

도시철도 차량의 차음향상에 관한 연구

A Study on the Increase of Transmission Loss of Metro Train

최 용 운†·구 정 서*·유 원 희**·고 효 인**

Yong-woon Choi, Jeong-seo Koo, Won-hee You and Hyo-in Koh

(2009년 11월 24일 접수 ; 2010년 1월 27일 심사완료)

Key Words : Transmission Loss(투과 손실), Metro Line(도시철도노선), Interior Noise(실내소음)

ABSTRACT

Lower tunnels and concrete based tracks are introduced to newly constructed metro lines to reduce the construction and track maintenance fees. But such a lower tunnel together with concrete based track causes higher interior noise of metro trains. It is required that the trains should not only be a transportation media but also be comfortable. So, to lower the metro train's interior noise level, design was made to increase the transmission loss per sectional part. Through such a design, it is expected that about 7 dB(A) of noise level will be reduced compared to that of the conventional train.

기 호 설 명

- L_S : 측부 내부소음수준
- L_E : 단부 내부소음수준
- L_U : 마루구조 내부소음수준
- L_R : 지붕구조 내부소음수준
- EN : 외부소음
- TL : 소음투과손실
- IL : 내부소음수준

1. 서 론

도시철도 차량의 객실 내 소음은 터널내부 구조에 의한 공기 전달음과 대차 및 차체를 통한 구조 전달음에 의하여 결정된다⁽¹⁾. 도시철도 소음은 공기 전달음이 매우 중요한 역할을 수행하게 되며, 터널

의 구조에 의해 상당량 소음 수준의 감소를 이룰 수 있다⁽²⁾.

차량 내부 소음을 저감하기 위해서는 전동차 각 부위별 소음 수준을 먼저 파악 하고, 부위별 시편을 제작 하여 측정 결과를 고려함과 동시에 차음성능 및 차량 제작의 난이도와 경제적인 측면 등을 고려하여 설계 목표치를 설정해야 한다. 이중에서도 차체의 각종 틈새를 없애는 것은 차음 성능 향상에 매우 중요한 변수로서 차체의 소음 투과손실을 높이는 노력에 비하여 노력과 시간을 절약 할 수 있는 장점이 있다고 할 수 있다.

그동안 지하철 내부 소음 저감에 대한 연구는 접근성 제한으로 학술적인 연구가 활발하지 못한 실정이었으나, 이 연구에서는 전동차 부위별 투과 손실 향상을 위한 시편 제작 및 측정을 통하여 전동차 제작 전에 소음 수준을 예측 할 수 있는 기틀을 마련한 의미가 있다고 사료된다.

2. 부위별 투과손실 측정

전동차의 측면구조는 측 판넬과 측면 유리 및 측

† 교신저자; 정회원, 서울도시철도공사
E-mail : choiyw@smrt.co.kr
Tel : (02)6311-3110, Fax : (02)6311-4121

* 서울산업대학교

** 정회원, 한국철도기술연구원

출입문으로 구성되어 있어, 터널 내를 최고속도로 운행할 경우 측면의 외부소음은 105 dB(A) 정도의 수준을 지니므로, 만일 국토해양부에서 정한 자동차 표준화 규정대로 객실 내 80 dB(A) 이하를 얻고자 한다면 측면의 평균투과손실은 30 dB 이상의 정량값을 지녀야 한다.

벽체의 차음은 표면반사, 흡음, 간극 및 일치효과에 의하여 결정되나, 그 중 간극은 이론적인 한계치를 정하는 변수가 되므로 설계시 간극값의 관리가 다른 변수에 비하여 상당히 중요하다⁽²⁾.

시편을 제작하여 시험하고자 할 경우에 시편의 종류에 따라 차이가 있을 수 있으나, 철도 차량의 벽체 소음투과손실 시험은 시편의 구성에서부터 막대한 예산과 인력, 시간을 필요로 한다.

단일벽의 경우에는 질량법칙에 따라 면밀도와 주파수에 의하여 투과손실이 결정되나, 흡차음재를 포함한 적층 복합 구조물의 예측에 대해서는 질량법칙을 적용할 수 없다. 일반적으로 적층 벽체는 전달행렬(transfer matrix)법이나 유한요소법(finite elements method)을 이용하여 예측할 수 있다. 전달 행렬법은 이론상 무한 평판을 가정하였고 곡률을 포함한 자동차와 같은 구조에는 적용이 불가능하다. 반면에 유한요소법을 이용한 적층 복합 구조의 소음투과손실 해석은 복잡한 프로그래밍 과정을 거쳐야 하는 단점이 있다.

이 연구 중 시편의 시험은 KCC 중앙연구소에서 수행되었으며, 측정 방법은 KSF 2808 (실험실에서의 음향 투과 손실 측정 방법)에 준하여 시행하였다.

시편은 중량물로 구성되어 그 중량 및 체적이 상당하므로, 시편의 크기를 제한하여 수행할 수밖에 없었다. 시편의 크기는 1.5 m × 1.5 m로서 음파의 속도가 340 m/s이고 시편의 표면에서 최소 1개 이상의 파장을 형성해야만 투과손실 측정이 가능하다. 그 결과 측정 결과에서 신뢰성이 있는 최소 주파수는 250 Hz이며 만일 반파장에 해당되는 데이터까지 고려한다면 약 125 Hz이다.

측정된 결과는 Table 1에서부터 Table 5에 이르기까지 ISO 또는 ASTM에서 정한 바에 따라 바닥 19, 측면 8, 지붕 1, 출입문 4, 출입문 포켓 1, 측창문 7개의 시편에 대하여 각 24회 측정된 값을 평균 한 것으로 대표값을 정리한 결과이며, 각 그림 및 표에서의 투과손실(TL) 및 선의 의미는 시편별로 주파수 대역

별 투과손실을 나타낸 것이다. 각 부위별 시편 측정 결과 중에서 차량바닥은 중대역 구간(400 Hz ~ 1000 Hz), 차량 측면은 저주파대역(63 ~ 400 Hz)의 투과손실이 큰 시편을 선택토록하고 차량하부의 외부소음 수준과 객실내 중앙소음과의 차음이 30 dB 수준을 만족하도록 하며, 제작시 난이도나 경제적인 측면 등을 감안하여 설계목표치에 근접한 소음투과 손실치를 지니는 구조를 선정하여 시험을 시행하였다.

Fig. 1에서와 같이 차량의 객실 내 소음을 최소화하기 위하여 수행한 마루구조의 소음 투과 손실 측정 결과 기존 차량의 마루구조는 38 dB 이었으나, 개선안에 따르면 최대 42 dB까지 4 dB 정도의 투과손실을 높일 수 있는 것으로 측정되었다.

기존의 마루구조는 총 두께 25 mm로서 keystone plate와 Unitex, Linolium으로 구성하였으나, 개선안은(Fig. 1 진한표시부분) 총 두께 45 mm의 마루구조로 keystone plate와 unitex, damping sheet, linolium으로 구성하였다. Fig. 2에서와 같이 측판의 경우에는 기존 골조타입의 구조와 달리, two-sheet 방식 구조로 변경되었으며, 지붕구조는 실제적으로 터널 내부의 소음이 높지 않은 위치이므로 기존의 구조를 그대로 사용하여도 객실 내 소음에 영향이 없다고 판단되었지만, 배기팬의 공간이 터널과 직접 통하므로 차체기밀 유지를 위해 배기팬을 제거하였다. Fig. 3에서와 같이 측출입문 및 출입문을 구성하는 door pocket은 도시철도 차량의 기밀유지에 상당히 취약한 부분이므로 출입문과 포켓 간격을 좁히고 차음패드와 브리시를 설치하여 객실 내 차음의 중요한 변수를 보강하였다.

기존의 도시철도에 사용되었던 출입문은 25 mm의 하니컴 판넬로 이루어져 있으며, 그 투과손실은 26 dB인 반면에, 다양한 시편을 구성하여 시험한 결과 30 mm의 하니컴 판넬을 사용할 경우에는 630 Hz ~ 1250 Hz 대역의 투과 손실이 높아져서 총 투과손실은 32 dB로 약 6 dB 이상의 투과 손실치를 높일 수 있었다. Fig. 4에서와 같이 측 창문의 경우에는 기존의 창문이 단층창으로 구성되어 소음투과손실이 낮으므로, 이를 접합유리로 변경하였으며, 차체단부(end panel)는 외판과 내장판과의 공간이 280 mm로 적당량의 공기층을 내포하고 있어 차음 성능은 대체적으로 우수하였으나, 도어포켓부위 흡음 성능을 향상시키기 위해 흡음재를 설치하였다.

Table 1 Noise transmission measurement result of the improved floors(remark : sample no.)

Sample	T.L (dB)	Remark
25t, Keystone plate with Billytex	39	19
25t, Keystone plate with Unitex(existing)	38	14
30t, Keystone plate with(Unitex ⊕ 0.4t SUS plate)	36	13
30t, Keystone plate with(Unitex ⊕ 0.4t SUS plate ⊕ 0.5t damping sheet)	38	15
30t, Keystone plate with (Unitex ⊕ 0.4t SUS plate ⊕ 1.0t damping sheet)	38	16
30t, Keystone plate with (Unitex ⊕ 0.4t SUS plate ⊕ 2.0t damping sheet)	37	17
30t, Keystone plate with (Unitex ⊕ 0.4t SUS plate ⊕ 4.0t damping sheet)	37	18
30t, Keystone plate with (Unitex ⊕ 2.0t damping sheet)	41	24
45t, Keystone plate with rubber mat(A)	41	11
45t, Keystone plate with rubber mat(B)	40	12
45t, Keystone plate with Unitex and damping sheet	42	25
45t, Keystone plate with Unitex and Pb	43	10

Table 2 Noise transmission measurement result of the improved side panels(remark : sample no.)

Sample	T.L	Remark
Two - Sheet panel without insulation	40 dB	1
Two - Sheet panel with insulation (glass wool 32K, 50t)	44 dB	2
Two - Sheet panel with insulation (P.E. Foam 30t)	41 dB	3
Two - Sheet panel with insulation (P.E. foam 80t, damping sheet 0.5t)	42 dB	4
Two - Sheet panel with insulation (P.E. foam 80t, rubber foam 9t)	41 dB	5
Two - Sheet panel with insulation (P.E. foam 100t, damping sheet 0.5t)	41 dB	6
Two - Sheet panel with insulation (P.E. foam 100t)	42 dB	7
Two - Sheet panel with insulationonn (P.E. foam 100t, damping sheet 1.0t)	41 dB	8

Table 3 Noise transmission measurement result of the improved roof

Sample	T.L
Roof	40 dB

Table 4 Noise transmission measurement result of the improved door panels

Sample	T.L	Remark
25t, honeycomb door	26 dB	9
30t, honeycomb door	32 dB	21
30t, P.E door (open cell)	31 dB	22
30t, P.E door	31 dB	23

Table 5 Noise transmission measurement result of the improved windows (FL : single glass, A : air, PW : laminated glass)

Sample	T.L	Remark
FL 5 mm + A6 mm + FL 6 mm	31 dB	
PW 6.3 mm + A6 mm + PW 6.3 mm	33 dB	
FL 4 mm + A6 mm + FL 6 mm	32 dB	
FL 3 mm + A5 mm + FL 6 mm	33 dB	
FL 4 mm + A6 mm + FL 5 mm	32 dB	
FL 6 mm + A12 mm + PW 6.8 mm	35 dB	
FL 5 mm + A6 mm + PW 6.7 mm*	34 dB	

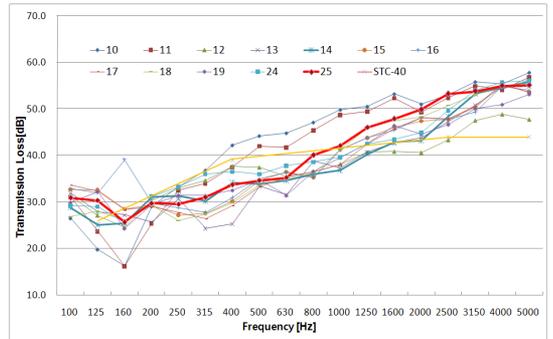


Fig. 1 Transmission loss of floor part

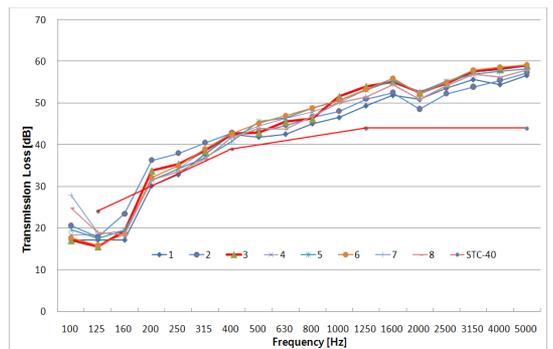


Fig. 2 Transmission loss of side part

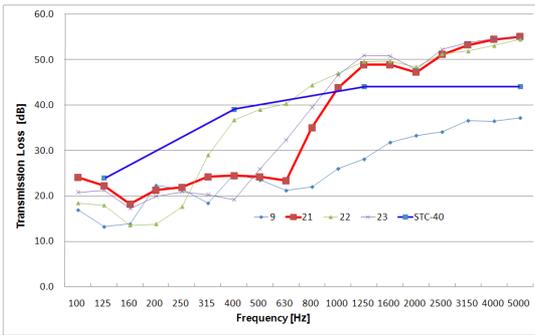


Fig. 3 Transmission loss of side part

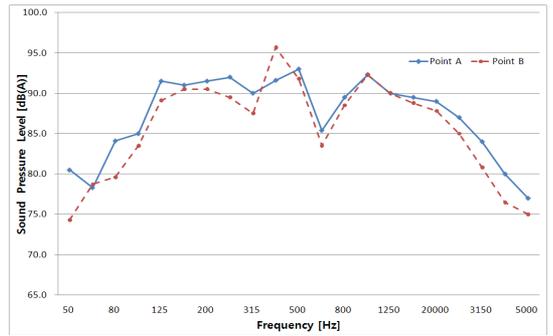


Fig. 6 Tunnel noise measurement during train running from Gong-rung to Taerung station



Fig. 4 Transmission loss of window part

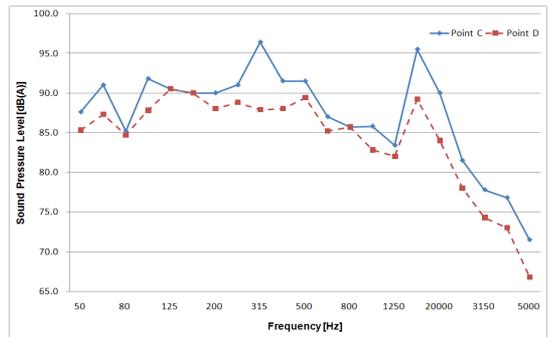


Fig. 7 Tunnel noise measurement during train running from Taerung to Gong-rung station

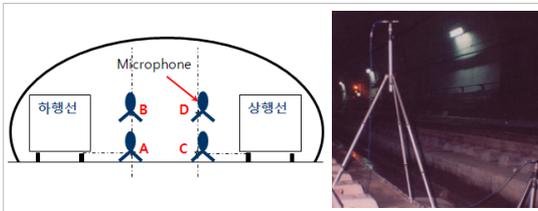


Fig. 5 Microphone installation position for the tunnel

3. 외부소음 수준

외부 소음원의 수준은 차량이 최고 속도로 주행 시 발생하는 터널 내 최고 소음 수준을 감안 하여 108 dB(A)으로 가정하였다.

차량의 주 소음원은 차륜과 레일간 마찰에 의하여 발생하는 마찰 소음 및 차량 주행 시 공기 저항에 의하여 발생하는 공기 전달음으로 구분 지어 진다.

도시철도 차량내부 소음은 소음원에서 발생한 소음이 터널 내에서 반향되어 차체 외부에 도달하므로, 터널의 구조, 궤도의 구조 및 차량의 구조에 의

하여 영향을 받는다⁽³⁾.

터널내부 소음을 알아보기 위하여 서울도시철도 7호선에서 측정한 자료인 Fig. 6와 7은 최대 소음 수준을 나타내는 구간을 선택하여 차륜/레일 접촉면(A,C)과 차량 측면 판넬 위치(B,D)에서 측정한 결과를 분석한 자료이다. Fig. 6의 하행선 측정 결과를 살펴보면, 차륜/레일 위치에서 측정된 결과는 1 kHz에서 최대값을 보여주고 있고 차량측면 판넬위치에서 측정된 결과는 400 Hz에서 최대값을 보여주고 있다. Fig. 7의 상행선 구간에서 측정한 결과는 1500 Hz에서 양측정점 모두가 최대값을 지니는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 차량바닥은 중대역 구간을, 차량측면은 저주파대역의 투과 손실이 커야함을 알 수 있다⁽⁴⁾.

4. 예측 및 측정 결과

4.1 예측

시편에 대한 소음 투과 손실 측정 결과를 이용하

Table 6 Noise transmission loss measurement

Classification	Structure	T.L.	Remark (before)
Floor	45t, Keystoneplate with unitex and damping sheet	42 dB	38 dB
Side panel	Two sheet panel with insulation (P.E.Foam 50t)	41 dB	40 dB
Door	30t, Honey comb door	32 dB	26 dB
Window	t17.7 laminated glass	34 dB	30 dB
End panel	panel + P.E.Foam (Door pocket)	35 dB	31 dB

Table 7 Internal Noise estimation result of line 7 train after structure improvements

Classification		Floor	Side panel	End panel	Roof	Remark
		UNIT : dB(A)				
Exterior noise (EN)	Symbol	OU	OS	OE	OR	Hypothesis value
	Value	108.0	105.0	105.0	103.6	
T.L.	Symbol	TLU	TLS	TLE	TLR	Test result
	Value	42.0	31.7	30.4	40.0	
Internal noise level(IN)	Symbol	LU	LS	LE	LR	IN = EN-TL
	Value	66.0	73.3	74.6	63.6	
Level inside		78.2				Estimated value TL = OU - linside
Total T.L.		29.8				

여 객실 내 소음 수준을 분석하기 위하여 소음 예측계산을 수행하였다. 차체 부위별로 요구되는 투과 손실을 얻기 위하여 각 부위별로 다수의 시편을 제작하여 측정하였고, 설계 및 제작이 가능하고 설계 목표치에 근접한 소음 투과 손실치를 지니도록 차체의 각 구조를 Table 6과 같이 설정하는 것이 가능하다. 이와 같이 설정된 개선안에 대한 기본 개념을 Fig. 8에 간략한 도면으로 나타내었다.

측정된 외부 소음 수준 및 소음 투과 손실 결과치로부터 객실 내 소음수준을 아래의 실험식을 이용하여 예측하는 것이 가능하다.

$$L_{inside} = 10 \times \log \left(2 \times 10^{\frac{L_s}{10}} + 2 \times 10^{\frac{L_E}{10}} + 10 \times 10^{\frac{L_U}{10}} + 10 \times 10^{\frac{L_R}{10}} \right) - 2dB(A) \quad (1)$$

여기서, L_S 와 L_E , L_U , L_R 은 각각 차체의 측부와

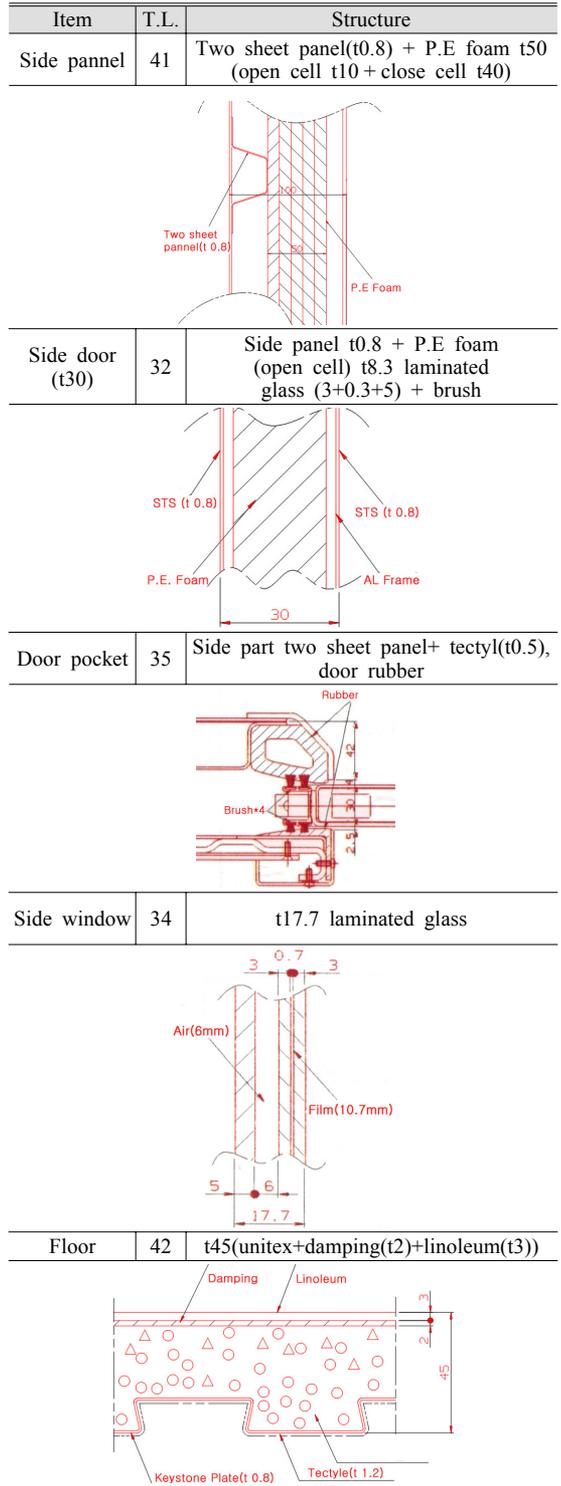


Fig. 8 Modification scheme of car body parts to reduce the internal noise levels of line 7 trains

단부, 마루구조, 지붕구조에 대한 내부소음수준으로 정의된다.

식 (1)⁽⁵⁾ 및 식 (1)에서의 $-2 \text{ dB}^{(5)}$ 은 객실 내 흡음을 고려한 수치로 일반적인 전동차의 흡음력을 나타낸 수치이며 설계 개선 전후 전동차의 인테리어는 동일하므로 적용 가능 하다고 판단된다.

서울시 도시철도 7호선 전동차의 최고속도 운행시 식 (1)을 통하여 예측된 객실 내 소음은 78.2 dB(A) 로서 계산 과정은 Table 7에 정리되어 있다.

4.2 실측 결과

실제 제작된 차량의 소음측정 (국토해양부 고시 기준에 의해 차량 전위 대차 중심부 상면, 차량 정중앙부, 후위 대차 중심부와 차량 정중앙부의 중간에서 측정한 소음의 평균치)결과, 정지시 객실내부는 평균 약 69.3 dB(A) 이며, 주행소음은 모터상부의 소음이 $106 \sim 107.1 \text{ dB(A)}$, 객실내부 소음이 $73.4 \sim 74.9 \text{ dB(A)}$ 로써 투과손실은 32.2 dB(A) 로 나타났다으며, 가감속시 역 구내 측정결과는 감속시 84.1 dB(A) 과 가속시 84.3 dB(A) 로 나타났다. 여기서 객실 내부 소음이 $73.4 \sim 74.9 \text{ dB(A)}$ 의 차이를 보이는 것은 운행 속도 80 km/h 에서 견인전동기 구동이나 터널 구조 등에 따른 것으로 판단되며, 이중 결과치가 높은 것을 최고 소음으로 결정하였다.

4.3 예측과 실측 분석

기존 운행 중인 차량의 실내 소음은 $85.2 \sim 85.5 \text{ dB(A)}$ 이나 개선된 방안에 의한 차량의 실내 소음은 78.2 dB(A) 로 예측 되어 기존차량에 비해 7 dB(A) 정도 감소 될 것으로 예측 되었다. 차량 제작 후 실측 결과 전동기 상부의 실외 소음은 107.1 dB(A) 로 가정치 108 dB(A) 과 유사 하게 나타났으며 이는 도시철도 전동차의 80 km/h 속도에서의 주소음원이 차륜과 레일의 접촉음 이므로 전동차 실내 소음 저감 설계가 외부 소음과는 관련이 적다는 것을 나타내고 있다. 실내소음은 74.9 dB(A) 로써 차음은 32.2 dB(A) 로 나타났다 실제 차량 제작시에는 제시한 부위 외에도 차량 천장 및 통로벽 등에도 차음 향상 설계를 적용하였기 때문에 결과치가 더 높게 나타난 것으로 판단된다.

5. 결 론

각종 시편의 투과 손실 측정 결과를 바탕으로 전동차 부위별 최적 설계를 통하여 전동차 객실내 소음 예측이 가능하다.

(1) 기존차량의 실내 소음은 85.5 dB(A) 이나 개선된 방안에 의한 차량의 실내소음은 78.2 dB(A) 로 예측되어, 기존차량에 비해 7 dB(A) 정도 감소 될 것으로 예측 되었다.

(2) 차량 제작 후 실측 결과 전동기 상부의 실외 소음은 107.1 dB(A) 으로, 가정치 108 dB(A) 과 유사 하였다. 이는 전동차 실내 소음 저감 설계가 외부 발생 소음과는 관련이 적다는 것을 나타내고 있다.

(3) 실제 차량 제작 후 실내 소음은 74.9 dB(A) 로 측정되어, 기존차량에 비해 10.6 dB 감소되었다.

(4) 투과 손실향상을 위해서는 차량측면은 저주파 대역을 차량바닥은 중대역 구간의 투과손실 향상이 효과적이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

(1) Iwnicki, S., 2007, Handbook of Railway Vehicle Dynamics, CRC Pr, pp. 282~287.

(2) U.S. Dept of Transportation, 1982, Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control.

(3) You, W. H., Hur, H. M., Koh, H. I., Park, J. H. and Choi, Y. W., 2009, "A Study on Relationship between Curving Noise and Wheel Wear in Seoul Subway System," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 85~93.

(4) Choi, Y. W., Koo, J. S., You, W. H. and Koh, H. I., "A Study on the Noise Characteristics of Subway Train," Transactions of the Korean Society for Railway, Vol. 12, No. 3, pp. 329~334.

(5) Lee, Y. J., 1996, "A Study of Cabin Inside Noise of Hanjin High-speed Passenger Coaches," Computers in Railway V, Vol. 2, pp. 33~44.