

전동차 소음저감을 위한 슬라이딩플러그 출입문 개발

Development of a Sliding-Plug Entrance Door System for Urban Electric Transit Unit to Reduce Inside Noise Level

서승일¹, 임영호², 신동국³

Seung-Il Seo, Young-Ho Lim, Dong-Kook Shin

Keyword : sliding-plug entrance door(슬라이딩플러그 출입문), noise reduction (소음저감), transmission loss (전달손실), air-tightness(기밀), standard urban transit unit (표준도시철도차량)

Abstract

Reduction of noise level in the cabin of urban transit unit is an important issue to enhance the comfortability of passengers. It is made clear that a cause of increased noise level in cabin is the imperfect airtightness of entrance doors. In this study, the sliding-plug door system is developed to reduce the noise level of cabins by securing the airtightness of entrance door. The sliding-plug door system is composed of air-driven engine, swing arms, guide rails, guide rollers and locking devices. It is economical owing to using the previous door engine system. It is also adequate for the platform system of our subway station. It was tested to prove the reliability of system and was applied to standard urban transit unit. The effectiveness of noise reduction in cabin resulting from the sliding-plug door system was confirmed by test results.

1. 서론

현재 서울을 비롯하여 부산시, 대구시, 인천시 등 대도시에는 6,000 량 이상의 전동차가 운행 중에 있고, 이용 승객도 연 20 억명 이상에 달하고 있어, 지하철은 대도시의 가장 편리한 대중교통 수단으로 자리를 잡아가고 있다[1]. 지하철은 이제 가장 대표적인 시민들의 발이 되었고, 시민들의 삶의 공간의 일부가 된 것이다. 초기의 전동차는 정시성과 안전성이 중요시 되었으나, 전반적인 소득수준의 향상과 삶의 질이 중요시되는 시대적 흐름에 따라, 쾌적성이 전동차 품질의 중요한 기준이 되었다. 일부 지하철 노선에서 운행되는 전동차의 과도한 소음은 승객들의 불만을 초래하면서, 심각한 사회적인 문제를 야기하기도 하였다. 이와 같이 쾌적성의 중요한 요인인 정

숙성에 대한 심각성을 반영하여 건설교통부에서 고시한 “도시철도차량 표준사양”[2]은 전동차 실내 소음기준을 종전 85 dB(A)에서 80 dB(A)로 강화하여 규정하고 있다.

소음기준의 강화에 따라 전동차의 실내소음 저감을 위한 대책 수립이 필수적으로 되었는데, 본 연구에서는 실내소음 저감 대책으로써 출입문의 개량을 통한 소음 저감 방안을 제시하고자 한다.

2. 전동차 소음 증가 원인에 대한 분석

2.1 소음원

전동차의 운행 중에 발생하는 외부 소음원으로는 바퀴/레일의 접촉소음, 터널 내의 공기소음, 전동기 및 기타 전장품에서 발생하는 기계소음 등을 들 수 있다. 외부소음 저감을 통한 실내소음 저감도 방안 대책이 될 수 있으나, 소음원의 개선 대책을 수립하는 데에 소요되는 비용이 막대하므로, 경제적인 대책

¹ 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

² 비회원, 한진중공업, 기술연구소, 주임연구원

³ 비회원, 동화기업(주), 대표이사

이 될 수 없다. 본 연구에서는 소음원에 대한 대책보다는 전달경로에 대한 대책을 수립하고자 한다.

2.2 소음 전달경로에 대한 분석

전동차는 바닥(floor), 지붕(roof), 측구조(side structure), 단부구조(end structure)로 이루어져 있고 외부소음은 이 구조를 통해 전달된다. 특히 측구조는 출입문(side door), 창문(window), 출입문 포켓(door pocket) 등으로 이루어져서 소음 전달의 중요한 통로가 되고 있다. 기존 전동차에 대해서 각 부위별로 실험을 통해 구한 전달손실을 비교하여 보면 Fig. 1과 같다[3]. Fig. 1을 보면 출입문 포켓 부분의 전달손실이 다른 부분에 비해 일부 저주파수 구간을 제외하고는 현격히 작음을 알 수 있다. 이러한 차이는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 슬라이딩 출입문에서 포켓 부분의 기밀 구조가 곤란하기 때문에 틈새로 공기음이 전달되기 때문이라 사료된다.

3. 슬라이딩플러그 출입문의 개발

3.1 기본 개념

슬라이딩플러그(sliding-plug) 출입문은 슬라이딩 출입문에서 불가피하게 존재하는 Fig. 2의 출입문 포켓 부분을 제거하고 출입문을 측구조에 밀착시킴으로써 기밀 구조를 형성하여 포켓의 틈새로 전달되는 공기음을 차단하고자 함이다.

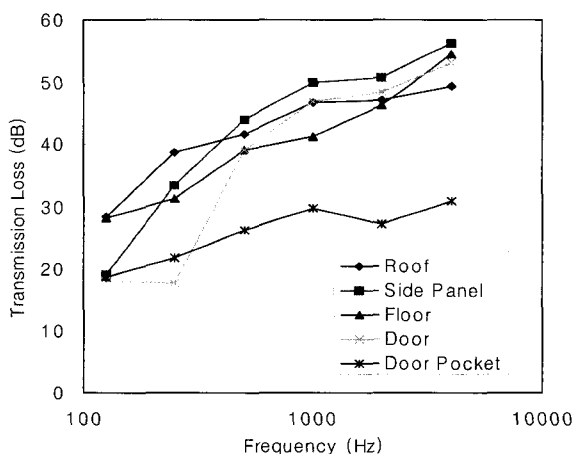


Fig. 1 Transmission loss of structures

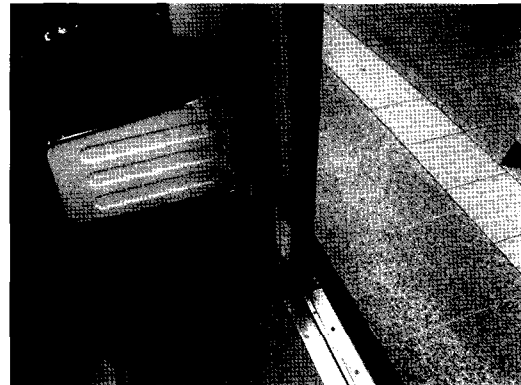


Fig. 2 Path of airborne noise

3.2 설계를 위한 제한 조건

국내의 지하철역의 플랫폼은 전동차의 바닥과 동일한 높이를 유지하도록 설계되어 있고, 전동차 탑승 중에 승객들의 안전을 고려하여 가능한 한 전동차와 인접하도록 설계되어 있다. Fig. 2에서도 볼 수 있듯이 플랫폼과 전동차와의 간격은 40~50 mm를 유지하고 있어서 완전한 스윙(swing) 방식의 플러그 출입문은 플랫폼과의 간섭으로 인해 채택이 곤란한 실정이다. 건축한계 내에서 출입문의 개폐를 가능하게 하기 위해서는 측구조와 밀착된 상태에서 작동하는 플러그 슬라이딩 방식의 출입문이 필요하다.

출입문의 슬라이딩플러그 방식의 개폐를 위해 동력원이 필요한 데, 신규로 엔진을 개발하게 되면 고가의 비용이 수반되고, 신뢰성 검증을 위해서도 상당한 기간이 소요된다. 따라서 엔진의 슬라이딩플러그 방식의 동작보다는 출입문의 동작기구를 통해 슬라이딩 플러그 방식의 개폐를 가능하게 하는 것이 더 경제적이다. 즉, 출입문 엔진 실린더는 기존의 것과 동일하게 직선으로 작동하지만 플러그 방식의 개폐가 가능하도록 출입문의 동작기구를 신규로 개발한다. 또한 운행 중에 출입문의 완벽한 기밀 유지를 위해서 추가의 출입문 밀폐장치도 개발한다.

3.3 슬라이딩플러그 동작기구의 설계

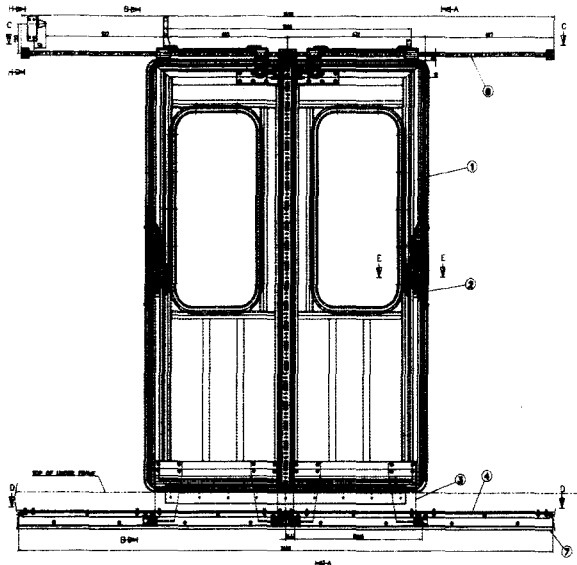


Fig. 3 Assembly drawing of sliding-plug door system

기존의 공기식 출입문 엔진을 활용하면서 출입문의 플러그슬라이딩 동작을 가능하게 하기 위해서 가이드 레일(guide rail)과 힌지(hinge)를 이용한 기구를 개발하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 슬라이딩플러그 출입문은 상부의 엔진과 힌지 방식의 스윙암(swing arm), 가이드레일, 중간 부분의 밀폐장치(locking device), 하부의 가이드레일과 롤러 등으로 구성되어 있다[4].

상부의 스윙암과 가이드레일의 상세 사진은 Fig. 4와 같다. 공기엔진 실린더가 직선 운동을 하면, 힌지로 연결된 스윙암의 롤러가 가이드레일을 따라 움직이고, 출입문은 바깥으로 튀어 나가면서 열리게 된다. 출입문의 양쪽에는 Fig. 5와 같이 또하나의 엔진이 있어서 출입문이 닫히게 되면 출입문에 부착된 핀을 당겨서 출입문을 완벽하게 밀착시키는 역할을 하게 된다.



Fig. 4 Hinge arms and upper guide rails

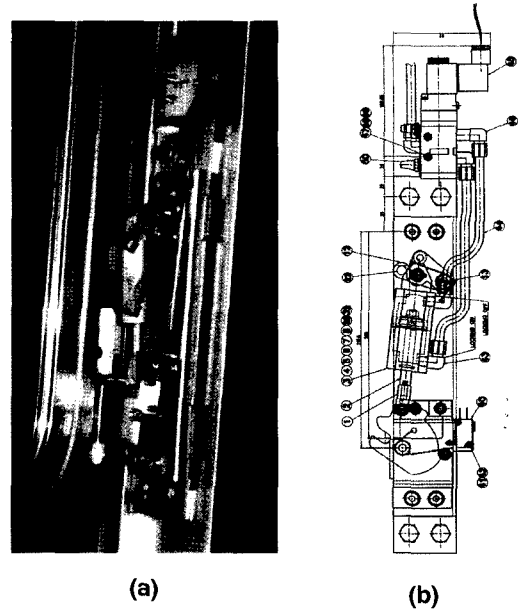


Fig. 5 Locking device

출입문 하부는 개폐 도중 출입문의 흔들림을 방지하고, 상부 암(arm)의 하중을 분담하기 위해 가이드레일을 Fig. 6와 같이 설치하였다.

3.4 슬라이딩플러그 출입문의 작동 시험



Fig. 6 Lower guide rails

슬라이딩플러그 출입문은 최초로 국내 전동차에 적용되는 점을 감안하여 안전성을 입증하기 위해 시작품을 제작하여 반복 시험을 실시하였다. Fig. 7과 같이 전동차 측구조의 일부를 제작하고 슬라이딩플러그 출입문 시스템 전체를 실제와 동일한 시작품으로 제작하여 10만회 반복 시험을 실시하였다. 시험 결과 출입문의 개폐와 밀착에 문제가 없었으며, 가이드레일 및 롤러 등의 이상도 발생하지 않았다.

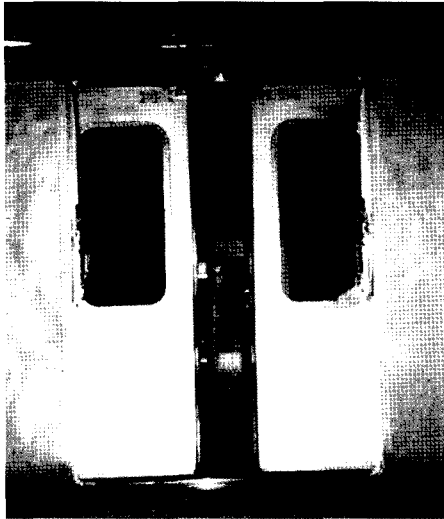


Fig. 7 Prototype door system for endurance test

3.5 실제 전동차에 적용

시험을 통해 성능 및 신뢰성이 입증된 슬라이딩플러그 출입문 시스템을 표준전동차[5]에 적용하여 유용성을 확인하였다. Fig. 8은 개발된 슬라이딩플러그 출입문 시스템을 표준전동차에 설치하는 장면이고, Fig. 9은 개발된 슬라이딩플러그 시스템이 적용된 표준전동차의 모습이다.

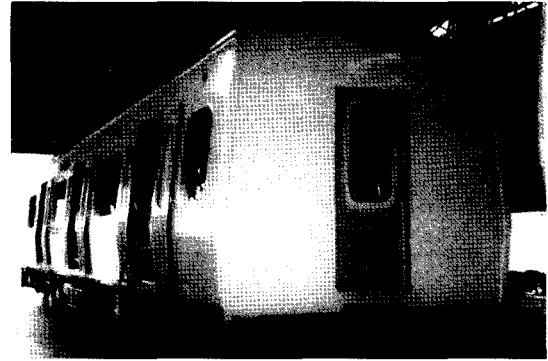


Fig. 8 Sliding-plug door system being assembled

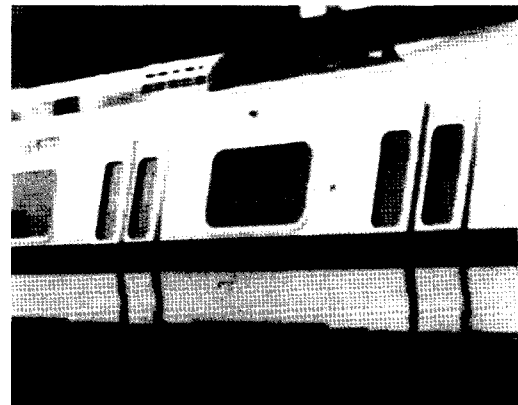


Fig. 9 Standard urban transit unit with sliding-plug door system

4. 슬라이딩플러그 출입문의 방음 효과에 대한 고찰

4.1 간이 방법에 의한 전동차 실내 소음 예측

서울시 지하철 구간에서 운행 중인 전동차에 대해서 Fig. 1의 전달손실을 이용하여 실내소음을 간단하게 계산할 수 있다[3][6]. 기존의 전동차에 대해 측구조의 투과손실 계산 결과는 Table 1과 같다. 출입문 변경에 따른 측구조의 투과손실 증가량은 약 5.6 dB 정도임을 알 수 있다.

Table 1의 결과를 기초로 기존 전동차에서 채택하고 있는 슬라이딩 출입문 설치 시의 실내소음 수준과 슬라이딩플러그 출입문을 설치한 경우의 실내소음 수준을 비교해 보면 Table 2와 같다. Table 2에서 전동차 실내소음 수준은 다음의 실험식[3]을 이용하여 계산하였다.

$$L_{inside} = 10 \log \left(2 \times 10^{\frac{L_S}{10}} + 2 \times 10^{\frac{L_E}{10}} + 10^{\frac{L_C}{10}} + 10^{\frac{L_R}{10}} \right) - 2 \quad (1)$$

Table 1 Calculation of transmission loss of side structure

Description	Side Panel	Side Door	Door Pocket	
			Sliding	Sliding Plug
Transmission Loss [TL _i ; dB(A)]	43	34	28	38
Transmission Loss Factor (τ _i)	10 ^(-43/10)	10 ^(-34/10)	10 ^(-28/10)	10 ^(-38/10)
Area(A _i ; mm ²)	8.031 × 10 ⁶	9.698 × 10 ⁶	1.139 × 10 ⁷	1.139 × 10 ⁷
Average Transmission Loss Factor (τ)	7.662 × 10 ⁻⁴			1.584 × 10 ⁻⁴ (註1)
Total Area(A ; mm ²)	2.911 × 10 ⁷			2.911 × 10 ⁷
Total Transmission Loss [TL ; dB(A)]	31.2			36.8

(註1) Side Panel과 Side Door의 투과 효과를 포함하여 계산한 결과임

Table 2 Calculation of noise level in cabin

항목	측구조	단부구조	마루구조	지붕구조	비고
외부소음 L _{EN}	109.0	108.0	113.0	109.0	오차를 고려하여 실측 결과 대비 3dB증가시킨 결과
투과손실 TL _i (슬라이딩 출입문)	31.2	34.8	42.0	40.0	
투과손실 TL _i (슬라이딩플러그 출입문)	36.8	34.8	42.0	40	
내부 소음 수준 (슬라이딩 출입문)	77.8	73.2	71.0	69.0	L _{EN} -TL _i
내부 소음 수준 (슬라이딩플러그 출입문)	72.2	73.2	71.0	69.0	L _{EN} -TL _i
전동차 실내 소음수준 L _{inside} (슬라이딩 출입문)	80.6				실험식에 따라 계산
전동차 실내 소음수준 L _{inside} (슬라이딩플러그 출입문)	77.8				실험식에 따라 계산

여기서, L_{inside}=전동차 실내소음 수준 dB(A)

L_S=측구조의 내부소음 수준 dB(A)

L_E=단부구조의 내부소음 수준 dB(A)

L_U=마루구조의 내부소음 수준 dB(A)

L_R=지붕구조의 내부소음 수준 dB(A)

Table 2를 통해 슬라이딩플러그 출입문을 적용한 전동차의 경우, 기존의 슬라이딩 출입문을 적용한 전동차에 비해 기밀효과에 의해 전체적으로 약 2.8 dB(A) 정도의 소음저감 효과가 있음을 확인할 수 있다.

5. 슬라이딩플러그 출입문 적용 시의 주의 사항

슬라이딩플러그 출입문 시스템은 차체와 출입문 사이를 강제적으로 밀착시킴으로 기밀을 최대한도로 유지시킨 것이 장점이라 할 수 있는데, 측구조가 곡면을 이루는 차체의 경우, 차체와 출입문의 제작 시에 공차관리가 엄격하지 않으면 차체와 출입문 사이에 초기부터 공차에 의한 틈새가 존재하게 되어 밀착 잠금장치로 기밀 유지가 곤란한 경우가 있다. 특히 알루미늄 차체의 경우 용접에 의한 변형이 심하므로 공차관리를 엄격히 하여 출입문과 차체 사이에 공차에 의한 틈새가 발생하지 않도록 주의해야 한다.

6. 결론

전동차 실내소음 저감은 승객의 안락감을 증가시키기 위한 필수 사항으로서 그 중요성이 더해가고 있다. 본 연구에서는 전동차의 실내소음 증가 원인 중 하나가 슬라이딩 출입문의 불완전한 기밀 성능에 있음을 확인하고, 출입문의 기밀을 완벽히 함으로 실내소음 저감에 기여할 수 있는 슬라이딩플러그 출입문을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 슬라이딩플러그 출입문은 기존의 출입문 시스템을 충분히 활용하여 경제성을 높였고, 우리 실정에 적합한 출입개폐 구조를 가지고 있다. 개발된 슬라이딩플러그 출입문의 시제품을 제작하여 반복시험을 수행함으로 신뢰성을 입증하였고, 표준전동차에 채택하여 유용성을 확인하였다. 슬라이딩플러그 출입문을 적용한 결과 전동차 실내소음 저감 효과는 2.8 dB(A)임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 남상팔, "철도차량의 현재와 미래", 2002년도 춘계학술발표대회논문집, 한국철도학회, 2002.
2. 도시철도차량 표준사양, 건설교통부고시 제1998-53호, 건설교통부, 1998.
3. 이동길, 최귀대, 서승일, 최문길, 김국현, "서울시 7&8호선 전차의 소음저감 대책에 대한 최종 보고서", (주)한진중공업, 1998.
4. 서승일, 임영호, 신동국, "사이드 슬라이딩플러그 도어", 공개특허공보 특2001-0009908, 대한민국특허청, 2001.
5. 서승일, 최성호, 임영호, 이정수, "표준화된 알루미늄 전동차의 개발", 한국철도학회지, 제2권, 제3호, 1999.
6. 서승일, 최문길, 김국현, "통근형 전동차의 객실내 소음 수준 예측", 1999년도 춘계 학술발표대회논문집, 한국철도학회, 1999.