

스파크음원을 이용한 철도소음 전파예측에 관한 기초적 연구

A Study on the Prediction of Train Noise Propagation Using the Spark Discharge Sound Source

주진수* 김재철**
Joo, Jin-Soo Kim, Jae-Chul

ABSTRACT

This paper concerns the prediction of railway noise propagation using scale model experiment in acoustics. In order to make acoustical experiment the digital signal processing technique are applied and spark discharge sound sources have been developed in which impulse response measured in 1/20 scale model railway. In the case of scale model experiment, it is difficult to realize sufficiently small size and directivity and to get sufficient sound energy and to get repeatability. Several type of Spark discharge sound source is made in laboratory. Experiment results are compared with the calculated results by the prediction model. As the results, it was found that railway noise could be predicted in acoustical scale model experiment using spark discharge sound source.

1. 서론

오늘날 철도는 도시권에서의 통근, 통학 및 도시간의 여객수송의 수단으로서 역할이 점차 증대되고 있다. 이러한 사회적 요구에 따라 열차편수의 증가, 편성길이의 증대 그리고 속도를 증대화 시킨 고속열차가 등장하게 되어, 철도소음은 도로교통소음과 함께 심각한 사회문제가 되고 있다.

철도차량 주행시 전동음이 철도소음의 주소음원으로 알려져 있어 많은 연구가 이루어지고 있으나, 그 발생 메커니즘은 다양하고 복잡하여 원인을 규명하기는 쉽지 않다. 한편 철도차량은 복수의 음원으로 구성되어 전파성상이 매우 복잡한 유한길이의 선음원으로 볼 수 있다.

이러한 철도차량 소음문제에 대한 물리적 측면을 해석하거나 예측하는 경우에는 수학적 모델식을 만들어 보편성 있는 형태로 다루는 것이 가장 기본적인 방법이다. 그러나 철도소음의 전파현상은 매우 복잡하여 공학적인 측면에서 본다면 수학적 해석 방법이 반드시 적합하다고 할 수 없으며, 또한 소음의 전파경로 등을 고려하면 현실적으로 한계성을 갖고 있다 볼 수 있다. 즉 수학적 해석방법은 현상의 해석적 기술이 가능한 경우에 한하여 큰 위력을 발휘하는 방법으로 볼 수 있다.

현단계에서 물리적 현상의 직접적으로 파악하는 가장 뛰어난 시뮬레이션 기술은 실물을 이용하여 실험하는 대신에 각종 물리적 요소를 확대 또는 축소한 상사모형으로 실험하고, 그 결과를 본래의 현상으로 확장하는 방법을 통하여 실물현상을 파악하는 모형실험방법이 있다.

모형실험은 현상이 복잡하고 이론계산 등에 의한 추정이 곤란한 경우 또는 여러 가지 조건을 인위적으로 바꾸어서 현상의 변화를 조사하고 싶은 때에 매우 효과적인 실험 방법으로서 소음제어 분야에서도 실용적인 해석·예측 방법으로 많은 연구자로부터 주목을 받고 있다.

따라서 본 연구는 축척음향모형실험을 통하여 고속철도소음을 예측하는데 활용하기 위한 기초연구로서, 철도차량 주행소음의 주요 소음원이 되는 전동음의 전파현상을 시뮬레이션 할 수 있는, 전기적 스파크 방사를 이용한 모형 실험용 음원전극을 연구하는데 그 목적이 있다.

본 연구를 수행하기 위하여 축척모형실험 기술과 디지털 신호처리기술을 응용하였다. 또한 철도소음의 전동음에 대한 음원모델을 조사·연구하여 수학적 이론모델을 이용한 수치해석을 실시하며, 그 결과를 모형실험결과와 비교·검토하여 본 연구에서 제안한 모형 실험용 음원에 대한 타당성을 검토하였다.

* 한일장신대학교 건축학부, 비회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

2. 축척모형실험

2.1 모형실험이론

일반적으로 모형실험의 일반적인 목적은 모형에서의 현상으로 실물현상을 추정하는데 있으므로, 실물과 모형에서의 물리적 현상은 공통의 지배방정식을 만족할 필요가 있다.

음향모형실험의 경우에는 다른 분야에 비하여 상사법칙이 비교적 단순하다는 것은 이미 잘 알려진 사실로서, 음향현상에서 파동현상과 관계되는 8개의 물리량(길이, 시간, 주파수, 공기밀도, 공기의 체적탄성률, 음압, 입자속도, 음향파워)을 길이(L), 질량(M), 시간(T) 3개의 기본 물리량에 의한 다차원 메트릭스로 정리하여 실물과 모형을 첨자 r 과 m 으로 구별하고 또한 상사비로서 기하학적 축척비 $L_m/L_r = 1/n$ 을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$f_m = n \cdot f_r \quad (2.1) \quad T_m = T_r/n \quad (2.2) \quad P_m = P_r \quad (2.3)$$

$$u_m = u_r \quad (2.4) \quad P_m = P_r/n^2 \quad (2.5)$$

단, f : 주파수, ρ : 공기밀도, K : 공기의 체적 탄성률, p : 음압, u : 입자속도, P : 음향파워, c : 음속

즉, $1/n$ 축척의 모형실험에서는 식(2.1), 식(2.2)에서 알 수 있듯이 실물에 대하여 실험주파수는 n 배, 시간은 $1/n$ 배의 관계가 된다. 또한 식(2.5)의 조건을 만족하기 위해서는 모형음원 음향파워에 대해서도 실물의 $1/n^2$ 로 해야 한다. 그러나 실제로는 절대음압레벨을 문제로 삼는 경우 임의 파워를 갖는 음원으로 실험한 후 결과를 보정하면 되고, 본 연구의 모형실험에서와 같이 진파특성의 측정 등과 같이 상대레벨만 알면 되는 경우에는 그 필요성도 없다.

일반 음향모형실험에서는 점성 등의 요소가 지배적인 경우는 드물며 무시해도 좋은 경우가 많다. 이들 영향을 무시할 수 없는 경우는 상사조건을 근사적으로 성립시키는 방법을 택하든가 실험결과를 보정하여 생각해야 한다.

2.2 모형실험방법

축척 모형비는 실험의 목적, 종류에 따라서 결정되어야 하지만, 보통 축척비가 크면 클수록 상사조건을 만족하는데 기술적으로 어렵게 되며 또한 측정의 정확도가 떨어진다.

소음전파에 관한 모형실험에서는 건축 실내음향(일반적으로 1/10축척)의 경우에 비하여 모형화 하는 범위가 광범위 하므로, 축척비가 커지는 것을 빼놓을 수 없지만, 이에 따른 실험주파수도 높아지므로 음원의 주파수 특성으로부터 축척비의 한계가 결정된다. 현재의 실험기술로서는 실물주파수를 1kHz로 정하면 1/100 정도까지의 모형실험이 가능하다. 단 이와 같이 축척비가 큰 경우에는 경계조건의 상사화에는 한계가 나타난다. 또한 공기흡수에 관해서도 상사성이 성립하기 어려우므로 필요에 따라서 실험결과를 보정해야 한다.

옥외에서의 소음전파형상을 취급하는 모형실험에서는 축척비로서 1/20~1/40이 한계이며 본 연구에서는 1/20축척모형을 제작하여 실험하였다.

한편 음향모형실험에서 아주 중요한 사항은 음원 선정이며, 음원의 출력파형, 주파수 특성, 지향성, 파워, 크기 등을 고려해야만 한다. 모형실험에 사용되고 있는 음원에는 스피커, 제트노이즈, 스파크 방전, 기계적 음원 등이 있다. 일반적으로 축척비가 1/20 정도 실험에서 스피커는 신호 재현성이 좋으나 크기가 크고, 강한 주파수, 파워, 지향성 등에서 문제가 있다. 본 연구에서는 공중 방전에 의한 펄스음을 이용한 것으로 100kHz 이상까지 비교적 큰 출력이 얻어지는 점과 우수한 무지향 특성, 작은 크기, 재현성 등에서 뛰어난 스파크 음원(예를 들면 Fig.1)을 사용하였다.

모형실험 측정계통도를 Fig.2에 나타낸다. 수용용 마이크로폰은 B&K 1/4인치를 사용하였으며, 오실로 그래프로 신호를 관측, 필터를 통하여 노이즈를 제거하고 컴퓨터에 저장하여 분석하였다.

3. 수치해석

3.1 지표면에서 음의 전파

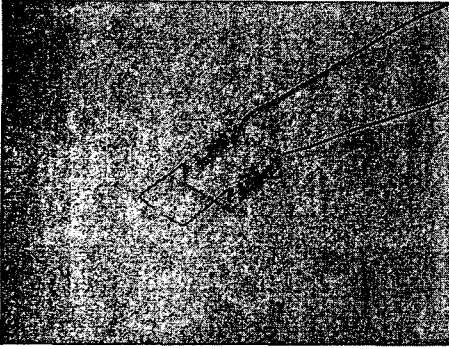


Fig.1 음원전극모형

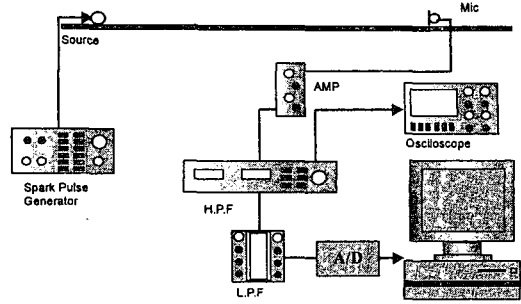


Fig.2 측정계통도

소음의 전파과정에서, 공기온도와 습도 등에 크게 영향 받는 공기의 음향흡수는 매우 미소하므로, 본 연구에서는 지표면에서의 흡음·반사에 주목하는 소음전파 예측모델을 작성하였다. 본 연구에서는, 음파가 간섭성을 갖는 경우의 지표면 위에서의 전파에 대하여, 川井 모델식을 이용하였다.

$$\phi_g = \frac{e^{ikr_1}}{r_a} + Q \frac{e^{ikr_2}}{r_b} \quad (3.1)$$

$$= \frac{e^{ikr_a}}{r_a} \left\{ 1 + Q \frac{r_a}{r_b} \cdot e^{ik(r_b-r_a)} \right\}$$

$$Q = V + (1-V) \left[\frac{2b(1 + \beta \cos \theta_1)}{(\cos \theta_1 + \beta^2)} G(\sqrt{ikr_b b}) \right] \quad (3.2)$$

여기서, r_a, r_b 는 음원 또는 허상 음원에서 측정점까지 직선거리,
 Q 는 구면파 반사계수

계산모델은 회절음장 등을 나타낼 때에 이용되는 속도 포텐셜에 의하여 표현되므로 약간 복잡하게 보인다. 그러나, 음원의 주파수특성, 지표면의 음향특성에 관하여 임의의 설정이 가능한 계산모델로, 다양한 입력조건에 대하여 응용이 가능하다.

3.2 철도소음 전파 예측모델

철도소음에 대한 음원모델로는 점음원이 연속하여 나열되어 있는 유한길이의 선음원 모델과 점음원이 일정한 간격으로 나열되어 있는 점음원열 모델을 들 수 있다. 본 연구에서는 주행열차의 음향방사 특성 검토결과를 바탕으로 전동음을 주음원으로 가정하여 동일한 크기의 파워를 갖는 점음원열 모델을 가정하였다. 음원 축은 지표면에 수평이며, 음원점 위치는 측정측 선로의 휠과 휘 사이의 중심위치에 휠축 높이로 하며, 이들 음원이 열차 길이에 걸쳐서 측정측 레일 위에 일직선으로 배열되어 있는 모델을 설정하였다.

평지에서의 소음전파 예측모델로서 지표면에 의한 초과감쇠를 고려하는 모델을 생각하여 전동음에 의한 측정점에서의 소음레벨 L_p 는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$L_p = 10 \log \left[\sum_f \left\{ 10^{\frac{L_w}{10}} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi r_i^2} \cos^n \theta_i \left| \frac{\phi_g}{\phi_f} \right|^2 \right\} \right] \quad (3.3)$$

여기서, L_w : 전동음을 가정한 점음원의 파워레벨(1옥타브 또는 1/3 옥타브 밴드),
 f : 주파수, N : 음원 개수($N=1$), n : 지향성을 나타내는 계수 ($n=0,1,2$)

ϕ_g : 식(3.1)에 의한 속도 포텐셜,

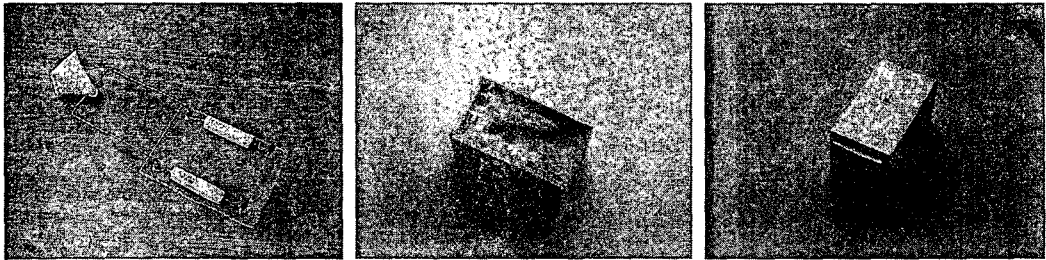
ϕ_f : 자유공간에서 점음원에서 거리 r_a 떨어진 점의 속도포텐셜($= e^{ikr_a}/r_a$).

4. 모형실험

4.1 모형실험용 음원

펄스발생기에 의하여 임펄스를 발생하는 음원 전극은 이미 설명한 바와 같이 크기가 작아야 하며, 측정대상 주파수 대역에서 높은 S/N 비가 얻어질 수 있는 높은 에너지의 음파를 발생해야 한다. 또한 발생한 음압 파형이 언제나 일정하여 그 재현성이 뛰어나야 한다.

모형실험을 위하여 무지향성 음원전극과 지향성 음원전극을 제작하였다. 전동음은 $\cos^n \theta$ 라고 하는 지향특성을 갖고 있으므로 모델화를 위해서는 무지향성 음원전극에 지향성을 부가해야 한다. 음원 전극에 지향성을 부가하기 위하여 Horn Speaker의 트위터를 가정한 모형 트위터를 제작하였으며, 검토 대상 모델은 Fig.3과 같다.



(a) Model A

(b) Model B

(c) Model C

Fig. 3 지향성 음원 모델

4.2 음원의 음향방사특성

음원의 기본형인 무지향성 점음원 전극의 거리감쇠특성 및 지향특성에 대하여 검토하였다. Fig.4는 자유공간에서의 거리감쇠특성에 대한 측정결과로서 모든 주파수 대역에서 음원으로부터 거리가 2배씩 멀어짐에 따라 점음원의 이론상 감쇠값 -6dB 의 감쇠직선에 정확하게 일치하는 결과를 나타냈다.

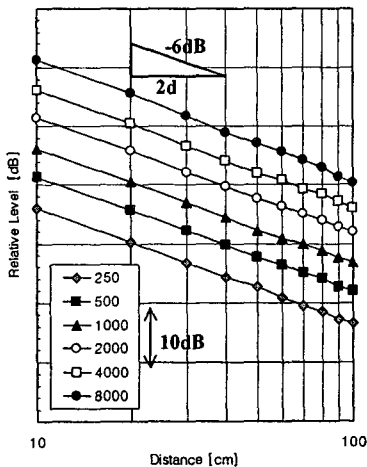


Fig. 4 거리감쇠특성(무지향성)

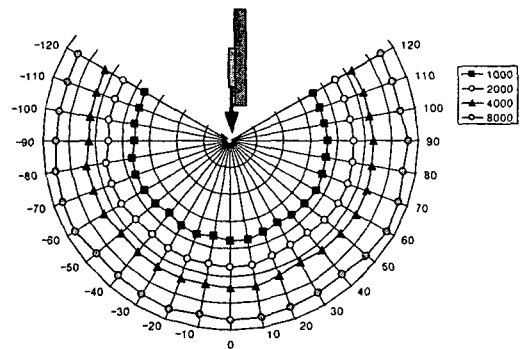


Fig. 5 수직방향 음향방사특성(무지향성)

또한 Fig.5는 음원 전극의 수직방향에 대한 음향방사특성 측정결과로서 모든 주파수 대역에서 모두 고르게 무지향성 음향방사특성을 나타냈다. 여기에는 나타내지 않았으나 수평방향 그리고 나머지 주파수 대역에서도 같은 실험결과를 나타냈다. 이상의 결과에서 모형 실험용으로 제작한 무지향성 음원 전극은 음향이론에 매우 잘 일치 하는 것을 알 수 있다.

한편 철도차량의 전동음을 가정한 음원전극 Model A, Model B 및 Model C가 갖는 음향방사특성의 실험결과를 Fig.6에 나타낸다. 음원전극의 후방부를 제외하면 3가지 모델 거의 비슷한 음향방사특성을 나타내는 결과를 보이고 있으나 Model A에 비하여 Model B와 Model C 음원전극의 지향성이 강한 결과를 나타내고 있다. 무지향성 음원전극에 비하면 좌우측면과 후면에서 최대 약 40dB까지 차이를 나타내고 있다.

4.3 음압레벨 unit pattern 비교

축척모형 실험용 음원전극과 철도차량의 모형을 이용하여 모형실험을 실시하였다. 음원은 실물환산 거리 4m 간격으로 이동하며, 각 음원점에 대하여 측정점에서의 음압을 측정하여 측정점의 음압레벨 unit pattern을 구하였다.

실험결과를 검토하기 위하여 음원전극 모델에 대한 unit pattern의 모형실험결과와 식(3.3)을 이용한 수치해석결과를 비교하여 Fig.7(무지향성 음원전극), Fig.8(지향성 음원전극 Model A)에 나타낸다. 수치 해석 결과는 비교를 위하여 무지향성 음원에 대한 계산결과와 $\cos^2 \theta$ 지향계수에 대한 계산결과를

함께 나타낸다.

Fig.7에 나타낸 무지향성 음원전극에 대한 음압레벨 unit pattern의 계산결과와 모형실험 결과에서 두 결과는 서로 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 무지향성 음원전극으로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

Fig.8에 나타낸 지향성을 부가한 음원전극의 Model A에 대한 음압레벨 unit pattern의 계산결과와 모형실험 결과에서는 모형실험결과와 지향성 계수 $\cos^2 \theta$ 로 가정한 계산결과에 가까운 unit pattern을 나타냈다. 여기서는 생략하였으나 지향성이 Model A보다 강한 Model B와 Model C에 대한 unit pattern의 계산결과는 $\cos \theta$ 로 가정한 계산결과에 가까운 unit pattern을 나타냈다.

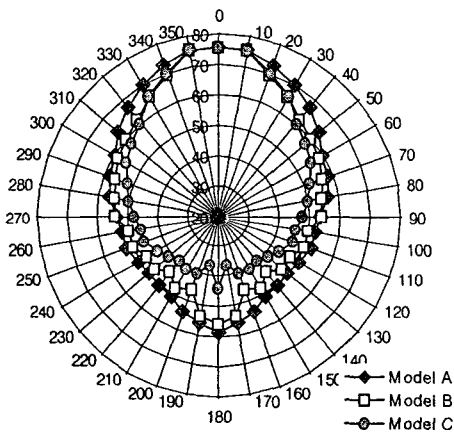


Fig.6 지향성 음원전극 음향방사특성

5. 결론

고속철도소음의 전파예측을 위하여 축척모형실험 기술과 디지털 신호처리기술을 응용하여 지향성 펄스방전 음원 전극에 대하여 연구·검토 하였으며, 수학적 해석모델을 통하여 음원 전극의 모델화 가능성을 검토하였다.

본 연구를 위하여 1/20 축척의 철도차량을 제작하였으며, 펄스방전 음원전극은 무지향성 음원전극과 전동음을 가정한 모델로서 세가지 형태의 지향성 음원전극을 제작하여 실험하였다.

음향방사특성에 관한 실험결과로서 시험 제작한 무지향성 점음원 전극의 거리감쇠특성과 지향특성이 이론상의 점음원의 음향방사특성을 정확하게 나타내는 것을 알 수 있었다. 한편 지향성을 부가한 세가지 형태의 음원전극의 실험결과는 음원축을 중심으로 좌우측면과 후면에서 20~40dB 정도 음압레벨차를 보이는 강한 지향특성을 갖는 음원으로 확인되었다.

또한 음원전극을 이용한 고속철도 전동소음의 unit pattern에 대한 실험결과를 수치해석결과와 비교한 결과 무지향성 음원전극은 무지향성 음원에 대한 수치해석결과에 매우 잘 일치하였으며, 지향성을 부가한 음원전극은 철도소음의 지향성 계수로 많이 사용되고 있는 $\cos^n \theta$ 의 이론곡선을 충분히 만족할 수 있음을 확인 하였다.

따라서 본 연구에서 활용한 축척모형실험 기술을 이용하여 고속철도소음의 전동음에 대한 예측이 가능함을 알 수 있었다. 본 연구는 단일 음원을 대상으로 하고 있지만 이 연구결과를 바탕으로 여러 개의 음원으로 구성되는 선음원열에 대한 모형실험에 확장하는 연구를 진행하고 있다. 또한 본 연구에서 지향성을 부가한 음원전극의 unit pattern에 대한 실험결과와 해석결과 사이에 약간의 차를 보이고 있으나 이는 다음 연구에서 지향성을 결정하는 horn에 대한 연구를 함께 병행하면서 검토를 해야 할 과제로 남겨두고자 한다.

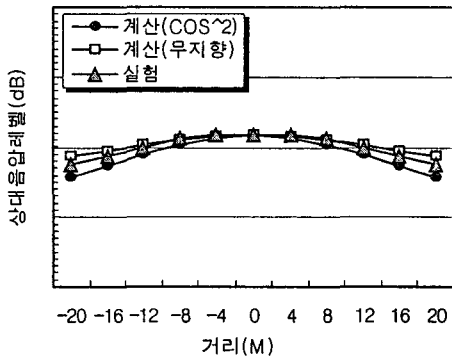


Fig. 7 무지향성 음원전극 unit pattern

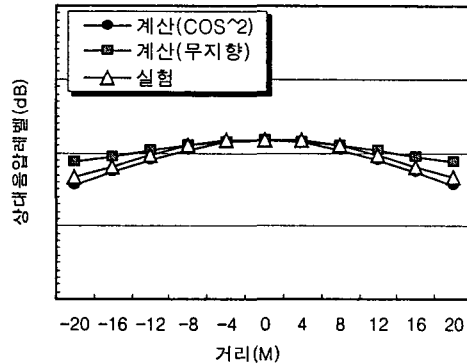


Fig. 8 지향성 음원전극(Model A) unit pattern

참고문헌

- 1) 江守一郎, D. J. シェ-リング: 「模型實驗の理論と應用」, 技報堂
- 2) 주진수, “음향 인텐시티법을 이용한 주행열차의 음향방사특성의 검토,” 한국소음진동공학회지
- 3) 주진수, 日高新人 외, “철도소음의 전파예측에 관하여,” 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, November, 1995
- 4) 日高新人, 朱鎮洙 他, “音響インテンシティによる鐵道車輛の音響放射特性の検討,” 日本音響學會騒音・振動研究會資料, 番號N-95-56 1995
- 5) 橋 秀樹, 日高新人 他, “音響インテンシティによる新幹線車輛の音響放射特性の検討,” 生産研究, Vol 49, No. 2 (1996)
- 6) M. E. Delany and E. N. Bazley, “Acoustical properties of fibrous absorbent materials”, *Appl. Acoust.* 3, 1970
- 7) H. G. Jonasson, “Sound reduction by barriers on the ground,” *Journal of Sound and Vibration*, 22, 1972
- 8) P. J. Remington, “Prediction of the effectiveness of noise control treatments on urban rail elevated structures,” *Journal of the Acoustical Society of America*, 78, 1985
- 9) 新建築學大系 10, 第5章, 音・振動
- 10) 川井孝雄, “Locally reactingな境界面上の音の傳播に關する研究.” 日本音響學會誌, 39卷, pp.374-379
- 11) Y. Hidaka, H. Yano and H. Tachibana., Scale model experiment on room acoustics by hybrid simulation technique, *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 10(2), 1989