

근접 철도터널의 굴착계획 및 설계 사례

A Case on Excavation Plan and Design of Adjacent Railroad Tunnel

김 선홍, 정 등호, 석 진호, 정 건웅, 서 성호

Seon-Hong Kim, Dong-Ho Jeong, Jin-Ho Seok, Geon-Woong Jeong, Seong-Ho Seo

(주)유신코퍼레이션 터널부

Abstract

The points of this design case are the planning and excavation method of a new double-tracked railroad tunnel which is approx. 11~22 meters apart from existing single-tracked railroad tunnel. For the optimum excavation method some needs are required in design stage, such as the reduction of noise and vibration, public resentment, damage of buildings and construction costs. Hence the estimation and application of allowable noise and vibration criterion is important. The ground coefficient (K, n) of this site is determined by field trial blasting. The excavation method is chosen to satisfy the allowable noise and vibration criterion. In addition, in order to ensure the stability of existing single-tracked railroad tunnel, the instrumentation of maintenance level is accompanied during the construction stage. As a result of this design condition, central diaphragm excavation with line drilling and pre-large hole boring blasting is applied to the area within 15 meters apart from existing tunnel. And above 15 meters apart, pre-large hole boring blasting is designed.

Keywords : Excavation Method, Blasting Noise and Vibration, Field Trial Blasting, Ground Coefficient, Central Diaphragm, Pre-Large Hole Boring Method

1. 개요

도심 인구 및 교통량의 증가로 인하여 철도, 도로 등의 교통망 증가가 지속적으로 요구된다. 이러한 요구의 충족을 위해 신설 노선망들은 산악구간이나 도심지 등의 다양한 지역을 통과하고 있다. 또한 교통망의 고속화와 직선화로 인하여 터널 건설의

증가가 불가피하게 되었다. 터널 건설시 수반되는 주요 문제로는 터널 갱구부의 사면안정, 단층과쇄대 구간 통과시의 터널 안정 및 터널 발파 굴착으로 인한 인접구조물에 미치는 진동, 소음영향 등을 들 수 있다. 특히 진동, 소음문제는 민원발생의 주원인이 되며 모든 터널현장에서 중요한 고려사항이 되고 있다. 본 고는 발파진동 및 소음으로 인한 인접구조물과 인근 지역의

피해를 최소화할 수 있고 경제성, 시공성이 고려된 굴착공법 계획 및 설계사례를 토대로 소개하고자 한다.

2. 주변현황 및 지질

본 구간은 중앙선 〇〇~〇〇의 일부구간으로 기존 채래식 단선 철도터널이 위치하고 있는데 증가되는 교통량의 확보를 위하여 신설 복선 철도터널이 기존 터널과 11~22m 정도 근접하여 계획되었다. 이 신설터널의 시점부는 11m 이격되어 기존 터널이 위치하고, 55m 이격되어 교회가 위치한다. 종점부는 기존 터널과 22m 내외로 이격되어 있고, 65m 내외로 아파트가 위치하고 있다. 또한 신설터널의 공사가 완료될 때까지 기존 터널을 통하여 열차운행이 계속된다. 따라서 본 설계구간의 경우 터널공사 시 진동, 소음에 의한 인근 민가 및 교회 등에 피해를 최소화할 수 있는 방안과 기존 터널의

구조적 안정성 확보로 기존 열차운행에 장애를 주지 않아야 한다.

Fig. 1은 터널 노선의 평면도로서 주변현황을 보여주며 Table 1은 신설터널 구간별 현황 및 고려사항이다. 주요 지점별 횡단현황은 Table 2와 같다.

지질은 대체적으로 양호한 연암과 경암으로 형성되어 있으나 계곡부는 파쇄가 심한 풍화암 및 연암으로 형성되어 있다. 암반등급은 III~V등급으로 분류되며 일축압축강도는 $1,479\sim 2,201\text{kgf/cm}^2$ 로 연암 이상의 강도를 보이고 있다. 또한 지하수위는 지표면 하 12~17m 범위에서 나타나며 대부분 터널 통과부분에 위치한다. 투수계수는 연암 $5.41\sim 5.99\times 10^{-5}\text{cm/sec}$, 경암 $1.13\times 10^{-5}\sim 5.85\times 10^{-6}\text{cm/sec}$ 으로 낮은 수치를 보인다.

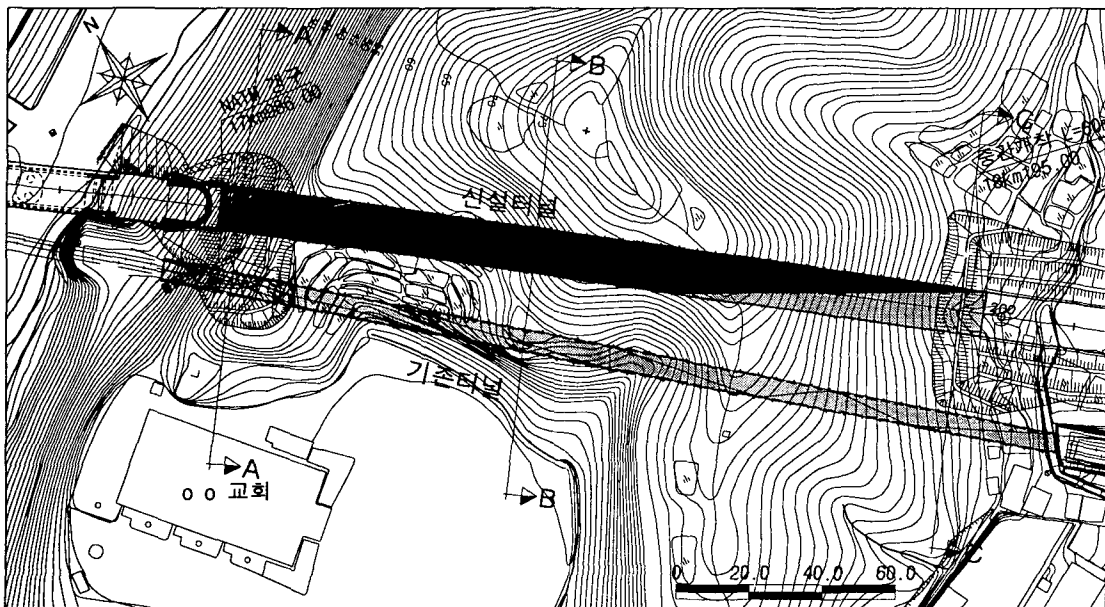


Fig. 1 The Present Condition of Tunnel

Table 1. Around Conditions and Considerations of Tunnel

구 간	현 황	주요 고려 사항
신설터널 시점부	<ul style="list-style-type: none"> ▶터널갱구는 교량과 연결되어 형성 ▶기존터널과 신설터널 간 이격거리 11~15m ▶우측 상부에 ○○교회 55m 이격 	<ul style="list-style-type: none"> · 운행중인 기존터널에 영향 최소화로 안전운행 확보 · 발파진동 제어 대책
신설터널 중간 개착부	<ul style="list-style-type: none"> ▶풍화심도가 깊고, 파쇄가 심한 계곡부 지형 ▶기존터널과 신설터널 22m 이격 ▶우측에 ○○아파트 53m 이격 	<ul style="list-style-type: none"> · 기설터널 영향 최소화 · 아파트 민원억제대책
신설터널 종점부	<ul style="list-style-type: none"> ▶우측 20m 이격하여 암반사면이 형성되어 있음 ▶문화재와 이격거리 95m ▶우측에 40m 이격하여 주거단지 형성 	<ul style="list-style-type: none"> · 발파진동 및 소음 저감대책 · 갱구부 발파 비산대책 · 기존철도사면 운행중 낙반 및 사면붕괴 대책

Table 2. Present Conditions of Principal Intersection

구 간	횡 단 현 황	주요 현 황
단면 A-A (시점부)		<ul style="list-style-type: none"> · 토피 9.3m, 터널은 양호한 경암층에 위치 · 우측상부 ○○교회 55.5m 이격 · 기존터널과 11.2m 이격
단면 B-B		<ul style="list-style-type: none"> · 토피 27m, 양호한 경암지대에 터널 위치 · 우측에 기존 운행중인 철도터널과 15.0m 이격
단면 C-C (중간개착부)		<ul style="list-style-type: none"> · 토피 6m, 절리가 많은 연·경암지대에 터널 위치 · 우측에 기존 운행중인 철도터널과 22m 이격 · 우측에 아파트 65m 이격

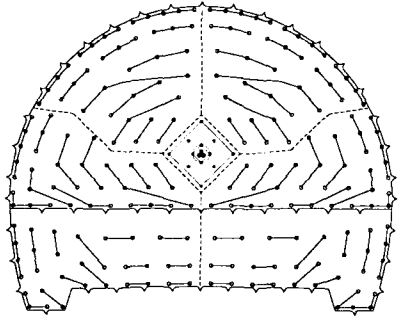
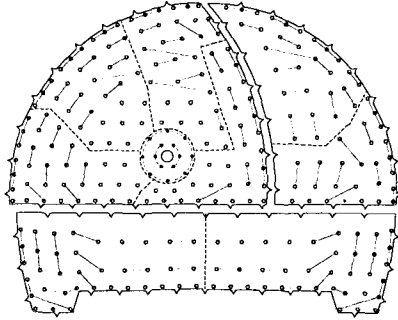
3. 적정 굴착공법 검토

연암이상의 양호한 지반에 적용 가능한 터널 굴착공법중 시공성과 경제성을 확보할 수 있는 것은 크게 발파와 비 발파공법으로 구분할 수 있다. 발파에 의한 굴착공법으로는 일반적인 천공으로 심발파 확대발파를 이용하는 것과 발파진동 및 소음을 감소시킬 수 있는 제어발파 등이 적용 가능하다. 비 발파공법으로는 TTM, ITC, Road Header 등의 굴착장비에 의한 방법과 천공 후 약액, 유압 및 유압+ Breaker로 암반을 절개 후 파쇄하는 공법을 적용할 수 있다.

Table 3, Table 4 및 Table 5는 적용 가능한 각 공법별 특징이다.

Table 3, 4 및 5와 같이 발파와 비 발파에 의한 굴착공법을 검토해본 결과, 본 설계구간은 대부분 연암이상으로 Road Header는 불가능하다. TTM공법의 경우에는 1,800kgf/cm² 까지 굴착이 가능하나 기계의 가능 굴착단면이 작아서 확공이 필요하며 Pilot터널과 부대설비 공간이 필요하므로 시공이 복잡하고 굴착효율이 낮다.

Table 3. Comparison between Normal and Controlled Blasting

구분	일반발파	제어발파 (선대구경 수평발파)
공법 개요		
	<ul style="list-style-type: none"> · 천공과 폭약을 이용하는 일반적인 터널 발파 공법 	<ul style="list-style-type: none"> · 소규모 수평보링장비로 최대 50m까지 ϕ 365mm 대구경 선진수평보링 후 심발 자유면으로 이용하는 공법
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 시공효율이 좋음 · 공사기간이 짧고 공사비가 저렴 · 인근구조물에 발파진동으로 인한 피해와 민원발생 우려 	<ul style="list-style-type: none"> · 대구경의 자유면 형성으로 진동 및 소음감소 · 막장 전방지반 예측가능 및 수발공 역할 · 공사비 다소 고가
공사비	71,000 원/m ³	100,000 원/m ³

유압식 파쇄공법은 시공성 및 단가면에서 적용이 어렵고, 유압절개+Breaker공법은 Slot 기계의 작업라인이 1개여서 1cycle 작업량이 적어 굴착효율이 떨어진다. 이와 같이 비발파에 의한 굴착작업은 충격과 진동, 소음이 적어서 인접구조물과 인근 지역의 피해를 최소화할 수 있지만 공사비가 고가이고 굴착효율이 저하되는 단점이 있다. 따라서 굴착효율 측면과 경제적인 측면에서 유리한 발파공법을 적용하되 기존터널과 11~22m 내외의 이격거리를 고려하여 진동저감효과가 있는 선대구경 수평발파공법을 적용하여 피해를 최소화하도록 계획하였다.

선대구경 수평보링은 선진시추로 발파 굴착 시 2자유면 확보 및 막장전방의 지반 예측이 가능하다. 또한 파쇄가 심한 계곡지형을 통과할 경우 과다유입수가 예상되는 구간에서 수발공으로 활용될 수 있다. 발파 굴착 시공 시 허용진동치를 초과하는 경우는 진동을 경감시키기 위한 Line Drilling과 암 절개공법을 적용하여 소음과 진동이 최소화되도록 하였다.

Table 4. Comparison between TTM and Road Header Excavation

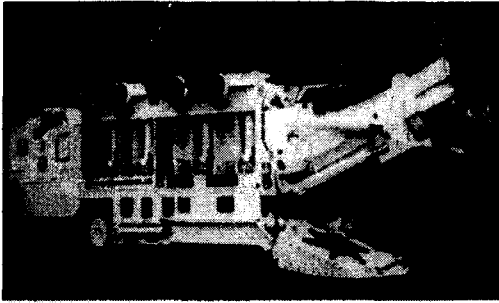
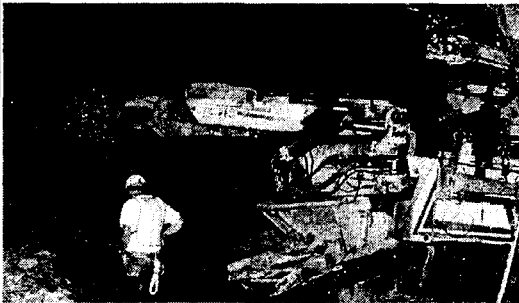
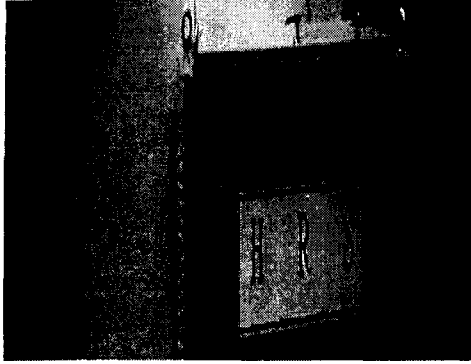
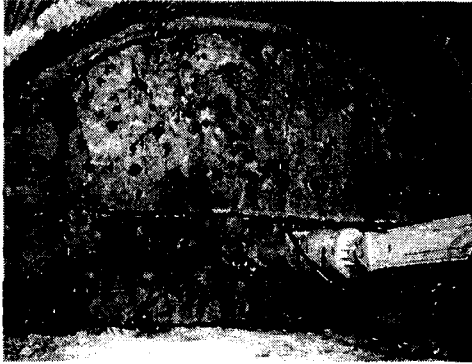
구분	TTM	Road Header
공법 개요	 <ul style="list-style-type: none"> · Boom의 드릴에 장착된 Pick의 회전력에 의해 암을 파쇄하는 기계식 굴착 · Road header + TBM · 최대굴착구경은 6.5m 	 <ul style="list-style-type: none"> · Boom의 드릴에 장착된 Pick의 회전력에 의해 암을 파쇄하는 기계식 굴착
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 무진동, 무소음, 운영 및 관리 편리 · 시공성 및 안정성이 좋음 · 여굴의 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> · 무진동, 무소음 · 여굴의 최소화 · 시공성 및 안정성이 좋고 운영 편리
공사비	150,000 원/m ³	205,000 원/m ³

Table 5. Comparison between Hydraulic Pressure and Hydraulic+Breaker

구분	유압식파쇄	유압절개+Breaker
공법 개요		
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 충격과 진동이 없어서 인접구조물에 균열 등 영향을 미치지 않음 · 소음과 진동이 없음. · 천공경이 크므로 천공소요시간이 김 	<ul style="list-style-type: none"> · Slot Hole 전용 Drill을 이용하여 중앙부 및 외벽부, 하단부에 연속천공 후 점보드릴에 의해 대구경홀(100~125mm)을 천공한 다음 유압파쇄기 Bigger로 1차 할암 후 터널용 Breaker로 2차 파쇄시키는 공법 · 소음과 진동이 없음. · 작업환경의 제한이 없음 · 비산물이 없고, 다른 작업과 병행 가능 · 천공경이 크므로 천공소요시간이 김 · 장비의 작업라인이 1EA로 1회 작업량이 적음
개략 공사비	130,000 원/m ³	160,000 원/m ³

4. 터널 굴착설계

4.1 발파진동 기준 선정

(1) 국내기준

국내의 경우 건설교통부에서 구조물 손상기준 발파진동 허용치를 Table 6과 같이 5등급으로 분류하여 설정하였으며 각 분야의 발파설계 시 이를 기준으로 활용되고 있다.

발파진동에 관한 여러 연구결과에 의하면 지하의 구조물에 대해서는 지상의 구조물보다 발파진동의 영향을 적게 받는다고 알려져 있다. 라이닝은 원지반과 완전히 밀착하고 있는 한 진동에 대해서 일반적으로 매우 안전한 구조물이나 천단부에 공동이 있으면 원지반과 라이닝이 독립되어 거동하거나, 큰 편차가 작용해서 상시 인장응력이 작용하고 있는 경우는 진동발생시 취약한 구조물이 된다.

이와 같이 라이닝은 그 형상 및 시공조건이 상이하기 때문에 일률적으로 허용치를 결정하는 것은 어려우나 현재 일반적으로 5~6cm/sec의 허용치를 취하고 있는 경우가 많다.

Fig. 2는 진동속도의 변화에 따라 폭원으로부터의 거리와 지발당 장약량과의 관계를 각 진동속도에서 구조물과 암반사이의 피해정도를 보여준다. 실제 지발당장약량이 0.312kg일 때 구조물 피해한계가 되는 이격거리는 약 7m정도가 된다.

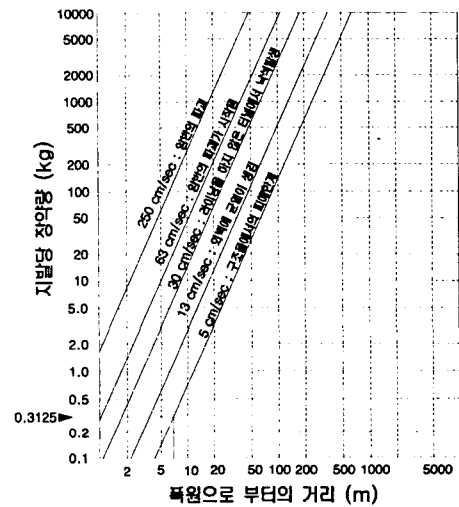


Fig. 2 Break Degree According to V-Velocity

Table 6. Blasting Vibration Guidance Levels for Building and Construction

구 분	진동 예민 구조물	조적식(벽돌, 석재 등)벽체와 목재로 된 천장을 가진 구조물	지하기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물	철근콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중소형 건축물	철근콘크리트 철근골조 및 슬래브를 갖는 대형 건축물
	문화재 등	재래가옥, 저층 일반가옥 등	저층양옥, 연립주택 등	중·저층아파트, 중소상가 및 공장	내진구조물, 고층아파트, 대형건물 등
허용 입자속도 (cm/sec)	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

(2) 외국기준 사례

중국과 러시아의 경우 터널 구조물에 대한 발파진동 허용치는 Table 7에서 보여주는 바와 같이 국내기준보다 2배 정도 높은 12~15cm/sec로 규정하고 있다.

지하매설파이프의 경우 23cm/sec, 지하의 콘크리트 벽의 경우는 25.4cm/sec 이하에서 균열과 파괴가 일어나지 않는 진동속도 허용치가 제시된 바 있다.

(3) 양생콘크리트 기준

양생중인 콘크리트 라이닝에 대한 발파진동 영향을 조사한 사례를 살펴보면 양생시간에 따라서 차이가 나지만 7일 이상의 양생기간을 거치면 5~10cm/sec 정도의 발파진동에도 견디는 것으로 조사되었다(Table 8참조). 슛크리트의 경우에도 발파진동에 의해 영향을 받는데, 슛크리트에 미세균열이 발생하기 시작하는 진동속도는 9cm/sec로 측정된 바 있다.

(4) 설계 적용 발파진동기준치

터널 시점부에 위치한 지상구조물인 ○○교회 건물은 주변민원의 발생을 억제하기 위해 진동 예민 구조물로 0.3cm/sec의 허용기준치로 설계 한다(Table 9 참조). 지중구조물인 기존 재래식 단선터널의 허용진동치는 1942년에 준공되어 약60년의 공용기간이 지난 것을 참조하여 1.0cm/sec로 진동기준치를 적용한다.

Table 7 Blasting Vibration Guidance Levels for Tunnel Lining

중국폭파 안정규정(GB6722-86)	교통터널에 대해 15 cm/sec
러시아의 철도터널에 대한 안정규정	일회적인 진동 : 12 cm/sec 반복적인 진동 : 6 cm/sec

Table 8 Blasting Vibration Guidance Levels for Curing Concrete

양생시간	미국(운수국)	독일	Law Eng. (미국)
0~12시간	0.64~5.08 cm/sec	0.64 cm/sec	0.25 cm/sec
12시간~7일	5.08~12.7 cm/sec	0.64~6.35 cm/sec	5.1 cm/sec
7일 이상	12.7~25.4 cm/sec	6.35~12.7 cm/sec	5.1~10.2 cm/sec

Table 9 Blasting Vibration Guidance Levels for This Design

근접 구조물	심발에서 이격거리	허용진동치	비 고
○○ 교회	63m	0.3 cm/sec	구조물(건물) 및 가옥
기존 재래식 터널	19m	1.0 cm/sec	콘크리트 라이닝

4.2 진동 예측식 및 최대지발당 장약량

(1) 시험발파에 의한 진동예측식 결정

지반조사 중 탄성과 탐사 시 음원발생을 위해 실시하는 누두공형태의 발파를 이용하여 이격거리별로 3대의 진동측정기를 사용하여 연속적인 진동계측을 실시하고 계측치를 회귀 분석하여 추정식을 결정하고 인근 구조물에 대한 발파로 인한 영향 평가와 지발당 장약량을 결정한다. 이에 대한 결과를 Table 10에 나타내었다.

(2) 이격거리에 따른 최대 지발당 장약량

시험발파에 의하여 추정된 진동식으로부터 주변 보안물건에 대한 허용진동값을 각각 0.3cm/sec, 0.5cm/sec, 1.0cm/sec, 2.0cm/sec, 5.0cm/sec로 하는 경우 폭원으로부터의 이격거리에 따라 사용가능한 최대 지발당 장약량을 검토해보면 Table 11과 같다.

Table 10 A Preestimate Formula According to Field Trial Blasting


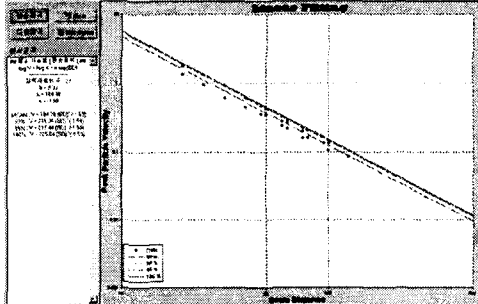
현장시험 발파진동 측정	발파진동 예측식
	
	$V = 217 \left[\frac{D}{W^{1/3}} \right]^{-1.6}$

Table 11 Maximum Delay Charge of According to Each Distances

이격거리	최대 지발당 장약량(kg)					비 고
	0.3(cm/sec)	0.5(cm/sec)	1.0(cm/sec)	2.0(cm/sec)	5.0(cm/sec)	
10	0.004	0.011	0.042	0.153	0.851	K=217 n=-1.6
15	0.015	0.038	0.140	0.515	2.871	
20	0.035	0.091	0.333	1.221	6.805	
40	0.279	0.726	2.663	9.767	54.436	
60	0.940	2.450	8.987	32.963	183.722	

4.3 굴착계획

본 설계의 굴착공법은 상술한 바와 같이 발파공법이 계획되었으므로 굴착계획 시 진동저감 대책을 강구하여야 한다. 진동저감 대책을 위하여 본 구간의 경우 굴착 시 시공성을 고려하여 기존 터널과 15m 이내로 근접될 경우와 그 이상일 경우 2가지 경우에 대하여 굴착계획을 달리하여 진동으로 인한 인접구조물의 안정성이 확보되도록 하였다. 즉, Table 12와 같이 보안물건과 15m 이상 이격된 경우는 심빼기 발파를 대신한 선대구경 천공 발파공법을 적용하였고 보안물건과 15m 이내로 근접될 경우는 터널 굴착면 최 외곽부에 Line Drilling 적용한 후 CD분할 심발좌측 이동 선대구경 천공발파 공법을 시행하도록 하였다. 이때의 설계발파시 안정구조물에 미치는 진동영향 평가는 Table 13과 같다.

4.4 발파 소음 영향 및 비산대책

발파 시 소음으로 인한 민원발생이 예상되므로 Table 14와 같이 소음전파를 차단할 수 있는 방음문과 갱구부 비산대책을 위한 슈퍼보드 공법을 이용한 암 파쇄 방호벽 설치를 계획하였다. 대구경에 의한 2자유면 확보로 일반 심발발파시의 진동과 소음을 감소시키고 장약 시 완전전색을 실시하고 지발당 장약량을 최소로 하여 발파하도록 하였다. 건설소음 규제 기준에 근거하여 본 구간의 발파 시 발생하는 소음의 허용정도를 평가해 보면 Table 15와 같이 60~61dB로 허용규제기준치인 70dB 내서 발생하는 것으로 산정된다.

Table 12 An Excavation Plan according to Distance

구 간	이격거리 11~15m	이격거리 15~22m
굴 착 계 획	<ul style="list-style-type: none"> 선대구경 심발을 CD굴착으로 구조물 반대쪽에 계획하여 영향거리 최소화 진동저감효과를 고려한 Line Drilling 계획 	<ul style="list-style-type: none"> 선대구경 심발적용, 굴진장 1m

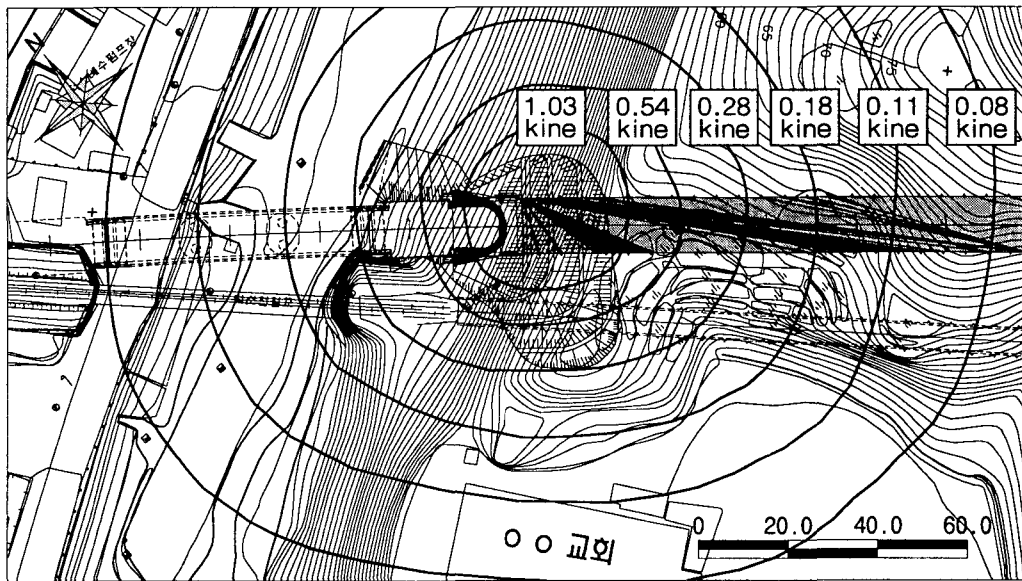
Table 13 A Vibration Influence of Adjacent Building on Blasting

근접 구조물	허용진동치	구 간	심발에서 최소이격거리	일반발파 시 진 동 치	제어발파 시 진 동 치
라이닝 (기존터널)	1.0 cm/sec	17Km990	19.0m	1.05 cm/sec	0.84* / 0.73** cm/sec
		18Km070	20.1m	0.96 cm/sec	0.77* cm/sec
		18Km190	27.0m	0.60 cm/sec	0.48* cm/sec
○○교회	0.3 cm/sec	17Km990	63m	0.15 cm/sec	0.12* cm/sec
가옥(○○APT)	0.3 cm/sec	18Km195	66m	0.14 cm/sec	0.11* cm/sec

※ 굴진장 1.0m 기준일 때 심발의 지발당 장약량 (125g×2.5EA = 0.312kg)

* 선 대구경 심발(-25%) 공법을 적용할 경우 저감효과를 고려한 진동치

** 안전율을 고려한 Line Drilling(-15%)공법을 추가 적용할 경우 저감효과를 고려한 진동치



발파진동 영향 검토(00터널 시점부)

Table 14 A Countermeasures against Blasting Noise

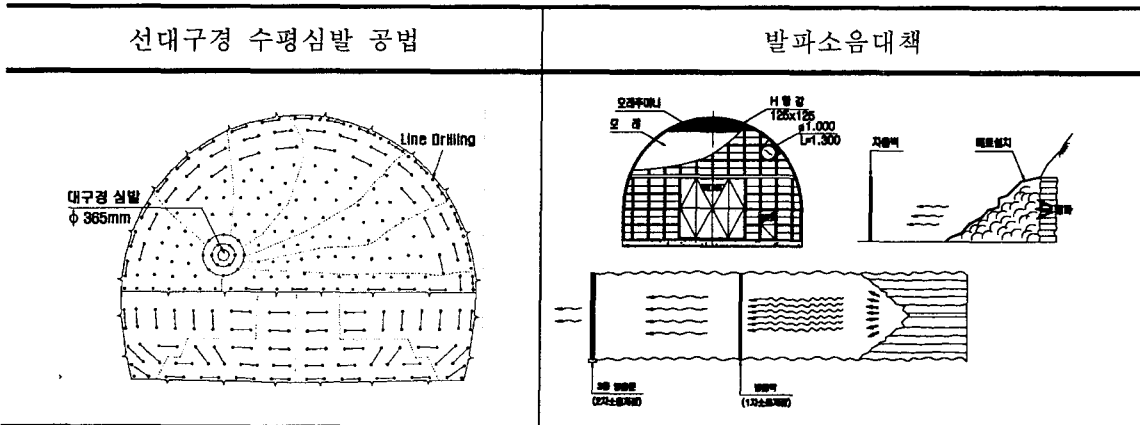


Table 15 Blasting Noise Influence

근접 구조물	허용기준치	구 간	심발에서 이격거리	소 음 치 (dB)
○○교회	70 dB	17Km990	63m	65.0dB (61.0)*
가옥(○○APT)	70 dB	18Km195	66m	64.5dB (60.5)*

※ 굴진장 1.0m 기준일 때 심발의 지발당 장약량 (125g×2.5EA=0.312g)

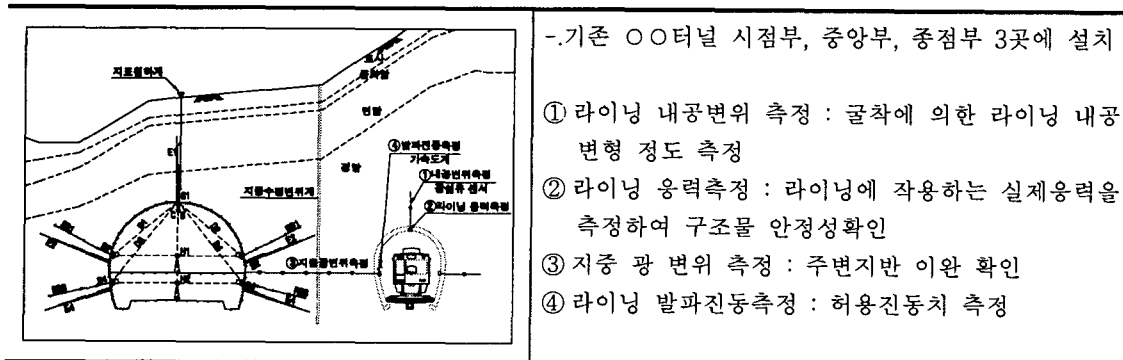
* 방음문 설치했을 경우 소음 저감치 (-4dB)

5. 인접구조물의 유지관리 계획

신설터널 시공 중에 발생할 수 있는 기존구조물에 대한 영향을 평가하여 열차의 안전운행과 사용 중인 구조물의 안정성 확보를 위하여 자동화 구조물 유지관리 계획을 계획하였다.

유지관리 계획항목으로는 터널 내 열차 운행에 지장이 없게 기존 터널구간의 시점부, 중앙부, 종점부에 설치하여 차후 근접터널 굴착 시 기존터널의 변위 및 응력을 측정하도록 계획하였다.

Table 16 Measurement Plan



6. 결 론

본 설계사례는 기존 재래식 ○○터널과 인접하여 신설 복선터널을 건설하는 과업으로 증가되는 교통량을 수용할 수 있도록 계획되었다. 신설 터널이 시공 완료될 때까지 기존 ○○터널을 통하여 열차의 운행은 계속된다. 따라서 신설터널이 기존터널과 근접하여 시공되는 과정에서 발생할 수 있는 기존 구조물의 안정성 저해와 이로 인한 열차운행시의 안전성 문제 등이 중요하게 고려되어야 하며, 아울러 터널 시공의 경제성과 시공성을 확보할 수 있는 굴착공법이 계획되어야 한다.

1) 기존 인접구조물과 인근 가옥의 보호를 위해서는 기계굴착이나 암 절개 공법과 같은 비발파공법이 진동과 소음이 없으므로 인근지역의 영향을 최소화하는 공법이지만 터널 굴착 시 시공성과 경제성을 확보할 수 없는 이유로 심발을 대구경으로 선천공하여 2자유면을 확보할 수 있는 선대구경 굴착공법을 적용하여 인근가옥과 근접구조물에의 영향을 최소화하였다. 또한 15m 이내로 근접된 보안물이 위치하는 구간은 Line Drilling과 선대구경 발파공법을 병용하여 소음과 진동을 허용치 이내에서 발생하도록 계획하였다. 또한 시험발파에 의해 현장의 진동전파 특성 및 진동저감효과를 분석하고 이를 근거로 적절한 발파 계획을 수립하도록 하였다.

2) 근접된 기존 재래식터널의 라이닝은 원지반과 완전히 밀착하고 있다면 진동에 대한 안전도가 높지만 천단부에 배면공동이 존재하여 라이닝이 독립되어 진동할 경우와 큰 편차가 작용하고 있는 경우에는 진동으로

인하여 라이닝의 균열과 붕락의 원인이 발생할 수 있으므로 기존 구조물의 사전조사를 철저히 하여 배면공동이 조사되면 충진한 후 공사를 진행해야 할 것이다. 또한 근접터널의 시공이 진행되는 동안 기존터널의 구조물변위와 라이닝응력, 진동치 등의 유지관리 계측을 실시하여 이상변위가 발생할 경우는 즉시 대책을 강구하여야 할 것이다.

참고문헌

1. (주)유신코퍼레이션, 2000, 중앙선 덕소-양수리간 복선전철 터널설계 보고서. pp. 137~250.
2. (주)호상테크노베이션, 2000, 암반절개공법 편람. pp. 120~130.
3. 서울대학교 공학연구소, 2000, 선 대구경 수평 보링공을 이용한 터널발파공법에 관한 연구. pp1~51.
4. Halcrow China Ltd, 2000, Korea National Railroad Joongang Railway Project ○○ Tunnel, Report Blasting Impact Assessment, Procedures and Protective Measures. pp. 12~27.
5. (사)대한터널협회, 1999, 건설교통부 제정 터널표준시방서. pp. 32~33
6. Per-Andes Perscon Roger Holmberg, Jaimin Lee, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, pp. 337~374.