통계적 에너지 해석법을 이용한 전동차의 실내소음 분석

The prediction of train interior noise with Statistical Energy Analysis

이승우* 김재철** 이동훈*** 추돈호****

Lee, Seoung-Woo Kim, Jae-Chul Lee, Dong-Hoon Choo, Don-Ho

ABSTRACT

As the improvements of service quality is becoming an important issue the, interior noise level of a train is an important factor of comfortable ride.

To reduce the interior noise level, noise sources of the train need to be removed. However, in case with a structure of large scale and multiple noise sources, an estimation of influences of major noise sources, with indentification of its traveling paths needs to be performed.

In current state, to improve the interior noise reduction, consideration of sound transmission loss of the train body prior to manufacturing is usually performed.

In this study, the sound transmission loss of the train body of new model train of seoul metro's line no.2 under test opeation is measured and modeling of the train body is performed. And train interior noise is predicted using the measured values.

1. 서 론

자동차가 소비자들을 의식하여 차내 실내 소음에 관심을 많이 갖는 반면 철도의 경우 이와 반대로 외부 환경소음의 문제에 더 주력 해 왔다. 그러나 차량의 고속화와 함께 승객에 대한 서비스 향상이 매우 중요하게 대두됨에 따라 승객에 대한 승차감 및 안락감 향상 측면에서 차량의 실내 소음은 중요한 문제로 발전하게 되었다.

철도차량의 실내소음 향상을 위해서는 차량소음원에 대한 근본적인 제거 등이 이루어져야 하나 구조물의 크기가 크고 소음 및 진동원이 다양한 경우 주요 소음원에 대한 소음의 전달경로를 파악하여 이 소음원이 객실 소음에 미치는 영향력에 대한 평가가 필요하다.

철도차량의 실내소음 향상을 위해서는 차량의 초기 설계단계에서부터 차량에 대한 효율적인 저소음 대책이 필요하지만, 현재는 제작 전 차체에 대한 음향투과손실을 확인하는 정도이고, 차량 제작 후에 실내 소음에 대한 문제점이 발생하면 현실적으로 차량에 대한 방음방진의 추가적인 대책방안을 세우기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 현재 시험운행 중인 서울메트로 2호선 신형 전동차의 설계에 적용된 각각의 설계안의 차체의 투과손실을 측정하여 소음성능을 확인하고, 신형차량을 모델링하여 이 투과손실의 측정값을 이용하여 실내소음을 예측하였다.

* 비회원, 서울메트로, 운영본부 차량팀, 서울산업대철도전문대학원
E-mail : swo8612@seoulmetro.co.kr
TEL : (02)6110-5706 FAX : (02)6110-5709
** 정회원, 한국철도기술연구원
*** 서울산업대학교, 기계공학과 교수
**** 서울메트로, 운영본부 차량팀, 서울산업대철도전문대학원

2. 차량의 차체구조 및 투과손실 측정결과

차량 실내에 유입되는 에너지의 대부분은 객실 바닥을 통해 전달되고 있음을 알 수 있다. 즉, 차량 하부에서 발생되는 소음은 차체 바닥을 통해서 객실 내부로 가장 많이 전달되고 있는 것을 나타내고 있다. 그 다음은 도어, 측창문 순으로 전달된다.[6]

터널 주행중 실내 소음에 민감한 영향을 주는 상구조, 도어, 그리고 측창문에 대하여 각종 설계안의 소음투과손실을 측정하여 보았다.

2.1 상구조

철도차량은 그림1과 같이 Unitex(3.6, 2t)을 삽입한 단일상 40t 유니텍스 구조로 부유상 구조의 소음투과손실을 측정하였다. 상구조에 대하여 부산시2호선에 적용된 단일상 25t 유니텍스 구조와 서울시 2호선에 적용 예정인 단일상 40t 유니텍스 구조, 그리고 아테네 프로젝트에 적용된 부유상 구조의 소음투과손실을 비교하였다.

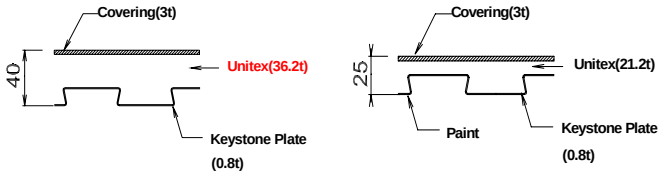

그림 1. 차체 상구조

일반적으로 상구조는 측부 출입문 다음으로 터널을 주행하는 전동차의 주요 소음 유입 통로이다. 하지만, 상구조의 두께는 설계초기 단계부터 여러가지 외부 환경, 이를 테면, 상면높이, 실현가능한 대차 높이등에 의해서 제한을 받는다. 상구조의 투과손실을 증대시키기 위하여 일방적으로 두꺼운 상구조를 채택하지 못하는 이유가 여기에 있다. 또한, 제한된 두께 내에서도 밀도가 높은 재료를 사용하면 투과손실은 어느 정도 증대되나 차량의 중량이 증가하는 등 단점이 있다. 일반적으로 무게를 늘려 차음성능을 증대시키는 방향의 설계안은 에너지를 소비하는 교통수단에는 적합한 방법이 아니며, 증가한 무게에 비해 차음성능의 증가량은 그리 크지 않다.

유니텍스 45t의 경우, 유니텍스 25t에 비하여 전체적으로 2~7dB 높은 경향을 보임을 알 수 있다. 부유상 구조의 경우, 250Hz 이하의 영역에서는 mass-air-mass resonance로 인하여 유니텍스 구조에 비하여 낮은 소음투과손실을 가지나, 그 이상의 주파수 영역에서는 플로어 상하부의 높은 소음 및 진동 절연 성능으로 인하여 높은 소음투과손실을 가진다.

2.2 도어

차체를 구성하는 주요 단면들 중에서 가장 낮은 소음투과손실을 보이는 도어는 터널 주행 중인 차량의 실내 소음에 가장 큰 영향을 주는 부분이다.

도어의 경우, 도어와 차체 사이의 틈새를 통하여 대부분의 소음이 유입되므로 도어의 상부, 하부, 측부 그리고 중앙의 씰링을 개선하여 이를 통한 소음 유입을 차단하는 것이 중요하다. 하지만, 서울시 2호선이 채택한 도어는 슬라이딩 방식의 출입문이므로 출입문의 개폐가 원할하기 위해서는 구조적으로 어느 정도 틈이 생길 수 밖에 없다. 측출입문이 완전히 닫혔을 시 출입문이 차체구조물과 최대한 밀착되는 구조이어야 하며 상. 하부 레일에 발생하는 틈은 브러쉬 등을 이용하여 소음이 유입될 수 있는 유효 틈새를 줄여야 한다. 또한 소음유입을 최소화하기 위해 과도한 밀봉설계는 도어의 작동을 방해하는 저항력으로 작용할 수 있으므로 이에 대한 고려가 현실적으로 필요하다. 이로부터 터널 주행 차량의 실내 소음 저감을 위해서는 도어의 씰링 개선이 우선되어야 함을 알 수 있다.

도어 씰링 상태에 따른 실내 소음 영향을 평가하기 위하여 표2와 같이 틈새가 많이 존재하는 도어, 틈새를 개선한 도어, 그리고 틈새를 완전 밀봉한 도어의 소음투과손실을 비교하였다.

표2. 각종 도어 모델

연번	구분	비고
1	틈새가 많이 있는 도어	광주 초기 모델
2	틈새를 개선한 도어	6호선
3	틈새를 완전 밀봉한 도어	6호선 완전 밀봉

소음투과손실을 비교해 보면, 틈새가 존재하는 도어는 틈새 개선된 도어에 비하여 10dB 정도 낮은 소음투과손실을 가짐을 알 수 있었다. 일반적으로 차체의 다른 부위에 비하여 낮은 소음투과손실을 가지는 이러한 도어의 소음투과손실 저감은 직접적으로 실내 소음 레벨을 상승시킨 것으로 나타났다.

2.3 측창문

다른 차체 부위에 비하여 비교적 낮은 소음투과손실을 가지는 측창문에 대하여 구조 변경에 따른 소음투과손실을 비교하였다. 비교된 측창문은 표3과 같다.

표3. 각종 측창문 모델

연번	구분	비고
1	복층유리(5-6A-5)	한글라스 자료
2	접합유리(6-0.76-6)	광주 Mock-up 시험

2.4 투과손실 측정방법 및 결과

2.4.1 투과손실측정방법

투과손실은 음의 입사조건에 따라서 다르지만, 건축음향설계에 이용되는 경우에는 랜덤입사에 대한 투과손실을 이용한다. 이러한 경우에 측정방법은 그림2와 같이 2개의 잔향실 사이에 시험재료(면적:S)을 설치하여 음원실 내의 평균음압레벨($\overline{L_1}$)과 수음실내의 평균음압레벨($\overline{L_2}$)을 측정하고, 수음실내(체적: V2)의 잔향시간(T2)을 측정하여 식1으로 계산하였다.

$$TL = \left(\overline{L_1} - \overline{L_2}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{S}{A_2}\right) \qquad (식1)$$

차량의 차체의 투과손실은 차량의 측벽과 바닥으로 구분해서 각각에 대한 시험편을 이용하여 KS F 2808, ISO 140-3와 ASTM E 90-044에 따라 실시되었다.

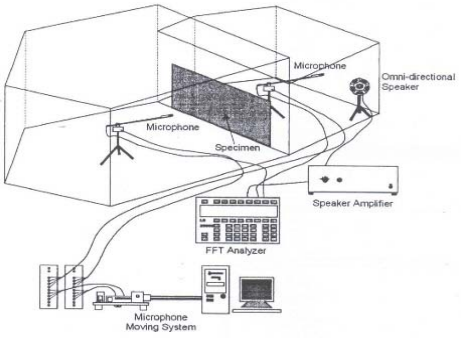

그림 2. 투과손실 측정 시스템

차량의 실내소음 예측결과와 투과손실의 측정값을 이용한 결과를 비교/검토하기 위해서 차체바닥 및 도어, 측창문의 투과손실을 측정하였다. 측정방법은 KS F 2808 및 ISO 140-3에 따라 실시하였다.

2.4.2 투과손실 측정결과 비교

2.4.2.1 상구조의 소음투과손실 비교

유니텍스 45t의 경우, 유니텍스25t에 비하여 전체적으로 2~7dB 높은 경향을 보임을 알 수 있다. 부유상구조의 경우, 250Hz 이하의 영역에서는 mass-air-mass resonance로 인하여 유니텍스 구조에 비하여 낮은 소음투과손실을 가지나, 그 이상의 주파수 영역에서는 플로어 상하부의 높은 소음 및 진동 절연 성능으로 인하여 높은 소음투과손실을 가진다.

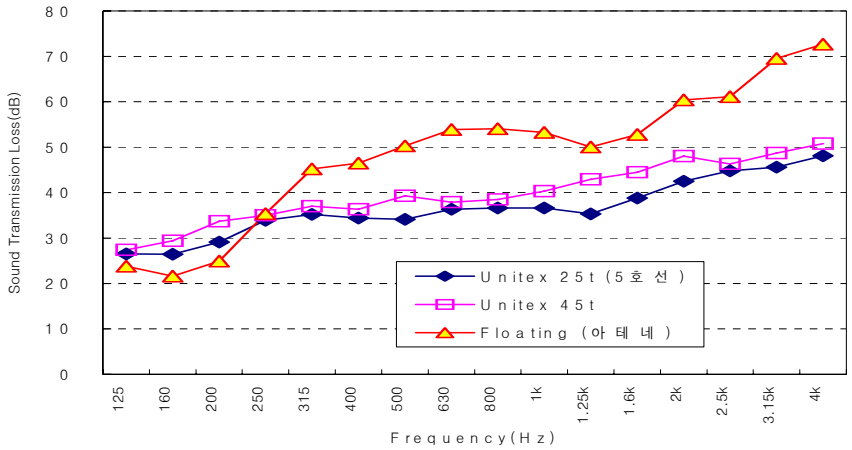

그림 3. 상구조의 소음투과손실 비교

2.4.2.2 틈새상태에 따른 도어의 소음투과 손실 비교

소음투과손실을 비교해 보면, 틈새가 존재하는 도어는 틈새 개선된 도어에 비하여 10dB 정도 낮은 소음투과손실을 가짐을 알 수 있다. 일반적으로 차체의 다른 부위에 비하여 낮은 소음투과손실을 가지는 이러한 도어의 소음투과손실 저감은 직접적으로 실내 소음 레벨을 상승시킨다.

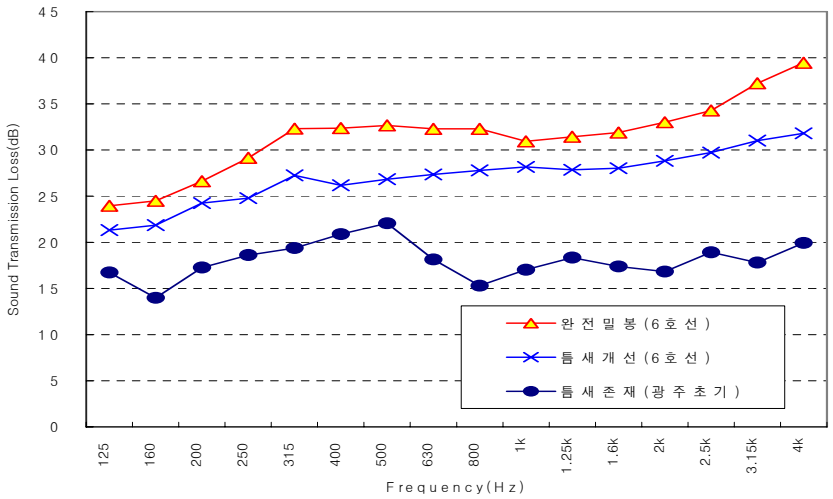

그림 4. 틈새 상태에 따른 도어의 소음투과손실 비교

2.4.2.3 측창문의 소음투과 손실 비교

측창문의 소음투과손실을 비교한 결과이다. 접합유리(6-0.76-6)가 다른 유리 구조에 비하여 전체 주파수 대역에서 높은 소음투과손실을 가짐을 알 수 있다. 반면에 복층 유리의 경우, 12.76mm접합유리에 비하여 낮은 면밀도를 가지며 댐핑 성능 또한 떨어지므로 다소 낮은 소음투과손실을 보임을 알 수 있다.

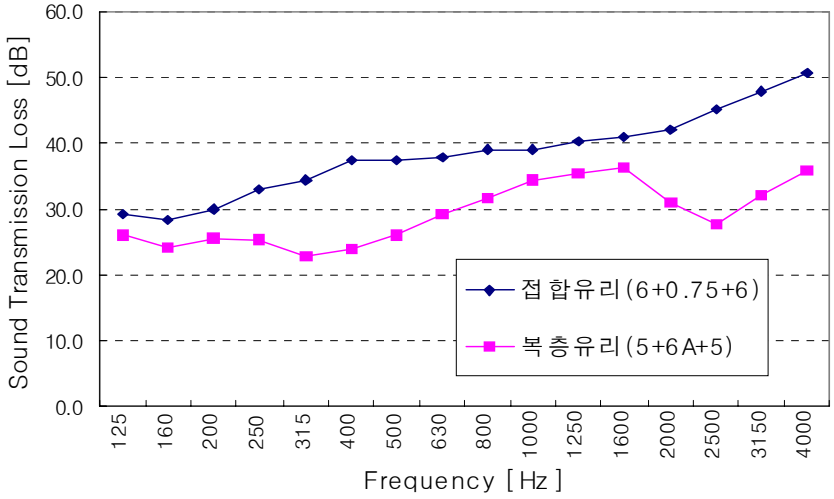

그림 5. 측창문의 소음투과손실 비교

2.4.2.4 차체 주요단면의 소음투과 손실 결과

차체 주요단면의 소음투과 손실 결과는 그림6과 같이 나타난다.

차체의 소음투과손실에 대하여 최대값과 최소값, 그리고 일반적인 차체 투과손실 영역을 나타내고 있다. 여기서 붉은 선은 최대와 최소값을 나타내며, 파란 상자는 차체 소음투과손실의 일반적인 수준을 나타낸다.

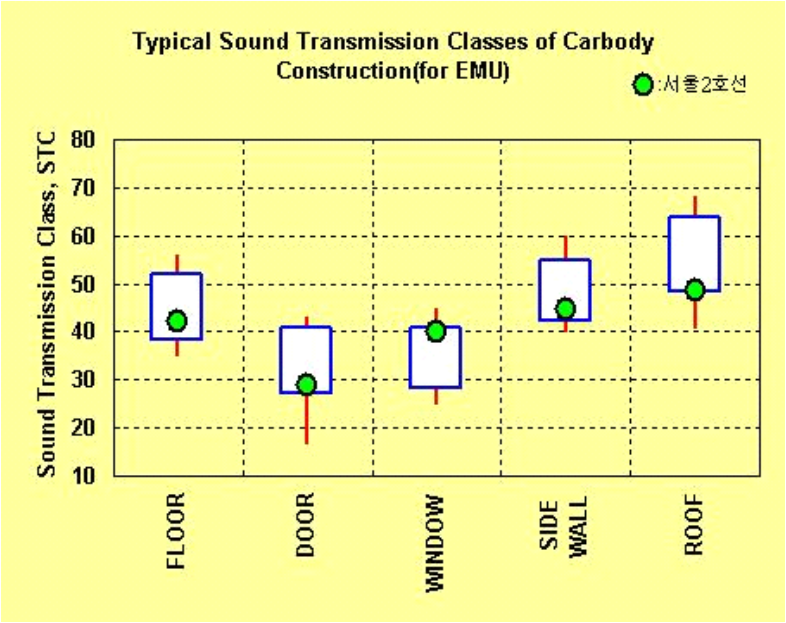

그림6. 차체 주요 단면의 소음투과손실 결과

3. 차량의 실내소음 기준 및 예측 결과

3.1 차량의 실내소음 기준

현재 운행 중에 있는 차량의 소음 기준치는 표4과 같이 최고속도 80km/h 주행 시 객실내 실내소음은 80dB(A)이하로 규정 되어있다.[5]

표4. 철도차량의 실내소음 기준

운행속도	실내 소음	주행조건	비고
80Km/h	80dB	자갈도상, 직선 평탄선로 에어콘 소음 포함	

3.2 차량의 실내소음 예측결과

차량의 실내소음을 해석하기 위해서 현재 항공기, 자동차 및 선박분야뿐만 아니라 철도차량분야에서도 활발히 적용되고 있는 통계적에너지해석법(Statistical Energy Analysis :SEA)을 이용하였다.[(1),(2)] 차량의 해석모델은 그림7와 같이 벽면, 바닥, 창문, 출입문을 90개의 하부시스템과 객실공간을 2개의 음향공간으로 분할하여 각각의 하부시스템의 에너지 전달경로를 확인할 수 있도록 모델링 하였다.

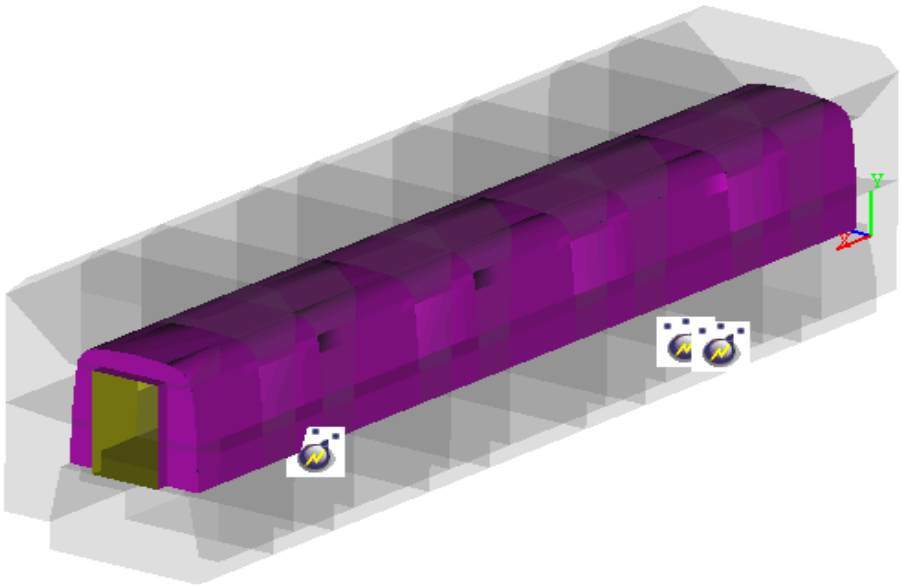

그림 7. 서울2호선 AutoSEA 해석 모델

3.2.1 상구조 변경에 따른 실내 소음 해석

서울2호선 설계 진행 안으로 잡혀있는 상구조 유니텍스 40t, 틈새 개선 도어, 복층 측창문을 기준으로 하여 상구조 변경에 따른 실내 소음을 해석 하였다.

상구조 변경에 따른 실내 소음 해석 결과는 표5와 같다.

표5. 상구조 변경에 따른 실내 소음 해석 결과 비교

연번	차체구조			해석결과(dBA)
	상구조	도어	측창문	
1	유니텍스40T	틈새 개선	접합 (6-0.76-6)	76.4
2	유니텍스 25T			76.9
3	부유상			76.3

3.2.2 도어 변경에 따른 실내 소음 해석

3.2.1절과 유사하게 설계 진행 예정 안을 기준으로 도어 변경에 따른 실내 소음을 해석 하였다. 도어 변경에 따른 실내 소음 해석 결과는 표6와 같다.

도어의 경우, 차체 단면 중에서 가장 낮은 소음투과손실을 가지므로 터널 주행 차량의 실내 소음에 가장 민감한 영향을 주는 부위이다. 차체와 도어 사이의 틈새 씰링이 불량일 경우, 이를 통한 소음 유입으로 인하여 실내 소음 레벨은 크게 상승한다. 소음 해석에서도 동일하게 틈새가 많은 도어의 경우, 틈새 개선된 도어에 비하여 8dB 가량 높은 실내 소음 레벨을 보였다. 반면에 틈새를 밀봉할 경우, 실내 소음이 크게 저감됨을 알 수 있다.

표6. 도어 변경에 따른 실내 소음 해석 결과 비교

연번	차체구조			해석결과(dBA)
	상구조	도어	측창문	
1	유니텍스 40T	틈새 개선	접합 (6-1.76-6)	76.4
2		틈새 많음		84.6
3		틈새 밀봉		74.0

3.2.3 측창문 변경에 따른 실내 소음 해석

3.2.1절과 유사하게 설계 진행 예정 안을 기준으로 측창문 변경에 따른 실내 소음을 해석 하여 표7과 같은 소음 해석 결과를 나타냈다.

표7. 측창문 변경에 따른 실내 소음 해석 결과 비교

연번	차체구조			해석 결과(dBA)
	상구조	도어	측창문	
1	유니텍스 40T	틈새개선	복층(5-6A-5)	76.9
2			접합(6-0.76-6)	76.4

접합유리(6-0.76-6)가 다른 유리 구조에 비하여 전체 주파수 대역에서 높은 소음투과손실을 가짐을 알 수 있다. 반면에 복층 유리의 경우, 12.76mm접합유리에 비하여 낮은 면밀도를 가지며 댐핑 성능 또한 떨어지므로 다소 낮은 소음투과손실을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

현재 운용 중에 있는 전동차량에 대한 차체 투과손실 측정 및 실내소음을 예측하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 차량의 바닥 및 도어, 측창문의 투과손실 측정결과 각각에 대한 STC(Sound Transmission Class)는 42dB, 29dB, 40dB를 나타내고 있다.
(2) 차량 바닥 및 도어, 출입문을 실제 재질과 유사하게 모델링하고, 전동차량이 80km/h로 주행 시 (측정한 차량하부의 소음을 소음원으로 적용한 결과) 객실 소음은 약 76dB(A)로 나타났다.
(3) 상구조의 경우 무게를 늘려 차음성능을 증대시키는 방향의 설계안은 에너지를 소비하는 교통수단에는 적합한 방법이 아니며, 증가한 무게에 비해 차음성능의 증가량은 그리 크지 않고 유니텍스 45t의 경우, 유니텍스 25t에 비하여 전체적으로 2~7dB(A) 높은 경향을 보임을 알 수 있다.
(4) 도어의 소음투과손실은 틈새가 존재하는 도어는 틈새 개선된 도어에 비하여 10dB(A) 정도 낮은 소음투과손실을 가짐을 알 수 있다.
(5) 측창문의 소음투과손실은 접합유리(6-0.76-6)가 다른 유리 구조에 비하여 전체 주파수 대역에서 높은 소음투과손실을 가짐을 알 수 있다.

참고문헌

1. Lyon. R. H.(1975), "Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems Theory and Application," MIT Press.
2. Ulf . Orrenius, (2003), "Development and Valiation of an SEA Model of a Metro Rail Car," Proceeding of the Vibro-Acoustic Users Conference, pp.1-72.
3. 김재철, 이찬우(2004.), “통계적 에너지 해석법을 이용한 KTX차량의 실내소음 해석” 한국철도학회춘계학술대회지, pp.75-79.
4. 서창영(2003), “통계적 에너지 해석법을 이용한 KTX 객실소음 예측” 중앙대학교 대학원 학위논문, pp.4-16.
5. 건교부(1998.2), “도시철도차량표준사양” 2.17항 소음』.
6. 김재철, 유원희, “전동차 실내 소음원 규명”.