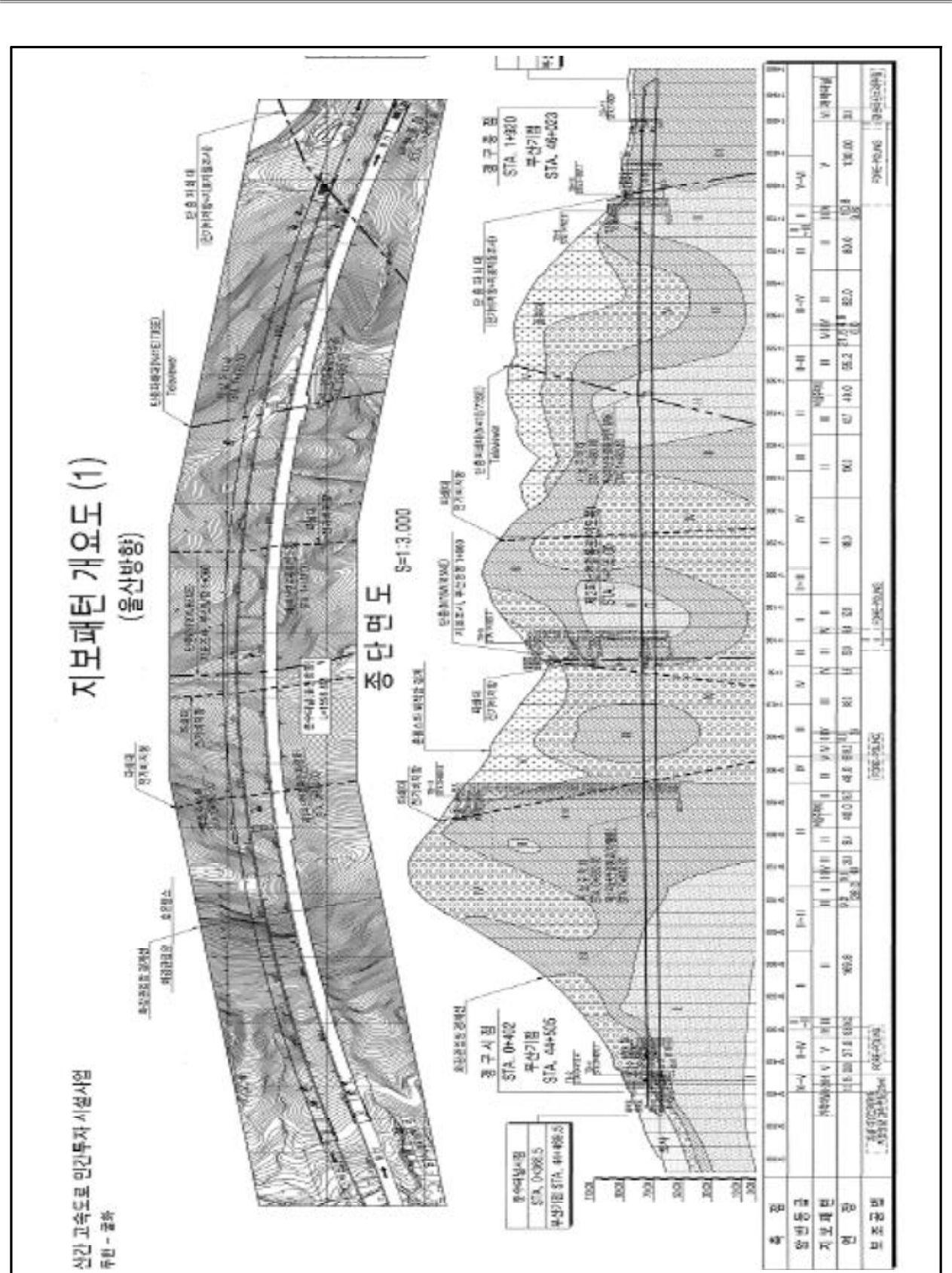
5.1.2 지반해석(지보패턴 현황)

구 분		표 준 단 면			
		TYPE-I	TYPE-II	TYPE-III	TYPE-IV
표 준 단 면					
지 반 분 류	지 반 등 급	I	II	III	IV
	RMR	81 이상	80 ~ 61	60 ~ 41	40 ~ 21
굴 진 장	Q	40 이상	10 ~ 40	1 ~ 10	0.1 ~ 1
	상 반	3.0	2.0	2.0	1.2
	하 반	4.0	4.0	3.0	2.4
지 보 재	형 식	강철유보강	강철유보강	강철유보강	강철유보강
	1차두께(mm)	50	80	80	80
	2차두께(mm)	-	-	40	80
	소 계(mm)	50	80	120	160
특 별 트	길 이(m)	4.0	4.0	4.0	5.0
	간 격	맨 엄	2.0	2.0	1.2
강 지 보 재 (m)	형 방 향	맨 엄	2.0	1.5	1.5
	구 격	-	-	-	LG-70X20X30
콘크리트라이닝 두께	간 격	-	-	-	1.2
	형 식	무 근	무 근	무 근	무 근
보 조 공 법	두께	350	350	350	350
	필요시	-	-	-	필요시 Fore-Poling
적 용 구 간	부 산 방 향	-	200.000M	580.000M	440.000M
	월 산 방 향	-	240.000M	510.000M	430.000M
비 고					

〈그림 5.1〉 문수터널(부산, 포항) 지보패턴 개요도 ①

구 분		표 준 단 면			
		TYPE-V	TYPE-VI	TYPE-VI-1	TYPE-VI-2
표 준 단 면					
지 반 분 류	지 반 등 급	V	VI	리 평 암	토 사
	RMR	20 이하	경 구 부	경 구 부	경 구 부
굴 진 장	Q	0.01 - 0.1	-	풍 화 암 구 간	토 사 구 간
	상 반	1.0	0.8	0.8	0.8
	하 반	1.0	0.8	0.8	0.8
지 보	형 식	감 성 유 보 강	감 성 유 보 강	감 성 유 보 강	감 성 유 보 강
	1차 두께(mm)	80	80	80	80
	2차 두께(mm)	80	80	80	80
	소 계(mm)	160	160	160	160
목 별 트	길 이(m)	5.0	5.0	6.0 중벽 4.0	6.0
	간 격	1.0	0.8	0.8	0.8
강 지 보 재	종 방 향	1.2	1.0	1.0	1.0
	횡 방 향	LG-95X22X32	H-150X150X7X10	H-150X50X7X10	H-150X50X7X10
콘 크 리 트 라이 닝	구 격	1.0	0.8	0.8	0.8
	간 격	무 근	원 근	원 근	원 근
보 조 공 법	형 식	무 근	원 근	원 근	원 근
	두께	400	400	400	400
적 용 구 간	부 산 방 향	Fore-Poling	감 관 디 단 그 리 우 링	감 관 디 단 그 리 우 링	감 관 디 단 그 리 우 링
	울 산 방 향	50.000M	20.000M	48.000M	10.000M
비 고	울 산 방 향	135.000M	20.000M	15.000M	13.000M
	비 고	보 조 공 법 : 울 산 방 향 27m 구간, 울 산 방 향 20m 구간, 울 산 방 향 20m 구간			

〈그림 5.2〉 문수터널(부산, 포항) 지보패턴 개요도 ②



〈그림 5.4〉 문수터널(포항) 지보패턴 적용 현황

5.1.3 해석조건

1) 해석위치선정

① 터널 해석시 다음을 고려하여 위치를 선정하였다.

- 지반조건이 불리한 곳
- 중요 시설물이 위치한 곳
- 대심도로써 응력방해력이 매우 큰 곳
- 갱구부 등 지형상 불리한 곳 등

② 해석위치

〈표 5.2〉 기장2터널(부산,포항) 해석위치

구 분 (해석위치)		지보타입 II (STA.1+450)	지보타입 III (STA.0+980)	지보타입 IV (STA.1+630)	지보타입 V (STA.0+440)
3차원 해석		M-C	M-C	M-C	M-C
2차원 해석	연속체	M-C H-P D-P	M-C H-P D-P	M-C D-P S-S	M-C D-P U-J
	퇴적암	이방성	이방성	이방성	—
	불연속	B-B	B-B	B-B	—
기타		Key Block	Key Block	Key Block	—

여기서 ;

M-C : Mohr-Coulomb Model

H-P : Hoek & Brown Model

D-P : Drucker-Prager Model

U-J : Ubiquitous Joint Model

B-B : Barton-Bandis Model

5.1.4 안전성능 판단기준

1) 변위

① 천단변위 - 프랑스 공업성의 관리기준

토 피(m)	천단 최대허용변위량(cm)	
	경암지반	소성지반
10 ~ 50	1 ~ 2	2 ~ 5
50 ~ 100	2 ~ 6	10 ~ 20
100이상	6 ~ 12	20 ~ 40

② 내공변위 - 일본의 비도건설 관리기준

관리기준		주의레벨 I		주의레벨 II
지반조건		내공변위	변위속도	내공변위
경암지반		2~3 cm	5mm/day가 3일 계속	3~5 cm
토사계 지 반	사질토	2~3 cm	5mm/day가 3일 계속	3~5 cm
	점성토	3~5 cm	10mm/day가 3일 계속	5~7 cm
팽창성 지반		10 cm	30mm/day가 3일 계속	20~30 cm
대 응 책		- 계측결과, 현장 상황을 종합적으로 판단하고 대책을 결정함. - 계측빈도를 증가하고 주의해서 시공.		- 시공방법 변경. - 보조공법 추가. - 지보재 추가. - 기타 보강대책 수립.

주) “주의레벨 I”의 내공변위를 기준으로 함.

2) 지보재 응력

① 숏크리트 허용응력

사용재료	설계기준강도 (kg/cm ²)	허용응력(kg/cm ²)	
숏크리트	$f_{ck} = 210$	허용압축응력	$f_{ca} = 0.40 f_{ck} = 84.0$
		허용인장응력	$f_{ta} = 0.13 \sqrt{f_{ck}} = 1.88$
		허용전단응력	$\tau_a = 0.08 \sqrt{f_{ck}} = 1.16$

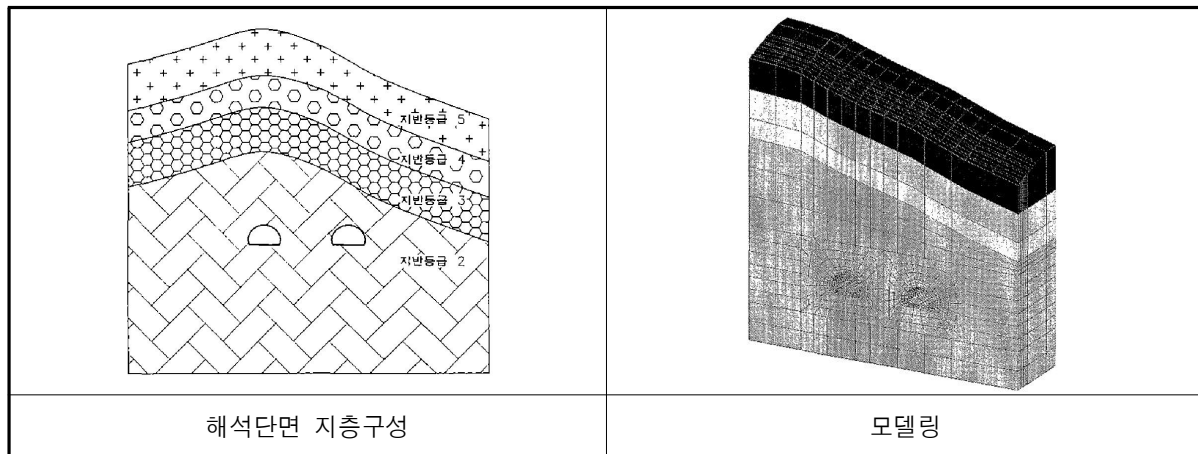
② 록볼트 허용축력

구 분		록볼트(SD35)		
		단면적(m ²)	허용응력(MPa)	허용축력(kN/EA)
허용축력	$\phi = 25.4\text{mm}$	0.0004909	175	88.67

5.2 안전성 검토

1) 단면(STA. 1+450, TYPE-II)

① 해석단면의 모델링



〈그림 5.5〉 해석단면 지층구성 및 모델링(STA. 1+450, TYPE-II)

② 지보패턴과 지반특성치

- 지보패턴

구 분			해 석 단 면
굴착공법	상 · 하반 분할굴착		
지보패턴	굴진장 (상반/하반)	2.0/4.0	
	쏫크리트 두께	8 cm	
	록볼트 길이, 간격	L=4.0m 종방향 2.0 횡방향 2.0	

- 지반특성치

지반등급	단위중량 (t/m³)	점착력 (t/m²)	내부마찰각 (deg)	포아손비	변형계수 (t/m²)
2	2.6	100	43	0.20	1,000,000
3	2.5	80	40	0.24	500,000
4	2.3	50	35	0.27	200,000
5	2.0	10	33	0.30	60,000

③ 해석결과 및 분석

- 해석결과

검토 항목	3차원 해석	2차원 연속체 해석				퇴적암 고려한 해석	2차원 불연속체 해석	키블릭 안정성 해석	검토 결과
	M/C (최대값)	M/C (최대값)	H/B (최대값)	D/P (최대값)	이방성 (최대값)	B/B (최대값)			
좌측 천단변위 (mm)	2.79	3.04	3.03	3.15	5.96	8.31		썩기 파괴 가능성 없음	안정
우측 천단변위 (mm)	2.64	2.76	2.75	2.86	5.14	2.16			안정
좌측 내공변위 (mm)	4.08	6.50	6.44	7.56	7.74	12.50			안정
우측 내공변위 (mm)	3.91	6.71	6.65	7.57	9.05	8.89			안정
힘압축 응력 (kg/cm ²)	57.0	66.0	47.6	80.7	77.6	52.8			안정
록볼트 축력 (ton)	2.22	1.27	1.26	3.99	1.99	8.20			안정

- 변위량

- 해석결과, 천단부의 최대 변위는 - 8.31mm로 나타났으며, 측벽부의 최대 변위는 - 12.50mm로 나타났다. 이는 터널 주변에서 발생하는 변위량이 미소하고 최종단계에서 수렴하는 경향을 보이므로 터널의 안정성에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

- 변위 결과

구 분	천단변위	내공변위	비 고
최대 변위 (mm)	-8.31	-12.50	

- 지보재 응력

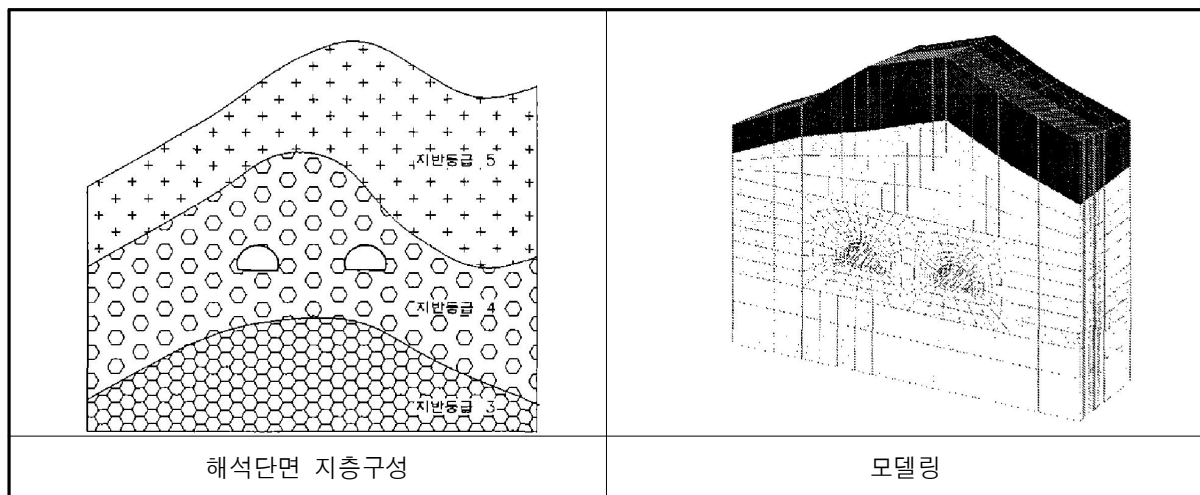
- NATM에서 숏크리트는 록볼트와 함께 주지보재로 작용하며 굴착면에 밀착되어 그 자체로서 응력을 수용하면서 원지반을 삼축응력상태로 구속하여 지반의 전단강도를 높이는 작용을 한다. 해석결과, 숏크리트의 최대 휨압축응력은 80.7kgf/cm^2 로 나타났고, 최대 록볼트 축력은 8.20ton 발생하였으며, 이는 허용응력 이내로서 터널 및 지보재의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

- 응력 검토결과

구 분	숏크리트 휨응력(kgf/cm^2)		록볼트 축력(ton)		비 고
	발생응력	허용응력	최대축력	허용축력	
지보재 응력	80.7	84.0	8.20	8.75	OK

2) 단면(STA. 1+630, TYPE-IV)

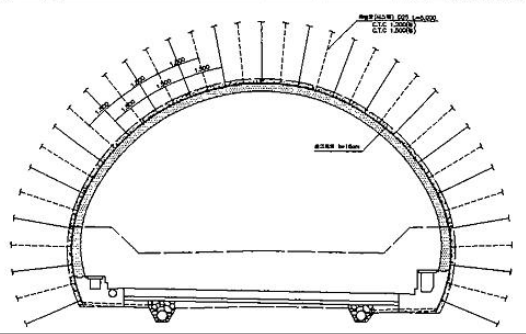
① 해석단면의 모델링



〈그림 5.6〉 해석단면 지층구성 및 모델링(STA. 1+630, TYPE-IV)

② 지보패턴과 지반특성치

- 지보패턴

구 분			해 석 단 면
굴착공법	상 · 하반 분할굴착		
지보패턴	굴진장 (상반/하반)	1.2/2.4	
	쉴크리트 두께	16 cm	
	록볼트 길이, 간격	L=5.0m 종방향 1.2 횡방향 1.5	

- 지반특성치

지반등급	단위중량 (t/m³)	점착력 (t/m²)	내부마찰각 (deg)	포아손비	변형계수 (t/m²)
3	2.5	80	40	0.24	500,000
4	2.3	50	35	0.27	200,000
5	2.0	10	33	0.30	60,000

③ 해석결과 및 분석

- 해석결과

검토 항목	3차원 해석	2차원 연속체 해석			퇴적암 고려한 해석	2차원 불 연속체해 석	키블릭 안정성 해석	검 토 결 과
	M/C (최대값)	M/C (최대값)	D/P (최대값)	S/S (최대값)	이방성 (최대값)	B/B (최대값)		
좌측 천단변위 (mm)	6.63	4.19	4.30	3.72	5.29	6.97	췌기 파괴 가능성 없음	안정
우측 천단변위 (mm)	7.01	5.24	5.45	4.55	9.23	5.04		안정
좌측 내공변위 (mm)	10.03	6.44	7.38	4.27	11.37	8.73		안정
우측 내공변위 (mm)	9.33	4.88	6.68	3.00	8.68	4.90		안정
휨압축 응력 (kg/cm ²)	63.0	73.1	76.1	56.0	82.8	6.33		안정
록볼트 축력 (ton)	5.3	2.78	5.51	2.18	4.58	6.08		안정

- 변위량

- 해석결과, 천단부의 최대 변위는 -9.23mm로 나타났으며, 측벽부의 최대 변위는 -11.37mm로 나타났다. 이는 터널 주변에서 발생하는 변위량이 미소하고 최종단계에서 수렴하는 경향을 보이므로 터널의 안정성에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

- 변위 결과

구 분	천단변위	내공변위	비 고
최대 변위(mm)	-9.23	-11.37	

- 지보재 응력

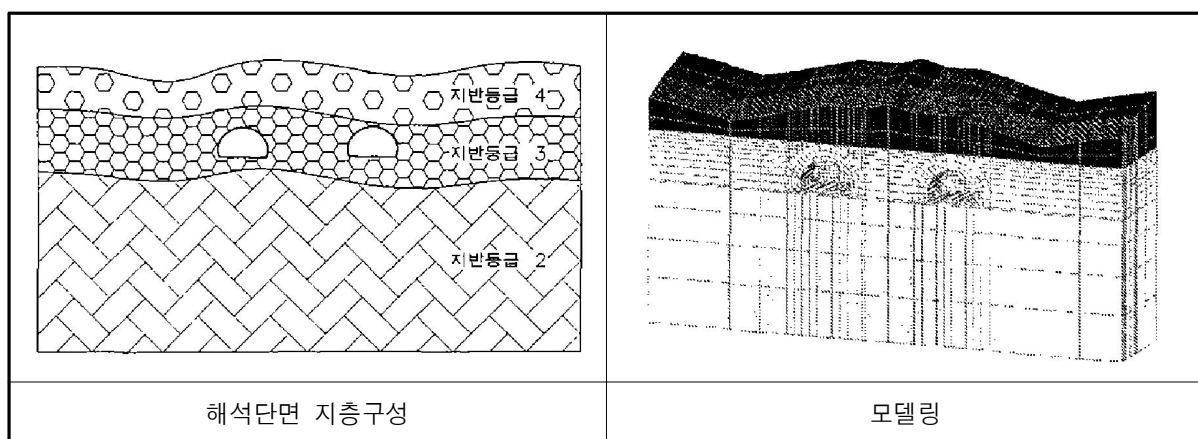
- NATM에서 숏크리트는 록볼트와 함께 주지보재로 작용하며 굴착면에 밀착되어 그 자체로서 응력을 수용하면서 원지반을 삼축응력상태로 구속하여 지반의 전단강도를 높이는 작용을 한다. 해석결과, 숏크리트의 최대 휨압축응력은 82.8kgf/cm²로 나타났고, 최대 록볼트 축력은 6.08ton 발생하였으며, 이는 허용응력 이내로서 터널 및 지보재의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

- 응력 검토결과

구 분	숏크리트 휨응력(kgf/cm ²)		록볼트 축력(ton)		비 고
	발생응력	허용응력	최대축력	허용축력	
지보재 응력	82.8	84.0	6.08	8.75	OK

3) 단면(STA. 0+450, TYPE-V)

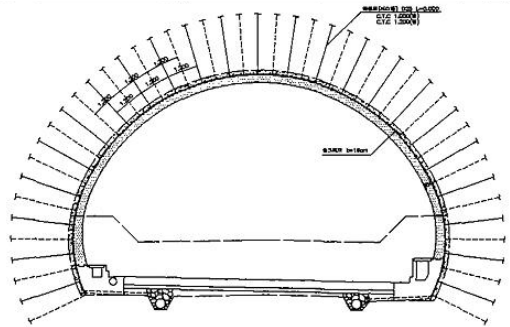
① 해석단면의 모델링



〈그림 5.7〉 해석단면 지층구성 및 모델링(STA. 0+450, TYPE-V)

② 지보패턴과 지반특성치

- 지보패턴

구 분			해 석 단 면
굴착공법	상 · 하반 분할굴착		
지보패턴	굴진장 (상반/하반)	1.0/1.0	
	쉴크리트 두께	16 cm	
	록볼트 길이, 간격	L=5.0m 중방향 1.0 횡방향 1.2	

- 지반특성치

지반등급	단위중량 (t/m³)	점착력 (t/m²)	내부마찰각 (deg)	포아손비	변형계수 (t/m²)
2	2.6	100	43	0.20	1,000,000
3	2.5	80	40	0.24	500,000
4	2.3	50	35	0.27	200,000

③ 해석결과 및 분석

- 해석결과

검토 항목	3차원 해석	2차원 연속체 해석			검토 결과
	M/C (최대값)	M/C (최대값)	D/P (최대값)	U/J (최대값)	
좌측천단변위 (mm)	0.97	3.22	3.19	3.25	안정
우측천단변위 (mm)	0.97	2.59	2.45	2.72	안정
좌측내공변위 (mm)	1.03	5.08	5.39	4.37	안정
우측내공변위 (mm)	1.03	3.23	3.30	2.52	안정
힘압축응력 (kg/cm²)	23.9	34.0	37.9	51.8	안정
록볼트축력 (ton)	0.84	3.00	3.05	5.90	안정

- 변위량

- 해석결과, 천단부의 최대 변위는 - 3.22mm로 나타났으며, 측벽부의 최대 변위는 - 5.39mm로 나타났다. 이는 터널 주변에서 발생하는 변위량이 미소하고 최종단계에서 수렴하는 경향을 보이므로 터널의 안정성에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

- 변위 결과

구 분	천단변위	내공변위	비 고
최대 변위(mm)	-3.22	-5.39	

- 지보재 응력

- NATM에서 숏크리트는 록볼트와 함께 주지보재로 작용하며 굴착면에 밀착되어 그 자체로서 응력을 수용하면서 원지반을 삼축응력상태로 구속하여 지반의 전단강도를 높이는 작용을 한다. 해석결과, 숏크리트의 최대 휨압축응력은 51.8kgf/cm²로 나타났고, 최대 록볼트 축력은 5.90ton 발생하였으며, 이는 허용응력 이내로서 터널 및 지보재의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

- 응력 검토결과

구 분	숏크리트 휨응력(kgf/cm ²)		록볼트 축력(ton)		비 고
	발생응력	허용응력	최대축력	허용축력	
지보재 응력	51.8	84.0	5.90	8.75	OK

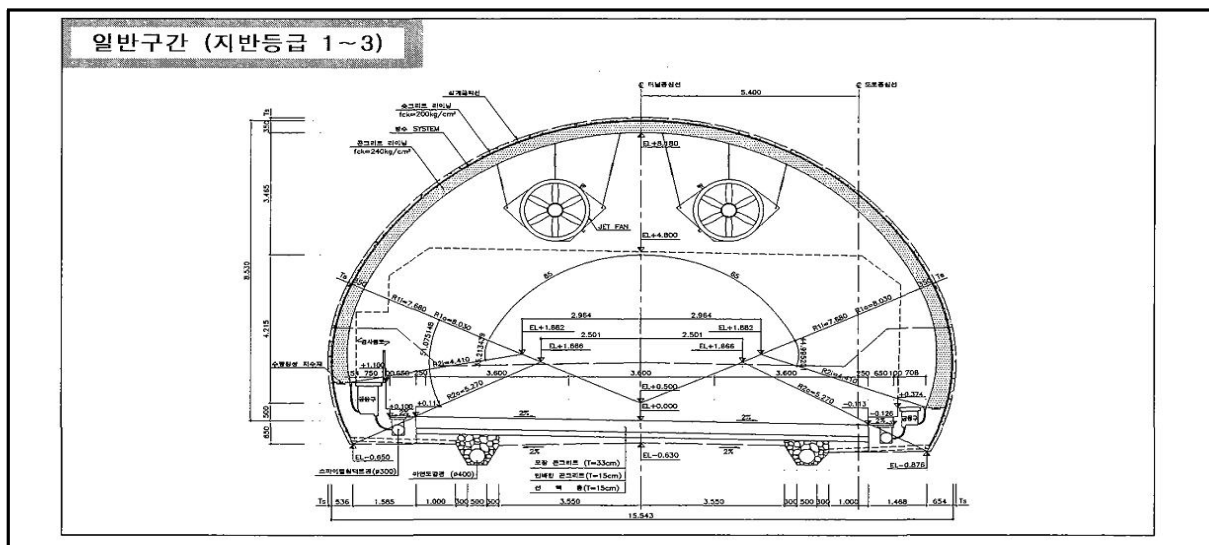
5.3 콘크리트 라이닝 해석

1) 일반구간 지반등급 1~3

- 해석조건

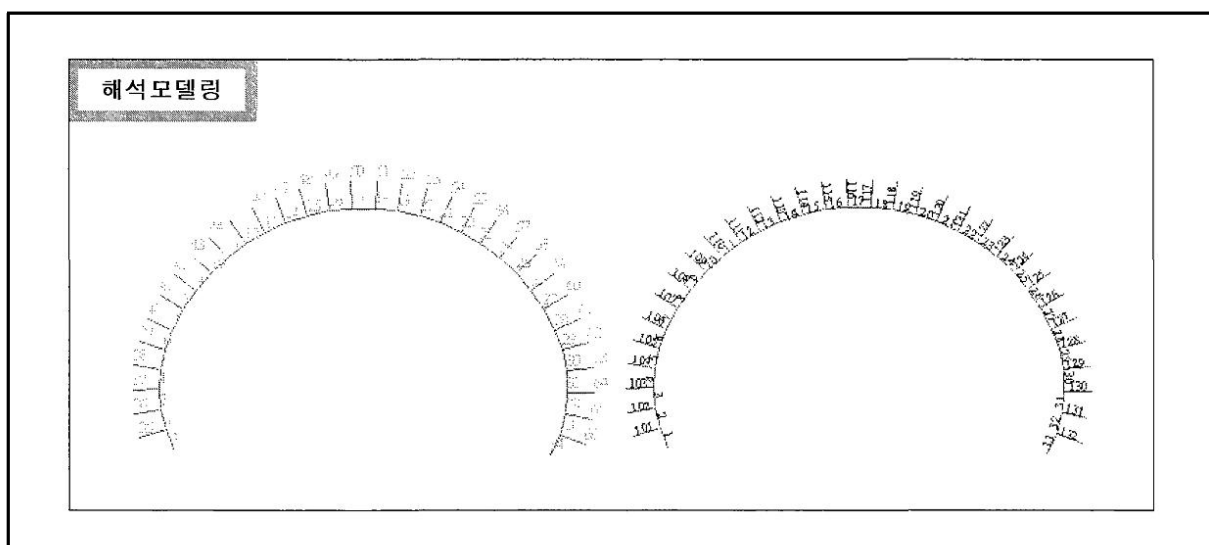
: 지반등급 1~3구간에 계획되어 있는 콘크리트라이닝의 구조검토를 위하여 가장 불리한 지반등급 3을 적용하였으며, 이완하중은 발파에 의한 이완하중고를 적용하였다. (해석 위치는 STA. 0+800)

- 해석단면



〈그림 5.8〉 콘크리트 라이닝 해석단면(지반등급 1~3)

- 해석모델링



〈그림 5.9〉 콘크리트 라이닝 해석모델링(지반등급 1~3)

② 검토방법

- 검토개요

: 무근콘크리트에 대한 구조해석을 수행하여 허용응력 이내의 경우 허용응력설계법 적용.

- 사용재료 및 허용응력

사용재료	설계기준강도 (kgf/cm ²)	허용응력 (kgf/cm ²)	
무근콘크리트	$f_{ck} = 240$	허용압축응력	$f_{ca} = 0.40 f_{ck} = 960$
		허용인장응력	$f_{ta} = 0.42 \sqrt{f_{ck}} = 65$
		허용전단응력	$\tau_a = 0.25 \sqrt{f_{ck}} = 38.73$

- 수치해석 결과가 허용응력을 초과하는 경우 강도설계법을 적용하여 철근보강.

- 단면특성

구분	단면두께 H(m)	단면2차모멘트 I(m ⁴)	탄성계수 E(tonf/m ²)	자중 W(tonf/m)	적용부재	비고
1	0.350	0.003573	8.2E5	2.500	콘크리트 라이닝	1~33
2	1.000	0.083333	96,725	0.000	스프링부재	101
3	1.000	0.083333	64,483	0.000	스프링부재	102~105
4	1.000	0.083333	68,386	0.000	스프링부재	106
5	1.000	0.083333	72,204	0.000	스프링부재	107~126
6	1.000	0.083333	70,083	0.000	스프링부재	127
7	1.000	0.083333	67,962	0.000	스프링부재	128~131
8	1.000	0.083333	101,985	0.000	스프링부재	132

- 작용하중

·자중(CASE-1)

: 단위중량(γ) = 2.5 tonf/m³

: E(탄성계수) = $15,000\sqrt{f_{ck}} = 15,000\sqrt{240} = 2.35E5(\text{kgf/m}^2)$

: 구조체의 콘크리트 라이닝의 자중은 프로그램에서 자동적으로 계산된다.

- 지반이완하중

: 이완하중고 $H = 0.5\text{m}(\gamma=2.5 \text{ tonf/m}^3, \nu=0.24)$

: 발파에 의한 수직이완하중(CASE-2), $P_v = 0.5\text{m} \times 2.5 = 1.250 \text{ tonf/m}^2$

: 발파에 의한 수평이완하중(CASE-3), $P_h = 0.5\text{m} \times 1.25 = 0.625 \text{ tonf/m}^2$

: 지반탄성계수 $E = 500,000 \text{ tonf/m}^2$

- 하중조합

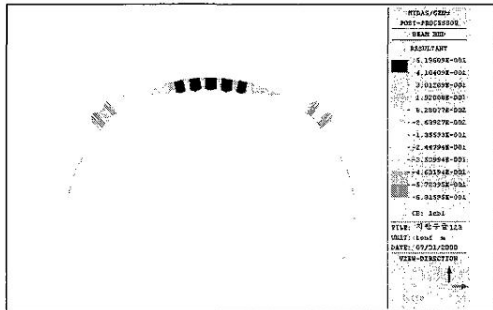
: $1.0 \times \text{CASE-1} + 1.0 \times \text{CASE-2} \Rightarrow$ 허용응력설계법

- 해석결과

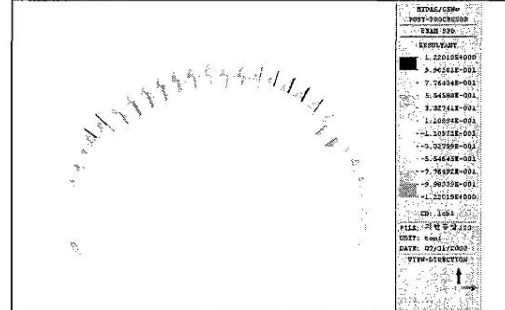
검토위치		하중조합	부재번호	해석단면력		
				모멘트 (tonf · m)	축력 (tonf)	전단력 (tonf)
라이닝	천정부	1	17	1.105	14.095	0.889
	측벽부	1	11	0.958	17.142	0.713
			23	0.957	17.142	0.713
	측벽하부	1	1	0.258	29.687	0.458

③ 단면검토

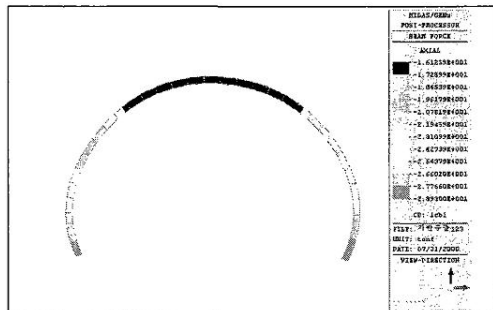
- 단면력도



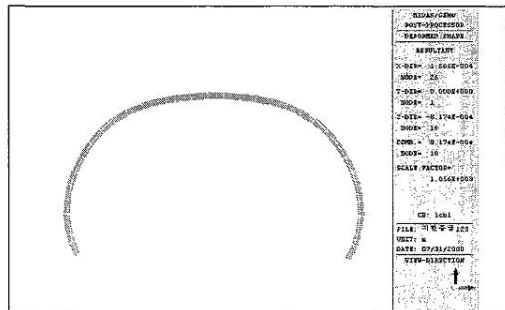
모멘트도(tonf · m)



전단력도(tonf)



축력도(tonf)



변위도(m)

- 응력검토

· 천정부

$$f = (P/A) + (M/Z)$$

$$= (14.095/0.35) + (1.105/0.20)$$

$$\text{최대응력 } f_{\max} = 95.521 \text{ tonf/m}^2$$

$$< f_{ca} \text{ ----- O.K}$$

: 안전율 = 10.05

· 측벽부

$$f = (P/A) + (M/Z)$$

$$= (17.142/0.35) + (0.958/0.02)$$

$$\text{최대응력 } f_{\max} = 96.877 \text{ tonf/m}^2$$

$$< f_{ca} \text{ ----- O.K}$$

: 안전율 = 9.91

· 측벽하부

$$f = (P/A) + (M/Z)$$

$$= (29.687/0.35) + (0.258/0.020)$$

$$\text{최대응력 } f_{\max} = 97.720 \text{ tonf/m}^2$$

$$< f_{ca} \text{ ----- O.K}$$

: 안전율 = 9.82

· 전단응력검토

$$v = V_{\max} / A$$

$$= 0.889 / 0.35$$

$$= 2.540 \text{ tonf/m}^2$$

$$< v_a \text{ ----- O.K}$$

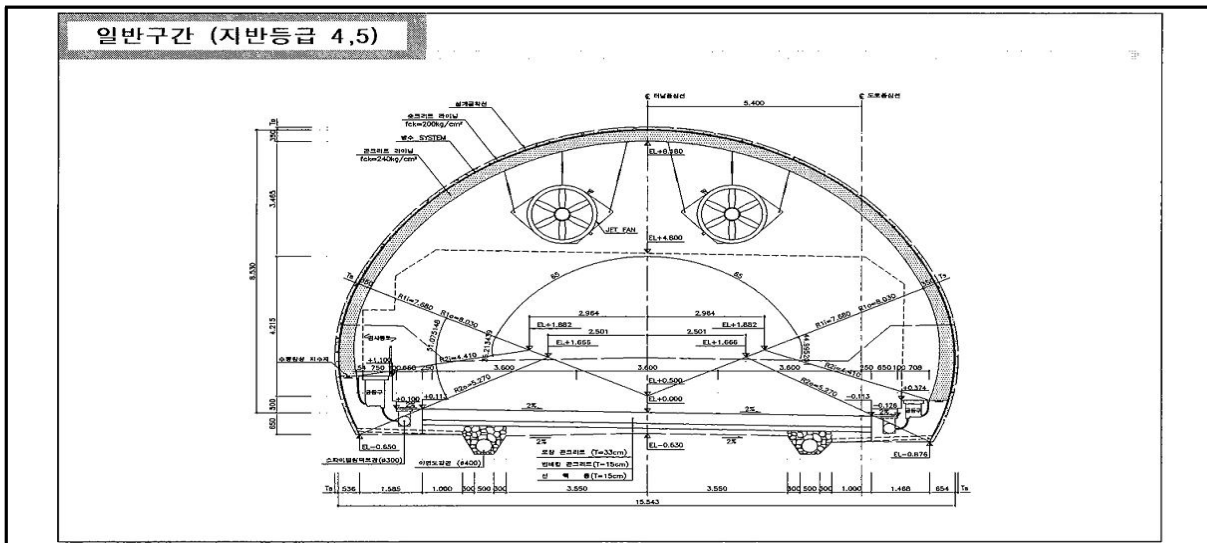
: 안전율 = 15.25

2) 일반구간 지반등급 4,5

- 해석조건

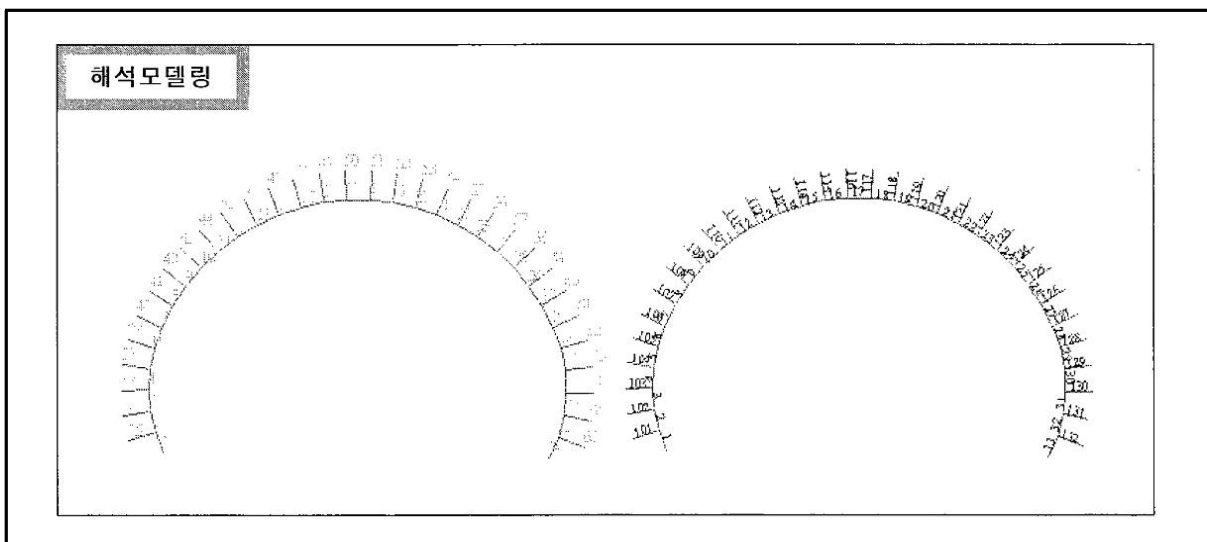
: 지반등급 4,5에 계획되어 있는 콘크리트 라이닝의 구조검토를 위하여 가장 불리한 지반등급 5를 적용하였으며, 이완하중고는 수치해석 결과를 바탕으로 산정하였다. (해석 위치는 STA. 1+280)

- 해석단면



〈그림 5.10〉 콘크리트 라이닝 해석단면(지반등급 4,5)

- 해석모델링



〈그림 5.11〉 콘크리트 라이닝 해석모델링(지반등급 4,5)

② 검토방법

- 검토개요

: 무근콘크리트에 대한 구조해석을 수행하여 허용응력 이내의 경우 허용응력설계법 적용.

- 사용재료 및 허용응력

사용재료	설계기준강도 (kgf/cm ²)	허용응력 (kgf/cm ²)	
무근콘크리트	$f_{ck} = 240$	허용압축응력	$f_{ca} = 0.40 f_{ck} = 960$
		허용인장응력	$f_{ta} = 0.42 \sqrt{f_{ck}} = 65$
		허용전단응력	$\tau_a = 0.25 \sqrt{f_{ck}} = 38.73$

- 수치해석 결과가 허용응력을 초과하는 경우 강도설계법을 적용하여 철근보강.

- 단면특성

구분	단면두께 H(m)	단면2차모멘트 I(m ⁴)	탄성계수 E(tonf/m ²)	자중 W(tonf/m)	적용부재	비고
1	0.350	0.003573	2.35E6	2.500	콘크리트 라이닝	1~33
2	1.000	0.083333	11,607	0.000	스프링부재	101
3	1.000	0.083333	7,738	0.000	스프링부재	102~105
4	1.000	0.083333	8,206	0.000	스프링부재	106
5	1.000	0.083333	8,665	0.000	스프링부재	107~126
6	1.000	0.083333	8,410	0.000	스프링부재	127
7	1.000	0.083333	8,155	0.000	스프링부재	128~131
8	1.000	0.083333	12,238	0.000	스프링부재	132

- 작용하중

·자중(CASE-1)

: 단위중량(γ) = 2.5 tonf/m³

: E(탄성계수) = $15,000\sqrt{f_{ck}} = 15,000\sqrt{240} = 2.35E5(\text{kgf/m}^2)$

: 구조체의 콘크리트 라이닝의 자중은 프로그램에서 자동적으로 계산된다.

- 지반이완하중

: 이완하중고 $H = 4.0\text{m}(\gamma=2.0 \text{ tonf/m}^3, \nu=0.27)$

: 발파에 의한 수직이완하중(CASE-2), $P_v = 4.0 \times 2.0 = 8.000 \text{ tonf/m}^2$

: 발파에 의한 수평이완하중(CASE-3), $P_h = 0.5 \times 8.0 = 4.000 \text{ tonf/m}^2$

: 지반탄성계수 $E = 60,000 \text{ tonf/m}^2$

- 하중조합

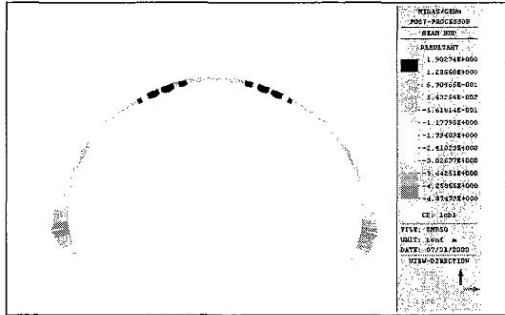
: $1.0 \times \text{CASE-1} + 1.0 \times \text{CASE-2} \Rightarrow$ 허용응력설계법

- 해석결과

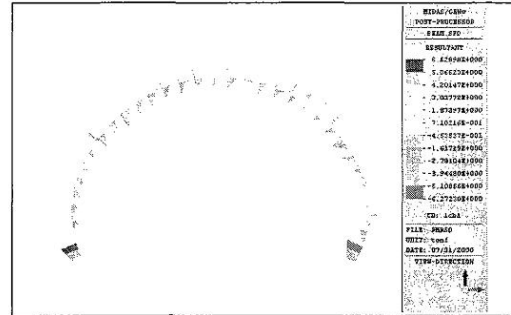
검토위치		하중조합	부재번호	해석단면력		
				모멘트 (tonf · m)	축력 (tonf)	전단력 (tonf)
라이닝	천정부	1	16	5.932	58.642	4.967
	측벽부	1	11	5.092	76.170	3.886
			23	5.105	76.172	3.888
	측벽하부	1	2	6.164	121.113	1.384

③ 단면검토

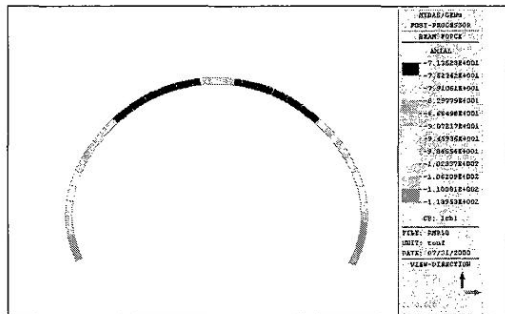
- 단면력도



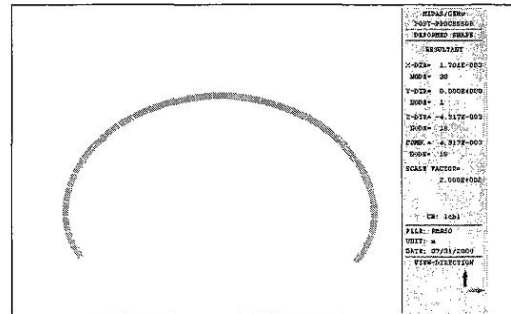
모멘트도(tonf · m)



전단력도(tonf)



축력도(tonf)



변위도(m)

- 응력검토

· 천정부

$$f = (P/A) + (M/Z)$$

$$= (58.642/0.35) + (5.932/0.20)$$

$$\text{최대응력 } f_{\max} = 464.149 \text{ tonf/m}^2$$

$$< f_{ca} \text{ ----- O.K}$$

: 안전율 = 2.07

· 측벽부

$$f = (P/A) + (M/Z)$$

$$= (76.170/0.35) + (5.092/0.02)$$

$$\text{최대응력 } f_{\max} = 472.229 \text{ tonf/m}^2$$

$$< f_{ca} \text{ ----- O.K}$$

: 안전율 = 2.03

· 측벽하부

$$f = (P/A) + (M/Z)$$

$$= (121.113/0.35) + (6.164/0.020)$$

$$\text{최대응력 } f_{\max} = 654.237 \text{ tonf/m}^2$$

$$< f_{ca} \text{ ----- O.K}$$

: 안전율 = 1.47

· 전단응력검토

$$v = V_{\max} / A$$

$$= 4.967 / 0.35$$

$$= 14.191 \text{ tonf/m}^2$$

$$< v_a \text{ ----- O.K}$$

: 안전율 = 2.73

5.4 안전성평가 결과

1) 지반 안전성평가

본 터널의 지반은 설계개념의 안전율을 도입하지 않은 경우로서, 터널 상태평가지 지반 상태와 라이닝 변상 등을 기 반영하였고, 안전성능평가를 정량화하여 A, B, C, D, E로 분류하기가 곤란하므로 안전, 불안전 여부만을 평가하였으며, 검토항목에 대해서 모두 안전한 것으로 평가되었다.

〈표 5.3〉 지반 안전성평가 결과

시설물 안전성평가 결과 산정표						
시설물명	문수터널(부산,포항)					
부재구분	변위 또는 응력				안전성능 여부 (안전, 불 안전)	비 고
	해석단면1 (TYPE2)	해석단면2 (TYPE3)	해석단면3 (TYPE4)	해석단면4 (TYPE5)		
천단변위 (mm)	-6.67	-8.31	-9.23	-3.22	안전	프랑스 공업성 평가기 준 허용변위 10~20mm
내공변위 (mm)	-8.40	-12.50	-11.37	-5.39	안전	
숏크리트 응력 (kgf/cm ²)	68.2	80.7	82.8	51.8	안전	허용휨압축응력 84(kgf/cm ²)
록볼트 축력 (ton)	6.14	8.20	6.08	5.90	안전	허용축력 8.75(ton)
안전성능평가 결과	안전					

2) 콘크리트 라이닝 안전성평가

콘크리트라이닝에 대한 안전성평가는 무근콘크리트인 본선부 TYPE 1~3,TYPE4,5 구간으로 구분하여 수행 되었다. 무근부는 허용응력법으로 검토한결과 전체적으로 안전율을 확보하고 있으며, 최소안전율은 휨응력에 대해 1.47으로 판정되어 안전성평가는 a등급으로 판정 되었다.

〈표 5.4〉 콘크리트 라이닝 안전성평가 결과(부산)

시설물 안전성평가 결과 산정표				
시설물명		문수터널(부산방향)		
부재구분		안전율(SF)	평가결과	비 고
지반등급 1~3 (무근구간)	휨응력	9.82	a	허용응력법
	전단응력	15.25	a	허용응력법
지반등급 4,5 (무근구간)	휨응력	1.47	a	허용응력법
	전단응력	2.73	a	허용응력법
안전성능평가 결과		• 최저 안전성능평가 결과 =A		

〈표 5.5〉 콘크리트 라이닝 안전성평가 결과(포항)

시설물 안전성평가 결과 산정표				
시설물명		문수터널(포항방향)		
부재구분		안전율(SF)	평가결과	비 고
지반등급 1~3 (무근구간)	휨응력	9.82	a	허용응력법
	전단응력	15.25	a	허용응력법
지반등급 4,5 (무근구간)	휨응력	1.47	a	허용응력법
	전단응력	2.73	a	허용응력법
안전성능평가 결과		• 최저 안전성능평가 결과 =A		