

도로교통소음의 예측기술 동향

김 철 환*, 장 태 순
(한국도로공사 도로교통기술원)

1. 머리말

도로교통소음의 예측방법에는 크게 모형실험에 의한 예측과 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 예측으로 나눌 수 있다. 모형실험에 의한 예측은 오래전부터 많이 사용되어 온 방법이지만, 최근 들어 컴퓨터의 성능과 해석 모델링 기법이 발달하면서 그 사용이 많이 줄어들고 있는 실정이다. 하지만 모형제작과 실험에 많은 비용과 노력이 소요됨에도 불구하고 복잡한 지형, 지물 등 컴퓨터 시뮬레이션으로 해석하기 어려운 대상의 소음예측에는 아직까지도 불가항력으로 사용되고 있다. 그림 1에 소음예측에 사용된 축소모형의 예를 나타내었다.

모형실험에 의한 소음예측을 하는 데 있어서도 음원과 모형의 제작방법이나 수음점의 설치 방법 등에 대한

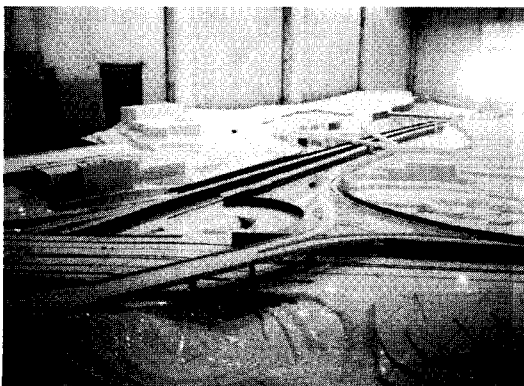


그림 1 소음예측을 위한 축소모형의 예 (일본 Kobayasi 이학 연구소)

많은 노하우와 기술이 필요하지만, 지면 관계상 이번 기사에서는 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 예측기술 동향에 대해 이야기해 보고자 한다.

도로교통소음과 같은 옥외 소음의 예측 계산에 적용할 수 있는 방법으로, 파동음향적 특성을 고려하여 경계요소법(BEM)으로 계산하거나, 기하학적인 특성에 회절 현상을 고려한 경상 음원법(mirror image source method), 음선 추적법(ray tracing method) 등으로 계산하는 방법이 있다. 경계요소법에 의한 계산방법은 음파의 위상차에 의한 간섭현상 등 훨씬 정확하고 정밀한 검토가 가능하지만 도로교통소음의 전파와 같이 넓은 영역에서는 방대한 계산량과 도로 형상과 포장 상태 및 주변 지형·지물 등의 특성을 모두 고려한 세부적인 모델링이 어렵다. 이에 비해 기하음향학적으로 계산한 결과도 통계적으로 보면 만족할만하기 때문에 우리나라를 포함한 많은 국가에서는 대부분 기하음향학에 기초한 도로교통소음 예측 방법을 사용하고 있다. 표 1에 주요 국가에서 사용하는 도로교통소음의 예측 모델을 나타내었다.

표 1 주요 국가별 도로교통소음 예측 모델

도로 교통소음 예측 모델	국 가
CRTN (calculation of road traffic noise)	영 국
RLS-90 (richtlinien für den lärm-schutz and stra ßen, 1990)	독 일
FHWA TNM (FHWA traffic noise model)	미 국
ASJ RTN-Model (acoustical society of Japan road traffic noise model)	일 본

* E-mail : c.h.kim@ex.co.kr / (031) 371-3366

2. 국가별 사용 예측모델의 개요

2.1 영국의 CRTN

영국의 수송국(department of transport)에서는 1975년에 도로교통소음의 예측 모델인 CRTN(calculation of road traffic noise)을 제안한 후 1995년에 다시 이를 개정하였다. 개정된 CRTN 모델에 반영된 주요 인자를 표 2에 각각 나타내었다. CRTN 모델의 경우 도로 및 지형·지물이 복잡한 경우에도 비교적 용이하게 적용할 수 있으나 차종 구분이 단순하고, 공기에 의한 흡음 효과, 기상 효과 등은 반영되지 않았다. 특히, 미국 FHWA의 소음 예측 모델과 같이 고속도로 방음대책 수립에 있어서 가장 중요한 요소인 회절 효과 산정에 있어서 높이 방향의 회절 효과만을 반영하고 폭 방향 회절을 고려하지 않아 방음벽 길이 설계의 최적화를 도모하기 어렵다.

2.2 독일의 RLS-90

독일의 소음 예측 모델인 RLS-90의 경우, 시간당 교통량의 중앙값과 2.8톤을 초과하는 트럭의 비율로부터 지면으로부터 높이 4 m, 25 m 떨어진 기준점에서의 기

표 2 영국 수송국의 소음 예측 방법(CRTN Model 1995)에 반영된 주요 인자

항 목	내 용
소음 평가 물리량	총합 10 % 시간을 소음레벨
차종 구분	<ul style="list-style-type: none"> • 소형차: 차체 중량 1,525 kg 이하 • 대형차: 차체 중량 1,525 kg 이상
적용속도 범위	<ul style="list-style-type: none"> • 20 ~ 130 km/h
기본 차량 소음 예측 인자	<ul style="list-style-type: none"> • 시간당 차량 통행량 • 전체 차량 평균 주행 속도 • 대형차 혼입비 • 차량 소음 발생 위치 • 도로 구배
소음 전달기구 고려 사항	<ul style="list-style-type: none"> • 거리 감쇠 • 노면 지면 감쇠 • 방음벽, 지형에 의한 단일 및 다중 회절 효과(최대 20 dB) • 방음벽, 건물, 절토부 지형 등에 의한 반사 효과 • 도로와 수음점간의 각도 • 밀집 주택에 의한 감쇠

본 소음 레벨이 다음 식에 의해 산정된다.

$$L(25m) = 37.3 + 10 \log[M(1 + 0.082P)] \quad (1)$$

이때, 차량 속도는 일반 승용차의 경우 100 km/h, 트럭의 경우 80 km/h이고, 도로면은 그루빙이 되지 않은 아스팔트 포장이며, 도로의 구배는 5% 미만일 때를 기준으로 하였다.

차량 속도, 아스팔트 종류, 구배 및 반사면 등에 대한 조정을 고려하여 음원의 레벨을 계산한다. RLS-90 모델에서 적용할 수 있는 차량 속도의 범위는 승용차의 경우 30 ~ 130 km/h이며, 트럭의 경우 30 ~ 80 km/h이다. 차량 속도 보정값인 C_s 는 다음 식에 의해 계산된다.

$$C_s = L_{car} - 37.3 + 10 \log \frac{100 + (10^{0.1 \cdot C})P}{100 + 8.23P} \quad (2)$$

여기서,

$$C = L_{트럭} - L_{승용차}$$

$$L_{트럭} = 23.1 + 2.5 \log(V_{트럭})$$

$$L_{승용차} = 27.8 + 10 \log[1 + (0.02 V_{승용차})^3]$$

도로의 구배가 5% 이상인 경우에는 0.6g - 3의 보정이 적용되며, 여기서 g는 도로 차선의 구배를 나타낸다.

또한, 반대편에 방음벽이 위치하여 방음벽 사이에 음의 다중 반사가 발생하는 경우, 다음 식과 같이 C_R 을 보정한다.

$$C_R = 4 \text{ H/L (최대 3.2 dBA): 반사형 방음벽 (3)}$$

$$C_R = 2 \text{ H/L (최대 1.6 dBA): 흡음형 방음벽 (4)}$$

여기서, H는 방음벽의 높이이며, L은 방음벽 사이의 거리를 의미한다.

교통 신호등 부근에서는 소음 레벨이 높아진다. 교통 신호등으로부터 수음점이 100, 70 또는 40 m 떨어진 경우 1, 2 또는 3 dBA 정도가 추가로 더해져야 한다.

RLS-90 모델에서는 동일한 속도에서 발생하는 소음이 브레이크와 가속 조작으로 인해 증가하는 것으로 가정한다. 전파 모델은 유한 길이 부분, 확산, 공기 흡음, 지면 감쇠, 반사면에 대한 보정을 계산한다.

2.3 미국의 TNM

미국의 연방고속도로국(FHWA)에서는 1977년에 고

표 3 FHWA-RD-77-108 에 반영된 주요 인자

항 목	내 용
소음 평가 물리량	63 Hz에서 8 kHz까지의 옥타브 밴드에서의 시간율 소음레벨 L_n 및 이의 Overall 레벨
차종 구분	<ul style="list-style-type: none"> • 승용차와 소형 화물차: 차량 중량 10,000 lb 이하 • 중형 트럭: 차량 중량 10,000 lb ~ 26,000 lb 인 화물차 • 대형 트럭: 차량 중량 26,000 lb 이상 화물차
적용 속도 범위	20 ~ 70 MPH
기본 차량 소음 예측 인자	<ul style="list-style-type: none"> • 시간당 차량 통행량 • 차종별 평균 주행 속도 • 차종별 혼입비 및 소음 발생 위치 • 도로 구배
소음 전달기구 고려 사항	<ul style="list-style-type: none"> • 거리 감쇠 • 지면, 숲에 의한 감쇠 • 방음벽, 지형에 의한 단일 회절 효과 (최대 20 dB) • 방음벽 반사 효과(최대 3dB)

속도로 소음 예측 방법인 FHWA highway traffic noise prediction model(FHWA-RD-77-108, 108 model)을 제안하였는데, 이에 반영된 주요 인자를 표 3에 나타내었다. FHWA의 모델은 차종별 소음 발생 위치를 보정할 수 있는 등 나름대로 장점이 있으나 고속도로 방음대책 수립에 있어서 가장 중요한 요소인 회절 효과 산정에 있어서 높이 방향의 회절 효과만을 반영하고 있고 폭 방향 회절 현상과 절토부 등에서 흔히 발생하는 다중 회절 현상을 반영할 수 없어 방음벽 설계의 최적화를 도모할 수 없다. 한편, 미국 연방고속도로국에서는 1998년 3월에 상기 소음 예측 방법을 개선한 방법인 'TNM (traffic noise model)' 을 마련하고 현재 이를 시험적으로 적용하고 있다. 새롭게 개선된 방법은 소음 레벨이 1/3 옥타브 밴드로 산정되며, 여러 지형 조건, 공기 흡음, 방음벽의 차음 영향 등의 음향 전달에 대한 최근 연구 결과를 반영하였고, 도로 양측에 설치되는 방음벽의 다중 회절 영향에 대해서도 분석이 가능하여 기존 방법보다 정확한 소음 예측 및 방음벽 설계가 가능한 것으로 알려져 있다.

표 4 일본음향학회 도로교통소음 예측 방법(ASJ RTN-Model 2003)에 반영된 주요 인자

항 목	내 용
소음 평가 물리량	63 Hz에서 4 kHz까지의 옥타브 밴드 또는 50 Hz에서 5 kHz 까지의 1/3 옥타브밴드에서의 등가소음레벨 L_{eq} 및 이의 Overall 레벨
차종 구분	4차종 분류 <ul style="list-style-type: none"> • 승용차: 정원 10인 이하의 차량 • 소형화물차: 배기량 50cc초과, 전장 4.7m 이하의 차량 • 중형차: 전장 4.7m를 초과하는 화물차 중 대형차를 제외한 차량 승차정원 11~29인의 중형 버스 • 대형차: 총 중량 8톤 이상 또는 최대 적재량 5톤 이상의 화물차 승차정원 30인 이상의 대형 버스 대형 특수자동차
	2차종 분류 <ul style="list-style-type: none"> • 소형차류: 상기 4차종 분류에서 승용차 + 소형화물차 • 대형차류: 상기 4차종 분류에서 중형차 + 대형차
적용 속도	<ul style="list-style-type: none"> • 자동차 전용 및 일반 도로의 일정 속도주행구간: 40 ~ 140 km/h • 일반 도로의 불규칙한 속도 주행구간: 10 ~ 60 km/h • IC 등 가감속 주행 구간 및 정지 구간: 0 ~ 80 km/h
정확도 보장 예측 범위	도로로부터 수평거리 200 m, 높이 12 m
표준 기상 조건	바람이 없고, 기온 구배가 심하지 않는 상태
대상도로	<ul style="list-style-type: none"> • 도로일반부 <ul style="list-style-type: none"> - 평탄부 - 절토부 • 도로특수부 <ul style="list-style-type: none"> - 성토부 - 고가부 - 인터체인부 - 터널 개구부 주변 - 반지하 도로 - 고가·평면도로 병설부 - 복층고가부
기타 대상조건	<ul style="list-style-type: none"> • 차량주행상태 <ul style="list-style-type: none"> - 정상주행상태 - 비정상주행상태 • 포장의 종류 <ul style="list-style-type: none"> - 밀입도 아스팔트포장 - 배수성(흡음성) 아스팔트포장

2.4 일본의 ASJ RTN-Model

일본음향학회에서는 1974년에 도로교통소음 조사연구위원회를 조직한 후 도로 교통소음 예측 방법 개발에 대한 지속적인 연구 조사를 수행하고 있다. 상기 위원회는 1975년에 소음 레벨의 중앙치를 평가량으로 하는 도로교통 소음 예측 방법(ASJ model 1975)을 발표하였으며, 1993년에는 소음 평가량을 국제적으로 일반화하고 있는 등가소음레벨(LAeq)로 하고, 일정한 단면의 일반 도로에 적용할 수 있는 교통 소음 예측방법(ASJ model 1993)을 발표하였다. 하지만 당시 도로교통소음의 평가에는 LA50이 사용되었기 때문에 이 방법에는 LAeq로부터 LA50을 추정하는 계산방법도 포함되었다.

한편, 일본에서 1997년 6월에 환경영향평가법이 법제화되고, 1999년 6월부터 시행에 들어감에 따라 관련 일본 정부기관에서 구체적인 소음계산방법에 대한 검토가 요구될 뿐만 아니라 소음환경기준 평가량이 1998년에 기존의 50% 시간을 소음레벨에서 등가소음레벨로 변경됨에 따라 일반 도로는 물론 도로 주변 지역에 대해 등가소음레벨에 근거한 도로교통소음의 평가 및 예측 방법의 적용이 요구되었다. 이에 일본 도로교통소음 조사연구위원회에서는 ASJ model 1993의 적용 범의 확대와 예측 정확도의 향상을 도모한 도로교통소음의 예측 계산 모델 ASJ model 1998을 1999년에 발표하였다. 이 예측방법에는 일반도로, 도로특수부를 포함한 거의 모든 구조와 형태의 도로를 대상으로 하였으며 교량과 고가도로 주변의 소음예측도 포함하고 있다. 그 후, 계산범위의 확대와 계산 정밀도를 보다 향상시킨 ASJ RTN-model 2003을 2004년에 발표하였다. 특히 이 모델의 명칭을 RTN-model (road traffic noise model)로 한 이유는 2001년 일본음향학회가 공식 발표한 건설공사장 소음예측 모델인 CN-model (construction model)과 구분하기 위해서이다. 표 4에 ASJ RTN-model 2003에 반영된 주요 인자를 나타내었다.

3. 국내의 도로소음 예측모델

국내에서 개발된 주요 도로소음 예측 모델은 국립환경연구원에서 발표한 예측 모델과 환경영향평가에 사용되고 있는 HW-NOISE, 한국도로공사에서 개발한 KHTN 등이 있다.

3.1 국립환경연구원 모델

국립환경연구원에서는 1989년에 고속도로, 일반도로 및 철도에 대해 교통소음 예측식을 발표하였다. 이들 예측식 중에서 고속도로 소음에 적용되는 식은 다음과 같다.

$$Leq = -7 + 10 \log Q + 22 \log V + \Delta T + \Delta W + \Delta R + \Delta \theta - \Delta D \text{ dB(A)} \quad (5)$$

여기서, Q 는 시간당 교통량(vehicles/h), V 는 평균 차속(km/h)이며, ΔT 는 대형차 혼입비, 도로구배 및 차량 속도 등에 따른 보정값으로서 평균차속 56 km/h를 기준으로 다음과 같이 산정한다.

$$V \leq 56 \text{ km/h} : \Delta T = 10 \log \{1 - F \cdot t + 9.82 F \cdot t (V/105)^{-3.2}\} \quad (6)$$

$$V > 56 \text{ km/h} : \Delta T = 10 \log \{1 - F \cdot t + 33.7 F \cdot t (V/105)^{-1.2}\} \quad (7)$$

여기서, F 는 구배계수로서 구배 2% 이하인 경우 $F=1$, 구배 2~6%인 경우 $F=1.4$, 구배 6% 이상인 경우에는 $F=2$ 의 값을 적용하며, t 는 전체 교통량에 대한 대형차 비율을 나타내는 대형차 혼입비이다. 식 (8)의 ΔW 는 노폭 보정값으로서 다음과 같이 산정한다.

$$O/R < 0.6 : \Delta W = \frac{1}{3.54} \left\{ 1.31 - 8 \left(1 + \log \frac{O}{R} \right) \right\} \quad (8)$$

$$O/R > 0.6 : \Delta W = \left(0.51 \frac{O}{R} - 0.11 \right) \times \left(\frac{I}{O} \right)^2 - \left(5.17 \frac{O}{R} - 1.37 \right)^{0.5} \quad (9)$$

여기서,

I : 중앙 분리대를 중심으로 한 안쪽 차선 중심간 거리(m)

O : 중앙 분리대를 중심으로 한 바깥 차선 중심간 거리(m)

R : 가상 주행 중심선에서 예측지점까지의 거리(m)

국립환경연구원의 소음 예측식은 비교적 도로 및 지형·지물이 간단한 경우에는 용이하게 적용할 수 있는 장점이 있으나, 차종 구분이 단순하고, 절토부, 성토부, 구조물부 등의 다양한 도로 환경 등을 정확하게 반영할 수 없을 뿐만 아니라 방음벽을 포함한 지형·지물

표 5 국립환경연구원 고속도로 소음 예측식에 반영된 주요 인자

항 목	내 용
소음 평가 물리량	총합 등가소음레벨 L_{eq}
차종 구분	<ul style="list-style-type: none"> • 소형차: 승객 및 화물 포함 차량 총중량 2.5톤 이하 • 대형차: 승객 및 화물 포함 차량 총중량 2.5톤 이상
적용 속도 범위	별도 구분없음
기본 차량 소음 예측 인자	<ul style="list-style-type: none"> • 시간당 차량 통행량 • 차량 평균 주행 속도 • 대형차 혼입비 • 차량 소음 발생 위치 • 도로 구배
소음 전달기구 고려 사항	<ul style="list-style-type: none"> • 거리 감쇠(지면 흡음 조건과 비흡음 조건으로 구분) • 노면 거리 • 도로와 수음점간의 각도 • 회절 감쇠(전파 경로차에 따라 6단계로 구분, 최대 회절효과: 22 dB)

에 의한 다중 회절 및 반사 효과와 공기 흡음 효과, 기상 효과 등이 고려되지 않았다.

3.2 HW-NOISE

국내 고속도로의 환경영향평가에 사용되는 소음 예측 프로그램인 HW-NOISE에 적용되는 식은 다음과 같다.

$$L_{eq} = PWL + 10 \log_{10} \frac{1}{2ds} + \Delta L_i + \alpha d + \alpha i \text{ dB(A)} \quad (10)$$

여기서, d 는 음원(도로단)에서 수음점(소음 예측 대상)까지의 직선 거리(m), ΔL_i 는 종단 구배의 보정값, αd 는 방음시설에 의한 회절의 보정값이다. αi 는 지표 조건 등 여러 가지 원인에 의한 보정값이다. s 는 평균 차두 간격으로 다음과 같이 산정한다.

$$s = 1000V / N \quad (11)$$

여기서, V 는 평균 차속(km/h)이며, N 은 평균 교통량(대/h)으로 주간 및 야간의 첨두 시간 교통량을 의미한다.

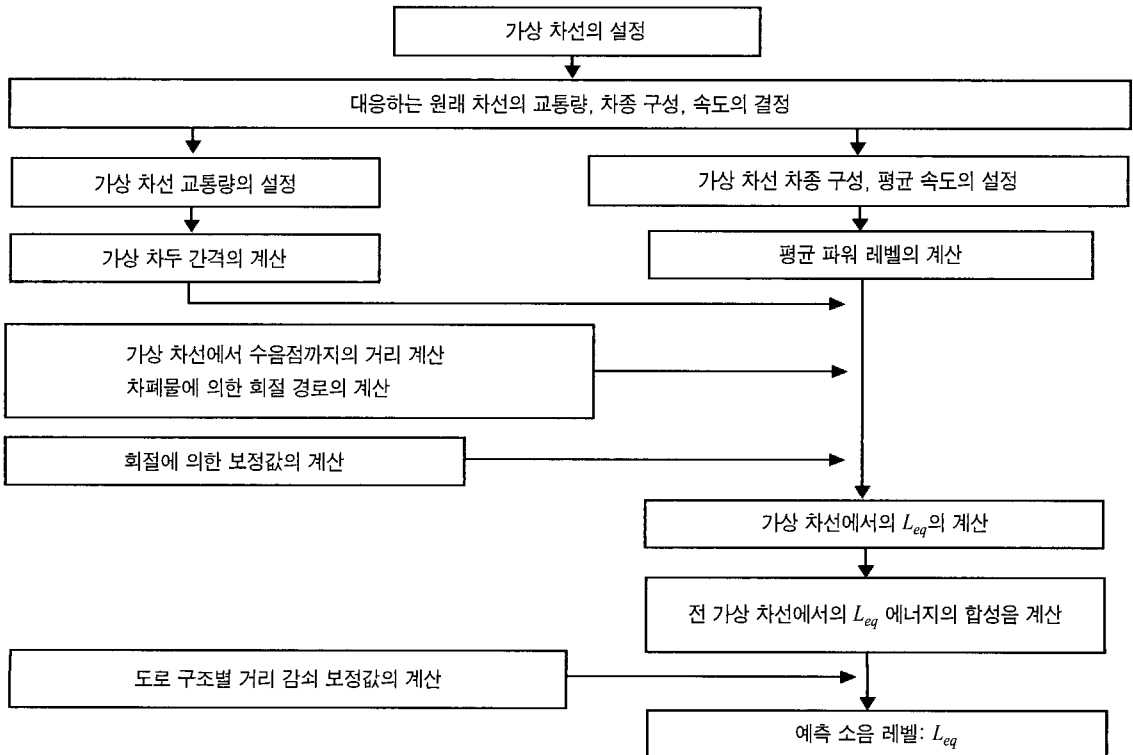


그림 2 HW-NOISE 소음 예측 계산의 흐름도

표 6 KHTN의 차종분류

항 목		내 용	참 고
대형 차류	대형차	대형화물자동차: 차량 총중량 8톤 또는 최대 적재량이 5톤 이상인 차 대형버스: 승차정원 30인 이상 대형특수 자동차	대형화물자동차에는 속도표시등의 장비가 의무 장착되며, 대부분이 3축차임
	중형차	화물자동차: 배기량이 2000 cc를 넘는 대형차 제외 중형버스: 승차정원 : 11 ~ 29명	대부분 2축차임
소형 차류	소형 화물차	화물자동차: 배기량 2000 cc 이하	벤 제외
	승용차	승용차: 승차정원 : 10인 이하	벤 포함

표 7 KHTN의 정상주행상태 차량 1대당 음향파워레벨(dB(A)) 평가식

포장종류	아스팔트		콘크리트	
	4차종 분류	2차종 분류	4차종 분류	2차종 분류
대형차	$56.22+30 \log_{10} V$	$55.02+30 \log_{10} V$	$58.86+30 \log_{10} V$	$57.66+30 \log$
중형차	$53.32+30 \log_{10} V$		$55.96+30 \log_{10} V$	
소형 화물차	$49.42+30 \log_{10} V$	$48.52+30 \log_{10} V$	$52.06+30 \log_{10} V$	$51.16+30 \log$
승용차	$48.22+30 \log_{10} V$		$50.86+30 \log_{10} V$	

* 차량 평균주행속도(km/h)

PWL은 음원(도로단)에서의 차량 운행에 따른 소음 크기로 볼 수 있으며 다음과 같이 산정한다.

$$PWL = 72.4 + 20 \log V + 10 \log(a_1 + 3.8a_2) \quad (12)$$

여기서, V 는 평균 차속(km/h)이며, a_1 및 a_2 는 각각 대형차 및 승용차의 혼입율을 의미한다. HW-NOISE에서는 소형차 및 15인승 이하 소형 버스와 중·소형 트럭(5톤 미만)은 소형차로 분류하고, 그 이외는 대형차로 적용한다. 그림 2에 HW-NOISE의 소음예측 흐름도를 나타내었다.

3.3 한국도로공사 KHTN

한국도로공사에서는 국내의 지형 및 교통특성을 고려하여 고속도로 교통소음에 대한 예측모델인 KHTN(Korea highway traffic noise)를 개발하여 도로교통기술원의 홈페이지상에서 일반에게 공개하고 있다. KHTN은

ASJ model 1998에 의한 음향파워 산정식을 국내 고속도로에서의 실측을 통해 보정하고 ISO 9613에 의한 전파 특성 계산 방법을 적용하고 있다. 표 6과 표 7에 KHTN의 차종분류 및 차량별 음향파워레벨을 나타내었다.

4. 맺음말

이상으로 주요 국가별 도로교통소음 예측모델과 국내 예측모델에 대해 개괄적으로 소개하였다. 특히, 일본의 경우에는 일본음향학회를 중심으로 조직된 도로교통소음 조사연구위원회에 의해 지속적으로 예측모델이 수정·보완되고 있어 그 발전이 두드러진다고 볼 수 있다. 국내에서도 이러한 연구가 진행되지 않은 것은 아니지만, 보다 우수한 모델의 개발을 위해서는 지금보다 조직적이고 체계적인 노력과 지원이 필요하다고 생각한다. 