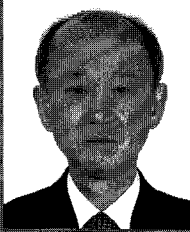


철도 선로연변 환경소음의 음원과 저감기술



서 사 범
서현기술단 부사장
공학박사 · 철도기술사

I. 머리말

환경문제는 인류가 해결하여야 할 큰 과제의 하나이다. 철도에서도 환경문제는 무시할 수 없는 큰 과제이며, 환경에 친화적인 철도를 실현하도록 사회에서 강하게 요구하고 있다. 철도의 속도향상을 실현하고, 환경에 친화적인 철도를 실현하기 위해서는 열차속도와 함께 증대되는 철도소음의 현상을 해명하고, 이들을 완화/저감하는 대책을 개발할 필요가 있다. 철도 선로연변의 소음을 저감하기 위해서는 우선 먼저 고속철도, 일반철도에 관계없이 소음이 어디에서 발생되고 있는가, 발생되고 있는 음이 연선소음에 얼마만큼 기여하고 있는가를 파악하도록 음원해석을 할 필요가 있다. 그리고 그 결과에 기초하여 기여도가 높은 음원부터 저감할 필요가 있다. 하나의 음원을 저감할 수 있으면, 계속하여 그 다음으로 큰 기여도를 가진 음원을 평가할 필요가 있다. 음원해석은 소음연구, 소음저감방책의 개발에서 빠뜨릴 수 없으며, 항상 그 해석/예측 방법정밀도의 향상이 요구된다.

본고에서는 고속철도와 일반철도 각각의 선로연변 환경소음의 음원성질과 저감기술을 논의하고, 일반철도에서 레일로부터의 전동음을 저감하는 기술에 관하여 논의한다.

II. 고속철도 선로연변 환경소음의 음원과 저감기술

1. 고속철도 소음의 음원과 대책

고속철도 선로연변의 소음은 차륜/레일의 진동으로 발생하는 전동음, 콘크리트 고가교 등과 같은 구조물의 진동으로 발생하는 구조물 소음, 팬터그래프를 비롯한 차체각부와 공기흐름의 상호작용으로 발생하는 공력소음, 팬터그래프가 이선할 때에 발생하는 스파크 음, 톱니바퀴 장치 등의 차량기기에서 발생하는 음 등으로 구성되며 이들을 발생부위별로 보면 그림 1과 같이 분류할 수 있다. 이 장에서는 고속철도 소음을 구성하는 주된 음원에 대하여 음원의 성질과 저감대책을 개별로 논의한다.

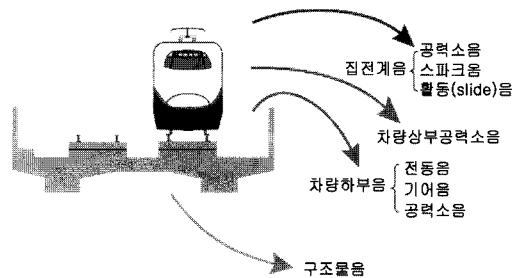


그림 1. 고속철도소음의 음원

2. 전동음

전동음은 차륜/레일 담면에 있는 미소한 진폭의 요철에 기인하는 가진력(加振力)으로 인하여 차륜과 레일이 진동하여 발생된다. 따라서 차륜과 레일의 표면상태가 전동음의 크기를 결정하는 주요한 인자로 된다. 고속철도 차량은 일반적으로 차륜의 담면 상태가 양호하기 때문에 전동음의 크기가 레일두부상면의 상태에 크게 의존한다고 한다. 전동음 대책으로서 레일의 표면을 평활하게 하는 대책(레일연삭)이 실시되고 있으며 큰 효과가 얻어지고 있다.

3. 구조물 소음

구조물 소음은 차륜/레일 간의 상호작용으로 발생한 진동이 콘크리트 고가교 등의 구조물로 전해져 방사(放射)되는 음이다. 구조물 소음의 크기를 결정하는 인자로서는 차량의 운하중, 차륜/레일의 표면상태, 열차속도, 진동 전파경로의 조건 등이 열거된다. 차량의 경량화나 전동음 대책으로서 실시되는 레일연삭은 구조물에 작용하는 가진력을 저감하므로 구조물 소음의 저감에도 기여하게 된다. 구조물 소음에 대한 또 하나의 저감방법은 차륜/레일 시스템의 진동이 콘크리트구조물로 전파되는 경로에서 진동을 차단하는 방법이다. 예를 들어, 자갈궤도의 경우에 도상자갈과 콘크리트구조물 사이에 까는 밸리스트 매트, 침목저면에 고무매트를 붙인 탄성침목 등이 고속철도에서 실용화되고 있는 주된 대책이다. 또한, 레일체결장치에서 스프링정수가 작은 레일패드 사용하는 방진방법도 효과가 있다.

4. 차량 공력소음

공력소음은 고속으로 주행하는 차량 주위의 공기흐름이 시간적으로 변동함에 따라 발생하는 음으로 고속철도의 등장과 함께 새로이 문제로 된 소음이다. 공력소음의 음향파워는 열차속도의 약 6제곱에 비례하며, 다른 음원에 비하여 높은 속도의존성을 갖고 있다.

공력소음의 음원은 지향성 마이크로폰 등을 이용한 측정으로 음원위치가 밝혀지게 됨에 따라 특정할 수 있게 되었다. 차량형식에 따라 소음레벨의 변동패턴이 다르지만 그 차이는 각 차량의 형식이나 표면상태 등의 차이에 대응하고 있으며 이들의 측정결과에 따라 공력소음의 음원이 밝혀져 왔다. 또한, 풍동시험으로 상세한 공력음원 분포를 얻는 시도도 이루어지고 있다. 풍동시험으로 얻어진 차량

공력음원 분포를 보면, 차량표면 각각의 국소적으로 고르지 않은 상태 때문에 공력소음이 현저히 발생되고 있음을 알 수 있다. 지금까지의 실제차량 시험과 풍동시험으로 확인되고 있는 고속철도 차량의 주된 공력음원으로서 집전시스템, 차량간극, 선두부분, 급배기용 루버(louver)구조, 특고압 모션 케이블 헤드, 대차부분 등이 열거된다.

일본의 새로운 고속철도차량에서는 집전시스템 공력소음의 저감이 진행되고 있으며, 기타의 음원에 대하여도 급배기용 루버구조의 차량하부로의 이설, 특고압 모션의 차량 건넌 장치의 소형 조인트化 등의 대책이 이루어지고 있다. 차량 전체주위를 포장함으로써 차량 간극부분으로부터의 공력소음도 대폭으로 저감되고 있다. 이들 대책의 결과, 지상의 지점에서 조망할 수가 있는 지붕 위의 고르지 않은 상태가 상당히 작게 되어 차량에서 발생하는 공력소음이 지상의 지점에 미치는 기여도는 대폭으로 감소되었다고 한다.

5. 집전시스템 소음

팬터그래프 부위에서 발생하는 음을 총칭하여 집전시스템 소음이라고 부른다. 집전시스템 소음은 집전시스템 공력소음, 팬터그래프의 이선으로 인하여 생기는 스파크 소음 및 팬터그래프와 전차선의 활동(滑動, slide)에 따른 활동소음으로 성립되고 있다. 이 중에서 활동 소음은 속도 의존성이 작기 때문에 200 km/h를 넘는 속도대역에서는 다른 두 가지에 비하여 작으며 예전에는 주요한 음원이었던 스파크 소음도 발생방지대책의 시행으로 크게 줄었다. 그 결과, 집전시스템 소음의 주음원은 공력소음으로 이행되고 있다.

집전시스템 공력소음이 지상지점에서의 소음에 크게 기여하는 것은 팬터그래프가 차량지붕에서 크게 돌출되어 있기 때문에 흐트러짐이 작은 공기흐름이 직접 부딪히는 점, 팬터그래프가 가는 봉상(棒狀)의 부재로 구성되어 있는 점, 차량의 높은 위치에 있기 때문에 방음벽을 이용한 차폐가 곤란하다는 점 등에 기인한다. 일본에서는 집전시스템 공력소음 대책으로서 팬터그래프에 부딪히는 공기흐름의 제어와 발생된 음의 차폐를 의도한 팬터그래프 커버가 개발되어 일정한 효과를 올렸다고 한다. 그 후에, 속도가 더욱 향상되는 과정에서 팬터그래프 커버 자체로부터도 공력소음이 발생됨을 알게 되어 팬터그래프 커버를 이용하

는 대책으로는 한계가 있음이 밝혀지게 되었다. 또한, 저소음 팬터그래프의 개발 및 애자(碍子) 커버의 채용, 저소음 팬터그래프의 개발 + 애자(碍子) 커버 + 2면 측벽의 조합 등이 대책이 실용화되어 집전시스템의 저소음화가 진행되었다.

6. 차음/흡음대책

발생된 소음의 차폐, 흡수에 대하여는 방음벽 대책이 널리 이루어지고 있다. 또한, 저감효과를 향상시킬 목적으로 여러 가지 구조의 방음벽에 대한 연구/개발이 이루어지고 있다. 고속철도에서 이용되고 있는 방음벽에는 예를 들어 직립형, 역L형(흡음재 부착 포함)이 있지만, 간섭형, 선단 분기형 등의 방음벽도 실용화되고 있다.

7. 고속철도 소음의 음원별 기여도 추이의 사례

고속철도를 처음 건설한 일본의 경우에 고속철도 개업 초기에는 방음벽이 설치되어 있지 않아 선로연변에서의 소음은 거의 전동음을 주성분으로 하는 차량하부소음의 기여 때문이었다고 한다. 그 후에 방음벽의 설치나 차륜 답면 상태의 개선으로 전동음을 비롯한 차량하부소음이 저감된 결과, 전동음과 함께 팬터그래프의 스파크 소음이 고속철도 소음의 중심으로 되어 왔다. 또한 그 후에 팬터그래프를 포함한 차량상부로부터의 공력소음의 기여도가 눈에 띄어온 것은 레일삭정으로 전동음이 대폭으로 감소되고 또 하나의 큰 음원이었던 스파크 소음도 특고압 모션 대책으로 거의 없게 되었기 때문이었다.

공력소음은 높은 속도 의존성을 가졌기 때문에 속도를 향상시키기 위해서는 그 대책이 불가결하다는 점을 인식하게 되었다. 예를 들어, 240 km/h를 넘는 주행속도의 차량에서는 차량상부를 평활화함에 따른 공력소음의 저감, 저소음 팬터그래프를 개발함에 따른 집전시스템 공력소음 저감 등의 새로운 소음저감 기술을 채택하여 소음레벨을 저감시키고 있다. 이들의 차량에서는 집전시스템을 포함한 차량상부에서 발생하는 공력소음의 기여도와 전동음을 비롯한 차량하부에서 발생하는 소음의 기여도는 길항(拮抗)되고 있다. 또한, 차량하부에서 발생하는 소음의 주체는 지금까지는 전동음이라고 생각하고 있었지만 고속영역에서는 차량하부에서 발생하는 공력소음이 지상지점의 소음에 영향을 주는 것은 아닌가라고 판단되는 데이터도 있다.

8. 향후 대책기술의 전망

현 시점에서 고속철도 소음의 구성은 차량하부에서 발생하는 소음과 집전시스템을 포함한 차량상부에서 발생하는 소음의 기여도가 길항하고 있으며, 향후의 소음저감을 위해서는 각각의 음원에 대하여 대책을 시행할 필요가 있다. 예를 들어, 에어로 다이내믹形 선두형상의 채용, 전체 주위의 포장이나 집전시스템 부분의 저소음화, 지붕 위의 철저한 평활화 등의 대책에 더하여 차량하부에서도 대차 부분 소음의 차폐를 고려한 대차 커버의 채용, 바닥아래(床下)의 철저한 평활화 등이 고려된다. 또한, 팬터그래프 수의 삭감(경부고속철도의 경우에 고속주행 시는 전후의 2개 중에 후부의 1개만 사용)과 차체하부 흡음 등의 대책도 고려된다.

차음/흡음 대책으로서 방음벽의 높임은 소음저감에 효과가 있지만 고가교 강도상의 문제 등 때문에 단순히 대폭적인 높임은 곤란한 상황에 있다. 한편, 소음저감효과를 늘리기 위하여 선단부분의 형상을 궁리한 특수형상 방음벽도 개발되고 있으며, 이들은 차량하부에서 발생하는 소음에 대하여는 방음벽의 높이를 그만큼 올리지 않고서도 높은 방음벽 이상의 소음저감효과를 기대할 수 있다. 다만, 이들의 방음벽 대책은 차량상부에서 발생하는 소음에 대하여는 효과가 작기 때문에 각각의 지점에서 소음의 음원별 기여도를 파악하면서 대책을 진행할 필요가 있다.

Ⅲ. 일반철도 선로연변 환경소음의 음원과 저감기술

1. 일반철도 소음의 현상

일반철도에서는 차륜/레일의 진동으로 생기는 전동음, 강형교량이나 콘크리트 고가교 등에서의 구조물 소음 이외에 급곡선 구간에서의 스킵소음, 정척레일 구간에서의 레일이음매부분 충격음, 동력차 구동장치로부터의 음, 톱니바퀴 장치의 음, 보조기기의 음 등이 발생되며, 그 음원은 다기에 걸쳐 있다. 또한, 일반철도의 열차는 고속철도에 비하여 저속으로 주행하므로 팬터그래프나 차량 등에서 생기는 공력소음이 연변소음에 미치는 영향은 작다.

일반철도의 선로연변에서 관측되는 소음은 차량이나 지상의 조건에 따라서 크게 변화한다. 예를 들어, 전동차가

90 km/h로 주행 시에 근접 측 궤도중심에서 수평거리 12.5 m에서 측정한 소음레벨(L_{pASmax} : 시간중첩특성 S에서의 최대치)을 지상조건별로 분류하여 정리한 사례의 결과를 보면, 평지구간(자갈궤도, 방음벽 없음)이 82~87 dB, 고가교구간(자갈궤도, 방음벽 있음)이 71~76 dB, 고가교구간(슬래브궤도, 방음벽 있음)이 75~80 dB이었다. 소음레벨의 분산이 큰 원인의 하나는 고속철도에 비하여 일반철도에서의 레일이나 차륜 표면상의 요철상태에 분산이 크기 때문에 차륜/레일요철에 기인하여 발생하는 전동음의 크기가 다른 점이다. 또한, 고가교 구간에서 자갈궤도에서의 소음레벨이 슬래브궤도보다도 작은 것은 도상자갈에서의 흡음효과에 따른 것이다.

2. 일반철도 소음의 주된 음원

콘크리트 고가교(장대레일 구간)를 전동차가 주행하는 경우에는 전동음, 주전동기 팬 음과 구조물 소음이 주요한 음원이다. 예로서 선로연변 소음에 대한 3개 음원의 기여를 추정할 예를 소개한다. 예측모델에 따른 시간중첩특성 S에서의 소음레벨 최대치, 고가교 높이가 7.4 m, 방음벽 높이가 1.4 m, 자갈궤도, 편성 6M4T, 기어비가 5.6, 속도가 120 km/h인 조건에서 구한 일반철도 소음의 12.5 m 지점에서의 음원별 기여도는 다음과 같았다. 여기서 음원별 기여도는 전체 음에서 점하는 각 음원의 에너지 비율을 나타낸 것이다. 열차 A(外扇形 팬)는 78.5 dB로서 주전동기 팬 음이 83%, 전동음이 15%, 구조물 소음이 2%, 열차 B(内扇形 팬)는 72.5 dB로서 주전동기 팬 음이 33%, 전동음이 59%, 구조물 소음이 8%, 열차 C(높은 헤드扇形 팬)는 71 dB로서 주전동기 팬 음이 9%, 전동음이 77%, 구조물 소음이 14%이었다. 외선형(外扇形) 모터(주전동기의 냉각용 팬이 모터 프레임의 외측에 있는 타입)를 탑재한 구형의 전동차에서는 주전동기 팬 음이 가장 큰 음원이었다. 새로운 차량에서는 냉각용 팬을 모터 프레임의 내측에 설치하는 등, 팬 구조의 개량이 진행되어 주전동기 팬 음이 저감되었다. 그 결과, 근접 측 궤도중심에서 12.5 m 떨어진 지점에서의 소음에서는 전동음의 기여가 상대적으로 크게 되어 있다.

3. 전동음

제2장에서도 언급하였지만, 전동음은 진폭이 수 마이크로 정도인 차륜/레일 표면요철에 기인한 가진력(加振力)으로

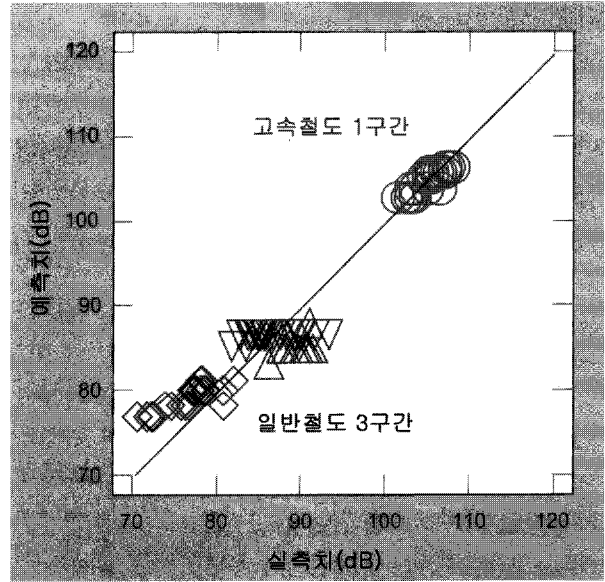


그림2. 전동음에 대한 실측치와 예측치의 비교사례(레일근방 지점)

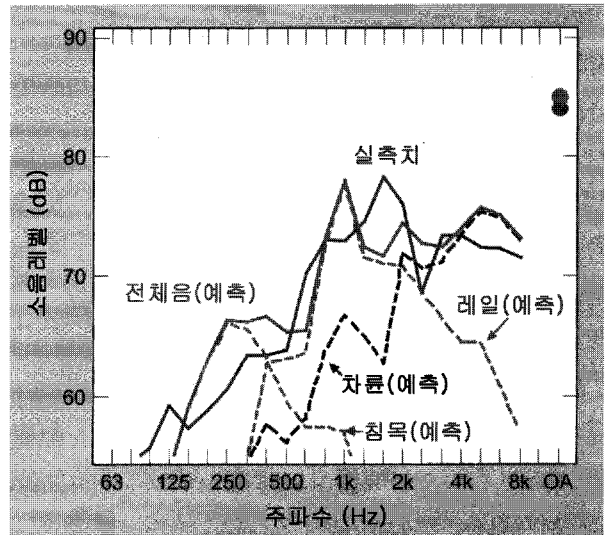


그림3. 전동음의 음원별 기여도의 예(일반철도, 90 km/h, 자갈궤도, 레일 근방 지점)

차륜과 레일이 진동하여 발생된다. 전동음의 크기를 결정하는 주된 요인은 차륜/레일 표면상의 요철이다. 전동음의 파워는 속도의 2~3 제곱에 비례하여 크게 되며, 이 속도의 존성은 차륜/레일표면의 요철 분포에 따라 결정된다. 또한, 전동음의 크기를 결정하는 또 하나의 요인은 궤도/차륜의 조건이다. 예를 들어, 궤도를 구성하는 레일체결장치의 스프링정수 등은 궤도의 진동특성에 영향을 주고 있다.

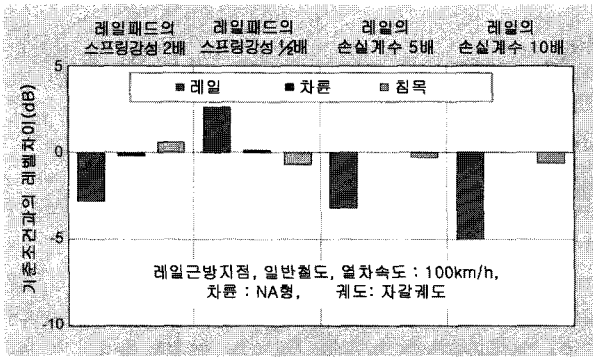


그림 4. 궤도에 관계되는 파라미터와 전동음의 관계의 예(예측치)

유럽에서는 이러한 전동음을 평가하기 위하여 TWINS(Track-Wheel Interaction Noise Software) 등의 이론모델이 구축되어 있다. TWINS는 전동음의 발생 메커니즘에 따라 차륜, 레일표면상의 요철이나 진동특성 등을 조합하여 차륜, 레일과 침목의 진동 및 각각에서 방사되는 음을 예측하는 구조로 되어 있다. 그림 2는 일반철도와 고속철도에서 측정된 차륜/레일의 요철이나 진동 파라미터를 TWINS에 적용하여 레일근방 지점에서의 소음을 예측한 결과의 예이다. 이 그림에서 실측치와 예측치는 대체로 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 3은 일반철도 차량이 자갈궤도 구간(평지, PC침목)을 주행하는 경우의 실측치와 예측치에 따른 각 음원의 기여도를 나타낸 것이다. 전체 음에 관하여 실측치와 예측치는 대체로 일치하고 있다. 또한 500~1,600 Hz에서는 레일이 주요한 음원이며, 2,000 Hz 이상에서는 차륜이 전체 음에 대하여 큰 영향을 갖고 있음을 알 수 있다.

전동음을 저감하기 위해서는 음원인 차륜과 레일의 진동을 억제하는 것이 유효하다. 이를 위해서는 ① 레일/차륜 간에 작용하는 가진력을 작게 하는 것이나 ② 부재를 제진(制振)하는 것이 필요하게 된다. ①의 경우에는 차륜 전삭(轉削)이나 레일 연삭(研削)으로 차륜/레일표면을 평활하게 하는 것이 유효하다. ②의 대책에서는 레일이나 차륜을 구성하는 부재의 진동특성을 바꾸어 부재자체의 진동이나 진동전파를 억제하는 것이 필요하다. 그림 4는 TWINS를 이용하여 궤도를 구성하는 부재의 스프링정수가 전동음에 미치는 영향을 평가한 예이다. 레일패드 스프링강성의 조정이나 레일 댄퍼 등에 따른 레일 손실계수의 증대가 레일 방사소음을 저감하는 것을 알 수 있다.

4. 주전동기 팬음

주전동기 팬음은 일반철도 전동차에서 구동모터를 탑재하는 차량에 특유한 소음이며, 주전동기와 동일 축에서 고속 회전하는 냉각용 팬에서 발생하는 일종의 공력소음이다. 그림 5는 레일근방에서의 소음레벨의 시간변동에서 전동차(M차)와 부수차(T차)에 대응하는 피크레벨의 예를 나타낸다. M차 대응의 소음레벨은 T차에 비하여 크며, 이 레벨차이는 M차의 주전동기 팬음에 기인한 것이다. 또한, M차 대응의 소음레벨은 속도의 6 제곱에 비례하며, 이것은 주전동기의 팬음이 공력소음이라는 것을 나타내고 있다.

주전동기 팬음의 크기는 팬의 형식과 냉각용 팬의 회전수로 결정된다. 팬은 모터와 동일 축에서 회전하는 구조로

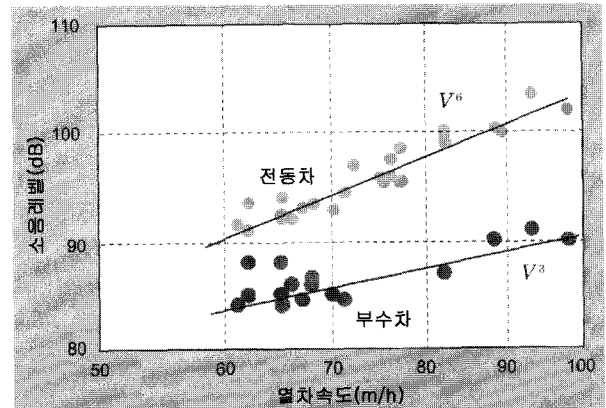


그림 5. 레일근방에서 소음의 속도특성의 예(外扇形 팬, 레일근방 지점)

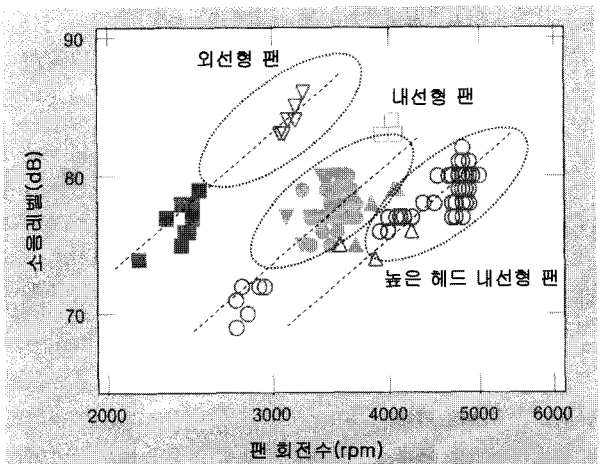


그림 6. 모터 팬 회전수와 레일근방 지점에서의 M차 대응 소음레벨의 예

되어 있기 때문에 그 회전수는 기어比와 열차속도에 비례하여 크게 된다. 일반적으로 도시철도 차량에서는 기어比가 크고 또한 최근의 VVVF 제어 차는 주전동기를 빠른 회전으로 이용하는 경향이 있기 때문에 상대적으로 주전동기 팬음이 크게 되어 있다.

주전동기 팬음을 저감하기 위해서는 팬을 개량할 필요가 있다. 팬의 설치위치나 형식을 변경함으로써 10~15 dB 정도의 저감이 실현되고 있다(그림 6). 또한 최근에는 외기(外氣)가 주전동기 내로 유통되지 않는 구조를 가진 전폐형(全閉形) 주전동기의 개발이 진행되고 있다.

5. 구조물 소음

구조물 소음은 레일/차륜 간의 상호작용으로 생긴 가진력이 레일, 침목 등을 경유하여 구조물을 진동시킴에 따라 발생된다. 구조물 소음은 콘크리트 교량과 강교(합성형을 포함)로 대별되며 구조물 소음은 일반적으로 후자가 큰 경향으로 있다.

강교에서의 구조물 소음은 강교의 형식에 따라 레일/침목을 지지하는 거더 부재(중형이나 박스 거더)나 방진(防塵) 판이 주된 음원으로 되어 있다. 그림 7은 강교 구간에서의 소음의 주파수분포의 예이다. 지상 12.5 m 지점과 중형 근방지점에서의 소음은 거의 같은 경향이며, 연변소음에서 강교를 구성하는 중형 등 부재의 진동으로부터의 소음의 영향이 큰 것을 알 수 있다.

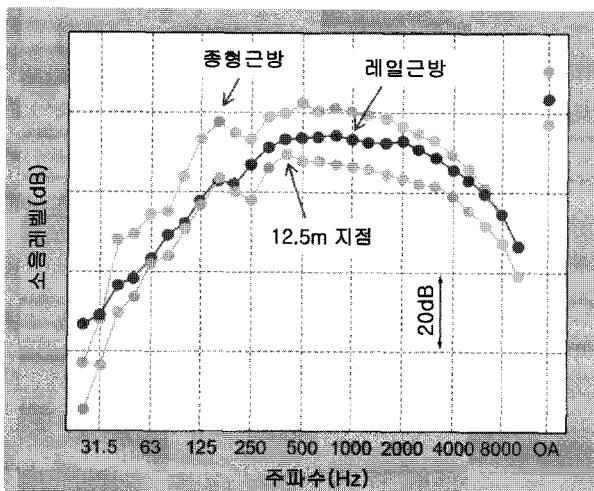


그림 7. 하로트러스 교량에서 소음의 주파수 분포의 예(일반철도, 105~110 km/h)

강교의 구조물 소음을 저감시키기 위해서는 ① 차륜/레일 간에서 생기는 가진력의 저감, ② 레일/구조물 간의 진동전파의 차단, ③ 거더 부재의 제진(制振)이 유효하다. ①의 경우에 차량의 경량화나 전동음 대책으로서 시행되고 있는 차륜/레일표면의 평활化 등이 유효하다. ②의 대책에서는 침목 등의 하부에 탄성재 등을 설치함으로써 구조물로의 진동전달을 방지한다. 최근에는 예를 들어 플로팅 궤도의 도입이 진행되는 사례도 있다. ③에서는 교량부재의 제진(制振)도 효과적이며, 고무계열 제진재나 제진 콘크리트를 이용하는 대책이 실용화되고 있다. 또한, 강교의 교량하면에 차음 판을 설치하여 선로연변에 대한 거더 부재로부터의 소음 전파를 방지하는 사례도 있다.

콘크리트 교량에서의 구조물소음도 마찬가지로 레일/차륜 간의 상호작용으로 생기는 가진력으로 인하여 구조물이 진동함으로써 발생된다. 이 구조물에 관하여도 상기와 같이 ①, ②의 대책이 유효하며, 소음저감의 노력이 진행되고 있다.

IV. 레일에서 발생하는 전동음의 저감기술

1. 전동음

(1) 전동음의개요

철도에서 발생하는 소음에 대한 저감대책은 현재 중요한 과제의 하나이며 그 소음 중에는 전동음이 있다. 제2장과 제3장에서도 언급하였지만, 전동음이란 차륜과 레일의 표면에 존재하는 미소한 요철로 인하여 열차주행 시에 차륜과 레일 양쪽에서 발생하는 방사(放射)소음이며 차륜이 레일이음매를 통과할 때에 발생하는 충격음도 이 전동음에 포함된다. 차륜과 레일 모두 금속부재이기 때문에 전동음이 크게 된다. 금속부재에 충격력을 가하면 큰 진동/소음이 발생하는 것은 잘 알고 있을 것이다.

지금까지의 차량에서는 모터 등의 기기에서 소음이 크게 발생되어 왔으므로 이들의 소음이 소음성분에서 큰 비율을 점하였기 때문에 전동음이 그다지 눈에 띄지 않았다. 그러나 최근의 차량은 기기의 저소음화가 진행되어 전동음의 비율이 상대적으로 증가하였기 때문에 전동음 대책의 중요성이 높아지고 있다.

(2) 레일이음매의소음

열차가 레일이음매를 주행하면 차륜이 레일의 간극 위를 통과하게 되므로 레일표면이나 차륜표면의 작은 요철의 경우보다도 큰 충격력이 가하여지고, 발생하는 진동/소음도 크게 된다.

이와 같은 레일이음매에 대한 진동/소음의 대책으로서 이음매 부분을 용접하여 간극을 없애는 레일의 장대화로 진동/소음의 저감을 도모하는 대책을 진행하여 왔다. 그렇지만 일반철도의 경우에는 이와 같은 레일의 장대화로도 다음과 같은 몇 가지 이유 때문에 레일의 이음매를 완전히 없애기가 곤란하다.

- ① 열차의 위치를 검지하기 위해서는 궤도에 전류가 흐르는 궤도회로를 구성한다. 그러기 위해서는 레일에 전기의 절연개소를 설치하여 일정구간마다 회로를 구분할 필요가 있다. 이곳에는 레일이음매를 남겨 절연재를 삽입한다(절연이음매).
- ② 레일은 계절의 온도변화에 따라 신축하고 그 때마다 길이(軸)방향으로 힘(軸力)이 작용한다. 레일의 장화에 따라 이 축력도 증가하기 때문에 축력을 줄여주기 위하여 장대레일 양단에 신축이 가능한 레일이음매 개소를 설치할 필요가 있다(신축이음매).
- ③ 규모가 작은 무도상 강교 위 등에서는 축력을 버틸 수 없는 등의 이유 때문에 레일을 장대화할 수 없는 개소도 있다.

이상과 같은 이유 때문에 레일을 장대화하여도 궤도상에는 이음매가 존재하고 그곳에서 발생하는 전동음의 대책은 중요한 과제로 되어 있다.

(3) 지금까지의 전동음대책의과제

전동음에 대한 지금까지의 주된 대책으로서 방음벽 등을 설치하여 왔다. 방음벽의 설치는 이음매개소나 그 이외의 일반구간을 불문하고 유효한 대책으로서 고려된다. 그렇지만 방음벽의 설치에는 많은 노력이나 큰 비용이 필요하다. 또한, 철도 선로연변의 고층주택에 대한 대책에서는 방음벽의 높이를 높게 할 필요가 있지만 선로연변에 설치할 수 있는 방음벽의 높이에는 구조상의 제한이나 일조권 등의 한계가 있다.

방음벽 이외의 전동음 대책도 실시되고 있지만 이들의 대책에도 시공비나 효과의 면에서는 각각 과제가 있다. 그

때문에 간단히 시공할 수 있는 유효한 대책의 개발이 요구되고 있다.

그러므로 전동음 중에 레일에서 발생하는 방사소음을 착안하여 그 방사소음을 저감하는 재료(방음재)를 레일근방에 설치하는 것이 전동음의 저감에 유효하지 않을까라고 생각되었다. 이하에서는 현재 일본에서 연구가 진행되고 있는 2 종류의 방음재에 대하여 소개한다.

2. 일반구간용 레일방음재

일반구간용 레일방음재(이하에서는 '레일방음재'라고 약칭)는 레일두부를 제외한 면을 피복하여 레일로부터의 방사소음을 가두도록 한 것이다. 경량이고 레일에는 끼워 넣을 뿐인 구조이며, 방음벽보다 간단히 시공할 수 있고 용이한 탈착으로 레일점검 등의 메인テナンス에도 대응할 수 있다.

(1) 레일방음재의구조

개발된 레일 방음재의 구조를 그림 8에 나타낸다. 레일 방음재는 이 그림과 같이 내층(레일 측)과 외층의 2층으로 된 적층구조로 되어 있다. 그리고 체결장치 사이마다 방음재 2채 1조로 레일을 피복하고, 고정블록을 이용하여 그 외층을 볼트로 고정한다. 내층에는 에틸렌폴로피엔 고무(EPDM)의 발포(發泡)체를, 외층에는 제진(制振)강판을 이용하고 있다. EPDM의 발포체는 유연하고 진동을 흡수하는 성능이 있기 때문에 이에 따라 레일의 진동이 외층으로 전하는 것을 방지한다.

외층의 제진강판은 레일의 진동이 전하여져 외층자체가

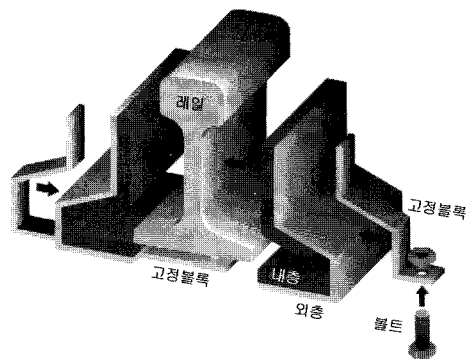


그림 8. 레일 방음재의 구조

진동하여버리면 거기에서 방사소음이 발생되므로 진동의 감쇠성능을 기대하여 채용하였다.

(2) 레일방음재의효과

실제의 열차 주행 시에 레일 방음재의 효과를 검토하기 위하여 실제궤도에 레일 방음재를 설치하여(그림 9) 소음을 측정된 결과를 소개한다.

그림 10에 열차통과 시 레일근방(근접 측의 궤도중심으로부터의 거리: 6.25 m, 레일로부터의 높이: 0.45 m)에서 소음레벨의 시간파형의 예를 나타낸다.

이 그림에서 각 피크는 차륜이 통과한 때의 소음을 나타내며, 피크가 큰 것은 모터를 탑재한 차량(M차), 작은 것은 모터를 탑재하지 않는 차량(T차)의 통과를 나타낸다. 레일 방음재의 설치에 따라 열차통과 시에 거의 전역(全域)에서 소음레벨이 저감되어 있지만, 특히 차륜 사이에서의 저감량(약 5 dB)이 큰 것을 알 수가 있다. 이것은 차륜 사이에서의 소음이 모터음 등의 차량기음보다도 전동음의 쪽이 기여도가 크기 때문에 레일 방음재의 효과가 크게 되어 소

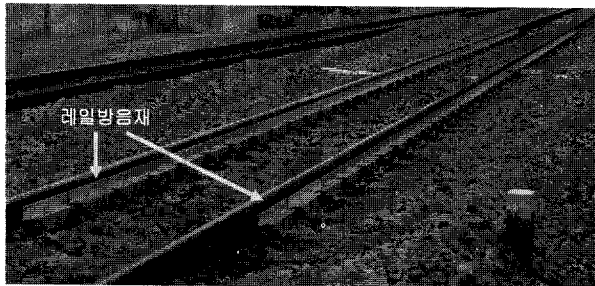


그림 9. 레일방음재의 설치상태

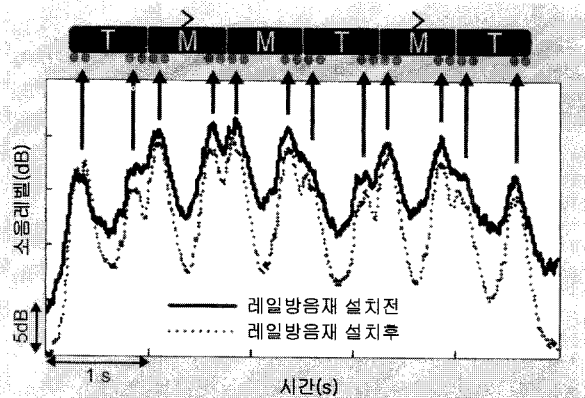


그림 10. 소음레벨의 시간파형의 예

음의 저감으로 이어진 것이라고 생각된다.

다음에 상기의 그림에 나타난 열차의 통과시간 전체를 대상으로 하여 1/3 옥타브 밴드 분석을 한 결과를 그림 11에 나타낸다. 1/3 옥타브 밴드 분석이란 측정된 소음이 어떠한 음색(주파수)의 음인가를 분석하는 것이다.

1/3 옥타브 밴드 분석의 결과에서 레일 방음재의 설치에 따라 500 Hz 이상의 소음이 저감되고, 저감량이 가장 큰 1 kHz 부근에서는 약 3 dB만큼 저감되어 있음을 알 수 있다. 과거의 연구사례로부터 철도소음 중에서도 1 kHz 부근의 소음은 레일로부터의 전동음의 기여가 큰 것이 추정되고 있으므로 이 측정에서 파악된 소음의 저감도 전동음에 대한 레일 방음재의 효과에 관계된 것이라고 추측된다.

그림 12에는 열차속도에 대한 소음레벨의 의존성을 나

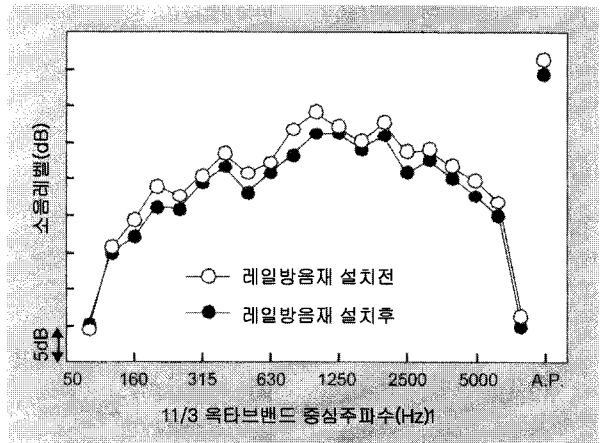


그림 11. 1/3옥타브밴드 분석결과

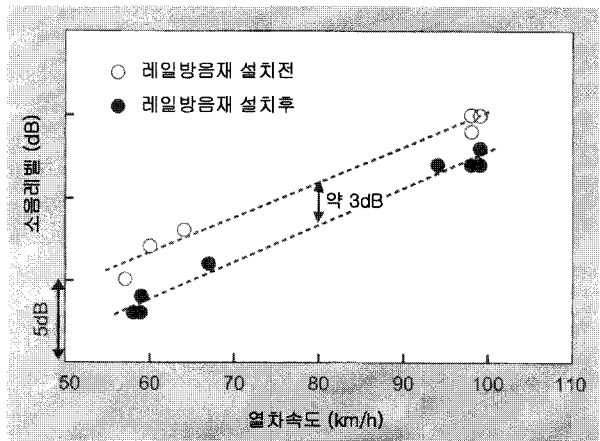


그림 12. 레일방음재 효과의 열차속도 의존성

타낸다. 그림 중의 소음레벨은 열차통과 시의 최대치이다. 이 그림으로부터 소음레벨이 열차속도 약 60~110 km/h의 범위에서 한결같은 모양으로 약 3 dB 저감되는 것을 알 수 있다.

3. 레일이음매용 방음재

레일이음매용 방음재는 레일 방음재의 구조를 참고로 하여 시작(試作)한 방음재로서 레일이음매에서의 사용 환경을 고려하여 레일이음매에 적용할 수 있는 구조로 되어 있다.

(1) 레일이음매용 방음재의 구조

레일이음매의 상태가 나쁘면 열차통과 시의 안전/안정성에 크게 영향을 주므로 레일이음매에 대하여는 빈번하게 외관의 육안점검이나 필요에 따라 볼트의 더 조임 등과 같은 메인テナンス 작업이 실시되고 있다. 그 때문에 방음재를 설치한 후에도 본래대로 이음매의 점검이나 메인テナンス 작업을 할 수 있는 구조가 요구된다. 그러므로 일반구간용의 레일 방음재와 같이 레일에 밀착시키는 구조가 아니라 레일에서 떨어져 설치하는 구조로 하였다. 시작(試作) 레일이음매용 방음재의 구조를 그림 13에 나타낸다.

방음재의 구성 재료는 방음재가 레일로부터 떨어진 위치에 있는 점을 고려하여 내층 측을 흡음재료, 외층 측을 차음 재료로 하는 구성으로 하였다. 레일이음매용 방음재에는 옥외에서의 장기 내구성이나 궤도가 구성하는 전기 회로에 지장을 주지 않는 전기특성을 가질 필요가 있다. 이 때문에 흡음재료에는 무기질 입자 결합재, 차음 재료에는 수지판을 이용하였다. 무기질 입자 결합재란 실리카모래

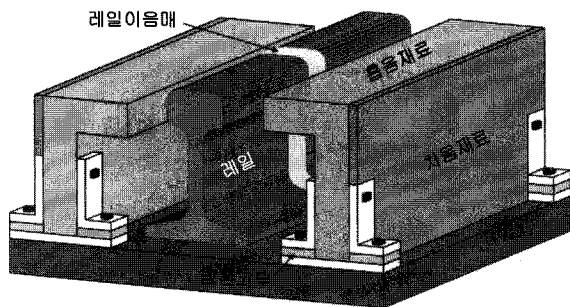


그림 13. 레일이음매용 방음재의 구조

(珪砂) 등의 무기질 입자를 소량(전체 중량의 4 % 정도)의 에폭시 수지로 결합한 다공질의 흡음재료이다.

(2) 레일이음매용 방음재의 효과

레일이음매용 방음재의 효과를 파악하기 위하여 모터카가 레일이음매를 주행할 때의 소음을 측정된 결과를 소개한다. 다만, 측정 시에는 모터카 기기로부터의 음의 영향을 극력 줄이기 위하여 모터로 가속하지 않는 주행상태(타협)에서 측정하였다.

그림 14에 소음측정 시의 레일이음매용 방음재 설치상태를 나타내고, 그림 15에 모터카의 주행속도를 변화시킨 때의 소음레벨의 최대치를 나타낸다.

그림 15로부터 레일이음매용 방음재의 설치에 따른 소음의 저감량은 모터카의 주행속도에 의존하고 가장 빠른 약 40 km/h에서 약 1.5 dB만큼 저감된 것을 알 수 있다.

이와 같이 방음재의 효과가 주행속도에 의존하는 주된 이유는 다음과 같이 생각할 수 있다.

침목 등, 레일 이외의 부분으로부터의 방사소음의 기여가 큰 경우에는 방음재의 소음 저감효과가 줄어들린다. 일반적으로 주행속도가 증가함과 함께 가진력이 증가되지만 침목 등, 레일 이외의 부분은 레일에 비하여 작은 가진력으로 진동될 수 있기 때문에 저속대역에서는 레일 이외의 부분으로부터의 방사소음의 기여가 크게 되어 방음재의 소음저감 효과가 작게 되었다고 생각된다. 이와 같이 레일이음매용 방음재의 소음저감 효과가 속도에 의존하는 것을

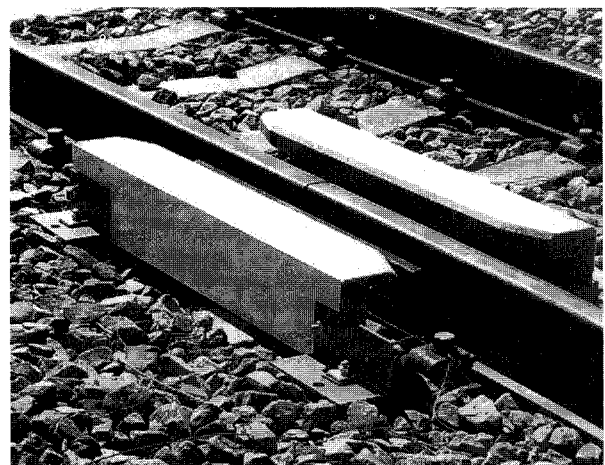


그림 14. 레일이음매용 방음재의 설치상태

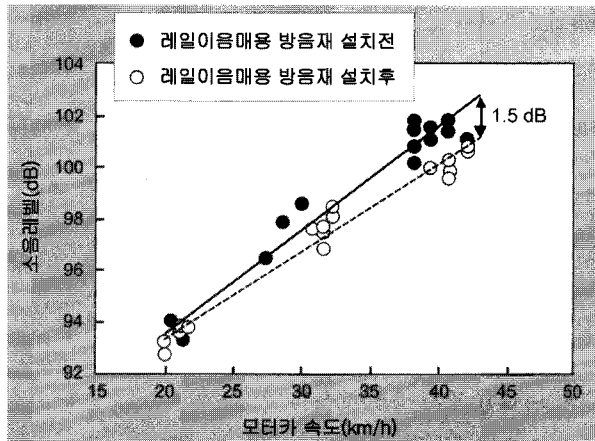


그림 15. 레일이음매용 방음재 효과의 속도의존성

알게 되었으므로 영업선로의 속도영역에 대하여 효과를 확인할 필요가 있다고 생각된다.

이 시작(試作) 레일이음매용 방음재에 대하여는 실험값에서 소음저감 효과가 확인되었으므로 향후는 이 시작품을 기초로 3 dB 정도의 소음저감 효과를 목표로 하여 재료 등을 개량하고 영업선로의 열차주행속도 영역(90~120 km/h)에서의 소음저감 효과의 확인 등을 통하여 실용화될 것이다.

V. 맺음말

이상으로 고속철도 소음을 구성하는 음원의 성질과 저감대책을 해설하고, 일반철도 소음의 현상이나 음원의 특성과 대책을 정리하였다. 또한, 일반철도에서 열차주행시에 발생하는 전동음 중에 레일로부터의 방사소음에 주목하여 방음벽보다도 간단히 시공할 수 있고 유효한 소음의 저감효과를 기대할 수 있는 대책으로서 레일 방음재와 레일이음매용 방음재 등 2 종류의 재료에 관한 연구개발을 소개하였다.

철도의 소음을 효과적으로 더욱 저감시키기 위해서는 보다 정량적인 관점에서 각 음원의 성질과 그 기여도를 이해하고 각 음원에 대한 연구개발을 하여 기여도가 큰 음원부터 우선적으로 대책을 시행할 필요가 있다. 철도토목기술 분야에서는 이를 위하여 레일이나 구조물에서의 진동/방사소음 특성을 파악하기 위한 측정방법의 개발이나 정밀도가 높게 예측할 수 있는 철도소음 예측기법의 구축이 필요하다. 또한, 본고에서 소개한 2 종류의 방음재에 대하여는 향후에도 더욱더 소음저감 효과의 향상이나 장기간의 내구성에 대한 평가 등이 이루어져야 할 것이다. ♪