

〈論 文〉

# J-R 곡선에서의 균열길이 감소현상에 관한 연구(II)

균열길이 감소현상의 처리법

석창성\* · 최용식\*

(1992년 2월 22일 접수)

## A Study on the Apparent Negative Crack Growth Phenomenon of J-R Curve(II)

The Correction Method of the Apparent Negative Crack Growth Phenomenon

C. S. Seok and Y. S. Choy

**Key Words :**  $J_{IC}$ , (J-R 곡선), Negative Crack Growth(균열길이 감소), Offset Technique (오프셋법), Blunting Line(둔화선)

### Abstract

It often occurs in J-R testing that some initial crack extension ( $\Delta a$ ) data points have anomalous negative values. The reason for the apparent negative crack growth is due to the analysis method. The phenomenon as a possible source of error in determining  $J_{IC}$  or J-R curve from partial unloading compliance experiments may be eliminated by the compliance correction equation or the offset technique. In this study, the correction methods are suggested and examined by the measurement of the actual crack length and  $J_{IC}$  analysis.

### 기 호 설 명

$B$  : 試片의 두께  
 $C_m$  : 실험으로 측정한 탄성 컴플라이언스  
 $C_{th}$  : 이론적인 탄성 컴플라이언스  
 $F_c$  : CT시편의 수정함수  
 $F_T$  : TPB시편의 수정함수  
 $J$  : J-적분 값  
 $J_{IC}$  : J의 임계치, 재료의 평면변형 탄소성파괴 인성치  
 $P_{max}$  : 荷重除去 직전의 作用荷重  
 $P_{re}$  : 荷重除去 후의 作用荷重  
 $S$  : 지지점간의 거리  
 $W$  : 試片의 폭  
 $a$  : 龜裂길이

$\alpha$  :  $a/W$   
 $\Delta a$  : 균열진전량  
 $\Delta P$  :  $P_{max} - P_{re}$   
 $\sigma_{fs}$  : (항복강도 + 인장강도) / 2  
 $\sigma_Y$  : 항복강도

### 1. 序論

균열길이 減少現象은, ASTM의  $J_{IC}$ 나 J-R 곡선 시험법<sup>(1,2)</sup>에서 單一 試片法으로 실험할 때 나타나는 현상으로, 제하 컴플라이언스법(unloading compliance technique)으로 균열길이를 측정할 때 초기의 균열길이 감소하는 것으로 나타나는 現象이다. 이러한 균열길이의 減少는, 실제로는 있을 없는 現象이며 실험과 해석상의 문제점<sup>(3-6)</sup>이라 하겠다. 이러한 균열길이 감소현상을 핀(pin)의 굽힘

\*정회원, 성균관대학교 기계공학과

의 영향,<sup>(3)</sup> 둔화거동(blunting behavior)의 영향<sup>(4)</sup>, 하중장치의 정렬불량의 영향<sup>(5)</sup> 등으로 해석한 연구 보고가 있으며, 이의 수정법으로 특수한 하중장치를 사용하거나,<sup>(3)</sup> R-곡선의 회귀분석방법을 다르게 하여야 한다는<sup>(6)</sup> 연구보고등이 있다. 본 연구자들은 균열길이 감소현상의 원인을 균열선단의 소성영역에 의하여 재하시에 발생하는 압축응력으로 보고 있으며,<sup>(7-9)</sup> 이를 고려한 컴플라이언스 修正式을 제안한 바 있다.<sup>(8,9)</sup>

本 논문에서는 균열길이 減少現象의 처리법에 대하여 고찰하고자 하며, 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 오프셋(offset)법<sup>(9)</sup>의 배경 및 오프셋법에 의한 균열길이 감소현상의 처리 방법을 제안하였다.

(2) 실제의 균열길이의 측정과  $J_c$  실험해석을 통하여, 修正式과 오프셋법의 타당성을 검토하였다.

## 2. 균열길이의 測定式의 修正式

### 2.1 CT 試片에서의 修正式

제하시 龜裂先端의 壓縮應力에 의하여 균열길이 減少現象이 나타난다는 가정하에 壓縮應力에 의한 컴플라이언스의 오차를 보정함으로서, 균열길이 減少現象을 처리할 수 있었다. 전보<sup>(8,9)</sup>에서 제안한 CT 試驗片에서의 균열길이 측정 수정식의 修正函數  $F_c$ 는 다음과 같다.

$$F_c = \frac{\Delta P f^2(a)}{\pi W B \delta_Y} \times \left\{ \frac{(W-a)(2W+a)}{4(W^2+aW+a^2)} - \frac{25(W+a)\Delta P^2 f^2(a)}{128\pi W B^2 \delta_Y^2 (W^2+aW+a^2)} \right\} \quad (1)$$

여기에서

$$f(a) = \frac{(2+a)(0.886+4.64a-13.32a^2+14.72a^3-5.6a^4)}{(1-a)^{3/2}}$$

식(1)에서  $F_c$ 를 구하고, 이  $F_c$ 를 이용하여 다음 식에서  $a/W$ 를 구함으로서, 균열길이를 구할 수 있다.

$$a/W = 1.00196 - 4.06319V + 11.242V^2 - 106.043V^3 + 464.335V^4 - 650.677V^5 \quad (2)$$

여기에서

$$V = 1 / [(BEC_{th})^{1/2} + 1]$$

$$C_{th} = C_m / (1 - F_c)$$

### 2.2 TPB 試片에서의 修正式

TPB 試片에서의 修正函數  $F_T$ 는 다음과 같다.<sup>(8,9)</sup>

$$F_T = \frac{\Delta P S^2 f^2(a)}{\pi W^3 B \sigma_Y} \times \left\{ \frac{(W-a)}{2(W+a)} - \frac{25\Delta P^2 S^2 f^2(a)}{96\pi W^3 B^2 \sigma_Y^2 (W+a)} \right\} \quad (3)$$

여기에서

$$f(a) =$$

$$\frac{3a^{1/2}[1.99 - a(1-a)(2.15 - 3.93a + 2.7a^2)]}{2(1+2a)(1-a)^{3/2}}$$

이 수정함수로부터 이론적인 컴플라이언스( $C_{th}$ )를 구한다음 ASTM<sup>(1)</sup>의 다음 식에 대입하여  $a/W$ 를 구함으로서, 균열길이를 구할 수 있다.

$$a/W = 0.999748 - 3.9054U + 2.2821U^2 - 3.21408U^3 + 51.51564U^4 - 113.031U^5 \quad (5)$$

여기에서

$$U = 1 / [(4BWEC_{th}/S)^{1/2} + 1]$$

$$C_{th} = C_m / (1 - F_T)$$

## 3. 오프셋법에 의한 균열길이 減少現象의 처리

### 3.1 오프셋법의 배경

2장의 수정식을 龜裂先端의 應力解析과 컴플라이언스의 보정에 의하여 유도하였으나 理論發展上 여러 문제점을 내포하고 있다.<sup>(8,9)</sup> 또, 이 修正式으로 균열길이를 계산할 경우 균열길이 감소현상이 없는  $J-R$  곡선을 얻을 수 있으나, 식의 계산이나 적용이 번거롭다. 이러한 번거로움이 없는 균열길이 減少現象의 간편한 처리방법으로 오프셋법을 제안하고자 하며, 그 배경은 다음과 같다.

試片에 하중을 가하면, 이론적인  $J-R$  곡선에서  $J$ 값과 균열길이가 증가한다. 이때, 처음에는 龜裂先部分의 鈍化에 의하여 균열길이가 증가하다가 균열의 찢어짐(tearing)이 시작된다. 여기에서  $J$ 와 龜裂鈍化에 의한 龜裂進展量의 관계를 그래프로 나

타낸 것이 鈍化線(blunting line)이다. 그러나, 균열길이 減少現象이 나타날 경우에는 Fig.1의 A 부분과 같은 거동을 한다. 이 균열길이의 減少는 계산상의 오류에 의한 것이라 생각되며, 균열의 찢어짐(tearing)이 시작되기 전에는 이론적으로 鈍化線上의 점까지 균열이 진전하여야 할 것이다. 즉, 균열길이 減少된 데이터나 鈍化線보다 왼쪽에 있는 데이터는 鈍化線上에 있어야 할 것이다. 이러한 오차는, 하중을 제거(unloading)할 때에 龜裂先端의 壓縮應力에 의한 균열단합(crack closure)에 의한 것이라 생각되며, 이 균열단합의 양만큼 균열길이를 보정하여야 할 것이다.

3.2 오프셋법에 의한 龜裂進展량의 보정

2장의 수정식에서, 균열길이의 減少現象은 최대 하중과 제거한 하중의 차이, 즉 제거한 하중의 양( $\Delta P$ ) 影響을 크게 받는다. Fig. 1에서 最大龜裂減

少點인 A점은 Fig.2의 P- $\delta$  곡선의 A점에 해당하며, 이 때의  $\Delta P$  값과 이 이후의  $\Delta P$  값은 큰 차이가 없다. 따라서 A 데이터에서 발생한 균열길이 減少량만큼 다른 데이터에도 균열길이가 減少되어 나타났다고 생각할 수 있다. 이러한 假定下에서, 최대 균열길이 減少點과 鈍化線 사이의 거리만큼 모든 데이터에 龜裂進展량을 보정한다.

3.3 오프셋법에 대한 考察

오프셋법에 의하여 龜裂減少량만큼 龜裂進展량을 보정할 경우 鈍化線이 材料마다 다르다<sup>(10)</sup>는 점과 모든 데이터의 균열길이 減少량이 일정하지 않다는 문제점이 있다. 材料마다의 鈍化線이 다르므로, 鈍化線을 실험에 의하여 구하거나 다른 研究者들의 鈍化線式<sup>(10)</sup>을 사용하면, 보다 정확하게 보정할 수 있을 것이나, 적용이 복잡하다는 단점이 있다. ASTM의  $J_{Ic}$  試驗法의 장점인 해석의 편리함에 바탕을 두고, ASTM의 鈍化線式( $J=2\sigma_{rs}\Delta a$ )을 기준으로 하여 오프셋하는 방법이 편리할 것이다.

4. 오프셋법과 수정식의 실험적 고찰

4.1 균열진전량의 비교

수정식이나 오프셋법의 타당성을 검토하기 위해서는 이들로부터 측정된 균열길이와 실제 시편에서 측정된 균열길이를 비교하면 될 것이다. 그러나 각각의 제하점에서의 균열길이를 정확히 측정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는, 현실적으로 검토 가능한 방법인, 실험 후 최종의 균열길이를 비교하여, 修正式과 오프셋법을 검토하고자 하였다.

本 研究에서는 A516 Gr70 강을 이용하여 상온(20°C)에서의  $J_{Ic}$  實驗을 한 후, 이 試驗 데이터를 전보의 修正式과 오프셋법으로 해석하여 균열길이를 구하였다. 이 데이터 중에서 최종의 균열길이와 시편을 파단하여 9곳으로부터 측정된 균열길이의 평균값을 비교하면 다음의 Table 1과 같다.

실험결과에 의하면 오프셋법에 의하여 균열진전량을 보정한 경우가 실제의 균열길이와 가장 유사하며, 수정식을 사용할 경우 과다하게 보정되는 것으로 나타났다. 그러나 이는 최종의 균열길이를 비교한 것이므로  $J_{Ic}$  값이 결정되는 부근에서는 이와 다를 수도 있다.

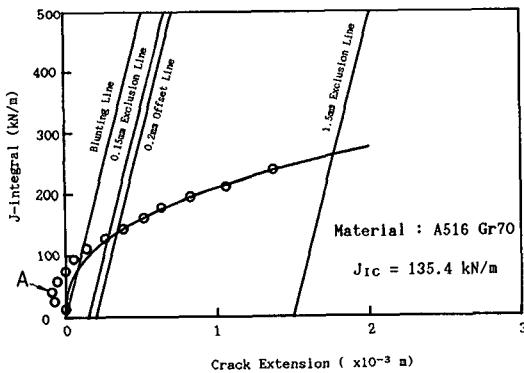


Fig. 1 Negative crack growth phenomenon of A516 Gr70 steel

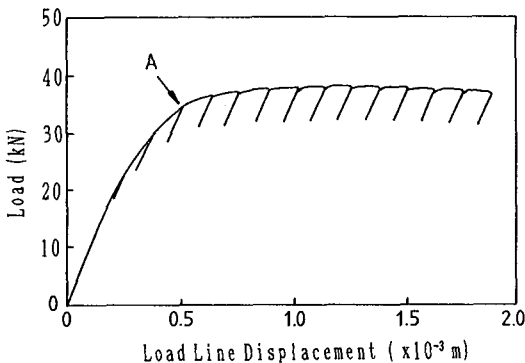


Fig. 2 Load-load line displacement curve for A516 Gr70 steel

Table 1 Comparison of maximum crack length

Technique	Max. crack length (mm)
ASTM E 813	30.58
Compliance correction equation	31.31
Offset technique	30.72
Measurement	30.93

수정식의 경우  $\Delta P$ 가 클 수록 보정량이 커지지만, 오프셋법의 경우에는 일정량을 보정하므로  $J_{IC}$ 가 결정되는 부근에서는 어느 결과가 정확한지 불분명하다. 따라서 어느 방법이 정확하다고 단정할 수는 없으나, 오프셋법이 수정식을 사용하는 방법보다는 편리하고 간단할 것이다.

4.2  $J_{IC}$  해석에 의한 비교

ASTM E 813의 방법에 따라 탄성컴플라이언스를 이용하여  $J_{IC}$  해석을 할 때와 수정식을 사용하여  $J_{IC}$ 를 해석할 때, 그리고 오프셋법을 사용하여 해석할 때의 A516 Gr70강의  $J_{IC}$  해석결과를 비교하였다. 또, 이 결과들을 多試片法을 사용할 때의  $J_{IC}$  해석결과와도 비교하였다. Fig. 1에는 ASTM E 813의 방법에 따라 탄성컴플라이언스를 이용하여  $J_{IC}$  해석을 한 결과를, Fig. 3에는 전보에서 제안한 수정식을 사용할 때의  $J_{IC}$  해석결과를, Fig. 4에는 오프셋법을 사용할 때의  $J_{IC}$  해석결과를, Fig. 5에는 多試片法으로 해석한  $J_{IC}$  해석결과

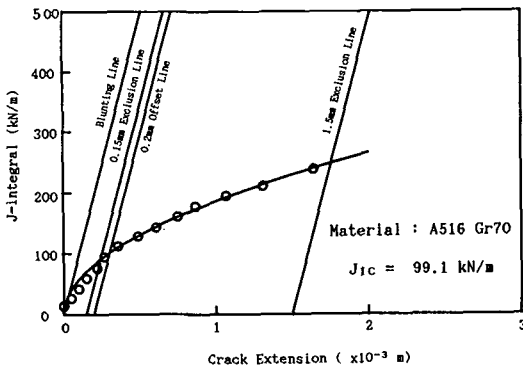


Fig. 3 J-R curve measured by the compliance correction equation

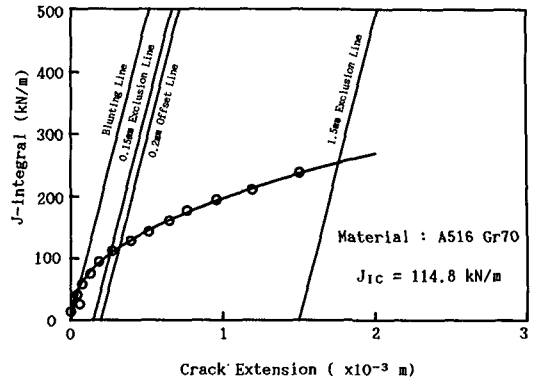


Fig. 4 J-R Curve by the offset technique

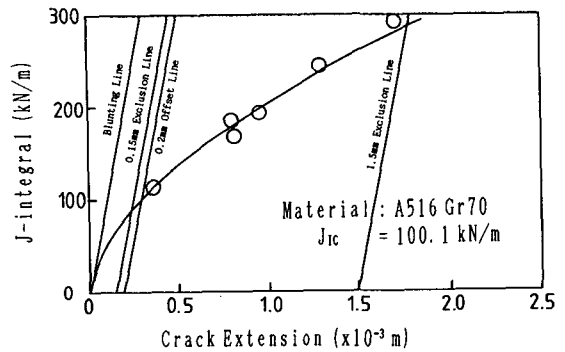


Fig. 5 Curve by the multi-specimen technique of ASTM E 813

를 나타내었다.

修正式이나 오프셋법을 사용할 경우, Fig. 3, Fig. 4에서와 같이, 균열길이의 減少現象이 나타나지 않으며, 이 때의  $J_{IC}$  값은, 균열길이 감소현상을 보정하지 않은 Fig. 1의  $J_{IC}$  값인 135.4 kN/m보다 작은, 99.1 kN/m와 114.8 kN/m로 나타났다. A516 Gr70 강의 常溫에서의 試驗結果인 Fig. 1을 오프셋법으로 처리하면, 모든 데이터에 A점과 鈍化線 사이의 거리(0.14 mm) 만큼 더하여지므로, Fig. 4와 같이 나타나게 된다. 이 때의  $J_{IC}$  값은 修正式으로 해석한 값(99.1 kN/m) 보다 조금 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 4에서와 같이 오프셋법에 의하여 균열길이 減少량을 보정할 경우, 모든 데이터에 0.14 mm를 더하므로, 修正式에 의한 Fig. 3의 보정치와 비교하여, 데이터 보정의 기준점인 A 점 이하의 데이터는 과대 보정되며 A 점 이후의 데이터는 과소 보정된다. A 점 이하의 데이터는 유효범위 밖의 데이터이므로  $J_{IC}$  해석에 影響

을 미치지 않으며, A점 이상의 데이터는 과소 평가되었으나  $J_{IC}$  값이 결정되는 鈍化線의 0.2 mm 이동선 부근에서는 그 오차가 작게 나타나므로, 오프셋에 의한 방법으로도  $J_{IC}$ 를 결정할 수 있을 것이다.

Fig.5와 같이 多試片法으로 해석할 경우에는 시편의 파단면으로부터 직접 균열길이를 측정하므로 균열길이 감소현상이 나타나지 않으며, 그 때의 값은 100.1 kN/m로 수정식이나 오프셋법을 사용한 경우와 비슷하게 나타났으며, 균열길이 감소현상을 수정하지 않은 경우의  $J_{IC}$  값(135.4 kN/m)은 과대평가됨을 알 수 있다. 따라서 균열길이 감소현상을 반드시 수정하여야 하며, 이를 수정하지 않고 균열길이가 감소된 부분의 데이터를 제외하고 해석하는 것은 잘못이라 하겠다.

## 5. 結 論

本 연구에서는  $J_{IC}$  해석에서의 균열길이 減少現象의 처리법으로 컴플라이언스 수정식과 오프셋법을 제안하였으며, 이에 대한 실험적 검토를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열길이 減少現象의 간편처리법으로는 오프셋법이 효과적이며, 오프셋법을 사용할 경우 간편하게 균열길이 減少現象을 처리할 수 있다.

(2) 실험후 시편 파단면에서 측정한 최종의 균열길이와 다 시편법으로 해석한  $J_{IC}$  값은, 수정식을 사용한 경우와 오프셋법을 이용한 경우의 사이의 값으로 나타났으며, 최종의 균열길이는 오프셋법을 이용한 경우와 다 시편법의  $J_{IC}$  값은 수정식을 사용한 경우와 잘 일치하였다.

(3) 균열길이 감소현상을 수정하지 않은 경우의  $J_{IC}$  값은 과대 평가되므로 균열길이 감소현상을 수정하여야 하며, 이를 수정하지 않고 균열길이가 감소된 부분의 데이터를 제외하고 해석하는 것은 잘못이라 하겠다.

## 참고문헌

- (1) "Standard Test Method for  $J_{IC}$ , A Measure of Fracture Toughness," 1987, ASTM E 813-87.
- (2) "Standard Test Method for Determining J-R Curves," 1987, ASTM E 1152-87.
- (3) Voss, B. and Mayville, R.A., 1985, "The Use of the Partial Unloading Compliance Method for the Determination of J-R Curve and  $J_{IC}$ ," ASTM STP 856, pp. 117~130.
- (4) Purtscher, P.T., 1987, "Absence of Stretch Zones in Austenitic Stainless Steels Fractured at Cryogenic Temperature," JTEVA, Vol.15, No.5, pp. 296~298.
- (5) Bowman, R., Antolovich, S.D. and Brown, R.C., 1988, "A Demonstration of Problems Associated with Crack Closure Measurement Techniques," Engineering Fracture Mechanics, Vol.31, No.4, pp. 703~711.
- (6) Rosenthal, Y.A., Tobler, R.L. and Purtscher, P. T., 1990, " $J_{IC}$  Data Analysis Methods with a 'Negative Crack Growth' Correction Procedure", JTEVA, Vol. 18, No.4, pp. 301~304.
- (7) 崔鎔湜, 梁原鎬, 金永鎭, 石昌星, 1990, "J<sub>IC</sub> 解析에서의 균열길이 減少現象에 대한 考察 (I)", '90年度 大韓機械學會 秋季學術大會 論文集, pp. 132~136.
- (8) 崔鎔湜, 石昌星, 1991, "J<sub>IC</sub> 解析에서의 균열길이 減少現象에 대한 考察 (II)", '91年度 大韓機械學會 春季學術大會 論文集 (I), pp. 440~444.
- (9) 石昌星, 1989, "材料的 彈塑性破壞韌性值  $J_{IC}$ 의 溫度依存性에 關한 研究", 成均館大學 博士學位論文, pp. 87~116.
- (10) Kolednic, O. and Stuwbe, H.P., 1987, "A Proposal for Estimating the Slope of the Blunting Curve", International Journal of Fracture, Vol. 33, pp. R63~R66.

(1) "Standard Test Method for  $J_{IC}$ , A Measure of