

철도차량 운행중 제동디스크의 표면 온도변화 및 디스크 재료의 온도변화에 따른 피로특성 연구

A Study of the Change of Temperature on Brake Disk Surface during the Service and The Fatigue Characteristic of disk material due to Temperature

김재훈*

Kim, J. H.

구병춘**

Goo, B. C.

석창성***

Suk, C. S.

ABSTRACT

This study investigates the change of the temperature and fatigue property of the braking disk (GC25-30 material) for the railway vehicle. The average temperature is measured about 100°C and the maximum temperature is measured over 200°C by non-contact sensor from Seoul to Chun-an. In the 20°C-300°C. The Fatigue tests did for new and used disk specimens. The fatigue test results of new disk specimens were similar due to the temperature change. But the compare of specimens between new disk and old disk, The fatigue life of old disk specimens was smaller than new disk specimens about 10%.

1. 서 론

최근에 들어 경제성이라는 측면에서 철도차량의 속도 향상에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이와 병행하여 고속에서의 철도차량의 안전을 보장하는 제동 장치의 고성능화 및 안전성 확보를 위한 요구도 증가하고 있다. 이러한 분위기 속에서 철도차량의 고출력화, 고속화 추세에 따라서 제동시스템은 더욱 가혹한 상태에서 제동거리 기준을 만족시키며 운전해야만 하는 상황이다. 특히 제동은 안전과 직결되는 중요한 요소로서 제동 시스템과 제동장치의 신뢰성 확보기술 및 평가기술은 매우 중요하다. 하지만 철도차량의 제동장치 중 제동 디스크는 레일, 차량 운행구간, 기관사 등 여러 가지 운전 조건에서 운전되어야 하는 부품으로 제동시 디스크의 마찰면에서 미소균열이 발생하는 등으로 인해 제동 시스템의 수명 단축이나 심각한 사고 발생 가능성이 내재되어 있다. 실제로 철도차량이 운전될 때 제동 디스크는 운전과 제동을 반복하며 라이닝과의 마찰에 의하여 열이 발생된다. 이때 발생된 열로 인해 온도상승에 따른 디스크 재료의 변화와 열응력 집중으로 인한 피로손상이 발생하여 디스크 표면의 균열 생성에 커다란 영향을 주게 된다. 따라서 균열 발생 방지 등 제동 디스크의 신뢰성을 확보하기 위해서는 실제 열차 주행 및 제동시 발생하는 온도변화에 대한 정확한 연구와 이를 바탕으로 그러한 온도 조건에서의 제동 디스크 재료의 신뢰성을 평가하는 연구가 수행되어야 한다. 하지만 국내는 아직 이러한 연구가 미비한 실정이다.[1],[2],[3]

본 연구는 철도 차량용 제동장치의 성능향상을 위한 연구의 일환으로 실제 상업운전 구간에서 실차 시험을 통해 열차 주행 및 제동시 발생하는 제동 디스크 표면의 온도 변화를 측정하고 분석하였으며, 이 온도변화 분석 결과를 바탕으로 제동디스크 소재에 대한 온도별 피로 시험을 수행하여 온도변화에 따른 소재의 피로수명을 평가하여, 제동 디스크의 온도변화에 따른 재료특성을 확인하고 제동 디스크의 신뢰성 확보의 한 기초를 마련하고자 하였다.

* 한구철도기술연구원

E-mail : lapin95@krri.re.kr

TEL : (031)460-5248 FAX : (031)460-5279

** 한국철도기술연구원

*** 성균관대학교 기계공학과

2. 재료 및 시험

2.1 재료

시험은 GC 25 ~ 30 수준 편상흑연주철 재질(이후 주철)의 12공(hole) 형상 제동 디스크를 사용하였다. 인장시험 및 피로인성 시험을 위하여 Fig. 1과 같이 피로 시험용 시편들을 동일한 제동 디스크에서 가공하여 사용하였다. 이때 실제 제동시 제동디스크 단면의 방향성을 고려하여 Fig.2과 같이 제동 디스크의 원주방향으로 시편을 채취하여 가공하였다.

피로 시험편은 ASTM E466(Standard Practice for Conduction Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials)과 ASTM E468(Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Tests Result for Metallic Materials)의 피로 시험편 규격에 준하여 피로 시험편을 제작하였다.

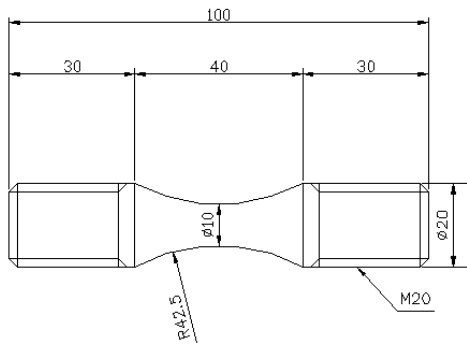


Fig. 1 Configuration of a fatigue test specimen

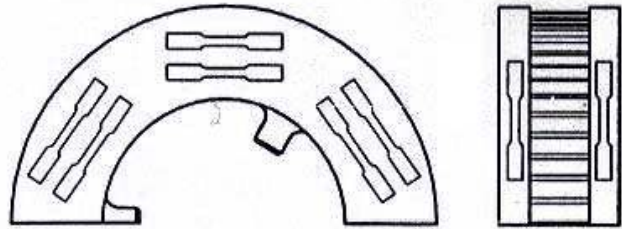


Fig. 2 Sampling position of test specimens

2.2 시험방법

2.2.1 피로시험 방법

피로 시험을 ASTM E466과 ASTM E468에 따라 피로 시험을 수행하였다. 디스크 소재에 대하여 상온과 300℃에서 피로 시험을 수행하였다. 전체적으로 탄성 구간에서 제동디스크가 가동 중에 압축 및 인장 하중을 받는 것을 감안하여 응력비 $R=-1$, 시험 속도 10Hz로 하여 시험을 수행하였으며 2×10^6 cycle 이상에서 미파단 시편이 발생할 때까지 하중을 변화시켜가며 시험을 수행하였다.

2.2.2 제동 디스크 온도변화 측정 방법

실제 주행시 발생하는 제동 디스크 표면의 온도변화를 측정하기 위해 경부선 서울 ~ 천안 구간에서 새마을호 열차를 이용하여 상업운전과 동일한 방법으로 2번 (상행, 하행)의 제동 디스크 표면 온도변화 측정 시험을 수행하였다. 측정 방법으로는 미국 레이텍(Raytek Corp.)사의 비접촉식 적외선 온도센서 Thermalert MID를 이용하여 Fig. 3 ~ 4 와 같이 새마을호 열차의 대차에 설치하여 초당 4회씩 제동 디스크 표면을 스캔하여 실시간으로 온도 변화를 측정하였다. 상, 하행 시험의 간격은 제동디스크의 냉각을 위하여 정차 후 20분간의 간격을 두고 수행하였다.



Fig. 3 The non-detective sensor on the disk(front)

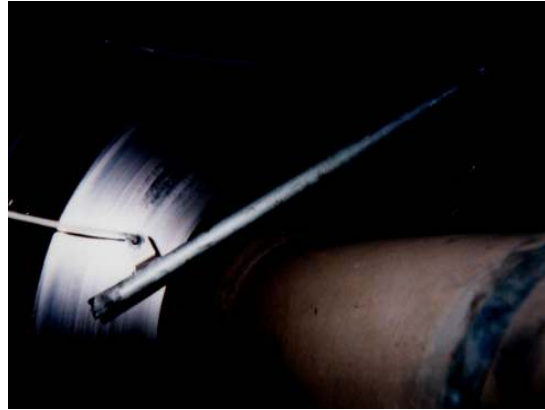


Fig. 4 The non-detective sensor on the disk(side)

2.3 시험결과 및 고찰

2.3.1 제동 디스크 온도변화 측정

경부선 서울-천안 상, 하행선 구간에서 새마을호를 이용하여 제동디스크 표면의 온도변화를 측정하였다. Fig. 5 - 6 은 서울-천안 구간에서 주행시 측정된 새마을호 제동 디스크 표면의 온도 변화 프로파일이며, Fig. 5 에서 표시한 각 제동구간에 대한 제동전후 속도 및 온도는 Table 1 - 2 에 나타내었다. Fig. 5 - 6에서 frequency는 비접촉 센서의 측정 회수이며, 1초당 1번씩 표면온도를 측정하였다. Fig. 5 에 따르면 초기 출발구간에서 새마을호 제동 디스크의 표면 온도는 상온(20℃)과 유사한 상태임을 알 수 있다. 그러나 제동 디스크는 열차 주행시의 가속과 감속의 반복에 따라 마찰에 의한 표면온도의 상승과 공랭으로 인한 하강이 반복적이며, 매우 급격하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 본 시험을 통해 확인한 결과, Fig. 5 에 표시된 1~4 번 주행 초, 중기 구간의 제동과 이후 구간의 제동은 온도 변화 프로파일이 서로 다른 것을 확인하였다. 먼저 1~4 번의 주행 초, 중기 구간에서는 제동 디스크 표면의 온도는 공랭에 의한 온도 하강 효과가 크지 않으며, 마찰열에 의하여 디스크 표면의 온도가 지속적으로 상승하는 것을 알 수 있다. 하지만 5 번 제동구간부터는 Table 1에 나타난 것과 같이 이전과 유사한 제동 조건에서도 짧은 순간에 급격하게 디스크 표면의 온도가 상승하며, 온도하강 또한 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 반복적인 제동에 의하여 제동 디스크의 표면에 누적된 열에너지의 영향으로 판단된다. 즉, 제동 디스크의 열에너지가 포화상태에 이르기 전까지는 마찰에 의해 발생한 열에너지가 계속 축적이 되어 디스크 표면의 온도가 지속적으로 상승하나, 열에너지가 포화된 이후에는 주행초기와 비교하여 동일한 속도에서 제동이 이뤄졌을 때에도 제동디스크 표면의 온도가 급격하게 상승하는 것으로 판단된다. 또한 포화상태에서는 초과된 열에너지는 공랭으로 빠르게 방출되어 급격한 온도하강이 이루어지며, 이러한 온도 상승과 하강이 반복됨에 따라 제동디스크는 열 피로의 영향을 계속적으로 받게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 5와 같이 위 결과를 바탕으로 본 연구에서 사용된 제동 디스크는 100℃ ~ 150℃ 부근에서 열에너지가 포화상태에 도달하는 것으로 판단되며, 이러한 사실은 뒤이어 측정된 Fig. 6 와 Table 2의 경부선 서울-천안 상행선 구간의 결과를 통해서도 재확인된다. 이 구간 시험의 경우 서울-천안 하행선 구간 시험과는 다르게 초기 제동 디스크의 표면 온도가 상온근처까지 냉각되기에 충분한 시간 (20분간 정차 후 시험 재개)을 갖지 못했기 때문에 약 100℃ 상태에서 시험이 시작되었다. 따라서 이미 시험 초기에 제동 디스크는 어느 정도 열에너지가 축적된 상태에서 주행을 시작한 것으로 판단되며, 상행의 경우 하행 주행과 비슷한 Table 2의 제동 조건하에서도 제동초기 구간에서부터 열에너지가 쉽게 포화되어 하행 주행 구간 후반부의 온도변화 프로파일과 같은 급격한 온도 상승과 하강이 나타나는 것으로 판단된다. 그리고 Table 3과 같이 상, 하행 구간의 평균온도와 최고온도를 비교한 결과 모두 뒤이어 주행한 상행

구간에서 제동디스크의 평균온도와 제동시 최고온도가 높게 나타났다.

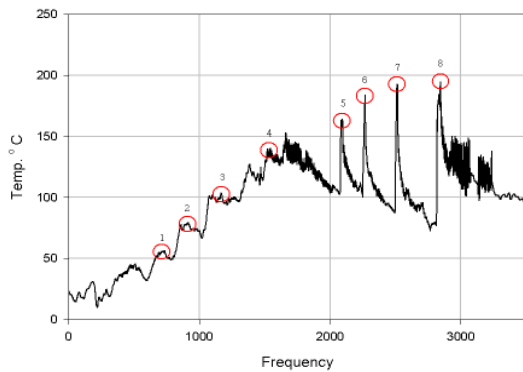


Fig. 5 The temperature profile on the disc surface (Seoul-> Chun-an)

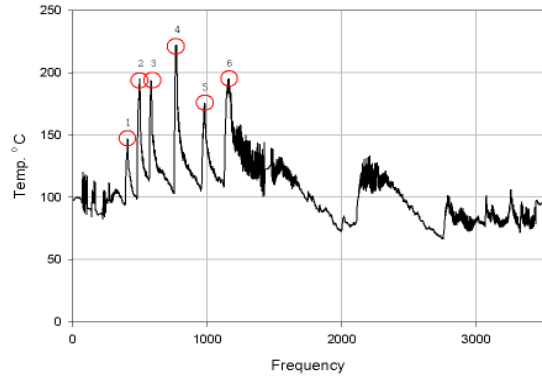


Fig. 6 The temperature profile on the disc surface (Chun-an-> Seoul)

Table 1. The change of temperature on the disc.

#	Before Braking Speed (Km/h)	After Braking Speed (Km/h)	Before Braking Temp (°C)	After Braking Temp (°C)	
1	135	110	32.5	56.7	
2	130	80	48.8	79.6	Emergency Braking
3	130	110	66.8	103.7	
4	130	110	110.2	140.6	Emergency Braking
5	130	90	102.8	164.5	
6	135	110	100.1	184.2	
7	135	100	87.1	192.9	
8	140	60	72.6	194.7	Emergency Braking

Table 2. The change of temperature on the disc.

#	Before Braking Speed (Km/h)	After Braking Speed (Km/h)	Before Braking Temp (°C)	After Braking Temp (°C)	
1	140	110	94.0	146.9	
2	130	100	98.8	195.2	
3	135	110	113.3	193.9	
4	135	90	103.6	222.5	Emergency Braking
5	135	110	104.9	175.8	
6	130	60	108.1	195.5	Emergency Braking

2.3.2 온도별 피로시험 결과

실제 제동디스크는 제동 시 마찰열에 의해 고온 환경에 놓이게 되며 이 때 발생한 열응력에 의하여 제동디스크는 압축응력을 받게 된다. 반면에 냉각 중에는 인장잔류응력에 의하여 인장응력을 받게 된다. 이처럼 제동디스크는 고온상황에서 반복되는 압축과 인장응력으로 인하여 피로를 받게 된다. 따라서 오랜 기간 가동된 제동디스크는 열피로에 의한 영향으로 디스크의 마찰면에 열피로 균열이 발생하기도 하는데, 이러한 열피로 균열은 부품의 안전성에 심각한 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 철도차량 제동 장치의 성능향상을 위한 연구의 일환으로 디스크에 대한 피로 시험을 수행하였다. 이 때 본 연구에서는 앞에서 얻은 열차 주행시 제동 디스크 온도변화 측정결과를 바탕으로 제동 디스크 재질에 대한 피로 시험의 온도조건을 결정하였다. Table 3과 같이 실차시험에서 측정된 제동 디스크 표면의 최고온도는 약 200°C 이며, 평균온도는 약 100°C로 측정되었다. 따라서 피로시험 온도는 상온과 여름철의 기온 상승시를 고려하여 300°C로 실험 온도를 결정하였다.

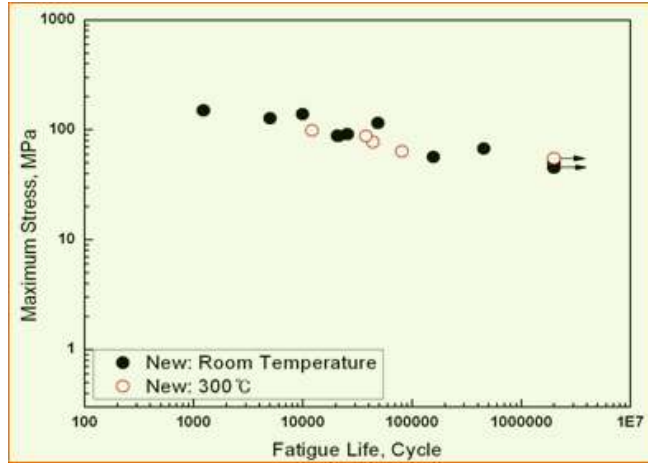


Fig. 7 The S-N curve of brake disk material at room temperature and 300°C

Fig. 7과 같이 상온과 300°C에서 수행한 피로시험 결과 디스크 재료의 S-N 선도는 기율기와 피로한도 모두 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 시험에 사용한 디스크 재료의 경우에는 300°C까지의 온도범위에서 열화에 따른 재료의 물성변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 재료의 제동 디스크는 기존선 열차의 제동을 위해 사용하는 것은 가능한 것으로 판단된다. 하지만 현재 문제가 되고 있는 열에 의한 균열발생 문제 해결 등 내구성을 향상시키기 위해서는 본 연구결과를 바탕으로 온도별 파괴인성 및 균열진전, 열전도 등 고려한 보다 심화된 연구가 필요로 한다.

3 결론

본 논문은 제동 디스크의 온도변화에 따른 재료특성을 확인하고 제동 디스크의 신뢰성 확보의 한 기초를 마련하고자 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제동 디스크는 열차 주행시의 가속과 감속의 반복에 따라 마찰에 의한 표면온도의 상승과 공랭으로 인한 하강이 반복적이며, 매우 급격하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 주행 초, 중기 구간의 제동과 이후 구간의 제동은 온도 변화 프로파일이 서로 다른 것을 확인하였다.
- 2) 중기 이후 구간에서는 이전과 동일한 제동 조건에서도 앞의 경향과는 다르게 짧은 순간에 급격하게 디스크 표면의 온도가 상승하며, 온도하강 또한 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 반복적인 제동에 의하여 제동 디스크의 표면에 누적된 열에너지의 영향으로 판단된다.
- 3) 열차 주행시 제동 디스크 온도변화 측정결과를 바탕으로 상온과 여름철의 기온 상승시를 고려하여 300°C로 피로시험 온도를 결정하여 피로시험을 수행한 결과, 디스크 재료의 S-N 선도는 기율기와 피로한도 모두 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 시험에 사용한 디스크 재료의 경우에는 300°C까지의 온도 범위에서 열화에 따른 재료의 물성변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 하지만 현재 문제가 되고 있는 열에 의한 균열발생 문제 해결 등 내구성을 향상시키기 위해서는 본 연구결과를 바탕으로 온도별 파괴인성 및 균열진전, 열전도 등 고려한 보다 심화된 연구가 필요로 한다.

참고문헌

1. 이치우, 장건익, 김종태, 열충격이 작용하는 취성구조의 신뢰성 평가, 한국해양공학회지, 12, 1, 1998, pp.58-64
2. 이강용, 김종성, 취형석, 김건영, 열충격하에 있는 반타원균열에 대한 파괴건전성 평가, 대한기계학회 논문집, 18, 12, 1994, pp.3163-3148
3. ASTM E466
4. ASTM E468

5. 김낙수, 임용택, 진종태 공역, 공업재료 가공학, 반도출판사, 1993
6. Anderson, Fracture Mechanics 2nd, CRC, 1995
7. A. Fissolo, C. Robertson & V. Maillot, Prediction of crack initiation and growth under thermal fatigue, Thermomechanical Fatigue and Fracture, WIT press, 2002, pp67-103