철도차량 소음방사 특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Noise Propagation for Railway

구동회[1], 김재철[1], 박태원[2]
Dong Hoe Koo, Jai Chul Kim, Tae Won Park

Keywords : *Noise Propagation Characteristics(소음방사특성), Sound Intensity(음향 인텐시티)*
Radiation coefficient(방사계수), KTX(한국형 고속철도), EMU(전기동차)

Abstract

The more sophisticated patterns of propagation model is presented in this paper, which includes three different source characteristics (spherical, cosine and dipole). The spherical, cosine and dipole radiation characteristics compared ,and sound event level and the maximum sound level are calculated by experiment and calculation. It is shown that patterns of propagation have dipole characteristics for low speed range (below about 150Km/h) at electric multiple system. We know that push-pull high speed system has cosine characteristics of noise propagation at low speed range (below about 200Km/h).

1. 서 론

철도차량 주행 시 발생되는 소음은 차량이 고속화 되면서 점차 커다란 문제를 발생시키기 때문에 철도차량에 대한 소음의 연구는 현재까지 많은 연구가 수행되어 왔다.

이러한 소음은 차량의 특성과 속도에 따라 다르게 나타나지만 일반적으로 차륜과 레일의 접촉에 의한 전동음, 공력소음, 동력소음 등으로 분류된다. 그러나 현재 200km/h이하에서 주행중인 대부분의 철도는 전동음과 엔진 등과 같은 동력장치에 의해서 발생되는 소음이 주요한 소음원이다[1, 2].

따라서 전기동차와 같은 차량의 소음원을 모델화하는 경우 전동음의 원인이 되는 차륜을 일렬로 분포시켜 모델링하여 소음을 예측하였으며[3, 4], 소음방사는 dipole 특성을 갖고 전파되는 것을 알았다[5, 6, 7, 8]. 그러나 새마을호 혹은 한국형 고속철도와 같이 전두부 혹은 후부의 동력차에 의한 소음의 영향으로 전기동차의 방사특성과 다를 것으로 생각된다.

따라서 본 논문에서도 철도차량 주행 시 방사되는 소음원은 차륜과 레일에 의한 전동음이므로 소음원이 차량에 등분포되어 있는 모델과 점음원의 배열에 의한 모델을 수립하였으며, 이 모델을 이용하여 EMU시스템을 갖는 전기동차에 대한 방사특성을 확인하였으며, 또한 Push-Pull 시스템을 갖는 한국형 고속차량에 대한 방사특성을 규명하였다.

2. 철도차량 방사 특성 모델

일반적으로 소음원에서 방사되는 소음의 특성은 Fig. 1과 같이 3가지의 형태를 갖고 방사된다.

*1 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
*2 비회원, 아주대학교, 기계공학과 교수

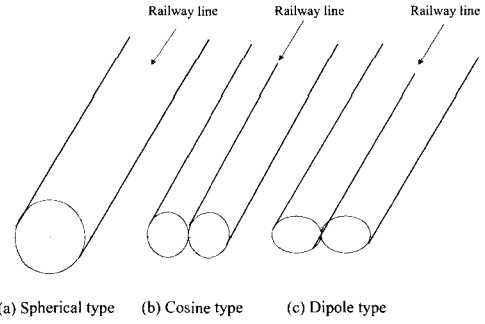


Fig. 1 The characteristics of noise propagation

2.1 철도차량의 소음방사 모델

철도차량의 소음전파 모델은 Fig. 2와 같이 길이가 X_1~X_2 인 차량에 m개의 소음원이 일정하게 분포되어 있다고 가정하여 모델링을 하였다[5].

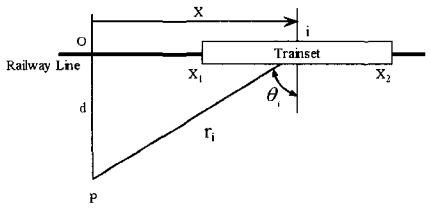


Fig. 2 The modeling for characteristics of propagation

차량의 임의의 지점 i에 대한 spherical, cosine 및 dipole 특성을 가진 소음의 인텐시티는 I_{iS} , I_{iC} , I_{iD}는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$I_{iS}=\left(\frac{\kappa^4}{r_i^2}\right)\rho C{U_o}^2\alpha^4\delta^2$$
$$I_{iC}=\left(\frac{\kappa^4}{r_i^2}\right)\rho C{U_o}^2\alpha^4\delta^2\cos\theta_i$$
$$I_{iD}=\left(\frac{\kappa^4}{r_i^2}\right)\rho C{U_o}^2\alpha^4\delta^2\cos^2\theta_i \qquad (1)$$

$$\begin{cases} P=observer\ po\,\text{int} \\ I_i=Average\,\text{int}ensity\ at\ P\ due\ to\ \sin gle\ dipole\ at\ i \\ U_O=Velocity\ amplitude\ of\ source\ vibration \\ \alpha,\delta=Parameters\ depending\ on\ source\ \dim ensions \\ \rho=densityofmedium \\ C=speed\ of\ sound \\ \kappa=2\pi/\lambda\ (\lambda\ is\ wavelength) \end{cases}$$

또한 X_1에서 X_2까지 m(단위 길이당 소음원수)개의 소음원이 존재할 때 총 인텐시티 I_S, I_C, I_D는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$I_S=\int_{X_1}^{X_2}\left(\frac{\kappa^4}{r^2}\right)\rho C{U_o}^2\alpha^4\delta^2 m\,dx$$
$$I_C=\int_{X_1}^{X_2}\left(\frac{\kappa^4}{r^2}\right)\rho C{U_o}^2\alpha^4\delta^2\cos\theta\, m\,dx$$
$$I_D=\int_{X_1}^{X_2}\left(\frac{\kappa^4}{r^2}\right)\rho C{U_o}^2\alpha^4\delta^2\cos^2\theta\, m\,dx \qquad (2)$$

위의 식 (2)에서 $K=(1/2)\,\kappa^4\rho C{U_0}^2\alpha^4\delta^2 m$이라 하고, 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

(a) Spherical 모델

$$I_S=\int_{X_1}^{X_2}\left(\frac{2K}{r_i^2}\right)dx=\frac{2K}{d}\left[\tan{-1}\frac{x}{d}\right]_{X_1}^{X_2}$$
$$=\frac{2K}{d}\left[\tan^{-1}\frac{(X_1+L)}{d}-\tan^{-1}\frac{X_1}{d}\right] \qquad (3)$$

(b) Cosine 모델

$$I_C=\int_{X_1}^{X_2}\left(\frac{2K}{r^2}\right)\cos\theta\,dx=\frac{2K}{d}\left[\frac{x}{\sqrt{x^2+d^2}}\right]_{X_1}^{X_2}$$
$$=\frac{2K}{d}\left[\frac{X_1+L}{\sqrt{(X_1+L)^2+d^2}}-\frac{X_1}{\sqrt{{X_1}^2+d^2}}\right] \qquad (4)$$

(c) Dipole 모델

$$I_D=\int_{X_1}^{X_2}\left(\frac{2K}{r^2}\right)\cos^2\theta\;dx=\frac{2K}{2d}\left[\frac{x}{d^2(x^2+d^2)}+\frac{1}{d^3}\tan^{-1}\frac{x}{d}\right]_{X_1}^{X_2}$$
$$=\frac{K}{d}\left[\frac{(X_1+L)d}{(X_1+L)^2+d^2}-\frac{X_1 d}{{X_1}^2+d^2}+\tan^{-1}\frac{(X_1+L)}{d}-\tan^{-1}\frac{X_1}{d}\right] \qquad (5)$$

위의 식에서 $L=X_2-X_1$, $d/L=a$, $x_1/L=b$과 같이 무차원 변수로 정의하고 정리하면 다음과 같이 된다.

$$I_S=\frac{2K}{aL}\left[\tan^{-1}\frac{(b+1)}{a}-\tan^{-1}\frac{b}{a}\right]$$
$$I_C=\frac{2K}{aL}\left[\frac{b+1}{\sqrt{a^2+(b+1)^2}}-\frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}}\right]$$
$$I_D=\frac{K}{aL}\left[\frac{a(b+1)}{a^2+(b+1)^2}-\frac{ab}{a^2+b^2}+\tan^{-1}\frac{(b+1)}{a}-\tan^{-1}\frac{b}{a}\right] \qquad (6)$$

식(6)에서 K는 소음의 세기에 의존하는 방사계수 directivity coefficient)를 나타낸다.

위의 2차원 등분포 모델링은 차량 전후부의 방사특성의 예측은 가능하나 근거리에서의 전동음에 대한 영향을 나타내기가 불가능하기 때문에 차륜과 레일의 접촉점을 소음원으로 가정하여 Fig. 3과 같이 3차원으로 모델링[3]하여 근거리에서 전동음에 대한 영향이 나타날 수 있도록 하였다. 그러나 동력차의 동력소음 및 공력소음은 고려되지 않았으며 지표면 효과도 고려하지 않았다.

위의 모델에서 차량길이 L(=2L1+L2)에 m개의 점음원이 존재하고 방사계수를 $K=\kappa^4\rho CU_0^2\alpha^4\delta^2$라 하면 수음점 R에 대한 인텐시티는 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
I_s &= \sum_{i=1}^{i=m}\left(\frac{\kappa^4}{r_i^2}\right)\rho CU_o^2\alpha^4\delta^2 = K_1\sum_{i=1}^{i=m}\left(\frac{1}{r_i^2}\right)\\
&= K_1\sum_{i=1}^{i=m}\left(\frac{1}{(H_R-H_C)^2+d^2+x_i^2}\right)\\
I_c &= \sum_{i=1}^{i=m}\left(\frac{\kappa^4}{r_i^2}\right)\rho CU_o^2\alpha^4\delta^2\cos\phi_i = K_1\sum_{i=1}^{i=m}\left(\frac{1}{r_i^2}\right)\cos\phi_i\\
&= K_1\sum_{i=1}^{i=m}\left(\frac{d}{((H_R-H_C)^2+d^2+x_i^2)^{3/2}}\right)\\
I_d &= \sum_{i=1}^{i=m}\left(\frac{\kappa^4}{r_i^2}\right)\rho CU_o^2\alpha^4\delta^2\cos^2\phi_i = K_1\sum_{i=1}^{i=m}\left(\frac{1}{r_i^2}\right)\cos^2\phi_i\\
&= K_1\sum_{i=1}^{i=m}\left(\frac{d}{(H_R-H_C)^2+d^2+x_i^2}\right)^2
\end{aligned}
\qquad (7)
$$

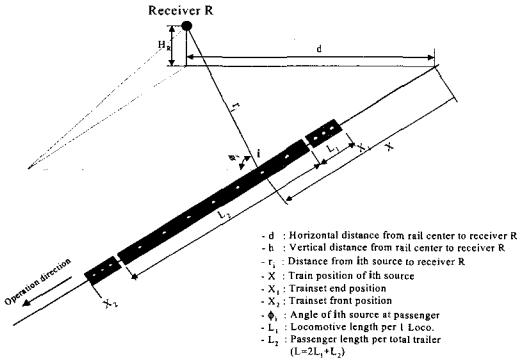


Fig. 3 The Modeling of noise propagation for railway system

2.2 방사 계수(K)의 결정

동력차와 객차로 구성된 차량의 소음전파 모델에 있어서 차륜/레일의 특성에 의존하는 방사계수 K값을 결정하기 위해서는 소음원의 파워를 알아야 한다. 그러나 소음원에 대한 파워를 직접 측정하기가 곤란하기 때문에 차량의 속도 및 거리에 따른 실험적인 결과를 통해 이를 추정하였다.

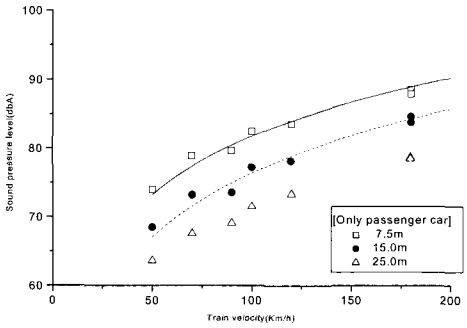


Fig. 4 The empirical formula for push-pull high speed train except propulsion system.

Fig. 4는 20량 1편성 Push-pull 시스템인 고속전철에 대하여 측정된 Leq(A)에 대한 측정 결과이다. 각각의 속도 및 거리에서의 측정된 소음레벨 Leq(A)에 대한 실험식을 구하면 식 (8)과 같다.

$$
\begin{aligned}
L_{7.5} &= 12.238\ln(V)+25.389 = 28.2\log_{10}(V)+25.389\\
L_{15} &= 13.531\ln(V)+14.192 = 31.2\log_{10}(V)+14.192\\
L_{25} &= 13.77\ln(V)+7.9867 = 31.7\log_{10}(V)+7.9867
\end{aligned}
\qquad (8)
$$

여기서 L_a는 거리 a(m)에서의 음압, V는 차량속도(Km/h)를 나타낸다.

위의 식(8)의 음압을 인텐시티로 표현하면 식 (9)와 같이 거리별로 나타낼 수 있다.

$$
\begin{aligned}
I_{7.5} &= 3.46\cdot10^{-10}V^{2.82}\\
I_{15} &= 2.63\cdot10^{-11}V^{3.12}\\
I_{25} &= 6.29\cdot10^{-12}V^{3.17}
\end{aligned}
\qquad (9)
$$

위의 식으로부터 각 위치 및 속도에 대한 인텐시티와 식 (5), (7)로부터 방사계수 K_1를 구할 수 있다.

Fig 5는 속도에 따른 K의 관계를 나타낸 것으로, K값은 속도가 증가함에 따라 V^p(p=2.5~3.0)로 증가하며 거리가 멀어짐에 따라 감소하는 형태를 나타낸다.

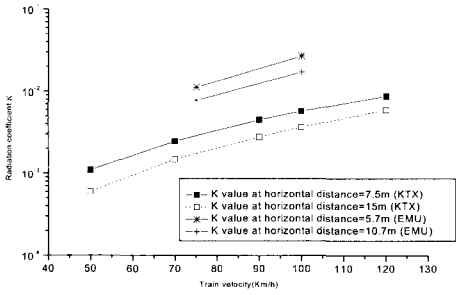


Fig. 5 The variation of radiation coefficient K

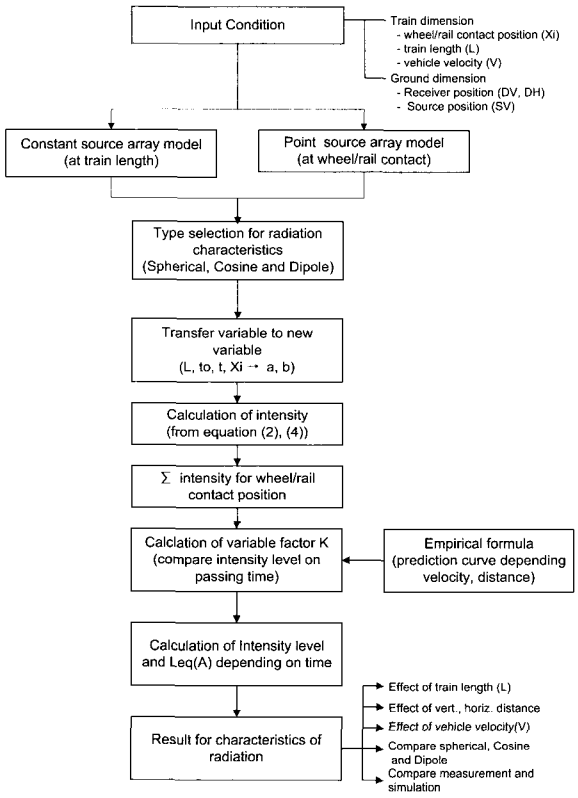
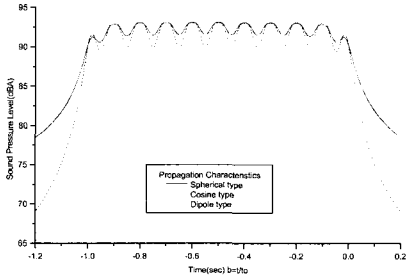


Fig. 6 The prediction flowchart for characteristics of radiation on receiver position from track center

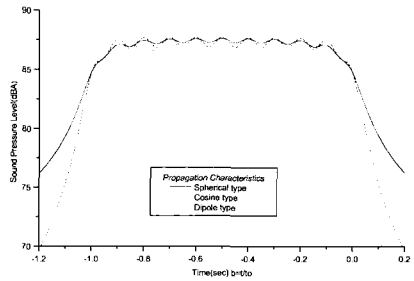
2.3 방사소음 특성 예측 순서

소음전파의 방사특성 예측은 모델링을 통해 가능하나 소음레벨을 예측하기 위해서는 방사계수 K를 알아야 가능하다. 따라서 차량의 속도 및 측정점까지의 거리에 따른 소음의 Leq(dBA) 값으로부터 각각의 속도에 대한 K값을 구하였다.

Fig. 6은 차량 및 기하학적 특성을 입력으로 해석차량의 소음방사 특성을 계산하기 위한 순서도이다. 차량 주행시 소음의 방사특성을 계산하기 위해서는 차륜/레일 접촉 지점((X_i)과 차량길이(L)의 차량제원 및 차량속도(V), 지면의 기하학적 데이터인 레일에서의 수평거리(d), 수직거리(H_R)를 식 (7)에 입력해야 한다. 방사계수 K는 식 (9)로부터 거리 및 속도에 대한 인텐시티를 계산하여 K값을 구한 후, 식 (6)과 식 (7)에 대입하여 일정거리 및 속도에 대한 방사특성을 예측할 수 있다.



(a) horizontal distance=5.7m



(b) horizontal distance=10.7m

Fig. 7 The characteristics of radiation for Spherical, Cosine and Dipole model which has point source array at axle/wheel contact point. (Train type:EMU-10, Velocity=100Km/h, Vertical distance=0.83m)

3. 결과 및 고찰

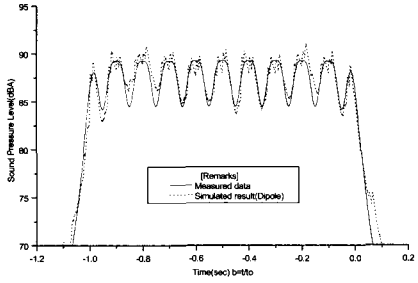
3.1 전기동차(EMU 시스템)

차량이 궤도위를 주행할 때 차량으로부터 발생되는

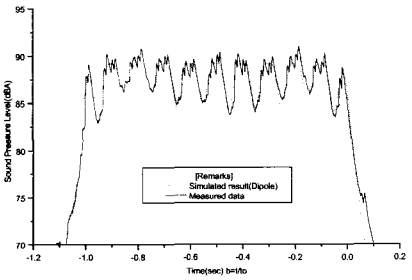
소음의 방사특성은 spherical, cosine, dipole 형태로 나타난다. 이러한 방사특성의 차이는 시간축에서 해석할 때 선두부 및 후두부에서의 소음전파의 기울기의 차이로 나타난다. Fig. 7은 EMU 차량(10 량)이 100Km/h의 속도로 통과시 3개의 방사특성을 계산한 결과이다.

Fig. 8은 EMU 차량이 75km/h의 속도로 주행시 거리에 따른 실험 및 계산 결과로써 Dipole 형태의 방사특성과 잘 일치하며, 근거리에서 차륜/레일 접촉에 의한 소음의 피크가 확연히 나타나는 것을 알 수 있다.

위의 결과로부터 본 논문의 방사특성 모델링에 대한 타당성을 검증할 수 있다.



(a) horizontal distance=5.7m



(b) horizontal distance=10.7m

Fig. 9 The result of comparison between measured data and characteristics of cosine radiation model at axle/wheel contact point. (Train type:EMU-10, Velocity=75Km/h, Vertical distance=0.83m)

3.2 KTX (Push-Pull 시스템)

Fig. 9는 KTX 시스템에 대하여 소음원을 차륜/레일 접촉점에서의 점음원으로 가정하여 3개의 방사특성별로 소음을 계산한 결과이다.

동력차와 객차의 대차 위치가 다르기 때문에 전두부와 후두부에서의 소음형태가 객차부와 다르게 나타나며, 수평거리=7.5m에서 차륜/레일 접촉에 의한 전동음이 확연히 나타나는 것을 알 수 있다.

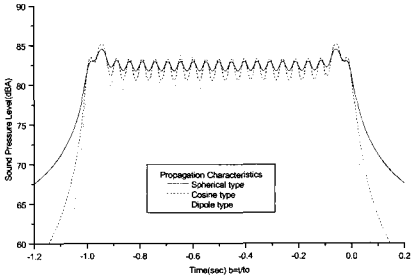


Fig. 9 The characteristics of radiation for Spherical, Cosine and Dipole model which has point source array at wheel/rail interaction (Length=400m, Vertical and horizontal distance from rail at measuring point = 1.2m / 7.5m, Train : KTX-20 , speed=100km/h)

각 방사 특성별로 차량이 측정점을 통과시 소음레벨의 최대값와 최소값의 차이는 dipole특성의 경우 4.5dB, spherical특성의 경우 2dB의 차이가 있으며 등가소음레벨은 특성별로 0.6dB의 차이를 나타낸다.

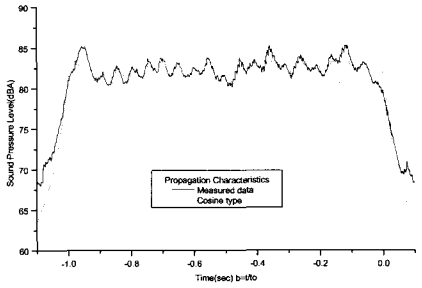


Fig. 10 The result of comparison between measured data and characteristics of cosine radiation model at axle/wheel contact point(Length=400m, Vertical and horizontal distance from rail at measuring point= 1.2m / 7.5m, Train : KTX-20 , speed=100km/h)

Fig. 10은 Fig. 9의 Cosine의 방사특성에 대한 계산결과와 실험결과를 나타내었다. KTX의 소음 방사특성은 Cosine 특성과 거의 일치하며 차륜/레일의 접촉

에 의한 충격음도 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

소음전파에 있어 영향을 미치는 인자는 차량속도, 차량길이, 소음원의 거리 및 높이 등이 있으며 이에 따라 소음의 특성 및 소음값이 다르게 나타난다.

Fig. 11는 소음원 거리에 따라 소음의 전파특성이 변화형태를 파악하기 위해서 소음원과 측정점의 거리를 7.5m, 15m, 25m로 변화시켜 계산한 결과이다..

Fig. 11의 결과로부터 수평거리가 15m가 되면 전동음의 영향에 의한 피크가 없어지게 되며, 약 15m이상에서는 등분포 소음원 모델의 해석 결과와 동일하게 된다.

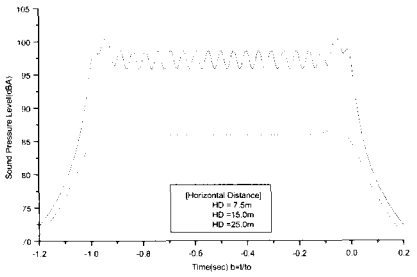


Fig. 11 The comparison for characteristics of radiation (Cosine model) which has noise pattern to horizontal distance and train length(train velocity=300Km/h, horizontal distance from rail = 7.5 ~ 25.0m, KTX-20)

4. 결 론

본 연구에서는 저속구간(약 100Km/h)의 EMU 시스템과 고속구간의 고속전철 Push-Pull 시스템에 대한 방사특성을 실험과 해석을 통해 검증하였으며, EMU 시스템은 Dipole 특성, 고속전철인 Push-Pull시스템은 Cosine 특성이 있음을 알 수 있었다.

만약 차량의 속도가 고속화(200Km/h이상)되면서 Convection 효과에 대한 모델 수립을 통해 고속시 Convection 특성을 검증할 필요가 있으며, 동력차에서 발생되는 기기소음의 모델 수립을 통하여 Push-Pull 시스템을 갖는 KTX에 대한 동력소음에 대한 모델 수립이 가능하다.

이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을수 있었다.

(1) EMU 시스템의 경우 방사패턴이 dipole 특성을 가지며, 저속(75Km/h, 100Km/h)에서 소음패턴이 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다.

(2) 속도별 실험을 통하여 방사패턴에 대한 해석 및 이론식이 가능하여 여러 인자(차량길이, 속도, 수직 및 수평거리등)에 대한 영향성을 알 수 있다.

(3) Push-Pull 시스템을 갖는 KTX의 소음방사 특성은 Cosine 특성을 나타내는 것을 확인하였으며, 300Km/h이상의 고속시 Convection 효과가 있으므로 해석모델 수립시 이를 고려할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. B. Mauclaire, "Noise generated by high speed train", Proc INTERNOISE '90, 1990.
2. S. Peters, "Prediction of rail-wheel noise from high speed trains", Acoustica Vol. 28, pp. 318-321, 1973.
3. D. Hohenwarter, "Railway noise propagation models", Journal of sound and vibration, Vol. 141, No. 3, pp. 17-41, 1990.
4. S. Peters, B. HEMWORTH and B. WOODWARD, "Noise radiation by a railway rail", Journal of sound and vibration Vol. 35, pp. 146-150, 1974.
5. D. H. Cato, "The prediction of enviromental noise from fast electric trains", Journal of sound and vibration Vol. 46, No. 4, pp. 483-500, 1976.
6. J. Lang, "A model to calculate railway noise", INTERNOISE 89, pp. 1243-1248, 1989.
7. L. G. Kurzweil, W. N. Cobb and R. P. Kending, "Propagation of noise from rail lines", Journal of sound and vibration, Vol. 66, No. 3, pp. 389-405, 1979.
8. E. J. Rathe, "Railway noise propagation", Journal of sound and vibration, Vol. 51, No. 3, pp. 371-388, 1977.
9. S. Peters, "The prediction of railway noise profiles", Journal of sound and vibration, Vol. 32, pp. 87-99, 1974.