

# 도시철도 차량의 차륜담면과 제륜자간 제동 마찰열에 관한 연구

김성걸<sup>1)</sup> · 윤천주<sup>2)</sup> · 구병춘<sup>3)</sup>

서울산업대학교 기계설계자동화공학부<sup>1)</sup> · 서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과<sup>2)</sup> · 한국철도기술연구원<sup>3)</sup>

## A Study on the Brake Frictional Heat between Wheel Tread and Brake Shoe of E.M.U.'s

Seong Keol Kim<sup>\*1)</sup> · Cheon Joo Yoon<sup>2)</sup> · Byeong Choon Goo<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-742 Korea

<sup>2)</sup>Department of Rolling Stock System Engineering, Graduate School of Railroad, Seoul National University of Technology, Seoul 139-742 Korea

<sup>3)</sup>Korea Railroad Research Institute, 374-1 Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi 437-757 Korea

(Received 20 February 2006 / Accepted 16 May 2006)

**Abstract** : Wheel treads of E.M.U. are usually under a heavy thermal load by brake frictional heat between wheel and brake shoe and damaged by repeated thermal and mechanical loads. To examine the cause of wheel tread damage of E.M.U.'s in service running, a systematic approach has been used. This study is composed of three parts. Frictional heat analysis was conducted in the first part by finite element method. Two kinds of brake shoes in service were considered. In the second part, experimental study was carried out on a brake dynamometer. Temperatures were measured for the two brake shoes. And experimental study in service running E.M.U.'s was performed. Wheel and brake shoe temperatures were measured by using thermocouples and temperature indicating strips. Finally metallurgical characteristics were examined by a SEM/EDS and the cause of the wheel damage was analyzed. It seems that aggregated ferrous component is a main cause of the wheel tread damage.

**Key words** : Wheel tread(차륜담면), E.M.U.(Electrical Multiple Unit, 도시철도 차량), Brake frictional heat(제동 마찰열), Wheel(차륜), Brake shoe(제륜자), Wheel tread damage(차륜담면 손상)

### Nomenclature

$k$  : Conductivity, W/m · K  
 $c$  : Specific heat, J/kg · K  
 $\rho$  : Density, kg/m<sup>3</sup>  
 $q$  : Heat flux, W/m<sup>2</sup>

### 1. 서론

도시철도 차량의 제동장치에는 전기제동(회생제

동)과 공기제동(담면제동, 디스크제동)이 있으며, 차량의 속도제어(감속 및 정지)를 위하여 전기제동과 공기제동을 혼합하여 사용하고 있다. 부수차량에는 디스크제동이 사용되며 구동차량에는 담면제동과 회생제동을 혼합하여 사용하고 있다. 구동차량의 담면제동(Fig. 1)은 차륜담면에 높은 압력으로 제륜자를 접촉시킴에 따라 차량의 운동에너지를 마찰에 의해 열에너지로 전환시켜 차량을 정지시키고 있으며, 이에 따른 제동 마찰열은 차륜과 제륜자의

\*Corresponding author, E-mail: rhett@snut.ac.kr

온도를 급격히 상승시켜 차륜 및 제륜자의 수명과 제동 성능에 영향을 미치고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup>

구동차량 차륜담면은 차륜과 제륜자의 마찰에 의해 반복적인 열하중을 받게 되며, 반복적인 열하중과 기계적인 하중에 의해 표면균열이 발생한다.<sup>2)</sup> 구동차량의 차륜담면 손상정도(Fig. 2)를 제륜자 제조사(A사, B사)별로 조사한 결과, B사 제륜자를 장착하여 운행한 차량의 차륜손상 발생 비율이 18.1% 더 많은 것으로 나타났다. 따라서 여러 가지 차륜 손상요인 중 제동 마찰열의 관점에서, 2개의 제륜자 제품에 대하여 차륜담면과 제륜자간의 제동 마찰열의 발생정도 와 경향을 비교·고찰하여 차륜 손상요인을 파악할 필요가 있다.

본 연구는 도시철도 차량의 2개의 제륜자(A사, B사) 제품을 대상으로 CAE 프로그램인 ANSYS를 이용하여 제륜자 열전달 해석을 수행하였고, 다이노미터 제동시험을 통해 차륜과 제륜자의 온도를 측정하였다. 그리고 실차 온도측정 시험을 실시하여 운행차량의 차륜과 제륜자의 온도를 측정하였다. 또한 실차시험에 사용한 제륜자에 대해 SEM과 EDS를 이용하여 성분분석을 실시하였다.



Fig. 1 The tread brake

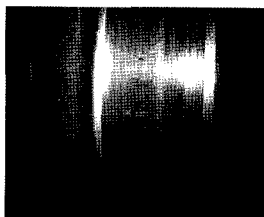


Fig. 2 Damage of the wheel

## 2. 제륜자 열전달 해석

ANSYS의 Thermal 3D Solid 요소인 Solid90을 사용하였으며 도시철도 차량의 레진제륜자를 대상으로 모델링 하였고 제동 마찰열 발생조건을 고려하여 경계조건과 물성값을 입력하였다. 해석에 필요한 제륜자별 물성값은 Table 1과 같다.

Table 1 Material Properties of the brake shoe

항 목	A사 제륜자		B사 제륜자	
	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 <sup>3</sup> )	1,940	7,800	2,010	7,800
탄성계수(kg/m <sup>2</sup> )	3.0×10 <sup>7</sup>	2.14×10 <sup>10</sup>	5.76×10 <sup>7</sup>	2.14×10 <sup>10</sup>
선팽창계수(10 <sup>-6</sup> /K)	4.0	11.0	4.6	11.0
압축강도(N/mm <sup>2</sup> )	42.33	-	101	-

### 2.1 열전달 해석조건

제동 초기속도 60, 80, 100km/h와 초기온도 100°C, 압부력 33, 43kN일 때 40초 동안 시간 변화에 따른 해석을 각각 실시하였다. 하중조건으로 차륜과 마찰되는 면에는 마찰열 발생으로 열속(Heat Flux)이 유입되고<sup>3)</sup> 나머지 부분에서는 대류에 의해 방열이 일어나는 것으로 가정하였다. 제동시 운동 에너지 90%가 열에너지로 전환된다고 가정하였다. 발생한 열 중 제륜자로 전달되는 비율  $\gamma$ 은 식(1)에<sup>4)</sup> 의해 25%로 주어진다.

$$\gamma = \frac{1}{1 + \left( \frac{\rho_w c_w k_w}{\rho_s c_s k_s} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

차륜과 제륜자의 접촉면에서 제륜자 쪽으로 전달되는 열속은 식(2)에 의해 구하였다.<sup>5)</sup>

$$q = \frac{F_b \cdot (V_0 - rt)}{A} \times \frac{25}{100} \times 0.9 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2)$$

여기서  $F_b$ 는 마찰계수,  $r$ 는 감속도,  $A$ 는 면적,  $V_0$ 는 제동 초속도 그리고  $t$ 는 시간이다.

### 2.2 열전달 해석결과

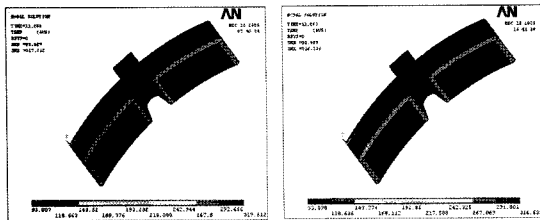
제동 초기속도 60km/h, 초기온도 60°C, 압부력 33kN일 때 3가지 대류 열전달계수 8, 50, 100W/m<sup>2</sup>K를 각각 적용하여 해석한 결과, 최고온도가 149.41°C, 149.411°C, 149.413°C로 그 차이가 없었다. 그리고 제륜자 4개 지점(①제륜자 마찰면, ②마찰면에서 2.7mm 지점, ③마찰면에서 10.2mm 지점, ④백스틸 뒷면)의 40초 동안 시간 경과에 따른 온도 변화도 차이가 거의 없었다. 따라서 본 해석에서는 대류 열전달계수 50W/m<sup>2</sup>K를 적용하였다.

제륜자 열전달 해석 결과 중 최고온도를 Table 2로 정리하였다. 최고온도는 제동 초기속도 100km/h, 초기온도 100°C, 압부력 43kN일 때 A사 제륜자의 경우 317.51°C, B사는 316.54°C로 차이가 거의 없었다. 압부력이 33kN일 때에도 A사 287.05°C, B사 286.22°C로 차이가 거의 없었으며, 다른 조건의 온도도 A사와 B사 제륜자 간에 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 A사와 B사의 제륜자 최고온도 차이는 1°C 이내로 차이가 거의 없다고 할 수 있다.

Table 2 Simulated maximum temperatures of the brake shoes

제동 초기속도	초기온도	압부력	최고온도(°C)	
			A사	B사
60km/h	100°C	33kN	189.41	189.01
80km/h	100°C	33kN	235.28	234.65
100km/h	100°C	33kN	287.05	286.22
60km/h	100°C	43kN	204.93	204.48
80km/h	100°C	43kN	257.78	257.12
100km/h	100°C	43kN	317.51	316.54

Fig. 3은 제동 초기속도 100km/h, 초기온도 100°C, 압부력 43kN에서 최고온도에 도달하였을 때의 온도분포로 A사와 B사 제륜자의 온도분포가 거의 같음을 알 수 있고, 마찰면의 최고온도 도달시간도 A사와 B사 모두 11.28초로 차이가 없음을 알 수 있다.



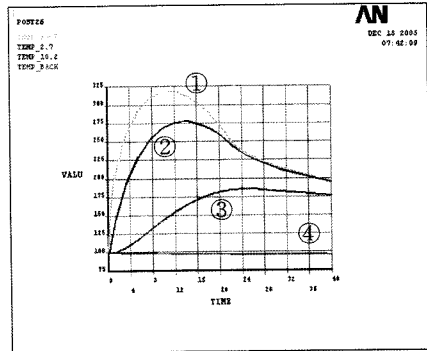
(a) Brake shoe 'A'

(b) Brake shoe 'B'

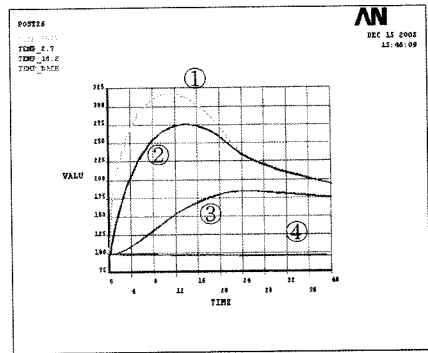
Fig. 3 Temperatures of the brake shoes(100km/h, 100°C, 43kN)

Fig. 4는 제동 초기속도 100km/h, 초기온도 100°C, 압부력 43kN일 때 제륜자 4개 지점(①마찰면, ②마찰면에서 2.7mm 지점, ③마찰면에서 10.2mm 지점, ④백스틸 뒷면)의 40초 동안의 시간 경과에 따른 온도변화를 나타내고 있으며, 각 지점의 온도변화가 A사와 B사 간에 거의 동일한 변화를 보이고 있다. 제륜자 마찰면은, ①TEMP\_SURF, 온도가 급격히

올라갔다가 내려오고 있고, 마찰면에서 떨어진 지점은, ②TEMP\_2.7, ③TEMP\_10.2, 온도 상승과 하강이 완만하고 최고온도 도달시간도 더 오래 걸리고 있다. 백스틸 뒷면은, ④TEMP\_BACK, 마찰면에서 발생된 열의 영향을 받지 않아 대기온도와 동일함을 알 수 있다.



(a) Brake shoe 'A'



(b) Brake shoe 'B'

Fig. 4 Temperatures of the brake shoes(100km/h, 100°C, 43kN)

제륜자 열전달 해석결과를 종합해 보면, 제륜자 최고온도는 A사와 B사 간에 온도 차이가 거의 없었으며 제륜자 온도분포와 최고온도 도달시간 그리고 시간 경과에 따른 온도변화들도 제륜자 간에 차이가 거의 없는 것으로 나타나 A사와 B사 제륜자의 온도특성이 거의 같음을 알 수 있다.

### 3. 다이내모미터 제동시험

도시철도 차량의 담면제동시 차륜과 제륜자의 온도를 측정하기 위해 다이내모미터를 이용한 제동시

험을 실시하였다.

### 3.1 제동시험 방법

시험방법은 서울도시철도공사 제륜자 표준규격서의 시험기준에 의하여 실시하였으며, 시험 장비인 제동 다이내모미터와 이 장비에 설치된 차륜과 제륜자(열전대)는 Fig. 5, 6과 같다.

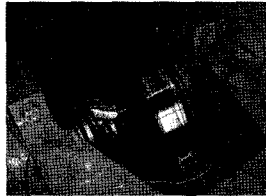
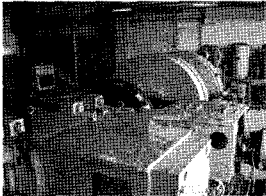


Fig. 5 Brake dynamometer      Fig. 6 Wheel and brake shoe

제동 초기속도 40, 60, 80, 100km/h, 초기온도 60, 100°C, 압부력 33kN(최대 상용제동력의 100%), 43kN(최대 비상제동력)을 각각 조합하여 시험을 실시하였다. 제륜자가 차륜담면과 균일하게 접촉하도록 갈아맞춤(Bedding)을 하여 80%이상 접촉되도록 예비시험을 실시하였고 제륜자는 마찰면에서 깊이 1mm, 차륜은 마찰면에서 깊이 10mm 위치에 열전대(Thermocouple)를 설치하여 온도를 측정하였다.<sup>6)</sup>

### 3.2 제동시험 결과

제륜자 최고온도는 Table 3과 같이 제동 초기속도 100km/h, 초기온도 100°C, 압부력 43kN일 때, A사의 경우 265°C이고 B사는 267.5°C로 제륜자 간에 온도차가 거의 없는 것으로 나타났다. A사의 경우에는 최고온도가 압부력 33kN일 때 289°C로 나타났는데, 이는 압부력 43kN일 때 보다 24°C 더 높은 경우로 제동시 열전대가 마찰면으로 이동하였거나 제륜자가 차륜담면에 국부적인 접촉에 의해 측정부위의 온도가 높아져 오차가 반영된 경우로 판단된다.

차륜 최고온도는 제동 초기속도 100km/h, 초기온도 100°C, 압부력 43kN일 때, A사의 경우 237°C이고 B사는 220°C로 A사 제륜자를 장착한 차륜의 온도가 B사보다 17°C 더 높게 나타났다.

시험조건별 제륜자 최고온도는 대체로 제륜자 간에 차이가 없거나 A사 제륜자의 온도가 높게 나타

Table 3 Maximum temperatures on brake tests

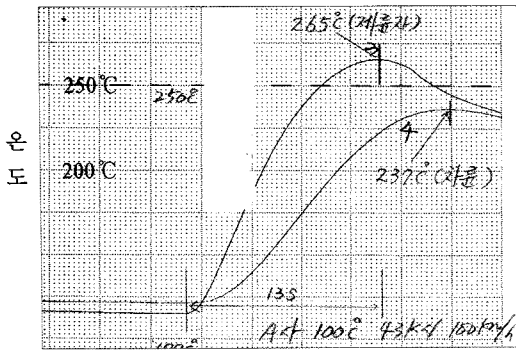
제동 초기속도	초기 온도	압부력	제륜자 최고온도(°C)		차륜 최고온도(°C)	
			A사	B사	A사	B사
40km/h	60°C	33kN	56.0	60.0	51.5	60.0
60km/h	60°C	33kN	88.5	99.0	80.0	86.5
80km/h	60°C	33kN	147.0	201.0	127.5	135.0
100km/h	60°C	33kN	212.5	207.5	182.0	148.0
40km/h	60°C	43kN	100.0	77.0	95.5	75.5
60km/h	60°C	43kN	129.5	112.0	120.0	104.5
80km/h	60°C	43kN	189.0	122.0	162.0	105.5
100km/h	60°C	43kN	262.5	237.5	207.5	177.5
40km/h	100°C	33kN	145.0	130.0	125.0	117.5
60km/h	100°C	33kN	197.5	145.0	155.0	134.0
80km/h	100°C	33kN	260.0	178.0	194.0	165.0
100km/h	100°C	33kN	289.0	190.0	235.0	195.0
40km/h	100°C	43kN	147.5	125.0	139.0	128.0
60km/h	100°C	43kN	177.5	191.0	160.0	155.0
80km/h	100°C	43kN	215.0	215.0	192.0	177.5
100km/h	100°C	43kN	265.0	267.5	237.0	220.0

났다. 차륜 최고온도는 A사 제륜자를 장착한 차륜 온도가 대체로 높은 것으로 나타났다. 그리고 2개 제륜자 모두 최고온도가 시험기준인 400°C 이하를 만족하고 있다.

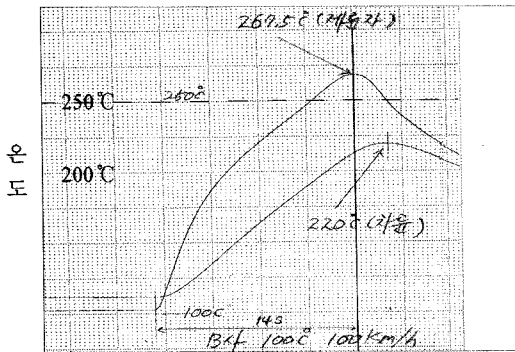
Fig. 7은 제동 초기속도 100km/h, 초기온도 100°C, 압부력 43kN일 때 제동시험 온도측정 그래프이다. 제륜자의 온도가 차륜보다 급격히 올라갔다가 내려 오고 있으며 최고온도 도달시간도 차륜보다 빠르고 온도도 더 높게 나타났다. 이는 온도 측정위치가 제륜자는 마찰면에서 1mm이고 차륜은 10mm로 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다. 시간 경과에 따른 제륜자 온도변화도 이론 해석결과인 Fig. 4와 비교해 보면, 2가지 결과가 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

차륜과 제륜자의 온도를 비교해 보면, Fig. 8과 같이 A사나 B사 모두 차륜보다 제륜자의 온도가 더 높게 나타났고 온도가 높아질수록 차륜과 제륜자간의 온도 차이가 많이 발생하고 있다. A사 제륜자는 온도가 비교적 규칙적으로 변하지만, B사는 불규칙적으로 변하는 것을 볼 수 있다. 즉 B사 제륜자의 온도가 불안정하게 상승하고 있음을 알 수 있다.

제동시험과 열전달 해석 결과를 비교해 보면, Fig. 9와 같이 A사 제륜자는 열전달 해석의 경우 마찰표



(a) Brake shoe 'A'

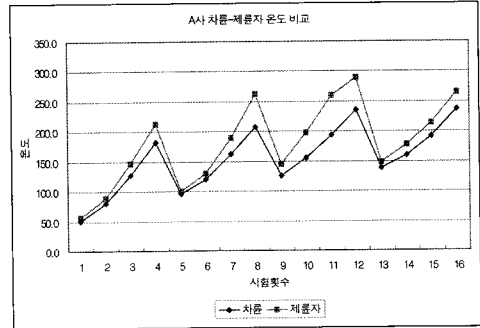


(b) Brake shoe 'B'

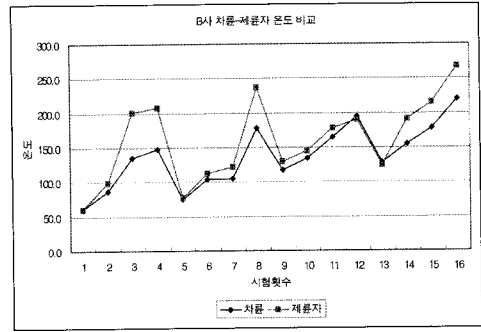
Fig. 7 Temperatures on brake tests (100km/h, 43kN, 100°C)

면으로 부터 마찰표면에서 깊이 2.7mm까지 온도분포가 317.5~277.3°C이며, 제동시험은 마찰면에서 깊이 1mm의 온도가 265°C로 나타나 제동시험 결과가 더 낮게 나타났다. 또한 B사 제륜자도 A사와 마찬가지로 제동시험 온도가 더 낮음을 알 수 있다. 이는 해석시 운동에너지 90%가 열에너지로 전환된다는 가정과 식 (1)에 의한 제륜자의 열 분담율이 실제와 약간의 차이가 있고 해석에 사용된 여러 물성값이 실험에 의해 정확히 구한 값이 아니기 때문이라 판단된다.

제동시험 후 차륜담면 상태는 A사 제륜자를 장착한 차륜은 Fig. 10과 같이 표면상태가 양호하였고, B사는 차륜담면에 마찰재의 마모 부스러기가 달라붙어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 Metal pick-up이란 현상으로 판단되며 이런 현상은 상대재의 금속이 천이되어 나타나는 현상을 말하며 이 부분에서 피로가 누적되어 담면균열 현상이 발생할 수 있다고 알려져 있다.<sup>7)</sup>

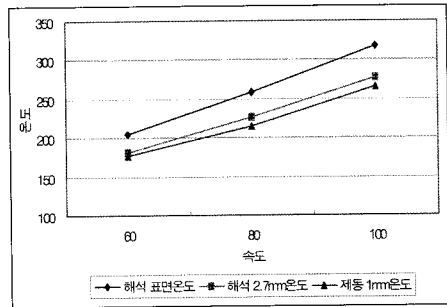


(a) Brake shoe 'A'

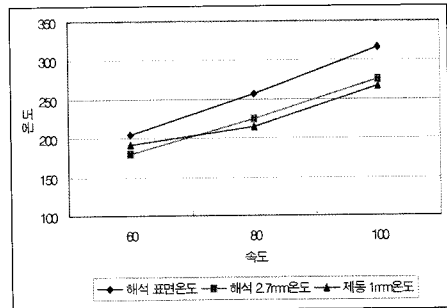


(b) Brake shoe 'B'

Fig. 8 Temperatures of the wheel and brake shoe on brake tests



(a) Brake shoe 'A'



(b) Brake shoe 'B'

Fig. 9 Comparison between test and analysis (100km/h, 43kN, 100°C)

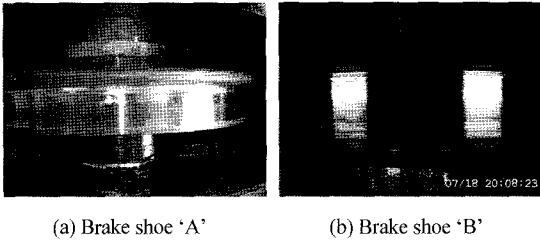


Fig. 10 Wheel tread after brake tests

제동시험 결과를 종합 고찰해 보면, 2개 제륜자의 최고온도가 시험기준인 400°C이하를 만족하고 있었고, 제륜자 최고온도는 대체로 제륜자 간에 차이가 없거나 A사가 높게 나타났고, 차륜 최고온도는 A사 제륜자 장착 차륜의 온도가 대체적으로 높게 나타났다. 차륜담면 상태는 B사 제륜자를 장착한 담면에서 마찰재의 마모 부스러기가 천이되어 달라붙는 현상이 확인되었다. 따라서 A사 제륜자가 B사보다 차륜에 대하여 열적 부담을 더 많이 주고 있음을 알 수 있으나, 반면에 B사 제륜자는 차륜담면에 마찰재가 달라붙어 차륜을 손상시킬 가능성이 많은 것으로 확인되었다.

#### 4. 실차시험

##### 4.1 표면온도 측정시험

###### 4.1.1 시험방법

차륜과 제륜자의 표면온도 측정을 위하여, 차륜과 제륜자(A사, B사)에 각각 표면온도 측정용 써머라벨(THERMAX, ENGLAND) 2종류(A형 : 40~71°C, B형 : 77~127°C)를 서울지하철 6호선 운행 차량에 부착하여 6차('05.6.29~'05.8.25)에 걸쳐 확인하였다. 써머라벨 부착 위치는 Fig. 11과 같이, 차륜에는 바깥쪽 림(Rim) 부위에 2종류를 부착하였고, 제륜자에는 측면 하부쪽에 A형을 상부쪽에는 B형을 부착하여 측정하였다.

###### 4.1.2 시험결과

제륜자 표면온도는 Fig. 12와 같이, A사 제륜자가 99°C이고 B사는 82°C로 A사의 온도가 17°C 더 높은 것으로 확인되었다. 1회~4회 측정시까지는 2개 제륜자의 온도가 같았으나 5회와 6회에서는 A사 온도가 B사보다 17°C 더 높게 나타났다.

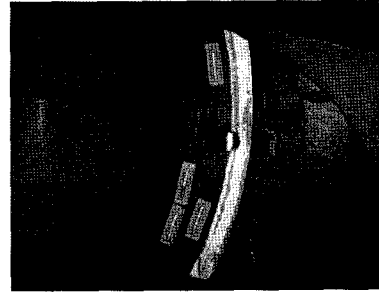
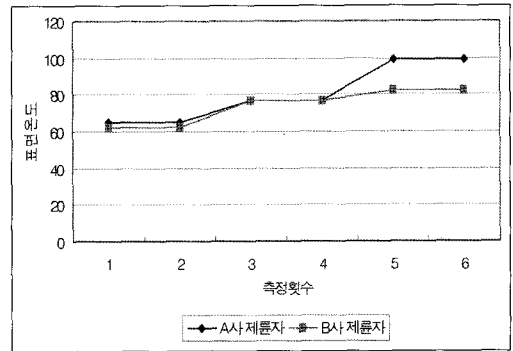
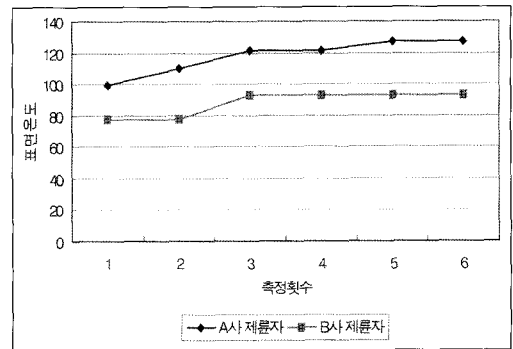


Fig. 11 Surface temperature indicating strips



(a) The brake shoe



(b) The wheel

Fig. 12 Surface maximum temperatures on running tests

차륜 표면온도는 A사 제륜자를 장착한 차륜이 127°C이고 B사는 93°C로 A사의 온도가 34°C 더 높은 것으로 확인되었다. 전반적으로 A사 제륜자 장착 차륜의 온도가 22~34°C 더 높게 나타났다. A사 제륜자 장착 차륜은 측정 한계치인 127°C까지 도달하여 실제로 127°C보다 온도가 더 높았을 것으로 생각되며, 온도 측정부위가 차륜 림(Rim)부위의 표면 온도이므로 차륜과 제륜자 간의 마찰면 온도는 이보다 훨씬 더 높을 것으로 예상된다.

표면온도 측정 1회~4회까지는 2개 제륜자의 온도가 동일함에도 차륜의 온도는 A사 제륜자를 장착한 차륜의 표면온도가 22~33°C 더 높은 것으로 나타났고, 차륜과 제륜자의 온도 차를 비교하면 A사 제품은 차륜과 제륜자 간에 온도 차가 28~45°C이고, B사는 11~16°C로 A사 제품에서 온도 차이가 많이 발생하고 있다. 이는 A사 제륜자가 차륜에 대한 열적 부담을 비교적 많이 주고 있음을 의미한다.

표면온도 측정결과, 제륜자는 A사 제륜자가 더 높았으며, 차륜도 A사 제륜자를 장착한 차륜의 온도가 더 높은 것으로 나타났다. 차륜과 제륜자 간의 온도 차이도 A사 제륜자에서 많이 발생하고 있다. 따라서 A사 제륜자가 B사보다 차륜에 대한 열적 부담을 더 많이 주는 것으로 판단된다.

## 4.2 제륜자 온도 측정시험

### 4.2.1 시험방법

제륜자 온도측정을 위하여 제륜자에 구멍을 뚫어 차륜과 마찰되는 면에서 깊이 3~10mm 위치에 4개(제륜자 하부 3개와 상부 1개)의 케이블형 온도센서를 설치하였고, 1개 센서는 주변온도 측정을 위하여 대차에 설치하였다. 총 5개의 온도센서를 차량 객실의 차트레코더와 연결하여 레코더(LR8100E, JAPAN)에 온도가 실시간으로 기록되도록 하였다.

제륜자 별로 각 1회씩 서울지하철 6호선 21개역(각 1왕복)에서 측정하였고, 열차 운전은 자동운전 방식이고 공차상태에서 측정하였다. 또한 써머라벨을 함께 부착하여 차륜과 제륜자의 표면온도도 함께 확인하였다. 제륜자에 온도센서가 설치된 사진은 Fig. 13과 같다.



Fig. 13 Temperature sensor of the brake shoe

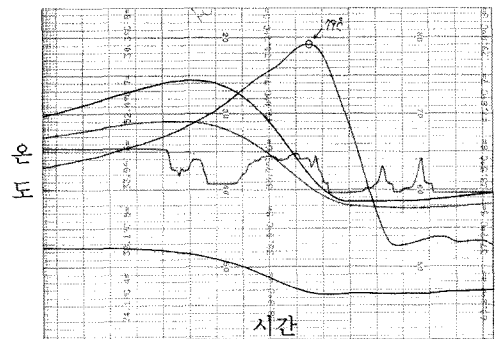
### 4.2.2 시험결과

온도센서에서 측정된 제륜자 최고온도는 Table 4와 같이 A사 제륜자는 79°C이고 B사 제륜자는 68.9°C로 B사보다 A사 제륜자의 온도가 10.1°C 더 높게 나타났다. 주변 평균온도가 4.6°C 더 낮음에도 A사 제륜자 온도가 더 높은 것으로 확인되었다. Fig. 14는 청구에서 신당 구간의 온도측정 그래프이다.

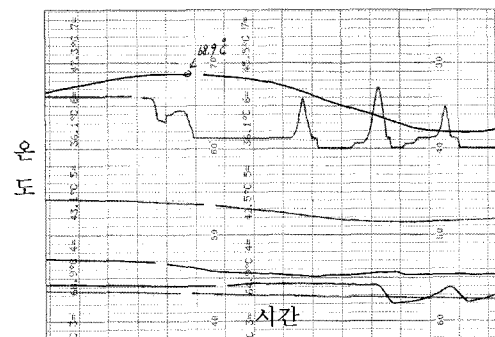
써머라벨로 확인된 제륜자 표면온도는 A사 제륜자가 77°C, B사 제륜자는 65°C로 A사 제륜자의 표면온도가 12°C 더 높게 나타났으며, 차륜 표면온도는 A사 제륜자를 장착한 차륜의 표면온도가 99°C이

Table 4 Maximum temperatures on running tests

구분	최고온도			주변 평균온도	
	온도센서	표면온도			
A사	제륜자	청구 → 신당	79°C	77°C	28.4°C
	차륜	-	-	99°C	
B사	제륜자	청구 → 신당	68.9°C	65°C	33°C
	차륜	-	-	77°C	



(a) Brake shoe 'A'

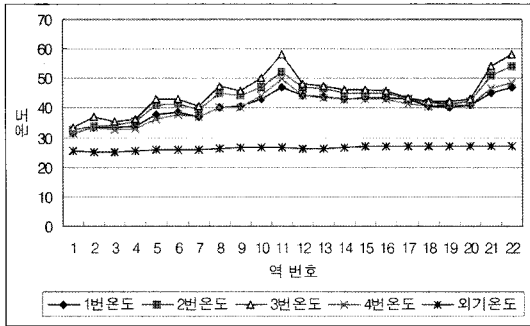


(b) Brake shoe 'B'

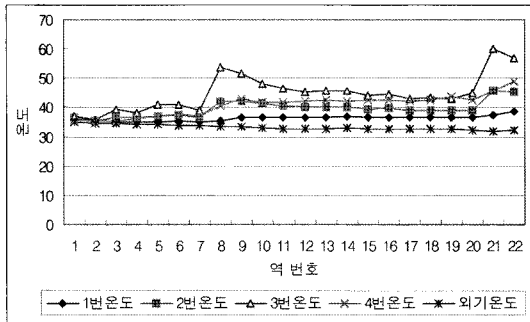
Fig. 14 Brake shoe temperatures on running tests (Cheonggu → Sindang)

고 B사가 77°C로 A사 제륜자를 장착한 차량의 표면 온도가 22°C 더 높게 나타났다. 이 결과는 4.1.2의 시험결과와 유사하다.

역별 최고온도 변화를 살펴보면 Fig. 15와 같이 A사와 B사 제륜자의 온도변화가 유사한 경향을 보이고 있으며, 대체로 A사 제륜자의 온도가 높게 나타났다.



(a) Brake shoe 'A'



(b) Brake shoe 'B'

Fig. 15 Brake shoe temperatures on running tests (Bonghwasan → Gongdeok)

A사 제륜자의 온도변화는 차량이 출발하여 운행할수록 온도가 급격히 상승하였다가 하강하고 있으며, 각 센서별로 온도 차이가 적어 4개 센서의 온도가 대체로 같이 변화하고 있음을 알 수 있다. B사 제륜자의 온도변화는 차량이 출발할 때는 각 센서별로 온도 차이가 별로 없으나 운행할수록 차이가 많이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

이는 A사 제륜자는 온도가 대체로 높지만 상승과 하강이 급격한 것으로 볼 때 제륜자가 열을 효과적으로 발산하고 있으며, 또한 4개 센서 간에 온도차가 없는 것으로 보아 열이 균일하게 발생하고 있는

것으로 생각된다. B사 제륜자는 대체로 A사보다 온도가 낮지만 상승과 하강이 완만한 것을 볼 때 제륜자가 열을 효과적으로 발산하지 못하고 내부에 누적되는 것으로 보이며, 4개 센서 간에 온도차가 많아 열 발생이 균일하지 않은 것으로 생각된다. 즉 B사의 경우 차륜과 국부적인 접촉을 하고 있어 제륜자 온도 및 마찰 특성이 좋지 않은 것으로 생각된다.

제륜자 온도측정 결과를 종합 고찰해 보면, 온도 센서와 써머라벨에서 측정된 제륜자 최고온도는 모두 A사가 높은 것으로 측정되어 A사가 B사보다 차륜에 열적 부담을 더 많이 주는 것으로 확인되었지만, 역별 최고온도 변화를 보면 B사 제륜자는 열을 효과적으로 발산하지 못하고 있으며 센서 별로 온도차가 많아 열 발생이 균일하지 않은 것으로 확인되어 제륜자의 온도 및 마찰 특성이 좋지 않음을 알 수 있었다.

### 4.3 제륜자 성분분석

#### 4.3.1 분석방법

온도 측정시험에서 사용한 A사와 B사 제륜자에 대해 각각 시편을 채취하여 SEM과 EDS로 미세조직 관찰과 성분분석을 실시하였다.

#### 4.3.2 분석결과

제륜자 성분분석 결과 Table 5와 같이 A사 제륜자의 경우에는 Fe의 함유량이 0.18%이고, B사는 14.91%로 B사 제륜자에 Fe이 82.8배 더 많이 함유되어 있는 것으로 나타났다.

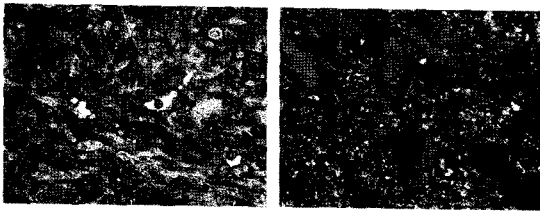
Table 5 Chemical composition of area

구분	C	Si	S	Ca	Fe	Ti
A사 제륜자 at%(wt%)	78.46 (55.71)	10.05 (16.69)	-	11.34 (26.87)	0.05 (0.18)	-
B사 제륜자 at%(wt%)	90.47 (72.19)	2.29 (4.28)	0.36 (0.76)	2.39 (6.36)	4.02 (14.91)	0.47 (1.51)

압축강도는 Table 1과 같이 A사 제륜자가 42N/mm<sup>2</sup>이고 B사는 101N/mm<sup>2</sup>로 Fe가 다량 함유된 B사 제륜자의 압축강도가 2.4배 높음을 알 수 있다.

Fig. 16은 시편의 표면조직을 ×100 배율로 확대한 사진이다. 사진에 표시된 2개 지점에 대한 성분분석 결과 사진 (b)의 B사 제륜자 2개 지점 중 우측 지점





(a) Brake shoe 'A'

(b) Brake shoe 'B'

Fig. 16 SEM photographs of the brake shoe

에서 Fe가 99.10%로 다량 함유되어 있으며, 사진에서도 Fe를 다량 함유한 조직이 많이 관찰되고 있다.

B사 제륜자에는 특히 Fe가 다량 함유되어 있고 또한 압축강도도 높음에 따라, B사 제륜자가 차륜에 더 공격적으로 작용하여 차륜손상을 유발할 가능성이 많은 것으로 판단된다.

## 5. 결론

도시철도 차량의 여러 가지 차륜 손상요인 중 제동 마찰열의 관점에서 손상요인을 파악하기 위하여 실제로 사용되고 있는 2개 제륜자를 대상으로 열진달 해석과 제동시험, 실차 온도측정 시험, 제륜자 성분분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제륜자 열진달 해석결과, 최고온도는 A사나 B사 제륜자 간에 온도 차이가 없었으며, 온도 분포와 온도 변화도 차이가 없어 2개 제륜자의 온도특성이 유사함을 알 수 있었다.
- 2) 제동시험 결과로 제륜자 최고온도는 차이가 없거나 A사가 다소 높았으며 차륜도 A사 제륜자 장착 차륜이 더 높게 나타나, A사가 차륜에 열적 부담을 더 많이 주고 있었다. 그렇지만 실제 운행 차량에서 측정된 차륜의 최고온도는 150°C 이하로 이 제동 열하중이 차륜손상의 직접적인 원인은 아닌 것으로 판단된다. 반면에 B사 제륜자는 차륜담면에 마찰제가 달라붙는 현상이 관찰되어 차륜을 손상시킬 가능성이 많은 것으로 확인되었다.
- 3) 실차 표면온도는 차륜과 제륜자 모두 A사 제륜자의 온도가 높았으며, 제륜자 온도측정(센서) 결과도 A사의 온도가 더 높게 나타나, A사 제륜자가 차륜에 열적 부담을 더 많이 주고 있었다.

역별 최고온도 변화를 보면 B사 제륜자는 열을 효과적으로 발산하지 못하고 있었고, 열 발생이 균일하지 못하여 온도 및 마찰 특성이 좋지 않음을 알 수 있었다.

- 4) 2개 제륜자의 성분을 분석한 결과, B사 제륜자에 Fe 성분이 다량 함유되어 있었고, 압축강도도 높아 차륜에 더 공격적으로 작용하여 차륜 손상을 유발할 가능성이 많은 것으로 확인되었다. B사 제륜자를 사용한 차륜손상 발생 비율이 A사 제품에 비해 18.1% 더 많은 것으로 조사되었는데 이에 대한 주된 원인은 차륜에 작용하는 열 하중보다는 제륜자의 차륜에 대한 공격성이 원인이라고 판단된다.

## References

- 1) K. J. Choi and D. H. LEE, "Effect of the Brake Shoe on the Brake Force of the Freight Car," Korea Railroad Research Institute, 2001.
- 2) B. C. Goo, "Fracture mechanics of railway axle, wheel, and rail," Korea Railroad Research Institute, World Rail Trend, 2005.
- 3) J. W. Seo and B. C. Goo, "Thermal Stress Analysis of Drums Brakes by Finite Element Method," Transactions of KSAE, Vol.9, No.3, pp.173-180, 2001.
- 4) H. M. Lee, "A Study on the Thermal Cracking Phenomenon of a Rolling Stock Brake Disc," M. S. Thesis, Seoul National University of Technology, 2003.
- 5) B. J. Kwon, "A Study on Stress Distribution of Korean High Speed Train Wheel at Tread Braking," M. S. Thesis, Seoul National University of Technology, 2002.
- 6) Brake Shoe Standard, Seoul Metropolitan Rapid Transit Corp., 2003.
- 7) K. J. Choi, B. C. Goo, S. J. Kwon, S. W. Nam, D. H. Lee, W. S. Jung, D. H. Lee, W. H. Yoo, J. S. Nam, Y. G. Kim and K. H. Moon, "A Study on the Development of Composite Brake Shoe for Power Car," Korea Railroad Research Institute, 1999.