

<논 문>

## 방음차륜의 소음진동 저감효과에 관한 연구

### A Study on the Effect of Low Noise Wheel for the Noise and Vibration Reduction

김 재 철\* · 유 원 희\* · 문 경 호\*\*

Jae Chul Kim, Won Hee You and Kyeong Ho Moon

(2000년 3월 2일 접수 : 2000년 5월 31일 심사완료)

**Key Words** : Low Noise Wheel(방음차륜), Interior Noise(차내소음), Rolling Noise(진동음), Squeal Noise(마찰음), Wheel Howling Noise(차륜 하울링소음)

#### ABSTRACT

Wheel /rail interaction has been known as a major source of railway noise. In this paper, a low noise wheel structure is developed and its effect on noise reduction is investigated. The developed low noise wheel employs a rubber material inserted into a steel rim or mounted on the wheel surface. Since the low noise wheel has low stiffness and high damping ratio compared to a solid wheel, the measurement results show that it reduces the rolling and squeal noise. It turns out that the proposed wheel could reduce interior noise level by 4~5dB(A) and vehicle vibration level by 7~10 dB. Although the proposed structure seems to be promising in noise reduction of railway vehicles, the low noise wheel is to be verified in endurance and cost effect.

#### 1. 서 론

철도의 경쟁력 향상을 위한 고속화와 에너지 절감을 위한 차량의 경량화가 추진되면서, 철도차량에 대한 소음진동 문제는 점차 심각한 환경적 문제를 야기하고 있다.

차량속도의 증가는 차량에서 발생하는 소음진동을 급격히 증가할 뿐만 아니라, 차체의 경량화는 투과손실(TL)의 저감에 의한 방음성능을 감소시켜 철도의 실내의 소음에 커다란 악영향을 미친다. 그러나 현재까지 국내철도의 소음진동에 대한 저감대책은 주로 방음벽과 차체에 대한 저감대책이 사용되고 있을 뿐 소음원에 대한 적극적인 대책방안이 수립되지 않아, 새로운 저감대책방안이 절실히 요구되고 있다.

현재 국내철도에 대한 소음진동에 가장 중요한 소음 및 진동원은 차륜과 레일의 상호작용과 추진장치 등으로 구분할 수 있다.

일반적으로 추진모터와 같이 추진장치에 의한 소음은 기기 자체에 대한 대책방안을 세워 효율적으로 저감시킬 수 있으나, 차륜과 레일 접촉에 의한 소음은 발생원인이 복잡하고 다양해서 차륜과 레일의 삭정주기를 조절하는 방법, 차륜담면 또는 레일담면에 고체 또는 유체상태의 기름을 공급하여 차륜과 레일 접촉에 의한 소음을 감소시키는 방법 및 방음차륜을 이용하는 방법 등 여러가지 저감대책이 적용되고 있다.

차륜과 레일의 상호작용에 의한 소음은 발생 메커니즘에 따라 직선구간에서 발생하는 진동음(rolling noise), 곡선구간에서 발생하는 마찰음(squeal noise)과 차륜 하울링소음(wheel howling noise) 및 분기기 혹은 레일의 이음매에서 발생하는 충격음(impact noise) 등 크게 세 분야로 나누어진다<sup>(1)</sup>. 이러한 소음 중에서도 특히 곡선이 많은 지하철과

\* 정희원, 한국철도기술연구원

\*\* 한국철도기술연구원

같은 구간에서는 마찰음이 자주 발생하여 많은 문제점을 야기시키기 때문에, 철도 선진국에서는 마찰음에 대한 저감방안으로 여러형태의 방음차륜을 개발하여 저감효과에 대한 시험을 하였으며<sup>(2,3)</sup>, 국내에서도 철도 소음의 저감방안으로 방음차륜의 저감효과를 시험적으로 검토하였다<sup>(4,5,6)</sup>.

본 논문에서는 철도차량의 소음 및 진동에 대한 방음차륜의 저감효과를 확인하기위해서 전기동차에 두 형태로 방음차륜을 부착하여 대차 프레임과 차체 마루의 진동 및 차량 실내소음과 하부소음을 측정하였으며, 직선구간과 곡선구간에 대해서 차륜과 레일의 상호작용에 의해서 발생하는 전동음과 마찰음의 저감효과를 분석하였다.

## 2. 방음차륜

일반적으로 방음차륜은 감쇠효과를 높이기 위해서 차륜 내부에 고무재질을 삽입하거나, 외부에 고무링 등을 부착하여 차륜으로부터 방사되는 소음을 저감 시킨다. 이러한 특수차륜을 탄성차륜, 댐핑차륜 또는 방음차륜 등으로 부르고 있으나, 본 논문에서는 '방음차륜'이라고 부르기로 한다.

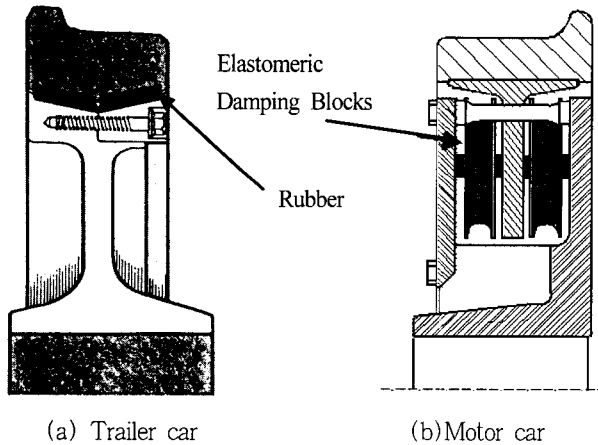


Fig. 1 Low noise wheels

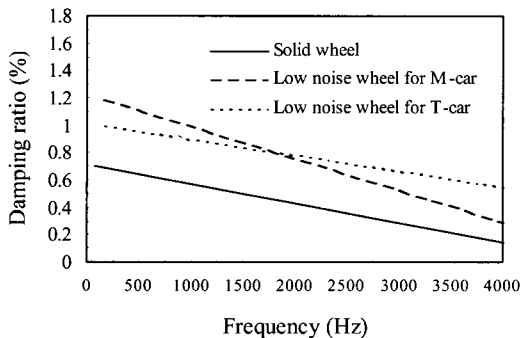


Fig. 2 Curve fitting results for damping ratio of solid wheel and low noise wheels

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 차륜내부에 고무재질을 삽입한 방음차륜을 사용하여 소음 및 진동의 저감효과를 확인하였으며, 차량의 제동방식에 따라 모터 차량용과 트레일러 차량용으로 구분된다.

일체차륜과 Fig. 1의 방음차륜의 감쇠효과는 각 차륜에 대한 감쇠비를 1차 적합곡선(curve fitting)으로 나타내면 Fig. 2와 같다. 전반적으로 방음차륜의 감쇠비가 일체차륜에 비하여 상당히 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 차량 주행 시 차륜과 레일의 상호작용에 의해서 발생하는 차륜의 진동과 방사소음에 저감효과가 있을 것으로 생각된다.

## 3. 시험방법 및 분석결과

### 3.1 시험방법

본 시험은 방음차륜에 대한 소음 및 진동 저감효과를 파악하기 위해서 전기동차 1편성(10량)에 두 형태로 방음차륜을 부착하여 시험을 하였다.

우선 전기동차 1편성 중에 5량만 방음차륜으로 교체하여 일체차륜과 방음차륜이 부착된 차량의 실내소음과 하부소음을 동시 측정하여 분석하였다. 그러나 위의 측정방법은 일체차륜과 방음차륜이 부착된 차량의 간격이 너무 길어서 차량 주행 시 일체차륜과 방음차륜이 서로 다른 구간을 주행하기 때문에 레일조건을 고려한 비교분석이 어렵다. 따라서 레일조건을 고려하기 위해서 차량 1편성(10량)에 방음차륜을 전부 부착하여 일체차륜과 방음차륜에 대한 차축, 대차프레임 및 마루의 진동가속도와 차량하부 및 실내 소음을 측정하여 동일한 구간에 대한 측정결과를 비교하였다. 차량의 진동은 상하방향의 진동을 측정하였으며, 차량 하부소음은 차륜과 근접한 대차프레임 측면에 마이크로폰을 설치하였고, 차량 실내소음은 차체와 대차가 접한 마루에서 1.6 m 위치에 마이크로폰을 설치하여 레코더에 기록한 후 분석하였다.

### 3.2 전동음이 실내소음에 미치는 영향

일반적으로 100 km/h이하의 속도로 주행하는 전기동차에서 발생하는 소음은 차륜과 레일에 의한 소음과 추진장치에 의한 소음이 주요한 요인으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 우선 차륜과 레일의 상호작용에 의한 전동음이 차량실내소음에 미치는 영향을 분석하여, 차륜과 레일에 의한 기여도를 파악하였다.

(1) 차량 실내소음과 하부소음, 차축진동의 상호관계

Fig. 3은 차량 하부소음과 실내소음에 대한 결과로서 하부소음과 실내소음이 레벨에 차이만 있을 뿐 동일한 형태로 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 4는

차량의 속도증가에 따른 차축의 진동레벨과 실내소음을 비교한 결과로써 차축의 진동레벨이 증가함에 따라서 실내소음이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

위의 두 결과에서 차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음과 실내소음은 상호 연관성이 있는 것으로 생각된다.

(2) 차량 실내소음과 속도의 관계

일반적으로 전동음은 차량속도에 2~3승으로 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>(7)</sup>. 따라서 식 (1)을 이용하여 차량의 속도증가에 따른 실내소음의 증가형태를 분석할 수 있다.

$$SPL = SPL_o + 10\log\left(\frac{V}{V_o}\right)^n \quad (1)$$

여기서,  $SPL$ 은 음압,  $SPL_o$ 은 기준음압,  $V_o$ 은 기준속도이다.

식 (1)에서  $n$ 이 2~3일 경우 전동음, 5~6일 경우 공력음에 해당한다.

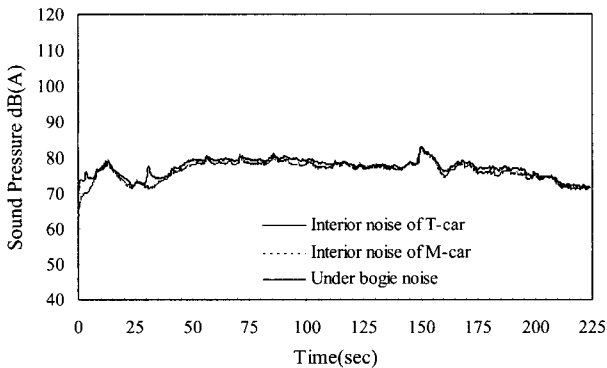


Fig. 3 Comparison of interior noise and under bogie noise.

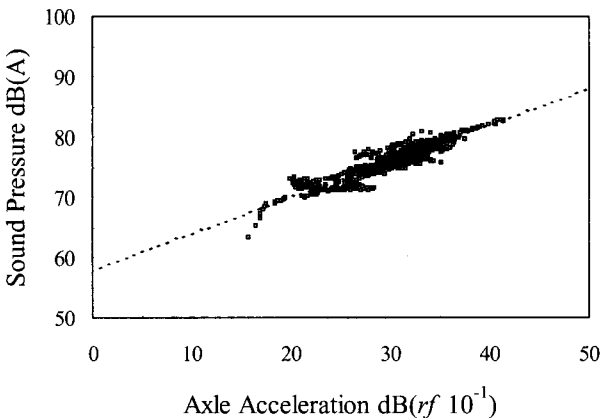


Fig. 4 Correlation of Axle acceleration and interior noise.

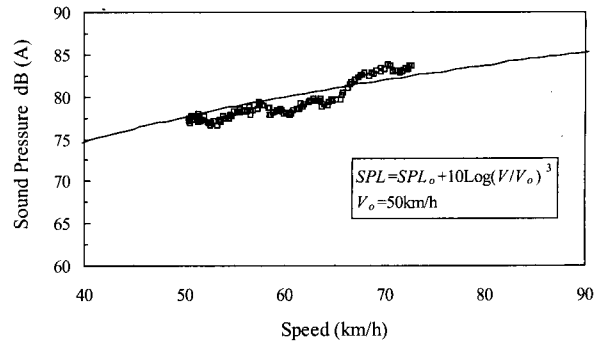


Fig. 5 Sound pressure as function of train speed.

Fig. 5는 식 (1)을 이용하여 차량속도에 따른 실내소음에 대한 증가를 나타낸 결과이다. 실선은 차량속도 50 km/h를 기준으로  $n=3$ 인 경우에 대해서 계산한 결과이고, □이 차량 속도증가에 따른 실내소음을 측정된 결과이다. 차량 실내소음이 차량속도의 3승에 비례하는 것을 알 수 있다. 따라서 차륜과 레일에 의한 전동음이 전기동차의 실내소음에 커다란 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.3 직선구간의 소음 및 진동 저감효과

차륜과 레일의 상호작용에 의해서 발생하는 전동음이 차량실내에 전달되는 경로는 차륜과 레일에서 방사되는 소음이 창문, 출입문 및 갱웨이 등을 통해서 직접 유입되는 공기전파음(air-borne sound)과 차륜의 진동이 대차 프레임, 차체 마루 등을 통해서 전달되는 고체전파음(structure-borne sound)으로 구분된다.

본 연구에서는 차륜에서 방사되는 소음의 저감효과뿐만 아니라, 진동에 의해서 전달되는 고체전파음의 저감효과를 확인하기 위해서 대차 프레임과 차체 마루의 진동 저감효과를 파악 하였다.

(1) 차량의 진동 저감효과

Fig. 6과 Fig. 7은 직선구간에서 차량의 속도증가에 따른 트레일러 차량에 대한 일체차륜과 방음차륜의 대차 프레임 및 차체 마루에 대한 상하방향 진동을 측정된 결과이다. 대차 프레임의 경우 약 7~10 dB정도의 저감효과가 있으며, 차체 마루의 경우에는 약 4~5 dB정도의 진동 저감효과를 확인할 수 있다. 이러한 각 부분의 진동 저감효과는 방음차륜 내부에 삽입된 고무재질에 의해서 차륜의 진동이 흡수되기 때문에 대차프레임과 차체 마루에 전달되는 진동이 감소되는 것으로 생각된다. 따라서 차륜에 의한 진동이 차량실내에 전달되는 고체전파음을 저감시키는데 효과가 있는 것으로 판단된다.

(2) 차량실내소음 및 하부소음 저감효과

Fig. 8은 트레일러 차량 하부소음에 대한 결과로써 실선

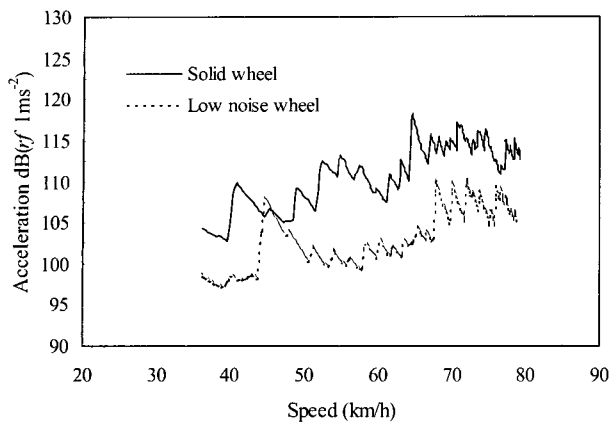


Fig. 6 Comparison of bogie frame vibrations for solid wheel and low noise wheel.

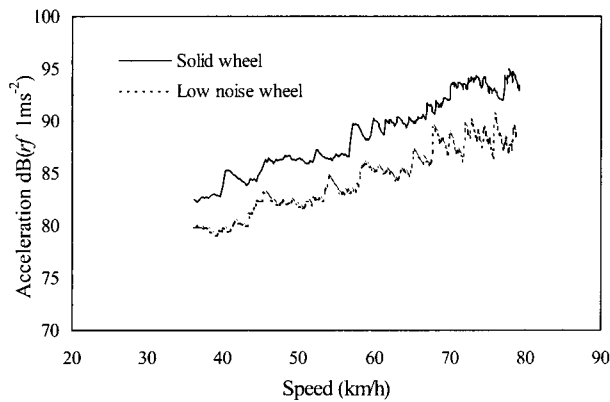


Fig. 7 Comparison of floor vibrations for solid wheel and low noise wheel.

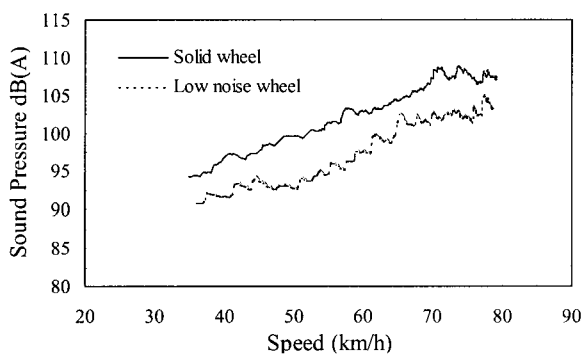
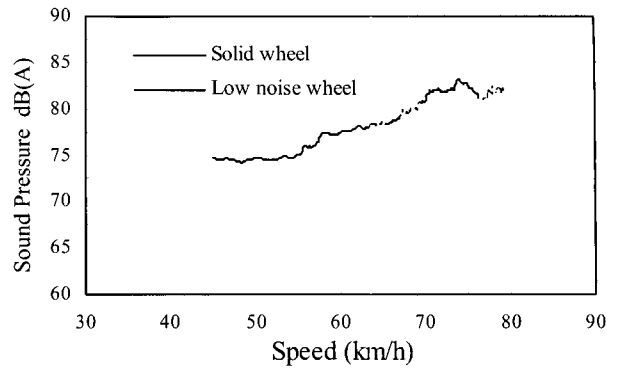
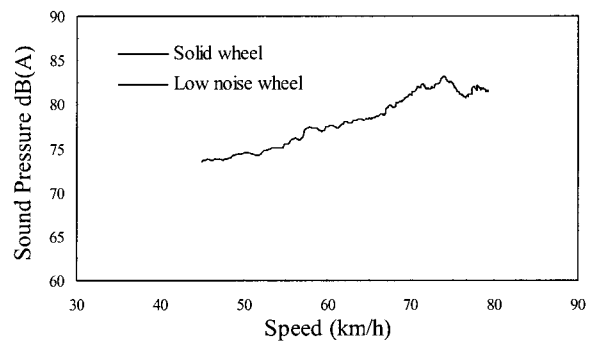


Fig. 8 Comparison of under bogie noises for solid wheel and low noise wheel.

이 일체차륜이 부착된 차량의 소음, 접선이 방음차륜이 부착된 차량의 소음을 나타낸다. 차량 주행시 하부소음의 저감효과가 약 4~5 dB(A) 정도인 것을 확인 할 수 있다. 이러한 하부소음의 저감효과는 차륜에서 방사되는 소음의 저



(a) Motor car



(b) Trailer car

Fig. 9 Comparison of interior noises for solid wheel and low noise wheel.

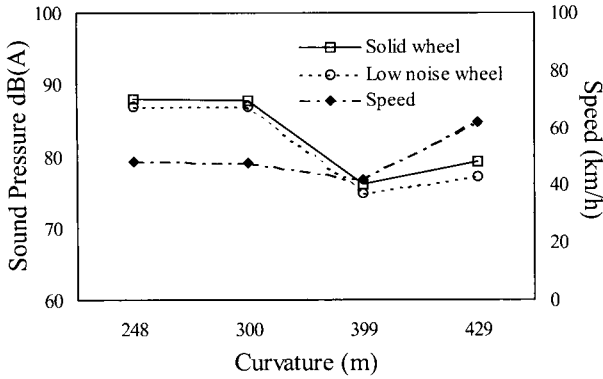
감에 의한 것으로 생각되며, 창문, 갱웨이 및 출입문 등을 통해서 전파되는 공기전파음에 저감효과가 있는 것을 나타낸다.

Fig. 9는 역과 역 사이의 동일구간에 대한 차내소음수준을 비교한 것으로써 (a)는 모터차량, (b)는 트레일러 차량에 대한 결과이다.

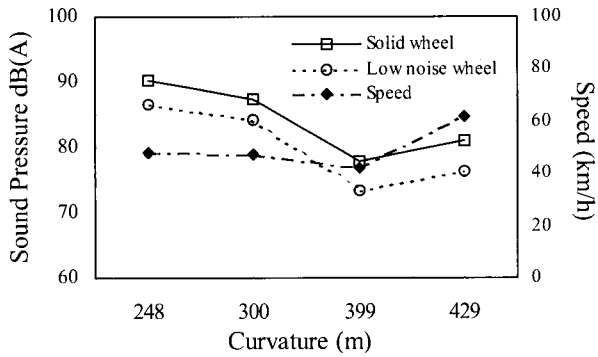
모터차량의 경우 약 1~2 dB 정도, 트레일러 차량의 경우 약 3~4 dB 정도의 소음 저감효과를 나타내고 있다.

다음의 결과에서 전반적으로 트레일러 차량보다 모터차량의 실내소음 저감효과가 적게 나타나는 것은 추진모터에서 발생하는 소음의 영향 혹은 구조적으로 트레일러 차량용 방음차륜보다 모터차량용 방음차륜의 소음 저감효과가 떨어지는 것으로 생각된다. 특히 차량속도가 약 50 km/h 이하의 저속구간에서 트레일러 차량보다 모터차량의 소음이 크게 나타나며, 모터차량의 소음이 일정하게 유지되는 것은 모터소음의 영향으로 판단된다.

이상의 결과로부터 방음차륜은 직선구간에서 차륜과 레일의 상호작용에 의한 차륜의 진동 및 방사소음에 저감효과가 있는 것을 확인하였다.



(a) Motor car



(b) Trailer car

Fig. 10 Comparison of interior noises for solid wheel and low noise wheel at curving track.

### 3.4 곡선구간의 소음 저감효과

Fig. 10은 곡선구간에서 곡선반경에 따른 방음차륜의 차내소음 저감효과를 나타낸 결과로써 □을 포함한 실선이 일체차륜을 장착한 차량, ○을 포함한 점선이 방음차륜을 장착한 차량, ◆을 포함한 일점쇄선이 차량속도를 나타낸다. 대체적으로 직선구간과 동일하게 모터차량은 약 1~2 dB(A)정도, 트레일러 차량은 약 3~4 dB(A)정도의 저감효과를 나타내고 있다.

위의 결과에서 레일의 곡선반경이 작을수록 높은 소음수준을 나타내고 있는 것은 급곡선 구간에서 나타나는 마찰음 및 차륜 하울링소음에 의한 것으로 판단된다.

일반적으로 마찰음은 1 kHz이상의 고주파수 영역에서 발생되며 차륜 하울링소음은 약 700 Hz이하의 주파수 영역에서 발생하는 소음으로, 이러한 소음을 파악하기 위해서 차량 하부소음을 주파수 분석한 결과와 차륜의 주파수 응답함수를 비교 검토하였다.

Fig. 11은 곡률반경이 399 m인 곡선구간에서 트레일러 차량에 대한 방음차륜과 일체차륜의 차량 하부소음의 측정

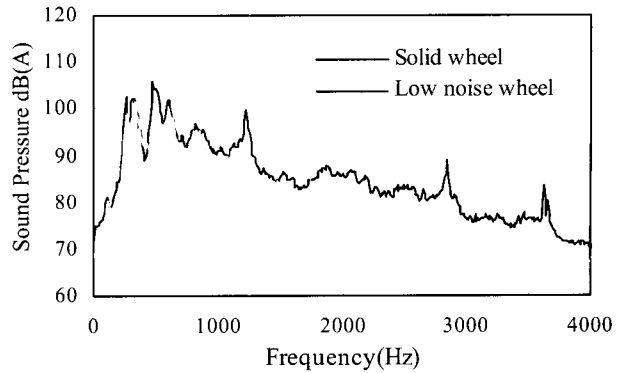


Fig. 11 Comparison of under bogie noise for solid wheel and low noise wheel at curving track.

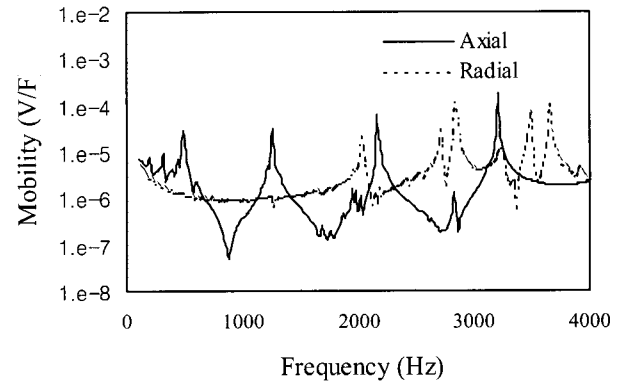


Fig. 12 Frequency response functions in axial and radial direction.

치를 주파수 분석한 결과이고, Fig. 12는 일체차륜의 차축방향과 방사방향에 대해서 임팩트 헤머를 이용하여 측정된 주파수 응답함수이다.

Fig. 11에서 약 500 Hz 부근의 소음은 차륜 하울링소음, 약 1260 Hz, 2830 Hz 및 3620 Hz 부근의 소음은 마찰음으로 생각되며, Fig. 12에서 차륜의 각 방향에 대한 공진주파수와 거의 일치한다.

위의 결과에서 마찰음의 저감효과가 상당히 크며, 차륜의 차축방향 공진주파수와 관련된 500 Hz 부근의 차륜 하울링소음에도 저감효과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 전체적으로 약 2 kHz이상의 주파수 영역에서부터 점차 저감효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

## 4. 방음차륜 저감효과에 대한 고찰

### 4.1 전동음의 저감효과

직선구간에서 발생하는 전동음의 발생메카니즘은 일반적

으로 차륜과 레일담면의 거칠기에 의한 가진력이 차륜과 레일의 진동을 발생시켜 소음으로 방사되어 전파된다. 이러한 전동음에 대한 연구는 1980년대 중반 Remington이 예측방법을 제안하여, 차륜과 레일의 임피던스와 표면의 거칠기를 이용해서 각각에 대한 평균속도를 계산하고, 이 평균속도로부터 차륜과 레일에서 방사되는 소음을 예측하였다<sup>(6)</sup>. Remington의 예측방법을 이용하여 전동음을 예측한 결과 약 2 kHz이상의 주파수 영역부터 차륜에서 방사되는 소음의 기여도가 큰 것을 확인하였다<sup>(9)</sup>.

따라서 감쇠효과가 커다란 방음차륜을 부착할 경우 차륜에서 발생하는 진동 에너지가 내부의 고무재질에 의해서 흡수되기 때문에 차륜의 진동과 방사소음이 감소되어 차량 실내에 전달되는 고체전파음과 공기전파음을 저감 시키는데 효과가 있다. 그리고 Fig. 12와 같이 2 kHz이상의 주파수 영역은 차륜에서 방사되는 소음의 기여도 크기 때문에 방음차륜의 저감효과가 크게 나타난다.

#### 4.2 마찰음 및 차륜 하울링소음의 저감 효과

마찰음 및 차륜 하울링소음에 대한 방음차륜의 저감효과는 식 (2)와 같이 차륜의 내부손실계수와 좌우방향 크리프에 의한 Stick-Slip으로 발생하는 음의 손실계수를 이용하여 Rudd가 이론적인 근거를 제시하였다<sup>(10)</sup>.

$$\eta = \eta_{in} - \eta_{ss} \quad (2)$$

여기서,  $\eta_{in}$  : 차륜의 내부손실계수를 나타내며,  $\eta_{ss}$  : Stick-Slip에 의한 음의 손실계수를 나타낸다.

식 (2)에서 차륜과 레일사이의 Stick-slip에 의한 손실계수가 차륜의 내부손실계수보다 커지면 차륜의 전체손실계수가 음이 되어 차륜의 진동이 증폭되기 때문에 마찰음과 차륜 하울링소음이 발생한다. 따라서 Fig. 2와 같이 일체차륜보다 감쇠효과가 커다란 방음차륜을 사용할 경우 마찰음과 차륜 하울링소음을 저감 시키는데 유용하다.

### 5. 결론

본 연구에서는 전기동차에 방음차륜을 부착하여 차륜과 레일의 상호작용에 의한 차륜의 진동 및 방사소음에 대한 저감효과를 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전기동차 주행 시 차륜과 레일에 의한 소음진동은 차량 실내 및 실외소음에 커다란 영향을 미치기 때문에 방음차륜은 차륜에서 방사되는 소음과 차량 실내에 전달되는 진동에 저감효과가 있는 것을 확인하였다.

(2) 방음차륜 부착 시 차량 하부소음은 약 4~5 dB(A)

정도의 저감효과가 있으며, 차량 실내소음은 모터차량의 경우 약 1~2 dB(A), 트레일러차량의 경우 약 3~4 dB(A)정도의 저감효과가 있는 것을 확인하였다. 또한 대차프레임의 진동은 약 7~10 dB, 차체 마루의 진동은 약 4~5 dB의 저감효과가 있는 것을 알았다.

(3) 일체차륜보다 감쇠효과가 커다란 방음차륜은 곡선구간에서 자주 발생하는 마찰음에 상당한 저감효과가 있는 것을 확인하였으며, 차륜 하울링소음에도 저감효과가 있는 것을 확인하였다.

그러나 방음차륜은 아직 경제성과 차륜담면의 마모 등, 검토되어야 할 분야가 많기 때문에 향후 보완적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 차량의 실내 및 실외소음을 저감하기 위해서는 방음차륜과 다른 저감대책을 동시에 사용하는 것이 효과적일 것으로 생각된다.

### 후 기

본 연구는 철도청의 연구비 지원 및 SABWABCO의 협조로 수행되었으며 관계자에게 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) 김재철, 1999, "차륜/레일 접촉에 의한 소음과 저감 대책", 한국소음진동공학회지, Vol 9, No. 3, pp. 443~449.
- (2) A. Bracciali, L. Ciuffi and R. Ciuffi, 1997, "Simultaneous Measurements of Track Side Noise of Three Different Wheelsets for the ETR 500 FS Train", IMechE, Vol. 211, Part E, pp. 41~49.
- (3) 佐藤 潔 외 5인, 1997, "彈性車輪과 브레이크디스크를 裝着한 高速車輛의 振動騒音", 鐵道總合研究所報告書, Vol.11, No.4, pp. 37~42.
- (4) 유원희 외 4인, 1998., "방음차륜에 의한 철도차량 소음진동저감 연구", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 291~298.
- (5) 유원희 외 1인, 1998, "방음차륜의 소음진동 저감효과 시험", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 64~68.
- (6) 유원희, 1999, "방음차륜의 소음진동 저감효과 고찰", 한국소음진동공학회지, Vol.9, No.3, pp. 436~442.
- (7) "회전기계의 진동소음과 대책: 철도차량용 차륜의 진동/소음과 대책", pp. 597~631.
- (8) Remington, P.J. 1987, "Wheel/rail rolling noise: I

Theoretical Analysis" J.Acoust.Soc.Am.81(6), pp. 1805 ~ 1823.

(9) 김재철 외3명, 1999, "도차량의 전동음에 관한 연구 (기초적 검토)", 한국소음진동학회, 추계학술대회논문집,

pp. 95 ~100.

(10) Rudd, M. J. 1976, "Wheel/Rail Noise Part 2 : Wheel Squeal", J.Sound, Vib, 46(3), pp. 381 ~394.