Bull. Korean Fish. Tech. Soc. 24(2, 3), 1988. 漁業技術 24(2, 3), 1988.

파괴인성치 J_{IC}의 결정에 대한 시험편 두께의 영향에 관한 연구*

고 성 위
부 산 수 산 대 학
(1988년 7월 30일 접수)

The Thickness Effect on the Determination of Fracture Toughness J_{IC}

Sung Wi Koh
National Fisheries University of Pusan
(Received July 30, 1988)

Recent experimental results show that the J integral can be effectively used to obtain a valid parameter for predicting plane strain and plane stress fracture. However, only a few research results have been reported for the effect of thickness where the plane strain state can not be assumed. A purpose of this study is to find the behavior of fracture touhness and tearing modulus varing the specimen thickness.

The type of specimen in the present study is compact tension (CT). The thicknesses of the low carbon steel specimens that are used in the experiments are 5, 10, 15, 20, and 25*mm*. The measurement of crack length is taken by optical measurements method.

From the study, the followings are found;

1) The fracture toughness and the tearing modulus which are obtained by using Yoon's and Simpson's formula show more conservative than that by using Rice's and Merkle's.
2) The fracture toughness is increased in specimen thickness which is reached 15 *mm*. Beyond this thickness the fracture toughness is decreased in specimen thickness.
3) In the case of CT specimen with the thickness ranging from 5 to 25 *mm*, the tearing modulus which is applied the same J integral equation is almost constant.
4) By using Yoon's formula, the correlation of the plane slress fracture toughness J_C with specimen thickness B is expressed as the following formula.

$$J_C/J_{IC}=1.7-15.1\left(\frac{B}{W}\right)+112.9\left(\frac{B}{W}\right)^2-301.3\left(\frac{B}{W}\right)^3+260.6\left(\frac{B}{W}\right)^4$$

서 론

파괴역학은 구조물을 구성하는 재료에 어떤 크기의 결함의 존재와 크랙의 발생을 가정하여 안전한 사용에 있어서의 제작조건과 사용조건을 확립하는데 그 목적을 두고 있다. 이와 같은 요구에 따라 크랙 선단의 소성역이 크랙길이에 비해 매우 작은 소규모 항복조건의 경우에 적용할 수 있는 선형탄성 파괴역학이 발달하게 되었으며, 이의 대표적인 매개변수가 응력강도계수 K이다. 이 응력강도계수 K의 임계값

* 본 연구는 1987년도 문교부 자유과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

K_{IC}는 ASTN E399[1] 규정보다 작으면 두께가 감소함에 따라 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보인다[2].

그러나 연성이 높은 재료가 응력을 받을 경우 크랙선단의 소성역이 커지므로 재료의 임계응력강도계수 K_{IC}를 구하려면 대단히 큰 크기의 시험편이 필요하게 되고 경우에 따라서는 시험편 치수와 중량의 문제점이 발생하게 되어 K_{IC}를 구할 수 없는 경우가 발생한다. 그러므로 이 경우는 선형탄성 파괴역학(LEFM)의 적용은 곤란하며 탄소성 파괴역학(elastic plastic fracture machanics)을 적용하여야 한다. 이러한 경우에서는 크랙선단의 응력 및 변형율 상태를 설명할 수 있는 매개변수는 재료의 탄소성을 고려한 새로운 매개변수이어야 한다. 이러한 매개변수로서는 Rice가 정의한 J적분[3, 4]이 가장 대표적인 것으로 알려져 있으며, J적분은 소성변형이론이 적용될 때 임의의 적분경로를 따라 적분하면 적분경로에 무관하며 J적분은 크랙선단을 포함하는 HRR 응력변형율장(Hutchinson-Rice-Rosengren stress strain field) [5-7]에서의 크랙선단의 응력 및 변형율의 특이성의 세기를 나타낸다. J적분에 대한 종래의 실험적인 연구를 살펴보면 대부분 응력변형율 상태의 연구로서 Begley와 Landes[8, 9]가 크랙성장 시작점에서의 J적분값을 J_{IC}로 정의한 후 J_{IC}의 결정방법에 대한 많은 연구가 진행되었으며 J_{IC}를 구하는 실험방법은 ASTM E813[10]에 표준화되어 있으며 이 규정의 시험편 치수에 대한 제약조건은 다음과 같다.

$$B, b \geq 25 J_{IC}/\sigma_f \qquad (1.1)$$

ASTM E813[10]에 규격화된 J_{IC}의 실험방법은 $J=2\sigma_f \Delta a$로 정의되는 크랙둔화선과 J저항곡선과의 교점을 J_Q로 한후 (1.1)식의 제약조건을 만족하면 J_{IC}라 한다. 이처럼 시험편 치수가 최소 시험편 치수의 제약조건을 만족하면 구해진 J_{IC}의 값은 재료의 성질이 된다.

J적분에 대한 연구는 하중과 소성변위의 함수관계를 이용하여 유도한 Rice 등[11]의 J적분식과 CT (compact tension)시험편에서 하중상태를 순수굽힘뿐만 아니라 인장성분까지 고려하여 제안한 Merkle과 Corten[12]의 적분식이 있다. 그리고 Sumpter와 Turner[13]는 크랙성장이 시작된 후에는 J적분값이 과대평가되므로 크랙성장을 고려하여 J적분식을 수정해야 한다고 발표하였다. 위의 결과를 토대로 하여 Simpson[14], McCabe와 Ernst[15], 윤 등[16]은 크랙성장을 고려하여 J적분식을 제안한 연구결과를 발표하였다. Paris 등[17, 18]은 J저항곡선의 기울기를 이용하여 계산하는 무차원계수인 열단계수(tearing modulus)를 제안하였다. 또한, Hickerson [19]은 얇은 두께의 CT, CCT(center cracked tension) 시험편에서 일정한 파괴인성치를 얻을 수 있다고 하였으며, 송 등[20, 21]은 두께 3 mm의 CT 시험편과 CCT 시험편에 대한 파괴인성치와 열단계수의 거동을 고찰하여 얇은 두께의 시험편에서 파괴인성치는 시험편 모양이 변화하여도 거의 일정한 파괴인성치를 얻는다고 발표하였다.

시험편 두께의 변화에 대한 J_{IC}의 거동에 관한 연구는 Landes와 Begley[9]가 CT 시험편에서의 ASTM E 813의 규정이상의 시험편 두께에서 시험편 두께가 감소할수록 J_{IC}는 증가한다는 발표결과가 있다, 그러나 시험편 두께의 변화에 대한 파괴인성치 J_{IC}의 거동에 관한 연구결과는 매우 희박한 실정이다.

이상과 같은 연구결과를 종합적으로 검토하여 보면 (1.1)식을 만족하는 일정 두께에서 부터 두께가 감소함에 따른 파괴인성치 J_C와 열단계수 T의 거동에 관한 많은 연구가 요망된다. 즉 동일 재료에서 크랙비, 시험편 모양 등이 일정할 때 두께변화에 대한 파괴인성치의 거동에 관한 연구는 희박한 실정이다. 이러한 시험편 두께의 감소에 대한 선형탄성 파괴역학 매개변수인 응력강도 계수 K의 연구결과[2]와 비교할 때 J_C에 대한 많은 연구가 요망된다, 즉 시험편 두께의 감소에 따라 J_C의 값이 증가되는지 혹은 증가하다가 감소하는지 등 J_C 및 열단계수의 거동에 관한 검토가 이루어져야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 많이 사용되는 저탄소강을 이용하여 CT 시험편을 제작하였으며, 크랙비는 0.60으로 일정하게 하였다. 그리고 시험편 두께는 25, 20, 15, 10, 5 mm, 즉 ASTM E 813 규정보다 큰 두께에서 이 규격보다 얇은 두께까지의 두께변화에 따른 파괴인성치의 거동 및 열단계수의 거동을 실험을 통하여 고찰하고자 한다.

J적분의 이론적 고찰

1. J적분

Rice 등[8]은 CT 시험편의 하중상태가 순수굽힘상태라고 가정하여 하중과 소성변위와의 관계를 다음과 같은 식으로 유도하였다.

$$J=2A/Bb \qquad (2.1)$$

여기서 A는 Fig. 2.1에서 처럼 하중변위 곡선하의

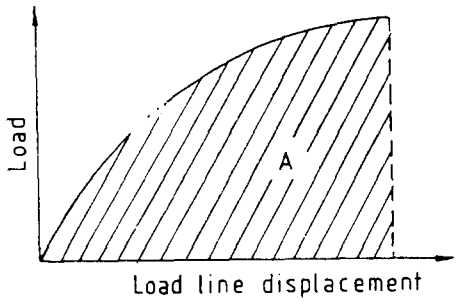

Fig. 2.1. Schematic loadline displacement curve for CT specimen.

면적이다.

Merkle과 Corten[9]은 순수굽힘과 인장성분을 고려한 J 적분식을 식(2.2)와 같이 유도하였으며, (2.2)식을 간략화하여 Landes[6]는 식(3.4)를 유도하였다.

$$J=\frac{1+\eta}{1+\eta^2}-\frac{\eta(1-2-\eta^2)}{(1+\eta^2)^2}\frac{2A}{Bb}-\frac{(1-2-\eta^2)}{(1+\eta^2)^2}\frac{2p\delta}{Bb} \tag{2.2}$$

$$\eta=3\sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2+\frac{a}{b}+0.5}-2\left(\frac{a}{b}+0.5\right) \tag{2.3}$$

$$J=\frac{1+\eta}{1+\eta^2}\frac{2A}{Bb} \tag{2.4}$$

그리고 Garwood 등[22]은 크랙이 성장하면 J 적분값이 과대평가되므로, 이것을 수정하기 위하여 크랙이 성장한 시험편의 하중변위선도의 면적대신 가상적인 하중변위선도의 면적을 J 적분식에 사용할 수 있음을 설명하였다,

Simpson[14]은 Garwood 등이 제안한 방법과 Rice 등이 제안한 (2.1)식을 사용하여 크랙성장을 이용한 (2.5)식과 같은 J 적분식을 제안하였다,

$$J^1=J_0\frac{b_1}{b_0}+\frac{2(A_1-A_0)}{Bb_0} \tag{2.5}$$

여기서 J_0, b_0는 Fig. 2.2에서 보여지는 것과 같이 각각 Q점에서의 J적분값과 리가멘트를 나타내며, J_1, b_1은 점 R에서의 그것이다. 식(2.5)를 일반화시키면 다음과 같다.

$$J_i=J_{i-1}\frac{b_i}{b_{i-1}}+\frac{2(A_i-A_{i-1})}{B\,b_{i-1}} \tag{2.6}$$

그리고 윤 등[16]은 유사한 방법으로 (2.7)식과 같이 제안하여 그 유용성을 고찰하였다.

$$J_i=J_{i-1}\frac{b_{i-1}\left(\frac{1+\eta^2}{1+\eta}\right)\left(-(a_i-a_{i-1})\right.}{b_i\left(\frac{1+\eta^2}{1+\eta}\right)+(a_i-a_{i-1})}+\frac{2(A_i-A_{i-1})}{B\left\{b_i\left(\frac{1-\eta^2}{1-\eta}\right)-(a_i-a_{i-1})\right\}} \tag{27}$$

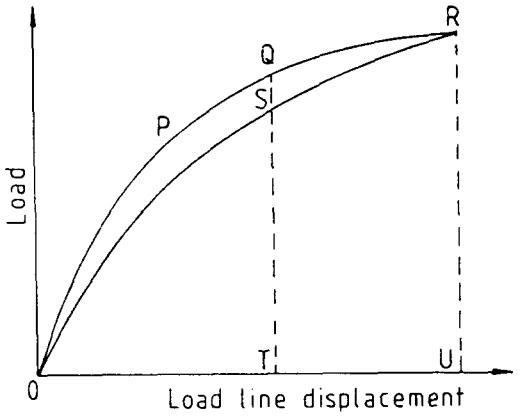

Fig 2.2. Schematic loadline displacement curve for CT specimen.
OPQR : Actual loadline displacement curve
OSR : Postulated loadline displacement curve
OPQRUTO : Area A1
OSRUO : Area A2

(2.7)식의 첨자는 (2.5)식의 방법과 동일하며, η는 (2.3)식과 동일하다.

따라서 본 연구에서는 (2.1), (2.4), (2.6) 그리고 (2.7)식을 사용하여 J 적분값을 구하고 상호 비교, 검토하였다.

2. J_C의 결정방법

평면응력 파괴인성치 J_C를 결정하는 방법은 $J-\Delta a$ 곡선에 의해 설명된다. 이동현미경에 의해 측정된 크랙증분량 Δa와 하중변위곡선의 면적 A를 구한 후 이 값을 2.1절의 각각의 J 적분식에 대입하여 J 적분값을 구한다.

Fig. 2.3은 위의 방법으로 얻은 J 적분값을 크랙증

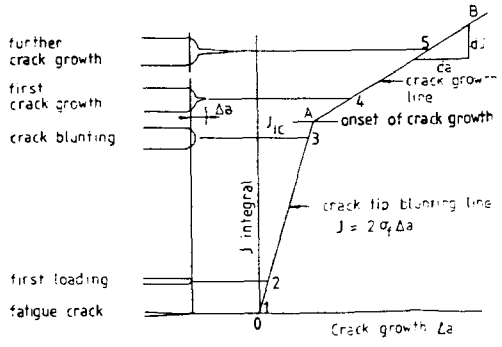

Fig. 2.3. J-resistance curve of the fracture process.

분량 Δa에 대해 나타낸 일 예이며, J 저항곡선이라 한다. 이 그림은 인장하중을 가함에 따라 크랙선단이 변화하는 모양을 5단계로 나타낸 것이다. 제1단계는 피로크랙을 발생시켰을 때의 크랙선단을 나타낸 것이다. 제2단계는 인장하중을 가함에 따라 날카로운 크랙선단이 둔화되기 시작하여 인장하중이 증가하면 COS라는 Δa만큼 크랙이 확장되는 단계이다. 하중이 더욱 증가함에 따라 크랙의 둔화는 임계점에 도달하여 크랙이 성장하게 되며 그 크랙성장의 과정은 제4, 5단계와 같다.

직선 OA는 크랙이 둔화될 때의 J 저항곡선이며, 이 때의 J 적분과 Δa와의 관계는 (2.8)식과 같다.

$$J = 2\sigma_f \Delta a \qquad (2.8)$$

여기서 σ_f는 유동응력으로 인장강도와 항복응력의 평균값이며, Δa는 둔화과정 때의 크랙길이의 증분이다. 그리고 곡선 AB는 크랙이 성장하고 있을 때의 J 저항곡선이고 그 곡선은 크랙둔화시의 J 저항곡선과는 상이한 기울기를 나타낸다.

ASTM E 813의 방법은 크랙둔화선인 (2.8)식과 크랙성장 이후의 J 적분값들을 최소자승법으로 얻은 회귀선과의 교점에서의 J 적분값을 J_Q라 하고 시험편 치수가 (1.1)식을 만족하면 평면변형율 파괴인성치 J_{IC}라 한다.

그러나 평면응력 상태에서는 위와 같은 조건이 수립되어 있지 않은 실정이므로 본 연구에서는 (2.8)식의 크랙둔화선과 크랙성장 이후의 회귀선의 교점을 평면응력 파괴인성치 J_C라고 정의하였다.

Paris는 크랙성장 이후의 J 저항곡선의 기울기를 이용하여 (2.9)식과 같은 열단계수를 제안하였다.

$$T = \frac{dJ}{da}\frac{E}{\sigma_f^2} \qquad (2.9)$$

본 연구에서는 Fig. 2.2에서 크랙성장 이후의 회귀선, 즉 AB 부분의 기울기를 이용하여 dJ/da를 구한 후 탄성계수 E와 σ_f를 대입하여 열단계수 T를 계산하였다.

실 험 방 법

1. 시험편의 선택

본 연구에서 사용한 재료인 일반 구조용 압연강판의 평면변형율 파괴인성치 J_{IC}를 대략 30 kgf/mm로 잡고[23], 인장응력과 항복응력의 평균값인 유동응력을 35 kgf/mm^2로 가정하면, 평면변형율 상태의 J_{IC}를 구하기 위하여 최소 시험편 두께는 ASTM E 813의 제약조건에 의하면 약 21.5 mm가 된다. 따라서 본 연구에서는 이보다 두꺼운 25 mm에서부터 20, 15, 10, 5 mm로 두께를 변화시켰다. 본 연구에 사용한 재료는 최초 두께가 25 mm의 강판으로서 시험재료의 화학적 성분은 Table 3.1과 같다. 또한 실험재료의 기계적 성질을 구하기 위하여 인장시험편은 압연방향으로 채취한 후 KS B 0801 4호 시험편으로 가공한 후 실험하여 얻은 기계적 성질은 Tabel 3.2와 같다.

Table 3.1. Chemical composition of specimen (Wt %)

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

Table 3.2. Mechanical properties

Materials	Tensile strength (kgf/mm^2)	Yield strength (kgf/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
SS41	46.3	27.5	36.1	66.5

$\nu = 0.30$ $E = 20950\ kgf/mm^2$

그리고 시험편의 길이의 방향은 압연방향, 크랙진전방향은 압연직각방향이 되도록 채취한 후 두께 25 mm를 밀링 머신을 사용하여 두께 5, 10, 15, 20, 25 mm가 되도록 평면가공하였으며, 평면가공시 열응력의 영향이 극소화되도록 주의를 기울여 가공하였다.

시험편 폭은 송 등[20]이 시험편 폭 W = 50 mm 이상인 시험편을 사용하면 파괴인성치에 미치는 W의 영향을 배제할 수 있으므로 본 연구에서는 각 시험편 공히 W = 50 mm로 하고 ASTM E 813 규정에 맞도록 선택하였다. 그리고 노치부는 fly cutter를 사용하여 두께 5 mm는 26.5 mm, 10 mm는 24.5 mm, 15 mm는 23 mm, 20 mm는 21.5 mm, 25 mm는 20 mm가 되도록 가공한 후 크랙이 진전할 때 크랙이 두께방향에 대해 일정한 비율로 진전하게 하기 위한 chevron notch도 아울러 가공하여 크랙비가 0.55가 되도록 하였다. 또한 핀 고정부는 편심이 되지 않도록 주의를 기울여 가공하였다.

본 연구에서 사용한 시험편 모양과 치수는 Fig. 3.1과 같다.

2. 실험기기

본 연구에서 사용한 실험기기는 다음과 같다.

1) 유압 인장압축 시험기(Instron 1350)
용량 : 10톤

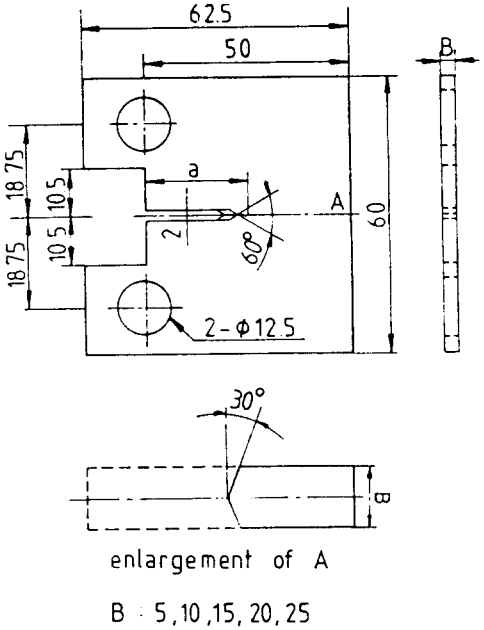

Fig. 3.1. Geometries and dimension of CT specimen.

제작 : Instron, U.S.A

2) X-Y 레코오더(Instron 7044 A)

오차 : ±0.2 *mm*

3) 이동현미경(RPM-2)

배 율 : 25 x, 50 x

측정단위 : 1/100 *mm*

제 작 : Japan

4) 컴퓨터(16 bits)

용량 : 640 *k* bits

제작 : Televideo, U.S.A

5) 인장시험기(Tensilon)

제작 : TOYO Baldwin, Japan.

Fig. 3.2는 시험계통도를 나타낸 것이다.

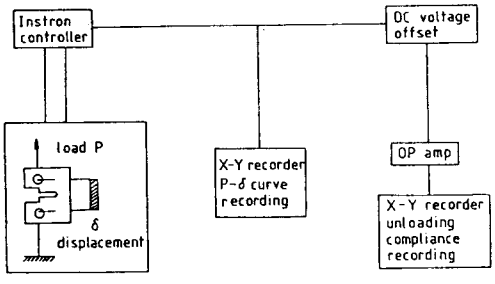

Fig. 3.2. Black diagram of fracture experimet.

3. 실험방법

1) 노치선단에 피로크랙을 발생시키는 방법

각각의 두께에 대하여 크랙비가 0.55가 되도록 기계가공한 시험편은 사포로 #1200까지 연마한 후 산화알루미나로 경면 처리하였다.

연마한 각 시험편들은 평면응력 상태에서 지지할 수 있는 한계하중을 (3.1)식을 이용하여 예측한 후 한계하중의 40% 이내의 크기로 10 *Hz*의 정현파(sine wave)를 반복응력으로 가하여 노치선단에 과부하가 걸리지 않고 피로크랙이 발생하도록 하였다.

$$P_1 = 1.072\,\eta b B \sigma_y \qquad (3.1)$$

여기서 η는 (2.3)식과 동일하다.

피로크랙의 측정은 이동현미경을 이용하였으며 각 시험편에 대하여 크랙비가 0.60이 되도록 피로크랙을 진전시켰다. 이때 소요된 회전수는 18~43만 회전, 즉 5~12시간이 요구되었다.

각각의 두께에 대하여 시험편은 4개 이상 피로크랙을 발생시켜 준비하였다.

2) J 적분계산에 필요한 인장파괴실험방법

피로크랙을 발생시켜 준비가 완료된 시험편은 크랙증분량 Δa, 크랙개구변위(crack opening displacement), 하중 등을 측정해야 하며 인장압축기에 걸어 파괴실험하며, 그 과정은 다음과 같다.

시험편을 grip에 고정한 후 안정크랙이 발생하도록 0.2 *mm/min*의 일정 변위속도로 하중을 가한다. 인장하중을 가하면서 각 변위에 대응되는 크랙길이를 측정하고자 하는 점에서 10% 이내로 제하하여 이때 로드 셀(load cell)로부터 얻어진 하중과 변위의 전기적 신호를 X-Y 기록계에 입력시켜 하중변위선도를 기록한다. 또한 측정하고자 하는 점에서 하중을 정지시킨 후 크랙길이와 크랙개구변위(COD)를 이동현미경을 이용하여 측정, 기록한다.

이렇게 얻은 하중변위곡선은 면적계를 이용하여 각각의 측정점에 대한 면적을 측정한 후 2.1절에서 서술한 J 적분식 (2.1), (2.4), (2.6), (2.7)식에 대입하여 J 적분값을 계산하여 J 적분곡선을 얻었으며, 그 계산은 전산프로그램을 이용하여 처리하였다. 또한 파괴인성치는 (2.7)식의 크랙둔화선과 회귀선(regresion line)의 교점에서 구하고 파단계수는 J 저항곡선의 기울기를 이용하여 계산된다.

위와 같은 결과에 의하여 얻은 J 저항곡선 및 파괴인성치, 열단계수의 거동을 동일 두께의 시험편에 대하여 4개 이상 준비하여 결과를 얻었으며 이 결과

를 시험편 두께의 변화에 대하여 고찰한다.

결과 및 고찰

1. 두께의 변화에 따른 평면응력 파괴인성치 J_C의 거동

Fig. 4.1~4.5.는 $z=0.60$인 CT시험편에 대하여 횡축에는 크랙증분량 Δa를, 종축에는 J적분값을 잡고 시험편 두께 $B=25,\ 20,\ 15,\ 10,\ 5\ mm$에 대하여 나타낸 것이다.

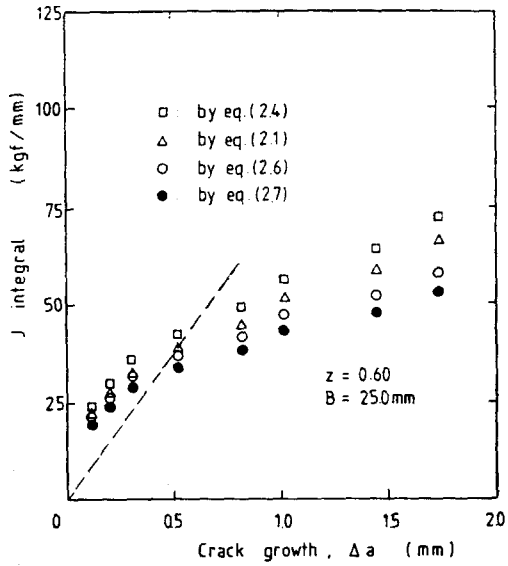

Fig. 4.1. Influence of the specimen thickness on J-resistance curve, $z=0.60$, $B=25.0mm$, CT specimen.

△,□표시는 (2.1),(2.4)식, 즉 Rice식과 Merkle식에 의해 얻은 결과이며 ○,●표시는 (2.6),(2.7)식, 즉 크랙성장을 고려한 Simpson식, Yoon식을 이용하여 얻은 결과이다. 그리고 파선은 $J=2\sigma_f \Delta a$로 표시되는 크랙둔화선을 나타낸 것이다. 이들 그림에 의하면 크랙증분량 Δa가 적은 범위에서는 Merkle과 Rice, Simpson, 윤 등에 의해 얻은 결과들이 비교적 비슷하나 Δa가 증가할수록 Merkle의 식에 의한 것이 Rice의 것보다 높게 나타나며, 또한 이것은 Simpson식과 Yoon식에 의한 것보다 높게 나타난다. 이러한 결과는 Rice식이 순수굽힘상태라고 가정하여 유도되었음에 반하여 Merkle식은 순수굽힘 뿐만 아니라 인장성분까지 고려하였기 때문이며, Simpson식과 Yoon식에 의한 것이 Rice식과 Merkle식의 결과보다 낮게 나타남은 Simpson식과 Yoon식은 크랙성장을 고려하여 J적분값이 과대평가됨을 수정하였기 때문이다. 이러한 결과는 평면응력상태에서 두께 3 mm의 CT시험편에서 실험한 송 등[20, 21]의 결과와 동일한 경향을 나타낸다.

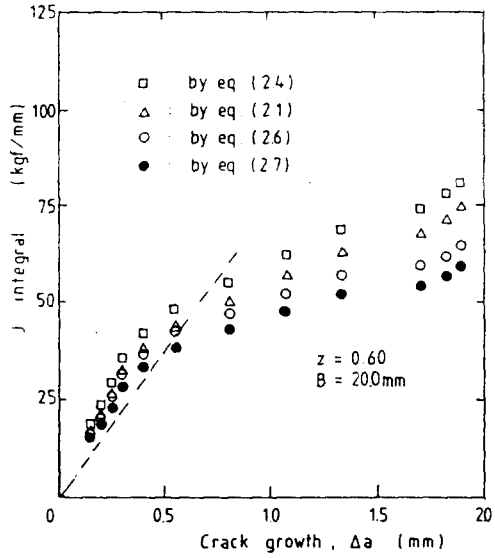

Fig. 4.2. Influence of the specimen thickness on J-resistance curve, $z=0.60$, $C=20.0\ mm$ CT specimen.

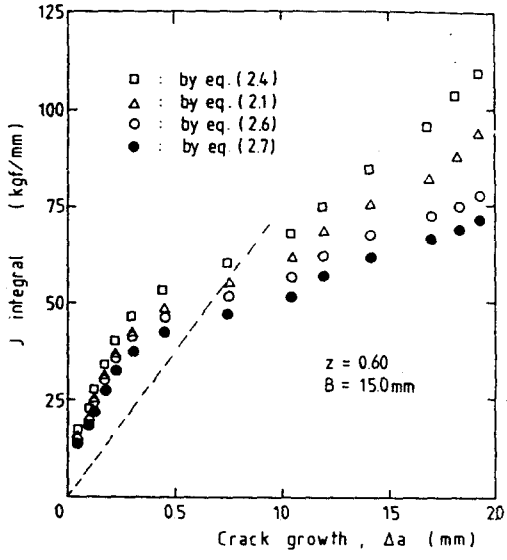

Fig. 4.3. Influence of the specimen thickness on J-resistance curve, $z=0.60$, $B=15.0\ mm$ CT specimen.

Table 4.1은 각각 시험편 두께에 대하여 각각의 J적분식을 이용하여 얻은 파괴인성치 Jc를 나타낸 것

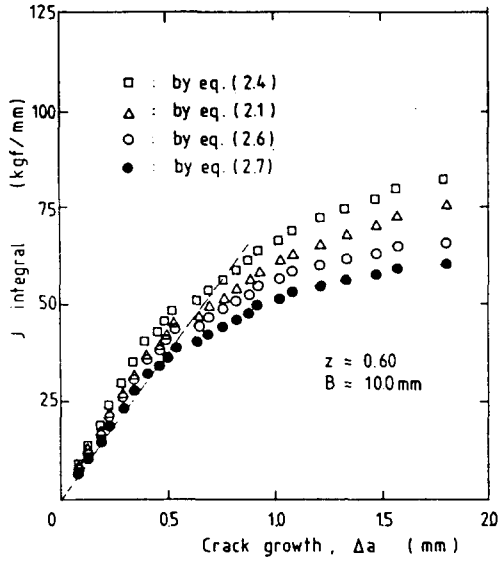

Fig. 4. 4. Influence of the specimen thickness on J-resistance curve, z=0. 60, B=10. 0 *mm*, CT specimen.

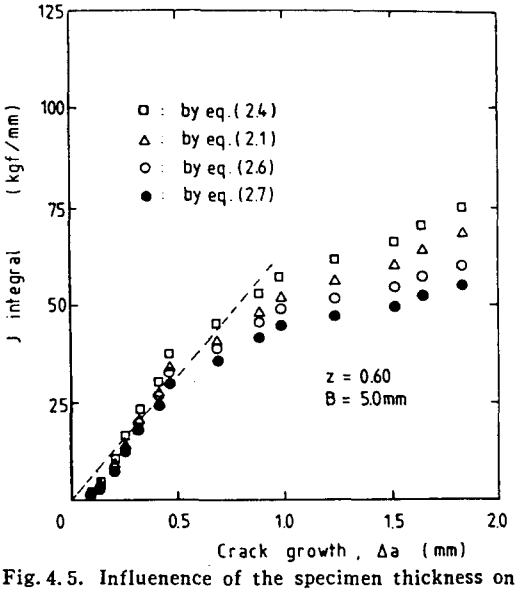

Fig. 4. 5. Influenence of the specimen thickness on J-resistance curve, z=0. 60, B=5. 0 *mm*, CT specimen.

이다. Table 4. 1의 시험편 구분에서 숫자 1, 2, 3, 4, 5는 시험편 두께가 각각 25, 20, 15, 10, 5 *mm*를 나타낸 것이며, 일예로 CT1은 CT 시험편으로 두께 25 *mm*를 나타낸다. 이 표에 의하면 우선 두께 25 *mm*의 시험편에서 동일한 J 적분 평가방법에 의한 Jc는 Rice, Merkle, Simpson, Yoon 식을 적용함에 따라 Jc=40. 20, 47. 25, 38. 49, 33. 69 *kgf/mm*로 Merkle 식에 의한 Jc가 가장 높게 나타나고 Yoon 식에 의한

Table 4. 1. Experimental Results of Jc

Specimen	Using eq. (2. 1)	Using eq. (2. 4)	Using eq. (2. 6)	Using eq. (2. 7)
CT 1	40. 20	47. 25	38. 49	33. 69
	36. 65	42. 04	35. 40	31. 19
	41. 58	47. 67	39. 94	35. 43
	38. 78	44. 77	37. 20	32. 81
Average	39. 30	45. 83	37. 76	33. 28
CT 2	44. 25	51. 48	42. 25	37. 12
	45. 86	53. 76	42. 94	38. 77
	44. 07	51. 45	41. 77	36. 01
	43. 22	51. 38	41. 58	36. 07
Average	44. 35	52. 02	42. 14	36. 99
CT 3	53. 61	63. 22	49. 85	43. 29
	54. 48	65. 07	50. 68	43. 95
	57. 12	71. 90	52. 25	44. 05
Average	55. 07	66. 73	50. 93	43. 76
CT 4	49. 10	60. 57	46. 32	39. 77
	45. 25	51. 35	42. 94	38. 40
	50. 07	58. 17	48. 68	41. 00
	44. 90	51. 51	43. 06	40. 25
Average	47. 33	55. 40	45. 00	40. 11
CT 5	41. 60	47. 61	39. 74	35. 31
	38. 97	45. 10	37. 84	33. 51
	42. 62	49. 00	41. 10	36. 41
	40. 18	46. 41	39. 60	34. 91
Average	40. 84	47. 03	39. 57	35. 04

Jc가 가장 낮게 나타남을 알 수 있다.

이와 같은 경향은 시험편 두께가 다른 시험편에 대해서도 동일한 경향임을 알 수 있다.

다음은 각 시험편에 대하여 얻은 Jc의 평균값에 대하여 고찰하여 본다. 우선 각 시험편에서 가장 과소평가되는 Jc값인 Yoon 식을 이용하여 얻은 Jc의 평균값은 두께가 25, 20, 15, 10, 5 *mm*로 감소함에 따라 Jc=33. 28, 36. 99, 43. 67, 40. 11, 35. 04 *kgf/mm*로 나타났다. 즉 시험편 두께가 ASTM E 813 규정을 만족하는 두께에서 감소함에 따라 파괴인성치 Jc는 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 동일조건에 대한 타 실험결과가 없어 직접 비교할 수는 없지만 선형탄성 파괴역학에서 시험편 두께에 대한 임계 응력강도계수 K_{IC}의 결과[2]와 비교하면 그 경향과 유사함을 알 수 있다. 선형탄성 파괴역학의 K_{IC}의 결과[2]를 토대로 본 실험결과와 고찰하여 보면 본 실험에 사용된 일반구조용 압연강판에서 두께 25 *mm*는 평면변형율이 지배적인 상태라 보고 두께 5 *mm*는 평면응력이 지배적인 상태라

보면 두께 15 *mm* 는 평면변형율과 평면응력의 천이점이라고 생각된다. 따라서 시험편 두께가 25 *mm* 에서부터 감소함에 따라 평면변형율이 지배적인 상태에서 평면변형율의 영향이 감소하고 평면응력의 영향이 나타나므로 파괴인성치 Jc 는 증가하다가 변이점 부근에서 가장 높은 Jc 값을 나타낸 후 평면응력의 상태가 더욱 증가하여 평면응력의 상태가 지배적인 조건으로 되므로 Jc 의 값이 다시 감소한다고 볼 수 있다.

Fig. 4.6은 Jc 의 값을 나타낸 것으로 △, □는 Rice, Merkle식에 의한 Jc 값이고 ○, ●는 크랙성장을 고려한 Simpson, Yoon식을 나타낸 것이다. 이 그림을 통하여 시험편 두께가 감소함에 따라 Jc 는 증가하다가 시험편 두께 15 *mm* 에서 가장 높게 나타나고 그 이하로 두께가 감소함에 따라 Jc 도 감소함을 알 수 있다. 따라서 $Z=0.60$인 CT 시험편을 사용하여 실험한 결과 파괴인성치 Jc 는 동일 두께의 시험편에서 Merkle식을 적용한 값이 가장 높고 크랙성장을 고려한 Yoon식의 결과가 가장 낮게 나타난다. 그리고 동일한 J 적분값 평가에서 평면응력 파괴인성치 Jc 는 시험편 두께의 증가에 따라 증가하다가 두께 15 *mm* 의 시험편에서 최고치를 기록한 후 점차 감소함을 나타내고 있다.

Fig. 4.7은 파괴인성치와 두께와의 상관관계를 무차원화시켜 나타낸 것이다. 여기서 Jc 는 각 식을 적용시켰을 때 시험편 두께 $B=25\,mm$ 의 Jc 값을 이용

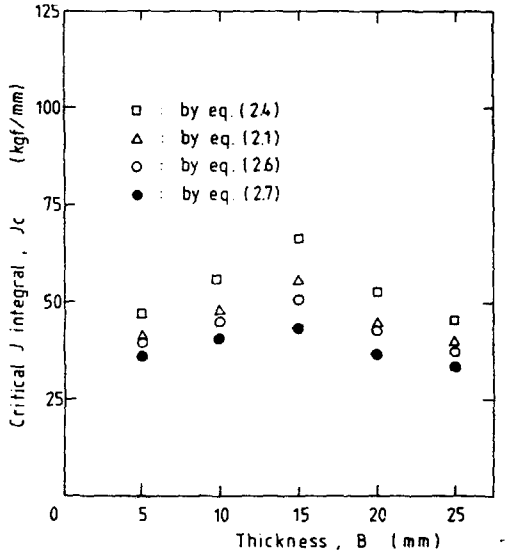

Fig. 4.6. Critical J integral values for CT specimens with variation of each equation.

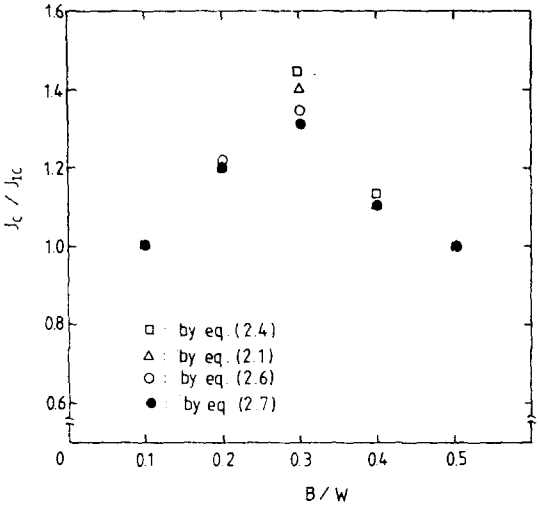

Fig. 4.7. Relation between Jc/JIC and B/W when a/W = 0.5.

하였다. 이 결과를 이용하여 2차 이상의 다항식을 사용하여 실험식을 구한 결과 4차 이상의 다항식에서 결정계수 R 이 1에 수렴하였다. 따라서 이 결과를 4차 다항식으로 구한 실험식은 다음과 같다.

i) (2.1)식의 경우

$$Jc/J_{IC}=2.4-28.2\left(\frac{B}{W}\right)+196.2\left(\frac{B}{W}\right)^2-504.5\left(\frac{B}{W}\right)^3+428.5\left(\frac{B}{W}\right)^4$$

$$R=0.999$$

ii) (2.4)식의 경우

$$Jc/J_{IC}=2.7-35.7\left(\frac{B}{W}\right)+245.1\left(\frac{B}{W}\right)^2-626.6\left(\frac{B}{W}\right)^3+530.8\left(\frac{B}{W}\right)^4$$

$$R=0.999$$

iii) (2.6)식의 경우

$$Jc/J_{IC}=2.1-22.6\left(\frac{B}{W}\right)+158.5\left(\frac{B}{W}\right)^2-409.9\left(\frac{B}{W}\right)^3+349.0\left(\frac{B}{W}\right)^4$$

$$R=0.999$$

iv) (2.7)식의 경우

$$Jc/J_{IC}=1.7-15.1\left(\frac{B}{W}\right)+112.9\left(\frac{B}{W}\right)^2-301.3\left(\frac{B}{W}\right)^3+260.6\left(\frac{B}{W}\right)^4$$

$$R=0.999$$

2. 두께의 변화에 따른 열단계수 T의 거동

Fig. 4. 8은 시험편 두께의 변화에 대한 열단계수 T의 거동을 고찰하기 위하여 크랙이 둔화되는 부분은 생략하고 크랙둔화 이후에 대하여 동일한 J 적분을 적용하였을 때 J와 Δ와의 관계를 나타낸 것이다. ○, ●, △, ▽, □들은 시험편 두께가 각각 5, 10, 15, 20, 25 mm에 대한 J 저항곡선을 나타낸 것이다. 열단계수 T는 (2.9)식에서 알 수 있듯이 E와 σ_f^2은 일정하므로 dJ/da에 의존하므로 J 저항곡선이 전체적으로 상승되더라도 기울기가 동일하면 동일한 값을 갖게 된다. 따라서 이 그림에서 알 수 있듯이 시험편 두께의 변화에 대한 열단계수 T는 동일 적분식을 적용하면 값의 차이는 다소 있지만 거의 일정하다고 할 수 있다.

Fig. 4. 12는 두께 B의 변화에 따른 열단계수 T의 거동을 나타낸 것이며, 횡축은 시험편 두께 B를 나타낸 것이다. 여기서 □는 Merkle식에 의한 J 저항

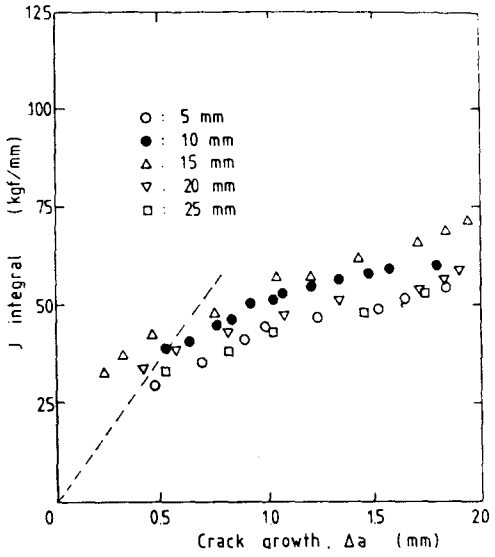

Fig. 4. 8. J integral values for CT specimens by using (2.7) equation.

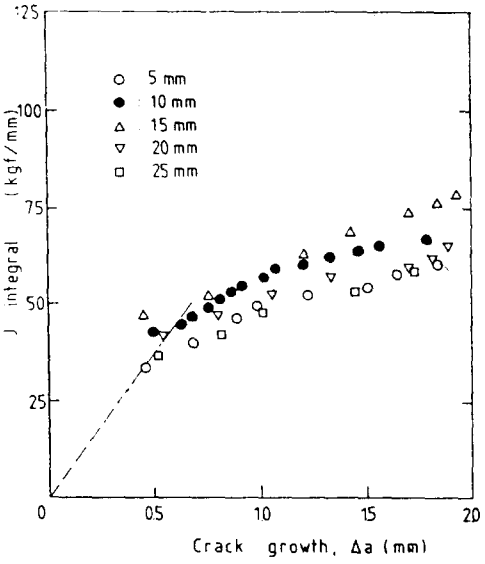

Fig. 4. 9. J integral values for CT specimens by using (2.6) equation.

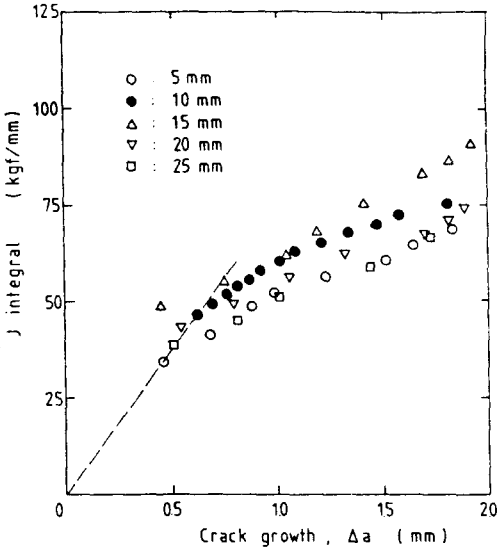

Fig. 4. 10. J integral values for CT specimens by using (2.1) equation.

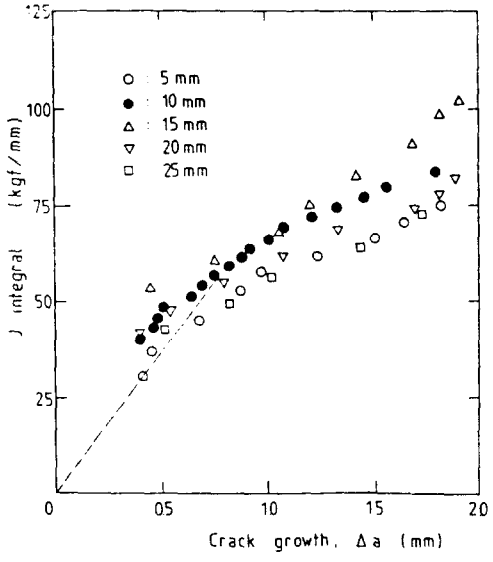

Fig. 4. 11. J integral values for CT specimens by using (2.4) equation.

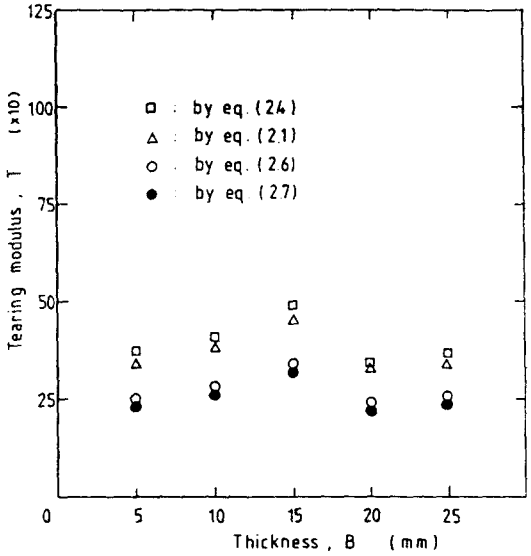

Fig. 4.12. Values of tearing modulus for CT specimens with variation of thickness.

곡선의 기울기를 이용하여 얻은 결과이고 △는 Rice 식, ○는 Simpson 식, ●는 Yoon 식에 의한 J 저항곡선의 기울기를 이용하여 얻은 결과를 나타내고 있으며, 이들 값들은 동일 두께의 시험편들이 4개 이상의 시험편에 대한 결과들을 평균하여 나타낸 것이다. 이 그림에 의하면 같은 두께의 시험편에 대하여 열단계수 T의 값은 Merkle 식에 의한 J 저항곡선의 기울기를 이용하여 얻은 결과가 가장 크고 Rice, Simpson, Yoon 식에 의한 J 저항곡선의 기울기를 이용하여 얻은 결과의 순으로 나타난다. 이러한 결과는 앞절에서 고찰한 Jc의 거동으로부터 예측되는 결과이며 동시에 두께 3 mm의 CT 시험편에서 z의 변화에 대한 고[24]의 결과와 유사한 경향이다. 또한 열단계수 T는 시험편 두께의 증가에 따라 미세한 차이는 있으나 거의 일정함을 알 수 있다. 이처럼 시험편 두께의 변화에 대한 열단계수 T의 값은 평균값을 취하면 거의 일정하지만 동일 두께의 시험편에서 여러개의 시험편을 사용하여 얻은 열단계수의 각 값들은 크게 나타나므로 전체적으로 큰 차이가 나며 이에 대한 많은 연구 검토가 요망된다. 이상과 같은 결과들을 종합하면 평면응력 상태하에서의 열단계수 T는 같은 두께의 시험편에서는 Merkle 식에 의한 값이 가장 높고 Yoon 식에 의한 값이 가장 낮음을 알 수 있다. 그리고 동일 J 적분값을 적용하였을 때 열단계수 T의 값은 두께의 변화에 따라 거의 일정하다고 할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 J 적분을 이용하여 두께의 변화에 따른 파괴인성치의 거동을 검토하기 위하여 두께 25 mm의 일반구조용 압연강판을 평면가공하여 두께 5, 10, 15, 20, 25 mm의 CT 시험편을 제작하였다. 이때 크랙비는 $z=0.60$인 상태에서 두께를 변화시켜 가면서 파괴인성수 Jc와 열단계수 T의 거동을 고찰하였다.

얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 평면응력 파괴인성치 Jc는 각각의 두께에 대하여 Merkle 식에 의한 결과가 가장 높게 나타나고 Rice 식, Simpson 식, Yoon 식의 순서로 나타난다.

2) 평면응력 파괴인성치 Jc는 동일한 J 적분식을 적용하였을 때 두께가 감소함에 따라 증가하였다가 두께 15 mm를 기준으로 다시 감소한다.

3) Yoon 식을 사용할 경우 평면응력 파괴인성치 Jc와 시험편 두께 B의 상관관계를 무차원화시켜 다음과 같은 실험식을 얻었다.

$$Jc/J_{IC}=1.7-15.1\left(\frac{B}{W}\right)+112.9\left(\frac{B}{W}\right)^2-301.3\left(\frac{B}{W}\right)^3+260.6\left(\frac{B}{W}\right)^4$$

$$R=0.999$$

4) 열단계수 T는 각각의 두께에 대하여 Merkle 식에 의한 결과가 가장 높게 나타나며, Rice 식, Simpson 식, Yoon 식에 의한 결과의 순으로 나타난다.

5) 열단계수 T는 각각의 단면의 두께에 대하여 동일한 J 적분식을 적용하였을 때 두께의 변화에 따라 거의 일정한 값을 나타내며, 이에 대한 많은 연구 검토가 요망된다.

감사의 글

본 논문은 1987년도 문교부 자유과제 학술연구 조성비의 지원으로 이루어진 것으로 여기에 심심한 사의를 표합니다. 아울러 실험에 협조를 해 준 부산수산대학 대학원생 엄 윤성, 한 종오군에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ASTM E399-81(1981): Standard test method for plane-strain fracture mechanics of metallic

materials.

2. Broek, D.(1978): Elementary engineering fracture mechanics. Nijhoff & Noordhoff, 107-111.
3. Rice, J.R.(1968): A path independent integral and the approximate analysis of stain concentration by notches and cracks. J. Applied Mech. 35, 379-385.
4. Rice, J.R.(1971): Mathematical analysis in the mechanics of fracture, Fracture II. Academic Press, 119-311.
5. Hutchinson, J.W.(1968): Singular behavior at the end of tensile crack in a power law hardening materials. J.Mech. Phy. Solids 16, 13-31.
6. J.W. Hutchinson, J.W.(1968): Plastic stress and strain fields at a crack tip. J.Mech. Phy. Solids 16, 337-347.
7. J.R. Rice, J.R. and G.F. Rosengren(1968): Plane strain deformation near a crack tip in a power law hardening materials. J. Mech. Phy. Solids 16, 1-12.
8. J.A. Begley, J.A. and J.D. Landes(1972): The J integral as a fracture criterion. ASTM STP 514, 1-20.
9. J.D. Landes, J.D. and J.A. Begley(1974): Test results from J-integral Studies: An attempt to establish a J_{IC} Testing Procedure. ASTM STP 560, 170-186.
10. ASTM E 813-81(1981): Standard test method for J_{IC}. a measure of fracture toughness.
11. Rice, J.R., P.C. Paris, and J.G. Merkle(1973): Some futher result of J integral analysis and estimates. ASTM STP 536, 231-245.
12. Merkle, J.G. and H.T. Corten(1974): A J integral analysis for the compact tension, considering axial force as well as bending effect. J. Pressure Vessel Technlogy, 286-292.
13. Sumpter, J.D. and C.E. Turner(1976): Method for laboratory determination of Jc. ASTM STP 601, 3-18.
14. Simpson, L.A.(1981): Effect of specimen geometry on elastic plastic R-curve for Zr-2.5 % Nb. Advances in Fracture Research 2, 833-834.
15. McCabe, D.E. and H.A. Ernst(1983): A perspective on R-curves and instability theory. ASTM STP 791, I-561-I-584.
16. 윤기봉·최성열·엄윤용(1983): J적분을 이용한 균열성장 저항곡선의 결정. 대한기계학회논문집 7(4), 441-450.
17. Paris, P.C., H.Tada, A.Zahoor, and H.Ernst (1979): The theory of instability of the tearing mode of elastic crack growth. ASTM STP 668, 5-36.
18. Paris, P.C., H.Tada, A.Zahoor, and H. Ernst (1979): Initial experimental investigation of tearing instability theory, ASTM STP 668, 251-265.
19. Hickerson, Jr., J.P.(1977): Experimental confirmation on the J integral as a thin section fracture criterion. Eng. Fracture Mech. 9, 75-85.
20. 송삼홍·고성위(1986) : 평면응력 파괴인성치 거동에 관한 연구(CT 시험편을 중심으로). 대한기계학회 논문집 10(6), 937-946.
21. 송삼홍·고성위·정규동(1986) : 평면응력 파괴인성치 거동에 관한 연구(CCT 시험편을 중심으로). 대한기계학회 논문집 11(3) 376-385.
22. Garwood, S.J., J.N. Robinson, and C.E. The Turner(1975):The measurment of crack growth resistance curve(R-curve) using the J-integral. Int. J. Fracture 11, 528-530,
23. 안득만·곽병만(1979) : J 적분을 이용한 저탄소강의 파괴인성치 결정. 대한기계학회 논문집 3 (4), 133-142.
24. 고성위(1986) : J 적분을 이용한 저탄소강 박판의 파괴인성치 거동에 관한 연구. 고려대학교 박사학위 논문.