

터널 内部의 道路交通騒音

여운호 · 유명진*

영동전문대학 환경관리과, *서울시립대학교 환경공학과

Road Traffic Noise in Tunnel

Woon Ho Yeo

Department of Environmental Management, Yeongdong Junior College

**Department of Environmental Engineering, Seoul City University*

ABSTRACT

This paper describes the impact of reflected sound in tunnel. The impact of reflected sound is obtained from making a comparison between measurements of tunnel and bridge. Sound level of tunnel is higher than that of bridge because reflected sound is generated in tunnel. Road traffic noise cannot be freely propagated because there are many buildings in urban. Therefore, a tunnel effect is generated in urban road. The impact of reflected sound is generated not only in tunnel, but also in urban road. This study provides the basic data for tunneling work and noise control strategy in urban road.

Keywords : Reflected sound, road traffic noise, tunnel effect.

I. 서 론

소득 수준 향상과 더불어 자동차 수요 급증으로 광범위한 지역에 도로교통소음 문제가 매우 심각한 실정이다. 자동차 하나 하나를 생각하면 점음원이 될수 있으며, 반구면파를 형성하고 있다. 이렇게 해석하는 것은 교통량이 적은 교외 도로등에서 찾아볼수 있으나, 교통량이 많은 도시지역 도로상의 자동차에서 발생하는 소음은 점음원이라 할 수 없으며, 점들이 조밀하게 이어진 즉, 선음원으로 볼 수 있고 반원통파를 형성하는 이동음원이라 할 수 있다. 자동차 소음원은 엔진음, 흡배기음, 웬음, 주행음 등이 있으며¹⁾ 확산되는 방향은 대체로 무지향성을 갖고 있다.

음파는 넓은 호수, 하천유역, 평야지대 및 해양과 같이 음이 자유로이 전파될 수 있는 자유음장하에서 반사현상이 잘 일어나지 않지만 산악지대, 건물이 밀집된 도시지역에서는 반사현상이 자주 확인되고 있다. 특히, 건물이 과밀화, 고층화된 곳에서는 음파가 자유로이 전파될 수 없고 반사효과가 대단히 커서 실내 음향측정시 벽의 반사효과를 고려하는

것처럼 반사음 영향을 도로교통소음 연구에 중요 고려 대상으로 하는 것이 바람직하다.^{1)~8)} 지금과 같은 차량 증가 현상이 지속되면 차속의 감소로 주행소음의 영향은 감소되는 반면, 반사소음 영향이 더 커질 것이다. 따라서 도시지역내의 도로교통소음은 저층에만 방음 효과가 있는 방음벽으로 해결하기 힘들며 고층방음을 위해서 방음터널 설치가 요구되므로 방음터널 설계 및 터널 통과 차내의 승객보호를 위해서 터널 내부의 도로교통소음 연구는 절실히 필요하다. 그러나 도로교통소음에 대한 연구는 고속도로나 도시의 고속화도로를 대상으로 한 것이 대부분이며 도시지역내의 도로를 대상으로 한 연구는 많지않아 도시지역내의 적합한 도로교통소음 방지대책을 수립하는데 어려움이 많으며, 특히 반사조건을 고려한 도로교통소음 연구는 극히 드문 실정이다.^{1)~3)} 본 연구에서는 도시지역내 반사소음 영향정도를 연구하는 한 과정으로 터널내의 반사음 정도와 소음발생 인자들의 관계를 찾고자 서울시내 소재 터널 및 교량을 대상으로 Leq , L_{10} , L_{50} , L_{90} , TNI 등의 소음도와 교통량, 차속, 대형차혼입율, 터널과 교량의 구조 및 기타 특징을 조사하였다.

II. 조사 방법

1. 조사기간

조사는 1992년 12월부터 1993년 8월까지 각조사 대상 지점별로 오전 7시에서 오후 11시 사이에 매 시간 실시하였다.

2. 조사지점

조사대상 지역은 반사음이 잘 발생하는 확산음장 조건인 북악터널, 구기터널, 금호터널, 하계동 지하차도 등과 반사음이 잘 발생하지 않는 자유음장인 천호대교, 올림픽대교, 잠실대교, 성수대교, 한남대교 등이다. 이 조사대상 지역들은 통과하는 차종등의 구성이 유사하며, 터널내의 반사음 영향정도를 비교 관찰하는데 좋은 조건을 갖고 있다. 각 조사대상 지역에서는 압소음 영향정도가 최저이며, 대상소음 측정을 하기 적합한 터널 및 교량 중앙부에서 수회 반복 측정하였다.

3. 측정항목 및 측정방법

측정항목은 Leq , L_{10} , L_{50} , L_{90} , TNI, 교통량, 차속, 대형차혼입율 등이며, 동시에 터널 및 교량의 폭, 길이, 높이, 주 사용자재 및 기타 구조 등을 조사하였다.

측정장비는 소음도 측정을 위한 정밀 소음계 (B&K 2231), 주파수 특성을 파악하기 위한 옥타브 필터 (B&K 1625), 주파수 분석을 위한 Module(B&K BZ 7103), 통계처리를 위한 Module(B&K BZ7101), 처리결과를 얻기 위한 Printer(B&K 2318), 차속 측정을 위한 Speed Gun (MR K-15) 등을 사용하였다. 특히 소음도 측정시 소음계의 Time Weighting은 Fast, Frequency Weighting은 A특성, Preset time은 20 min이었다. 대형차와 소형차 구분은 적재중량 2.5 톤을 기준으로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 차속과 교통량

차속과 교통량은 소음도에 직접적으로 영향을 미치는 요소이다. 일정한 도로를 통과하는 자동차들은 교통량이 적을 때에 도로 제반조건 등에 따라 차속이 결정될 수 있다. 그러나 교통량이 증가하게 되면 도로 제반여건에 대한 영향도 있지만 다른 차들에 의해 여러 제약을 받아 차속이 결정 된다. 본 연구에서 조사대상이 된 터널내부의 차속과 교통량을 조사한 결과 Fig. 1.과 같이 나타났다. 이 결과는

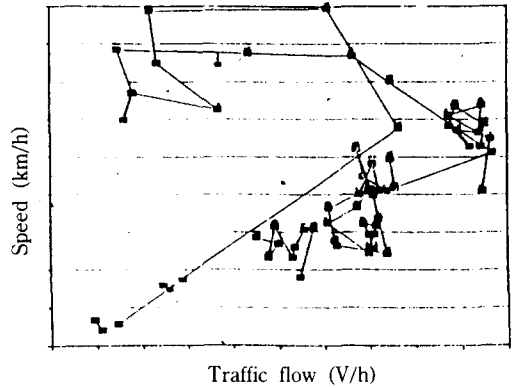


Fig. 1. Measured traffic flow and speed relationship.

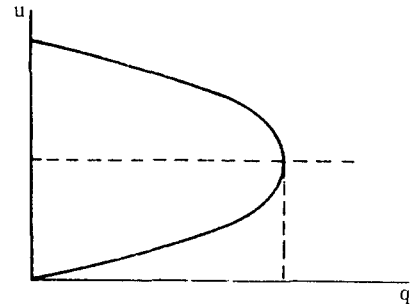


Fig. 2. Theoretical traffic flow and speed relationship.

Greenshield의 속도-밀도 관계식에 의해 산출한 식 (1)과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이 식은 그림으로 나타내면 Fig.2.와 같다.⁹⁾

$$\begin{aligned}
 q &= uk \\
 k &= k_j \left(1 - \frac{u}{u_f} \right) \\
 \therefore q &= uk_j \left(1 - \frac{u}{u_f} \right) \\
 &= k_j \left(u - \frac{u^2}{u_f} \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 q : 교통량(V/h)
 u : 속도(km/h)
 u_f : 자유흐름시의 속도(km/h)
 k : 교통밀도(V/km)
 k_j : 최대 교통밀도(V/km)

교통량, 차속, 교통밀도 관계를 곡선으로 나타내면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림들을 통해서

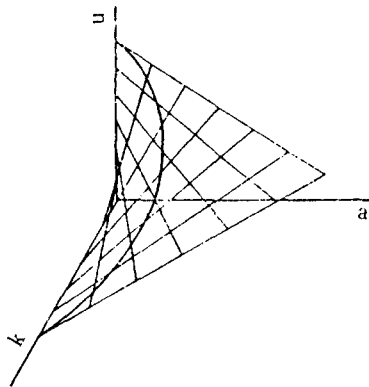


Fig. 3. Traffic flow, speed and traffic density relationship.

Table 1. Noise level and vehicle speed relationships

Noise level (dB)		Speed (km/h)			
		20	30	40	50
Leq	Tunnel	81	83	86	94
	Bridge	67	69	72	74
L ₁₀	Tunnel	84	85	88	96
	Bridge	69	70	74	78
L ₅₀	Tunnel	75	77	80	89
	Bridge	62	65	68	72
TNI	Tunnel	79	85	89	101
	Bridge	69	72	76	81

알 수 있듯이 일정한 도로에서 차속과 교통량이 무한히 증가할 수 없으며, 경우에 따라서는 서로가 억제 요소로 작용하기도 하므로 도로교통소음 영향 인자로 차속과 교통량이 단순히 소음도 증가요인이 되지는 않고 있음을 알 수 있다.

2. 소음 발생요인과 터널내의 반사효과

도로교통소음은 교통량, 차속, 차종, 도로구조, 도로주변환경 등에 의하여 영향을 받게 되며, 이러한 요인에 따른 반사효과는 다음과 같다.

(1) 차속 변화에 따른 반사음 효과

교통량과 대형차혼입율이 유사한 경우 차속 변화에 따른 터널내부의 소음도는 Table 1과 같다.

Table 2. Noise level and traffic flow relationships

Noise level (dB)		Traffic flow (V/h)			
		2000	3000	4000	5000
Leq	Tunnel	86	87	89	93
	Bridge	69	71	72	74
L ₁₀	Tunnel	89	91	92	94
	Bridge	72	74	75	78
L ₅₀	Tunnel	83	85	86	88
	Bridge	63	66	70	72
TNI	Tunnel	90	93	95	101
	Bridge	76	83	86	89

이 표에 의하면 유사한 교통량, 대형차혼입율에서 차속이 증가함에 따른 소음도가 증가하였으며, 터널내의 Leq값이 교량위의 Leq값 보다는 14~20 dB 정도 높게 나타났다. 한편 L₁₀, L₅₀, TNI값들도 터널내의 값이 교량위의 값보다 각각 14~18, 12~17, 10~20 dB만큼 높았다. 자유롭게 음이 전파될 수 있는 교량위에서는 반사음이 거의 존재하지 않지만, 반사조건을 잘 갖고 있는 터널내에서는 직접음과 반사음이 합성되어 높은 소음도를 나타내고 있으며, 차속이 변함에 따라서 반사음 영향이 다르게 나타났는데 그 이유는 고주파음의 발생정도가 변화되었던 것으로 사료된다.

(2) 교통량 변화에 따른 반사음 효과

차속과 대형차혼입율이 유사한 경우 교통량 변화에 따른 터널 내부의 소음도는 Table 2와 같다.

이 표에서 알 수 있듯이 교통량이 증가함에 따라 소음도도 증가하였으며, 터널내부의 소음이 교량위의 소음보다 Leq 값으로는 16~19 dB, L₁₀ 값으로는 16~17 dB, L₅₀ 값으로는 16~20 dB, TNI 값으로는 9~14 dB 높게 나타났다.

(3) 반사효과에 의한 터널내부의 음에너지 밀도

터널내부의 소음 총에너지밀도는 터널입구, 중앙부, 출구 등에 동일한 성능, 동일한 하중, 동일한 속도로 달리고 있는 자동차가 있다고 가정할 경우, 입구를 달리는 자동차 소음의 일부는 터널내부로 전파되고, 출구를 달리는 자동차 소음의 일부도 터널내부로 전파되므로 터널은 역이송법칙이 성립되지 않는 실내공간과 같은 확산음장조건이 형성되었다. 즉, Fig. 4에서 처럼 직접음과 반사음이 공존하는

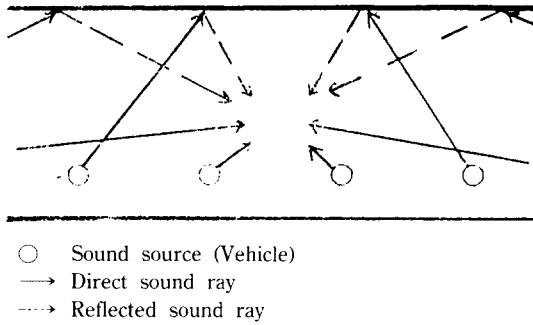


Fig. 4. Sound field in tunnel.

상태가 된다. 따라서, 터널 중앙부에서의 소음 총에너지밀도는 직접음 에너지밀도와 반사음 에너지밀도의 합으로서 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

$$\delta_d = \frac{wQ}{4\pi r^2 C}$$

$$\delta_r = \frac{4w}{CR} \text{ 라고 표현할 때에}$$

$$\delta = \delta_d + \delta_r$$

$$\therefore \delta = \frac{wQ}{4\pi r^2 C} + \frac{4w}{CR} \quad (2)$$

- 여기서 δ_d : 직접음 에너지밀도(J/m³)
- δ_r : 반사음 에너지밀도(J/m³)
- δ : 총에너지 밀도(J/m³)
- w : 음원의 파워(w)
- Q : 지향계수
- r : 음원으로부터 떨어진 반경(m)
- V : 터널 체적(m³)
- S : 터널 내부의 표면적(터널 입구 및 출구 단면적 포함된 값)(m²)
- C : 음의 전파속도(m/sec)
- R : 실정수 = $\frac{a}{1-\bar{a}}$
- \bar{a} : 평균 흡음율

위에서 언급한 소음 총에너지밀도 표현은 도로 양면에 건물과 같은 반사체가 조밀하고 도로 상부에 고가차도와 같은 반사체가 있는 지역에서도 적용 가능한 식으로 볼 수 있다. 또한, 이러한 에너지밀도 관계식은 대도시내 고층건물이 과밀한 지역의 국지적인 부분에도 적용할 수 있을 것이다.

3. 소음발생요인과 터널 내부에서의 소음도

도로교통소음요인과 터널내부의 소음도 관계를 정확히 밝힌다는 것은 터널 건설시 감음대책 및 방음터널 설계에 큰 도움이 될 것이다. 반사음의 영향이 큰 터널내부의 교통량, 차속, 대형차혼입율과 소음도 관계를 회귀분석한 결과 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$Leq = 64.94 - 0.64 \ell n(q) + 1.5 \ell n(p_r) + 6.22 \ell n(u) \quad (3)$$

이 관계식은 서울시내 고속화도로를 대상으로 연구하여 발표한 식(4)와 비교하였을 때 차이가 있는데 그 이유는 터널내의 반사음이 존재한다는 것을 의미하고 있다.¹¹⁾

$$Leq = 57.11 + 2.32 \ell n(q) + 5.88 p_r - 0.09 u \quad (4)$$

- 여기서, q : 교통량(V/h)
- p_r : 대형차혼입율
- u : 차량의 평균속도(km/h)

IV. 결 론

확산음장인 터널 내부의 반사음 효과를 살피며, 도로교통소음 발생요인들의 특성을 연구하기 위하여 서울시내 소재 터널과 교량을 대상으로 소음도, 교통량, 차속, 차종, 터널 및 교량의 구조 등을 측정 조사한 결과는 다음과 같았다.

- ① 터널 내부에서의 교통량, 교통밀도 및 차속관계는 Greenshield의 속도-밀도 관계식에서 산출된 식과 잘 일치하였으며, 일정한 도로에서 차속과 교통량이 함께 증가할 수도 있지만 경우에 따라서는 제한 요소로서 작용하므로 도로교통소음 발생에도 이와 같은 특성들이 나타날 수 있다.
- ② 차속 변화에 따른 반사음 효과는 교통량과 대형차혼입율이 유사한 경우 터널 내부의 소음도가 교량위의 소음도보다 Leq 값으로 14~20 dB 높았으며, L_{10} , L_{50} , TNI 값으로도 각각 14~18 dB, 12~17 dB, 10~20 dB 높게 나타났다. 그리고 차속이 변화면서 고주파음 발생율도 변화하여 반사음의 효과에 영향을 주었다.
- ③ 교통량 변화에 따른 반사음 효과는 차속과 대형차혼입율이 유사한 경우 터널내의 소음도가 교량위의 소음도보다 Leq 값으로 16~19 dB, L_{10} , L_{50} , TNI 값으로 각각 16~17 dB, 16~20 dB, 9~14 dB 높았다.
- ④ 터널 내부에서의 도로교통소음 발생요인에 의한 소음예측식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Leq = 64.94 - 0.64 \ell n(q) + 1.5 \ell n(p_T) + 6.22 \ell n(u)$$

이상의 결과에서 터널 내부의 교통소음 반사효과가 큰 것을 알 수 있으며 건물의 과밀화, 고층화된 도시지역 도로에서도 그와 유사한 효과가 존재할 수 있으므로 본 연구는 이러한 교통소음 문제 해결에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) 조한인 : “도로교통소음예측모델”. 연세대학교 산업대학원 석사학위 논문, p.67, 1984.
- 2) 石井聖光 : “道路交通騒音豫測計算方法に關する研究”. 日本音響學會誌, 33(8), 426-430, 1977.
- 3) 渡邊義則, 藤岡良雄 : “道路交通騒音の豫測計算方法に關する研究(第2報)”. 九州工業大學研究報告, No. 41, pp. 53-61, 1980.
- 4) Kadhim, S. and Jraiw : “A Computer Model to Assess and Predict Road Transport Noise in Built-up Areas”, *Applied Acoustics*, 21, 147-162, 1987.
- 5) Wu Shuoxidn : “Computer Simulation of Road Traffic Noise in an Urban Built-up Area”, *Applied Acoustics*, 22, 71-78, 1987.
- 6) Mitsuyasu Yanashita and Kokei Yamamoto : “Scale Model Experiments for the Prediction of Road Traffic Noise and the Design of Noise Control Facilities”, *Applied Acoustics*, 31, 150-153, 1990.
- 7) Ult Sandberg : “Road Traffic Noise-The Influence of the Road Surface and its Characterization”, *Applied Acoustics*, 21, 97-118, 1987.
- 8) Radwan, M. M. and Oldham, D. J. : “The Return Wall as a Traffic Noise Barrier”, *Applied Acoustics*, 20, 169-182, 1987.
- 9) 최재성, 원재무 : “교통공학”. 박영사, 80-119, 1991.
- 10) 정일록 : “소음진동학”. 신광출판사, 195-226, 1989.