

부산 도시철도 3호선 실내소음 특성분석

An interior noise characteristic analysis of Busan Metro Line 3

안찬우† · 홍도관* · 한근조** · 강현욱*** · 이권순****

Chan-Woo Ahn, Do-Kwan Hong, Geun-Jo Han, Hyeon-Uk Gang, and Kwon-Soon Lee

Key Words : Interior noise(실내소음), Busan Metro Line3(부산 도시철도 3호선), Squeal noise(스켈소음), Active Noise Control(능동소음제어)

ABSTRACT

This paper deals with the correlation between the interior noise and the floor vibration of the train from rolling, impulse and friction in Busan Metro line 3. The correlation is verified by sound and vibration measurement causing friction between the railway and the wheel. If ANC(Active Noise Control) system can reduce 5 dB in below 500 Hz, the sound pressure level of the whole band pass can be reduced about 1.8-4.8 dB in squeal noise. Curve squeal noise is the intense high frequency tonal that can occur when a railway vehicle transverses a curve. The frequency range is from around 500 to almost 20,000 Hz, with noise levels up to about 15 dB in curve.

1. 서 론

도시철도는 지상교통과 비교하여 정확성, 신속성, 안전성, 대량성 이외에도 배기가스 배출이 없다는 이점 때문에 대도시 교통문제를 해결하기 위한 유용한 수송수단이 되고 있다. 이와 같이 도시철도가 갖는 긍정적인 측면과는 달리 도시철도 운행으로 인한 소음진동 문제는 도시철도 주위에 주거하는 주민이나 도시철도를 이용하는 승객들에게 소음공해라는 또 다른 환경문제에 직면하고 있다.

일반적으로 소음은 가청주파수 20~20,000 Hz 사이에서 발생하는 음압의 변화로서 그 동안 소음저감을 위한 연구와 기술개발이 계속되어 왔다. 이에 반해 저주파소음은 귀에 잘 들리지 않기 때문에 별로 주목을 받지 못했지만, 이들 저주파소음이 사람의 순환기, 호흡기, 신경, 내분비, 수면 등에 영향을 준다는 연구결과들이 발표됨에 따라 환경소음 전반에 걸쳐 점차 관심이 고조되고 있다. 저주파소음은 가청음에 비해 주파수가 낮기 때문에 흡음재와 차음재를 사용하는 일반적인 소음저감 방법으로는 차단이 힘들며, 주파수가 낮을수록 진동을 수반하는 경우가 많기 때문에 소음과 진동을 완전히 구분하기 힘든

특성을 가지고 있다.

최근에 능동형 소음저감방식인 ANC(active noise control) 기법⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾을 이용한 차량의 실내소음 저감 기술에 적용하는 사례가 많이 보고되고 있다. 이는 주로 차량의 실내에 ANC 를 설치하여 저주파 대역폭의 소음을 감소하는 것을 목적으로 하고 있다. 또한 차량의 머플러나 블로워 모터의 소음에 대하여 ANC 를 장착하여 차량 전체의 소음을 어느 정도 저감하는 기술도 연구되고 있다. 그 외에도 음향시스템의 헤드폰에 ANC 시스템을 부착하여 주변 소음을 저감하여 음질을 향상시키는 기술도 발표되었으며 헬기나 항해선 등의 엔진 소음을 감소시키기 위한 ANC 기술도 개발되고 있다. 이렇듯 다양한 산업기기에 ANC 시스템이 응용되어 좋은 결과를 보이고 있지만, 철도차량에 ANC 를 적용한 사례는 거의 전무한 실정이다. 이러한 시스템은 소음원에 대한 해석적 모델링이 어려울 뿐만 아니라 소음원에 대한 주파수 스펙트럼 분석이 힘들기 때문이다. 또한 철도소음은 주로 저주파와 고주파 성분을 모두 포함하고 있으므로 기존의 ANC 기법으로는 기술적 가치에 대하여 그 성능이 매우 만족스럽지 않은 것으로 보고되고 있다.

본 논문에서는 능동소음제어 시스템 기술 개발을 위한 기초측정 연구로 전동과 마찰 및 충격으로 인한 철도차량의 실내소음과 바닥진동의 상관관계를 분석하였다. 또한 주된 소음원인 스켈노이즈⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾가 발생할 때 철도차량 실내에서 발생하는 소음의 주파수 분석을 통해서 500 Hz 미만의 저주파 대역에서

† 교신저자; 동아대학교 기계공학과
E-mail : cwahn@dau.ac.kr
Tel : (051) 200-7643, Fax : (051) 200-7656
* 한국전기연구원 전동력연구센터
** 동아대학교 기계공학과
*** 동아대학교 일반대학원 기계공학과
**** 동아대학교 전기공학과

ANC 시스템을 적용하여 5 dB 저감된다면 전주과수 대역에서 음압레벨이 어느정도 저감할 수 있는지에 대한 고찰을 수행하였다. 향후 ANC 시스템을 개발 하는데 있어서 중요한 자료로 활용하고자 한다.

2. 실내소음 및 진동 측정

2.1 측정대상 및 운행경로

본 연구의 측정대상은 부산 도시철도 3 호선으로 측정하였으며 측정은 2010 년 8 월 5 일 13 시 34 분 부터 14 시 55 분 동안 부산 도시철도 3 호선 임시 운행열차를 대상으로 측정노선과 구간은 Fig. 1 에 나타냈으며, 왕복 32 구간을 측정하였다. 측정 시 운행 철도차량은 측정에 필요한 최소인원만 탑승한 공차상태의 열차로서 상행선 운행시에는 3 호차, 하행선 운행시에는 2 호차의 위치에서 측정하였다. 도시철도 운행속도는 직선구간에서는 70 km/h, 곡선구간에서는 50 km/h 로 주행하였고, 실내온도는 24℃ ~25℃ 를 유지하였으며, 기본적으로 필요한 전기장치는 작동시키고 실내방송은 하지 않은 상태로 측정하였다. 또한 각 역에 정차 시 문은 열지 않고, 주행 패턴은 실제와 동일하게 하였다.



Fig. 1 Route of Busan Metro Line 3

2.2 측정 장비 및 방법

본 연구의 측정 및 분석에 사용된 장비는 Table 1 에 나타내었다. 철도차량의 실내소음 경향을 다양하게 파악하고 주행방향으로의 소음변화를 알아보기 위하여 차량의 한쪽에는 수음자의 높이기준인 120 cm 의 높이에 3 개의 마이크로폰을 일렬로 설치하여 실내소음의 변화를 측정하였다.

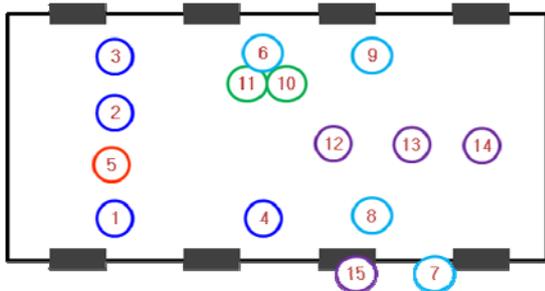


Fig. 2 The measurement position

Table 1. Equipments for measurement and analysis

Equipment	Model	Spec	Use
FFT Analyzer	B&K3560-C	4ch.	Analyzer
Microphone	B&K4189L001	4ea	Measure
	B&K4189A021	4ea	
Accelerometer	B&K4514B002	4ea	
Sound Level Meter	RION NL-32	1ea	
	RION NL-21	1ea	
Tri-axis vibration meter	RION VM-54	1ea	
Tape recorder	SONY PC204A	4ch.	Recorder
Data recorder	RION DA-20	4ch.	
Level recorder	RION LR-04	2ea	
Nexus	Nexus Conditioning Amplifier	4ch.	Amp.

Table 2. The characteristics of measurement point and lists of equipments

No.	Equipment	Features
1, 4, 8	Microphone	Height 20cm
3, 6, 9		Height 120cm
7		Outdoor wheels
15		Outdoor inverter
10, 11	Sound level meter	Flat Mode
2, 12, 13, 14	Accelerometer	Bottom
5	Tri-axis vibration meter	

또한 차량의 반대쪽에는 개발하고자 하는 바닥부착형 패널형태의 ANC 시스템을 고려하여 20 cm 의 높이에 3 개의 마이크로폰을 일렬로 설치하여 바닥 부분의 소음변화를 측정하였다. 그리고 철도차량의 객차 바닥의 진동을 분석하기 위하여 각 센서를 바닥 중앙부분에 부착하여 측정하였다. 실내소음 및 진동측정을 위해 사용된 장비의 측정 위치는 Fig. 2 에 나타내었으며 각 위치에 사용된 장비 리스트를 Table 2 에 나타내었다. Fig. 3 은 철도차량 실내의 소음특성을 분석하기 위해서 사용된 마이크로폰의 부착 및 설치를 나타낸다. 측정된 소음의 주파수 보정은 Flat 특성으로 하였다.



(a) Indoor microphones (L:20cm, R:120cm)



(b) Outdoor microphones (L:Inverter, R:Wheel)

Fig. 3 Location of microphones

3. 측정 결과 및 분석

3.1 실내소음 및 바닥진동 상관분석

소음측정은 3 개의 data recorder 를 이용하였으며 측정 후 실험실에서 결과를 분석 정리하였다. 협약 기관인 부산교통공사의 요구에 의해 전 운행구간에서 등가소음레벨과 최대소음레벨 그리고 통계분석량인 시간소음레벨(중앙값)을 정리하였으며 Fig. 4 에 나타내었다. 전 운행구간의 측정결과 대저~체육공원 구간에서 등가소음레벨과 시간소음레벨(중앙값)이 가장 최소로 나왔으며, 반면에 만덕~미남 구간이 최대로 나타났으며 전 운행구간의 소음레벨을 Fig. 5 에 나타내었다. 전 운행구간에서 소음이 가장 최대 및 최소인 구간들에 대해서 실내소음특성을 분석하였다. Fig. 5 의 (a)는 대저에서 체육공원 사이의 음압은 70 dB 을 전후하며 Fig. 5 의 (b)는 만덕에서 미남 사이의 음압은 80 dB 대로 나타내며 열차 출발 40 초와 도착 전 40 초에 가속 및 분기기 통과에 대한 소음 및 약간의 스킨노이즈에 의한 상대적으로 큰 실내 소음이 발생하였다.

전동과 마찰 및 충격으로 인한 철도 차량 바닥의

진동과 실내소음과의 상관관계를 분석하였다. Fig. 6 의 열차 실내 바닥의 진동측정 결과를 나타낸다. Fig. 5 의 소음측정결과와 Fig. 6 의 바닥진동측정 결과는 거의 비슷한 경향을 나타낸다.

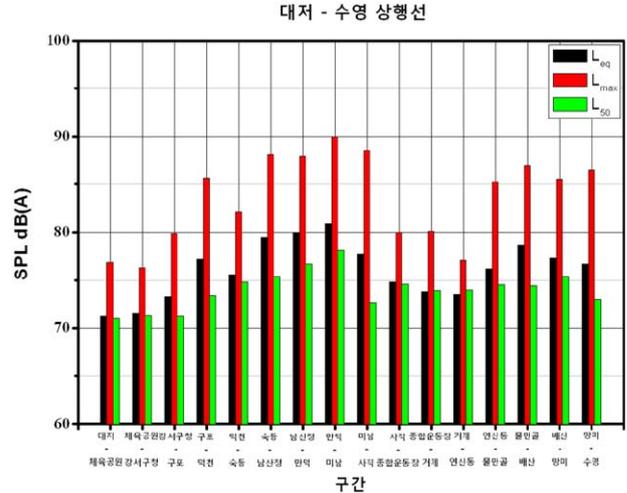
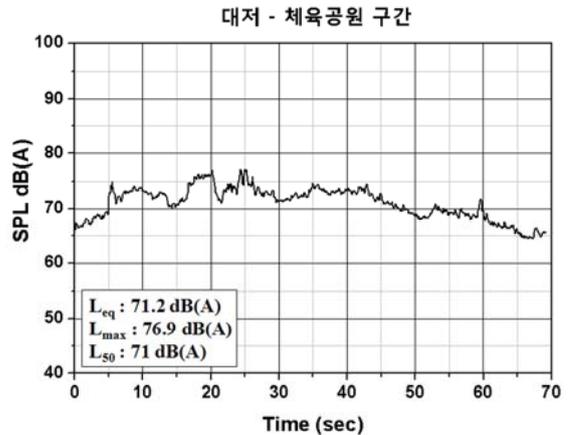
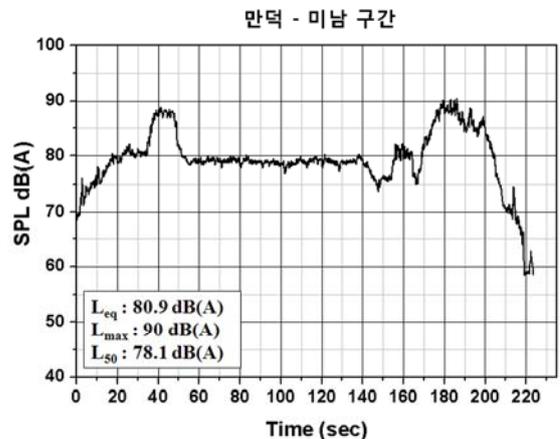


Fig. 4 Equivalent sound level, max. sound level, median sound level of metro line 3

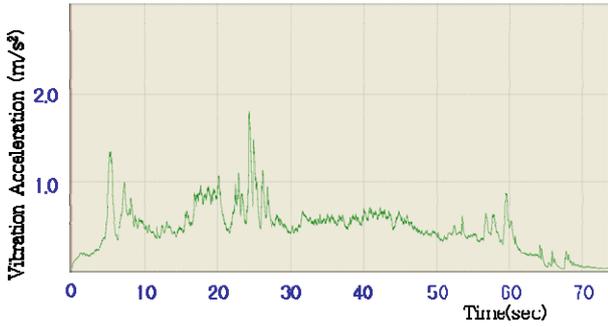


(a) Daejeo to Sports Park

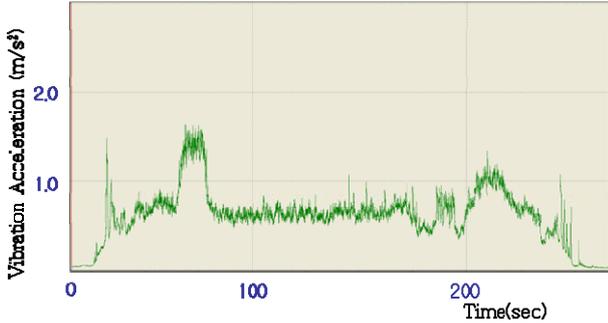


(b) Mandeok to Minam

Fig. 5 Sound pressure level



(a) Daejeo to Sports Park



(b) Mandeok to Minam

Fig. 6 Vibration acceleration level

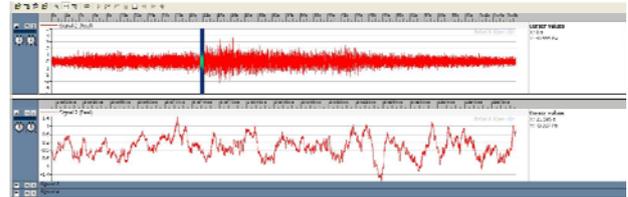
운행구간에서 바닥의 진동과 실내소음의 경향이 잘 일치함을 알 수 있으며, 약 20 초 에서 30 초 사이의 곡선구간을 지나는 부분에서 진동과 소음의 피크 경향이 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 5 (b)와 Fig. 6 (b)의 만덕에서 미남구간 상행선에서 등가소음레벨, 최대소음레벨 및 시간당 소음레벨(중앙값)이 가장 높은 구간이며, 출발 40 초와 도착 40 초 부근의 바닥진동과 소음경향이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 레일과 차륜의 마찰로 인한 진동이 차량의 바닥으로 진동이 전달되었으며 또한 마찰로 인한 스켈 노이즈가 발생하여 차량 실내소음으로 측정됨을 알 수 있다. 따라서 충격, 마찰 진동으로 인한 진동원인에 대해서 실내소음이 영향을 받고 있음을 확인하였다.

3.2 능동소음 저감효과

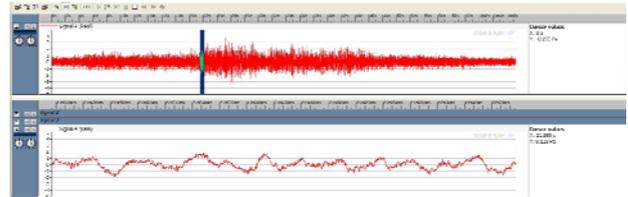
(1) 대저~체육공원 구간

진동과 마찰 및 충격으로 인한 철도차량의 실내소음의 1/3 옥타브 분석을 통해서 능동소음제어가 가능한 500Hz 미만과 수동소음제어가 가능한 500Hz 이상의 음압레벨을 구해서 Table 3 에 나타내었다. Fig. 7 은 만덕에서 미남의 운행구간에서 시간에 따른 음압의 변화를 나타낸다. 실내소음 측정위치는 Fig. 2 의 8 번과 4 번을 나타내며, 각각 열차의 진행 방향 앞부분과 열차의 중앙부 바닥에서 20 cm 띄웠을 때를 나타낸다. Fig. 8 은 대저에서 체육공원의 운

행구간에서 열차가 출발하여 24 초 근방에서 분기기를 지날 때 발생하는 진동과 충격으로 인해 크게 발생하는 신호를 샘플링하여 1/3 옥타브 분석한 결과를 나타내었다.

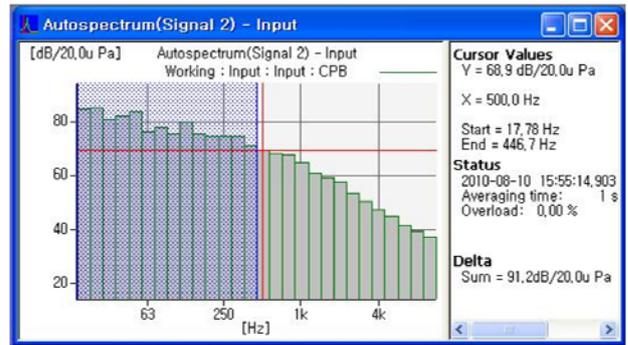


(a) Measuring position number 8

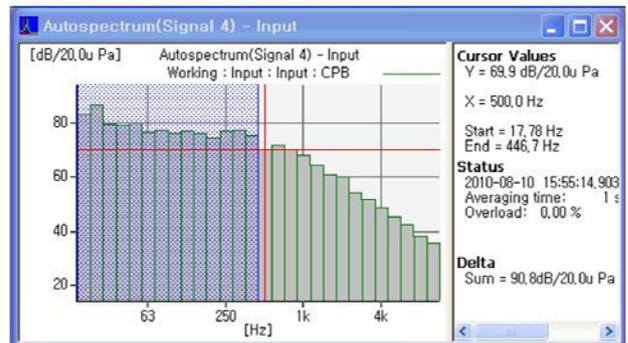


(b) Measuring position number 4

Fig. 7 Time signals from Daejeo to Sports park



(a) Measuring position number 8



(b) Measuring position number 4

Fig. 8 1/3 Octave analysis from Daejeo to Sports park

Table 3 의 결과에서 대저와 체육공원의 구간에서는 저주파 대역이 고주파 대역의 음압레벨보다 상당히 높게 발생하였다. Table 3 에 나타낸 결과처럼 저주파 대역과 고주파 대역으로 나뉘었으며 ANC 시스템이 적용되어 저주파 대역의 소음이 5 dB 정도 저감이 된다면 아래의 식을 이용하여 전주파수 대역에

서 음압의 총합이 어떤 경향을 가지는지 알 수 있다.

$$dB_{sum} = 10\log(10^{(L1/10)} + 10^{(L2/10)}) \quad (1)$$

여기서, L1 과 L2 는 합하고자 하는 음압을 나타내며, dB_{sum} 은 음압의 합을 나타낸다.

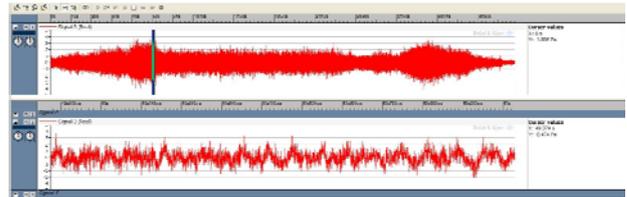
Table 3. Overall of Daejeo ~ Sports park according to frequency range

Going up Overall (dB/20.0uPa)				
Frequency		Low	High	Whole Band
Location				
Height 20cm	1	91.2	74.9	91.30
	2	90.8	76.4	90.95
	3	93.3	75.8	93.38
Height 120cm	1	90.6	73.0	90.67
	2	90.2	72.8	90.28
	3	90.8	73.8	90.89

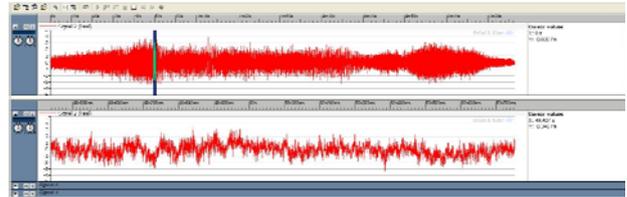
ANC 시스템이 적용되어 소음이 저감될 만한 경향을 고려하여 저주파를 5dB 이 저감 되는 것으로 판별하고 값을 정리하였다. 계산 결과 전주파수 대역에서 음압의 총합이 약 4.8dB 저감되는 것을 알 수 있다. 대저~체육공원 구간의 분기기를 통과할 때 발생하는 저주파 대역의 음압이 고주파 대역의 음압보다 더 크게 발생하는 곳에는 ANC 시스템의 저주파 대역 소음저감이 전 주파수 대역의 음압레벨을 저감하는 데는 기여도가 큰 것으로 판단된다. 또한 대저에서 체육공원 구간은 전체적으로 스킨노이즈가 크게 발생하지 않는 구간이어서 Table 3 의 고주파 영역에서 음압레벨이 크게 발생하지 않았다. 따라서 스킨노이즈가 발생하지 않는 구간에서는 상당한 효과가 있을 것으로 생각된다.

(2) 만덕~미남 구간

Fig. 9 는 만덕에서 미남의 운행구간에서 시간에 따른 음압의 변화를 나타낸다. Fig. 10 은 열차가 출발하여 40 초가 된 시점에서 스킨노이즈가 크게 발생하는 신호를 샘플링하여 1/3 옥타브 분석한 결과를 나타내었다. Fig. 10 의 1/3 옥타브 신호를 500 Hz 미만의 저주파 대역과 500 Hz 이상의 고주파 대역으로 나눠서 음압레벨을 각각 overall 로 Table 4 에 나타내었다. Table 4 에서 나타난 것과 같이 만덕에서 미남으로의 상행구간에서는 저주파 대역과 고주파 대역의 음압레벨이 거의 비슷하게 발생하였다. 앞의 식 1 과 같이 계산 결과 전주파수 대역에서 음압의 총합이 약 1.5dB 저감되는 것을 알 수 있다.

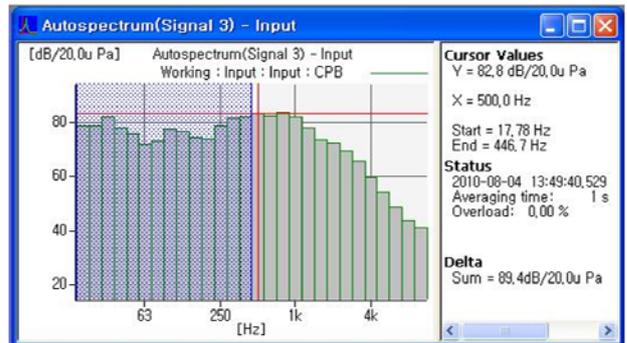


(a) Measuring position number 8

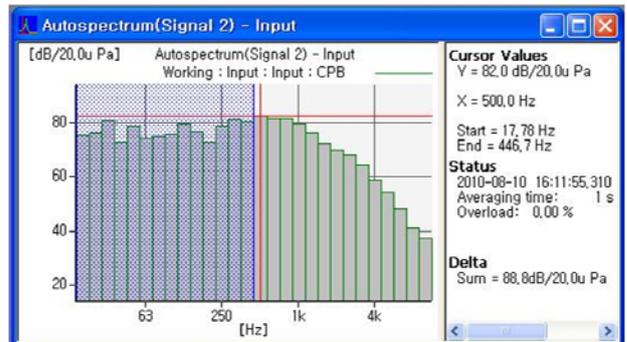


(b) Measuring position number 4

Fig. 9 Time signals



(a) Measuring position number 8



(b) Measuring position number 4

Fig. 10 1/3 Octave analysis from Mandeok to Minam

만덕에서 미남 구간의 스킨노이즈가 지배적으로 발생하며 저주파 대역의 음압이 고주파 대역의 음압과 비슷한 곳에는 ANC 시스템의 저주파 대역 소음저감이 전 주파수 대역의 음압레벨을 저감하는 데는 기여도가 그리 크지 않은 것으로 판단되며, 고주파 대역의 음압레벨과 함께 소음을 저감해야 큰 효과가 있을 것으로 판단된다. 그리고 레일의 곡률반경이 상대적으로 적은 대저에서 체육공원 사이의 500 Hz 에서 20,000 Hz 사이의 음압레벨에 비하여 곡률반경이 더 심한 만덕에서 미남 사이에 고주파 대역의

음압레벨이 스킨노이즈에 의해 약 15 dB 이 상승한 것으로 판단된다.

Table 4. Overall of Daejeo ~ Sports park according to frequency range

Overall (dB/20.0uPa)					
Location		Frequency	Low	High	Whole Band
Height 20cm	1		89.4	90.4	92.94
	2		88.8	89.5	92.17
	3		88.3	89.9	92.18
Height 120cm	1		87.5	88.8	91.21
	2		88.9	89.0	91.96
	3		87.1	89.7	91.60

4. 결 론

본 논문에서는 능동소음제어 시스템 기술 개발을 위한 기초측정 연구로 부산도시철도 3 호선의 실내 소음 및 진동을 측정하였으며 레일과 차륜의 마찰로 인한 진동이 차량의 바닥으로 진동이 전달되고 또한 마찰로 인한 스킨노이즈가 발생하여 차량 실내소음으로 측정되어 충격, 마찰 진동으로 인한 진동원인에 대해서 실내소음이 영향을 받고 있음을 확인하였다. 또한 소음원인 분기기 통과 시 발생하는 소음과 곡선부가 많은 곳에서 주된 스킨노이즈가 발생할 때 철도차량 실내에서 발생하는 소음의 주파수 분석을 통해서 500 Hz 미만의 저주파 대역에서 ANC 시스템을 적용하여 5 dB 저감된다면 전주파수 대역에서 음압레벨이 약 1.8 dB 에서 4.8 dB 정도의 소음저감 효과가 있을 것으로 판단된다. 또한 레일의 곡률반경이 상대적으로 적은 대저에서 체육공원 사이의 500 Hz 에서 20,000 Hz 사이의 음압레벨에 비하여 곡률반경이 더 심한 만덕에서 미남 사이에 고주파 대역의 음압레벨이 스킨노이즈에 의해 약 15 dB 이 상승한 것으로 판단된다. 향후 ANC 시스템을 개발하는데 있어서 중요한 자료로 활용하고자 한다.

후 기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 조현철, 이권순, 남현도, 2009, “ 신경회로망 다중 LMS 기법을 이용한 고속철도의 실내소음저감을 위한 ANC 시스템”, 전기학회논문지, Vol. 58P, No. 4,
- (2) Maria A. Heckl, 2000, “ CURVE SQUEAL OF TRAIN WHEELS, PART2:WHICH WHEEL MODES ARE PRONE TO SQUEAL”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 229, No. 3, pp. 695~707.
- (3) U. Fingberg, 1990, “ A MODEL OF WHEEL-RAIL SQUEALING NOISE”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 143, No. 3 pp. 365~ 377.
- (4) P. J. Remington, 1986, “ WHEEL / RAIL SQUEAL AND IMPACT NOISE : WHAT DO WE KNOW? WHAT DON’ T WE KNOW? WHERE DO WE GO FROM HERE”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 116, No. 2, pp. 339~353.
- (5) 최용운, 구정서, 유원희, 고효인, 2009, “ 도시철도 전동차 소음 특성에 관한 연구”, 한국철도학회논문집, Vol. 12, No. 3, pp.329~334.
- (6) 정성수, 신수현, 김호철, 이우섭, 2005, “ 서울지하철의 저주파소음 특성”, 대한환경공학회지, Vol. 27, No. 11, pp.1193~1197.
- (7) 유원희, 고효인, 박준혁, 조준호, 양철식, 2008, “ 지하철 곡선부소음의 특성에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp.773~778.
- (8) 김범수, 김관주, 김상수, 김재철, 2006, “ 철도차량 스킨소음의 발생메커니즘에 관한 실험연구”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp.1469 ~1472.
- (9) 최용운, 구정서, 유원희, 고효인, 2010, “도시철도 차량의 차음향상에 관한 연구”, 한국소음진동공학회논문집, Vol. 20, No. 3, pp.257~262.