

## 고속도로 교통소음의 음향파워 평가

### Acoustic Power Estimation of Highway Traffic Noise

오정한\* · 조대승\* · 장태순\*\* · 강희만\*\* · 이용은\*\*  
박형식\* · 권성용\*\*\* · 이성환\*\*\*

Jung-Han Oh, Dae-Seung Cho, Yong-Eun Lee, Tae-Soon Jang  
Hee-Man Kang, Hyeong-Sik Park, Sung-Hwan Lee, Sung-Yong Gweon

#### ABSTRACT

Precise highway traffic noise simulation and reduction require the accurate data for sound power levels emitted by vehicles, varied to road surface, traffic speed, vehicle types and makers, different from countries to countries. In this study, we have elaboratively measured domestic highway traffic noise and parameters affecting noise levels at the nearside carriageway edge. From numerical simulation using the measured results for highway traffic noise, we propose not only two correction factors to enhance the accuracy of highway traffic sound power estimation using ASJ Model-1998 but also its typical power spectrum according to road surface type. The measured and predicted highway traffic noise levels using the proposed sound power shows little difference within 1 dB.

#### 1. 서론

국내 경제의 지속적인 성장과 더불어 이를 뒷받침하기 위한 사회간접시설 확충의 일환으로 고속도로가 확장되면서 고속도로 이용차량의 증가<sup>(1)</sup>와 함께 차량의 대형화와 고속화로 인해 고속도로 교통 소음레벨이 높아지고 있다. 또한, 소득증진과 생활수준 향상에 따른 정온한 생활 환경에 대한 국민의 요구가 날로 증대하고 있는 상황에서 수도권을 중심으로 고속도로 인근에 대규모 공동주택 단지가 건설되고 있어 고속도로 소음의 효율적 저감대책 수립에 활용할 수 있는 소음예측 방법의 정립이 필요하다.

일반적으로 교통 소음예측은 도로를 주행하는 차량으로부터 발생하는 음향파워를 평가하고 수음영역까지 전파되는 동안의 전달감쇠를 계산하여 수행한다. 이와 같은 소음예측에 활용할 수 있는 기존 연구로서는 국내의 경우 국립환경연구원<sup>(2)</sup>과 한국도로공사<sup>(3)</sup>의 소음예측모델 등이 있으며, 외국의 경우 미국 연방고속도로국의 FHWA방법<sup>(4)</sup>, 영국 수송국의 CRTN 방법<sup>(5)</sup>, 프랑스 도로국과 육상수송국 등이 공동으로 만든 NMPB 방법<sup>(6)</sup>, 일본음향학회의 ASJ 방법<sup>(7)</sup> 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 않아 국내 고속도로 교통 소음의 정밀한 소음예측 및 저감대책 수립에 적용하기 곤란한 실정이다.

한편, 도로 교통소음예측에 필요한 차량의 음향발생특성을 평가하기 위해서는 차량 종류는 물론 각각의 차량에 대한 주행 속도별 음향특성치 측정이 요구

\* 부산대학교 조선해양공학과  
E-mail : ojh93@lycos.co.kr  
Tel : (051) 510-2752, Fax : (051) 512-8836

\*\* 한국도로연구소 환경연구소

\*\*\* 한양대학교 기계공학과

된다. 그러나 이는 다양한 차종과 도로 구조를 반영한 방대한 시험이 요구된다.

이에 본 연구에서는 국내 고속도로 교통소음의 예측 정확도 향상을 위하여 반사물이 없는 평탄, 성토 및 종단구배 구조를 갖는 콘크리트 또는 아스팔트 포장된 고속도로에서 등가소음도는 물론 차선·차종별 주행대수와 평균속도 및 기상상태를 계측하고, 일본음향학회의 1998년도 교통소음 예측모델과의 비교·검토를 통해 국내 고속도로 교통소음에 대한 음향파워레벨 산정식과 음향파워스펙트럼을 제시하였다. 아울러, 제시된 음향파워 특성의 정확도 검토를 위해 소음계측 결과와 환경소음예측 프로그램 ENPro<sup>(8)</sup>를 이용한 예측 결과를 비교·검토하였다.

## 2. ASJ Model-1998의 도로 교통소음 음향 파워레벨 산정식

### 2.1 차종 분류

일본 음향학회(Acoustic Society of Japan: ASJ)에서 1998년에 발표한 ASJ Model-1998 방법은 도로 교통 소음에 대한 가장 최신의 연구 결과로서 9,443대의 차량에 대한 음향파워레벨을 실측한 결과를 토대로 Table 1에 나타낸 4차종 또는 2차종 분류법에 의거하여 차량 주행 상태에 따른 차종 및 도로 종류별 도로교통 소음의 음향파워레벨 산정식과 차량속도별 파워스펙트럼을 제시하고 있다.

Table 1 Classification of vehicle types in ASJ Model-1998

Type		Specification
Heavy vehicle	Large vehicle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heavy trucks having three or more axles and designed for the transportation of cargo. The gross vehicle weight is greater than 8 ton or the cargo capacity is greater than 5 ton.</li> <li>Large buses designed for transportation of 30 or more passengers.</li> <li>Large special purpose vehicles</li> </ul>
	Medium vehicle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medium trucks having two axles and 2000 cc or more displacement.</li> <li>Medium buses designed for transportation from 11 to 29 passengers.</li> </ul>
Light vehicle	Light trucks	<ul style="list-style-type: none"> <li>Light trucks having engine displacement from 50 cc to 2000 cc.</li> </ul>
	Auto-mobiles	<ul style="list-style-type: none"> <li>Automobiles designed for the transportation of 10 or less passengers including van</li> </ul>

### 2.2 차종별 기본 음향출력레벨

ASJ Model-1998의 차종별 고속도로 교통소음 음향파워 산정식은 Table 2에 나타내었다. 이때, 2차종 분류에 따른 음향파워 산정식은 대형차와 중형차의 혼입비율은 같고, 승용차에 대한 소형트럭의 혼입비율은 0.25로 설정되어 유도된 식이다. 제시된 식은 차량 속도  $V$ 가 40km/h~140km/h이고 교통흐름이 일정한 경우에 대해 적용할 수 있다.

Table 2 A-weighted sound power level  $L_{WA}$  emitted by a highway vehicle: ASJ Model-1998

Classification	4 vehicle types	2 vehicle types
Large vehicle	$54.4 + 30 \log_{10} V$	$53.2 + 30 \log_{10} V$
Medium vehicle	$51.5 + 30 \log_{10} V$	
Light truck	$47.6 + 30 \log_{10} V$	$46.7 + 30 \log_{10} V$
Automobile	$46.4 + 30 \log_{10} V$	

\*  $V$ : traffic speed ( km/h )

### 2.3 파워 스펙트럼

ASJ Model-1998에서는 차량소음 발생 특성 및 전달감쇠를 주파수 대역별로 계산하기 위해 차량 음향 파워레벨에 대한 상대파워스펙트럼을 차량속도에 따라 달리 제시하고 있다. 중심주파수  $f_i$ 에서의 옥타브 밴드 음향파워레벨  $L_{WA,i}$ 는 다음과 같이 산정한다.

$$L_{WA,i} = L_{WA} + \Delta L(f_i) + \Delta L_{A-weight,i} + \Delta L_{adj} \text{ dB} \quad (2.1)$$

여기서,  $\Delta L(f_i)$ 는 옥타브 밴드별 보정치(dB),  $\Delta L_{A-weight,i}$ 는 옥타브밴드별 A-가중치 보정계수이며,  $\Delta L_{adj}$ 는

$$\Delta L_{adj} = -10 \log_{10} \sum 10^{(\Delta L(f_i) + \Delta L_{A-weight,i})/10}$$

로서 스펙트럼별 음향파워 합성치를 0 dB로 하기 위한 보정 값에 해당한다.

식(1)에 포함된 옥타브 밴드별 보정치  $\Delta L(f_i)$ 은 차량 주행속도에 따라 다음과 같이 산정한다.

속도구분이 없는 경우

$$\Delta L(f_i) = -10 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{f_i}{2000} \right)^2 \right] \text{ dB} \quad (2.2)$$

80 km/h 이하

$$\Delta L_v(f_i) = \Delta L(f_i) - 2.5 \log_{10} \left[ \frac{f_i}{1000} \right] \text{ dB} \quad (2.3)$$

80 km/h 이상

$$\Delta L_v(f_i) = \Delta L(f_i) + 2.5 \log_{10} \left[ \frac{f_i}{1000} \right] \text{ dB} \quad (2.4)$$

## 2.4 도로의 등가음향출력레벨

차종별 A-가중치 시간 적분 음향출력은 다음과 같이 산정한다.

$$(L_{WA T})_i = L_{WA} + 10 \log_{10} \left( \frac{3.6 \Delta l}{V} \cdot \frac{N}{3600} \right) \text{ dB} \quad (2.5)$$

여기서,  $L_{WA}$ 는 차량 1대당 음향출력레벨(dB),  $\Delta l$ 은 도로의 길이(m),  $V$ 는 해당 차종의 평균 주행속도(km/h)이며,  $N$ 은 시간당 차량통과 대수이다. 따라서, 식(2.5)를 이용하여 모든 차종에 의한 음향파워레벨을 산정한 후 이를 대수 합하면 해당 도로의 등가음향출력레벨  $L_{WAeq}$ 을 산정할 수 있다.

## 3. 고속도로 교통소음 측정

### 3.1 측정 지점

ASJ Model-1998에서 제시된 방법을 보정하여 국내 고속도로 여건에 맞는 교통소음 음향파워 산정식을 도출하고자 경부 및 호남고속도로에서 소음계측을 수행하였다. 계측지점은 Fig. 1에 보인 바와 같이 지형 지물 등에 의한 반사효과가 없는 평탄부, 성토부 및 종단구배부를 대상으로 콘크리트 포장부 4곳, 아스팔트 포장부 3곳의 도로에서 실시하였다. 계측지점별 도로 형태는 Table 3에 나타내었다.

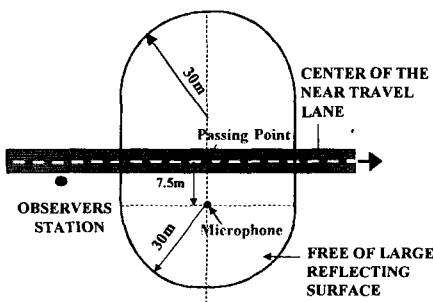


Fig. 1 Site geometry to measure highway traffic noise

Table 3 Locations for highway traffic noise measurement

No.	Location (km)	Surface type	Lanes	Gradient (%)
1	Kyungbu 221.5	Concrete	4	1.08
2	Kyungbu 334.0	Concrete	4	0.28
3	Kyungbu 233.5	Concrete	4	0.28
4	Kyungbu 78.5	Asphalt	8	0.70
5	Kyungbu 340.5	Concrete	4	4.64
6	Honam 14.5	Asphalt	4	0.28
7	Honam 13.05	Asphalt	4	4.28

### 3.2 측정 방법

고속도로 교통소음의 음향파워 평가를 위한 계측 위치는 노면에 인접한 주행차선의 중심 위치로부터 7.5m 이격된 지점을 기준으로 하되 지형지물로 인해 마이크로폰 설치에 곤란한 경우 노면으로부터 최대한 이격된 지점으로 하였으며, 마이크로폰의 설치 높이는 도로면으로부터 1.5m로 하였다.

고속도로 교통 소음 및 차종·차선별 교통량과 기상조건을 계측하기 위한 측정시스템의 구성은 Fig.2에 나타내었다. 이때, 측정시스템은 고속도로 노면에 설치하되 계측 장비 탑재 차량으로 인한 반사 효과 배제와 차량 속도 계측으로 인한 운전자의 차량 감속을 방지하기 위하여 마이크로폰 설치 지점으로부터 후방 40m~50m 지점에 설치하였다.

계측 현장에서의 소음측정은 10분간의 에너지 평균 등가소음도를 측정하되 보다 엄밀한 분석을 위하여 디지털 테이프 레코드에 실시간 신호를 저장하였다. 상기의 계측시간은 미국 연방 고속도로국에서 규정하고 있는 최대 변동폭이 10dB 이내의 비정상 변동 소음신호의 등가소음도 계측시간 5분의 2배에 해당한다<sup>(9)</sup>. 실제 고속도로에서 통상적인 차량 주행상태에서 계측한 시간영역 음압 신호를 Fig. 3에 예시하였는데 최대 변동폭이 10 dB보다 작음을 확인할 수 있다. 따라서, 신호 취득시간 10분은 고속도로 소음의 시간 평균 소음도 측정에 충분하다고 판단한다. 소음 신호 분석은 디지털 테이프에 저장된 신호를 이용해서 10분간의 A-가중치 에너지 등가소음도를 중심주파수 63Hz부터 8kHz까지의 1-옥타브 밴드별로 구하였다.

차선·차종별 교통량은 비디오 카메라로 녹화하여 분석하였으며, 이들의 주행속도는 2대의 레이저 속도 측정기를 이용해서 차량 주행 방향별로 차량 후방에서 측정하였다. 한편, 차량 교통량 및 기상 차이 등으로 인한 소음 발생량의 변동을 고려하기 위해서 모든 지점에 대해 시간대와 일자를 달리 하면서 최소 4회 이상 측정하였다. 소음측정시 차선당 차종별 평균주행 속도와 차량 통과대수는 Fig. 4에 나타내었다.

#### 4. 국내 고속도로 교통소음의 음향발생특성 평가

##### 4.1 평가 방법

차종별 음향파워레벨을 정밀하게 평가하기 위해서는 최소 100 m 이내에 다른 차량이 주행하지 않는 조건에서 개별 차량 1대가 통과할 때의 소음도를 측정해야만 한다. 그러나, 국내 고속도로에서는 주간

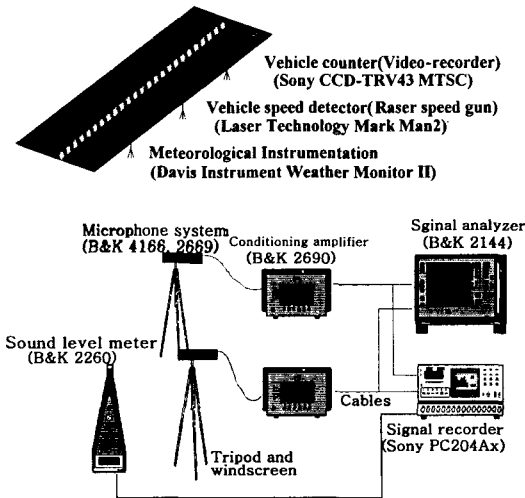


Fig. 2 Experimental setup to measure highway traffic noise, flow, and meteorological condition

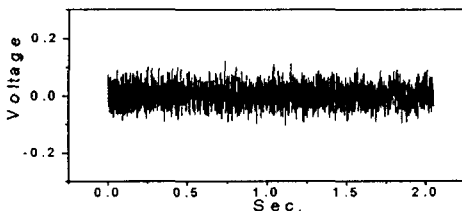
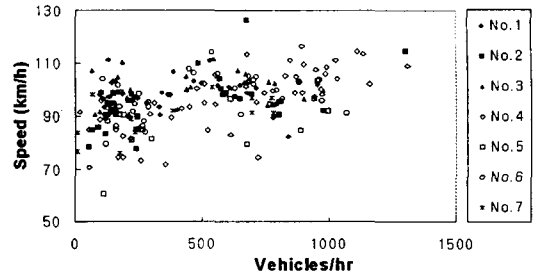
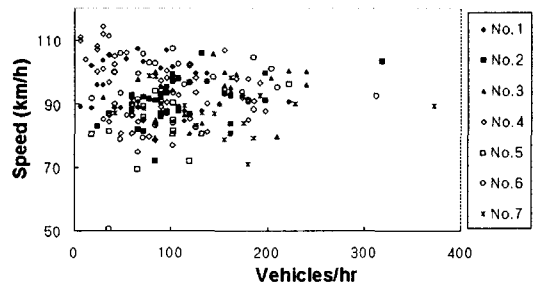


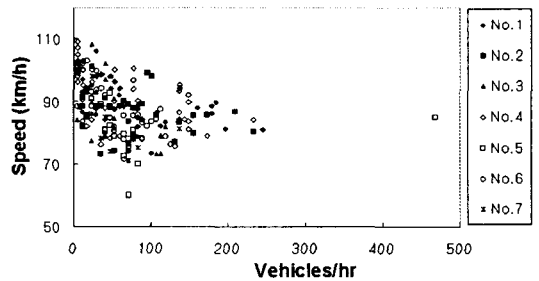
Fig. 3 Typical time signal of highway traffic noise



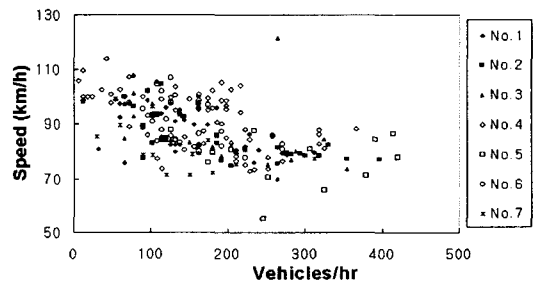
(a) Automobile



(b) Light truck



(c) Medium vehicle



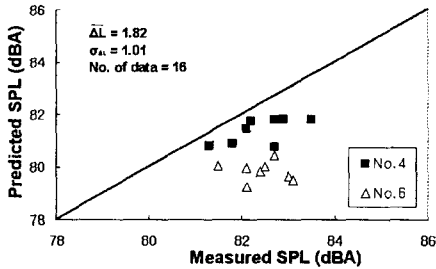
(d) Large vehicle

Fig. 4. Measured highway traffic flow and mean speed per lane and vehicle type

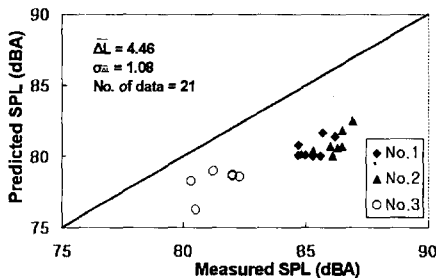
이와 같은 교통 조건을 만족하는 경우를 찾아 보기 어려웠다. 이에 본 연구에서는 ASJ Model-1998의 4차종 분류에 의한 도로교통 음향파워레벨 산정과 ISO 9613<sup>(10,11)</sup>에 의거한 전달감쇠 산정 기능을 제공하는 환경소음예측프로그램 ENPro를 이용하여 측정지점에 대해 차선·차종별 평균속도를 고려한 소음예측 결과를 예측 결과와 비교하여 국내 고속도로 교통소음 예측에 적합한 음향파워레벨 보정치를 도출하였다. 이때, 교통소음의 유효 발생위치는 ASJ Model-1998과 동일하게 각 차선의 중앙부 지면으로 간주하였다. 또한, 도로 노면으로부터 5.7 m이내의 근거리 수음점에 대한 전달감쇠 산정 결과에 포함되는 오차는 무시할 수 있다고 가정하였다.

#### 4.2 포장 종류별 음향파워레벨

Fig. 5에는 경사도가 1.1% 미만인 평탄한 지점에서의 포장유형별 등가소음도 예측 결과를 ASJ Model-1998의 음향파워레벨 산정식을 적용하여 예측한 결과와 함께 나타내었다. 이에는 예측치로부터 예



(a) Asphalt pavement



(b) Concrete pavement

Fig. 5 Measured and predicted total sound pressure levels at non-sloped highways: Prediction using

the traffic sound power level suggested by ASJ Model-1998

측치를 뺀 값의 평균치  $\overline{\Delta L}$ 와 이의 표준편차  $\sigma_{\Delta L}$ 도 함께 나타내었는데 평균 차이값은 상대적으로 크나 표준편차는 1 dB 내외로 예측치와 측정치의 상관관계가 매우 양호함을 확인할 수 있다. 따라서, 일본 도로와의 노면 상태와 차량 음향방사 특성 또는 차종별 구성비의 차이를 고려하여 ASJ Model-1998의 차종별 음향파워산정식에 아스팔트 포장도로의 경우 1.82dB를 보정하고, 콘크리트 포장도로인 경우 상기 보정치와 함께 콘크리트 포장 효과 2.64dB를 추가로 고려하면 정도 높은 국내 고속도로 교통소음의 음향 파워레벨 산정이 가능하다고 판단한다.

한편, 경사도가 4% 이상인 종단구배부에 대한 예측치와 측정치의 차이는 Table 4에 나타내었는데 예측회수가 적고 평탄부와 비교하여 포장 유형별로 상반된 경향이 나타나 신뢰성 높은 종단구배 효과 보정치를 도출하기 어려웠다.

Table 4. Road-gradient effect in dB obtained by comparison of the measured and the predicted sound pressure levels using ASJ Model-1998

Surface	Gradient	Difference			Gradient effect
		Up	Down	Mean	
Asphalt	4.28%	1.20	2.20	1.70	-0.12
Concrete	4.46%	5.50	5.45	5.48	1.02

#### 4.3 포장 종류별 음향파워스펙트럼

고속도로로부터 수음영역까지의 전달경로 상에서 발생하는 감쇠는 주파수 대역별로 달라지므로 정밀한 교통소음 예측을 위해서는 주파수대역별 음향발생특성을 파악해야 한다.

본 연구에서는 이를 위하여 평탄부 도로의 예측결과를 이용해서 A-가중치 총합음압레벨로부터 중심주파수 기준 63Hz부터 8kHz까지의 옥타브밴드별 A-가중치 음압레벨을 뺀 차이값의 평균치를 이용해서 국내 고속도로 교통소음의 파워스펙트럼을 도출하였다. 도출된 결과는 Fig. 6에 ASJ Model-1998에 제시된 파워스펙트럼과 함께 나타내었다.

상기 결과로부터 A-가중치 기준으로 국내 고속도로 교통소음은 1kHz 대역 주파수 성분이 가장 지배적임을 확인할 수 있다. 또한, ASJ Model-1998에 제

시된 속도 구분이 없는 경우의 파워스펙트럼과 비교하여 2kHz 이상의 고주파수 성분은 작으나 125Hz 성

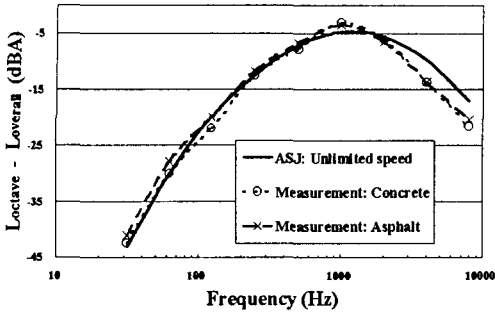
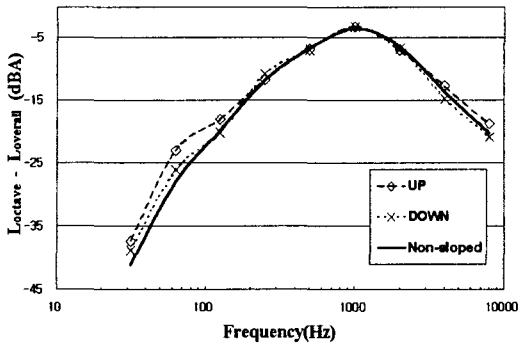


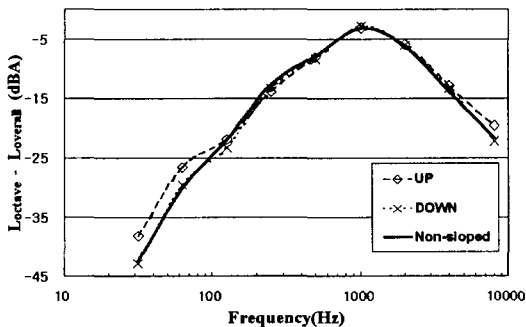
Fig. 6 Power spectrum at the non-sloped highway

분을 제외한 1kHz이하의 중저주파수 영역에서는 다소 높게 나타나 국내 차량의 엔진 및 배기관 소음성분이 상대적으로 큰 것으로 평가된다.

한편, 종단구배부의 파워스펙트럼 평가 결과는 Fig. 7에 나타내었는데 평탄부 계측결과와 비교하여 250Hz 이하의 저주파수 영역의 소음이 크게 나타나



(a) Asphalt pavement



(b) Concrete pavement

Fig. 7 Power spectrum at the sloped highway 나 소음성분이 지배적인 500Hz~2kHz 주파수 영역에서는 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다. 이에 종단구배부에서의 음향파워스펙트럼은 평탄부와 동일한 것으로 간주하였다.

#### 4.4 제시된 음향파워 산정방법의 정확도 평가

4.2절과 4.3절에 기술한 음향파워레벨 보정치와 음향파워스펙트럼을 이용해서 모든 계측지점에 대한 소음예측을 재수행한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이에 는 비교목적으로 계측치도 함께 나타내었는데 계측치와 예측치의 평균 차이가 0.07dB, 이의 표준편차가 0.97dB로서 계측치와 예측치의 부합성이 매우 양호하여 제시된 음향파워 평가 방법이 국내 고속도로 교통소음 예측에 유용하게 이용될 수 있다고 판단한다.

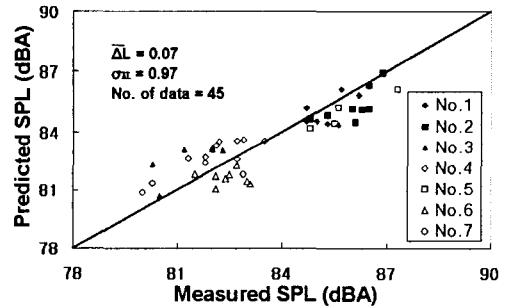


Fig. 8 Measured and predicted total sound pressure levels: Prediction using the modified traffic sound power level

### 5. 결론

본 연구에서는 국내 고속도로 소음을 계측하고, 이의 음향 발생 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 국내 고속도로 교통소음의 음향파워레벨은 일반 음향학회 제시 음향 파워 평가식과 비교하여 아스팔트 포장부의 경우 평균 1.82dB 높은 것으로 나타났다. 또한, 아스팔트 포장 기준으로 콘크리트 포장이 고속도로 교통소음 유발량에 미치는 영향은 평균 2.64dB인 것으로 확인되었다.

- (2) 국내 고속도로 교통소음은 1kHz 주파수 대역 성분이 가장 지배적이다. 또한, 일본음향학회 제시 파워스펙트럼과 비교하여 엔진 및 배기관 소음의 영향으로 인해 저주파수 성분이 상대적으로 크게 나타났다.
- (3) 본 연구에서 제시한 음향파워 특성치를 이용하여 정상주행 상태의 고속도로 노면 교통소음을 예측한 결과는 계측결과와 1dB 이내의 평균오차를 나타내었다.
- (4) 보다 정밀한 국내 도로교통소음 예측을 위해서는 국내에서 운행되고 있는 차량들에 대해 정상, 단속 및 가감속 주행 상태 등을 반영한 속도별 음향파워레벨 조사가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- (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) Dae-Seung Cho, 2001, *ENPro 3.0 User Manual*, Createch.
- (9) C.S.Y. Lee and G.G. Fleming, "Measurement of Highway-Related Noise", Report No. FHWA-PD-96-046 and DOT-VNTSC-FHWA-96-5, U.S. Department of Transportation.
- (10) ISO 9613-1, 1993, "Acoustics - Attenuation of Sound During Propagation Outdoors - Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the

Atmosphere," International Standard Organization, Geneva.

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