

방음터널 단면형상에 따른 소음저감 특성 평가

- 터널 내부소음을 중심으로 -

Evaluation on the Characteristics of Noise Reduction according to the Tunnel Section Shape

이원열* · 김하근** · 오양기*** · 주문기*** · 조성환****

Won Yeul Lee, Ha Geun Kim, Yang Ki Oh, Moon Ki Ju and Sung Hwan Jo

Key Words : High Rise Apartment(고층공동주택), Noise Barrier Tunnel(방음터널), Traffic Noise(교통소음)

ABSTRACT

It seems inevitable for residential buildings to be high-rise and allocated near traffic roads due to the overcrowding in urban area. Acoustic environment in those area has been seriously deteriorated by the increase of traffic vehicles. Commonly used sound barriers have a limitation in controlling noise due to diffraction noise of sound barrier. Hence sound barrier is not effective to attenuate noise especially for the residential units in high level. This work aims at evaluating noise reduction according to the tunnel section shape by using 1/5 scale model. We carried out a number of field measurements for 1/5 scale model of Noise Barrier Tunnel with various sectional shape. The results from predictions and the measurement show generally good agreement.

1. 서 론

최근 높은 인구밀도에 따른 도시화 및 신도시의 건설에 의해 자동차 보급률의 급등과 도로망 확장, 도시 순환 고속도로 등의 고속화 도로 건설 등으로 교통소음의 환경문제화 가능성이 더욱 증대되고 있다. 반면, 택지난 및 거주지역의 교통 편이성에 대한 거주자들의 선호 등으로 인하여 대부분의 주거 단지들이 도로변이나 도로에 인접하여 건설되고 있어, 도로교통소음으로 인한 거주지역의 환경오염문제는 커다란 요소로 대두되고 있는 실정이다.

일반적으로 도로교통 소음을 감소시키기 위해서는 소음원을 없애거나 감소시키는 것이 가장 좋은 방법이나 도로 및 철도변과 같이 근본적으로 소음원을 차단시키지 못하는 경우 간접적인 방법, 즉 소음원과 경로를 차단하거나 분산시키

는 방법을 사용하여야 한다. 경로차단에 의한 대표적인 소음 대책수단으로는 방음벽, 방음터널을 들 수 있고, 향후 국내 환경기준이 강화될 경우 소음감쇄 효과가 뛰어난 방음터널의 수요창출이 예상되며, 방음벽과 더불어 환경소음 저감시설로서 만들어진 것들이며, 그 성능이나 경제성, 구조 안전성, 미관 등 다양한 설계요소에 대한 적절한 평가가 이루어져 각광을 받으리라 예상된다. 그러나 현재 국내에 설치되어 있는 방음터널은 대부분 수직형 방음벽 개념의 연장선이다. 따라서 고층주거에 대한 방음시설물이 가장 절실히 필요한 수도권에서 조차 거의 방음터널을 찾아보기 힘들고, 설치되어 있는 방음터널 조차 그 성능 및 기능을 충분히 발휘하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 현황을 개선하기 위해서는 시급히 관련 제반 기술을 정립하여 기능측면에서 우수하며 보다 환경친화적인 방음터널을 개발할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 단면형태의 방음터널 개발을 목적으로 소음저감에 대한 각각의 터널 단면형상에 대한 터널내부 음향성능 특성을 1/5축소모형실험과 컴퓨터 시뮬레이션으로 검증하였다. 또한 실제 상황을 좀더 정확히 모사하기 위해 음원(고음용 무지향성 스피커)을 1개 사용하였을 경우와 3개(무지향형 스피커 및 고음용 스피커) 사용한 경우로 나누어서 실험을 진행하였고, 단면형태는 8개 구조를 실험시공 하였다. 이러한 연구결과를 통하여 방음터널의 다

* 목포대학교 전임연구원
E-mail : won1339@lycos.co.kr
Tel : (031) 738-4746, Fax : (031) 738-4748

** 대한주택공사 주택도시연구원 수석연구원, 공학박사

*** 목포대학교 건축공학과 교수, 공학박사

**** 목포대학교 건축공학과 박사과정

***** (주)신성산건 대표이사

이 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업에 의한 연구개발성과의 일부임

양한 단면형태에 따른 터널 내부 음향성능평가 및 방음터널 설계 시 기초 데이터를 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 축소모형실험의 이론

모형실험에서 필요한 상사법칙을 간단히 정리하면 다음과 같다. 여기서 모형의 축적은 $1/n$, 침자 r , m 은 각각 실물, 모형을 나타낸다.

...) 길이에 대하여

$$L_m = Lr/n \quad \text{식(1)}$$

$$\lambda_m = \lambda r/n \quad \text{식(2)}$$

간, L : 길이, λ :음의 파장

2) 주파수(f), 시간(T)에 대하여

$$f_m = n \times f_r \quad \text{식(3)}$$

$$T_m = T_r/n \quad \text{식(4)}$$

3) 경계의 음향임피던스(Z) 또는 흡음률(α)에 대하여

$$Z_m(f_m) = Z_r(f_r) \quad \text{식(5)}$$

$$\alpha_m(f_m) = \alpha_r(f_r) \quad \text{식(6)}$$

식(3)에서 알 수 있듯이 모형실험에서의 주파수는 실물에 대한 가청주파수의 n 배로 해야 되므로 실험용 음원으로서 고주파영역의 음을 낼 수 있는 특수한 스피커나 스파크 방전을 이용한 무지향성음원 등이 이용되고 있다. 또한 고주파음을 수음하기 위하여 모형용으로 가청주파수의 n 배 까지 수음할 수 있는 마이크로폰이 이용되고 있다. 본 실험에서는 고음용 무지향성 음원과 20kHz까지 측정 가능한 마이크로폰을 사용하였다.

또한 공기 중 음파가 전파되는 경우 공기에 의하여 음에너지의 일부가 흡수되어 음이 감쇠되는 현상이 발생한다. 이 현상에 대하여 모형을 실물과 동일한 조건으로 하기 위해서는 주파수에 따른 감쇠율이 적용되어야 한다. 축소모형실험에서는 보다 정확한 모사를 위해 실험매질로서 건조공기 또는 질소(N_2)가스를 사용하여 표준적인 온습도 공기의 음향 흡수를 광대역 주파수범위에서 시뮬레이션 할 수 있다. 본 실험에서는 이러한 실험조건을 만족시키기가 불가능하고, 도로교통소음의 결정주파수가 1~2kHz(1/5축소모형에서는 5K~10kHz)에서 형성되므로 고주파대역에서의 공기흡음을 무시하고 측정하였다. 또한 본 실험의 목적상 각 방음터널 내부의 음향특성을 상대적으로 비교하기 위함임으로 공기흡음에 대한 영향은 큰 변수로 작용하지 않을 것으로 판단된다.

3. 실험 장치의 개요

본 실험은 방음터널의 단면형상에 따른 터널내부의 소음 저감 특성에 관한 연구로서, 시험시공은 외부 압소음 약 30~40 dB(A)인 김포 매립지에 시공하였다. 방음터널의 벽면 및 지붕 재질은 기본적으로는 3mm 강판을 사용하였다. 또한 터널의 바닥은 콘크리트로 되어 있으며, 터널의 높이를 1.75m, 길이를 18m로 하였다. 터널의 단면형상 변형의 용이성을 위하여 터널지붕 상부중앙 패널을 분리할 수 있도록 하였다. 벽면에는 50T의 다공질 흡음재를 강판 패널에 공기층 없이 부착하였으며, 천장배플에는 25T 다공질 흡음재를 목재합판에 부착하였다. 그림1은 본 실험에 사용한 방음터널의 모습이다.

실험은 그림 2에 나타난 것처럼 수음점을 외부에서의 영향을 최소화하기 위하여 터널 중앙에서 측정하였으며, 터널 중앙내 0.3m 간격으로 5점을 측정하였다. 측정 장비는 4Hz~100kHz까지 측정이 가능한 정밀 소음계(B&K Type 4135, 1/4 inch 마이크로폰 사용)와 20kHz까지 측정이 가능한 정밀 소음계(SVAN912A, 1/2 inch 마이크로폰 사용) 등을 사용하였다. 음원으로는 B&K Type 2610을 사용하였다. B&K Type 4135 사용시에는 컴퓨터 소프트웨어인 Cooledit Pro 2.0로 데이터를 저장하여 실험실에서 측정값을 분석하였다.

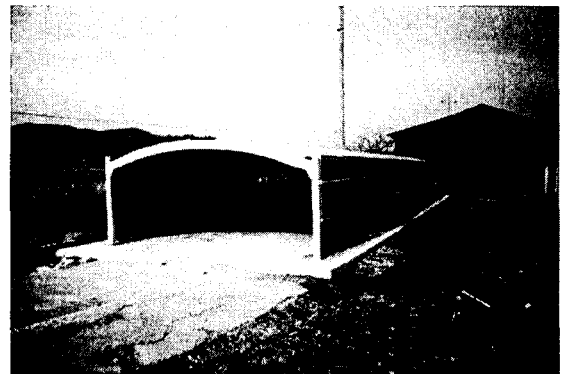


그림 1. 방음터널

4. 측정 및 시뮬레이션 개요

3.1 대상 모델의 개요

방음터널의 단면구조는 14개 구조로 나누었다. 터널의구조는 크게 4그룹으로 나눌 수 있다. 첫 번째 그룹은 방음터널 기본 구조형으로 방음터널의 벽면에 흡음재를 부과한 것이다. 두 번째는 방음터널 지붕 일부(0.5m)를 개방하고 벽면에 흡음재를 부과한 것이다. 세 번째 그룹은 지붕open형인 2안을 기본으로 오픈된 개구부에 흡·차음재 처리를 한 배플

(baffle)을 사용한 구조이다.

본 연구에서 방음터널의 단면을 이와 같이 분류한 이유는 방음터널 내부의 흡·차음재의 많고 적음에 따른 소음저감 효과와 일반적으로 환기 등을 위하여 방음터널의 일부분을 open하는 경우가 흔히 있으므로 방음터널 중앙상부에 개구부를 여러 형태로 설계하였을 경우의 소음저감효과를 분석하고자 이와 같이 대상모델을 설정하였다.

3.2 측정 방법

측정은 2가지 방법으로 하였다. 첫 번째는 고음용 무지향성 스피커 1개를 이용하여 고주파의 음을 발생시킨 후 1/4 inch 마이크로폰을 사용한 정밀소음계로 수음하였고, 두 번째 방법으로는 실제 도로교통 소음의 선음원 특성을 모사하

기 위해 무지향성 스피커를 1.5m 간격으로 3개 배치하여 음을 발생 시킨 후 1/2 inch 마이크로폰을 사용한 정밀 소음계(SVAN)로 측정하였다. 이 때 스피커의 간격은 예비 테스트에 의해 선음원의 특성을 고려하여 3개의 음원사이에 등음압 분포가 나타남을 확인한 후 결정하였다. 표 2는 측정 항목별 측정방법을 나타낸 것이며, 평면도상의 측정지점은 그림 2에 나타냈다.

측정에 사용된 음원은 Pink Noise를 사용하였고 125~20kHz의 1/3 옥타브대역 중심주파수로 측정하였다. 측정점은 내부의 5개 지점이며, 현장 측정 시 주위 반사음의 영향을 피하기 위하여 마이크로폰을 바닥으로부터 최소 0.3m 높이에, 벽면으로부터 0.3m 이상의 간격을 두고 설치하였다.

3.3 시뮬레이션의 개요

본 실험에서는 축소모형(1/5 Scale Model)의 음압레벨 분포 등 물리적인 지표의 예측을 위하여 3차원 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 RAYNOISE를 이용하였다. RAYNOISE 프로그램은 실내음향, 공장소음, 방음벽 도로교통소음 등의 환경소음 예측·분석에 이용된다.

본 프로그램의 내역은 다음과 같다.

(1) Program명 : RAYNOISE

표 1. 방음터널 단면형상 및 개요

구분	방음터널 단면구조	개요
I 그룹		- 기본구조형 1안 - no absorber - 터널 전체에 강판사용
		- 기본구조형 2안 - 벽체 1/2 흡음재(50T) 부착
		- 기본구조형 3안 - 벽체 모두 흡음재(50T) 부착
II 그룹		- 천정OPEN형 4안 - 천정 0.5m open, - 터널 전체에 강판사용
		- 천정OPEN형 5안 - 천정 0.5m open - 벽체 1/2 흡음재(50T) 부착
		- 천정OPEN형 6안 - 천정 0.5m open - 벽체 모두 흡음재(50T) 부착
III 그룹		- 배플부착형 7안 - 천장배플 0.5m 부착 (5mm 합판 및 흡음재 25T) - 벽체 1/2 흡음재(50T) 부착
		- 배플부착형 8안 - 삼각천장배플 0.25m×2EA 부착 - 벽체 1/2 흡음재(50T) 부착

표 2. 측정 항목 및 방법

측정항목	측정방법		측정점
터널내 음압레벨	Source 1개	음원: 고음용 스피커 1개 (Pink noise) 수음: 1/4" 마이크로폰	터널내 5점
	Source 3개	음원: 무지향성 스피커 3개 (Pink noise) 수음: 1/2" 마이크로폰	

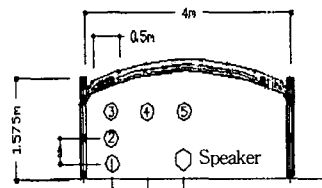
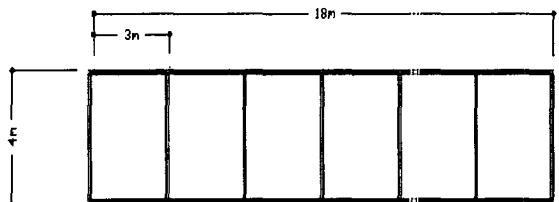
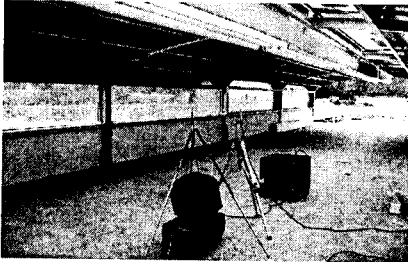


그림 2. 방음터널의 측정지점



(a). 방음터널 내부



(b) 측정 장면

그림 3. 방음터널의 내부 측정 장면

(2) Algorithm : MISM (Mirror Image Source Method, 허상법), RTM (Ray Tracing Method, 음선추적법)

본 시뮬레이션을 위하여 방음터널을 3차원으로 모델링하였고(그림 4. 참조), 이 때 노드수는 232개, 요소의 수는 142개로 하였으며, 수음점은 16개로 하였다. 시뮬레이션 시 몇차 반사음까지 고려할 것인지는 프로그램 사용자가 조절할 수 있으며, 본 시뮬레이션에서는 60~200차 반사음까지 고려하여 신뢰할만한 결과를 구하였다 또한 시뮬레이션에 사용한 흡음율 및 투과손실 데이터와 음원 데이터는 표 3.과 표 4.와 같이 입력하였다.

4. 측정 및 시뮬레이션 결과분석

4.1 Source 1개 실험 결과

고음용 스피커 1개를 터널 내부 중앙부위에 배치한 후 1/4 inch 마이크로폰을 사용하여 측정한 결과는 그림 5, 6과 같다. 그림 5는 각 단면의 측정 평균 음압레벨을 측정한 측정치 평균과 컴퓨터 시뮬레이션으로 예측한 예측치의 평균값을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 컴퓨터 시뮬레이션으로의 예측치 실제 방음터널(모형크기의 5배)에서의 내부음압 레벨값을 예측한 것이다. 그림 5에서 보면 실측치에서 방음터널 내부 평균음압레벨이 가장 큰 단면형은 1안으로 단면 평균 음압레벨은 83.5dB(A)였으며, 가장 적은 경우는 8안으로서 81.1dB(A)로 나타나 전체적으로 2.4dB 정도의 차이가 있었다. 그림 6은 그룹별 단면의 평균음압레벨로서 음압레벨은 I 그룹, II 그룹, III 그룹 순으로 작게 나타났다.

RAYNOISE - GEOMETRICAL ACOUSTICS MODELING

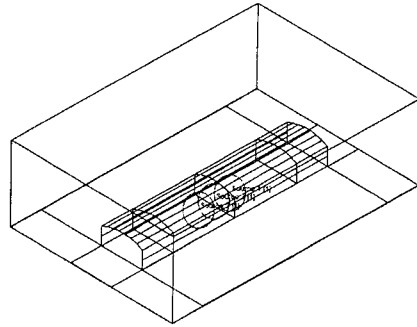


그림 4. Raynoise에서의 방음터널 Modeling

표 3. 측정 항목 및 방법

구분	주파수[Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
		터널강판 ²⁾	흡음율	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.07
	투과손실	0	9	14	20	26	30	37	37
터널내부 바닥 ³⁾	흡음율	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.09	0.09
	투과손실	-	-	-	-	-	-	-	-
터널외부 바닥 ⁴⁾	흡음율	0.23	0.34	0.55	0.6	0.42	0.55	0.56	0.5
	투과손실	-	-	-	-	-	-	-	-
터널내부 흡음벽 ⁵⁾	흡음율	0.16	0.16	0.16	0.43	0.77	0.90	0.86	0.86
	투과손실	0	9	14	20	26	30	37	37
baffle ⁶⁾	흡음율	0.04	0.04	0.04	0.13	0.32	0.51	0.80	0.80
	투과손실	-	18	20	24	24	25	30	-
외부	흡음율	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	투과손실	-	-	-	-	-	-	-	-

표 3. 음원 데이터

구분	주파수[Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
		무지향성 스피커 (dB)	90	90	95	99	98	95	95
고주파용 스피커 (dB)	90	98.5	101	103.5	95	95	83	84	

그림 7, 8, 9는 각 측정지점에서의 측정치와 시뮬레이션 결과치를 비교하여 나타낸 것이다. 각 측정지점에서의 측정치와 예측치의 오차는 0.3~1.1dB 정도로 나타났으며, 터널 중앙부위에서의 실내음압분포는 비교적 균등한 것으로 나타났다.

- 2) M. DAVID EGAN, "ARCHITECTURAL ACOUSTICS" 1988, pp. 52
- 3) Raynoise Library 흡음율
- 4) M. DAVID EGAN, "ARCHITECTURAL ACOUSTICS" 1988, pp. 53
- 5) SKY VIVA 50T 32K(흡음율 관내법 측정데이터)
- 6) SKY VIVA 25T 32K(흡음율 관내법 측정데이터) 및 소음·진동대책 핸드북, pp. 624

4.2 Source 3개 실험 결과

무지향성 스피커를 1.5m 간격으로 3개를 배치하여 정밀소음계(SVAN)를 사용하여 터널 내부 소음레벨을 측정한 결과는 그림 10, 11과 같다. 그림 10.은 방음터널 각 단면의 음압레벨을 실제 측정한 실측치 평균과 컴퓨터 시뮬레이션으로 예측한 예측치 평균값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 10에서 보면 실측치에서의 터널내부 평균음압레벨이 가장 큰 단면형은 4안 및 1안으로 내부 흡음처리를 하지 않은 것으로 나타났다. 또한 가장 작은 음압레벨분포를 보인 것은 3안으로 나타났다. 방음터널 내부 평균음압레벨이 가장 큰 단면형과 가장 낮은 단면형과의 레벨 차이는 2.2dB 정도로 나타나 음원을 1개 사용하였을 경우인 2.4dB와 비슷한 것으로 나타났다.

그림 11.은 방음터널의 단면형상에 따른 그룹별 단면평균 음압레벨을 나타낸 것이다. 그룹별 단면 평균 음압레벨이 가장 낮게 나타난 순은 III그룹, II그룹, I그룹 순으로 나타났다. 그림 12, 13, 14는 각 측정지점에서의 측정치와 시뮬레이션 결과치를 비교 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 각 측정점에서의 측정치와 예측치의 오차는 0.3~1.4dB 정도로 나타났으며, 터널 내 실내음압분포는 균등한 것으로 나타났다.

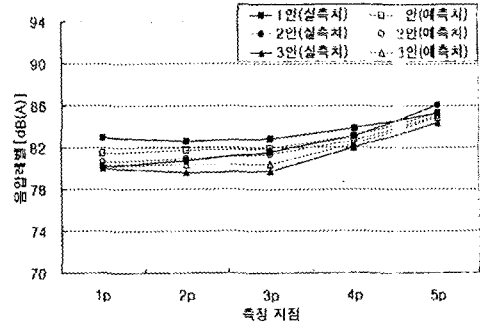


그림 7. I 그룹에서의 측정지점별 음압레벨 (Source1개)

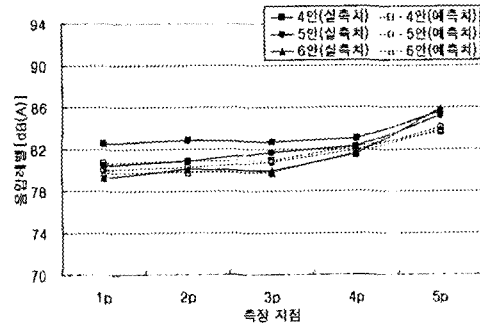


그림 8. II 그룹에서의 측정지점별 음압레벨 (Source1개)

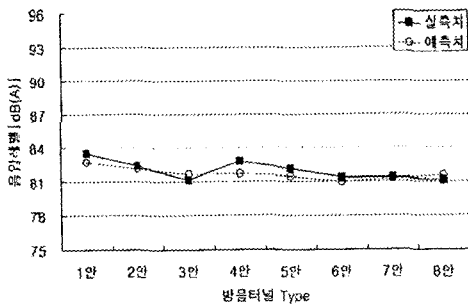


그림 5. 단면형상별 평균음압레벨 (Source 1개)

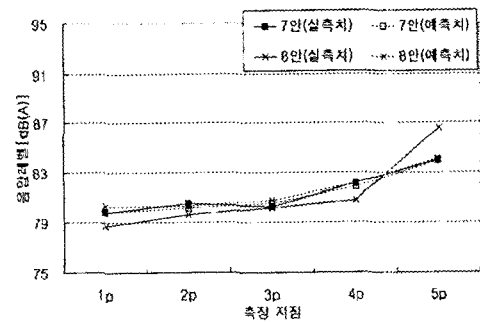


그림 9. III 그룹에서의 측정지점별 음압레벨 (Source1개)

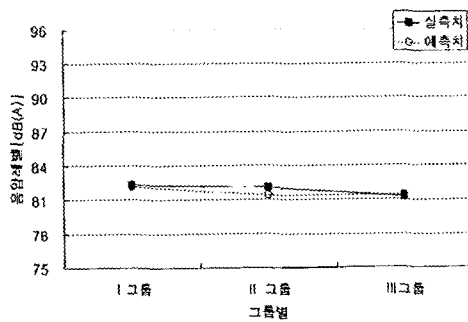


그림 6. 그룹별 평균음압레벨 (Source 1개)

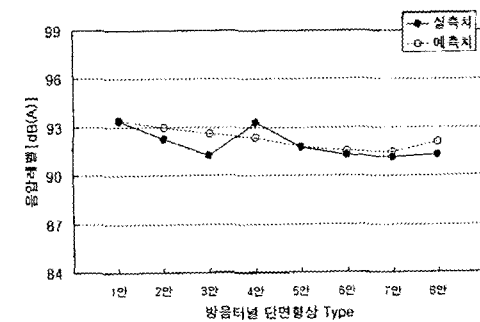


그림 10. 단면형상별 평균음압레벨 (Source 3개)

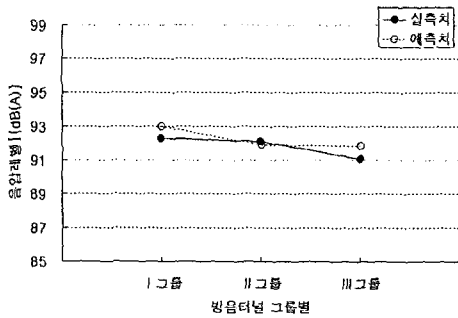


그림 11. 그룹별 평균음압레벨(Source 3개)

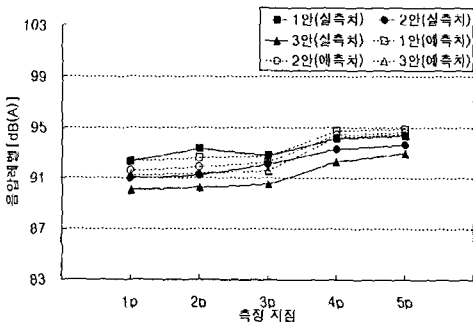


그림 12. I 그룹에서의 측정지점별 음압레벨(Source3개)

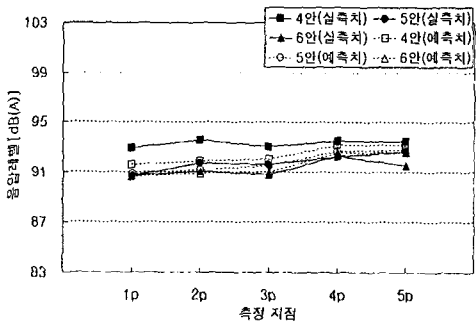


그림 13. II 그룹에서의 측정지점별 음압레벨(Source3개)

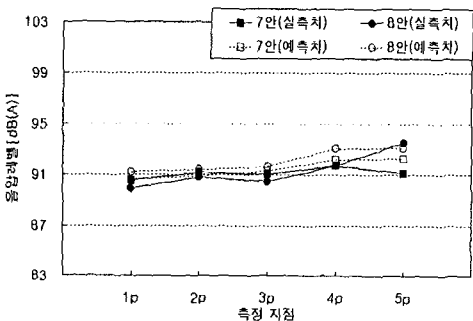


그림 14. III 그룹에서의 측정지점별 음압레벨(Source3개)

5. 결 론

본 연구는 고층공동주택의 거주지역에 적용 가능한 방음 시설개발의 일환으로서 1/5 축소모형실험 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각 단면형상의 터널 내 소음특성을 분석함으로써 방음터널 설계 시 참고가 될 것으로 기대된다.

본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다. Source 1개를 사용한 경우 실측치의 방음터널 내부 평균음압레벨이 가장 큰 단면형은 1안으로 단면평균 음압레벨은 83.5dB(A)였으며, 가장 적은 경우는 8안으로서 81.1dB(A)로 나타나 전체적으로 2.4dB 정도의 차이가 있었다.

Source 3개를 사용한 경우 방음터널 내부 평균음압레벨이 가장 큰 단면형은 4안 및 1안으로 내부의 흡음처리를 하지 않은 것으로 나타났며, 가장 작은 음압레벨분포를 보인 것은 3안으로 나타났다. 방음터널 내부 평균음압레벨이 가장 큰 단면형과 가장 낮은 단면형과의 레벨 차이는 2.2dB 정도였었다.

방음터널 단면형상에 의해 분류한 그룹별 단면 평균 음압레벨은 실측치와 예측치의 평균 오차가 Source 1개 일 때와 Source 3개의 실험에서 각각 0.3~1.1dB와 0.3~1.4dB로 나타나 신뢰할 수 있는 수준으로 생각되며, 단면 평균음압레벨이 낮게 나타난 순서는 Source 1개와 3개 모두 III그룹, II그룹, I그룹 순으로 나타났다. 그룹별 단면 평균음압레벨은 Source 1개에서는 I그룹과 II그룹이 비슷한 음압레벨분포를 보였고, III그룹과는 1dB 차이를 보였다. Source 3개에서도 평균음압레벨분포는 I그룹과 II그룹이 비슷한 수준으로 나타났고 III그룹과는 1.2dB 차이를 보였다.

향후 연구에서는 더욱 다양한 방음터널의 단면형상 및 외부소음과의 비교도 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 소음·진동대책 핸드북, pp. 624
- (2) M.DAVID EGAN, "ARCHITECTURAL ACOUSTICS" 1988, pp. 52
- (3) 김하근 외4명, "간선도로 방음터널의 효과와 타당성", 한국생태환경건축학회 논문집, 2002. 03, pp55-61
- (4) 한국소음진동공학회, "소음·진동 편람", 1995. 11 pp37-45