

도시철도차량의 운행 특성에 따른 제동마찰재 유지보수 분석 연구

Analysis of maintenance frequency for brake friction material by operation characteristics of urban railway rolling stock서경수^{*†}, 김영규^{*}, 김홍봉^{*}, 박세영^{*}, 김계신^{**}, 강병훈^{**}, 김인호^{***}Kyoung-soo Seo^{*†}, Young-gyu Kim^{*}, Hong-bong Kim^{*}, Se-Young Park^{*}Kae-Shin Kim^{**}, Byoung-Hun Kang^{**}, In-Ho Kim^{***}

Abstract In urban railway rolling stock, air braking, which is the basic braking system, is an adhesive brake that obtains the braking force by the adhesion between the wheel and the rail. This is a way to push the braking friction material onto the wheel face in a manner that directly transmits the braking force to the wheel, or pushing the lining against the disk coupled to the axle and wheel. The braking friction material is a part that has a great influence on the driving safety when the rolling stock is running, and the identification of the replacement cycle and the consumption amount is very important for the operation management and maintenance of the rolling stock. In this paper, we analyze the consumption characteristics of braking friction materials and would like to suggest implications for the overall operation of the rolling stock, such as rolling stock operation management, maintenance and maintenance materials management of the urban railway operator.

Keywords : Rolling Stock, Brake, Brake Friction Material, Maintenance, Operation Characteristics,

초 록 도시철도차량에서 기초 제동시스템인 공기제동은 차륜과 레일의 점착력으로 제동력을 얻는 점착 브레이크이다. 이는 차륜에 제동력을 직접 전달하는 방식으로 제동 마찰재를 차륜 답면에 밀어 붙이는 방식과 차축이나 차륜에 결합된 디스크에 라이닝을 밀어 붙이는 방식이 있다. 제동 마찰재는 차량 운행시 주행 안전성에 큰 영향을 미치는 부품으로 교환주기 및 소모량의 파악은 차량의 운행관리 및 유지보수 운영에 있어 매우 중요하다. 본 논문에서는 도시철도차량에서 사용되는 제동 슈와 라이닝 등 제동마찰재의 차량 종류에 따른 소모량 특성을 분석하여 도시철도 운영기관의 차량 운행관리, 유지보수 및 유지보수 자재관리 등 차량운영 전반에 대한 시사점을 제시하고자 한다.

주요어 : 도시철도차량, 제동, 제동마찰재, 유지보수, 운행특성

1. 서 론

제동마찰재는 차량의 속도를 감속하거나 정지하고자 하는 목적으로 승무원의 제동조작 또는 차량의 제어신호에 의해 발생된 제동지령을 제동시스템에 의해 공기압력으로 변환하여 기계적 메커니즘에 의해 제동마찰재로 전달되어 최종적으로 차륜 및 차륜과 결합된 제동

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

* 서울메트로 도시철도연구원

** 서울메트로 신정차량사업소

*** 서울메트로 운영본부 차량정비처

디스크와 마찰하여 제동효과를 일으키는 역할을 한다. 제동마찰재는 차량의 감속과 정지에 관련되어 전동차의 운행시 주행안전성에 큰 영향을 미치는 부품으로서 각 도시철도 운영기관에서는 차량의 원활한 운영 및 목표 가용도를 유지하기 위해 적정 재고 수량을 상시 보유해야 하고 차량 운영 관리의 효율화 및 최적화된 운영을 위해서는 제동마찰재와 같은 주요 부품의 적정 보유수량을 파악하고 이를 유지해야 한다. 도시철도 운영기관에서 사용되는 제동마찰재는 운영기관 재고보유 상황에 따라 필요시 발주가 이루어져 수요가 불규칙하고 불확실하다는 특징을 가지고 있다. 운영사 입장에서는 제품구매에 리드타임이 길고 납품된 제품의 품질문제가 발생시 공급선 변경의 어려움과 시간지연에 따른 재고부족 문제로 차량 운영에 지장을 초래할 수 있으며 제조업체는 사전 수요예측에 의한 생산과 납기 조율이 어려워 생산효율을 높이는 것과 제품의 공급사슬관리가 쉽지 않다. 따라서 제동마찰재와 같은 주요 부품의 유지보수 수량 즉 수요를 추정하는 것은 운영기관 뿐만 아니라 제조업체에게도 반드시 필요하다. 차량운행에 있어 제동마찰재의 소모에 따른 수요에 영향을 줄 수 있다고 예측할 수 있는 요소로는 차량의 운행에 따른 주행거리, 차량의 제어방식에 따른 제동 특성, 혼잡도에 따른 승객부하, 역간거리와 같은 노선의 특성 등을 들 수 있다.

본 논문에서는 이와 같이 주행거리 및 차량의 종류에 따른 제동마찰재 사용량 특성을 서울메트로가 운영하는 1~4호선의 유지보수 자료를 이용하여 실증적으로 분석하여 제시한다. 이를 통해 운영기관의 유지보수 자재 수요예측, 공급사슬관리, 적정재고량 산정, 차량 운행 관리 등 유지보수 운영전략 수립 및 차량운영관리 전반에 대한 시사점을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구의 분석에 사용된 자료는 서울메트로 5개 차량기지의 2008년 1월 부터 2016년 12월 까지 9년 간의 제동마찰재 유지보수 및 운영관련 자료를 사용하였다. 분석방법은 종속변수인 제동 슈와 라이닝 사용량과 독립변수인 연간평균주행거리 및 차량 종류에 따른 인과관계를 파악하기 위해 회귀분석을 사용하였으며 차량 종류는 범주형 자료(Category Data)로 명목척도(Nominal Scale)이기 때문에 더미변수를 만들어 더미회귀분석(Regression with Dummy variable)을 하였다. 분석에 사용된 도구는 통계용 소프트웨어인 IBM SPSS Version 21을 사용하였다,

3. 분석결과

3.1 상관분석

각 변수 제동슈와 라이닝 연간평균사용량 및 연간평균주행거리와의 상관관계를 파악하기 위해 Pearson 상관계수를 분석하였다. 전체차량에 대한 연간평균주행거리, 슈 연간평균사용량, 라이닝연간평균사용량 상관분석결과는 Table.1에 제시되었으며 분석결과 제동 슈와 라

이닝의 연간평균사용량 상관계수만이 통계적으로 유의한 것으로 나타났다(P<0.01)

Table. 1 Correlations for All type of Seoulmetro Rolling stock

		연간평균주행거리	슈연간평균사용량	라이닝연간평균사용량
연간평균 주행거리	Pearson Correlation	1		
	Sig. (2-tailed)			
	N	216		
슈연간평균 사용량	Pearson Correlation	-.109	1	
	Sig. (2-tailed)	.109		
	N	216	216	
라이닝 연간평균 사용량	Pearson Correlation	-.089	.567**	1
	Sig. (2-tailed)	.196	.000	
	N	215	215	215

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Table. 2 Correlations for Chopper Control Rolling stock

		연간평균주행거리	슈연간평균사용량	라이닝연간평균사용량
연간평균 주행거리	Pearson Correlation	1		
	Sig. (2-tailed)			
	N	60		
슈연간평균 사용량	Pearson Correlation	.907**	1	
	Sig. (2-tailed)	.000		
	N	60	60	
라이닝 연간평균 사용량	Pearson Correlation	.949**	.849**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	
	N	60	60	60

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

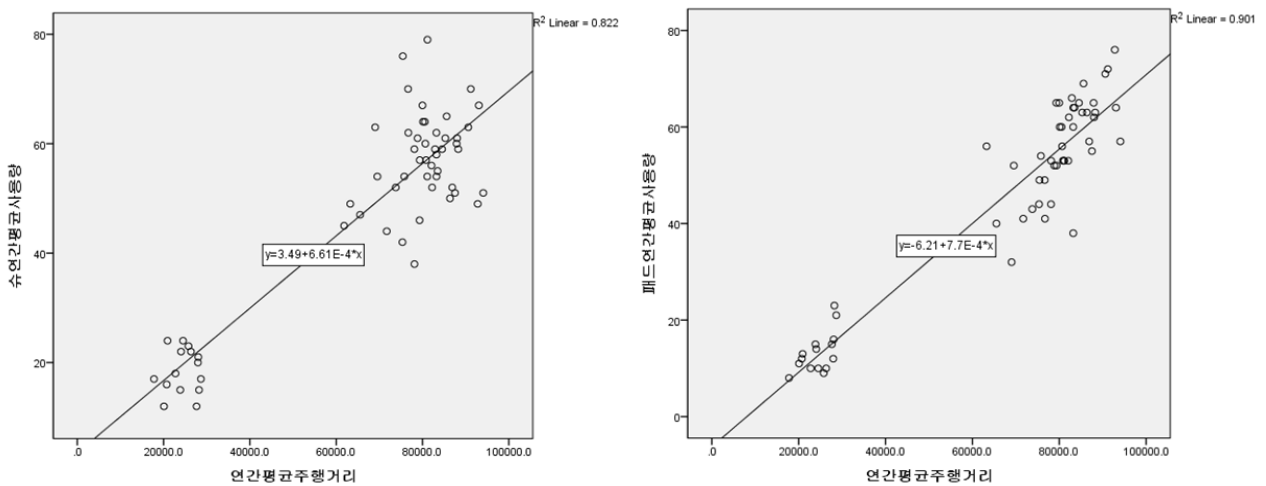


Fig. 1 Scatter plot for chopper control rolling stock with shoe, lining and driven distance

Table. 3 Correlations for VVVF Control Rolling stock

		연간평균주행거리	슈연간평균사용량	라이닝연간평균사용량
연간평균 주행거리	Pearson Correlation	1		
	Sig. (2-tailed)			
	N	145		
슈연간평균 사용량	Pearson Correlation	.513**	1	
	Sig. (2-tailed)	.000		
	N	145	145	
라이닝 연간평균 사용량	Pearson Correlation	.165*	-.216**	1
	Sig. (2-tailed)	.048	.009	
	N	145	145	145

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

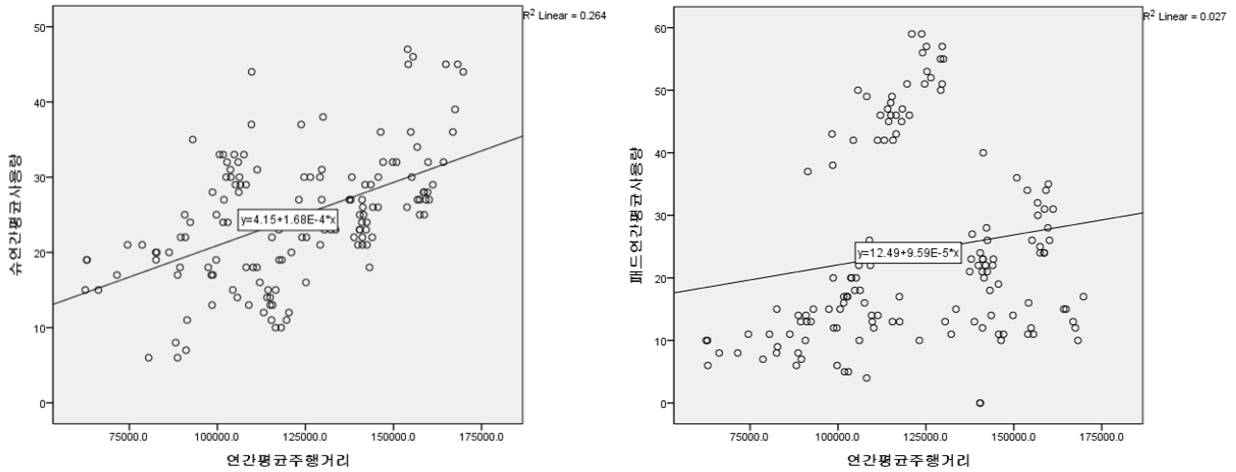


Fig. 2 Scatter plot for VVVF control rolling stock with shoe, lining and driven distance

3.2 회귀분석

차량 종류별 회귀분석 결과는 Table.4, 5와 같다. 차량종류 명칭은 범주형 데이터로 명목 척도이기 때문에 일반적인 회귀분석으로는 분석이 불가능하여 마찰재 교환량이 비교적 적은 VVVF 차량을 기준으로 초과 차량과 CAM(저항제어) 차량을 Dummy 변수로 하여 기준인 VVVF 차량과 비교 분석하였다.

식(1)은 종속변수인 제동 슈 사용량에 대한 각 독립변수인 주행거리 및 차량 종류에 따른 영향력을 추정하는 회귀모형이며 Table.4는 식(1)의 회귀모형을 사용하여 제동 슈의 교환에 영향을 주는 각 차종별 계수를 추정된 결과이다.

$$QOBSE = \alpha + \beta_1 DOD + \beta_2 TOTC_{CHOPPER} + \beta_3 TOTC_{CAM} + \epsilon \quad (1)$$

QOBSE : Quantity of Brake Shoe Exchange

DOD : Distance of Driven

TOTC : Type of Train Control

Table. 4 Coefficients estimate result for brake shoe with CHOPPER and CAM rolling stock by VVVF

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	
	B	Std. Error	Beta			
(Constant)	-8.561	3.267		-2.621	.009	
1	연간평균주행거리	.000	.000	.606	10.474	.000
	d_제어CHOPPER	37.997	2.094	1.062	18.149	.000
	d_제어CAM	2.022	3.150	.028	.642	.522

a. Dependent Variable: 슈연간평균사용량

R² = .619 Adj.R² = .614 F = 114.772

분석결과 독립변수의 설명력은 61.9%로 나타났으며, 본 회귀모형은 통계적으로 유의한 것으로 파악되었다(F=114.772, P<0.01) 독립변수중 연간평균주행거리 및 초과제어 차량의 추정계수는 통계적으로 유의한 것으로 나타났으나(P<0.01) CAM(저항제어) 차량의 경우 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다.

초과제어 차량의 경우 VVVF 차량에 비해 연간 37.997개의 제동 슈를 더 교환하는 것으로 추정할 수 있다. 연간평균주행거리의 제동 슈 교환에 대한 영향은 유의수준 1%에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났으나 비표준화 계수가 0 으로 나타나 표준화 계수로 순위를 파악할 경우 초과 차량의 계수보다 영향력이 떨어지는 것(0.606대 1.062)으로 분석되었다.

제동 라이닝 교환량에 대한 주행거리와 각 차량 종류의 영향을 분석하는 회귀모형은 다음의 식(2)와 같으며 Table.5는 식(2)의 회귀모형을 사용하여 제동 라이닝의 교환에 영향을 주는 각 차종별 계수를 추정한 결과이다.

$$QOBLE = \alpha + \beta_1 DOD + \beta_2 TOTC_{CHOPPER} + \beta_3 TOTC_{CAM} + \epsilon \quad (2)$$

QOBLE : Quantity of Brake Lining Exchange

DOD : Distance of Driven

TOTC : Type of Train Control

Table. 5 Coefficients estimate result for brake lining with CHOPPER and CAM rolling stock by VVVF

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	
	B	Std. Error	Beta			
(Constant)	-7.192	5.112		-1.407	.161	
1	연간평균주행거리	.000	.000	.475	6.330	.000
	d_제어CHOPPER	35.179	3.251	.818	10.820	.000
	d_제어CAM	-4.569	5.046	-.050	-.905	.366

a. Dependent Variable: 라이닝연간평균사용량

R² = .374 Adj.R² = .365 F = 42.055

분석결과 독립변수들의 설명력은 37.4%로 나타났으며, 본 회귀모형은 통계적으로 유의한 것으로 파악되었다(F=42.055, P<0.01) 독립변수 중 연간평균주행거리 및 초과제어 차량의 추정계수는 통계적으로 유의한 것으로 나타났으나(P<0.01) CAM(저항제어) 차량의 경우 유의하지 않은 것으로 분석되었다. 초과제어 차량의 경우 VVVF 차량에 비해 연간 35.179개의 라이닝을 더 교환하는 것으로 추정할 수 있다. 연간평균주행거리의 제동 라이닝 교환에 대한 영향은 유의수준 1%에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났으나 비표준화 계수가 0으로 나타나 표준화 계수로 순위를 파악할 경우 초과제어 차량의 추정계수보다 영향력이 떨어지는 것(0.475대 0.818)으로 분석되었다.

5. 결론

본 논문은 서울메트로에서 운영중인 도시철도차량의 제어방식에 따른 제동마찰재 유지보수 특성을 분석하기 위해 제동 슈와 라이닝 사용량 자료를 바탕으로 실증적으로 분석하였다.

전체 서울메트로 대상으로 상관계수 분석결과 제동 슈와 라이닝의 상관계수만 유의한 양(+)의 상관이 있는 것으로 나타났다. 차종별 상관계수 분석결과 구형의 초과제어 차량의 경우 주행거리, 제동 슈와 라이닝의 사용량에서 강한 양의 상관관계가 나타났는데 이는 초과 차량의 제동 시스템 특성상 공기제동의 사용이 VVVF 차량에 비해 많기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

차량의 종류에 따른 제동마찰재 사용량 추정을 위한 Dummy 회귀분석에 있어서는 VVVF, 초과, CAM(저항제어)의 3개 종류 차량 중 제동마찰재 소모량이 가장 적은 VVVF 차량을 기준으로 하여 나머지 초과와 CAM 차량을 더미변수로 만들어 분석하였다. 분석결과 제동 슈와 제동 라이닝 모두에서 CHOPPER 차량이 유의한 영향이 있는 것으로 나타났으나 CAM 차량은 두 가지 모두의 분석에서 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 VVVF 전동차가 기존의 초과 차량에 비해 제동마찰재 소모량이 상대적으로

낮다는 것과 또한 초과 차량의 경우 제동마찰재 소모량과 연간평균주행거리가 강한 양(+)의 상관관계를 가진다는 것을 알 수 있었는데 이는 구형 차량들이 신형 VVVF 차량에 비해 공기제동을 유의하게 많이 사용한다는 증거가 될 수 있다. 따라서 구형 차량과 VVVF 차량의 운영에 있어 공기제동관련 유지보수 발생량, 운영비용, 공기제동 사용에 따른 소음과 분진 발생 등에 차이가 있다는 것을 시사한다.

본 연구의 기여점은 첫 번째, 국내도시철도 운영기관의 유지보수 데이터를 바탕으로 차량의 종류에 따라 제동마찰재의 사용량에 유의한 차이가 있다는 것을 실증적으로 보여주었다는 점과 두 번째, 이러한 분석결과를 바탕으로 도시철도 차량운영에 있어 비용발생 구조, 대 승객 서비스품질 관리, 운영 효율화를 위한 유지보수 정책 수립에 있어 도움이 될 수 있다는 것과 세 번째, 차량의 종류에 따라 제동마찰재의 소요량을 산출할 수 있는 모형을 실증적 분석을 통해 제시하였다는 점을 들 수 있다.

본 연구의 한계점은 분석에 사용한 데이터의 특성상 보다 세밀한 운행조건에 따른 제동마찰재의 유지보수 특성을 분석하지 못하였다는 것이다. 따라서 향후 연구과제로는 운행노선의 승객 부하량, 차량의 주행패턴, ATO 자동운전과 수동운전에 등에 따른 제동마찰재의 소모 특성 등을 분석하여 보다 정밀한 예측모형을 만드는 것이다. 또한 차량 운영비용 함수의 도출, 중요 유지보수 자재의 수요예측 모형 수립 및 공급사슬 관리, 차량 유지보수 운영 정책 수립 등의 의사결정을 위해 도시철도 차량 주요 부품에 대한 유지보수 특성의 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업 “철도차량 부품호환 및 표준모듈 개발” 연구단 과제인 4세부 “도시철도차량용 제동마찰재 개발 및 표준화 연구”의 수행 및 연구비 지원에 의해 작성 되었습니다.

참고문헌

- [4] 박근영, 한현수 (2015), “공급사슬 관점에서 기업 위험의 계량적 추정” *Journal of Information Technology Applications & Management*, 22(2), pp.201-217.
- [5] 박상규, 오정현 (2004), “신제품 수요예측을 위하여 누적자료를 활용한 회귀모형에 관한 연구”, *한국데이터정보과학회지*, 제20권 제1호, pp.117-124.
- [8] 서울메트로 차량분야정보화시스템 RIMS(Rollingstock Information Maintenance System)
- [9] 서울메트로 (2007), “서울메트로 2호선 전동차 VVVF(280량) 주요부품명칭도감”, 서울메트로
- [11] 이근희 (2010), “연구방법론의 이해”, 북넷
- [12] 이정동, 오동현 (2012), “효율성분석이론,” (주)지필미디어.
- [13] 이훈영 (2008), “연구조사방법론” 도서출판 청람
- [14] 한국철도공사, 서울메트로, 한국철도기술연구원, 광운대학교 (2013), “철도운영 및

- 유지보수 효율화 기술개발 기획 최종 보고서” , 국토교통부 국토교통과학기술진흥원
- [15] 하헌구, 이경미 (2002), “우리나라 철도산업의 비용 특성에 관한 연구” , 교통개발연구원
- [15] 홍용기 (2011), “철도차량 시스템 기술” , 도서출판 프린트 하우스
- [17] Alexander, G. Joris, K. Frits, S. (2006), “Modeling and solving the periodic maintenance problem” , European Journal of Operational Research 172, pp.783-797.
- [18] Anily, S., Glass, C.A., Hassin, R. (1999), “Scheduling of maintenance services to three machines” , Annals of Operations Research, 86, pp.375-391.
- [19] Cantos, P. (2001), “Vertical relationships for the European railway industry” , Transport Policy, 8, pp.77-83.
- [20] Cantos, P. and Maudos, J. (2001), “Regulation and efficiency: the case of European railways” , Transportation Research Part A, 35, pp.459-472.
- [21] Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. and Simchi-Levi, E. (2007), “Designing and Managing the Supply Chain” , McGraw-Hill Co, Inc.
- [22] Slack, N., M. Lewis (2015), “Operations Strategy: Fourth Edition,” Pearson, Harlow United Kingdom, Pearson Education Limited
- [23] Thomas, Ahrén., Aditya., Parida (2009), “Maintenance performance indicators (MPIs) for benchmarking the railway infrastructure a case study” , Benchmarking: An International Journal, Vol. 16 Iss 2, pp.247-258.