<응용논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.7.817 ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

경춘선 전동열차의 실내 소음 특성

안용찬* · 이중혁* · 김석현**†
* 강원대학교 대학원 융합시스템공학과, ** 강원대학교 메카트로닉스공학과

Interior Noise Characteristics of the Electric Trains in Gyeongchun Line

Yong Chan Ann*, Jung Hyeok Lee* and Seock Hyun Kim†
* Dept. of Convergence System Engineering, Kangwon National Univ.,
** Dept. of Mechatronics engineering, Kangwon National Univ.

(Received March 14, 2014 ; Revised May 14, 2014 ; Accepted May 14, 2014)

Key Words: Gyeongchun Local Electric Train(경춘 일반전동열차), ITX(도시간 준고속열차), Tunnel Noise (터널 소음), Structure-Borne Noise(구조전달소음), 공기전달소음(Air-Borne Noise)

초록: 경춘 복선의 일반 전동열차와 준 고속 열차인 ITX-청춘이 개통된 이래, 서울과 춘천을 오가는 유동인구가 급증하고 있다. 이는 대용량성과 저렴한 요금, 운행의 정시성 및 안전성 측면에서 다른 교통수단에 비해 철도 운송의 경쟁력이 높기 때문이다. 그러나 실내소음 측면에서는 전동 열차에 대한 승객들의 불만이 상당하다. 특히 터널 구간에서 실내소음은 급격히 높아져 대화에도 지장을 줄 정도이다. 본 연구에서는 경춘선 일반 전동 열차와 ITX-청춘 열차를 대상으로 정상 주행 중의 실내소음 특성을 비교 분석한다. 개활지, 터널 및 교량에서의 소음 레벨, 주파수 특성과 음질 지수를 분석하고, 실내 위치에 따른 소음레벨의 차이를 비교하여 소음의 전달 경로를 파악함으로써 향후 전동 열차의 실내소음 향상을 위한 기초 정보를 제공하고자 한다.

Abstract: Since the opening of the double-track railway for the Gyeongchun local electric train and the semi-high speed train ITX, floating population between Seoul and Chuncheon has rapidly increased. This is attributable to the competitiveness of the railway service in terms of punctuality and safety of operation, mass transportation and low fare. However, many passengers have expressed strong dissatisfaction and displeasure towards the interior noise and its high rate of increase, particularly in tunnel sections. In this study, the interior noise characteristics of Gyeongchun local electric train and ITX were analyzed and compared. Noise levels, frequency spectrum and sound quality indices were compared for the open land, tunnel and bridge. Finally, from the noise levels depending on the location in the vehicle compartment, the noise transmission path was determined and a basic strategy for reducing the interior noise was developed.

1. 서 론

2010년 12월 경춘선 전철이 개통된 이래, 철도 수송의 대용량성 및 저렴한 요금, 높은 안전성과 정시성 때문에 이용객들이 비약적으로 증가하고 있다. 그러나 이러한 편리함에도 불구하고, 경춘 전동열차를 이용하는 많은 승객들이 객실내의 소음 환경에 대해서는 적지 않은 불만을 토로하고 있다. 현재 경춘선에는 상봉역 ~ 춘천역 구간 18개역에서 정차하는 일반전동열차와 용산역(청량리역) ~ 춘천역을 운행하는 최고속도 180km/h 급의 준고속열차인 ITX-청춘의 2가지 열차가 운행중이다. 특히, 일반 전동열차의 경우, 상봉역에서 춘천역까지 총 80.7km의 운행구간 중 약 40%를 차지하는 터널 구간에서의 실내 소음에 대한 불만은 매우 높다. 두 차량 모두 도시철도에 비해 역간 거리가 길어, 운행 속도가 더 높고 이에 따라 실내 소음도 증가한다. 터널 내에서는 각종

† Corresponding Author, seock@kangwon.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

소음원으로부터 발생한 소음이 터널 벽에서 반사되므로, 터널 내 폐공간의 음향 인텐시티가 크게 증가한다.[1] 그 결과 승객들은 개활지에 비해서 터널 안에서 큰 소음레벨의 증가를 체감한다. 소음 대책을 수립하기 위해서는 실내소음 특성과 전달경로의 파악이 우선되어야 하는데, 승객을 태운 정상 운행상태에서 운행 조건을 확인하면서 실내소음을 측정하는 데에는 현실적인 한계가 있다. 본 연구에서는 승객 수가 가장 적은 첫 차의 객실을 대상으로 소음을 녹음하였고, 승객에 의한 잡음이 없는 실내소음을 대상으로 특성을 분석하였다. 일반전동열차와 ITX-청춘 열차의 터널 및 교량, 개활지 구간에서 객실내의 소음을 대상으로, 위치별 실내 소음레벨, 주파수특성 및 음질지수를 비교하고, 소음의 전달 경로를 파악하여 향후 정숙한 전동열차의 설계 및 차음 대책을 위한 기초 자료를 제공하도록 하였다.

2. 소음 측정 방법

2.1 측정 장비 및 측정법

소음 분석은 4-Channel Analyzer(Hamonie, 01dB사)를 사용하였다. 두 개의 Microphone(Type 40 FAF, G.R.A.S사)을 사용하여 소음을 측정하였으며, 각 측정 지점의 소음 레벨은 5초 등가음압레벨을 측정하였다. 음질 지수 분석에는 dB-Sonic을 사용하였다.

2.2 측정 궤도 구간

제동 소음이 발생하지 않는 구간을 선택하여 개활지, 교량, 그리고 터널의 세 구간에서 실내소음을 측정하였다. ITX와 일반 전철 공통으로, 교량 소음은 굴봉산역 ~ 가평역 사이에서 측정하였고, 터널 소음은 마석역 ~ 대성리역 사이의 3개 터널 중 2번째 터널에서 측정하였다. 개활지 소음은 일반 열차의 경우, 김유정역 ~ 남춘천역 사이, ITX는 마석역 ~ 대성리역 사이에서 측정하였다. 일반 전철과 ITX의 개활지 측정 구간이 다른 이유는 각 열차별로 같은 속도에서의 터널 소음과 개활지 소음을 비교하도록 개활지를 선정하였기 때문이다.

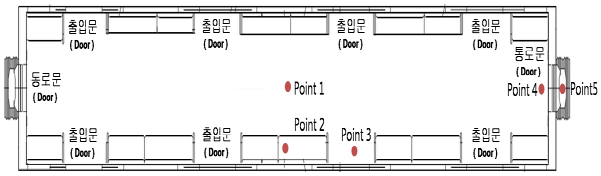
2.3 객실내의 측정 위치

2.3.1 일반전철

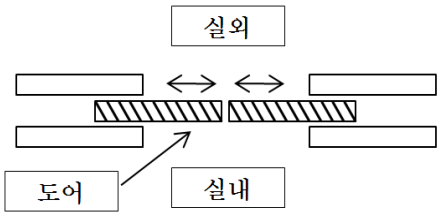
Fig. 1(a)와 같이 일반전철의 객실 내 중앙에서 입석 승객의 귀 위치에 해당하는 160cm 높이(Point 1)와, 좌석 승객의 귀 위치인 유리창 내측 120cm 높이(Point 2)에서 측정하였다. 일반전철의 객실 출입문은 Fig. 1(b)의 포켓 슬라이딩(Pocket sliding) 구조인데, 소음의 측정은 출입문 내측(Point 3)과 통로 문 내측(Point 4), 외측(Point 5)에서도 수행하였다. Point 2 ~ Point 4 에서는 벽면으로부터 10cm 거리에서 측정하였다.

2.3.2 ITX-청춘

Fig. 2(a)에 보이는 ITX의 객실은 출입문의 위치가 일반 전동열차와 전혀 다르다. Fig. 2(b)와 같이 통로 측면에 플러그 인(Plug in) 형태의 출입문이 설치되어 있고, 통로와 객실 사이에 슬라이딩 도어

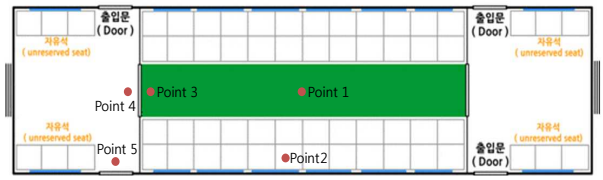


(a) Compartment

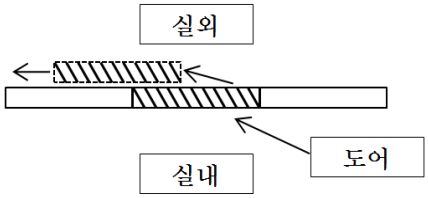


(b) Pocket sliding door (Point 3)

Fig. 1 Measurement in Gyeongchun local line



(a) Compartment



(b) Plug-in door (Point 5)

Fig. 2 Measurement in ITX

(Sliding door)가 있다. 그 결과 외부의 소음이 객실 내의 출입문으로 바로 들어오는 일반 전동열차에 비해 소음의 차단 측면에서 매우 유리하다. Fig. 2(a)와 같이 객실 중앙, 유리창, 그리고 통로문 내측의 3개 지점과(Point 1, 2, 3) 통로문 밖 2개 지점(Point 4, 5)에서 소음을 측정하였다.

3. 실내 소음 분석결과

3.1 일반전철

Table 1은 개활지, 교량, 터널 구간에서 ITX와 일반전철의 소음레벨이고, Table 2는 각 전철의 객실 내 위치에 따른 소음레벨을 비교한다. 속도는 개활지와 교량에서는 GPS 신호로, 터널 내에서는 진입 전/후의 시간과 터널 길이로 부터 구하였다. 일반전철의 속도는 개활지와 터널에서 각각 90km/h, 98km/h 이고, ITX의 속도는 모두 168km/h 로 나왔다.

Table 1을 보면, 일반전철에서는 개활지 90km/h의 속도 하에서, 객실 중앙보다는 유리창 내측이 약간 높게 나온다. 또한 ITX에 비해서 운행 속도는 훨씬 낮지만 소음레벨은 3 ~ 4dB 정도 더 높다. 일반전철에서 교량의 소음레벨은 개활지와 유사하다. KTX의 경우에도 개활지와 교량에서의 소음레벨이나 스펙트럼은 거의 유사한 것으로 보고된 바 있다.[2]

Table 2의 터널 소음을 보면, 개활지 대비 약 7dB가 증가하여 77dB(A) 이상의 소음레벨을 보인다. 특히 출입 문 내측(Point 3)에서는 82dB(A)로 옆 사람과 대화하기가 불편할 정도로 높아진다. 이는 포켓 슬라이딩(Pocket sliding) 구조에서 문짝과 차체 사이의 틈새로 공기전달음이 많이 유입되는데 기인한다. 직접 청음결과에서도 출입문 부근에서 외부 소음이 많이 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 차음이 취약한 통로 상에서는 85dB(A)로 매우 높으나, 통로문 내측 객실에서는 77dB(A)로 객실 중앙과 대등하다. 이는 통로문에 의하여 객실 외부의 통로 소음이 상당부분 차단됨을 의미한다. 결과적으로 일반 전동열차의 경우, 객실 내 출입문이 외부 소음의 주요 전달경로이고 유리창도 차음성능이 충분치 않은 것으로 평가된다. 터널 내에서 유리창의 차음취약성은 고속전철에서도 보고된 바 있다.[3]

Fig. 3은 전철의 객실 중앙의 소음 스펙트럼으로, 소음원에 대한 정보를 제공한다. Fig. 3(a)의

Table 1 Noise level in the passenger compartment [Leq, dB(A)]

	Section	Velocity (km/h)	Point 1 (중앙)	Point 2 (유리창)
Gyeong -chun	open land	90	70.6	71.1
	bridge	90	71.2	71.5
	tunnel	98	77	78.2
ITX	open land	168	66.7	68.2
	bridge	70	59.1	61.4
	tunnel	168	73.4	74.7

Table 2 Passenger compartment noise level in tunnel [Leq, dB(A)]

Tunnel	Gyeong-chun (98km/h)	Tunnel	ITX (168km/h)
Point 1 (객실중앙)	77	Point 1 (객실중앙)	73.4
Point 2 (유리창)	77.9	Point 2 (유리창)	74.7
Point 3 (출입 문)	82	Point 3 (통로문안)	75.9
Point 4 (통로 문 내부)	77	Point 4 (통로문밖)	79.5
Point 5 (통로)	85	Point 5 (출입문)	79.6

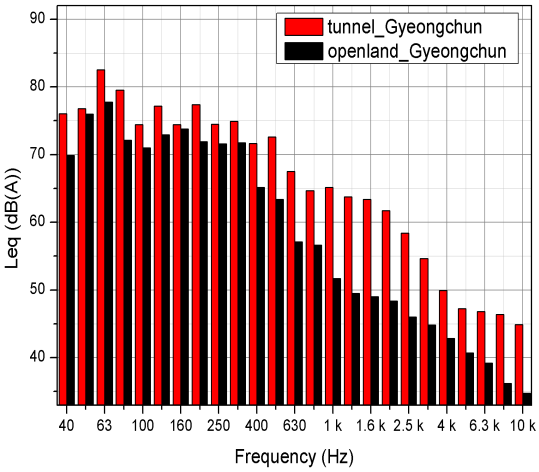
일반전철의 주파수 특성을 보면, 400Hz 까지는 터널 소음이 개활지보다 조금 높게 나오다가 400Hz 이후 그 차이는 현저히 증가한다.

선행 연구결과[4]에 따르면, 철도차량의 소음전달 경로는 레일-휠의 진동이 대차 마운팅부를 통하여 차체로 전달되어 실내소음으로 방사되는 구조전달음과, 외부 소음이 틈새를 통한 누설이나 차체를 투과하여 유입되는 공기전달음으로 구분된다. 동일한 운행속도와 레일 조건 하에서 터널 내/외부에서 구조전달음의 변화는 거의 없을 것이나, 터널 안에서와 같이 외부 음압이 급격히 높아지면 공기전달음은 급격히 증가할 것이다. 터널 안에서 일반전철의 속도가 개활지보다 약간 높은 것을 감안하면, 같은 도상 조건하에서 구조전달 소음은 터널 안에서 조금 높아질 것이나, 공기전달 소음은 폐공간인 터널에서 크게 증가할 것이다. 이러한 상황을 고려할 때, 증가분이 작은 400Hz 아래의 저주파수 소음은 구조전달음이 지배하는 것으로 볼 수 있고, 증가분이 매우 큰 400Hz 위의 고주파수 대역은 공기전달음이 지배하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 터널 내에서 일반전철의 소음대책은 우선적으로 공기전달 소음

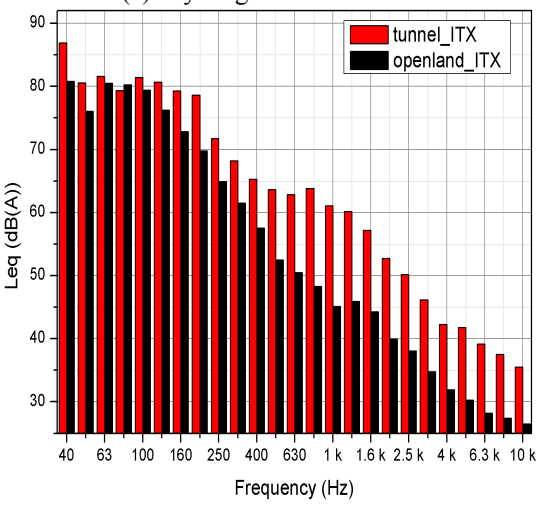
의 효과적인 차단에 초점을 맞추어야할 것이다.

3.2 ITX-청춘

Table 1에서 터널 내 소음이 개활지 소음보다 7dB정도 높게 나오는 것은 일반전철과 비슷하다. 그러나 ITX는 빠른 속도에도 불구하고 일반전철에 비해서 소음레벨은 4dB 정도 낮다. 이는 일반전철 대비 차음성능이 매우 우수함을 의미한다. Table 2의 터널 안 실내소음은 객실중앙-유리창-통로문 순으로 조금씩 증가하여 통로문 내측에서 가장 높다. 통로에서는 79dB(A) 이상으로 높게 나온다. 즉, ITX에서는 통로로 유입된 소음이 통로 문을 통하여 객실 내로 전달되는 것이 주요 경로가 된다. 한편, ITX의 출입문은 플러그인(Plug-in) 구조로 기밀성이 좋아 외부 소음이 통로로 유입되는 것을 상당부분 차단한다. 이는 Table 2에서 ITX의 출입문 안 소음레벨이 일반전철의 출입문 안 소음레벨보다 낮은 것으로부터 확인된다. Fig. 3(b)의 ITX 소음 스펙트럼을 보면, 터널 안에서 400Hz 이후의 성분이 급증하는 것이 일반전철과 유사하다. 터널 안과 밖에서의 속도가 같음을 감안하면, 구조전달 소음은 터널 안과 밖에서 대등하나 터널 내에서 급상승한 외부소음이 차체나 유리창을 통하여 투과되어 들어오는 공기전달음은 터널 안에서 크게 증가하고 있다.



(a) Gyeongchun local line



(b) ITX

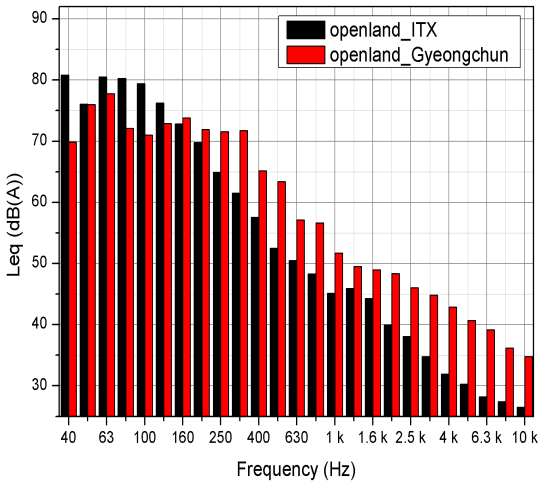
Fig. 3 Frequency Spectrum in tunnel and on open land

3.3 음질 평가

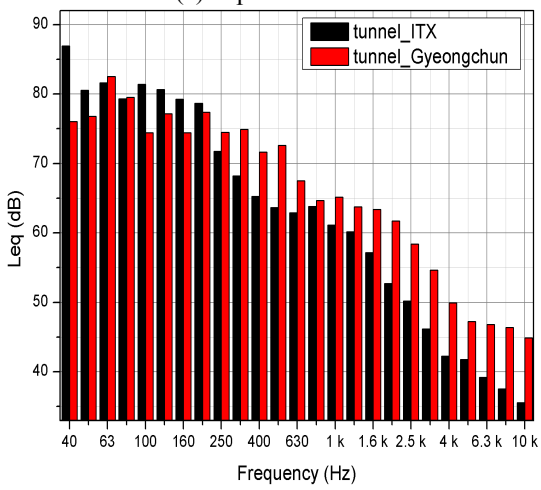
Fig. 4에서 ITX와 일반전철의 주파수 특성을 비교해보면, 개활지와 터널 모두 200Hz 아래에서는 속도가 훨씬 빠른 ITX의 실내소음이 더 높다. 그러나 250Hz 이후에서는 일반전철이 낮은 속도임에도 ITX보다 소음이 높아진다. 이러한 주파수 분포특성의 차이는 소음레벨의 차이만 아니라 음질의 차이도 발생시킨다. 소음레벨과 함께 사람의 청감을 반영하는 음질지수로, Zwicker[6]등이 제안하여 널리 사용되는 Loudness, Sharpness, Roughness를 비교해본다. 좌석 승객을 고려하여 유리창 안쪽의 측정 데이터를 사용하여 추출한 음질 지수를 Table 3에 보인다. ISO 532B[7]에 의해 표준화 되어, 주관적으로 느끼는 음의 크기를 나타내는 Loudness는 일반전철과 ITX 모두 개활지 대비 터널에서 15sone 정도 급격히 증가한다. 또한 두 차량 공통적으로 터널에서 공기전달 소음의 고주파 영향이 커지므로 Sharpness가 크게 증가하여 더 날카롭게 느껴진다. Loudness와 Sharpness는 성가신 정도에 큰 영향을 미친다.[8]

Table 3 Sound quality parameters

	Section	Loudness (Sone)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)
Gyeong-chun	open land (90km/h)	25	0.89	0.28
	tunnel (98km/h)	41	0.98	0.36
ITX	open land (168km/h)	20.6	0.64	0.26
	tunnel (168km/h)	34	0.74	0.3



(a) Open land



(b) Tunnel

Fig. 4 Frequency Spectrum of ITX and Gyeongchun local line in tunnel

따라서 Loudness와 Sharpness가 개활지에 비해 터널에서 상당히 높으므로 터널 내에서 성가심도를 클 것이며, 그 정도는 일반전철에서 훨씬 크게 나온다.

4. 소음의 저감 전략

실내소음은 차륜-레일의 진동이 대차 마운팅을 통하여 차체진동으로 전달되는 구조전달음과 차륜-레일 소음, 공력소음, 기계소음이 차체의 틈새를 통하거나 패널을 투과하여 들어오는 공기전달음으로 구분된다.[4] 무게와 비용의 증가를 최소화하면서 실내소음을 저감시키기 위해서는 가장 취약한 부분, 즉 가장 지배적인 전달경로를 개선하여야 한다. 측정결과, ITX의 경우 통로 문을 통한 소음전달이 상대적으로 크므로, 통로 문의 차음성능을 높일 필요가 있다. 가장 심각한 소음 문제는 터널안의 일반열차에서 발생한다. 90km/h의 일반열차는 168km/h의 ITX보다도 객실 내 소음이 약 4dB 더 높다. 그 원인은 Fig. 4의 일반전철과 ITX의 소음 스펙트럼에서 찾을 수 있다. 터널 안에서 약 200Hz 아래에서는 ITX의 소음레벨이 일반열차보다 높다. 이는 저주파수영역의 구조전달 소음은 ITX가 일반전철에서보다 높음을 의미한다. 반면, 400Hz 이후에는 훨씬 느린 일반열차의 소음이 ITX보다 크게 높아지고 이 때문에 총 소음레벨이 4dB 높게 나온다. 이는 터널 내에서 공기전달음이 급격히 증가하는 데에 기인한다. 터널 내에서 증가한 외부 소음은 일반전철의 슬라이딩 출입문을 통하여 잘 전달된다. 이는 슬라이딩 출입문 부근에서 측정한 소음레벨이 가장 높게 나오는 것으로 증명된다. 따라서 일반 열차의 출입문을 개선하지 않고서는 실내소음을 줄이는 것은 매우 어렵다. 1차적으로 출입문의 틈새를 막아 기밀성을 높이는 작업이 필요하다. 이와 함께 출입문 패널과 유리창의 투과손실을 높여 측면재 전체의 평균 투과손실을 높이는 방향으로 차음 전략을 세울 필요가 있다.

5. 결 론

경춘 일반 전철과 ITX의 운행 중 터널, 교량 및 개활지 구간에서의 실내 소음 특성을 비교 분석하였다. 일반 전철과 ITX 모두 터널 내에서의 소음레벨은 개활지 대비 6dB ~ 7dB 높았고, 이는 400Hz 이상에서 지배적인 공기전달 소음의 큰 상승에 기인하였다. 일반전철의 경우, 출입문 내측에서 객실 내 다른 3개 지점보다 4dB 이상 높았다. 이는 400Hz 이후의 공기전달 소음이 급증하는 데에 기인하였다. 터널 내에서 급증한 외부 소음이 객실 출입문과 유리창을 통하여 전달됨으로써 실내 소음이 급상승하였다. 특히, 일반전철의 슬라이딩 구조 출입문은 ITX 출입문의 플러그인 구조 에 비해 누설이 크므로, 일반전철은 객실 출입문의 차음성능을 높이는 방안이 최우선적으로 필요하며, 동시에 유리창의 투과손실을 높여 측면 전체의 평균 투과손실을 높여야 한다. ITX는 일반전철보다는 실내 소음이 낮으나, 실내 소음 개선을 추진한다면, 통로 문과 유리창의 차음성능을 높이는 것이 우선적으로 필요하다. 본 연구결과를 기반으로, 향후 주요 소음원의 개선

방안과 전달경로 상의 효과적인 댐핑 및 차음 방안에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 “2014년도 강원대학교 학술연구조성비(과제번호-120140164)”로 연구하였으며, 지원에 감사드린다.

참고문헌
(References)

(1) Choi, S. H., Kim, J. C., Lee, C. W. and Cho, J. H., 2004, "Interior noise of a KTX vehicle in a tunnel," *Proceedings of Annual Conference of the Korea Society for Railway*, pp. 88~92.

(2) Choi, S. H., Kim, J. C., Lee, C. W. and Cho, J. H., 2004, "Proceedings of ACOUSTICS 2004," *Australian Acoustical Society*, pp. 415~419.

(3) Kim, S. H., Lee, H. J. and Kim, J. T., 2012, "Sound Insulation Strategy for the Tunnel Noise in a High Speed Train," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 4, pp. 315~322.

(4) Woo, K. J. and Kim, S. H., 2008, "A Study on the Reduction of Structure-Borne Noise in a Train," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 6, pp. 519~523.

(5) Park, S. I. and Kim, W., 2012, "A study on the Design for Side Entrance Door According to Different Type," *Proceedings of Spring Conference of the Korea Society for Railway*, Vol. 2012, No. 5, pp. 503~507.

(6) Zwicker, E. and Fastl, H., 1974, Psychoacoustics: Facts and Models, Springer Verlag, Berlin.

(7) Zwicker, E., Fastl, H., Widmann, H., Kurakata, K., Kowano, S. and Namba, S., 1991, "Program for Calculating Loudness According to DIN 45631 (ISO 532B)," *Journal of Acoustic Japan (E)*, Vol. 12, pp. 39~42.

(8) Park, B., Kim, D. K., Jeon, J. Y., Choi, S. H. and Park, J. H., 2010 "Sound Quality Characteristics for Interior Noise of High Speed Train," *Transactions of the KSNVE*, Vol. 20, No. 8, pp. 774~781.