

정위치 정차 성능 기반 전동차 광폭 출입문 시스템 개발 연구

김무선^{1*}, 홍재성², 김정태³, 장동욱⁴

¹한국철도기술연구원 광역도시철도융합연구실, ²한국철도기술연구원 기술기준팀

³한국철도기술연구원 지능형신호통신연구팀, ⁴한국철도기술연구원 무선급전연구팀

Development of the Wide Passenger Door System of EMU based on the High Precision Stop Performance

Moosun Kim^{1*}, Jae-Sung Hong², Jungtai Kim³, Dong Uk Jang⁴

¹Metropolitan Transit Convergence Research Division, Korea Railroad Research Institute

²Technical Regulation Team, Korea Railroad Research Institute

³Signalling & Communication Research Team, Korea Railroad Research Institute

⁴Wireless Power Transfer System Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 현재 서울 및 대부분의 광역도시에서 운영 중인 전동차는 출퇴근시 높은 혼잡도로 인해 열차 운행시간이 상승적으로 지연되고 있는 실정이다. 그 중 정차역에서 승객들의 승하차 시간에 따른 지연 효과도 큰 영향을 미친다. 이번 연구에서는 승객 승하차 시간을 단축시킴으로써 도시철도의 표정속도를 향상시킬 수 있는 방안으로 광폭 출입문 시스템 개발을 수행하였다. 먼저 광폭 출입문의 폭을 정의하기 위해 시험을 통하여 크기별 시간 단축 효과를 확인하고, 주변 기기와의 간섭 효과를 고려하여 열차의 정위치 정차 성능 향상을 조건으로 최적 사이즈를 정의하였다. 그리고 출입문 크기의 변경으로 인한 차량 구체의 구조 특성이 바뀌게 되므로 구조 해석을 통해 구조 안정성을 확인하였다. 다음으로 광폭 출입문 시스템의 상세 설계를 진행하고 시작품을 제작하였으며 기능 시험과 내구 시험을 진행하여 제시한 설계안의 타당성을 검증하였다. 본 연구의 체계적인 개발 과정을 통해 향후 표정속도 향상을 위한 방안으로 광폭 출입문 적용시 출입문 크기 정의부터 시스템 제작까지 설계 자료로 활용할 수 있을 것이다.

Abstract In Seoul and most metropolitan cities, urban trains are delayed due to high congestion during commute times. The delay effect of passengers boarding and disembarking is also significant. In this study, a wide passenger door system was developed as a way to improve the scheduled speed of urban trains by decreasing the passengers' flow time. The door size was defined experimentally to shorten the entrance time. The optimum door size was also determined to improve the stop precision performance of the train while considering the interference effect with peripheral devices. Because the change in door size changes the structural characteristics of the vehicle, the structural stability of a train was analyzed numerically. A prototype of the wide door system was made, and the proposed design was verified using functional and endurance tests. The systematic development process can be used as design data for door size definition and system production when applying a wide door to improve the scheduled speed.

Keywords : Electric Multiple Unit(EMU), Endurance Test, High Precision Stop, Passenger Flow-Time, Scheduled Speed, Structural Analysis, Wide Passenger Door

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음

*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5546 email: mskim@krri.re.kr

Received November 1, 2016

Revised (1st November 29, 2016, 2nd December 5, 2016)

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

1. 서론

서울 등 대도시권 출퇴근시간의 광역도시철도 표정속도 향상은 열차 이용자의 불편을 최소화하고 타 교통수단 대비 열차 이용률을 높이기 위해서 필수적으로 고려되어야 한다. 표정속도 향상을 위한 주요 방안은 열차 주행 속도를 향상하거나 정차 시간을 최소화하는 것이며 이에 대한 연구를 한국철도기술연구원에서 진행 중에 있다. 표정 속도를 향상시키기 위해서는 궤도특성을 고려한 최고 주행속도가 제한되어 있는 조건에서 가감속도를 늘리는 방법이 있으며 적정 가감속을 정의하기 위한 연구가 진행되었다[1,2]. 다음으로 정차 시간을 최소화하기 위해서는 정차시간에 직결되는 승하차 시간을 단축해야 하며, 그 방안으로 철도기술연구원에서는 광폭출입문 시스템 개발 연구를 진행하였다.

광폭 출입문은 현재 운행 중에 있는 도시철도 출입문 폭 1,300mm에서 크기를 늘려 승객들의 승하차를 원활하게 함으로써, 승하차 시간을 단축시키는 것을 목적으로 한다. 해외 광폭 출입문 사례로는 독일 출입문 개발 업체인 IFE 社가 더블 판넬 슬라이딩 타입으로 2,000mm, 슬라이딩 플러그 타입으로 1,880mm 출입문을 개발하였다.

현재의 전동차 출입문 폭은 승객의 표준 체형과 전동차 구체의 안정성을 고려하여 표준규격으로 규정되어 있다. 하지만 40년 전 1호선 개통 당시의 규격이어서, 현재 상황에서의 승객 체형과 승하차 패턴이 고려되지 않아 이를 고려할 수 있는 출입문 시스템 개발이 필요하다[3]. 확장된 폭의 출입문 시스템을 개발하기 위해서는 먼저 출입문 적정 폭의 정의가 필요하다. 이는 현대인의 체격 조건을 고려하여야 하며, 승하차 시간의 단축 효과의 비교 분석으로부터 정의할 수 있다. 또한 대부분의 역사에 설치되어 있는 스크린 도어와 같은 다른 장치와의 간섭 효과도 고려하여야 한다. 다음으로 출입문 폭이 넓어짐으로써, 차량 구조체의 구조특성 변화를 고려하여야 한

다. 넓어진 출입문만큼, 단일 구조체의 지지부위가 좁아지고 창문틀의 크기도 변경이 불가피해진다. 이로 인한 구조 특성의 변화가 허용 범위 내에 들어올 수 있도록 고려되어야 한다. 마지막으로, 광폭 출입문 시스템의 상세 설계 및 시제품을 제작하여 출입문 규격에서 제시하는 기준에 맞춰 성능을 만족함을 확인 및 장시간 작동 영향을 고려할 수 있는 내구성 시험을 진행하여야 한다.

본 연구에서는 광폭 출입문 시스템 개발을 위해 실제 시험을 통한 광폭 출입문 크기 정의와 광폭 출입문 적용 시 차체 구조에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 또한 시제품을 제작하여 출입문 성능 시험과 함께 내구 시험을 통한 제품의 신뢰성을 확보하였다.

2. 본론

2.1 광폭 출입문 폭 정의

광폭 출입문 개발을 위해 출입문 폭의 목표를 1,800mm로 선정하였는데 그 목표치는 한국인의 표준체격, 출입문 폭 크기에 따른 승하차 시간 단축 효과 및 주변 시설물과의 간섭 여부를 다음과 같이 전체적으로 고려하여 정의한 값이다.

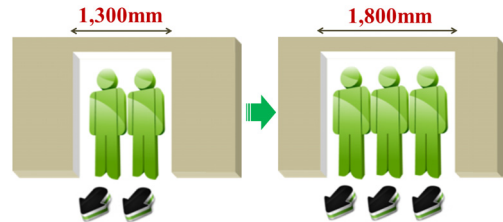


Fig. 1. Number of passengers on 1,300mm and 1,800mm width door

2015년 20~30 세 남성 기준으로 어깨너비(양쪽 어깨 접 사이의 수평 거리)는 평균 401mm 이며 상위 5%의

Table 1. Passenger flow time for various door width and congestion index

Door width	congestion Index, number of flowing passenger	200%, maximum (88)	200%, average (66)	150%, maximum (76)	150%, average (24)	100%, maximum (54)	100%, average (20)
1,300mm	time(sec)	46.8	38.0	45.2	18.2	29.8	15.0
1,600mm	time(sec)	39.6	32.3	38.2	14.8	28.5	11.9
1,800mm	time(sec)	37.2	31.0	35.9	14.2	25.4	11.6
2,000mm	time(sec)	37.0	29.7	33.4	14.6	24.8	11.7

평균치는 약 432mm 이다[4]. 따라서 승객 한명이 주변 간섭 없이 통과하기 위한 최소 간격은 약 500~550mm 수준으로 고려할 수 있다. Fig.1 에 나타낸 바와 같이 현재의 출입문 너비 1,300mm 기준으로 2명이 동시에, 그리고 1,800mm 기준으로는 3명이 동시에 간섭 없이 출입이 가능하다.

출입문 폭에 따른 승하차 시간 단축효과를 분석하기 위해 폭 조절이 가능한 간이 출입문을 제작하고, 혼잡도에 맞는 인원을 동원하여, 혼잡도 100%, 150%, 200% 기준으로 출입문 폭이 1,300mm, 1,600mm, 1,800mm, 2,000mm에 대하여 시험을 진행하였다[3,5]. 승하차 시간은 문열림 초기부터 문닫힘이 완료되는 순간까지의 총 시간을 측정하였다. 문열림 시간과 문닫힘 시간은 출입문 제어 기술과 안전 등을 고려하여 현재 폭 크기에서 각각 2.5±0.5초, 3.0±0.5초의 규격을 가지며, 그 조건에 맞게끔 출입문 작동 시간을 조절하였다.

시험 결과를 Table 1에 정리하였다. 각 혼잡도 별로 승하차 인원 선정은 2호선 노선 현장에서 측정한 승하차 인원을 기준으로 최대 인원과 평균 인원으로 분류하여 정의하였다.

결과에서 알 수 있는 바와 같이 1,800mm의 경우 1,300mm 대비 대부분의 시험 조건에 있어 약 20%의 시간 단축효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 출입문과 주변 시설물과의 간섭여부를 고려할 때, 직접적인 간섭으로 고려할 수 있는 것은 역사에 설치된 스크린 도어이다. 스크린 도어의 폭은 2,000mm이며, 1,300mm 폭의 현재 열차 출입문 경우 ±350mm의 정위치 정차 허용 오차 범위를 가지게 된다. 출입문이 넓어질수록 허용 오차 범위는 줄어들며 2,000mm에서는 허용 오차는 0이 된다. 이는 현재의 전동차 제동 시스템으로는 구현 불가능하므로, 정위치 정차 오차를 최대한 줄일 수 있는 기술 적용을 조건으로 출입문 폭을 정의하게 되는데, 1,800mm의 경우 ±100mm의 오차 범위가 요구되므로, 이를 위해 정위치 정차 성능 향상 기술 개발을 더불어 진행하고 있다.

2.2 차량 구조체 구조 특성 분석

전동차 출입문 확대는 차체 구조 변경을 수반하게 되므로, 그에 따른 구조 특성도 달라지게 된다.

따라서 구조해석을 통하여 광폭출입문이 적용되는 차체 구조물에 관한 구조 안전성을 검토하였다[6]. 해

석 대상은 Tc-car와 M-car이며 하중조건은 ‘도시철도 차량기술기준(part 51)’을 적용하였다. 1,300mm와 1,800mm 도어 기준으로 해석을 위한 모델링은 Fig.2에 나타내었다.

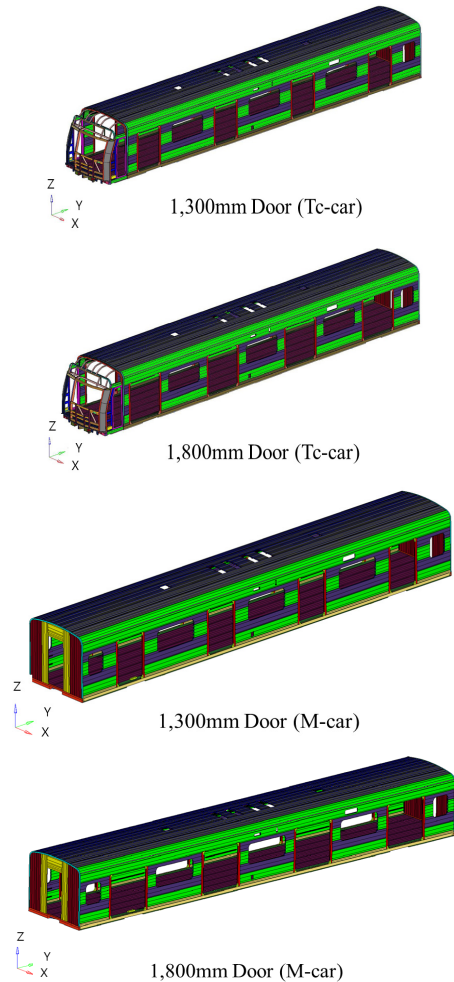


Fig. 2. Modeling for 1,300mm and 1,800mm Tc-car and M-car

Table 2. Load conditions

Load type	Load magnitude	
	Tc-car	M-car
Vertical(kg)	58,080	60,787
Compressive (kg)	67,083	69,263
3-point support (kg)	17,083	19,263
Torsional (ton-m)	4	4
1st natural frequency	bare frame	bare frame

차체는 shell 요소를 사용하였으며, 출입문 상하부 및 리프팅 패드 서포트는 solid 요소를 사용하였다. 재질 기준은 KS D6759/EN13981와 JIS H4000 규격을, 하중조건은 ‘성능시험의 구조체 하중시험’과 ‘안전기준 제 26 조’의 시험하중 조건을 적용하였다. Table 2에 시험 하중조건에 관한 내용을 정리하였다.

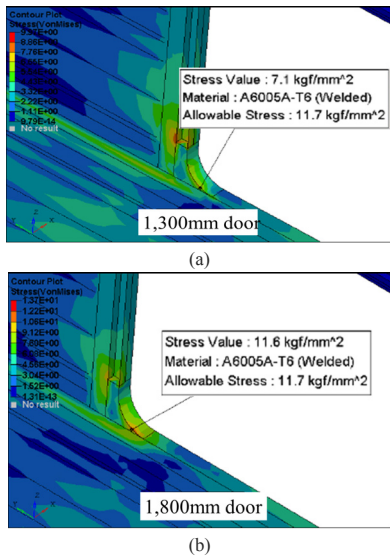


Fig. 3. Door frame corner stress in (a) 1,300mm and (b) 1,800mm

구조해석으로부터 얻어진 주요 부위의 해석 결과는 재질의 허용 응력과 대비하여 Table 3에 Tc-car, Table 4에 M-car로 구분하여 나타내었다.

각 하중 조건별로 주요 하중 부위에서의 최대 응력은 재질의 허용응력 범위에 들어가는 것을 확인할 수 있다. 다만, Fig.3에서 보이는 바와 같이 1,800mm 도어를 가지는 M-car의 경우 수직하중 조건에서 용접부인 도어 프레임 하부 코너에 최대응력이 허용응력에 근접함을 보인다. 따라서 이 부위는 용접부를 모재부로 바꾸거나, 코너부 곡률을 조절하는 설계 보완 등의 방안으로 안전율을 증대시킬 필요가 있다.

2.3 광폭 출입문 성능 시험 및 내구성 시험

대부분의 국내 전동차 출입문은 포켓슬라이딩 타입으로 공압식과 전기식으로 분류된다. 전기식은 공압식에 비해 고가이면서 구조가 복잡하지만, 승객 안전성이 우수하고 유지보수가 용이하여 현대식 차량에 대부분 적용되고 있다. 이번 연구에서는 광폭 출입문 개발을 위해 전기식의 포켓슬라이딩 방식을 적용한 시작품을 제작하였다[7].

넓어진 폭에 의한 도어의 기밀유지 성능 저하를 최소화하기 위해 도어 포켓 내부에 일반적으로 쓰이는 블러

Table 3. Results of structural analysis of Tc-car

Load type	High-stressed part	material	allowable stress	maximum stress(kgf/mm ²)	
				1,300mm door	1,800mm door
Vertical	window frame corner	A6005A-T6	21.9	9.6	13.3
Compressive	Lower front post	A5083-O	16.2	7.5	7.2
	Higher front post	A5083-O	16.2	7.5	7.5
	curvated center	A6005A-T6	21.9	6.6	6.8
3-point support	door frame corner	A6005A-T6	11.7	6.8	8.4
	window frame corner	A6005A-T6	21.9	6.3	8.7
Torsional	window frame corner (operator room)	A5083-O	15.1	2.7	2.7
1 st natural frequency(Hz)			over 10.0	14.08	12.76

Table 4. Results of structural analysis of M-car

Load type	High-stressed part	material	allowable stress	maximum stress(kgf/mm ²)	
				1,300mm door	1,800mm door
Vertical	window frame corner	A6005A-T6	21.9	9.8	13.7
	door frame corner	A6005A-T6	11.7	7.1	11.6
Compressive	coupler pad	A5083-O	16.2	7.6	7.6
	curvated center	A6005A-T6	21.9	6.3	6.5
3-point support	door frame corner	A6005A-T6	11.7	7.5	9.4
	window frame corner	A6005A-T6	21.9	6.8	9.3
Torsional	Bolster	A6005A-T6	11.7	1.9	2.0
1 st natural frequency(Hz)			over 10.0	13.58	12.34

쉬 타입 대신 밀폐형 고무 테두리를 적용하였으며, 상부에도 도어와 도어 프레임간의 밀착을 위해 Fig. 4와 같이 출입문 닫힘시 자동으로 밀착될 수 있는 경사진 밀폐용 구조물을 장착하였다. 도어 구동부의 시스템 구성은 Fig. 5에 나타내었다.

광폭 출입문은 일반 출입문 대비하여 판넬 면적이 넓어지고 도어엔진의 개량이 이루어짐으로써 전체 출입문 시스템 중량이 약 18% 정도 증가하였다. 또한 문 열림 및 닫힘 시간이 상대적으로 길어졌다.

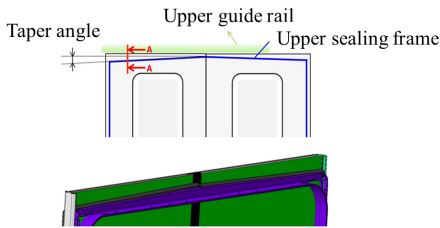


Fig. 4. Door sealing structure

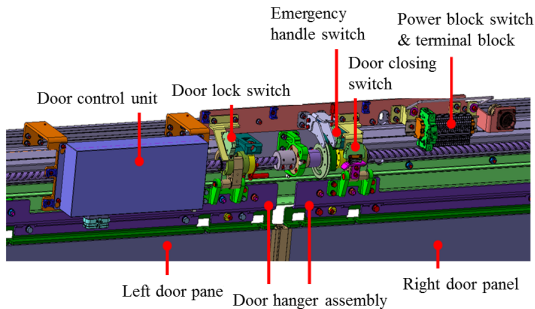


Fig. 5. Door driving system

제작된 광폭 출입문 시작품을 대상으로 주요 항목에 관한 성능시험을 진행하였다. 성능 시험의 신뢰성을 높이기 위해 차량과 유사한 프레임 구조에 출입문 시스템을 취부한 후 시험을 진행하였다.

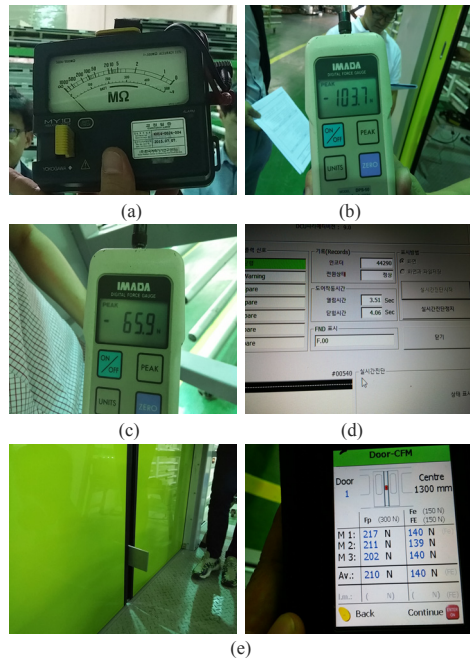
시험 항목과 판정기준 요약은 다음과 같다. Fig.6는 각 항목 시험 실시 및 결과를 나타낸다.

- 1) 절연저항 시험 :도어 내부 결선과 접지 사이 절연저항 10MΩ 이상(관련규격 : KS C IEC 60571)
- 2) 도어 수동 작동력 시험 : 도어 열림을 수동으로 3회 반복 후 힘의 평균치가 150N 이하(관련규격 : EN14752)
- 3) 비상핸들 작동시험 : 핸들 작동 힘 200N 이하(관

련규격 : EN14752)

- 4) 도어 개폐거리 시험/도어 닫힘 스위치 시험 및 잠김 스위치 작동 시험 : 도어 열림거리 1,800mm 이상/도어 열림시간 최대 3.5초±0.5초, 도어 닫힘시간 최대 4.0초±0.5초 이내(구매자 요구사항)
- 5) 장애물 감지 및 힘 측정 시험 : 도어 상하부 200mm 및 중앙부에서 폭 10mm 물체를 감지 후 열려야 하며, 3회 감지 후 완전히 열려야 함/ 닫힘 힘 160N 이하 및 충격(Peak) 힘 350N 이하 (구매자 요구사항)
- 6) 최소 작동 전압 시험/최대 작동 전압 시험/역전압 시험 : 공급 전압 50V±1V에서 도어 정상 작동, 공급 전압 90V±1V에서 4.0초±0.5초 이내에 열리고 4.5초±0.5초 이내에 닫혀야 함, 72V 역전압에서 작동하지 않아야 하며 정상 전압 복구시 4.0초±0.5초 이내에 열리고 4.5초±0.5초 이내에 닫혀야 함 (관련규격 : KS C IEC 60571)
- 7) 누수시험 : 누수가 없어야 함(관련규격 : EN14752)

위 시험항목 진행 결과 시작품의 작동 성능에 이상이 없음을 확인하였다.





(f)



(g)

Fig. 6. Door performance test : (a) Insulation resistance, (b) Door manual opening force, (c) Emergency handle releasing force, (d) Door opening and closing time, (e) Obstacle detecting and closing/peak force, (f) Minimum/Maximum operating voltage, and (g) Water leakage

다음으로, 제작된 광폭 출입문 시작품의 내구성을 검증하기 위해 Fig.7 과 같이 230만회 반복 개폐시험을 진행하였다. (EN14752 규격 : 100만회 기준) 내구성 시험 230만회는 서울 2호선 기준으로 약 18년을 운행한 경우와 같은 도어 개폐 횟수이다. 내구성 시험 진행 결과 소모품 교체 건은 없었으며, 개폐 동작에 이상 없음을 확인하였다. 다만 반복 작동에 의하여 고무 및 우레탄 재질의 부품 등에서 약간의 마모 현상을 발견할 수 있었다. 이는 각 부품의 교환주기에 따라 부품 교체를 필요로 한다. 따라서 높은 신뢰성과 내구성을 위해 제작사에서 권장하는 소모품 교체주기에 따라 유지보수가 된다면, 광폭 출입문 도어 시스템은 차량 수명과 동일하게 운용될 수 있을 것으로 판단된다.



Fig. 7. Door system endurance test

3. 결론

대도시권 출퇴근 시간대 열차의 표정속도를 향상하기 위한 방안으로 열차 가감속도 성능 향상 및 승하차 시간 단축 등을 고려할 수 있다. 이 중, 승하차 시간 단축을 위한 방안으로 현재 1,300mm 크기의 열차 출입문을 확장한 광폭 출입문 적용을 고려할 수 있다. 이를 위해 다음과 같은 내용으로 출입문 개발을 진행하였다.

- 1) 광폭 출입문 크기의 정의를 위해, 한국인의 표준체형을 고려하고, 실제 시험을 통하여, 최적 폭을 1,800mm로 정의하였다.
- 2) 광폭 출입문 적용 차량 구조체의 구조 특성 검토를 위해 진행한 수치해석 결과 각 하중 조건에서 소재의 허용응력 내로 최대 응력이 발생함을 확인하였다.
- 3) 1,800mm 광폭 출입문 시스템을 실제 제작하여 문 열림/문단힘 및 장애물 감지와 같은 성능시험과 내구시험을 수행하였다, 그 결과 신뢰성과 내구성을 확보함을 확인하였다.

본 연구를 통하여 광폭 출입문 시스템 개발을 위해 수행한 출입문 시스템 정의 및 사이즈 변경에 따른 주요 고려 사항에 대한 검토와 실제 제품 제작 후 철도 차량 규격에서 정의한 시험까지 전반적인 개발 내용을 기술함으로써, 철도 차량 관련 부품 개발시 수행하게 되는 개발 프로세스의 이해를 도울 수 있을 것이다.

References

- [1] J. Kim, M. S. Kim, K. Ko, D. U. Jang, "The Study on the Standardization of the Maximum Acceleration of the Electric Multiple Unit through the Analysis of the Traction and the Adhesion Characteristics", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol.

16, no. 11, pp. 7934-7940, 2015.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7934>

- [2] K. J. Ko, J. T. Kim, M. S. Kim, D. U. Jang, J. S. Hong, S. H. Ryu, J. D. Jung, "Analysis of Acceleration and Deceleration on High Performance Train for a Metropolitan Rapid Transit System", *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 33, no. 6, pp. 564-574, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.7470/jkst.2015.33.6.564>
- [3] J. Kim, M. S. Kim, J. S. Hong, Y. H. Cho, T. Kim, "An Analysis of Boarding and Alighting Times for Urban Railway Vehicles", *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 17, no. 3, pp. 210-215, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.3.210>
- [4] http://sizekorea.kats.go.kr/02_data/directData01.asp, 2016.
- [5] S. Oh, S. Kim, J. Hong, "Comprehensive analyses of the influence of door-width on the passenger flow time on Korean urban railway", *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 230, no. 6, pp. 1-9, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715607905>
- [6] J. S. Hong, D. U. Jang, M. S. Kim, J. T. Kim, K. J. Ko, "FEM Analysis of Carbody for Wide Passenger Door EMU", *Proceedings of Korean Society for Precision Engineering 2014 Spring Conference*, Jeju, p. 1006, 2014.
- [7] J. S. Hong, M. S. Kim, J. T. Kim, "Mock-up Test for Wide Passenger Entrance Door", *Proceedings of Korean Society for Precision Engineering 2015 Spring Conference*, Jeju, p. 1194, 2015.

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

최적화, 열유동 및 구조 해석

홍 재 성(Jae-Sung Hong)

[정회원]



- 1990년 2월 : 고려대학교 공과대학 기계공학과(학사)
- 2000년 8월 : 한양대학교 공과대학 기계공학과(공학석사)
- 2005년 2월 : 경희대학교 공과대학 기계공학과(공학박사)
- 1995년 6월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

구조체 수명평가

김 정 태(Jungtai Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 공과대학 전기공학부(공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 공과대학 전기및전자공학과(공학박사)
- 1999년 2월 ~ 2012년 7월 : LIG 넥스원 수석연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

열차제어, 신호처리, 임베디드시스템

장 동 욱(Dong Uk Jang)

[정회원]



- 1998년 2월 : 충북대학교 공과대학 전기공학과 (학사)
- 2000년 2월 : 충북대학교 공과대학 전기공학과 (석사)
- 2000년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

전기철도, 절연재료, 고전압