

특 집

|| 고속철도 구조물에 적용된 최신 기술 ||

고속철도 터널의 최신 설계기술

- Recent Design Technology of High-Speed Railway Tunnel -



이양상*
Lee, Yang Sang



추석연**
Choo, Seock Yeon

1. 개 요

경부고속철도건설 사업구간 412 km 중 터널이 차지하는 비율은 약 46%에 해당되는 46개소 191 km로써 그야말로 터널로 점철되는 단군 이래의 최대규모 국책공사이기도 하다. 터널 단면 또한 107 m²나 되는 대단면으로 기존 복선철도터널의 배에 가까운 면적이다.

서울-부산간 노선에서 가장 긴 터널은 부산직할시에 소재한 금정터널로 연장이 18.5 km에 이른다.

경부고속철도의 1단계 개통에 이은 2단계구간 대구-부산 노선중 한창 공사중인 제13-4공구는 경상남도 양산시에 소재한 천성산을 터널로 통과하는 구간으로서 13-3공구와 연결된 원효터널(연장 13.5 km)의 일부구간을 포함한 9 km의 구간을 공사범위로 하고 있다.

동구간 중 천성산을 관통하는 원효터널구간은 부산시 소재 금정산과 함께 환경훼손을 이유로 터널통과 문제를 놓고 불교계 및 환경단체와 오랜 기간동안 마찰을 빚어왔던 구간으로서 대안입찰에 따라 대안설계가 시행된 구간이다.

특히 천성산일원에는 무제치늪을 비롯하여 밀밭늪 등의 습지와 내원사, 미타암 등의 사찰 등이 산재한 경남지방의 영산이며 가지산도립공원의 일부로서 환경단체 및 일반인들의 관심이 큰 지역이다. 따라서 다른 구간과 달리 습지보호를 위해 보다 많은 조사와 분석을 통해 터널설계를 수행한 프로젝트이다.

본고는 경부고속철도 제13-4공구를 대안입찰방식에 따라 발주하면서 채택된 대안설계보고서를 중심으로 발췌 요약한 내용이다.

2. 고속철도터널 일반

경부고속철도 터널은 고속도로나 일반철도와 달리 고속으로 주행하는 열차를 안전하게 지켜내도록 설계되어야 하지만 굴착 방법 등은 특별히 다를 것이 없으므로 대부분 NATM 공법에 의한 굴착공법을 적용하였으며 일부 토파가 낮은 입출구 구간과 계곡부는 개착식으로 공사를 시행하고 도심구간의 경우 TBM + NATM 공법으로 하였다.

터널단면은 고속주행으로 인한 터널내 공기저항 감소를 위해 복선터널로 적용하였고 열차승객의 이명현상 완화와 미기압파에 의한 터널 갱구부 소음을 저감하고자 시속 300 km로 운행하는 구간에서는 107 m²를 적용하고 그 외 구간은 82 m²를 적용하였는 바 미기압파에 대비하여 터널 갱문을 45°로 경사지도록 설계 기준을 정하였다.

터널의 콘크리트 라이닝은 전철화설비의 고정금구설치를 위해 두께를 40 cm로 하였고 단면형상은 3심원형으로 적용하여 하부 배수관도입부가 취약개소가 되지 않도록 하였다.

또한 터널 입·출구부는 라이닝을 무근콘크리트로 하던 것을 건조수축 및 온도변화로 인한 균열의 억제와 내구성 증진 유지보수비용 절감을 위해 단철근(D13@300)보강을 하였고 철근은 전식에 의한 부식을 방지하기 위해 접지공사를 하고 개착터널의 경우 15 m 마다 신축이음을 설치하도록 하였다.

터널 양측은 배수구외에 각종 케이블류의 설치공간을 위한 트

* 한국철도시설공단 토목설계1부장

** (주)삼보기술단 지반부 이사

로프를 설치하였으며 트로프는 덮개를 설치하여 비상통로로 활용하였고 그 외에도 비상시의 방재를 위해 터널연장이 5km가 넘는 터널은 사갱을 설치하여 운영시 승객의 대피구로 활용하였고 터널내 이동통로, 조명시설, 비상전화기, 터널입출구부 비상주차장 등 방재시설을 대폭 적용하였다.

3. 철도계획

3.1 사전조사

원효터널구간은 종교단체 및 시민단체에 의한 환경훼손 민원이 공기지연은 물론 사업비의 증가의 원인으로 예상되는 바 대안설계시 이를 충분히 감안하여 철저한 사전조사를 시행, 민원발생요인을 최소화하고 공기를 준수하고자 하였다. 조사 결과에 대한 검토내용을 요약하면 <표 1>과 같다.

그 외의 조사현황으로서는 다음과 같으며, 이러한 조사를 통해 내실 있는 터널 대안설계가 되도록 노력하였다.

- | | |
|----------------|-----------------|
| 가. 교통현황조사 | 나. 기상·기후조사 |
| 다. 수리·수문조사 | 라. 광업권 및 폐갱조사 |
| 마. 환경현황조사 | 바. 유적 및 문화재조사 |
| 사. 주요 구조물 조사 | 아. 공원 및 임도 현황조사 |
| 자. 재해발생 이력조사 등 | |

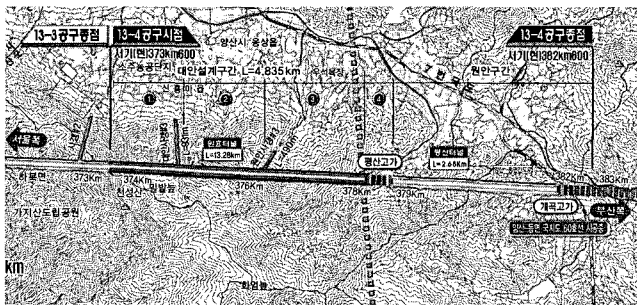


그림 1. 노선 개요도

3.2 노선계획

경부고속철도사업의 목적에 맞는 설계기준을 근거로 지역특성을 감안하고 민원의 해결 내지 최소화를 기 하고자 터널계획에 앞서 철도계획을 검토하였다. 특히 습지와 문화재 보전의 과제를 염두에 두고 선형검토와 시설물계획을 실시하였다.

그 결과 노선 전연장이 직선이며 다소 급한편의 종단선형(-23%, 설계기준 최급기울기 25% 이하)이나 선로 경합이 발생하지 않는 것으로 나타났으며 원효터널에는 공사용 사갱을 1개소 반영하여 장래에는 비상대피통로로 활용하도록 하였다. 철도계획 결과는 <그림 2> 및 <표 2>와 같다.

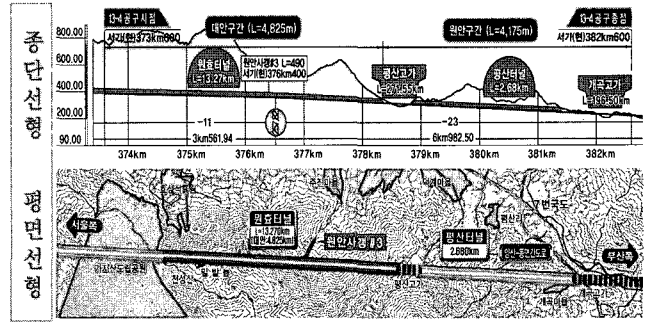


그림 2. 평면 및 종단 선형계획

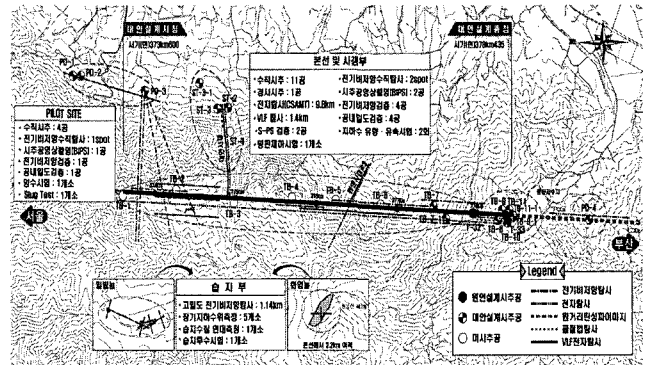


그림 3. 지역별 지반조사내용

4. 지반조사분석

과업노선의 지형 및 선구조 판독, 암종분포, 단층대의 발달상태를 파악하기 위해 여러 가지 조사와 분석을 시행하였으며 자료 조사와 현장조사를 통해 지형 및 지질정보를 분석한 뒤 선구조분석을 통해 지질의 분포상황을 확인하였다.

조사결과 주요 분포 암종은 유문암질응회암, 안산암, 흑운모화강암 등으로 분류되었고 7개에 이르는 중소규모의 단층구조선이 확인되었다.(<표 3> 참조)

- 단층파쇄대 확인을 통한 터널굴착시 보강대책 수립
- 전기비저항-RMR 상관관계로부터 미시추구간의 암반등급 산정 및 지보패턴 설계에 활용
- 전기비저항-RMR-투수계수 상관관계로부터 터널구간 수리 특성 분석에 활용
- 터널 예정구간의 P파 속도로부터 지층분포현황 및 지질이상대 파악
- 탄성파속도와 전기비저항값과의 상관성 분석 → 터널구간 암반분류 및 지보패턴 설계에 활용

<그림 3>은 지역별로 조사한 내용과 횡수 등을 요약한 것이다. 그리고 터널해석을 위한 지반설계정수를 산정하기 위해 시추조사도 추가 시행하였으며 수압파쇄시험과 AE/DRA 시험 및 실내시험을 통해 얻어진 각종 결과는 <표 4, 5>에 정리하였다.

표 1. 조사 결과 검토내용

구분	조사 주안점	설계 반영
밀밭늪 근접통과구간 	<ul style="list-style-type: none"> · 가지산 도립공원 영역 인접 · 밀밭늪 근접통과 · 주변 소주농공단지 입지 · 효성식물원 인접 · 대안사갱 입지 검토 및 분석 · 13-3공구 사갱#2 인접 	<ul style="list-style-type: none"> · 인접 공구와 선형, 구조물 연계성 확보 · 대안사갱 갱구 깎기 비탈면 최소화 · 밀밭늪 보전을 위한 굴착공법 적용 · 소주농공단지내 기존도로 활용 · 효성식물원 사유지 저축 배제 · 대안사갱 진입로 확보
미타암 (석야미타불입상) 구간 	<ul style="list-style-type: none"> · 미타암, 화엄사 적멸보궁 근접통과 · 대동아파트 노선 좌측 구릉지 인접 · 보연암, 백동소류지 노선 좌측 인접 · 천성산 정상 하부통과 · 천성산 임도 분포 	<ul style="list-style-type: none"> · 문화재 보전을 위한 굴착공법 적용 · 공사중 및 운영중 소음·진동 영향 안전거리 이격(L = 250 ~ 300m) · 공사시 진동에 의한 천성산 생태계 보전방안 수립
울산공업용수로 횡단구간 	<ul style="list-style-type: none"> · 미타암 사찰진입로 저축 · 주진소류지, 불광사 근접 · 주진마을 인접 · 울산공업용수로 도수터널 횡단 · 무지개폭포 노선 우측 통과 	<ul style="list-style-type: none"> · 범불교계 민원해소를 위한 사갱위치 변경 · 주진소류지, 불광사 소음·진동영향 해소 · 본선 하부 울산공업용수로 도수터널 안정성 확보를 위한 굴착공법 적용 · 공사시, 운행중 차수대책 수립
원효터널 종점, 평산저수지구간 	<ul style="list-style-type: none"> · 청소년수련원 근접통과(60m) · 평산저수지 횡단 · 수련장 진입도로폭 협소 및 운동장 저축 · 독립유공자 이관수 지사 묘지 근접 	<ul style="list-style-type: none"> · 청소년수련원 소음·진동 최소화 시설 적용 · 평산저수지 수질오염 방지대책 적용 · 진입도로 개량 →연장: 467m, 폭: 8m, 무지개교 신설 · 원효터널 종점 갱구 비탈면 최소화 · 접근방지시설 강화: 운동장 부근

표 2. 철도계획 결과

a. 선형 설계 검토분석

구분	평면선형			종단선형			
	개소	연장(m)	비율(%)	기울기	개소	연장(m)	비율(%)
직선	1	9,000	100	11%	1	2,917.5	32.4
				23%	1	6,082.5	67.6

b. 노반설계 검토분석

구분	구조형식	구조물명	노선연장(m)		비고
			대안설계구간	원안설계구간	
본선터널	NATM	원효터널	4,825		2,680
	NATM	평산터널			
사갱터널	NATM	사갱 #3	490		원효터널
교량	P.S.C Box	평산고가			271.5
	P.S.C Box	개곡고가			196.5
토공					1,023

표 3. 단층구조선 조사현황

구분	터널교차점	방향	터널계획고 압중	단층파와 여부	비고	미타암단층 경사시추 결과
F1	374km660	N37W/78SW	화강암	추정	소규모	
F2	374km690	N71E/84SE	화강암	확인	중규모	
F3	375km220	N74W/78SW	화강암	확인	중규모	
F4	375km350	N73E/86NW	화강암	확인	소규모	
F5	376km300	N88E/84SE	안산암	확인	소규모	
F6	376km680	N84E/83SE	안산암	추정	소규모	

표 4. 분포 암증별 실내시험 결과

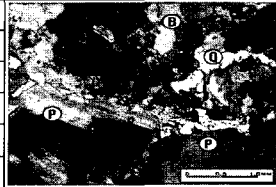
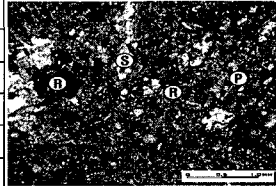
구분		화강암	안산암	화강암 박편사진	
물리적 특성	비 중	2.63 ~ 2.70	2.64 ~ 2.72		
	흡수율	0.32 ~ 0.63	0.15 ~ 0.73		
	탄성파속도 (m/sec)	Vp	1,440 ~ 5,310		2,370 ~ 6,040
		Vs	1,030 ~ 3,090		980 ~ 3,550
역학적 특성	일축압축강도(kgf/cm ²)	450 ~ 1,440	910 ~ 1,520	안산암 박편사진	
	압열인장강도(kgf/cm ²)	81 ~ 142	89 ~ 121		
	점착력(kgf/cm ²)	138 ~ 244	188 ~ 202		
	내부마찰각(°)	45 ~ 57	45 ~ 53		
절리면 전단 시험	점착력(kgf/cm ²)	0.60 ~ 1.37	0.20 ~ 0.85		
		내부마찰각(°)	최대		31.1 ~ 37.3
	잔류		27.6 ~ 32.4		27.2 ~ 31.0
	수직강성(kgf/cm ² /mm)	768	443.9 ~ 614.5		
	전단강성(kgf/cm ² /mm)	17.6 ~ 21.4	9 ~ 24		

표 5. 암의 분류결과

구분	1 등급	2 등급	3 등급	4 등급	5 등급
지반평가	매우 양호	양호	보통	불량	매우 불량
RMR	81 ~ 100	61 ~ 80	41 ~ 60	21 ~ 41	20 이하
Q	40 이상	10 ~ 40	1 ~ 10	0.1 ~ 1	0.1 이하
RMi	25 이상	5 ~ 25	0.5 ~ 5	0.1 ~ 0.5	0.1 이하
탄성파속도(m/sec)	4,290 이상	2,860 ~ 4,290	2,000 ~ 2,860	570 ~ 2,000	570 이하
전기비저항($\Omega \cdot m$)	3,881 이상	1,578 ~ 3,881	641 ~ 1,578	260 ~ 641	260 이하

5. 습지 보전대책

터널의 상부지표면에 분포하고 있는 습지는 국내에서 희소 가치가 있는 고산습지로서 보존 가치가 높아 환경단체는 물론 불교계와 학계에서 관심을 갖고 있는 터라 설계를 위한 조사부터 철저한 계획을 수립하여 환경피해가 최소화되게 하였다.

5.1 습지 현황

내륙에 분포하고 있는 습지의 종류로서는 Marshes, Swamps, Bogs, Fens 등이 있는데 Fens는 지하수 유동으로 인해 이탄층이 산정상부에 형성, Bogs보다 산화가 적고 고영양분화 한 것으로 우리나라 내륙습지, 밀밭습, 화염습, 무제치습 해당된다.

습지유지의 Mechanism은 습지가 생성된 후 지하수 유동에 의해 유지, 보전되며 건기시와 우기시 지하수위 변동에 의하여 이탄층이 포화-불포화상태의 순환과정을 반복하는 것이며 천성산의 습지는 부분적으로 육지화 되어가는 단계로 조사되었다. 습지 분포현황은 <그림 4> 및 <표 6>에 나타내었다.

습지의 상태를 정확히 조사하고 터널에 의한 영향유무를 조사하기 위해 핸드오가에 의한 지층분포와 지하수위 변동사항을 측정하고 습지 물 연대측정을 통해 지표수 또는 지하수여부를 파악하였으며 이탄층에 대한 실내시험을 통해 투수시험을 시행하였다.

밀밭습지에서 시행한 핸드오가결과 현생 식물뿌리 및 잔해로 이루어진 습지식생대는 약 30 cm 두께이고, 습지퇴적물층은

표 6. 천성산 원호터널구간 습지 현황

명칭	위치	규모(m ²)	노선 인접성	지정현황	비고
밀밭습	천성산 정상부	25,000	13-4공구	습지보전지역 선정 추진중	고층습지 (Peat land)
화염습	원호산 정상부	124,384		습지보전지역 (2002.2)	
무제치습	정족산 정상부	160,000	13-3공구	생태계 및 습지보전지역	

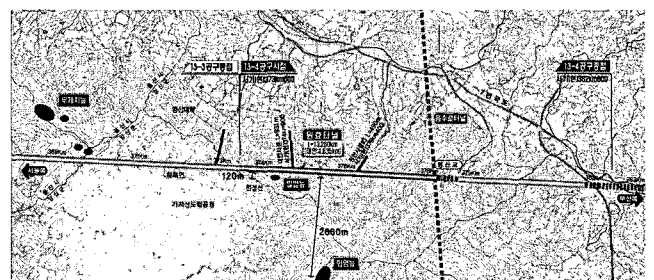


그림 4. 터널상부 습지의 분포도

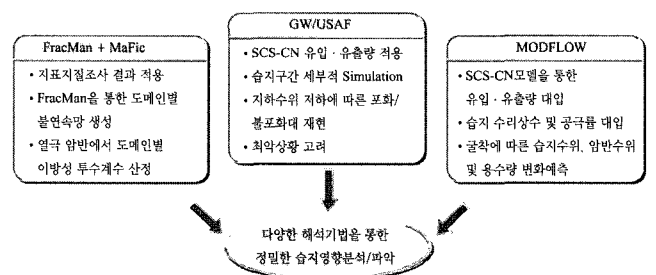
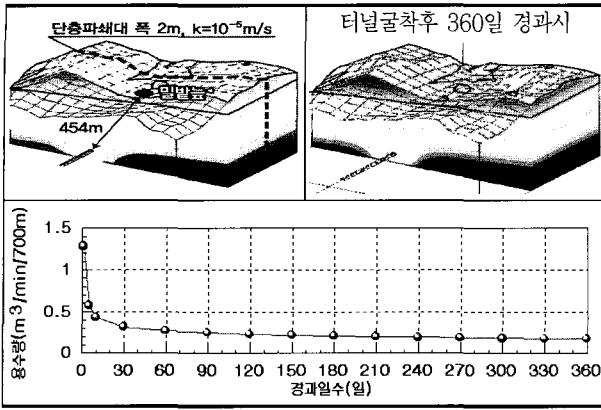


그림 5. 습지영향의 단계적 분석



- 습지 하부구간은 포화·불포화 메커니즘 모델링
- 터널천단부와 습지 최단거리 약 454m
- 터널 상부 단층파쇄대 폭 2m, 투수계수 10^{-5} m/sec 존재
- 터널굴착시 시간에 따른 지하수위 저하량을 검토
- 터널 상부에서 233m까지 영향범위로 나타남(굴착후)
- 터널굴착후 습지수위 변화는 0m→영향 없음
- 터널내 용수량은 180일 이후 0.2m³/min/700m로 수렴

경과일수(일)	5	30	90	180	270	360
습지수위 저하량(cm)	0	0	0	0	0	0

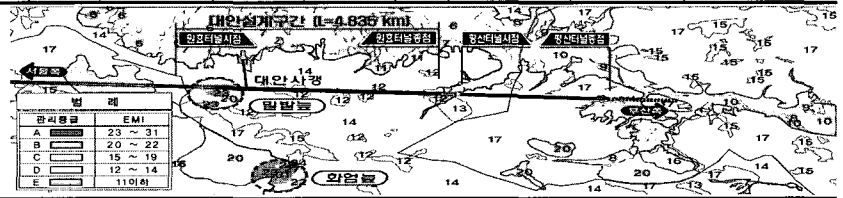
· 360일 경과후에도 지하수위 변화는 없으므로 밀밭늪의 터널굴착 영향은 없는 것으로 판단됨

그림 6. 밀밭늪의 습지수위변화상태 분석결과

표 7. EMI를 통한 관리구간현황

EMI 등급	대기질(μg/m ³ , ppm)				소음(dB(A))		진동(dB(V))		수 질(mg/ℓ)				EMI 등급점수	구분	
	PM-10	SO ₂	NO ₂	CO	주	야	주	야	pH	COD	DO	TN			TP
A	75	0.01	0.02	8	50	40	55	55	6.5 ~ 8.5	< 3	> 7.5	1.5	0.05 이하	23 ~ 31	집중관리구간
B	100	0.02	0.03	15	55	45	60	55		< 3	> 7.5	1.5	0.05 이하	20 ~ 22	관리구간
C	125	0.03	0.05	20	55	50	65	60	6.0 ~ 8.5	< 6	> 5	3.0	0.10 이하	15 ~ 19	관리후보구간
D	150	0.05	0.08	25	60	50	65	60		< 8	> 5	3.0	0.10 이하	12 ~ 14	예비구간

- 녹지자연도, 생태자연도, 환경자연도를 종합, EMI 작성을 통한 집중관리구간 선정
- 가중치 적용은 주요인자별 중요도를 감안하여 환경자연도(x3), 녹지자연도(x1), 생태자연도(x2)를 적용



약 1~2m로 이루어진 것을 확인하였으며 지하수위를 갈수기인 2002년 11월부터 2003년 1월동안 3개월간에 걸쳐 모니터링한 결과 최대 지표면으로부터 -80cm 강하하는 것을 관찰하였다.

습지에 대한 투수시험(변수위) 결과 $1.33 \sim 1.34 \times 10^{-5}$ cm/sec로 나타나 1.3×10^{-5} cm/sec로 적용하고 분석을 실시하였다.

5.2 터널통과에 따른 습지의 단계별 분석

터널건설로 인한 습지의 영향 분석을 위해 우선 이번 공사와 유사한 시공사례를 분석하여 대응 예를 살펴보고 습지에서 가장 중요한 지표수의 거동에 관해 철저한 조사와 분석을 시행하였다. <그림 5>와 같은 방법으로 정밀한 습지영향을 분석하고 이에 대한 대응책을 강구하였다.

우선 본 공사와 유사한 사례를 조사한 결과 국내에서의 제석산 석유비축기지, 일본에서의 오키야마현 토사카 터널과 후쿠시마현 요코도 터널이 관계가 있었으며 그중 요코도 터널이 본 터널과 유사한 것으로 조사되어 본 과업에서 변형적용 하였으며¹⁾, 분석 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

가. 불연속면 특성을 고려한 이방성투수계수를 산정하여 수행된 파쇄대를 고려한 Parameter Study 및 연속체 해석(MODFLOW)결과 파쇄대폭을 20m로 하고 투수계수를

10^{-4} cm/sec로 가정하였을 때 지하수위 저하량은 최대 65m가 저하되는 것으로 평가됨.

나. 이에 대한 대책방안으로 Pilot 터널 및 그라우팅방안을 수립하였으며 최종 검토결과 암반수의 변화는 12m, 습지수위 변화는 없는 것으로 평가되어 효율성을 검증하였음.

다. 이러한 결과는 어디까지나 전산시뮬레이션 결과이므로 시공 중에는 암반지하수위 및 습지지하수위 변화를 측정하기 위하여 수위관측정 및 기타 모니터링 항목을 설정하여 원활한 계획이 수행되도록 하기로 함.

<그림 6>은 터널직상부에 위치한 밀밭늪에 대한 습지수위 변화상태를 요약한 것으로 터널공사로 인한 수위변화 영향은 없는 것으로 조사되었다.

5.3 습지 및 생태계 보전대책

5.2절에서 분석한바와 같이 터널공사로 인한 습지의 영향은 거의 없는 것으로 확인되었으나 보다 확실한 습지보전을 위해 다음과 같은 대책을 수립하여 만반의 준비를 하였다.

가. 지하수위/수질/대기질/소음·진동 관리기준치 제시
나. Ecosystem Multiple Index(EMI)에 의한 집중관리구간

표 8. 고속철도 터널구조물 설계기준²⁾

적용설계 방법	철근 콘크리트 구조물	강도설계법
	강 구조물	허용응력설계법
	터널 슛크리트, 라이닝 콘크리트(무근)	허용응력설계법
항목	설계기준	적용
산악터널 라이닝 보강	· 터널 입출구부 150 m 구간 철근보강 · D13 단철근 적용	· 150 m 구간 철근보강 · D16, D19 복철근 차등 적용
터널 보조도상 콘크리트	· 인버트 없는 경우 : t = 25 cm, 와이어 메쉬 설치 · 개착부 : 와이어 메쉬 적용	· 설계기준 준수
라이닝 시공 조인트 개선	· 삼각형 형태의 시공이음부가 삼각형 중앙에 오도록 설치	· 설계기준 준수
시공·신축이음 설치기준	· 개착터널 신축이음 : 20 m 간격 · 갱구부 신축이음 : 20 m 간격	· 설계기준 준수 · 복합지수관 설치
터널 팽암거	· 인버트 없는 구간 : $\phi 200$ mm, THP유공관 · 인버트 설치 구간 : 인버트층 내부에 동일 직경	· 설계기준 준수
방수슈트	· NATM 구간 : ECB 슈트(t = 3 mm 이상)	· 설계기준 준수
종방향 배수관	· NATM 구간 : $\phi 150$ mm, THP 유공관	· NATM 구간 : $\phi 150$ mm HDPE관 적용

콘크리트 재료 사용기준	종류	설계기준강도 f_k (MPa)	적용
		2 중	24 이상
	일반 슛크리트	21 이상	여굴채움
	강섬유 보강 슛크리트	보강 슛크리트	본선터널, 사갱
		마감 슛크리트	사갱
	보조 도상	인버트 없는 경우	터널내 보조도상
		인버트 있는 경우	
		개착부	
	구조물 기초	10 이상	구조물 기초
	포장용	24 이상	사갱(유지보수용 포장)

선정

- 다. 주요 파쇄대 집중 위치 및 지하수 저하 가능 위치 선정
- 라. 시공중 조사계획 수립 → 파쇄대 및 집중응출 가능위치 예측
- 마. 최악의 시나리오를 가정한 영향 검토
- 바. 모니터링 시스템을 이용한 효율적이고 지속적인 유지관리 계획 수립

특히 지하수위에 대해서는 갈수기시 습지 장기수위 측정결과, 굴착에 의한 저하량은 없었으며 해의 시공사례 분석과 수치해석

시 습지수위 변화 등을 고려하여 관리기준치를 설정하여 GL-80 cm로 설정하였다. 또한 습지 및 주변자연지역 유지관리시 광범위한 지역에 대한 유지관리는 현실적으로 불가능하므로 습지를 포함하여 Ecosystem Multiple Index(EMI)를 도입하여 자연생태계 및 습지보전의 효율적 관리를 계획하였다. (<표 7> 참조)

시공 및 운영중의 대책으로서는 자동화계측시스템을 도입하여 효율적인 유지관리가 되도록 계획하였으며 임도의 개보수, 습지하류부 수위조절용 목책을 설치하고 목도를 설치하는 등 습지보전을 위해 많은 노력을 하였다.

6. 터널설계

6.1 설계기준

터널의 설계에 기본인 설계기준은 한국고속철도건설공단에서 정한 기준에 따라 <표 8>과 같이 적용하였다.

6.2 지반조사 결과 적용

6.2.1 본선 및 Pilot Site 암반분류

당초 실시설계시 구간별 암반등급 결정에는 국부적 지표면 탄성과 탐사와 종점부에 집중된 3공의 시추공만으로 원호터널 전구간 암반등급 결정하였던 것을 금회에는 미시추구간 지보등급 결

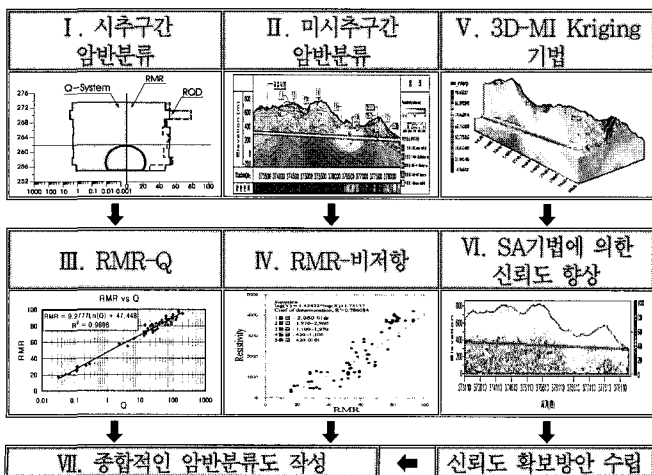


그림 7. 암반분류 흐름도

표 9. 암반분류결과

구분	RMR	Q-System	RMi
산정식	$\sigma_c + RQD + J_s + J_c + J_w + J_o$	$RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF$	$\sigma_c \times J_p$
범위	0 ~ 100	0.001 ~ 1,000	0.01 ~ 10
암반등급	Very Poor ~ Very Good	Exc. Poor ~ Exc. Good	Very High ~ Very Low
적용 예	<ul style="list-style-type: none"> · 지보하중 : $P = (100 - RMR)/100 \times V_b$ · 변형계수 : $E_m = 2 \times RMR - 100$ · 무지보 시간 	<ul style="list-style-type: none"> · 지보압 : $Proof = 2/J_r \times Q^{-1/3}$ · 무지보폭 계산 · Support Category 	<ul style="list-style-type: none"> · 터널지보량 평가 · Rock Burst 평가 · 암중간 지보체계의 유의성

※ σ_c : 단축압축강도, J_s : 불연속면 간격, J_c : 불연속면의 상태, J_o : 불연속면의 방향, J_n : 불연속면의 군수
 J_r : 불연속면의 거칠기, J_a : 불연속면의 변질정도, SRF : 응력감소계수, σ_c : 단축압축강도, V_b : 암괴의 크기

정을 위한 RMR과 물리탐사 결과간의 상관성 분석과 3D-MI Kriging 및 SA기법을 통한 암반등급 신뢰도의 향상을 꾀하였고 암반등급 산정기준에 있어서도 RMR 지반 등급에 의존한 암반 분류를 실시하던 것을 RMR과 Q-system에 의한 암반분류를 상호 비교하고 시추공별 RMi 산정 후 지보량 적정성을 평가하였다. 그 결과 I등급 비율이 95% 이상이던 것을 76%로, II등급 비율이 2%이던 것을 15%로 적용하여 터널공사의 안전성을 향상시켰다. (〈그림 7〉 참조)

또한 암반이 갖는 다양한 성질을 공학적 특성별로 구분하여 설계에 적용 가능한 등급을 제시하고자 시추조사 구간에서는 RQD, RMR, Q-System 및 RMi에 의한 암반분류를 실시하였고 미시추 구간에서는 암반분류 기준에 입각한 물리탐사(전자탐사, 전기비저항탐사, 탄성파토모그래피)결과와 암반분류(RMR, Q, RMi)의 상관관계를 통해 터널 전구간에 대해 정량적인 암반분류를 시행하였다. 또한 시추 및 물리탐사 자료를 이용한 3D Multiple Indicator Kriging(3D-MIKriging) 및 Simulated Annealing (SA)의 지구통계기법에 의한 암반등급을 검증하여 암반분류에

신뢰성을 확보하였다.

터널공사에서 가장 널리 쓰이고 있는 RMR, Q-System 및 RMi에 의한 암반분류 실시결과 (표 9)와 같다.^{3,4)}

본 지역은 종교계 및 환경단체 민원, 관련기관 인·허가 불허 등으로 시추 불가능 구간이 발생하였으나 본선구간 계획공 23공 중 10공(본선 7공, 사갱 3공) 실시하고 Pilot Site 운영(시추 5공)으로 미시추 한계성을 극복하였다.

RMR-Q 분류, RMR-RMi, RMR-비저항, RMR-VP간의 상관성 분석으로 암반등급별 분류기준을 마련한 결과는 (표 10)과 같고 과업구간에 대한 암반등급 산정기준은 (표 11)와 같다.

6.2.2 3D-MI Kriging 및 SA에 의한 암반분류

민원 및 산악지형 등으로 인해 시추 불가능 지역이 발생함에 따라 지구통계학(Geostatistics) 기법들 중 3D-MI Kriging 및 SA를 통해 물리탐사, 시추조사 자료를 활용하여 미시추구간에 대한 합리적인 암반등급을 산정하고자 하였다.

MI Kriging 기법은 각종 물리탐사 결과를 입력치로 활용, 미

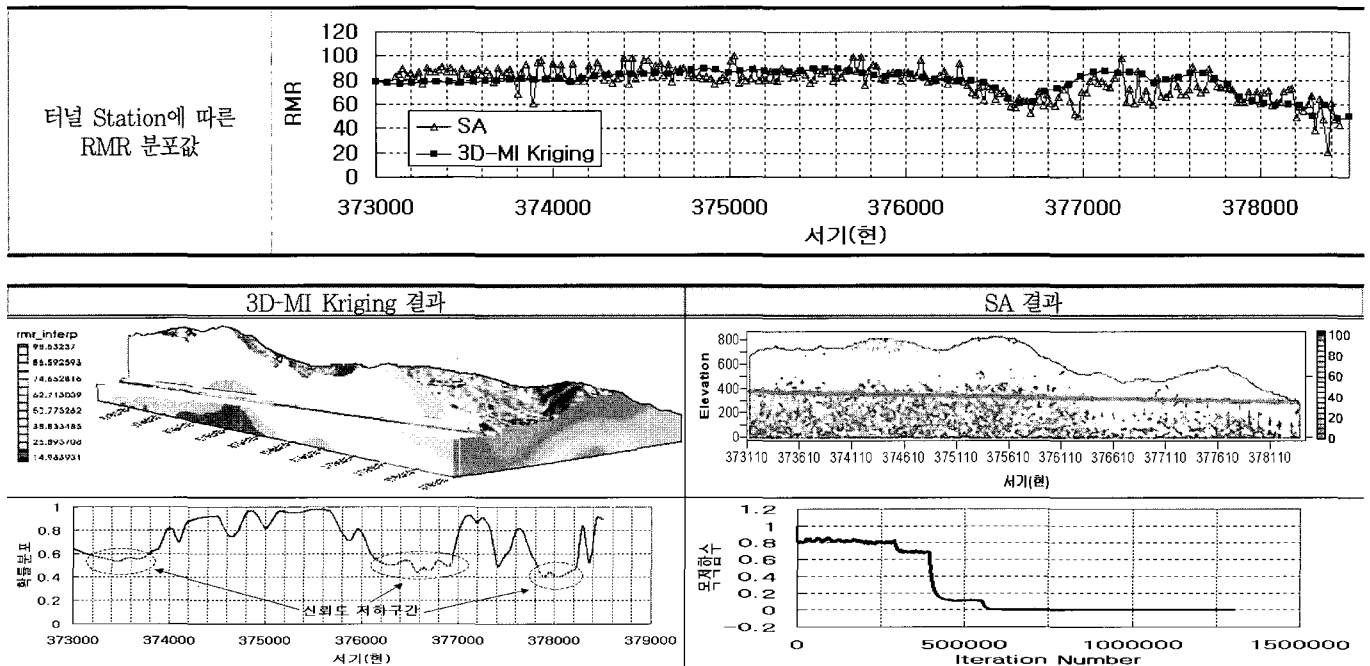


그림 8. 터널구간 암반등급

표 10. 암반등급별 상관성 분석결과

구분	RMR - Q	RMR - R _{Mi}	검토결과
시추 구간			<ul style="list-style-type: none"> RMR과 Q의 상관성 분석결과 $R^2 = 0.9698$로 높은 선형적인 상관관계를 보임($RMR = 9.2777 \ln(Q) + 47.448$) RMR과 R_{Mi}의 상관성 분석결과 $R^2 = 0.9555$의 높은 로그함수적인 비례관계를 보임($RMR = 9.7563 \ln(R_{Mi}) + 49.5$)
미시추 구간			<ul style="list-style-type: none"> RMR과 전기비저항과의 상관성 분석결과 $R^2 = 0.7266$의 상관관계를 보임 (비저항 = $122.71 e^{0.0373 RMR}$) RMR과 Vp와의 상관성 분석결과 $R^2 = 0.7681$의 상관관계를 보임 ($Vp = 47.621 RMR + 479.68$)

표 11. 과업구간 암반등급 산정기준

암반등급	I	II	III	IV	V
지반평가	매우 양호	양호	보통	불량	매우 불량
RMR	81 이상	61 ~ 80	41 ~ 60	21 ~ 40	20 이하
Q-System	40 이상	10 ~ 40	1 ~ 10	0.1 ~ 1	0.1 이하
R _{Mi}	25 이상	5 ~ 25	0.5 ~ 5	0.1 ~ 0.5	0.1 이하
전기비저항($\Omega \cdot m$)	3,881 이상	1,578 ~ 3,881	641 ~ 1,578	260 ~ 641	260 이하
탄성파속도(m/sec)	4,290 이상	2,860 ~ 4,290	2,000 ~ 2,860	570 ~ 2,000	570 이하

표 12. 연속체 적용 지반 설계정수

구분	I	II	III	IV	V
RMR	81 ~ 100	61 ~ 80	41 ~ 60	21 ~ 40	20 이하
Q	40 이상	10 ~ 40	1 ~ 10	0.1 ~ 1	0.1 이하
변형계수 $E_m(\times 106 \text{ tf/m}^2)$	4.24	2.78	1.41	0.19	0.08
점착력 $C(\text{tf/m}^2)$	1,320	950	710	370	90
마찰각 $\phi(^{\circ})$	49	45	41	35	32

시추구간의 암반등급을 정량화하는데 추정과정에서 사후누적확률 분포의 형태로 결과를 표현하므로 암반등급추정 신뢰도를 얻을 수 있다.⁵⁾

SA기법은 주로 광역최적화기법에 사용하며 동일한 시물레이션 조건하에서도 확률적으로 등가인 다른 결과를 나타낸다. 즉 3회의 시물레이션을 실시하여 추정값의 불확실성을 예측하는 것이다. 이 방법은 값의 교란을 통해 목적함수값을 재계산하여 목적

함수가 최소화되는 값을 찾아낸다.

3D-MI Kriging값으로 산정한 RMR 값은 최대 신뢰수준이 1로서, 0.5 이하는 신뢰도 저하구간으로 기각하였고 373 km 600, 376 km 600, 378 km 000 부근에서 0.5 이하의 확률분포를 보이고 있어 SA기법을 통한 3회 해석결과 목적함수는 Iteration 횟수가 증가하면서 0에 근접하여 SA에 의한 RMR 값은 모두 신뢰할 수 있음을 알 수 있었다(그림 8). 따라서 SA 및 3D-MI Kriging, 시추결과를 종합 비교·평가하여 최종적으로 구간별 RMR 값을 산정하였다.

6.2.3 구간별 암반등급 결정

본 터널 노선에 대한 구간별 암반등급 및 지보패턴 분류내용을 단면도에서 보면 (그림 9)와 같다.

6.2.4 터널구간 설계정수 산정

과업구간 연속체 지반정수 산정시 등급별 산정치를 적용하여 인접지역 적용물성치 범위내로 평가한 결과는 (표 12)와 같으며

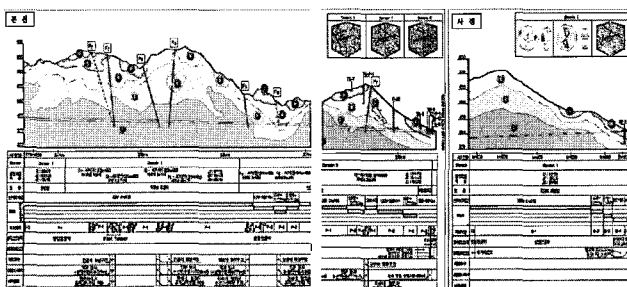


그림 9. 구간별 암반등급 및 지보패턴 분류

이를 설계에 반영하였다.

불연속체 적용 지반의 설계정수는 잔류마찰각 : 31.7 ~ 32.4°, 접착력 : 9.2 ~ 13.7 kgf/cm², 수직강성 : 224 ~ 333 kgf/cm²/mm, 전단강성 : 19.1 ~ 32.2 kgf/cm²/mm, JRC : 7 ~ 11, JCS : 864 ~ 955 kgf/cm²를 설계에 반영하였다.

암반등급과 투수계수 상관성 분석을 통한 암반등급별 투수계수 선정은 <표 13>과 같이 적용하였다. 지중응력과 축압계수 평가 결과는 <표 14>와 같다.

6.3 터널설계

본 터널은 고속열차의 최고설계속도를 350 km/h, 최고운행속도 300 km/h 를 적용하였고 궤도, 전기, 신호, 방재시설 등과의 인터페이스사항을 검토확인하면서 공기압검토 및 미기압파에 대한 안정성을 검토하였다.

또한 습지보전지역을 고려한 Pilot 터널 단면을 추가 적용하여 습지보전지역 통과시 Pilot 터널 굴착을 통해 전방 지질에 대한 사전조사 및 지하수 유출시 차수그라우팅을 수행하도록 하였으며 중점갱구부의 풍화암 지반은 인버트 단면을 적용하였다.

굴착단면은 3심원형과 동심원형을 검토하였으나 동심원의 경우 하부 배수구 구간의 라이닝 두께가 28 cm로써 라이닝 두께가 설계기준 40 cm에 미치지 못하므로 3심원형으로 적용하였다.

그리고 터널내의 측벽배수관 검토결과 clogging으로 인한 배수 지체시 라이닝에 잔류수압이 발생할 수 있으므로 통수능력이 탁월하며 내구성이 우수한 HDPE 유공관 적용하였으며 유공관 사용시 동심원 단면은 배수관 설치부 라이닝 순수두께가 설계두께인 40 cm보다 작으므로 구조적 취약부로 작용하여 균열 발생

가능성이 있으므로 원안단면을 그대로 적용하였다.

6.4 터널 안정을 위한 보조공법

지반상태, 용출수 등의 조건에 따라 보강 및 차수용으로 보조공법을 차등 적용하였고 정밀조사를 통한 적용구간 및 예상구간 선정으로 정확도를 확보하였다.

적용 보조공법으로는 막장 천단부 안정화 공법으로서 포어폴링, 대구경 강관다단 그라우팅공법이 있고 차수공법으로는 TAS 그라우팅 공법이 있다.

포어폴링은 천단부의 안정성 확보를 위해 천단부 120° 구간에 설치하며 L = 4 m, 강관 ϕ 38 mm를 사용하였다. 대구경 강관다단 그라우팅공법은 이중관 방식으로 천공과 동시에 강관 설치후 주입재를 주입하는 방법으로 천단부 120° ~ 180° 구간에 설치하고 L = 12 m, 강관 ϕ 114 mm를 사용하였다.

차수공법인 TAS 그라우팅 공법은 Gel time이 짧아 공기면에서 유리하고 공극 또는 균열로의 침투효과가 양호하며 터널 굴착과 연계하여 시공이 가능할 뿐만 아니라 어독성 시험에 의해 규명된 환경친화적 재료를 사용하여 친환경적인 공법이므로⁶⁾ 용출수가 예상되는 지점의 30 m 전방에서 50 m 구간에 대한 선진시추를 시행, 감지공을 설치 한 후 누수량이 0.3 l/min/m 이상일 때 MSG 등의 시멘트 계열 그라우팅을 시행하는 것으로 하였다.

6.5 공기압 검토

고속으로 운행하는 열차가 터널 진입시 생성된 압축파가 터널 출구에서 방출시 발생하는 충격성 소음인 미기압파(Micro

표 13. 암반등급별 투수계수

암반등급	RMR	투수계수(cm/sec)	RMR-투수계수 상관성분석
I 등급	81 ~ 100	8.80×10^{-7}	
II 등급	61 ~ 80	9.91×10^{-7}	
III 등급	41 ~ 60	3.95×10^{-6}	
IV 등급	21 ~ 40	2.05×10^{-5}	
V 등급	0 ~ 20	1.33×10^{-4}	

표 14. 지중응력 및 축압계수

구분	수압과채시험	AE/DRA	최대주응력 작용방향
시험 결과			
평가	<ul style="list-style-type: none"> 터널축방향 축압계수 : 2.0 터널단면방향 축압계수 : 2.8 	<ul style="list-style-type: none"> 화강암층 : 1.68 ~ 1.89 안산암층 : 2.22 ~ 2.31 	<ul style="list-style-type: none"> 최대주응력은 터널방향과 69°로 교차하는 N72E 방향

표 15. 미기압파 검토기준

항목	적용값
출구 미기압파	20 Pa
측정지점	터널출구면에서 20m 거리
측정높이	지면으로부터 1.2m
소음도	120 dB
적용근거	일본 신간선 기준

Pressure Wave)가 발생하게 된다. 따라서 이에 대한 검토가 필요하였고 또한 고속열차가 단독 및 교행 할 때 발생하는 열차 내부의 이명감을 해석하였다. 압축파는 터널 전 연장에 대하여 영향을 미치므로, 원효터널 전 구간에 대해 검토를 수행하였다.

6.5.1 미기압 검토

국내 차량 도입선인 프랑스는 노선이 대부분 평지이고 도심근처의 터널에서 약 220 km/hr로 운행속도를 낮추어 주행함으로써 미기압과 발생을 차단하고 독일은 일본의 터널단면적보다 큰 단면에서 270 km/hr로 운행하므로 터널 미기압파의 심각성이 보고된 바 없으므로 <표 15>과 같이 가장 엄격한 기준인 일본신간선 기준을 적용하였다.⁷⁾

통상 미기압은 출구 및 입구형상이 모두 영향을 미치게 되며 입출구부 모두 표준갱문(45°)대비 갱문경사각을 30°, 40°, 45°, 50°, 60°로 변화시키면서 검토하였다.

터널출구로부터 20 m 지점의 미기압파의 크기는 갱문각도 30° 일때 10.88 Pa, 45°(표준갱문)일 경우 9.52 Pa, 60° 경우 12.73 Pa로서 검토안 중 45°(표준갱문)일 경우가 가장 우수하였다(<그림 10> 참조). 방음벽 설치시 8.60 Pa로 감소(허용기준 20 Pa 만족)하므로 갱문에 방음벽을 추가 설치하였다. 이로써 출구부 미기압파로 인한 소음발생문제가 없도록 조치하였다.

6.5.2 승객 이명감 발생 검토

터널내 열차가 고속으로 진입, 주행시 터널외부와 내부의 기압 차로 인해 급격한 압력변동이 발생하게 되며 이는 열차내에 탑승한 승객들에게 이명감(귀울림)을 유발하여 불쾌감을 초래하므로 원효터널에 대한 이명감의 발생여부를 검토하였다.

승객 이명감의 검토기준은 <표 16>과 같이 선정하였다. 검토 결과 <표 17>, <그림 11>에서 보듯이 후미객차에서 (-)압이 가장 크게 작용하고 열차속도 300 km/hr일때 단독주행시 허용치 대비 80.19%, 교차주행시 허용치 대비 96.92%로써 이명감에

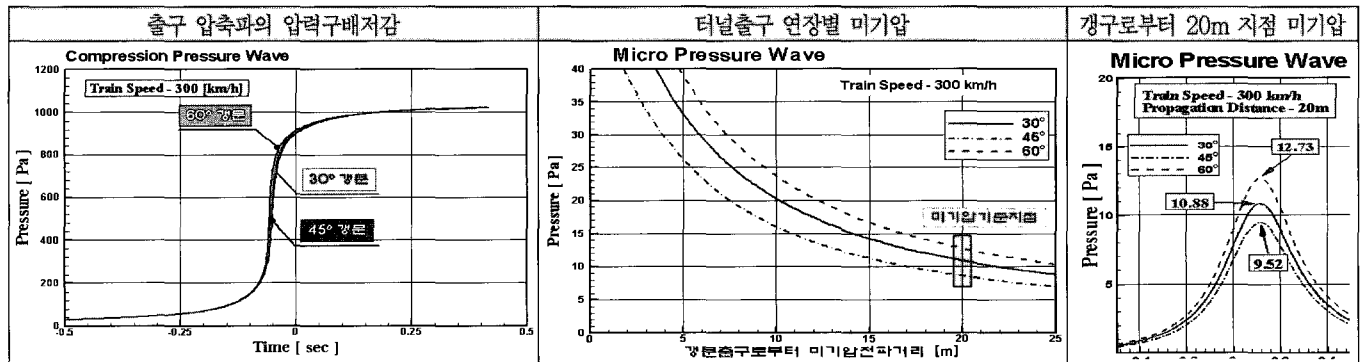


그림 10. 미기압 검토결과

표 16. 승객 이명감 검토기준

기준	특징	검토 기준	선정 사유
경부 고속철도 기준	· 차량 출고 인도시 시험조건 (차량기밀도 z = 11 sec 인 경우에 해당)	A. $ \Delta P \leq 2000$ Pa B. $\frac{dP}{dt} \leq 200$ Pa/sec C. $ \Delta P + 5 \times \left \frac{dP}{dt} \right \leq 2,000$: 터널연장 5 km 미만 $ \Delta P + 5 \times \left \frac{dP}{dt} \right \leq 2,500$: 터널연장 5 km 이상	· 경부고속철도, (사)대한터널협회, 일본, 이탈리아 및 프랑스 SNCF 중 가장 엄격한 경부고속철도 기준을 적용

표 17. 단독 및 교차주행시 압력 변동치

구분	적용값	단독 후미 객차			교행 후미 객차			기준만족여부	
		최소	최대	기준치대비(%)	최소	최대	기준치대비(%)	단독	교행
i	$\leq 2,000$ Pa	-1,596.37	7.42	80.19%	-1,931.06	7.42	96.92%	○	○
ii	≤ 200 Pa/sec	-42.34	50.33	46.34%	-63.45	53.80	58.63%	○	○
iii	$\leq 2,500$ Pa	1,855.44		74.22%	2,255.73		90.23%	○	○

대해서 안전한 것으로 나타났다.

6.5.3 터널내 열차교행시 압력변동 검토

터널내 공기압 분포 및 터널라이닝부에 작용하는 풍하중을 예측하여 구조물 설계시 반영하고자 하였다. 해석 코드로서 FLUENT Ver 6.0을 이용한 3차원 전산유체역학(CFD)시뮬레이션을 적용하였고 해석방법으로서 이동격자(Moving Mesh)기법을 이용한 열차이동/압축성유동/표준 k-ε모델 적용하였다.

공기압 검토결과 열차 교행시 선두부에서 최대 350 Pa의 압력이 발생하는 것으로 나타났으며 열차 선두가 교차할 때 비하여 후미객차가 교차할 때 압력변동은 상대적으로 큰 것으로 확인되었다. 또한 열차 교행시 터널라이닝부에 미치는 압력은 1,324 Pa로 독일 DB 기준치(± 4,000 Pa 이하)를 만족하나 터널라이닝 구조 검토시 이를 반영하였다.

7. 결 언

본 원호터널의 설계는 특별히 설계조건이 복잡하거나 지반조건이 나쁜 사례는 아니지만 환경단체와 불교계가 터널관통에 반대하고 습지의 보전에 대해 국민의 이목이 집중되었던 터라 이에 대한 공학적인 관점에서 대응함으로써 보다 정밀하고 안전한 공사가 될 수 있도록 설계하여야 하는 것이 다른 산악터널과 다른 점이라고 하겠다. 다만 고속철도터널이 갖는 공기역학문제라던가 개문의 설계지의 생성원인과 보존 등 특수한 것은 관심을 가질만

한 점이라 생각된다. 앞으로도 우리 토목인은 자연환경보존과 국민의 삶의 질 향상에 따른 민원발생의 예방에 힘써 건설사업의 순조로운 진행은 물론 전문성이 부족한 일반국민들로부터 지탄받는 일이 발생하지 않도록 민·관·학계가 협심하여 노력해야 할 것으로 생각한다. □

참고문헌

1. 福島縣縣北建設事務所, "國道115號 第983100058號 地質調査委託(國道改築) 報告書," 1999. 3.
2. 한국고속철도건설공단, "고속철도 터널설계기준," 1997.
3. (사)대한터널협회, "터널설계기준 부록 1", 1999.
4. Palmström A., "Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing." Proc. Int. Symp. Fundamentals of Rock Joints, Björkliden, Sweden, 1985, pp.103~110.
5. 배기훈, "암반터널설계를 위한 지층분포의 3차원 모델링과 3D Kriging 기법을 이용한 암반등급분포의 지구통계학적 처리방안 연구", 한국지반공학회 봄학술발표회, 2002, pp.245~252.
6. 백정식 외, "TAS공법의 특징과 지반환경", 한국지반공학회지 Vol.18, No.3, 2002, 3호, pp.8~17.
7. Satoru Ozawa, "Study of Micro-pressure Wave radiated from a tunnel exit", 일본국유철도 철도기술연구소, Railway Technical Research Report, 1979.
8. "경부고속철도 부산·경남권 건설사업 환경영향평가 최종보고서", 동아대학교 환경문제연구소, 1993, pp.160~228.

학회지 광고 안내

- 발생시기 : 격월간(홀수달 31일 발행)
- 배부기관 : 학회 정회원, 특별회원, 도서관회원 및 기타 관련기관

- * 본 학회의 회원사 또는 1년(6회) 게재하는 광고는 상기 광고 게재료의 10%를 할인해 드립니다.
- * 자세한 문의사항은 학회로 연락주시기 바랍니다.(Tel.02-568-5985~7)

지면	1회 광고료
표2	80만원
표3	70만원
표4	100만원
간지	70만원
내지	50만원
박스광고	30만원