

## BOX Model에 의한 도로교통소음 예측

### Prediction of Road Traffic Noise by Box Model

여 운 호\*, 유 명 진\*\*  
(Woon Ho Yeo\*, Myong Jin Yu\*\*)

#### 요 약

발생된 도로교통소음 예측을 위한 새로운 방법을 제시하고자 하며, 본 연구에서 도시지역 도로 한 Block내에서는 도로교통 특성이 유사하므로 한 Block을 한 Box로 간주하였다. 이 예측방법은 한 Block 내에서 발생한 다양한 도로교통소음을 예측할 수 있다. 본 Model의 검증은 도로에서 실측한 소음레벨 및 교통특성을 활용하여 실시하였으며, 실측된 소음레벨과 예측된 소음레벨의 상관성을 살펴본 결과 높은 상관관계를 갖고 있는 것으로 나타났다.

#### ABSTRACT

In order to establish a prediction method for road traffic noise generated from actual traffic flow, a new approach is proposed for practical use. One block in urban road is regarded as one box in this study. This prediction method is able to treat any kind of road traffic noise generated from one block. The validity of the proposed prediction method has been experimentally confirmed by applying it to actually observed road traffic noise data. The correlation between observed and predicted noise level is good.

#### I. 서 론

도시지역 도로변은 고속도로나 고속화도로변과 달리 건물의 과밀화, 고층화로 간향음이 항상 존재하는 조건을 갖고 있어 간향음강화되어 있으며, 현재와 같은 교통량 급증으로 도시지역 도로교통소음은 도로보행인 및 도로변 주민에게 정신적, 육체적으로 심각한 영향을 미쳐 대화방해, 수면방해, 휴식방해 등을 일으킬 뿐 아니라 장기적으로 이러한 환경에 노출되

면 난청유발 가능성도 있을 수 있다.

본 연구는 고속도로나 고속화도로변 보다 훨씬 인구 밀도가 높아 피해 대상자가 많이 발생하는 도시지역 도로변의 소음방지 대책을 수립하기 위해 도시지역 도로 및 도로변을 Box로 가정하여 도로교통소음 예측 Model을 제시하고자 한다. 제시된 예측 Model 검증은 고가도로 상판과 도로변 건물에 의해 간향음이 많이 발생하는 청계로변과 서울시내 소재 터널 그리고 도시지역 일반도로 조건을 갖고 있는 즉, 양변에 반사 건물이 존재하는 도로에서 소음도, 교통량, 차속, 차종 및 도로변 재반구조 등을 측정 및 조사하여 실시한다.

\*영동전문대학 환경관리과

\*\*서울시립대학교 환경공학과

접수일자: 1993년 10월 4일

II. 모형 수립

2.1 잔향음장 구성

여러 하천이나 호수 또는 대기 등의 환경문제 해결을 위한 일정한 공간을 Box로 가상하여 문제의 해석 및 예측을 시도하였던 것처럼, 도시지역 도로는 일정한 Block내에 유사한 교통 특성을 갖고 있으므로 한 Block을 하나의 Box로 가상할 수 있다. 한 Block은 도로면, 도로면 양단의 반사체인 건물면, 도로 상공면, 도로가 통과하는 Block 입구 및 출구면들로 구획되어 있으며, 이 면들이 Box의 각 면이라 가정할 수 있다. 이 때 상공면 및 도로면의 개구부는 흡음률이 100%인 면으로 가정한다. 그리고 Block내외에 유사한 교통특성 즉, 교통량, 차속, 차종구성, 도로구조 및 도로변특성이 유사할 경우 Block내의 한 자동차에서 발생한 소음이 Block 입구 또는 출구 경계 밖으로 전파될 때 Block 입구 및 출구 밖에서도 이 자동차와 유사한 자동차에서 발생한 소음이 경계면을 통하여 Block내로 전파된다고 할 수 있다. 따라서 교통량이 아주 적은 구간을 제외한 대부분의 시간대에 도시지역도로에는 많은 자동차들이 연속하여 주행하므로 Block 입구 또는 출구 경계면을 중심으로 Block 내에서 발생하여 Block 외부로 나간 음에너지 만큼 음에너지가 Block 외부에서 경계면을 통하여 들어올 수 있으므로 Block 입구 및 출구 경계면은 완전반사면이라 할 수 있다.

Fig.1은 도시지역내의 도로 한 Block을 한 Box로 가정한 그림으로 Box내를 주행하고 있는 자동차 ㉔와 Box밖을 주행하는 자동차 ㉕가 동일 차종으로 Box 경계면에서 각각 x만큼 떨어져 있는 경우를 나타내었다. 도시지역 도로에서 연속적으로 많은 자동차가 통과하므로 이러한 상황이 계속하여 이어질 수 있으며, Box 내부 ㉔의 위치가 바뀌어 x값이 변한다 하더라도 이에 대응하는 Box 외부 ㉕가 존재할 수 있다. 따라서 Box 내부 ㉔에서 발생하여 Box 외부의

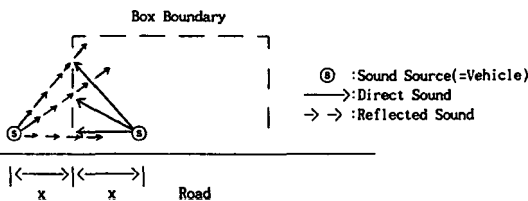


Fig. 1. Reflection in Box

도로방향으로 전파되는 소음은 경계면을 중심으로 같은 거리 떨어진 Box 외부 ㉕에서 발생한 소음이 유발되므로 Block입구 및 출구 면이 완전반사체 역할을 하고 있는 것을 보여주고 있다.

2.2 기본 방정식

Box를 직접음과 잔향음이 함께 존재하는 실내 음장이라 할 수 있으므로 Box내의 총 에너지밀도는 직접음 에너지밀도와 잔향음 에너지밀도의 합으로 생각할 수 있다.

$$\text{즉, } \delta_d = \frac{w}{4\pi r^2 c} \quad (1)$$

$$\delta_r = \frac{4w}{cR} \quad (2)$$

$$\delta = \delta_d + \delta_r \quad (3)$$

$$\delta = \frac{w}{4\pi r^2 c} + \frac{4w}{cR} \quad (4)$$

- 여기서,  $\delta$  : Box내의 총 에너지밀도 ( $J/m^3$ )
- $\delta_d$  : Box내의 직접음 에너지밀도 ( $J/m^3$ )
- $\delta_r$  : Box내의 잔향음 에너지밀도 ( $J/m^3$ )
- w : 음원의 파워 (W)
- r : 음원으로부터 측정점까지 거리 (m)
- c : 전파속도 (m/s)
- R : 실정수 ( $m^2$ )
- $\bar{a}$  : 평균흡음률
- s : Box내부 총표면적 ( $m^2$ )

$$R = \frac{\bar{a} s}{1 - \bar{a}}$$

한편,  $E = E_P + E_K \quad (5)$

$$E = V/2 \times \left[ \frac{\rho_0^2 c^2 v^2 + 2\rho_0 c v P_0}{\rho_0 c^2} + \rho_0 v^2 \right] \quad (6)$$

에서,  $\delta = \frac{P^2}{\rho_0 c^2}$  인 관계를 찾을 수 있다.

- 여기서, E : 총 에너지 (J)
- $E_P$  : 위치 에너지 (J)
- $E_K$  : 운동 에너지 (J)
- V : 정적 체적 ( $m^3$ )
- $\rho_0$  : 정적 기체밀도 ( $kg/m^3$ )
- v : 순간 입자속도 (m/s)

$P_0$  : 정적 압력 ( $N/m^2$ )

$p$  : 실 압력 ( $N/m^2$ )

따라서

$$\delta = \frac{p^2}{\rho_0 c^2} = \frac{w}{4\pi r^2 c} + \frac{4w}{cR} \quad (7)$$

$$p^2 = w\rho_0 c \left( \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (8)$$

$$L_p = L_w + 10\log \left( \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 10\log \rho_0 c - 20\log(2 \times 10^{-5}) - 120 \quad (9)$$

그런데, 대기조건을 22℃, 751 mmHg라 가정하면  $\rho_0 c = 407 \text{ mks rays}$ 이므로

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

여기서,  $L_p$  : 음압레벨 (dB)

$L_w$  : 음향파워레벨 (dB)

### 2.3 Box내의 도로교통소음 예측

주어진 도로의  $L_w$ 값과 교통량은 일본음향학회에서 제시한 것 처럼  $L_w = 87 + 0.2 \times \text{차속} + 10\log(\text{소형차혼입률} + 10 \times \text{대형차혼입률})$ 로 계산한다. 그리고 대상으로 총교통량을 각차선별로 동일하게 배분한 각차선별 교통량과 차속을 이용해  $Y(\text{차두간격} = \text{차속}/\text{교통량} \times 1000 : \text{단위, m})$ 를 구한다. Fig.2에서 처럼  $r = (d^2 + X^2)^{1/2}$ 이므로

$$L_p = L_w + 10\log \left( \frac{1}{4\pi(d^2 + X^2)} + \frac{4}{R} \right) \quad (11)$$

로 표현할 수 있다. 여기서,  $d$ 는 측정지점(p)에서 A까지의 거리이며,  $X$ 는 A에서 가장 가까운 자동차와의 거리로 그범위는  $0 \leq X \leq Y/2$ 이고,  $r$ 의 범위는  $d$

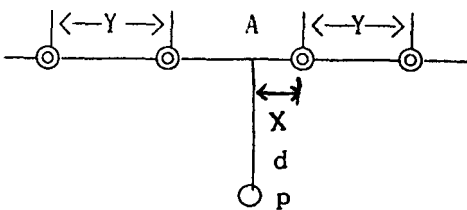


Fig. 2. Distance between vehicle and observation Point

$\leq r \leq (d^2 + Y^2/4)^{1/2}$ 이다. 따라서,  $SPL_{max}$ 는  $r=d$ 일 때이며,  $SPL_{min}$ 은  $r = (d^2 + Y^2/4)^{1/2}$ 일 때이고,  $SPL_{\alpha}$ 는  $X = \alpha/100 \times Y/2$  인 값을  $r$ 에 대입한 값이다.(여기서,  $\alpha$ 는 퍼센트를 의미한다.)

이와같이 각 차선별로 구한 SPL 값을 합하여 대상 도로의 소음레벨을 산출한다.

식(10)의  $R = \frac{s\bar{a}}{1-\bar{a}}$ 에서  $s$ 는 Box 각면 면적의 합이고,  $\bar{a}$ 는 Box 각면의 흡음률을 평균한 값이며, 각면의 면적과 흡음률은 Fig.3에 표시된 것과 같다.

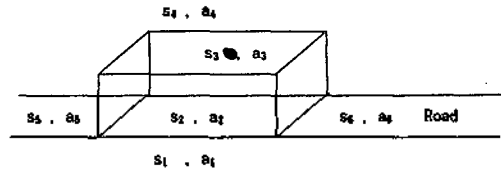


Fig. 3. Areas and Sound Absorption Coefficients of Box

이 그림에서  $s_1$ 과  $s_3$ 는 도로측면 반사체의 면적이고,  $s_5$ 는 Box내의 도로면적,  $s_4$ 는 상공면의 면적,  $s_5$  및  $s_6$ 는 Block 입구 및 출구면의 면적이다. 그리고  $a_1 \sim a_6$ 는 각각  $s_1 \sim s_6$ 에 대응하는 흡음률이다.  $s_1$ 과  $s_3$  중에 반사체내의 개구부 및 반사체 사이의 골목 같은 개구부가 존재할 수 있으며, 이러한 개구부의 면적도 포함된 값이므로 이 부분의 흡음률은 1로 가정하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_1 + s_3 = s_{1R} + s_{1E} + s_{3R} + s_{3E} \quad (12)$$

여기서,  $s_{1R}$  :  $s_1$ 중 음을 반사시키는데 기여한 부분의 면적(즉, 개구부 이외의 부분 면적)

$s_{1E}$  :  $s_1$ 중 개구부의 면적

$s_{3R}$  :  $s_3$ 중 음을 반사시키는데 기여한 부분의 면적

$s_{3E}$  :  $s_3$ 중 개구부의 면적

$s_4$ 는 상공면의 면적으로 반사체가 존재하지 않아 음이 자유로이 전파될 수 있는 경우  $a_4$ 값이 1이라 가정할 수 있으며,  $s_5$ 와  $s_6$ 도 사실상 음이 자유로이 전파될 수 있지만 Fig.1에서 처럼 교통량이 많은 도시 지역 도로라 가정할 때 유사한 성능을 갖고 있는 자동차가 경계면들을 중심으로 Box 내외부 동일한 거리에 주행하면, 이 때 발생한 음이 각각 반대편으로

전과되어 완전반사체와 같은 역할을 하게 되고, 흡음률은 0이 된다고 볼 수 있다. 따라서, 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$s = s_{1R} + s_{1E} + s_2 + s_{3R} + s_{3E} + s_4 + s_5 + s_6 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \sum_{i=1}^6 \frac{a_i S_i}{S} \\ &= \frac{a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + a_4 S_4 + a_5 S_5 + a_6 S_6}{S} \\ &= \frac{a_{1R} S_{1R} + s_{1E} + a_2 S_2 + a_{3R} S_{3R} + s_{3E} + s_4}{S} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $a_{1R}$  :  $a_1$  중 음을 반사시키는데 기여한 부분의 흡음률  
 $a_{3R}$  :  $a_3$  중 음을 반사시키는데 기여한 부분의 흡음률

만약, 상공면이 고가도로가 통과한다든지 터널 윗부분처럼 반사면이 존재하면 식(13)의  $s_4$ 는  $s_{4R}$ ( $s_4$  중 음을 반사시키는데 기여한 부분의 면적)과  $s_{4E}$ ( $s_4$  중 개구부의 면적)의 합으로 계산할 수 있으며, 식 (14)의  $s_4$ 를  $a_{4R} S_{4R}$ (여기서  $a_{4R}$ 은  $a_4$  중 음을 반사시키는데 기여한 부분의 흡음률)과  $S_{4E}$ 의 합으로 계산한다. 식 (13), 식 (14)를 활용하면 Box내의 실정수를 구할 수 있으며, 교통량이 적은 심야같은 때에 도시지역 도로 및 교통량이 적은 교외 도로는 Box 입구 및 출구면 ( $s_5$  및  $s_6$ 부분)이 Block 외부에서 입사되는 음에너지가 적고, 대기흡수작용 등으로 완전반사체 역할을 할 수 없어 이때에는 이면들을 개구부 계산하는 방법과 동일하게 계산하면 된다. 즉, 총표면적은 식(13)으로 계산하고, 평균흡음률은 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \sum_{i=1}^6 \frac{a_i S_i}{S} \\ &= \frac{a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + a_4 S_4 + a_5 S_5 + a_6 S_6}{S} \\ &= \frac{a_{1R} S_{1R} + s_{1E} + a_2 S_2 + a_{3R} S_{3R} + s_{3E} + s_4 + s_5 + s_6}{S} \end{aligned} \quad (15)$$

III. Model

Box Model에 의한 도로교통소음값 예측식을 검증

하기 위하여 고가도로 상공과 도로변 건물에 의해 잔향음이 많이 발생하는 청계로변과 서울 시내 소재 터널내 그리고 양면에 반사건물이 존재하는 도로에서 측정된 소음도, 교통량, 차속, 차종 및 도로변 재반구조 등에 대한 자료를 이용하였다.

3.1 대상도로의 제반 특성

청계로는 교통량이 많고 도로 윗부분에 고가도로가 통과하여 한 Block이 Box와 유사한 모양으로 잔향음장 조건을 잘 갖추고 있으며, 터널도 교통량이 많고 입구와 출구를 완전 반사체로 가정할 때 터널 중앙부에서는 Box모양의 잔향음장 조건을 잘 갖추고 있고, 양면에 반사 건물이 존재하는 도로는 도시지역에서 흔히 볼 수 있다. 따라서 청계로와 양면에 반사건물이 존재하는 도로 중 직선도로로 Box 각면 표면적 계산이 용이한 Block과 서울 시내 소재 터널을 Box Model 검증 대상으로 선정하였으며 이들 개요는 Table 1과 같다. 총표면적은 Box 각면의 면적에 Box내에 산재한 흡음물체중 규모가 크고, 고정된 물체의 표면적을 합하여 계산하였으며, 청계로 한 Box 총표면적은 35,396 m<sup>2</sup>이고, 터널내부 총표면적은 18,324 m<sup>2</sup>, 양면에 반사 건물이 존재하는 도로는 48,048 m<sup>2</sup>이다. 그리고 흡음률은 David A.Harris 등이 제시한 건축재료별 흡음률을 근거하여 계산한 결과, 청계로 평균흡음률 0.015, 터널내부도로 평균흡음률 0.02이며, 양면에 반사 건물이 존재하는 도로는 평균흡음률 0.012, 실정수는 청계로 539 m<sup>2</sup>, 터널내부도로 374 m<sup>2</sup>, 양면에 반사 건물이 존재하는 도로는 584 m<sup>2</sup>이었다.

Table 1. Characteristics of Road

대상도로 특징	청계로	터널내부 도로	양면에 반사건물이 존재하는도로
대상Block 길이 (m)	75	610	80
노 폭 (m)	49.6	9.6	52
도로변반사체높이(m)	8.7	7	10.5

3.2 측정 항목 및 방법

도로에서 측정된 소음평가척도는 등가소음레벨 ( $L_{eq}$ ), 변동소음을 적절히 표시하기 위한 통계적 평균값인 퍼센타일레벨 ( $L_x$ )중  $L_{10}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{90}$ 과 교통소음의 변동크기에 대한 효과를 고려한 평가척도로 교통소음지수(TNI)등이며, 이와 동시에 차속, 교통량, 차종이 조사되었으며, 기타 도로 제반 특성도 조사하

였다. 소음레벨은 인도상 1.2m 높이의 삼각대에 설치된 정밀 소음계(B&K Type 2231)를 동특성 Fast, 청감보정회로 A특성으로 하여 매시간 20분씩 24시간 연속측정하였다. 이와동시에 주파수분석 Module(B&K Type BZ7103), 통계처리를 위한 Module(B&K Type BZ7101), 측정 결과를 얻기 위해 Printer(B&K 2318)를 사용하였다. 교통량, 차종 및 차속 측정은 Video Camera(Sony TR-1000)와 Speed Gun(MR, K-15)을 사용하였으며, 청계로에서 측정한 자료는 고가도로 통과 자동차의 소음을 보정하였다.

3.3 검증 방법

Box Model에 의한 도로교통소음 예측식 검증은 통계처리 프로그램인 SAS를 이용하여, 예측식 각 인자를 활용 계산한 예측값과 실측값 상관관계분석을 행하였으며, 그 결과는 상관계수(R), 설명력(R<sup>2</sup>)으로 나타냈다.

IV. 결과 및 고찰

청계로와 터널내부도로 그리고 양면에 반사 건물이 존재하는 도로를 대상으로 도로교통소음 예측식은 L<sub>eq</sub>, L<sub>10</sub>, L<sub>50</sub>, L<sub>90</sub>, TNI 등의 평가 척도로 나타냈으며, 실측값은 Table 2와 같다. 터널내부도로의 실

측 소음레벨이 청계로 및 양면에 반사 건물이 존재하는 도로를 대상으로 한 값보다 모든 평가척도에서 높은 값을 나타내고 있는데, 그 이유는 터널내부 도로가 반사조건을 잘 형성하고 있으며, 터널내의 차선수가 터널외부 차선수 보다 적어 차두간격도 짧기때문인 것으로 볼 수 있다. 실측값과 예측값을 SAS 프로그램에 의해 상관분석한 결과 Table 3과 같으며, 여기서 L<sub>eq</sub>, L<sub>10</sub>, L<sub>50</sub>은 높은 상관관계를 보인 반면, L<sub>90</sub> 및 TNI는 이들 보다 낮은 상관관계를 보였다. 청계로에 대한 상관관계가 터널내부 도로의 상관관계 보다 약간 낮게 나타났는데, 청계로 한 Block 내의 규모가 작은 흡음체를 고려하지 않은 점과 Block 내의 총표면적 계산의 어려움 등이 원인인 것으로 생각된다. 도로 상공면에 반사체가 없는 도시지역 일반 도로조건을 갖고 있는 양면에 반사 건물이 존재하는 도로에 대한 실측값과 예측값 상관관계도 높아 도시지역의 대부분 도로에 적용할 수 있으며, 특히 도로변 반사체의 흡음 정도 즉, 간향음 효과를 고려한 조건에서 L<sub>eq</sub>, L<sub>10</sub>, L<sub>50</sub> 값 예측에 적합한 Model로 사료된다.

V. 결 론

도시지역 도로중 양 도로변과 상공면이 반사체 역할을 하는 청계로, 터널내부도로 및 양면에 반사 건

Table 2. Observed Noise Level and Traffic Flow

구 분	L <sub>eq</sub> dB(A)	L <sub>10</sub> dB(A)	L <sub>50</sub> dB(A)	L <sub>90</sub> dB(A)	TNI dB(A)	교통량* (대/hr)	차량혼입률 소형:대형	차속 (Km/hr)
청 계 로	77.1	80.0	74.5	68.5	84.5	1068	0.67:0.33	47.4
터널내부도로	88.5	92.5	87.1	76.3	111.1	1371	0.94:0.06	55.1
양면에 반사건물이 존재하는 도로	75.4	78.7	71.9	66.2	86.2	1231	0.69:0.31	49.4

\* 대상도로의 전차선을 통과하는 양으로, 청계로는 6차선, 터널내부도로는 2차선 그리고 양면에 반사건물이 존재하는 도로는 6차선이다.

Table 3. Correlations between observed and predicted Noise Level

평가 척도	청 계 로			터 널 내 부 도 로			양면에 반사건물이 존재하는도로		
	R	R <sup>2</sup>	P	R	R <sup>2</sup>	P	R	R <sup>2</sup>	P
L <sub>eq</sub>	0.9056	0.8201	<0.001	0.9179	0.8425	<0.001	0.8991	0.8084	<0.001
L <sub>10</sub>	0.8839	0.7813	<0.001	0.9090	0.8263	<0.001	0.8723	0.7609	<0.001
L <sub>50</sub>	0.8447	0.7135	<0.001	0.8896	0.7914	<0.001	0.8221	0.6758	<0.001
L <sub>90</sub>	0.7763	0.6026	<0.001	0.8067	0.6508	<0.001	0.7371	0.5433	<0.001
TNI	0.8231	0.6775	<0.001	0.8439	0.7122	<0.001	0.7981	0.6370	<0.001

여기서, R: 상관계수, R<sup>2</sup>: 설명력, P: 유의도

찾아 온 것 이: 도로의 소음레벨을 비교할 때 반사조건이 잘 형성되어 있으며, 차두간격이 짧은 터널내부 도로가 제일 높았다. 본 예측 Model을 이 도로들에 적용한 결과 충분히 적용 의의가 있으며, 청계로 및 양면에 반사 건물이 존재하는 도로에 대한 실측값과 예측값 상관관계가 터널내부도로에 대한 것 보다 약간 낮기는 하지만 상관계수값이 일반적으로 높게 나타났으므로, 이 Model을 상공면 반사책이 없는 도시 지역의 일반도로에도 적용 가능성이 있다고 사료되며, 도로교통소음 평가척도중  $L_{eq}$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{50}$ 의 상관관계가 다른 것보다 높게 나타났으므로, 본 Model 적용시 이들이 적합한 평가척도라 볼 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. 정일록, "소음진동학", 신광출판사, pp.195-208(1987)
2. David A.Harris, "Noise Control Manual", VNR., p. 148(1991)
3. M.Ohta and Y.Mitani, "A Computer Model to Assess and Predict Road Transport Noise in Built-up Areas", Applied Acoustics, 21(1987)
4. M.M.Radwan and D.J. Oldham, "The Return Wall as a Traffic Noise Barrier", Applied Acoustics, 20 (1987)
5. Ult Sandberg, "Road Traffic Noise-The Influence of the Road Surface and its Characterization", Applied Acoustics, 21(1987)
6. 足立義雄, 岡崎新太都, "建物周辺における道路交通騒音の傳播", 土木技術資料 25-6, pp.319-324(1983)
7. 石井聖光, "道路交通騒音の豫測計算方法に關する研究(その1)", 日本音響學會誌, 31, pp.507-517(1975)

#### ▲여 운 호(Woon Ho Yeo)



1984년 2월 : 서울시립대 환경공학  
학과 졸업  
1987년 2월 : 서울대 환경보건학  
과(보건학석사)  
1992년 2월 : 서울시립대 환경공  
학과 박사과정 수료  
1988년 3월 ~ 현재 : 영동전문대  
환경관리과 교수

#### ▲유 명 진(Myong Jin Yu)



1967년 2월 : 서울대학교 토목공  
학과 졸업  
1975년 10월 : 영국 뉴캐슬대학  
교 환경공학과(공  
학석사)  
1983년 2월 : 미국 아이오와 주  
립대학교 환경공학  
과(공학박사)

1970년 9월~1978년 1월 : 울산공과대학 교수  
1978년 1월~현재 : 서울시립대학교 환경공학과 교수