

철도차량용 제동디스크의 운행중 온도 변화 및 열전도도 측정 연구

A Study on the Temperature Change of Braking Disc and Thermal Conductivity during the Service

김재훈[†] · 구병춘* · 석창성**

Jaehoon Kim · Byeong-Choon Goo · Chang-Sung Suk

Abstract This study investigates the temperature change and thermal conductivity for the braking disc of the railway vehicle due to the types of train and service conditions. The temperature change was measured by non-contact Infrared thermometers. Average temperature was measured between 79.32°C and 104.46°C due to types of train and service section. In the same service section, the surface temperatures of Saemaul train were higher than Mugungwha train; the reason might have been the average service speed of Saemaul train (83km/h) was higher than Mugungwha train (107km/h), and the weight was similar 39t (Mugungwha) and 39.3t (Saemaul). But the maximum surface temperature was measured on the Mugungwha train; however the difference was not too big with the maximum temperature of Saemaul train. Also, the disc surface temperatures were changed due to the material of lining; metal and non-asbestos, on the same train and the same service section. In addition, the thermal conductivity was tested the thermal conductivities were increased by the increasing of the temperature. The change is too big between 100°C and 200°C. But each average value is small, and the mechanical property change is very low. As a result, we conclude that this disc is suitable for usage between 100°C and 300°C.

Keywords : Braking disk, Temperature change, Thermal conductivity

요 지 본 논문은 제동 디스크의 주행 중 온도변화를 측정하고 이에 따른 재료 특성을 확인하여 제동디스크의 신뢰성 확보의 기초 차원에서 연구를 수행하였다. 열차별 제동디스크 온도변화를 측정한 결과, 동일 구간에 대해서도 제동디스크 표면의 온도변화는 평균 및 최고 온도 모두 열차별로 상이한 것을 알 수 있다. 또한 동일구간 동일차량을 이용하여 제동디스크와 라이닝의 조합에 의한 온도변화를 측정한 결과, 규격을 만족하는 표준제품이라 하더라도 사용조합에 따라 표면의 온도 변화가 달라지는 것을 확인했으며, 따라서 제동디스크와 라이닝을 선택할 때는 반드시 이를 고려한 영향을 평가를 수행하여야 한다. 그리고 주행 중 디스크 온도변화 측정 결과를 바탕으로 100°C, 200°C, 300°C에서 일은 제동디스크의 열전도도 시험결과는 온도가 증가할수록 약간씩 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 변화는 100°C~200°C 사이에 변화가 가장 큰 것으로 나타났다.

주요어 : 제동디스크, 온도변화, 열전도도

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

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부
E-mail : lapin95@krii.re.kr

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

* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부

** 비회원, 성균관대학교, 기계공학부

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 재질의 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 재질의 신뢰성을 평가하는 연구가 수행되어야 한다. 하지만 국내는 아직 이러한 연구가 미비한 실정이다[1-3]. 실제로 제동디스크는 열차가 제동을 할 때 마다 마찰에너지에 의해 가열되고 다시 대류열전달에 의해 냉각되는 과정을 반복하기 때문에 열에 의한 피로를 받게 되며 열피로에 의한 영향으로 디스크 마찰면에는 열균열이 발생하기도 한다. 이러한 미소균열이 성장하여 부품의 안전성에 심각한 영향을 미치게 되고 균열로 인해 발생할 수 있는 제동디스크의 갑작스러운 파괴는 경제적으로 큰 손실은 물론 많은 인명 피해를 가져올 수 있다. 따라서 이러한 균열의 발생 원인이 되는 열적 피로에 대한 원인 분석 및 해결 방안에 대한 연구가 필요하며 그 중 제동디스크 운행 환경과 소재의 열전도도에 대한 평가가 필요한 실정이다. 재료의 열전도도는 온도에 따라 다양한 경향을 보인다. 일반적으로 순수금속의 경우, 온도증가에 따라 열전도도가 감소하는 경향을 보이는 반면에 합금의 경우는 온도증가에 따라 열전도도가 증가하는 경향을 보인다. 따라서 다양한 온도에서 가동 중인 부품에 대한 정확한 온도분포를 파악하기 위해서는 실제 가동 온도 범위에서의 온도별 열전도도 측정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실제 상업운전 구간에서 실차 시험을 통해 열차 주행 및 제동시 발생하는 제동 디스크 표면의 온도변화 프로파일을 측정하고 이를 통한 운행환경을 분석하였으며, 이 온도변화 분석 결과를 바탕으로 철도 차량 접촉 제동장치의 온도별 열전도도 측정시험을 수행하여 다양한 온도 조건에서의 디스크 소재의 열전도도를 확보하였다. 또한 온도변화 프로파일을 위한 실차 시험의 경우 추가로 제동디스크와 라이닝 조합에 따른 온도 변화도 측정하였다. 제동디스크와 라이닝 항상 조합으로 함께 사용하는 부품으로서 각각의 규격을 만족하는 디스크와 라이닝을 사용한 경우에도 사용 조합에 따라 제동 디스크 표면온도 프로파일 및 온도분포가 변화할 수 있으며, 이에 따라 예상치 못한 제동디스크 손상이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 제동디스크와 라이닝 조합에 따른 디스크 표면 온도 변화 프로파일도 측정하였다.

2. 재료 및 시험

2.1 제동 디스크

시험은 GC250~300수준 편상흑연주철재질(이후 주철재질)의 12공(hole) 형상 제동 디스크를 사용하였다. 시험편의 경우에는 제동시 제동디스크 단면의 방향성을 고려하여 제동 디스크의 원주방향으로 시험편을 제취하여 가공하였다.

2.2 제동 디스크 온도변화 측정

실제 주행시 발생하는 제동 디스크 표면의 온도변화를 측정하기 위해 Table 1과 같이 새마을호와 무궁화호에 대한 제동 디스크 표면 온도변화 측정 시험을 수행하였으며, 각 측정은 실제 열차의 상업운전과 동일한 조건에서 수행되었다. 측정방법으로는 미국 레이텍(Raytek Corp.)사의 비접촉식 적외선 온도센서(Noncontact Infrared Thermometers)인 Thermalert MID를 Fig. 1과 같이 새마을호와 무궁화호의 대차에 설치하여 초당 4회씩 제동디스크 표면을 스캔하여 실시간으로 온도변화를 측정하였다. 이때 비접촉식 적외선 온도센서의 재질 표면에 따른 조시율에 따른 온도보정을 위하여 실차 실험전에 다이ना모 시험기를 통하여 동일한 제동 디스크 재질에 대한 예비 실험을 수행하였다.

2.3 열전도도 시험

열전도도 시험은 제동 디스크 표면의 온도변화 측정시험 결과를 고려하여 100℃, 200℃, 300℃에서 수행하였으며, 시험방법은 ASTM E1225[4] 규격에 따라 수행하였다.

Table 1. Kinds of train for temperature measurement

Train Type	No. of measurement point	Interval
Saemaul	1	20 minutes
Mugungwha	1	10 hours

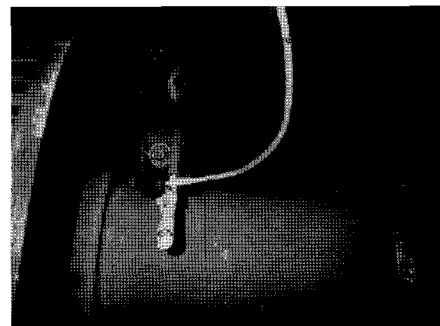


Fig. 1. The non-detective sensor on the disk

3. 결과 및 고찰

3.1 열차 주행시 제동 디스크 온도변화

먼저 비접촉식 적외선 온도 센서를 이용하여 열차종류별 제동디스크의 표면 온도변화를 측정하였다. 그 결과 새마을호 열차와 무궁화호 열차의 제동디스크의 온도변화는 Fig. 2 - Fig. 5와 같이 각 제동디스크는 열차 운행시 제동마찰에 의한 온도상승과 공냉에 의한 냉각 과정을 계속적으로 반복되고 있는 것으로 측정되었다. 이는 열피로 싸이클 과정으로써 열크랙 및 열피로 파괴의 발생 원인이 된다. 하지만 이때 제동디스크의 온도 변화 프로파일은 열차 종류 및 운행 조건 등에 따라 달라지며, 본 연구에서 측정된 열차 종류별 제동디스크 표면 평균온도와 최고온도는 Table 2, Table 3과 같이 차

이가 나타났다.

제동디스크 표면 평균온도의 경우 새마을호 열차가 상, 하행선 모두 무궁화호 열차보다 13.28℃(서울-천안) 와 15.04℃(천안-서울)로 높게 나타났다. 이는 새마을호 열차의 평균 주행속도가 107km/h(경부선)로 무궁화호 열차 평균 주행속도 83km/h(경부선)보다 더 빠르기 때문으로 판단된다. 이 경우 새마을호 무궁화호 객차의 지중은 39t과 39.3t으로 거의 동일하다. 하지만 최고 온도의 경우에는 무궁화호 열차에서 228.9℃로 측정되었다. 그러나 이 경우 그 값의 차이는 6.4℃로 새마을호 열차 최고온도 222.5℃d와 매우 근사한 것을 확인하였다.

또한 제동디스크와 라이닝의 조합별 제동디스크 온도 변화를 측정하기 위하여 무궁화 호 객차를 이용해서 서울-부산 상,

Table 2. Average & maximum temperature of disc surface (Saemaul)

Section	Ave. temp.(℃)	Max. temp. (℃)
Seoul-Cheonan	92.60	194.7
Cheonan-Seoul	104.46	222.5

Table 3. Average & maximum temperature of disc surface (Mugungwha)

Section	Ave. temp.(℃)	Max. temp. (℃)
Seoul-Cheonan	79.32	147.8
Cheonan-Seoul	89.42	228.9

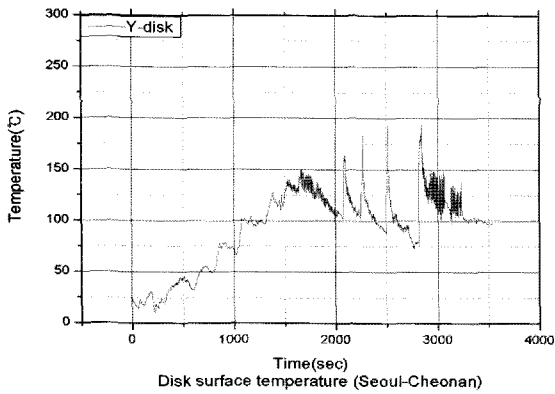


Fig. 2. Temperature change profile of disc surface for Saemaul (Seoul-Cheonan)

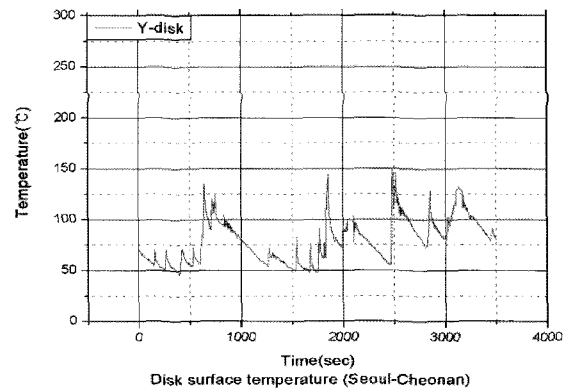


Fig. 4. Temperature change profile of disc surface for Mugungwha (Seoul-Cheonan)

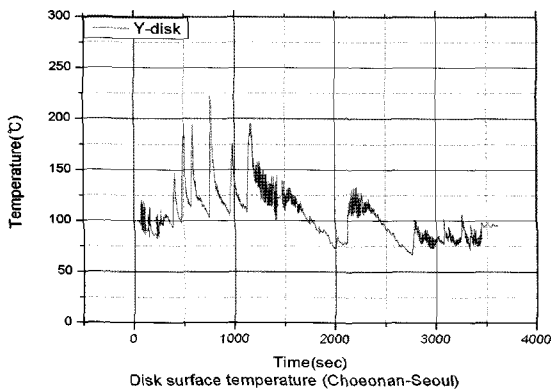


Fig. 3. Temperature change profile of disc surface for Saemaul (Cheonan-Seoul)

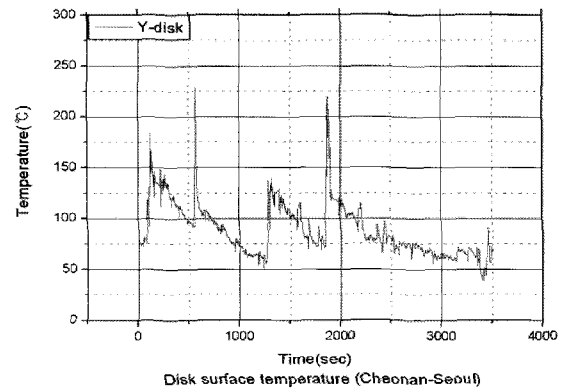


Fig. 5. Temperature change profile of disc surface for Mugungwha (Cheonan-Seoul)

하행 구간의 상업운전에 대하여 온도변화 측정 시험을 수행하였다. 이 시험의 경우 제동디스크와 라이닝 사이의 접촉면 온도를 측정하기 위하여 비접촉식 적외선 온도센서가 아닌 접촉식 온도센서를 제동디스크와 라이닝의 접촉면에 설치하였다. 시험 대상은 Y사에서 제작한 제동디스크와 철계, 비석면계 라이닝 2 종류를 사용하였다.

각각의 제동디스크와 라이닝의 조합은 무궁화 호 객차의 대차에 Y사 제동디스크를 장착한 후 각 대차의 1위 축에는 비석면계 라이닝을 2위 축에는 철계 라이닝을 장착하여 시험차를 준비하였다. 비교 시험결과 제동디스크 평균온도에 있

어 제동디스크와 라이닝의 종류별 조합에 따라서 차이가 있음을 확인하였다. Table 4에서와 같이 서울-부산구간 상, 하행선 모두에서 철계 라이닝을 사용한 조합의 경우가 비석면계 라이닝을 사용한 경우에 비해 평균온도에서 약 20°C 정도 높은 것으로 확인되었다. 이 결과는 Fig. 6 - Fig. 7 구간별 온도 변화 그래프에서도 쉽게 확인되며, 서울-부산구간 상, 하행선 모두에서 철계 라이닝을 사용한 경우의 온도변화 결과가 위쪽에 분포하고 있다. 하지만 최고온도의 경우에는 종류별 특성과 구간 및 운행 조건에 따라 차이가 나타났다. 서울-부산 운행의 경우에는 구간별 최고온도는 비석면계를 사용한 것에서 관측되었으나, 부산-서울 운행에서는 평균온도뿐 아니라 최고온도도 철계 라이닝에서 나타났다. 따라서 각각 제동디스크와 라이닝 규격을 만족하는 표준 제품이라 하더라도 사용 조합에 따라 표면의 온도 변화가 달라지기 때문에 제동디스크와 라이닝을 선택할 때는 이를 고려한 영향을 평가하여 각각의 안전성을 고려한 측면에서 각각의 성능을 최적화할 수 있어야 한다. 실제로 각각의 규격을 만족하는 디스크와 라이닝을 사용한 경우에도 사용 조합을 고려하지 않아 조합의 문제로 인하여 디스크에 열 균열 등의 문제가 발생된 사례가 보고되고 있다.

Table 4. Average & maximum temperature of disc surface due to combination of disc and lining

Section	Lining type	Ave. temp.(°C)	Max. temp. (°C)
Seoul-Pusan	Non-asbestos	75.39	448
	Metal	103.90	393
Pusan-Seoul	Non-asbestos	61.48	145
	Metal	91.33	253

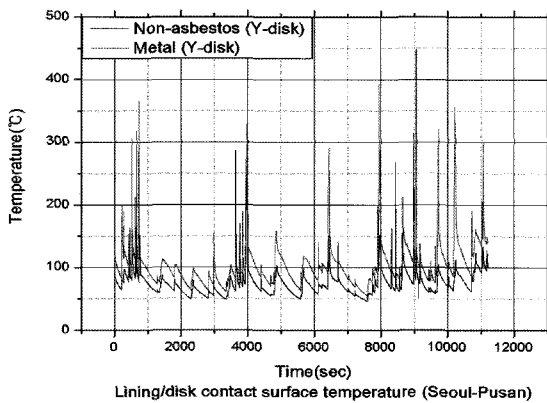


Fig. 6. Temperature change profile of disc surface due to combination of disc and lining (Seoul-Pusan)

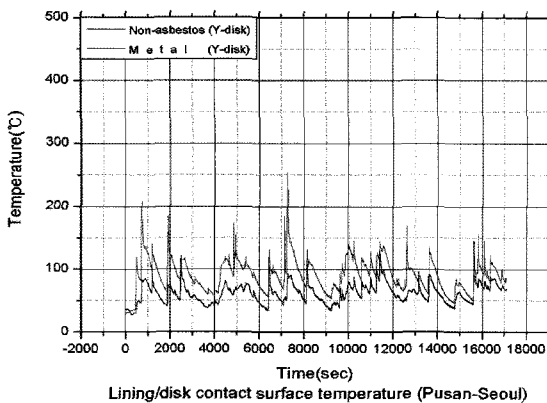


Fig. 7. Temperature change profile of disc surface due to combination of disc and lining (Pusan-Seoul)

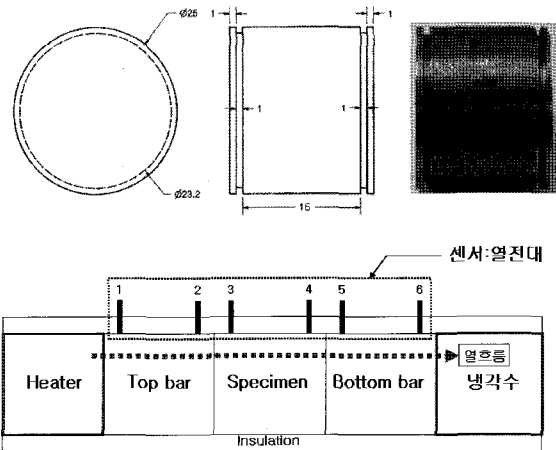


Fig. 8. Specimens and system of thermal conductivity test

Table 5. Thermal conductivity results due to temperature

Test temp. (°C)	Specimen	Thermal conductivity(W/m°C)				Ave.
		Test1	Test2	Test3	Test4	
100°C	New1	66.2	60.9	56.7	61	64.1
	New2	66.7	57.8	75.6	67.5	
200°C	New3	68.3	73.5	68.2	66.8	68.8
	New4	68.2	71.6	71.6	62.3	
300°C	New5	71.2	68.8	70.7	68.3	69.8
	New6	68.9	68.4	71.3	70.6	

3.2 온도별 디스크 재질의 열전도도 시험 결과

본 연구에서는 열차 주행시 제동 디스크 온도변화 측정결과를 바탕으로 제동 디스크 재질에 대한 열전도도 시험 온도 조건을 결정하였다. Table 2, Table 4와 같이 실차시험에서 측정된 제동 디스크 표면의 최고온도는 몇몇 경우(약 450°C 등) 이외에는 주로 300°C 이하이며, 평균온도는 약 100°C로 측정되었다. 따라서 시험 온도는 100°C, 200°C, 300°C까지 실험 온도범위를 결정하였다.

시험방법은 ASTM E1225 시험규격에 따라 Fig. 8과 같이 시험편 및 시험 시스템을 제작하여 수행하였다. 이때, 시험편은 측정 온도에 도달한 뒤, 시험편의 각 센서로부터 출력되는 온도가 일정하게 유지되도록 1시간 ~ 1시간 30분 정도 정상 상태를 유지하였다. 온도 측정부에서 각각의 온도를 측정하여 식 (1)을 이용, 열전도도를 계산하였다. 각각의 시험편에 대하여 4회 시험하였고, 그 값을 평균하여 열전도도를 산출하였다.

$$\lambda_s = \frac{(Z_4 - Z_3)}{(T_4 - T_3)} \left[\frac{\lambda_T}{2} \frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} + \frac{\lambda_B}{2} \frac{T_6 - T_5}{Z_6 - Z_5} \right] \quad (1)$$

여기서 λ_s : 시험편의 열전도도, λ_T : Top bar의 열전도도, λ_B : Bottom bar의 열전도도, Z_n : n번째 센서까지의 거리, T_n : n번째 센서의 온도이며, 시험에 사용된 Top bar와 bottom bar의 온도에 따른 열전도도는 λ_T : 364[W/m°C], λ_B : 1.15747*(92+0.1944T)[W/m°C] (0-180°C), 147[W/m°C] (180°C 이상)와 같다.

시험결과 100°C, 200°C, 300°C에서 얻은 제동디스크의 열전도도는 Table 5와 같다. 제동디스크의 열전도도는 온도가 증가할수록 약간씩 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 변화는 100°C에서 200°C 사이에 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 하지만 전체적인 값에서 온도에 따른 열전도도는 유사하며, 앞서 실험한 제동디스크의 실차 온도측정 결과를 바탕으로 할 때, 현재 새마을호와 무궁화호 열차에 사용하는 제동디스크의 경우에는 주 사용온도구간, 특히 200°C에서 300°C 사이에서 제동디스크의 물성 변화는 매우 적은 것을 알 수 있다. 따라서 현재 사용중인 제동디스크 재질은 제동디스크 재질의 주요 요구 조건인 열전도 특성이 초기 물성과 동일하게 잘 유지되고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이러한 열전도도 결과 등을 바탕으로 향후 디스크의 조직검사, 온도분포해석 등 추가적인 연구를 통해 제동디스크의 성능을 검증하고 이를 개선하는 연구를 진행하고자 한다.

4. 결론

본 논문은 제동 디스크의 주행중 온도변화를 측정하고 이에 따른 재료 특성을 확인하여 제동디스크의 신뢰성 확보의 기초 차원에서 연구를 수행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열차별 제동디스크 온도변화를 측정된 결과, 동일 구간에 대해서도 제동디스크 표면의 온도변화는 평균 및 최고 온도 모두 열차별로 상이한 것을 알 수 있다.
- (2) 또한 동일 구간 동일 차량을 이용하여 제동디스크와 라이닝의 조합에 의한 온도변화를 측정된 결과, 규격을 만족하는 표준 제품이라 하더라도 사용 조합에 따라 표면의 온도 변화가 달라지는 것을 확인했으며, 따라서 제동디스크와 라이닝을 선택할 때는 반드시 이를 고려한 영향을 평가를 수행하여야 한다.
- (3) 주행 중 디스크 온도변화 측정 결과를 바탕으로 100°C, 200°C, 300°C에서 얻은 제동디스크의 열전도도 시험결과는 온도가 증가할수록 약간씩 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 변화는 100°C에서 200°C 사이에 변화가 가장 큰 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 기본연구사업(PK07001A)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, 김중성, 최형석, 김진영, 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. Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique, ASTM E1225.
5. 김낙수, 임용택, 진중태 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, pp.67-103.

(2007년 8월 10일 논문접수, 2007년 12월 4일 심사완료)