

대도시 도로교통소음 예측 연구

A Study on the Prediction of Urban Road Traffic

여 운 호*

Woon-Ho Yeo

ABSTRACT

Neighboring buildings which are sufficiently close to both sides of an urban street reflect sound back to the road and sound energy is increased by these reflectors. Therefore, this study is focussed on the prediction modeling for road traffic noise under reflective conditions. A part of a block in urban road is regarded as a box. The sound energy density in the box is employed to establish prediction formulas in terms of independent variables. The validity of the proposed prediction method has been experimentally confirmed by applying it to actually measured road traffic noise data. On the whole, the agreement between measured and predicted noise levels appeared to be satisfactory.

1. 서 론

대도시의 도로교통소음은 다른지역 도로교통소음과 전파경로가 다르며, 대도시내에는 건물과 같은 여러 반사체의 반사작용으로 동일한 출력을 내는 자동차가 주행할때 당연히 더 심각한 소음공해를 유발한다.

기존 대부분의 도로교통소음 예측모형이 속도, 교통량, 차종만을 주된 영향인자로 고려하여 연구되었으므로^(1~3) 도로변 반사체가 별로 없는 고속도로같은 곳에서는 어느 정도 잘 적용될 수 있지만, 건물이 고층화, 과밀화된 대도시지역 도로는 터널내의 도로와 유사한 도로변 조건이므로 적용하기 곤란한 실정이다. 그러므로 이러한 지역에서는 반사효과를 고려하는 것이 필요하다.

현재까지 반사효과를 고려한 연구에서^(4~10) 반사효과를 독립변수화한 것들은 대부분 반사량의 일부분을 고려할 수 있게 되므로 반사효과가 정확히 반영되기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 대부분의 반사효과가 예측값에 반영될 수 있게 대상 도로의 일부분을 박스(box)로 가상하여⁽¹¹⁾, 이 폐쇄된 공간내의

소음 에너지 밀도는 직접 음에너지 밀도와 반사음 에너지 밀도의 합이며 이것으로 도로교통소음 예측식을 수립하였다.

2. 대도시 도로교통소음 전파경로

본 연구에서는 도로중 블록(block)내의 도로 및 도로변 특성이 유사하게 연속되는 지점을 선정하여 모형의 적합성을 관찰하였다.

조건별 대상도로는 터널 내의 도로(박스 1), 양변에 고층건물이 존재한 고가도 하부의 도로(박스 2), 양변에 고층건물이 존재한 도로(박스 3), 한 변에만 고층건물이 존재한 도로(박스 4), 개활지 통과 도로(박스 5) 및 교량상의 도로(박스 6) 등이었다.

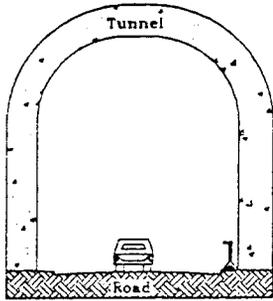
측정지점의 반사조건(박스)별 도로, 횡단면 및 종단면의 직접음과 1차 반사음 전파경로는 Fig. 1과 같다.

3. 대도시 도로교통소음 대책을 위한 도로 교통소음 예측

3.1 반사음을 고려한 대도시 도로교통소음 예측 모형 수립

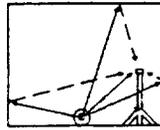
대도시 도로교통소음은 앞에서 살펴본 것처럼 도로변 여러 반사체에 의하여 반사되며 소음피해는 더

*정회원, 인천전문대학 환경공학과

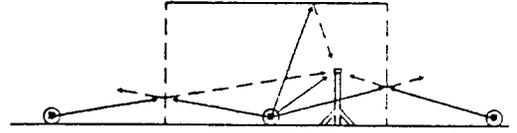


(a) Road

- ⊙ : Sound source(=vehicle) —→ : Direct sound ray
- ⊥ : Sound level meter - -> : Reflected sound ray
- : Reflective surface
- - : Assumed reflective surface



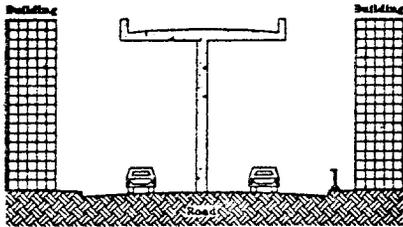
cross section



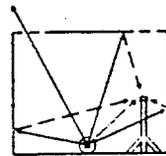
longitudinal section

(b) Sound propagation

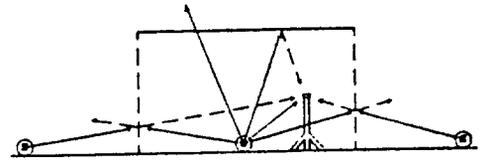
(Box1)



(a) Road



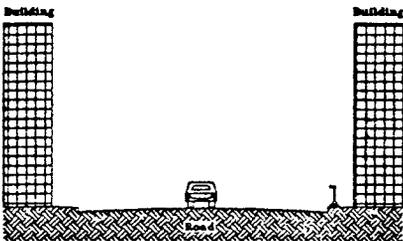
cross section



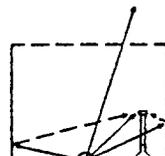
longitudinal section

(b) Sound propagation

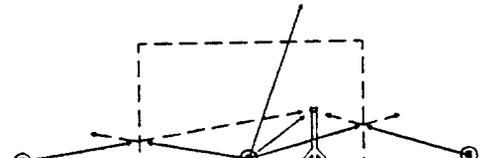
(Box2)



(a) Road



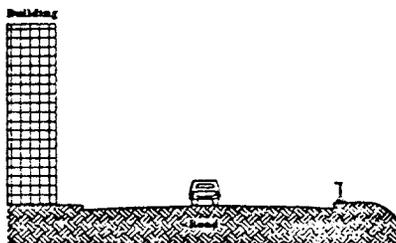
cross section



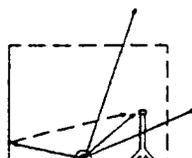
longitudinal section

(b) Sound propagation

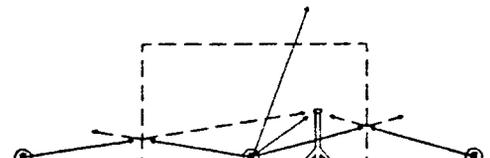
(Box3)



(a) Road



cross section



longitudinal section

(b) Sound propagation

(Box4)

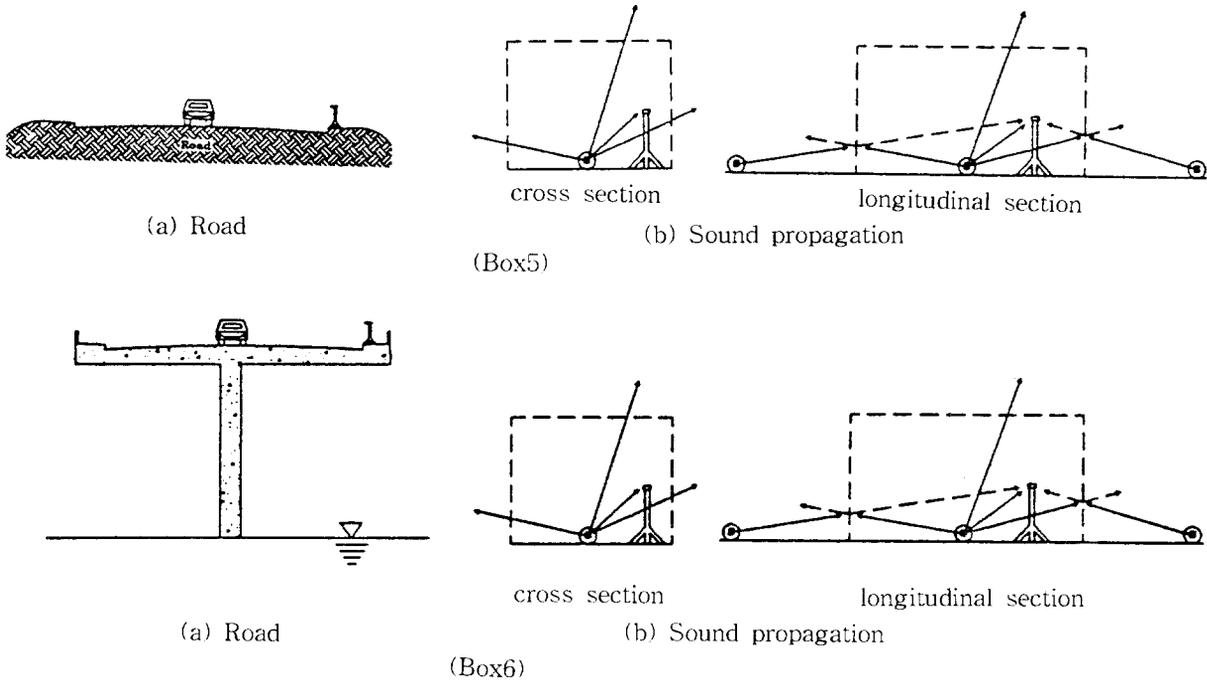


Fig. 1 Road and Sound propagation in each box

욱 가증될 수 있다. 따라서 이 지역의 도로교통소음 대책을 세우기 위한 소음 예측은 반사효과를 고려하는 것이 필요하다.

등간격모형에 기초한 이론식은 1963년에庄미 등에 의해 발표되었지만, 그 후 1968년에 Johnson과 Saunders도 같은 식을 발표하였다^(1~3).

이 모형의 관측점에 있어서 음의 세기 I_w 는

$$I_w = \frac{W}{4dh} \times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(2\pi x/h)} \quad (1)$$

로 표현 가능하다.

여기서,

W : 각 음원의 파워 (W)

d : 관측점 b 로부터 차선까지의 거리 (m)

h : 차두간격 (m/대) = 1,000 × (속도/교통량)

x : A점부터 최초의 자동차까지의 거리 (m)

음압레벨 SPL은

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 10 \log_{10} \frac{I_w}{I_0} \\ &= \text{PWL} + 10 \log_{10} \frac{1}{4dh} \times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(2\pi x/h)} \quad (2) \end{aligned}$$

로 된다. 단, PWL은 음향파위레벨, I_0 는 10^{-12}W/m^2 이다. SPL은 x 의 값에 의해 변하지만, h 를 주기로 한다. SPL의 최대치 SPL_{\max} , 최소치 SPL_{\min} 은 각

각 다음 식으로 표시된다.

$$\text{SPL}_{\max} = \text{PWL} + 10 \log_{10} \frac{1}{4dh} \times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - 1} \quad (3)$$

$$\text{SPL}_{\min} = \text{PWL} + 10 \log_{10} \frac{1}{4dh} \times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) + 1} \quad (4)$$

SPL_a (SPL_a 보다 큰 수치를 얻을 확률이 $a/100$ 가 되는 레벨)는 식 (2)에

$x = (a/100) \times (h/2)$ 를 대입하여 정리하면

$$\text{SPL}_a = \text{PWL} + 10 \log_{10} \frac{1}{4dh} \times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(\pi a/100)} \quad (5)$$

로 된다.

$$\bar{I}_w = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{W}{4dh} \times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(2\pi x/h)} dx$$

$$= \frac{W}{4dh} \quad (6)$$

$$L_{eq} = \text{PWL} + 10 \log_{10} \frac{1}{4dh} \quad (7)$$

이 예측식들의 $\text{PWL}(=L_w)$ 산정시 차종을 3종 (대형차류, 소형화물차류, 승용차류)으로 분류한 경우와 2종 (대형차류, 소형차류)으로 분류하는 경우가

있으며, 2중으로 분류하였을 때 식(8)과 같이 산출한다^(1~3).

$$L_w = 87 + 0.2u + 10 \log_{10}(f_1 + 10f_2) \quad (8)$$

여기서, u : 속도 (km/h)

f_1 : 소형차류혼입률

f_2 : 대형차류혼입률 ($f_1 + f_2 = 1$)

박스라는 폐쇄된 공간에서 직접음 에너지 밀도 δ_a (J/m^3)는

$$\delta_a = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (9)$$

반사음 에너지 밀도 δ_r (J/m^3)은

$$\delta_r = \frac{4W}{cR} \quad (10)$$

여기서, p : 음압 (N/m^2)

ρ_0 : 밀도 (kg/m^3)

c : 전파속도 (m/s)

R : 실정수 (m^2)

따라서 박스라는 폐쇄된 공간내 총음 에너지 밀도 δ 는

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_a + \delta_r \\ &= \frac{W}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{cR} \end{aligned} \quad (11)$$

$$L_p = L_w + 10 \log\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) \quad (12)$$

여기서, L_p 는 SPL을 의미하며, r 은 구면파의 반경 (m)이다. 본 연구에서 자동차소음을 무지향성으로 가정하며, 도로변 반사건물 내의 빈틈, 건물사이의 골목 그리고 상공면 같은 부분은 100% 흡음된다고 가정한다.

Fig. 2는 도시가로 일부분을 한 박스로 가정한 그림으로 박스내를 주행하고 있는 자동차㉔와 박스밖을 주행하는 자동차 ㉕가 동일 차종으로 박스 경계면에서 각각 동일한 거리만큼 떨어져 있는 경우를 나타내었다. 도시가로에서 연속적으로 많은 자동차가 통과하므로 이러한 상황이 계속하여 이어질 수 있으며, 박스 내부 ㉔의 위치가 바뀌어 x 값이 변한다 하더라도 이에 대응하는 박스 외부 ㉕가 존재할

수 있다. 따라서 박스 내부 ㉔에서 발생하여 박스 외부의 도로방향으로 전파되는 소음은 경계면을 중심으로 같은 거리 떨어진 박스 외부 ㉕에서 발생한 소음이 유입되므로 이경계면, 즉 박스 입출구면이 완전반사체 역할을 한다고 할 수 있으며, 이 면의 흡음률은 0으로 가정할 수 있다.

복수차선에서 파워레벨 계산시 왕복 2차선도로의 경우에는 도로중앙 1차선을 가상하여 예측을 하고, 편도 2차선 및 3차선 도로에서는 상하차선 중앙에 각각 1차선(계 2차선)씩을 가상하여 파워레벨 계산식을 활용하기로 가정한다^(1~3). 박스 폭은 도로 한쪽 단의 반사체로부터 건너편 단의 반사체가 있는 지점까지의 거리로 하며, 박스의 길이는 박스폭의 2배 정도의 길이로 도로 및 도로변 특성이 유사한 구간을 택하여 정한다. 박스의 길이를 이렇게 정한 이유는 소음계가 위치한 곳이 박스 길이의 중앙지점 도로변이라 할때 소음계 앞을 통과하는 자동차의 소음이 소음계 건너편 반사체에 의해 반사되므로 그 경로는 소음계까지 대체로 박스 폭의 2배 정도가 된다. 따라서 본 연구에서는 소음계로부터 박스 입출구면까지의 거리가 각각 박스 폭(즉, 박스 길이는 박스 폭의 2배) 정도는 되어야 이면 근처에서부터 반사되어 소음계에 입사하는 것으로 가정한 음에너지가 소음계에 감지되어 반사효과가 소음도에 반영될 수 있을 것으로 생각될 뿐만 아니라 직접음도 최소한 이 정도의 거리 이내의 것들은 모두 반영되어야 할 것으로 사료되기 때문이다. 한편, 박스의 높이는 터널내의 도로와 양변에 고층건물이 존재한 고가도 하부의 도로에서는 도로상부의 반사체까지의 높이를 박스의 높이로 하며, 그밖의 도로에서는 박스 폭을 높이로 가상하였다. 그 이유는 앞에서 언급한 것처럼 소음계 앞을 통과하는 자동차가 소음계 반대쪽의 반사체에 반사되어 오는 경로와 도로상공면의 가상된 반사체에 의하여 반사되어 오는 음파의 경로는 유사하다고 볼 수 있기 때문이다. 길이 및 높이를 이보다 더 길게 가상할 수도 있지만 교통 및 도로변 특성 등을 용이하게 정확히 측정 및 조사하기 위해 이처럼 최소조건을 만족하는 범위에서 길이와 높이를 가상하였으며, 박스 각 면의 크기를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3이다.

예측대상 도로의 L_w 값 계산은 식 (8)에 제시된 것처럼 $L_w = 87 + 0.2u + 10 \log(f_1 + 10f_2)$ 로 구하며, Fig. 4에서 처럼 d 와 x 를 표현할 수 있다. 여기서, d 는 관측점㉑에서 A까지의 거리이며, x 는 A에서 가장 가까운 자동차와의 거리로 그 범위는 $0 \leq x \leq h/$

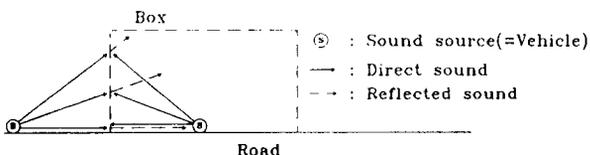


Fig. 2 Reflection in the boundary between boxes

2이다.

각 면의 면적과 흡음률은 Fig. 5에 표시된 것과 같다. 이 그림에서 S_1 과 S_3 는 도로측면 반사체의 면적이고, S_2 는 박스 내의 도로면적, S_4 는 상공면의 면적, S_5 및 S_6 는 박스 입출구면의 면적이다. 그리고 $a_1 \sim a_6$ 는 각각 $S_1 \sim S_6$ 에 대응하는 흡음률이다. 실정수 R 은 $R = s\bar{a} / (1 - \bar{a})$ 로 표현하며 여기서, S 는 박스 각면 면적의 합이고, \bar{a} 는 박스 각 면의 흡음률을 평균한 값이며, 따라서 이들을 활용하면 박스내의 실정수를 구할 수 있다. 그런데 박스내에는 등간격으로 주행한다고 가정한 자동차에서 직접 발생하는 직접음 에너지가 박스 각 면에서 반사된 반사음에너지와 함께 존재한다.

총 음에너지 밀도(δ) 관계식과

$\delta = \frac{I}{c}$ 인 관계를 활용하면

$$\delta = \delta_a + \delta_r = \frac{I_a}{c} + \frac{I_r}{c} \quad (13)$$

$$I = \delta c = \delta_a c + \delta_r c = I_a + I_r \quad (14)$$

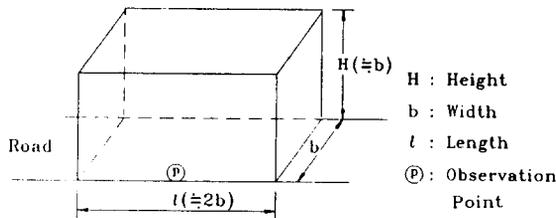


Fig. 3 Box dimension

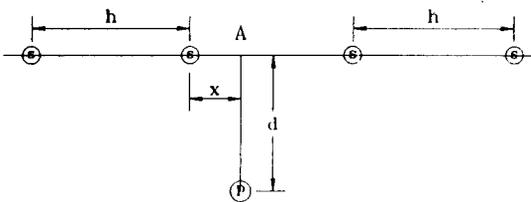


Fig. 4 Distance between a vehicle and the observation point

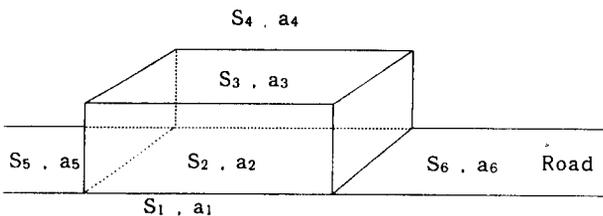


Fig. 5 Areas and sound absorption coefficients of a box

여기서, I : 총 음의 세기 (W/m^2)

I_a : 직접음의 세기 (W/m^2)

I_r : 반사 음의 세기 (W/m^2)

직접음에 의한 세기는 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_a = \frac{W}{4dh} \times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(2\pi x/h)} \quad (15)$$

반사음에 의한 세기는 식 (10)을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$I_r = \delta_r c = \frac{4W}{cR} \times c = \frac{4W}{R} \quad (16)$$

따라서

$$I = \frac{W}{4dh} \times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(2\pi x/h)} + \frac{4W}{R} \quad (17)$$

이므로

$$\frac{I}{I_0} = \frac{W}{W_0} \left(\frac{1}{4dh} \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(2\pi x/h)} + \frac{4}{R} \right) \quad (18)$$

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4dh} \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(2\pi x/h)} + \frac{4}{R} \right) \quad (19)$$

이 식에서 $x=0$ 일때 I_a 가 최대이므로 소음레벨도 최대치를 나타내며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{\max} = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4dh} \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - 1} + \frac{4}{R} \right) \quad (20)$$

$x=h/2$ 일때 I_a 가 최소이므로 소음레벨도 최소이다.

$$L_{\min} = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4dh} \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) + 1} + \frac{4}{R} \right) \quad (21)$$

한편, $x = (\alpha/100) \times (h/2)$ 를 식 (19)에 대입하면 L_a 를 다음과 같이 구할 수 있다. (여기서, α 는 퍼센트를 의미)

$$L_a = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4dh} \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(\alpha\pi/100)} + \frac{4}{R} \right) \quad (22)$$

L_{10} , L_{50} 및 L_{90} 이 특히 많이 쓰이므로 이들을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{10} = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4dh} \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos\left(\frac{10}{100}\pi\right)} + \frac{4}{R} \right) \quad (23)$$

$$L_{50} = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4dh} \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(\frac{50}{100}\pi)} + \frac{4}{R} \right) \quad (24)$$

$$L_{90} = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4dh} \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(\frac{90}{100}\pi)} + \frac{4}{R} \right) \quad (25)$$

한편 식 (6)에서 I_d 값을 의미하는 I 의 평균은 $W/(4dh)$ 라고 하였으며 이 값을 활용하여 구한 소음레벨은 등가소음레벨로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{eq} = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4dh} + \frac{4}{R} \right) \quad (26)$$

3.2 대도시 도로교통소음 예측모형의 적용

본 연구에서는 서울시 등의 도로중 블록내의 도로 및 도로변 특성이 유사하게 연속되는 총 46개 관측점의 도로를 선정하여 모형의 적합성을 관찰하였다.

여러 조건별 관측점에서 측정된 소음평가척도는 L_{10} , L_{50} , L_{90} 및 등가소음레벨 (L_{eq}) 등이다. 이와 동시에 자동차속도, 교통량, 차종이 조사되었으며, 기타 도로 및 도로변 반사체 제반 특성도 조사하였다.

소음레벨은 인도상 1.2 m 높이의 삼각대에 설치된 정밀소음계 (B & K Type 2231)로 매시간 20분씩 측정하였다. 이와 동시에 주파수분석을 위해 Real Time 주파수분석계 (B & K Type 4418)를 사용하였다. 교통량, 차종 및 속도 측정은 비디오 카메라 (Sony TR-1000)와 속도 측정기 (MR, K-15)를 사용하였으며, 흡음율은 David 등이 제시한 건축재료별 흡음율을 근거하여 계산하였다.

Table 1 Correlations between observed and predicted noise level

| Box Name | r | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| | L_{10} | L_{50} | L_{90} | L_{eq} |
| Box 1 | 0.74 | 0.87 | 0.92 | 0.64 |
| Box 2 | 0.85 | 0.94 | 0.95 | 0.76 |
| Box 3 | 0.89 | 0.98 | 0.95 | 0.84 |
| Box 4 | 0.84 | 0.97 | 0.99 | 0.82 |
| Box 5 | 0.79 | 0.98 | 0.98 | 0.73 |
| Box 6 | 0.89 | 0.97 | 0.98 | 0.71 |

* Significant level: < 0.001

본 연구에서 제시한 도로교통소음예측모형은 통계처리 프로그램인 SAS를 활용하여 계산한 예측치와 실측치간의 상관분석을 행하여 적합성을 살펴 보았으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

Table 1에서 처럼 상관계수 (r) 값이 L_{10} 은 0.74~0.89, L_{50} 은 0.87~0.98, L_{90} 은 0.92~0.99, L_{eq} 는 0.64~0.84로 대부분의 지표가 실측치와 예측치간에 비교적 높은 상관성을 갖고 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

우리 사회는 공업화와 더불어 급격한 도시화가 진행되고 있다. 도시화가 진행되면서 우리 나라 일부 도시는 세계적 규모의 대도시로 발전하였다. 그러나 좁은 국토에 도시화는 고층화, 과밀화가 필연적이며, 또한 이 지역에는 많은 자동차가 집중적으로 운행될 수밖에 없다. 따라서 고층화, 과밀화된 대도시 지역 도로교통소음은 직접음과 반사음이 혼재하며, 직접음과 반사음 모두에 대한 대책이 강구되어야 할 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 대도시 도로교통소음 대책을 위해 반사조건을 고려한 도로교통소음 예측 모형을 제시하였으며, 이 모형을 적용한 결과 실측치와 예측치 사이에 비교적 상관성이 높았다. 그러므로 대도시 지역에서 L_{10} , L_{50} , L_{90} 및 L_{eq} 등을 예측시 반사조건을 고려하여야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) 石井聖光, 1975, "道路交通騒音豫測計算方法に關する研究(その1)," 日本音響學會誌, 第31卷, 第8號, pp. 507~517.
- (2) 石井聖光, 1977, "道路交通騒音豫測計算方法に關する研究-高さ別補正值 α_i について-, " 日本音響學會誌, 第33卷, 第8號, pp. 426~430.
- (3) 庄司光, 山本剛夫, 1980, "衛生工學ハンドブック-騒音振動編-, " 朝倉書店, 東京, pp. 233~260.
- (4) 山下充康, 金澤純一, 1980, "都市内中層家屋の窓面における道路交通騒音," 日本騒音制御工學會技術發表會講演論文集, pp. 89~91.
- (5) 鈴木富雄, 見留與吉, 枝雅之, 1980, "道路交通騒音に關する模型實驗(第3報)-高架道路床版裏面反射による影響-, " 川崎市公害研究所年報, 第7號, pp. 123~134.

- (6) Hothersall, D. C., and Simpson, S., 1983, "Reflection of Road Traffic Noise," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 90, No. 3, pp. 399~405.
- (7) 足立義雄, 岡崎新大都, 1983, "建物周辺における道路交通騒音の傳播," *土木技術資料*, 第25卷, 第6號, pp. 319~324.
- (8) Shuoxian, W., 1987, "Computer Simulation of Road Traffic Noise in an Urban Built-up Area," *Applied Acoustics*, Vol. 22, pp. 71~78.
- (9) Sandberg, U., 1987, "Road Traffic Noise-The Influence of the Road Surface and its Characterization-," *Applied Acoustics*, Vol. 21, pp. 97~118.
- (10) 中山降, 宮川降己, 1989, "沿道の地表面性狀を考慮した道路交通騒音の模型實驗," *土木技術資料*, 第31卷, 第7號, pp. 353~359.
- (11) 呂運浩, 柳明辰, 1994, "Box Model에 의한 道路交通騒音豫測," *韓國音響學會誌*, 第13卷, 第1號, pp. 57~62.
- (12) 呂運浩 外, 1994, "騒音防止對策 樹立에 관한 研究," *서울特別市*, pp. 233~270.