

도시철도 차량의 차륜담면-제륜자간 제동 마찰열에 관한 연구

Study on the frictional heat between wheel tread and brake shoe of EMU

윤천주* 김성결** 구병춘***
Yoon, Cheon-Joo Kim, Seong-Keol Goo, Byeong-Choon

ABSTRACT

Frictional heat generates when the brake shoes are in contact with wheel tread under high pressure for EMU's speed control, stopping, and deceleration. Such a frictional heat has a significant effect on the wheel tread. In order to analyze the characteristics of frictional heat and measure the amount of the generated heat, tests by using a brake dynamometer and for running vehicles are carried out. In addition, finite element analysis is performed to simulate the temperature distribution and thermal analysis of the brake shoes. Through the tests and the simulations, it is found that the problems by temperature increase at tread braking are verified.

1. 서론

도시철도 차량의 제동시스템에는 전기제동(회생제동)과 공기제동(담면제동, 디스크제동)이 있으며, 차량의 속도제어(정지 및 감속)를 위하여 전기제동과 공기제동을 혼합하여 사용하고 있다. 부수차량에는 디스크제동이 사용되고 구동차량에는 담면제동과 회생제동을 혼합하여 사용하고 있다. 구동차량의 담면제동은 차륜담면에 높은 압력으로 제륜자를 접촉시킴에 따라 차량의 운동에너지를 마찰에 의해 열에너지로 전환시켜 정지 시키고 있으며, 이에 따른 제동 마찰열은 제륜자와 차륜의 온도를 급격히 상승시켜 차륜 및 제륜자의 수명과 제동 성능에 영향을 미치고 있다.

차륜담면은 제륜자와 차륜의 마찰에 의해 반복적인 열 하중을 받게 되며, 반복적인 열하중과 기계적인 하중에 의해 표면균열이 발생한다.^[1] 이러한 반복적인 열하중의 영향으로 차륜 표면손상을 가속시켜 삭정주기나 교환주기가 빨리 도래되어 유지보수 비용 증가의 요인이 되고 있다. 차륜담면 손상(박리) 정도를 제륜자 제조사(A사, B사)별로 조사한 결과, B사 제륜자를 장착하여 운행한 차량의 차륜 손상비율이 18.1% 더 많은 것으로 나타남에 따라 여러 가지 차륜손상 요인 중 제동 마찰열에 의한 영향을 고찰해 볼 필요가 있다.

본 연구는 도시철도 차량의 차륜담면과 제륜자간의 마찰열 발생정도와 경향을 파악하기 위하여 제륜자 2개사(A사, B사) 제품을 대상으로 CAE 프로그램인 ANSYS를 이용하여 제륜자의 열전달 해석을 수행한다. 그리고 실물 다이내모미터 제동시험을 통해 제륜자와 차륜 온도를 측정하고, 실차 시험을 실시하여 운행차량 제륜자의 온도를 측정한다. 그 결과를 도시철도 차량의 담면제동시 온도상승에 의해 생기는 여러 현상들을 정확하게 파악하여 제륜자를 개발 및 설계하는데 필요한 기초적 자료로 제공하고자 한다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원생, 정회원

** 서울산업대학교 교수, 비회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

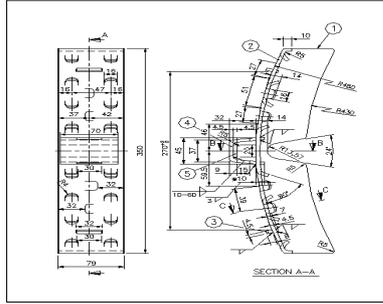


그림 1. 제륜자 도면



사진 1. 차륜담면 손상(박리)

2. 제륜자 열전달 해석

제륜자의 열전달 해석은 ANSYS의 Thermal 3D Solid 요소인 Solid 90을 사용하였으며 실물 제동열 발생조건을 고려하여 경계조건과 물성치(열전달계수, 비열, 밀도)를 입력한 후, 열전달 해석을 수행하였다. 해석에 필요한 제륜자 물성치는 표1과 같다.

표 1. 제륜자 물성치

물성치	제조사		B사	
	마찰재	백스틸	마찰재	백스틸
열전달계수, (W/mK)	7.5	17.4	7.5	17.4
비열 (J/kgK)	1,040	460	1,040	460
밀도 (kg/m^3)	1,940	7,800	2,010	7,800
탄성계수 (kg/m^2)	3.0×10^7	2.14×10^{10}	5.76×10^7	2.14×10^{10}
선팽창계수 ($10^{-6}/K$)	4.0	11.0	4.6	11.0
압축강도 (N/mm^2)	42.33	-	101	-

2.1 열전달 해석조건

속도 60, 80, 100km/h에서 압부력 33kN과 43kN일 때 40초 동안 시간변화에 따른 해석을 실시하였으며, 대류 열전달계수의 영향을 알아보기 위하여 대류 열전달계수 8, 50, 100W/m²K로 변경하면서 각각 해석을 수행하였다. 제동시 운동에너지 90%가 열에너지로 전환한다고 가정하였고 발생한 열은 식(2.1)에 의해 25%가 제륜자로 전달된다고 결정하였다.^[2] 제륜자 쪽으로 전달되는 열속은 식(2.2)에 의해 구하였다.^[3]

$$\gamma = \frac{q_p}{q_p + q_w} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_w c_w k_w}{\rho_p c_p k_p} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.1)$$

$$q = \frac{F_b \cdot f \cdot (rt + v_0)}{\pi DB} \times \frac{25}{100} \times 0.9 \quad (2.2)$$

2.2 열전달 해석결과

속도 60km/h, 압부력 33kN, 초기온도 60°C일 때 3가지 대류 열전달계수 8, 50, 100W/m²K를 적용하여 해석한 결과 최고온도가 각각 138.2, 138.3, 138.3°C로 그 차이가 없어 본 해석에서는 50W/m²K의 강제대류 조건을 적용하였다.

제륜자 열전달 해석 결과는 표2와 같이 압부력 43kN일 때 마찰면의 최고온도가 A사 제품은 290.0°C, B사 제품은 289.6°C로 차이가 거의 없었으며, 온도분포 경향도 그림2와 3과 같이 유사한 것으로 나타났다. 그림4와 5는 속도 100km/h, 압부력 43kN에서 마찰표면과 마찰표면으로부터 깊이 2.4, 10.4mm 위치의 시간에 따른 온도변화를 나타내며 깊이에 따라 온도차이가 많은 것으로 나타났다.

표 2. 제륜자 열전달 해석 결과(최고온도)

제조사	기준속도	압부력	초기온도	최고온도(°C)		
				마찰면	마찰면에서 깊이 2.4mm 온도(node 23317)	마찰면에서 깊이 10.4mm 온도(node 11262)
A사	80km/h	33kN	100°C	218.0	183.5	138.4
	80km/h	43kN	100°C	238.6	193.4	139.8
	100km/h	43kN	100°C	290.0	233.4	161.1
B사	80km/h	33kN	100°C	217.8	175.0	137.8
	80km/h	43kN	100°C	238.0	192.4	138.9
	100km/h	43kN	100°C	289.6	232.2	159.8

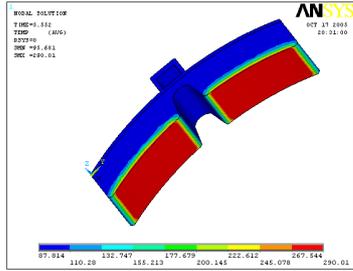


그림 2. 온도분포(A사,100km/h,43kN,100°C)

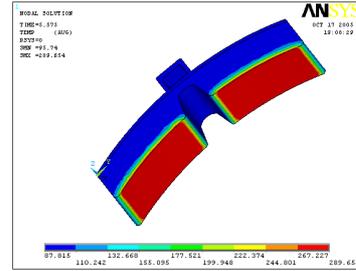


그림 3. 온도분포(B사,100km/h,43kN,100°C)

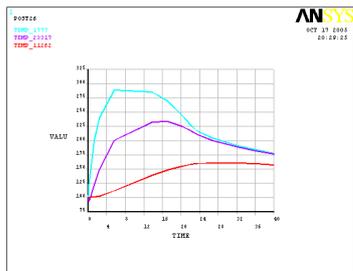


그림 4. 온도그래프(A사,100km/h,43kN,100°C)

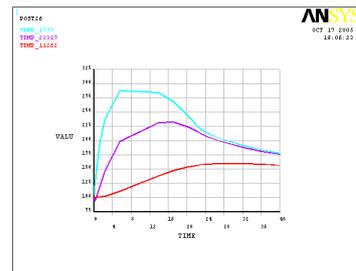


그림 5. 온도그래프(B사,100km/h,43kN,100°C)

3. 다이내모미터를 이용한 제동시험

제륜자와 차륜의 온도를 측정하기 위하여 다이내모미터를 이용한 제동시험을 실시하였다. 시험 방법은 서울시도시철도공사 제륜자 표준규격서의 시험기준에 의해 실시하였으며, 시험장비인 제동 다이내모미터와 이 장비에 설치된 제륜자와 차륜 사진은 아래와 같다.



사진 2. 제동 다이내모미터



사진 3. 차륜과 제륜자(열전대)

3.1 제동시험 조건

초기온도 60°C와 100°C에서 압부력 33kN(최대 상용제동력의 100%), 43kN(최대 비상제동력), 제동 초기속도 40, 60, 80, 100km/h를 조합하여 실시하였다. 제륜자가 차륜담면과 균일하게 접촉하기 위하여 갈아맞춤(Bedding)을 하여 80%이상 접촉되도록 예비시험을 하였고 제륜자는 마찰표면에서 깊이 1mm, 차륜은 담면에서 깊이 10mm 위치에 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다.^[4]

3.2 제동시험 결과

제륜자 최고온도는 그림6, 7과 같이 기준 속도와 압부력 증가에 따라 온도가 상승하는 경향을 보여주고 있으며, 초기온도 100℃, 압부력 43kN, 속도 100km/h일 때 제륜자 최고온도는 A사가 265℃이며, B사가 267.5℃로 거의 동일한 것으로 확인되었다. 차륜 최고온도는 그림8, 9와 같이 A사 제륜자를 장착하여 시험한 차륜이 237℃, B사는 220℃로 A사 제륜자를 장착한 차륜 온도가 17℃ 더 높은 것으로 나타났다. 그리고 2개 제품 모두 최고온도가 시험기준인 400℃이하를 만족하고 있다. 제동시험 온도그래프는 그림10, 11과 같다. 제륜자와 차륜의 최고온도를 비교해 보면 A사 제품은 차륜보다 제륜자가 28℃ 더 높았으며, B사 제품도 제륜자가 47.5℃ 더 높아, 최고온도는 차륜보다 제륜자가 더 높은 것으로 나타났다.

평균마찰계수는 표3, 4와 같이 A사 제품은 전체적으로 기준(0.25±0.03)을 만족하고 있으며, B사 제품은 속도가 증가 할수록 평균마찰계수가 낮아지는 것으로 나타났다.

제륜자와 차륜간의 온도분담 측면에서 보면, 제륜자 최고온도는 2개 제품이 거의 차이가 없으나 차륜 온도는 B사 제품이 17℃ 더 낮은 것으로 볼 때, B사 제품이 적정한 마찰력이 확보된 상태라면 제동 마찰열을 차륜보다는 제륜자 쪽에서 더 부담하고 있어 온도분담 측면에서는 B사 제륜자가 유리하다고 할 수 있다. 그리고 B사 제륜자는 속도와 온도의 증가에 따라 마찰계수가 낮아지는 경향이 있어 마찰계수를 상승시켜야 할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

다이내모미터 제동시험 결과와 제륜자 열전달 해석결과를 비교해 보면, 최고온도는 A사 제륜자의 경우, 열전달 해석에서는 마찰표면에서 깊이 2.4mm까지 233.4~290℃이며, 다이내모미터 제동시험에서는 마찰표면에서 1mm의 온도가 265℃로 나타나 2가지 결과가 일치함을 보여주며, 시간변화에 따른 온도변화도 2가지 결과가 유사한 경향을 보여주고 있다.

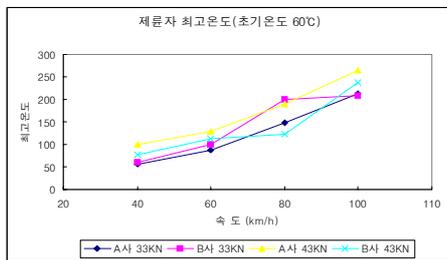


그림 6. 제륜자 최고온도(초기온도 60℃)

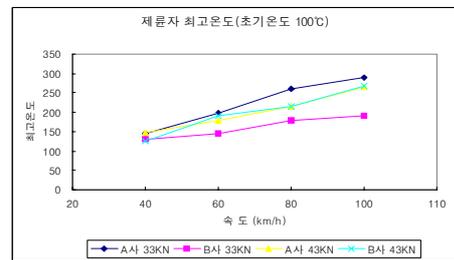


그림 7. 제륜자 최고온도(초기온도 100℃)

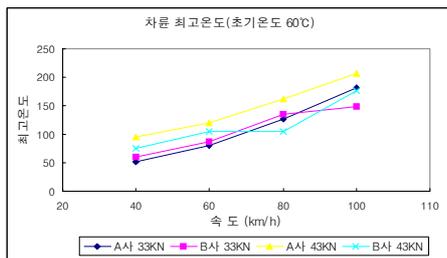


그림 8. 차륜 최고온도(33kN, 60℃)

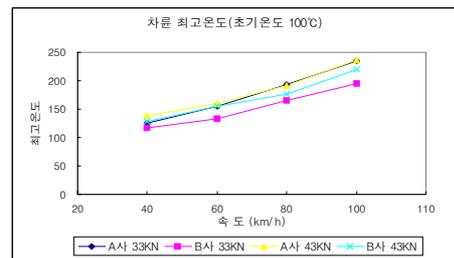


그림 9. 차륜 최고온도(43kN, 100℃)

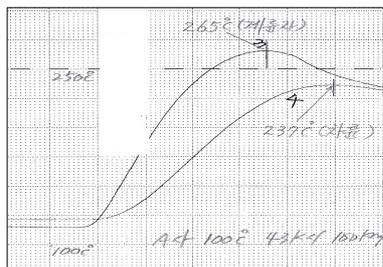


그림 10. 온도그래프(A사, 43kN, 100℃)

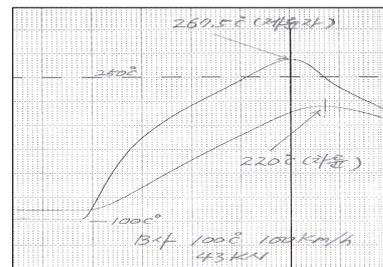


그림 11. 온도 그래프(A사, 43kN, 100℃)

표 3. 평균 마찰계수(초기온도 60℃)

시험조건		평균 마찰계수	
압부력	기준속도	A사	B사
33kN	40km/h	0.252	0.227
	60km/h	0.261	0.206
	80km/h	0.262	0.124
	100km/h	0.284	0.108
43kN	40km/h	0.255	0.234
	60km/h	0.280	0.177
	80km/h	0.280	0.146
	100km/h	0.276	0.102

표 4. 평균 마찰계수(초기온도 100℃)

시험조건		평균 마찰계수	
압부력	기준속도	A사	B사
33kN	40km/h	0.262	0.190
	60km/h	0.278	0.157
	80km/h	0.281	0.131
	100km/h	0.252	0.127
43kN	40km/h	0.256	0.231
	60km/h	0.277	0.186
	80km/h	0.282	0.141
	100km/h	0.273	0.115

4. 실차 온도측정 시험

4.1 실차 표면온도 측정

운행 차량의 제륵자와 차륵의 표면온도 측정을 위하여 제륵자와 차륵에 각각 온도테이프 2종류 (A형:40~71℃, B형:77~127℃)를 부착한 후 운행하여 4차('05.6.29~'05.7.26)에 걸쳐 확인하였다. 표면 최고온도 확인결과는 그림12, 13과 같이 제륵자는 2개 제품 모두 77℃로 온도가 같았고, 차륵은 A사 121℃, B사 93℃로 A사 제륵자를 장착한 차륵이 28℃ 더 높은 것으로 확인되었다. 온도테이프는 사진4와 같다.

표면온도 측정결과 제륵자 최고온도는 2개의 온도가 같았고, 차륵은 A사가 더 높은 것으로 확인되어 다이내모미터 제동시험의 시험결과와 유사한 경향을 보여준다. 제륵자와 차륵의 최고온도를 비교해 보면, A사 제품은 제륵자보다 차륵 온도가 44℃ 높았고, B사의 경우도 차륵 온도가 16℃ 더 높아, 제륵자보다 차륵 온도가 더 높은 것으로 나타났다. 한편 다이내모미터 시험에서는 차륵보다 제륵자 온도가 더 높게 나타났다. 이런 현상의 원인으로서는 다이내모미터 제동시험에서는 제륵자와 차륵간에 마찰력만 작용하고 있으나, 실차 표면온도 측정에서는 제륵자와 차륵간의 마찰력과 레일과 차륵간의 접촉력이 함께 작용하여 차륵의 온도가 높은 것으로 생각된다.

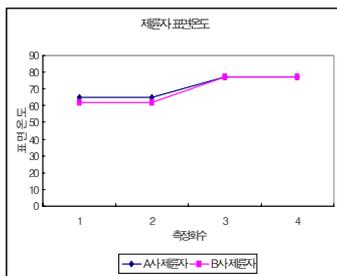


그림 12. 제륵자 표면온도

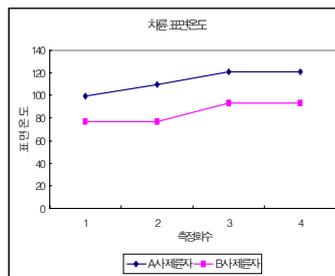


그림 13. 차륵 표면온도



사진 4. 온도테이프

4.2 실차 제륵자 온도측정

제륵자에 온도센서를 마찰면에서 깊이 3~10mm위치에 4개를 설치하여, 서울시 지하철 6호선 21개역(총 2왕복)에서 온도를 측정 하였다. 운전방법은 자동운전이며 공차상태에서 측정하였으며, 또한 온도테이프를 부착하여 차륵과 제륵자의 표면온도도 함께 확인하였다.

온도센서에서 측정된 제륵자 최고온도는 표5과 같이 A사 79℃, B사 68.9℃이며, 온도테이프로 확인된 제륵자 표면온도는 A사 77℃, B사 65℃로 A사 제륵자의 온도가 각각 10.1, 12℃ 더 높게 나타났고, 차륵 표면온도는 A사 99℃, B사 77℃로 A사 제륵자를 장착한 차륵에서 22℃ 더 높게 나타났다. 또한 제륵자와 차륵 간에 온도를 비교해보면, 제륵자보다 차륵온도가 A사 17℃ B사 12℃ 더 높은 것으로 확인되었다. 이런 결과들은 다이내모미터 제동시험의 결과와 실차 표면온도 측정 결과들과 경향이 일치함을 알 수 있다.

그리고, 2개 제품의 역별 온도상승 분포가 그림14와 15와 같이 유사한 경향을 나타내고 있으며, 다이나모미터 제동시험에서는 온도가 많이 상승하였으나 실차 시험에서는 상승하지 않은 이유로는 구동차량 제동시 전기제동과 공기제동을 혼합하여 사용하고 있어 답면제동 부담률이 적고, 공차상태에서 1왕복만 시험 운행함에 따라 온도가 많이 상승하지 않은 것으로 판단된다.

표 5. 실차 제륜자 온도

구 분		최고온도		
		센서온도		표면온도
A사	제륜자	청구→신당	79℃	77℃
	차 륜	-	-	99℃
B사	제륜자	청구→신당	68.9℃	65℃
	차 륜	-	-	77℃



사진 5. 제륜자에 온도센서 설치

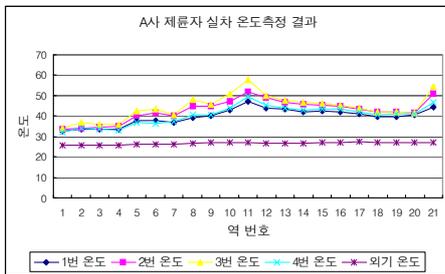


그림 14. 실차 온도측정(A사 제륜자)

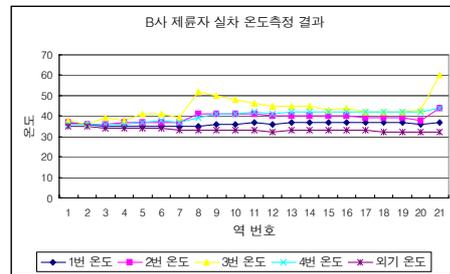


그림 15. 실차 온도측정(B사 제륜자)

5. 결 론

도시철도 차량의 차륜답면과 제륜자간의 마찰열 발생정도와 경향을 파악하기 위하여, 제륜자 2개사 제품을 대상으로 열전달 해석과 다이나모미터 제동시험, 실차 온도측정 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제륜자 열전달 해석결과 마찰면 최고온도는 A사가 290.0℃, B사가 289.6로 차이가 거의 없었으며, 온도분포 경향도 유사하다.
- (2) 다이나모미터 제동시험 결과로는 제륜자 최고온도는 A사가 265℃, B사가 267.5℃로 차이가 거의 없었으며, 차륜은 A사 제륜자를 장착한 차륜 온도가 17℃ 더 높은 것으로 나타났다.
- (3) 실차 표면온도(온도테이프) 측정결과 제륜자는 2개 제품 모두 77℃로 차이가 없었고, 차륜은 A사 제륜자를 장착한 차륜이 28℃ 더 높았으며, 실차 제륜자 온도측정(온도센서) 결과 최고온도는 A사 79℃, B사 68.9℃로 A사 제륜자의 온도가 10.1℃ 더 높은 것으로 나타났다.
- (4) 제륜자 2개사 제품을 비교해 보면, 제륜자의 최고온도는 차이가 거의 없었고 차륜 최고온도는 다이나모미터 제동시험과 실차 온도측정 결과가 모두 B사 제륜자를 장착한 차륜 온도가 높은 것으로 확인되었다. 따라서 B사 제륜자를 장착한 차륜의 손상 원인으로 열에 의한 영향보다는 마찰재의 기계적 강도나 재질 등 다른 영향에 의한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 구병춘, “차축, 차륜, 레일의 파괴역학”, 해외철도기술동향, 한국철도기술연구원.
2. 이현목(2003), “철도차량용 제동 디스크 열균열 현상에 관한 연구”, 석사학위 논문, 서울산업대학교.
3. 권범진(2002), “한국형 고속전철의 답면제동에 의한 차륜의 응력분포에 관한 연구”, 석사학위 논문, 서울산업대학교.
4. 최경진(1999), “동력차용 합성제륜자 개발에 관한 연구”, 한국철도기술연구원. pp174-206