

방음터널의 풍하중 산정 및 감음성능 예측

Estimation of Wind Pressure on Soundproof Tunnel and Noise Reduction at Far-field

°임정빈* · 김영찬* · 김두훈* · 조재영** · 이학은***

Jung-Bin Im, Young-Chan Kim, Doo-Hoon Kim, Jae-Young Cho and Hak-Eun Lee

Key Words : Soundproof Tunnel(방음터널), Drag Force(항력), Wind Pressure(풍하중), Noise Reduction(소음저감)

ABSTRACT

The objective of this study is to estimate wind pressure acting on soundproof tunnel and noise reduction through the tunnel. For the purpose various shape of scale models were prepared and drag forces acting on each models were measured in wind tunnel. And numerical simulation was performed to confirm experimental results. As a result, the lowest drag force coefficient of 0.59 was obtained in the case of arch roof shape model. Noise reduction through soundproof tunnel was simulated by using ray tracing method according to various open ratio of its roof area.

1. 서 론

인구의 도시집중화와 경제발전에 따른 교통량의 급격한 증가는 대기오염 및 소음·진동 등 각종 환경문제를 유발하고 있다. 특히 소음공해는 일상생활에서 가장 빈번히 접하게 되는 문제로서, 환경부에 따르면 2003년 서울, 부산, 대구 등 전국 27개 도시의 도로변 주거지역에서 낮 시간대의 경우 전체의 59%인 16개 도시가, 밤 시간대의 경우 89%인 24개 도시가 소음기준을 초과한 것으로 조사된 바가 있다.

현재 도로변의 소음공해로부터 거주자를 보호하기 위한 가장 일반적인 대책은 방음벽을 설치하는 것이다. 그러나 교통량의 증가에 따라 기존도로 및 신설도로의 차선수가 늘어나고 도로변에 인접한 건물들이 점차 고층화되고 있기 때문에 방음벽을 설치한 후에도 중·고층부에서는 소음저감효과가 거의 없는 실정이다. 따라서 최근에는 고층부의 교통소음을 줄이기 위한 대책으로 방음터널에 대한 관심이 높아지고 있으며 주로 소음공해로 인한 민원지역에 설치되고 있다.

그러나 방음터널은 방음벽에 비해 시공비가 매우 높을 뿐만 아니라 고가위에 설치하는 경우 과도한 자중으로 인하여 시공이 불가능한 경우도 있다. 특히 방음터널에 대해

여 특별한 검토 없이 방음벽의 풍하중 기준을 그대로 적용함에 따라 다소 과대 설계되는 경향이 있으므로 적절한 설계풍하중 등 방음터널의 설계기준을 마련하는 것이 필요하다. 또한 현재 국내에 시공되어 있는 방음터널의 경우도 인접한 아파트의 고층부에서 예상과는 달리 도로변 소음기준을 거의 만족하고 있지 못하는 등 아직 해결해야 할 기술적인 문제점들이 많이 있다.

따라서 본 연구에서는 방음터널의 외부 형상에 따른 설계 풍하중을 산출하기 위해 축소모형에 대한 풍동시험을 수행하였고 수치해석결과와 비교 검토하였다. 또한 방음터널의 상부 개폐율에 따른 인접 지역에서의 소음예측을 수행하였다. 이러한 연구결과를 통하여 본 연구에서는 수음지역에 따른 최적의 음향성능을 갖는 다양한 형태의 방음터널을 개발하기 위한 기초자료로 사용하고자 한다.

2. 방음터널의 풍하중 산정

2.1 국내 방음벽의 설계풍하중

국내에서는 아직 방음터널에 대한 풍하중기준이 규정되어 있지 않으므로 다음과 같은 방음벽의 설계풍하중 산정방법을 준용하고 있다.

환경부의 「방음벽 설계지침(1990. 12)」에 의하면 지주 및 기초교량의 고가부에서는 300kg/m²이상, 토공부에서는 150kg/m²이상, 그리고 벽재료인 방음판(판넬) 및 프레임은 300kg/m²이상의 하중을 고려하도록 규정하고 있다.

그러나 환경부에서 최근에 고시한 「방음벽의 성능 및 설치기준」(2002. 12. 3)에서 방음벽은 강풍·진동에 의하여

* 유니슨 기술연구소
E-mail : jbin@unison.co.kr
Tel: (041)620-3413, Fax: (041)552-7416

** 고려대학교 대학원

*** 고려대학교 토목환경공학과

변형 또는 파괴되지 않도록 안전한 구조로 하되, 건설교통부의 「도로교 표준시방서²⁾」에서 정하는 지역별 설계풍속을 적용할 수 있다고 규정함으로써 풍압에 대한 방음벽의 과대 설계를 방지할 수 있도록 하고 있다.

2.2 방음터널 풍동실험

(1) 공기력 계수

바람으로부터 구조물이 받는 풍압(정적인 공기력)은 단순히 바람이 부는 방향에 대해서만 작용하는 것이 아니라 구조물의 형상 및 치수에 따라 다양한 방향으로 작용한다. 이러한 힘은 그림 1과 같이 일반적으로 6분력이라고 하는 6개 방향의 힘으로 분해하여 취급하는 경우가 많다.

이 중 항력(drag force), 양력(lift force) 그리고 피칭모멘트(pitching moment)의 3가지가 구조물에 가장 큰 영향을 주는데, 이러한 공기력은 외력으로 가정하여 설계에 반영할 수 있다.

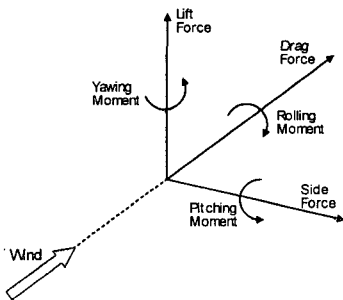
수치해석 또는 일련의 실험에서 측정된 공기력을 단위길이(m)당 공기력으로 환산하여 다음과 같은 공기력 계수를 산출한다.

$$* \text{항력계수} : C_d = \frac{F_d}{0.5\rho V^2 D} \quad (1)$$

$$* \text{양력계수} : C_l = \frac{F_l}{0.5\rho V^2 B} \quad (2)$$

$$* \text{모멘트계수} : C_m = \frac{F_m}{0.5\rho V^2 B^2} \quad (3)$$

여기서, F_d 는 항력, F_l 은 양력, F_m 은 모멘트, ρ 는 공기밀도, V 는 풍속, D 는 구조물의 높이, B 는 구조물의 폭을 의미한다.



[그림 1] 공기력의 분류

구조물에 있어서 각 구조요소의 단면형상은 공기역학적 특성을 지배하는 중요한 인자이므로 단면에 작용하는 정적 공기력이 작은 형태를 선정하는 것이 유리하다. 특히 교량 단면이나 방음터널과 같이 소위 “뚱뚱한 단면(bluff body)”에 있어서는 모서리 형상의 미소한 차이에 의해서도 단면의

공기역학적 특성이 크게 달라지는 경우가 있다. 따라서 공기력 계수가 작은 단면형상을 선택하는 것이 풍하중을 경감시키기 위한 효과적인 수단이라 할 수 있다.

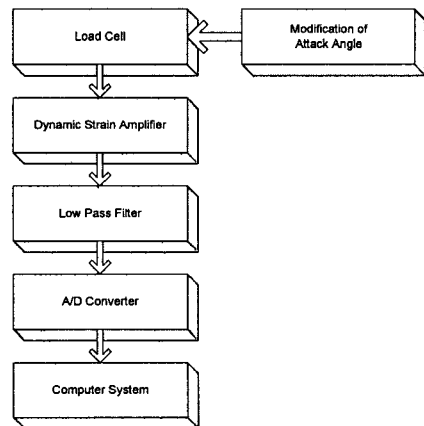
(2) 풍동실험장치 및 방법

방음터널 축소모형에 대한 풍동실험은 고려대학교 공과대학에 설치된 풍동을 이용하여 수행하였다. 원 풍동의 test section은 3m이지만, 실험을 위해 spring support system이 설치된 1.5m의 test section을 연장하였다. 측정부의 크기는 폭 1m, 높이 0.8m, 길이 4.5m이며 최대풍속은 40m/s이다. 풍동의 제원은 표 1에 나타낸 바와 같다.

[표 1] 풍동 제원

항 목	성 능
풍동형식	순환형
풍 속	0~40m/s
측정부 크기	1.0m×0.8m×4.5m(W×H×L)
최대풍량	1,050m ³ /min
송 풍 기	구경 1,430mm, DC모터(55kW, 35~1,700rpm)
풍속편차	±1% 이하
Turn Table	수동식 360° 회전
Traverse	평면이동, DC 모터구동에 의한 컴퓨터제어

공기력 측정은 모형의 양단에 3분력계(Three component load cell, LMC-3501-5, Nissho)를 설치하여 수행하였다. 측정에 사용된 3분력계는 항력, 양력, 모멘트를 동시에 측정할 수 있는 장치로 항력과 양력은 50N, 모멘트는 5N·m까지 측정할 수 있다. 실험에서 측정된 공기력은 2개의 Load cell에서 측정된 값을 합산한 값이다. 공기력계수의 측정 절차는 그림 2에 나타낸 바와 같다.



[그림 2] 공기력 계수 측정 흐름도



[그림 3] 풍동실험 전경

(3) 풍동실험모형

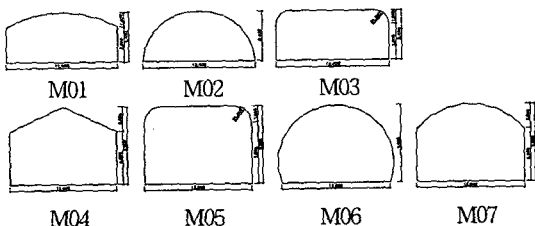
방음터널의 형상에 따른 공기력 특성을 검토하기 위해 아치형, 경사형, 사각형, 원형의 4가지 형식을 채택하였다. 그림 4와 같이 폭 12m, 높이 5.4m인 2차선 도로용 방음터널과 높이 8.8m인 철도용 방음터널 모형을 제작하였고, 그림 5와 같이 폭 20m, 높이 5.4m인 4차선 도로용 방음터널모형을 제작하여 방음터널의 형태뿐만 아니라 폭과 높이에 따른 공기력 특성을 검토할 수 있도록 하였고, 4차선 방음터널은 상부가 일부 open된 형태에 대해서도 검토하였다.

방음터널은 아파트나 주택이 밀집한 지역의 교량에 설치되는 경우가 많으므로 그림 6에 나타난 바와 같이 PC Box 교와 Steel Box교 상부에 설치되어 있는 형태에 대해서도 공기력 특성을 검토하였다.

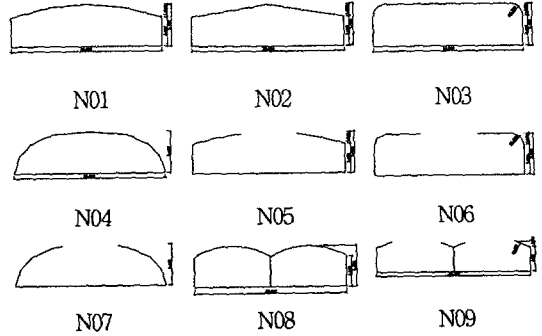
풍동실험용 방음터널 모형의 축소율은 높이 5.4m에 대해서는 1/135, 높이 8.8m에 대해서는 1/220으로 하였다. 이는 풍동 측정부의 크기에 대하여 풍동실험에서 요구하는 폐쇄효과(Blocking Ratio), 폭원과 모형길이의 비(Aspect Ratio)를 만족하는 값이다. 풍동실험에서 측정되는 공기력계수는 엄밀한 의미에서 단면형상 외에도 측정시의 폐쇄율에 따라 영향을 받기 때문에 구조물에 작용하는 공기력을 측정하는 경우에는 이러한 점에 충분히 주의할 필요가 있다.

$$* \text{폐쇄효과} = \frac{\text{모형의투영단면}}{\text{풍동의단면적}} \times 100 \leq 5\%$$

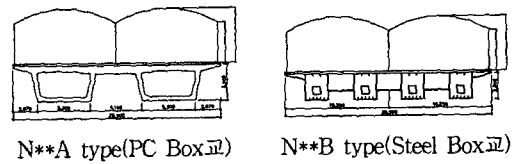
$$* \text{폭원과 모형길이의 비} = \frac{\text{모형의길이}}{\text{모형의폭}} \geq 2.0$$



[그림 4] 2차선 방음터널 모형



[그림 5] 4차선 방음터널 모형



[그림 6] 교량부 방음터널 모형

(4) 공기력계수 측정결과

방음터널 축소모형에 대한 풍동실험을 통하여 항력계수, 양력계수, 모멘트계수의 3가지 공기력계수를 측정하였으나, 방음벽의 풍하중 계산에 사용되는 항력계수에 대한 측정결과만 정리하였다.

[표 2] 2차선 방음터널의 항력계수 측정결과

Model	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07
C_d	0.65	1.09	1.07	1.38	1.54	1.18	1.21

[표 3] 4차선 방음터널의 항력계수 측정결과

Model	N01	N02	N03	N04	N05
C_d	0.59	0.69	0.95	0.79	0.64

Model	N06	N07	N08	N09
C_d	1.12	0.54	0.66	0.86

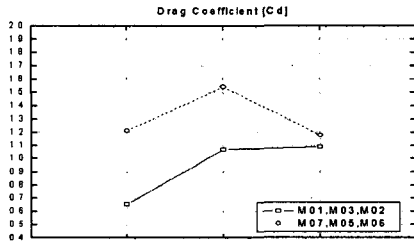
Model	N01A	N02A	N03A	N04A	N05A
C_d	0.82	1.03	1.23	0.88	0.88

Model	N06A	N07A	N08A	N09A
C_d	1.21	0.72	0.82	1.06

Model	N01B	N02B	N03B	N04B	N05B
C_d	0.77	0.85	1.08	0.82	0.81

Model	N06B	N07B	N08B	N09B
C_d	1.07	0.66	0.77	1.00

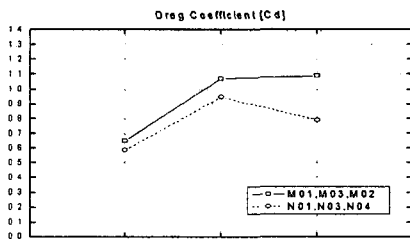
2차선 방음터널의 경우 표 2에서 나타난 바와 같이 아치형인 M01 단면의 항력계수가 0.65로 가장 낮음을 알 수 있다. 예상과는 달리 원형단면인 M02에 비해 M01 단면의 항력계수가 약 40% 작음을 알 수 있는데 이러한 이유에 대해서는 차후 CFD해석을 통하여 풍압분포의 확인이 필요할 것으로 판단된다. 한편 단면의 형상비가 2.22:1인 도로형 방음터널과 비교하여 형상비가 1.36:1인 철도용 방음터널의 경우는 그림 7에 나타난 바와 같이 형상에 관계없이 도로용 방음터널보다 항력계수가 높게 나왔으며 그 중에서 원형단면인 M06 단면의 항력계수가 1.18로 가장 낮았다.



[그림 7] 2차선 방음터널의 형상별, 높이별 항력계수 비교

형상비가 3.7:1인 4차선 방음터널의 경우 표 3에서 나타난 바와 같이 2차선 방음터널에 대한 결과와 마찬가지로 아치형단면인 N01의 항력계수가 0.59로 가장 낮게 측정된 반면, 둥근 모서리의 사각형단면인 N03의 항력계수는 0.95로 비교적 높게 측정되었다.

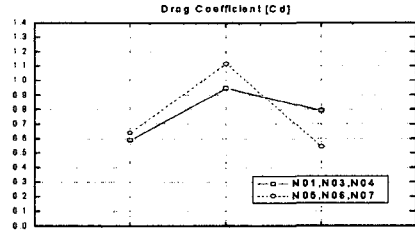
그림 8은 방음터널의 폭 변화에 따른 항력계수를 비교하기 위해 단면형태가 같고 높이가 5.4m인 2차선 방음터널과 4차선 방음터널의 경우를 비교한 것이다. 높이는 동일한 상태에서 형상비가 2.2:1에서 3.7:1로 폭이 넓어짐에 따라 아치형 단면의 항력계수 변화는 미미한 반면 원형단면의 경우는 항력계수가 상당히 작아짐을 알 수 있다.



[그림 8] 방음터널의 폭 변화에 따른 항력계수 비교

그림 9는 4차선 방음터널에 대하여 단면 형상별로 상부의 개폐유무에 따른 항력계수를 비교한 것이다. 그림에서 상부가 일부 개방됨으로써 아치형 단면과 모서리가 둥근 사각형 단면은 항력계수가 높아진 반면 원형단면의 경우는 오히려 31% 낮아진 0.54의 가장 낮은 항력계수가 측정되었다. 이러한 이유에 대해서는 차후 수치해석적인 방법을 통한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

한편 표 3에서 나타난 바와 같이 방음터널이 교량부에 설치되어 있는 경우 토공부에 비해 항력계수가 높아지며 특히 PC Box교가 Steel Box교의 경우보다 항력계수가 높음을 볼 수 있다.



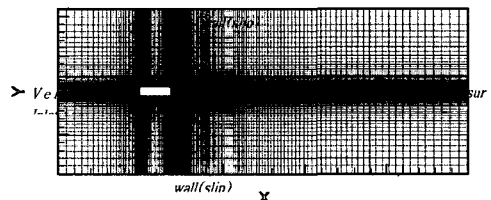
[그림 9] 방음터널 상부 개폐유무에 따른 항력계수 비교

2.3 방음터널 유동해석

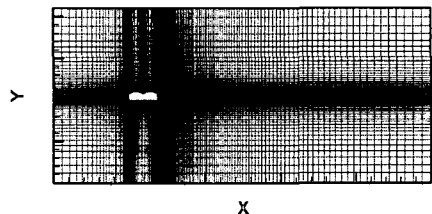
(1) 수치해석 모델

본 연구에서는 풍동실험의 현실적인 문제들, 즉 실험시간 및 비용 그리고 실험결과 가시화의 어려움 등을 보완하고 실험결과를 검증하기 위해 부분적으로 수치해석을 수행하여 방음터널의 구조설계에 필요한 항력계수를 제시하고자 한다.

수치해석모델은 4차선 방음터널과 동일한 형상비를 갖는 직사각 단면과 그림 5의 이중 아치형 단면인 N08을 선정하였고 모든 조건은 풍동실험과 동일하도록 하였다. 유동장 해석은 상용 프로그램인 Fluent-6을 이용하였다. 본 문제에서의 유동장은 난류영역에 해당하므로 Reynolds stress 모델을 적용하였고 난류강도는 5%, 난류스케일은 0.1 D 를 사용하였다. 여기서 D 는 방음터널의 높이를 의미한다. 이산화 방법은 PROSTO, 유속과 압력의 연계는 PISO 방법을 사용하였다. 그림 10(a)와 그림 10(b)는 수치해석을 위한 방음터널의 모델링 형태와 경계조건은 나타난 것으로 총 요소는 각각 40,200개와 41,200개이다.



(a) 직사각형 단면

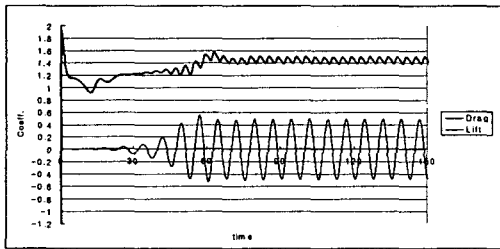


(b) 2중 아치형 단면

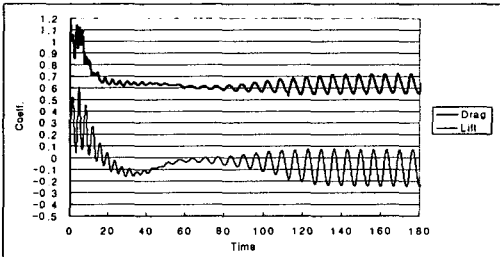
[그림 10] 방음터널 수치해석 모델

(2) 수치해석 결과

그림 11은 수치해석을 통해 구한 항력계수와 양력계수의 시간이력선도를 나타낸 것으로 직사각형 단면의 경우는 항력계수가 1.44, 그리고 2중 아치형 단면의 경우는 항력계수가 0.63으로 계산되었다. 표 4에 나타낸 바와 같이 풍동실험에서 측정된 2중 아치형 단면의 항력계수가 0.66이었으므로 수치해석결과와 풍동실험결과가 거의 일치함을 알 수 있다.



(a) 직사각형 단면



(b) 2중 아치형 단면

[그림 11] 항력계수와 양력계수의 시간이력선도

2.4 방음터널 설계풍하중 산정

도로교 설계기준에서는 구조물의 정적설계를 위한 단위면적당 풍하중 $P(\text{kg/m}^2)$ 는 설계기준풍속 $V_d(\text{m/s})$, 공기밀도 $\rho(=0.125\text{kgs}^2/\text{m}^4)$, 항력계수 C_d 및 거스트 응답계수 G 를 사용하여 다음과 같이 구하도록 규정하고 있다.

$$P = 1/2 \times \rho \times (V_d)^2 \times C_d \times G \quad (4)$$

여기서 설계기준풍속이란 개발지 지상 10m에서 10분간 평균풍속을 기본풍속으로 하고 시설물이 설치되는 지점의 지표상향 등 지표조건 조건에 의해 보정한 풍속을 의미한다.

국내 교량 및 건축물과 같은 주요구조물은 변동풍속에 의한 구조물의 변형과 진동을 고려하여 거스트 응답계수(도로교의 경우 1.9)를 적용하고 있으나 방음벽은 주요 구조물에 비해 설계수명이 10~20년으로 상대적으로 짧은 반면 도로교 설계기준에서 정하는 설계풍속은 교량 등 주요 구조물의 설계기준으로 재현기간 100년에 달하는 풍속이므로 일본 등 외국에서도 방음벽 설계시 일반적으로 거스트 응답계수는 적용치 않는다. 국내에서도 이를 감안하여 고속도로 방음벽 설계를 위한 풍하중은 다음과 같이 거스트 응답계수를 고려

치 않는다.

$$P = 1/2 \times \rho \times (V_d)^2 \times C_d \quad (5)$$

풍동실험결과로부터 알 수 있는 바와 같이 항력계수는 시설물의 종류 및 형상에 따라 다양한 값을 가지고 있으며, 미국의 AASHTO(방음벽) 규정에서는 1.2~1.5, 일본 도로교설계요령(방음벽)에서는 교량부와 토공부를 구분하여 각각 1.6과 1.2를 적용하고 있다. 국내의 경우 한국도로공사에서는 지역별 설계풍속을 적용할 수 있도록 규정한 환경부 고시에 따라 지역별 표준 설계풍하중을 산출하였다⁽³⁾. 이때 항력계수는 일본과 동일한 값(토공부 1.2, 교량부 1.6)을 사용하였다. 우리나라와 같은 태풍권에 속하는 일본은 방음벽 설계시 토공부 150kg/m², 교량부 250kg/m²의 설계풍하중을 적용하고 있다.

표 4는 한국도로공사에서 지역별 설계풍속을 적용하여 산출한 방음벽의 설계풍하중과 본 연구에서 풍동실험을 통해 측정된 항력계수로부터 산출한 설계풍하중을 비교한 것이다. 이때 본 연구에서는 방음터널을 주요구조물로 가정하여 거스트 응답계수 1.9를 적용하였다. 표에서 토공부와 교량부 모두 서로 비슷한 값을 나타냄을 볼 수 있으나, 방음터널의 항력계수가 방음벽의 약 1/2정도이고 또한 구조적으로도 보다 안정된 형태임을 감안하면 방음벽보다 방음터널의 설계풍하중을 최대 50% 작게 할 수 있음을 알 수 있다.

[표 4] 방음벽 기초 및 지주의 지역별 표준 설계풍하중

지역	기본 풍속 (m/s)	설계풍속(m/s)		풍하중(kg/m ²)			
		토공부	교량부	한국도로공사 (방음벽, G무시)		풍동실험결과(방음터널, G=1.9)	
				토공부 $C_d=1.0$	교량부 $C_d=1.0$	N08 $C_d=.6$	N08A $C_d=.8$
내륙	30	30	33.5	68	112	71	109
서해안	35	35	39.1	92	153	96	149
서남해안 남해안 동남해안	40	40	44.7	120	200	125	195
동해안 제주지역 특수지역	45	45	50.3	152	253	159	246

* 지표조건 II(개발지, 농지, 전원, 수목과 저층 건축물이 산재한 지역)로 가정하여 설계풍속을 산출함

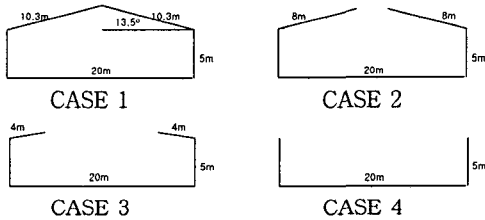
* 교량부의 경우 방음벽 고도 20m를 표준 설계풍속으로 함

3. 방음터널의 감음성능 예측

터널의 길이가 200m 이상이 되면 자연환기가 곤란하므로 인위적인 환기시스템이 필요하다. 그러나 방음터널의 경우 내부에 환기팬을 설치하기가 곤란하므로 일정한 간격으로

상부를 개방하거나 전 구간을 반 개방형 터널구조로 시공하기도 한다. 그러나 이 때 방음터널 주변의 수음지역에 따라 상부 개방유무 및 개방면적을 결정해야 한다. 이에 본 연구에서는 터널 상부의 개방유무 및 개방면적 변화에 따른 수음지역에서 소음저감효과를 예측하기 위해 상용 프로그램인 RAYNOISE Rev3.0을 이용하여 수음지역에서의 음장분포를 계산하였다.

그림 12에 나타난 바와 같이 소음예측모델은 완전 밀폐형 방음터널(CASE-1), 반 개방형 방음터널(CASE-2, CASE-3), 방음벽(CASE-4)의 4가지를 대상으로 하였고, 폭 20m, 수직부 높이 5m, 방음터널 상단 최대높이 7.4m로 모델링하였다. 한편 방음터널 및 방음벽은 모두 흡음형 방음판으로 구성되어 있다고 가정하고 표 5의 흡음률과 차음량을 입력자료로 이용하였다. 또한 4차선 도로는 4개의 선음원으로 모델링하였다.

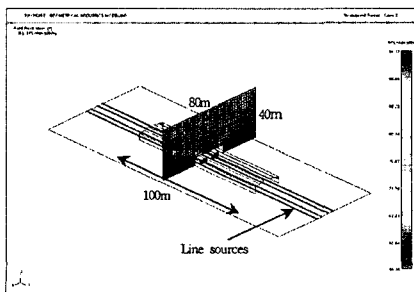


[그림 12] 방음터널 소음저감효과 예측모델

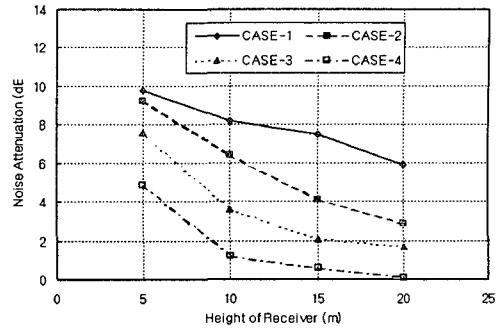
[표 5] 방음판의 음향성능 입력자료

	Octave band center frequency(Hz)							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
흡음률	0.15	0.24	0.47	0.69	0.8	0.83	0.75	0.7
차음량(dB)	12	18	24	31	37	35	39	39

그림 13은 CASE 2에 대한 계산결과예를 나타낸 것으로 터널 중앙지점의 W80m×H40m의 영역에 대하여 소음분포를 예측하였다. 그림 14는 음원의 크기가 동일한 조건에서 CASE-1~CASE-4의 방음대책에 따른 수음점(도로단으로부터 20m지점)에서 높이별 소음저감효과로서 완전 밀폐형 방음벽(CASE-1)의 경우도 20m 높이에서 차음효과가 약 6dB 정도임을 알 수 있다.



[그림 13] 방음터널 주변 음장분포 계산결과(CASE 2)



[그림 14] 방음터널 주변 20m지점에서 높이별 소음저감효과

4. 결론

- 1) 여러 형태의 방음터널 축소모형(축소비 1/135~1/220)을 제작하여 풍동실험으로 항력계수를 측정하였다.
- 2) 방음터널의 폭이 넓어질수록 항력계수가 낮아지며, 형상비(폭과 높이의 비) 3.7:1인 아치지붕형 방음터널의 경우 항력계수가 0.59로 가장 낮게 측정되었다.
- 3) 토공부에 비해 교량위에 설치된 방음터널의 항력계수가 높게 측정되었으며, 특히 PC Box교의 경우가 Steel Box교에 비해 높게 측정되었다.
- 4) 수치해석적인 방법으로 2중 아치형 방음터널의 항력계수를 계산하였으며, 풍동실험의 결과와 잘 일치하였다.
- 5) 풍동실험에서 측정한 항력계수를 이용하여 방음터널의 설계풍하중을 산정하였으며, 형태에 따라 동일한 높이의 방음벽에 비해 항력계수가 약 1/2이므로 설계풍하중을 최대 50% 정도 줄일 수 있을 것으로 예상된다.
- 6) 방음터널 상부의 개방면적에 따라 수음지역에서의 소음저감효과를 예측할 수 있었으며, 주변 지역에서의 소음현황에 따라 상부개방유무를 적절히 설계할 수 있음을 알 수 있다.

후기

본 연구는 2002년도 한국토지공사 중소기업 기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 환경부고시 제2002-184호, 2002, "방음벽의 성능 및 설치기준", pp.3~4
- (2) 건설교통부, 2000, "도로교 표준시방서", p.20
- (3) 한국도로공사, 2002, "방음벽 설계풍하중 검토