

OO 사찰 하부 터널통과 설계 사례

A Case Study on the Design of Railway Tunnel through section for under OO temple

김 신¹⁾, Shin Kim, 이성기²⁾, Sung-Ki Lee, 서형철³⁾, Hyoung-Chul Seo,곽정열⁴⁾, Jung-Yeol Kwag, 조봉식⁵⁾, Bong-Sik Cho

¹⁾ (주)테조엔지니어링 상무, Executive Directive, Teso Engineering Co. (e-mail:rlatls2@paran.com)

²⁾ (주)테조엔지니어링 부사장, Vice President, Teso Engineering Co.

³⁾ (주)테조엔지니어링 부장, Principal Engineer, Teso Engineering Co.

⁴⁾ (주)테조엔지니어링 대리, Lead Engineer, Teso Engineering Co.

⁵⁾ (주)SK건설 부장, Principal Director, SK Engineering & Construction Co. Ltd..

SYNOPSIS : It is very important to evaluate predictable problems diversely such as stability of a tunnel and structures when tunnel is inevitably constructed in the area where is adjacent to a structure and low overburden. Double electrified railway design on the third section of Donghae-Nambu line studied in this paper has some problems mentioned above. So more careful works are required before construction.

In this study, ground surrounding is composed of faults, fault zone and set back about 13m from a Buddhist temple located on the upper part of the tunnel. From these conditions, this case study presents proper methods considering ground condition, effects of blasting and civil petitions. It is tried to make the tunnel and Buddhist temple stable by analytical technique and analysis of existing cases. And design considering stability of tunnel and adjacent structure during operation is carried out as well. Especially, environmentally friendly railway tunnel which is appropriate to the local condition and surroundings is designed by minimizing noise and vibration that is able to occur during construction and train service. From now on, this study is helpful to better design in the case of tunnel design which has to consider civil petition.

Key words : Adjacent construction, Analysis of existing cases, Analytical technique, Civil petition, Tunnel design

1. 서 론

동해남부선 부산~울산 복선전철 건설공사는 부산권 광역전철망의 수송능력을 증가시키고 더불어 지역주민들의 교통편의를 제공하며 더 나아가 국토의 균형적인 발전에 기여하고 지역사회 개발을 위하여 계획되었다. 본 설계사례 구간인 3공구에서는 공사 중 및 열차 운행 중 소음·진동 발생을 최소화하여 민원을 대비한 환경대책을 수립하고 지역여건과 주변 환경에 어울리는 환경 친화적 철도터널을 건설하고자 하였다. 특히 송정터널구간 직상부에 위치한 해광사(사찰, 이후 사찰 혹은 해광사로 표기)에 대한 민원을 사전에 방지하고자 이에 대하여 합리적이고 경제적인 통과방안을 수립하였다. 따라서 본 설계사례에서는 사찰 하부 통과시 터널굴착 및 보조공법, 사찰건물의 안정공법, 운영 중 열차진동 및 소음에 대한 영향검

토 등 안정성 확보 방안을 제시하고자 한다.

2. 현황 및 설계 개요

동해남부선 부산~울산 복선전철 제3공구 과업구간은 부산광역시 해운대구 우동에서 기장군 기장을 일원까지 연결되는 철도노선으로 총연장 7.754km이며, 터널 2개소(L=3,298m), 교량 4개소(L=2,270m), 정거장 2개소로 구성되어 있다. 본 설계사례 구간인 송정터널의 사찰 하부 통과지역 현황은 <그림 1, 2>와 같이 우측으로는 6차로의 해운대 우회도로가 지나고 있으며 좌측으로는 부산~울산간 고속도로가 마무리단계 공사 중에 있다. 또한 해운대 우회도로와 본 과업노선 사이에는 우회도로 건설로 인한 비탈면이 형성되어 있다. 사찰은 터널 천단부터 수직으로 13m 이격되어 있으며 그 규모는 단층건물 3개동(대웅전과 요사채 2개동)으로 이루어져 있고 요사채 앞마당에 심도 80m의 관정을 두고 있다.

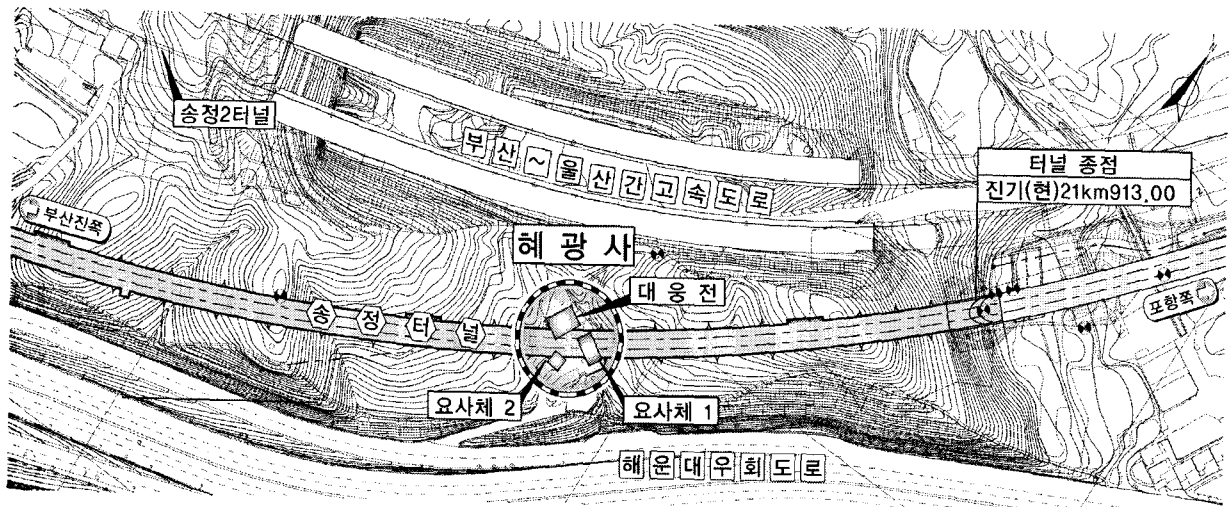
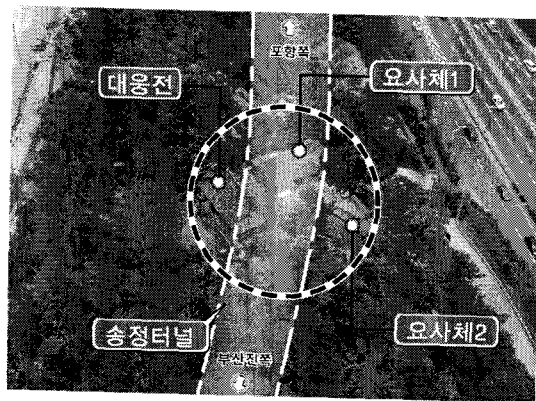
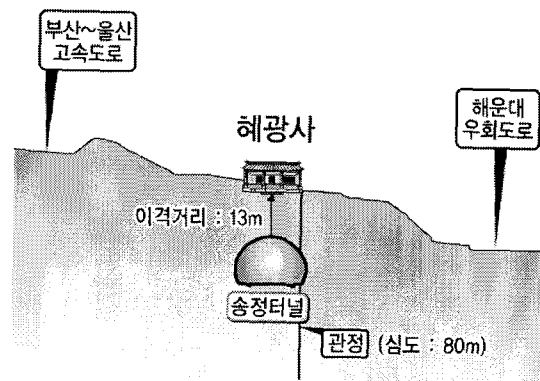


그림 1. 사찰구간 평면도



(a) 현황사진



(b) 횡단면도

그림 2. 현황사진 및 횡단면도

3. 지반분석

3.1 송정터널 구간의 지형 및 지질 분석

지표지질조사 결과 송정터널구간의 기반암은 상·하부 석영안산암 및 응회암류(Kdut, Kdlt)와 응회질 퇴적암류(Ksd)가 주류를 이루고 있다.

응회질 퇴적암류(Ksd)는 층리구조가 얇은 박층과 괴상의 형태이지만, 퇴적암의 특징상 이방성을 가지는 것으로 판단된다. 본 지역에서 가장 우세한 암종인 상부 석영안산암 및 응회암류(Kdut)는 화산 활동과 관련한 단층운동에 의해 전체적으로 단열 및 절리를 따라 열수의 유입이 용이하며, 일부 팽창성 점토광물이 생성되어 취약대를 형성하고 있다.

<그림 3>과 같이 인근 송정지역에 확인된 일광단층의 영향에 따라 파생된 소규모의 단층파쇄대가 송정터널과는 8조가 교차하고 있으며, 사찰 주변의 저토포 구간은 기반암의 분포심도가 깊고, 파쇄폭이 30~40m되는 F12-1, F12-2 단층파쇄대가 통과하여 대체로 불량한 암반층을 이루고 있다.

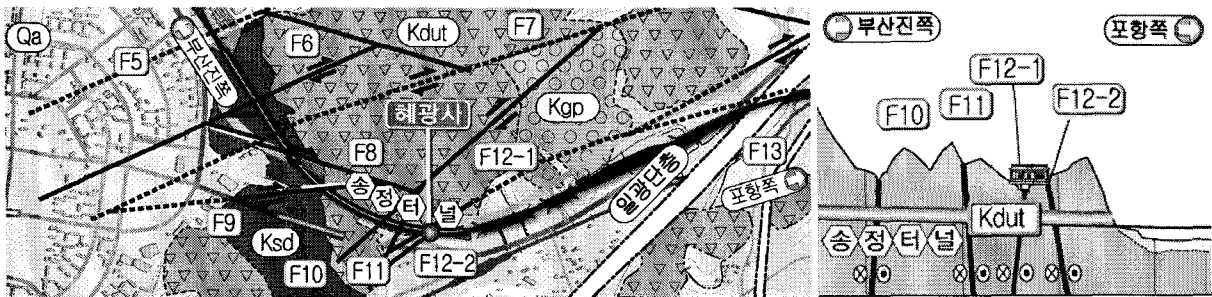


그림 3. 지질 종평면도

3.2 물리탐사 분석

그림 4의 전기비저항탐사 결과 해광사 구간은 F12-1, F12-2 단층파쇄대의 영향으로 보여지는 300ohm-m 이하의 전기비저항 이상대가 분포하며 풍화와 파쇄가 심할 것으로 예상된다. 또한 <그림 5>에서 알수 있듯이 터널 상부에 주변 탄성파속도보다 낮은 저속도대가 분포하는 것으로 조사되었으며, 전기비저항탐사결과와 일치하고 있다.

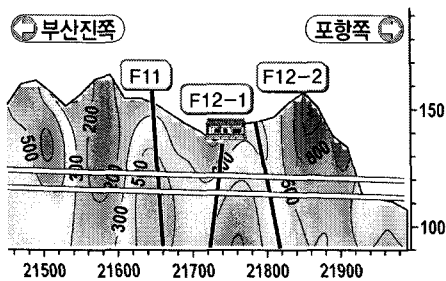


그림 4. 전기비저항탐사

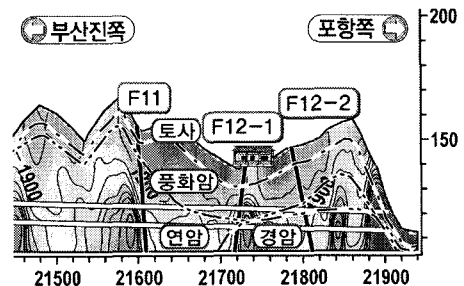


그림 5. 탄성파토포그래피

3.3 사찰구간 시추조사 분석

사찰 내에는 기존시추자료(TB-11)가 있어 인근에서 경사시추(ATB-2)를 실시하였다. 시추조사결과 시추심도 29.7m까지 풍화토 및 풍화암이 분포하였으며, 13.5m~34.0m까지 단층과쇄대의 시료가 검출되었는데 이는 F12-2 단층과 그에 따른 영향구간으로 보인다. 기존시추자료(TB-11)는 시추깊이 22.3m중 4.3~20.1m까지 풍화암이었으며 그 이하는 경암으로 나타났다.

표 1. 시추공을 통한 지층구분 및 지질특성

지층 구분	시추심도(m)		지질특성
	ATB-2	TB-11	
풍화토	0~4.0	0.2~4.3	실트질 모래
풍화암	4.0~29.7	4.3~20.1	석영안산암질 응회암
연 암	29.7 ~ 53.8	-	유문석영안산암질 래피리응회암
	53.8	-	석영안산암질응회암
경 암	53.8~	20.1~	석영안산암질 응회암

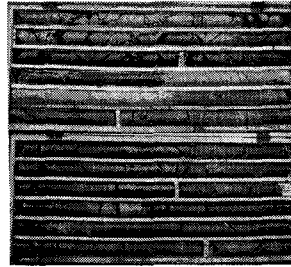


그림 6. 시추코어사진

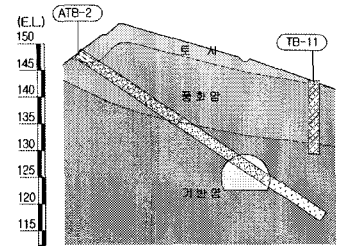


그림 7. 시추개요도

3.4 터널 안정성 해석을 위한 설계정수 선정

3.4.1 연속체해석을 위한 설계정수

본 지역의 석영안산암질 응회암에 대한 지반정수는 현장시험 및 실내시험 결과, 각종 경험식, 인근 공사현장 기존 조사자료 및 Hoek-Brown 파괴규준을 적용하여 추정된 현지암반 강도정수 등을 토대로 설계구조물의 안정적인 측면을 고려한 Bayesian 이론에 의한 통계처리기법을 적용하여 산출된 최후도값(Posterior)의 95% 신뢰수준에서 기존 설계자료를 참고하여 결정하였다.

표 2. 연속체해석을 위한 설계정수

구분	단위중량(kN/m ³)	점착력(kPa)	내부마찰각(°)	변형계수(MPa)	포아송비	비고	
기반암	III	26	900	40	5,000	0.25	본 사례에서 기반암 I, II 등급은 미적용
	IV	25	450	38	3,000	0.25	
	V	23	250	35	600	0.30	
풍화암	21.0	30.0	34.0	150	0.31		
풍화토	19.0	20.0	30.0	30.0	0.33		
붕적층	19.0	0.0	29.0	15.0	0.35		

3.4.2 지중응력해석 및 수리해석을 위한 설계정수

암반 내에 존재하고 있는 초기응력의 크기는 암종 및 지질학적 이력에 따라 지역별로 차이를 나타내므로 시추공을 이용한 수압과쇄시험 및 AE/DRA 시험 성과와 기존의 관련문헌, 경험식 등을 종합 분석하여 측압계수를 산정하였으며 인근 공사현장 조사자료와 금회 조사자료를 비교 분석한 결과 최대주응력 방향 및 측압계수가 모두 유사한 것으로 나타났다.

지층별 투수계수는 관련문헌을 참고하여 현장투수시험과 암반수압시험 결과의 평균치를 적용하였으며

수리특성은 암질이 양호할수록 대체로 작아지는 경향을 나타냈다.

표 3. 지중응력해석 및 수리해석을 위한 설계정수

구 분	축압계수	투수계수(cm/sec)		
		기반암	풍화암	풍화토
설계적용	1.5	9.0×10^{-5}	4.0×10^{-4}	6.5×10^{-4}

3.4.3 동적해석 설계정수

현장에서 수행한 하향식 탄성파탐사와 Suspension PS 검층 성과 중 분산도가 큰 값이나 과대평가된 결과는 배제한 후 실내시험 성과, 기존의 경험식 등을 종합 분석하여 동적특성치를 산정하였다.

표 4. 동적해석을 위한 설계정수

구 분	탄성파속도		동적 특성치				비 고	
	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	G_d (MPa)	E_d (MPa)	K_d (MPa)	v_d		
기 반 암	III	3,800	2,000	10,000	26,000	23,500	0.31	본 사례에서 기반암 I, II 등급은 미적용
	IV	3,600	1,900	9,000	24,000	22,000	0.33	
	V	3,400	1,650	7,000	19,000	19,300	0.35	
풍화암	2,400	1,100	2,800	8,000	9,000	0.36		
풍화토	1,700	760	1,150	3,200	4,500	0.38		
봉적층	490	200	77	210	350	0.40		

4. 터널 굴착 공법 선정

4.1 지반조건에 따른 굴착공법 검토

지표지질조사 결과 부산-울산 고속도로 절취사면에서 나타난 단층파쇄대 절리의 방향<그림 8참조>과 경사 시추(ATB-2)와 수직시추(TB-11)에서 나타난 지반정보에 따라 파쇄구간을 분석하여 해광사 하부의 지반을 구성해 보면 <그림 9>와 같이 F12-1의 단층파쇄대가 터널과 사교하며 통과하는 것으로 분석되었다. 그러므로 해광사 직하부의 암상태는 파쇄가 심한 단층파쇄대가 형성되었을 것으로 보여 21km700~750(L=50m)구간은 발파에 의한 굴착보다는 천단부를 보강하고 기계굴착공법을 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다.

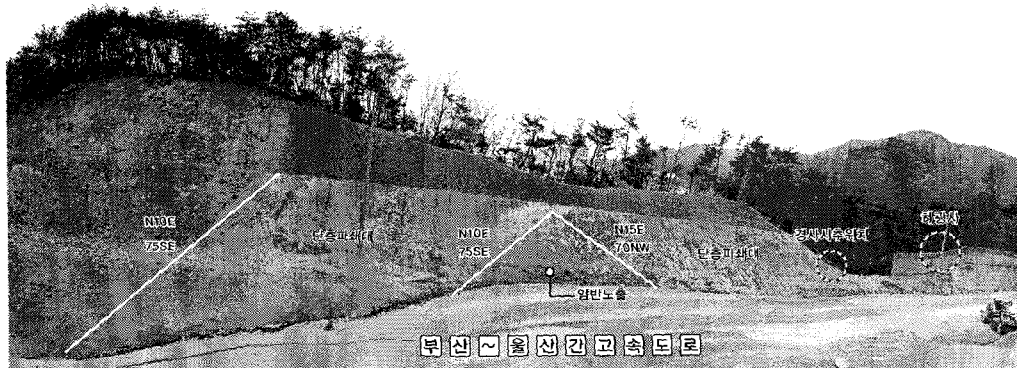


그림 8. 비탈면 현황사진

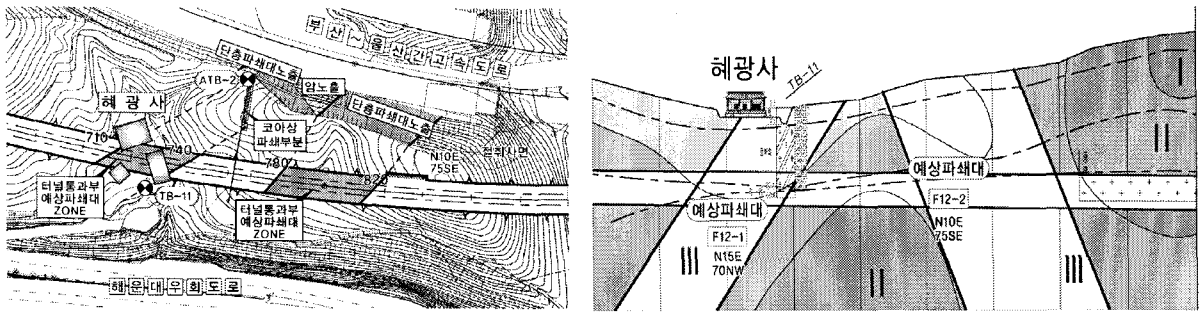


그림 9. 평면 및 단면도

4.2 발파영향에 따른 굴착공법 검토

터널의 발파가 사찰에 미치는 영향을 분석하기 위해 사찰인근의 시추공에서 시험발파를 실시하였다. 시험발파시 발파 진동 계측기로부터 획득된 진동 속도 데이터는 통계처리(최소자승법)를 통해 환산거리 및 진동발생 수준에 대한 상관관계를 유도하였으며, 단순회귀분석(수치해석)을 통하여 발파진동 상수(K, n)를 산출하여 <표 5>와 같은 발파진동 추정식을 유추하였다.

표 5. 발파진동 추정식

발파진동 추정식 (자승근)	$V_{(95\%)} = 181.19 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.65}$	발파진동 추정식 (삼승근)	$V_{(95\%)} = 121.54 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.63}$
-------------------	---	-------------------	--

해광사의 발파진동허용기준은 문화재급에 해당하는 0.2kine(서울시 지하철 건설 본부, 주택공사)으로 적용하여 이격거리별로 발파영향 검토를 한 결과, 해광사 하부 118m 구간은 허용기준치를 초과하여 발파가 불가한 것으로 나타났다.

따라서, 발파진동 허용기준을 만족하기 위한 굴착패턴은 <그림 10>의 B와 같이 사찰 직하부 118m 구간에 기계굴착을 적용하는 것이 타당하며, 기계굴착구간 전후로 조절발파를 통해 진동저감 굴착이 되도록 설계하였다. 또한 터널 및 사찰의 안정성 확보를 위한 지보패턴 적용을 세분화하여 <그림 10>의 A와 같이 설계하였다.

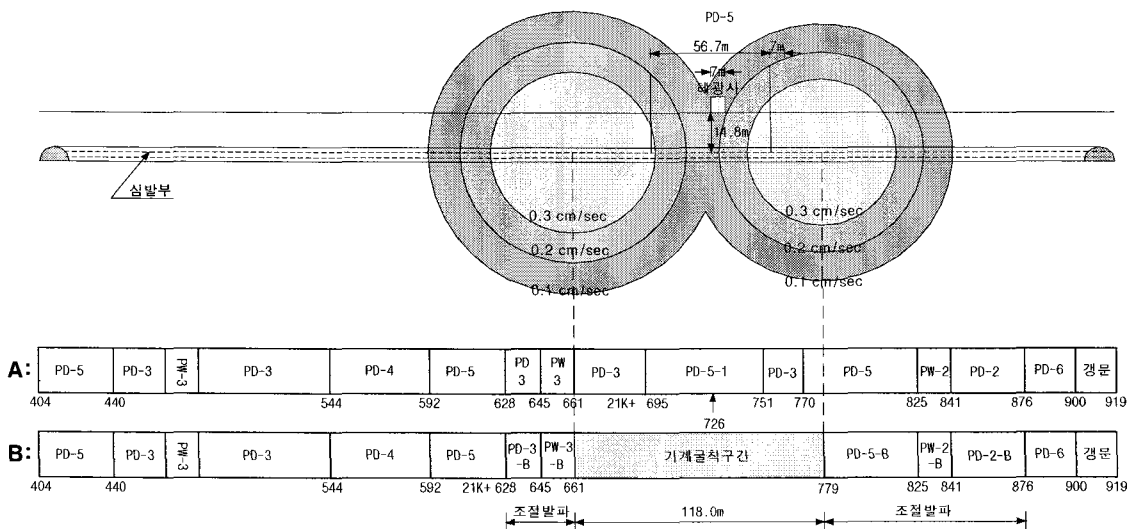


그림 10. 굴착 및 지보패턴

4.3 민원을 고려한 굴착공법 검토

사찰 통과구간의 굴착공법은 지반분석 및 발파영향 검토에 따라 사찰 직하부 구간은 무진동·무소음의 기계굴착공법을 적용하였으며, 인접한 구간도 조절발파 굴착패턴을 적용하여 통과할 수 있게 하였다. 그러나 터널천단부에서 이격거리가 13m인 저토포 구간의 터널 굴착에 따른 안정성과 노후화된 사찰, 그리고 지하관정에 대한 대책은 수립되어야 하므로 추가적인 검토가 필요하였다.

저토포구간에 따른 터널안정 대책으로는 <그림 11>과 같이 터널 천단부에 대구경강관보강그라우팅을 실시하여 지반보강을 실시하였으며, 상반 CD분할굴착을 적용하여 터널 및 지상건물의 안정성을 확보하였다.

사찰의 안정을 위한 대책으로는 터널 시공시 <그림 12>와 같이 공사 중 막장의 선행변위를 계측하고, 건물 경사계와 균열측정계와 같은 정밀 측정 장비를 이용하여 구조물의 안전에 문제가 발생하지 않도록 계측을 실시하도록 하였다. 계측결과 과도한 변위 발생시 사찰의 침하를 방지하기 위해 사찰 주변에 마이크로 파일 보강을 할 수 있도록 계획하였다.

또한, 사찰 직하부의 터널 통과로 심도 80m인 지하관정의 간섭이 확실하여 공사 전 사찰과 협의 후 심도 100m인 심정의 신설로 예상 민원을 해결하고자 하였다.

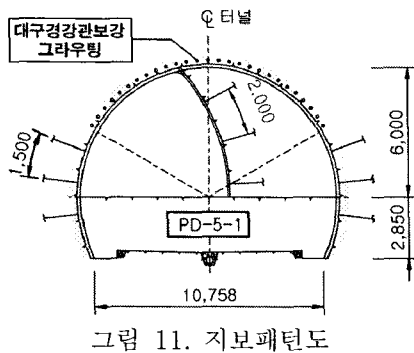


그림 11. 지보패턴도

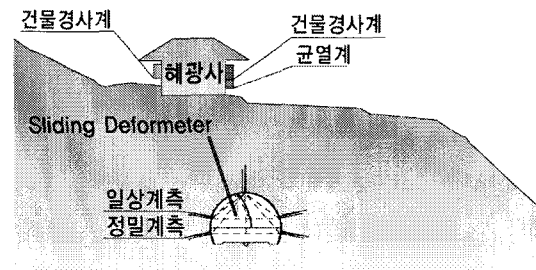
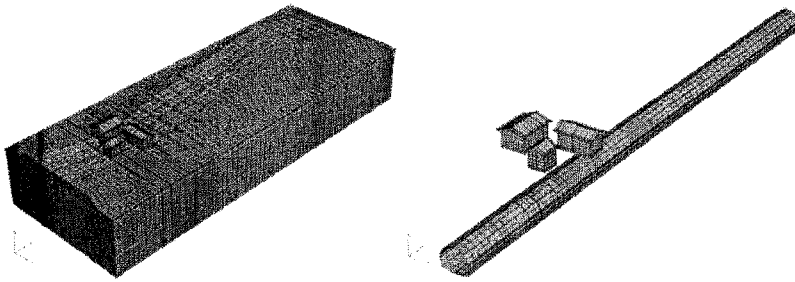


그림 12. 계측계획도

5. 터널 안정성 해석

5.1 터널 굴착에 따른 해광사 잠재적 손상 평가

터널 굴착에 의한 인접구조물의 잠재적 손상 평가에 관해 본 검토에서는 범용유한요소해석 프로그램 (ABAQUS)을 이용한 3차원 해석을 통하여 검토하였다. 손상에 대한 허용 기준은 구체적인 허용기준이 확립되어 있지 않으므로 과도한 허용치라는 평가도 있지만 민원에 대비한 설계라는 점을 감안하여 Sower(1962)의 허용침하량, Bjerrum(1963)의 허용각변위, Burland and Wroth(1974)의 허용수평변형률을 적용하였다. 또한 수평변형률과 각변위를 이용한 Boscardin & Cording 도표로 구조물의 손상정도를 평가하였다.



(a) 전체 (b) 신설터널 및 해광사
그림 13. 유한요소해석모델

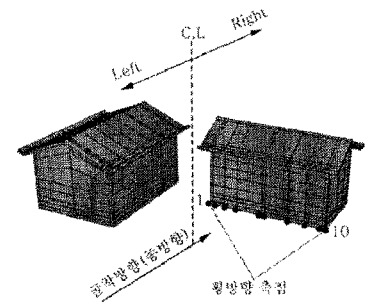
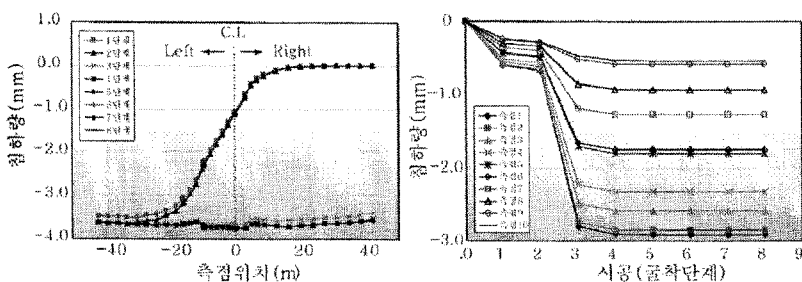


그림 14. 해광사 측점



(a) 중방향 침하 (b) 횡방향 침하

그림 15. 사찰구간 굴착단계별 침하량

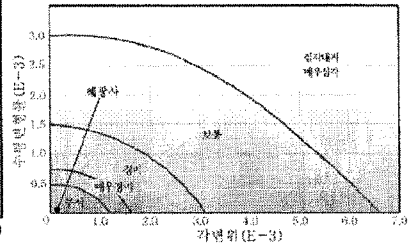


그림 16. 사찰의 Boscardin & Cording 도표

표 6. 해광사 손상평가

구분	최대침하량(mm)	최대부등침하량(mm)	각변위	수평변형률	평가
기준	25mm	0.002S (26)	1/800 (1.25E-3)	1/2000 (5.0E-4)	-
해광사	3.913	2.375	1.83E-4	8.9E-7	O.K.

주) S는 기둥 사이의 간격 또는 임의 두점 사이의 거리

해광사의 최대침하는 3.9mm, 최대응력은 1.087MPa로 허용치 이내로 나타났으며, Boscardin & Cording 도표에 의한 영향검토결과 손상등급 0(무시)으로 나타나, 터널굴착시공에 따른 해광사의 안전성에는 문제가 없는 것을 확인하였다.

5.2 사찰 직하부 통과구간 터널 안정성 해석

지반분석 결과 해광사 통과구간에서 단층대 및 파쇄대의 출현이 예상되었다. 따라서 대상구간에 대하여 시공과정을 모사한 3차원 해석을 수행하여 터널 안정성에 대한 검토를 하였으며, 해광사 하부에 대한 단층파쇄대 안정성 검토를 통하여 적용 지보패턴의 적정성을 검토하고 필요시 별도의 보강대책을 수립하였다.

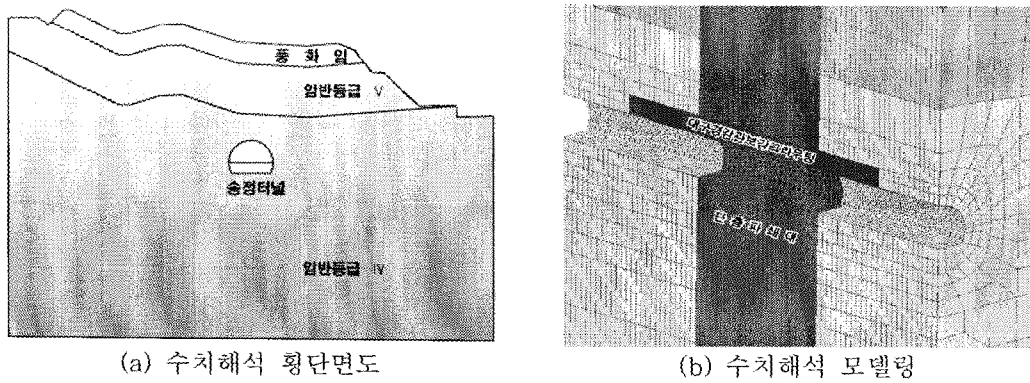


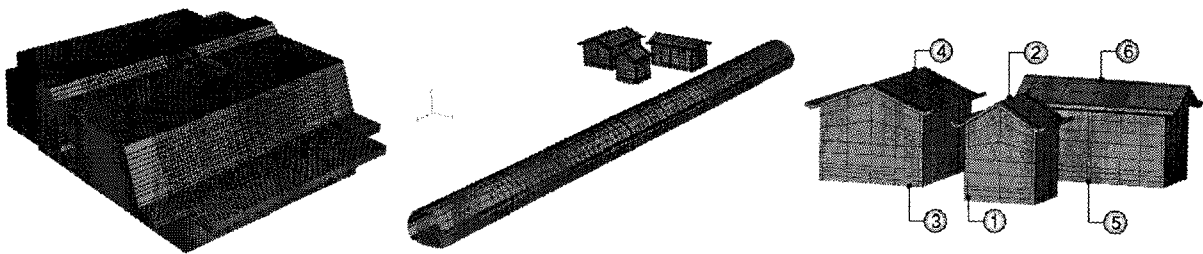
그림 17. 해석모식도

단층과쇄대 폭을 고려하여 종방향 길이가 충분히 긴 지반을 3차원으로 모델링하였으며, 단층과쇄대 (폭:30m, N20E/80NW) 통과 1D 전부터 PD-5-1 패턴(대구경강관 보강그라우팅)으로 사전보강을 실시하고, 단층대 통과 이후 1D까지 PD-5-1 패턴을 유지하였다.

터널내 발생 변위 및 지보재 부재력 검토 결과, 최대협압축응력은 7.25MPa로 허용치(8.4MPa) 이내의 값을 보여 설계에 적용된 보강패턴은 적합한 것으로 판단되었으며, 단층대 구간을 30m로 추정함에 따라 수치해석 결과 터널내공변위와 부재력의 크기가 비교적 크게 나타났다. 따라서 시공시 현장여건에 적합한 보조공법을 적절히 병행해야 할 것으로 판단된다.

5.3. 완공 후 철도 운행에 대한 영향 검토

완공후 열차 운행시 해광사에 미치는 소음·진동 영향을 수치해석을 통하여 검토하였다. 해석시 하중은 역해석 기법을 통해 산정된 열차주행하중을 시간이력하중으로 적용하였으며, 상·하행선 동시운행을 고려하여 양방향에 주행하중을 적용하였다. 수치해석은 범용 유한요소프로그램(ABAQUS)을 사용하여 3차원 해석을 수행하였으며 지반의 경계조건은 무한요소를 적용하였다. 또한 건물내부의 진동으로 인한 고체음 해석을 위해 음향요소를 적용하였고, 등가소음도 산정시 시간당 열차운행대수를 적용하였다. (2025년, 18대/hr : 동해남부선 복선전철 건설사업 환경영향평가서 참조)



(a) 전체 (b) 신설터널 및 해광사

그림 18. 유한요소해석모델

그림 19. 해광사 해석위치

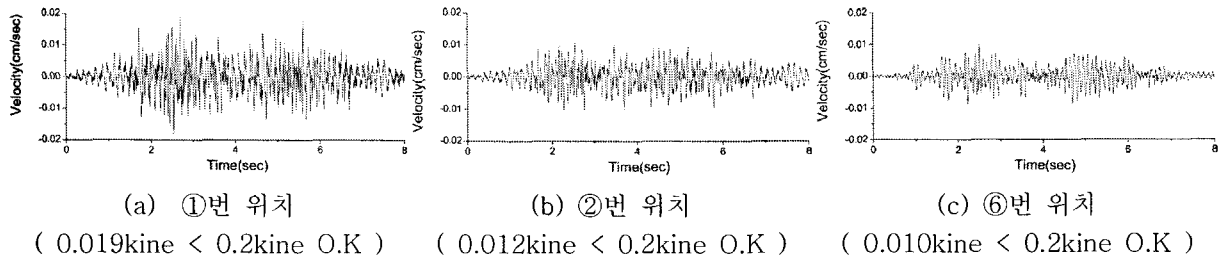


그림 20. 해석위치별 진동속도

해석결과 본선 터널 직상부에 위치한 해광사 건물에서 발생하는 진동레벨은 56dB(V), 건물내부의 등가소음도는 37Leq dB(A)로 허용기준치(60dB(V)와 40LeqdB(A))를 만족하였으며, 진동속도는 최대 0.019cm/sec로 문화재 진동허용기준치(0.2kine)를 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 이 구간에 대한 별도의 방진·방음대책은 필요 없을 것으로 판단된다.

6. 결론

동해남부선 3공구 과업구간 중 송정터널구간 직상부 13m에 위치한 해광사에 대하여 터널 설계시 합리적이고 경제적인 통과방안을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지표지질조사, 물리탐사, 시추조사 등을 통한 지반분석 결과, 사찰 하부에 폭 30m정도의 단층파쇄대가 터널과 사교하면서 존재하는 것을 확인하였으며, 이를 토대로 사찰 하부 50m구간은 기계굴착공법의 적용이 타당하다고 판단하였다.
- 2) 발파영향 검토 결과, 해광사 하부 118m구간은 발파허용 기준치(0.2kine)를 초과하여 발파가 불가한 구간으로 나타났으며, 이 구간은 지반분석에서 나타난 단층파쇄대를 포함하는 구간으로 암질이 불량하여 진동 및 소음을 최소화할 수 있는 기계굴착공법을 적용하였다. 또한, 이 구간과 인접하여 발파 진동의 영향이 예상되는 구간은 굴진장을 축소하고, 지발당 장약량을 조정하는 조절발파패턴을 적용하여 허용진동값을 만족시켰다.
- 3) 사찰통과구간의 민원을 고려하여 사찰직하부 통과시 천단부에 대구경강관보강그라우팅을 적용하고, CD분할굴착을 통한 PD-5-1패턴을 적용하여 터널의 안정성을 도모하였다. 터널 시공 중 사찰에 건물 경사계와 균열측정계를 설치하여 상시계측을 할 수 있도록 하였으며, 간섭이 확실한 지하관정은 사찰과 협의 후 이전 신설하기로 하였다.
- 4) 3차원 수치해석을 통한 터널 굴착에 따른 사찰구조물의 잠재적 손상평가 결과 손상평가 기준인 최대침하량, 부등침하량, 각변위 및 수평변형률 등은 허용기준을 만족하는 것으로 나타났으며, Boscardin & Cording 도표에 의한 영향검토결과 손상등급 0(무시)으로 분류되었으므로 터널 굴착 시공에 따른 해광사의 안전성에는 문제가 없는 것을 확인하였다.
- 5) 또한 사찰 하부 통과구간 중 단층대 통과구간에 대한 터널 안정성 해석 결과, 터널 내 발생변위 및 지보재 부재력은 허용치 이내의 값을 보여 적용된 보강패턴은 적절한 것으로 판단되나 단층대 통과 구간에서 변위와 부재력의 크기가 비교적 크게 나타났으므로 시공시 현장상황에 적합한 보조공법이 적절히 병행되어야 할 것으로 판단된다.
- 6) 완공 후 철도 운행시 사찰에 미치는 소음·진동 영향을 3차원 수치해석을 통하여 검토한 결과, 사찰 건물에서 발생하는 진동레벨은 56dB(V), 건물내부의 등가소음도는 37Leq dB(A)로 허용기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

향후 사찰과 같은 민원발생이 예상되는 구간을 통과하는 터널을 설계하거나 시공하는 경우 본 논문의 검토사항을 고려하면 좀 더 나은 설계에 보탬이 될 것이라고 판단된다. 그러나 본 논문에서 적용한 굴착 및 보강 방법이 본 과업구간에 국한되어 있기 때문에 추후 근접시설물 등에 대한 기술발전을 이룩하기 위해서는 더욱 더 많은 설계나 사고사례분석을 통하여 설계 및 시공의 적정성을 검토하며 학술적인 측면에서 아낌없는 비판과 토론이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 동해남부선 부산~울산 복선전철 제3공구 건설공사 설계보고서, 2005, pp147~184
2. 동해남부선 부산~울산 복선전철 제3공구 건설공사 구조계산서, 2005, pp27~62,389~393,406~414
3. 동해남부선 부산~울산 복선전철 제3공구 건설공사 지반조사보고서, 2005, pp235~292
4. 동해남부선 부산~울산 복선전철 제3공구 건설공사 시추공시험발파 결과보고서, 2005
5. 동해남부선 부산~울산 복선전철 제3공구 건설공사 열차진동영향 검토 보고서, 2005
6. 동해남부선 복선전철 제3공구 건설공사 터널시공시 인접구조물 안전성평가, 2005
7. 김창용(1998), “도심지 터널 굴착에 따른 지반거동 특성예측과 인접 구조물 손상평가에 관한 연구”, pp9~13, 한양대학교.
8. 송인철(2003), 터널 굴착시 인접구조물의 거동과 손상평가에 관한 모형실험연구, pp 13~29, 단국대학교