

〈論 文〉

파괴 인성치 J_{IC} 의 결정 방법에 관한 연구

최 영 환* · 엄 운 용*

(1989년 5월 31일 접수)

A Method to Determine the Fracture Toughness J_{IC}

Y.H. Choi and Y.Y. Earmme

Key Words : Fracture Toughness(파괴 인성치), Load-Displacement Curve(하중-변위 곡선), Key Curve(키이 곡선)

Abstract

A method to determine directly J_{IC} from load-displacement curve without measuring crack growth amount is studied. A method to use key curve in determination of J_{IC} is also considered. The values of J_{IC} obtained from the above methods are compared with that obtained from the ASTM standard test method (E813). By performing experiments using both compact-tension specimen and three-point-bending specimen of a structural alloy steel SCM4, it is shown that the methods proposed here may be used in determination of J_{IC} .

기 호 설 명

- a : 균열 길이
- b : 균열비 형성부
- B : 시험편 두께
- E : 탄성계수
- J : J 적분
- P : 하중
- W : 시험편 폭
- σ_y : 항복 응력
- σ_u : 인장 강도
- σ_o : 유동 응력 ($= (\sigma_y + \sigma_u) / 2$)
- δ : 하중선 변위
- CT : 컴팩트 인장
- TPB : 3점 벤딩

단에 큰 소성 변형을 동반하면서 균열이 진전하기 시작하여, 비교적 낮은 속도로 균열이 진행해 가는 파괴 양식을 말한다. 이러한 탄소성 파괴의 균열 진전 시작을 기계공학적 개념으로 기술하기 위하여 탄성 파괴(elastic fracture)의 파괴인성치(fracture toughness) $K_{IC}^{(1)}$ 를 사용할 경우, 균열 선단의 큰 소성역 때문에 시험편의 크기가 매우 커지게 되어 실험상 여러 문제점을 유발하게 된다. Begley와 Landes⁽²⁾는 작은 크기의 시험편으로 탄소성 파괴의 균열 진전 시작을 기술하기 위하여 Rice⁽³⁾가 제안한 J 적분(J integral)을 사용하였다. 그들은 초기 균열 선단이 완전 둔화(full blunting)된 후, 새로운 균열 진전이 시작될 때의 J 값을 J_{IC} 라 하고 이를 탄소성 파괴의 파괴인성치로 제안하였다. 그 후, 많은 실험을 거쳐 J_{IC} 의 측정 방법은 ASTM(American Society for Testing and Materials)과 JSME(Japan Society of Mechanical Engineers)에 의해 각각 표준화 되었다^(4,5).

1. 서 론

탄소성 파괴(elasto-plastic fracture)는 균열 선

J_{IC} 의 결정 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫째, 균열 선단의 둔화에 의해 발생하는 스트레치

*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

영역의 크기(stretched zone width, 앞으로는 SZW로 표기함)를 측정하여 결정하는 방법(SZW 방법)이다. 이 방법은 JSME에 의해 제안된 것으로 SZW의 측정이 어렵다는 단점이 있으나, 균열 전진양을 측정하기 어려운 재료의 J_{IC} 를 결정하는데는 매우 유용하다⁵⁾. 둘째, J -저항 곡선(J - Δa 곡선)과 둔화선(blunting line)의 교점을 찾아, 그 점에서의 J 값을 J_{IC} 로 정의하는 방법이다. 이 방법은 ASTM과 JSME에서 모두 제안하고 있는 방법(R -곡선 방법)으로, J -저항 곡선을 어떤 함수로 피팅(fitting)할 것인가와 둔화선을 어떻게 결정할 것인가에 따라 J_{IC} 의 값이 약간씩 달라지게 된다. 이 방법으로 J_{IC} 를 결정하기 위해서는 균열 길이의 측정이 필수적이다. 균열 길이를 결정하는 방법으로는 '다시시험편 방법'(multi-specimen method)과 '단일 시험편 제하 컴플라이언스 방법'(single specimen unloading compliance method)이 주로 쓰인다. 이 중, 다시시험편 방법은 균열 길이를 정확하게 결정할 수 있다는 장점이 있으나, 시험편의 수가 많아지는 단점이 있다. 또한 단일 시험편 제하 컴플라이언스 방법은 하나의 시험편으로 J -저항 곡선을 결정할 수 있는 장점이 있는 반면, 균열 길이의 측정이 매우 복잡해지는 단점이 있다.

본 연구에서는 균열 길이의 별도 측정없이, 하중-변위 곡선에서 직접 J_{IC} 를 결정하는 방법을 제안하고 그 타당성을 조사한다. 또한 키이 곡선(key curve)을 이용하여 J_{IC} 를 좀더 간단하게 구하는 방법에 대해서도 알아본다. 위의 방법으로 결정된 J_{IC} 의 값은 ASTM에 의해 제안된 R -곡선 방법으로 구한 J_{IC} 의 값과 비교된다. 본 연구의 타당성을 조사하기 위하여 기계 구조용합금강인 SCM4를 사용한 파괴 실험을 수행한다.

2. 하중-변위 곡선에서 직접 J_{IC} 를 결정하는 방법

2.1 ASTM 방법

최근 개정된 ASTM 표준 실험 방법 E813 (ASTM standard test method E813-87)에서는 다음과 같이 J_{IC} 를 결정한다⁴⁾. 먼저 파괴 실험에서 결정된 J - Δa 데이터를 다음식과 같은 역함수 꼴로 피팅(fitting)한다.

$$J = \xi \cdot (\Delta a)^\rho \quad (1)$$

여기서 ξ 와 ρ 는 피팅 상수들이다. 그 다음, 식 (1)

의 J -저항 곡선과 다음식으로 표시되는 0.2mm 이동 둔화선(0.2mm offset blunting line)과의 교점을 구해, 그 교점에서의 J 값을 J_{IC} 로 정의한다.

$$J = 2 \cdot \alpha_0 \cdot (\Delta a - 0.2) \quad (2)$$

앞으로는 ASTM 방법에 의해 결정되는 J_{IC} 의 값을 $(J_{IC})_a$ 로 표기한다. 본 연구에서는 위의 방법에 의해 J_{IC} 를 결정할 때, 단일 시험편 제하 컴플라이언스 방법에 의해 균열길이를 측정하도록 한다.

2.2 하중-변위 곡선에서 직접 J_{IC} 를 결정하는 방법

본 방법은 균열 길이를 따로 측정하지 않고, 단지 하중-변위 곡선의 데이터만으로 J_{IC} 값을 결정하는 것이다. 이때 J_{IC} 는 J -저항 곡선과 식 (2)로 주어진 0.2mm 이동 둔화선과 교점에서의 J 값으로 정의한다.

먼저 J 값은 다음 식과 같이 하중-변위 곡선에서 구할 수 있다⁶⁾.

$$J = J_e + \frac{h(a/W)}{B \cdot (W-a)} \int_{\delta_e}^{\delta} P d\delta \quad (3)$$

여기서 B , W , a 는 각각 시험편 두께, 폭, 균열 길이를 나타내고, P 는 하중, δ 는 하중선 변위(load-line displacement 앞으로는 '변위'로 표기함)를 나타낸다. 또한 $h(a/W)$ 는 시험편 형상의 함수이다. 또한 J_e 는 탄성 영역까지의 J 값으로서 다음과 같이 정의된다.

$$J_e = \frac{h(a_0/W)}{B \cdot (W-a_0)} \cdot \frac{P_e \cdot \delta_e}{2} \quad (4)$$

여기서 a_0 는 초기 균열길이이고, P_e 와 δ_e 는 각각 탄성 한계(elastic limit)에서의 하중과 변위이다 (Fig. 1 참조).

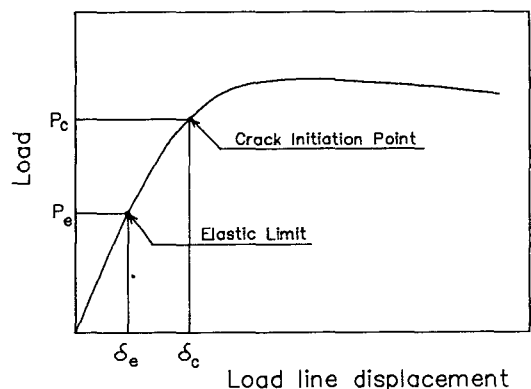


Fig. 1 Schematic diagram for load-displacement curve (P - δ curve)

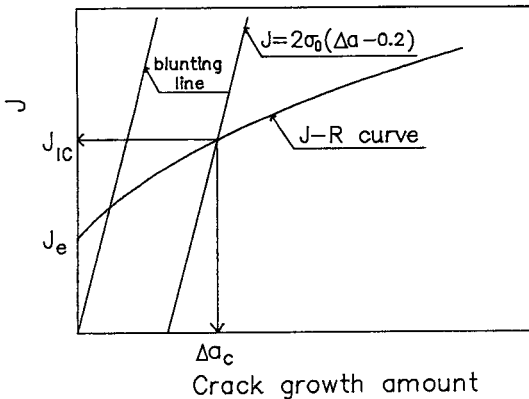


Fig. 2 Schematic diagram for J -resistance curve ($J-\Delta a$ curve)

식 (3)은 J 가 하중과 변위, 그리고 균열길이의 함수임을 보여주고 있다. 식 (3)의 J 를 균열 진전량 Δa 의 함수로 도식적으로 그린것이 Fig. 2에 표시되어 있다(J - R curve). J 값이 J_e 에 도달하기 전까지는 시험편이 탄성 거동을 하므로 균열은 진전하지 않는다. J 값이 J_e 을 지난 후부터 균열 진전이 시작된다.

J_{IC} 는 위의 J -저항 곡선과 식 (2)로 주어진 0.2 mm 이동 둔화선과의 교점에서의 J 값으로 정의하였으므로 다음의 관계가 성립한다.

$$J_e + \frac{h(a_c/W)}{B \cdot (W - a_c)} \int_{\delta_e}^{\delta_c} P d\delta = 2 \cdot \sigma_0 \cdot (\Delta a_c - 0.2) \quad (5)$$

여기서 δ_c , Δa_c , a_c 은 J -저항 곡선과 0.2mm 이동 둔화선과의 교점에 대응하는 변위, 균열 진전량, 균열길이를 나타낸다(Fig. 2 참조). 또한 a_c 는 초기 균열길이 a_0 와 균열 진전량 Δa_c 와 ' $a_c = a_0 + \Delta a_c$ '의 관계가 있으므로, $h(a_c/W)$ 는 다음식과 같이 근사적으로 Taylor 전개를 할 수 있다.

$$h\left(\frac{a_0 + \Delta a_c}{W}\right) = h\left(\frac{a_0}{W}\right) + \left(\frac{\Delta a_c}{W}\right) \cdot h' \left(\frac{a_0}{W}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta a_c}{W}\right)^2 \cdot h''(a_0/W) \quad (6)$$

여기서 $(\Delta a)^3$ 이상의 항은 무시하였다. 식 (6)을 식 (5)에 대입한 후 Δa_c 에 대해 정리하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$[a_1 \int_{\delta_e}^{\delta_c} P d\delta + a_2] \cdot (\Delta a_c)^2 + [a_3 \int_{\delta_e}^{\delta_c} P d\delta + a_4] \cdot (\Delta a_c) + [a_5 \int_{\delta_e}^{\delta_c} P d\delta + a_6] = 0 \quad (7)$$

여기서 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 는 다음과 같이 정의되는 상수이다.

$$a_1 = \left(\frac{1}{2W^2}\right) \cdot h''(a_0/W) \quad (8a)$$

$$a_2 = 2 \cdot \sigma_0 \cdot B \quad (8b)$$

$$a_3 = \left(\frac{1}{W}\right) \cdot h'(a_0/W) \quad (8c)$$

$$a_4 = -J_e \cdot B - 2 \cdot \sigma_0 \cdot B \cdot (W - a_0 + 0.2) \quad (8d)$$

$$a_5 = h(a_0/W) \quad (8e)$$

$$a_6 = J_e \cdot B \cdot (W - a_0) + 0.4 \cdot \sigma_0 \cdot B \cdot (W - a_0) \quad (8f)$$

식 (7)을 만족하는 근을 구하면 J_{IC} 값을 결정할 수 있다. 그러나 식 (7)은 Δa_c 과 P_c, δ_c 의 함수이므로 Δa_c 를 소거해야만(또는 Δa_c 를 하중, 변위의 식으로 치환해야만) 하중-변위 곡선에서 직접 J_{IC} 의 값을 결정할 수 있게 된다. Δa_c 와 하중, 하중선 변위의 관계는 다음과 같이 유도할 수 있다. 하중선 변위는 다음과 같이 탄성 성분과 소성 성분으로 나눌 수 있다.

$$\delta_c = (\delta_e)_c + (\delta_p)_c \quad (9)$$

여기서 δ_c 는 균열 진전 시작점(Fig. 1, Fig. 2 참조)에서의 하중선 변위이고, $(\delta_e)_c$ 와 $(\delta_p)_c$ 는 균열 진전 시작점에서의 탄성 변위와 소성 변위이다. $(\delta_e)_c$ 와 $(\delta_p)_c$ 는 각각 다음과 같이 쓸 수 있다⁽⁶⁾.

$$(\delta_e)_c = \frac{P_c}{B \cdot E} f(a_c/W) \quad (10a)$$

$$(\delta_p)_c = 2 \cdot \Delta a_c \cdot g(a_c/W) \quad (10b)$$

' $a_c = a_0 + \Delta a_c$ '의 관계와 $f(a/W)$ 와 $g(a/W)$ 에 대한 Taylor 전개를 이용하면 식 (9)~식(10-b)에서 다음의 관계를 유도할 수 있다.

$$(\beta_1 \cdot P_c + \beta_2) \cdot (\Delta a_c)^2 + (\beta_3 \cdot P_c + \beta_4) \cdot (\Delta a_c) + (\beta_5 \cdot P_c - \delta_c) = 0 \quad (11)$$

식 (11)의 해를 구하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$\Delta a_c = \frac{-(\beta_1 P_c + \beta_2) + [(\beta_3 P_c + \beta_4)^2 - 4 \cdot (\beta_1 P_c + \beta_2) \cdot (\beta_5 P_c - \delta_c)]^{0.5}}{2 \cdot (\beta_1 P_c + \beta_2)} \quad (12)$$

여기서 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ 는 다음과 같이 정의되는 상수이다.

$$\beta_1 = \left(\frac{1}{2 \cdot B \cdot E \cdot W^2}\right) \cdot f''(a_0/W) \quad (13a)$$

$$\beta_2 = \left(\frac{2}{W}\right) \cdot g'(a_0/W) \quad (13b)$$

$$\beta_3 = \left(\frac{2}{B \cdot E \cdot W}\right) \cdot f'(a_0/W) \quad (13c)$$

$$\beta_4 = 2 \cdot g(a_0/W) \quad (13d)$$

$$\beta_5 = \left(\frac{1}{B \cdot E}\right) \cdot f(a_0/W) \quad (13e)$$

여기서 $f(a/W)$, $g(a/W)$ 는 시험편 형상의 함수이다. 식 (12)를 식 (7)에 대입하면 하중-변위 관계로만 이루어진 다음의 최종식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & [a_1 \int_{\delta_e}^{\delta_c} P d\delta + \alpha_2] \cdot \\
 & \left\{ \frac{-(\beta_1 P_c + \beta_2) + [(\beta_3 P_c + \beta_4)^2 - 4 \cdot (\beta_1 P_c + \beta_2) \cdot (\beta_5 P_c - \delta_c)]^{0.5}}{2 \cdot (\beta_1 P_c + \beta_2)} \right\}^2 \\
 & + [a_3 \int_{\delta_e}^{\delta_c} P d\delta + \alpha_4] \cdot \\
 & \left\{ \frac{-(\beta_1 P_c + \beta_2) + [(\beta_3 P_c + \beta_4)^2 - 4 \cdot (\beta_1 P_c + \beta_2) \cdot (\beta_5 P_c - \delta_c)]^{0.5}}{2 \cdot (\beta_1 P_c + \beta_2)} \right\} \\
 & + [a_5 \int_{\delta_e}^{\delta_c} P d\delta + \alpha_6] = 0 \tag{14}
 \end{aligned}$$

식 (14)에 의해 J_{IC} 를 결정하는 순서는 다음과 같다. 먼저 식 (14)의 좌변을 $Y(P, \delta)$ 라 하자. 하중-변위 곡선에서 탄성 한계를 결정하여 그때의 P_e 과 δ_e 의 값을 구한 후, 그 이후의 하중-변위 데이터를 $Y(P, \delta)$ 에 차례로 대입하여 가다가 Y 값이 0이 되는 곳에서의 P_c 와 δ_c 를 결정한다. 그 값을 식 (12)에 대입하면 Δa_c 를 결정할 수 있고, 따라서 식 (2)이나 식 (3)에서 J_{IC} 의 값을 결정할 수 있다. 앞으로는 위의 방법으로 결정된 J_{IC} 를 $(J_{IC})_d$ 로 표기하기로 한다.

2.3 키이 곡선을 이용한 J_{IC} 의 결정 방법

식 (14)로 J_{IC} 를 결정하기 위해서는 하중-변위 데이터가 있어야 한다. 그러나 시험편에 대한 하중-변위 관계를 미리 알 수 있다면, 좀 더 쉽게 식 (14)에서 J_{IC} 를 구할 수 있을 것이다. 시험편에 대한 하중-변위 관계를 나타내는 곡선을 키이 곡선(key curve)이라고 한다.

주로 굽힘 하중을 받는 삼점 시험편(three-point bending specimen, 앞으로는 TPB 시험편으로 표기함)이나 컴팩트 인장 시험편(compact tension specimen, 앞으로는 CT 시험편으로 표기함)에 대한 키이 곡선은 Lin등⁽⁷⁾에 의해 이미 다음과 같이 제안되어 있다.

$$P = \gamma \cdot E \cdot B \cdot (W - a)^2 \cdot \left[\frac{\delta}{W} \right]^s \tag{15}$$

여기서 γ 와 s 는 재료와 시험편 형상에 따라 결정되는 키이 곡선의 피팅(fitting) 상수이다. 식 (15)를 식 (14)에 대입하면 식 (14)는 변위만으로 이루어진 방정식이 된다. 따라서 키이 곡선의 피팅 상

수 γ 와 s 를 알면 하중-변위의 데이터를 모르더라도 J_{IC} 를 결정할 수 있다. 물론 키이 곡선의 피팅 상수 γ 와 s 를 구하기 위해서는 하중-변위 데이터가 필요하지만, 키이 곡선이 어떤 시험편에 대해 구해져 있다면 쉽게 J_{IC} 의 값을 결정할 수 있는 장점이 있다. 앞으로는 키이 곡선을 사용하여 결정된 J_{IC} 를 $(J_{IC})_k$ 로 표기하기로 한다.

3. 실험

3.1 시험편 및 실험 방법

본 연구의 실험에서 사용한 시험편의 재질은 기계 구조용 합금강인 SCM4(KS 규격, 크롬-몰리브덴 강)이다. SCM4의 화학 성분과 재료 물성치들이 각각 Table 1과 Table 2에 표시되어 있다. 여

Table 1 Chemical compositions of SCM4(wt %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM4	.40	.25	0.73	.03	.03	1.15	0.23

Table 2 Material properties of SCM4 after heat treatment

Yield stress(kgf/mm ²)	83.2±1.3
Tensile strength(kgf/mm ²)	94.8±1.22
Young's modulus(kgf/mm ²)	21600±350
Elongation(%)	19.7±2.4
Reduction of area(%)	61.5±1.5
Poisson's ratio	0.30

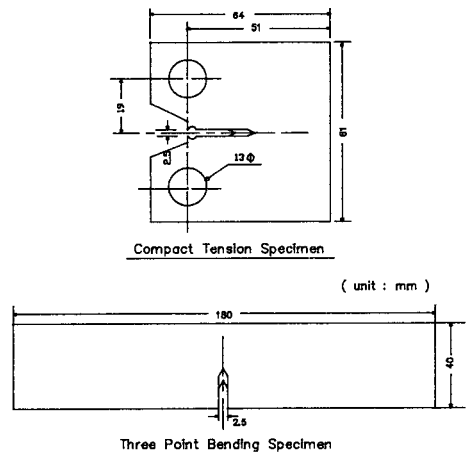


Fig. 3 Dimensions and geometries of compact tension specimen and three point bending specimen

Table 3 Hardness of SCM4

After machining(Rockwell A)	53.5±1.7
After quenching(Rockwell C)	51.4±16
After tempering(Rockwell C)	26.8±1.6

기서 재료의 물성치는 ASTM 표준 실험 방법 E8⁽⁸⁾에 의거한 인장 실험으로 부터 결정하였다. 시험편의 형상은 CT 시험편과 TPB 시험편으로 제작하였으며, 그 형상이 Fig. 3에 표시되어 있다. 초기 균열비는 0.60, 0.65, 0.70, 0.75의 4가지로 하였으며, 두께는 CT 시험편의 경우는 25.4mm로, TPB 시험편의 경우는 20mm로 하였다. 시험편은 LT 방향으로 제작하였으며, 노치(notch)부의 형태는 세브론(chevron) 형으로 하였다. 재료들이 균일한 성질을 갖게하기 위하여 시험편 가공 후 열처리를 하였다. 열처리는 먼저 담금질을 한 후, 뜨임을 하였다. 담금질은 850°C에서 1시간 유지한 후 유냉을 하였으며, 뜨임은 645°C에서 1시간 15분 유지한 후 공냉을 하였다. 열처리를 전후한 재료의 경도(hardness)가 Table 3에 표시되어 있다.

실험은 50톤(ton) 용량의 유압 시험기(model : MTS)를 사용하였다. 하중은 시험기에 부착된 로드셀(load cell)로 측정하였으며, 변위는 클립 온 게이지(clip-on gage, model : MTS 63202C-20)를 사용하여 측정하였다. ASTM 표준 실험 방법 E813에 의거하여 피로 균열을 발생시켰으며, 파괴 실험은 변위 속도를 0.14mm/sec로 하여 변위 제어(stroke control) 실험을 하였다. 균열 길이의 측정을 위한 제하(unloading)는 변위 0.3mm마다 하였고, 파괴 실험은 최대 변위 5mm 까지 하였다. 실험 후, 시험편에 열 착색(heat tinting)을 하여 초기 균열 길이와 최종 균열 진전량을 14" 옵티컬 컴퍼레이터(optical comparator, model : Clausing 4301)를 사용하여 측정하였다.

3.2 여러 함수의 결정

식 (14)에 의해 J_{IC} 를 결정하기 위해서는 식 (8)과 식 (13)에 나타나 있는 시험편 형상에 따른 함수 $h(a/W)$, $f(a/W)$, $g(a/W)$ 를 알아야 한다. 이런 함수들은 이미 알려져 있다. 본 연구에서는 CT 시험편과 TPB 시험편에 대해 다음 식들을 사용하였다^(9,10).

(CT 시험편)

$$h(r) = 2 + 0.522 \cdot (1 - r) \tag{16a}$$

$$f(r) = \left[\frac{1+r}{1-r} \right]^2 [2.163 + 12.219r - 20.062 \cdot r^2 - 0.993 \cdot r^3 + 20.609 \cdot r^4 - 9.9314 \cdot r^5] \tag{16b}$$

$$g(r) = \left[\frac{2}{1-r} + \lambda - 1 \right] \cdot \left[\frac{1}{1-\lambda} \right] \tag{16c}$$

여기서 λ 는 다음과 같다.

$$\lambda = \left[\{2 \cdot (1+r^2)\}^{0.5} - (1+r) \right] / (1-r) \tag{16d}$$

(TPB 시험편)

$$h(r) = 2 \tag{17a}$$

$$f(r) = 23915.5 - 1147460.5 \cdot r - 341879.0 \cdot r^2 - 353207.3 \cdot r^3 + 1378827.3 \cdot r^4 \tag{17b}$$

$$g(r) = \frac{1}{0.45 \cdot (1-r)} \tag{17c}$$

여기서 r 은 균열비 a/W 이다.

4. 결과 및 토론

4.1 파괴 실험

초기 균열비 0.60, 0.65, 0.70, 0.75인 CT 시험편과 TPB 시험편에 대한 초기 균열 길이와 최종 균열 진전량이 Table 4(a)와 4(b)에 표시되어 있다. 여기서 최종 균열 진전량은 실험이 끝난 후 열 착색된 시험편에서 직접 측정된 양이다. 단일 시험편 제한 컴플라이언스 방법에 의해 계산된 최종 균열 길이는 시험편에서 직접 측정된 최종 균열 진전량보다 30-40% 정도 작게 평가되었다. 이 이유는 균열 선단의 터널링(tunneling)과 시어 립(shear lip)의 형성때문으로 생각된다.

Fig. 4는 대표적인 하중-변위 곡선을 나타낸 그림이다. 이것은 C60-2 시험편에 대한 것으로, 여기서 탄성 한계(elastic limit)에서의 하중(P_e)과 변위(δ_e)는 각각 3120 kgf와 0.37mm이다.

4.2 ASTM 방법

Fig. 5는 C65-1 시험편에 대한 $J-\Delta a$ 곡선을 나타낸 그림이다. J -저항 곡선의 데이터를 식 (1)과 같이 멱급수 꼴로 피팅하였을 때의 피팅 상수, ξ 와 ρ 의 값은 각각 43.15와 0.496이다. 이 값으로 구한 J -저항 곡선과 식 (2)로 주어지는 0.2mm 이동 둔화선의 교점에서의 J 값, 즉 $(J_{IC})_a$ 는 25.4 kgf/mm이다. ASTM 방법으로 구한 CT 시험편과 TPB 시험편의 J_{IC} , 즉 $(J_{IC})_a$ 가 Table 4(a)와 (b)에 표시되어 있다. 전 시험편에 대한 $(J_{IC})_a$ 의 평균값과 편차는 26.8±2.2kgf/mm이다.

Table 4(a) Initial crack length(a_o), final crack growth amount (Δa_f) and various J_{IC} values for CT specimens

Specimen	a_o (mm)	Δa_f (mm)	$(J_{IC})_a$ (kgf/mm)	$(J_{IC})_a$ (kgf/mm)	$(J_{IC})_k$ (kgf/mm)
C60-1	31.038	2.472	29.8	26.4	30.5
C60-2	31.350	3.849	29.0	25.8	30.4
C60-3	31.170	4.846	31.4	27.6	31.8
C65-1	32.687	3.873	25.4	22.8	27.8
C65-2	33.440	3.584	29.6	21.8	25.5
C65-3	33.497	3.462	29.8	22.4	27.6
C70-1	36.052	2.276	28.2	19.2	27.3
C70-2	36.146	2.665	26.4	21.0	25.8
C70-3	36.275	2.682	25.4	23.1	25.5
C75-1	38.438	1.752	28.8	26.8	27.4
C75-2	38.743	2.216	27.6	22.4	25.4
C75-3	38.746	1.126	25.0	22.6	26.8

Table 4(b) Initial crack length(a_o), final crack growth amount(Δa_f) and various J_{IC} values for TPB specimens

Specimen	a_o (mm)	Δa_f (mm)	$(J_{IC})_a$ (kgf/mm)	$(J_{IC})_a$ (kgf/mm)	$(J_{IC})_k$ (kgf/mm)
T60-1	24.189	1.771	23.4	26.8	28.6
T60-2	24.284	1.320	25.3	26.6	32.8
T60-3	24.538	2.730	25.5	22.0	30.2
T65-1	26.225	1.109	22.7	23.1	29.4
T65-2	26.293	1.132	27.4	24.4	29.4
T65-3	26.353	1.429	22.8	23.9	30.1
T70-1	28.424	1.511	25.2	24.5	24.8
T70-2	28.525	2.138	29.8	28.4	27.5
T70-3	28.546	1.821	23.8	27.8	27.6
T75-1	30.062	1.109	29.0	25.3	24.4
T75-2	30.263	1.436	26.5	26.7	26.8
T75-3	30.464	11.324	25.6	22.4	22.2

4.3 하중-변위 곡선에서 직접 J_{IC} 를 구하는 방법

하중 변위 곡선에서 직접 J_{IC} 의 값을 구하기 위해서는 식 (14)로 주어지는 방정식의 근을 구해야 한다. 2.2 절에서 언급한 바와 같이 식 (14)의 좌변의 식을 Y 라고 하면, Y 는 J -저항 곡선에서 0.2mm 이동 둔화선을 뺀 값에 두께 B 와 균열비형성부의 길이 ($W-a$)를 곱해준 값이다. 따라서 Y 의 차원은 $[J \times B \times (W-a)] = [kgf \times mm]$ 이 된다. 하중-변위 곡선의 P_c, δ_c 의 값을 구한 후, 이

값을 식 (12)에 대입하여 Δa_c 를 결정한다. 이 Δa_c 의 값을 식 (2)에 대입하면 $(J_{IC})_a$ 의 값을 구할 수 있다. Y 값은 처음에는 양(positive)의 값을 갖다가 균열이 진전함에 따라 음(negative)이 되므로 그 사이에 반드시 0이 되는 곳이 존재하게 된다.

Fig. 6은 C65-1 시험편에 대한 Y 값을 균열 진전양에 대해 그린 그림이다. Y 값은 0.2mm까지는 증가하다가 그 이후부터 감소하기 시작하여 $\Delta a_c = 0.329mm$ 에서 0이 된다. 바로 이 점에서의 J 값이 $(J_{IC})_a$ 로, C65-1 시험편의 경우 22.8kgf/

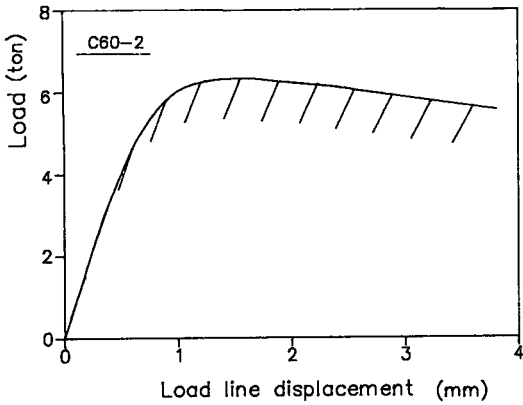


Fig. 4 Load-displacement curve for C60-2 specimen

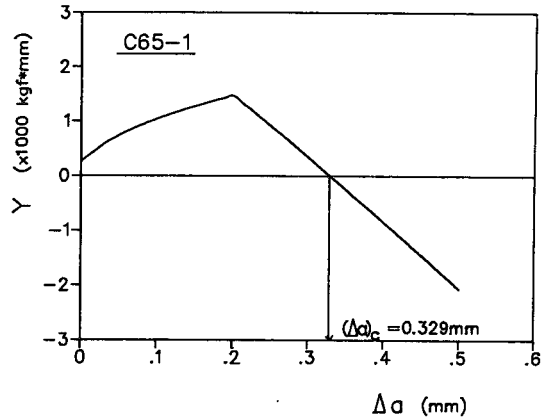


Fig. 6 $Y-\Delta a$ curve for C65-1 specimen. The values of $(\Delta a)_c$ and $(J_{IC})_a$ are 0.3287mm and 22.8kgf/mm respectively

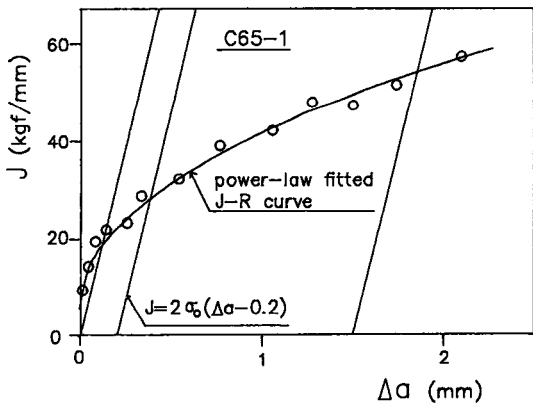


Fig. 5 $J-\Delta a$ curve for C65-1 specimen. The value of $(J_{IC})_a$ is 25.4kgf/mm

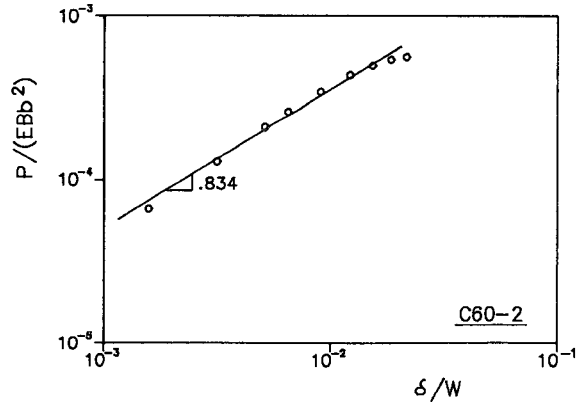


Fig. 7 Key curve for C60-2 specimen. The values of fitting constants, namely, γ and s given by Eq. (15) are -1.793 and 0.834 respectively

mm이다. CT 시험편과 TPB 시험편에 대한 $(J_{IC})_a$ 의 값이 Table 4(a)와 (b)에 표시되어 있다. 전 시험편에 대한 $(J_{IC})_a$ 의 평균값과 편차는 $24.4 \pm 2.3\text{kgf/mm}$ 로서 $(J_{IC})_a$ 과 비슷한 값을 보여주고 있다.

4.4 키이 곡선 방법

키이 곡선을 이용하여 J_{IC} 의 값을 구하기 위해서는 먼저 하중-변위 곡선의 키이 곡선을 구해야 한다. Fig. 7은 C60-2 시험편에 대한 하중-변위 데이터를 식 (15)의 형태로 피팅한 그림이다. 여기서 피팅 상수 γ 와 s 의 값은 각각 -1.793 , 0.834 이다. 이 값을 사용하여 결정된 C60-2 시험편에 대한 $(J_{IC})_k$ 의 값은 30.4kgf/mm 이다. 이와 같이 γ ,

s 값을 구하여 식 (15)와 식 (14)로부터 결정된 $(J_{IC})_k$ 의 값이 Table 4(a)와 (b)에 표시되어 있다. 전 시험편에 대한 $(J_{IC})_k$ 의 평균값과 편차는 $27.2 \pm 2.6\text{kgf/mm}$ 로서, $(J_{IC})_a$ 의 값과 매우 비슷한 값을 보여 준다.

키이 곡선은 시험편 형상만 알면 균열 길이에 상관없이 하중-변위 거동을 설계(즉 2개의 피팅 상수만 가지고) 기술할 있다는 공학적인 장점을 가지고 있다. 탄소성 거동을 하는 시험편의 하중-변위 거동을 정확히 기술하는 키이 곡선을 구하는 것은 매우 어렵다. 다만 삼점 굽힘 시험편의 키이 곡선만이 어느정도 자세히 조사되었을 뿐이고 다른 형상의 시험편에 대한 키이 곡선은 아직 확실하게 알려져 있지 않다. 본 논문에서 사용한 멱급수 형태

의 키이 곡선도 하중-변위 곡선을 완전하게 기술하고 있지않다⁽⁷⁾. 따라서 J_{IC} 의 결정에 오차가 발생할 것으로 예상된다.

하중-변위 곡선에서 J -저항 곡선을 구하는 기본적인 개념은 키이 곡선에서 출발하였다. 키이 곡선은 시험편의 하중-변위 거동을 기술하는 것이므로 여기서 바로 J -저항 곡선을 유도할 수 있다⁽⁷⁾. 그 후 Herrera와 Landes⁽¹¹⁾는 하중-변위 곡선에서 직접 J -저항 곡선을 구하는 방법을 제안하였다. Herrera와 Landes의 방법과 본 연구에서 제안한 방법의 차이는 다음과 같다. 먼저 Herrera와 Landes의 논문은 J 를 탄성 성분(J_e)과 과소성 성분(J_p)로 나누었다. 그러나 본 연구에서는 J 를 탄성 영역(elastic range : 균열전전은 없고 변위만 선형적으로 증가하는 영역)의 최대점까지의 J 값(본 연구에서도 J_e 로 표시하였으나 Herrera와 Landes의 J_e 와는 다름)과 그 이후에서의 J 값(이 J 는 탄성 성분과 소성 성분이 모두 포함되어 있는 J 값임)으로 나누었다. 따라서 Herrera와 Landes의 식은 변위가 0인 점 부터 적용되나, 본 연구의 식은 변위가 탄성 한계 이후부터 적용된다. 또한 Herrera와 Landes의 식을 사용하기 위해서는 변위의 소성 성분(δ_{p1})을 따로 결정 해야하나 본 연구의 식을 사용하면 δ_{p1} 의 별도 측정 없이 하중-변위(즉 전체변위) 곡선에서 바로 J_{IC} 의 값을 구할 수 있다는 장점이 있다.

5. 결 론

(1) 균열 전진양의 별도 측정 없이 하중-변위 곡선에서 직접 J_{IC} 의 값을 구하는 방법으로 결정된 $(J_{IC})_a$ 의 값은 ASTM에 의해 제안된 방법으로 구한 $(J_{IC})_a$ 값과 비슷한 값을 보여 준다.

(2) Line등⁽⁷⁾이 제안한 CT 시험편과 TPB 시험편에 대한 키이 곡선을 하중-변위 곡선에서 직접 (J_{IC}) 의 값을 구하는 식에 대입하여 결정된 $(J_{IC})_a$ 의 값도 ASTM 방법으로 결정된 $(J_{IC})_a$ 값과 상

당히 비슷한 결과를 보여 준다.

참 고 문 헌

- (1) ASTM Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 1988, E399-83, ASTM, Vol. 3.1, pp. 480~504.
- (2) Begley, J.A. and Landes, J.D., 1972, "The J -Integral as a Fracture Criterion", ASTM STP 514, p. 1.
- (3) Rice, J.R., 1968, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentrations by Notch and Crack", J. of Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 379~386.
- (4) ASTM Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, 1988, E813-87, ASTM, Vol. 3.1, pp. 686~700.
- (5) 일본기계학회기준, 탄소성과괴인성 J 시험방법, 1981, JSME S 001-1981, JSME, pp. 1~142.
- (6) Ernst, H.A., Paris, P.C., and Landes, J.D., 1981, "Estimation on J -Integral and Tearing Modulus T from Single Specimen Test Record", ASTM STP 743, pp. 476~502.
- (7) Lin, I.H. and Rosenfield, A.R., 1982, "Key Curve Analysis of Crack Growth resistance Curve", Int. J. of Fracture, Vol. 20, pp. 103~115.
- (8) ASTM Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials, 1988, E8-87a, ASTM, Vol.3.1, pp. 121~136.
- (9) Joyce, J.A. and Vassilaros, M.G., 1981, "An Experimental Evaluation of Tearing Instability Using the Compact Sopecimen", ASTM STP 743, pp. 525~542.
- (10) You-Gu Xian and Guo-Hao Huang, 1982, "on the Compatibilty between J -Integral and Crack Opening Displacement : , Engng Fracture Mechanics, Vol. 16, pp. 83~94.
- (11) Herrera, R. and Landes, J.D., 1988, "A Direct J -R Curve Analysis of Fracture Toughness Tests", J. of Testing and Evaluation, Vol. 16, pp. 427~449.