

부산지역 도시철도 레일코팅시스템 설치에 따른 소음저감 효과 분석

최종욱^{†*} · 석성주^{**} · 유평종^{*}
산업환경과^{*}, 부산교통공사^{**}

Evaluation of Noise Abatement by Rail Coating System Installed the Busan Metro Line 3

Choi Jong-wook^{†*}, Seok Seong-joo^{**} and Yoo Pyung-jong^{*}
Industrial Environment Division^{*}, Busan Transportation Corporation^{**}

Abstracts

A rail coating system was installed to reduce the level of squeal noise generated from sharp curve between Minam station and Mandeok station of the Busan Metro line 3. This study was performed to evaluate the effectiveness of squeal noise abatement by a rail coating system. The results were as follows.

In order to investigate the reduction of noise level, the outdoor-tunnel noise level was measured at four points along with sharp curved rail before and after installation of a rail coating system and 1.8 dB(A) of noise level was reduced in this condition. A cabin noise of the train was also measured during the train trip from Minam station to Mandeok station before and after installation of this system and 1.6 dB(A) of noise level was abated after installation of this system. The frequency analysis was conducted at high squeal noise level and the highest sound power level concentrated near 500 Hz both before and after installation of this system. The noise level was dropped at higher frequency rate ranged 1 kHz to 20 kHz after installation of this system.

Key words : Rail coating system, Squeal noise, Outdoor-tunnel noise, Cabin noise, Busan Metro

서 론

현대 도시생활에서 지하철의 역할은 많은 비중을 차지하고 있으며, 부산과 같은 대도시에서는 필수적으로 요구되는 대중교통 수단이다. 지하철은 극심한 교통 혼잡으로 인해 도착시간을 예측 할 수 없는 지상교통과는 달리 도심의 지하를 관통하여 정확한 시간에 예정된 장소에 도착할 수 있는 장점이 있다. 그러나 많은 시민들이 이용하는 지하철

환경에 대한 시민들의 만족도는 이용도만큼 높지 않는 것도 사실이다. 그 중 지하철의 역사 및 차내에서 발생하는 소음 문제는 심각한 상태로 인식되고 있다. 현대인들은 여러 종류의 생활소음에 노출된 상태에서 생활하고 있는데, 지하철 소음은 일상 생활에서 매일 쉽게 접하게 되는 소음이다.

지하철 운행 중 곡선구간을 지날 때 나타나는 고소음은 인간의 청각에 불쾌감을 유발하는 소음으로 차륜이 레일 위를 굴러감으로서 발생하는 전형적인

[†] *Corresponding author.* E-mail : jemichoi@korea.kr
Tel : +82-51-309-2954, Fax : 82-51-309-2739

전동소음외에 곡선부 운행시 나타나는 높은수준의 스킨소음이다. 스킨소음이 인간에 불쾌감을 주는 이유는 소리 에너지가 특정주파수에 집중되어 있는 톤(tonal)성분의 에너지가 두드러지게 방사되기 때문이고, 이 주파수 영역은 인간의 귀가 가장 민감한 대역인 1 - 5 kHz 뿐 아니라 20 kHz까지 해당되기 때문이다¹⁾. 곡선부의 스킨소음은 특히 도심 을 지나는 지하를 다니는 지하철의 경우 건설 여건 상 곡선 반경이 작기 때문에 지하철을 이용 하는 시민들에게 차내 소음 또는 차외로 전파 되는 환경 소음의 주요 피해 원인이 된다.

지하철 고소음의 주원인인 스킨소음을 줄이기 위하여 레일의 곡률반경을 충분히 크게 함으로 제거 할수는 있지만 지하철 노선은 현존하는 도로의 지하에 건설되므로 곡률반경을 무조건 크게 건설하기에는 한계가 있다. 따라서 스킨소음 해결 방안으로 차륜에 댐핑을 추가하거나 접촉표면에 분사를 하는 방법들이 대안으로 제시되고 있다²⁾.

부산교통공사에서는 부산지하철의 스킨소음 저감을 위하여 도시철도 3호선 미남→만덕역간 곡선 선로에 접촉표면 분사방식인 레일코팅시스템을 시범 설치하여 운영 중에 있다. 본 연구에서는 부산 교통공사에서 시범설치한 레일코팅시스템에 대한 소음도 비교조사를 통해 스킨소음 저감효과를 분석 하였다.

재료 및 방법

측정방법

지하철 지하선로와 차량내부에서의 소음측정은 ISO 3381³⁾과 환경부 소음진동공정시험기준⁴⁾에 따라 실시하였고, 소음측정기의 청감보정회로는 A특성에 고정하고 동특성은 fast로 한 상태로 측정하였다. 지하철 3호선 미남→만덕 구간의 지하선로와 차량내부에서의 소음측정은 Fig. 1과 같이 이루어졌으며, 지하선로에서의 소음도 측정은 지면 위 1.5 m의 높이에서 소음기를 설치하여 2013년 1월에서 7월까지 매월 측정하였고 또한 주파수 분석을 위하여 Symphonie 01 dB(프랑스) 소음측정기를 이용하여 측정하였다.

차량내부에서의 소음도 측정은 승객에 의한 영향을 제거하기 위해 공차 운행 중에 실시하였으며, 지하철 출발시(출입문 닫힘)와 도착시(출입문 열림)를 구간으로 하여 열차의 중간 칸 실내 중앙지점에서 지면 1.5 m 높이에서 소음도를 측정하였다.

측정지점

Fig. 2와 같이 레일코팅시스템 설치지점은 지하철 3호선 미남→만덕 구간 중 미남역 끝단에서 80 m 지점에 도유기 1호를 설치하고, 그 지점에서 120 m 지난 지점에 도유기 2호기를 설치하였다. 지하선로

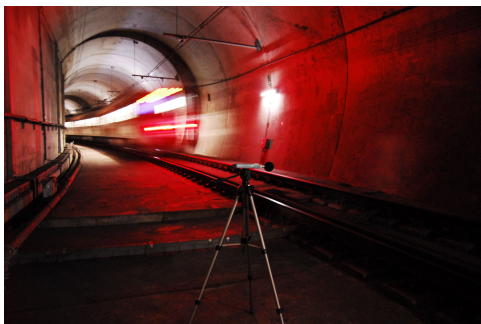
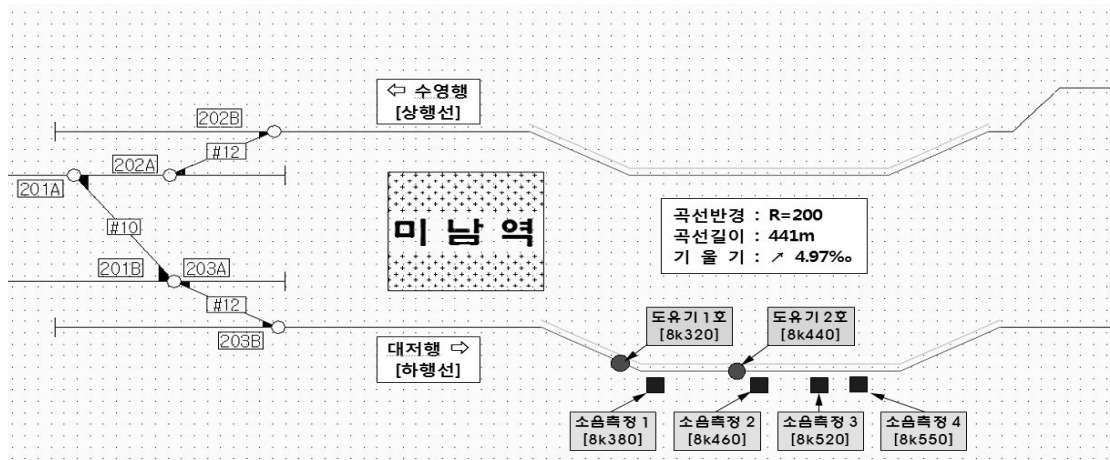


Fig. 1. Noise level measurement in the outdoor-tunnel and in the cabin of Busan Metro Line 3.



에서의 소음도 측정지점은 도유기 1호기를 60 m 지난 지점을 제1측정지점으로 정하고, 제1지점에서 80 m 지난 지점을 제2측정지점, 제2지점에서 60 m 지난 지점을 제3측정지점, 제3지점에서 30 m 지난 지점을 제4측정지점으로 정하였다. 레일코팅시스템 설치 전인 '13년 1월에 설치전 소음도를 1회 측정 하였고, 설치 후인 2월부터 7월까지 매월 7회 측정 하였으며 측정시간은 15시에서 16시까지 1시간 이 었고 측정시간 동안 열차는 미남→만덕 구간을 8 회 통과 하였다.

레일코팅시스템

부산교통공사에서 지하철 3호선에 스컬소음 저 감을 위해 시범 설치한 레일코팅시스템은 Fig. 3과

같다. 레일코팅시스템의 작동 원리는 먼저 센서를 통해 차량진입을 먼저 감지한 다음 compressor에 서 압축공기를 생산하여 공기와 코팅제를 혼합하 여 곡선선로 내부 레일은 레일 표면에, 바깥 레일 은 측면에 코팅제를 분사하도록 설계되었다.

결과 및 고찰

지하 선로에서의 소음도 차이에 대한 고찰

1) 곡선부 현황

철도선로는 가능하면 직선이어야 하나 지형지물 에 따라 경제적으로 건설하기 위하여 방향전환을 해야 하는 차량이 일정한 속도로 원활하게 주행할



Fig. 3. Photo of rail coating system installed in Busan Metro Line 3.

수 있도록 해주는 굽은 모양의 선로를 곡선부라 한다⁵⁾.

최근 건설되는 지하철 일수록 기존 도로를 따라 노선이 결정되고 환승 등으로 인해 곡선반경이 300 m 이하인 급곡선 구간이 늘어나고 있는 추세이다. 이런 급곡선 구간이 많을수록 스کیل소음의 발생률이 증가되고 이로 인하여 지하철의 소음도가 높아지는 결과를 낳는다. Table 1에 나와 있는 부산지하철 선로의 직곡선 현황을 살펴보면 부산 지하철의 총 연장은 226,652 m이고 그 중 곡선선로는 95,896 m로 전체 42 % 정도로 차지하고 있다.

그 중 급곡선부에 해당되는 300 m이하 곡선부는 35,849 m로 곡선선로 중 37 %가 스کیل소음을 유발하는 것으로 나와 있다. 서울시와 비교해 보면 총 연장은 부산시 보다 약 2.6배 길지만 곡선부의 비율은 부산과 비슷한 42 %를 차지하고 있다⁷⁾. 그러나 서울의 급곡선부는 곡선선로 중 20 %를 차지하여 부산보다는 급곡선부의 비율이 많이 낮은 것으로 나와 있다. 따라서 부산지하철의 스کیل소음이 서울보다 더 많이 발생되어 있다는 것을 알 수 있다.

2) 레일코팅시스템 설치전 후 소음도 비교

급곡선부의 스کیل소음은 레일과 차륜 플랜지의 접

촉에 의한 소음보다 차륜이 레일상부를 가로지르는 스타크-슬립 현상으로 인한 소음이 우세하게 나타난다⁸⁾. 레일코팅시스템의 코팅제 분사는 이런 스타크-슬립 현상에 의한 마찰 소음을 완화시키는 윤활유 역할에 목적이 있다. 레일코팅시스템 설치전 후의 소음도 비교를 위해서 지하선로에서 측정된 소음도의 분석결과는 Fig. 4와 같다. 레일코팅시스템 설치전의 지점별 소음도를 살펴보면 곡선부의 시작점인 1지점에서 98.5 dB(A)의 가장 높은 소음도를 보인다. 곡선부의 마지막 지점인 4지점에서는 95.5 dB(A)로 줄어드는 소음도의 형태를 보이고 있다. 7회 소음도를 조사한 레일코팅시스템 설치후의 지점별 평균 소음도를 보면 1지점에서는 95.7 dB(A)로 설치전의 소음도 보다 2.8 dB(A)이 감소되는 것으로 나타났고 2지점과 3지점에서도 설치전에 비하여 2.2 dB(A)이 저감되는 것으로 나타났다. 그러나 4지점에서는 설치전과 설치후의 소음도 차이가 거의 나지 않는 것으로 나타났다. 레일코팅시스템 설치로 인해 도유기에서 200 m 떨어진 3지점까지는 소음도가 2.2 - 2.8 dB(A) 저감되는 것으로 나타났지만 4개 지점 전체평균 소음도에서는 1.8 dB(A)이 저감되는 것으로 나타났다.

Fig. 5에서는 레일코팅시스템 설치전부터 월별

Table 1. Curvature of the railroad of the Busan Metro⁶⁾

구분	계		1호선		2호선		3호선		4호선	
	개소	연장(m)	개소	연장(m)	개소	연장(m)	개소	연장(m)	개소	연장(m)
계 (궤도연장)	1,113	226,652	271	67,052	433	93,895	188	40,306	221	25,399
직 선	562	130,756	135	39,194	220	53,667	95	25,715	112	12,180
곡선소계	551	95,896	136	27,858	213	40,228	93	14,591	109	13,219
300 M이하	163	35,849	22	6,935	50	14,116	19	5,955	72	8,843
301 - 400	57	13,540	25	6,464	15	3,704	9	2,251	8	1,121
401 - 500	22	5,174	7	1,813	11	2,821	-	-	4	540
501 - 600	309	12,625	9	2,207	20	7,544	9	2,335	2	539
601 - 900	97	14,870	38	6,989	44	6,747	5	416	10	718
901이상	172	13,838	35	3,450	73	5,296	51	3,634	13	1,458

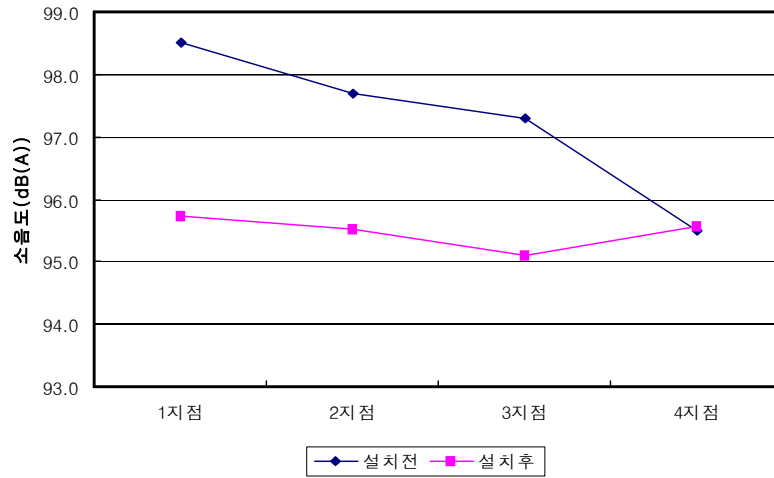


Fig. 4. Comparison of outdoor-tunnel noise level before and after installation of rail coating system in Busan Metro line 3.

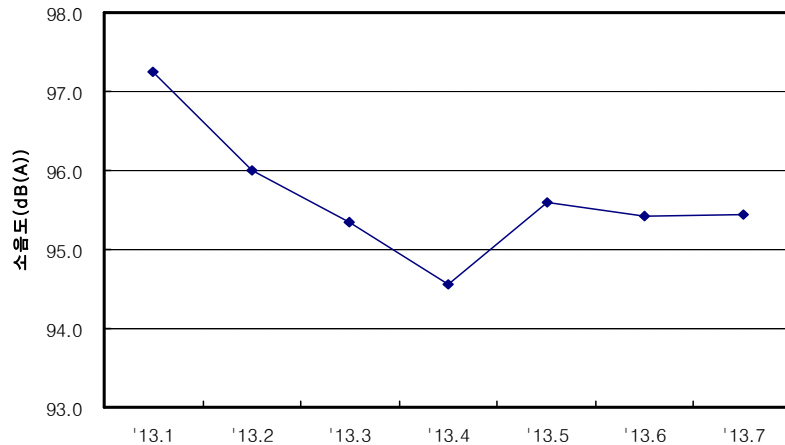


Fig. 5. Monthly variation of outdoor-tunnel noise level after installation of rail coating system in Busan Metro line 3.

지하선로에서 스کیل소음도 변화를 보여주고 있다. 레일코팅시스템 설치전인 '13년 1월의 소음도는 97.3 dB(A)이었으나 설치 직후인 2월의 소음도는 96.0 dB(A)로 1.3 dB(A)이 저감되었고 3월에는 95.4 dB(A)로 1.9 dB(A) 감소되다가 4월에는 94.6 dB(A)로 2.7 dB(A)까지 감소하다 다시 5월에는 1.7 dB(A)과 6월과 7월은 1.9 dB(A) 감소하는 것으로 나타났다.

3) 레일코팅시스템 설치전 후 주파수 분석

급곡선부 스کیل소음은 차륜과 레일의 접촉부분과 접착력에 따라서 다양한 경계조건들에 의해 차륜이 받는 크립력(creep force)에 의해 반응하는 동역학적 불안정성(stick-slip)에 근거하는 것으로 알려져 있다⁸⁾. Table 2는 차륜의 반경방향인 반사방향과 차륜의 수직방향인 차축방향에 대한 고유 진동수를 보여주고 있는데, 차축방향에 대한 주파수가 방사

Table 2. Natural frequency of wheel set⁹⁾

차축방향(Hz)	방사방향(Hz)
474	
1199	1983
2122	2633
3142	3376
4197	4231

방향보다 낮은 주파수 영역을 차지하고 있다. 제3 측정지점에서 레일코팅시스템 설치 전과 후의 순간 최고소음도에서의 주파수 분석결과는 Fig. 6과 같이 나타났으며, 설치전과 후 모두 500 Hz 영역에서 가장 높은 소음도를 보여주고 있다.

레일코팅시스템 설치 이후 주파수 분석에서 1 kHz에서 5 kHz 사이 주파수에서는 소음도가 6 - 18 dB(A) 감소하였고 8 kHz에서 20 kHz까지는 25 - 30 dB(A) 감소하는 것으로 나타났다. 레일코팅 시스템에 의한 주파수별 소음 저감 효과는

특히 고주파수대에서 효과가 나타나는 것으로 나왔다.

차량내부 소음도 조사

레일코팅시스템 설치로 인한 전동차 차량내부의 소음도 저감 효과를 분석하기 위하여 미남→만덕 구간 중 스켈소음 유발 지점에 대한 레일코팅시스템 설치전과 후의 소음도를 비교한 결과는 Table 3 과 같다. 레일코팅시스템 설치 전 스켈소음이 발생 되는 9초 동안에 측정된 등가소음도는 84.8 dB(A) 을 나타내었으나 설치이후 같은 지점에서의 등가소음도는 83.2 dB(A)로 나타나 전동차 내부에서도 1.6 dB(A)의 소음 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 선로연장이 3,134 m이고 전동차 운행시간이 4분간 소요되는 미남→만덕 구간 전체에 대한 소음도 비교에서 레일코팅시스템 설치 전의 등가소음도는 77.7 dB(A)로 나타났고 설치 후의 등가소

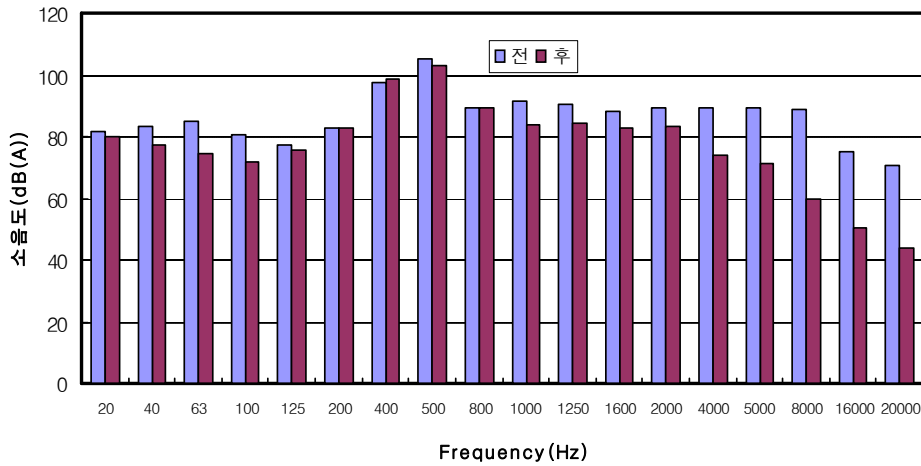


Fig. 6. Frequency analysis of squeal noise according to installation of rail coating system in Busan Metro line 3.

Table 3. Squeal noise level before and after installation of rail coating system in Busan Metro line 3

구분	측정일시	스켈소음구간 운행시간	소음도(dB(A))		
			Leq	Lmax	Lmin
설치 전	'13.1.24	9초	84.8	87.0	82.7
설치 후	'13.3.28	9초	83.2	86.0	80.3

음도는 77.5 dB(A)로 나타나 전체 선로연장의 10%에 해당되는 곡선부에서의 소음저감이 전체 구간의 소음도에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

결 론

부산지하철의 스퀸소음 저감을 위하여 3호선 미남→만덕 구간 급곡선 지하선로에 도유방식의 레일코팅시스템을 설치하고 소음 저감 효과에 대한 연구결과를 수행한 결과는 아래와 같다.

1. 미남→만덕 구간 급곡선부 지하선로에서 레일코팅시스템 설치 전과 후의 소음도 비교를 위하여 4개 지점에서 소음도를 측정한 결과 1지점에서 3지점까지는 소음도가 2.2 - 2.8 dB(A) 저감되는 것으로 나타났지만, 4개 지점 전체 소음도 비교에서는 1.8 dB(A)이 저감되는 것으로 나타났다.
2. 레일코팅시스템 설치전인 '13년 1월에 지하선로의 소음도는 97.3 dB(A)이었으나 설치 후인 2월에는 소음이 1.3 dB(A)이 저감되었고, 3월에는 1.9 dB(A) 감소, 4월에는 2.7 dB(A)까지 감소, 5월에는 1.7 dB(A) 감소, 6월과 7월은 1.9 dB(A) 감소하는 것으로 나타나 1.3 - 2.7 dB(A) 범위로 소음저감이 나타났다.
3. 레일코팅시스템 설치전과 후 지하선로에서 순간 최고소음도에 대한 주파수 분석결과 500 Hz 전후 영역에서 소음이 가장 높게 나타났고, 설치 후 1 kHz에서 5 kHz 사이 주파수에서 고음도가 6 - 18 dB(A) 감소, 8 kHz에서 20 kHz까지는 25 - 30 dB(A) 감소하는 것으로 나타나 고주파수 영역에서 저감효과가 있는 것으로 나타났다.
4. 지하철 차량내부에서의 소음저감 효과분석에서 레일코팅시스템 설치 전 스퀸소음 발생구간의 등가소음도는 84.8 dB(A)로 나타났으나 설치 후 같은 지점에서의 등가소음도는 83.2 dB(A)로 나타나 1.6 dB(A)의 소음 저감효과를 보였다.

참고문헌

1. 문경호, 유원희, 김재철, "지하철 스퀸소음에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 6, 209 - 214 (2003)
2. 유원희, 고효인, 박준혁, 조준호, 양철식, "지하철 곡선부소음의 특성에 관한 연구", 대한기계학회 춘추학술대회논문집, 773 - 778(2008)
3. ISO(International Organization Standardization)-3381.
4. 환경부, "소음진동공정시험기준"(2011)
5. 최용운, 구정서, 유원희, 고효인, "도시철도 전동차 소음특성에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 12, 329 - 334(2009)
6. 부산교통공사, "업무편람"(2012)
7. 서울메트로, 서울도시철도공사, "업무편람"(2012)
8. 유원희, 허현무, 고효인, 박준혁, 최용운, "지하철 곡선부 소음과 차륜 마모와의 관계에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 19, 85 - 93(2009)
9. S. S, Hsu, Z. Huang, C.J. Jones, "Experimental and theoretical investigation of railway wheel squeal", Proceedings of Mechanic Engineering, 221(2007)