

터널 발파소음 감쇠를 위한 방음시스템 개발



노상림
LG 건설(주)
지하공간팀 과장



조영천
LG 건설(주)
지하공간팀 과장



김옥영
LG 건설(주)
지하공간팀



이상필
LG 건설(주)
지하공간팀 팀장

1. 개요

우리나라는 국토 면적이 좁고 대도시에서 인구가 밀집된 형태이므로 지하공간 개발사업의 국내시장 규모는 지속적으로 증가할 것으로 추정되며, 현재 도시발전 기반시설에 대한 공공 발주 및 SOC사업 등이 활발히 진행되고 있다. 그러나 이에 반해 환경에 대한 인식변화와 시민활동의 증가로 인하여 환경분쟁은 해마다 증대되고 있으며, 특히 2000년 이후 환경분쟁 변화동향을 살펴보면 전체 환경분쟁중 소음/진동부문이 전체의 88%를 차지 가장 큰 비중을 차지하고 있다.

발생원인별로 살펴본 민원현황에서도 건설공사장 소음이 76%로 공장, 차량 등에서의 발생비율을 훨씬 상회하였다. 이에 반해 민원대책은 주민설득이 대다수를 차지하고 있어 보다 구체적이고 근본적인 소음 대책이 필요하다. 이에 본 고에서는 도심지 토목공사 중 발파소음에 의하여 민원의 주 대상이 되고 있는 터널 소음의 저감 대책에 대하여 알아보고 당사에서 도심지 터널(국사봉터널, 양녕로 확장공사현장)에 적용한 방음시스템의 사례를 소개하고자 한다.

2. 발파소음의 특성

2.1 건설소음의 특징 및 규제기준

건설 공사장 소음의 관련 규제기준은 1994년 11월 소음·진동규제법 시행규칙에 의해 생활소음과는 다르게 분류되어 제시되었으나, 1997년 10월에 생활소음과 동일한 범위에 포함되어 개정하였으며, 2004년 1월 15일에는 발파소음의 경우 주간에 한하여 규제기준치에 +10dB을 보정할 수 있도록 개정하였다.

현행 소음·진동규제법 시행규칙에 의거한 생활소음 규제기준(제29조의2제3항관련) 중 발파소음 관련 부분은 표 1과 같다.

2.2 발파소음의 특징

발파소음이란 암반속에 장약된 화약이 폭발하면서 발생하는 소음을 말하는데, 지반 충격과 진동을 통해 발생하는 소리와 공기가 압력의 변화를 일으켜 사람에게 감지되는

표 1. 생활소음 규제기준(단위 : dB(A))

대상 지역	시간 소음원	아침,저녁 (5:00-8:00 18:00-22:00)	낮 (8:00-18:00)	밤 (22:00-5:00)
		(1) 공사장	65	70
(2) 공사장	70	75	55	

- 대상지역(1) : 주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구 및 관광·휴양개발 진흥 지구, 자연환경보전지역, 그밖의 지역 안에 소재한 학교·병원·공공도서관
- 대상지역(2) : 그 밖의 지역
- 발파소음의 경우 주간에 한하여 규제기준에 +10dB을 보정한다.

소리이다. 다시 말해서 발파시 공기를 매질로 하여 전파되는 파동 중에서 사람의 귀에 들리는 가청영역(20Hz~20000Hz)의 주파수를 가지는 소음과 사람의 가청영역을 벗어나 사람이 들을 수 없는 20Hz 이하의 저주파 진동에너지를 손실 없이 멀리까지 전파되어 가옥 등 구조물을 진동시켜 2차적 소음을 발생시키는 것을 통틀어 발파소음 또는 발파풍압이라 한다. 현재 일반화되어 있는 발파작업 과정에서의 발파풍압 생성원인은 ①발파지점에서 직접적인 암반의 변위로 인한 지반 충격음(APP), ②발파지점에서 약간 떨어진 곳에서의 진동에 의해 공기로 전달되는 지반 진동음(RPP), ③파쇄된 암반의 틈을 통해 분출되는 발파 가스음(GRP), ④불안전한 전색에 의해 전색물이 분출하면서 나오는 발파공음(SRP)으로 볼 수 있다. 이 중에서 지반 충격음과 지반 진동음은 발파소음으로 사람에게 대부분 감지되며, 발파 가스음 및 발파공음은 발파작업과 방음상태에 따라 저감 시킬 수 있다. 특히 발파 가스음은 천공장을 길게 할 경우 폭발 생성가스의 분출강도가 저하되기 때문에 상당히 줄어든다. 일반적으로 발파소음의 최대크기는 암반 속에서 폭발할 경우 발파지점 부근에서 160~180dB(L) 크기의 음파로 전파되는 것으로 알려져 있다(한국 소음진동 공학회, 1997).

2.3 발파소음의 거리감쇠 효과 예측기법

소음은 주위의 다양한 매체를 통해 사방으로 전달되며

음원과 수음점 사이의 여러 가지 메카니즘에 의해 감쇠된다. 대기중으로 전파되는 발파소음은 기압, 온도, 습도, 풍속 및 풍향에 따라 복잡하게 전파되며, 장애물의 차단 효과에 의해서도 다양하게 전파되기 때문에 주변 환경 및 조건을 감안한 복잡한 통계기법으로 예측해야 한다. 그러나 시시각각으로 대기조건이 변하고 장애물의 형상 및 조건이 다르기 때문에 소음의 감쇠예측을 정확히 계산적으로 산출하기는 사실상 어렵다. 그래서 국내에서는 발파소음의 거리감쇠 효과를 파악하기 위하여, 소음이 전달되는 대기를 균일한 매질로 가정하여 기하학적인 근사 계산식에 초과감쇠를 보정하는 방법과 발파시 동시에 기폭되는 지발당 장약량과 거리요소를 통하여 회귀분석으로 산출된 상관식에 의해 예측하는 방법을 사용한다.

2.3.1 점음원에 의한 발파소음 예측기법

발파작업이 한 지점에서 발생할 경우 소음원은 점음원으로 취급할 수 있다. 즉, 자유공간 중에 있는 음향출력 W의 점음원에서 거리 r인 구면의 표면적 $4\pi r^2$ 의 단위면적당 단위시간에 통과하는 에너지 이므로 음향출력 W와 음의강도 I는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} [w/m^2]$$

이것은 음의 세기가 거리의 자승에 반비례하여 감쇠되는 것을 표시한 것이다. 또한 음압레벨(SPL)과 음향파워레벨(PWL)의 관계를 통해서 무지향성 점음원의 경우 음원으로부터 r거리만큼 떨어진 반자유공간에서의 음압레벨은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$SPL = PWL - 20\log r - 8$$

그리고 음원으로부터 $r_1(m)$ 떨어진 지점의 음압레벨을 SPL_1 , $r_2(r_1 > r_2)$ 지점의 음압레벨을 SPL_2 이라 할 경우 두 지점사이의 거리에 따른 거리 감쇠치는 위의 식으로부터

터 아래의 식과 같이 구할 수 있다.

$$SPL_1 - SPL_2 = 10 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

발파지점에서 발생한 소음은 기하학적으로 확산되기 때문에 거리에 따라 음의 강도는 적어진다. 음의 강도는 대기가 균일하고 장애물이 존재하지 않을 경우에는 일반적으로 100m 이내에서 균일하게 감쇠하게 되며 100m 이상에서는 소음의 주파수 영향, 기상영향 및 지면의 상황에 따라 초과 감쇠현상이 나타나 소음이 복잡하게 전달된다.

2.3.2 장약량과 거리의 환산거리에 의한 발파풍압 예측기법

발파과정에서 발파풍압에 영향을 미치는 직접적인 요인으로서 기폭되는 화약량, 천공장, 최소 저항선, 지연시차, 사용되는 화약류의 종류를 들 수 있으며, 간접적인 요인으로서의 풍향 및 풍속, 지형 및 장애물의 형상을 들 수 있다. 이러한 영향 요소가 모두 반영된 발파소음은 직접적인 영향요인으로 예측하고 나머지는 초과감쇠 요인으로 반영해야 할 것으로 생각된다.

그래서 발파현장에서는 아래의 식과 같이 미국 광무국에서 제시하고 있는 발파진동 추정식을 인용하여 발파풍압을 예측하고 있는데, 발파풍압에 가장 크게 영향을 미치는 지발당 장약량과 발파지점으로부터 발파풍압 측정 위치와의 거리를 두개의 독립변수로 하고 나머지는 발파를 통해 수집된 결과로부터 회귀분석을 통해 발파풍압을 예측할 수 있다.

$$P = K \left(\frac{D}{W^{\frac{1}{2} \text{ or } \frac{1}{3}}} \right)^n$$

여기서, P: 발파풍압 (kg/cm²=9.8×10⁴ Pa)

D: 폭원으로부터 거리(m)

W: 지발당 최대장약량(kg)

K, n: 상수

이와 같은 발파풍압의 단위를 아래의 식과 같이 사람의 청각보정을 가한 음압수준(dB) 단위로 표시 할 수 있다.

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \text{ dB}$$

여기서, P₀: 사람이 가청할 수 있는 최소 음압 실효치 (2×10⁻⁵ Pa)

P: 대상음압의 음압 실효치

그러나 위와 같은 식은 터널발파에서 전체 발파공수를 무시하고 단순히 지발당 장약량을 기초로 예측할 뿐만 아니라 천공장, 발파당 총장약량, 전색상태, 화약류의 종류 등의 영향요인이 전혀 반영되지 않았기 때문에 발파소음을 예측하는데는 다소 무리가 있다.

미광무국에서 연구한 결과를 보면, 터널발파와 대기중에서 화약이 폭발한 경우의 데이터를 이용하여 환산거리에 따른 발파소음의 전파특성을 그림 1과 같이 log-log 좌표계를 통해 나타내고 있다.

위 그림에서 하한선은 터널발파와 같이 암반중에서 화약이 폭발할 경우 지반진동에 의해 생기는 지반진동음(RPP)을 나타낸 것이고, 상한선은 대기중에서 화약이 폭발하는 경우에는 가장 큰 발파소음을 나타내고 있다.

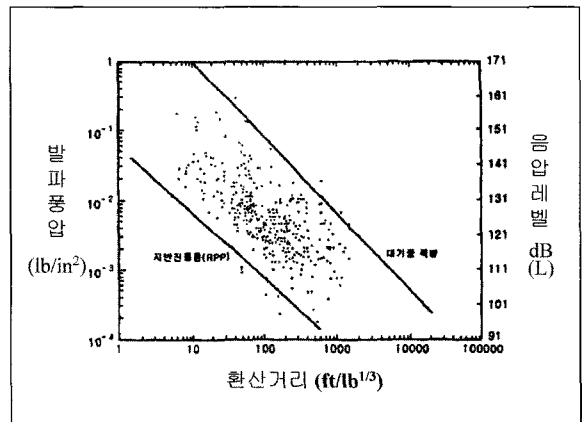


그림 1. 환산거리에 따른 발파소음 측정

2.4 발파소음의 주파수 특성

사람의 귀에 들리는 소음은 특정 주파수의 음만이 들리는 것이 아니라 서로 다른 주파수의 음이 종합되어 들리는 것이다. 또한, 소음은 그 발생원별로 각각 다른 주파수 특성을 가지는데, 소음저감 대책수립을 위해서는 이러한 소음의 주파수 특성을 파악하는 것이 가장 중요하다.

그림 2는 당사 ○○전력구 현장 터널에서 측정점으로부터 213m 떨어진 지점의 발파시에 발생된 소음의 1/1 옥타브밴드 중심주파수별 분석결과 및 향타소음, 도로소음과의 비교이다. 발파소음의 O.A(Over - All) 소음도는 약 117dB(A)로서, 250Hz 대역에서 가장 큰 레벨을 보이고 있으며, 그 밖의 주파수 대역에서는 낮아지는 경향을 나타내고 있다.

특히, 125Hz 대역 및 그 이하의 주파수대역의 음압레벨이 지배적으로 나타나고 있으므로 효과적인 발파소음 방지를 위한 방음시스템의 설계에서는 125Hz 대역 이하의 주파수 대역을 주요 저감대상으로 하는 것이 유리하다고 판단된다.

이는 현재 일반적으로 사용되고 있는 방음시설물(방음벽 등)이 주로 500Hz대역을 기준으로 하고 있는 것을 감안하면, 발파소음 방지를 위한 방음시스템의 설계는 일반 방음시설물과는 다른 별도의 설계가 요구됨을 알 수 있다.

2.5 터널 발파소음 분석

터널의 발파는 공사장 발파중 자유면이 가장 적어 많은 회야량을 필요하게 되어 발파소음 또한 노천발파에 비해 크게 된다. 또한 터널발파의 소음은 막장에서 터널입구까지는 터널이 전파경로의 역할을 할 뿐만 아니라 음압이 분산 또는 소멸되지 않기 때문에 거리 변화에 따른 소음의 감쇠가 거의 일어나지 않는다고 볼 수 있다. 더구나 터널 내부에 설치된 풍관(Duct)과 시설물의 진동으로 2차적인 소음이 증가하는 현상이 발생하기도 한다. 따라서

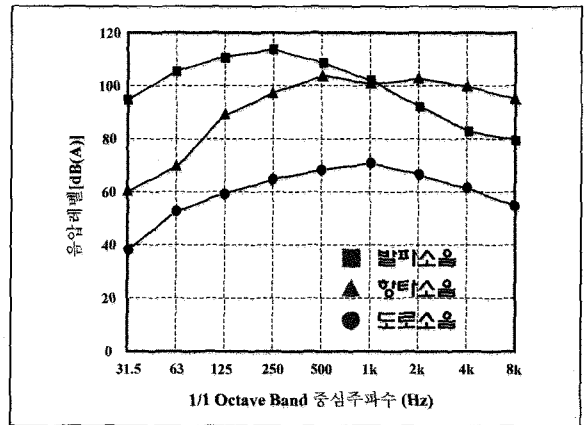


그림 2. 소음원에 따른 주파수특성 비교

터널발파에서의 발파소음 전파특성은 터널 내부에서 측정하는 것은 큰 의미를 갖지 못하고 최소한 주변이 완전히 개방된 자유공간 또는 반 자유공간의 터널 개구부에서 소음을 측정하거나 개구부에서 어느정도 거리를 둔 위치에서 발파소음의 감쇠현상을 파악해야 한다. 당사에서는 터널 발파소음의 전달과정(소음발생원 ⇒ 갱내소음전달 ⇒ 1차소음저감 ⇒ 갱외소음전달 ⇒ 2차소음저감)의 단계별 분석을 통하여 각 과정에서의 영향요소 및 개선방안(표 2)을 도출하고 소음저감을 위한 적절한 방음시스템을 도입, 그 효과를 검증해 보았다.

3. 방음시스템 선정

3.1 방음 재료 선정

도로소음의 경우 1000Hz대역에서 높은 음압레벨 분포를 나타내며 향타소음의 경우 500~2000Hz 대역에서 음압레벨이 높은 것을 알 수 있으나 발파의 경우에는 125~250Hz 대역을 중심으로 음압레벨이 높으므로 저주파대역의 음압레벨 저감이 중요한 요소이다(그림 2).

기존에 적용된 방음 구조는 주파수별 소음 저감량이

표 2. 터널 발파소음 분석

소음 전달과정	소음발생원	갱내소음전달	1차소음저감	갱외소음전달	2차소음저감
영향 요소	- 화약량 - 기폭방식 - 전색정도 - 자유면의 형상	- 단면의형태 및 크기 - 기후조건(온도/풍속) - 거리 감쇠	- 수음점의 음압레벨 - 주파수특성분석 - 방음벽투과손실 - 방음구조/ 형태	- 주변지형의형태 - 기후조건 - 거리감쇠	- 민원대책 - 주변환경 조화 - 방음벽 투과손실
개선 방안	- 정밀설계와 시공관리를 통한 소음 최소화	- 갱내 소음의 거리감쇠에 대한 분석 필요	- 주파수특성 및 투과손실을 고려한 재료의 선정	-	-

500Hz 대역 이상에서 차음효과가 높게 나타나며 특히 기존 갱구부 방음벽의 경우 그 차음효과가 미흡한 것으로 조사되었다. 따라서, 본 고에서는 1999년 LG건설 기술연구소에서 제안·적용한 페타이어재와 적층구조를 이용한 방음시스템 구조를 이용하여 저주파대역의 소음저감에 이용하였다(그림 4).

표 2에서 보는 바와 같이 소음발생원, 갱내외에서의 소음전달, 2차소음 저감 과정에서는 소음 조절이 극히 제한적이거나 효과가 미미한 것으로 분석되었고, 갱문에 방음시설을 설치하여 1차소음을 제어하는 것이 최적의 방안임을 알 수 있다.

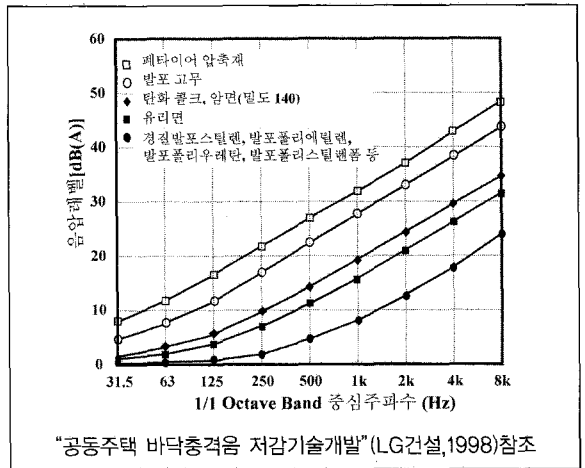


그림 3. 재료별 투과손실 산정결과

3.2 적용 방음시스템의 특징

3.2.1 방음 재료

현재 사용되고 있는 방음 재료에 따른 재료별 투과손실 산정결과는 그림 3과 같다.

그림 3에서 방음재료 중 동일두께에 대한 투과손실은 페타이어 압축재가 가장 컷으며 이는 페타이어 압축재의 면밀도가 높기 때문인 것으로 파악된다.

3.2.2 방음 구조

동일 방음재료의 투과손실을 극대화하기 위해서는 중공층을 형성하는 것이 효과적이다. 중공구조의 경우에는 공명주파수 부근에서 투과손실이 현저하게 저하되는 현

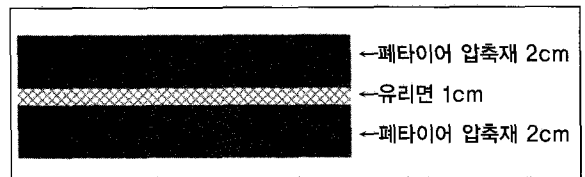


그림 4. 방음시스템 재료 구성

상이 발생한다. 이러한 공명에 의한 투과손실의 방지를 위해서는 암면, 유리면 등을 중공층에 충전시키면 3~10dB정도의 투과손실 개선을 얻을 수 있다. 따라서, 방음구조로서 상기의 페타이어 압축재 2cm를 양면에 설치하고, 중공층에 유리면(Glass Wool)을 1cm삽입한 구조를 선정하였다(그림 4).

4. 방음 시스템 현장 적용

4.1 현장 현황

선정된 방음시스템은 당사 도심지 터널 현장인 국사봉 터널(양녕로)에 적용하였다. 국사봉 터널 주변에는 갱구부를 기준으로 약 50~60m 지점에 민가 및 학교시설이 위치하고 있어 터널 발파시 소음 발생으로 인한 민원 발생이 빈번할 것으로 예상된 지역이다(그림 5).

표 3은 현재 소음 예측에 주로 사용하고 있는 추정식에 의해 예측된 소음도를 나타낸 것이다.

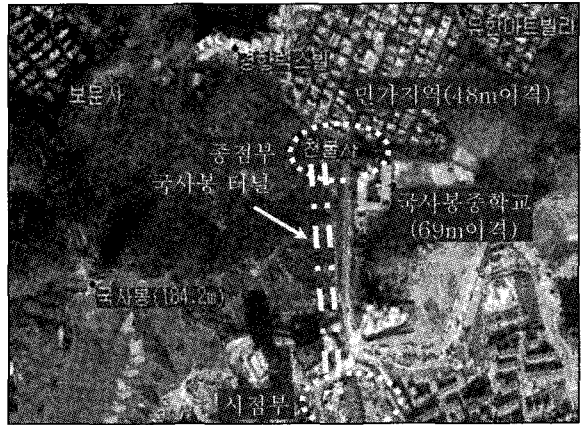


그림 5. 현장 현황

4.2 방음시스템 제작

현장작업 여건을 고려하여 갱구부 전면에 폭 32.0m, 높이 8.3m, 길이 10.0m의 구조로 프레임 제작하였으며 프레임에 부착될 방음판넬 1장의 크기는 시공성과 구조적 안정성을 고려하여 가로/세로 각각 4m×2m의 크기로 제작하였다(그림 6).

제작과정은 먼저 방음판넬 Frame의 제작, 소음저감을 위한 다층구조의 방음판넬 제작, 방음판넬의 조립 및 Frame용접, 기밀성 확보를 위한 우레탄 주입, 강재 Main Frame 제작 및 설치, 방음시스템의 완성순이다. 시스템 전면부에는 누음 방지를 위하여 20mm두께의 고무매트를 적용한 감쇠창을 도입하여 폭풍압이 방음판넬을 손상하지 않고 감쇠창으로 빠져나갈 수 있도록 고안하였다.

5. 방음시스템 효과 검증 및 평가

5.1 대응비교 분석법

비교의 효과를 높이기 위하여 동일조건 실험단위로 쌍을 이루어 측정하는 대응비교분석법(Paired Comparison

표 3. 현장 발파소음 예측

구분	이격거리	소음도1	소음도2
국사봉 중학교	48	89.1dB	94.4dB
민가	69	86.6dB	91.2dB

- 소음도1 : 중앙환경분쟁조정위원회 제안식
- 소음도2 : 반구면파 감쇠현상에 의한 발파소음 감소 예측식
- 지발당 장약량 : 0.5kg/delay

Approach)을 사용하였다. 갱구로부터 80m 전방과 방음시스템에 근접하여 터널내부에 각각 설치한 소음기로부터 터널 내 소음감쇠 효과를 검증하였고, 방음시스템에 근접한 터널 내/외부의 자료로부터 방음시스템의 효과를 비교 분석하였다. 여기에 민원의 대상이 되는 주택가에서의 소음자료를 추가하였다.

대응비교분석법을 통한 소음 데이터 분석 결과, 터널내의 소음 감쇠현상은 80m의 이격거리에 1dB(A)의 정도로서 미미하였다. 방음시스템에 의한 소음 감쇠현상 비교는 통계기법을 사용하여 분석하였다.

5.2 대응표본 통계법

방음시스템의 효과 검증에 관한 대응비교분석을 위하여 대응표본검정을 실시하였으며, 그 결과 방음시스템 안

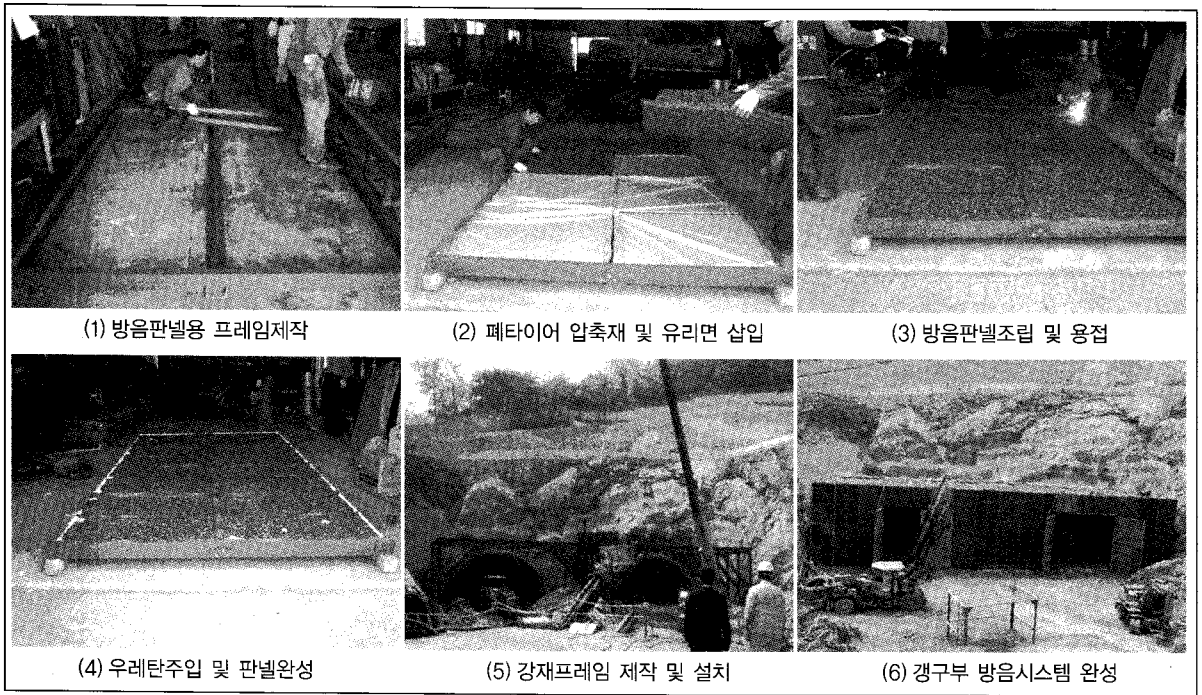


그림 6. 방음시스템(프레임+판넬)의 제작 및 설치

과 밖에서의 소음감쇠 평균의 차가 15dB(A)로써 소음저감효과를 확인할 수 있었고 t-value가 13.30, 유의확률이 0.001로 매우 유의한 차이를 보였다(표 4, 표 5 참조).

5.3 민원주택지역의 소음 비교

실제적인 민원 발생 지역인 주택가 근처에서의 소음을

표 4. 대응표본 통계량

방음시스템	평균	표준편차
설치전	121dB(A)	3.68
설치후	106dB(A)	3.16

표 5. 대응표본 검정

방음시스템	평균	표준편차	차이의 95% 신뢰구간		t-value	유의확률
설치전 - 설치후	15 dB(A)	2.21	하한	상한	13.30	0.001
			11	18		

측정/비교하였으며 시험발파시 91dB(A)로 예측되었던 소음을 76dB(A)까지 저감시킬 수 있음을 확인하였고, 이는 공사장에서의 소음규제기준치인 80dB(A)을 만족시키는 결과라 할 수 있다. 표 6 및 표 7은 민원발생 지역에서 측정한 소음도의 일표본 통계량 및 일표본 검정값이다.

표 6. 일표본 통계량

구분	평균	표준편차
민원주택	76dB(A)	1.53

표 7. 일표본 검정

구분	t-value	유의확률	평균차	차이의 95% 신뢰구간	
민원주택	-16.6	0.001	-15	하한	상한
				-18	-11

6. 맺음말

본 고에서는 당사 양녕로 확장공사 현장의 국사봉터널의 발파소음에 의한 인접지역에서의 민원발생을 사전에 예방하고자 주파수 특성에 맞는 페타이어 및 유리면 적층 구조를 선정하고 현장 적용시킴으로써 인접건물에서의 발파소음에 대한 영향이 거의 없이 원활한 공사를 수행하였으며, 또한 개발 방음시스템에 대하여 기존의 방음문을 이용한 방음시스템과 감쇠 정도를 비교/평가한 결과 약 15dB(A) 이상의 우수한 성능을 확인하였다.

향후 유사한 도심지 터널 공사시 본 방음시스템의 적용에 의해 발파소음관련 민원의 사전 예방이 가능할 것으로 판단되며, 적극적인 활용이 기대된다.

참고문헌

1. LG건설/기술연구소, 1999, 도심지 터널 방음시스템 개발에 관한 연구
2. 한국소음진동공학회, 1995, 소음·진동 편람, pp. 2~145
3. 정일록, 2002, 최신 소음·진동공학, 동화기술
4. 윤해동 외 3인, 1998, "철도소음의 전달 및 감쇠특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집 18권 2호 pp. 955~960
5. 김의간 외 2인, 1991, "다층벽 차음구조물에 대한 음향투과 손실 예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집 제15권 5호, pp. 1522~1529
6. 안명석, 1994, "공사장의 발파소음 진동저감기술", 대한토목학회지 Vol.42 No.5 pp. 43~54