

부산 도시철도 3 호선 차량 곡선부 스컬소음 특성

Analysis of Curve Squeal Noise for Busan Metro Line 3

홍도관¹, 안찬우², 한근조², 강현욱³
Do Kwan Hong¹, Chan Woo Ahn², Geun Jo Han² and Hyeon Uk Gang³

1 한국전기연구원 전동력연구센터 (Electric Motor Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute)

2 동아대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.)

3 동아대학교 기계공학과 대학원(Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.)

✉ Corresponding author: cwahn@dau.ac.kr, Tel: 051-200-7643

Manuscript received: 2010.10.21 / Revised: 2010.12.23 / Accepted: 2011.1.14

This paper deals with the measurement and analysis of the squeal noise according to the curvature of rail. The squeal noise is generated by the friction between the railway with curve and the wheel. The squeal noise is a big problem in Busan Metro Line 3. If the developing panel type ANC(Active Noise Control) system which is attached to the floor can reduce 5 dB in below 500 Hz, the sound pressure level of the whole band pass can be reduced about 4-4.8 dB in squeal noise above the curvature of R400. 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.

Key Words: Squeal Noise (스컬소음), Busan Metro Line 3 (부산 도시철도 3 호선), Active Noise Control (능동소음제어), Low Frequency Sound Pressure Band (저주파 음압 대역), Octave Analysis (옥타브 분석)

기호설명

L_{max} = maximum noise level

L_{eq} = equivalent noise level

L_{50} = percent of time a noise level, median

1. 서론

최근 선진국에서 능동형 소음저감방식인 ANC (active noise control) 기법¹⁻⁴을 이용하여 차량의 실내소음 저감기술에 적용하는 사례가 많이 보고되고 있다. 이는 주로 차량의 실내에 ANC를 설치하여 저주파 대역폭의 소음을 감소하는 것을 목적으로 하고 있다. 하지만 철도차량에 ANC를 적용한 사례는 거의 전무한 실정이다. 이러한 시스템은

소음원에 대한 해석적 모델링이 어려울 뿐만 아니라 소음원에 대한 주파수 스펙트럼 분석이 힘들기 때문이다. 또한 철도에서 발생하는 소음은 주로 저주파와 고주파 성분을 모두 포함하고 있으므로 기존의 ANC 기법으로는 기술적 가치에 대하여 그 성능이 매우 만족스럽지 않은 것으로 보고되고 있다.

철도소음을 저감하기 위한 소음측정분석에 대한 연구로 레일의 곡선반경에 따라서 레일과 차륜의 마찰로 인한 소음원인 스컬소음^{5-11,13-16}이 발생할 때 철도 차량 실내에서 발생하는 소음의 주파수 분석을 수행하였다. 주파수 분석을 통해서 스컬이 발생하지 않는 구간에서는 500 Hz 미만의 저주파 대역에서 개발될 ANC 시스템을 적용하여 5 dB 저감된다면 전주파수 대역에서 소음저감 효과

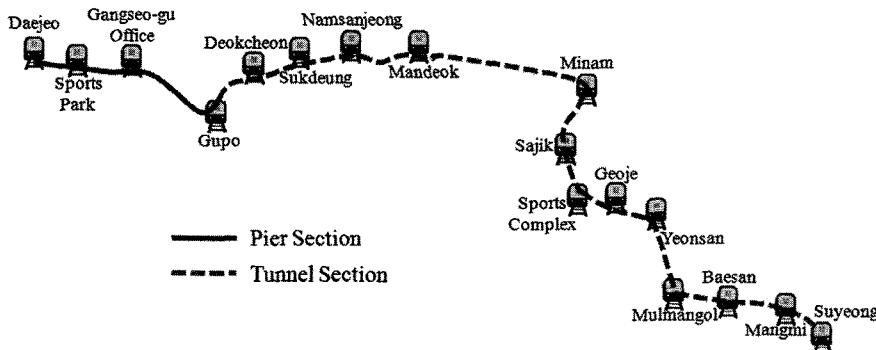


Fig. 1 The route of busan metro line 3

가 있지만, 레일의 곡선반경이 작은 구간에서 스웰소음이 발생할 경우 전주파수 대역에서 음압벨이 어느 정도 저감할 수 있는지에 대한 고찰 및 분석을 수행하였다. 향후 철도차량에서 소음이 유입되는 바닥에 음의 파형을 실시간으로 분석하고 스피커를 통해서 제어음을 발생시켜 음파를 상쇄시키는 바닥 부착형 패널형태의 ANC 시스템을 개발하고자 한다. ANC 시스템 개발에 필요한 선행연구로 부산도시철도 3 호선 차량의 실내에서 발생하는 스웰소음에 대한 측정 및 분석을 통해 ANC 시스템에 대한 효과를 예측하는데 있어서 중요한 자료로 활용하고자 한다.

2. 실내소음측정

2.1 측정 대상 및 운행 경로

본 연구의 측정대상은 부산 도시철도 3 호선으로 하였으며 측정은 2010년 8월 5일 13시 34분부터 14시 55분 동안 부산 도시철도 3 호선 임시운행열차를 대상으로 측정노선과 구간은 Fig. 1에 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 평균적으로 직선구간에서는 70 km/h, 곡선구간에서는 50 km/h로 주행하였고, 실내온도는 24°C~25°C를 유지하였으며, 기본적으로 필요한 전기장치는 작동시키고 실내방송은 하지 않은 상태로 측정하였다. 또한 각 역에 정차 시 문은 열지 않고, 주행패턴은 실제와 동일하게 하였다.

2.2 측정 장비 및 방법

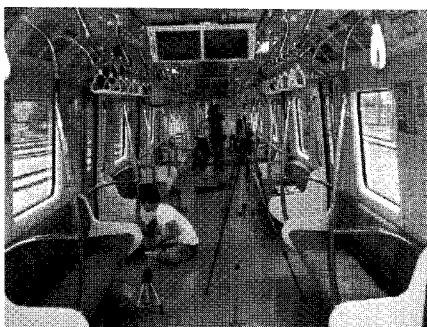
본 연구에 사용된 측정 및 분석 장비는 Table 1에 나타내었고, 각 장비의 구성도는 Fig. 2의 (b)와 Fig. 3에 나타내었다. 철도차량의 실내소음 경향을 다양하게 파악하고 주행방향으로의 소음변화를 알아 보기 위하여 개발하고자 하는 바닥 부착형 패널형태의 ANC 시스템을 고려하여 Fig. 2의 (c)와 같이 20cm의 높이에 3개의 마이크로폰을 일렬로 설치하였다. 바닥부분의 소음변화를 8번 지점에서 측정하였으며 측정된 소음의 주파수 보정은 Line 특성으로 하였다. Fig. 2의 (a)는 부산 도시철도 3호선 실제 차량의 외부를 나타낸다.

Table 1 Equipments for measurement and analysis

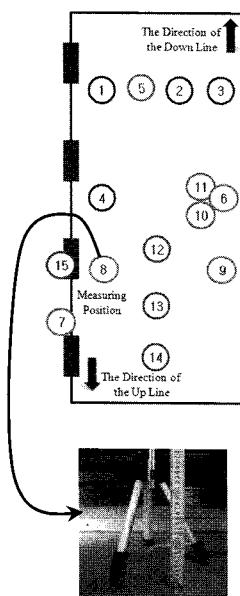
Equipment	Model	Spec	Use
FFT Analyzer	B&K3560-C	4ch.	Analyzer
Microphone	B&K4189L001	4ea.	
	B&K4189A021	4ea.	
Accelerometer	B&K4514B002	4ea.	
Sound Level Meter	RION NL-32	1ea.	
	RION NL-21	1ea.	
Tri-axis vibration meter	RION VM-54	1ea.	Measure
Tape recorder	SONY PC204A	4ch.	
Data recorder	RION DA-20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



(a) The busan metro line 3 vehicle



(b) Setup of the equipments



(c) Position of the equipments

Fig. 2 Setup the equipments for measurement of the busan metro line 3 vehicle

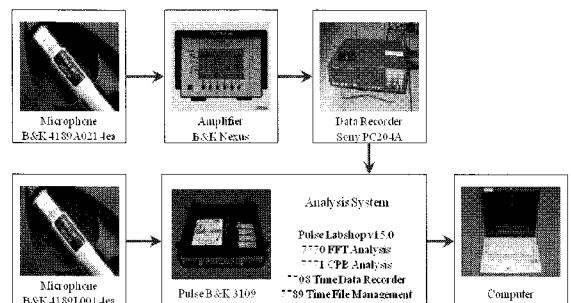


Fig. 3 Measurement and analysis equipments

3. 소음특성 분석 결과

3.1 등가소음, 시간율소음 및 최대소음

부산 도시철도 실내소음은 운행 시 여러 소음 원으로 인하여 변동소음이 발생하게 된다. 변동소음을 대표값으로 나타내는 방법으로 등가소음레벨과 시간율소음레벨 및 최대소음레벨 등이 있다.

Fig. 4는 대저역에서 출발하여 수영역에 도착하는 상행 3 호선 전체 운행구간의 차량 실내소음 측정결과를 나타낸다. 대저~체육공원 운행구간에서 등가소음레벨과 시간율 소음레벨(중앙값)이 가장 최소로 나타났다. 반면에 운행 시간이 가장 긴 만덕~미남 구간은 최대로 나타났다. 대저~체육공원 구간에서는 레일의 곡선반경이 R900, R1200 으로 스웰소음이 큰 문제가 되지 않지만 만덕~미남 구간은 레일 곡선반경이 R200, R600, R1000 으로 이 구간에서는 곡선부 레일과 차륜사이의 마찰로 인한 스웰소음에 의한 고주파 성분의 소음이 지배적으로 발생하였다.

3.2 레일의 곡선반경 유무에 따른 소음비교

Fig. 5 의 (a)는 부산 도시철도 3 호선 노선 중 체육공원~강서구청 상행구간에서 발생하는 음압레벨의 변화를 나타낸다. 곡선부의 레일 곡선반경도 중요하지만 가감속 및 등속 구간 중에 어디서 발생하는가에 따라서 스웰소음의 특성이 조금씩 다르다고 할 수 있다.

이 구간에서는 레일 곡선반경이 없는 직선 구간으로 스웰소음이 발생하지 않는 구간이다. 따라서 시간에 따라 음압레벨이 전동 및 레일 단차에 의한 충격 특성을 제외한 레일과 차륜의 마찰에 의한 스웰소음 특성이 발생하는 Fig. 5 의 (b)와 (c)

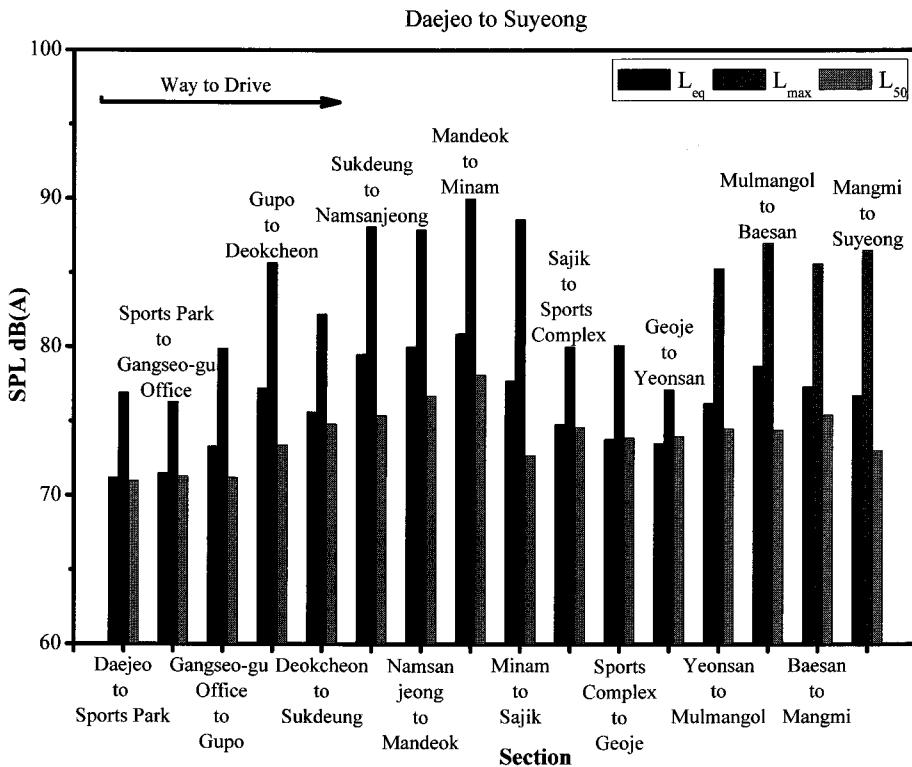


Fig. 4 Equivalent sound level, max. sound level, median sound level of busan metro line 3

같은 피크 특성이 발생하지 않았다.

Fig. 5 의 (b)는 부산 도시철도 3 호선 노선 중 만덕~미남 상행구간에서 발생하는 음압레벨의 변화를 나타내며 곡선부 레일 곡선반경이 3 종류 (R600, R1000, R200)로 가속 구간과 감속 구간에 스컬소음으로 인하여 피크에서 발생함을 알 수 있다. Fig. 5 의 (c)는 구포~덕천 상행구간에서 발생하는 음압레벨의 변화를 나타내며 2 종류 (R200, R6000) 와 등속 및 감속 구간에서 스컬소음으로 인하여 피크가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

이러한 곡선부 레일로 인하여 스컬소음이 발생 할 수 밖에 없는 구조이며 이러한 스컬소음이 심 한 구간을 운행할 때 이용하는 승객은 금속 마찰 음으로 인한 고주파 소리 때문에 소음 공해에 고 통 받게 된다. 이러한 곡선부에는 부분적으로 방 음 레일을 설치하든지 방음차륜을 통해서 금속 마 찰에 의한 고주파 진동을 진동절연 재료를 적용하 면 짜증스러운 고주파의 소음을 감쇠시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 레일 곡선반경에 따른 스컬소음 특성

4.1 레일의 곡선반경에 따른 소음특성

3.2 절에서 레일의 곡선반경에 따른 소음의 비교 결과에서와 같이 레일의 곡선반경에 따라 스컬 소음의 특성이 크게 변화함을 알 수 있었다. 따라서 부산도시철도 3 호선 전체 운행구간에서 레일의 곡선반경(R200~R3002)에 따른 스컬소음의 특성을 분석하였다. 스컬소음이 발생할 때 500 Hz 미만의 저주파에서 발생하는 소음에 대한 특성평가를 위해 주파수 보정함수를 A 특성을 사용하지 않고 Line 특성을 사용하였다.¹²

Table 2 의 결과는 레일의 곡선반경이 가장 작 은 구간에서 스컬소음이 지배적으로 발생하고 스 커블소음이 발생할 때 실내소음의 주파수를 분석 해 보면 고주파 대역의 음압레벨이 저주파 대역의 음 압레벨과 거의 비슷하게 발생한다. 하지만 레일의 곡선반경이 R400 이상인 곳에는 레일과 차륜의 마 찰로 발생하는 스컬소음의 감소로 인하여 고주파

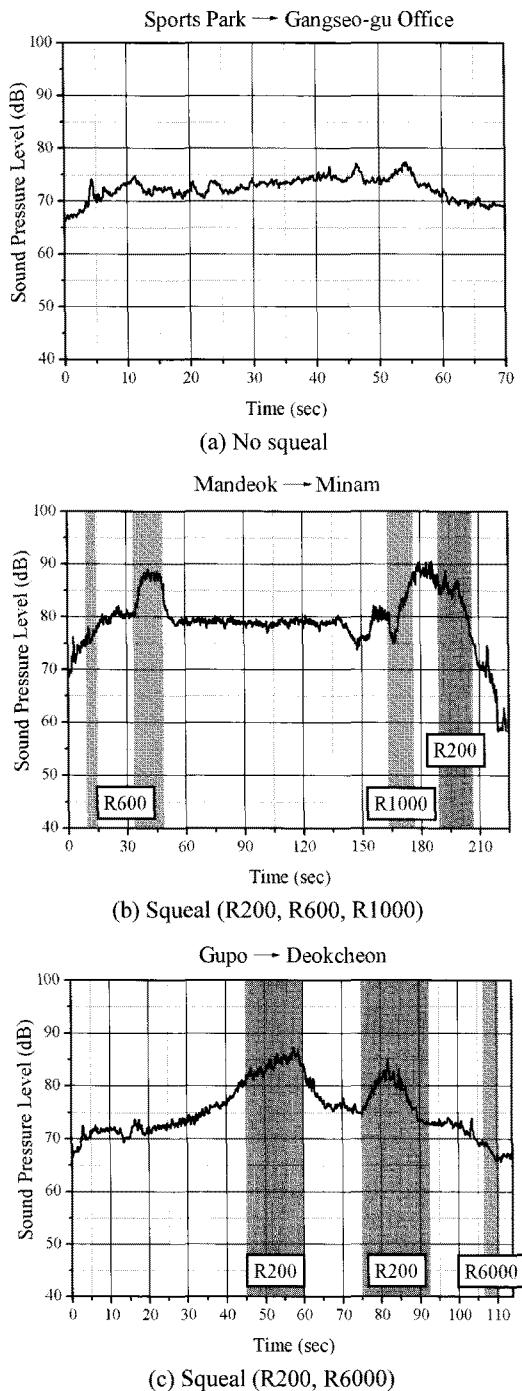


Fig. 5 Comparison no squeal with squeal in SPL

대역의 음압레벨이 저주파 대역의 음압레벨보다 작게 발생하였다. 이것은 레일 곡선반경 증가에 따라서 레일과 차륜의 마찰이 감소하기 때문이다.

바닥 부착형 패널 형태의 ANC 시스템이 개발되어 저주파 대역의 소음이 5dB 정도 저감된다면 아래의 식을 이용하여 전주파수 대역에서 음압의 총합을 구할 수 있다.

$$dB_{sum} = 10 \log(10^{\frac{L_{Low}}{10}} + 10^{\frac{L_{High}}{10}}) \quad (1)$$

여기서, L_{Low} , L_{High} , dB_{sum} 는 각각 저주파, 고주파, 전주파수 대역 음압레벨을 나타낸다. Fig. 6은 만덕~미남 구간(R200)에서 스케일소음이 발생할 때 음압을 1/3 옥타브 분석한 결과를 나타낸다.

Table 2는 부산 도시철도 3 호선 상행구간 중에 레일 곡선반경에 따라서 저주파 대역의 음압레벨과 고주파 대역의 음압레벨의 크기를 나타내고 있다. 결과를 보면 곡선반경이 작을 때는 레일과 차륜의 마찰에 의한 스케일소음이 크게 발생하여 고주파 대역의 음압레벨이 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Comparison of SPL according to the curvature of rail
(Unit : dB)

Location	Frequency	Going up overall (dB/20.0μPa)		
		Low	High	Whole band
Mandeok→Minam	R200	87.4	90.0	91.9
Gupo→Deokcheon	R200	86.6	85.5	89.1
Mangmi→Suyeong	R297	88.2	85.1	90.0
Namsanjeong→Mandeok	R352	86.6	81.5	87.8
Gangseo-gu Office→Gupo	R400	90.2	81.3	90.7
Mandeok→Minam	R600	85.9	76.6	86.4
Mangmi→Suyeong	R800	80.6	68.6	80.8
Baesan→Mangmi	R1502	85.0	75.2	85.4
Deokcheon→Sukdeung	R2100	84.0	70.9	84.2
Mangmi→Suyeong	R3002	86.1	72.1	86.2

Low frequency : 0 ~ 500Hz, High frequency : 500 ~ 20,000Hz, Measuring position : Height 20cm

4.2 능동소음제어 효과 예측분석

Table 2에서 레일의 곡선반경이 커짐에 따라

레일과 차륜의 마찰이 감소하고 이로 인해 고주파 대역의 음압레벨이 감소하는 것을 확인할 수 있으며 바닥 부착형 패널형태의 ANC 시스템을 개발하여 저주파 대역의 음압레벨을 저감한다면 전대역 음압레벨을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 바닥 부착형 패널형태의 ANC 시스템을 개발하여 Table 2 의 데이터에서 저주파 대역의 음 압레벨을 5dB 저감한다면 레일 곡선반경에서 발생하는 스케일소음에 대해서 전대역 음압레벨을 얼마나 줄일 수 있는지를 검토하여 Table 3에 나타내었다. Table 3의 능동소음제어 효과를 예측하여 분석한 결과, R200 에서는 고주파 대역의 음압레벨이

커서 전대역 음압레벨 저감에는 크게 기여하지 못하고 R200 이상에서는 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 실제 측정된 철도실내 소음을 이용하여 적응형 LMS 및 신경회로망 기반의 ANC 시스템을 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 제안된 ANC 제어기법의 타당성 및 성능의 우수성이 검증된 연구사례도 있다.¹⁾

본 논문은 이러한 ANC 시스템을 주 소음원의 전달 경로인 차량바닥에 설치하기 쉽게 패널형태의 ANC 시스템을 개발하여 500Hz 미만의 능동 소음 제어를 구현하여 약 5dB 정도 저감할 수 있다면 R400 이상에서는 전대역 음압레벨을 약 4~5dB 정도 저감할 수 있음을 확인하였다.

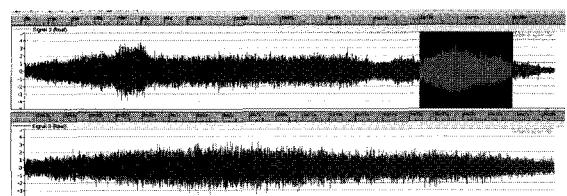
Fig. 6 의 (a)는 만덕~미남 구간의 스케일소음이 가장 심하게 발생하는 레일 곡선반경이 R200 인 지점을 통과할 때 발생하는 음압의 시간영역 신호를 확대하여 나타내었다. 이 부분이 감속부라서 브레이크에 의한 스케일도 포함되어 있다. 그리고 Fig. 6 의 (b)는 실내소음의 음압신호를 주파수 영역의 1/3 유타브 분석을 통해서 저주파 대역 음압레벨과 고주파 대역 음압레벨의 크기를 분석하여 Table 2에 나타내었다.

Table 3 Comparison of ANC effect according to the curvature of rail
(Unit : dB)

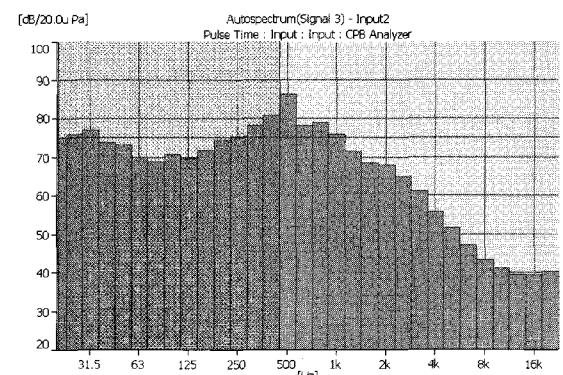
Going up overall (dB/20.0μPa)					
Location	Frequency	Low	High	Whole band	Effect
Mandeok →Minam	R200	82.4	90.0	90.7	1.2
Gupo →Deokcheon	R200	81.6	85.5	87.0	2.1
Mangmi →Suyeong	R297	83.2	85.1	87.3	2.6
Namsanjeong →Mandeok	R352	81.6	81.5	84.6	3.2
Gangseo-gu Office→ Gupo	R400	85.2	81.3	86.7	4.0
Mandeok →Minam	R600	80.9	76.6	82.3	4.1
Mangmi →Suyeong	R800	75.6	68.6	76.4	4.5
Baesan →Mangmi	R1502	80.0	75.2	81.2	4.2
Deokcheon →Sukdeung	R2100	79.0	70.9	79.6	4.6
Mangmi →Suyeong	R3002	81.1	72.1	81.6	4.7

Measuring position : Height 20cm

Effect : $(L_{Low} + L_{High}) - (L_{Low(-5dB)} + L_{High})$

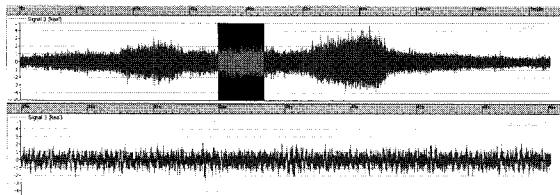


(a) Time signal of sound pressure

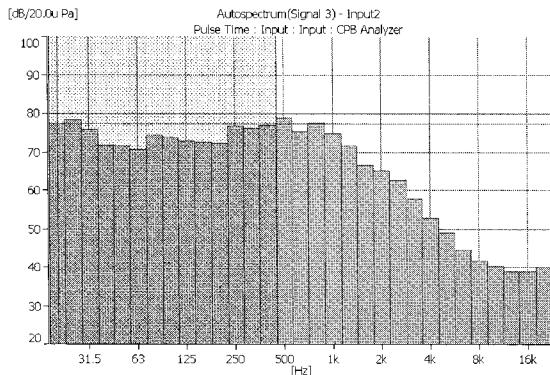


(b) 1/3 octave of sound pressure

Fig. 6 1/3 Octave analysis(Mandeok to Minam, R200)

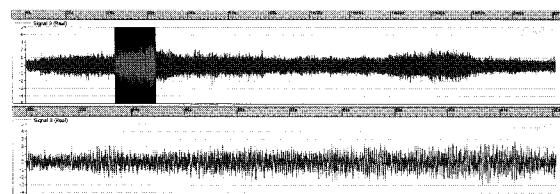


(a) Time signal of sound pressure

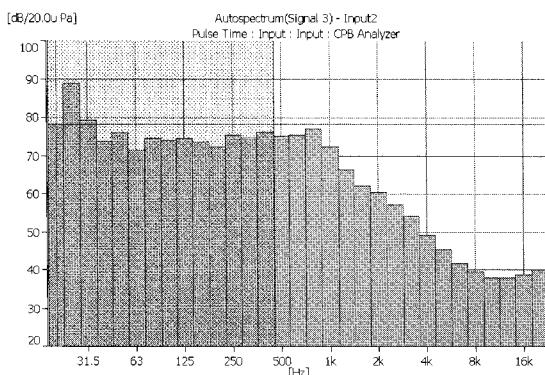


(b) 1/3 octave of sound pressure

Fig. 7 1/3 Octave analysis(Namsanjeong to Mandeok, R352)

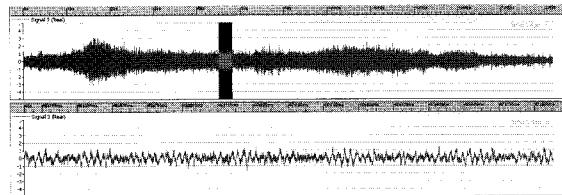


(a) Time signal of sound pressure

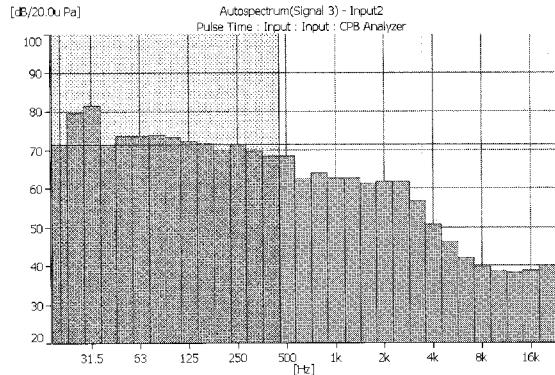


(b) 1/3 octave of sound pressure

Fig. 8 1/3 Octave analysis(Gangseo-gu Office to Gupo, R400)



(a) Time signal of sound pressure



(b) 1/3 octave of sound pressure

Fig. 9 1/3 Octave analysis(Mangmi to Suyeong, R3002)

Fig. 7 의 (a)는 남산정~만덕 구간의 스웰소음이 발생하는 레일 곡선반경이 R352 인 지점을 통과할 때 발생하는 음압의 시간영역 신호이고 등속 구간이다. (b)는 1/3 옥타브 분석의 결과이며 Fig. 6 의 (b)와 비교해보면 500Hz 이상의 음압이 약간씩 작게 발생한 것을 볼 수 있으며, 이것은 레일의 곡선반경이 더 커져서 상대적으로 레일과 차륜의 마찰에 의한 고주파의 스웰소음이 감소한 결과라고 할 수 있다.

Fig. 6 과 Fig. 7 은 레일 곡선반경이 R400 미만으로 레일과 차륜의 마찰에 의한 스웰소음이 증가하여 고주파의 음압이 크게 발생하는 특성을 가진 반면에 Fig. 8 과 Fig. 9 는 레일 곡선반경이 각각 강서구청~구포(R400), 망미~수영(R3002)으로 곡선반경이 상대적으로 큰 구간이며, Fig. 8 은 곡선부 레일 곡선반경이 R400 으로 비교적 레일과 차륜의 스웰소음이 적게 발생하여 Fig. 6 과 Fig. 7 보다 상대적으로 고주파에서 음압이 감소함을 볼 수 있다. Fig. 9 는 등속 구간에서 곡선부 레일의 곡선반경이 R3002 로 곡선부 레일과 차륜의 마찰에 의한 스웰소음이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

따라서 Table 3 에서와 같이 R400 이상에서 레일

의 곡선반경에 따라 발생하는 스웰소음에 의한 고주파 소음의 영향이 적어서 ANC 시스템을 개발하여 능동소음제어에 의해 저주파 대역의 음압레벨이 5dB 감소 된다면 전주파수 대역의 소음저감이 최대 4.7dB로 소음저감 효과가 가장 크다고 할 수 있다.

5. 결론

레일의 곡선반경에 따라서 레일과 차륜의 마찰로 인해 스웰소음이 발생할 때 철도 차량 실내에서 발생하는 소음의 주파수 분석을 수행하였으며 500Hz 미만 저주파 대역의 능동소음제어 시스템 기술적용으로 레일의 곡선반경에 따른 전대역 음압레벨의 감소 효과에 대한 연구를 수행하였다.

주 소음원의 이동경로인 차량바닥에 설치하기 쉽게 패널형태의 ANC 시스템을 개발하여 500Hz 미만의 능동소음 제어를 구현하여 약 5dB 정도 저감할 수 있다고 가정하여 곡선반경에 따른 능동소음제어 효과예측분석을 수행하였다. 그 결과 R400 이하의 곡선반경이 작은 구간에서는 스웰소음이 크게 작용하여 고주파 대역의 음압레벨이 커서 능동소음제어 기술을 통해서 저주파 대역의 음압레벨을 저감 시켜도 주파수 전대역 음압레벨을 1~2dB 정도밖에 저감 시키지 못하는 것을 확인하였다. 반면에 R400 이상에서는 전대역 음압레벨을 약 4~5dB 정도 저감할 수 있음을 확인하였다. 따라서 곡선반경이 R400 이상의 구간에서 능동소음제어에 의한 전대역 음압레벨의 저감효과가 우수함을 확인하였다.

후기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Cho, H. C., Lee, K. S. and Nam, H. D., "A Neural Multiple LMS Based ANC System for Reducing Acoustic Noise of High-Speed Trains," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58, No. 4, pp. 385-390, 2009.
- Das, K. K. and Satapathy, J. K., "Frequency-domain Block Filtered-x NLMS Algorithm for Multichannel ANC," International Conference on Emerging-Trends in Engineering & Technology, pp. 1293-1297, 2008.
- Yegui, X., Ikuta, A., Liying, M. and horasani, K., "Stochastic Analysis of the FXLMS-Based Narrowband Active Noise Control System," IEEE Trans. on Audio, Speech, & Language Processing, Vol. 16, No. 5, pp. 1000-1014, 2008.
- Kim, H. S. and Park, Y., "Delay-X LMS Algorithm an Efficient ANC Algorithm Utilizing Robustness of Cancellation Path Model," Journal of Sound & Vibration, Vol. 212, No. 5, pp. 875-887, 1998.
- Lee, C. W. and Kim, J. C., "Analysis of Curve Squeal Noise for KTX Train," Proceeding of the Korean Society for Railway Spring Conference, pp. 1187-1190, 2009.
- Choi, J. K., Lee, J. W. and Chang, S. I., "A Study on Squeal Noise Control by Absorption Treatment in Urban Rail Transit System," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 58-64, 2001.
- Moon, K. H., You, W. H. and Kim, J. C., "A Study on the Squeal Noise for Subway," Transactions of the Korean Society for Railway, Vol. 6, No. 3, pp. 209-214, 2003.
- Moon, K. H., You, W. H. and Kim, J. C., "An Experimental Study on the Squeal Noise for Subway," Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Spring Conference, pp. 536-541, 2003.
- Moon, K. H., Kim, J. C., You, W. H. and Oh, I. G., "The Reduction Effectiveness of Squeal Noise Through Rail Lubricator," Proceeding of the Korean Society for Railway Spring Conference, pp. 627-632, 2003.
- Moon, K. H., Kim, J. C., You, W. H. and Seo, J. W., "A Study on the Squeal Noise for Domestic EMU," Proceeding of the Korean Society for Railway Spring Conference, pp. 66-71, 2002.
- You, W. H., Koh, H. I., Park, J. H., Jo, J. H. and Yang, C. S., "A Study on the Characteristics of Subway Noise in Curved Line," Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineering Autumn Conference, pp. 773-778, 2008.
- Cho, J. H., Lee, K. J., Jung, W. S. and Hong, C. K., "Identification of Noise Characteristics for Subway

- Train Passing Through the Underground Tunnel," Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, pp. 340-345, 2002.
13. Kim, B. S., Kim, K. J., Kim, S. S. and Kim, J. C., "Experimental Study of Generating Mechanism about Railway's Squeal Noise," Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Spring Conference, pp. 1469-1472, 2006.
14. You, W. H., Hur, H. M., Koh, H. I., Park, J. H. and Choi, Y. W., "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. 1, pp. 85-93, 2009.
15. Kim, K. J., Kim, B. S., Park, J. K. and Kim, J. C., "Study on the Curve Squeal Noise of Train Wheels," Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Autumn Conference, pp. 29-32, 2005.
16. Lee, C. W. and Kim, J. C., "Characteristics of Braking Noise of KTX Train," Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 85-86, 2006.