

# 한국형 고속전철(KTX) 방사패턴에 관한 연구

## A study on patterns of propagation for high speed train(KTX)

°구 동 회\*, 김 재 철\*, 박 태 원\*\*, 문 경 호\*\*\*  
Dong. Hoe, Koo, Jae. Chul. Kim, Tae. Won, Park, Kyeong. Ho. Moon

### ABSTRACT

The more sophisticated patterns of propagation model is presented in this paper, which includes three different source characteristics. 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 has dipole characteristics for low speed range(below about 150Km/h) at electric multiple system. We know that push-pull high speed system(maximum speed : 300Km/h) has cosine characteristics of noise propagation. For this purpose, We conduct the experiment of noise and know the empirical formula of noise level and radiation coefficient K. This model of simulation is conducted through point source array model at wheel/rail contact point by using program and experimental formula. We can guess prediction of profile, flat and wear of wheel by above modeling in near field.

**Key Words** : noise profile, directivity pattern, radiation characteristics, spherical , cosine , dipole type

### 1. 서론

철도차량의 소음전파는 차량의 특성에 따라 다르게 나타나며 소음원으로는 전동음(Rolling Noise), 공력소음(Aerodynamic Noise), 동력소음(Motor Noise), 판토소음(Pantograph Noise)으로 분류된다. 이중 차량이 외부에 전파되는 소음은 전동음이 큰 비중을 차지하고 있다고 알려져 있다[1].

철도차량은 1개 편성으로서 운행되며, 기관차의 경우 전동음, 기기소음, 동력소음, 공력소음으로 구성되며 객차의 경우 전동음이 주요한 소음원이다. 본논문에서 고려되는 한국 고속전철의 경우 기관차가 양끝에서 견인하는 Push-Pull 형태의 추진 형식으로 이루어 지며 최고속도 300Km/h로 운행된다.

소음의 전파특성은 소음원의 특성에 따라 3가지 형태의 방사특성을 가지며 방사특성에 따라 spherical, cosine, dipole 형식의 방사특성[3]으로 분류된다. 현재까지는 저속영역(약 150km/h 이하)에

서 소음원의 지향특성에 대한 연구가 진행되어 dipole 특성이 있음을 규명하였다[2][3][7].

본논문에서는 고속영역에서 Push-Pull 시스템의 소음전파 특성을 규명하고, 시뮬레이션을 통한 예측을 하였다.

이를위해 속도 및 거리에 따른 실험식을 도출하여 실험에 근거한 방사특성 및 패턴 예측에 대하여 알아보았다

### 2. 방사 패턴 모델

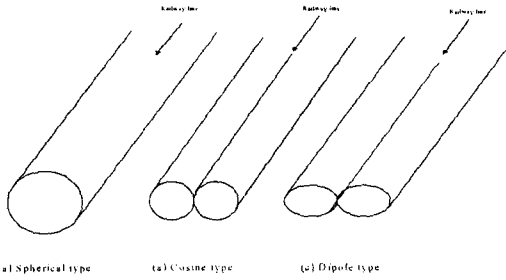
차량의 소음전파 특성을 모델링 하는데 있어 차량 길이 L에 m개의 등분포 소음원의 존재에 의한 모델링을 통하여 차량이 지날 때 수음점에서의 방사패턴(<Fig. 1>참조)에 따른 총 인텐시티는 식(1)과 같다.

길이 L인 차량이  $X_1$ 에서  $X_2$ 까지 m(단위길이당 음원 수)개의 음원이 존재할때 총 인텐시티  $I_s$ ,  $I_c$ ,  $I_d$ 라 하면

\* : 한국철도기술연구원 선임연구원

\*\* : 아주대학교 교수

\*\*\* : 한국철도기술연구원 주임연구원



<Fig 1> The directivity pattern for spherical, cosine and dipole type

$$I_S = \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\kappa^4}{r^2}\right) \rho C U_o^2 \alpha^4 \delta^2 m dx$$

$$I_C = \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\kappa^4}{r^2}\right) \rho C U_o^2 \alpha^4 \delta^2 \cos \theta m dx \quad \text{-----(1)}$$

$$I_D = \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\kappa^4}{r^2}\right) \rho C U_o^2 \alpha^4 \delta^2 \cos^2 \theta m dx$$

where

- $I_S, I_C, I_D$  : Total intensity at spherical, cosine and dipole type
- $U_o$  = Velocity amplitude of source vibration
- $\alpha, \delta$  = Parameters depending on source dimensions
- $\rho$  = density of medium
- $C$  = speed of sound
- $\kappa = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  is wavelength)

위의 식(1)에서  $K=(1/2)\kappa^4\rho CU_o^2\alpha^4\delta^2m$  이라 하고, K를 방사계수라 하고 적분하면 인텐시티는 식(2)와 같으며  $L=x_2-x_1$ ,  $d=aL$ ,  $x_1=bL$  을 대입하고 일정속도  $v$ 에 대해  $x_1=0$  일때  $t=0$ 에서  $x_1=vt$ ,  $t_0$ 는 통과시간이라 하면 차량이 관측자를 통과할때의 시간 간격으로부터  $b=v t_0$ 가 되며 차량 끝단이 관측자를 지날때는  $t=0$ (즉  $b=0$ )가 된다.

$$I_S = \frac{2K}{d} \left[ \tan^{-1} \frac{(x_1+L)}{d} - \tan^{-1} \frac{x_1}{d} \right]$$

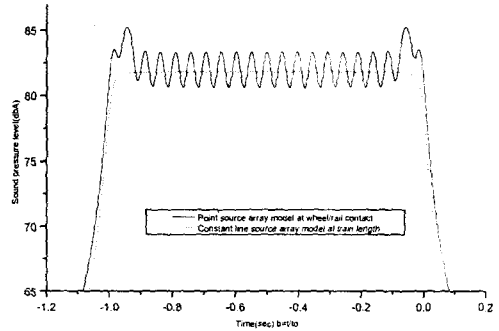
$$I_C = \frac{2K}{d} \left[ \frac{x_1+L}{\sqrt{(x_1+L)^2+d^2}} - \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2+d^2}} \right]$$

$$I_D = \frac{K}{d} \left[ \frac{(x_1+L)d}{(x_1+L)^2+d^2} - \frac{x_1d}{x_1^2+d^2} + \tan^{-1} \frac{(x_1+L)}{d} - \tan^{-1} \frac{x_1}{d} \right] \quad \text{-----(2)}$$

위의 2차원 등분포 모델링은 차량전후부의 방사

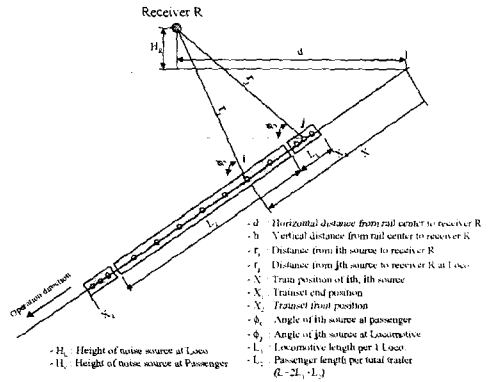
패턴 예측은 가능하나 근거리장에서의 차륜/레일 접촉소음의 예측이 어려우므로 차륜/레일 접촉점을 소음원으로 가정하여 <Fig. 3>에서와 같이 모델링을 하였으며 방사계수 K 값을 도출하는 것이 소음의 패턴을 묘사하는 중요한 요소가 된다.

2가지 소음 모델링의 차이점을 보면 <Fig. 2>와 같이 표현된다.



<Fig. 2> Comparison of noise patterns for 2 types modeling

차량길이  $L$ (객차부:  $L_1$ , 기관차:  $L_2$ )라 하고, 주음원을 차륜/레일의 접촉점으로 하였으며, 소음원과 관측자와의 거리  $r_i, r_j$ 라 하며, 관측자의 레일상면에서 높이  $H$ 라고 정의하여 모델링하였다.



<Fig. 3> The Modeling of noise propagation for Push-Pull System

수음점 R 지점의 인텐시티를 구하여 보면 차량길이  $L$ 에  $m$ 개의 점음원이 존재하고

$$K_i = \kappa^4 \rho C U_o^2 \alpha^4 \delta^2 \text{라 하면, } r_i = \sqrt{(H_R - H_C)^2 + d^2 + x_i^2},$$

$\cos \phi_i = d / \sqrt{(H_R - H_C)^2 + d^2 + x_i^2}$  이므로 총인텐시티  $IP_s, IP_C, IP_D$ 는 식 (3)와 같이 표현된다.

$$IP_s = K_1 \sum_{i=1}^{i=m} \left( \frac{1}{(H_R - H_C)^2 + d^2 + x_i^2} \right)$$

$$IP_C = K_1 \sum_{i=1}^{i=m} \left( \frac{d}{((H_R - H_C)^2 + d^2 + x_i^2)^{3/2}} \right) \dots\dots(3)$$

$$IP_D = K_1 \sum_{i=1}^{i=m} \left( \frac{d}{(H_R - H_C)^2 + d^2 + x_i^2} \right)^2$$

### 3. 실험 및 분석

#### 3.1 소음 측정

고속전철의 음향지향특성 및 소음특성을 알아보기 위해 한국의 고속전철 시운전 구간에서 2000년 5월~10월 사이에 외부소음 측정을 통하여 차량운행속도, 거리별 소음의 특성을 분석하였다. 시험장소는 현재 300 Km/h로 시운전이 시행되는 서울기점 124Km 지점으로 평지이며 레일은 연속용접레일로 구성되어 있다.

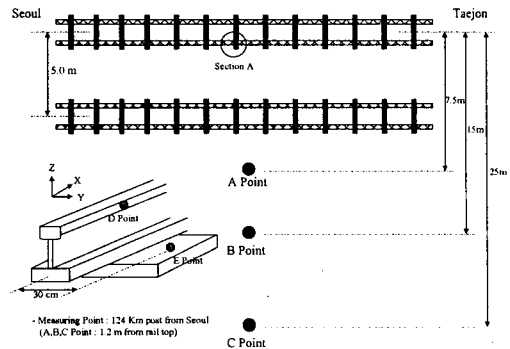
본실험은 고속전철인 KTX의 지향특성 및 소음특성에 대한 분석을 위해 시행되었으며 측정차량은 20량 고정편성으로 구성된 KTX 차량으로 기본시스템은 <Table 1>과 같다.

<표 1> The Basic specification for KTX system

System Characteristics	high speed Train (KTX)
Configuration	2PC+2MT+16IT (20 trainset)
Operation Maximum Speed	300 Km/h
<b>Civil Condition</b>	
- Total Length (Test Track)	431 Km (65.5 Km)
- Track Profile	UIC 60Kg
- Track Gauge	1435mm
Electrification System	AC 25KV, 60 Hz
<b>Rolling Stock System</b>	
- Trainset length (PM, MT, IT)	387.19m (PM=22.15m, MT=21.845m, IT=18.7m)
- Trainset weight	771.2 ton (full)
- Passenger load	935 persons
- Wheelbase	3000mm
- Bogie No.	23
- Bogie type	PC, MT : Conventional bogie IT : Articulated bogie

\* Remark : PC=Power Car, MT=Motored Car, IT=Intermediate car

측정은 차량을 저속(50Km/h)에서 고속(300km/h)까지 단계별로 정속운행하면서 궤도중심에서 거리별로 소음수준을 측정하였다



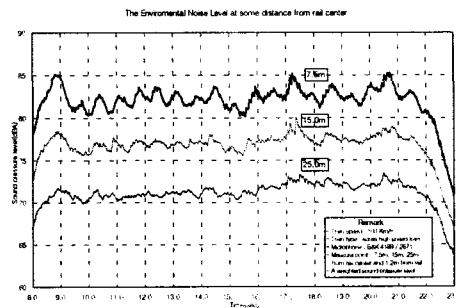
<Fig. 4> The measuring point of Sound for High speed train(KTX)

<Fig. 4>에서 보듯 소음측정은 B&K 4189/2671 Microphone 을 A(7.5m), B(15m), C(25m) 위치에 설치하고 이를 SONY Recorder 에 기록하여 소음 분석장비인 LMS 장비를 이용하여 A-weighting 된 소음레벨의 형상과 주파수분석을 수행하였다.

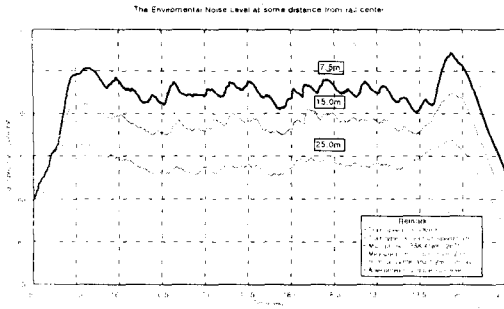
#### 3.2 결과 분석

Microphone 을 이용한 소음 측정은 차량을 속도별로 운행하면서 각각의 속도에서 소음도를 측정하였다.

<Fig. 5>은 고속차량의 100Km/h, 300Km/h 에서 시간축에 대한 소음패턴 측정 예로서 기관차가 있는 전부와 후부는 동력소음 때문에 상대적으로 소음레벨이 크게 존재하며 객차가 있는 중간부분은 레일/차륜이 접촉하는 부분에서 증가하고 그외에서는 적어지는 산과같은 소음 형태를 보인다.



(a) low speed(100Km/h)



(b) high speed(300Km/h)

<Fig. 5> The measured sound pressure level and shape

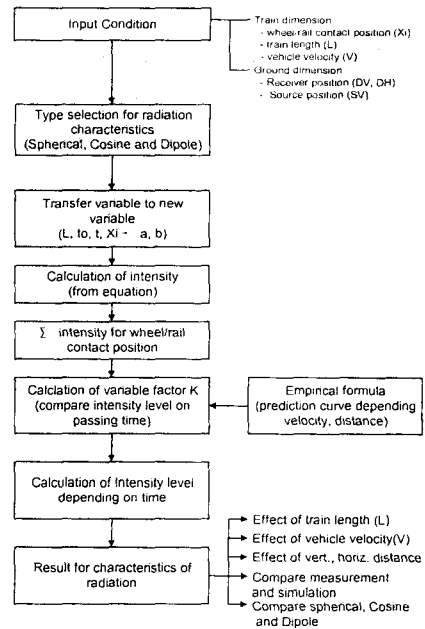
#### 4. 방사패턴 예측 및 결과 고찰

음원의 지향성은 spherical, cosine, dipole 형태가 있으며 이는 식 (2), (3)에서 언급하였다.

방사특성을 모델링하는데 있어 차량길이에 점음원이 일정하게 분포하여 모델링하여 보면 <Fig. 2>에서 보듯 근거리에서에서 소음전파 형태의 크고 작은 값을 묘사하기가 어렵다. 소음원을 차륜/레일 접촉점으로 모델링하면 산과 같은 값을 나타낼수 있으며 이러한 것은 근거리에서의 소음형상을 정확히 묘사할수 있으며 이를 통해 차륜에서의 찰상 등의 원인을 밝혀줄수 있는 근거를 제시한다.

소음전파의 방사특성은 모델링을 통해 가능하나 소음레벨을 예측하기 위해서는 수식에서 보듯 방사계수 K 값을 알아야 가능하다. CATO의 경우 K 값을 알기 위해 어느 일정거리(30m 지점)에서의 K 값을 기준으로 속도의 4.2 승에 비례하는 식을 도출하였다. 그러나 다른거리에서의 이값의 사용은 상당한 오차를 동반한 예측을 하게된다. 이는 K 값이 차륜/레일 특성과 함께 속도 및 거리가 달라지면 속도의 4.2 승에 비례하지 않기 때문이다. 이를 정확히 추정하기 위해 속도 및 거리에 따른 소음의  $Leq(dBA)$  값을 실험을 통해 유도하였으며 본 논문에서는 실험식으로 구한 K 값으로 각속도에서 소음패턴 및 측정값 추정이 가능하였다.

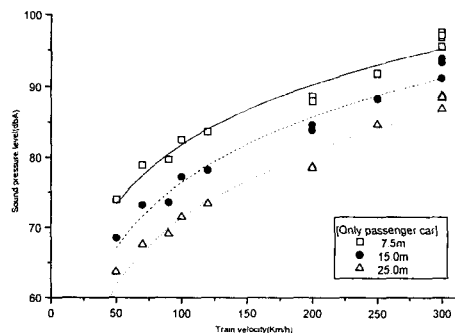
<Fig. 6>은 소음패턴 예측을 위한 각종 인자의 영향성을 보기위한 시뮬레이션 흐름도이다.



<Fig. 6> The prediction flowchart for characteristics of radiation

#### 4.1 방사계수(K)

PUSH-PULL 형태의 기관차 객차의 구성에 있어 소음전파 모델링에 있어 차륜/레일의 특성에 의존하는 방사계수 K 값의 결정에 있어 차륜/레일의 특성을 알수 없으므로 실험적인 결과를 바탕으로 이를 계산하여 소음패턴 및 소음레벨값을 알수 있었다.



<Fig. 7> The empirical formula for push-pull high speed train

<Fig. 7>은 실험결과를 가지고 속도 및 거리에 따른 실험식을 구하면 식 (4)와 같다.

$$L_{7.5} = 12.238 \ln(V) + 25.389 = 28.2 \log_{10}(V) + 25.40$$

$$L_{15} = 13.53 \ln(V) + 14.192 = 31.2 \log_{10}(V) + 14.20 \quad \text{-----(4)}$$

$$L_{25} = 13.77 \ln(V) + 7.9867 = 31.7 \log_{10}(V) + 7.99$$

where  $L_a$ : a(m)에서의 A-weighted noise level(dbA)  
 위의 식을  $L = a \log_{10} V + b$  을 Intensity 에 대해 풀면  
 $a \log_{10} V + b = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$  이므로  $I = 10^{-12} (V^a 10^b)^{0.1}$

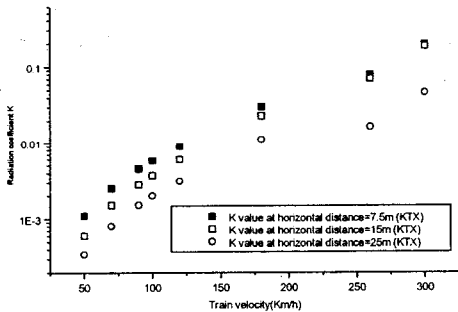
가 되므로 위식에서  $I_{7.5}$ ,  $I_{15}$ ,  $I_{25}$  는 식(5)과 같다.

$$I_{7.5} = 3.46 \cdot 10^{-10} V^{2.82}$$

$$I_{15} = 2.63 \cdot 10^{-11} V^{3.12} \quad \text{-----(5)}$$

$$I_{25} = 6.29 \cdot 10^{-12} V^{3.17}$$

where  $I_a$ : a(m)에서의 인텐시티  
 위에서 구한 각 위치에서의 인텐시티와 식 (3)에  
 서 방사계수  $K_r$  를 구할수 있으며 고속전철의 경  
 우 전속도 영역에서 총인텐시티는 거리(30m 이내)  
 에 따라 속도의 2.82~3.17 승에 비례한다는 것을  
 알수 있다.



<Fig 8> The radiation coefficient K for high speed system(KTX)

#### 4.2 방사 특성 예측 결과

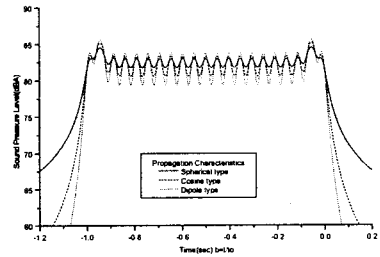
차량이 궤도를 운행할 때 차량에서 나는 소음의 방사특성은 spherical, cosine, dipole 형태로 나타난다. 이러한 방사특성의 차이는 시간축에서 해석할 때 선두부 및 후두부에서의 소음전파의 기울기의 차이로 나타난다.

소음전파에 있어 영향을 미치는 인자로는 차량속도, 차량길이, 소음원의 거리 및 높이등이 있으며 이에 따라 소음의 특성 및 소음값이 다르게 나타난다.

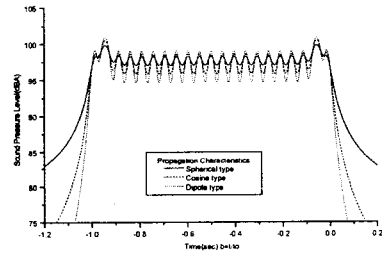
여기서는 고속전철(KTX)의 경우 소음원의 방사특성에 대한 규명과 각 요소별 영향성에 대하여 알아보았다.

<Fig. 9>는 3 개의 방사특성에 대하여 소음원을 차륜/레일 접촉점에서의 점음원으로 가정시의 소음 예측한 결과이다.

<Fig. 10>에서 보면 저속 및 고속에서 방사특성은 cosine 특성과 거의 일치하며 차륜/레일의 접촉에 의한 충격음도 거의 유사하게 시뮬레이션이 된다.

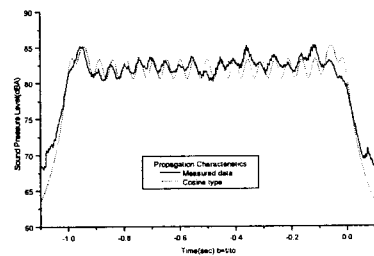


(a) low speed(100km/h)

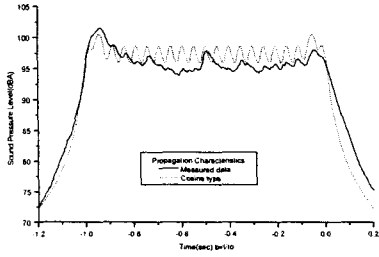


(b) high speed(300km/h)

<Fig. 9> The characteristics of radiation for Spherical, Cosine and Dipole model(Length=400m, Vertical and horizontal distance from rail at measuring point= 1.2m / 7.5m, Train : KTX-20)



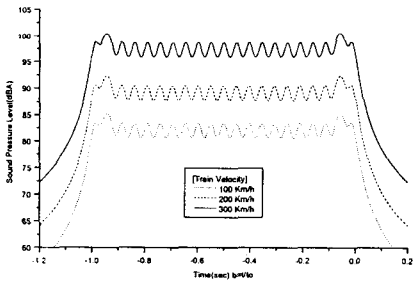
(a) low speed(100km/h)



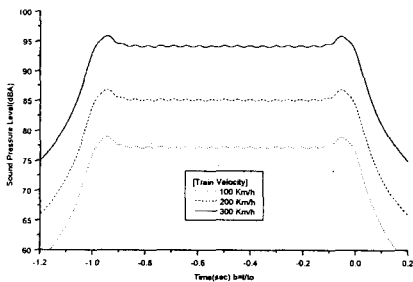
(b) high speed(300km/h)

<Fig. 10> The result of comparison between measured data and characteristics of cosine radiation model(Length=400m, Vertical and horizontal distance from rail = 1.2m / 7.5m, Train : KTX-20)

차량이 운행될 때 소음원거리에 영향을 미치는 인자인 차량길이, 소음원거리, 속도에 따라 소음의 전파특성이 어떻게 변하는지를 알아보려고 한다. <Fig. 11>에서보면 속도가 100km/h→200km/h로 증가시 8~9dB가 증가하고, 100km/h→300km/h로 증가시 15~16dB의 증가를 보인다.



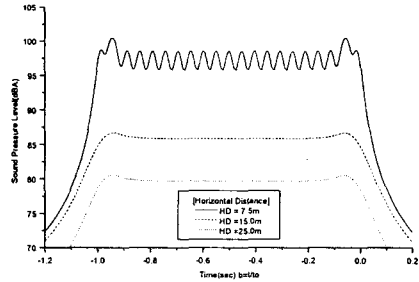
(a) horizontal distance=7.5m



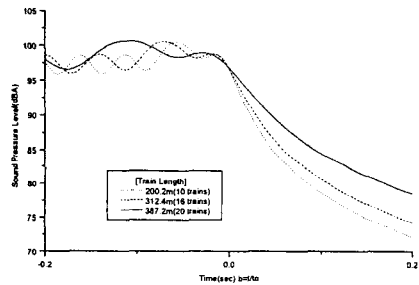
(b) horizontal distance=15m

<Fig. 11> The comparison for characteristics of radiation (Cosine model)(velocity=50 ~ 300km/h, Length=400m, KTX-20)

<Fig. 12>에서 보면 수평거리가 15m가 되면 차륜/레일 접촉점에서의 산과 같은 형상이 없어지게 되며(a), 차량길이가 짧아지면 차량후부의 cosine 특성이 dipole 특성에 가깝게 저감되는 효과가 나타난다.



(a) variation of horizontal distance



(b) variation of train length

<Fig. 12> The comparison for characteristics of radiation (Cosine model) which has noise pattern to horizontal distance and train length(velocity=300km/h, length=200~400m, horizontal distance=7.5 ~ 25.0m, Train : KTX-20)

## 5. 결론

본연구에서는 Push-Pull 시스템의 고속(300km/h)에서의 실험을 통한 방사패턴 예측이 가능하였고, 방사특성이 Cosine 특성이 있음을 알수 있었다. 고속영역에서 실험식을 통해 구한 K 값으로 근거리장에서의 시간축에서의 소음패턴이 가능하였으며 시뮬레이션을 통한 각요소(거리, 속도, 차량편성등)에 따른 소음의 패턴 및 방사특성에의 영향을 알아 보았다.

본 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) KTX 시스템의 경우 각속도에 따른 거리별 실험식을 유도하였으며, 방사계수 K 값을 거리 및 속도에 따라 구할수 있었다.
- (2) 실험식을 통해 고속에서 방사패턴에 대한 시뮬레이션 및 이론식이 가능하여 여러 인자 (Train length, horizontal/vertical distance, train speed etc.)에 대한 영향성을 알수 있었다.
- (3) KTX 의 경우 기관차방식으로 방사패턴은 cosine 특성을 가지며 각속도 영역별로 (300Km/h 까지)에서 잘 일치함을 알수 있다.
- (4) 방사패턴의 모델링은 constant array with train length 과 point source array on wheel/rail contact 로 가능하며 본 연구에서의 point source array 모델링을 통해 근거리에서의 차륜/레일의 영향을 나타낼수 있으며 차륜의 찰상 영향등의 예측에 활용이 가능하다.

## 후 기

고속철도(KTX)관련 시험에 협조해 주신 한국고속철도건설공단 관계자 분께 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. D.H.CATO, 1976 Journal of sound and vibration 46(4),483-500. The prediction of enviromental noise from fast electric trains
2. D.Hohenwarter, 1990 Journal of sound and vibration 141(3),17-41 Railway noise propagation models.
3. J.Lang, 1989 INTERNOISE 89, 1243-1248 A model to calculate railway noise
4. L.G. Kurzweil, W.N. Cobb and R.P. Kending, 1979 Journal of sound and vibration, 66(3), 389-405 Propagation of noise from rail lines.
5. E.J. Rathe, 1977 Journal of sound and vibration

- 51(3),371-388 Railway noise propagation
6. S. Peters 1973 Acoustica 28, 318-321 Prediction of rail-wheel noise from high speed trains.
7. S. Peters, B. HEMWORTH and B. WOODWARD 1974 Journal of sound and vibration 35, 146-150. Noise radiation by a railway rail
8. Peters 1974 Journal of sound and vibration 32, 87-99. The prediction of railway noise profiles.