

통근형 지하철의 실내소음저감

Interior Noise Reduction for Subway Railroad Vehicles

김종년* 유동호** 박경환***
Kim, Jong-Nyeun Yoo, Dong-Ho Park, Kyung-Hwan

ABSTRACT

In this paper, the interior noise reduction for subway railroad vehicles was studied by improving transmission loss of carbody panels and side doors, and on-line tests were conducted to examine the exterior noise levels at various running conditions. Also the transmission loss for design candidates of the carbody specimen was measured in two reverberation rooms. From the results of the tests, side door gap is the most dominant factor affecting the interior noise level of subway railroad cars with a sliding typed side door. The next one is revealed to transmission loss of a floor panel. To improve the transmission loss of the carbody, many activities were conducted such as, treatment of resilient and sound-absorbing materials and reducing the gap of the side door by adopting a brush and rubber, etc. The estimated interior noise level for modified car which is designed with improved carbody panels is lower than original car by about 5dB.

1. 서론

전동차 소음은 전동차를 구성하는 각각의 시스템과 관련되어 복합적으로 나타나는 현상으로, 이에 영향을 미치는 인자로는 차량의 고유특성, 운전조건, 선로조건 및 궤도구조 등을 들 수 있으며, 이들은 운행 중에 서로 연관되어 작용하여 "전동차 소음"이라고 하는 결과로 표출된다. 이 전동차의 소음원은 차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생하는 휠/레일 접촉소음(전동음, rolling noise), 판토그래프와 가선의 접촉음(집전소음), 주행하는 차량의 표면에서 공기동력학적 메커니즘에 의해서 발생하는 공력소음(공력음)이 있으며, 전인전동기의 구동에 의한 소음(구동장치음), 차체 구조물의 진동에 의한 소음(구조소음), 실내 에어컨이나 환기팬에 의한 소음(보조기기음) 등이 있다. 실내소음 저감에 대한 방법으로는 이러한 소음원으로부터 방사되는 소음자체를 저감하는 방법과 아울러 방사된 소음을 실내로의 유입을 적절히 차단하는 방법 등이 있을 수 있다[1].

실제로 곡선로 주행시의 전동차의 실내소음은 주행속도가 비록 중,저속이라 할지라도 차실 내에서 높은 소음수준으로 인하여 승객의 의사소통을 방해하고 불편함을 야기 시킨다. 최근에는 전동차 선로가 증가함에 따라 신규노선은 지선화 되고 전체 노선의 길이 중에서 곡선로의 비중이 커지게 됨으로써 이러한 소음에 노출로 인한 불편은 점점 가중되고 있다. 특히 통근형 지하철의 경우는 정비 등의 편리함 때문에 기존의 자갈도상 대신 콘크리트도상을 사용하므로 상하의 외부 소음이 흡음되지 못하고 터널전체에 광범위하게 반사하게되어 터널내부의 전체적인 외부소음의

* 현대정공(주) 기술연구소 선임연구원

** 현대정공(주) 기술연구소 주임연구원

*** 현대정공(주) 기술연구소 연구원

레벨을 높이는 주 요인이 되고 있다. 또한 승객수송능력을 증대시키기 위하여 출입문의 숫자가 장거리용 객차 등에 비하여 그 숫자가 많으며, 또한 이러한 출입문은 미닫이형(sliding type)이므로 외부소음이 실내로의 침투에 취약한 구조로 되어있다[2]. 따라서 통근형 지하철의 실내소음레벨은 출입문과 같은 개구부로의 소음침투가 지배적이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 곡선로에서 소음과다 현상의 원인을 시험으로써 분석하는 한편, 출입문 밀폐구조를 강화하고 차체 각 부위의 차음성능을 향상시켜 그 결과를 전동차 내부 소음저감설계에 적용하고자 한다. 소음저감을 위하여 행하여진 각종 시험과 분석내용을 간추리면 다음과 같다. 먼저 주행중 소음 측정에서는 실내 소음과 차외 소음에서의 주파수별 레벨을 분석하여 그 특성을 분석하였으며, 차체 투과음의 부위별 기여도를 파악하기 위하여 "암상자(black-box)"를 이용하여 주행중 차체를 침투하는 소음을 측정하였다. 그리고 차체의 차음성능을 향상시키기 위하여 몇 가지 개선안을 적용하여 투과손실(Transmission Loss, TL) 시험을 실시함으로써 그 결과를 설계에 반영하였다.

2. 본 론

2.1. 주행중 전동차의 실내외 소음특성

지하철 실내외 소음의 특성은 다른 소음원과 달리 복합적인 소음 특성을 갖는 외에도, 주위 환경여건의 변화에 따라 많은 차이를 보이는 것이 일반적이다. 이는 차량의 주행속도 및 감.가속상태, 선로의 상태, 차종 등의 편차로 인하여 발생하는 것이다. 실내소음의 경우, 직선로에서 80km/h로 주행시 M-car와 TC-car 모두 소음이 약 83dBA 정도의 수준이었으며 곡선로에서는 차속은 비록 60km/h 이하이나 소음레벨은 85dBA 이상인 것으로 나타났다. 그림 1은 직선로/곡선로 및 차종에 따른 실내 소음 및 차외 소음측정 결과의 한 예로서, 앞에서 언급한 소음 레벨의 차이 및 주파수 성분을 확인할 수 있다.

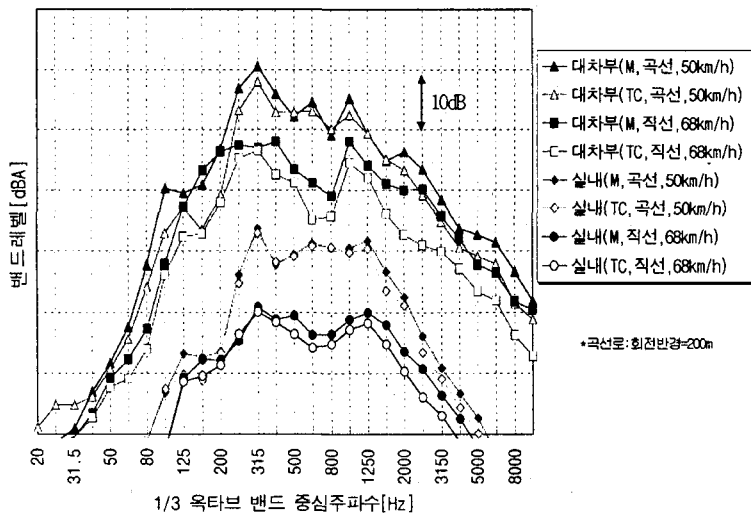


그림 1. 직선 및 곡선로 실내외 1/3 옥타브 밴드 분석

동일한 차량에 대하여 직선로와 곡선로간의 차이는 약 8dB 정도가 곡선로에서 더 높은 것으로 나타났다. 또한 같은 구간에서 M-car와 TC-car의 실내소음레벨 차이는 직선로에서 약 1.6dB, 곡선로에서 약 0.9dB 정도로 M-car의 소음레벨이 더 높았다. 이는 M-car의 견인전동기 발생 소음

에 의하여 실외소음레벨이 높기 때문인 것으로 판단된다. 실외소음의 경우 M-car와 TC-car 모두, 직선로보다 곡선로에서의 소음레벨이 약 6~8dB 정도 높은 것으로 나타났다. 차종별로 보아서 M-car가 TC-car보다 직선로에서는 약 3.5dB, 곡선로에서는 2.1dB가 높았다. 표 1에 선로에 따른 실내 및 차외 소음레벨을 정리하였다.

표 1. 선로 및 차종에 따른 실내의 소음레벨의 증가

	비교 대상	소음레벨 변화
차실내 소음	직선로 : 곡선로	곡선로 +9dB(M, TC-car)
	M-car : TC-car	M-car +1.6dB(직선로) M-car +0.9dB(곡선로)
차외 소음	직선로 : 곡선로	곡선로 +6~8dB(M, TC-car)
	M-car : TC-car	M-car +3.5dB(직선로) M-car +2.1dB(곡선로)

*직선로 주행속도: 68~75km/h, 곡선로 주행속도 : 50~55km/h

전동차가 곡선부를 주행할 때는 직선구간을 주행할 때보다 소음수준이 증가하는데, 이는 레일과 휠의 접촉부분이 늘어남에 따른 것으로 전체적인 전동음이 증가할 뿐만 아니라, 이상음(squeal 음)을 발생시켜 이용하는 승객들에게 심한 불쾌감을 주며, 휠과 레일의 이상마모를 초래하여 소음이 계속해서 증가하는 악순환을 겪게 된다[3]. 이러한 이상소음들은 250Hz이상의 주파수 영역에서 광범위하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 곡선 주행시 레일과 차륜 플렌지의 접촉에 의한 측면가진으로 인하여 차체의 구조진동으로 야기된 소음도 무시할 수 없는 요소가 되고 있다. 따라서 곡선주행시의 과도한 소음발생과 진동을 저감하기 위하여 곡선부에서의 캔트(cant)각 또는 슬랙(slack) 등을 조절하는 선로설계, 터널 내 흡음재 설치, 그리고 방진휠 채택 등의 별도의 대책이 필요하다. 운행중 대차부의 소음 중에서 견인전동기만의 발생 소음레벨을 직선로에서의 M-car의 대차부 소음과 TC-car의 대차부 소음의 차이로 추정해 본 결과, 160, 200, 250, 400, 1000Hz 대역이 견인전동기의 주요 소음의 성분인 것으로 판단되었으며, 전체 소음레벨(overall level)은 103~106dBA로 추정되었다. 이와 반대로 휠-레일에서 발생하는 소음은 TC-car의 대차부 소음으로 파악할 수 있는데 직선로에서는 250, 315, 1000Hz 밴드의 성분이, 곡선로에서는 250~2000Hz의 모든 밴드 성분이 실내 소음에 영향을 크게 줄 수 있는 것으로 나타났다. 전체 소음레벨(overall level)은 견인전동기 추정 소음레벨보다 약 1dB 작은 102~105dBA 정도로 나타났다. 표 2는 차외 소음의 소음레벨 및 주요 성분을 정리한 것이다.

표 2. 차외 소음의 주요 성분 및 소음레벨

구분	소음레벨 (Overall), [dBA]	주요 성분 (1/3 옥타브 밴드 중심주파수), [Hz]	선로
견인전동기 소음	104.6	160, 200, 250, 400, 1k	직선로
휠-레일 소음 (TC-car 대차부)	103.6	250, 315, 1k	직선로
	111.6	250~2k	곡선로

*직선로 주행속도: 68~75km/h, 곡선로 주행속도 : 50~55km/h

2.2 전동차 소음원 제어

전동차의 소음 저감 방안들은 크게 소음원의 관점과 차음/방음의 관점으로 분류할 수도 있다. 이러한 분류로 보면, 이 두 관점에 대한 접근이 상호 보완적인 관계에 있으며, 현실적 한계를 고려하여 최적의 조건 또는 대책을 마련해야 할 것이다. 소음원 측면의 접근법에서는 소음원의 수를 줄이거나 소음이나 소음을 유발할 수 있는 진동이 작게 발생하는 단품(또는 장치)을 선정하는 것과 같은 소음원에 대한 직접적인 제어가 중요하다. 이렇게 하기 위해서는 소음예측 또는 시험을 통한 적절한 소음의 규제 상한값을 각각의 단품에 대해 책정하고, 이 규제를 통해 최적의 단품을

선정하는 과정이 필요하다. 이때 소음레벨뿐만 아니라 소음의 주파수성분이 반드시 검토되어야 할 것이다. 그 이유는 동일한 소음레벨이라고 하더라도 저주파수대역에서 소음성분이 지배적이라면 일반적인 차체 구조는 저음역에서 차음성능이 떨어지므로 실내소음에 미치는 그 영향이 더 클 것이기 때문이다. 소음원에 해당되는 것은 차량 부속 단품 외에도 레일 또는 궤도 구조물도 포함될 수 있다. 휠-레일 접촉음의 경우는 레일 설치시의 슬랙의 양에 따라 곡선로 주행시 스컬음으로 인하여 발생하는 소음레벨에 큰 영향을 미치므로 곡선 반경에 따른 적절한 슬랙이 주어져야 한다. 곡선로 주행시의 스컬음은 저소음 방진 휠(resilient wheel)의 채택으로도 저감이 가능하다[4]. 직선로 주행시의 소음을 줄이기 위해서는 레일의 표면이 아주 좋은 평활도를 유지하도록 하여야 할 것이다. 차음/방음 측면의 접근법에서는 차체가 외부의 소음원들로부터 주요한 주파수 성분을 차단, 반사하는 성능을 가질 수 있도록 하거나, 터널 내부의 흡음처리[5], 차내부 흡음처리 등의 소음의 에너지를 흡수하는 등의 소음원을 떠난 소음에 대한 제어가 이루어져야 한다. 소음의 차단 성능을 향상 시키기 위해서는 벽체의 틈새의 최소화, 진동을 줄일 수 있는 적절한 강성설계 또는 제진설계, 투과된 음의 크기를 줄일 수 있는 흡음구조 등이 병행되어야 한다.

2.3 전동차 소음저감설계

2.3.1 차체(carbody) 설계

앞절에서 예로 든 몇 가지 전동차 내부 소음저감 방안중 어느 하나만을 보강 또는 제어해서는 큰 효과를 거두기는 어려우며, 이들간의 복합적인 효과를 적절히 조합할 때 소음저감의 목적이 달성될 수 있다. 그러나, 본 연구는 차체의 차음성능 향상에 그 초점을 두고 있으므로 차체 구조 단면 변경에 의한 투과손실 증대가 목적이다. 따라서 각 부위별로 다음과 같은 개념으로 차체 중요 부재의 설계에 접근하도록 하였다.

차체 각 구성판넬은 대개 무게를 크게 증가시키지 않고 중고주파수의 투과손실을 증대시킬 목적으로 외판과 내판 사이에 흡음재를 삽입한 형태인 이중벽 구조를 가지고 있다. 그러나 전동차와 같이 승객수가 많은 경우, 이중벽 구조로 이루어진 부유상구조에 대해서는 강도해석을 통하여 안전성이 입증되어야 한다. 그리고 부유상구조는 일반적으로 저주파수 대역에서 양 패널의 무게와 패널 사이의 공기층에 의하여 공진영역이 존재하므로 저주파수 영역에서의 투과손실이 저하된다. 따라서 저주파수의 투과손실이 높은 상구조로는 무게를 증가시킨 일체형 상구조를 검토하고자 한다. 상구조 및 벽, 지붕 구조를 관통하여 지나가는 각종 케이블과 덕트는 그 틈새를 밀봉하여 공기음의 유입을 차단하여야 한다. 외판과 내판 사이에 흡음효과를 갖는 단열재로 채워지는 것이 일반적이는데 흡음율이 좋은 재료를 선택하여야 한다. 또, 일반적으로 무겁고 감쇠계수가 높은 재료일수록 소음을 차단하는 효과는 크지만 비용과 차량 총중량의 증가를 수반하게 되므로 이에 대한 최적화를 꾀해야 할 것이다.

2.3.2 차체 투과 소음

주행중 차체를 투과하는 유입소음의 각 부위별 기여도를 파악하기 위하여 내부가 흡음처리된 500×500×500mm 크기의 암상자를 제작하여 주행중 차체 실내면에 부착하므로써 차체부위별 투과음을 측정된 결과, 표 3에서 처럼 천장의 배기구부, 단부의 바닥, 단부와 중앙사이의 바닥, 측부 출입문, 측창, 단부 출입문 패널, 바닥 중앙, 측출입문 포켓, 단부 출입문 포켓, 천장 패널, 단부 배전반 패널의 순으로 암상자내 소음레벨이 높은 것으로 나타났다. 천장의 배기구의 레벨이 높은 이유는 외부(터널)와 바로 통하고 있기 때문이다. 이와 출입문(틈 포함)을 제외한다고 보면 단부 바닥이 가장 레벨이 높은 것이다. 이러한 현상은 바닥이 차체중에서 전체적으로 두께가 얇아 소음에 취약한 부위일 뿐만 아니라 대차부에서 발생하는 외부 소음레벨이 상대적으로 높기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 암상자법에 의한 기여도는 음압레벨을 표시하므로 전체적으로 실내소음레벨에 기여할 수 있는 기여도를 계산하기 위해서는 방사면적을 고려한 파워개념으로 접근하여야 할 것이다.

표 3. 압상자내 소음레벨 순위

압상자 설치부	압상자 내부 음압 레벨 순위	Floor(End)와의 음압레벨 차이(평균) [dB]
Roof exhaust fan	1	+16.2
Floor(End)	2	0
Floor(Middle)	3	-1.0
Side door panel	3	-1.0
Side window	5	-5.3
End door panel	6	-5.5
Floor(Center)	7	-5.8
Side door pocket	8	-6.0
End door pocket	9	-7.3
Roof panel	10	-7.6
End inspec. cover	11	-10.1

2.3.3 시편 투과손실 측정

차체의 단부 벽체(End wall), 지붕(Roof), 측부 벽체(Side wall) 및 바닥체(Floor)등의 다양한 중간 구조에 대하여 잔향실-잔향실법에 의한 측정이 이루어졌다. 바닥체와 측부의 시편크기는 $1.5m \times 1.5m$ 이며, 단부, 지붕 및 출입문조립체의 시편크기는 $1.3m \times 2.3m$ 로 제작되었다. 차체 각 부분에 대한 기존안과 개선안에 대한 투과손실이 그림 2~7에 나타나 있다.

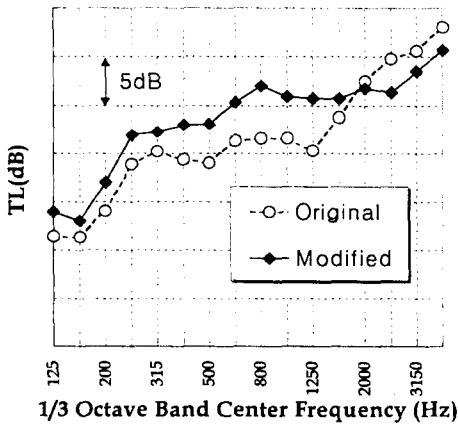


그림 2. Floor panel: 다층구조

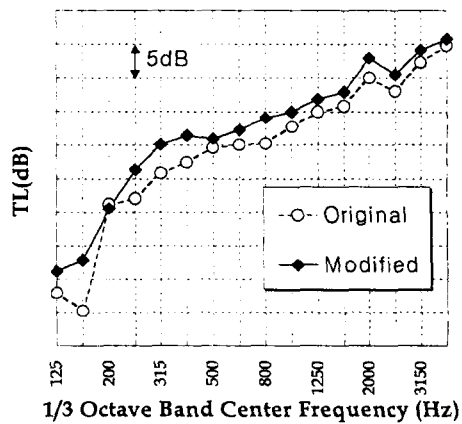


그림 3. Side panel: 흡음재 교체

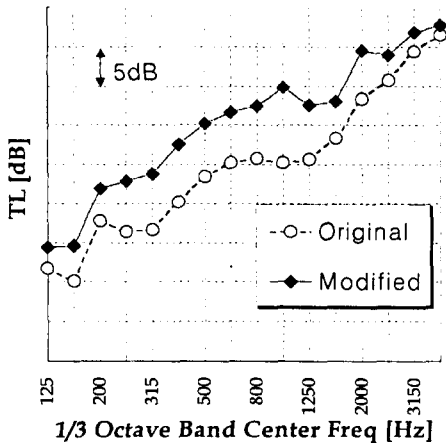


그림 4. End panel: 흡음재 신규설치

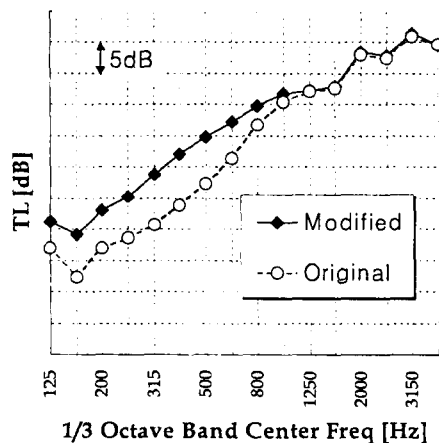


그림 5. Roof panel: 흡음재 교체

이중벽 구조인 경우 중간에 삽입하는 흡음재와 내판의 재질을 변경해 가면서 투과손실을 측정하였다. 그에 대한 투과손실 증가량은 다음의 표 4와 같다.

표 4. 흡음재 및 이중벽의 효과

적용 부위	투과손실 증대량 [dB]		비고
	흡음재 삽입	이중벽 효과	
측부 구조	0~5	-	250~1000Hz
단부 구조	2~9	10~14	250~1000Hz
지붕 구조	2~13	11~17	250~1000Hz
출입문 및 포켓	1~3	-	250~1000Hz

2.3.4 출입문 설계

출입문은 구조적으로 공기음의 직접적인 유입이 용이한 구조이므로 공기층의 차단을 위한 기밀구조를 갖는 출입문을 개발하는 것이 우선 과제이다. 따라서 출입문(Door)의 여러 가지 밀폐 차음에 대하여 시험하였다.

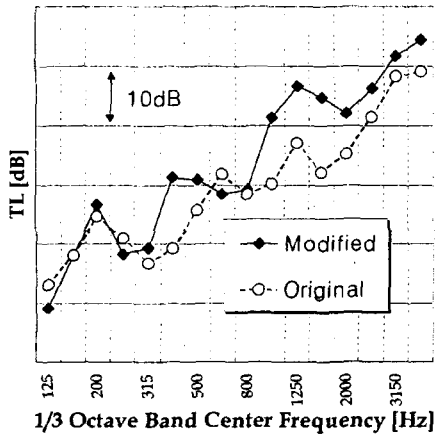


그림 6. Door panel: 두께증가

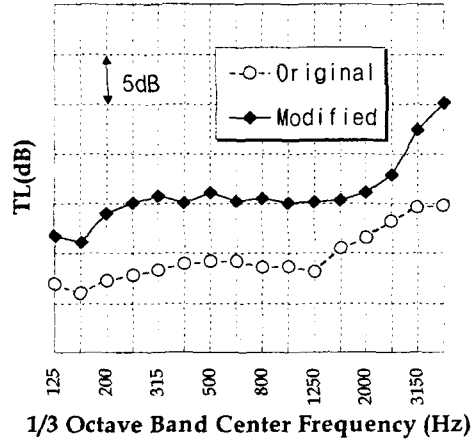


그림 7. Door & pocket: 기밀구조강화

위의 그림 6에서 주파수 영역마다 투과손실치의 증가가 서로 다르지만, 개선안의 경우는 기존안에 비하여 약 2.3dB 정도 차음도가 높아졌음을 알 수 있다. 그러나, 출입문 패널만의 투과손실치는 시험에서 측정된 출입문 틈을 포함한 전체 출입문의 투과손실치와의 직접적인 비교는 불가능하다. 따라서 시험에 의하여 틈을 완전히 밀봉한 상태와 틈이 존재하는 경우의 투과손실치를 다음의 그림 8에서 비교하여 틈의 면적을 유추하였다. 예를 들어 완전히 밀봉한 상태에서의 투과손실치(potential TL :500Hz에서의 TL 또는 STC: Sound Transmissio Class)가 약 29dB이고 틈이 존재하는 경우(composite TL)가 25dB라면 그림 8에서 두 값이 교차하는 틈면적 0.2%의 선과 만나므로 틈의 면적비를 유추할 수 있을 것이다. 본 연구에서 대상으로 한 출입문의 개구율은 실험 결과 약 0.15%가 되는 것으로 나타났다. 아울러 이 그래프로부터 출입문의 틈을 줄인다면 투과손실이 커질 수 있는 여지가 많음을 알 수 있다. 따라서, 기밀구조를 강화하기 위하여 추가의 설계안(측부 기밀판, 하부 브러쉬 2개 적용, 상부 브러쉬 2개 적용 등)으로 틈의 면적을 0.1% 까지 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 그러므로 출입문 패널만의 투과손실치를 약 2dB 더 증가시키고 틈의 면적을 0.1%로 줄인다면 그림 8의 그래프에 의하여 전체적인 투과손실치는 약 1.5dB 정도의 추가 증가가 예상되었다.

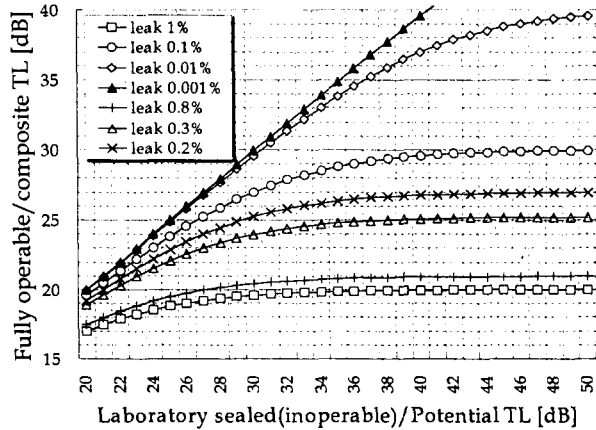


그림 8. 틈에 의한 문의 차음성능

2.3.5 차체 설계변경

시편투과손실 시험으로부터 전동차의 실내소음을 저감하기 위해 선정한 설계안을 정리하면 다음의 표 5와 같다.

표 5. 투과손실 증대를 위한 차음 구조 보강

차체 부위	목적	조치 내용	시편투과손실 증가량 [dB]
바닥 구조	· 바닥 구조 변경에 의한 차음성능 보강	· 재질변경(복층구조)	3.5
측부 구조	· 흡음성능 증대에 의한 투과손실 증가	· 내부흡음재 교체	6.0
지붕 구조	· 흡음성능 증대에 의한 투과손실 증가	· 내부흡음재 교체	6.0
측부/단부 출입문	· 출입문 틈새를 통한 소음 유입 차단	· 하부 레일부 Brush 설치 · 측부 및 상부 Sealing · 도어 접합부 접촉개선 · 포켓내 흡음재 설치 · 도어 패널 두께증가	6.5
배기구 (팬)	· 배기구로 통한 소음 유입 차단	· 배기구 삭제	-

시편 투과손실 측정시험의 결과를 이용하여 변경된 차체로 구성된 차량의 내부소음레벨을 상용 패키지인 AutoSEA[6]를 사용하여 계산하였다. 입력으로 사용된 외부소음레벨의 수준은 그림 1의 대차위의 레벨을 비롯한 측부 및 지붕의 음압레벨을 차량길이 방향으로 중앙과 단부에서, 그리고 단부 다이아프램 내.외부에서 각각 음압레벨을 측정하여 사용하였다. 실내소음의 예측을 통하여 제시된 설계안을 적용시 기존 전동차에 비하여 실내소음을 약 5dB정도 저감시킬 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 향후 제작될 전동차의 실내소음을 저감하는데 필요한 몇 가지 항목에 대해서 논하였다. 한편, 소음해석이나 설계에 중요한 역할을 하는 실측데이터를 얻기 위하여 서울시에서 상업운행중인 전동차의 실내소음을 측정하여 분석하였다. 실측데이터의 분석에 의하면 소음측정에 있어서 측정조건 및 방법상에서도 많은 불확실성이 존재함을 알 수 있었다. 따라서 철도차량의 소음측정치는 많은 데이터를 확보하여 이를 통계적으로 처리해야만 신뢰성이 있을 것이다.

시편투과손실 시험을 통하여 차음성능이 우수한 설계안을 선택하였으며 음향투과손실치에 외부소음 측정치를 적용하여 실내유입소음을 구하였다. 기존 전동차에 대하여 계산된 실내유입소음은 암상자법에 의한 실측치와 어느 정도 유사함을 확인하였다. 한편 시편투과손실 시험의 결과로부터 계산된 실내 중앙위치에서의 음압레벨은 측부 출입문과 상구조의 영향이 큼을 알 수 있었다.

현 상태에서 상구조 자체로는 중량 및 두께의 제한으로 투과손실의 현격한 증가는 한계가 있었으며 출입문은 현재의 미닫이 형태로는 구조적으로 틈새의 영향을 완전히 배제할 수 없으나 시편에 대한 투과손실 시험을 통하여 몇 가지 설계안을 적용한 결과 어느 정도 기밀구조가 향상되었음을 알 수 있었다. 또한 밀폐 차음시험을 통하여 출입문 패널보다는 틈새의 영향이 훨씬 중요함을 알 수 있었다.

시편 투과손실 측정시험의 결과로부터 계산된 실내유입소음을 이용하여 전동차 실내중앙위치에서의 음압레벨을 예측하였다. 실내소음의 예측을 통하여 제시된 설계안을 적용시 기존 전동차에 비하여 실내소음을 약 5dB정도 저감시킬 수 있었다.

참고문헌

1. P. W. Eade, "Railway vehicle Internal Noise", J of Sound and Vibration, 51, p403-415, 1977
2. P. J. Remington, "Retrofit Noise Control of Rapid Transit Cars", J of Sound and Vibration, 66(3), p419-441, 1979
3. B. Hemsworth, "Recent Developments in Wheel/Rail Noise Research, J of Sound and Vibration, 66(3), p297-310, 1979
4. L. G. Kurzweh, " Wheel/Rail Noise - Measurement for Control", J of Sound and Vibration, 1983
5. 軌道用 吸音材の 開發, RTRI Report, 日本 鐵道總研報告, Vol. 8, No. 6, 1994
6. "AutoSEA User Guide", Vibro-Acoustic Sciences Limited, 1997