

서울시 터널 내 방음벽 설치가 입자상 물질 농도 및 소음 수준에 미치는 영향

조현우 · 이지연 · 리우시아오산 · 이기영[†]

서울대학교 보건대학원 환경보건학과
(2010. 7. 25. 접수/2010. 9. 20. 수정/2010. 10. 19. 채택)

Impact of Soundproofing Wall of Tunnel on Particulate Matter and Noise

Hyunwoo Cho · Jiyeon Lee · Xiaoshan Liu · Kiyoung Lee[†]

Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health and
Institute of Health and Environment, Seoul National University

(Received July 25, 2010/Revised September 20, 2010/Accepted October 19, 2010)

ABSTRACT

The Seoul metropolitan government has installed soundproofing walls in road tunnels to improve the tunnel environment for pedestrians. To evaluate the efficiency of these soundproofing walls, we measured noise levels and concentrations of PM_{2.5} and ultrafine particles (UFP) in tunnels with or without these walls. Although noise and UFP levels were significantly lower in the tunnels with soundproofing walls, PM_{2.5} levels were significantly higher: but were significantly lowered by use of a ventilation system. When PM_{2.5} and noise levels were simultaneously measured in a tunnel with soundproofing wall, noise level was significantly reduced but PM_{2.5} level was significantly higher. It is concluded that the soundproofing wall can protect pedestrians from noise, but not PM. Installation of a ventilation system is recommended for protection of pedestrians in tunnels with soundproofing walls.

Keywords: PM_{2.5}, ultrafine particles (UFP), noise, soundproofing wall, ventilation system

I. 서 론

우리나라에서 자동차는 중요한 교통수단 중 하나이다. 서울특별시 도시교통본부의 통계자료에 따르면 2009년 9월 기준 서울에 약 295만대의 자동차가 등록되어 있고, 2000년부터 꾸준히 증가하는 추세이다.¹⁾ 뿐만 아니라 다른 지역의 많은 시민들도 자동차를 이용하고 있다. 교통체증을 줄이기 위해 설치가 시작된 터널은, 1997년도 전국 184개소에서 2007년 기준 1,064개소로 증가하였다.²⁾ 하지만 터널과 같은 일부 폐쇄된 공간에서 차량에 의해 발생된 공기 중 오염물질은 건강상 악영향을 미칠 수 있다.³⁾ 입자상 물질(particulate

matter, PM)의 경우 천식과 기타 호흡기 계통 질환을 유발할 수 있는데,^{4,6)} 경증 알레르기성 천식을 가진 사람의 경우 도로터널 내 오염된 공기에 단기간 노출되어도 천식반응을 촉진시킬 수 있다고 보고된다.⁷⁾ 특히 직경이 100 nm보다 작은 입자인 초미세입자(ultrafine particles, UFP)⁸⁾는 인체의 폐포까지 침투하여 상피세포와 반응함으로써⁹⁾ 염증을 유발할 수 있기 때문에¹⁰⁾ 직경이 큰 입자들보다 건강에 위해할 수 있다.¹¹⁾ 또한 차량소음에 대한 만성적 노출은 심혈관계 질환을 유발할 수 있다고 보고된다.¹²⁾

서울특별시는 보행환경 개선을 위해 2009년 초부터 터널 내 차도와 보행자도로 사이에 방음벽 설치를 시작했으며, 이를 통해 소음과 매연의 차단 효과를 기대하고 있다. 서울시내에는 총 31개의 터널이 있고, 이중 보도가 설치된 곳은 22곳이다. 서울특별시는 2009년 말까지 보도가 설치된 터널 중 보행자 수가 많은 13곳의 방음벽 설치를 계획하였고, 2009년 10월 29일

[†]Corresponding author :Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health and Institute of Health and Environment, Seoul National University
Tel: 82-2-880-2735, Fax: 82-2-745-9104
E-mail : cleanair@snu.ac.kr

현재까지 9곳에 설치를 완료하였다.

국내의에서 도로터널 내 방음벽 설치에 따른 입자상 물질과 소음 등의 차단효과에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 현재까지 터널 내 환경에 대한 대부분의 연구는 차량을 통해 노출되는 오염물질의 농도측정^{13,14)} 및 성분 분석,^{15,16)} 노출기준 준수여부에 초점이 맞추어져 왔다.¹⁷⁾ 또한 방음벽에 대한 대부분의 연구는 터널 내 보행자도로를 전면 차단하는 폐쇄형 방음벽이 아닌 고속도로 및 주거시설에 주로 설치되는 개방형 방음벽의 차음효과에 집중되어 있다.¹⁸⁻²⁰⁾ 그러나 본 연구의 주요 연구대상인 ‘방음벽’과 그 설치 목적과 설치 형태가 비슷한 지하철역 승강장의 스크린도어의 경우, 설치 후 20.5%의 PM_{2.5} 저감효과,²¹⁾ 약 10 dB 정도의 차음효과²²⁾가 있다는 연구결과가 있을 뿐이다. 따라서 본 연구는 도로 터널 내 방음벽 설치에 따른 입자상 물질과 소음에 대한 효과를 정량적으로 파악하고, 향후 방음벽의 추가 설치 등의 정책적인 결정사항에 있어 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 조사대상

서울특별시에 의해 보도가 설치된 22곳 터널 중 방음벽 설치가 완료되었거나 계획 중인 13곳 터널을 선정하였다. 측정 당시 13곳의 터널 중 9곳의 터널에 방음벽 설치가 완료된 상태였으며, 방음벽은 차도로부터 보행자 도로를 틈새 없이 완전히 차단하고 있었다. 지역별 터널 분포는 종로구(3), 강남구(2), 관악구(2), 동작구(1), 성북구(1), 금천구(1), 서대문구(1), 노원구(1), 강서구(1)였다.

2. 조사방법

2009년 9월부터 10월, 주중 퇴근시간(18:00~20:00)에 한 터널 당 1회씩 측정하였다. 습도의 영향을 최소화하기 위해 우천 당일과, 전후 1일은 측정하지 않았다. 또한 측정위치 선정 시 상행로와 하행로 중, 측정 당시 차량통행이 많은 쪽의 보도를 택하여 측정하였다.

입자상 물질로는 PM_{2.5}, 0.02~1 μm 범위의 초극미세 입자 ultrafine particles(UFP), 그리고 소음수준을 측정하였다. PM_{2.5}의 질량농도(μg/m³)는 광 산란 방식의 휴대용 장비인 Sidepak(AM510, TSI, USA), UFP의 개수농도(Pt/cc)는 입자를 알코올로 감싼 후 레이저 빔을 분사해 입자의 수를 파악하는 P-Trak(Model 8525, TSI, USA)을 이용해 10초 간격으로 기록하였다. 매 측정 전, 두 장비 모두 zero filter로 calibration을 하였으

며, 측정 후 TSI 업체의 TrakPro 소프트웨어를 사용하여 데이터를 받았다. 소음수준(Leq dB(A))은 noise dosimeter(UT84601, Larson Davis INC, USA)를 이용해 측정하였으며, 기기의 작동 조건은 다음과 같다.

- Range : 40-143 dB
- Time weighting : Slow
- Frequency weighting : A
- Frequency weighting for peaks : C
- Exchange rate : 5 dB
- Threshold : 80 dB
- Criteria level : 90 dB
- Logging : 1 record/5 seconds

측정에 사용된 noise dosimeter는 미국 표준 협회의 ANSI S1.25(1991) 기준에 맞게 제작되었으며, 사용 전 Calibrator(CAL15)를 이용해 94, 114 dB에 맞추어 Calibration을 하였다. 측정된 자료는 해당 기기의 Blaze software를 사용해 컴퓨터에 받아 사용하였다.

터널의 중간지점에서 30분 동안 동시에 측정하였으며, 측정높이는 방음벽 설치유무에 관계없이 바닥에서 대략 70~100 cm이었다. 방음벽 미설치 터널의 보호간 높이를 기준으로 하였으며, 측정 장비의 센서를 해당높이에 고정시켜 측정하였다.

방음벽 안팎의 농도를 직접 비교하기에는 통행차량으로 인한 사고위험이 있어, 방음벽이 설치된 터널과 미설치된 터널을 간접 비교하였다. 그러나 1곳의 터널은 방음벽에 설치된 비상문이 열려있어, 측정 장비의 센서를 방음벽 밖으로 내어 직접 비교하였다. 추가적인 정보는 터널의 길이와 높이, 교통량, 온도, 습도를 기록하였다. 터널의 길이와 높이의 경우, 터널 입구에 표시되어 있는 터널 정보를 이용하였으며, 온도 및 습도의 경우 Air velocity meter(Model 9555series, TSI, USA)를 이용하여 측정하였다. 교통량을 보기 위해 5분 동안 통과하는 차량 수를 직접 세어 기록하였다.

3. 자료의 처리

SPSS Version 12.0을 이용하여 30분간 10초 간격으로 측정된 자료를 모두 분석하였다. 일반적인 터널의 정보는 기술통계로 처리하였다. 간접 비교 시 방음벽 설치유무와 환풍기 설치유무에 따른 두 그룹간의 차이, 직접 비교 시 방음벽 안팎의 비교는 Mann Whitney U test로 검정하였다. 특히 환풍기에 의한 차이를 검정 시, 방음벽이 미설치된 4곳의 터널은 분석에서 제외하였다.

III. 결 과

1. 연구대상 터널의 일반적 정보

각 터널을 통과한 차량은 55~236대, 터널의 길이는 88~617 m이었으며, 모든 터널의 공기 중 PM_{2.5}의 (산

술)평균 농도는 69 µg/m³, UFP는 77312 Pt/cc, 소음 수준은 75.6 Leq dB(A)으로 조사되었다. Larsson *et al.*(2007)²³⁾의 연구에 의하면, PM_{2.5}와 0.02~1 µm 범위 UFP의 중위 값이 각각 64 µg/m³, 110000 Pt/cc인 1.5 km의 도로터널에 2시간 동안 노출되었을 때, 피시

Table 1. General description of all tunnels and measurement results

No	Wall	Ventilation	Traffic volume (no./5 min)	Tunnel length (m)	Tunnel height (m)	Temperature (°C)	Humidity (%)	PM _{2.5} (mg/m ³)*	UFP (Pt/cc)*	Noise (Leq dB(A))*
1	No	No	236	568	7.1	21.4	52.7	78±24	148235±44830	85±2
2	No	No	77	485	7.7	19.9	36.6	42±37	130025±57349	83±4
3	No	No	81	260	8.2	18.9	61.3	85±11	71648±33671	81±5
4	No	No	223	555	6.8	22.2	47.2	61±15	73183±51796	92±2
5	Yes	No	179	250	8.5	16.6	39.6	20±4	28470±10329	69±3
6	Yes	No	102	191	7.1	20.9	80.1	165±35	104091±13595	68±4
7	Yes	No	55	360	4.5	17.5	61.5	19±4	36148±14836	72±3
8	Yes	No	117	121	6.2	19.8	66.6	29±15	57468±17119	69±3
9	Yes	No	95	88	3.1	17.7	60.1	176±6	65905±25386	78±2
10	Yes	No	219	140	6.5	26.3	55.0	91±14	113370±41565	70±3
11	Yes	No	119	220	4.9	24.4	40.7	24±11	51957±22853	70±5
12	Yes	Yes	155	442	7.4	21.7	48.4	67±12	31578±13218	72±3
13	Yes	Yes	123	617	9.6	21.3	41.6	41±5	91698±16171	74±4

*: arithmetic mean±SD

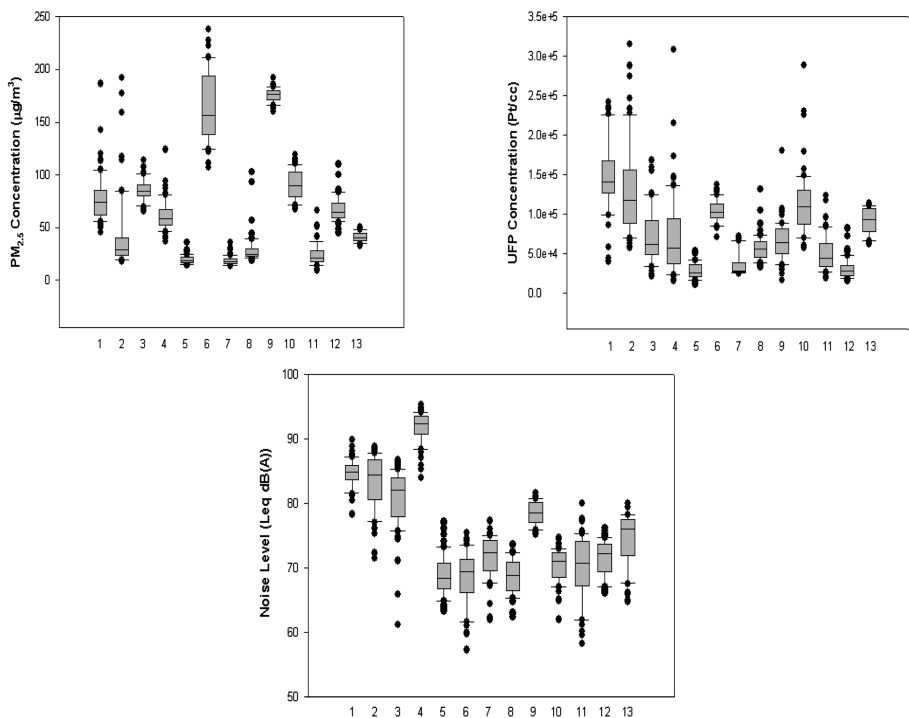


Fig. 1. Distribution of PM_{2.5}, UFP concentration, and noise level in the 13 tunnels. The horizontal lines in the box plot represent median values.

협자의 기도에 염증이 생김을 보였다. 이 입자상 물질의 농도에 비추어 PM_{2.5}의 농도의 중위 값이 64 µg/m³ 이상인 터널은 5(38.5%)곳, 이하는 8(61.5%)곳이었으며, UFP의 농도가 110000 Pt/cc 이상인 터널은 2(15.4%)곳, 이하는 11(84.6%)곳이었다. 소음의 경우 환경부의 소음, 진동규제법 시행규칙에 의한 도로교통 소음한도인 73 Leq dB(A)를 넘는 터널은 6(46.2%)곳이었고, 이 중 방음벽 미설치 터널은 한도를 모두 초과하였으며, 설치된 터널은 9곳 중 2곳이 초과하였다. 터널의 특성과 측정결과는 Table 1과 Fig. 1에 나타났다.

2. 간접 비교

13곳의 터널 중간지점에서 측정된 PM_{2.5}, UFP의 농도와 소음수준을 방음벽과 환풍기의 영향을 보기 위해 방음벽 설치여부에 따라 터널을 분류하여 비교하였다. 방음벽이 설치된 터널은 미설치 터널에 비해 PM_{2.5}의 평균농도가 높았고, UFP와 소음의 평균수준은 낮았다. 두 그룹간의 차이는 PM_{2.5}, UFP, 소음 모두 유의하였다(p<0.001). 또한 방음벽이 설치된 9곳의 터널 중, 환풍기가 설치된 터널은 미설치 터널에 비해 PM_{2.5}와 UFP의 평균농도가 낮았다. PM_{2.5}의 경우 두 그룹간의 차이가 유의하였으나(p<0.05), UFP의 경우 유의하지 않았다(p=0.366) (Table 2).

3. 직접 비교

방음벽 안팎의 직접 비교가 가능했던 1곳(6번 터널)에서는 PM_{2.5}, UFP의 농도와 소음수준 모두 유의한 차이가 있었다(p<0.001). 입자상 물질의 경우 방음벽 내측 농도가 외측에 비해 높았으며, 소음의 경우 내측이 외측보다 낮았다(Table 3). 방음벽의 내측/외측 농도 비율은 PM_{2.5}; 1.62, UFP; 1.07, 소음; 0.89로 나타났으며, 방음벽 설치로 인해 38.2%의 PM_{2.5}농도 증가, 6.7%의 UFP농도 증가, 11.8%의 차음효과를 보인 것으로

Table 3. Concentrations of PM_{2.5} and UFP, and noise level inside and outside tunnel

	PM _{2.5} (µg/m ³)	UFP (Pt/cc)	Noise (Leq dB(A))
Inside	165±35	104091±13595	68±4
Outside	102±21	97126±22689	76±6
p-value	<.001	<.001	<.001

로 나타났다. 측정 시 방음벽 안쪽의 환풍기는 미설치되었으며, 5분 동안의 교통량은 102대였다.

IV. 고 찰

국내외에서 터널 내 보행자의 건강보호를 위해 설치된 방음벽의 효과에 대한 연구는 그 동안 거의 없었다. 터널 내 방음벽의 입자상 물질과 소음에 대한 차단 효과를 보기 위해 서울시내 방음벽을 설치하기로 한 13곳 터널을 대상으로 측정한 결과, 방음벽을 설치한 터널은 그렇지 않은 터널에 비해 낮은 소음수준을 보임으로, 방음벽의 주요목적인 소음의 차단효과가 있는 것으로 보인다. 또한 환경부의 도로교통 소음한도를 방음벽 미설치 터널은 모두 초과, 설치 터널은 9곳 중 2곳에서 초과하였다. 방음벽이 설치되었음에도 한도를 초과한 2곳 터널 중, 1곳의 터널은 터널길이가 최소인 88 m로 방음벽 외부소음에 영향을 받을 수 있다는 점, 다른 1곳의 터널은 방음벽 미설치 터널들이 모두 80 Leq dB(A) 이상의 수준임에 비해 상대적으로 낮은 74 Leq dB(A)를 보였다는 점에 근거해 방음벽의 차음효과를 예상할 수 있다.

서울시내 방음벽을 설치하기로 한 13곳 터널을 대상으로 한 터널당 1회씩 측정하였다. 반복측정이 아닌 1회 측정을 통해 그 터널의 특성을 대표할 수 있는 지에 대해 선택성 편견(selection bias)이 따를 수도 있겠지만, 주중 퇴근시간(18:00~20:00)에만 측정, 우천 당

Table 2. Concentrations of PM_{2.5} and UFP, and noise level in tunnels by wall and ventilation system

		No. of tunnels	PM _{2.5} (µg/m ³)	UFP (Pt/cc)	Noise (Leq dB(A))
No wall		4	66±19	106093±38866	85±5
Wall		9	70±62	64251±31800	71±3
p-value			<.001	<.001	<.001
In tunnels with wall	No ventilation	7	75±70	65344±32305	71±4
	Ventilation	2	54±19	61638±42511	73±2
p-value			0.037	0.366	<.001

일과 전후 1일은 미 측정, 터널의 중간지점에서 측정함으로써 특정 변수들의 영향을 통제하였다.

방음벽에 의한 입자상 물질 농도의 간접 비교 시, 방음벽 내측에서 $PM_{2.5}$ 는 증가, UFP는 감소하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 $PM_{2.5}$, UFP의 농도가 모두 증가한 직접 비교 결과와 다른 차이를 보이고 있었다. 간접 비교는 같은 터널의 방음벽 내측, 외측을 동시에 측정하는 것이 아니라 방음벽 설치유무를 기준으로 방음벽의 효과를 간접적으로 비교한 것이다. 그러므로 공기의 흐름에 민감한 입자상 물질의 경우, 간접 비교를 통한 방음벽 효과를 측정하기는 쉽지 않은데(Fig. 1), 이것은 교통량 등 다른 환경요인의 영향을 받을 수 있기 때문이다. 연구 대상 터널 수가 적기 때문에 통계적 처리 및 해석을 하기에 한계가 있지만, $PM_{2.5}$, UFP, 소음과 교통량, 터널의 길이, 높이와의 상관성을 보기 위해 Pearson test를 실시한 결과, 모든 항목에서 유의하지 않음을 보였다.

도로교통 소음의 원인은 크게 3가지로 구분되는데, 자동차 엔진과 부속장비에서 발생하는 엔진소음, 흡배기계 및 자동차 표면과 공기의 흐름에 의해 발생하는 기체소음, 타이어와 도로 표면과의 마찰에 의해 발생하는 노면소음(타이어소음) 등이다.²⁴⁾ 일반적으로 교통량과 소음수준이 비례관계로 판단하기 쉬우나, 본 연구에서 계수한 차량 수는 차량의 종류 및 사용 연료 등을 기준으로 분류하여 계수하지 않고, 구분 없이 계수하였기 때문에 교통량과 소음수준의 비례관계를 예측하기에는 무리가 있어 보인다(Table 1).

방음벽이 설치된 9곳의 터널 중, 6곳의 터널 내 방음벽에 비상문이 설치되어 있었다. 대부분의 비상문은 잠겨있었고, 1곳은 비상문이 열려있어 방음벽 효과에 대한 직접 비교가 가능하였다. 방음벽을 통해 입자상 물질의 농도와 소음수준이 모두 감소될 것이라는 예상과 달리, 직접 비교 시 소음감소 효과는 있었으나, 방음벽 내부의 입자상 물질 농도가 외부에 비해 높았다. 이것은 첫째, 해당 터널의 환풍기 미설치와 터널 중간지점에서의 측정으로 인해, 외부에서 유입된 공기가 순환되지 못하였기 때문이라고 판단된다. 둘째, 교통수단에서 발생하는 입자상 물질의 기여도는 입자의 크기가 작을수록 더욱 크다.²⁵⁾ 또한 입경이 다른 입자는 중력장에 있어서 침강속도가 다르기 때문에 입자간에 상대적인 운동이 생겨 충돌을 일으켜 응집한다.²⁶⁾ 방음벽 외측은 내측에 비해 공기에 의한 입자의 운동이 활발하고, 이로 인해 내측 보다 입자의 응집이 잘 일어나 침강하여 방음벽 외측의 농도가 내측에 비해 더 낮을 수 있다. 따라서 환풍기가 미설치된 터널의

경우, 방음벽의 입자상 물질 차단효과는 없는 것으로 보인다.

도로터널 내 환풍기 설치의 목적은 자동차로부터 나오는 유해물질의 농도를 희석시키고, 운전자, 통행자 모두에게 호흡에 필요한 산소를 공급하기 위함이다. 300 m 이하의 짧은 터널에서는 이동차량에 의해 외부의 공기가 유입(피스톤 효과)되어 오염된 공기를 밀어낼 수 있지만, 긴 터널의 경우에는 추가적인 환풍기의 설치가 필요하다.²⁷⁾ 따라서 도로터널 내 방음벽이 설치된 경우, 이동차량에 의한 피스톤 효과를 기대할 수 없기 때문에, 방음벽 미설치 터널에 비해 공기의 순환이 덜함을 예측할 수 있다. 실제로 방음벽은 설치되었으나 환풍기가 미설치된 특정 터널에서 측정당시 불쾌한 냄새가 지속되었으며, 터널을 통과하는 다수의 주민들이 마스크를 착용하고 있었다. 비록 본 연구에서 환풍기 설치여부에 따라 $PM_{2.5}$ 와는 달리, UFP의 측정결과는 유의한 차이를 보이지는 않았지만, 환풍기가 설치된 터널의 평균농도가 미설치 터널보다 낮은 점, 또한 간접 비교였다는 점을 감안할 때, 직접 비교 시 환풍기 설치로 인한 입자상 물질의 감소효과를 기대할 수 있을 것이다.

본 연구의 한계점은 대부분이 간접 비교였다는 점이다. 한 곳 터널만 직접 비교가 가능하였기 때문에 향후 더 많은 터널을 통한 추가적인 직접 비교가 요구된다. 또한 본 연구에서는 입자상 물질과 소음을 대상으로 하였지만, 자동차로 인한 대기 오염물질의 다양성을 고려할 때, CO와 NO_x ²⁸⁻³⁰⁾의 차단효과에 대한 연구도 필요하다고 본다.

V. 결 론

본 연구는 터널 내 방음벽의 $PM_{2.5}$, UFP, 소음수준에 대한 차단효과를 보기 위해 서울시내의 13곳 터널중간 지점에서 18:00~20:00에 30분 동안 측정하였다. 방음벽이 설치된 터널과 미설치 터널 두 그룹으로 나눠 방음벽의 효과를 간접적으로 비교한 결과, 방음벽이 설치된 터널에서 UFP, 소음의 감소와 $PM_{2.5}$ 의 증가효과가 나타났다. 특정 터널의 방음벽 내외를 동시 측정된 경우에도 소음의 감소를 확인하였으나, 입자상 물질들은 증가하였다. 터널 내 보행자의 건강 보호를 위한 방음벽 설치의 효과를 극대화시키기 위해 환풍기 설치가 요구된다. 본 연구를 통해 주로 방음벽의 간접 비교가 이루어진 점, 대상물질이 입자상 물질과 소음에 국한된 점을 근거로 향후 다양한 물질에 대한 방음벽의 직접 비교가 요구된다.

참고문헌

1. Seoul city transportation headquarters, State of vehicle registration. Available from: http://transport.seoul.go.kr/tdata/tdata02_01_14.html
2. Ministry of land, transportation and maritime affairs, Office of transport policy, Safety management of structures as bridge, tunnel, etc. Available from: http://transport.mltm.go.kr/USR/WPGE0201/m_19444/DTL.jsp
3. El-Fadel, M. and Hashisho, Z. : Vehicle emission and air quality assessment in roadway tunnels: the Salim Slam tunnel. *Transportation Research Part D*, **5**, 355-372, 2000.
4. Dockey, D. W. and Pope, C. A. : Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual Reviews of Public Health*, **15**, 107-132, 1994.
5. Anderson, K. R., Avol, E. I., Edward, S. A., Shamoo, D. A., Peng, R. C., Linn, W. S. and Hackney, J. D. : Controlled exposure of volunteers to respirable carbon and sulfuric acid aerosols. *Journal of the Air and Waste Management Association*, **42**, 770-776, 1992.
6. Harrison, R. M. and Yin, J. : Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *Science of the Total Environment*, **249**, 85-101, 2000.
7. Svartengren, M., Strand, V., Bylin, G., Jarup, L. and Pershagen, G. : Short-term exposure to air pollution in a road tunnel enhances the asthmatic response to allergen. *European Respiratory Journal*, **15**, 716-724, 2000.
8. Sioutas, C., Delfino, R. J. and Singh, M. : Exposure assessment for atmospheric ultrafine particles (UFPs) and implications in epidemiologic research. *Environmental Health Perspective*, **113**, 947-955, 2005.
9. Brown, J. S., Zeman, K. L. and Bennett, W. D. : Ultrafine particle deposition and clearance in the healthy and obstructed lung. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **166**, 1240-1247, 2002.
10. Seaton, A., MacNee, W., Donaldson, K. and Godden, D. : Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet*, **345**, 176-178, 1995.
11. Cheng, Y. C., Liu, Z. S. and Chen, C. C. : On-road measurements of ultrafine particle concentration profiles and their size distributions inside the longest highway tunnel in Southeast Asia. *Atmospheric Environment*, **44**, 763-772, 2010.
12. Wolfgang, B., Bernd, B., Marianne, S., Norbert, K. and Hartmut, I. : Traffic Noise and Risk of Myocardial Infarction. *Epidemiology*, **16**, 33-40, 2005.
13. Chiang, H. L. and Huang, Y. S. : Particulate matter emissions from on-road vehicles in a freeway tunnel study. *Atmospheric Environment*, **43**, 4014-4022, 2009.
14. Knibbs, L. D., Richard, J. D., Lindia, M. and Mengersen, K. L. : On-road ultrafine particle concentration in the M5 east road tunnel. *Atmospheric Environment*, **43**, 3510-3519, 2009.
15. Lough, G. C., Schauer, J. J., Park, J. S., Shafer, M. M., Deminter, J. T. and Weinstein, J. P. : Emissions of metals associated with vehicle roadways. *Environmental Science & Technology*, **39**, 826-836, 2005.
16. He, L. Y., Hu, M., Zhang, Y. H., Huang, X. F. and Yao, T. T. : Fine particle emissions from on-road vehicles in the Zhujiang tunnel, China. *Environmental Science & Technology*, **42**, 4461-4466, 2008.
17. Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A. and Pericicous, K. : Modeling air quality in street canyon: a review. *Atmospheric Environment*, **37**, 155-182, 2003.
18. Chung, H. J., Ryu, Y. J. and Chung, M. C. : Numerical noise analysis of high-speed railway system with various shapes of noise barrier. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **24**(2D), 285-292, 2004.
19. Lee, S. W. and Cha, S. G. : A fundamental study for the performance improvement soundproofing walls around express railroad. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **19**(10), 195-202, 2003.
20. Kim, S. W., Kim, K. M., Park, H. K., Kim, H. R. and Kim, T. W. : An experimental study on the noise attenuation characteristics of noise barriers in the apartment housing development. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **16**(8), 135-142, 2000.
21. Jhun, J. S., Kim, D. S., Park, D. S., Han, K. M., Lee, H. C., Lee, J. and Kim, J. H. : Changes of indoor air quality in a platform by installing PSDs. *Journal of the Korean Society for Atmospheric Environment*, **18**-22, 2009.
22. Nam, J. H., Park, K. S., Son, W. T., Ko, J. L. and Shin, J. W. : A Study of the Indoor Noise Reduction by Installation of Platform Screen Doors in a Subway. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 1130-1135, 2010.
23. Larsson, B.-M., Sehlstedt, M., Grunewald, J., Skold, C. M., Lundin, A., Blomberg, A., Sandstrom, T., Eklund, A. and Svartengren, M. : Road tunnel air pollution induces bronchoalveolar inflammation in healthy subjects. *European Respiratory Journal*, **29**, 699-705, 2007.
24. Ministry of Environment : A study of improvement to road traffic noise. A Book of Ministry of Environment, 2004.
25. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA) Occupational Safety and Health Research Institute : A Study on Health Protective Condition of Subway Workers among Advanced Countries. A Research Paper, 2006-51-709, 2006.
26. William, C. H. : Aerosol Technology Second Edition. John Wiley & Sons, INC, 1999.
27. Bari, S. and Naser, J. : Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25**, 70-77, 2010.
28. Kristensson, A., Johansson, C., Westerholm, R., Swietlicki, E., Gidhagen, L., Wideqvist, U. and Vesely, V. : Real-world traffic emission factors of gases and par-

- ticles measured in a road tunnel in Stockholm, Sweden. *Atmospheric Environment*, **38**, 657-673, 2004.
29. John, C., Friedrich, R., Stachelin, J., Schlapfer, K. and Stahel, W. A. : Comparison of emission factors for road traffic from a tunnel study(Gubrist tunnel, Switzerland) and from emission modeling. *Atmospheric Environment*, **33**, 3367-3376, 1999.
30. Dallmann, T. R. and Harley, R. A. : Evaluation of mobile source emission trends in the United States. *Journal of Geophysical Research*, **115**, D14305, 2010.