

고속도로 교통소음 예측

Prediction of Highway Traffic Noise

°조대승* · 김진형** · 최태묵** · 오정한** · 장태순***

Dae-Seung Cho, Jin-Hyeong Kim, Tae-Muk Choi, Jung-Han Oh, Tae-Soon Jang

ABSTRACT

This paper presents some advanced and supplemental methods to enhance the accuracy in case of calculating geometric divergence attenuation, attenuation by multiple screening structures, ground attenuation at unflat surfaces of sound during propagation outdoors by the methods specified in ISO 9613-2. Moreover, a calculation method for considering short-term wind effect, specified in ASJ Model-1998, is also introduced. To verify the accuracy of adopted methods, we have carried out highway traffic noise prediction and measurement at the twelve locations appearing representative road shapes and structures, such as flat, retained cut, elevated, barrier-constructed roads. From the results, we have confirmed the predicted results show good correspondence with the measured at direct, diffracted and reflected sound fields within 30m from the center of near side lane.

1. 서론

국내 경제의 지속적인 성장과 더불어 이를 뒷받침 하기 위한 사회간접시설 확충의 일환으로 고속도로가 확장되면서 고속도로 이용차량의 증가⁽¹⁾와 함께 차량의 대형화와 고속화로 인해 고속도로 교통 소음레벨이 높아지고 있다. 따라서, 고속도로 교통소음으로 인해 예상되는 주민 민원에 대해 능동적으로 대처하기 위해서는 신설 및 기존 고속도로의 소음 유발정도와 소음전달 경로상의 감쇠기구에 대한 정확한 예측 기술이 필요하다.

고속도로 교통소음의 예측에 활용할 수 있는 기존 연구결과로서는 국내의 경우 국립환경연구원⁽²⁾과 한국도로공사⁽³⁾의 소음예측모델 등이 있으며, 외국의

경우 미국 연방고속도로국의 FHWA방법⁽⁴⁾, 영국 수송국의 CRTN 방법⁽⁵⁾, 프랑스 도로국과 육상수송국 등이 공동으로 만든 NMPB 방법⁽⁶⁾, 일본음향학회의 ASJ 방법⁽⁷⁾ 등이 있다. 그러나, 상기의 연구 결과들은 교통소음의 발생 및 전달감쇠 평가에 주파수 특성을 반영할 수 없거나 우리나라의 도로 구조, 차량 및 교통 여건 등이 반영되지 않거나 소음 평가물리량이 달라 국내 고속도로 교통 소음의 정밀한 소음예측 및 저감대책 수립에 적용하기 곤란한 실정이다.

한편, 국제표준기구에서는 항공기 소음과 충격음을 제외한 대부분의 육외환경소음 예측 방법에 대한 국제 규격인 ISO 9613-2⁽⁸⁾를 제정하였다. 그러나, ISO 9613-2는 도로, 철로와 같은 선 소음원을 복수개의 점 소음원으로 모델링하므로써 소음원 근접장에서의 예측 정확도가 분할된 점소음원의 간격에 따라 좌우될 뿐만 아니라 평탄하지 않은 지형에서의 지면 감쇠 효과, 다중회절 효과 등의 평가 방법 등이 명확하게 명시되지 있지 않다.

이에 본 연구에서는 보다 정밀한 육외 환경소음의 계산 기법 마련을 위하여 ISO 9613-2의 육외 전파소음 전달감쇠 산정 방법을 보완·개선할 수 있는 방안

* 정회원, 부산대학교 조선해양공학과
E-mail : daecho@hyowon.pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-2482 Fax : (051) 512-8836

** 부산대학교 대학원 조선해양공학과

*** 한국도로연구소 환경연구실

을 제시하고, 이를 다양한 도로 구조 유형을 갖는 국내 고속도로 교통소음 예측에 적용할 경우의 정확도를 예측 결과와 비교·검토하였다. 이때, 고속도로 주행 차량의 음향방사파워는 ASJ Model-1998에 제시된 경험식을 수정 보완한 연구 결과⁽⁹⁾를 활용하였다.

2. 옥외 환경 소음 예측 방법

2.1 옥외 환경소음 예측식

소음원의 음향발생 특성은 물론 음의 전달과 정에서 발생하는 감쇠특성도 주파수 대역별로 달라진다. 이에 ISO 9613 방법은 특정 수음점의 옥타브밴드별 등가 음압레벨 L_{FT} 를 다음과 같이 산정한다.

$$L_{FT} = L_W + D_I - A_{div} - A_{atm} - A_{gr} - A_{bar} - A_{misc} \quad (2.1)$$

여기서,

L_W : 소음원 또는 경상 소음원(image source)의 옥타브 밴드 음향출력레벨 (dB ref = 10^{-12} W)

D_I : 소음원의 지향지수

A_{div} : 기하학적 확산 효과에 의한 감쇠

A_{atm} : 공기 흡음에 의한 감쇠 효과

A_{gr} : 지면에 의한 감쇠 효과

A_{bar} : 구조물에 의한 회절 효과

A_{misc} : 숲, 공장지대 및 건물밀집지대에서의 감쇠 효과

수음점에서의 총합 A-가중치 등가 음압레벨 L_{AT} 는 식(2.1)에 의거해서 경상 소음원을 포함한 각각의 소음원에 대해 중심주파수 63Hz부터 8kHz까지의 1-옥타브밴드별 등가 음압을 산정한 후 다음과 같이 산정한다.

$$L_{AT} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m 10^{0.1((L_{FT})_i + (A_j)_j)} \right] \quad (2.2)$$

여기서,

n : 경상 소음원을 포함한 소음원으로부터 수음점으로 전달되는 음의 전파 경로 개수

j : 중심주파수 63 Hz부터 8kHz 까지의 1-옥타브밴드를 나타내는 지수

A_j : 표준 A-가중치 계수(dB)

한편, 기상 변화 효과를 고려한 장기 평균 A-가중치 음압레벨 $L_{AT}(LT)$ 은 하풍조건에서 계산된 등가음압레벨 L_{AT} 를 이용해서

$$L_{AT}(LT) = L_{AT} - C_{met} \quad (2.3)$$

로 계산한다. 여기서, C_{met} 는 기상 효과 보정계수이다.

이하 본 장에서는 상기 ISO 9613-2의 예측식을 토대로 고속도로 소음예측을 수행하되 이의 정밀도를 향상시키기 위해 ISO 9613-2에 정의된 전달감쇠 평가 방법중 기하학적 확산효과, 지면 감쇠효과, 구조물에 의한 차음효과를 보다 정밀하게 산정하기 위해 보완·개선한 방법과 단기간 부는 바람의 영향을 고려하기 위한 방법에 대해서 기술한다.

2.2 기하학적 확산 효과(A_{div})

ISO 9613 방법은 선 또는 면 소음원 등을 이산 점 소음원의 집합체로 간주한다. 이때, 분할된 소음원의 중심에 위치하는 것으로 간주되는 점 소음원에 의한 자유 음장에서의 기하학적 감쇠 효과는

$$A_{div} = 20 \log d + 11 \quad \text{dB} \quad (2.4)$$

와 같이 산정한다. 여기서, d 는 점 소음원으로부터 수음점까지의 거리이다.

상기 점 소음원에 의한 기하학적 확산 효과 산정방법은 소음 전파거리 d 가 소음원의 최대 변의 크기보다 2배 이상인 경우에는 정확도가 보장되나 소음원의 근접장에서는 오차가 크다. 따라서, 고속도로와 같이 소음원의 크기를 무시할 수 없는 경우 이들 소음원을 매우 많은 점 소음원의 결합체로 반영하여야만 근접장에서의 계산 정확도를 향상시킬 수 있으나 이는 소음예측 연산 부담을 증가시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 소음원 근접장에서 적은 연산 부담으로 계산 정확도를 높이기 위해 소음원의 기하학적 형상과 소음 전파거리를 고려하여 다음과 같이 기하학적 확산 효과를 산정하였다.

$$d < \frac{b}{\pi} : A_{div} = 10 \log \left(\frac{\pi}{4bl} \right) \text{ dB} \quad (2.5a)$$

$$d > \frac{b}{\pi} : A_{div} = 10 \log \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{d_o l} \right) + 11 \text{ dB} \quad (2.5b)$$

여기서, b 와 l 은 각각 소음원 단변과 장변의 길이(m)이고, θ_1 , θ_2 및 d_o 의 정의는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 상기 식(2.5a)는 면 소음원, 식(2.5b)는 선 소음원에 대한 기하학적 확산 효과 평가식에 해당하며, 식(2.5b)는 소음 전파거리 d 가 커질 경우

$$\theta_2 - \theta_1 \approx \frac{l}{d_o} \cos \theta \approx \frac{l}{d}$$

와 같은 근사 관계식이 성립하므로 소음원으로 부터 원거리에서는 식(2.4)에 나타난 점 소음원의 기하학적 확산 효과 산정식과 같게 된다⁽¹⁰⁾.

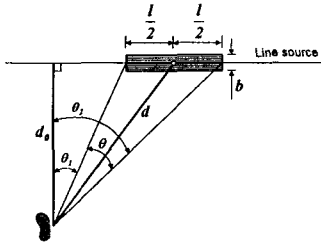


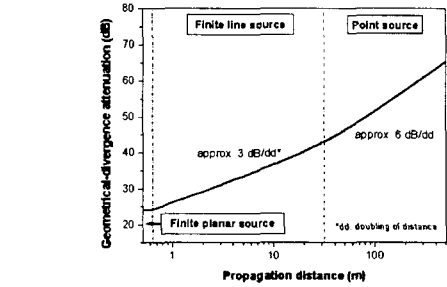
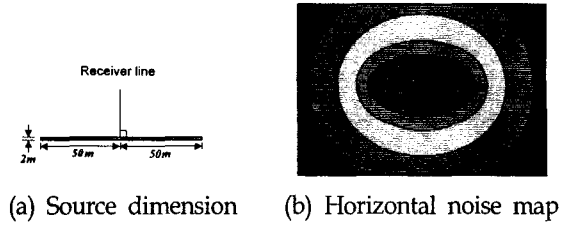
Fig. 1 Calculation of geometrical divergence attenuation using a finite line source

Fig. 2에는 상기 방법에 의해 길이 100 m, 폭 2 m 인 소음원을 한 개의 소음원으로 모델링한 경우의 기하학적 확산 효과 계산 결과를 나타내었는데 소음원의 형상과 전파 거리별 거리 감쇠 효과가 잘 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

2.3 지면 감쇠 효과 (A_{gr})

ISO 9613 방법에서는 지면을 음향학적으로 딱딱한 지면(acoustically hard ground)과 부드러운 지면의 2 종류로만 분류한다. 지면 감쇠 효과는 소음전달경로를 소음원 영역, 수음점 영역 및 중간 영역으로 구분하고 각각의 영역에서 부드러운 지면이 차지하는 비율과 지면으로 인한 반사 효과를 고려하여 산정한다. ISO 9613에서는 상기의 방법을 지면이 평탄한 경우에 대해서 적용할 수 있다고 규정하고 있으며, 지면이 평탄하지 않고 대부분의 소음 전달경로가 음향학적으로 부드러운 지면으로 구성된 경우에 한해서 지면감쇠 효과를 총합 음압레벨 기준으로만 산정하는 방법을 별도로 제시하고 있다.

이에 본 연구에서는 평탄하지 않은 지형에 대한 지면감쇠효과를 옥타브 밴드별로 산정하기 위하여 프랑스의 도로 교통 소음 계산 방법⁽⁶⁾에 규정된 방법을 적용하였다. 상기 방법은 ISO 9613 방법과 동일한 방법으로 하풍조건하의 옥타브 밴드별 지면 감쇠 효과를 산정하되 평탄치 않은 지형에 대해서 Fig. 3에 보인 바와 같이 등가 소음원의 높이



(c) Geometrical-divergence attenuation

Fig. 2 An example showing the geometrical-divergence attenuation of a lengthy source

$(h_s)_{eq}$ 와 등가 수음점의 높이 $(h_r)_{eq}$ 를

$$(h_s)_{eq} = h_s \cos \theta + \frac{S_r - S_u}{d_p} \quad (2.6a)$$

$$(h_r)_{eq} = h_r \cos \theta + \frac{S_r - S_u}{d_p} \quad (2.6b)$$

와 같이 산정한 후 평탄한 지형과 마찬가지로 방법으로 지면감쇠 효과를 산정한다. 여기서, h_s , h_r 은 각각 실제 소음원과 수음점의 높이, d_p 는 지면에 투영된 소음전파거리, S_r 과 S_u 는 각각 소음원과 수음점이 위치한 지면을 잇는 기준 면(reference plane)과 실제 지형으로 둘러싸이는 기준면 하부 면적과 상부 면적을 나타낸다.

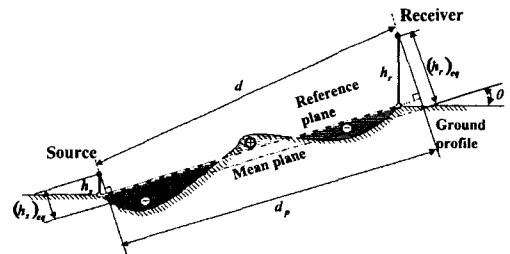


Fig. 3 Evaluation of mean ground profile

2.4 구조물에 의한 차음효과 (A_{bar})

ISO 9613 방법에서는 면밀도가 10 kg/m^2 이상이

고, 구조물 내부 영역에 균열 등이 없으며 소음원과 수음점을 잇는 직선에 수직한 면에 투영되는 구조물의 길이가 음파의 파장보다 큰 구조물은 회절 효과를 유발한다고 간주한다. 회절 경로는 구조물의 높이 및 측면 방향에 대해 모두 고려하며, 차음효과는 단일 회절의 경우 20dB, 이중 회절의 경우에는 25dB로 제한한다.

본 연구에서는 고속도로 소음예측에 있어서 도로변에 위치한 방음벽은 물론 절토부·성토부 등에서와 같이 소리의 직접 전달경로를 차단하는 지형이 위치할 경우 소음원과 수음점을 잇는 직선상의 지형 높이를 고려하여 지형 높이방향 회절효과를 고려하였다.

한편, 소음원과 수음점 사이의 다수의 차음구조물로 인해 3번 이상의 다중 회절효과가 있는 경우에 대해서는 이들 중 가장 차음 효과가 큰 두개의 회절 기준점을 선정하여 이중 회절로 평가하도록 규정하고 있다. 그러나, ISO 9613방법에는 가장 효과가 큰 차음구조물의 선정 기준을 제시하고 있지는 않다. 이에 본 연구에서는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 소음원 중심, 수음점 및 회절점으로 구성되는 삼각형들 중에서 소음원 및 수음점에서의 내각의 크기가 가장 큰 차음구조물을 선택하는 방법을 적용하였다.

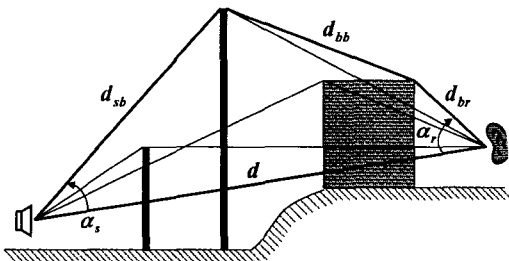


Fig. 4 Determination of the two most effective diffraction points

2.5 바람 효과

ISO 9613에서는 소음전파가 용이한 하풍조건에서 전달 감쇠를 산정하되 장기 기상 효과로 인한 A-가중치 음압레벨 변화를 기상보정계수를 도입하여 식(2.3)에서와 같이 보정한다. 그러나, 소음계측시 단기적으로 작용하는 바람 효과를 계산하는 방법에 대해서는 제시하고 있지 않다. 이에 본 연구에서는 소음계측 당시에 작용하는 단기 바람효과를 고려하기 위하여 ASJ Model-1998⁽⁷⁾에 제시된 평가 방법을 적용하였다.

본 방법은 소음원으로부터 15 m 이상 이격된 지점에서의 바람의 영향 A_{wind} 를

$$A_{wind} = \{0.88 \cdot \log_{10}(l/15)\} \cdot U \cos \theta \quad (2.7)$$

와 같이 산정한다. 여기서 U 는 풍속(m/s), θ 는 수음점에서 음원(도로)으로 내린 수직선과 풍향이 이루는 각도이고, l 은 도로중심으로부터 관측점까지의 수평거리(m)이다.

3. 고속도로 소음 예측

3.1 대상 지점

고속도로 소음예측에 전술한 옥외소음의 전달 감쇠 산정 방법을 적용할 경우의 정확도 고찰을 위하여 Table 1에 보인 바와 같이 고속도로 구조 유형을 편도 2차선 콘크리트 포장부를 기준으로 평탄부, 절토부, 성토부, 종단구배부, 교량부, 방음벽 설치부로 구분하고, 아스팔트 포장 효과를 고찰하기 위한 평탄부와 종단구배부 및 차선 효과를 평가하기 위한 편도 4차선 아스팔트 포장 평탄부 등의 총 12개 지점을 대상으로 소음계측 및 예측을 수행하였다. 이때, 방음벽 설치부와 절토부를 제외한 모든 계측 지점은 고속도

Table 1. Locations for highway traffic noise measurement

Position	Surface type	Lane	Type	Gradient (%)	Barrier
1	Concrete	4	flat	1.08	×
2	Concrete	4	flat	0.28	×
3	Concrete	4	retained cut	1.80	×
4	Concrete	4	elevated	0.28	×
5	Asphalt	4	bridge	1.31	×
6	Concrete	4	flat	1.40	Single
7	Concrete	4	flat	0.16	Both
8	Asphalt	8	flat	0.70	×
9	Concrete	4	flat	4.64	×
10	Concrete	4	flat	0.07	×
11	Asphalt	4	flat	0.28	×
12	Asphalt	4	flat	4.28	×

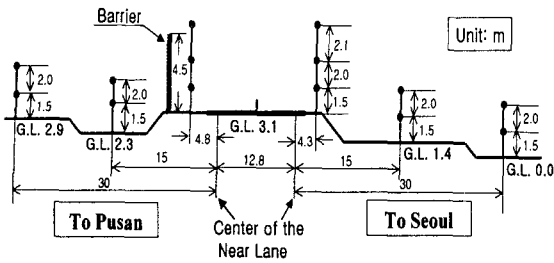


Fig. 5 Receiver positions at the highway with a noise barrier

로부터 반경 30 m 이내에 반사효과를 유발하는 지형·지물이 없는 곳에 해당한다.

상기 지점에서의 소음 계측 및 예측 결과 비교위는 Fig. 5에 일단 방음벽 설치부를 대상으로 예시한 바와 같이 노선에 인접한 주행차선의 중앙부로부터 최대 7.5 m 이내의 거리에서 지면으로부터 높이 1.5 m, 3.5 m, 5.5 m 위치와 중단구배부를 제외한 지점에서의 이격거리 15.0 m와 30.0 m에서의 지면으로부터 높이 1.5 m, 3.5 m 위치로 설정하였다.

3.2 모델링

소음 예측 대상지점의 모델링은 저자가 개발한 환경소음예측 프로그램 ENPro⁽¹¹⁾를 이용해서 수행하였다. 이때, 고속도로 소음예측에 필요한 차선·차종별 통과 대수는 10분간의 등가 소음계측 당시 도로 교통 상황을 녹화·분석한 결과를 이용하였으며, 이들의 평균주행속도는 2대의 레이저 속도계측기를 이용해서 차량 후방에서 측정한 차량별 속도 계측치를 차종별로 평균한 값을 이용하였다. 또한, 기상조건은 계측 당시의 온도, 습도 및 풍향·풍속을 1분 간격으로 계측한 값의 평균치를 이용하였다. 한편, 차량에서 방사되는 음향파위레벨 및 이의 스펙트럼은 7.5 m에서의 계측결과를 토대로 ASJ Model-1998에 제시된 경험식을 수정·보완한 결과⁽⁹⁾를 이용해서 차종·차선별로 산정하였다.

소음예측을 위한 모델링은 계측 지점에 대한 도로 구조 및 지형을 측정하여 수행하였으며, 지면 모델링은 계측 당시의 지면 상태에 따라 음향학적으로 딱딱한 지면과 부드러운 지면으로 구분하여 모델링하였다. Fig. 6에 콘크리트 포장 일단 방음벽 설치부에 대한 모델링 결과를 예시하였다.

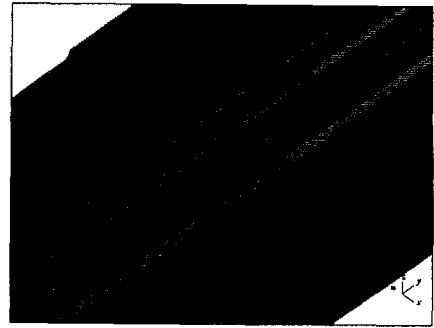


Fig. 6 Noise prediction model for a barrier-constructed highway

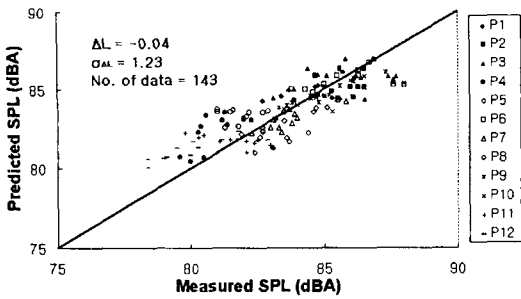
3.3 결과 및 고찰

Fig. 7에 일단 방음벽 설치부의 A-가중치 총합음압레벨에 대한 단면부 소음예측 결과를 예시하였으며, Fig. 8에는 A-가중치 총합 음압레벨에 대한 예측 및 계측 결과를 도로로부터 이격거리별로 나타내었다. 또한, Table 2에는 총합레벨은 물론 옥타브밴드별 예측치와 계측치 차이의 평균값과 이의 표준 편차를 나타내었다.

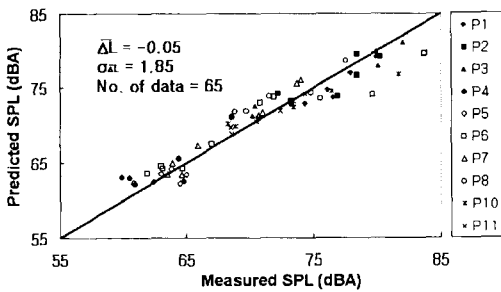
상기 결과로부터 총합 음압레벨 예측치와 계측치의 평균 차이는 0.3dB 이내이고, 표준편차는 최대 2.05dB 이내로서 예측치와 계측치의 부합성이 매우 양호함을 확인할 수 있다. 한편, 주파수 대역별 예측치와 계측치는 옥타브밴드 중심주파수 기준으로 고속도로 교통소음이 지배적인 250Hz~4kHz 대역에서는 차이값의 평균이 최대 1.2dB, 표준편차가 2.9dB 이내로서 부합성이 양호하나, 63Hz~125Hz와 8kHz 대역에서는 계측치와 예측치의 부합성이 다소 떨어진다.



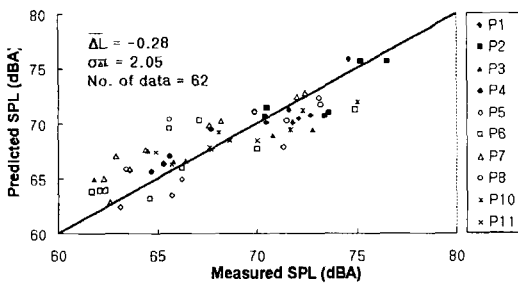
Fig. 7 Cross-sectional noise map for a barrier-constructed highway



(a) $d=7.5m$



(b) $d=15m$



(c) $d=30m$

Fig. 6 Comparison between the measured and the predicted overall A-weighted sound pressure levels for highway traffic noise (d : Distance from the center of near-side lane)

이는 전달 감쇠량 산정의 오차와 함께 해당 주파수 대역의 교통소음 음향파워가 차종 구성에 따라 변동이 심하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 이들 주파수 대역의 A-가중치 음압 레벨이 매우 작아 총합 A-가중치 음압레벨 산정에 미치는 영향은 거의 없다.

Table 2. Mean and standard deviation of the difference between the measured and the predicted octave-band sound pressure levels

Location	Statistic (dBA)	Nominal midband frequency (Hz)							Overall		
		63	125	250	500	1000	2000	4000		8000	
7.5m	Asphalt (48)	Mean	1.16	0.05	0.03	-0.44	-0.32	-0.30	-0.06	0.75	-0.31
	Standard deviation	2.04	1.41	2.09	1.54	1.28	1.52	1.43	1.62	1.37	
7.5m	Concrete (95)	Mean	0.74	0.34	0.08	-0.08	0.09	0.15	0.34	1.13	0.09
	Standard deviation	1.60	1.36	1.44	1.07	1.27	1.15	1.27	1.75	1.12	
15.0m (65)	Mean	3.44	1.98	-0.07	-0.16	-0.36	-0.19	0.47	2.88	-0.05	
	Standard deviation	2.34	1.98	2.45	2.12	2.32	1.98	3.03	5.71	1.85	
30.0m (62)	Mean	4.59	2.26	-1.12	-0.83	-0.42	0.01	0.94	2.80	-0.28	
	Standard deviation	2.46	2.25	2.60	2.28	2.55	2.65	2.87	4.41	2.05	

* Horizontal distance from the center of near side lane.

** No. of measured data

4. 결론

본 연구에서는 ISO 9613-2에 규정된 옥외전파 환경소음의 전달감쇠 산정 방법을 보완·개선한 방법을 토대로 대표적 구조 형태를 갖는 국내 고속도로부에 대한 소음예측 및 계측을 수행하고 양자간의 부합성을 비교하였다. 그 결과 제시된 방법을 적용할 경우 평탄부는 물론 성토부·절토부·방음벽 설치부 등과 같이 회절 및 반사 효과가 있는 경우에도 정밀한 고속도로 교통소음 예측이 가능함을 확인하였다. 이에 본 연구에서 적용한 소음예측 방법은 신설 또는 기존 고속도로 교통소음의 예측 및 저감 대책 수립에 유용하게 이용될 수 있다고 판단한다.

참고문헌

- (1) 한국도로공사, 1999, 고속도로 1일 통행량 현황 자료.
- (2) 정일록 등, 1989, "도로교통 소음저감을 위한 종합대책에 관한 연구(III)", 국립환경연구원.
- (3) 한국도로공사, 1994, "고속도로 소음대책에 관한 연구".
- (4) FHWA, 1977, *Users Manual: RSC Highway Noise Prediction Code: MOD-04*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-RD-77-18, Washington D.C.
- (5) HMSO, 1995, *Calculation of Road Traffic*

Noise, U.K. Department of Transport.

(6) NMPB-96, 1997, *Road Traffic Noise - New French Calculation Method Including Meteorological Effects*, CERTU.

(7) 일본음향학회 도로 교통소음 조사연구위원회, 1999, "도로교통소음의 예측모델: ASJ Model-1998", 일본음향학회지 55권 4호.

(8) ISO 9613-2, 1996, "Acoustics - Attenuation of Sound During Propagation Outdoors - Part 2: General Method of Calculation," International Standard Organization, Geneva.

(9) 오정한 등, 2001, "고속도로 교통소음의 음향과 위 평가", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집.

(10) Beranek, L.L., 1988, *Noise and Vibration Control*, McGraw-Hill Book Co.

(11) Dae-Seung Cho, 2001, *ENPro 3.0 User Manual*, Createch.