

도시철도 운행소음 저감용 페어링시스템 연구

A study on Fairing System for Traveling Noise Reduction in Urban Subway

최상춘*
Choi, Sang-Chun

장원락**
Jang, Won-Rak

호경찬***
Ho, Kyoung-Chan

ABSTRACT

As the density and height of the buildings nearby subway lines get higher, the unprecedented residents' appeals for noise are on the rise. Furthermore, in accordance with the revision of enforcement regulations on the Noise and Vibration Control Act, the night time noise standards have been reinforced by 5dB effective on January 1st 2010 and the appropriate measures shall be taken accordingly.

For the settlement of the public grievances against noise and vibration generated on tracks in at-grade and elevated section, the installation of continuously-welded-rail, rail lubrication system, improved fastening system and higher noise barrier is currently executed. Nevertheless, the noise and vibration levels in some areas are still exceeding the limits required in the regulation. Among the measures, an installation of higher noise barrier or noise tunnel seems to be the most effective way; however, it has limitations owing to the structural stability of existing elevated structures.

The paper in consideration of the local conditions and foreign practices discusses the installation of fairing system under the train body as an noise insulation panel in order to reduce the rolling noise and under-carriage noise.

Based on the result of this study, a performance verification test during actual train operation is in progress for further study.

1. 서 론

국가 경제의 지속적 성장을 위한 사회 간접 시설 확충의 일환으로 도시철도, 고속철도, 고속화 도로 등 대량, 고효율 교통시설의 신설 및 증설이 지속적으로 진행되고 있다. 이와 같은 교통시설은 그 대부분이 인구 밀집도가 매우 높고, 활용 가능한 공간이 극히 제한적인 대도시를 중심으로 건설되기 때문에 기존 교통시설과 건축물, 도시미관 등 기존 공간의 활용도를 최대한 보전할 수 있어야 한다.

도심에 위치한 도시철도의 경우 특히 토공구간과 교량구간에서는 도시철도 주변이 고밀도화, 초고층화로 인하여 기존에 발생하지 않았던 소음민원이 증가하고 있는 추세이다. 이에 대응하여 기존차량의 정비와 보수, 신형 차량으로 교체 등의 꾸준한 노력에도 불구하고 소음민원은 끊임없이 발생하고 있는 실정이다.

따라서 도시철도를 운행하는 열차의 소음 발생원인 및 전달경로를 규명하여 효율적인 소음저감대책을 수립하는 것이 시급한 실정이다. 한편, 소음진동 규제법 시행규칙 개정에 따른 2010년 1월1일부터 소음진동 규제기준 강화에 따라 야간 소음기준이 65dB(A)에서 60dB(A)로 5dB 강화됨에 따른 대책 또한 필요한 시점이다.

† 책임저자 : 서울메트로, 기술연구소, 비회원
E-mail : scchol@yahoo.co.kr
TEL : (02)6110-5348 FAX : (02)6110-5338

** 서울메트로, 토목팀, 비회원

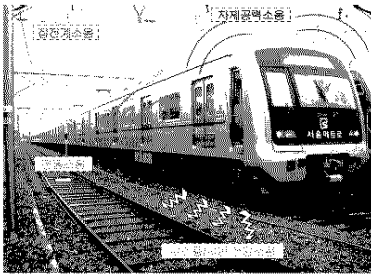
*** (주)에이브이티, 기술연구소, 정회원

상기와 같은 이유로 도시철도에서 발생하는 주된 소음원인 전동소음과 각종 기계장치 소음을 근접에서 차단하여, 효과적으로 소음저감 할 수 있는 시스템 개발이 필요하다. 본 연구에서는 차량하부에서 발생하는 소음에 대하여 흡음 및 차음성능을 동시에 가지는 “웨어링 시스템”에 대해서 검토하였다.

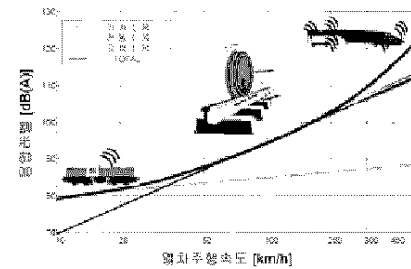
2. 전동소음 일반

2.1 도시철도 소음 발생원

열차 운행시 발생하는 소음원과 열차의 주행속도별 주요소음원은 아래의 그림1, 2와 같다.



[그림 1] 도시철도 소음원



[그림 2] 열차 속도별 주요소음원

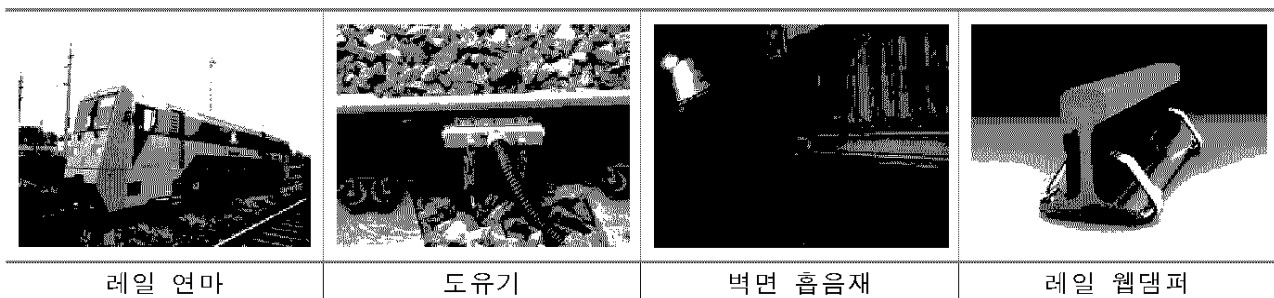
열차의 소음원은 크게 차량하부의 기기소음과 휠과 레일에 의한 전동소음과 집진계 소음과 차체의 공력소음으로 나눌 수 있으며, 교량이나 선하역사와 같은 구조에서는 구조물 소음이 있다.

한편, 차량의 운행속도에 따른 주요 소음원은 40km/h 이하의 저속구간에서는 모터휠, 엔진소음과 에어콘 등에 의한 기기소음, 40 ~ 200km/h의 중속구간에서는 차륜과 휠의 접촉에 의한 전동소음, 200km/h 이상의 고속구간에서는 차량의 형상 등에 의한 공력소음이다.

이때, 도시철도의 일반적인 운행속도는 40~110km/h 이므로, 주된 소음원은 전동소음이라 할 수 있다. 전동소음은 차륜과 레일의 상호작용에 의해서 발생하는 전동음(Rolling Noise), 레일의 이음매를 차륜이 통과할 때 혹은 차륜담면에 발생한 마모에 의해서 레일에 충격을 가해서 발생하는 충격음(Impact Noise), 또한 차량이 곡선을 통과할 때에 차륜 후렌지와 레일의 측면이 접촉해서 발생하는 스켈소음(Squeal Noise)이 있다. 이 중에 충격음은 레일의 용접에 의한 레일장대화로 대부분 해결하고 있으며, 스켈소음은 곡선부에 한정해서 발생하고 있다. 한편, 주행시 궤도의 전 구간에서 특히 문제가 되는 것은 전동음이며, 그 발생메커니즘은 레일과 차륜의 표면에 존재하는 미세한 요철로 인하여 가진력이 발생하여 차륜과 레일의 진동이 음파로 방사되는 것으로 정의되고 있다.

2.2 도시철도 소음 저감방안

레일의 연결부에서 발생하는 충격소음 저감을 위해서 레일의 장대화를 실시하고 있으며, 그 저감 성능은 4~10 dB로 알려져 있다. 레일의 장대화와 함께 일반적으로 사용하는 소음저감방법은 아래의 그림 3과 같이 정리할 수 있다.



[그림 3] 전동소음의 저감대책

위의 저감방법과 함께 차량에서 검토할 수 있는 방법으로 차량 하부의 보조발전기, 냉난방장치의 컴프레서, 저전압공압장치, 냉각브로워, 제동공기압축기, 제동장치 등의 차량 운행에 필요한 모터와 브러쉬 등의 기기에서 발생하는 소음과 차륜의 진동에 의해서 방사되는 소음을 차단, 흡수하는 ‘웨어링 시스템’이 있다.

3. 웨어링 시스템 설계

웨어링 시스템의 자재 선정시 소음저감성능에 앞서 고려할 사항은 시스템의 안전과 관련된 재료의 불연성 그리고 기존차량의 에너지 효율과 관계되는 제품의 무게이다. 본 연구에서는 소음저감성능에 초점을 맞추어 검토하였다.

웨어링 시스템이 가지는 소음저감 기본 개념은 소음전달 경로 상에서 차음을 통해서 음이 전달되는 것을 막아주는 것이며, 웨어링 시스템에 의해서 구획되는 부분 밀폐 공간의 흡음력을 높여서 추가적으로 음의 방사량을 줄여주는 것이다. 즉 웨어링 시스템의 마감재의 차음특성과 내부 흡음재의 흡음력이 소음저감성능의 중요한 변수가 될 것이다.

3.1 차음재 설계

차음재는 외장재로써의 기능을 겸하기 때문에 기존 차체의 재질과 동일하거나 그 특성이 우수한 재질을 사용해야 할 것이다. 일반적으로 사용되는 차체의 재질이 스테인레스이기 때문에 본 연구에서는 스테인레스 재질을 우선 검토하였으며, 차량의 자중 증가를 최소화하기 위해서 알루미늄 재질과 비교 검토하였다.

[표 1] 차음재의 재질별 장단점

| 재 질 | 알루미늄 | 스테인레스 |
|-----|---|---|
| 비 중 | 2.7ton/m ³ | 7.8ton/m ³ |
| 장 점 | <ul style="list-style-type: none"> 경량화에 의한 성능향상에 기여한다. 차량용재에 사용가능하다. 각종 구조재에 사용가능하다. | <ul style="list-style-type: none"> 내식성이 우수하다 차음성능이 우수하다. 표면이 미려하여 외장성이 뛰어나다. 유지관리 비용이 저렴하여 경제적이다. |
| 단 점 | <ul style="list-style-type: none"> 강도가 약하다. 차음성능이 낮다. | <ul style="list-style-type: none"> 염소성분에 약하다. 가공하기 어렵다. |

차음재의 성능을 평가하는 항목은 차음재의 전, 후면의 음압차인 투과손실이다. 투과손실의 일반식은 다음과 같다.

$$TL = 20 \times \log(m \cdot f) - 43 [dB]$$

이 때, m 은 면밀도(kg/m^2)[= 비중 × 두께], f 는 주파수이다.

위의 식과 같이 차음재는 질량법칙(mass law)에 의해서 재질의 비중과 제품의 두께가 그 성능을 좌우한다. 이는 제품의 밀도가 큰 재질의 제품을 사용하면 그 효과가 크다는 것이다. 따라서 차음 요구 성능의 최소 한계를 만족시키면서 차음재의 자중을 최소화하는 것이 필요하다. 그리고 차량의 안전성을 고려하여 재질의 강도도 고려해야 할 것이다.

아래의 표와 같이 동일한 두께에서는 알루미늄의 투과손실이 스테인레스와 비교하여 낮은 것을 알 수 있다. 차음재는 면밀도가 성능평가 변수이기 때문에 동일성능을 발휘하기 위해서는 알루미늄과 스테인레스의 면밀도가 유사해야 한다.

[표 2] 재질별 차음계수

| 종 류 | Octave band center frequency[Hz] | | | | | | | | 비 고 |
|------------|----------------------------------|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k | |
| 스테인레스 1.6T | 9 | 14 | 21 | 27 | 32 | 37 | 43 | 42 | |
| 알루미늄 1.8T | 14 | 16 | 16 | 16 | 23 | 29 | 30 | 36 | |

3.2 흡음재 설계

흡음재는 흡음성능 뿐 아니라 안정성, 내구성 및 제품의 사용환경 등의 여러 조건을 검토해야 한다.

[표 3] 흡음재별 특성

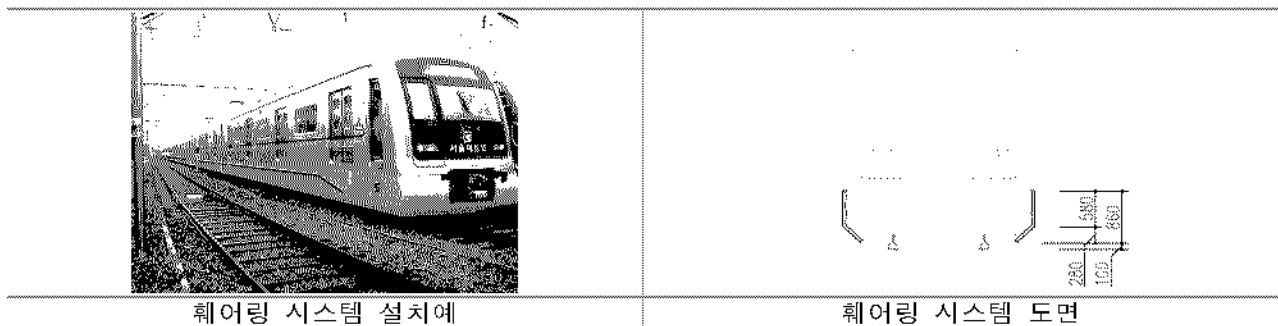
| 구 분 | 발포알루미늄 | 미네랄울 |
|-----------|---------------|--------------|
| 불 연 성 | 100% 불연(750℃) | 불연(300℃조직변화) |
| 비중(밀도) | 0.2 ~ 0.4 | 0.48 ~ 0.96 |
| 흡 음 률 | NRC 0.70 | NRC 0.95 |
| 악취 및 유독가스 | 없 음 | 약 간 |
| 습 기(물) | 물청소 가능 | 습기 및 물에 취약 |
| 변 형 | 없 음 | 많 음 |
| 내 구 성 | 반영구적 | 반영구적 |
| 가 공 성 | 공구필요 | 작업용이 |
| 재활용성 | 가 능 | 불 가 |

[표 4] 발포알루미늄과 미네랄울의 흡음률

| 종 류 | Octave band center frequency[Hz] | | | | | | | | NRC |
|--------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k | |
| 발포알루미늄 15T | 0.1 | 0.25 | 0.71 | 0.87 | 0.63 | 0.52 | 0.79 | 0.8 | 0.70 |
| 미네랄울 60K 50T | 0.1 | 0.25 | 0.83 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.95 |

3.3 웨어링 시스템의 형상 설계

웨어링 시스템의 길이는 소음저감성능을 설계하는 중요한 변수이다. 웨어링 시스템의 기본원리는 소음원을 은폐와 차폐시켜, 차음에 의해 소음저감하는 방법이기 때문에 웨어링 시스템의 길이를 최대한 길게 해주는 것이 좋다. 이 때, 차량과 건축한계 등의 설계기준을 확인하여 검토시 반영해야 한다. 웨어링 시스템의 길이는 차체하부에서 레일 담면 기준으로 높이 100mm 까지 내리는 것으로 설계하였다.



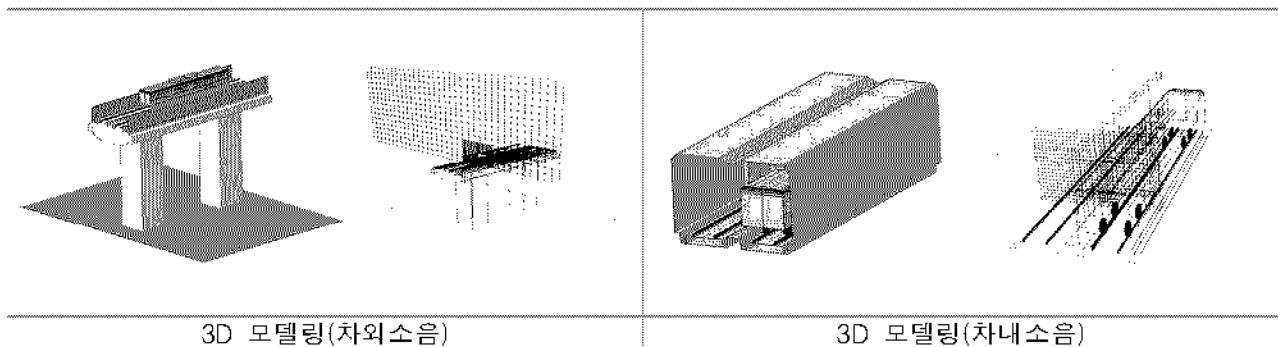
[그림 4] 웨어링 시스템 형상

본 연구에서 웨어링 시스템(L=860mm, 레일에서 H=100mm)의 형상은 차량한계를 최대한 활용하여 음원을 최대한 차폐함으로써, 소음저감 성능을 극대화하도록 설계하였다.

4. 웨어링 시스템 성능예측

소음평가는 음의 회절, 투과, 흡음에 관한 물성치를 입력하여 실제의 현상과 유사하게 실내 음장 분석과 옥외환경소음 등에 널리 사용되고 있는 소음해석전용 프로그램인 LMS社의 「Raynoise」를 사용하여 검토하였으며 프로그램의 해석기법은 ①Ray Tracing Method(RTM)와 ②Mirror Image Source Method(MISM)의 장점을 이용한 ③Beam Tracing Method(BTM)를 이용한다.

검토내용은 선로 주변지역으로 소음이 전파되는 것을 분석하기 위하여 웨어링 시스템 설치 유무에 따른 차외소음, 차내소음 평가를 웨어링 시스템 재질별로 분석하여 성능을 평가하였다. 그리고, 차내소음은 터널과 같은 실내공간에서 벽, 바닥, 창문과 같은 차체를 통해서 차내로 유입되는 소음의 영향을 평가하기 위함이다. 이 때, 차내소음은 공기전달음에 대한 재료별 투과손실을 고려한 평가에 한정하며, 차량의 진동에 의해 이차로 발생하는 고체음 영향은 검토에서 제외하였다.



[그림 5] 해석 모델링

1) 지하철 주행시 소음파워레벨 (PWL)

소음원의 음향파워레벨은 레일 측부에서 측정된 실측 소음도를 기초데이터로 차량음원(음향파워)을 역산하여 해석시 차량음원으로 가정하였다.

[표 5] 측정소음도와 도시철도 주행음 파워

| 측정소음도(SPL) | | 도시철도 주행음 파워(PWL) | | | |
|------------|----------|------------------|----------|------|-------|
| | Freq[Hz] | [dB(A)] | Freq[Hz] | [dB] | |
| | 63 | 72.6 | | 63 | 101.9 |
| | 125 | 86.2 | | 125 | 105.7 |
| | 250 | 91.4 | | 250 | 104.9 |
| | 500 | 92.4 | | 500 | 100.1 |
| | 1K | 87.9 | | 1K | 92.4 |
| | 2K | 88.4 | | 2K | 91.5 |
| | 4K | 85.0 | | 4K | 88.3 |
| | 8K | 80.1 | | 8K | 85.8 |
| | A.P. | 97.3 | | A.P. | 109.9 |

2) 웨어링 시스템의 물성 입력

외장재인 차음재는 차음성능과 본체와의 연속성을 위해서 동일 재질인 스테인레스를 선정하였으며, 흡음재는 흡음성능을 고려하여 미네랄울을 웨어링 시스템의 주재료로 선정, 성능평가를 실시하였다. 이 때 웨어링 시스템의 투과손실과 흡음특성은 아래의 표 6과 같다.

[표 6] 차음재의 투과손실과 흡음재의 흡음률

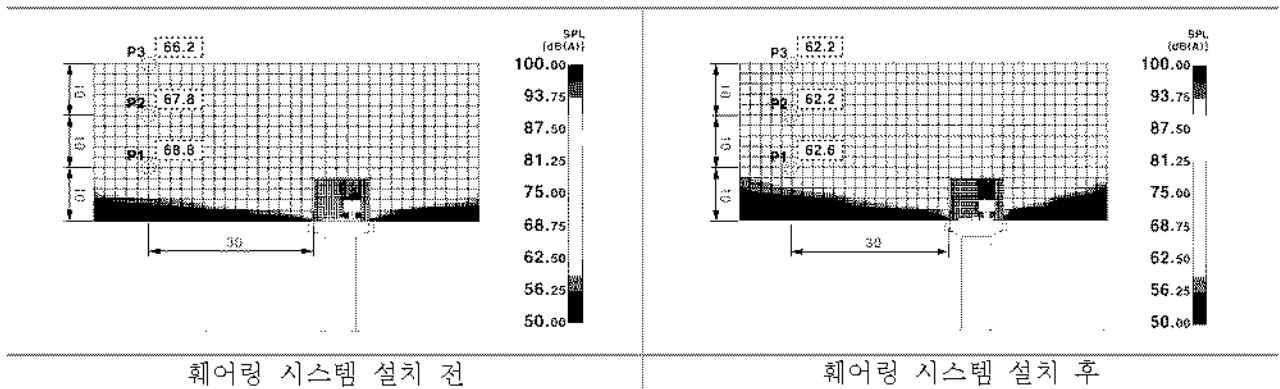
| 투과손실 | | 흡음률 | | | |
|------|----------|------|-----|----------|------|
| | Freq[Hz] | [dB] | | | |
| | 63 | 9.0 | | Freq[Hz] | [-] |
| | 125 | 14.0 | | 63 | 0.10 |
| | 250 | 21.0 | | 125 | 0.25 |
| | 500 | 27.0 | | 250 | 0.83 |
| | 1k | 32.0 | | 500 | 1.0 |
| | 2k | 37.0 | | 1k | 1.0 |
| | 4k | 43.0 | | 2k | 1.0 |
| 8k | 42.0 | 4k | 1.0 | | |
| | | 8k | 1.0 | | |

※ "Engineering noise control" Table 참고

4.1 차외소음 평가

소음저감 성능을 평가하기 위한 예측지점은 교량구간 주변에서 민원이 발생할 수 있는 민원 예상지를 20층 아파트로 가정하여 적용하였다. 이 때, 아파트의 위치는 교량에서 이격거리가 30m이며, 예측지점의 높이는 레일 면에서 10m(P1), 20m(P2), 30m(P3) 지점에서 소음도를 예측, 검토하였다. 한편, 일반적으로 교량구간에는 방음벽 또는 차음벽이 설치되어 있기 때문에, 해석시에는 방음벽의 높이를 레일면에서 2.0m로 가정하여 검토하였다.

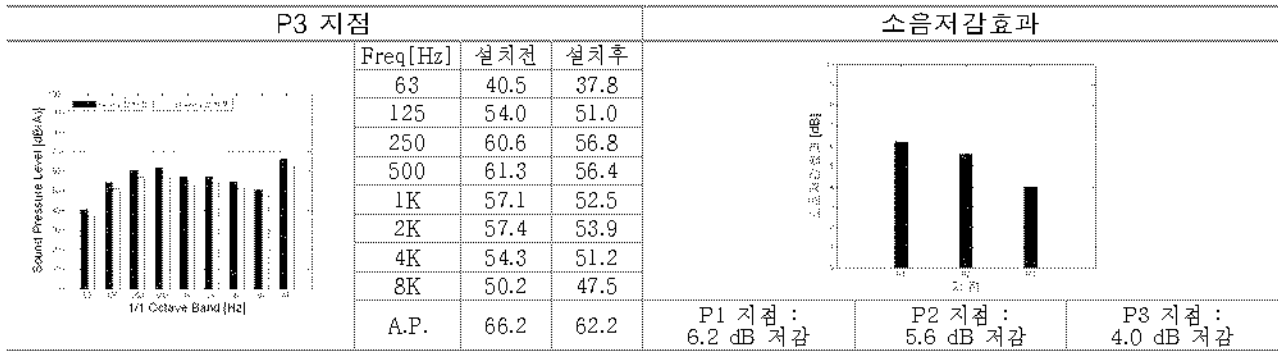
웨어링 시스템 설치 전의 예상소음도는 'P1'지점에서 68.8dB(A), 'P2'지점에서 67.8dB(A), 'P3'지점에서 66.2dB(A)로 예측되었으며, 설치 후의 예상소음도는 'P1'지점에서 62.6dB(A), 'P2'지점에서 62.2dB(A), 'P3'지점에서 62.2dB(A)로 예측되었다. 웨어링 시스템의 설치 전후의 소음차이에 의한 소음저감량은 4.0 ~ 6.2dB로 소음저감성능이 우수한 것으로 평가되었다.



[그림 6] 차외 소음의 예상 소음도

[표 7] 예측 지점별 차외 소음도

| P1 지점 | | P2 지점 | | | | | |
|-------|----------|-------|------|------|----------|------|------|
| | Freq[Hz] | 설치전 | 설치후 | | | | |
| | 63 | 43.6 | 38.9 | | Freq[Hz] | 설치전 | 설치후 |
| | 125 | 56.2 | 50.6 | | 63 | 42.2 | 38.0 |
| | 250 | 63.0 | 56.8 | | 125 | 55.6 | 51.0 |
| | 500 | 64.0 | 57.0 | | 250 | 62.2 | 56.7 |
| | 1K | 59.8 | 53.3 | | 500 | 62.9 | 56.4 |
| | 2K | 60.1 | 54.7 | | 1K | 58.6 | 52.5 |
| | 4K | 56.9 | 51.9 | | 2K | 58.8 | 53.9 |
| 8K | 52.6 | 48.1 | 4K | 55.7 | 51.2 | | |
| A.P. | 68.8 | 62.6 | 8K | 51.5 | 47.6 | | |
| | | | A.P. | 67.8 | 62.2 | | |

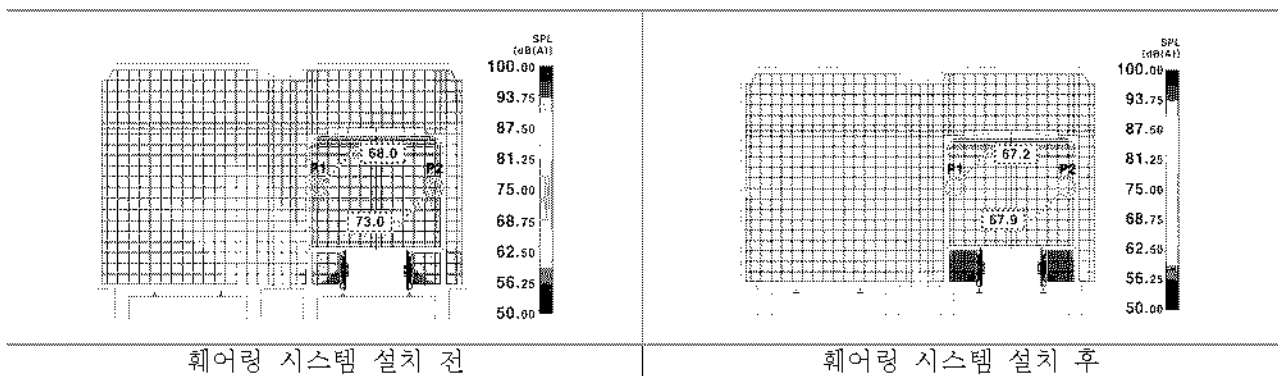


4.2 차내소음 평가

차내소음 평가시 웨어링 시스템의 설계조건은 차외소음 성능평가지와 동일한 해석 입력값을 사용하였으며, 웨어링 시스템의 설치 유무에 따라 수음점인 실내 창측에서 소음도를 검토하여 평가하였다. 단, 차내 소음은 재료별 투과손실에 대한 평가로써 한정하며, 진동에 의한 고체음 예측은 평가는 제외하였다.

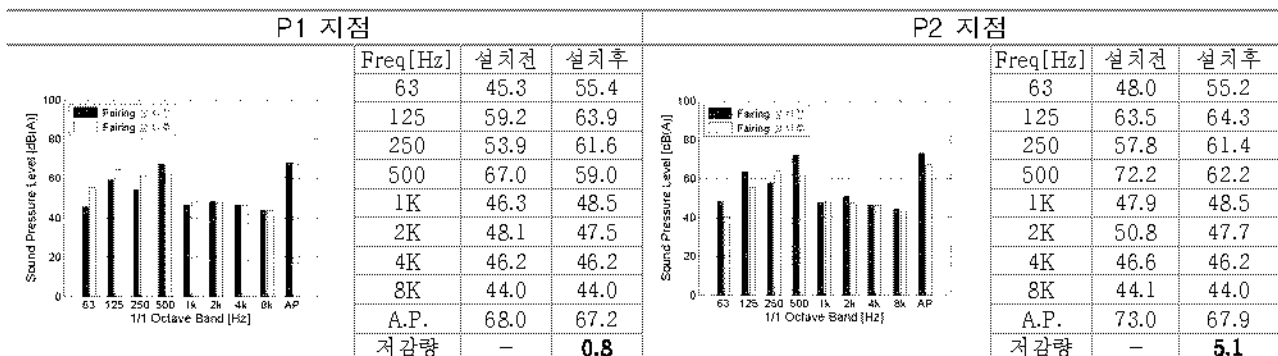
차내소음도는 설치 전 74.3 ~ 75.3dB(A)로 분포하며, 설치 후 67.2 ~ 67.9dB(A)로 예측되었으며, 소음저감량은 0.8 ~ 5.1dB 로써 웨어링 시스템의 유무에 따른 차내소음의 소음저감성능을 확인하였다. 이러한 결과는 차량의 바닥부분을 통해서 차량내부에 유입되는 소음보다 투과손실이 상대적으로 작은 유리창을 통해서 들어오는 소음이 크기 때문으로 분석된다.

아래의 그림에서 보는 것과 같이 웨어링 시스템 설치 후 차량하부의 소음은 커지고 있으나 차량 상부에 위치한 유리창으로 전파되는 소음량이 줄어들어 최종적으로 유리창을 통해 차량 내부로 들어오는 소음 또한 줄어드는 것으로 분석된다.



[그림 7] 차내 소음의 예상 소음도

[표 8] 예측 지점별 차내 소음도



5. 결론 및 향후계획

도시철도의 특성상 주된 소음원인 전동소음과 부속기기소음을 동시에 저감할 수 있는 대책으로써 웨어링 시스템의 소음저감성능을 검토하였다.

차외소음의 저감성능은 웨어링 시스템의 설치 전과 비교하여 4.0 ~ 6.2dB의 소음저감 성능이 나타나는 것으로 평가되었으며, 발포알루미늄은 상대적으로 0.2dB 낮게 평가되었다.

차내소음의 저감성능은 웨어링 시스템의 설치 전과 비교하여 0.8 ~ 5.1dB 소음이 저감되는 것으로 예측되었다. 이는 웨어링 시스템에 의해서 궤도에서 터널 상부로 전달되는 소음이 줄어들기 때문이라 판단되며, 한편 본 시뮬레이션에서는 고체음에 대한 평가가 제외되었기 때문에 추후 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

따라서, 웨어링 시스템은 도시철도 전동소음에 대해서 차외소음과 차내소음 저감 양쪽에 효과가 있는 것으로 판단된다.

상기와 같이 검토한 결과를 토대로 차후 연구방향은 실제 운행차량에 설치하여, 그 성능을 실차에서 검증하고자 한다.

참고문헌

1. 도시철도 운행소음 저감용 Fairing System 상용화 연구, 서울메트로 기술연구소, 2008.
2. 고속철도 환경소음기준 및 진동기준에 대한 (환경기준 및 방음대책편), 한국고속철도건설공단, 1995
3. 서사범(역), Coenraad Esveld, 최신 철도선로(Modern Railway Track-second Edition), 열과알
4. 조준호, 이덕희, 정우성, 신민호, 레일 이음매 개선에 따른 철도연변 소음저감연구, 철도학회논문집 Vol 4, No 1
5. 터널 내부 소음저감을 위한 흡음기술 개발 연구보고서, 건설교통부, 한국철도기술연구원, 2003.
6. 철도소음진동총람(1)-철도 소음편, 철도청,
7. 김재수, 양만우, 건축음향설계 방법론, 서우출판
8. 정일록, 김재용, 윤세철, 이태호, 최신 소음진동 이론과 실무, 신광문화사, 2001.
9. I.L.Ver, C.S.Ventees and M.M.Myles, Wheel/Rail noise part 4: Impact noise generation by wheel and rail discontinuities, Journal of Sound and Vibration, 46(3) 1976
10. David A. Bies and Colin H. Hansen, Engineering Noise Control -Theory and Practice 3rd edition
11. Raynoise Program Manual.
12. ENC Program Manual.