

철도차량용 제동디스크의 온도 변화 측정 및 물성치 변화에 관한 연구(I)

A study on the Mechanical Properties of the Braking Disk due to the Temperature Change(I)

김재훈*

Jae-Hoon Kim

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 Chun-an. As a result of measuring, we determine the temperature of test(tensile and J-integral) at 20°C, 100°C, 200°C and 300°C. In the test, the material values are decreased by the increasing of the temperature. But ratio of decreasing is the largest at 200°C, the tensile test value is decreased about 10% and the J-integral test value is decreased 30%. The mechanical properties of this material are mostly changed at 200°C.

Keywords : Braking disk(제동 디스크), Temperature change(온도 변화), Crack(균열), J-integral(J적분)

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 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 수명단축이나 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 커

다란 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[1-3].

따라서 본 연구에서는 실제 상업운전 구간에서 실차 시험을 통해 열차 주행 및 제동시 발생하는 제동 디스크 표면의 온도 변화를 측정하고 분석하였으며, 이 온도변화 분석 결과를 바탕으로 상온 및 고온에서 제동 디스크 재료에 대한 인장시험과 파괴인성 시험을 수행하여 제동 디스크의 온도변화에 따른 재료특성을 확인하고 제동 디스크의 신뢰성 확보의 한 기초를 마련하고자 하였다. 또한 이후 논문에서는 본 논문 결과를 바탕으로 상기 온도에서 피로시험을 수행할 예정에 있다

2. 재료 및 시험

2.1 시험재료

2.1.1 제동 디스크

시험은 GC 25~30 수준 편상흑연주철재질(이후 주철재질)의 12공(hole) 형상 제동 디스크를 사용하였다. 인장

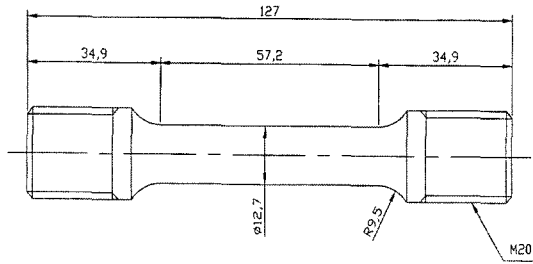


Fig. 1. The tensile test specimen

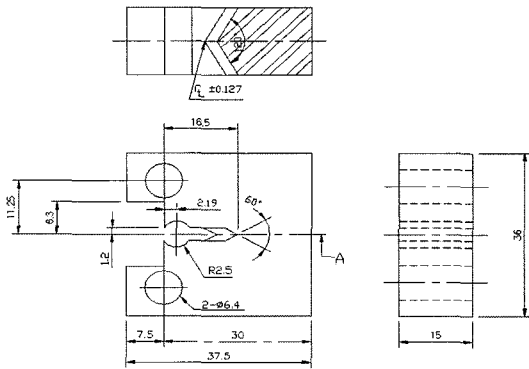


Fig. 2. The J_{1C} test CT specimen

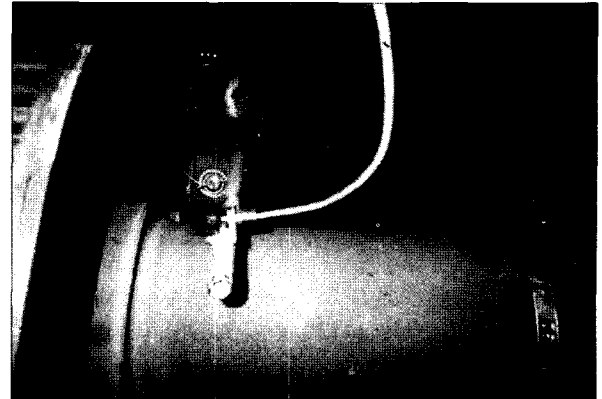


Fig. 3. The non-detective sensor on the disk(front)

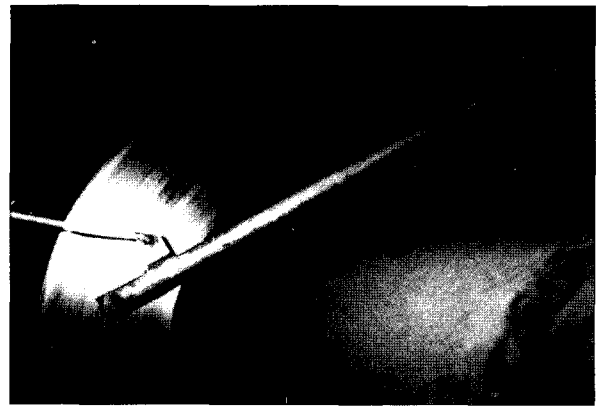


Fig. 4. The non-detective sensor on the disk(side)

시험 및 파괴인성 시험을 위하여 Fig. 1~2 와 같이 인장과 파괴인성 시험용 시편들을 동일한 제동 디스크에서 가공하여 사용하였다. 이때 실제 제동시 제동디스크 단면의 방향성을 고려하여 제동 디스크의 원주방향으로 시편을 채취하여 가공하였다.

2.2 시험방법

2.2.1 제동 디스크 온도변화 측정

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.

2.2.2 인장 및 파괴인성 시험

인장시험은 INSTRON 사의 model 1332 UTM과 고온 항온조(chamber)를 이용하여 시험하였다. 인장 시험은 ASTM 규격에 맞추어 시험을 하였으며, 시험온도는 제동 디스크 표면의 온도변화 측정시험 결과를 고려하여 상온(20℃), 100℃, 200℃, 300℃ 에서 수행하였다.

파괴인성 시험(J-integral)은 인장시험과 마찬가지로 INSTRON 사의 model 1332 과 고온 항온조를 사용하여 ASTM E 813 규정에 따라 시험을 수행하였다.

특히 파괴인성치의 임계값인 J_{1C} 값을 구하기 위하여 먼저 하중-하중선 변위 선도를 작성한 후 제하 컴플라이언스법을 이용하여 균열 길이를 계산하였다. 그리고 J-Integral 값을 계산한 후 둔화선(blunting line)을 그려서 둔화선의 0.2 mm offset line 과 회귀 곡선이 만나는 지점에서 J_Q 결정하고, J_{1C} 조건들을 만족할 때, J_Q 값을 J_{1C} 값으로 결정하였다. 이때 온도는 인장시험과 마찬가지로 상온(20℃), 100℃, 200℃, 300℃ 에서 수행하였다[3,4,7].

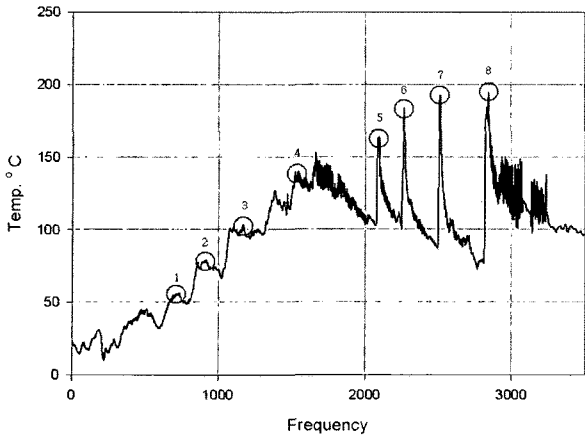


Fig. 5. The temperature profile on the disc surface (Seoul->Chun-an)

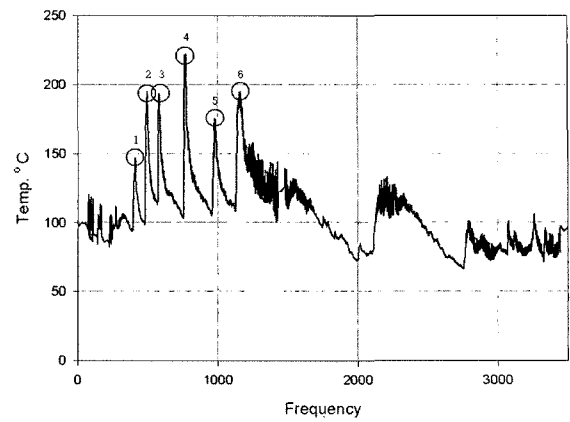


Fig. 6. The temperature profile on the disc surface (Chun-an->Seoul)

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

3. 결과 및 고찰

3.1 열차 주행시 제동 디스크 온도변화

경부선 서울-천안 상, 하행선 구간에서 새마을호를 이용하여 제동디스크 표면의 온도변화를 측정하였다. Fig. 5~6은 서울-천안 구간에서 주행시 측정된 새마을호 제동 디스크 표면의 온도 변화 프로파일이며, Fig. 5에서 표시한 각 제동구간에 대한 제동전후 속도 및 온도는 Table 1 - 2에 나타내었다. Fig. 5~6에서 frequency는 비접촉 센서의 측정회수이며, 1초당 1번씩 표면온도를 측정하였다.

Fig. 5에 따르면 초기 출발구간에서 새마을호 제동 디스크의 표면 온도는 상온(20°C)과 유사한 상태를 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. 5에 표시된 1~4번 주행 초, 중기 구간의 제동과 이후 구간의 제동은 온도 변화 프로파일이 서로 다른 것을 확인하였다. 먼저 1~4번의 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 5번 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 디

Table 3. The ave. and max. temperature on the disc.

	Ave. Temp(°C)	Max. Temp(°C)
Seoul-> Chun an	92.60	194.7
Chun an -> Seoul	104.46	222.5

Table 4. The tensile test due to the temperature change

Temp.(°C)	room (20)	100	200	300
Yield strength (MPa)	230.9	222.6	210.1	191.2
per room temp.		-3.6%	-9.0%	-17.2%
Ultimate strength (MPa)	305.5	288.9	267.6	287.7
per room temp.		-5.4%	-12.4%	-5.8%

Table 5. The JIC due to the temperature change

Temp.(°C)	room(20)	100	200	300
JIC [kJ/m ²]	4.19	3.77	2.91	2.79
per room temp.		-10.02 %	-30.55 %	-33.41 %

스크 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 지속적으로 받게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 5와 같이 위 결과를 바탕으로 본 연구에서 사용된 제동 디스크는 100°C ~ 150°C 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 정차후 시험 재개)을 갖지 못했기 때문에 약 100°C 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 최고 온도를 비교한 결과 모두 뒤이어 주행한 상행 구간에서 제

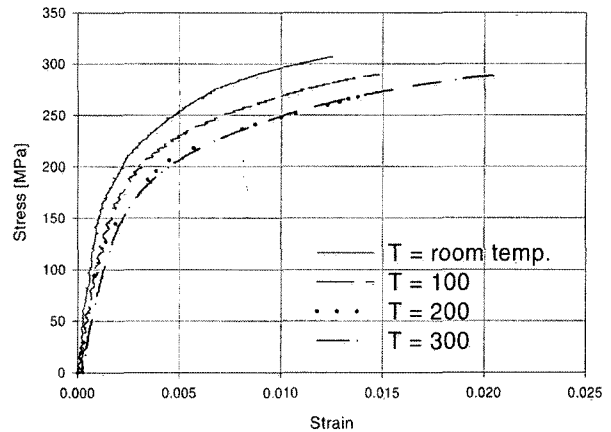


Fig. 7. The temperature profile on the disc surface

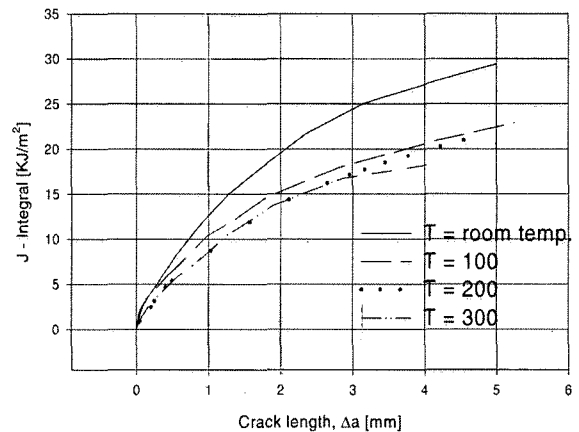


Fig. 8. The temperature profile on the disc surface

동디스크의 평균온도와 제동시 최고온도가 높게 나타났다.

3.2 온도별 디스크 재질의 인장 및 파괴인성 시험 결과

본 연구에서는 열차 주행시 제동 디스크 온도변화 측정결과를 바탕으로 제동 디스크 재질에 대한 인장 및 파괴인성 (JIC)시험의 온도조건을 결정하여 Fig. 9-10과 같이 시험하였다. Table 3과 같이 실차시험에서 측정된 제동 디스크 표면의 최고온도는 약 200°C 이며, 평균온도는 약 100°C로 측정되었다. 따라서 인장 및 JIC 시험 온도는 상온 및 100°C, 200°C 와 여름철의 기온 상승을 고려하여 300°C까지 실험 온도범위를 확대하여 결정하였다.

본 연구에서 사용한 상용 제동 디스크의 재질은 GC 25 ~ 30 계열의 주철재질로 문헌상의 인장 강도는 250 ~ 320 MPa 로 알려져 있다. 인장시험 결과 상온에서 제동 디스크의 인장강도는 305.5 MPa 로 문헌상의 범위 내에 들어오는 것으로 확인되었다. 그리고 Table 4 와 Fig. 7 과 같이 상기

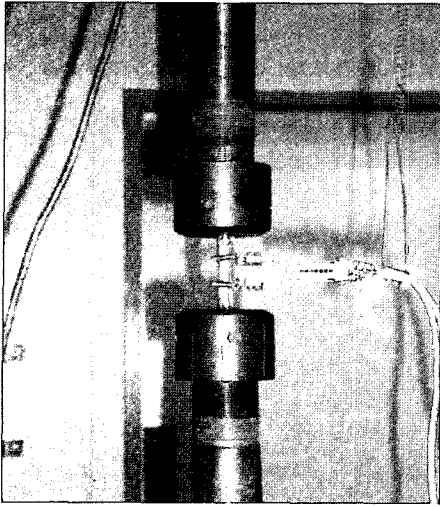


Fig. 9. The tensile test at room temp.

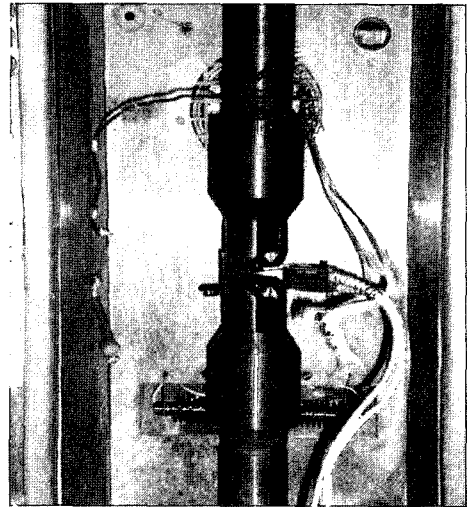


Fig. 10. The J-integral test in the chamber

조건인 온도에서 인장시험을 수행한 결과, 제동 디스크 재질은 온도 증가에 따라 다른 재질과 마찬가지로 인장강도와 항복강도 값이 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 온도별 감소량의 비교에 있어서는 Table 4의 결과와 같이 주철재질은 100℃ 온도에서는 상온과 비교하여 인장과 항복강도가 크게 변화되지 않으나, 200℃ 이상의 고온에서는 약 10% 이상 감소되는 것으로 확인되었다.

또한 여러 원인에 의하여 제동 디스크 표면에 균열이 존재할 때, 온도변화에 따른 균열진전 특성을 파악하기 위하여 J_{IC} 값을 측정하였다. 온도별 시험결과 J-integral의 임계값인 J_{IC} 값 또한 인장시험 결과와 마찬가지로, 온도변화에 대하여 일관성이 나타나는 것을 확인하였다. 하지만 Table 5에서 보이는 것과 같이 J_{IC} 값은 온도가 증가할수록 인장강도의 감소량보다 상대적으로 큰 비율로 상온의 J_{IC} 값보다 감소하며, 온도에 민감한 것을 확인하였다. 이 결과는 온도가 높을수록 주철재질의 제동 디스크는 더 적은 에너지로도 쉽게 균열이 증가한다는 사실을 말해주고 있다. 특히 주목할 점은 인장 결과와 마찬가지로 J_{IC} 값 또한 상온과 비교하여 200℃에서 30.55%로 가장 급격하게 감소 사실이다. 100℃ 경우 J_{IC} 값은 상온대비 10% 정도 감소에 그쳤으며, 300℃의 경우에는 200℃와 비교할 때 약 3%만이 감소했다. 이 결과를 바탕으로 주철재질 제동 디스크는 균열이 존재할 때, 200℃에서 상대적으로 균열진전이 급격히 증가한다고 판단된다. 하지만 Fig. 8에서 보는바와 같이 200℃와 300℃의 임계값 이후의 J-Integral 값은 거의 차이가 없음을 알 수 있다.[6,8,9]

따라서 이러한 인장과 J_{IC} 시험 결과를 바탕으로 할 때, 현재 주철재질 제동 디스크는 약 200℃의 온도에서 상온과

비교할 때, 상대적으로 물성들이 저하되는 것으로 판단된다. 그리고 이러한 온도는 실측 온도 측정 결과를 바탕으로 볼 때, 제동 디스크의 열에너지 포화 온도와 유사하며, 현재의 새마을호 열차 운행에서 빈번히 발생하는 온도변화 구간에 포함된다. 그리고 이러한 특성이 제동 디스크 손상 원인 중에 하나로 판단되며, 제동디스크의 내구성을 향상시키기 위해서는 본 연구결과를 바탕으로 온도별 피로수명, 열전도 등 온도를 고려한 보다 심화된 연구를 수행할 예정이다.

4. 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) 실차시험에서 측정된 제동 디스크 표면의 최고온도는

약 200℃이며, 평균온도는 약 100℃로 측정되었다. 따라서 인장 및 J_{IC} 시험 온도는 상온 및 100℃, 200℃와 여름철의 기온 상승을 고려하여 300℃까지 실험 온도범위를 확대하여 결정하였다.

- (4) 인장시험 결과 상온에서 제동 디스크의 인장강도는 305.5 MPa로 문헌상의 범위 내에 들어오는 것으로 확인되었다. 그리고 제동 디스크 재질은 온도 증가에 따라 다른 재질과 마찬가지로 인장강도와 항복강도 값이 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 온도별 감소량의 비교에 있어서는 200℃ 이상의 고온에서는 약 10% 이상 감소되는 것으로 확인되었다.
- (5) 온도별 시험결과 J -integral의 임계값인 J_{IC} 값 또한 온도변화에 대하여 일관성이 나타나는 것을 확인하였다. 하지만 J_{IC} 값은 온도가 증가할수록 인장강도의 감소량보다 상대적으로 큰 비율로 상온의 J_{IC} 값보다 감소하며, 온도에 민감한 것을 확인하였다. 특히 주목할 점은 인장결과와 마찬가지로 J_{IC} 값 또한 상온과 비교하여 200℃에서 30.55%로 가장 급격하게 감소 사실이다. 하지만 200℃와 300℃ 각각의 J -Integral 값은 J_{IC} 이후에는 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 기본연구사업 (PK05003A)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이치우, 장건익, 김종태, 열충격이 작용하는 취성구조의 신뢰성 평가, 한국해양공학회지, 12, 1, 1998, pp.58-64
2. 이강용, 김종성, 최형석, 김건영, 열충격하에 있는 반타원균열에 대한 파괴건전성 평가, 대한기계학회논문집, 18, 12, 1994, pp.3163-3148
3. 석창성, 최용식, 양원호, 김영진, 재료의 탄소성파괴인성치 J_{IC} 의 온도 의존성에 관한 연구(I), 대한기계학회논문집, 13, 4, 1989, pp.653-659
4. 석창성, 최용식, 양원호, 김영진, 재료의 탄소성파괴인성치 J_{IC} 의 온도 의존성에 관한 연구(II), 대한기계학회논문집, 14, 4, 1990, pp.866-872
5. 윤석호, 윤기봉, 김승태, 서창민, 열화된 Cr-Mo-V강의 고온 파괴인성값 J_{IC} 의 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, pp.67-103