혼합모드 하중하에서 제하 컴플라이언스법에 의한 파괴인성 측정

심재룡* · 이영숙** · 김도형*** · 범현규**** · 강기주†

(2001년 4월 13일 접수, 2001년 10월 29일 심사완료)

Measurement of Fracture Toughness J_C Under Mixed Mode Loading Using Unloading Compliance Method

Jae-Ryong Shim, Young-Sook Lee, Do-Hyung Kim, Hyeon-Gyu Beom and Ki-Ju Kang

Key Words: Fracture Toughness(파괴인성), Unloading Compliance Method(제하 컴플라이언스 방법), Mixed Mode Fracture(혼합모드 파괴)

Abstract

Experimental procedure to measure fracture toughness (J_C) under mixed mode loading using CTS(Compact Tension-Shear) specimens is described. It's loading angle ranges from 0° to 45° with interval of 15°. The general outline of experimental procedure is similar to that of ASTM E813-89 for mode I fracture. Equations for determining J-integral is quoted from the authors' previous works. The relation between unloading compliance and physical crack size was calibrated. As an example, fracture toughness of aluminum alloy 2024P-T361 was measured and some reasonable results of J_C with various loading angles were obtained.

1. 서 론

균열이 존재하는 물체에 작용하는 하중은 균열면에 대한 상대적인 위치에 따라 모드 I, II, III 세 가지로 분류되며 각각 열림모드(opening mode), 전단모드(shearing mode) 및 찢김모드(tearing mode)라고 불린다. 균열길이에 비해 충분히 큰 등방성 균질재료의 경우 열림모드에서 균열이 가장 잘 진전하며 균열의 진전도 궁극적으로 순수 모드 I이 되는 방향으로 나아가려는 경향이 있어 파괴역학에 대한 연구는 주로 모드 I에 집중되어 왔다.

최근 미소균열이 많은 경우 혼합모드로 균열이 진전한다는 것이 밝혀지고 복합재료에서 하중이 모드 I으로 작용해도 혼합모드 상태가 되며 압력용기 및 비행기의 균열은 인위적으로 혼합모드상태로 균열이 진전되도록 설계되고 있는데 이와 같은 이유로 혼합모드에 대한 파괴 역학적 연구가 활발히 진행되는 추세이다.

혼합모드 파괴에 대한 연구는 과거의 선형 탄성파괴역학(LEFM)에 의한 해석적인 연구결과를 바탕으로 파괴인성(K_C or G_C)의 측정,[1~3] 균열진전방향의 예측[4~6] 등의 측면에서 이루어져 왔다. 또한 탄소성 파괴의 경우 Shih[7]가 혼합모드의 경우에도 모드 I의 HRR응력장과 유사한 응력분포가 이루어짐을 입증한 바 있다.

모드 I의 탄성 및 탄소성 파괴인성으로서 K_{IC}, J_{IC}가 규정되고 그 측정법이 오랫동안 다듬어져

* 군산 직업훈련원
** 인천 직업훈련원
*** 전남대학교 대학원
**** 회원, 전남대학교 자동차 공학부
† 책임저자, 회원, 전남대학교 자동차 공학부
E-mail : kjkang@chonnam.ac.kr
TEL : (062)530-1668 FAX : (062)530-1689

산업표준[8,9]으로 자리잡은 반면 혼합모드에 대한 파괴인성의 측정법은 그 필요성이 최근 들어서야 제기된 탓에 아직까지 그 표준이 제정되지 않았다.

홍기주, 강기주[10]는 혼합모드 파괴실험을 위하여 Richard 와 Benitz[11]가 제안한 바 있는 CTS(Compact Tension-Shear)시험편 형상을 대상으로 적절한 그립을 설계하고 J-적분을 실험적으로 결정하는 방법을 제시한 바 있다.

파괴인성을 측정하기 위해서는 균열길이에 따른 J-적분 데이터가 필요하여 모드 I에서는 J_{IC}측정시 균열 길이를 구하기 위한 방법으로 한 개의 시험편으로 가능한 제하 탄성 컴프라이언스법이 있다.[9] 혼합모드 파괴인성 측정에 이 방법을 응용하기 위해서는 먼저 정확하고 효율적인 컴프라이언스-균열길이 관계의 확보가 매우 중요하다.

본 연구에서는 Al 2024P-T361을 대상으로 홍기주, 강기주[10]가 제안한 바 있는 CTS시험편 및 실험장치(grip)를 이용하여 하중각(0° , 15° , 30° , 45°)을 변화시키면서 컴프라이언스-균열길이 관계를 도출하고 그 결과를 바탕으로 혼합모드 파괴인성(J_C)을 측정하였다.

2. 컴플라이언스와 균열길이 관계

J_C측정시 균열진전량은 컴플라이언스의 변화로부터 결정된다. 기존의 컴플라이언스와 균열길이 관계식을 소개하면 ASTM[9]에서는 CT 시험편에서 컴플라이언스 C_i와 균열길이 a_i의 관계를 다음과 같은 식으로 나타내고 있다.

$$\frac{a_i}{w} = 1.000196 - 4.06319U_{LL} + 11.242U_{LL}^2 - 106.043U_{LL}^3 + 464.335U_{LL}^4 - 650.677U_{LL}^5$$

$$U_{LL} = \frac{1}{[B_e E C_i]^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (1)$$

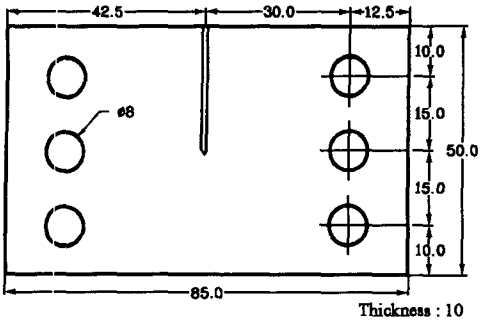
여기서 C_i는 핀 바로 아래 부분에 클립게이지를 설치하여 측정된 하중선-변위에 대응하는 컴플라이언스, B_e는 측면홈(side groove)의 존재에 의한 실두께 B_N을 감안하여 다음과 같이 정의되는 시험편 유효두께 $B_e=B-(B-B_N)^2/B$이다. E는 재료의 탄성계수, W는 시험편의 가로폭(width)이다.

본 연구에서는 먼저 혼합모드 하중을 받는 CTS시험편에 대하여 위와 같은 균열길이와 컴플라이언스의 관계식을 구하였다.

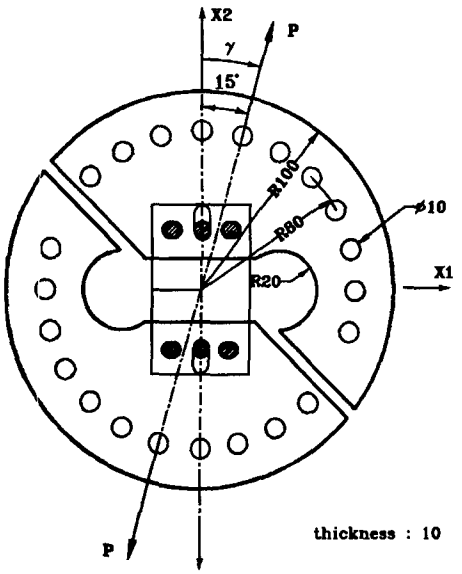
3. 시험편 제작 및 실험방법

3.1 시험편 제작 및 실험장치

파괴인성 J_{IC}의 측정에 관한 ASTM 표준[9,12]에는 실험장치, 방법뿐만 아니라 시험편 치수에 대해서도 규정되어 있다. 균열 선단의 소성역 크기가 균열길이나, 판 두께에 비하여 매우 작은 상태, 즉 소규모 항복조건을 만족하기 위한 시험편의 여러 크기 등에 상세한 규정이 되어있다.



(a)



(b)

Fig. 1 Specimen and grip (unit: mm)

Table 1 Mechanical properties

Young's modulus E(GPa)	55
0.2% Yield strength σ_0(MPa)	255
Tensile strength σ_u(MPa)	310
Poisson's ratio	0.33

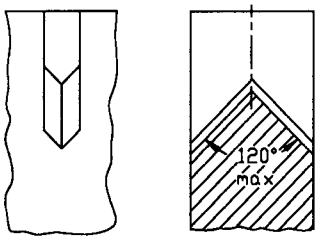


Fig. 2 Configuration of the notch

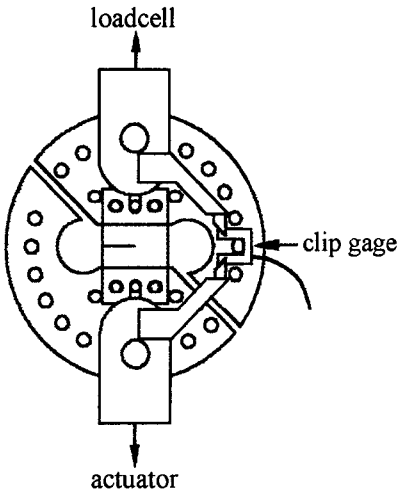


Fig. 3 The shape of grip with clip gage

혼합모드 작용하의 파괴 인성을 측정하기 위하여 지금까지 여러 종류의 시험 방법이 제안되었는데, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 시험편의 형상이 단순하고, 크기가 비교적 작으며 모드혼합도를 모드 I에서 모드 II까지 자유롭게 조절할 수 있는 CTS시험편과 하중장치를 사용하였다.

이 시험편과 장치는 홍기주, 강기주 논문[10]에서 채택한 것과 동일한 것으로 시험편 재질은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 Al 합금 2024P-T361이다. 기계적 물성은 Table 1과 같다.

시험편 제작은 다음과 같은 방법으로 이루어졌다. 먼저, 두께 10mm 판재에 압연방향과 균열의 진전방향이 직각이 되도록 (L-T)시험편을 채취하였다. 소재의 열변형을 최소화하고, 정밀도를 높이기 위하여, 와이어 컷팅으로 절단하였으며 치수 허용차 ±0.02mm 이내로 가공되었다.

피로예비 시험편에는 균열진전이 두께방향으로 균일하게 이루어지도록 Fig. 2와 같은 쉐브론(chevron)형 노치를 이용하였는데 노치의 각은 120° 로서 와이어 컷팅으로 가공하였다

시험편의 핀홀의 구멍은 (ϕ8mm)기준면을 설정하고 지그를 제작하여 머시닝 센타에서 드릴 및 리이머 가공으로 이루어 졌으며 치수 허용차는 ±0.02mm 이내로 가공되었다.

피로예비균열을 발생시킨 다음에 균열의 진전방향을 제어하고 평면 변형률(plane strain)응력 상태를 갖도록 하기 위하여 시험편 양측면에 측면 홈(side groove)을 가공하였다. 엔드밀을 사용하여 각도 90° , 깊이 1mm로 양쪽 노치의 끝에서 중심선을 따라 가공하였다.

노치 없는 시험편은 소재의 외곽 형상만을 와이어 컷팅으로 절단하고, 시험편 양측면에 측면 홈(side groove)을 가공하여 제작하였다.

시험편 변위를 측정하기 위하여 혼합모드 그립의 상·하에 결합된 "ㄷ"형 핀 연결쇠에 다리를 부착하여 다리 끝에 나이프에지를 달고 클립게이지를 부착하였다.(Fig. 3) 따라서 하중 작용각에 관계없이 하중선변위(load line displacement)를 측정할 수 있었다.

그립은 Fig. 1에서와 같이 하중 작용각 γ를 -45° ~+105° 의 범위에서 15° 씩 일정하게 변화시킬 수 있도록 되어 있다. 피로균열 진전 및 파괴실험은 SATEC사의 CATS(Computer Aided Testing System)전기유압식 재료시험기로 수행되었다.

3.2 실험방법 및 절차

3.2.1 컴플라이언스와 균열길이 관계

혼합모드 하중하에서 컴플라이언스와 균열길이의 관계를 구하기 위한 실험 방법 및 절차는 Fig. 4와 같다.

먼저 모드 I에서 최대하중 550kgf, 하중비 0.1, 20Hz 정형파의 반복하중을 가하여 a/W=0.5~0.6 범위에서 7가지의 서로 다른 길이의 예비균열을

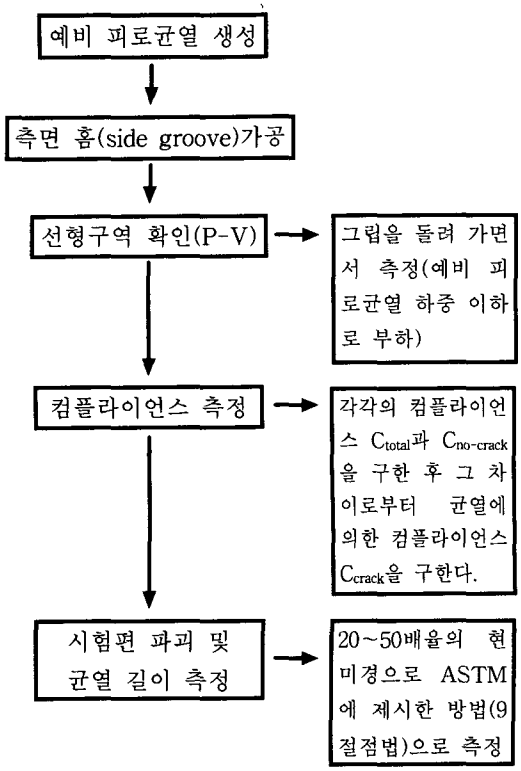


Fig. 4 Process of test method

가진 시험편을 만들었다. 그리고 각각의 시험편에 0° , 15° , 30° , 45° 의 4가지 각으로 하중을 가하고 제하(Unloading)시 P-V선도로부터 컴플라이언스를 기록하였다.

다시 말하자면 하나의 시험편에 하중 각 0° 에서 특정길이의 예비균열을 발생시킨 후 하중 각을 0° 에서 45° 까지 15° 간격으로 변화시키면서 부하와 제하를 거듭하여 각각의 하중 각에 대한 하중-변위데이터를 구한다. 이 때 최대하중은 예비균열작성시의 피로 하중의 최대값과 같게 하여 소성변형의 영향이 발생하지 않도록 하였다. 컴플라이언스 측정이 끝난 시험편은 액체질소에 담구어 급냉 후 단순 인장하여 파단시키고 파면을 관찰하여 실제 예비균열길이를 측정하였다. 20~50배율의 현미경으로 파단면상의 예비균열 선단을 ASTM[12]에서 제시한 9점법(9-points method)으로 측정하였다. 예비균열 단면과 인장하여 파단시킨 면과 구별하는 방법으로 철합금의 경우 열착색법이나 염료침투법을 사용할 수 있으나 ASTM에서는 연성재료인 경우 염료침투법을 사용해서는 안된다고 규정하고 있다. 본 실험재료

Table 2 Constant da for various loading angles

외부하중각(γ)	0°	15°	30°	45°
d_a	2.854	2.938	3.003	3.042

인 Al 2024P-T361의 경우에는 육안으로 보아도 피로균열 진전에 의하여 형성된 파단면과 인장하여 파단시킨 면은 명백하게 구별될 수 있었다.

이때 측정된 변위 데이터에는 핀과 그립의 유격이나 마찰, 자체변형 및 불완전한 조립등으로 인한 영향이 포함되어 있다. 순수하게 균열에 의한 하중-변위($P\text{-}V_{crack}$) 데이터를 얻기 위하여 노치가 없는 시험편을 장착하여 위와 같은 방법으로 하중-변위($P\text{-}V_{no\text{-}crack}$)를 구한 후 앞서 구한$P\text{-}V_{total}$를 보정하였다. 즉, 제하(Unloading)시 얻어진 $P\text{-}V_{total}$과 $P\text{-}V_{no\text{-}crack}$의 데이터의 선형구역을 각각 최소자승법(least square fitting)으로 선형으로 근사하여 기울기의 역수인 컴플라이언스 C_{total}과 $C_{no\text{-}crack}$을 구한 후 두 값의 차이로부터 균열에 의한 컴플라이언스 C_{crack}을 구하였다.

3.2.2 파괴인성 JC 측정실험

예비균열과 측면홈 가공이 끝난 시험편을 대상으로 J_C측정실험을 하였다. 실험과정은 모드 I에 대한 ASTM규정 E813-89와 거의 동일하며 파괴진전에 따른 균열길이변화는 앞서 구해진 제하 컴플라이언스-균열길이 관계식으로부터 결정되었다. J-적분은 홍기주, 강기주[10]의 방법으로 계산되었다.

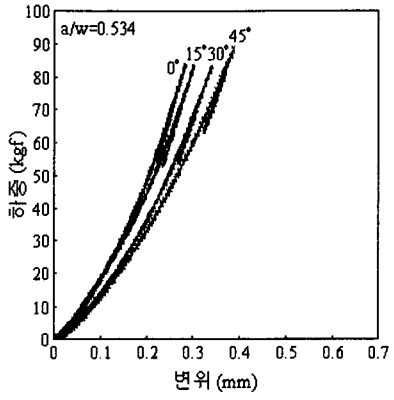
$$J = G + \eta_{pl}\frac{A_{pl}}{B(W-a)} \tag{2}$$

여기서 η_{pl}은 모드혼합도(즉 하중각 γ)와 균열길이비 a/W의 함수이다.

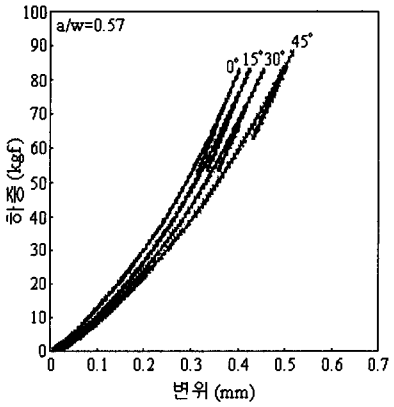
둔화선(blunting line)은 김동학, 강기주[13]가 실재 시험편의 형상에 대해 FEA를 수행하여 구했던 결과를 이용하였다. 즉, 둔화선은 식 (3)과 같이 표현되며 상수 d_a는 Table 2와 같다.

$$\Delta a = \frac{1}{d_a}\frac{J}{\sigma_{ys}} \tag{3}$$

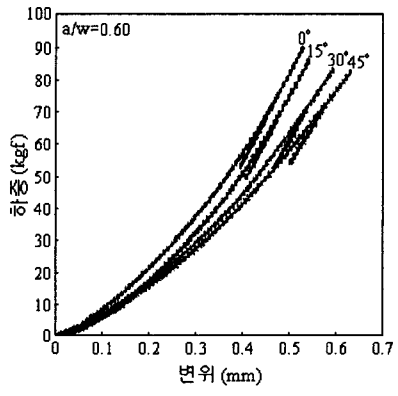
여기서 상수d_a는 하중각에 대하여 상당히 둔감하여 d_a=2.854~3.042의 좁은 범위에 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 d_a=3으로 일정한 값을 취하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Load-displacement(V_{total}) curves for each loading angle and crack size with crack (a) a/W=0.534, (b) a/W=0.57, (c) a/W=0.6

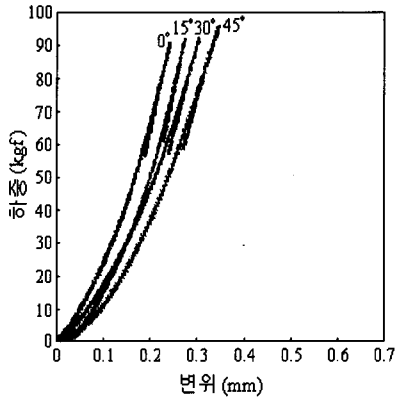


Fig. 6 Load-displacement($V_{no\text{-}crack}$) curves under various loading angle for specimen without a crack

4. 실험결과

4.1 하중 작용각에 따른 P-V선도

Fig. 5는 a/W가 각각 0.534, 0.57, 0.60인 시험편의 제하시 측정된 하중-변위($P\text{-}V_{total}$)선도를 작용하중각 별로 나타낸 것이다. 균열길이와 하중각이 증가함에 따라 곡선 기울기가 감소함을 보인다.

Fig. 6은 균열이나 노치가 전혀 없는 시험편의 제하시 측정한 하중-변위선도($P\text{-}V_{no\text{-}crack}$)이다. Fig. 5의 $P\text{-}V_{total}$데이터와 비교해보면 같은 하중에 대하여 $V_{no\text{-}crack}$이 V_{total}의 50~90%을 차지함을 알 수 있다. 이것은 변위를 시험편이 아닌 상하의 핀 조인트 부분에 부착된 클립게이지로부터 측정하기 때문에 시험편 뿐 아니라 그립 및 접촉부의 변형에 의한 것까지 포함되기 때문이다.

4.2 하중 작용각에 따른 컴플라이언스와 균열길이 관계

Fig. 5와 Fig. 6의 제하시 하중-변위 데이터를 각각 선형근사(least square fitting)하여 각각의 컴플라이언스 C_{total}과 $C_{no\text{-}crack}$을 구한 후 그 차이로부터 균열에 의한 컴플라이언스 C_{crack}을 구하였다. Fig. 7은 하중 작용각 별로 컴플라이언스와 균열길이의 관계를 나타낸 그림이다. 여기서 U_{LL}은 컴플라이언스(C_{crack})를 식 (1)과 같이 무차원화한 것이다. 하중각이 15° 만 되어도 컴플라이언스-균열길이의 관계가 모드 I인 경우와 크게

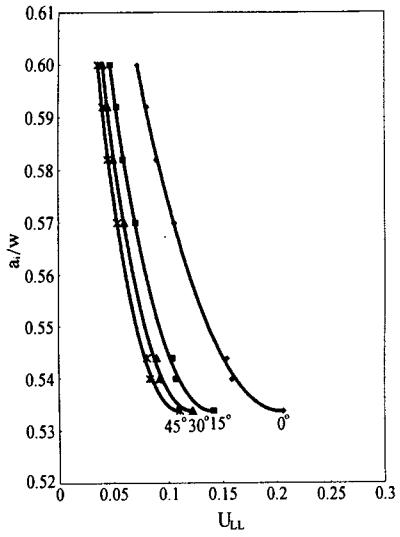


Fig. 7 The relation between compliance and crack length for various loading angles

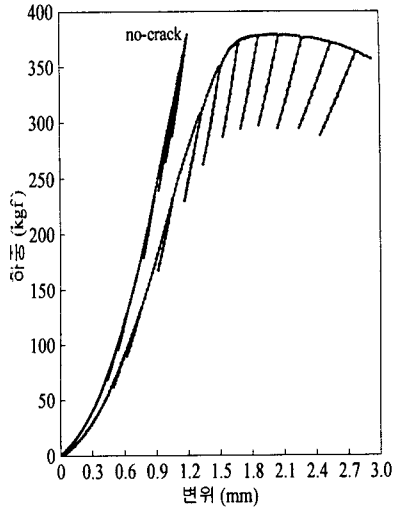


Fig. 8 Load-displacement(P-V) curve for a/W=0.544 and mode I

달라짐을 알 수 있다. 하중 작용각별 컴플라이언스와 균열길이를 도표로 나타낸 다음, 최소자승법으로 근사(fitting)결과 다음과 같은 다항식으로 표시할 수 있었다.

$$
\begin{aligned}
0\text{도} &: a/W = -1.6995U_{LL}^3 + 4.6667U_{LL}^2 - 1.6863U_{LL} + 0.6982 \\
15\text{도} &: a/W = -13.409U_{LL}^3 + 12.056U_{LL}^2 - 2.5912U_{LL} + 0.6972 \\
30\text{도} &: a/W = -24.409U_{LL}^3 + 17.004U_{LL}^2 - 3.0462U_{LL} + 0.6968 \\
45\text{도} &: a/W = -35.809U_{LL}^3 + 21.372U_{LL}^2 - 3.3961U_{LL} + 0.6966
\end{aligned} \tag{4}
$$

4.3 하중 작용각에 따른 파괴인성 JC

Fig. 8은 J_C측정을 위한 파괴실험에서 구해진 하중-변위선도(P-V curve)의 한 예로서 외부하중각이 0° 이고 초기 균열길이가 $a_i/W=0.544$인 경우이다.

Fig. 9는 여러 하중작용각에 따른 J-⊿a선도이다. 여기에서 0.15㎜ 옵셋(offset)된 둔화선 이상의 데이터들을 최소자승법으로 근사(fitting)하여 $J = C_1(\Delta a)^{C_2}$ 형태의 회귀선(regression line)으로 나타냈다. 3.2.2절에서 언급한 바와 같이 균열진전 초기의 데이터들은 하중작용각에 관계없이 이론적인 둔화선(blunting line)과 비슷한 양상을 보인다.

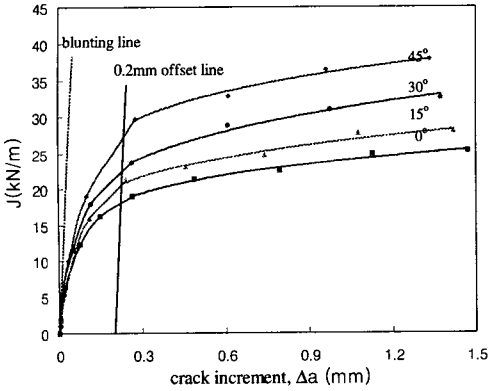


Fig. 9 J-⊿a curves for various loading angles

Table 3 Jc values for various loading angle

Loading angle(γ)	0°	15°	30°	45°
J_C[kN/m]	18.08	20.50	22.65	27.33

0.2㎜ 옵셋(offset)된 둔화선과 J-⊿a선과의 교점을 J_C로 결정하여 구한 값은 Table 3과 같다.

위의 결과를 보면 외부 하중 각이 커질수록 J_C 값이 커진다. 이는 균열의 진전 방향이 제한되어 있는 이종재료 계면에서 파괴인성-모드혼합도의 관계와 유사하다.[14]

혼합모드 하중하에서는 균열이 진전함에 따라 측면홈을 벗어나는 경향이 관측되었다. Fig. 9에

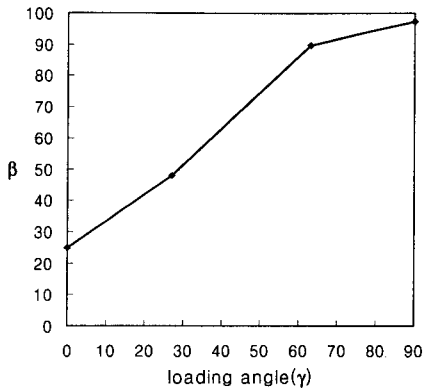


Fig. 10 Variation of constant β with loading angles

서는 최대 하중각인 γ=45° 에서 균열이 측면홈을 따라 진전된 최대 한계인 Δa=1.5㎜이내의 데이터만을 나타내었다.

제하컴플라이언스법(unloading compliance method)에 의해 예측된 균열길이의 타당성에 대한 조사로 마지막 제하시 예측된 균열길이와 시험편을 파괴시켜 9점법(9-points method)[12]으로 측정된 균열진전량 Δa_p를 비교하였다. 그 오차는 최대 0.12mm 로서 ASTM에서 규정한 허용오차 0.15 Δa_p 보다 작았다. 이는 앞에서 구한 혼합모드 하중하에서 균열길이대 컴플라이언스 관계식이 타당함을 의미한다.[9]

본 연구에서 측정된 J_C데이터가 평면변형률상태에서의 파괴인성으로서의 유효한지를 입증해야만 한다. ASTM표준에서는 모드 I파괴에 대해서 다음과 같은 제한조건을 두고 있다.

$$B,\ b > 25\ \frac{J}{\sigma_{ys}} \qquad (5)$$

홍기주, 강기주[10]는 혼합모드에 대하여 위와 유사한 제한 조건을 제시한 바 있다. 즉,

$$B,\ b > \beta\frac{J}{\sigma_{ys}} \qquad (6)$$

여기서 β는 γ의 함수로서 Fig. 10에 표시 되어 있다. γ가 15° , 30° , 45° 인 경우 β는 각각 37, 51, 70이다.

앞에서 구한 J_C값들을 식 (6)의 우변에 대입한 결과 각각 2.975, 4.53, 7.502㎜로서 식 (6)의 제한조건을 만족한다. 이것은 측정된 J_C값이 평면변형률상태에서의 파괴인성으로서 유효하다는 것을 의미한다.

모드 I 파괴에 관한 ASTM표준 측정법은 3점 굽힘시험편이나 CT시험편에 대하여 초기균열길이 대 폭의비가 0.5≤a/W≤0.7 인 범위에 적용된다. 본 연구에서 제안된 제하컴플라이언스법(unloading compliance method)에 의한 균열길이 예측식인 식 (4)는 균열길이/폭 비 0.5≤a/W≤0.6 인 좁은 범위에 대해서만 입증되었다. 또한 파괴인성 J_C값은 0.54≤a/W≤0.56의 범위에서만 구해졌다. 본 연구에서 제안된 측정법을 보다 넓은 범위의 a/W적용에 가능하도록 하기 위한 추가 연구가 필요하다.

5. 결 론

CTS 시험편을 이용한 혼합모드 파괴인성 J_C 측정법을 제시하였다. 알루미늄합금 2024P-T361을 소재로 수행한 일련의 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제하탄성 컴플라이언스로부터 균열길이를 측정하는 과정 및 계산식을 완성하였다. 최종 파단 후 파면에서 관찰된 균열길이와 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

(2) 모드 I에 대한 ASTM 표준시험법과 유사한 과정을 거쳐 하중작용각에 따른 파괴인성 J_C의 변화를 측정하였다. J_C 는 하중작용각에 따라 증가하였다.

(3) 하중작용각 0° ≤ γ ≤45° 의 범위에서 측정된 모든 J_C값은 소규모항복조건을 만족하므로 평면변형율 파괴인성으로서 타당하다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 기계공학연구(과제번호 1998-018-E00074)지원에 의해서 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

(1) Mahajan, R. V. and Ravi-chandar, K., 1989, "An Experimental Investigation of Mixed Mode Fracture," *International Journal of Fracture*, Vol. 41, pp. 235~252.

(2) Yishu, Z., 1989, "Experimental Study on Mixed Mode Crack Propagation," *Engineering of Fracture*

Mechanics, Vol. 34, pp. 891～899.

(3) Davenport, J. C. and Smith, D. J., 1993, "A Study of Superimposed Fracture Modes I, II and III on PMMA," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, Vol. 16, pp. 1125～1133.

(4) Guo, Y. H. and Srivatsan, T. S. 1994, "Influence of Mixed Mode Loading Fatigue Crack Propagation," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 47, pp. 843～866.

(5) Budden, P. J. and Jone, M. R., 1991, "A Ductile Fracture Model in Mixed Modes 1 and 2," *Fatigue Fracture*, Vol. 14, pp. 469～482.

(6) Papadopoulos, G. A., 1987, "The Stationary Value of the Third Stress Invariant as a Local Fracture Parameter," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 34, pp. 643～652.

(7) Shih, C. F., 1974, "Small Scale Yielding Analysis of Mixed Mode Plane Strain Crack Problems," Fracture Analysis, ASTM STP 560, pp. 187～210.

(8) ASTM Standard E399-83, 1983, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials."

(9) ASTM Standard E813-89, 1989, "Standard Test Method for J_{IC} a Measure of Fracture Toughness."

(10) 홍기주, 강기주, 1996, "혼합모드 하중을 받는 CTS시험편에서 K_I, K_{II}와 J-적분의 측정방법," 대한기계학회논문집(A), Vol. 20, No. 11, pp. 3498～3506.

(11) Richard, H. A. and benitz, K., 1989, "A Loading device for the Criterion of Mixed Mode in fracture Mechanics," *International Journal of fracture*, Vol. 22, pp. R55～58.

(12) ASTM Standard E1820-96, 1996, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness"

(13) 김동학, 강기주, 1998, "혼합모드 하중에서의 둔화직선과 CTOD," 대한기계학회 재료 및 파괴분과 학술대회 논문집, pp. 81～86.

(14) J.W. Hutchinson, J. W. and Suo, Z., 1991, "Mixed Mode Cracking in Layered Materials," *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 29, pp. 63～191.