

도시철도차량용 제동마찰재 표준화 개발을 위한 현차시험 연구

A study for rolling stock operation test on brake friction material standardization development product for urban railway rolling stock

서경수^{*†}, 김영규^{*}, 김영배^{**}, 김종우^{**}, 김인호^{***}

Kyoung-soo Seo^{*†}, Young-gyu Kim^{*}, Young-bae Kim^{**}, Jong-woo Kim^{**}, In-ho Kim^{***}

초 록 제동마찰재는 차량 운행 시 주행 안전성에 큰 영향을 미치는 중요 부품으로 운영기관에 따라 상이한 제작사양으로 인해 표준화 되지 않고 있다. 본 논문에서는 “도시철도차량용 제동마찰재 개발 및 표준화 연구” 개발품에 대한 성능평가 및 신뢰성 검증을 위한 현차 시험 요구사항 및 연차별 시험계획 수립 등 전반적인 성능평가 및 시험 방안을 제시하여 도시철도차량용 부품의 개발과정에서의 개발품 성능평가를 위한 현차 시험계획 수립 및 현차시험 운영 전반에 대한 시사점을 제시하고자 한다.

주요어 : 철도차량, 제동시스템, 제동마찰재, 성능평가, 철도용품, 현차시험

1. 서 론

도시철도차량의 제동시스템은 주행중인 전동차량을 감속하기 위한 전기적 회생제동 장치와 감속 이후 차량을 정지시키기 위해 사용하는 공기제동 방식의 기계식 제동장치로 구분할 수 있다. 공기제동은 차량의 기초 제동시스템으로 차륜과 레일의 점착력으로 제동력을 얻는 점착제동 방식이다. 제동마찰재는 차량의 속도를 감속하거나 정지하고자 하는 목적으로 승무원의 제동조작 또는 차량의 제동 제어신호에 의해 발생된 제동지령을 제동시스템에 의해 공기압력으로 변환되고 공기압력의 기계적 힘에 의해 제동마찰재로 전달되어 차륜 및 차륜과 결합된 제동 디스크와 마찰하여 최종적으로 제동효과를 일으키는 역할을 한다.

제동마찰재는 차량의 감속과 정지에 관련되어 전동차의 운행 시 주행안전성에 큰 영향을

주는 중요 부품으로서 부수차(T-CAR)용 라이닝(패드) 및 동력차(M-CAR)에 사용하는 슈(제륜자)로 2종의 제품이 사용된다.

공기식 제동장치에 사용하는 도시철도차량용 제동마찰재는 차량을 안전하게 정지시키기 위해 내열성, 내마모성, 소음 등 여러 조건을 동시에 만족하는 성능을 가져야 하며 균열, 파손 등이 발생하지 않도록 충분한 강도는 물론 마모로 인한 교환을 최소화 할 수 있도록 여러 조건을 만족하도록 개발되어야 한다.

제동마찰재의 적용규격 및 제작사양서상 시험 방법은 KRS(한국철도표준규격)와 운영기관별로 관리 되고 있는데 먼저 규격부문을 보면 도시철도 전동차량용 라이닝은 KRS BR 0022-16을 슈는 KRS BR 0017-15로 나눌 수 있으며, 한국철도공사에서 사용하는 규격은 전동차량 라이닝 KRS BR 0007-11과 슈 KRCS B006 03(레진 제륜자) 규격이 별도로 규정되어 관리되고 있다. 또한 제작사양서상 시험 방법에 있어 평균마찰계수를 측정하기 위한 제동력 적용이 슈의 경우 7~43kN, 라이닝은 4~22kN 구간에서, 다이노미 시험의 경우 제동 시작온도 50℃~200℃ 구간으로 분포되어

† 교신저자: 서울교통공사 도시철도연구원
(lifetide@seoulmetro.co.kr)

* 서울교통공사 도시철도연구원

** 서울교통공사 신정차량사업소

*** 서울교통공사 차량정비처

있으며, 시험횟수는 40회 ~ 150회 까지로 전국 도시철도 운영기관간에 상이한 제작사양서와 규격으로 인해 표준화되어 있지 않다는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 국토교통부에서 진행하고 있는 철도기술연구사업인 “철도차량 부품호환 및 표준모듈 개발” 연구단 4세부 “도시철도차량용 제동마찰재 개발 및 표준화 연구” 과제에 의해 도시철도차량의 운행 환경과 요구사항이 반영된 표준화된 제동마찰재 개발과 시험 및 검증을 통해 최적화된 표준규격서(안)을 도출하는 것을 목표로 수행되고 있다.

본 논문에서는 도시철도차량용 제동마찰재 표준화 연구 개발품의 성능을 효과적으로 평가하기 위한 차량시험 요구사항, 연차별 시험계획 수립, 실험방안 등에 대하여 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 도시철도차량용 제동마찰재

도시철도차량에서 사용하는 공기제동은 제동시스템의 최종 작용점인 마찰이 작용하는 위치에 따라 동력차량(M, Motor Car)에서 사용하는 차륜 답면 제동(Wheel Tread Brake)과 부수차량(T, Trailer Car)사용하는 디스크 제동(Disk Brake) 방식으로 나누어진다.

Fig.1과 Fig.2는 각각 VVVF제어방식 동력차량의 대차(Bogie)와 VVVF제어방식 동력차량에 사용되는 답면 제동용 제동 블럭을 나타내며 Fig.3은 답면 제동용 제동마찰재인 제동 슈(제륜자)를 보여준다.

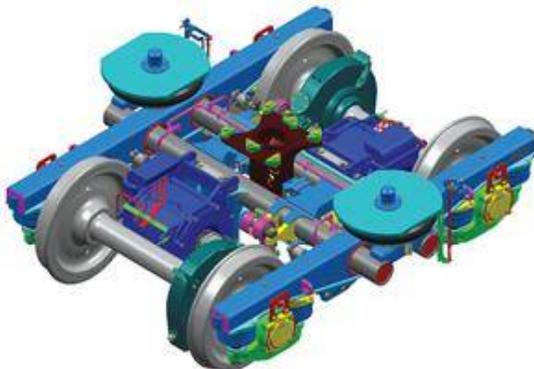


Fig. 1 Bogie of VVVF M(Motor) Car



Fig. 2 Brake Block of VVVF M Car



Fig. 3 Brake Shoe for Tread Brake

답면제동은 차륜(Wheel)의 답면(Tread)에 공기압력의 힘으로 제동마찰재를 직접 마찰시켜 제동작용을 한다. 답면제동용 제동 슈는 저항제어, 초퍼제어 차량 뿐만 아니라 VVVF제어 차량과 공동으로 사용하며 차륜 1개 당 1개가 사용되어 1축 당 2개, 1대차 당 4개, 량 당 총 8개가 적용된다. 따라서 10량 조성 5M5T 방식의 VVVF제어 전동차의 경우 편성 당 총 40개의 제동 슈가 사용되고 10량 조성 6M4T 방식의 초퍼 및 저항제어 전동차의 경우 편성당 총 48개의 제동 슈가 사용된다.

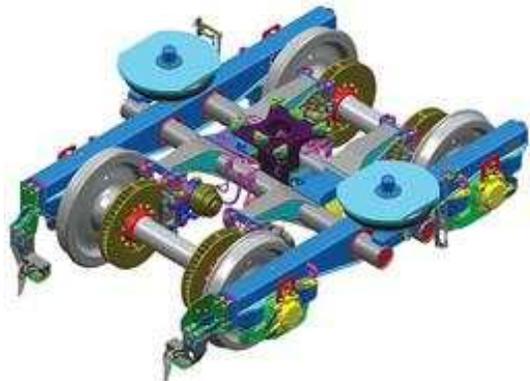


Fig. 4 Bogie of VVVF T(Trailer) Car

Fig.4 와 Fig.5는 각각 VVVF제어 방식 부수 차량(Trailer)의 대차와 디스크제동용 제동 실린더를 나타내며 Fig.6은 VVVF제어 차량 디스크제동용 제동마찰제인 제동 라이닝(Pad)을 보여준다.

디스크 제동은 차륜(Wheel)의 답면(Tread)에 직접 마찰하여 제동작용을 하는 답면 제동과 달리 차륜과 결합된 제동 디스크를 두 개의 라이닝 마찰재가 마주잡아 제동작용을 하는 방식이다.



Fig. 5 Brake Cylinder Assy of VVVF T Car

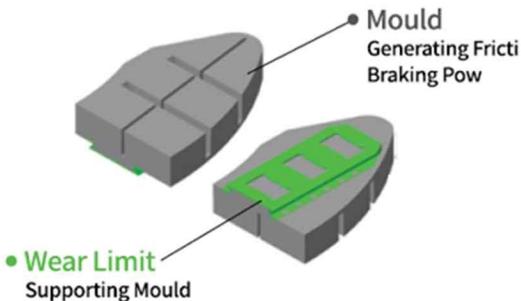


Fig. 6 Brake Lining for Disk Brake

제동 라이닝은 동력이 없는 부수차(T, Tc Car)의 디스크 마찰에 사용하는 마찰재로 저항제어 및 초과제어 전동차의 경우 디스크 좌우에 각 1개씩 설치되어 차축 1축 당 4개, 대차 1대 당 8개, 1량 당 총 16개로 구성된다. 따라서 10량 조성 6M4T 방식의 저항제어 및 초과제어 전동차의 경우 편성 당 64개가 사용된다. VVVF제어 전동차의 경우 상·하 2개 1조의 라이닝이 디스크 좌우에 설치되어 차축 1개 당 4조, 대차 1대 당 8조, 1량 당 총

16조 32개로 구성된다. 따라서 10량 조성 5M5T 방식의 VVVF제어 전동차의 경우 편성 당 총 80조 160개의 라이닝이 사용된다.

2.2 제동마찰재 표준화 개발

도시철도차량용 제동마찰재 개발 및 표준화 연구는 제동성능 향상 및 소음을 저감한 제동마찰재를 표준화하여 타 도시철도 차량에 적용할 수 있는 기반 설계 기술을 보유하기 위함이며 국내 도시철도 운영기관의 요구사항을 반영하여 표준규격 및 현차 시험을 만족하는 표준 제동마찰재 시제품을 개발하고 시험 및 검증을 통해 도시철도 차량에 최적화된 표준규격서(안)을 도출하는 것을 목적으로 한다. 연구의 수행은 연차별로 다음과 같이 진행 된다.

1) 2차 연도

- 기존 제품 벤치마킹 및 운영기관 요구사항 수집, 시장 요구사항 분석을 통한 1차 시작품 사양 설계 및 제작
- 1차 시작품 평가를 통한 설계 목표 달성 검증 및 개선방안 수립
- 제동 시스템 분석, 현장 요구사항 수집 및 분석, 국내외 기술표준 분석, 제동 마찰재 해석 방법론 도출
- 현차 시험을 위한 시험선 선정

2) 3차 연도

- 1차 시작품 평가 결과를 반영한 2차 시작품 개발 및 공인기관 평가를 통한 설계 목표 검증
- 제동시스템 모델 구축 및 평가, 소음발생 원리 및 현차 환경 분석
- 운영기관 실사용 제품 특성 분석 및 현차 시험 준비
- 1차 시작품 개발기술 검토 및 성능평가를 위한 시험인프라 운영계획 수립

3) 4차 연도

- 현차시험을 통한 시제품 개발 및 국내외 확대 적용 사양서 개발
- 현차 시험 및 성능평가 시 발생 문제점 도출
- 개선품을 반영한 해석 진행, 현차 제동 환경 측정

4) 5차 연도

- 시제품의 국내외 인증 추진, 확대 적용 개발품 사양 최적화 및 해외 시험 진행
- 현차 성능평가 및 유지보수 규격서 도출
- 현차 성능평가 프로세스 정립 및 시험 규격서(안) 도출

5) 6차 연도

- 시제품의 국내외 인증 획득, 확대 적용 개발품 사양 최적화, 사업화 검토
- 현차 성능평가 연장 진행
- 현차 성능평가 프로세스 정립 및 시험 규격서(안) 도출 완료

2.3 현차 제동환경 측정

제동마찰재 개발 과정중 하나인 현차 제동 환경 측정은 도시철도차량의 주행 중 제동시스템이 작동되는 환경 및 소음특성을 분석하기 위한 것으로 제동마찰재에 온도 센서를 장착하고, 제동 시 발생 소음의 특성을 분석하기 위해 제동시스템에 가속도계 및 소음계를 설치하여 신호를 계측 및 저장한다.

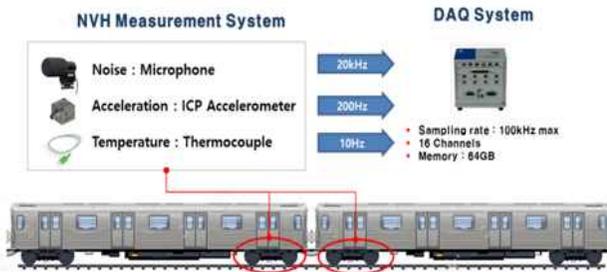


Fig. 7 Measurement Planning for Brake Operation Environment

Table 1. Measurement Sensor and Signal

Measurement	Part	Sensor	Remark
Tread Brake	Shoe	Thermocoupler (2 Channel) Accelerometer (3 Channel)	RH Side
Disk Brake	Pad	Thermocoupler (2 Channel) Accelerometer (3 Channel)	RH Side
Speed	Carbody	Speed (1 Channel)	
Noise	Outer/Inner	Microphone (2 Channel)	

2.4 개발품 성능평가를 위한 현차시험

개발품의 성능평가를 위한 현차시험은 다음과 같이 2차 시작품이 개발되는 3차 연도부터 6차 연도까지 개발과정 및 평가 목적에 따라 순차적으로 진행된다.

- 1) 3차 연도 : 성능평가를 위한 현차 시험 계획 수립 및 2차 시작품의 현차 소량 평가(1축 장착 후 성능평가 시작하여 1량으로 확대)
- 2) 4차 연도 : 개발품 현차시험을 통한 제품 신뢰성 검증 및 개선방향 도출
- 3) 5차 연도 : 현차시험을 통한 내구성 및 안정성, 제품 신뢰성 파악
- 4) 6차 연도 : 제품 신뢰성 검증

3차 연도에 시행하는 소량평가는 개발품의 본질적인 현차 평가를 실시하기에 앞서 개발 방향의 검토 및 현차평가 계획의 사전 확인과 검증을 위한 것으로 기본성능이 KRS에 명시된 제동마찰재 규격(KRS BR 0022-16, KRS BR 0017-15)을 만족하여 차량에 장착하는 것이 문제가 없다고 판단될 때 시험을 시행하며 1축 장착을 시작으로 2축(1대차), 2대차(1량)의 순으로 순차적으로 확대 진행하기로 계획되었다. 소량평가의 평가 항목은 소음, 마모, 내구성 등으로 한다.

2.5 성능평가를 위한 연차별 시험계획 및 시험 인프라 요구사항

제동마찰재 개발품의 효과적인 성능평가를 위해서는 각종자료(설계, 성능시험기준 및 절차서, 제작규격서, 표준규격서, 유지보수 절차서)의 검토를 통해 성능평가 방안을 수립하고 이를 바탕으로 시험인프라 선정, 시험인프라 구축 및 운영계획 수립, 시험인프라 구축, 운영(성능평가), 시험결과 검토 및 분석의 순으로 진행한다.

시험인프라 운영을 통한 개발품 성능평가는 각 차년별 개발목표 및 연구일정에 따라 적합하게 계획되고 수행되어야 하며 각 차년별 성능평가를 위한 세부 수행 내용은 다음과 같다.

1) 3차 연도

- 제동마찰재 시제품 설계자료 검토
- 시험선 인프라 선정
- 시험선 구축 및 운영 시 참여기관별 업무 및 역할 정의
- 시험선 구축 및 운영 계획 수립
- 시험선 차량 유지보수 계획 수립
- 시험선 차량 기술자료 수집 및 검토

2) 4차 연도

- 제동마찰재 2차 시제품 성능시험기준 및 절차서 검토
- 시제품 시험 인프라 구축
- 현차시험 성능평가(1개 편성 중 동력차/부수차 각 1량)
- 시험선 운영 계획에 따른 인프라 운용 및 유지보수
- 시험선 차량 침승 및 시험 결과 검토
- 시험선 차량 운용 및 유지보수 자료 수집, 검토

3) 5차 연도

- 제동마찰재 시제품 제작규격서, 표준규격서, 유지보수절차서 등 검토
- 시험선 운영 계획에 따른 인프라 운용 및 유지보수
- 시험선 차량 침승 및 시험 결과 보고서 작성
- 시험선 차량 운용, 유지보수 자료 수집 및 검토

4) 6차 연도

- 시험선 운영 계획에 따른 인프라 운용 및 유지보수
- 시험 결과 보고서 작성

연차별 현차시험을 위한 차량기지, 차량, 구내 및 본선 시험 노선 등 시험 인프라의 선정을 위해서는 개발 결과물의 성격, 요구 사항, 개발수행 과정상의 여건 등 다음의 사항을 종합적으로 고려해야 한다.

- 1) 개발품의 성능 및 적용성의 정밀하고 효과적인 평가가 가능해야 한다.
- 2) 개발품의 시험 및 평가방법의 특성에 따

라 적합한 차량과 노선이 선정되어야 한다.

- 3) 시험선로 구축과 운영에 따른 비용이 과도하게 발생하지 않아야 한다.
- 4) 성능평가의 효과성과 시험 인프라 운영에 따른 차량기지의 기존 운영기능과의 상충을 최소화해야 한다.

본 제동마찰재 개발품의 시험을 위한 시험 노선 및 차량 등 구체적인 요구사항은 다음과 같다.

- 1) **표준적인 도시철도 차량** : 도시철도차량용 제동마찰재 개발 및 표준화 연구는 국내 도시철도에 사용하는 표준규격 및 현차시험을 만족하는 표준(호환) 마찰재 시제품을 개발하는 것으로 도시철도차량에 적용 시 표준적으로 운영하는 차량이며 미래에도 계속 도입 및 운영할 차량을 대상으로 시험 차량의 선정하는 것이 요구된다.
- 2) **일정한 운행주기** : 제동마찰재 시제품을 운영중인 현차에 적용하여 시험함에 있어 불균일한 운행패턴과 운행시간을 가지는 노선 및 차량보다는 시험의 효과성을 위해 타 노선에 비해 균일하고 일정한 운행주기를 가지는 노선과 차량을 선정하여 현차시험을 시행하는 것이 요구된다.
- 3) **승객량 및 운행횟수가 많은 노선** : 제동마찰재의 현차시험 기간이 정해져 있기 때문에 현차시험의 효과 및 성능의 조기 검증을 위해서는 승객량 및 운행횟수가 많은 노선을 대상으로 인프라를 선정하는 것이 요구된다.
- 4) **역간거리가 비교적 짧고 균일하며 제동취급이 일정한 노선** : 제동마찰재의 성능평가를 위한 성능시험을 효과적으로 실시하기 위해서는 역간거리가 비교적 짧아 차량 운행 시 제동취급이 빈번한 노선이 유리하다 따라서 역간거리가 짧고 빈번한 제동취급과 제동취급이 일정한 노선을 선정하는 것이 요구된다.

상기에서 제시한 제동마찰재 개발품의 시험 노선 요구사항 및 조건을 종합적으로 고려하였을 때 개발품의 성능평가 효율성 및 성능 검증의 효과성을 위해서는 승객량이 타노선에 비해 많고 순환선 특성상 일정한 운행패턴을 가지는 서울교통공사 2호선 노선이 적합하여 2호선을 시험 노선으로 선정하였다.

서울교통공사 2호선의 노선 특성은 다음과 같다.

- 1) **높은 승객 수송량** : 2호선은 2014년 기준 일일평균 수송인원 2,113천명, 연간 수송인원 771,242천명으로 (구)서울메트로 전체 연간수송인원인 1,544,025의 50%를 차지하는 높은 승객수송량을 가지고 있다.
- 2) **순환선 구간** : 2호선은 성수역을 기점으로 60.2km, 50개 정거장(지선포함)의 순환선 구간이다.
- 3) **운행횟수** : 2호선 노선의 일일 열차운행 횟수는 997회로 서울교통공사 노선중 가장 많은 운행 횟수를 가진다.
- 4) **운행차량수** : 2호선 노선을 운행하는 차량의 수는 834량으로 (구)서울메트로 (2014년 기준) 차량수 1954량의 약 43%를 차지한다.

제동마찰재 시제품의 성능 및 적용성을 평가하기 위한 차량은 Fig. 8의 2호선 VVVF 제어방식 도시철도차량(전동차)으로 선정하였다.



Fig. 8 Line2 VVVF control rolling stock

VVVF제어방식의 도시철도차량은 개발되는 제동마찰재의 적용대상 차종이며 현재 시점에서 적용된 도시철도차량(전동차) 제작 기술에서 최신 기술이 적용되고 국내 6개 도시철도 운영기관에서 주력 전동차종으로 운용되고 있다.

2.6 현차시험을 통한 성능평가 계획 수립

개발품의 현차시험을 통한 성능평가는 제동마찰재 2종 개발품이 서울교통공사 표준규격서를 만족하는 것을 확인하기 위한 공인기관 시험을 시작으로 하여 현차평가 요구조건외의 과약, 현차평가 항목의 결정, 현차평가 일정 수립, 구내시운전, 본선시운전, 본선운행의 순으로 다음과 같이 시행한다.

- 1) **공인기관 시험** : 공인기관 시험은 개발품의 현차시험 전 차량에 대한 영향의 안정성을 확인하기 위한 것으로 마찰계수, 온도, 마모량으로 하며 적용규격은 한국철도 표준규격(KRS)를 적용한다.
- 2) **현차평가 항목의 결정** : 현차평가의 항목은 현차시험의 효과성과 실행가능성 그리고 차량운영 기능의 방해가 발생하지 않도록 종합적으로 고려하여 결정한다.
- 3) **현차평가 일정 수립** : 현차평가 일정수립은 현차평가의 목적, 현장 차량 운영 상황, 제약조건 등을 종합적으로 고려하여 결정한다.
- 4) **차량적용 및 기능시험** : 제동마찰재 개발품을 현차에 장착하고 기본적인 기능을 확인하여 차량에 미치는 부정적인 영향 또는 위험 등을 점검한다.
- 5) **구내시운전** : 개발품 적용이후 기지 구내 시험 인프라에서 구내시운전을 적용하여 차량 주행중 발생하는 이상과 기본적인 성능을 확인하고 마찰재와 디스크 또는 차륜과의 인터페이스(마찰면)를 안정화 시킨다.
- 6) **본선시운전** : 시험차량에 승객을 취급하지 않은 상태에서 본선 시운전을 시행하여 본선에서 마찰재의 기본적인 성능을 평가한다.

7) **본선운행** : 개발품이 적용된 차량을 본선에서 정상적인 운영을 함으로써 본격적인 성능과 신뢰성을 파악한다.

제동마찰재의 현차시험을 통한 성능평가를 위한 현차평가 항목은 다음과 같다.

1) 차량적용 및 기능시험

- 외관, 치수, 장착 등 차량 설치에 문제는 없는지 확인한다.
- 기본 제동기능 작용 시 정상적으로 마찰력을 생성하는지 확인한다.
- 제동 완해시 정상적으로 완해가 되는지 등을 확인한다.

2) 구내시운전

- 감속도 : 제동작용시 정상적인 감속도 값을 가지는지 확인한다.
- 발열량 : 제동작용시 열발생이 규정 이내인지 검사한다.
- 정위치 정차 : 승무원의 제동조작에 따라 정위치 정차가 되는지 확인한다.
- 제동패턴 확인 : 승무원의 제동조작에 따라 정상적인 제동패턴을 보이는지 확인한다.

3) 본선시운전

- 감속도 : 제동작용시 정상적인 감속도 값을 가지는지 확인한다.
- 정위치 정차 : 승무원의 제동조작에 따라 정위치 정차가 되는지 확인한다.
- 발열량 : 제동작용시 열발생이 규정 이내인지 검사한다.
- 제동패턴 확인 : 승무원의 제동조작에 따라 정상적인 제동패턴을 보이는지 확인한다.

4) 본선운행

- 외관검사 : 마찰재의 이상마모, 손상, 균열, 파손 등 주기적인 검사로 발견되는 문제점을 검사한다.
- 발열량 : 제동작용시 열발생이 규정 이내인지 검사한다.
- 마모량 : 주기적인 마모량 측정으로 규격에 적합한지를 검사한다.
- 소음 : 본선 주행시 마찰재의 제동작용에 따른 소음을 측정하여 목표 소음치

이내인지를 확인한다.

3. 결론 및 향후 연구과제

도시철도차량용 제동마찰재 개발 및 표준화 연구는 도시철도차량의 운행 환경과 요구사항이 반영된 표준화된 제동마찰재 개발과 시험 및 검증을 통해 최적화된 표준규격서(안)을 도출하는 것을 목표로 수행되고 있다.

본 논문에서는 도시철도 차량용 제동마찰재 개발품의 현차시험을 통한 성능평가 시험에 대하여 연차별 세부 수행내역과 시험인프라 선정 및 운영계획 수립 시 고려사항 및 요구조건에 대하여 논의하였다. 또한 요구사항을 고려하여 시험노선 및 차량을 선정하였다.

본 연구를 통해 도시철도차량에 적용되는 차량용품의 개발에 있어서 현차시험을 통한 개발품 성능평가 계획의 수립, 시험노선 및 차량 선정 등에 시사점을 제시하고자 하였다.

향후에는 본 논문에서 논의한 것과 같이 도시철도차량에 적용되는 개발품의 성능평가에 있어 효과적인 평가가 이루어질 수 있도록 고려 사항과 요구되는 조건의 파악에 대한 보다 세부적인 연구가 지속되어야 할 것이다.

후기

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업 “철도차량 부품호환 및 표준모듈 개발” 연구단 4세부 “도시철도차량용 제동마찰재 개발 및 표준화 연구” 과제에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 광주도시철도공사.(2009). 표준규격서 및 도면 (브레이크 라이닝 및 슈)
- [2] 국토교통부.(2011).도시철도차량의 성능시험에 관한 기준(전문)-국토부고시 (2011-413,11,82 관련)
- [3] 김현철, 김희율 (2009). 철도차량용 제륜자의 자동 검사 시스템. 전자공학회논문지-SP, 46(6), 1-15.

[4] 대구도시철도공사. (2016). 표준규격서(1,2호선 전동차용 브레이크 라이닝 및 슈)

[5] 대전도시철도공사. (2015). 표준규격서(브레이크 라이닝)

[6] 부산교통공사. (2016). 사양 및 표준규격서(브레이크 슈, 라이닝)

[7] 서경수, 김영규, 김홍봉, 박세영, 김계신, 강병훈, & 김인호. (2017). 도시철도차량의 운행 특성에 따른 제동마찰재 유지보수 분석 연구. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 259-266.

[8] 서경수, 김영규, 김홍봉, 박세영, 김영배, 강우철, & 김태인. (2016). 철도차량 내부장치간 무선연계 및 배선절감 기술 성능평가를 위한 시험 인프라 구축과 운영방안의 수립. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 19-25.

[9] 서보성, 이규석, 오현석, & 윤병동. (2015). 철도차량 제동장치의 주요 부품 고장진단을 위한 테스트베드 구축. 한국철도학회 학술발표대회 논문집, 162-165.

[10] 서울도시철도공사. (2015). 표준(잠정)규격서 (브레이크라이닝, 5-8호선)

[11] 서울도시철도공사. (2015). 표준(잠정)규격서 (브레이크슈, 5-8호선)

[12] 서울메트로. (2016). 브레이크라이닝(신형), 슈 표준(잠정)규격서

[13] 이종득. (2007). 철도공학개론. 노해출판사.

[14] 인천교통공사. (2016). 표준규격서(브레이크 라이닝 및 슈)

[15] 한국철도공사. (2016). 표준규격서(브레이크 라이닝 및 슈)

[16] KRS BR 0017-15 전동차용 합성제륜자

[17] KRS BR 0022-16 전동차용 브레이크 라이닝