

反射條件을 考慮한 道路交通騒音 豫測 研究

The Prediction of Road Traffic Noise under Reflective Conditions

呂 運 浩*
(Woon Ho Yeo*)

要 約

대부분의 道路交通騒音 豫測 方法에서는 音波가 자유로이 전파된다고 가정하였다. 그러나 都市街路邊의 건물들은 음파를 反射시켜 도로내에 음에너지를 증가시키고 있다. 따라서 본 연구는 反射條件을 고려한 道路交通騒音 豫測 方法을 찾고자 한다. 이 방법은 豫測式에 反射效果를 考慮하여 L_{10} , L_{50} , L_{90} 및 L_{eq} 등의 소음레벨을 구하는 것이다. 제시된 예측 방법의 適合性을 파악하기 위해 測定調査된 交通 등의 特性을 豫測式에 活用하여 예측된 소음레벨과 실측된 소음레벨을 比較分析하였다. 전반적으로 豫測 소음레벨과 實測 소음레벨이 일치하였다. 그러므로 본 연구에서 제시하고 있는 反射條件을 考慮한 豫測 方法이 都市街路에서 道路交通騒音 豫測에 適合한 것으로 사료된다.

Abstract

A considerable number of methods are available for predicting traffic noise levels of road networks where sound is freely propagating. But surrounding buildings reflect back sound to the road and sound energy is increased by these reflectors. Therefore, this study was focussed on the establishment of the prediction method of road traffic noise under reflective conditions. This prediction method was developed by establishing prediction formulas of noise level such as L_{10} , L_{50} , L_{90} and L_{eq} . The sound energy density was employed to establish prediction formulas in terms of independent variables. The validity of the proposed prediction formulas was been confirmed by applying them to actually measured parameters of road traffic noise and noise level data. On the whole, the agreement between measured and predicted noise levels appeared to be satisfactory. The conclusion might be reached that the method developed in this study could be used to predict road traffic noise under reflective conditions.

I. 序 論

기존의 道路交通騒音 豫測 方法 中에서^{1)~7)} 反射效果를 獨立變數化한 것들은 대부분 反射率의 일부만을 고려하였으므로 反射效果가 정확히 반영되기 힘들며 특히, 난반사 효과는 거의 고려되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 대부분의 反射效果가 예측값에 반영될 수 있게 대상 道路의 일부분을 Box로 가상하여⁸⁾, 이 閉鎖된 空間內의 總音에너지密度는 直接音에너지密度와 反射音에너지密度의 합이며 이것으로 道路交通騒音 예측값을 찾고자 한다. 閉鎖된 空間內에 道路交通騒音 영향인자로 速度, 交通量, 車種은 물론 道路邊 反射體의 폭, 높이, 吸音率, 開口部의 면적까지 고려하였다. 개발된 方法의 검증대상

은 터널內의 道路(Box1), 兩邊에 高層建築物이 存在한 高架道下部의 道路(Box2), 兩邊에 高層建築物이 存在한 道路(Box3), 한 邊에만 高層建築物이 存在한 道路(Box4), 開豁地 通過 道路(Box5) 및 橋梁上의 道路(Box6) 등이다.

騒音度에 영향을 주는 인자들을 豫測式에 대입하여 豫測值를 구한후 SAS 프로그램으로 實測值와의 相關性을 分析하여⁹⁾ 豫測方法의 適合性을 檢討하였다.

II. 理論的 考察

1. 等間隔模型

等間隔模型에 기초한 이론식은 1963년에 庄司 등에 의해 발표됐지만, 그후 1968년에 Johnson 과 Saunders도 같은 식을 발표했다.¹⁰⁾

이 模型의 觀測點에 있어서 음의 세기 I_w 는

*인천전문대학 환경공학과
접수일자: 1995년 9월 11일

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

로 표현 가능하다.

여기서,

W: 各 音源의 파워 (W)

d: 觀測點 p로부터 車線까지의 距離 (m)

h: 車頭間隔(m/대) = 1,000 × (속도/교통량)

x: 0 점부터 최초의 自動車까지 距離(m)로 0 ≤ x ≤ h/2 범위에 있다.

音壓레벨(dB) SPL은

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

로 된다. 단, PWL은 음향파위레벨(dB), I_0 는 10^{-12}W/m^2 이다. SPL은 x값에 의해 변하지만, h를 주기로 한다. SPL의 最大値 SPL_{\max} , 最小値 SPL_{\min} 은 각각 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_α (SPL_x 보다 큰 수치를 얻을 確率이 $\alpha/100$ 가 되는 레벨)는 식(2)에 $x = (\alpha/100) \times (h/2)$ 를 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \text{SPL}_\alpha &= \text{PWL} + 10 \log_{10} \frac{1}{4dh} \\ &\times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(\alpha \pi/100)} \end{aligned} \quad (5)$$

로 된다.

$$I_w = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{W}{4dh} \times \frac{\sinh(2\pi d/h)}{\cosh(2\pi d/h) - \cos(2\pi x/h)} dx = \frac{W}{4dh} \quad (6)$$

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

이 豫測式들의 PWL (= L_w) 산정시 車種을 3종(大型車類, 小型貨物車類, 乘用車類)으로 분류한 경우와 2종(大型車類, 小型車類)으로 분류하는 경우가 있으며, 2종으로 분류하였을 때 식(8)과 같이 산출한다.

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

여기서, u: 速度(km/h)

f_1 : 小型車類混入率

f_2 : 大型車類混入率 ($f_1 + f_2 = 1$)

2. Box에서의 基本方程式

Box라는 閉鎖된 공간에서 直接音에너지密度 δ_d (J/m^3)는

$$\delta_d = \frac{W}{4\pi r^2 c} \quad (9)$$

反射音에너지 密度 δ_r (J/m^3)은

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

여기서, c: 전파속도(m/s)

R: 室定數(m^2)

따라서 Box라는 閉鎖된 空間內 總音에너지密度 δ 는

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

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

여기서, L_p 는 SPL을 의미하며, r은 球面波의 半徑(m)이고, 音源은 無指向性이라 가정한다.⁸⁾

III. 反射條件을 考慮한 道路交通 騒音 豫測模型 樹立

본 연구에서 自動車騒音を 無指向性으로 가정하며, 道路邊 反射建物內의 빈틈, 건물사이의 골목 그리고 上空面 같은 부분은 100% 吸音된다고 가정한다.

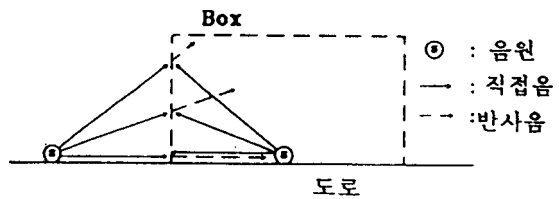


그림 1. Box境界面에서의 反射

Fig 1. Reflection in the boundary between boxes

그림 1은 都市街路 일부분을 한 Box로 假想한 그림으로 Box내를 주행하고 있는 自動車(음원)와 Box밖을 주행하는 自動車(음원)가 동일 車種으로 Box 境界面에서 각각 동일한 거리만큼 떨어져 있는 경우를 나타내었다. 都市街路에서 연속적으로 많은 自動車가 통과하므로 이러한 상황

이 계속하여 이어질 수 있으며, Box 내부 ㉔의 위치가 바뀌어 x값이 변한다 하더라도 이에 대응하는 Box 외부 ㉔가 존재할 수 있다. 따라서 Box 내부 ㉔에서 발생하여 Box 외부의 道路方向으로 傳播되는 騒音은 境界面을 중심으로 같은 거리 떨어진 Box 외부 ㉔에서 발생한 騒音이 유입되므로 이경계면, 즉 Box 入出口面이 完全反射體 역할을 한다고 할 수 있으며, 이 면의 흡음률은 0으로 가정할 수 있다.

複數車線에서 파워레벨 계산시 왕복 2車線道路의 경우에는 道路中央 1車線을 假想하여 예측을 하고, 片道 2車線 및 3車線 道路에서는 上下車線 中央에 각각 1車線(계 2車線)씩을 假想하여 파워레벨 계산식을 활용하기로 가정한다.¹⁰⁾ Box 폭은 道路 한쪽 端의 反射體로부터 건너편 端의 反射體가 있는 지점까지의 거리로 하며, Box의 길이는 Box폭의 2배정도의 길이로 道路 및 道路邊 特性이 유사한 구간을 택하여 정한다. Box의 길이를 이렇게 정한 이유는 騒音計가 위치한 곳이 Box 길이의 중앙지점 道路邊이라 할때 騒音計 앞을 통과하는 自動車의 騒音이 騒音計 건너편 反射體에 의해 반사되므로 그 經路는 騒音計까지 대체로 Box 폭의 2배 정도가 된다. 따라서 본 연구에서는 騒音計로부터 Box 入出口面까지의 거리가 각각 Box폭(즉, Box길이는 Box폭의 2배) 정도는 되어야 이면 근처에서부터 반사되어 騒音計에 입사하는 것으로 가상의 음에너지가 騒音計에 감지되어 反射效果가 騒音度에 반영될 수 있을 것으로 생각될 뿐만 아니라 直接音도 최소한 이 정도의 거리 이내의 것들은 모두 반영되어야 할 것으로 사료되기 때문이다. 한편, Box의 높이는 터널내의 道路와 兩邊에 高層建築物이 존재한 高架道 下部의 道路에서는 道路上部의 反射體까지의 높이를 Box의 높이로 하며, 그밖의 道路에서는 Box폭을 높이로 가상하였다. 그 이유는 앞에서 언급한 것처럼 騒音計 앞을 통과하는 自動車가 騒音計 반대쪽의 反射體에 반사되어 오는 經路와 道路上空面의 가상된 反射體에 의하여 반사되어 오는 音波의 經路는 유사하다고 볼 수 있기 때문이다. 길이 및 높이를 이보다 더 길게 가상할 수도 있지만 交通 및 道路邊 特性 등을 용이하게 정확히 測定 및 調査하기 위해 이처럼 최소조건을 만족하는 범위에서 길이와 높이를 가상하였으며, Box 각 면의 크기를 그림으로 나타낸

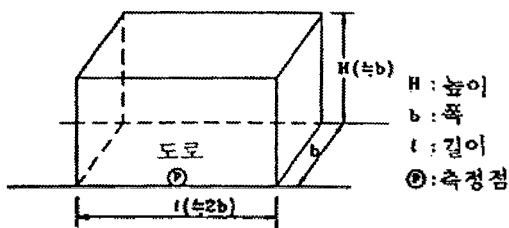


그림 2 Box 크기
Fig 2. Box dimension

것이 그림 2이다. 豫測對象 道路의 L_w 값 계산은 식(8)에 제시된 것처럼 $L_w = 87 + 0.2u + 10 \log(f_1 + 10f_2)$ 로 구하며, 그림 3에서 처럼 d와 x를 표현할 수 있다. 여기서, d는 觀測點 ㉔에서 A까지의 거리이며, x는 A에서 가장 가까운 自動車와의 거리로 그범위는 $0 \leq x \leq h/2$ 이다.

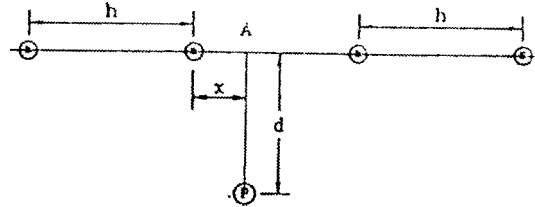


그림 3 自動車와 觀測點과의 距離
Fig 3. Distance between vehicle and observation point

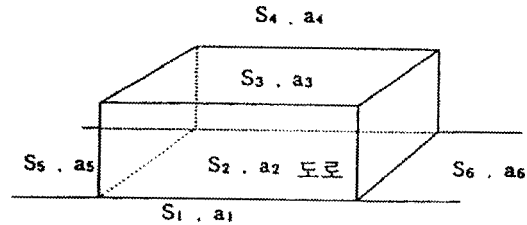


그림 4. Box 各面의 面積과 吸音率
Fig 4. Areas and sound absorption coefficients of a box

각 면의 면적과 吸音率은 그림 4에 표시된 것과 같다. 이 그림에서 S_1 과 S_3 는 道路側面 反射體의 面積이고, S_2 는 Box내의 道路面積, S_4 는 上空面의 面積, S_5 및 S_6 는 Box 入出口面의 面積이다. 그리고 $a_1 \sim a_6$ 는 각각 $S_1 \sim S_6$ 에 대응하는 吸音率이다. 室定數(R)는 $R = \frac{S\bar{a}}{1 - \bar{a}}$ 로 표현하며 여기서, S는 Box 각면 面積의 합이고, \bar{a} 는 Box 각 면의 吸音率을 평균한 값이며, 따라서 이들을 활용하면 Box내의 室定數를 구할 수 있다. 그런데 Box내에는 等間隔으로 주행한다고 가정한 自動車에서 직접 발생하는 直接音 에너지가 Box각 면에서 반사된 反射音에너지와 함께 존재한다.

앞에서 언급한 것처럼 總音에너지밀도(δ) 관계식과 $\delta = \frac{I}{c}$ 인 관계를 활용하면

$$\delta = \delta_d + \delta_r = \frac{I_d}{c} + \frac{I_r}{c} \tag{13}$$

$$I = \delta c = \delta_d c + \delta_r c = I_d + I_r \tag{14}$$

여기서, I : 總音의 세기 (W/m^2)

I_d : 直接音의 세기 (W/m^2)

I_r : 反射音의 세기 (W/m^2)

直接音에 의한 세기는 식(1)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

反射條件에 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

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

$$L_p = L_w \quad (18)$$

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

이 식에서 $x=0$ 일때 I_d 가 최대이므로 소음레벨도 最大値를 나타내며 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

$x=h/2$ 일때 I_d 가 최소이므로 소음레벨도 最小이다.

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

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

$$L_\alpha = L_w$$

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

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

$$L_{10} = L_w$$

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

$$L_{50} = L_w$$

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

$$L_{90} = L_w$$

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

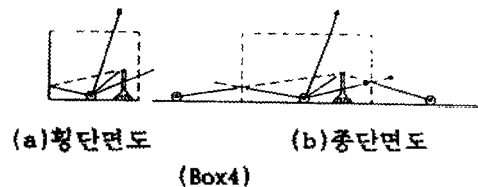
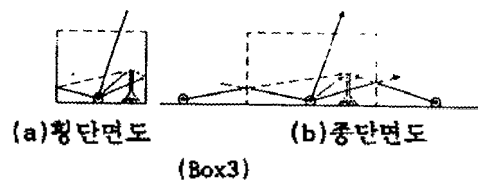
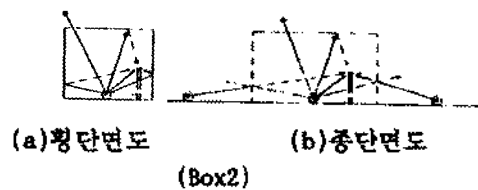
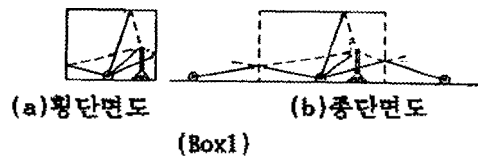
한편 식(6)에서 I_d 값을 의미하는 I 의 평균은 $W/(4dh)$ 라고 하였으며 이 값을 活用하여 구한 聽音레벨은 等價聽音레벨로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

IV. 模型의 適用

1. 對象道路

- ⊙ : 음원
- ↓ : 소음계
- : 반사면
- : 가상반사면
- : 직결음
- : 반사음



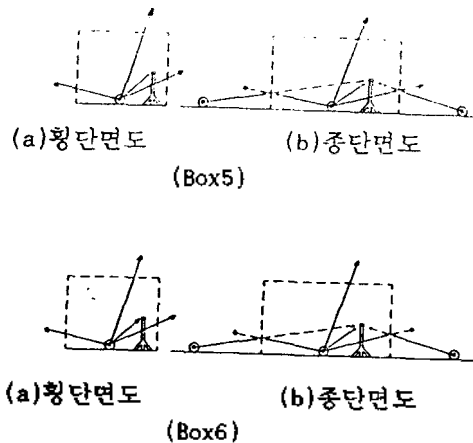


그림 5. 각 Box별 소음전파
Fig 5. Sound propagation in each Box

본 연구에서는 道路中 Block내의 道路 및 道路邊 特性이 유사하게 연속되는 지점을 선정하여 模型의 適合性을 관찰하였다. 측정지점의 반사조건(Box)별 횡단면과 종단면의 직접음 및 1차 反射音 전과경로는 그림 5와 같다.

2. 資料의 測定分析 및 檢證

여러 條件別 觀測點에서 측정된 騒音評價尺度는 L_{10} , L_{50} , L_{90} 및 L_{eq} 등이다. 이와 동시에 自動車速度, 交通量, 車種이 조사되었으며, 기타 道路 및 道路邊 反射體 제한 특성도 조사되었다.

騒音레벨은 人道上 1.2m 높이의 삼각대에 설치된 精密 騒音計(B&K Type 2231)로 매시간 20분씩 측정하였다. 이와 동시에 周波數分析을 위해 Real Time 周波數分析計(B&K Type 4418)를 사용하였다. 交通量, 車種 및 速度 측정은 Video Camera(Sony TR-1000)와 Speed Gun(MR, K-15)을 사용하였으며, 吸音率은 Harris 등이 제시한 건축재료별 吸音率을 근거하여 계산하였다.¹¹⁾

본 연구에서 제시한 道路交通騒音 豫測 方法은 統計處理 프로그램인 SAS를 활용하여 계산한 豫測值와 實測值間의 原点回歸分析을 행하여 適合性을 살펴보았다.

3. 道路交通騒音 變數 特性

본 연구에서 導出한 道路交通騒音 豫測式의 適合性을 檢證하기 위해 對象道路에서 측정된 速度, 交通量, 大型車混入率 및 室定數는 表 1과 같이 나타낼 수 있다.

4. 模型의 適合性 檢討

본 연구에서는 模型의 適合性 評價를 위하여 實測值와 式(23)~식(26)에 의한 豫測值間에 原点回歸分析을 행하였다. 이 방법은 도로교통소음 적합성 검토에 자주 이용되는 것으로, 모든 Box의 각 지표별 原点回歸分析한 결과를 일반적 신뢰 범위인 回歸直線 上下에 5dB(A)間隔의 殘差를 갖고 있는 점선을 그려 豫測值와 實測值間

의 殘差 5dB(A)範圍內에 드는 자료의 퍼센트를 나타낸 것이 표 2이다.

表 1. 各Box別 道路交通騒音 變數
Table 1. Parameters of road traffic noise

Box 種類	速度 (km/h)	交通量 (대/h)	大型車 混入率	室定數 (m ²)
Box1	49	1,815	0.050	67
Box2	39	4,163	0.104	746
Box3	41	3,912	0.059	1,789
Box4	49	6,199	0.062	2,860
Box5	57	2,167	0.131	3,095
Box6	58	5,662	0.050	5,404

표 2에서 처럼 5dB(A)殘差範圍內에 드는 것이 L_{10} 은 41~93%, L_{50} 은 61~95%, L_{90} 은 78~100%, L_{eq} 는 71~100%로 일부 Box의 L_{10} 을 제외한 그밖의 대부분 指標가 實測值와 豫測值間에 비교적 높은 相關性을 갖고 있음을 보여주고 있다. Box1부터 Box6까지 전반적으로 큰 차이 없이 相關性이 높은 이유는 도로변 반사체 유무에 관계없이 도로 일정 구간을 Box로 가상하여 에너지 밀도를 예측 근거로 하였기 때문으로 사료된다.

表 2. 實測值와 豫測值와의 關係
Table 2. Measured noise levels versus predicted noise levels

Unit : %

Box	L_{10}	L_{50}	L_{90}	L_{eq}
Box1	62	69	82	86
Box2	77	88	94	100
Box3	73	63	95	96
Box4	75	65	100	91
Box5	41	61	78	71
Box6	93	95	97	99

V. 結 論

본 연구에서는 도시가로 일부분을 閉鎖空間, 즉 Box로 假想하여 그 내부의 음에너지密度를 算出하므로 反射音이 포함된 道路交通騒音 豫測 方法을 開發하고자 하였으며 다음과 같은 結論을 얻었다.

L_{10} , L_{50} , L_{90} 및 L_{eq} 豫測式에 의한 豫測值를 原点回歸分析한 결과, 일부 Box의 L_{10} , L_{50} 을 제외하고 대부분 높은 相關性을 나타냈으므로 反射條件을 고려한 道路交通騒音豫測式으로 L_{90} 및 L_{eq} 값들은 물론, L_{10} 과 L_{50} 값도 적합하게 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 都市地域처럼 道路邊 建物이 密集된 道路에서 騒音레벨을 예측할 때에는 反射條件을 중요한 影響因子로 考慮하여야 더욱 精確한 豫測值를 구할 수 있으며, 본 研究에서 제안한 方法은 反射條件下에 있는 道路 뿐만 아니라 開豁地 道路에서도 잘 적용됨을 알 수 있었다.

▲여 운 호(정희원)
13권 1호 참조.

參 考 文 獻

1. 山下充康, 金澤純一: "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, Vol. 1980.
2. 鈴木富雄, 見留與吉, 枝雅之: "道路交通騒音に関する模型實驗(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, No. 7, 1980.
3. D. C. Hothersall, S. Simpson: "Reflection of Road Traffic Noise," Journal of Sound and Vibration, Vol. 90, No. 3, 1983.
4. 足立義雄, 岡崎新大都: "建物周邊における道路交通騒音の傳播," 土木技術資料, Vol. 25, No. 6, 1983.
5. W. Shuoxian: "Computer Simulation of Road Traffic Noise in an Urban Built-up Area," Applied Acoustics, Vol. 22, 1987.
6. U. Sandberg: "Road Traffic Noise-The Influence of the Road Surface and its Characterization-," Applied Acoustics, Vol. 21, 1987.
7. 中山隆, 宮川隆己: "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, Vol. 31, No. 7, 1989.
8. 呂運浩, 柳明辰: "Box Model에 의한 道路交通騒音豫測," 韓國音響學會誌, Vol. 13, No. 1, 1994.
9. 毛利正光, 塚口博司, 金甲洙: "ワイブル分布を用いた環境騒音の推計," 日本騒音制御工學會誌, Vol. 8, No. 6, 1984.
10. 庄司光, 山本剛夫: "衛生工學ハンドブック-騒音・振動編-," 朝倉書店, 1980.
11. D. A. Harris: "Noise Control Manual," VNR., p. 148, 1991.