

온도변화에 따른 철도차량용 제동디스크의 물성치 변화에 관한 연구

A Study on the Mechanical Properties of the Braking Disk due to the Change of Temperature

김재훈*
Kim, Jae-Hoon

강부병**
Kang, Bu-Byoung

김형진***
Kim, Hyeong-Jin

석창성****
Seok, Chang-Sung

ABSTRACT

This study investigates the change of the temperature and mechanical properties of the braking disk 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 Chunan. In the 20°C-300°C, the 0.2% offset yield strengths of the disk (GC25-30 material) are a little down to the reference value, but the linear relation of tensile test result is not find from the linear change of temperature. However, J_{Ic} values have the inverse proportion to the temperature, and the J_{Ic} value at 200°C decrease 30.55% from the J_{Ic} value of the room temperature. This result means that the crack length on the braking disk is rapidly increase at 200°C

1. 서론

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 제동거리기준을 만족시키며 운전해야만 하는 상황이다. 특히 철도차량에 있어서 제동은 안전과 직결되는 중요한 요소로서 제동시스템과 제동장치의 신뢰성 확보기술 및 평가기술은 매우 중요하다. 특히 철도차량의 제동장치 중 제동디스크는 여러 가지 운전 조건에서 운전되어야 하는 부품으로 디스크의 마찰면에서 미소균열이 발생하는 등 제동시스템의 수명단축이나 심각한 사고 발생 가능성이 내재되어 있다. 실제로 철도차량이 운전될 때 제동디스크는 운전과 제동을 반복하며 라이닝과의 마찰에 의하여 열이 발생된다. 이때 발생된 열로 인해 열응력 피로가 균열 생성에 커다란 영향을 주게 된다. 그러나 이러한 제동디스크의 균열 발생을 방지하기 위해 제동디스크 재질의 열 영향에 대한 연구가 되어있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재 철도차량에서 사용되고 있는 제동디스크 온도변화에 대한 실차 시험을 수행하여 실제 운행시 제동디스크의 표면온도 변화를 분석하였으며, 이 온도변화를 바탕으로 인장시험과 J-Integral 시험 등 제동디스크 물성변화 연구를 수행하여 제동디스크의 온도변화에 따른 재료특성 및 신뢰성을 확보하고자 하였다.

* 한국철도기술연구원 주임연구원, 비회원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

**** 성균관대학교 기계공학과, 비회원

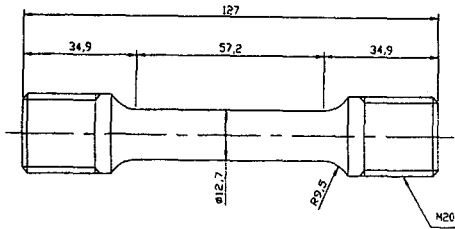


그림1 인장시편 설계도면

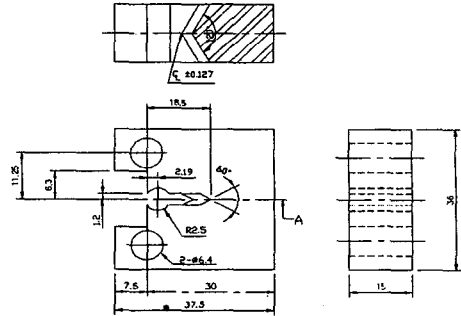


그림2 CT시편 설계도면

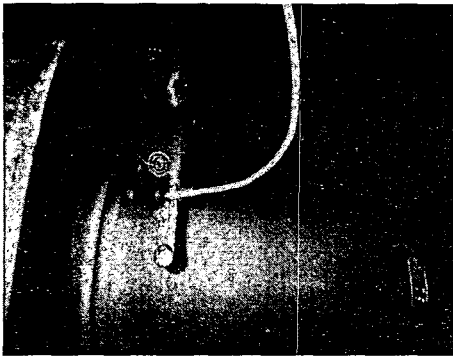


그림3 비접촉 온도센서 장착 위치 (전면)

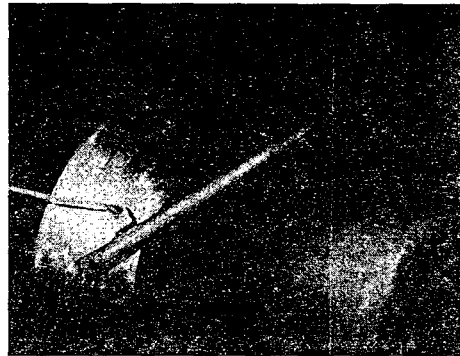


그림4 비접촉 온도센서 장착 위치 (측면)

2. 재료 및 시험방법

2.1 재질 및 시편

시험은 GC25-30 수준의 합금주철 재질의 12공 형상 제동디스크를 사용하였다. 인장시험 및 J-Integral 시험을 위하여 그림1, 2의 설계도면과 같이 인장시편과 J-Integral 시험용 CT시편을 동일한 제동디스크에서 가공하여 사용하였다. 이때 실제 제동디스크 단면의 제동시 열충격 방향성을 고려하여 시편을 가공하였다.

2.2 시험방법

2.2.1 제동디스크 온도변화 측정

실제 주행시 발생하는 제동디스크 표면의 온도변화를 측정하기 위해 서울-천안 구간에서 새마을호를 이용하여 상업운전과 동일한 방법으로 2번(상행, 하행)의 제동디스크 표면 온도변화 측정 시험을 수행하였다. 상, 하행 시험의 간격은 제동디스크의 공랭을 위하여 20분간의 간격을 두고 시험을 수행하였다. 온도변화 측정은 그림3, 4와 같이 새마을호 동력궤차의 제동디스크 측면에 비접촉식 적외선 온도 센서를 장착하여 실시간으로 제동디스크 표면의 온도변화를 측정하였다.

2.2.2 인장시험

인장시험은 INSTRON사 1332 모델의 UTM과 고온 항온조를 사용하여 시험하였다. 시험온도는 새마을호 제동디스크 표면온도 결과를 고려하여 상온(20℃), 100℃, 200℃, 300℃에서 수행하였다.

2.2.3 J-Integral 시험

본 연구에서는 J_{IC} 값을 측정하기 위해 인장시험과 마찬가지로 INSTRON사 1332 모델의 UTM과 고온 항온조를 사용하여 ASTM E 813 규정을 따라서 실험하였다. 먼저 실험을 통해 하중-하중선 변위선도 작성한 후 제하점플라이언스법을 이용하여 균열 길이를 계산하였다. 그리고 J-Integral 값을 계산하였다. 이후 둔화선(blunting line)을 그려서 둔화선의 0.2mm offset line과 회귀 곡선이 만나는 지점에서 J_Q 결정하고, J_{IC} 조건들을 만족할 때, J_Q 값을 J_{IC} 값으로 결정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 새마을호 주행시 제동디스크의 온도변화

서울-천안 상, 하행 구간에 대하여 새마을호의 제동디스크 표면 온도변화를 측정하였다. 그림5는 서울에서 출발하여 천안 도착 때까지의 새마을호 제동디스크의 표면 온도변화에 대한 프로파일이며, 표1은 그림5에서 표시한 각 제동구간에 대한 제동초기 및 제동종료 속도, 제동 전 온도 및 각 제동구간의 최고 온도를 나타내고 있다. 초기 출발구간에서 새마을호 제동디스크의 표면온도는 상온(20℃) 근처의 온도를 나타내고 있다. 하지만 열차가 가속과 감속을 반복함에 따라 제동디스크의 표면온도는 제동마찰열에 의해 급격히 상승하며, 각 제동 구간에서는 마찰에 의한 온도 상승과 공랭으로 인한 온도 하강이 반복적으로 발생함을 확인할 수 있다. 특히, 계속되는 제동에 의해 제동디스크의 표면에는 열에너지가 축적되어 주행거리가 길어짐에 따라 주행초기와 비교할 때 동일한 속도에서 제동이 이뤄졌을 경우에도 제동디스크 표면의 온도는 급격하게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이 경우에도 공랭에 의해 제동디스크의 표면온도는 빠르게 냉각된다. 따라서 제동디스크는 열용력에 의한 피로를 계속적으로 받고 있다. 또한 그림6과 표2은 천안을 출발하여 서울에 도착할 때까지 제동디스크 표면 온도변화를 나타낸 것이다. 이 경우 서울-천안 구간과는 다르게 제동디스크의 표면온도는 상온 근처까지 냉각되기에 충분한 시간(20분 정차)을 갖지 못했기 때문에 약 100℃ 부근 상태로 높게 측정되었다. 이후의 제동 과정에도 축적된 열에너지가 많기 때문에 서울-천안 구간과 비교하여 상대적으로 표면온도가 높게 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 상, 하행구간의 평균온도와 최고온도를 비교한 결과를 통해 극명하게 나타난다. 표3와 같이 새마을호 제동디스크의 평균온도와 제동시 최고온도 모두 천안-서울 구간에서 높게 나타나는 것으로 측정되었다. 그리고 두 주행결과를 바탕으로 새마을호 제동디스크는 주행시 평균적으로 100℃ 부근의 온도상태에 있으며, 제동 조건에 따라서 200℃ 이상의 고온으로 상승과 하강을 반복하는 것으로 확인되다.

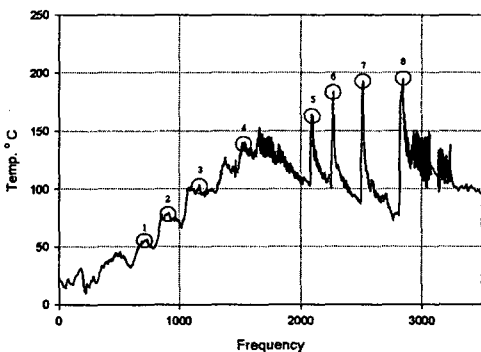


그림5 서울->천안 제동디스크 표면온도 변화

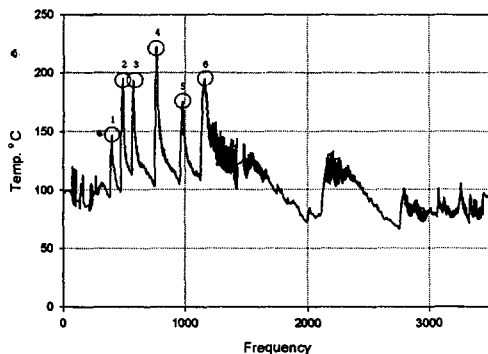


그림6 천안->서울 제동디스크 표면온도 변화

표1 서울-천안 제동조건 및 온도변화

측정 회수	제동전 속도 (Km/h)	제동후 속도 (Km/h)	제동전 온도(℃)	최고 온도(℃)	비 고
1	135	110	32.5	56.7	
2	130	80	48.8	79.6	비상제동
3	130	110	66.8	103.7	
4	130	110	110.2	140.6	
5	130	90	102.8	164.5	비상제동
6	135	110	100.1	184.2	
7	135	100	87.1	192.9	
8	140	60	72.6	194.7	비상제동

표2 천안-서울 제동조건 및 온도변화

측정 회수	제동전 속도 (Km/h)	제동후 속도 (Km/h)	제동 전 온도(℃)	제동최고 온도(℃)	비 고
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	비상제동
5	135	110	104.9	175.8	
6	130	60	108.1	195.5	비상제동

표3 제동디스크 평균온도 및 최고온도 비교

구간	평균온도 (℃)	최고온도 (℃)
서울-천안	92.60	194.7
천안-서울	104.46	222.5

3.2 인장시험 및 J-Integral 결과

본 과제에서는 위의 실차 제동디스크 온도변화 측정결과를 바탕으로 인장시험 및 J-Integral 시험의 실험온도를 결정하였다. 실측시험에서 상, 하행선 구간의 제동디스크 최고온도는 약 200℃ 부근으로 측정되었으며, 평균온도의 경우는 100℃ 부근으로 측정되었다. 따라서 시험의 온도는 상온 및 100℃와 200℃에서 실험하기로 결정하였으며, 여름철의 기온 상승을 고려하여 300℃까지 실험 온도범위를 확대하였다. 인장시험 결과 제동디스크 재질의 물성치는 표4, 그림7과 같이 나타났다. 디스크의 재질이 GC25-30의 주물인 것을 고려할 때 표4의 항복강도는 문헌 값에는 못 미치지만 어느 정도 근사한 범위 값이 측정되었다. 하지만 그림7의 온도변화에 따른 인장시험의 물성변화에서는 일관성을 확인할 수 없었다. 시편모두 한 개의 디스크에서 가공하여 실험을 한 결과이나, 서로 다른 온도조건뿐만 아니라 동일한 온도조건에서 실험한 인장시험 결과도 서로 편차가 발생하였다. 이는 주물재질의 불균일성에 의한 것으로 사려되며, 현재로서는 온도에 따른 제동디스크의 신뢰성을 확인할 수 없었다.

하지만 표5와 같이 J-Integral 시험을 통한 J_{IC}값 측정결과는 온도변화에 따라 일관성이 나타나, 온도가 증가할수록 더 적은 에너지로도 균열이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 주목할 점은 상온 대비 J_{IC}의 감소는 200℃에서 30.55%로 가장 급격하게 발생한다는 사실이다. 100℃ 경우 균열진전에 소모되는 에너지는 상온대비 10%의 감소가 발생했으며, 300℃의 경우에는 200℃와 비교할 때 약3%만이 감소했다. 이는 현재의 제동디스크 재질일 경우 여러 원인에 의해 균열이 존재할 때 200℃에서 상대적으로 균열진전이 급격히 증가한다는 것을 의미한다. 그리고 이 온도는 본 연구의 제동디스크 온도변화 실측정 결과상 제동 최고 온도에 해당하는 값으로 현재의 새마을호 열차 운행에서 빈번히 발생하는 온도변화 구간에 포함된다. 따라서 제동디스크의 내구성을 향상시키기 위해서는 본 연구에서 확인한 200℃에서 발생하는 급격한 균열진전 가속 문제에 대해 좀더 종합적인 연구가 필요하다.

표4 온도 변화에 따른 제동디스크 인장시험 결과

Temp. (℃)	상온(20)		100		200		300	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Yield strength (MPa)	230.9	219.1	232.5	222.6	210.1	253.2	220.1	191.2
Ultimate strength (MPa)	305.5	278.9	289.4	288.9	267.6	299.7	295.2	287.7

표5 온도 변화에 따른 제동디스크 J_{IC}

Temp. (℃)	상온(20)	100	200	300
J _{IC}	4.19	3.77	2.91	2.79
상온대비 감소		10.02 %	30.55 %	33.41 %

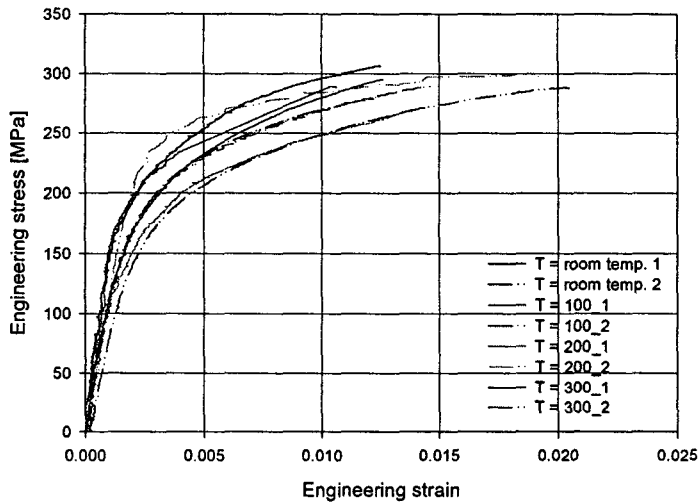


그림7 온도별 제동디스크 인장시험 결과 그래프

4. 결론

본 연구에서는 현재 철도차량에서 사용되고 있는 제동디스크의 온도변화 및 이에 따른 물성변화 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 새마을호 제동디스크는 온도측정결과 주행시 평균온도는 100℃ 부근이며, 비상제동 등 제동 조건에 따라서 200℃ 이상의 고온으로 상승한다는 결과를 확인하였다.
- 각 제동 구간에서 마찰에 의한 온도 상승과 공랭으로 인한 온도 하강이 반복적으로 발생하며, 계속되는 제동에 의해 제동디스크의 표면에는 열에너지가 축적되어 주행거리가 길어짐에 따라 주행초기와 비교할 때 동일한 속도에서 제동이 이뤄졌을 경우에도 제동디스크 표면의 온도는 급격하게 상승하는 것을 확인할 수 있다.
- 디스크의 재질이 GC25-30 주물인 것을 고려할 때 항복강도는 문헌 값에는 못 미치지만 어느 정도 근사한 범위 값이 측정되었다. 하지만 온도변화에 따른 인장시험의 물성변화에서는 일관성을 확인할 수 없었다.
- J-Integral 시험을 통한 J_{IC}값 측정결과는 온도변화에 따라 일관성이 나타나, 온도가 증가할수록 더 적은 에너지로도 균열이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 주목할 점은 상온대비 J_{IC}의 감소는 200℃에서 30.55%로 가장 급격하게 발생한다는 사실을 확인하였다.

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, 대한기계학회논문집, 18, 12, 1994, pp.3163-3148
3. 석창성, 최용식, 양원호, 김영진, 재료의 탄소성파괴인성치 JIC의 온도 의존성에 관한 연구(I), 대한기계학회논문집, 13, 4, 1989, pp.653-659
4. 석창성, 최용식, 양원호, 김영진, 재료의 탄소성파괴인성치 JIC의 온도 의존성에 관한 연구(II), 대한기계학회논문집, 14, 4, 1990, pp.866-872
5. 윤석호, 윤기봉, 김승태, 서창민, 열화된 Cr-Mo-V강의 고온 파괴인성값 JIC의 평가, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 1992, pp.244-249
6. 장윤석, 석창성, 김영진, 원자력 배관재료의 파괴저항곡선 예측(2), 대한기계학회논문집 A권, 21, 11, 1997, pp.1789-1795
7. 김낙수, 임용택, 진종태 공역, 공업재료 가공학, 반도출판사, 1993
8. Anderson, Fracture Mechanics 2nd, CRC, 1995
9. A. Fissolo, C. Robertson & V. Maillot, Prediction of crack initiation and growth under thermal fatigue, Thermomechanical Fatigue and Fracture, WIT press, 2002, pp67-103

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 철도시스템 선진화 기술 연구 사업으로 지원된 “시스템 성능향상 핵심기술”과제의 연구결과 일부입니다.