

# 터널 발파에서 방음재질을 고려한 방음문 개발에 관한 연구

## Development of Noise-proof Facility Considered with Soundproofing Materials in a Tunnel Blasting

정재형<sup>†</sup> · 원연호<sup>1)</sup>

Jeoung, Jae-Hyeung · Won, Yeon-Ho

**ABSTRACT** : This study investigated a sound reduction degree by each soundproofing materials and the sound pressure level of a main frequency range to develop soundproofing facilities installed for reducing sound in a tunnel blasting. The frequency range and sound pressure level of soundproofing materials(eg. sand and water etc.) mainly used at a working spot were measured using the experimental apparatus considered with blasting situation. The full scale pilot test was also carried out using developed soundproofing facilities in this study. And the performance of developed soundproofing facilities was analyzed. As a result, the developed soundproofing facilities using water in sound insulation materials could reduce about 10dB(A) of blasting noise in compare with the existing soundproofing facilities.

**Keywords** : Tunnel blasting, Soundproofing facilities, Sound pressure level, Main frequency

**요지** : 본 연구는 터널발파에서 소음저감을 목적으로 설치되는 방음시설 개발을 위하여 현장에서 주로 사용되는 방음재와 물, 모래 등을 이용하여 각 재질에 따른 소음저감효과를 판단하였다. 최대 소음레벨과 주파수의 범위를 측정하여 방음재질별 소음감쇠도와 주파수 대역의 음압레벨을 고찰하였다. 그리고, 방음재료 분석의 결과를 반영하여 물과 스펀지 등으로 채운 개량형 워터튜브 방음문과 기존 스펀지 부직포 등으로 채운 방음문을 축소 제작하여 화약을 사용하여 실험형 현장실험을 통한 검증을 하였다. 그 결과 물을 차음재료로 사용한 경우에 기존 방음문에 비해 약 10dB(A) 정도의 소음 저감효과를 나타내었다.

**주요어** : 터널발파, 방음시설, 소음레벨, 주파수

## 1. 서론

우리나라에서의 터널 건설은 암반이 많은 지질적 조건 때문에 발파를 이용하여 굴착을 하는 경우가 많다. 이 경우에 적절한 저감대책을 세우지 않으면 필연적으로 진동과 소음으로 인하여 건설현장 주변에서 환경민원을 발생시키기도 한다. 발파진동의 처리에 있어서는 국토해양부의 잠정지침등이 제시되어 적절하게 대처되고 있으나 발파소음의 경우에는 일회성 충격소음으로서 현장에서 환경부의 기준을 지키면서 시공하기에는 많은 어려움이 있기도 하다. 특히 터널 내에서 발생하는 발파음은 집약적인 발파풍압으로 전파되어 터널 내부에서 에너지가 저감되지 않고 갱구를 통하여 집중적으로 방향성을 가지고 더 멀리 전파되어 환경적인 영향을 초래하기도 한다(노상립, 2004).

국내외적으로 터널발파 소음 저감을 위한 방법들은 다양하게 적용되고 있으나, 본 연구에서는 발생된 발파 소음을

방음재 등을 이용하여 갱구에서 차단하는 방법에 대하여 연구하였다. 특히 복합재질을 방음재로 사용하기 위하여 방음재료에 대한 실험 및 평가를 수행하였으며, 방음재질별 두께에 따른 차음 및 방음 성능을 평가하기 위하여 소음레벨의 크기와 주파수 대역을 측정하여 비교하고, 도출된 방음재료에 대하여 실제로 폭약을 사용한 실험형 모형터널에서 검증하였다.

## 2. 기본이론 및 방음문 재료 평가 실험

### 2.1 발파소음의 생성원인 및 일반적 특성

발파소음은 공기 중에서 발생하는 파동이 발파원 근처에서는 충격파의 형태(폭풍압)를 가지며, 발파원으로부터 일정한 거리(임계거리) 이상에서는 음파로 전달된다. 음압이 180dB 이하의 경우를 음파로 정의하며 발파 작업 시 초기

† 정희원, 한국건설기술연구원, 수석연구원(E-mail : jjhcvil@kict.re.kr)

1) 비회원, 원앤비 기술사사무소 소장

발생되는 충격파가 음파로 변화되는 거리까지를 임계거리로 표현한다. 폭약을 TNT로 사용했을 경우에 충격파에서 음파로 이행되는 임계거리와 폭약량과의 관계는 표 1과 같다.

일반적으로 발파 폭발압은 넓은 범위의 주파수를 가지고 있으며, 0.1~200Hz 범위의 주파수가 중심이 된다. 이 범위 중 20Hz 이상의 발파폭압은 사람이 들을 수 있는 가청영역의 소음이 된다. 발생한 소음 중에서 약 100Hz 이하의 저주파 소음은 사람의 가청영역을 벗어나 사람이 들을 수는 없지만 비교적 먼 거리까지 에너지의 손실없이 전파하는 특성이 있고, 가옥 등 구조물을 진동시켜 2차 소음을 발생시킨다. 우리나라에서는 가청영역의 소음과 저주파 파동을 통틀어 발파폭압으로 표현하는데 일본과 같은 경우에는 엄격한 의미에서 가청영역의 소음과 저주파음을 구별하여 기준을 정립하여 사용하기도 한다. 그리고 맹금류 및 가축의 경우에는 사람의 인체를 대상으로 하는 환경기준의 탁월주파수 영역보다 주파수 50Hz 이하의 저주파수 영역에서의 음압이 클 경우에 불쾌감 및 불편증을 유발시킨다고 보고되고 있다.

발파작업 과정에서 발파폭압의 생성원인은 다음과 같은 4가지 형태로 구분되어 진다(기경철 등, 2002).

- ① 발파지점에서 직접적인 압반의 변위로 인한 공기압력파(지반충격음 또는 발파면음, Air Pressure Pulse, APP)
- ② 지반진동에 의해 공기로 전달되는 파(지반진동음, Rock Pressure Pulse, RPP)
- ③ 파쇄된 암반의 틈을 통해서 나오는 가스의 분출(발파가스음, Gas Release Pulse, GRP)
- ④ 불완전한 전색에 의해 전색물이 분출되면서 나오는 가스의 분출(Stemming Release Pulse, SRP)

일반적인 발파에서 발생하는 저주파음의 대부분은 공기압력파(APP)에 의한 것이 대부분으로서 발파 방음문의 설치로 소음확산을 막을 수 있다. 소규모 발파나 부적절하게 설계된 발파에서는 ③, ④의 영향도 크게 나타나지만, 이것들은 적절한 발파설계에 의해 비교적 손쉽게 제어할 수 있다.

방음문을 시공한 후 새어나오는 발파음을 측정함에 있어서 기후(대기의 온도분포, 풍향, 풍속 등) 및 지형과 숲, 벽,

표 1. 충격파로부터 음파로 이행되는 임계거리(TNT 경우)

| 약량(kg) | 임계거리(m) |
|--------|---------|
| 1      | 3.3     |
| 10     | 7.5     |
| 100    | 15.0    |
| 1000   | 33.0    |

건물 등에 의한 차폐성의 영향을 받을 수 있다. 특히 기온과 지표와 대기의 상이한 온도분포는 발파 소음의 전달경로를 왜곡시켜 파가 집중 또는 분산되도록 할 수 있으며, 지표보다 높은 고도에서 온도가 상승하는 대기역전의 경우에는 파로가 지표 쪽으로 휘게 되고 소음은 지상에 집중될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 충분히 정온한 곳에서 실험을 수행하도록 노력하였으며 본 실험을 단시간에 실시하여 이러한 오차를 줄일 수 있도록 노력하였다.

## 2.2 방음문 재질 평가 실험

### 2.2.1 방음재질 평가 실험 개요

본 실험에서는 방음 재료 분석용 터널 및 실험기구에 각각의 방음재료를 규격별로 실험장치에 부착하여 밀폐상태를 동일하게 한 후, 전기뇌관으로 소음을 발생시켰다. 발생소음의 크기를 일정하게 하기 위해 일반 산업용 폭약의 기폭에 사용되는 순발 전기뇌관을 사용하였으며, 전기뇌관만으로도 방음재를 설치하지 않으면 상당 거리에서 120dB 이상의 소음이 측정되어 본 실험에서 충분히 신뢰성을 가지고 적용될 수 있었다.

방음재가 부착되지 않는 개방상태의 최대소음레벨(dB(A))과 주파수의 범위 음압레벨(dB)을 측정하고 각 방음재질을 종류와 규격별로 부착하여 소음레벨과 주파수의 범위의 음압레벨을 각 3회씩 측정하여 평균한 후 상대비교 하였다. 소음계의 측정위치는 그림 1과 같이 소음원의 크기 및 계측기의 측정범위를 고려하여 10m, 20m의 근거리에서 설치하였다.

본 실험에서는 발파소음을 터널과 유사하게 발생시키기 위하여 그림 2와 같이 원형 콘크리트 흙관(T60mm, φ600mm, L3000mm)을 사용하여 한 쪽면은 모래주머니를 쌓아 차단하고 가운데 부분에 소음원을 제공할 수 있는 파이프를 설치하였으며 다른 한쪽은 방음재를 설치할 수 있도록 제작하였다.

본 실험에 이용된 소음측정기는 실시간 적분형 소음전용

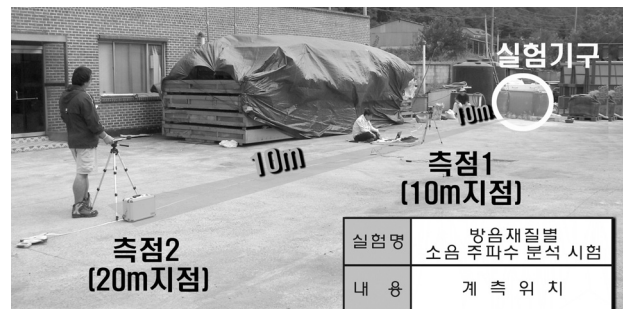
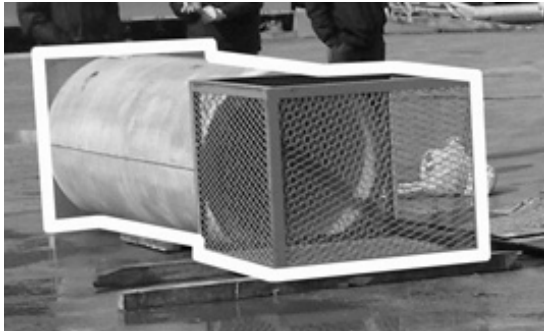


그림 1. 방음문 재료 평가 실험개요



(a) 복합재료 방음재질 고정틀



(b) 물 방음재(워터튜브) 고정틀



(c) 실험기구 후면

그림 2. 방음재료 분석용 터널

측정기 SC-310(환경부 형식승인번호 : NESM-74)로서 적분형 소음계 기능과 주파수 분석 기능을 함께 갖추고 있으며, 120dB의 넓은 동적계측범위를 갖추고 있다. 또한 등가소음레벨(Leq), 최대소음레벨(Lmax)등을 동시에 측정하며 측정된 각각의 값들은 A보정, C보정 및 Fast, Slow, Impulse에 해당하는 값으로 동시에 저장 및 편집이 가능하다. 본 연구에서는 환경부의 소음, 진동 공정시험기준에 적합하게 소음계의 동특성을 빠름(fast)모드로 하여 발파소음의 최대소음레벨을 측정하였다.

재료 평가 실험에 사용된 방음재의 종류는 표 2에 정리하였다. 물, 모래, 스펀지, 인조솜, 압축벼단, 스티로폼, 왕겨, 고무판, 천막 등이며 규격(두께)은 각각 10cm, 30cm, 50cm로 하였다. 고무판과 천막의 경우에는 일반적으로 많이 사용되는 제품을 사용하였다. 물을 방음재료로서 채용하기 위해서 폴리비닐 재질을 사용하여 물을 넣어서 일정 두께의 방음재 형상을 유지하는 튜브형상의 용기인 워터튜브를 제작하여 그 속에 물을 주입하여 실험하였다.

### 2.2.2 방음재질 평가실험 결과 및 분석

#### 1) 방음재질별 소음 감소 측정 및 결과분석

모형터널 방음문에서 10m와 20m의 이격거리 지점에서 방음재를 부착하지 않은 개방상태와 방음재를 재료별로 부착한 상태에서의 최대소음레벨을 측정하고 소음저감 능력을 비교하였다. 그림 3에서는 각 측정에서의 방음재질별 소음저감능력을 나타내었다.

소음레벨 측정값은 방음재질별로 각 3회를 측정하여 식 (1)을 사용하여 평균하였다(정일록, 1999).

표 2. 실험에 사용된 방음재질의 종류와 규격

| 방음재질         | sample No. | 규격 (두께) | 비 고  | 방음재질     | sample No. | 규격 (두께) | 비 고 |
|--------------|------------|---------|------|----------|------------|---------|-----|
| 천막 (1)       | 1-1        | 2mm     |      | 압축벼단 (5) | 5-1        | 10cm    |     |
|              |            |         |      |          | 5-2        | 30cm    |     |
|              |            |         |      |          | 5-3        | 50cm    |     |
| 물 (워터튜브) (2) | 2-1        | 10cm    |      | 인조솜 (6)  | 6-1        | 10cm    |     |
|              | 2-2        | 30cm    |      |          | 6-2        | 30cm    |     |
|              | 2-3        | 50cm    |      |          | 6-3        | 50cm    |     |
| 왕겨 (3)       | 3-1        | 10cm    |      | 스펀지 (7)  | 7-1        | 10cm    |     |
|              | 3-2        | 30cm    |      |          | 7-2        | 30cm    |     |
|              | 3-3        | 50cm    |      |          | 7-3        | 50cm    |     |
| 모래 (4)       | 4-1        | 10cm    |      | 고무판 (8)  | 8-1        | 1.2cm   |     |
|              | 4-2        | 30cm    |      |          | 8-2        | 2.4cm   |     |
|              | 4-3        | 50cm    |      | 스티로폼 (9) | 9-1        | 10cm    |     |
|              |            | 9-2     | 30cm |          |            |         |     |

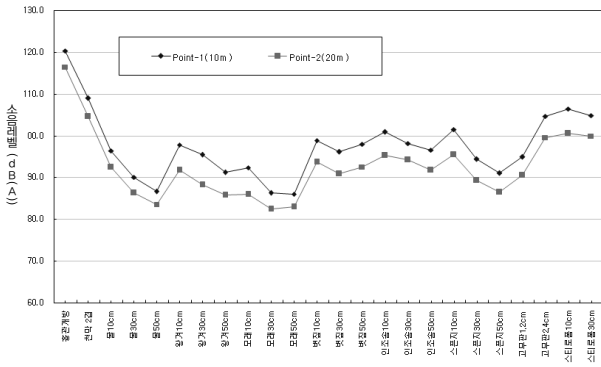


그림 3. 각 측정지점에서의 방음재질별 최대소음레벨 측정 평균치

$$L_p = 10 \times \log_{10} \left[ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N 10^{L_N/10} \right] \quad (1)$$

여기서,  $L_p$  : 평균 소음 레벨(dB(A))

$L_N$  : 각 측정점에서 측정된 소음레벨

$N$  : 측정횟수

표 3과 표 4에서는 방음재질별 소음감쇠 순위를 방음문

표 3. 방음재질별 최대소음레벨의 감쇠순위(측정위치 10m)

| 감쇠 순위 | Sample No. | 방음 재질 | Size  | Point 1(10m)      |          |
|-------|------------|-------|-------|-------------------|----------|
|       |            |       |       | 측정 최대소음레벨 (dB(A)) | 소음레벨 감소치 |
|       | 개방상태       | 0     | -     | 120.3             | 0.0      |
| 1     | 4-3        | 모래    | 50cm  | 86.0              | -34.3    |
| 2     | 4-2        | 모래    | 30cm  | 86.2              | -34.1    |
| 3     | 2-3        | 물     | 50cm  | 86.6              | -33.7    |
| 4     | 2-2        | 물     | 30cm  | 90.1              | -30.2    |
| 5     | 7-3        | 스편지   | 50cm  | 91.0              | -29.3    |
| 6     | 3-3        | 왕겨    | 50cm  | 91.2              | -29.1    |
| 7     | 4-1        | 모래    | 10cm  | 92.3              | -28.0    |
| 8     | 7-2        | 스편지   | 30cm  | 94.4              | -26.0    |
| 9     | 8-1        | 고무판   | 1.2cm | 94.9              | -25.4    |
| 10    | 3-2        | 왕겨    | 30cm  | 95.5              | -24.8    |
| 11    | 5-2        | 압축뿔단  | 30cm  | 96.1              | -24.2    |
| 12    | 2-1        | 물     | 10cm  | 96.4              | -23.9    |
| 13    | 6-3        | 인조솜   | 50cm  | 96.5              | -23.8    |
| 14    | 3-1        | 왕겨    | 10cm  | 97.8              | -22.5    |
| 15    | 5-3        | 압축뿔단  | 50cm  | 98.0              | -22.4    |
| 16    | 6-2        | 인조솜   | 30cm  | 98.1              | -22.2    |
| 17    | 5-1        | 압축뿔단  | 10cm  | 98.9              | -21.4    |
| 18    | 6-1        | 인조솜   | 10cm  | 100.8             | -19.5    |
| 19    | 7-1        | 스편지   | 10cm  | 101.5             | -18.8    |
| 20    | 8-2        | 고무판   | 2.4cm | 104.7             | -15.7    |
| 21    | 9-2        | 스티로폼  | 30cm  | 104.8             | -15.5    |
| 22    | 9-1        | 스티로폼  | 10cm  | 106.4             | -13.9    |
| 23    | 1-1        | 천막2겹  | 2mm   | 108.9             | -11.4    |

에서의 이격거리별로 정리하였다. 최대소음레벨 감소치는 각 측정에서의 개방상태에서의 측정소음레벨 값과 재질별 방음문 부착 시의 측정되는 측정소음레벨 값의 차이를 계산 하였으며, 이를 기준으로 감쇠순위를 정하였다. 측정치의 분석결과 방음재질별 소음레벨 최소값은 10m 지점(point-1)은 Sample 4-3(모래 50cm)가 86dB(A), 20m 지점(point-2)은 Sample 4-2(모래 30cm)가 82.4dB(A)를 나타내었다. 따라서 개방된 상태의 소음레벨과 비교하면 Sample 4-3(모래 50cm)은 -34.3dB(A), Sample 4-2(모래 30cm)는 -34dB(A)로 가장 양호한 감쇠효과를 나타내었다.

전반적으로 모래와 물이 방음문과의 가까운 거리에서 저감 효과가 크게 나타났으며 모래, 왕겨, 스펀지 등이 방음문과 이격거리가 멀어질수록 소음감쇠효과가 크게 나타났다. 반면에 일반적으로 현장에서 채용되고 있는 천막, 스티로폼, 인조 솜 등이 전반적으로 효과가 낮은 재료로 평가되었다.

## 2) 주주파수 대역(500Hz)에서의 방음재질별 음압레벨 분석

일반적인 발파소음은 측정위치에 따라 다르지만 대체적

표 4. 방음재질별 최대소음레벨의 감쇠순위(측정위치 20m)

| 감쇠 순위 | Sample No. | 방음 재질 | Size  | Point 2(20m)      |          |
|-------|------------|-------|-------|-------------------|----------|
|       |            |       |       | 측정 최대소음레벨 (dB(A)) | 소음레벨 감소치 |
|       | 개방상태       | 0     | -     | 116.4             | 0.0      |
| 1     | 4-2        | 모래    | 30cm  | 82.4              | -34.0    |
| 2     | 4-3        | 모래    | 50cm  | 82.9              | -33.5    |
| 3     | 2-3        | 물     | 50cm  | 83.5              | -32.9    |
| 4     | 3-3        | 왕겨    | 50cm  | 85.7              | -30.7    |
| 5     | 4-1        | 모래    | 10cm  | 86.0              | -30.4    |
| 6     | 2-2        | 물     | 30cm  | 86.2              | -30.2    |
| 7     | 7-3        | 스편지   | 50cm  | 86.5              | -29.9    |
| 8     | 3-2        | 왕겨    | 30cm  | 88.2              | -28.2    |
| 9     | 7-2        | 스편지   | 30cm  | 89.2              | -27.2    |
| 10    | 8-1        | 고무판   | 1.2cm | 90.5              | -25.9    |
| 11    | 5-2        | 압축뿔단  | 30cm  | 90.9              | -25.5    |
| 12    | 6-3        | 인조솜   | 50cm  | 91.7              | -24.7    |
| 13    | 3-1        | 왕겨    | 10cm  | 91.7              | -24.7    |
| 14    | 2-1        | 물     | 10cm  | 92.4              | -24.0    |
| 15    | 5-3        | 압축뿔단  | 50cm  | 92.5              | -23.9    |
| 16    | 5-1        | 압축뿔단  | 10cm  | 93.7              | -22.7    |
| 17    | 6-3        | 인조솜   | 30cm  | 94.2              | -22.2    |
| 18    | 6-1        | 인조솜   | 10cm  | 95.2              | -21.2    |
| 19    | 7-1        | 스편지   | 10cm  | 95.4              | -21.0    |
| 20    | 8-2        | 고무판   | 2.4cm | 99.5              | -16.9    |
| 21    | 9-2        | 스티로폼  | 30cm  | 99.9              | -16.5    |
| 22    | 9-1        | 스티로폼  | 10cm  | 100.5             | -15.9    |
| 23    | 1-1        | 천막 2겹 | 2mm   | 104.6             | -11.8    |

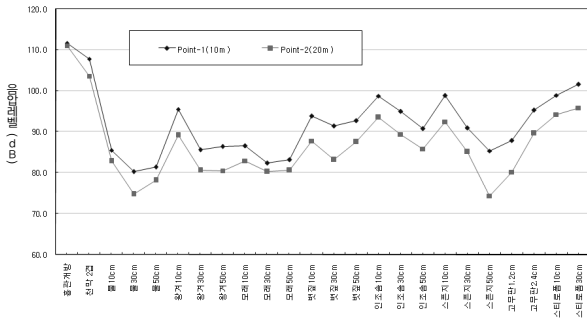


그림 4. 각 측정지점에서 주주파수 대역(500Hz)의 방음재질별 음압레벨값

으로 500Hz 이하로 알려져 있다. 본 방음재질 평가에서는 전기뇌관을 소음원으로 사용하여 폭약을 사용한 경우와 조금 상이한 영역에서 주주파수가 검출되었다. 본 연구에서는 방음재 재질평가에 있어서 음압레벨이 가장 크게 분포하는 주주파수 대역인 500Hz에서 개방상태와 방음재질별 부착 상태에서의 음압레벨의 감쇠 정도를 각 측정위치에서 분석하였다. 분석결과는 그림 4와 같으며 방음재질별 감쇠순위

표 5. 주주파수 대역(500Hz)에서의 음압레벨의 감쇠순위(측정위치 10m)

| 감쇠 순위 | Sample No. | 방음 재질 | Size  | Point 1(10m) |          |
|-------|------------|-------|-------|--------------|----------|
|       |            |       |       | 측정 음압레벨 (dB) | 음압레벨 감소치 |
|       | 개방상태       | 0     | -     | 111.7        | 0.0      |
| 1     | 2-2        | 물     | 30cm  | 80.3         | -31.4    |
| 2     | 2-3        | 물     | 50cm  | 81.4         | -30.3    |
| 3     | 4-2        | 모래    | 30cm  | 82.4         | -29.3    |
| 4     | 4-3        | 모래    | 50cm  | 83.2         | -28.5    |
| 5     | 7-3        | 스펀지   | 50cm  | 85.4         | -26.3    |
| 6     | 2-1        | 물     | 10cm  | 85.5         | -26.2    |
| 7     | 3-2        | 왕겨    | 30cm  | 85.6         | -26.1    |
| 8     | 3-3        | 왕겨    | 50cm  | 86.4         | -25.3    |
| 9     | 4-1        | 모래    | 10cm  | 86.6         | -25.2    |
| 10    | 8-1        | 고무판   | 1.2cm | 87.8         | -23.9    |
| 11    | 6-3        | 인조솜   | 50cm  | 90.8         | -20.9    |
| 12    | 7-2        | 스펀지   | 30cm  | 91.0         | -20.7    |
| 13    | 5-2        | 압축뿔단  | 30cm  | 91.5         | -20.2    |
| 14    | 5-3        | 압축뿔단  | 50cm  | 92.7         | -19.0    |
| 15    | 5-1        | 압축뿔단  | 10cm  | 93.8         | -17.9    |
| 16    | 6-2        | 인조솜   | 30cm  | 95.0         | -16.7    |
| 17    | 8-2        | 고무판   | 2.4cm | 95.3         | -16.4    |
| 18    | 3-1        | 왕겨    | 10cm  | 95.5         | -16.2    |
| 19    | 6-1        | 인조솜   | 10cm  | 98.8         | -12.9    |
| 20    | 7-1        | 스펀지   | 10cm  | 98.8         | -12.9    |
| 21    | 9-1        | 스티로폼  | 10cm  | 99.0         | -12.7    |
| 22    | 9-2        | 스티로폼  | 30cm  | 101.6        | -10.1    |
| 23    | 1-1        | 천막 2겹 | 2mm   | 107.8        | -3.9     |

는 표 5, 표 6과 같다.

방음재질 평가실험에서 도출된 발파소음의 주주파수 대역과 일반적으로 화약을 소음원으로 사용한 경우의 주주파수 대역은 다소 차이가 있었으나 상대적으로 고주파수 영역에서 평가된 방음재질실험 결과를 방음문의 질량등을 고려하여 계산하면 실대형 모형실험에 적용할 수 있으므로, 방음재료 평가실험에서의 주주파수 대역인 500Hz에서의 방음재질별 음압레벨을 분석하였다. 방음문 설치 후 음압레벨의 최저값은 Point-1(10m)에서는 물 30cm가 Point-2(20m)에서는 스펀지 50cm가 최저수준을 나타내었다. 전반적인 상황을 평가하는 최대소음레벨 감쇠순위에서는 모래, 물, 왕겨, 스펀지 등이 전반적으로 우수한 성능을 보여주었으나, 주주파수 영역에 대한 평가에서는 물, 모래, 스펀지, 고무판이 탁월한 성능을 보여주었다. 고무판의 경우에는 특정주파수의 음을 차음하는데 효과가 있는 것으로 보이며 천막, 스티로폼, 인조 솜 등은 특정주파수 영역에서도 효과가 낮은 재료로 평가되었다.

표 6. 주주파수 대역(500Hz)에서의 음압레벨의 감쇠순위(측정위치 20m)

| 감쇠 순위 | Sample No. | 방음 재질 | Size  | Point 2(20m) |          |
|-------|------------|-------|-------|--------------|----------|
|       |            |       |       | 측정 음압레벨 (dB) | 음압레벨 감소치 |
|       | 개방상태       | 0     | -     | 111.1        | 0        |
| 1     | 7-3        | 스펀지   | 50cm  | 74.4         | -36.7    |
| 2     | 2-2        | 물     | 30cm  | 74.8         | -36.3    |
| 3     | 2-3        | 물     | 50cm  | 78.2         | -32.9    |
| 4     | 8-1        | 고무판   | 1.2cm | 80.2         | -30.9    |
| 5     | 4-2        | 모래    | 30cm  | 80.3         | -30.8    |
| 6     | 3-3        | 왕겨    | 50cm  | 80.5         | -30.5    |
| 7     | 3-2        | 왕겨    | 30cm  | 80.6         | -30.5    |
| 8     | 4-3        | 모래    | 50cm  | 80.6         | -30.5    |
| 9     | 2-1        | 물     | 10cm  | 82.9         | -28.2    |
| 10    | 4-1        | 모래    | 10cm  | 82.9         | -28.1    |
| 11    | 5-2        | 압축뿔단  | 30cm  | 83.2         | -27.8    |
| 12    | 7-2        | 스펀지   | 30cm  | 85.1         | -26.0    |
| 13    | 6-3        | 인조솜   | 50cm  | 85.8         | -25.2    |
| 14    | 5-3        | 압축뿔단  | 50cm  | 87.6         | -23.5    |
| 15    | 5-1        | 압축뿔단  | 10cm  | 87.8         | -23.3    |
| 16    | 3-1        | 왕겨    | 10cm  | 89.2         | -21.9    |
| 17    | 6-2        | 인조솜   | 30cm  | 89.4         | -21.7    |
| 18    | 8-2        | 고무판   | 2.4cm | 89.7         | -21.4    |
| 19    | 7-1        | 스펀지   | 10cm  | 92.5         | -18.6    |
| 20    | 6-1        | 인조솜   | 10cm  | 93.6         | -17.5    |
| 21    | 9-1        | 스티로폼  | 10cm  | 94.3         | -16.8    |
| 22    | 9-2        | 스티로폼  | 30cm  | 95.9         | -15.2    |
| 23    | 1-1        | 천막 2겹 | 2mm   | 103.7        | -7.4     |

### 3. 방음문 개발 및 실험

#### 3.1 방음문 개발의 기본 사항과 설계개념

소음은 파동의 형태로 대기 중을 진행하므로 그 발생원의 음향세기와 파동의 진행과정 특성만 알 수 있으면 임의의 점에서의 소음도를 예측할 수 있다. 그리고 그 음의 진행 경로에 차음 또는 흡음시설을 하여 음의 전파를 막거나 투과되면서 에너지를 흡수하여 소음 전달을 저감시키는 것이 방음문의 역할이다. 일반적으로 흡음재와 차음재를 조합하여 방음문을 설계하며 발생음의 특징에 따라 다양하게 적용하지만 국내에서는 발파음에 대한 흡음 또는 차음에 대한 연구가 체계적이지는 않은 상황이어서 각 재료를 복합하여 정밀한 흡음성능, 차음성능, 투과손실량등을 계산하는 이론적 설계는 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 각 재료에 대한 성능평가를 하였으며 성능평가를 토대로 연구를 진행하였다.

발파소음을 차단하기 위해서는 방음문의 방음재에 대한 선정이 매우 중요하다. 효과적으로 발파소음을 차단하기 위해서는 흡음성능을 가지는 재료와 차음성능을 가지는 재료를 복합적으로 조합하는 것이 중요하다. 일반적으로 흡음재료는 다공질재료를 많이 사용하여 음에너지의 일부가 재료에 접하면서 열에너지로 변환되어 흡수되는 기술을 사용한다. 좀 더 진보된 형태인 단일공명기, 유공판, 판진동형재료 등도 개발되어 있다. 차음재는 음이 입사면을 통하여 바로 진행되지 못하도록 물리적인 공간을 메우는 재료로서 투과손실을 많이 발생시키는 것이 좋은 재료로 평가된다.

본 연구에서는 원연호 등(2008)의 선행연구에서 도출된 부직포와 폴리우레탄(polyurethane) 계열 스펀지의 조합을 기본으로 하고 본 연구의 방음재료 분석실험에서 우수한 것으로 평가된 물(10cm 두께)을 차음성능을 발휘하는 재료로서 사용하여 실험에 사용될 발파 소음 저감용 방음문을 개발하였다.

#### 3.2 실험 개요

본 실험에서는 발파로 인한 소음의 영향을 효과적으로 최소화할 수 있도록 터널 방음문을 제작하고 실험으로 실험을 수행하였다. 기존의 방음문과 비교하여 물을 차음재료로 선택함으로써 방음문의 무게가 증가되어 발파 중저음이 감쇄되는 효과를 기대하였다.

실험이 수행된 장소는 발생음의 반사와 회절 등을 방지하기 위해 실험기구와 동일한 레벨의 평탄한 위치로 하였으며 실제 폭약을 사용하게 됨으로써 민원발생 우려가 없는

곳을 기본으로 하여 차량의 이동 등 외부 발생소음의 영향이 없는 정온한 장소를 선정하는데 세심한 주의를 하였다.

그림 5는 실험 개요를 보여주고 있으며 제작된 실험기구는 실험장소로 운반하여 공장에서 제작된 실험기구에 다른 하나의 흡관을 연결하고 한쪽 면을 철재막이와 모래를 쌓아 외부 토사가 유입되지 않도록 하였다. 실험기구에서 발생된 소음을 측정하기 위해 소음전용측정기(SC-310)를 50m 간격으로 2대를 설치하였으며 음압레벨 측정을 위한 진동측정기는 25m 간격으로 4대를 설치하였다. 측정방법은 방음문이 개방된 상태, 일반 방음문 설치 및 워터튜브 방음문 설치 등에 따른 최대소음레벨과 1/3 옥타브밴드에 의한 주파수 대역을 각각 3회씩 측정하였으며 이는 식 (1)로서 평균하여 분석에 이용하였다.

본 실험의 소음원 제공은 그림 6과 같이 일반적으로 터널 발파에서 사용되는 에멀전폭약과 전기뇌관을 사용하였으며 폭약의 양은 실험에 사용된 소음측정기의 최대소음레벨 측정범위(120dB)와 소음발생장소와 측정거리(50m, 100m)를 감안하여 에멀전폭약 45g을 사용하였다.

실험용 방음문은 워터튜브를 이용한 방음문과 기존의 방음문 2개조를 이용하였다. 제작된 실험기구에 기존의 방음



그림 5. 실험 개요



그림 6. 소음제공용 폭약과 뇌관



그림 7. 실험기구 방음문 밀폐상태



그림 8. 실험기구 방음문 개방상태

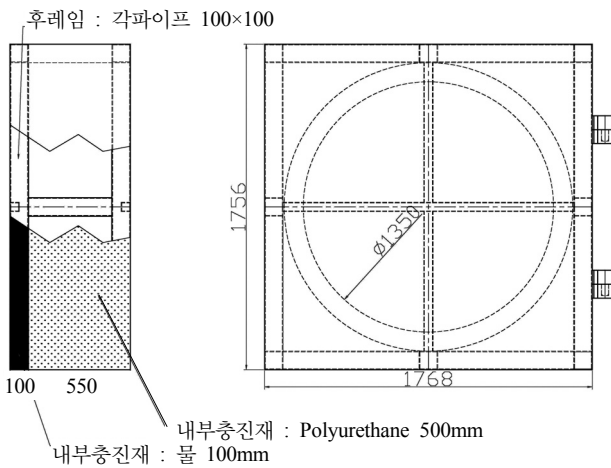


그림 9. 실험에 사용된 방음문의 제원

표 7. 실험에 사용된 방음문 규격과 재질

| 구분         | 규격   | 재질   | 비고       |
|------------|--|--|----------|
| 기존 방음문     | 두께 : 650mm<br>가로 : 1,756mm<br>세로 : 1,756mm | 외부 : 스틸 강판<br>골격 : 각 파이프<br>충진재 : polyurethane 및 부직포(60cm)     | 무게 350kg |
| 물을 이용한 방음문 | 두께 : 650mm<br>가로 : 1,756mm<br>세로 : 1,756mm | 외부 : 스틸 강판<br>골격 : 각 파이프<br>충진재 : polyurethane(50cm) 및 물(10cm) | 무게 570kg |

문과 물이 담길 수 있는 워터튜브가 내장된 방음문을 설치하고 실험기구 내에서 폭약을 폭발시켜 발생된 소음을 소음 전용측정기를 이용하여 최대소음레벨과 주 주파수대역을 측정·분석하였다. 측정방법은 방음문이 개방된 상태, 기존 방음문 설치 상태, 워터튜브 방음문 설치 상태로 구분하여 3회씩 측정하여 최대소음레벨의 크기와 주 주파수 대역에서의 음압레벨을 상호비교 하였다. 그림 7과 그림 8은 실험에 사용된 방음문이 없는 상황과 방음문이 설치되어 실험한 상황을 보여주고 있다.

실험용 방음문은 그림 9와 같이 기존의 방음문(내부충진재 : Polyurethane 650mm)과 물을 이용한 방음문(내부충진재 : 물 100mm+Polyurethane 550mm) 2개조를 제작하였고 규격은 그림 9와 같으며 재질 및 내부구성은 표 7과 같다.

### 3.3 실험의 결과 분석

계측결과에 따른 분석 및 평가는 방음문의 설치 종류와 방음문에서 측정지점까지의 이격거리(50m, 100m)에 따라 주파수 대역별 음압레벨(dB)과 최대소음레벨(dB(A))의 측정결과를 비교 평가하였다. 방음문 설치에 따른 소음레벨의 분석결과 주 주파수 대역은 125Hz를 나타내었다.

#### 3.3.1 방음문 설치에 따른 효과 분석

개방상태, 일반방음문 설치, 물을 이용한 방음문 설치에 따른 이격거리 50m, 100m의 주 주파수 대역별 평균 소음레벨을 비교하면 그림 10, 그림 11과 같다.

방음문의 설치에 의하여 발파 소음이 대폭적으로 저감된 것을 확인할 수 있었으며 기존방음문과 물을 사용한 방음문 모두 다 소음 전파를 차단하는데 효과적임을 보여주었다. 발파소음의 주파수 대역에 대하여 고찰해보면 전반적으로 물을 사용한 방음문이 우수한 것으로 나타났으며, 25Hz 주파수 대역 이하의 저주파수 대역의 음압레벨 분석에 있어서는 기존의 방음문 보다 물을 사용한 방음문의 효과가 좋은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 방음문에서 가까울수록 두드러지게 나타났으며 이는 발파소음은 발생원에서 가까울수록 소음이러기 보다 풍압의 형태로 전달되기 때문에 이

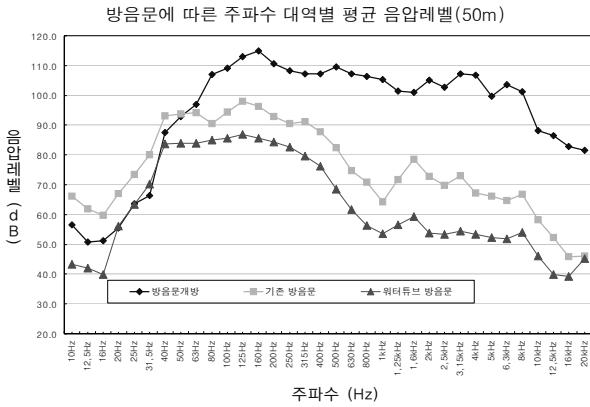


그림 10. 방음설치 방법에 따른 주파수 대역별 음압레벨 비교(50m 지점)

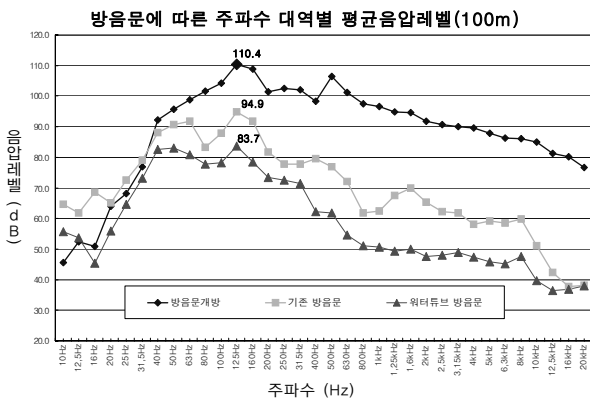


그림 11. 방음상태에 따른 전주파수 대역별 음압레벨 비교(100m 지점)

러한 풍압을 저지하는데 물을 차음재로 선택한 것이 유리하였다는 판단을 할 수 있다. 그러나 25Hz 이하의 저주파 대역에서 기존의 방음문의 경우에는 방음문 개방전 보다 높은 음압레벨이 반복 측정되어 저주파수 영역에 있어서 분석의 명확한 결론을 내리기 위해서는 추가적인 이론적 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

### 3.3.2 최대소음레벨과 주파수 대역별 음압레벨 비교

개방상태, 일반방음문 설치, 물을 이용한 방음문 설치에 따른 이격거리 50m, 100m에서의 평균최대소음레벨을 비교하면 표 8과 같다. 표 9는 발파소음의 주주파수대역(125Hz)에서의 음압레벨을 비교한 것을 나타내고 있다.

물을 이용한 방음문 설치에 따른 최대소음레벨은 50m의 이격거리에서 79.8dB(A)를 나타내어 기존방음문 90.8dB(A)에 비교하여 -11dB(A), 개방상태 120.3dB(A)에 비교하여 -40.5dB(A)의 저감효과를 나타내었다. 한편 100m의 이격거리에서는 72.2dB(A)를 나타내어 기존방음문 84.3dB(A)에 비교해서 -12.1dB(A), 개방상태 107.8dB(A)에 비교해서 -35.6dB(A)의 저감효과를 나타내었다. 주 주파수 대역인 125Hz에서 음압레벨(dB)은 50m에서 86.8dB을 나타내어 기존 방음문 97.9dB에 비교하여 -11.1dB, 개방상태 113dB에 비교하여 -26.2dB의

표 8. 평균 최대소음레벨 비교

| 구분         | 평균최대소음레벨(dB(A)) |          |               |          |
|------------|-----------------|----------|---------------|----------|
|            | Point-1(50m)    |          | Point-2(100m) |          |
|            | dB(A)           | 소음레벨 감소치 | dB(A)         | 소음레벨 감소치 |
| 방음문 개방     | 120.3           | 0.0      | 107.8         | 0.0      |
| 기존 방음문     | 90.8            | -29.5    | 84.3          | -23.4    |
| 물을 이용한 방음문 | 79.8            | -40.5    | 72.2          | -35.6    |

표 9. 주주파수대역(125Hz)에서의 음압레벨 비교

| 구분         | 주주파수대역(125Hz)에서의 음압레벨 측정치 |          |               |          |
|------------|---------------------------|----------|---------------|----------|
|            | Point-1(50m)              |          | Point-2(100m) |          |
|            | dB                        | 음압레벨 감소치 | dB            | 음압레벨 감소치 |
| 방음문 개방     | 113.0                     | 0.0      | 110.4         | 0        |
| 기존 방음문     | 97.9                      | -15.1    | 94.9          | -15.5    |
| 물을 이용한 방음문 | 86.8                      | -26.2    | 83.7          | -26.7    |

저감효과를 나타내었다. 한편 100m의 이격거리에서 83.7dB을 나타내어 기존 방음문 94.9dB 대비 -11.2dB, 개방 상태 110.4dB 대비 -26.7dB의 저감효과를 나타내었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 터널발파의 소음저감을 목적으로 한 방음 시설 개발을 위해 터널에서 주로 사용된 방음재질들과 그 외 물, 모래 등을 이용하여 소음레벨과 주파수의 크기를 측정 고찰하였으며 그 결과를 반영하여 새로운 방음문을 도출하고 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방음재질별 최대소음레벨 측정결과 방음문에서의 이격거리 10m에서는 모래(50cm)가 86dB(A)로서 개방소음(120.3dB(A)) 대비 -34.3dB(A)의 감쇠도를 나타내었으며, 이격거리 20m에서는 모래(30cm)가 82.4dB(A)로서 개방소음(116dB) 대비 -34dB(A)의 감쇠도를 나타내었다.
- (2) 전체적으로 물을 재료로 사용하는 방음문이 높은 차단 성능을 나타내었으며 주파수 대역별 음압레벨 분석에서 25Hz 이하의 저주파수 영역에서 기존 방음문보다 좋은 특성을 나타내었으나 이에 대한 이론적 해법을 제시하기 위해서는 추가 연구가 요구되었다.
- (3) 약 1KHz 이상의 고주파수의 대역에서는 어떠한 방음재질을 사용하여도 소음감소가 크게 나타나는 것을 알 수 있었으며 주주파수 영역에 따라서 효과가 높은 방음재가 다소 상이하게 나타나 민원의 대상이 되는 수음지역에서의 발파 소음분석을 통한 방음문 재질의 조합 및



설계도 중요하다고 판단되었다.

- (4) 물을 이용한 워터튜브 방음문을 실험을 통하여 검증한 결과 최소소음레벨은 방음문에서 50m의 이격거리에서 79.8dB(A)을 나타내어 기존방음문 90.8dB(A) 대비 -11dB(A), 개방상태 120.3dB(A) 대비 -40.5dB(A)의 저감효과를 나타내었다. 그리고 100m의 이격거리가 있는 경우는 72.2dB(A)을 나타내어 기존방음문 84.3dB(A) 대비 -12.1dB(A), 개방상태 107.8dB(A) 대비 -35.6dB(A)의 저감효과를 나타내었다.
- (5) 워터튜브 방음문 설치에 따른 주파수 대역인 125Hz에서 음압레벨(dB)은 50m의 이격거리에서 86.8dB을 나타내어 기존 방음문 97.9dB 대비 -11.1dB, 개방상태 113dB 대비 -26.2dB의 저감효과를 나타내었다. 그리고, 100m

의 이격거리가 있는 경우는 83.7dB을 나타내어 기존 방음문 94.9dB 대비 -11.2dB, 개방 상태 110.4dB 대비 -26.7dB의 저감효과를 나타내었다.

## 참 고 문 헌

1. 기경철, 김일중(2002), *산학인을 위한 발파공학*, 동아기술, pp. 346.
2. 노상림(2004), 터널발파 소음감쇠를 위한 방음시스템개발, *대한화약발파공학회지*, Vol. 22, No. 1, pp. 70~71.
3. 원연호, 정재형, 조영동(2008), 터널 방음시설의 방음재질 종류에 따른 소음과 주파수의 크기 고찰, *대한화약발파공학회지*, Vol. 25, No. 2, pp. 23~33.
4. 정일록(1999), *소음진동학*, 신광출판사, pp. 57.

(접수일: 2010. 11. 7 심사일: 2010. 11. 12 심사완료일: 2011. 1. 14)