

방음차륜의 소음진동 저감효과 고찰

유 원 희

(한국철도기술연구원 차량시스템연구팀)

1. 머리말

1990년대 이후 국내에서 고속철도, 지하철 및 경전철 등의 건설이 활발히 진행되면서 철도소음진동에 의한 환경소음문제가 논란의 대상이 되고 있다. 철도소음진동의 주된 원인은 차륜/레일 접촉에 의한 전동음으로서 크게 차륜에서 방사되는 소음과 레일에서 방사되는 소음으로 분류된다. 미국, 일본 및 유럽의 철도선진국들은 오래 전부터 차륜과 레일에서 방사되는 소음을 줄이기 위한 여러 가지 방법을 개발하여 사용해 왔다. 그 중에서도 차륜에서 방사되는 소음을 줄이기 위한 방음차륜은 여러 가지의 형태로 개발되어 현재 유럽 각국 및 일본에서 경전철과 지하철에 사용되고 있다. 본 글에서는 이러한 방음차륜의 소음진동 저감효과를 여러 가지 자료와 서울지하철에서의 실차시험을 통해 검토해 보고자 한다.

2. 방음차륜의 소개

2.1 일반사항

일반적으로 차량과 궤도의 연성운동에 의한 소음을 차량의 측면에서 저감시키기 위한 방법으로는 다음과 같은 몇 가지의 방법이 있다⁽¹⁾.

- 차륜에서의 방사음을 저감하는 방법
- 대차의 1차 현가장치의 강성 감소
- 차량의 스커트 내면의 흡음처리

이 중에서 차륜에서의 방사음을 저감하는 방법이 비교적 간편하고 가장 효과적이며, 많

이 사용되고 있는 방법이다.

차량의 주행속도가 중속도 이상에서는 차륜/레일 전동음이 차량내부 및 외부소음의 주된 원인이 된다. 차륜/레일 전동음 중에서 차륜에 의해 방사되는 소음을 효과적으로 저감하기 위하여 특수한 형태의 차륜이 개발되어 쓰이고 있는 데 이를 탄성차륜, 뎀핑차륜 또는 방음차륜 등의 여러 가지 이름으로 부르고 있다. 물론 각각의 명칭은 그 차륜의 음향학적 특성을 고려하여 붙이게 된 것이지만 여기에서는 '방음차륜'이라는 하나의 명칭으로 부르기로 한다. 방음차륜은 특히 추진동력 장치의 소음이 충분히 낮을 때 전체소음수준을 상당히 저감시킬 수 있다.

또한, 방음차륜은 차륜이 곡선을 주행할 때 생기는 날카로운 음을 효과적으로 제어할 수 있으며 많은 경우 거의 완전히 제거할 수 있으므로, 지하철과 같이 짧은 곡선이 많은 구간에서 차륜 회전시 생기는 미끄럼 소음을 제어하는 데 아주 효과적이다. 차륜의 소음은 차륜과 차축사이가 견고하게 연결되어 있기 때문에 곡선 선로상에서 차륜의 주행이 부드럽지 못하게 되고 차륜이 레일 표면에서 횡방향으로 미끄러지면서 계속되는 스틱슬립(stick-slip) 과정을 거치면서 차륜의 고유모드가 여기되어 고체전달소음(structure-borne noise)이 공기전달소음(air-borne noise)으로 변하게 된다. 따라서 차륜의 형상을 변경시키기 보다는 여기되는 고체전달소음을 제어함으로써 차륜이 갖는 진동에너지를 감소시키는 것이 보다 간편하며 효과적이다. 차륜의 진동에너지의 감소는 동시에 공기전달소음수준을 감소시키게 된다.

이러한 이론적인 배경을 바탕으로 여러 가지의 방음차륜이 개발되어 사용되고 있다. 방음차륜은 대체로 크게 2종류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 차륜과 레일 사이의 상호작용에 의한 진동이 윤축으로 전달되는 것을 탄성 및 댐핑을 이용하여 감소시키는 것이고, 두 번째는 윤축의 진동자체를 흡진기(vibration absorber)를 이용하여 감소시키는 것이다. 제동장치의 종류에 따라 구별되어 사용되고 있으며, 지적재산권의 범위를 회피하여 여러 가지 다른 형태의 차륜이 개발되고 있다. 그림 1은 여러 가지 방음차륜의 단면도를 보여 주고 있다.

현재 방음차륜은 SAB사, MAN사, BOCHUM사, KRUPP사, VSG사 등에서 생산된 제품들이 주로 사용되고 있다.

2.2 방음차륜의 메카니즘

차륜담면 및 레일담면에 존재하는 미소한 요철은 주행시 차륜과 레일의 접촉에 의한 전동음을 발생시키는 물론 구조물소음 및 윤중(수직하중)변동 등을 발생시키는 원인이 된다. 이러한 것을 억제하기 위해서는 차륜과 레일을 삭정함으로서 요철을 작게 하는 것이 필요하다. 그러나 주행기간에 따른 요철의 변화가 일정하지 않고, 일반적으로 차륜과 레일의 요철을 관리하는 것이 매우 어렵다. 따라서 방음차륜을 이용하여 차량측면에서 차륜의 요철에 대한 대책을 세우는 것이 매우 긍정적인 방법으로 평가되고 있다.

차량이 주행시 차륜과 레일의 접촉상태는

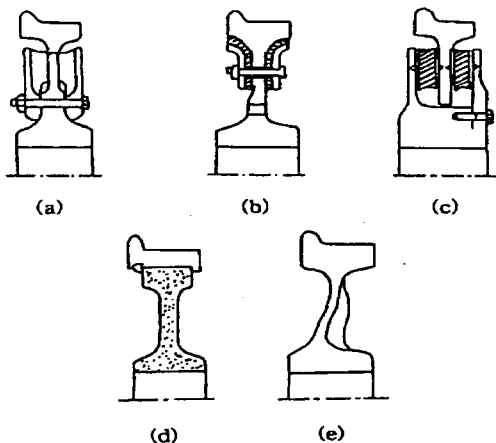


그림 1 방음차륜의 종류

그림 2와 같이 차륜의 타이어에 상당하는 질량을 가진 해머가 연속적으로 레일을 타격하면서 이동하는 것으로 생각할 수 있다. 레일을 타격하는 힘은 차륜/레일의 요철의 크기, 차륜의 타이어 질량 및 속도, 차륜이나 레일을 지지하는 스프링에 상당하는 강성에 의존되는 것으로 생각되고 있다. 이러한 가정에 의해서 레일 및 차륜의 판부에서 발생하는 고주파수의 진동에 의한 소음이 바로 전동음이다⁽²⁾.

전동음의 주된 발생원은 유럽의 경우에는 차륜이라고 알려져 있으며, 일본 신간선의 경우에는 레일이라고 알려져 있다. 유럽의 TGV나 ICE의 경우 브레이크 디스크를 차축에 취부함으로써 차륜의 판부에서 진동이 쉽게 발생하는 구조로 되어 있다. 주행 중 판부의 진동에 의해서 방사되는 소음은 2~4 kHz 정도의 고주파수 성분이 크게 나타난다. 이것이 TGV와 ICE의 전동음의 주된 원인으로 알려져 있다. 한편, 일본의 신간선의 경우 차륜의 판부 측면 양쪽에 브레이크 디스크를 설치함으로써 차량 판부의 진동에 의한 음의 방사를 억제하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 레일의 진동에 의한 음의 방사가 전동음의 주된 원인으로 간주되고 있다.

다음 그림 3은 직선 슬라브궤도를 고속주행시 방음차륜과 일체차륜의 윤중 변동률을 표시하고 있다. 시속 310 km/h에서의 윤중 변동률은 방음차륜이 일체차륜에 비교하여 40% 정도 감소함을 보이고 있다. 한편, 그림 4에 도시한 방음차륜은 질량이 작은 타이어에 고무를 취부하여 충격흡수를 하도록 한

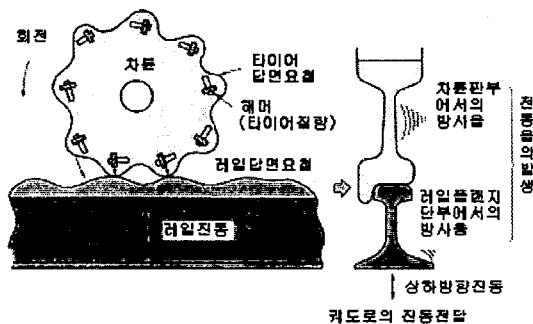


그림 2 전동음 및 진동의 발생 메카니즘

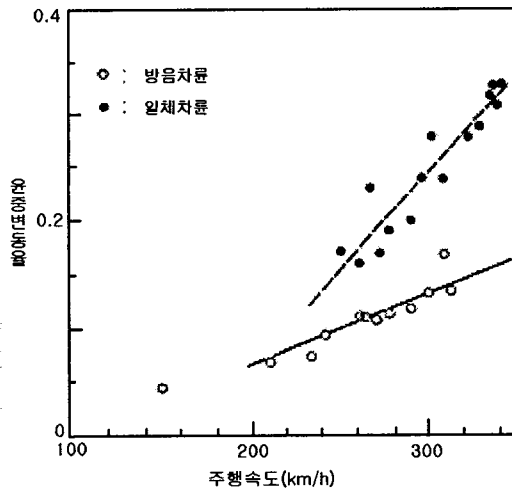


그림 3 차륜별 고속직선구간의 속도와 운중 변동률의 비교

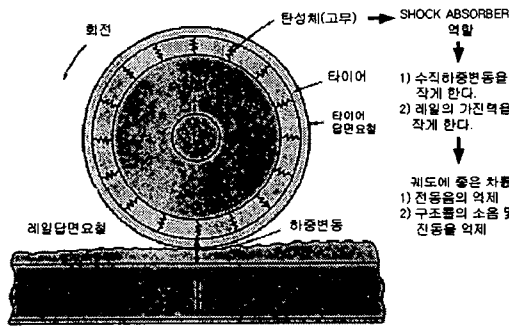


그림 4 방음차륜에 의한 수직하중변동 저감에 대한 도시

결과, 궤도에 작용하는 수직하중변동을 작게 하고, 궤도에 상해를 주는 것을 억제함으로써 궤도에 좋다는 것을 설명한 것이다. 그와 동시에 레일가진력의 저감 및 구조물의 소음진동 저감효과가 있음을 의미한다.

2.3 방음차륜의 소음진동 저감효과

일반적으로 차륜이 전동음의 주된 원인이 될 경우, 방음차륜의 소음진동 감소효과는 매우 커서 외국의 시험결과 자료에 의하면 차륜에 가까운 지점에서의 소음수준이 일체차륜은 116 dB이고 방음차륜은 100 dB로서 16 dB나 감소되고 있다. 이러한 방음차륜은 직선구간에서는 물론이고 곡선구간에서도 상당한 소음감소효과를 갖고 있기 때문에 짧은

곡선구간이 많은 지하철에서는 물론이고 직선구간이 많은 장거리용 일반철도, 고속철도 등에서도 차륜/레일의 전동음을 효과적으로 저감시키기 위하여 점차로 그 적용을 확산시켜가고 있는 추세에 있다. 방음차륜이 소음을 가장 효과적으로 감소시키고 있는 주파수대역은 500 Hz 이상이며 어떤 주파수에서는 20 dB 이상의 소음감소효과를 가져오기도 한다.

그림 5는 1/5 모형차륜에 의한 시험을 통해 얻은 차량주행속도와 차륜/레일 전동음 사이의 관계를 나타낸 것이다. 방음차륜이 일체차륜에 비하여 전반적으로 소음수준이 상당히 낮음을 알 수 있다.

또한 그림 6은 1/5 모형차륜시험을 통해 얻은 일체차륜과 방음차륜에 있어서의 전동음의 주파수특성 차이를 보여주고 있다. 대체로 250 Hz 이상의 대역에서 방음차륜의 소음저감효과가 우수함을 알 수 있다.

앞에서도 언급하였듯이 방음차륜이 차륜/레일 전동음의 저감효과를 가져오기 위해서는 그 기구(mechanism)상 차륜의 진동이

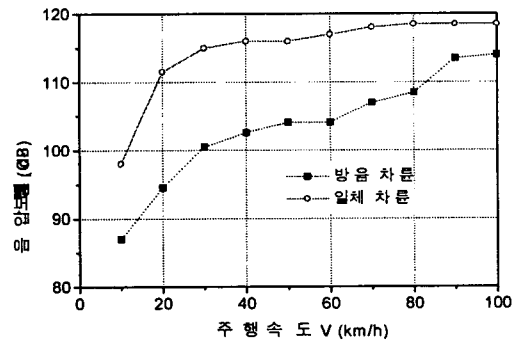


그림 5 주행속도와 전동음수준과의 관계 (1/5 모형차륜)

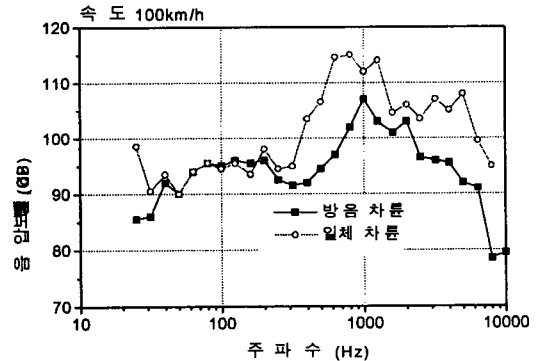


그림 6 전동음의 주파수분석결과 (1/5 모형차륜)

저감되어야 한다. 즉, 전동음이 저감된다는 것은 곧 차륜/레일의 진동이 저감된다는 것을 의미한다. 따라서 방음차륜은 차량의 진동과 지반진동(궤도진동)에도 상당한 저감효과가 있다.

3. 방음차륜의 소음진동 저감효과 시험방법 (3.4)

본 장에서는 방음차륜을 실차에 적용하기 위하여 수행하는 시험 항목과 그 목적에 대해 알아본다.

3.1 실험실 시험

새로운 방식의 차륜이 차량의 소음과 진동 및 궤도진동 등에 미치는 영향을 정밀하게 평가하기 위하여는 우선 기존차륜과 새로운 차륜의 동적 특성 및 음향특성을 평가해 보아야 한다. 기존차륜과 방음차륜의 음향특성을 실험실 수준에서 파악하기 위하여 다음과 같은 시험을 실시한다.

(1) 타격시험(답면상부 종방향, 차륜측면 횡방향)

타격시험의 목적은 두가지가 있다. 첫째는 타격음의 수준을 비교하는 것이고, 다른 하나는 차륜의 진동모드 특성을 파악하는 것이다. 타격음의 수준을 평가하기 위하여 그림 7과 같은 실험장치를 구성하여 시험을 실시한다. 이 시험에서부터 얻어지는 각각의 차륜에 대한 충격음 및 진동전달함수를 비교함으로써 새로운 차륜의 적용시 소음진동 저감효과를 사전에 대략적으로 파악해 볼 수 있다.

차륜의 모드 특성만을 비교할 경우에는 그림 8과 같은 실험장치를 구성하여 시험하는 것이 가능하다. 그림 9는 차륜의 모드형상에 대한 예를 보여주고 있다.

(2) 가진시험

이 시험은 차륜의 고유진동수를 비교하기 위하여 실시된다. 물론 타격시험에서도 어느 정도 차륜의 고유진동수가 파악되지만 타격에 의한 시험보다는 가진기를 이용하여 정현파 스위프(sweep)시험을 시행함으로써 정확한 진동전달함수와 고유진동수 및 비선형성등을 파악할 수 있다. 수평방향의 경우 윤축상태에서 차륜 측면을 수평가진하고 수직진동의 경

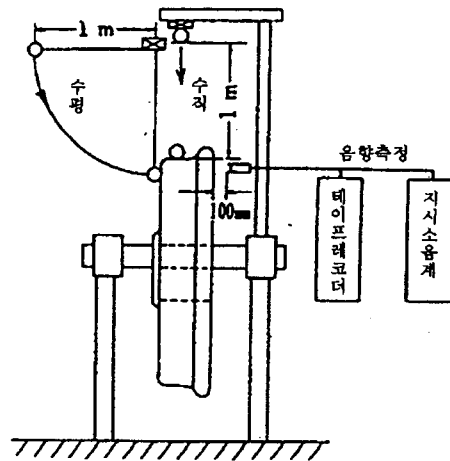


그림 7 타격시험장치

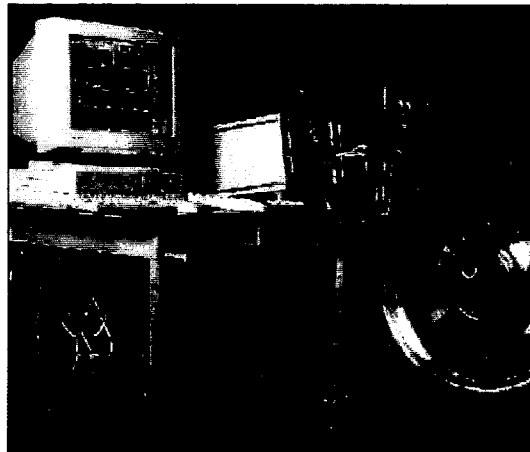


그림 8 차륜의 모드해석 실험장치

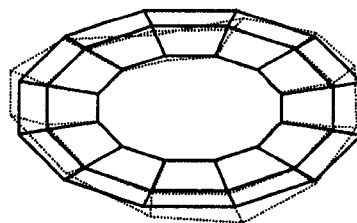


그림 9 실험적 모드해석을 통해 얻은 차륜의 모드형상 예

우 윤축상태에서 차륜 답면을 수직가진함으로써 주파수 분석에 의하여 평가한다.

(3) 차륜회전시험대 시험

이 시험은 차륜에 하중을 가한 상태에서

차륜을 회전시킴으로서 기존차륜과 새로운 차륜사이의 소음(소음수준 및 주파수 스펙트럼), 동적응력, 진동절연부(고무부)의 온도상승 등을 평가하기 위해 실시된다.

3.2 실차시험

실차시험은 최소한의 차량편성을 기본으로 하여 실시한다. 이는 시운전시의 비용절감도 관계가 있으며 승객의 탑승이 필요치 않으므로 최소한의 운행 가능한 차량편성으로 충분하기 때문이다. 한편, 차륜은 전 차량을 기존차륜이 있는 상태에서 시운전시험을 실시하고 그것을 기본 데이터로 확보한 후, 새로운 차륜으로 모두 교체하여 기존차륜에서와 똑같은 시험을 실시한다.

(1) 시험구간 및 속도조건

다양한 조건(속도, 궤도상태, 곡선반경, 터널 등)에서 시험을 수행하여 여러 측면으로 새로운 차륜의 소음진동 저감성능을 확인할 필요가 있다. 표 1은 방음차륜의 소음진동 저감효과를 파악하기 위하여 실시된 여러 가지 실차시험조건에 대한 예를 보여주고 있다.

(2) 측정항목 및 측정위치 (공차 및 영차)

시험은 공차시와 함께 영차시에도 실시된다. 영차시는 필요한 만큼의 인공중량을 차량에 적재하여 시험을 실시한다. 이 때 수행되는 시험항목으로는 다음과 같은 것이 있다.

- 차량내부소음 : 차량내부의 소음저감효과를 평가하기 위해 실시된다.

- 차량하부소음 : 차륜/레일 진동음의 저감효과를 평가하기 위해 실시된다.

- 궤도근방의 차외소음 : 이 항목 또한 차륜/레일 진동음의 저감효과를 평가하기 위해 실시된다. 이 항목은 철도연변의 환경소음과도 밀접한 관계가 있다.

- 대차중심부에 해당하는 차체바닥에서의 진동 : 이 시험은 새로운 차륜으로 인하여 차체바닥에서의 진동이 얼마만큼 저감되었는지에 대하여 파악하기 위해 실시된다. 차체바닥의 진동은 곧바로 승객에게 영향을 주기 때문이다.

- 차체 각부의 진동 : 차체바닥의 진동과 함께 차체의 안정성 향상 또는 저하 정도를 평가하기 위하여 차체의 여러곳에 센서를 설치하여 차체진동의 특성을 파악하기 위한 시

표 1 방음차륜의 소음진동 저감효과를 파악하기 위한 실차시험조건 예

구간	곡선반경	궤도상태	열차속도(km/h)
지하직선	-	콘크리트	20, 40, 60, 70
지하곡선	200m	콘크리트	20, 30, 40, 50
고가차선	-	벨러스트	20, 40, 60, 80,
전체차선	-	-	영업선 운전속도

험이다.

- 차륜 및 대차 각부의 진동 : 새로운 차륜에 의하여 차륜/레일 상호작용에 의한 진동의 저감효과를 평가하기 위하여 실시된다.

- 차륜의 횡압 및 수직압 : 이 항목은 차량의 탈선과도 직접적인 관련이 있으며, 차륜의 교체후 차량의 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위해 실시된다.

이와 같은 여러 가지 시험들은 시간이력곡선은 물론이고 협대역 및 광대역 주파수분석과 옥타브밴드분석을 실시하여 분석함이 바람직하다. 또한, 이때 소요되는 센서의 종류 및 수량은 필요한 만큼 충분히 하는 것이 좋다.

(3) 기타 항목

상기와 같은 측정항목 이외에도 새로운 차륜으로 교체한 효과에 대하여 충분한 평가를 하기 위한 목적으로 다음과 같은 사항을 수행하는 것이 바람직하다.

- 지반진동 : 차륜의 교체에 의해 수반되는 차륜/레일 상호작용에 의한 진동저감효과로 인하여 지반의 진동 또한 영향을 받는다. 이 시험은 철도주변에 위치한 거주민들의 주거환경평가를 위하여 실시된다.

- 지상구조물진동 : 지상구조물의 진동환경에 대한 평가를 위해 실시된다.

- 철도연변소음 : 철도연변 거주민들의 철도소음환경에 대한 영향을 평가하기 위하여 실시된다. 차륜/레일 진동음의 저감은 철도환경소음에 큰 영향을 미친다.

4. 방음차륜적용 실차시험^(5~7)

본 절에서는 방음차륜의 소음진동 저감효과를 파악하기 위한 실차시험을 실시한 결과에 대해 기술한다. 시험은 앞에서 언급한 방

법에 준하여 실시하되 우리의 현실에 적절한 항목을 선택하여 시험을 실시하였으며, 2회에 걸쳐 시험을 실시하였다.

4.1 차륜취부 현황 및 시험항목

(1) 차륜취부 현황

일체차륜에 의한 소음진동과의 비교를 위하여 방음차륜은 추진전동기가 부착된 M차 1량 및 트레일러 차량인 T차 1량에 취부하였으며, 나머지 차량에는 일체차륜을 취부하였다.

(2) 시험항목

실차시험은 진동시험 및 소음시험으로 분류하였으며, 진동시험으로는

- Axle box (상하, 전후, 좌우 : 3축)
- Bogie frame (상하, 전후, 좌우 : 3축)
- Car body (상하, 좌우 : 2축)

의 항목이 선정되었고, 소음시험으로는

- 차내소음
- 차량하부소음
- 차외소음

의 항목이 선정되었다.

4.2 시험결과 및 고찰

방음차륜의 소음진동 저감효과에 대해서는 M차 및 T차 모두에 대하여 분석을 실시하였다. 그러나 M차의 경우 견인전동기의 영향으로 인하여 방음차륜의 소음진동 저감효과를 충분히 파악할 수가 없었다. 따라서 본 글에서는 견인전동기의 영향이 없는 T차에 대해서만 살펴보기로 한다. 다음 그림 10은 차량이 75 km/h의 속도로 개활지를 주행할 때, 방음차륜을 취부한 차량과 일체차륜을 취부한 차량 사이의 차체상하진동을 비교한 것

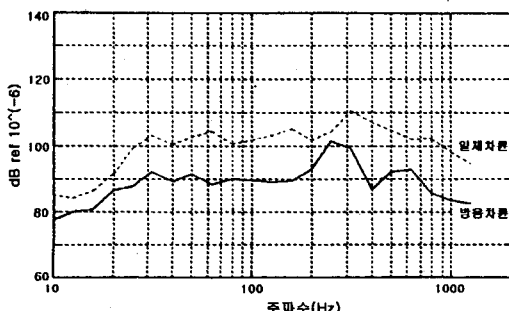


그림 10 방음차륜의 차체상하진동 저감효과

이다. 방음차륜을 취부한 차량이 일체차륜을 취부한 차량에 비하여 전주파수 영역에서 진동수준이 작게 나타나고 있으며, 대체로 5~10 dB의 저감효과를 보이고 있다.

그림 11은 차량이 60 km/h의 속도로 지하터널 속을 주행할 때, 20초 정도의 시간 동안 차륜에 가깝게 위치한 마이크로폰에서 습득한 차량하부소음에 대한 방음차륜의 저감효과를 나타내고 있다. 대체로 3 dB 정도의 소음저감효과를 보이고 있음을 알 수 있다.

한편, 그림 12는 차량이 80 km/h의 속도로 개활지를 주행할 때, 45초 정도의 시간 동안 차내 중앙 1.6 m 높이에 위치한 마이크로폰으로부터 습득한 차내소음에 대한 방음차륜의 저감효과를 보여주고 있다. 약 6 dB 정도의 소음저감효과가 있음을 알 수 있다.

앞에서 살펴본 바와 같이 방음차륜의 소음진동 저감효과를 파악하기 위하여 실시된 실차시험결과 방음차륜은 전동차의 소음진동 저감효과에 상당한 효과가 있는 것으로 파악되고 있다. 그러나 지금까지의 시험결과는 차량 1량에 대한 효과검증일 뿐이고 차량 1편성(차량 8량 또는 10량 편성) 전체에 방음차

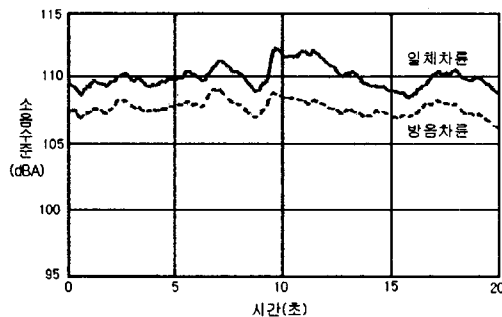


그림 11 방음차륜의 차량하부소음 저감효과

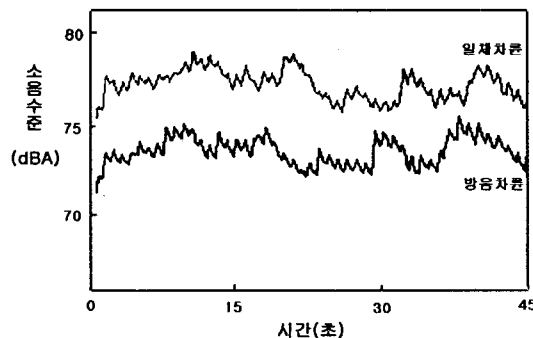


그림 12 방음차륜의 차내소음 저감효과

륜을 취부하여 수행한 시험은 아직 수행되지 않고 있다.

5. 맺음말

본 글에서는 철도차량의 소음에 대한 방음차륜의 저감효과에 대하여 살펴보았다. 특히 서울시의 지하철에 대한 실차시험을 통하여 방음차륜이 전동차의 소음과 진동의 저감에 상당한 효과가 있다는 것을 파악하였다. 그러나 방음차륜을 서울시 지하철차량과 같은 중형(重型)차량에 바로 적용하는 것은 다소 시기상조이며 여러 가지 예상되는 문제점들을 풀어 나가야 한다. 예상되는 문제점들을 대략적으로 열거하면 다음과 같다.

- 방음차륜의 안전성
- 방음차륜의 유지보수성
- 경제성
- 내구성(특히 고무부분)

이들 중에서 안전성에 대한 문제는 반드시 짚고 넘어가야 할 문제이다. 1998년 6월 3일 오전 11시 기존선 개량구간인 하노버~함부르크 구간을 시속 200 km의 고속으로 주행하던 독일의 ICE 제 884 열차가 하노버 북쪽 50 km 지점에서 탈선하면서 고가도로 교각과 충돌하여 승객 100여명이 사망하고 중경상자가 200여명에 이르는 대형사고가 발생하였다. 이 사고의 원인은 차륜에 있는 것으로 알려지고 있으며, 이 차량에 사용된 차륜

은 독일 VSG사의 방음차륜으로서 다소 취약한 구조로 되어 있는 것으로 알려져 있다. 현재 방음차륜을 생산하고 있는 일본 및 유럽 각국의 차륜제작사에서는 보다 안전한 방음차륜을 개발, 생산하는 데 주력하고 있다.

참고 문헌

- (1) 도서출판 세화, 1992, 회전기계의 진동 소음 : 그 원인과 대책·해석·조사·진단
- (2) 佐藤 潔, 佐川明朗, 1995, "彈性車輪で騒音・振動を減らす", RRR, 8月号, pp. 17~20.
- (3) 帝都高速度交通營團, 騒音・振動対策研究會報告書.
- (4) S. Cervello and A. Bracciali, "Development of a Vibro-Acoustical Methodology for the Design and Validation of Low Noise Railway Wheels", WCRR97.
- (5) 한국철도기술연구원, 1997, 방음차륜 적용 전기동차의 소음진동 1차 및 2차시험 결과보고서.
- (6) 한국철도기술연구원, 1998, 지하철 5호선 저소음 탄성차륜 적용 차량실내소음 시험결과 보고서.
- (7) 한국철도기술연구원, 1998, 지하철 5호선 저소음 탄성차륜 적용 차량실내소음 2차 시험결과 보고서.