

〈논 문〉

## PSD를 이용한 혼합모드 하중하에서 탄소성 파괴인성평가에 관한 실험적인 연구

김희송\* · 이춘재  
(1995년 9월 26일 접수)

### An Experimental Study on the Evaluation of Elastic-Plastic Fracture Toughness under Mixed Mode I - II - III Loading Using the Optical PSD

Hei Song Kim and Choon Jae Lee

**Key Words :** Position Sensing Devices(PSD: 위치측정장치), Fracture Toughness Test(파괴인성시험), Elastic-Plastic Fracture(탄소성 파괴), Behavior of the Crack Propagation(균열진전거동), Mixed Mode Test(MMT: 혼합모드시험)

#### Abstract

In this paper, an elastic-plastic fracture toughness test under mixed mode loading was proposed using a single edge-cracked specimen subjected to bending moment(M), shearing force(F), and twisting moment(T). The J-integral of a crack in the specimen is expressed in the form  $J=J_I + J_{II} + J_{III}$ , where  $J_I$ ,  $J_{II}$  and  $J_{III}$  are the components of mode I, mode II and mode III deformation, respectively.  $J_I$ ,  $J_{II}$  and  $J_{III}$  can be estimated from  $M-\theta$  ( $\theta$ : crack opening angle),  $F-U$  ( $U$ : crack shear displacement) and  $T-\alpha$  ( $\alpha$ : crack twisting angle). In order to obtain the  $M-\theta$ ,  $F-U$  and  $T-\alpha$  diagram in real time, a new deformation gage for mixed mode loading was proposed using the optical position sensing device(PSD). The elastic-plastic fracture toughness test was carried out with an aluminum alloy. The loading apparatus was designed and manufactured for this experiment. For the loading condition of the crack initiation in the mixed mode, the MMT-3(mode I + mode II + mode III) has the lowest values out of the all specimens. This implies that MMT-3 is possible of the crack initiation at lower load, if the specimen acts on together with the torque under the same loading condition. An elastic-plastic fracture toughness test using the PSD brings a successful experimentation in measuring the crack deformation(mode I + mode II + mode III).

#### 1. 서 론

현대사회는 급격한 산업발전과 함께 많은 구조물이 만들어지고 이 구조물은 복잡한 응력상태 하에

서 사용되는 경우가 대부분이다. 이와 같은 구조물의 재료에 결함이 존재하면 개구형변위, 면내전단 변형, 면외전단변형이 중복된 혼합모드의 파괴양상을 갖는다고 할 수 있다. 이들 재료의 파괴인성을 정확하게 평가하는 것은 안정성 평가면에서 대단히 중요하다. 또한 설계시의 하중조건이 오랫동안 사용한 후에는 여러가지 요인에 의하여 예상치 못하

\*회원, 단국대학교 기계공학과

\*\*회원, 대전산업대학교 기계공학과

는 하중조건으로 하중의 크기와 하중방식이 변화되어 설계기준 하중보다 아주 작은 하중에서 파괴가 발생하여 구조물이 붕괴되거나 기계의 부품이 파손되어 대형사고를 유발하게 된다. 이러한 관점에서 혼합모드의 파괴현상을 정확하게 파악하여 파괴기준을 설정할 필요가 있다.

지금까지 많은 학자들이 파괴인성의 평가는 단순한 모드(mode)에서 연구해 왔으며, 혼합모드의 파괴거동은 선형탄성 파괴역학(LEFM)의 범주내에서 조사되어 왔다. 파괴기준에 대하여는 여러가지 이론이 발표되어 있다.<sup>(1~7)</sup> Erdogan과 Sih,<sup>(2)</sup> William과 Ewing<sup>(3)</sup>에 의하여 최대 주방향응력설, Sih<sup>(4)</sup>에 의하여 변형률-에너지밀도이론, Hussain<sup>(5)</sup>에 의하여 최대 변형률-에너지밀도이론 등이 있다.

그리고 Mode I + Mode II의 혼합모드조건하에서 파괴조건을 조사하기 위하여 여러가지 실험방법이 제안되어 있다. Masaru<sup>(6)</sup>는 3점굽힘 실험을 하였고, Maiti와 Smith<sup>(7)</sup>는 취성재료의 파괴기준을 설정하기 위하여 직선균열을 갖는 무한판(infinite sheet)으로 실험하였으며, Atkinson<sup>(8)</sup>은 Brazilian Disk를 사용하여 실험하였다. 그 외에도 여러가지 시험편을 사용한 실험방법이 제안되었다.

그러나 현재까지 혼합모드조건하에서 파괴거동에 대하여 제안된 이론과 실험방법의 대부분은 선형 파괴역학을 토대로 연구하였고 취성파괴 범위에서 실험한 것이 대부분이다. 그리고 탄소성과파괴의 혼합모드조건에서 파괴기준은 명확히 규명되고 있지

않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 모드 I과 모드 II, 그리고 모드 III가 동시에 작용하는 혼합모드 부하장치(fixture)를 고안하여 제작하였고 연성재료인 Al-6061을 사용하여 파괴인성 파라미터인 J적분값을 실험적으로 구하여 파괴인성시험을 수행하였다. 그리고 모드 I과 모드 II, 모드 III의 각각의 파괴모드에 대하여 3점 굽힘시험을 수행하여 본 실험에 사용한 혼합모드 조건하에서 시험결과와 비교하므로서 혼합모드 (I + II + III)조건에서 파괴인성  $J_c$ , 균열진전저항, 균열진전속도를 평가하였다.

## 2. J적분의 계산

Fig. 1(a)와 같이 하중이 작용하면 굽힘모멘트 M, 전단력 F, 비틀림모멘트 T가 동시에 작용하는 편측균열시험편(single edge cracked specimen)의 균열부분은 모드 I, 모드 II, 모드 III가 동시에 작용한다. 시험편의 J적분은 Tohgo<sup>(9)</sup> 등에 의하여 계산된 방법으로 계산하였다. 계산을 간편하게 하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 균열부가 고정된 외팔보로 가정하였다.

$M=PH$ ,  $F=P$ ,  $T=Pd$  이면 이 외팔보의 균열부의 변위는 Fig. 1(c)와 같은 변형을 한다고 할 수 있다. 그리고 하중점변위  $\delta$ , 균열개구각  $\theta$ , 균열전단변위 U, 균열부의 비틀림각  $\alpha$ 로 표시한다. 균열에 대한 J적분은 다음 식으로 주어진다.

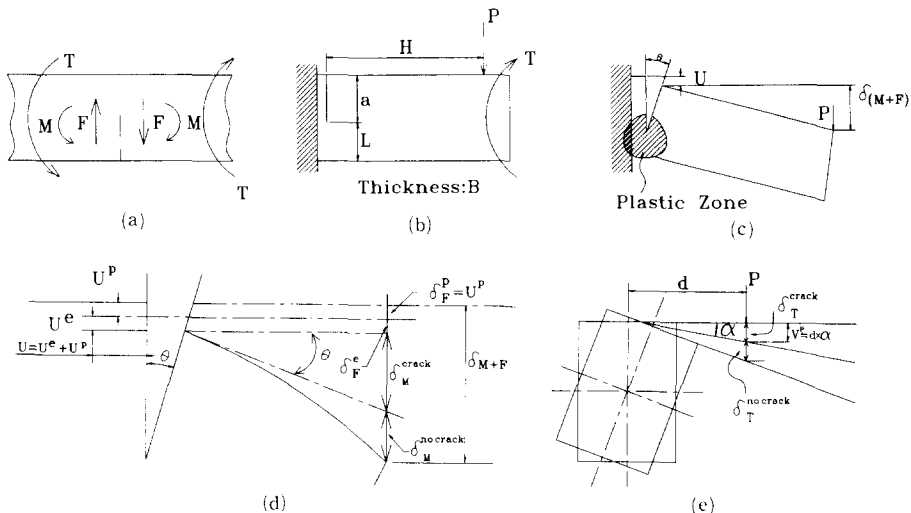


Fig. 1 Deformation of a specimen subjected to bending moment (M) shearing force(F) and twisting moment (T)

$$J = \frac{1}{B} \int_0^P \left( \frac{\partial \delta}{\partial a} \right) dp \quad (1)$$

여기서,  $\delta$ 는 하중점 변위,  $B$ 는 시험편의 두께,  $a$ 는 균열길이이고  $\delta$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\delta = \delta_M^{crack} + \delta_M^{nocrack} + \delta_F^e + \delta_F^p + \delta_T^{crack} + \delta_T^{nocrack} \quad (2)$$

여기서,

$\delta_M^{crack}$  : 굽힘모멘트에 의한 균열발생 후의 변위

$\delta_M^{nocrack}$  : 굽힘모멘트에 의한 균열발생 전의 변위

$\delta_F^e$  : 전단력으로 인한 탄성변위

$\delta_F^p$  : 전단력으로 인한 소성변위

$\delta_T^{nocrack}$  : 토크로 인한 균열발생 전의 변위

$\delta_T^{crack}$  : 토크로 인한 균열발생 후의 변위

또한,

$$\delta_M^{crack} H\theta, \delta_F^e = U^p, \delta_T^{crack} = da = V^p \text{이다.}$$

식 (2)을 식 (1)에 대입하면

$$J = \frac{1}{B} \int_0^P \left[ \frac{\partial \delta_M^{crack}}{\partial a} \right]_p dp + J_I^e + \frac{1}{B} \int_0^P \left[ \frac{\partial \delta_F^p}{\partial a} \right]_p dp + \frac{1}{B} \int_0^P \left[ \frac{\partial \delta_T^{crack}}{\partial a} \right]_p dp \quad (3)$$

식 (3)의 첫번째 항은 굽힘모멘트로 인한 모드 I 성분이고, 두번째 항과 세번째 항은 전단력으로 인한 모드 II 성분에 대한 탄성과 소성부분이며 넷번째 항은 비틀림모멘트로 인한 모드 III 성분이다.

식 (3)을 M, F, T의 함수로 표시하면

$$J = \frac{1}{B} \int_0^M \left[ \frac{\partial(H\theta)}{\partial a} \right]_M \frac{dM}{H} + J_I^e + \frac{1}{B} \int_0^F \left[ \frac{\partial U^p}{\partial a} \right]_F dF + \frac{1}{B} \int_0^T \left[ \frac{\partial(da)}{\partial a} \right]_T \frac{dT}{d} \quad (4)$$

위 식에서  $H, d$ 는 상수이므로

$$\therefore J = \frac{1}{B} \int_0^M \left[ \frac{\partial \theta}{\partial a} \right]_M dM + J_I^e$$

$$+ \frac{1}{B} \int_0^F \left[ \frac{\partial U^p}{\partial a} \right]_F dF + \frac{1}{B} \int_0^T dT \quad (4)$$

식 (4)의 첫번째 항의 계산은 균열개구각  $\theta$ 가 다음의 함수로 주어진다.

$$\theta = f\left(\frac{M}{BL^e}\right) \quad (5)$$

$$J_I = \frac{1}{B} \int_0^M \left( \frac{\partial \theta}{\partial a} \right)_M dM = \frac{2}{LB} \int_0^e Md\theta \quad (6)$$

전단변위  $U^p$ 는 전단력  $F$ 에 대하여 다음과 같은 함수관계를 갖는다.

$$U^p = Lg\left(\frac{F}{LB}\right) \quad (7)$$

결국 식 (4)의 두번째 항과 세번째 항은 다음과 같이 된다.

$$J_{II} = J_I^e + \frac{2}{LB} \left[ \int_0^U FdU - \frac{1}{2}FU \right] \quad (8)$$

균열비틀림각  $\alpha$ 가 비틀림모멘트  $T$ 에 대하여 다음과 같은 함수 관계를 갖는다.

$$\alpha = f\left(\frac{T}{BL^e}\right) \quad (9)$$

결국 식 (4)의 네번째 항은 다음과 같이 된다.

$$J_{III} = \frac{1}{B} \int_0^T \left( \frac{\partial \alpha}{\partial a} \right)_T dT = \frac{2}{LB} \int_0^\alpha Td\alpha \quad (10)$$

결국  $J$ 의 값은 식 (6), 식 (8), 식 (10)의 합으로 계산된다.

즉

$$J = J_I + J_{II} + J_{III} \quad (11)$$

$J_I^e$ 는 모드 II의 탄성부분이며 응력확대 계수  $K_{II}$ 는 다음과 같다.

$$K_{II} = \left(\frac{F}{WB}\right) \sqrt{\pi a} F_{II} \quad (12)$$

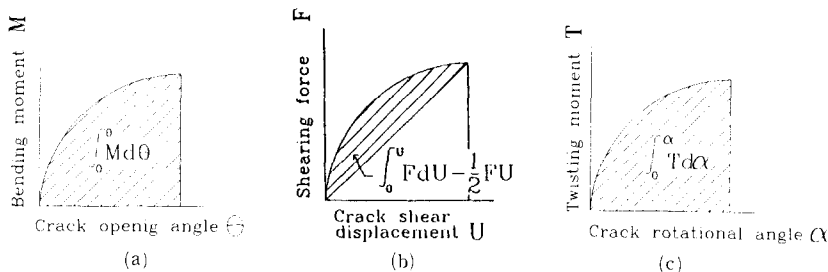


Fig. 2 M- $\theta$ , F-U and T- $\alpha$  of a specimen under mixed mode loading

$$J_{II}^e = \frac{K_{II}^2}{E'} = \frac{\pi a F^2}{E' (WB)^2} F_1^2 \quad (13)$$

여기서,

$$F_{II} : \text{수정계수}$$

$$E' = \begin{cases} E : \text{평면응력} \\ \frac{E}{1-\nu^2} : \text{평면변형} \end{cases}$$

즉, 편축 균열을 갖는 시험편의 J적분은 모드 I 성분과 모드 II 성분, 모드 III 성분의 합으로 계산된다.  $J_{I}$ 과  $J_{II}$ ,  $J_{III}$ 는 Fig. 2에서와 같이 M- $\theta$ , F-U, T- $\alpha$  선도로부터 얻어지며 이 방법의 타당성은 참고문헌 (9)에서 혼합모드 균열에 대한 유한요소해석에 근거를 두어 이미 증명한 바 있다.

### 3. 실험장치 및 시험편

#### 3.1 부하장치 제작

본 실험에 사용한 부하장치 (loading apparatus)는 한개의 하중점에서 혼합모드가 만들어지도록 하였으며 ASTM E 813-81의 3점 굽힘시험에 의한  $J_{IC}$  시험법에 근거를 두어 제작하였으며 특히, 접촉부의 저항 및 마찰을 최소화하기 위하여 가능하면 모든 접촉부는 점접촉 및 선접촉이 되도록 하였다. 부하장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 혼합모드(모드 I + II + III)의 조건은 시험편에 고정구를 설치하여 한개의 하중점으로 압축하중과 함께 편심하중을 작용시킴으로서 시험편에는 굽힘모멘트와 전단력 그리고 비틀림모멘트가 동시에 작용하도록 설계하였다. 각 시험편의 굽힘모멘트 M, 전단력 F, 비틀림모멘트 T의 크기와 하중의 위치를 Fig. 4에 표시하였다.

#### 3.2 시험편

시험편은 하중조건과 형상에 따라 각각 10개씩 전부 60개를 준비하였으며 Fig. 4에서 3PB-1, MMT-1은 3점 굽힘시험편으로서 순수모드 I 시험편이며, 3 PB-2와 MMT-2 시험편은 모드 I+II의 혼합모드 시험편으로서 균열길이  $a=10$  mm, 폭  $B=10$  mm, 리가먼트(ligament)길이  $L=10$  mm, 높이  $W=20$  mm이다. 그리고 MMT-3은 혼합모드 (Mode I + II + III) 시험편으로서 응력집중을 방지하기 위하여 높이의 변화가 있는 부분은 곡선으로 제작하였으며 다른 조건은 3점 굽힘시험편과 동일하다.

#### 3.3 혼합모드 균열의 변형 측정장치

Fig. 1(a)에서 굽힘모멘트 M, 전단력 F, 비틀림모멘트 T를 받는 혼합모드 시험편의 J적분을 계산하기 위하여 균열개각  $\theta$ 와 균열비틀림각  $\alpha$ , 균열전단변위 U를 실시간에 따라 측정할 필요가 있다. 본 실험에서는 2차원 광학PSD(position sensing device)를 사용하여 변형량 및 변형각을 측정하였다. 측정 시스템은 전자 다이오드 레이저, PSD, PSD 신호처리장치이며 개략적인 측정 시스템은 Fig. 5에서 보여주고 있다. 시험편의 표면에 부착된 PSD에 전자 다이오드 레이저빔이 방사(放射)되면 시험편의 변형과 함께 빔 spot의 움직이는 위치가 전압으로 측정된다. 그리고 빔 spot의 움직이는 거리는 PSD A와 B에서 x, y좌표값을 각각 X1, Y1, X2, Y2로 표시하였다.

#### 3.4 PSD의 측정원리

Fig. 6은 시험편에 PSD와 레이저빔을 부착시킨

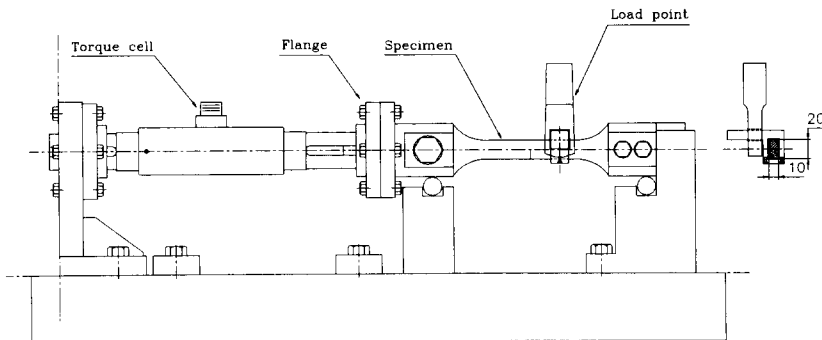


Fig. 3 Loading apparatus

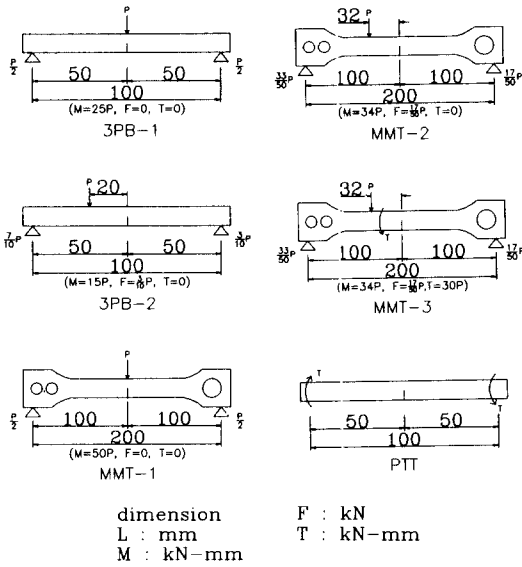


Fig. 4 Specimen geometrics and loading method

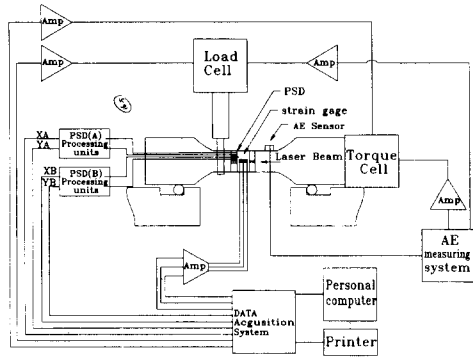


Fig. 5 Measuring system for deformation of a mixed mode crack

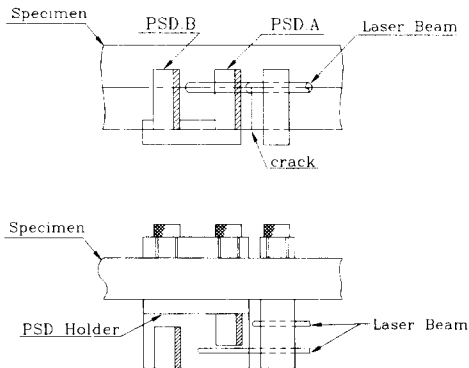


Fig. 6 Attachment of P.S.D and laser beam to a specimen

것이며 Fig. 7은 모멘트에 의하여 만들어지는 균열 개구각  $\theta$ 의 측정원리를 보여준 것이며, Fig. 8은 전단력에 의하여 만들어지는 전단변위 U를 측정하는 원리이고 Fig. 9는 비틀림모멘트에 의하여 만들어지는 균열비틀림각  $\alpha$ 를 측정하는 원리를 보여준 것이다. 그리고 균열개구각  $\theta$ , 균열전단변위 U, 균열비틀림각  $\alpha$ 는 다음 식 (14), (15), (16)에서 구한다.

굽힘모멘트 M에 의한 균열개구각  $\theta$ 는

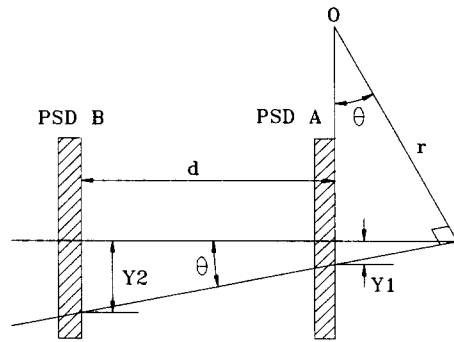


Fig. 7 Measuring principle of a crack opening angle ( $\theta$ ) due to bending moment (M)

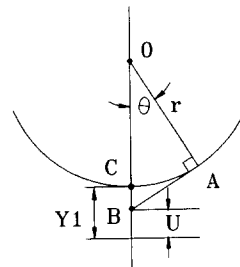


Fig. 8 Measuring principle of a displacement (U) due to Shearing force (F)

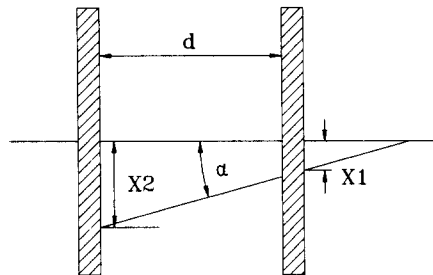


Fig. 9 Measuring principle of a crack twisting angle ( $\alpha$ ) due to twisting moment (T)

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Y_2 - Y_1}{d} \quad (14)$$

전단력 F에 의한 균열 전단변위 U는

$$U = Y_1 - \overline{BC} = Y_1 - r \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (15)$$

$\theta$ 가 미소한 각, 즉 변위가 미소하면 두번째 항은 무시될 수 있다.

$$U \approx Y_1$$

비틀림모멘트 T에 의하여 만들어지는 균열비틀림각  $\alpha$ 는

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{X_2 - X_1}{d} \quad (16)$$

식 (15)에서 r의 값은 모드 I 상태에서 레이저빔으로부터 회전중심까지의 거리를 의미하는 것이며 회전중심이 하중방식에 의존되지 않는다는 가정 하에서 혼합모드 하중의 경우에도 동일한 r의 값을

갖는다고 할 수 있다.

본 실험에 사용한 2차원 PSD는 분해능(resolution)이  $6\mu\text{m}$ 를 사용하였으며 거의 정확하게 M- $\theta$ , F-U, T- $\alpha$ 선도를 얻을 수 있다.

#### 4. 실험방법

본 실험에 사용한 재료는 알루미늄 합금 6061이며, 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에서 보여주었다.

피로균열의 길이는 1.0~1.5 mm로 하였고 최고하중 150 kg에서 최저하중 15 kg까지 작용시켜서 20000~60000 cycle 범위에서 만들어졌다. 이것은 ASTM E399-83 A2의 예균열조건에 의하여 만들어진 것이다. 3점 굽힘시험과 본 실험에서 개발된 혼합모드시험은 상온에서 실행하였다.

본 실험에 사용한 압축시험기는 일본에서 제작한 25 Ton 만능재료시험기로서 0.5 mm/min의 속도

Table 1 Chemical composition of the material

Compositions	Al	Mg	Fe	Si	Zn	Mn	Cu	Pb	Cr
wt(%)	base	3.86	0.75	0.49	1.23	0.356	0.28	0.037	0.07

Table 2 Mechanical Properties of the material

Material	Yielding stress (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation(%)	Hardness (Hv)
Aluminium (6061)	265	303	18	78

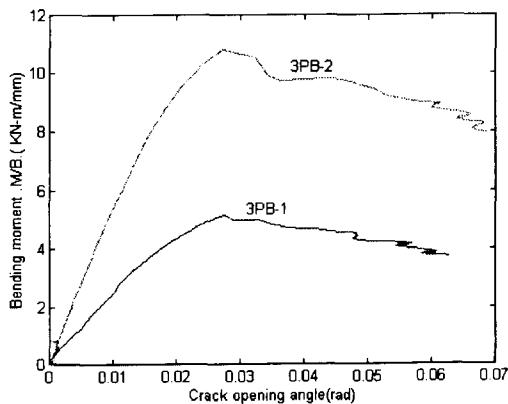


Fig. 10 M- $\theta$  relation for the mixed mode

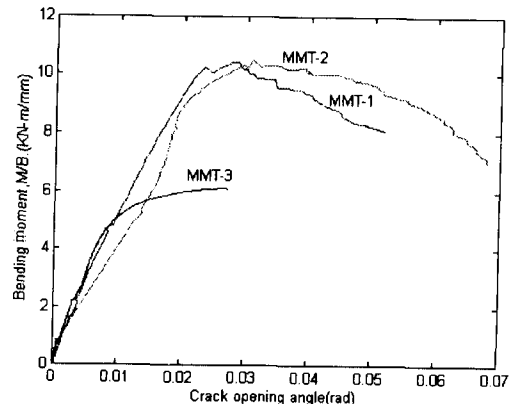


Fig. 11 M- $\theta$  relation for the mixed mode crack

로 하중을 작용시켰으며 변형은 평면변형률상태로 가정하였다. 균열개시점은 AE(acoustic emission)와 균열게이지(crack gage)를 이용하여 측정하였고 이 두개의 값을 비교함으로써 AE와 스트레인게이지의 단점을 보완하면서 균열개시점을 선정하였다. 또한 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 파단면을 관찰하였다.

실시간에 따른 균열개구각  $\theta$ , 전단변위  $U$ , 균열비틀림각  $\alpha$ 은 PSD의 A와 B에서 각각 전압으로 측정되어 자료획득장치(data acquisition system)에 저장되도록 하였다. 하중점에서 하중은 재료시험기의 로드셀(load cell)에서 측정되고 비틀림으로 인한 비틀림모멘트는 부하장치에 설치된 토크 변환기(torque transducer)에서 측정하였다. 본 실험에 사용한 로드셀 및 토크 변환기의 보정은 오차를 최대 한 줄이기 위하여 매회 시험 시작 전에 실시하였다. 균열개시점을 균열게이지와 AE로 측정하여

비교한 후 균열게이지를 기준으로 하여 개시점을 판정하고 Figs. 10, 11, 12, 13으로부터 면적을 구하여 식 (6), (8), (10)에 대입하여  $J_{Ic}$ ,  $J_{IIc}$ ,  $J_{IIIc}$ 의 값을 각각 계산하고 식 (11)로부터  $J_c$ 를 결정하였다.

### 5. 실험결과 및 검토

#### 5.1 균열개시와 J적분과의 관계

Figs. 10, 11, 12, 13은 실험에 의하여 얻어진  $M-\theta$ 와  $F-U$ 와  $T-\alpha$ 의 관계를 각 시험편에 대하여 그래픽한 것이다. Figs. 10, 11에서는 3점 굽힘 시험편인 3PB-1과 3PB-2 그리고 MMT-1, MMT-2 시험편과 같이 모드 I이 지배적인 시험편에서는 pop-in이 관측되었다. 이것은 참고문헌 (1)에서

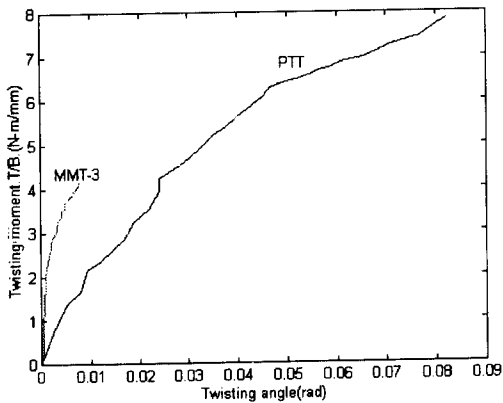


Fig. 12 F-U relation for the mixed mode crack

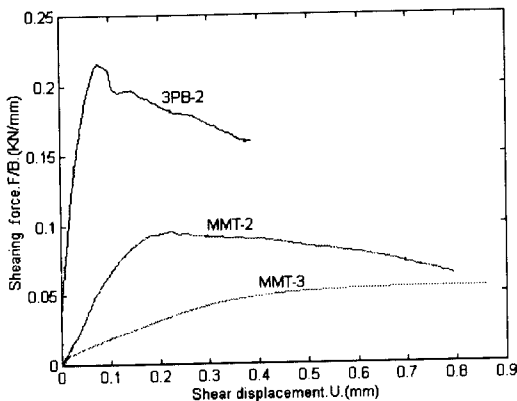


Fig. 13 T- $\theta$  relation for the mixed mode crack

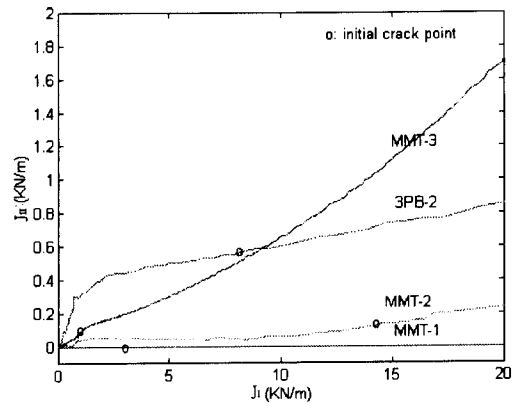


Fig. 14a Loading processes and condition of crack initiation on  $J_I - J_{III}$  plane

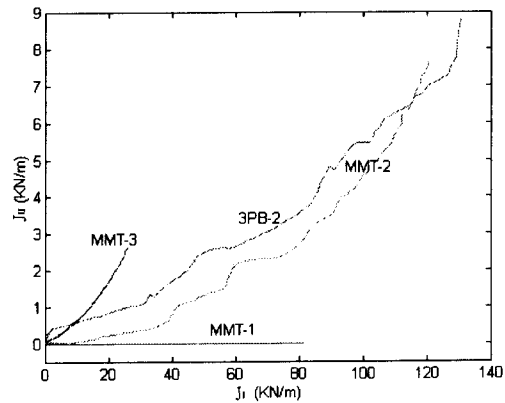


Fig. 14b Loading processes and condition of crack initiation on  $J_I - J_{II}$  plane

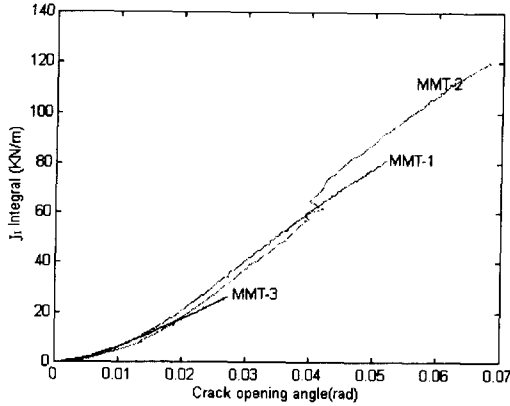


Fig. 15a Relation of the J-integral ( $J_I$ ) and crack opening angle ( $\theta$ )

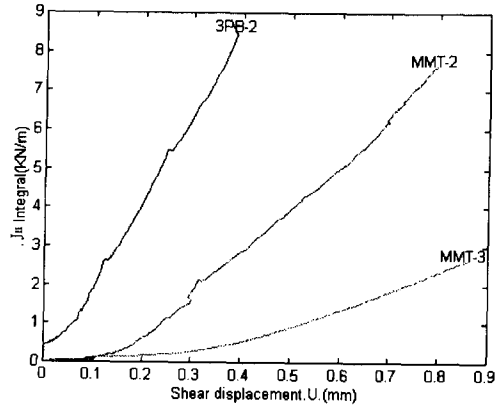


Fig. 16 Relation of the J-Integral ( $J_I$ ) and Shear Displacement, U (mm)

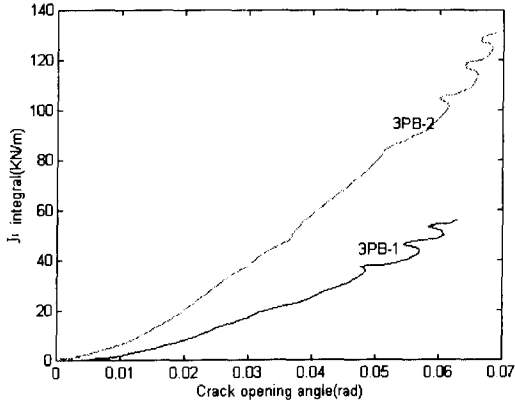


Fig. 15b Relation of the J-integral ( $J_I$ ) and crack opening angle ( $\theta$ )

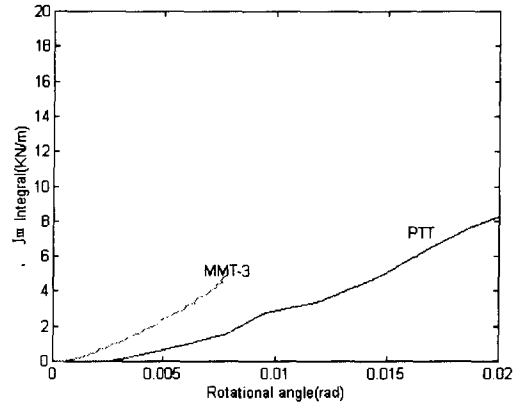


Fig. 17 Relation of the J-integral ( $J_{III}$ ) and rotational angle ( $\alpha$ )

이미 관측한 바 있다. 그러나 모드 I + 모드 II + 모드 III가 동시에 작용하는 혼합모드 시험편인 MMT-3 시험편에서는 pop-in 현상이 관측되지 않았다. 이것은 모드 III에 의한 비틀림 전단응력이 pop-in현상을 방해하는 역할을 하는 것으로 생각된다. Fig. 12에서 3PB-2와 MMT-2의 실험결과 차이가 있는 것은 균열부근에 작용하는 전단력의 크기는 거의 같지만 굽힘모멘트는 MMT-2가 3PB-2보다 2배정도 크기 때문에 이것이 전단변위에 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. Fig. 14(a), (b)는  $J_I$ ,  $J_{II}$ ,  $J_{III}$ 와 균열개시의 조건과 하중과정을 보여준 것이다.

균열개시 조건은  $\Delta a=0$  일 때의 J값을  $J_c$ 로 정하였으며  $J_{Ic}$ ,  $J_{IIc}$ ,  $J_{IIIc}$ 는 작용하는 M과 F, T의 비에 따라 다르게 결정된다. 균열개시점은 Fig.

14(b)에서 각 시험편에 대하여 표시하였다. 균열 선단의 응력-변형률과 개시되는 균열의 형태가 모드 I이 지배적인 균열과 모드 II가 지배적인 균열 또는 모드 III가 지배적인 균열이 서로 다르기 때문에 각각의 균열개시점에서의 J적분값이 다르다. 그러나 일반적으로 모드 II가 지배적인 경우의 파괴 인성이 모드 I이 지배적인 경우 파괴 인성치 보다 큰 값을 갖는다. Fig. 15(a), (b)와 Figs. 16, 17은 균열개구각  $\theta$ , 전단변위 U, 균열비틀림각  $\alpha$ 에 대한 J적분 값을 표시한 것이다.

### 5.2 균열개시점의 하중

하중과 하중점의 변위를 측정된 결과 Fig. 18과 같다. 실험에 의하여 측정된 균열개시 시간에서 작용한 하중의 크기를 표시한 결과 MMT시험에서



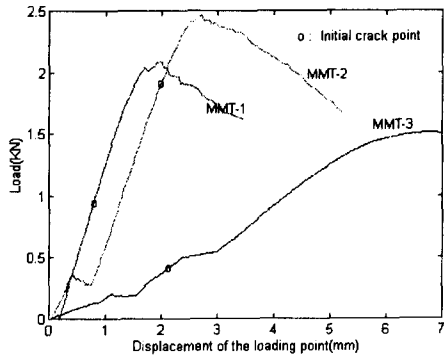


Fig. 18 Relation of load and displacement of the loading point

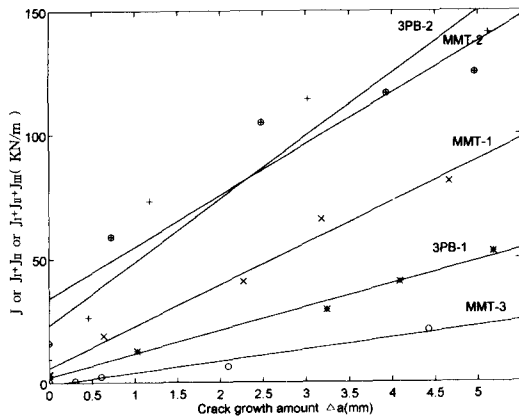


Fig. 19 J-integral resistance for mixed mode crack

모드 I 균열의 경우가 모드 I + II의 경우보다 약 1/2의 값에서 균열이 개시되었다. 또한 주목할 만한 것은 동일한 조건의 전단력 F, 굽힘모멘트 M이 작용하는 경우에 비틀림모멘트 T가 혼합하여 작용하면 F와 M만 작용하는 경우보다 균열개시점의 하중이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

### 5.3 J 적분과 저항곡선

균열길이  $\Delta a$ 의 측정은 균열길이 가 서로 다른 5개의 시험편을 선택하여 액화질소에 약 10분 동안 넣은 후 급속파단하여 파단면을 형성한 다음 현미경(배율 50, 분해능 0.02 mm)으로 두께의 3/8, 1/2, 5/8의 3점에서 측정하여 이 값의 평균치를  $\Delta a$ 로 간주하였다. Fig. 19에서와 같이 균열진전저항은 순수한 모드 I인 3PB-1과 MMT-1이 모드 I + II인 3PB-2, MMT-2 보다 작은 값을 갖고 있으며 모드 I + 모드 II + 모드 III의 혼합모드인

MMT-3의 경우가 가장 작은 J적분 저항을 갖고 있다.

이것은 동일한 조건의 모드 I + II의 혼합모드에 모드 III가 함께 작용하면 균열저항은 크게 감소하는 것을 의미하는 것이다. 또한 모드 I 성분이 지배적인 J적분의 저항 값은 모드 II 성분이 지배적인 J적분의 저항값보다 작은 값을 갖고 있다. 이것은 인장에 의한 균열개시 저항보다 전단에 의한 균열개시 저항이 더 크다는 것을 의미한다.

### 5.4 균열개시점 판단

AE에 의한 개시점의 측정은 링다운계수법, 진폭분포법, 주파수해석법이 있으나 본 실험에서는 링다운계수법을 사용하였으며 AE의 계수가 급격한 변화를 하는 시점을 균열개시점으로 선정하였다.

3PB-1의 시험편보다는 3PB-2의 시험편이 균열개시점 시간이 약 4배 정도 늦으며 AE신호의 파형은 돌발형이 만들어졌다.

그러나 MMT-3 시험에서는 균열개시점이 3PB-2보다는 빠르고 3PB-1과 비슷하여 상당히 빠른편에 속한다. 그리고 AE의 파형은 개시점까지는 연속형이 만들어지며 AE에너지의 분포를 보면 균열이 발생한 후부터는 에너지의 크기가 불규칙하게 변화하는 것을 볼 수 있다.

순수토크시험(PTT)은 돌발형이 주로 발생하며 균열개시점 이후에 AE계수는 일정하게 증가하는 현상을 보이고 있다.

균열게이지(crack gage)에 의한 균열개시점 판정은 균열개시점을 알 수 있는 게이지 단자가 있어서 균열이 개시될때 게이지 선의 절단으로 전압이 급격한 변화를 하여 이 시점을 균열개시점으로 판정한다.

균열진전속도가 낮은 경우에는 균열이 통과한 후에 개구변위 증대에 따라 게이지 선이 절단되는 현상이 있어서 3PB-1 시험편보다는 MMT-3 시험편에서 AE에 의한 균열개시점과 균열게이지에 의한 균열개시점이 일치하지 않는 경향이 있다.

Table 3은 여러가지 시험편에 대한 균열개시 시간을 AE와 균열게이지를 비교하였고 균열개시점의 하중과 J적분을 표시하였으며 부하과정에서 작용한 최고하중을 표시하였다. 또한 균열게이지(C. G)와 AE의 측정에 의한 J적분값의 오차를 표시하였으며 연성재료에서 AE로 균열개시점을 측정하는 것은 약간의 오차가 있으며 혼합모드의 경우에는 더욱

**Table 3** Comparison of experimental value according to the various specimen

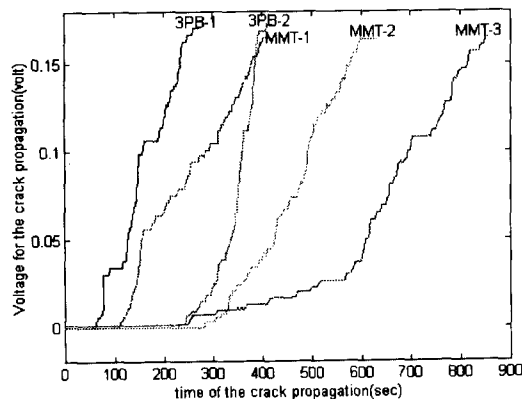
Specimen	Initial crack point of C.G(sec)	Initial crack point of A.E(sec)	Load at initial crack point (kN)	J values of initial crack point based on C.G(KN/m)	J values of initial crack point based on AE(KN/m)	Error based on C.G	Sum of $J_c$ based on C.G (KN/m)	Maximum load (KN)
3PB-1	50	50	2.0235	$J_{Ic}=2.92$	$J_{Ic}=2.92$	0%	2.92	2.0588
3PB-2	250	240	3.82061	$J_{Ic}=7.0088$	$J_{Ic}=6.8071$	2.7%	7.5402	7.2098
				$J_{IIc}=0.5314$	$J_{IIc}=0.5231$			
MMT-1	90	60	0.8599	$J_{Ic}=3.5479$	$J_{Ic}=3.2423$	8.6%	3.5479	2.0844
MMT-2	243	220	1.9402	$J_{Ic}=16.2322$	$J_{Ic}=15.702$	3.3%	16.3893	2.4078
				$J_{IIc}=0.1571$	$J_{IIc}=0.1418$			
MMT-3	264	60	0.4343	$J_{Ic}=0.5473$	$J_{Ic}=0.4474$	17.0%	1.5973	1.5134
				$J_{IIc}=0.0395$	$J_{IIc}=0.0387$			
				$J_{IIIc}=0.0105$	$J_{IIIc}=0.0094$			
PTT	456	390		$J_{Ic}=9.1694$	$J_{Ic}=8.3414$	9.0%	9.1694	

큰 오차의 값을 갖는다.

### 5.5 균열게이지에 의한 균열진전속도

실험에 사용한 게이지는 0.1 mm 간격으로 그리드 선(grid line) 수가 46개로 4.6 mm의 폭을 갖고 있다. 균열이 진전됨에 따라 그리드(grid)가 절단되어 최종 46개가 절단되면서 전압의 변동을 나타낸다.

Fig. 20에서는 3PB, MMT에 대한 균열진전시간에 따른 균열게이지의 전압변동을 보여 주고 있다.



**Fig. 20** Relation of rate and time of the crack propagation

며 단순모드 I (3PB-1)보다는 혼합모드 I + II (3PB-2)가 균열진전시간이 큰 값을 가지며 이것은 3PB-1보다 3PB-2가 균열진전속도가 작은 것을 의미하는 것이다.

MMT에 대한 결과로서 단순모드 I인 MMT-1보다는 혼합모드인 모드 I + 모드 II + 모드 III의 경우 균열진전속도가 작은 것을 알 수 있다.

### 5.6 SEM에 의한 파면관찰

연성재료는 큰 소성변형을 받는 경우 재료중의 계재물이나 석출물등의 제2상 입자를 핵으로 하여 미소공공이 발생하고 마침내 그것들이 성장하여 합체함으로서 파괴가 발생하는 것으로 되어 있다.

본 실험에서 Fig. 21은 모드 I이 지배적인 3PB-1에 대한 파면의 형태이며, Fig. 22는 혼합모드 (I + II + III)인 MMT-3에 대한 파면의 형태를 보여 준 것이다.

일반적으로 3PB-1에서는 등축딴푼(eguiaxed dimple)현상이 발생하고 계재물 등의 제2상의 입자가 약간 존재한다. MMT-3에서는 딴푼의 크기가 3PB-1에 비하여 작으며 제2상 입자의 수가 많아져 미소공공의 발생흔적이 많이 보인다. 이것은 MMT-3가 3PB-1보다 작은 하중에서 파괴됨을 의미한다.

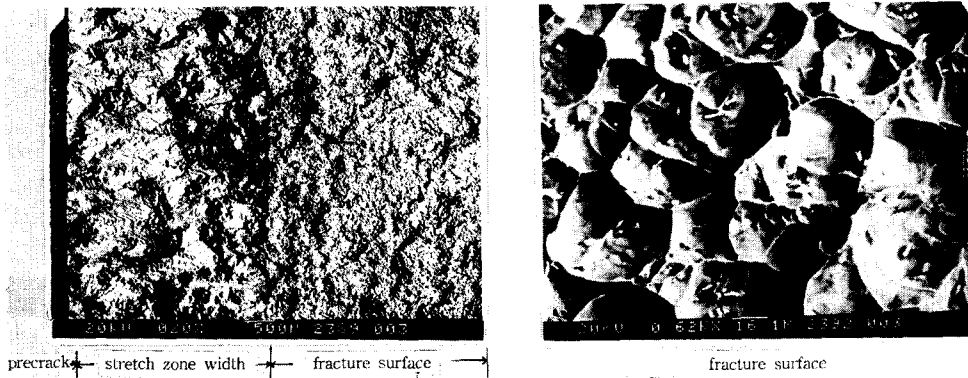


Fig. 21 Aspect of fracture surface (Mode I)

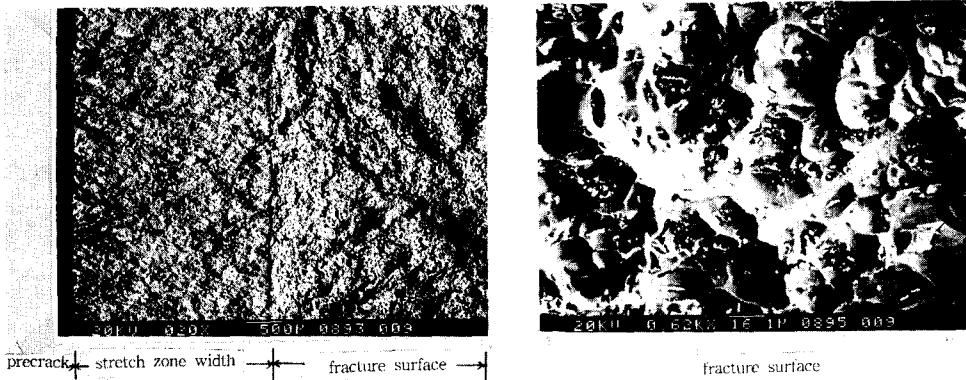


Fig. 22 Aspect of fracture surface (Mode I + II + III)

## 6. 결 론

모드 I 과 모드 II, 모드 III가 동시에 작용하는 혼합모드 하중하에서 재료의 탄소성 파괴인성을 평가하기 위하여 혼합모드가 만들어지는 부하장치를 고안하여 제작하였으며, 여러가지 하중조건에서 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 굽힘모멘트 M, 전단력 F, 비틀림모멘트 T가 작용하는 모드 I-II-III의 혼합모드조건에서 2차원 광학 PSD를 사용하여 균열개구각, 균열전단변위 U, 균열비틀림각  $\alpha$ 를 실시간에 따라 각각 측정하고 J적분을 계산함으로써 연성재료의 탄소성 파괴인성을 평가할 수가 있다.

(2) 균열개시조건은 순수모드 I (MMT-1)과 모드 I + II (MMT-2)보다 모드 I + II + III (MMT-3)가 가장 작은  $J_c$ 값을 갖는다. 특히 MMT-2보다 MMT-3는  $J_c$ 값이 급격히 감소한다.

(3) 파면의 양상은 순수모드 I인 3PB-1(또는 MMT-1)에서 등축딴돌(equiaxed dimple)현상을 보이며, 모드 I + II + III (MMT-3)의 파면은 딴돌의 크기가 3PB-1에 비하여 작으며 미소공공의 생성된 부분이 많이 보인다.

(4) 균열진전속도는 모드 I이 지배적인 3PB-1 또는 MMT-1보다 혼합모드(모드 I + 모드 II + 모드 III)인 MMT-3가 크게 느리다.

(5) 균열진전저항은 모드 I + 모드 II인 3PB-2 또는 MMT-2가 가장 큰 값을 갖으며 모드 I + II + III인 MMT-3가 가장 작은 값을 갖는다.

## 참고문헌

- (1) Keiichiro, Tohgo. and Hitoshi, Ishii., 1992, "Elastic-Plastic Fracture Toughness Test under Mixed Mode I-II Loading," *Engineering Fracture Mechanic*, Vol. 41 No. 4, pp. 529~540.

- (2) Eradogan, F. and Sih, G. C., 1963, "On the Crack Extention in Plates under Plane Loading and Transverse Shear," *Trans ASME, Ser. D85*, pp. 519~527.
- (3) Williams, J. G and Ewing, P. D., 1972, "Fracture under Complex Stress-the Angled Crack Problem," *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 8, No. 4, pp. 441~446.
- (4) Sih, G. C., 1974, "Strain Engineering Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problem," *International Journal Fracture*. 10, pp. 305~321.
- (5) Shih, C. F., 1974, "Small-Scale Yielding Analysis of Mixed Mode Plane- Strain Crack Problem," *ASTM STP* 560, pp. 187~210.
- (6) Gurson, A. L., 1977, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth," *Trans. ASME, Ser. A99*, pp. 2~15.
- (7) Maiti, S. K. and Smith, R. A., 1983. "Theoretical and Experimental Studies on the Extension of Cracks Subjected to Concentrated Loading near their Faces to Compare the Criteria for Mixed Mode Brittle Fracture". *J. Mech. Phys. Solids*. Vol. 31, No. 5, pp. 389~403.
- (8) Atkinson, C., 1982, "Combined Mode Fracture via the Cracked Brazilian Disk Test," *International Journal of Fracture*. Vol. 18, No. 4 pp. 279~291.
- (9) Tohgo, K., Otsuka, A., Gao, W. and Wojima, Y., 1989, "A Simple Method of Estimating the J-Integral for a Mixed Mode Single-Edge Cracked Specimen Bending Moment and Shearing Force," *JSME Trans. Ser. A* 55, pp. 2307~2315.
- (10) Cotterell, B., Lee, E. and Mai, Y. W., 1982, "Mixed Mode Plane Stress Ductile Fracture," *International. J. Fracture*, 20, pp. 243~250.
- (11) Kishimoto, K., Aoki, S., Yoshida, T., Sakata, M. and Richard, H. A., 1990, "Elastic-Plastic Fracture Behavior of an Aluminum Alloy under Mixed Mode Loading," *J. Mech. Phys. Solids*, 38, pp. 195~213.
- (12) George, G. and Laurence, M., 1983, "Use of J-Integral Estimation Techniques to Determine Critical Fracture Toughness in Ductile Steels," *ASTM STP* 803, pp. 1-458~1-479.
- (13) Begley, J. A. and Lands, J. D., 1972, "The J-Integral as a Fracture Crterion.," *ASTM STP* 514, pp. 1~20.
- (14) Aoki, S. Kishimoto, K., Yoshida, T. and Sakata, M., 1987, "A Finite Element Study of the near Crack Tip Deformation of a Ductile Material under Mixed Mode Loading," *J. Mech. Phys. Solids*. Vol. 35, No. 4, pp. 431~455.
- (15) Chell, G. G. and Girvan, E., 1978, "An Experimental Technique for Fast Fracture Testing in Mixed Mode," *International Journal of Fracture* 14. R81~R84.
- (16) Nikos, Tsamgarakis., 1984, "The Dependence of Mode III Fracture Initiation Toughness on Strength and Microstructure," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, No. 5, pp. 903~909.
- (17) 東郷敬一郎, 大塚昭夫, 高紅維, 1990, "混合モード荷重を受けるき裂からの延成き裂発生挙動" 日本機械學會論文集, A編 第39巻 第443號, pp. 1089~1094.
- (18) 坂田勝, 青水繁, 岸本喜久雄, 吉田勉, 深野博司, 1987, "混合モード荷重における延性き裂先端の破壊挙動について" 日本機械學會論文集, A編, 第53巻 第485號, pp. 116~121
- (19) 東郷敬一郎, 大塚昭夫, 野嶋泰資., 1990, "大規模降伏. 混合モード条件下にあるき裂先端近傍の應力. 變形率場", 日本機械學會論文集 A編, 第56巻 第523號, pp. 559~567
- (20) McClintock, F. A., 1986. "A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 363~371.
- (21) 배성일, 한민구, 1993, *파괴역학실험법*, 원창출판사, pp. 73~106.
- (22) Anne, C, and Roulin-Moloney, 1989, *Fractography*, pp. 304~350.