*2003 춘계 학술발표회 논문집*

*한국 원자력 학회*

# 하중비 방법을 이용한 CANDU 압력관의 파괴인성 평가

# Evaluation of Fracture Toughness in the CANDU Pressure Tube by Load Ratio Method

오승진, 김인섭
한국과학기술원
대전시 유성구 구성동 373-1
김영석, 안상복
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요약

CANDU 원자로에서 압력관은 일반적인 경수로에서 압력용기에 해당하는 1차 압력경계로서 Zr-2.5Nb합금으로 만들어져 있다. 압력관의 건전성은 CANDU 원자로의 안전성과 경제성을 좌우하는 중요한 요소이다. 파괴인성 특성은 압력관의 건전성을 평가하기 위한 중요한 특성으로서 조사된 압력관의 경우 기존의 실험방법을 적용하기 용이하지 않기 때문에 하중비 방법을 이용하여 압력관의 파괴인성 특성치인 J-R 곡선을 구하는 방법을 모색하였다.

Zr-2.5Nb 압력관 재료를 기존의 직류전위차법 및 하중비방법을 이용하여 J-R 곡선을 구하고 비교하였다. 하중비 방법의 경우 직류전위차법에 비해 $J_{Ic}$값이 높게 나타났으며 dJ/da값은 반대로 낮게 평가되는 결과를 보였다. 이것은 하중비 방법에서 결정되는 균열 진전 시작점이 하중-하중선 변위 곡선에서 실제 균열 시작점에 비해 높은 하중에서 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 앞에서 나타난 기존의 실험 방법과의 오차를 줄이기 위하여 실제 균열 시작점과 하중비 방법에서 나타난 균열 시작점과의 관계식을 DCPD 방법에서 구한 실제 균열길이를 이용하여 구하였으며, 이를 하중비 방법에 적용한 결과 $J_{Ic}$, dJ/da값이 기존 방법에서 구한 값과 잘 일치하는 것을 보였다.

Abstract

In CANDU reactor, pressure tube, which component is Zr-2.5Nb, is primary pressure boundary. Integrity of pressure tube is important factor which determine safety and economization of CANDU reactor. Fracture toughness is integrity evaluation factor of pressure tube. In case of irradiated pressure tube, evaluation of fracture toughness is difficult because it is not easy to applying conventional method. In this study, Load-ratio method is applied to evaluate fracture toughness. Compared with DCPD method, $J_{IC}$ by

Load-ratio method was larger than that of DCPD method and dJ/da was smaller than DCPD method. The reason is that crack initiation is determined at larger LLD point.

To reduce error between DCPD method and Load-ratio method, modified Load-ratio method was applied to evaluate fracture toughness and showed reliable result. However, physical analysis of relationship between crack length and load-line displacement is needed.

## 1. 서론

CANDU 압력관은 장시간의 운전시 제조과정에서 존재했던 수소와 가동 중 중수로부터 흡수된 수소가 국부적인 응력 집중에 의하여 수소화물이 생성되어 파괴인성의 저하를 일으킨다. 이로 인해 압력관의 수소취성에 의한 파괴인성 저하에 대한 많은 연구가 현재까지 이루어지고 있다. 압력관의 수소취성에 대한 시험법으로 탄소성 파괴 역학에 기초한 J-R 시험법이 널리 사용되어 왔으며 이들 중 컴플라이언스법(unloading compliance method)과 직류전위차법(DC-electric potential method, DCPD)이 J-R 곡선을 결정짓는 방법으로 가장 널리 사용되고 있다.

압력관의 파괴인성 시험의 경우 비조사 시편에 대한 연구는 매우 활발한 상태이나 시험 방법들의 현저한 발전에도 불구하고 조사시편의 시험의 경우 전류측정을 위한 용접작업이나 CTOD 게이지를 수작업으로 설치 할 수 없어 시험에 어려움이 따르고 있다. 한편으로는 압력관 시험편의 특성상 시험편의 크기가 표준 시편에 비해 매우 작기 때문에 대부분 직류전위차법을 표준시험법으로 채택하고 있었으나 ASTM Standard E1737-96 은 E1820-99 로 개정되면서 직류전위차법이 표준시험법에서 제외된 상태이다.

한편 동하중에서의 J-R curve 특성을 결정하기 위하여 1980 년대부터 별도의 계측장비 없이 하중-하중비 곡선만을 가지고 J-R curve 특성을 결정하는 새로운 방법에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 현재 key-curve 방법에 이론적 기반을 둔 정규화법(normalization method)[1]과 Joyce 등의 하중비방법(load-ratio method)[2]등에 대한 연구가 진행 중이다.

본 연구에서는 조사 시편의 J-R curve 특성을 결정하는데 있어 기존의 시험결과와 호환성을 가지면서 시험법에 대한 난이성을 해결하는 것을 목표로 하중비방법을 압력관 시험편의 J-R curve 특성시험에 적용하였으며 기존의 직류전위차법의 결과와 호환성을 가지도록 하는 방법을 모색하였다.

## 2. load ratio 개념

J-integral 해석에 관한 변형이론[3]에 따르면, 균열진전을 포함하는 시험편의 하중-하중선변위 곡선을 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림 1에서 두 개의 점선 OA와 OA`은 각각 균열길이가 각각 $a_1$과 $a_2$ ($a_1<a_2$)인 시험편에서 균열성장이 없다고 가정할 때 예상되는 변형 곡선이다. 하지만 실제로는 변형이 일어나면서 동시에 균열이 진전하므로 실제 시험 중에서 얻어지는 하중-하중선변위 곡선은 실선으로 나타낸 곡선이다.

변형소성이론에 따르면 실선의 변형과정은 OA`의 과정과 A`A의 과정을 합한 변형과정

으로 생각할 수 있다. 시험편의 초기 균열길이를 $a_1$으로 가정한 뒤 균열 성장이 일어나지 않은 채 변형이 일어난다고 생각하면 곡선은 OA`의 형태를 띈다. 그 후 변형을 억제한 채 균열이 $a_1$에서 $a_2$로 성장한다면 소성변형량은 없고 균열진전에 따른 탄성해중에 의해 곡선은 AA`를 따르게 된다. 따라서 균열의 성장 전후의 탄성 해중선은 각각 A`D와 AD가 된다. 따라서 균열의 가상진전 전후의 컴플라이언스의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_2 = C_1 \times \frac{P_2}{P_1}$$

이때 $C_1$은 시험편 초기 컴플라이언스와 동일하므로 변위곡선상의 임의의 점 A에서 컴플라이언스, $C_2$은 OA`로 표현되는 기준 경화 곡선과의 하중비에 의하여 결정될 수 있다.

이와 같은 방법으로 균열 성장에 따른 컴플라이언스를 이용하여 균열길이를 구할 수 있다 [5].

## 3. 실험 방법

본 연구에 사용된 시편은 CANDU 압력관에 사용중인 Zr-2.5Nb 합금이 사용되었다.

그림 2와 같이 CT(Compact Tension) 시편으로 두께 이외에는 W=17mm를 기준으로 ASTM E399-83에 준하여 균열 진전 방향이 압력관의 축 방향과 일치하도록 제작하였으며 Precrack은 하중을 4단계로 나누어서 초기 하중이 $15MPa\sqrt{m}$, 마지막 단계의 최대하중이 $10MPa\sqrt{m}$가 넘지 않게 하면서 a/W= 0.5가 되도록 내었다. 시험 중 균열 진전은 직류전위차법으로 균열진전을 측정하였으며 파괴시험은 상온에서 300℃사이의 온도구간에서 시험을 수행하였다.

파괴시험 수행 후 균열길이를 하중비방법을 이용하여 구하였다. 파괴시험 후 측정한 초기 균열길이와 최종균열길이 및 하중-하중선 곡선 데이터를 이용하여 극한하중해석(limit load analysis)을 통해 기준경화곡선을 구하였다[4]. 계산에 필요한 자료는 표1에 정리하였다.

앞에서 언급한 관계식을 이용하여 기준경화곡선과 하중-하중선곡선 및 초기 균열길이 값에서 얻은 컴플라이언스값을 이용하여 균열 성장에 따른 컴플라이언스값을 계산하였으며 이 값을 ASTM E1820[5]에 명시된 관계식을 이용하여 균열길이를 계산하였다.

직류전위차법을 통해 얻은 균열길이와 하중비방법을 이용하여 얻은 균열길이를 이용하여 J-R 곡선을 구한 뒤 두 결과를 비교 평가 하였다.

## 4. 결과

### 1) 기준 경화곡선

초기 및 최종 균열길이 및 하중-하중선 곡선을 이용하여 기준 경화곡선을 온도에 따라 구하였다. 그림 3에서 각각의 결과를 직류전위차법으로 구한 실제 균열 길이를 이용하여 구한 기준 경화곡선과 비교하였다. 비교한 결과 실제 균열길이를 대입한 기준 경화곡선이 최대하중(Max. Load, $P_{max}$)이 더 크게 나타났다. 이것은 최종균열길이에서 접선을 그어 기준 경화

곡선을 구했으나 균열이 성장하지 않는 경우 하중-하중선곡선이 소성변형의 관점에서 하중이 하중선 변위의 N제곱에 비례하기 때문에 나타나는 차이로 보인다. 따라서 이러한 관점에서 기준 경화곡선을 보다 정확하게 구하기 위한 연구가 필요한 것으로 생각된다.
그림 4에서 온도 증가에 따른 기준 경화곡선의 특성을 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 기준경화곡선은 탄성영역에서는 거의 차이를 보이지 않으나 소성영역에서는 크게 증가하는 것을 보였다. 상온의 경우 다른 온도에서의 곡선과 달리 탄성영역에서 소성영역으로 변하는 시점에서 변위에 따른 하중의 증가량이 거의 감소하지 않는 것으로 나타났다. 이것은 고온에서와 다르게 상온에서는 탄성역에서 변형에 필요한 하중과 소성역에서 변형에 필요한 하중의 크기가 크게 차이가 나지 않기 때문에 나타나는 현상으로 보인다.

2) J-R 곡선의 특성 평가
직류전위차법을 이용하여 구한 균열길이와 하중비방법을 이용하여 구한 균열길이를 이용하여 J-R 곡선을 구하였다. 그림 5에서 상온에서 각각의 방법으로 얻은 J-R 곡선을 표시하였다. 각 방법에 따른 차이를 비교해본 결과 $J_{IC}$값의 경우 직류전위차법이 하중비 방법에 비해 낮게 나타났으며 반대로 dJ/da값의 경우 직류전위차법이 높게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 온도에 따라 각 방법에 따른 파괴인성특성 변화를 알아보기 위하여 dJ/da값과 $J_{IC}$값을 그림 6, 7에 정리하였다. $J_{IC}$값의 경우 온도가 증가함에 따라 $J_{IC}$값은 각 방법에 따른 차이가 감소하나 상온과 마찬가지로 하중비 방법이 높게 나타났으며 하중비방법의 결과값이 직류전위차법에 비하여 평균 38%의 오차를 가지고 과대평가한 것을 볼 수 있었다. dJ/da값의 경우 온도증가에 따른 차이의 감소효과는 $J_{IC}$값에 비해 작게 나타났으며 직류전위차법으로 구한 것에 비해 평균150%의 오차로 과소평가되었다.

**5. 토의**

<u>Load ratio 방법의 개선</u>

하중비 방법을 이용하여 J-R 곡선을 구한 결과 기존의 직류전위차법과 차이가 크게 나타나는 것을 볼 수 있었으며 이것을 그대로 적용하기에는 기존 방법과의 호환성이 떨어진다는 결과를 보였다. 이러한 문제점이 생기는 이유는 균열 시작점이 결정에 있는 것으로 보였다. 그림 8에서 보면, 직류전위차법의 경우 균열 시작점은 하중-하중선 변위곡선에서 선형성이 벗어나는 지점 부근인 $D_1$에서 균열 시작점이 존재하는 것으로 생각된다. 그러나 하중비 방법에서는 균열 시작점이 기준경화곡선이 하중-하중선 변위곡선에서 벗어나는 $D_2$에서 균열이 시작점이 나타난다. 그 결과 균열 시작점이 $(=D_2-D_1)$만큼 차이가 나게 된다. 직류전위차법에서 구한 균열길이를 이용하여 하중선 변위 $D_1$, D2에 해당하는 균열 길이 $a_0$, a1의 값의 관계를 구한 결과 $_{crack}(a_1-a_0)=1/2$ 이라는 관계식이 나왔다. 이것을 이용하여 다음과 같은 방법으로 load ratio 방법을 변형시켜 균열 길이를 구했다.
(1) 하중-하중선 변위 곡선에서 선형성을 벗어나는 점 $D_1$을 초기 균열 길이 $a_0$를 가지는 시작점으로 결정한다.

(2) 기준경화곡선이 하중하중선 변위곡선을 벗어나는 점 D2에서의 균열 길이를 $a_1$일 때, a1=$a_0$+1/2의 관계식으로 $a_1$을 결정한다.
(3) $a_1$와 $a_0$사이의 균열길이는 하중선 변위에 대하여 선형적으로 균열이 증가한다고 가정하여 계산한다.
(4) 하중비 방법을 이용하여 초기균열길이 $a_0$대신 $a_1$을 대입하여 $a_1$이후의 균열 길이를 계산한다.
이와 같은 방법으로 균열 길이를 구하여 J-R 곡선을 구한 결과 그림 9에서 보여지듯이 두 방법간의 오차가 상당히 감소했음을 보였다. 온도에 따른 $J_{IC}$값과 dJ/da의 변화를 관찰한 결과 그림 10,11에서 나타나듯이 온도에 따라서도 두 방법에 따른 오차가 상당히 감소했음을 보였다.

## 6. 결론

1) 하중비방법을 이용하여 압력관재료의 균열길이를 온도별로 구했다. 기준경화곡선은 극한하중해석법을 이용하여 구했으며 이 결과를 이용하여 J-R 곡선을 얻었다.
2) 하중비방법을 이용하여 구한 J-R 곡선을 직류전위차법을 이용하여 구한 J-R 곡선과 비교하였다. J-R 곡선에서 $J_{IC}$는 직류전위차법에 비해 하중비 방법이 평균 38%이상 크게 나타났으며 dJ/da는 평균 150%의 오차로 작게 나타났다. 이것은 각각의 방법에서 초기 균열 시작점이 결정되는 시점이 다르기 때문에 나타나는 것으로 생각된다.
3) 직류전위차법과 하중비방법으로 구한 균열길이의 오차를 줄이기 위한 방법을 모색하였다. 각각의 방법에서 균열시작점이 나타나는 하중비 변위의 값과 직류전위차법에서의 균열길이값을 이용하여 하중비방법을 개선하였다. 개선한 결과 각 방법에 따른 J-R 곡선의 차이가 상당히 감소함을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

[1] Landes, J.D., Zhou, Z., Lee, K., and Herrera, R., "Normalization Method for Developing J-R Curves with the LMN Function," Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 19, No. 4, July 1991, pp. 305-311.
[2] Hu, J. M.,Albrechtm P., and Joyce, J. A., “Load Ratio Method for Estimating Crack Extension,” Fracture Mechanics : Twenty-Second Symposium(Volume I), ASTM STP 1131, H. A. Ernst, A. Savena, and D.L. McDowell, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelpia, 1992, pp. 880-903.
[3] Rice, J.R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notched and Cracks", Journal of Applied Mechanics, Vol.35, 1968. pp 379-386.
[4] 이봉상, 홍준화, 하중비 방법을 이용한 CT 시험편의 파괴저항곡선의 평가, 대한기계학회 `97 추계학술대회논문집
[5] "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM E1820-99", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.

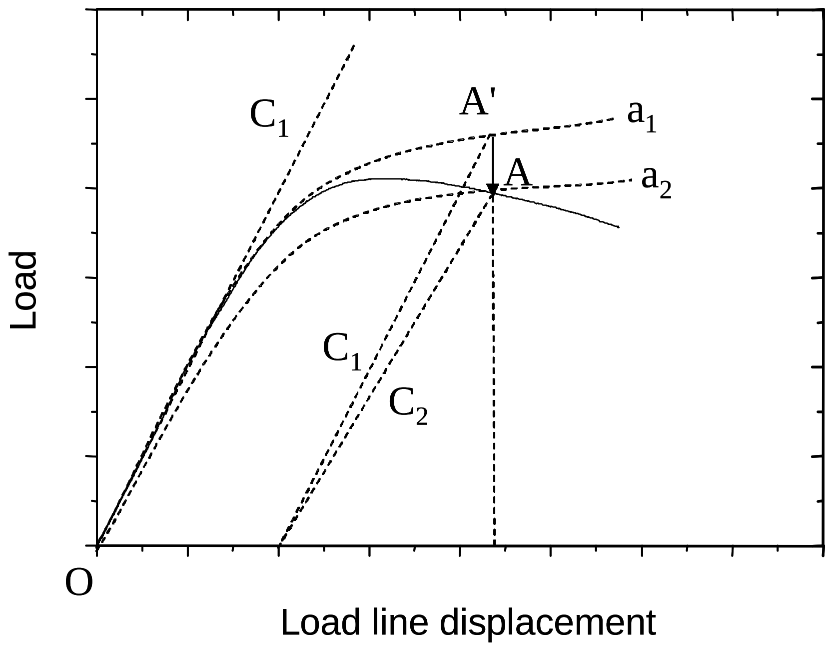


그림 1 Concept of load-ratio-method for direct determination of the elastic compliance

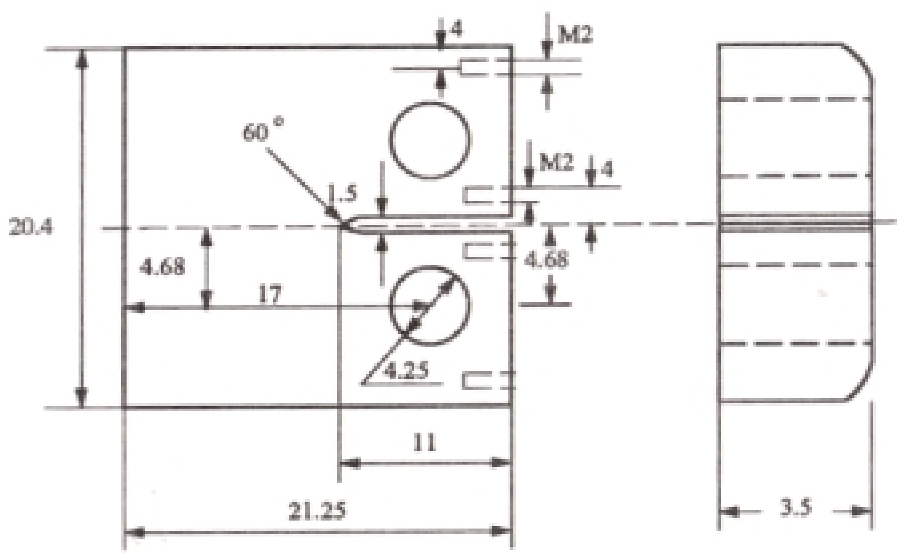


그림 2 Schematic representation of the compact tension specimen

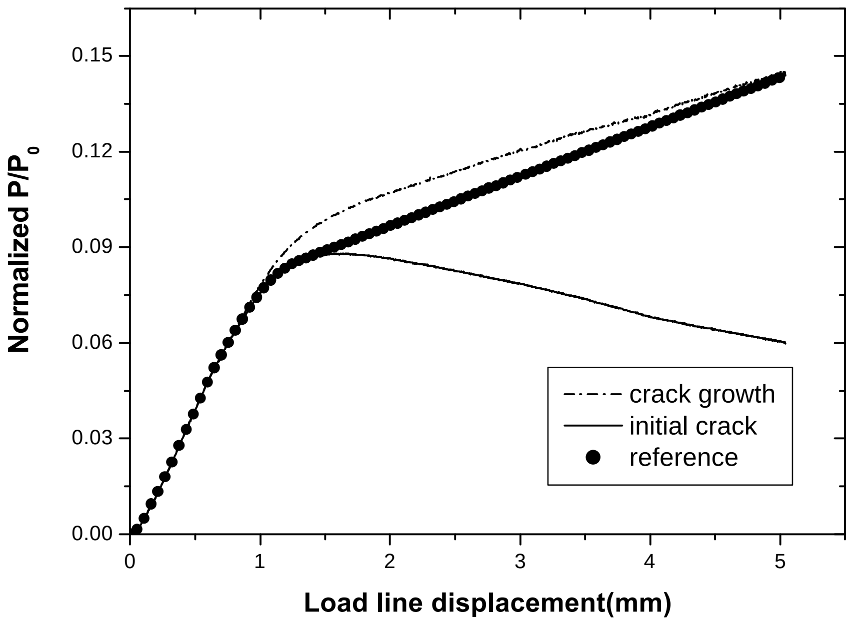


그림 3 Reference curve at 100℃

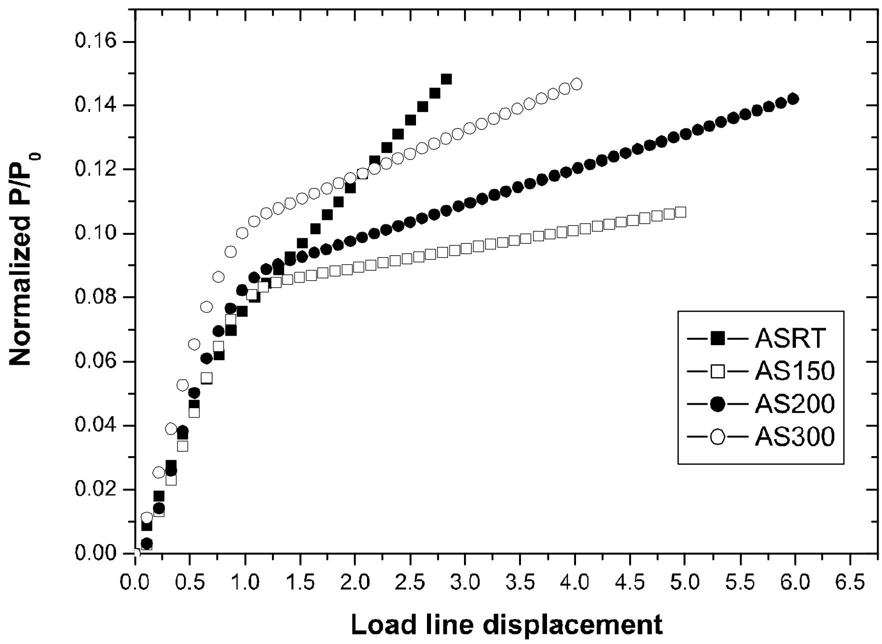


그림 4 referece curve with increasing temperature

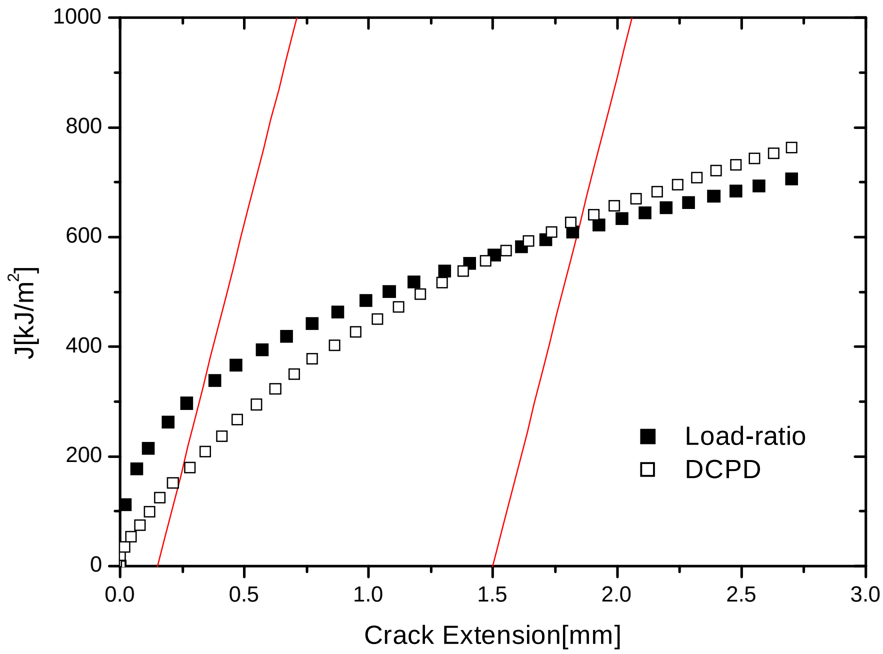


그림 5 J-R curve at room temperature

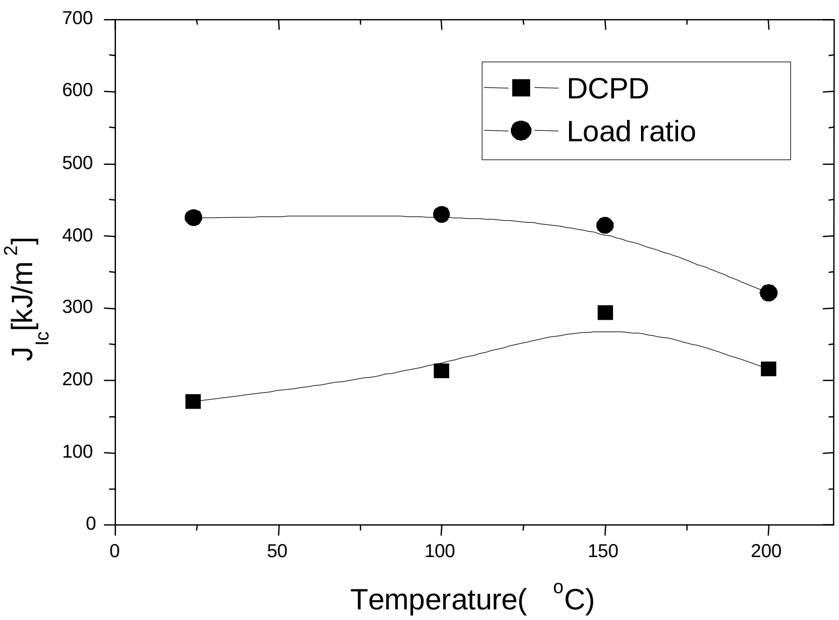


그림 6 Effect of temperature on $J_{IC}$

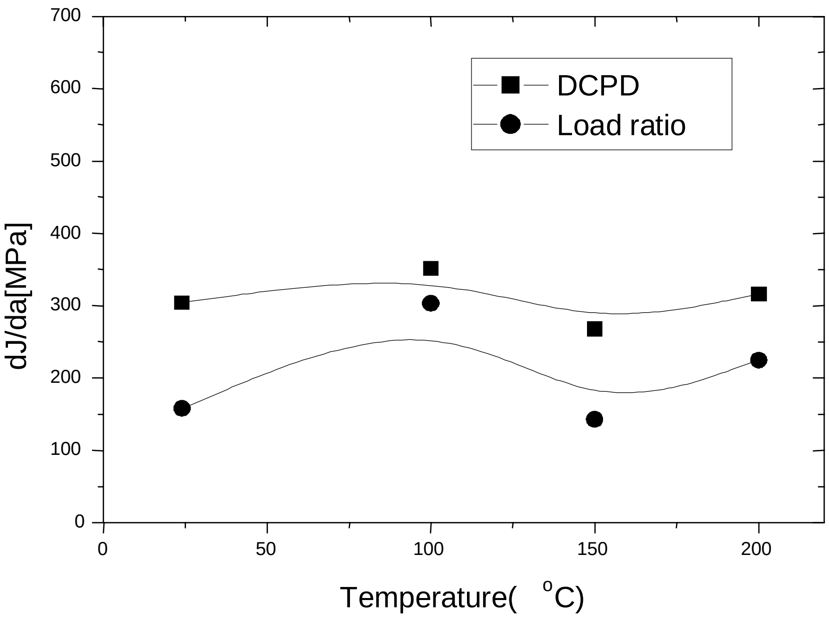


그림 7 Effect of temperature on dJ/da

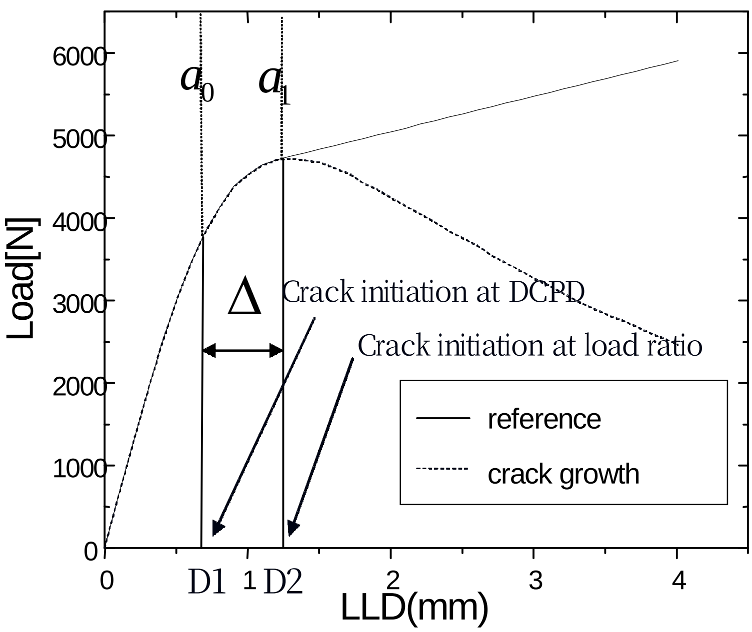


그림 8 Crack initiation point at Load-Load Line Displacement curve

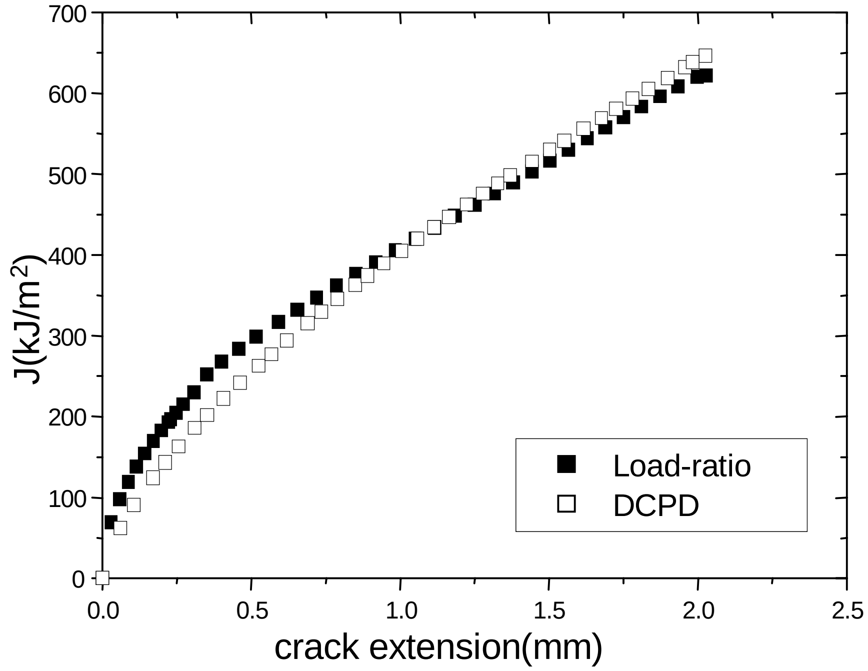


그림 9 Evaluation of J-R curve using modified load ratio method

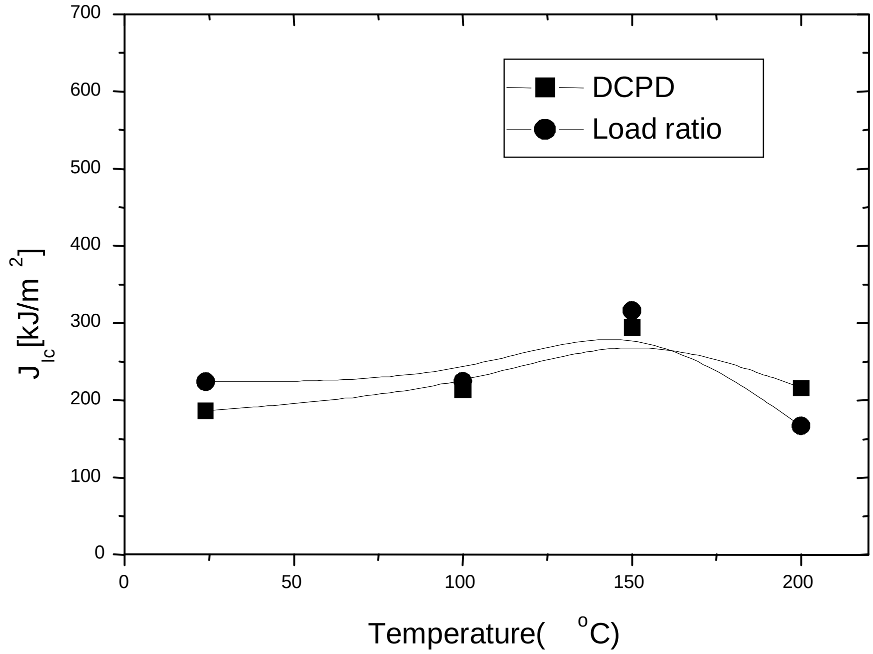


그림 10 Effect of temperature on $J_{IC}$(modified load ratio method was used.)

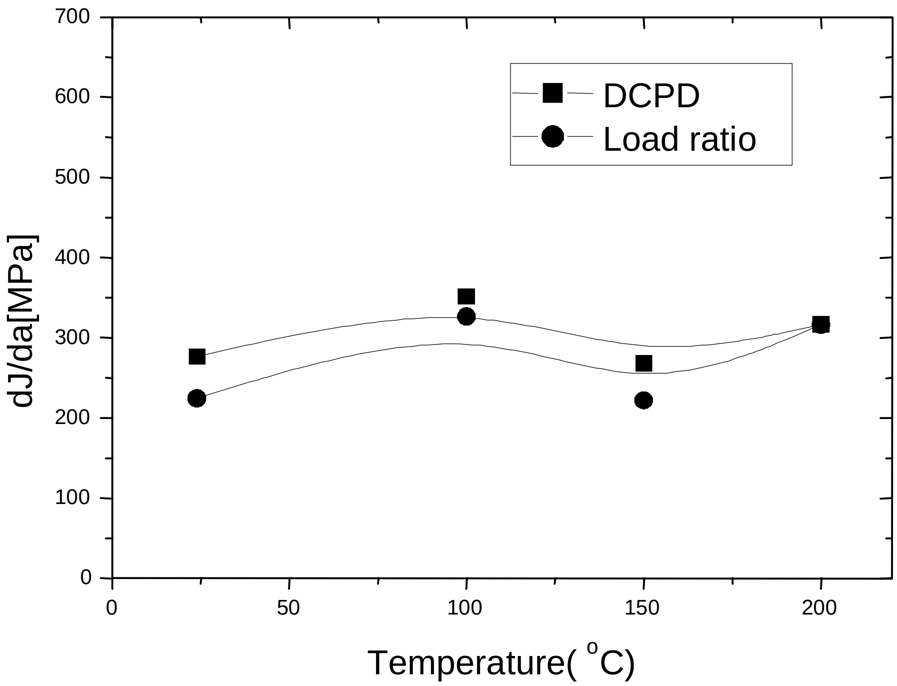


그림 11 Effect of temperature on dJ/da(modified load ratio method was used.)

표 1 The parameter for calculating of reference curve

| Specimen | Test Temp.(℃) | $C_H$(ppm) | initial crack length(mm) | final crack length(mm) | Yield Stress(MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| ASRT | Room temp. | 0 | 9.21 | 11.25 | 807 |
| AS100 | 100 | 0 | 9.21 | 11.77 | 686 |
| AS150 | 150 | 0 | 9.21 | 11.63 | 612 |
| AS200 | 200 | 0 | 9.69 | 12.47 | 610 |
| AS250 | 250 | 0 | 9.85 | 11.95 | 540 |
| AS300 | 300 | 0 | 9.55 | 11.22 | 483 |