

## 터널 발파소음 예측기법 및 방음 시스템 시공사례



이 태 노  
(주)성보이엔씨 상무이사

### 1. 개요

소음이 사람에게 미치는 피해정도는 개인의 감정이나 분위기에 따라 크게 좌우된다. 사람은 일상생활 속에서 주변에 많은 소음에 항상 노출되어 있으며 경우에 따라서는 사람에게 정신적 피해를 줄 수 있는 소음의 크기로 장시간 노출되어 있는 경우가 많다. 그러나 허용치 이상의 소음에 노출되어 있다 할지라도 특별한 신체적 증상이 없는 것으로 보아 소음의 피해는 어느 정도는 정신적인 것으로 볼 수 있다. 반면에 특정한 환경에 따라서는 소음이 감지되면 수면장애 등의 심리적 불안감을 야기 시키기도 한다. 즉, 사전에 사전 경고도 없을 뿐만 아니라 발생원을 파악하기 어려울 때 발생하는 소음, 진동과 병행해서 발생하는 소음, 사람에게 불안감을 줄 수 있는 소음의 종류에 따라 사람의 반응정도는 다르게 나타난다. 결론적으로 보면, 사람에게 미치는 소음의 크기는 어느 선에 두어야 불평이 없게 되는가는 매우 어려운 일이다. 최 근래 건설 현장에서 발생하는 각종 공사소음으로 민원이 끊임 없이 발생하고 있으며 소송, 분쟁 및 행정조치 등으로 현장이 몹살을 앓고 있다. 이러한 소음 중에서 역시 가장 으뜸은

지반굴착 작업으로 발생하는 각종 소음이 차지하고 있다. 특히 발파소음은 사람에게 불안감을 조성시켜 심리적, 생리적으로 매우 민감하게 발생하게 된다. 발파소음에 대한 각종 규제법이 존재하고 있지만 발파소음에 대한 사람의 반응은 이와는 관계없이 불만과 고통을 호소하고 있는 게 현실이다.

본 고에서는 각종 공사소음 중에서 사람이 가장 민감하게 받아들이고 있는 발파소음의 전파특성과 예측할 수 있는 기법, 그리고 발파소음을 저감 시킬 수 있는 방음 시스템의 시공사례를 소개하고자 한다.

### 2. 발파소음 특성 및 예측기법

#### 2.1 발파소음 특성

발파소음이란 암반 속에 장약된 화약이 폭발하면서 발생하는 소음을 말하는데, 지반 충격과 진동을 통해 발생하는 소리와 공기라는 물질이 압력의 변화를 일으켜 사람에게 감지되는 소리이다. 다시 말해서 발파시 공기를 때

질로 하여 전파되는 파동 중에서 사람의 귀에 들리는 가청영역(20Hz ~ 20000Hz)의 주파수를 가지는 소음과 사람의 가청영역을 벗어나 사람이 들을 수 없는 20Hz 이하의 저주파 진동이 에너지의 손실 없이 멀리까지 전파되어 가옥 등 구조물을 진동시켜 2차적 소음을 발생시키는 것을 통틀어 발파소음 또는 발파풍압이라 한다. 현재 일반화되어 있는 발파작업 과정에서의 발파풍압 생성원인은 ① 발파지점에서 직접적인 암반의 변위로 인한 지반 충격음(APP), ② 발파지점에서 약간 떨어진 곳에서의 진동에 의해 공기로 전달되는 지반 진동음(RPP), ③ 파쇄된 암반의 틈을 통해 분출되는 발파 가스음(GRP) ④ 불완전한 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 저감시킬 수 있다. 특히 발파 가스음은 천공장을 길게 할 경우 폭발 생성 가스의 분출강도가 저하되기 때문에 상당히 줄어든다. 일반적으로 발파소음의 최대크기는 암반 속에서 폭발이 폭발할 경우 발파지점 부근에서 160 ~ 180dB(L) 크기의 음파로 전파되는 것으로 알려져 있다.(한국소음진동공학회, 1997)

## 2.2 발파소음의 거리감쇠 효과 예측기법

소음은 주위의 다양한 매체를 통해 사방으로 전달되며 음원과 수신점 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 국내에서 발파소음의 거리감쇠 효과를 파악하는 방법을 보면, 소음이 전달

되는 대기를 균일한 매질로 가정하여 기하학적인 근사 계산식에 초과감쇠를 보정하는 방법과 발파시 동시에 기록되는 지발당 장약량과 거리요소를 통하여 회귀분석으로 산출된 상관식에 의해 예측하는 방법이 있다.

### 1) 점음원에 의한 발파소음 예측기법

발파작업이 한 지점에서 발생할 경우 소음원은 점음원으로 취급할 수 있다. 이럴 경우 발파소음 감쇠현상은 다음의 식으로 예측할 수 있다. 즉, 자유공간 중에 있는 음향출력 W의 점음원에서 거리 r 만큼 떨어진 점의 음의 강도 I는 반경이 r 인 구면의 표면적  $4\pi r^2$  의 단위면적당 단위시간에 통과하는 에너지 이므로 음향출력 W 와 음의 강도 I는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

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

이것은 음의 세기가 거리의 자승에 반비례 하여 감쇠되는 것을 표시한 것이다. 또한 음압레벨(SPL)과 음향파워레벨(PWL)의 관계를 통해서 무지향성 점음원의 경우 음원으로부터 r 거리만큼 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 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 일반

적으로 100 m 이내에서 균일하게 감쇠하게 되며 100 m 이상에서는 소음의 주파수 영향, 기상영향 및 지면의 상황에 따라 초과감쇠 현상이 나타나 소음이 복잡하게 전달된다.

2) 장약량과 거리의 환산거리에 의한 발파소음 예측기법

발파과정에서 발파소음에 영향을 미치는 직접적인 요인으로서 기폭되는 화약량, 천공장, 최소저항선, 지연시차, 사용되는 화약류의 종류를 들 수있으며, 간접적인 요인으로서 풍향 및 풍속, 지형 및 장애물의 형상을 들 수 있다. 이러한 영향 요소가 모두 반영한 발파소음 예측은 현실적으로 불가능하기 때문에 발파소음은 직접적인 영향요인으로 예측하고 나머지는 초과감쇠 요소로 반영해야 할 것으로 생각된다.

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

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

여기서, P : 발파풍압(Kg/cm<sup>2</sup> = 9.8×10<sup>4</sup> 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 표시할 수 있다.

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

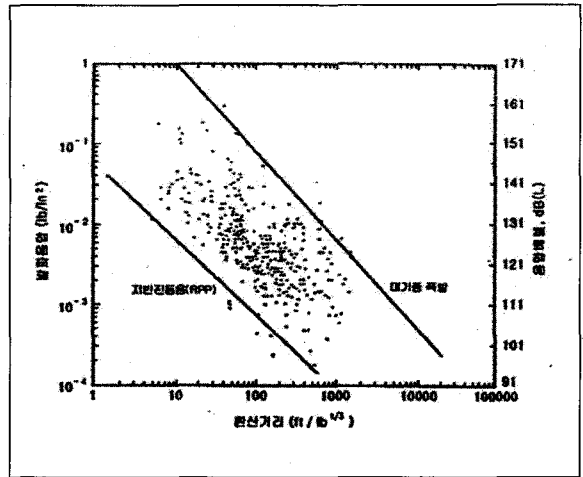


그림 2.1 환산거리에 따른 발파소음 측정결과(미국 광무국)

여기서, P<sub>0</sub> : 사람이 가청할 수 있는 최소 음압 실험치(2 × 10<sup>-5</sup> Pa)

P : 대상음의 음압 실험치

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

미광무국에서 연구한 결과를 보면, 터널발파와 대기중에서 화약이 폭발한 경우의 데이터를 이용하여 환산거리에 따른 발파소음의 전파특성을 그림 2.1과 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.

### 3. 터널발파의 발파소음 측정 및 분석

#### 3.1 개 요

터널 발파시 발파소음의 전파특성을 파악하기 위해서 터널발파가 시작되는 현장중에서 발파소음 전파특성을 비교적 정확히 측정할 수 있는 현장을 선정하여 수회에 걸쳐 발파소음 데이터를 수집 하였다. 터널발파시의 소음은 벤치발파와의 상당한 차이가 있다. 터널발파의 소음은 막장에서 터널입구까지는 터널이 전파경로 역할을 할 뿐만 아니라 음압이 분산 또는 소멸되지 않기 때문에 거리변화에 따른 소음의 감쇠가 거의 일어나지 않는다고 볼 수 있다. 더구나 터널 내부에 설치된 풍관(Duct)과 시설물의 진동으로 2차적인 소음이 증가하는 현상이 발생하기도 한다. 그러나 벤치발파는 소음이 구면상으로 펼쳐지기 때문에 음의 세기가 거리변화의 영향을 받게 된다. 그래서 터널발파에서의 발파소음 전파특성을 터널 내부에서 측정하는 것은 어려울 뿐만 아니라 별 의미가 없다고

볼 수 있다. 그래서 터널발파로 인한 발파소음은 최소한 주변이 완전히 개방된 자유공간 또는 반 자유공간의 터널 갱구부에서 소음을 측정하거나 갱구부에서 어느 정도 거리를 둔 위치에서 발파소음의 감쇠현상을 파악해야 한다.

본 고에서는 터널 발파의 발파소음 전파특성을 정확히 파악하기 위해서 갱구부 막장에서 발파가 이루어지는 현장을 선정하여 발파소음 전파특성을 파악 하되, 갱구부에 방음문을 설치하지 않았을 경우와 방음문을 설치 하였을 때의 경우를 조사 하였다.

#### 3.2 갱구부에 방음문이 없는 경우의 발파소음 전파특성

우리나라 터널공사 현장에서 터널 발파시 갱구부에 방음문을 설치하지 않고 발파하는 경우는 거의 없다. 그러나 일부 현장에서 주변에 민가 또는 구조물이 전혀 존재하지 않는 경우에 방음문 없이 발파를 수행하는데, 이럴 경우는 발파지점으로부터 20여 m 떨어진 곳에 비산방지

표 3.1 발파소음 전파특성 파악 대상 현장 현황

구 분	현 황	비 고
현 장 명	중부내륙고속도로 ○ ○ 현장	
위 치	경북 김천시 아포읍	
발파 지점	갱구부로부터 1.5 m 지점	Ⅱ ~ Ⅲ Type
막장암반상태	RMR : 72 Q value : 4.6	
굴착 단면적	61.719 m <sup>2</sup>	상부단면

표 3.2 발파소음을 측정할 당시의 발파패턴

구 분	현 황	비 고
천 공 장	1,600 mm	
발파공법	V-Cut 발파공법	
사용 화약류	NewMITE(φ32mm) + 비전기식 뇌관	
총 발파공수	111 ~ 114 공	
지발당 최대장약량	5.625 Kg	바닥공
총 장약량	90.7 ~ 92.2 Kg	

용 이동식 가설재를 설치한 후 발파작업이 이루어 진다. 이와 같이 갱구부에 방음문을 설치하지 않고 비산방지용 이동식 가설재만을 설치한 후 발파작업이 이루어진 현장에서 발파소음 전파특성을 조사 하였다. 특히 본 현장은 터널 전방에 직선방향으로 소음전파를 감소시킬 수 있는 방해물이 거의 존재하지 않아 정확한 소음의 전파특성을 파악할 수 있게 되었다. 표 3.1은 발파소음 전파특성을 파악하기 위해서 활용된 현장의 주요 현황이다.

본 현장 주변에는 갱구부 전방 약 200 m 떨어진 지점에 다수인이 거주하는 민가가 존재하고 있지만 터널 입구 위치와 방향으로 볼때 발파공해로 인한 큰 피해는 발생하지 않을 것으로 판단 되었다. 그래서 발파작업시 특별히 방음문을 설치하지 않고 발파작업이 이루어 졌기 때문에 터널발파 소음을 측정하는데 매우 좋은 조건이었다. 표 3.2는 발파소음을 측정할 당시의 발파 패턴이다.

발파소음의 잔파특성을 파악하기 위해서 발파작업은 3차에 걸쳐 이루어 졌으며, 측정거리는 발파막장으로부터 40 m ~ 200 m 지점에서 이루어 졌다. 이때 사용된 장비는 INSTANTEL사 제품인 MINIMATE PLUS 와 BLASTMATE-Ⅲ를 사용하였다. 특히 BLASTMATE-Ⅲ는 300개의 측정 데이터를 입력할 수 있을 뿐만 아니라 감응 주파수 영역이 200 ~ 300Hz로 다른 발파진동 측정기 보다 주파수 범위가 매우 넓다. 또한 발파소음의 특성을 음압의 세기로 측정하기 위해서 소음기준을 PaL 단위로 설정하여 측정 하였다. 그림 3.1은 발파소음 측정에 사용된 BLASTMATE-Ⅲ의 설치된 장면이다.

또한 본 현장에서 총 3차 걸쳐 수행된 발파작업시 다양한

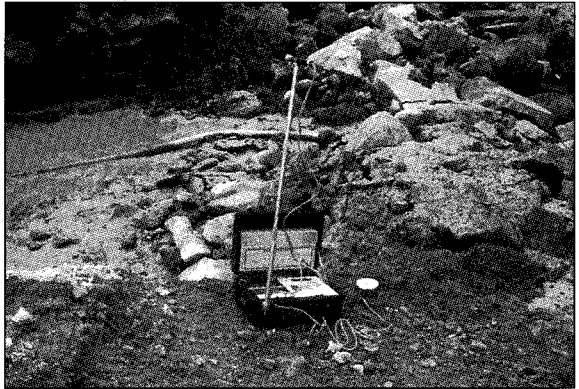


그림 3.1 발파소음 측정에 사용된 BLASTMATE-Ⅲ 의 모습

거리에서 수집된 발파소음 데이터를 보면 표 3.3과 같다.

이와 같이 방음문이 존재하지 않는 상태에서의 터널발파 소음 데이터를 이용하여 미광무국에서 제시하고 있는 발파소음 예측식으로 추정해 본 결과 아래의 식과 같이 산출 되었다.

$$P = 168,091 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.96}$$

다시 위 식을 음압수준(dB)으로 환산하면 아래의 식과 같이 표시할 수 있다.

$$dB = 198.49 - 32.2 \log \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)$$

$$dBA = dB - \text{주파수보정곡선에따른보정값}(A\text{특성})$$

표 3.3 발파소음 수집 데이터

지발당최대장약량(Kg)	총 장약량(Kg)	측정거리(m)	발파소음측정(PaL)
5.625	90.7 ~ 92.2	40	313.3 ~ 328
"	"	50	184.5 ~ 285.0
"	"	60	39.9 ~ 251.7
"	"	70	33.57 ~ 49.0
"	"	200	2.95 ~ 5.02

그러나, 위 식에서 산출된 발파소음 예측식의 상수는 발파소음이 전파되는 방향이 터널의 정면이면서 장애물이 존재하지 않은 순수한 발파소음 데이터를 이용하여 추정된 예측식이기 때문에 발파현장의 주변 상황에 따라 발파소음 감쇠현상이 약간씩 차이는 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 갱구부에 방음문을 설치한 경우의 발파소음 전파특성

일반적으로 터널발파시 갱구부에 방음문 및 차단벽을 설치한 후 발파작업이 이루어진다. 이때 사용되는 방음문의 재료는 주로 부직포, 페타이어, 고무판(벨트콘베어) 등이 주로 사용되며, 차단벽의 재료는 피복 성형강판(E.G.I 판), 폴리프로필렌 방음판 등을 주로 사용한다. 이와 같은 방음문을 터널 갱구부에 설치할 경우에는 파쇄석에 의한 손상을 최소화 하기 위해서 터널이 어느 정도 굴진된 다

음에 설치하게 된다. 금번에 발파소음을 측정할 현장은 발파막장으로부터 10m 구간에 Open Tunnel을 만든 후 갱구부에 방음문을 설치한 후 발파소음을 측정하였다. 표 3.4 는 발파소음 전파특성을 파악하기 위해서 활용된 현장의 주요 현황이다.

또한, 본 현장의 터널은 4차선 터널이기 때문에 상부 전단면 발파가 어려워 상부단면을 4분할 한 후 4회에 걸쳐 발파를 실시 하였다. 표 3.5 은 발파소음을 측정할 당시의 발파패턴이다.

발파소음 측정은 다양한 위치에서 이루어 졌는데, 발파소음의 정확한 전파특성을 파악하기 위해서 터널 전방의 직선방향에 설치한 장비의 발파소음 데이터를 이용하여 전파특성을 파악 하였다. 또한 발파소음 측정은 방음문을 설치하지 않고 발파를 수행한 현장 데이터와 정확한 비교 분석을 위해서 동일 제품인 MINIMATE PLUS 와 BLASTIMATE-Ⅲ 장비를 사용하였다. 표 3.6 은 발파작업시 수집된 발파소음 데이터이다.

표 3.4 발파소음 전파특성 파악 대상 현장 현황

구 분	현 황	비 고
현 장 명	서울외곽순환고속도로 ○ ○ 현장	
위 치	서울시 노원구 상계동	
발파 지점	갱구부로부터 10 m 지점	
방음문 재료	고무판(벨트콘베어)	
막장암반상태	RMR : 71 Q value : 4.0	우수 내지 보통
굴착 단면적	97.46 m <sup>2</sup>	상부단면

표 3.5 발파소음을 측정할 당시의 발파패턴

구 분	현 황	비 고
천 공 장	1,600 mm	
발파공법	V-Cut 발파공법	
사용 화약류	NewMITE(φ32mm) + 비전기식 뇌관	
총 발파공수	40 ~ 50공/발파당	총 174 공
지발당 최대장약량	3.125 ~ 5.625 Kg	중앙부 확대공
총 장약량	15.65 ~ 28.5 Kg/발파당	

방음문을 터널 갱구부에 설치하고 발파소음을 측정한다. 결과 발파소음이 감소되는 현상이 뚜렷하게 나타났는데, 터널발파의 소음 데이터를 이용하여 미광무국에서 제시하고 있는 발파소음 예측식으로 추정해 본 결과 아래의 식과 같이 산출되었다.

$$P = 11,538 \left( \frac{D}{W^{2/13}} \right)^{-1.72}$$

마찬가지로, 위 식을 음압수준(dB)으로 환산하면 아래의 식과 같이 표시할 수 있다.

$$dB = 15.22 - 34.4 \log \left( \frac{D}{W^{2/13}} \right)$$

위 식에서 산출된 발파소음 예측식의 상수는 본 현장의 방음문의 재료와 발파조건을 근거로 산출하였기 때문에 방음문의 재료 특성과 현장상황에 따라 약간씩 차이는 있을 것으로 판단된다.

### 3.4 터널발파의 발파소음 감쇠현상 분석 및 예측

터널 발파시 방음문 설치시와 방음문을 설치하지 않았을 때와 비교분석한 결과 발파소음 감쇠현상이 두드러지

게 나타나고 있음을 알 수 있다. 터널 갱구부에 설치되는 방음문의 재질을 두께가 10mm 인 고무판과 부직포를 이용할 경우 방음문을 설치하지 않았을 때보다 표 3.7과 같이 약 15 dBA가 감쇠되고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 발파소음이 터널 갱구부에 방음문을 설치하였음에도 불구하고 50 m 지점에서 발파소음 규제치(80 dBA 기준으로 할경우)보다 27.3 dBA를 초과하는 것으로 나타났다. 다시 말해서 터널발파 지점으로부터 50 m 지점에 발파소음의 피해가 우려되는 민가 및 축사가 존재할 경우에는 별도의 가시설 방음벽을 설치해야 한다. 국내 자동차 통행도로 및 공사현장에서 설치하고 있는 각종 방음벽 구조 및 재질을 발파소음 저감을 위한 가시설 방음벽으로 활용할 경우에는 상당히 발파소음을 저감할 수 있을 것으로 보인다. 표 3.8 과 3.9 는 국내 연구기관에서 조사한 방음벽 형태 및 재질별 소음의 투과손실을 나타낸 것이다.

또한 터널 갱구부에 방음문을 설치하지 않았을 경우, 발파소음 예측 경험식으로 소음의 감쇠현상을 살펴보면 발파소음이 전파되는 경로에 특별한 장애물이 없을 때는 거리변화에 따른 감쇠현상은 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그러나 점음원에 의한 반자유공간에서의 음압 레벨 예측식과 비교해 보면 단거리에서는 발파 소음값이 비

표 3.6 발파소음 수집 데이터

지발당최대장약량(Kg)	총 장약량(Kg)	측정거리(m)	발파소음측정(PaL)
3.125 ~ 5.625	15.65 ~ 28.5	30	33.5 ~ 87.2
"	"	50	17.8 ~ 36.8
"	"	70	2.6 ~ 4.85
"	"	110	1.12 ~ 3.39

표 3.7 방음문 설치에 따른 소음감쇠 효과

방음문 설치여부	설치할 경우시	설치하지 않을경우	비 고
지발당 최대장약량	5.625 Kg	5.625 Kg	
측정거리 기준	50 m	50 m	
평균 발파소음	91.6 dBA	107.3 dBA	주주파수대:50Hz 내외
발파소음 감쇠효과	△ 15.7 dBA		

표 3.8 방음벽 형태별 소음의 투과손실 비교표(대한주택공사, '98)

구 분	AL 방음벽 방음벽	경량콘크리트 방음벽	차음 슈트 방음벽	EGI 방음벽	폴리프로필렌 방음벽
특 성	- 흡음, 차음 효과 우수 - 미관 우수	- 내구성, 차음 효과 우수	- 중량 가벼움 - 차음효과 미흡	- 흡음효과 미흡	- 흡음효과 우수
투과손실 (500Hz)	30 dB	36.7 dB	25 dB	25 dB	25.9 dB

표 3.9 방음벽 재질별 소음의 투과손실 비교표(환경부, '97)

재 질	철 판	알루미늄	유 리	합 판	콘크리트블록
두께(mm)	1	1.2	10	12	100
면 밀도(Kg/m <sup>2</sup> )	5.9	1.71	25.0	8.0	160
투과손실 (125Hz ~ )	28 dB	18 dB	31 dB	22 dB	28 dB

표 3.10 예측별 거리별 발파소음 감쇠효과

구 분	점음원에 의한 음압레벨 예측식 기준	발파소음 예측 경험식 기준	비 고
예 측 식	$SPL = PWL - 20 \log r - 8$	$dB = 198.49 - 39.2 \log \left( \frac{D}{W^{1/13}} \right)$	PWL : 180dB
30 m 기준	142.4 dB	149.7 dB	W : 5Kg 경우
200 m 기준	125.9 dB	117.4 dB	
감쇠 효과	△ 16.5 dB	△ 32.3 dB	

숫하게 나타난 반면 거리가 멀어질수록 금번 현장시험을 통해 산출된 발파소음 예측 경험식에서 감쇠현상이 두드러지게 나타나는 것으로 파악 되었다. 표 3.10 은 점음원에 의한 반자유공간에서의 음압레벨 예측식과 금번 현장 시험을 통해 산출된 발파소음 예측 경험식에 의한 거리별 감쇠효과를 나타낸 것이다.

발파소음 전파특성을 위한 현장시험을 통해 산출된 발파소음 예측 경험식으로 국내 터널발파에서 적용하고 있는 일반적인 발파패턴을 기준으로 하여 방음 시스템에 따라 거리별 발파소음 예측을 종합해서 추정해 보면 표 3.11 과 같다.

### 3.5 발파공수 변화에 따른 발파소음 전파특성

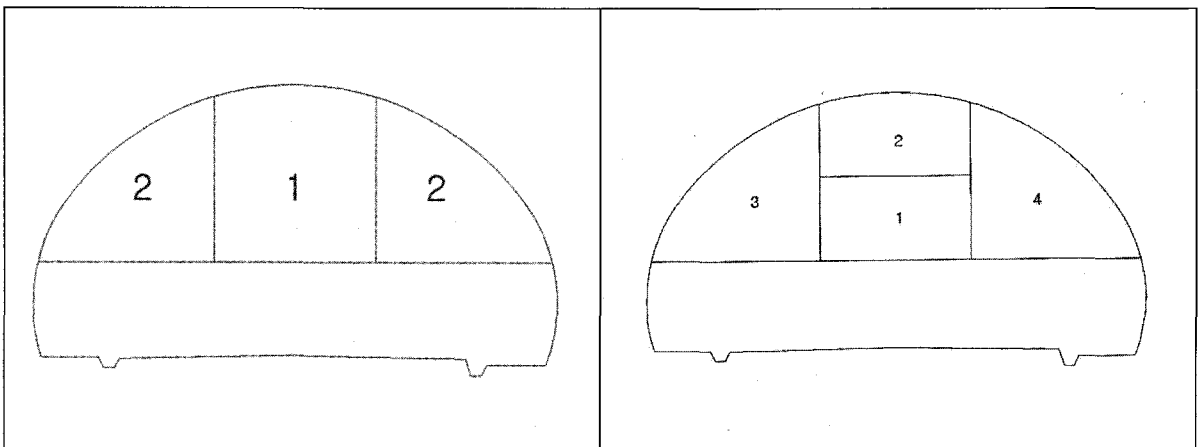
터널발파시 기폭되는 장약공수에 따라 발파소음의 전파 특성의 변화를 확인하기 위해서 천공장을 동일하게 하고 발파단면을 달리하여 발파소음을 측정 하였다. 발파측정 위치는 동일한 거리와 동일한 장비를 사용하여 측정 하였다. 그림 3.2 는 본 현장의 터널단면을 상, 하로 분할하고 다시 상부단면을 3단면 내지 4단면으로 분할한 모습이다.

다시말해서 터널 상부단면을 3분할하여 발파를 실시하고, 이를 다시 상부단면 중앙부를 세분하여 4분할 한 후 발파를 실시 하였다. 그래서 상부단면 중앙부의 분할에 따라 1회 발파공수가 달라지는데 각각 4회에 걸쳐 시험발파가 이루어 졌다. 그 결과 1회 발파공수가 다를 경우 발



표 3.11 방음 시스템에 따른 거리별 발파소음 예측

방음 시스템	지발당 최대 장약량(Kg)	거리별 발파소음 예측(dBA)				
		50 m	70 m	100 m	150 m	200 m
미 설치	1.0	101.8	96.1	90.0	83.1	78.2
	3.0	108.0	102.3	96.2	89.3	84.4
	5.0	110.9	105.1	99.1	92.2	87.3
	7.0	112.8	107.1	101.0	94.1	89.2
방음문 설치 (고무판)	1.0	86.7	81.7	76.4	70.3	66.0
	3.0	92.2	87.1	81.8	75.8	71.5
	5.0	94.7	89.1	84.3	78.2	73.9
	7.0	96.4	91.4	86.0	80.0	75.7
방음문+방음벽 설치 (고무판+EGI판)	1.0	66.7	61.7	56.4	50.3	46.0
	3.0	72.2	67.1	61.8	55.8	51.5
	5.0	74.7	69.1	64.3	58.2	53.9
	7.0	76.4	71.4	66.0	60.0	55.7
예측조건	- 발파소음 예측식 · 방음문 미설치 : $dB = 198.49 - 39.2 \log\left(\frac{D}{W^{1/13}}\right)$ · 방음문 설치 : $dB = 175.22 - 34.4 \log\left(\frac{D}{W^{1/13}}\right)$ - dBA = dB - 주파수 A 특성 보정값(50Hz 내외기준- 30 적용) - 가시설 방음벽(E.G.I) 설치시 투과손실 : - 20dB 적용 - 1회 발파당 총 화약량, 발파시간, 화약류 특성요소는 미 고려 - 장애물에 의한 초과감쇠 효과 배제					



(상부단면 3분할발파)

(상부단면 4분할 발파)

그림 3.2 본 현장 터널단면의 분할한 모습

표 3.12 터널 상부단면 중앙부 분할에 따른 발파패턴

구 분		단면적 (㎡)	천공장 (m)	공당장약량 (Kg)	장약공수 (공)	지발당장약량 (Kg)	총화약량 (Kg)
상부단면 4분할 발파	중앙하부	20.34	1.5	0.625	43	0.75	27.5
	중앙상부	17.76	1.5	0.625	35	0.625	18.575
상부단면 3분할 발파	중앙부	38.1	1.5	0.625	76	0.75	53.95

표 3.13 터널 상부단면 중앙부 분할에 따른 발파소음 측정결과

구 분		측정거리	발파소음(dBA)	비 고
중앙부 2분할 발파	중앙하부	70 m	65.0 ~ 77.7	심발공 존재
	중앙상부	70 m	63.8 ~ 76.0	확대공
중앙부 전체 발파	중앙부	70 m	77.6 ~ 83.0	심발공 + 확대공

파소음 또한 상당한 차이가 나타났음이 확인 되었다. 표 3.12는 발파단면 분할에 따른 발파패턴이다.

일반적으로 발파소음은 지발당 장약량에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있으나, 금번 시험발파 결과 1회 발파당 발파시간 및 총 화약량에 상당한 영향을 받는 것으로 확인 되었다. 즉, 상부단면 중앙부를 2분할 하여 순차적으로 발파시킨 경우와 중앙부 전체를 발파시킨 결과가 표 3.13과 같이 도출 되었다.

위의 경우를 보면 상부단면 중앙부를 2분할 하여 1회 발파공수 및 장약량을 적게하여 발파하였을 때 중앙부 전체를 일시에 발파하였을 때보다 발파소음이 동일한 거리에서 약 7 dBA 정도 저감되어 약 10% 정도 작게 나오는 것으로 분석 되었다. 이와 같이 발파소음은 지발당 장약량에도 영향을 받지만 발파시간과 총 장약량에 의해서도 영향을 받는 것으로 확인 되었다.

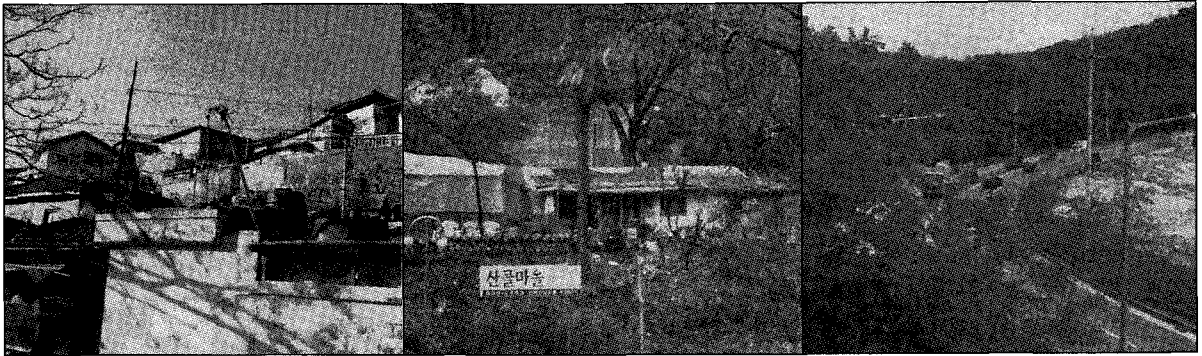
## 4. 터널 발파소음 방음 시스템 시공사례

### 4.1 현장 현황

본 현장은 3.3장에서 기술한 현장으로서 서울시 상계동

에 위치하고 있으며 수락산을 관통하는 터널현장이다. 현 장주변에는 차량이 많이 통과하는 도로가 인접해 있고 다수인이 거주하는 민가, 화훼농장, 그리고 주차장이 존재하고 있다. 이 중에서 상계4동 주택지는 건축연도가 상당히 오래된 낡은 가옥이 주종을 이루고 있으며, 다수인이 존재하고 있을 뿐만 아니라 이미 가옥과 담 벽에는 기존 균열이 형성되어 있기 때문에 민원이 야기될 가능성이 있었다. 특히 상계4동 민가는 발파지점으로부터 최단거리로 70 m 정도밖에 떨어져 있지 않기 때문에 발파진동 및 소음으로 인한 직접적인 피해가 예상되었다. 또한 주변에 있는 동막골 유원지는 많은 행락객이 왕래할 뿐만 아니라 사람이 상시 거주하고 있기 때문에 발파소음을 저감해서 민원을 최소화 해야 하는 현장이다. 그리고 터널입구 정면에는 상계동에서 별내면으로 연결되는 지방도로가 존재하는데 주야간에 많은 차량이 통행하고 있다. 그림 4.1는 본 현장 주변에 존재하고 있는 도로 및 보안물건의 모습이다.

본 현장 터널의 지질은 대보 화강암이 기반암으로 형성하고 있으며 갱구부 구간암반은 풍화암 내지 보통암 상태로 나타난다. 본 현장 수락산 터널 종점부의 시추결과(TB7 ~ TB8)로 확인된 암반의 공학적 특성을 보면 표 4.2와 같다.



(상계4동 마을)

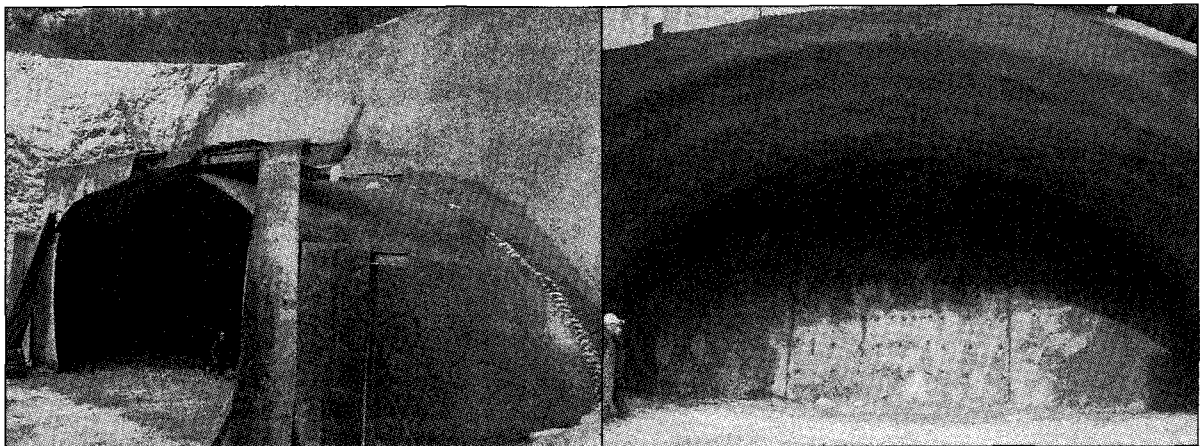
(동막골 유원지)

(도 로)

그림 4.1 본 현장 주변에 존재하는 보안물건의 모습

표 4.2 수락산 터널 종점부 시추결과 확인된 암반의 공학적 특성

지표심도(m)	암 종	탄성파속도(P파)(m/sec)	일축 압축강도(Kg/cm <sup>2</sup> )	영률10 <sup>-3</sup> (Kg/cm <sup>2</sup> )
26.9 ~ 27.25	화강암	2,910	1,280	5.16
26.9 ~ 27.25	화강암	2,650	1,200	5.67
26.75 ~ 27.60	화강암	3,840	1,350	4.82
26.75 ~ 27.60	화강암	3,330	1,110	6.43



(외부의 모습)

(내부의 모습)

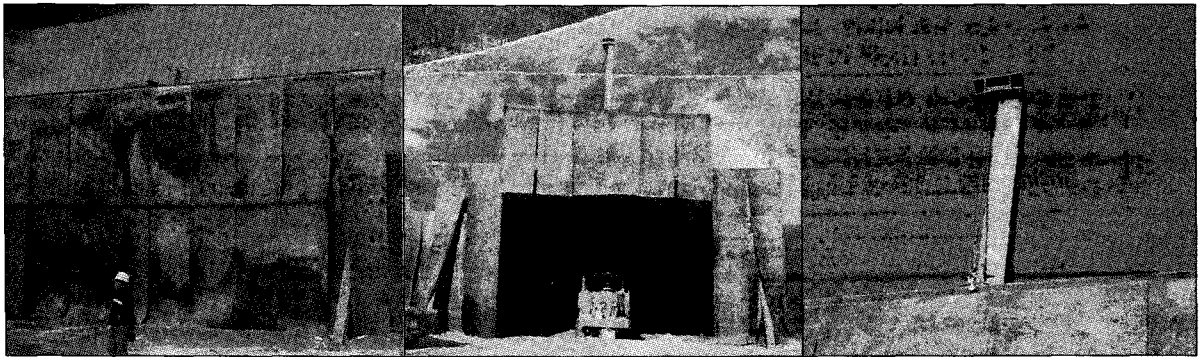
그림 4.2 터널 갱구부에 설치된 Open Tunnel의 모습

이와 같이 보안물건이 터널 주변에 많이 배치되어 있고, 기반암은 매우 단단한 화강암류로 분포되어 있을 뿐만 아니라 터널 굴착단면이 매우 크기 때문에 발파작업으

로 인한 소음이 크게 발생할 것으로 예상되어 발파소음 저감을 위해서 특수한 형태의 방음 시스템을 설치하여 소음을 저감하게 되었다.

표 4.3 Open Tunnel 과 방음문에 투입된 자재의 자원과 특성

구 분	자 재 명	규 격	용도종류 및 특성
Open Tunnel	강지보	150×150×7	
	압축 스티로폼	50mm	흡음재
	압축 벚짚	50mm	
	Wire Mesh	100×100mm	
	Shotcrete	$\delta bk = 45\text{Kg/cm}^2$	차음재
방 음 문	H 형강	300×300×10	
	강지보	150×150×7	
	고무판(벨트콘베아)	t = 13mm	차음재
	부직포	-	흡음재
	전동 Winch	20 HP	방음문 개폐용



(방음문 폐쇄장면)

(방음문 개방장면)

(Winch 설치장면)

그림 4.3 현장에서 사용된 방음문의 작동 상태

## 4.2 방음 시스템 구조 및 특성

터널발파 소음을 저감시키기 위해 설치된 방음 시스템은 첫 번째 발파작업부터 설치 되어야 하나 화약 기폭시 발생하는 풍압과 파쇄석의 이동으로 인하여 갱구부에 직접 설치할 수 없다. 그래서 본 현장에서는 터널 갱구부 전방에 Open Tunnel을 만든 후 입구에 방음 시스템을 설치 하였다. Open Tunnel은 그림 4.2와 같이 터널 막장 임반으로부터 전방으로 15 m 지점까지 설치 하였으며, 이때 투입된 자재는 표 4.3과 같다.

Open Tunnel은 터널 단면크기와 형상대로 구축 하였

는데 발파소음 저감효과를 극대화 시키기 위해서 차음효과와 흡음효과가 동시에 이루어 질 수 있도록 제작 되었다. 또한 터널입구에 설치된 방음문은 Steel Beam으로 만든 다음 자동적으로 개폐가 가능하도록 하였다. 표 4.3은 Open Tunnel과 방음문에 투입된 자재의 자원과 특성을 나타낸 것이다.

방음문은 Winch를 이용하여 자동적으로 개폐 되도록 하였는데, 발파시 상부에 매달린 고무판을 바닥까지 내리고 발파 후 고무판에 부착된 로프와 Winch를 이용하여 방음문을 개방 시켰다. 그림 4.3은 현장에서 사용된 방음문의 작동 상태이다.

### 4.3 발파소음 측정 및 저감효과

본 현장 터널 갱구부 입구에 Open Tunnel을 구축하고 방음문을 설치한 결과 발파소음이 방음문을 설치하지 않았을 때보다 동일 측정거리에서 약 15 dBA 정도 저감되고 있음을 알 수 있다(본 보고서 3.3 장 참조). 또한 발파 지점에서 70 m 떨어진 주변에 존재하는 민가위치에서 발파소음을 측정된 결과 75 dBA 내외로 측정되었으며, 180 m 지점에서 66 dBA 내외로 측정 되었다. 그러나 천공장이 증대할 경우 지발당 장약량 및 총장약량이 증가하게 되면 발파지점으로 부터 70 m 거리에서는 허용치를 초과할 것으로 예상되어 별도의 가시설 방음벽을 설치해야 할 것이다.

## 5. 맺음말

발파소음은 공기매체를 통해 사방으로 메카니즘에 의해 소리가 감쇠된다. 발파지점으로부터 발생한 소음은 기하학적으로 확산되기 때문에 거리변화에 따라 감쇠되는 것이 일반적이지만, 발파현장에서 소음의 전파특성을 파악한 결과 단순히 거리변화에 따른 소음감쇠 효과보다 각종 지장물 및 방음 시스템 상황에 의한 초과감쇠 효과가 월등히 크다는 것을 확인하게 되었다. 특히 터널 갱구부

에 방음문을 설치할 경우가 방음문을 설치하지 않을 때 보다 동일거리에서 발파소음이 약 15 dBA 정도 저감되는 것을 확인하게 되었다.

터널발파의 발파소음은 지발당 장약량의 영향뿐만 아니라 발파당 총 장약량 및 발파시간에도 영향을 받는 것으로 확인 되었는데, 1회 발파당 장약량이 18 Kg일때의 발파소음이 발파당 장약량이 54 Kg 때보다 약 7 dBA 정도 작게 감지되는 것으로 확인 되었다.

또한 현장시험을 통해 산출된 발파소음 예측 경험식은 기존의 발파소음 예측식과 단거리에서는 비슷하게 감쇠되었으나, 발파지점으로부터 거리가 멀어질 수록 소음이 상대적으로 감쇠현상이 두드러지고 있음이 확인 되었는데, 향후 터널발파 현장에서 발파작업 전에 설계된 발파 패턴으로 발파소음이 감쇠효과를 예측할 수 있는 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. 김희강 외(1991), 최신 소음진동학, 동화기술
2. 정일록(1988), 소음진동이론과 실무, 신광문화사
3. 한국소음진동공학회(1997), 소음으로 인한 피해의 인과관계 검토기준 및 피해액 산정 방법 관한 연구, 환경부
4. 대한주택공사(1998), 건설공사장 소음도 평가 및 예측기법 개발연구