

새마을 열차 환경소음 예측식 제안

Suggestion of Prediction Equation for Environmental Noise of Saemaeul Trains

조준호* · 김재철* · 고효인* · 한환수*

Jun-Ho Cho, Jae-Chul Kim, Hyo-In Koh and Hwan-Su Han

Key Words : Railway Environmental Noise(철도환경소음), 소음폭로레벨(Sound Exposure Level), 소음예측(Noise Prediction)

ABSTRACT

For the reduction and efficient management of railway noise, first of all prediction of railway noise is necessarily requisited. Many studies for prediction of railway nearby noise have been accomplished. But it is impossible to predict easily and exactly for the Korean Railway, because the acoustic powers for each rolling stock operated in Korea have not been built yet. So in this study, prediction model equation for environmental noise for Korean rolling stock Saemaeul was suggested using SEL of engine and rolling noise component separately. Finally for the validation of prediction equation, the predicted result was compared to the measured.

1. 서 론

철도교통은 그 대량수송 능력뿐만 아니라 정시성, 안전성 그리고 무엇보다도 환경친화성은 널리 알려진 사실이며, 이러한 장점으로 인해 그 기술 발전 및 수요는 더욱 가속화되리라 예상된다.

그러나 철도교통은 소음측면에서는 상당히 취약하며, 일반 도로교통과 같이 일정한 소음도 분포를 가지기 보다, 열차 통과전후에 소음도 차이가 매우 큰 특성을 나타낸다.

이러한 철도 소음에 대하여 기하급수적으로 늘어나는 민원 및 국민의 요구에 의해 1990년대부터 국가 및 공공복지 차원에서 관심을 가지고 관련 연구 및 기술개발이 추진되어오고 있다. 이러한 철도소음 예측기술은 프랑스, 독일, 일본 등을 중심으로 발전되어 왔다. 이러한 예측기술은 고도의 이론적 배경과 많은 측정 경험을 바탕으로 개발될 수 있으며, 최근 고속철도 시스템과 같이 철도 시스템의 판매시 필요한 설계도구로써 개발되거나, 도시 전체의 환경소음을 예측 분석하여 도시계획 및 설계를 위해서 사용되어 왔다.

철도소음 예측과 관련하여 국내에서는 국립환경과학원에서 최초로 연구를 수행하여 그 예측식을 제시한 바 있다.[1-2]

여기에서는 새마을, 무궁화, 통일호 열차 및 전기여객열차와 전철에 대하여 주로 거리와 속도의 함수로 최대소음도 및 등가소음도를 예측하는 모델을 제시한 바 있다. 그러나 이 예측 모델의 경우 철도소음을 너무 단순화하여 모델을 구성하므로 그 실용성 및 정확도 측면에서 오차를 많이 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 철도의 환경소음 예측모델을 개발하기 위해 새마을 열차를 대상으로 환경소음 예측 모델을 구성하였고, 예측 모델식을 이용한 결과와 실측 결과를 비교 평가하였다.

2. 철도소음 방사모델 및 성분분리

2.1 철도소음 방사모델

일반적으로 철도차량의 소음원에서 방사되는 소음은 코사인 음원, 쌍극자음원으로 나뉘어 질 수 있으며 이러한 소음은 음원으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 지점에서의 음압은 다음 식에 의해 각각 계산될 수 있다.[3-8]

$$p_c^2 = \frac{\rho c W_c}{4\pi r^2} \cos \theta \quad (1)$$

$$p_d^2 = \frac{\rho c W_d}{4\pi r^2} \cos^2 \theta \quad (2)$$

여기에서 W 는 각 음원에 대한 음향파워이고 p 는 각 음원에

* 한국철도기술연구원
E-mail : jhcho@krti.re.kr
Tel : (031) 460-5333, Fax : (031) 460-5279
** 한국철도기술연구원

대한 수음점에서의 음압을 나타내며, 아래첨자에 의해서 c는 코사인음원, d는 쌍극자음원으로 구분된다.

먼저 전동음은 각 차륜을 소음원의 위치로 설정하여 점음원이 나열되어 있는 형태로 모델링하였으며 동력차에 의한 소음은 엔진 및 각종 기기류의 위치를 점음원으로 모델화하여 추가하였다. 이러한 음원들의 위치관계를 그림 1과 2에 나타내었다.

그림 1에서 각 음원으로부터 수음점까지의 거리 r_i 와 θ_i 는 다음 식 (3)에 나타내었다.

$$r_i = \sqrt{(h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + x)^2} \quad (3)$$

$$\cos \theta_i = \frac{d}{\sqrt{(h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + x)^2}}$$

여기에서 h_r 은 레일담면에서 수음점까지의 높이, h_c 는 레일담면에서 음원까지의 높이, r_i 는 음원과 수음점 간의 거리, d 는 음원과 수음점간의 수직거리, L 은 첫 번째 음원과 마지막 음원까지의 거리, 즉 차량의 길이를 나타낸다. x_i 는 첫 번째 음원으로부터의 거리, x 는 첫 번째 음원과 수음점으로부터 수직인 점까지의 거리를 나타낸다.

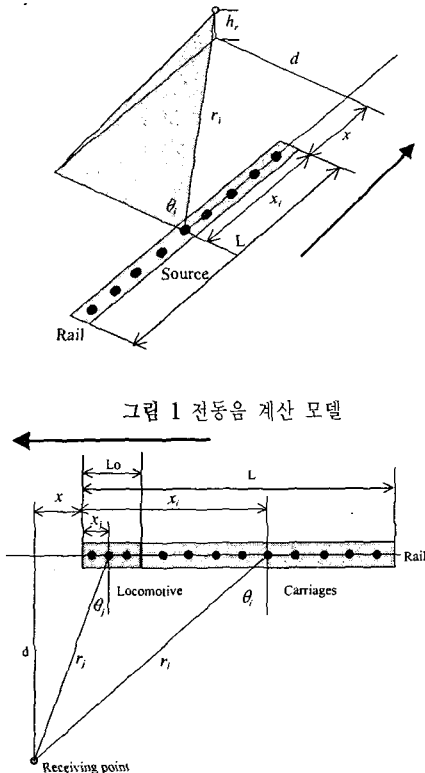


그림 2 엔진을 가진 차량소음의 계산 모델

(3)식에서 $x = vt$ 로 치환하여 식(1)과 (2)에 대입하고 $K = \rho c \frac{W}{4\pi}$ 로 치환하면, 다음과 같이 각 음원에 대한 수음점의 음압을 계산할 수 있다.

$$P_c^2 = K_c \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos \theta_i$$

$$= K_c \sum_{i=1}^m \left(\frac{d}{((h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + vt)^2)^{3/2}}\right) \quad (4)$$

$$P_d^2 = K_d \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos^2 \theta_i$$

$$= K_d \sum_{i=1}^m \left(\frac{d}{(h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + vt)^2}\right)^2 \quad (5)$$

여기에서 v 는 차량속도, m 은 전동소음원의 총 수이다. 위 식들에서 열차의 선두부 즉 첫 번째 음원이 수음점을 통과할 때 $x = 0$ 가 된다. 식의 우측에서 K 값은 음원의 파워에 해당하며 소음의 크기를 결정하고, 괄호에 해당하는 부분은 소음의 방사특성을 결정하는 지향성을 나타낸다. 동력장치인 엔진소음원도 위와 동일하게 계산식을 유도할 수 있으며, 전동음에 대한 계산식에 다음 식과 같이 동력소음을 더하면 전체소음을 계산할 수 있다.

$$P^2 = K_c \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos^2 \theta_i + K_L \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{r_j}\right)^2 \cos^2 \theta \quad (6)$$

이와같은 예측모델을 이용하면 기관에 의한 동력음(power noise) 또는 기관음(engine noise)과 열차바퀴(wheel)와 레일(rail)사이의 작용에 의한 전동음(rolling noise)을 나누는 것이 가능하며, 그 대표적인 예를 그림 3에 나타내었다.

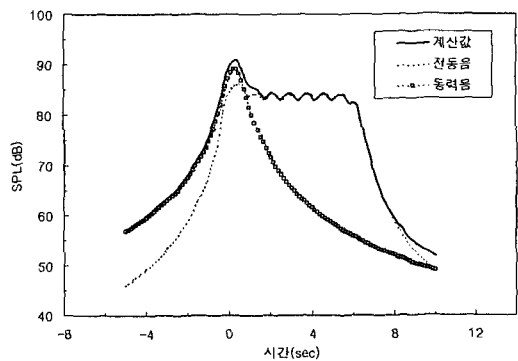


그림 3 성분 소음레벨과 합성에 의한 총 소음레벨

2.2 철도소음 기술

철도소음을 기술하는 척도는 여러 가지가 있는데 지금까지

사용한 등가음압레벨 이외에도 많이 사용하는 것이 열차가 한 번 지나가는 시간만을 고려하는 소음폭로레벨(sound exposure level, SEL)이다. SEL은 다음과 같이 정의된다.

$$SEL = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} \right) dB \quad (7)$$

여기서 $T_0 = 1s$ 이고 T 는 측정시간이다. SEL과 등가음압레벨은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$L_{eq, T} = SEL - 10 \log (T/T_0) + 10 \log n \quad (8)$$

이 식에서 n 는 시간 T 사이에 통과한 열차의 수이다.

3. 소음측정 및 성분 SEL 분석

3.1 측정개요 및 측정결과

새마을 열차의 환경소음 예측 모델을 구성하기 위해 전의~전동구간 및 대구~지천구간에서 소음측정을 수행하였다. 소음은 거리별로 평지에서 수행되었다. 측정 위치는 15m(대구~지천구간의 경우 12.5m), 25m, 50m, 100m에서 동시에 소음을 레코더에 녹음하여 실험실에서 그 소음도를 분석하였다. 그림 4에는 소음도 측정을 위한 현장 개념도를 나타낸다.

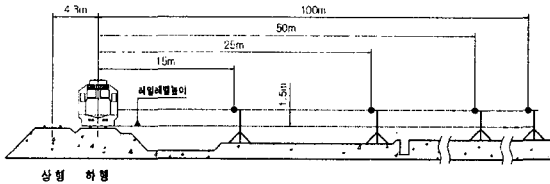


그림 4. 소음측정 현장 개념도

가. 측정 및 분석 장비

- 신호 컨디셔너(Larson Davis Model 2210)
- 2 채널 실시간 분석 시스템(Larson Davis 2900B)
- 16 채널 DAT 기록기(Sony SIR1000)
- 마이크로폰(Larson Davis LD2541)
- 마이크로폰 프리앰프(Larson Davis PRM 901)
- 표준음 발생기, Wind Screen
- Agilent VXI frontend
- LMS Coda-x

나. 데이터 분석 방법

데이터는 열차가 측정하는 마이크로폰에 접근하기 전부터

빠져나가는 충분한 시간동안 레코더에 저장하였으며, 저장된 데이터는 실험실에서 시간에 따른 소음도(Sound Pressure Level)변화를 분석하였다. 이때 측정 열차의 최고소음도(Lmax)와 열차통과하는 동안의 소음폭로레벨(Sound Exposure Level)을 분석하였다.

3.2 새마을열차소음 성분 SEL 분석

본 절에서는 앞 3.1절에서 설명한 바와 같이 측정된 소음을 방사소음모델과 소음폭로레벨(SEL)을 이용하여 성분분석하였다.

새마을 열차는 전후 디젤동력방식의 열차로 국내에서는 주로 8량 및 16량 1편성으로 운행되고 있다. 16량 1편성의 경우 총 4대의 동력차(엄밀한 의미로는 동력객차)가 편성되어 있다.

새마을 열차는 무궁화열차와 같이 동력이 집중된 방식이 아니고 분산된 방식으로 전체 소음에너지는 일정할지라도 최고소음도는 낮아서 주위 환경에 끼치는 영향은 상대적으로 적다.

측정된 새마을열차 소음을 성분소음인 전동소음과 동력소음으로 성분 분석한 결과중 대표적인 것을 그림 5에 나타내었다.

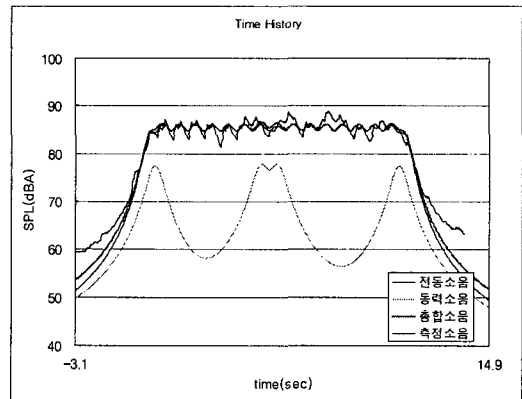


그림 5. 대표적인 성분분석 결과(대구~지천구간, 12.5m위치)

이와 같이 방사모델을 이용하여 분석된 총합소음과 측정으로부터 얻어진 소음의 상관분석을 수행하여 그림 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 좋은 상관성을 보이고 있음을 알 수 있다.

또한 성분분석을 수행한 결과를 이용하여 기준위치인 25m 위치에서 속도별 실험실을 얻었으며 그 결과를 그림 7과 그림 8에 각각 나타내었다. 다만 측정 및 분석결과 전동소음의 SEL이 당해 속도구간인 110 - 120km/h 의 범위에서 속도에 비례하지 않고 비록 작은 기울기를 가지지만 반비례하는 결과를 나타내고 있다. 그러나 실제 총합소음의 속도에 따른 영향은 양의 기울기를 가짐을 알 수 있었다.

이제 여기에 새마을 열차가 통과할 때 단위 동력소음과 단위 전동소음이 거리에 따라 감소하는 정도를 알기 위해 측정 데이터 및 성분분석 데이터를 이용하여 실험식을 구성하였다. 그림 9와 그림 10에 그 결과를 나타내었다. 이들 그림으로부터 거리가 두배로 될 때에 단위 동력소음 및 단위 전동소음의 SEL은 각각 2.84 dBA, 5.39 dBA 소음이 감소되는 것을 알 수 있다.

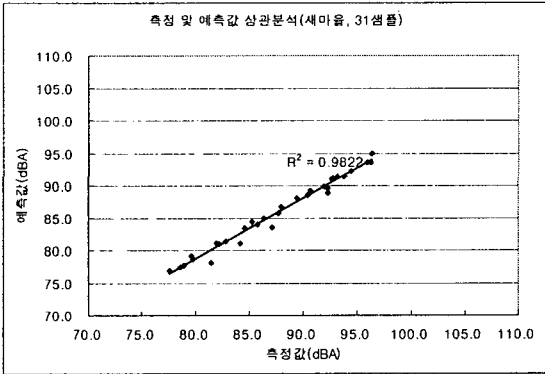


그림 6 방사소음 성분 분석값과 측정값 상관분석

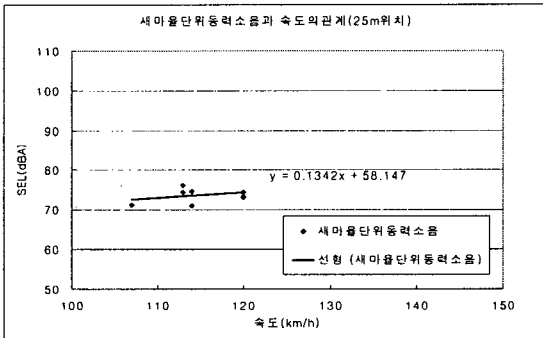


그림 7 새마을 단위 동력소음과 속도관계

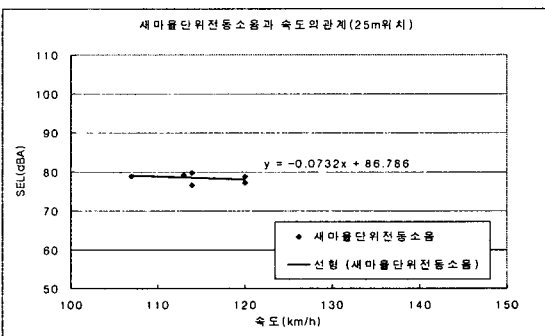


그림 8 새마을 단위 전동소음과 속도관계

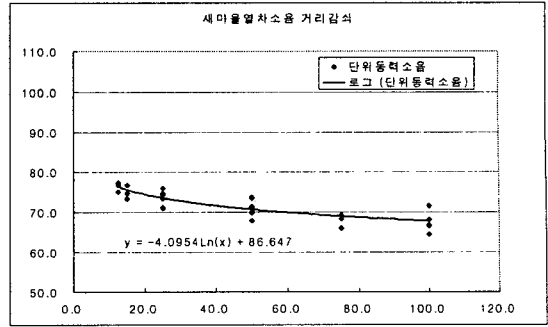


그림 9 새마을열차 단위 동력소음 SEL의 거리감쇠 특성

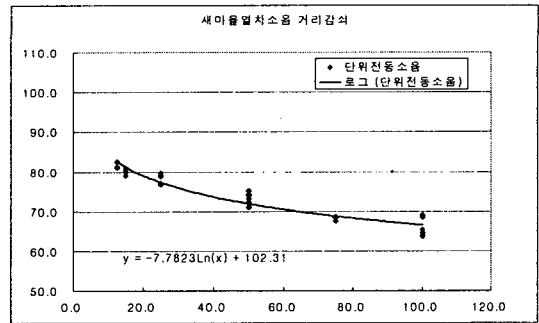


그림 10 새마을열차 단위 전동소음 SEL의 거리감쇠 특성

4. 새마을열차 환경소음 예측식 및 검증

4.1 예측식 구성

새마을 열차 소음 예측을 위한 모델 즉 예측식을 제시함에 있어서 표준 조건을 다음과 같이 구성하였다.

- 기준속도(V) : 주요 영업속도인 105-120km/h
- 기준위치 : 25m
- 대상범위(d) : 7.5 - 100m
- 선로 : 직선/수평/장대레일/발라스트베도/콘크리트 침목
- 레일 및 차륜 조건 : 레일과 차륜의 삭정 상태 양호

예측모델은 (6)식의 소음방사 모델을 활용하여 전동소음은 쌍극자특성을 가지는 점음원의 배열로 모델링하고 기관차의 엔진 등에 의한 기관소음은 점음원이 코사인방사 특성을 가지는 모델을 활용하였다. 이와같은 음원위치와 방사특성에 대해 철도소음 측정데이터를 근거로 하여 기준위치에서의 소음폭로레벨 또는 폭로소음레벨(Sound Exposure Level)을 기관소음과 전동소음으로 각각 분리하여 구성하였다.

새마을 열차 단위 동력소음($SEL_{e,d}$)과 단위 전동소음($SEL_{r,d}$)의 SEL 실험식을 이격거리 d(m)의 함수로 정리하면 다음 표와 같다.

표 1 관심위치의 단위 소음성분 SEL(위치 d[m])

구분	실험식
단위 동력소음 $SEL_{e,d}$ (dBA)	$SEL_{e,d} - 4.0954 \ln(d/25)$
단위 전동소음 $SEL_{r,d}$ (dBA)	$SEL_{r,d} - 7.7823 \ln(d/25)$

단, 여기에서 속도(속도 V km/h)에 대한 SEL_e 와 SEL_r 은 그림 7과 그림 8로부터 각각 얻는다.

다음으로 예측하고자하는 열차의 편성조건(동력차수, 총열량수)를 고려 SEL_E 와 SEL_R 을 다음 식으로부터 구한다.

$$SEL_E = SEL_{e,d} + 10 \log(n_e), \quad (9)$$

where n_e : car no of propulsion

$$SEL_R = SEL_{r,d} + 10 \log(n_r) + C_c, \quad (10)$$

where n_r : total car no.
 C_c : effect of rail connection

열차 1대 통과시의 SEL은 다음 식으로 구한다.

$$SEL = 10 \log(10^{0.1 \times SEL_E} + 10^{0.1 \times SEL_R}) \quad (11)$$

새마을 열차 n대가 T 시간(단위 s)동안 통과할 때의 이격거리(d)에서의 등가소음도 Leq 는 (8)식을 개별열차 특성을 고려할 수 있는 다음 모델식으로 주어진다.

$$L_{eq,T} = SEL_t + 10 * \log(T) \quad (12)$$

4.2 예측식 검증

본 연구에서 개발된 새마을열차 환경소음 예측식을 검증하기 위해 약간의 성토위에 철도가 조성된 평택-성환구간을 대상으로 그 타당성이 분석되었다. 그림 11에는 당해구간의 지형 및 마이크론 위치를 개략적으로 나타내었다. 당해구간은 논 지역으로서 평지의 성격을 띠고 있으며, 지표는 부드러운 흙으로 조성되어 있었다.

당해구간에서 상행선과 하행선을 통과하는 새마을 열차에 대해 각각 이격거리별로 소음을 동시에 측정하였고 최고소음도, 소음폭로레벨(SEL)을 분석하였고 편성조건, 속도 등의 정보와 함께 나타내었다.

당해구간의 경우 다른 보정조건은 거의 필요하지 않았으며,

다만 상행열차의 경우 자갈도상에 의한 초과감쇠 -2.5dB를 고려[9]하였고, 그림 11에 나타난 바와 같이 지형조건상 채널 2번 위치에서 방음벽과 같은 회절현상에 의해 소음이 많이 저감되어서 방음벽에 의한 효과를 보정하였다.[9]

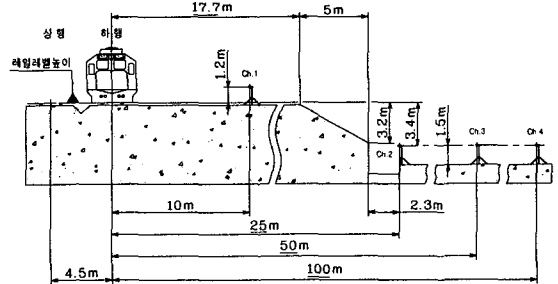


그림 11 평택-성환 구간 측정위치 단면도

이 구간에서 측정된 소음도와 예측식에 의해 계산한 소음도의 상관도를 분석하여 그림 12와 13에 나타내었다.

상관도 분석결과 상행의 경우 토구간의 끝단부위에서 일어나는 회절현상에 의한 영향으로 하행보다 큰 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

그림 14와 그림 15에는 상하선별 소음도를 거리에 따라 측정값과 예측값을 비교하여 나타내었으며, 표 2에는 측정 위치별 소음도 측정 및 예측결과의 차이를 비교하여 나타내었다.

2번 마이크론이 위치가 철도를 위한 성토의 끝단 바로 아래 부분으로 회절효과에 의한 소음 감쇠가 전형적으로 차선에서 나타나고 있음을 알 수 있으며, 대체로 3번과 4번 위치에서는 소음도에 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 즉 거리감쇠에 의한 영향은 그 영향이 방음시설이나 지형에 의한 효과에 비하면 미미함을 알 수 있다. 측정 및 예측을 위해 비교한 위치에서 대체로 2 ~ 3 dBA 이내에서 예측하고 있었으며 그 거리에 따른 소음도 변화 유형을 잘 예측하고 있는 것으로 확인할 수 있었다.

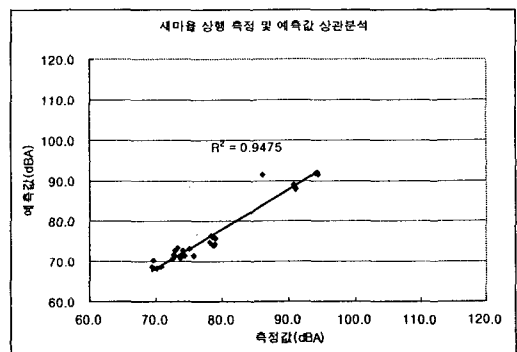


그림 12 평택-성환구간 새마을 상행열차 소음 상관도 분석

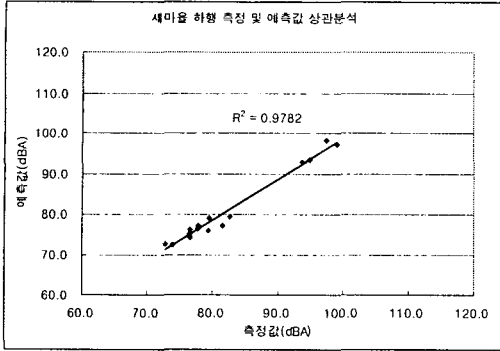


그림 13 평택-성환구간 새마을 하행 소음 상관도 분석

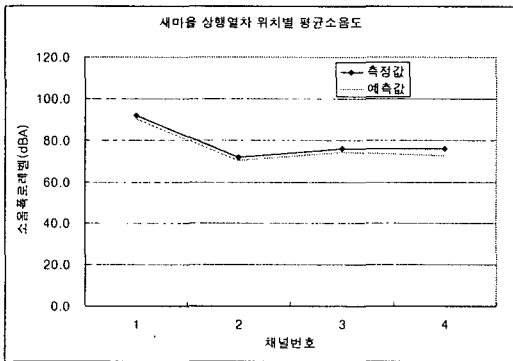


그림 14 평택-성환구간 새마을 상행선 소음도 비교

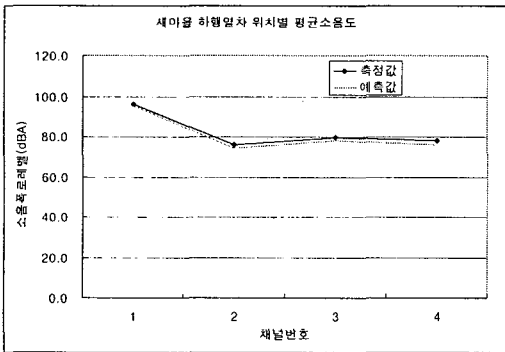


그림 15 평택-성환구간 새마을 하행선 소음도 비교

표 21 평택-성환구간 예측 및 측정 소음도 차이 비교(단위:dBA)

구분	채널 1	채널 2	채널 3	채널 4	
측정값	상행선	1.4	1.7	1.6	3.2
예측값	하행선	0.9	1.5	1.6	2.4

4. 결 론

본 연구에서는 새마을열차 환경소음 예측모델을 구성하기 위하여 새마을 열차에 대한 실제 측정 및 분석을 선로중심으로부터 이격 거리별로 수행하였다. 대상 차종인 새마을 열차의 경우 동력소음의 거리감쇠는 배거리당 2.84dBA, 전동소음의 거리감쇠는 배거리당 5.39dBA로 두배 가까이 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

철도소음 음원위치와 음원의 음향파워 및 방사특성을 측정 데이터에 기초한 기관소음 및 전동소음의 소음폭로레벨(Sound Exposure Level)로 규명하였으며, 기관차의 수, 객차의 수 그리고 이격거리, 열차 통과 회수를 고려하여 소음 예측을 할 수 있는 예측 모델식이 제안되었다.

제안된 예측 모델식의 타당성 평가를 위해 측정결과와 비교하였으며 약 3.0dBA이내의 적은 오차를 보이고 있음을 확인하였으며, 향후 기준선을 통과하는 새마을 열차에 대한 환경소음 예측을 위해 유용하게 활용할 수 있으리라 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업에 의해 수행되었으며, 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 사업장 소음의 방지대책에 관한 연구(II), 국립환경연구원, 1993
- (2) 사업장 소음의 방지대책에 관한 연구(III), 국립환경연구원, 1994
- (3) S. Peters, 1976, The predictions of railway noise profiles, Journal of Sound and Vibration 32, pp. 97~99
- (4) D. H. Cato, 1976, Predictions of environmental noise from fast electric trains, Journal of Sound and Vibration 32, pp. 483~500
- (5) E. J. Rathe, 1977, Railway noise propagation, Journal of Sound and Vibration 51, pp. 371~388
- (6) D. Hohenwarter, 1990, Railway noise propagation models, Journal of Sound and Vibration 141, pp. 17~41
- (7) 김재철, 문경호, 2003, 철도소음의 방사특성에 관한 연구, 대한기계학회논문집 A 권, 제27권, 제4호, pp 531-536
- (8) 조준호, 김재철, 최성훈, 이찬우, 한환수, 2004, 무궁화열차 환경소음 예측모델 개발에 관한 연구, 한국소음진동공학회 2004년도 춘계학술대회논문집, pp 336-371
- (9) Calculation of railway noise(Draft for public comment), The Department of Transport, UK