

〈논 문〉

# 도로소음의 예측모델에 대한 비교·평가

## Application of Ray Acoustics in Outdoor Noise Propagation : NIC@E

이 규 철\* · 김 정 태\*\*

Lee, Kyu-Chul and Kim, Jeung-Tae

(1999년 4월 21일 접수 ; 1999년 11월 6일 심사완료)

**Key Words :** Ray-tracing(음선추적법), NIRI Model(국립환경연구원 도로소음 예측식), JAS Model(일본 음향학회 도로소음 예측식)

### ABSTRACT

NIC@E is the software developed by authors. The program provides the noise level in outdoors due to various noise source types : construction machines including blast sources, railroad vehicles and automobiles. It operates in the Windows system. In this paper, a highway traffic noise has been evaluated using various types of approach : Ray-tracing method, NIRI method, JAS method. In order to compare the noise estimation performance for various models, a measurement is conducted on a 8 lane express highway at the distance of 25 m and 50 m from the lane. The result shows that the ray tracing and JAS model predict the measured value well within 2dB deviation. The NIRI model, however, underestimates the highway noise level, as the distance between the source and receiver increases.

### 1. 서 론

소음을 발생시키는 음원과 함께 다양한 조건의 전달경로에 대한 연구가 진행되고 있으며, 실험적 방법을 통한 수식화와 데이터베이스화가 이루어지고 있다. 본 논문은 이러한 연구를 기초로하여 다양한 소음원과 환경조건에 따른 주위 소음도를 해석적으로 예측하기 위한 틀개발에 관한 내용이다. 국내에서는 아직 이와 같은 연구가 미흡한 실정이며 따라서 이용되는 틀은 대부분 국외에서 개발된 것들이다.

또한 국외에서 개발된 대다수 틀의 경우, 도로교통이나 항공기 등과 같은 어느 한 종류의 소음원에 대한 해석만 이루어져 여러 종류의 소음원이 대상지

역내에 공존하는 실제 모델을 정확히 해석하기에는 한계가 있다. 이런 현실을 고려한 본 연구의 성과로서 개발된 소음예측프로그램은 국내에서 최초로 개발된 틀로서 우리나라의 소음원과 환경조건을 종합적으로 고려할 수 있다는 특징을 갖고 있다. 특히, 도로교통소음의 경우 음선법을 이용하여 자체 개발한 소음도예측식과 국립환경연구원에서 제시하는 예측식(이하 NIRI model), 일본음향학회에서 제시하는 예측식(이하 JAS model) 등을 해석에 이용함으로써 각각의 소음도를 비교 평가 할 수 있다. 따라서 좀 더 정확하고 객관적인 소음도를 예측할 수 있다.

### 2. 소음예측 알고리즘 : 음선법

본 연구에서 소음원의 모델 및 지표면 반사효과 등을 고려하기 위하여 광음향이론을 적용하였다.

광음향기법은 음의 전파를 회절현상에 의거한 파

\* 정회원, 홍익대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과

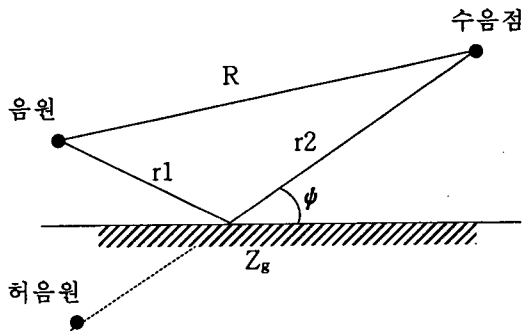


Fig. 1 Geometry of sound-propagation path

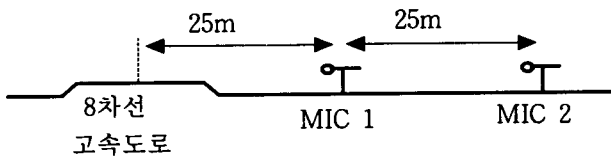


Fig. 2 Measurement set-up

동(wave)전파가 아닌 직진성이 강한 음선(ray)으로 가정하여 해석하는 알고리즘이다. 이 방법은 Fig. 1에서와 같이 공간에서 전파되는 음을 재현하기 위한 기하학적 음향이론에 기초를 두고 있다. 음선에서 방사되는 에너지가 각각 초기에너지를 가지고 임의의 지표면에서 경면반사(specular reflection)를 통해 반사되며, 음선의 에너지는 공기흡음률과 반사체의 흡음률에 따라 점차 감소하게 된다<sup>(3,6)</sup>. 따라서, 음선의 에너지가 지정한 값(에너지밀도, 음의 진행거리, 음의 진행시간 등)이하로 감소하면, 이 음선의 추적을 마치고 다음 음선의 추적을 실행한다. 본 연구에서 사용된 허상법(image source method)은 광음향기법 중의 하나로서 특정음원과 수음점을 먼저 설정한 후, 2점간의 음선경로를 착안하여 계산하는 방법이다. 소음원과 수음점 사이에 차폐물이 없을 경우, 직접음이 도달되어 소음도에 영향을 미칠 것이며, 지표면에 의한 1차 반사음이 수음점에 도달하여 역시 소음도에 영향을 미치게 된다. 지표면 임피던스  $Z_g$ 는 식 (1)과 같은 경험식으로 구할 수 있다.

$$Z_g = \rho d \left[ 1 + 0.0571 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.754} - i 0.087 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 주파수이고  $\sigma$ 는 지표면의 유동저항(flow resistivity) 값이다. 한편, 지표면의 유동저항 값은 실험을 통해서 구할 수 있다. 따라서 지표면의

유동저항값을 구함으로써 지표면의 임피던스를 구할 수 있고, 임피던스를 구하게 되면 지표면의 반사계수  $R_p$ 를 구할 수 있으며 지표면의 흡음률도 구할 수 있게 된다. 따라서 지표면에서의 상대음압값은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$A = 20 \log \left| \frac{P_{직접음} + P_{반사음}}{P_{직접음}} \right| \quad (2)$$

예측과정에서는 각종 지표면에 대한 유동저항값을 대입하여 상대음압값을 구하도록 하였다. 한편, 음원에서 방사된 음선은 경면반사에 의해 반사되고, 회절현상은 고려하지 못하므로 직진성을 강조하게 되어 주로 고주파대역에서 사용이 가능하게 된다

### 3. 도로교통 소음예측식

#### 3.1 국립환경연구원의 예측식

국립환경연구원의 도로교통 소음예측식<sup>(4,5)</sup>은 차선수에 따라 일반도로와 고속도로의 경우 등 크게 두 가지로 나뉘어진다. 일반도로의 경우 다시 도로단에서 10 m이내의 지역과 10 m이상인 지역으로 나뉘어 각각의 경우에 대하여 달리 소음도를 예측하며, 고속도로의 경우는 다른 예측식이 적용된다.

##### (1) 일반도로에서의 소음도 예측식

일반도로의 경우 노면에서부터 10 m 이내의 도로단지역과 노면에서 10 m 이상 떨어진 지역으로 나뉘어 예측식이 정의된다. 각각의 결과는 1시간의 등가소음도이다.

- 노면에서 10 m 이내의 도로단지역

$$L_{eq} \approx L = 10 \log (10^{L_p/10} + 10^{L_B/10}) [dBA]$$

$$L_p = 45 + 10 \log (N_1/l) + 30 \log (V_1/50) \quad (3)$$

$$L_B = 53 + 10 \log (N_2/l) + 30 \log (V_2/50)$$

$N_1$  : 1시간당 소형차 통과대수 (대/hr)

$N_2$  : 1시간당 대형차 통과대수 (대/hr)

$l$  : 가상 주행중심선에서 도로단지역까지의거리 (노면에서10 m이내)

$$l = \sqrt{l_n \times l_f}$$

$l_n$  : 노면에서가장가까운차선의 중심선까지의거리(m)

$l_f$  : 노면에서가장먼쪽차선까지의거리

$V_1$  : 소형차 평균차속 (km/hr)

$V_2$  : 대형차 평균차속 (km/hr)

10 m이내의 예측식의 경우, 식 (3)과 같이 소형차와 대형차로 분리하여 각각의 시간당 통과대수, 평균차속 등의 정보를 얻는다. (소형차와 대형차의 구분은 2.5 t 이상의 트럭부터 대형차로 구분하였다.) 또한 노선에서 가장 가까운 차선 중앙까지의 거리와 가장 먼 차선 중앙까지의 거리를 곱하고, 이 값의 제곱근을 취한 가상주행중심선에서 도로단 지역까지의 거리를 계산한다. 통과대수와 평균차속, 도로단 지역까지의 거리 등을 이용하여 소형차와 대형차 각각의 소음도를 구한다. 각 소음도들을 대수합식에 대입하여 합성소음도를 구한 후, 이 값을 등가소음도( $L_{eq}$ )로 한다.

위 예측식에서 알 수 있듯이 소형차의 소음도일 경우에 비해 대형차의 소음도가 8 dBA정도 높게 계산되는 것을 알 수 있다. 이는 같은 속도와 차량대수일 경우 대형차에서 발생하는 음향파워가 크기 때문이다.

- 도로단에서 10 m 이상 지역

$$L_{eq} = 1.1 \times (20 + 10 \log(QV/l)) - 9 \log ra - C \quad [\text{dBA}] \quad (4)$$

여기서,

$Q$  : 1시간당 등가 교통량(대/hr), 소형차통과대수+10×대형차통과대수

$V$  : 평균차속(km/hr)

$l$  : 가상 주행중심선에서 도로단+도로단에서 기준 10 m까지의 거리

$ra$  : 기준 10 m에 대한 도로단에서 10 m 이상 떨어진 예측지점까지의 거리비

$C$  :  $Q$ 에따른 상수 (0 ~ -5.5)

식 (4)는 도로단에서 10 m 이상 지역의 소음도 계산 식이며, 대형차 통과대수에 10을 곱한 값과 소형차통과대수의 합을 1시간당 등가 통행량으로 하고, 평균차속과 거리를 이용하여 소음도를 구한다. 역시 대형차에서 발생하는 소음에 가중치를 둔다.

이 값에서, 거리비에 따른 보정과 통행량에 따른 보정치를 더하여 등가소음도를 구한다.

(2) 고속도로에 대한 예측식

1시간 당 전체차량의 통행량과 평균 속도를 이용하여 소음도를 구하고 아래의 조건에 따른 보정치를 추가하여 구한다. 고속도로에 대한 예측식은 식 (5)와 같다.

$$L = -7 + 10 \log Q + 22 \log V \quad (5)$$

$$L_{eq} = L + \Delta T + \Delta W + \Delta R + \Delta \theta - \Delta D$$

단위는 dBA이며, 통행량( $Q$ )과 속도( $V$ )를 이용하여  $L$ 값을 구하고 아래의 조건에 따른 보정치를 추가하여 구한다.

$\Delta T$  : 속도보정치 56[km/hr]기준

$\Delta W$  : 노폭 보정치(dB(A))

$\Delta R$  : 거리 감쇠치(dB(A))

$\Delta \theta$  : 난측 감쇠치(dB(A))

$\Delta D$  : 회절 감쇠치(dB(A))

속도보정치의 경우, 도로의 구배율과 대형차의 혼입율을 변수로하며 평균차속 56 km/hr를 기준으로 적용되는  $\Delta T$ 의 예측식이 달라진다.

노폭 보정치는 바깥차선 중심선까지의 거리와 가상주행중심선에서 측정지점까지의 거리비에 따른 보정치이며, 난측감쇠치는 가상주행중심선과 음향방사를 가로막는 주변지형지물과 각을 이용하여 감쇠치를 계산한다. 또한 회절감쇠치는 도로단 지역의 형태, 즉 성토도로 및 절토도로의 경우 음원과 도로단, 측정점까지의 기하학적 회절에 의한 음향의 감쇠치를 계산한다.

Fig. 2는 고속도로변의 소음예측과정을 보여주고 있다. 고속도로의 소음예측식의 경우, 일반도로에 비해 다양한 도로조건을 예측에 이용할 수 있는 특징을 가지고 있다.

3.2 일본음향학회의 예측식

일본음향학회의 도로소음예측식<sup>(4)</sup>은 우선 1대의 차량에서 발생하는 평균음향파워레벨(dBA)을 이용하여 자동차 교통소음의 중간치( $L_{50}$ )를 구하고  $L_{eq}$ 로 환산하는 방식을 사용하는 것이 특징이다. 예측과정은 식 (6)과 같다.

$$L_w = 87 + 0.2V + \log(a_1 + 10a_2)$$

$$L_{50} = L_w - 8 - 20 \log l + 10 \log(\pi \frac{l}{d} \tanh 2\pi \frac{l}{d}) + a_d + a_i$$

$$(r = l/d, \rho = s/d) \quad (6)$$

$$L_{eq1} = L_{50} - 10 \log[\frac{\tan^{-1}(\tanh 2\pi r \cdot \tan \pi \rho)}{\pi \rho}]$$

$$(0 \leq \rho \leq 0.5)$$

$$L_{eq2} = L_{50} - 10 \log[\frac{1}{\rho} + \frac{\tan^{-1}(\tanh 2\pi r \cdot \tan \pi \rho)}{\pi \rho}]$$

$$(0.5 < \rho \leq 1)$$

여기서,

- $L_w$  : 1대의 차에서 발생하는 평균파워레벨 dBA
- $L_{50}$  : 자동차의 교통소음의 중간치 dBA
- $V$  : 평균주행속도(km/hr)
- $a_1$  : 소형차의 혼입률 2.5 t이하 트럭까지 )
- $a_2$  : 대형차의 혼입률 (  $a_1 + a_2 = 1$  )
- $l$  : 음원에서 수음점까지의 거리(m)
- $d$  : 평균 차두간 거리(m)  $d = 1000 V/N$
- $N$  : 교통량(대/시)
- $a_d$  : 회절감쇠치에 의한 보정치 dBA
- $a_i$  : 도로구조별 각종 원인에 의한 보정치 dBA
- $S$  : 선음원의 평균길이(m)

우선, 모든 차량에 대한 평균속도(km/hr)와 소형차와 대형차의 각각의 혼입률을 이용하여, 차량 1대에서 발생하는 평균파워레벨을 구한다. 음원에서 수음점까지의 거리(m), 평균차두간 거리(m), 선음원의 평균길이(m), 회절감쇠치(dBA), 도로구조별 보정치(dBA) 등을 이용하여 교통소음의 중간치( $L_{50}$ )를 구하고 여기서, 평균차두간 거리와 선음원의 평균길이와의 비를 기준(=0.5)으로 하여 이상인 경우와 미만인 경우에 대한 1시간당의 등가 소음도 ( $L_{eq}$ )를 구하게 된다.

#### 4. 프로그램의 적용

NIC@E를 실행시키면 주메뉴창 Fig. 3이 생성된다. 우선 메인 메뉴의 지형선택버튼을 눌러 지형선택창을 활성화 시킨 후, 대상지형의 크기를 선택한

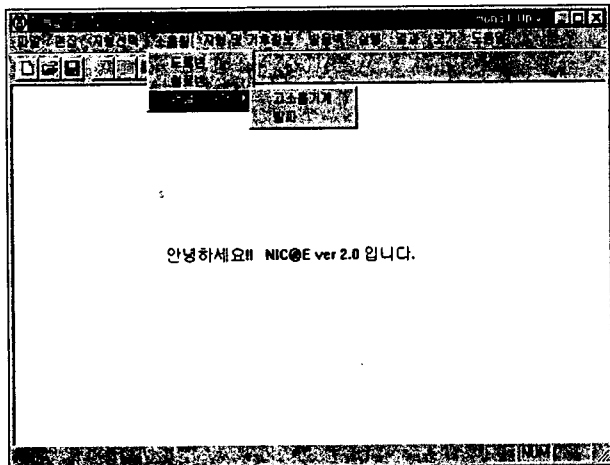


Fig. 3 NIC@E program : main structure

다. 다음 소음원의 입력에서 도로변을 선택하면 Fig. 4와 같은 창이 활성화되며, 도로소음원의 정보를 입

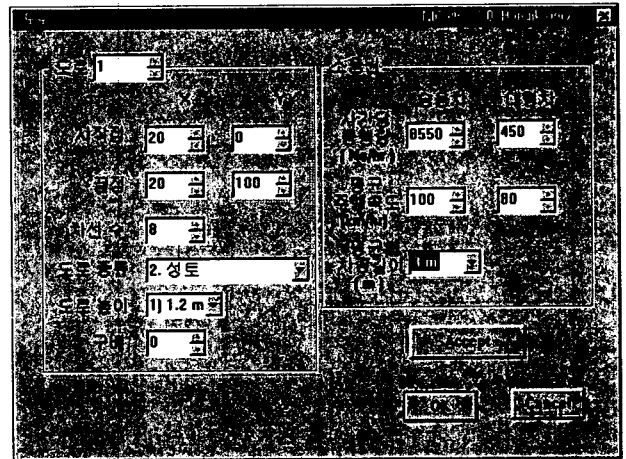


Fig. 4 Highway noise information

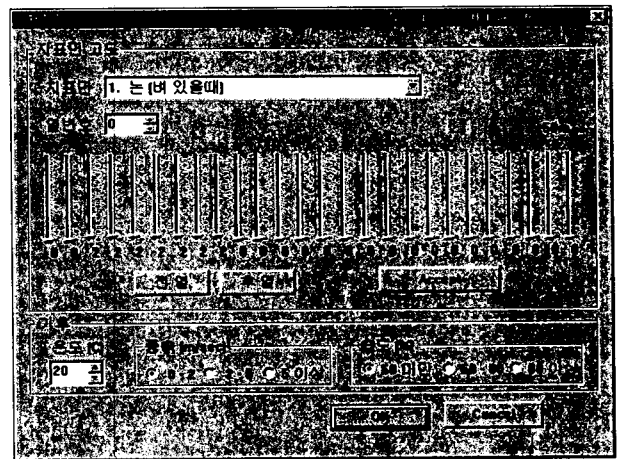


Fig. 5 Geometry & Climate information

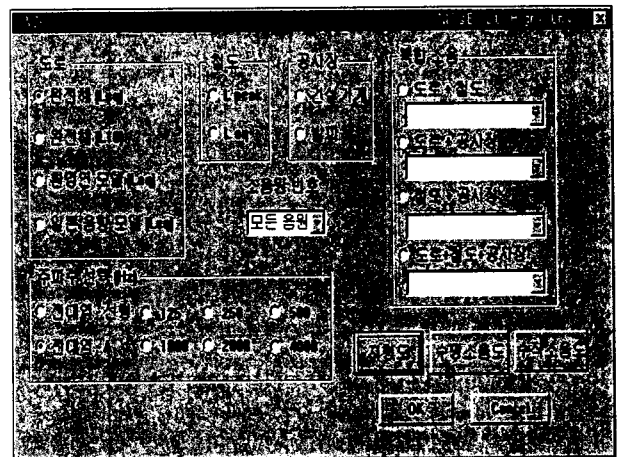


Fig. 6 Output Selection window

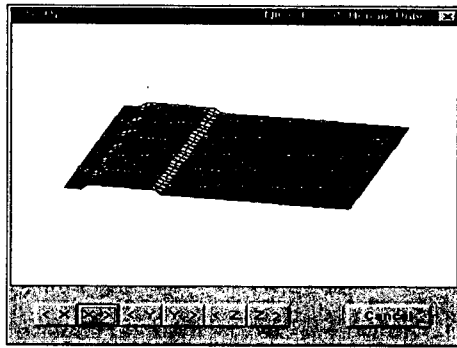


Fig. 7 3D Geometry map

력한다. 대상지역내에서 3개의 도로를 동시에 해석할 수 있으며, 시작점과 끝점을 이용하여 사용자가 원하는 곳에 도로를 위치시킬 수 있다. 소형차와 대형차 각각의 시간당 차량대수와 평균속도를 입력하고 도로의 구배와 도로의 종류, 차선수, 차간거리 등을 입력한다. Fig. 5는 지형 및 기후정보입력창의 모습이다. 해석시 지표면의 반사를 고려하기 위하여 지표면의 종류와 지형의 고도를 입력하고, 기후정보도 입력한다.

결과창 Fig. 6의 도로 부분에서 원하는 해석결과를 선택한 후, 소음원 번호, 보고싶은 주파수대역 등을 선택한다. 음선법에 의한 해석은 등가소음도와  $L_{10}$  소음도를 각 옥타브밴드별 또는 Overall 값 등으로 확인할 수 있다. 국립환경연구원모델 및 일본 음향학회모델의 경우는 Overall(A) 등가소음도만을 확인할 수 있다. 지형도 버튼을 누르면, Fig. 7과 같은 대상지역의 3차원 지형도를 볼 수 있다.

## 5. 결과 및 실측치와의 비교

Fig. 2에 보여져 있는 것과 같이 소음측정장비를 구성하고 실험을 통한 실측치를 얻었으며, 이를 해석결과와 비교하여 본다. 본 실험은 왕복 8차선의 경부고속도로상에서 실시되었으며, 실험조건은 Table 1과 같다. 3가지 예측방법에 의한 소음분포도는 각각 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10과 같다. 해석결과를 2차원 그래프상에 색깔로 표시한다. 3 가지 경우 모두 원

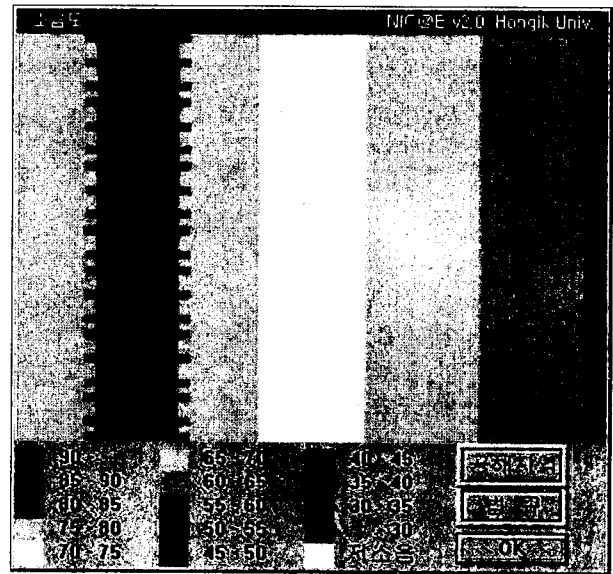


Fig. 9 Noise map : NIRI model( $L_{eq}$ )

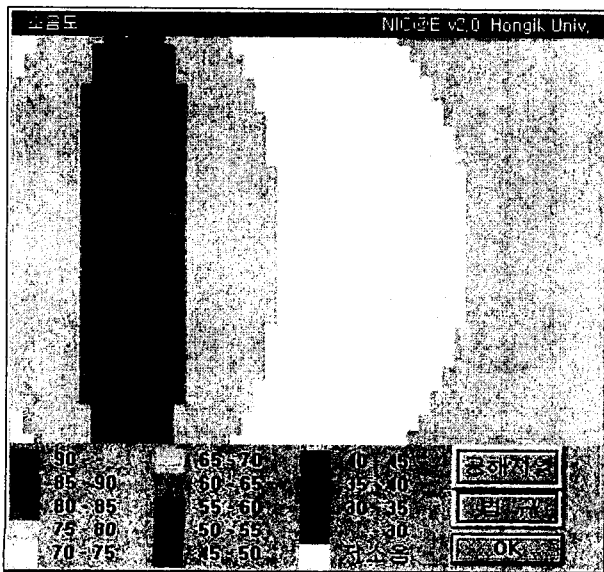


Fig. 8 Noise map : Complete - model( $L_{eq}$ )

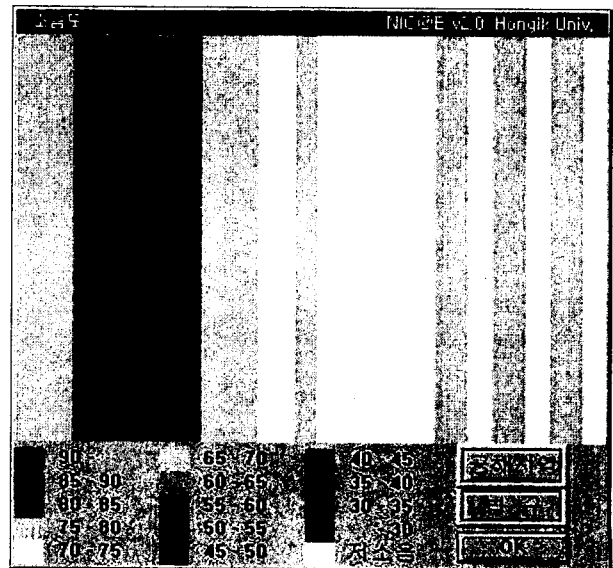


Fig. 10 Noise map : JAS model( $L_{eq}$ )

Table 1 The condition of Highway

날짜	97년 5월
장소	경부고속도로, 서울~천안 구간 (왕복8차선)
기온	20 °C
풍속	0~2 m/s
습도	50 %
통행량	소형차 8550 대형차 450 [대/시]
평균속도	소형차 100, 대형차 80 [km/h]
도로유형	성토
도로높이	1.2 m
지표면의 종류	논

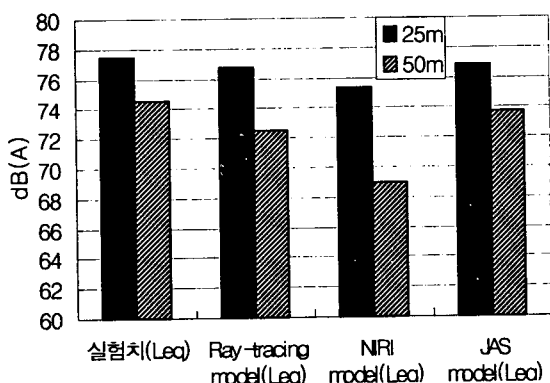


Fig. 11 Results of analysis and measurement

쪽 도로를 중심으로한 대칭적 소음분포가 일치하는 것을 알 수 있다. 실험결과치에서 거리가 2배 증가함에 따라 소음도가 3 dB 감소했다. 따라서, 총 통행량이 시간당 9000대로 매우 많아 이를 선음원으로 가정하는 것이 타당했음을 알 수 있다. 실험결과와 NIC@E를 이용한 해석결과는 Fig. 11과 같다.

광음향 해석 모델이나 일본음향학회 모델의 경우도 거리에 따라 3~4 dB정도의 감소를 보여 선음원으로 가정했음을 알 수 있다

그러나 국립환경연구원 모델의 경우 거리에 따른 감쇠가 6 dB정도로 점음원으로 해석했음을 알 수 있으며, 이에 따라 소음도가 낮게 해석되는 경향이 있다. 25 m거리에서의 실험치와 각 모델별 해석

치는 큰 차이 없이 서로 일치하는 것을 알 수 있으며, 50 m거리에서도 국립환경연구원의 경우를 제외하고는 서로 일치하는 결과가 나왔다. 특히 일본음향학회 예측식의 경우 30 m이내의 근거리 지역 소음도가 실험치와 매우 일치하는 특징을 갖고 있다.

## 6. 결 론

해석결과, 실제 실험치와 NIC@E를 이용하여 해석한 결과가 작은 오차로서 서로 일치하는 것을 알 수 있었다. 특히, 광음향기법과 일본음향학회의 예측식에 의한 결과는 거의 일치하였으며, 환경연구원의 예측식에 의한 결과는 음원으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 실험치 보다 5~6 dB 정도 낮게 나와 차량이 많은 선음원의 해석에는 적합하지 않음을 알 수 있었다. 광음향해석 모델에 의한 해석시 옥타브 밴드별 소음도를 확인 할 수 있으며, 중심주파수 125 Hz 및 250 Hz 등의 저주파대역의 소음이 넓게 전파되는데 비해 2 kHz 및 4 kHz 대역의 소음은 거리에 따른 감쇠가 커 가까운 지역까지만 소음이 전파되는 음향특성을 확인 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) 1973, Highway Research Board, Highway Noise : A field Evaluation of Traffic Noise Reduction Measures.
- (2) Wong, J. Y. 1993. Theory of Vehicles, John Wiley and Sons, Inc.
- (3) Pierce Allan, 1981. Acoustics. McGraw-Hill Book.
- (4) 정일록 등, 1989. "도로교통 소음저감을 위한 종합대책에 관한 연구(Ⅲ)", 국립환경연구원.
- (5) Federal Highway Administration, users Manual : TSC Highway Traffic Noise Prediction Code, 1977.
- (6) 김정태, 1995. "육상교통 소음 제어 기술 개발 (I)", 홍익대 과학기술연구소.
- (7) 김정태, 이규철, 1998. "건설공사장, 도로교통 및 철도소음 예측 프로그램 : SONICS", 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, pp. 747~752.