

<論 文>

平面應力 破壞韌性值 舉動에 관한 研究

—CT 試驗片을 中心으로—

宋 森 弘* · 高 性 渭**

(1986年 8月 23日 接受)

A Study on the Behavior of the Plane Stress Fracture Toughness

—About the Compact Tension Specimen—

Sam Hong Song and Sung Wi Koh

Key Words: *J*-Integral(*J*-적분), Compact Tension Specimen(CT 시험편), Plane Stress Fracture Toughness(평면응력 파괴인성치), *J*-Resistance Curve(*J* 저항곡선), Strain Hardening(변형경화)

Abstract

In this paper, the plane stress fracture toughness of low carbon steel with 3mm thickness is investigated for various specimen widths and crack ratios using the *J* integral. The experiments is carried out for the compact tension(CT) specimen on an Instron machine.

For materials that may be approximated by the Ramberg and Osgood stress strain law, the relevant crack parameter like the *J* integral and load line displacement are approximately normalized. Crack driving forces in terms of *J* integral is computed using the above estimation scheme. Abtained results are summarized as follows.

(1) The plane stress fracture toughness, J_c , is almost constant in the range 50~70mm of width. Hence J_c can be obtained by using smaller specimen than ASTM standad.

(2) Yoon's and Simpson's formular which considers crack growth in obtaining *J* integral show more consevative *J* than Rice's and Merkle's.

(3) J_c is almost constant in the range 0.499~0.701 crack ratios tested. J_c obtained by using Kumar's formular is 28.14kgf/mm for base metal specimen and 32.51kgf/mm for annealed.

(4) Comparison of the prediction with actual experimental measurements by Yoon's fo rmluar show good agreement for several different-size specimens.

* 正會員: 高麗大學校 工科大學 機械工學科

** 正會員: 高麗大學校 大學院, 現 釜山水產大學

기 호 설 명

a : 크랙길이 (mm)

- a_c : 유효 크랙길이 (mm)
 Δa : 크랙길이의 증분 (mm)
 A : 하중변위곡선하의 면적 (mm²)
 B : 시험편 두께 (mm)
 E : 탄성계수 (kgf/mm²)
 K : 응력강도계수 (kgf/mm^{3/2})
 n : 변형경화지수
 P : 적용하중 (kgf)
 P_t : 한계하중 (kgf)
 U : 포텐셜에너지
 W : 시험편 폭 (mm)
 Z : 크랙비 (a/W)
 α : 재료상수
 δ : 하중선 변위 (mm)
 ϵ_s : 탄성변형률 ($\sigma_s = E\epsilon_s$)
 σ_s : (항복응력 + 인장강도) / 2 (kgf/mm²)
 σ_s : 항복응력 (kgf/mm²)

1. 서 론

일반적으로 선형탄성 파괴역학은 크랙선단의 소성역이 크랙길이에 비해 매우 작은 소규모 항복조건인 경우에 대하여 적용할 수 있으며, 이의 대표적인 매개변수(parameter)가 응력강도계수 K 이다. 그러나 연성이 높은 재료가 응력을 받을 경우 크랙선단의 소성역이 커지므로 선형탄성 파괴역학의 적용은 곤란하다. 또 ASTM E399⁽¹⁾에 규정하는 재료의 임계 응력강도계수 K_{Ic} 를 구하는 실험에서는 대단히 큰 크기의 시험편이 필요하게 되고 경우에 따라서는 시험편의 치수 또는 시험기의 용량의 점으로 보아 K_{Ic} 를 구할 수 없는 경우가 많다⁽²⁾.

따라서 이러한 경우에서의 크랙선단의 응력 및 변형률 상태의 설명은 재료의 탄소성을 고려한 새로운 방법이 필요하게 된다. 이 중 크랙선단의 탄소성거동에 대한 해석적도구로서 제안된 것이 Rice⁽³⁾가 정의한 J 적분이다. J 적분은 소성변형 이론이 적용될 때 임의의 적분경로를 따라 계산하면 적분경로에 무관하고, J 적분의 값은 크랙선단을 포함하는 HRR 응력변형률장(Hutchinson-Rice-Rosengren stress strain field)⁽⁴⁻⁶⁾에서의 크랙선단의 응력 및 변형률의 특이성의 세기를 나타낸다.

J 적분에 대한 연구는 대부분이 평면변형률 상태에서 연구로서 다음과 같다. Begley와 Landes⁽⁷⁾가 크랙성장 시작점에서 J 적분값을 평면변형률 파괴인성치

J_{Ic} 로 정의한 이래 많은 관심의 대상이 되었으며⁽⁸⁻¹²⁾, 이에 대한 실험방법이 ASTM E813⁽¹³⁾에 표준화 되었다. 이 규정에 의하면 시험편 치수는 다음과 같은 제약조건이 있다.

$$B, (W-a) \geq 25J_{Ic}/\sigma_s \quad (1)$$

Garwood등⁽⁴⁾은 Rice 등⁽⁸⁾과 Merkle등⁽⁹⁾에 의하여 제안된 J 적분식은 크랙성장 시작점까지만 적용할 수 있으므로 크랙성장이 시작된 후에는 이 식들에 의한 J 적분값이 과대평가되므로 크랙성장을 고려하여 수정하여야 한다고 발표하였다.

한편, 연성을 갖는 두께가 얇은 판재가 응력을 받는 경우는 평면응력 상태로 취급할 수 있으며 (1)식의 제약조건을 만족시키지 못한다. 즉 두께가 얇은 시험편으로는 평면변형을 파괴인성치를 구하기 곤란하다. 이러한 두께가 얇은 시험편을 이용한 J 적분에 대한 연구는 다음과 같은 연구가 있으나 회박한 실정이다. Adams 등⁽¹⁵⁾은 $B=3.2\text{mm}$, $z=0.20\sim 0.55$, $W=26\sim 203\text{mm}$ 인 CT(compact tension) 시험편등에서 실험한 결과 작은 크랙비에서 높은 파괴인성치를 얻으며, W 의 증가에 따라 파괴인성치는 증가한다는 결과를 발표하였다. Hickeson⁽¹⁶⁾은 $B=2.06\sim 4.01\text{mm}$, $z=0.59\sim 0.88$, $W=63.5\sim 102\text{mm}$ 인 CT 등의 시험편에서 Rice식을 적용한 결과 파괴인성치는 시험편 치수와 z 에 무관하다고 하여 Adams 등의 연구에 상반된 결론을 얻었으며, 또 W 의 최소치수는 (1)식의 제약조건보다 작으나 규정하지 못하였다. Kumar 등⁽¹⁷⁾은 재료를 변형경화한다고 가정하여 평면변형률 및 평면응력 상태의 CT 시험편에서 HRR 응력변형률장의 특징을 이용하여 이론식을 정립한 후 수치해석에 의한 J 적분값을 계산하여 타연구의 실험결과와 비교적 잘 일치한다고 발표하였다.

위의 연구결과들을 종합하여 보면 다음과 같은 문제점을 생각할 수 있다.

(1) 평면응력 파괴인성치가 W 에 따라 어떠한 영향을 받으며 그 최소치는 얼마인가?

(2) 평면응력 상태에서 J 저항곡선 거동을 고찰한 연구는 없으나 이것은 z 에 따라 어떠한 거동을 할 것인가?

(3) 평면응력 상태에서 크랙성장을 고려한 J 적분식을 적용하면 J 저항곡선은 어떠한 거동을 할 것인가?

(4) Kumar 등⁽¹⁷⁾이 해석한 이론식을 이용한 J 적분값은 실험치와 비교하여 어떠한 차이를 나타낼 것인가?

본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 두께가 얇

은 평면응력 상태의 CT 시험편을 이용하여 W 와 z 의 변화에 따른 파괴인성치와 J 저항곡선의 거동 및 크랙 성장을 고려한 J 적분식도 검토하였다. 또한, 재료를 변형경화 재료로 가정하고 HRR 응력변형률장의 특성을 이용하여 컴퓨터 프로그램을 작성하여 J 적분을 구한 후 실험치와 상호 비교 검토하였다. 이 때 사용한 입력자료는 실험치의 그것과 동일하게 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용한 재료는 $B=3\text{mm}$ 인 일반 구조용 압연강판을 사용하였다. 이 때 $B=3\text{mm}$ 로 선정한 이유는 응력을 가했을 때 판재의 상태가 평면응력 상태에 접근하도록 하기 위함이다. 이 재료의 기계적 성질을 얻기 위하여 인장 시험편은 압연방향으로 채취한 후 KS B0801 5호로 가공하여 시험하였다. 또한, 압연강판을 910°C 에서 1시간 유지후 로냉시킨 풀림재의 경우에도 모재와 동일한 방법으로 시험하였다. 시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 수치계산에 이용할 α 와 n 은 재료가 Ramberg

와 Osgood⁽¹⁸⁾의 변형경화 법칙을 따른다고 가정하여 얻었으며 여기에 함께 나타내었다.

시험편은 동일한 조건이 되도록 길이방향을 압연방향으로 하고 크랙전진방향을 압연지 각 방향으로 한 CT 시험편을 사용하였으며, Fig. 1에 시험편의 모양과 치수를 나타내었다. W 는 Adams⁽¹⁵⁾ 등과 Hicerson⁽¹⁶⁾의 연구결과와 비교하기 위하여 40, 50, 60, 70 mm로 하였으며, 4.1절에 고찰한 결과에 의해 $W=50\text{mm}$ 이면서 z 는 0.50, 0.60, 0.70으로 하였으며, 다음 순서로 준비하였다. 우선 0.45, 0.55, 0.65로 기계가공한 후 표면을 사포와 산화 알루미늄으로 연마하였다. 연마된 시험편은 다음 (2)식과 같은 P_I 의 40%되는 정현파를 편진하중으로 가하여 프로크랙을 2.5mm 정도 주어 $z=0.50, 0.60, 0.70$ 이 되도록 한 후 파괴시험하였다.

$$P_I = 1.072\eta(W-a)B\sigma^{(17)} \quad (2)$$

$$\eta = \sqrt{\left(\frac{2a}{W-a}\right)^2 + 2\left(\frac{2a}{W-a}\right) + 2} - \left(\frac{2a}{W-a} + 1\right) \quad (3)$$

시험은 $0.2\text{mm}/\text{min}$ 의 일정 변위속도로 실험하였다. 사용한 시험기는 Instron사의 전기유압식 인장압축 시험기(model; 1331, 용량: 10톤)이다. 하중질 변위는 하중과 함께 $X-Y$ 기록계에 기록하고, 동시에 다른 $X-Y$ 기록계에 OP amp를 사용하여 증폭시켜 기록하였다. 인장하중을 가하는 도중 크랙길이를 알고자하는 적당한 부분에서 하중을 10% 이내로 제한하여 증폭된 기울기를 $X-Y$ 기록계에 기록하여 하중에 대한 변위의 기울기를 구한 후, 하중제거 컴플라이언스 방법으로 크랙길이를 구하였다. 하중변위 곡선하의 면적은 면적계를 사용하였다. 이 결과를 다음 절에 기술한 각 J 적분식을 이용하여 J 저항곡선을 결정하였다. 평면응력 파괴인성치 J_c 를 ASTM의 방법대로 $J=2\sigma_c \Delta a$ 로 정의되는 크랙분화선과 J 저항곡선의 교점에서 구하였다. 크랙분화선을 $J=2\sigma_c \Delta a$ 를 사용하는 것은 4.2절에서 고찰하는 바와 같이 약간의 의문점이 있지만 다음 연구과제로 남겨두고 우선 본 연구에서는 ASTM의 방법에 따라 결과를 정리하였다.

Table 1 Chemical composition (wt%)

C	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
0.13	0.23	0.02	0.01	0.01	0.04	0.04

Table 2 Mechanical properties

Materials	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	n	α
$L-T$	42.1	28.6	48.5	7.521	19.715
Annealed	39.3	22.8	50.8	4.742	24.739

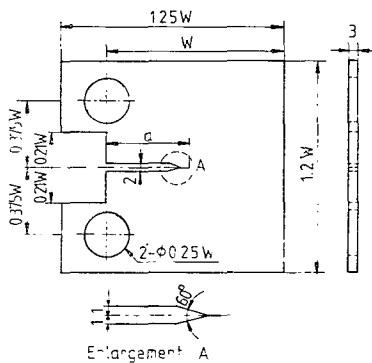


Fig. 1 Geometry and dimensions of CT specimen

3. CT 시험편에 대한 J 적분식

3.1 실험계산을 위한 J 적분식

Rice⁽⁹⁾가 2차원 파괴역학에 대한 매개변수로서 정의한 J 적분을 포텐셜에너지에 의하여 표현하면 다음과 같은 관계가 있음이 알려져 있다.

$$J = -\frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a} \tag{4}$$

또한, Rice 등⁽⁸⁾은 인장하중과 변위와의 관계가 함수관계가 있음을 이용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$J = \frac{2}{(W-a)} \int_0^{\delta} \left(\frac{P}{B} \right) d\delta \tag{5}$$

Merkle 등⁽⁹⁾은 CT 시험편에서 인장효과를 고려한 J 적분식을 제안하였는데 Landes 등⁽¹⁰⁾은 이를 다음과 같이 수정하였다.

$$J = \frac{1+\eta}{1+\eta^2} \frac{2A}{B(W-a)} \tag{6}$$

여기서 η 는 (3)식과 동일하다.

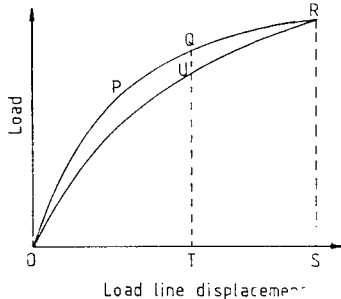
Garwood 등⁽¹¹⁾은 크랙이 성장함에 따라 J 적분값이 과대평가 되는 것을 방지하기 위하여 크랙이 성장한 시험편의 하중변위곡선의 면적 대신에 가상 하중변위 곡선의 면적을 J 적분식에 사용할 수 있음을 설명하였다. 이를 Fig. 2에 의하여 설명하면 다음과 같다. 곡선 $OPQR$ 은 최초 크랙길이 a_0 에 대한 하중변위 곡선으로 하중이 증가함에 따라 Q 점에서 크랙길이가 a_1 로 성장하여 R 점에 도달하고 있음을 나타내고 OUR 은 최초 크랙길이가 a_1 일 때의 가상 하중변위곡선이다. 따라서 J 적분값이 과대평가 되는 것을 수정하기 위해서는 $OPQR$ 에 의한 면적 A_1 대신에 OUR 의 한면적 A_2 를 사용하여야 한다.

Simpson⁽¹²⁾은 Garwood 등⁽¹¹⁾이 제안한 방법과 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$J_i = J_{i-1} \frac{W-a_i}{W-a_{i-1}} + \frac{2(A_i-A_{i-1})}{B(W-a_{i-1})} \tag{7}$$

여기서 첨자 i 는 i 번째의 값을 나타내며, 일 예로 J_i 는 i 번째의 J 적분값이다.

윤등⁽²⁰⁾은 (7)식과 유사한 방법으로 다음과 같은 수



$OPQR$: Actual load-displacement curve
 OUQ : Postulated load-displacement curve
 $OPQRSO$: Area A_1
 $OURSO$: Area A_2

Fig. 2 Load vs. load line displacement diagram

정식을 발표하여 그 유용성을 고찰하였다.

$$J_i = J_{i-1} \frac{(W-a_{i-1}) \cdot \frac{1+\eta^2}{1+\eta} - (a_i-a_{i-1})}{(W-a_i) \cdot \frac{1+\eta^2}{1+\eta} + (a_i-a_{i-1})} \tag{8}$$

본 연구에서는 (5), (6)식을 이용하여 J 적분값을 구하고, 동시에 크랙성장을 고려한 (7), (8)식을 사용하여 J 적분값을 구한 후 상호 비교 검토하였다.

3.2 수치계산을 위한 J 적분식

단순인장의 경우 Ramberg 와 Osgood⁽¹⁸⁾의 응력 변형률 관계를 다음과 같다.

$$\epsilon/\epsilon_y = \sigma/\sigma_y + \alpha(\sigma/\sigma_y)^n \tag{9}$$

재료는 (9)식을 따른다고 가정하면, J 적분과 δ 는 다음과 같이 탄성부분과 소성부분으로 나눌 수 있다.

$$J = J_e(a_i) + J_p(a_i, n) \tag{10}$$

$$\delta = \delta_e(a_i) + \delta_p(a_i, n) \tag{11}$$

탄성부분에서의 이 값들은 다음과 같다.

$$J_e = a_e P^2 f^2(z) / EB^2 W^2 \tag{12}$$

$$\delta_e = PV(z) / EB \tag{13}$$

여기서, f 와 V 는 크랙비의 함수로서 다음과 같다⁽²¹⁾.

$$f(z) = \frac{2+z}{z(1-z)^{1.5}} \cdot \{0.866+4.64z-13.32z^2 + 14.72z^3 - 5.6z^4\} \tag{14}$$

$$V(z) = \{0.995+27.977z-27.209z^2 + 11.06z^3\} / (1-z^4) \tag{15}$$

소성영역에서의 이 값들은 다음과 같다⁽²²⁾.

$$J_p = \alpha \epsilon_y \sigma_y a g_1(z) h_1(z, n) (P/P_1)^{n+1} \tag{16}$$

$$\delta_p = \alpha \epsilon_y a g_2(z) h_2(z, n) (P/P_1)^n \tag{17}$$

여기서, g_1, g_2 는 시험편 모양의 함수로서 g_1 는 (18)식과 같고, g_2 는 1이며, h_1, h_2 는 변형경화와 크랙비의 함수로서 Table 3에 나타내었으며, 각 경우의 값을 보간법에 의해 내삽하여 계산하였다. 또 P_1 는 (2)식과 동일하다.

$$g_1(z) = (1-z)/z \tag{18}$$

(9)식부터 (18)식을 이용하여 탄소성변형을 하는 전 범위의 J 적분식과 변위는 다음과 같이 된다.

$$J = a_e P^2 f^2(z) / (EB^2 W^2) + \alpha \epsilon_y \sigma_y (W-a) h_1(z, n) (P/P_1)^{n+1} \tag{19}$$

$$\delta = PV(z) / (BE) + \alpha \epsilon_y a h_2(z, n) (P/P_1)^n \tag{20}$$

(19), (20)식은 탄성과 소성부분으로 구분되어 있고 탄소성 천이영역에서는 다음과 같이 유효 크랙길이⁽²²⁾를 이용하여 수정하였다.

$$a_e = a + \phi r, \tag{21}$$

Table 3 h_1, h_2 for the plane stress CT specimen

$n \backslash z$		1	2	3	5	7	10
1/4	h_1	1.609	1.464	1.284	1.060	0.903	0.729
	h_2	9.670	7.996	7.205	5.944	5.000	3.945
3/8	h_1	1.552	1.249	1.047	0.801	0.647	0.484
	h_2	7.800	5.734	4.615	3.253	2.475	1.765
1/2	h_1	1.398	1.084	0.901	0.686	0.558	0.436
	h_2	6.288	4.149	3.107	2.089	1.590	1.181
5/8	h_1	1.274	1.031	0.875	0.695	0.593	0.494
	h_2	5.419	3.375	2.536	1.804	1.468	1.176
3/4	h_1	1.234	0.977	0.833	0.683	0.598	0.506
	h_2	4.767	2.922	2.242	1.657	1.379	1.116

여기서, r_s 는 Irwin의 소성역 크기의 개념으로 평면 응력 상태에서 변형경화에 의하여 수정한 것으로서 (22)식과 같으며, ϕ 는 소규모 항복일 때 a 를 수정하고, 대규모 항복일 때 $J/J_p, \delta/\delta_p$ 가 1에 접근하여 소성 적정 크랙길이가 되도록 수정하는 계수로서 (23)식과 같다.

$$r_s = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (22)$$

$$\phi = \frac{1}{1 + (P/P_I)^2} \quad (23)$$

본 연구에서는 위의 관계식을 이용하여 FORTRAN IV로 프로그램을 작성하였으며, 주프로그램과 4개의 부프로그램으로 구성되어 있다. 프로그램에 사용한 입력자료는 실험조건에 일치하도록 하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 흐름도이며 다음과 같은 과정으로 계산하였다. 크랙비등의 시험편 치수, 하중등의 각종 입력자료를 읽은 후, Table 3에서 h_1, h_2 를 내삽하여 계산한다. 이 값을 이용하여 J 적분값, 응력강도계수, 변위등을 계산하여 결과를 프린트한다. 하중이 최대하중을 초과하는지 여부를 검토하고 미달 되었으면 하중을 증가시켜 위의 방법으로 반복 계산한다. 최대하중을 초과하면 크랙비가 0.75에 도달할 때까지 크랙길이를 증가시키면서 위의 방법과 동일하게 계산하고 계산과정을 종료한다.

본 연구에서는 위의 방법과 같이 (19)식을 이용하여 J 적분값을 구한 후, 실험의 결과를 계산하는 (5), (6), (7), (8)식에 의하여 얻은 것을 상호 비교검토하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 시험편 폭의 변화에 대한 J 저항곡선의 거동

우선 본 절에서는 W 의 변화에 대한 J 저항곡선의 거동을 고찰한다. Fig. 4는 횡축에 Δa 를 잡고 종축에 J 적분값을 잡아 W 의 변화에 대한 실험결과를 나타낸

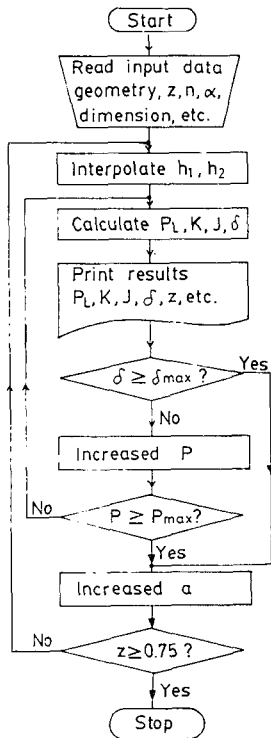


Fig. 3 Flow chart

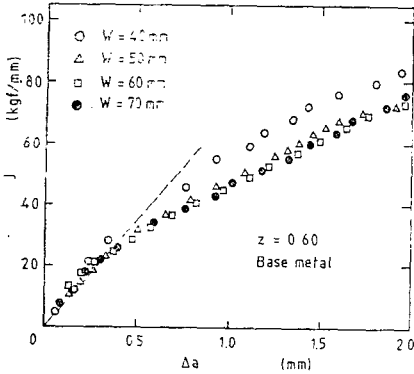


Fig. 4 The changes In $J-\Delta a$ curves with $z=0.60$ for varying specimen width.

것이다. 이 때 z 는 0.60이다. ○, △, □, ● 표시는 $W=40, 50, 60, 70$ mm 일 때의 결과이다.

최소자승법 (least square method)에 의하여 구한 J 저항곡선의 기울기는 W 가 40, 50, 60, 70mm로 증가함에 따라 그 기울기는 40.03, 32.00, 32.58, 31.46으로 나타나며 $W=40$ mm를 제외하고는 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 경향은 타 연구결과가 없어 비교할 수는 없지만 J 저항곡선의 기울기는 시험편치수에 의존하기 때문이라고 생각한다.

ASTM E813⁽¹³⁾에서는 최소자승법에 의해 구한 J 저항곡선과 크랙분화선 $J=2\sigma_c \Delta a$ 의 교점을 구하여 J_0 라 한 후 시험편의 치수가 (1)식의 조건을 만족하면 평면변형을 파괴인성치 J_c 로 취하고 있으나, 본 실험에서 사용한 시험편은 평면응력 상태라 할 수 있으며, 이에 대해서는 (1)식과 같은 제약조건이 수립되어 있지 못한 실정이다. 따라서 최소자승법으로 구한 J 저항곡선과 크랙분화선의 교점을 평면응력 파괴인성치 J_c 라 정의한다.

Fig. 4의 결과에서 W 가 40, 50, 60, 70mm로 증가함에 따라 J_c 는 32.68, 28.32, 26.23, 25.56kgf/mm를 얻었으며, $W=40$ mm인 경우를 제외하면 거의 일정한 값을 가진다. 이 경향은 Hickerson⁽¹⁶⁾의 결과와는 유사하나 Adams⁽¹⁵⁾ 등의 결과와는 상이하며, 이것은 Adams 등이 연구한 z 의 범위가 0.2~0.55로 낮은 z 범위임에 비하여 Fig. 4는 $z=0.600$ 으로 z 가 높기 때문이라 생각한다. 따라서 $W=50$ mm 이상의 시험편 폭에서는 유효한 평면응력 파괴인성치를 얻을 수 있다고 할 수 있다.

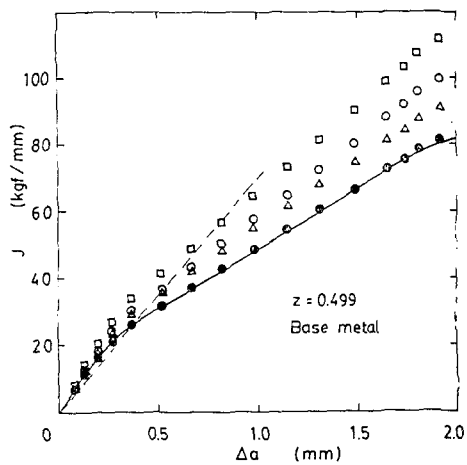
4.2 크랙비 변화에 따른 J 저항곡선의 거동

본 절에서는 4.1절에서 기술한 결과에 의해 $W=50$ mm 이상인 시험편을 사용하여 유효한 J_c 를 얻을 수 있으므로 $W=50$ mm인 시험편에 대한 결과를 고찰한다. 우선 모재에 대하여 z 의 변화에 따른 J 저항곡선이 3장에서 기술한 각 J 적분식을 이용하면 어떤 거동을 하는가를 고찰한 후, 동시에 열처리한 폴리머의 경우에 대한 그것을 고찰한다.

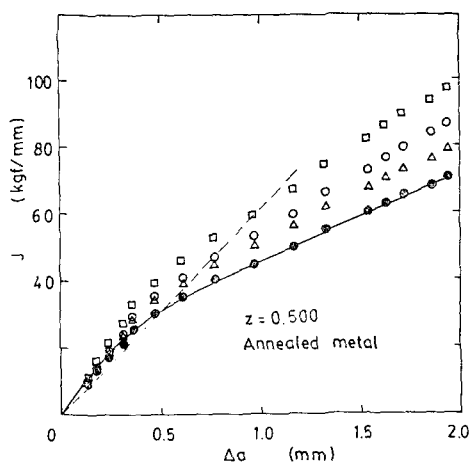
Fig. 5(a)는 z 가 0.499인 모재에 대하여 횡축에 Δa 를 잡고 종축에 J 적분을 나타낸 것이다. ○, □ 표시는 Rice식, Merkle식을 이용하여 얻은 결과이고, △, ● 표시는 크랙성장을 고려한 Simpson식, Yoon식에 의한 결과이며, 실선은 4.3절에 기술한 방법으로 (19)식을 사용한 컴퓨터 프로그램에 의해 얻은 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 Merkle식에 의해 얻은 J 적분값이 Rice식에 의해 얻은 그것보다 높게되고 있음을 보여주고 있으며, 또한, 이 결과들은 크랙성장을 고려한 Simpson식, Yoon식에 의해 얻은 그것들보다 과대평가되고 있음을 알 수 있다. 이것은 크랙성장을 고려함으로써 J 적분값이 과대평가 되는 것이 수정되기 때문이며 동시에 J 저항곡선도 낮은 값을 나타낸다고 생각된다. 또한 (19)식에 의해 얻은 J 적분값은 Yoon식에 의해 얻은 그것과 잘 일치함을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 z 에 0.60, 0.70인 경우에도 유사한 경향을 나타내고 있음을 Fig. 5(b), (c)를 통하여 알 수 있다. 따라서, 평면응력 상태에서 크랙성장을 고려한 J 적분식에서 얻은 J 적분값이 크랙성장을 고려하지 않은 그것보다 더 낮아 짐을 알 수 있다.

Fig. 5에서 Δa 가 크랙분화선 $J=2\sigma_c \Delta a$ 에 따르지 않고 있으며 이에 대한 연구는 다음 과제로 남겨두고 우선 ASTM의 방법으로 J_c 를 구하였다. 파괴인성치는 낮은 값을 취하는 것이 실제상 안전하므로 (19)식으로부터 얻은 J 저항곡선과 크랙분화선의 교점인 J_c 를 택하였다. Fig. 5의 결과로부터 z 가 0.499, 0.600, 0.701으로 증가함에 따라 J_c 는 27.00, 27.57, 29.85kgf/mm로서 평균치는 28.14kgf/mm를 얻었다. 즉, J_c 는 $z=0.499-0.701$ 범위에서 z 에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내며 이 결과는 종래의 연구결과⁽¹⁶⁾와 동일하다.

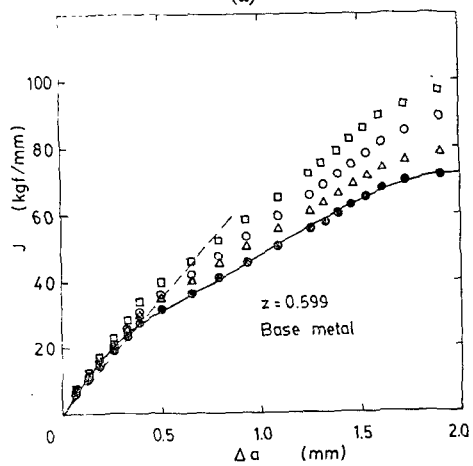
Fig. 6(a), (b), (c)는 (19)식에 의하여 얻은 J 적분값의 유효성을 검토하기 위하여 폴리머의 경우에 대하여 얻은 결과를 Fig. 5와 동일한 방법으로 나타낸 것이다. 이 결과를 통하여 동일 z 에서 각 J 적분식을 적용



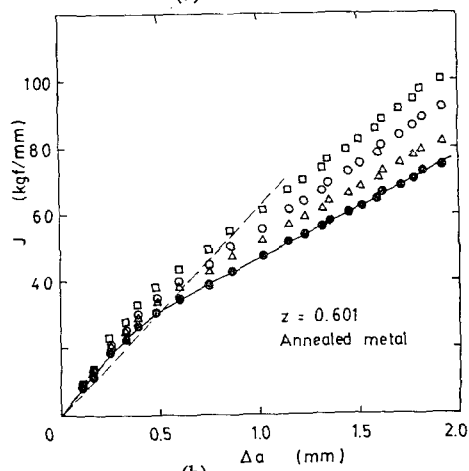
(a)



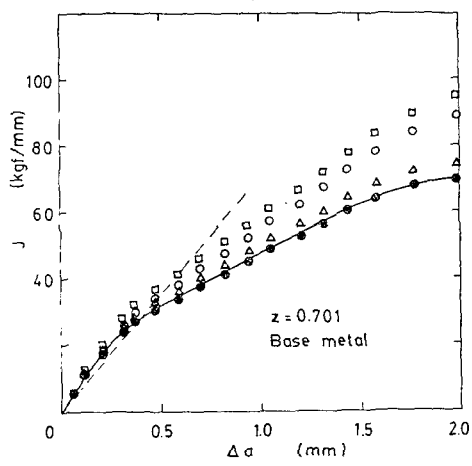
(a)



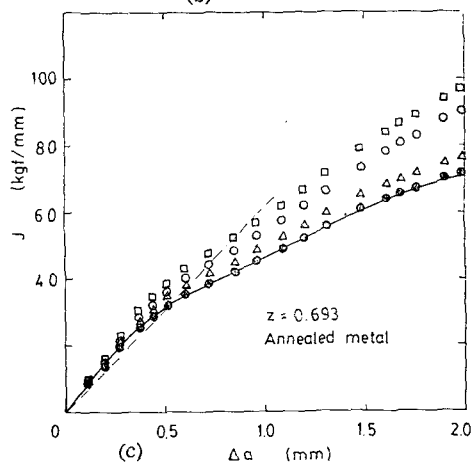
(b)



(b)



(c)



(c)

□ : Merkle ○ : Rice △ : Simpson ● : Yoon
 - : Estimation

□ : Merkle ○ : Rice △ : Simpson ● : Yoon
 - : Estimation

Fig. 5 J -resistance curves for base metal specimen

Fig. 6 J -resistance curves for annealed metal specimen

할 때 J 저항곡선의 거동은 그 값의 차이는 있으나 모재와 유사하다. 즉, z 가 0.500, 0.601, 0.693 으로 증가함에 따라 J_c 는 32.62, 32.12, 32.801kgf/mm 로서 평균치는 32.51kgf/mm 를 얻었다. 따라서, 풀립재의 경우 J 저항곡선과 J_c 의 거동은 모재의 그것들과 비교하여 그값의 차이는 있으나 전체적인 경향은 모재의 그것과 유사하며, 이 결과는 (19)식에 의한 J 적분식이 유효하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5, 6의 결과를 종합하여 보면 ASTM E813⁽¹³⁾의 규정보다 작은 시험편을 사용하여 크랙비에 무관한 평면응력 파피인성치 J_c 를 얻을 수 있다고 할 수 있다.

4.3 수치계산에 의한 J 저항곡선의 결정

Fig. 7은 (19), (20)식을 이용한 프로그램에 의해 얻은 J 와 a 의 관계를 δ 및 P 가 일정하게 유지될 때를 표시한 일 예이다. 파선은 δ 가 일정할 때, 가는 실선은 P 가 일정할 때를 표시한 것이며, 굵은실선은 $z=0.499$ 인 모재의 시험편에서 실험에 의하여 얻은 J 저항곡선을 \circ 표시로 나타낸 후 연결하여 동시에 나타낸 것이다. 이때 실험의 값은 4.2절에 기술한 바와 같이 낮은 J_c 를 이용하기 위하여 Yoon식에 의하여 얻은 것이다. 여기서, α 와 n 은 Table 2의 값을 사용하였으며, $E=20950\text{kgf/mm}^2$ 이고 그의 여러 값들은 실험조건과 동일하게 사용하였다. 수치계산에 의한 J 저항곡선은 다음과 같은 방법으로 구하였다. 우선 실험을 행한 최초 크랙길이 24.96mm에서 z 와 n 의 함수 h_1, h_2

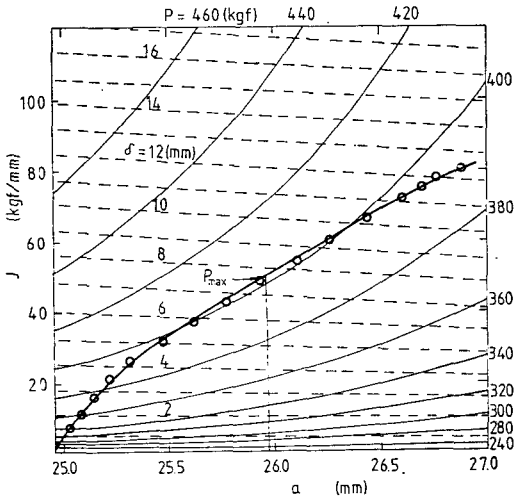


Fig. 7 J crack driving force diagram for CT specimen, $\alpha=19.715, n=7.521$

를 구하고 하중을 증가 시켜가면서 J 적분값과 δ 를 계산한 다음 가상 크랙증분량을 주어 마찬가지로 방법으로 계산한다. 이와 같은 과정을 반복하여 Fig. 7과 같은 J, a, δ, P 의 관계를 얻는다. 얻어진 결과에 실험치를 도시한 후 a 와 P 를 결정하여 J 와 δ 를 다시 계산한다. 이렇게 하여 얻은 J -저항곡선을 Fig. 5(c)에 실선으로 실험치와 함께 나타내었다. z 가 다른 모재와 풀립재의 경우에 대하여 얻은 그것도 Fig. 5, 6에 실선으로 나타내었다. 이 결과들을 종합하여 보면 크랙성장을 고려한 Yoon식의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 이 결과의 타당성을 직접적으로 검토할 수는 없으나 다음과 같이 하중변위곡선을 이용하여 간접적으로 검토한다.

Fig. 8은 (19)식에 의하여 얻은 J 적분값의 타당성을 검토하기 위하여 모재의 경우에 전술한 방법으로 얻은 하중과 변위를 실험치의 그것과 비교하여 나타낸 것이다. \circ 표시는 실험에 의하여 얻은 결과이고, 실선은 컴퓨터 프로그램에 의하여 계산된 결과이다. 계산된 하중은 실험치보다 적게 나타나지만 그 경향은 비교적 잘 일치하고 있다고 할 수 있으며 이를 설계의 관점으로 살펴보면 하중이 저하중으로 계산되고 있으므로 바람직하다고 할 수 있다. 이와 같은 경향은 풀립재의 경우에도 유사한 경향을 나타낸다. 따라서 (19)식에 의하여 얻은 J 적분값은 유효하다고 할 수 있다.

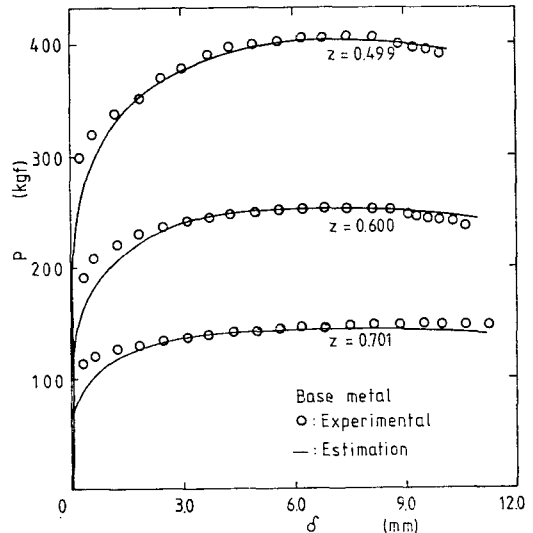


Fig. 8 Comparison of predicted and experimentally measured load load-line displacement curves for CT specimen

5. 결 론

CT 시험편을 이용한 평면응력 J 저항곡선의 거동을 고찰하기 위하여, 두께 3mm 일반 구조용 압연강판을 W 가 40, 50, 60, 70mm 인 시험편을 준비하여 W 의 변화에 대한 J 저항곡선의 거동을 고찰하고, z 가 0.50, 0.60, 0.70 인 시험편을 준비하여 J 저항곡선의 거동을 고찰하였다. 또한, 시험재료를 변형경화 재료로 가정하여 프로그램을 작성하여 얻은 그것을 실험치와 비교 검토하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) W 의 변화에 대한 J 저항곡선의 거동을 고찰하였으며, W 가 50~70mm의 범위에서는 거의 일정한 평면응력 파괴인성치 J_c 를 얻었다. 따라서, ASTM 규정보다 작은 시험편을 사용하여 평면응력 파괴인성치 J_c 를 구할 수 있다.

(2) Merkle식과 Rice식을 이용한 J 저항곡선이 크랙성장을 고려한 Simpson식과 Yoon식을 이용한 그것보다 높게 나타난다.

(3) 평면응력 파괴인성치 J_c 는 $W=50$ mm, z 의 범위 0.499~0.701 사이에서 크랙비에 관계없이 거의 일정하게 나타나며, 그 평균값을 Kumar식을 이용하여 모재는 28.14kgf/mm, 풀립재는 32.51kgf/mm를 얻었다.

(4) 컴퓨터 계산에 의한 하중은 실험치의 그것보다 적게 나타나지만 하중변위곡선의 경향은 실험치와 비교적 잘 일치하며, Kumar식에 의해 결정된 J 저항곡선은 Yoon식에 의한 그것과 잘 일치한다.

참 고 문 헌

(1) Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM E399-74, 1974
 (2) 김정규, 파괴인성 및 그 평가법, 대한기계학회지, 제 21 권 제 1 호, pp.44~55, 1981
 (3) J.R. Rice, A Path Independent Integral and Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, Trans. ASME, J. Applied Mech., Vol. 35, pp. 379~386, 1968
 (4) J.R. Rice and G.F. Rosengren, Plane Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power Law Hardening Materials, J. Mech. Phys. Solids, Vol.

16, pp. 1~12, 1968
 (5) J.W. Hutchinson, Singular Behavior at the end of a Tensile Crack in a Power Law Hardening Materials, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 16, pp.13~32, 1968
 (6) J.W. Hutchinson, Plane Stress and Strain Fields at a Crack tip, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 16, pp. 337~347, 1968
 (7) J.A. Begley and J.D. Landes, The J -Integral as a Fracture Criterion, ASTM STP 514, pp. 1~20, 1972
 (8) J.R. Rice, P.C. Paris and J.G. Merkle, Some Further Results of J -Integral Analysis and Estimate, ASTM STP 536, pp. 231~245, 1973
 (9) J.G. Merkle and H.T. Corten, A J -Integral Analysis for Compact Specimen, Considering Axial Forces as well as Bending Effects, Trans. ASME, J. Press. Vessel Tech., Vol. 96, pp. 286~292, 1974
 (10) J.D. Landes, H. Walker and G.A. Crarke, Evaluation of Estimation Peceduresused in J -Integral, ASTM STP 668, pp. 266~287, 1979
 (11) 김정규, 오재민, 김형채, 복합조직강의 균열선단에서의 파괴저항에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제 9 권 제 5 호, pp. 564~571, 1985
 (12) 이강용, 김육환, J 적분해석과 산정방법, 대한기계학회논문집, 제 10 권, 제 3 호, pp. 427~431, 1986
 (13) Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, ASTM E813-81, 1981
 (14) S.J. Garwood, J.N. Robinson and C.E. Turner, The Measurement of Crack Growth Resistance Curve(R Curve) using the J -Integral, Int. J. Fracture, Vol. 11, pp. 528~539, 1975
 (15) N.J.I. Adams and H.G. Munro, A Single Method for Evaluation of the J -Integral as a Fracture Parameter, Eng. Fracture Mech., Vol. 6, pp. 119~132, 1974
 (16) J.P. Hickerson, Jr., Experimental Confirmation on the J -Integral as a thin Section Criteria, Eng. Fracture Mech., Vol. 9, pp. 7~85, 1977
 (17) V. Kumar and C.F. Shih, Fully Plastic Crack Solution, Estimation Scheme, and Stability Analyses for the Compact Specimen. ASTM STP 700, pp. 406~438, 1980
 (18) W. Ramberg and W.R. Osgood, Description of

- Stress-Strain Curves by Three Parameters, NACA Technical Note No. 902, 1943
- (19) L.A. Simpson, Effects of Specimen Geometry on Elastic-Plastic R -Curve for Zr-2.5% Nb, Advances in Fracture Research Vol. 2, pp.833~843, 1981
- (20) 윤기봉, 최성렬, 엄윤용, J 적분을 이용한 균열성장 저항곡선의 결정, 대한기계학회논문집, 제 7 권 제 4 호, pp.441~450, 1983
- (21) H. Tada, P. Paris and G. Irwin, the Stress Analysis of Crack Handbook, Del Research Corporation, Hellertown, Pennsylvania, 1973
- (22) C.F. Shih, J -Integral Estimates for Strain Hardening Materials in Antiplane Shear using Fully Plastic Solution, ASTM STP 590, pp.3~26, 1976