

<論 文>

5083-H115 알루미늄 합금의 혼합 모드 피로 균열성장 특성

옹장우* · 진근찬** · 이성근** · 김증배**

(1989년 1월 9일 접수)

Mixed-Mode Fatigue Crack Growth Behaviors in 5083-H115 Aluminum Alloy

Jang Woo Ong, Keun Chan Jin, Sung Geun Lee and Jong Bae Kim

Key Words : Mixed Mode Loading(혼합 모드 하중), Fracture Criteria(파괴조건), Fatigue (피로), Mixed Mode Specimen(혼합 모드 시험편), High Strength Aluminum Alloy(고강도 알루미늄 합금)

Abstract

For the mixed-mode crack problems the direction of crack growth, the crack path and the rational representation of fatigue crack growth rates should be studied to predict fatigue life and safety of structures. In this study, a round specimen which produce nearly identical effects in all loading directions is proposed to make an easy measurement of initial direction of crack growth. The mode I and mode II stress intensity factors of the specimen were calculated using finite element method, in which the square root singular stresses at the crack tip are modeled by means of four rectangular quarter-point eight-noded elements surrounding the crack tip. Experimental results for high strength aluminum alloy showed that the direction of mixed-mode crack growth agree well with maximum principal stress criterion as well as minimum strain energy density criterion, but not with maximum shear stress criterion. From data of fatigue crack growth rates using crack geometry projected on the line perpendicular to the loading direction it is easily established that mixed-mode fatigue crack growth in 5083-H115 aluminum alloy goes predominantly with mode I crack growth behaviors.

1. 서 론

구조물 또는 구조부재에 작용하는 응력상태는 많은 경우가 다축응력 상태로서, 파괴역학적 상황은 균열 열림형과 미끄럼형 또는 비틀림형 균열이 혼합된 상태이다.

이러한 상황은 경사진 균열, 노치부근에서의 균열, 용접이음부, 비틀림과 굽힘을 받는 봉이나 복

합재, 압력용기, 항공기, 지상운송차량 등 수없이 많은데, 이것은 구조물의 복잡한 기하학적 형상 또는 하중형태가 단축보다는 다축응력 상태로서 복잡한 양상을 띄고 있기 때문이다. 이와 같이 실제의 많은 상황은 혼합 모드 상태인데, 간단히 해를 얻기 위하여 모드 I으로 가정하거나 혼합 모드 파괴역학 개념을 적용하지 않음으로써 데이터의 부족을 보상 하다보면 불안전 설계 또는 과안전 설계를 유발할 수도 있다. 그러므로 구조물의 경제성 제고 및 신뢰성 확보를 위해서는 모드 I만이 아니라 혼합 모드 균열특성을 규명할 필요가 있다. 혼합 모드 균열 문제에는 초기균열 성장방향

*정회원, 충남대학교 공과대학 기계설계학과

**정회원, 대전기계창

및 파괴조건, 피로균열 진전특성에 관한 연구가 중요 내용이 된다.

혼합 모우드 파괴조건 및 균열성장 방향에 대한 연구로는 최대 원주응력 조건⁽¹⁾, 최소 변형률 에너지 밀도 조건^(2~5), 최대 에너지 해방률 조건^(6~8), J 적분에 의한 이론⁽⁹⁾, 최대 변형률 조건⁽¹⁰⁾ 등을 근거로 한 이론들이 발전되어 오고 있으며, 실험적 연구를 위한 많은 혼합 모우드 시험편들^(11~27)이 각각의 실험목적에 적합하도록 제안되어 사용되고 있는데 현재까지 규격화된 시험편은 없다. 한편 혼합 모우드 피로하중을 받을 때는 일반적으로 균열선단의 최대인장응력작용면에 가까운 방향으로 균열이 진전하여 K_I 가 급속히 0이 되는 것으로 알려져 있다^(22,28~30). 그러나 plexiglass에 대한 실험결과⁽³¹⁾는 K_{II}/K_I 가 1.12 이상일 때는 균열이 최대 전단응력 작용면으로 진전하며, 알루미늄 합금 2017-T3 및 7075-T6의 경우는 K_{II}/K_I 가 각각 1.6 이상일 때는 모우드 II에 의존하는 방향으로 진전하고 있음을 보고하고 있어⁽³²⁾ 혼합 모우드 균열진전특성은 작용하중의 형태와 재질 등에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 혼합 모우드 균열문제의 연구를 위하여 K_{II}/K_I 의 조절이 간편하고, 균열진전경로가 하중방향에 따른 균열전면의 자유표면의 영향을 균일하게 한 시험편(이하 RCM 또는 round compact mixed-mode 시험편이라 한다)을 고안하여 균열길이 및 하중작용 방향에 따른 K_I 및 K_{II} 를 수치해석한 다음 일반화 하였다. 또 고강도와 용접성이 요구되는 항공기부품, 압력용기, 지상운송차량 등에 사용되고 있는 5083-H115 알루미늄 합금에 대해 혼합 모우드 균열진전 방향 및 피로균열 진전특성을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 시험편

순수 모우드 I이 아닌 균열의 성장방향 또는 피로특성 연구를 위한 시험편으로는 Cruciform 시험편⁽¹¹⁾을 비롯하여 모우드 II 균열성장을 연구하기 위한 여러 종류의 시험편^(12~19)들이 개발되어 사용되고 있고, 혼합모우드 균열시험편으로서도 인장하중과 비틀림을 가하여 혼합모우드 응력상태를 얻는 튜브형 시험편^(20~22), 반원형 굽힘형 시험편⁽²³⁾, CT 시험편의 예비균열을 경사지게 진전한 경우⁽²⁴⁾, 하중작용방향의 변화를 용이하게 한 시험편^(25~27) 등

의 많은 시험편들이 사용되고 있다. 각 시험편들은 사용목적에 따라 특성이 있고 장단점을 가지고 있는데 현재까지 표준 CT시험편 등과 같이 규격화된 시험편은 없다.

일반적으로 혼합모우드 균열진전을 위한 시험편 및 실험장치는 우선 K_I 과 K_{II} 의 조절이 간편해야 하며 하나의 균열을 가짐으로써 균열진전특성을 분석하기가 용이하여야 한다. 또한 일반적인 1축용 피로시험기를 사용할 수 있는 것이 바람직하다.

이러한 점을 고려하여 Fig. 1에서와 같이 K_{II}/K_I

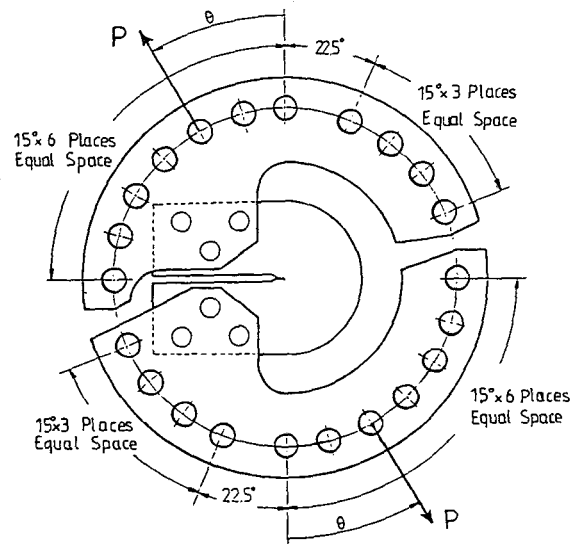


Fig. 1 Device for mixed-mode loading

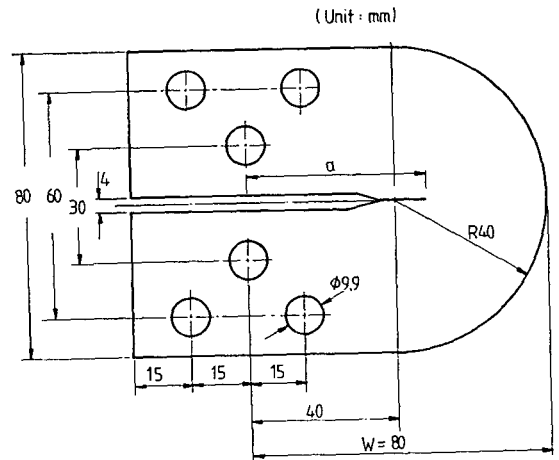


Fig. 2 A round compact mixed-mode (RCM) specimen

의 조절이 간편하고 균열성장각 및 진전경로가 하중작용방향에 따른 균열전면의 자유포면의 영향을 균일하게 받도록 한 RCM 시험편 및 시험치구를 고안하였다. 하중작용방향은 15도 간격으로 변화할 수 있고 하중작용선은 시험편의 반원의 중심을 지나도록 하였다. 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다. 시험재료는 5083-H115로서 기계적 성질 및 화학적 성분은 참고문헌 (33)에 나타나 있다. 피로 균열진전시험은 하중반복속도를 10Hz로 하고, 응력비는 전시험에 걸쳐 0.1로 하였다. 예비균열은 ASTM E647-83⁽³⁴⁾의 규정에 준하여 모드 I 피로하중하에서 노치선단으로부터 3mm 이상이 되도록 하였으며, 예비균열생성 후 하중작용방향 θ 를 변화시켜 혼합모우드 하중상태가 얻어지도록 하였다. 균열길이의 측정은 수평 및 수직으로 이동가능한 100배의 이동식 현미경을 사용하였다. Fig. 3은 시험장치를 보여주고 있다.

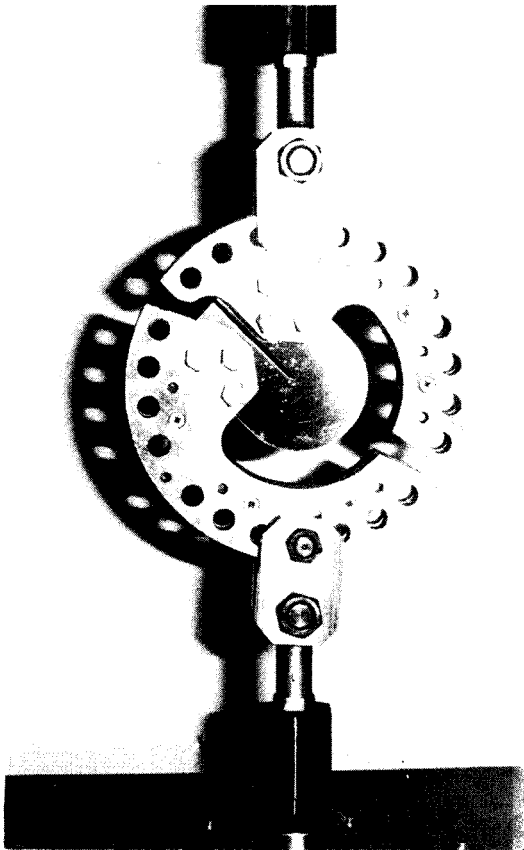


Fig. 3 Mixed-mode loading apparatus

3. 혼합모우드 하중을 받는 시험편의 응력 강도계수 해석

Fig. 1과 같이 균열면에 대한 수직선으로부터 θ 의 방향에서 하중 P 를 받을 때의 RCM 시험편에서의 모드 I, II의 응력강도계수 K_I , K_{II} 를 유한요소법을 사용하여 구하였다. 하중조건은 시험치구와 시험편의 결합부위가 균열선단으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 균열선단의 응력상태에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하여 Fig. 4와 같이 결합부위에 점하중이 작용하는 것으로 하였다.

Fig. 4에서 작용하는 하중 P_{1x} , P_{1y} , P_{2x} , P_{2y} , P_{3x} , P_{3y} 는 힘의 평형조건으로부터 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{1x} &= -\frac{P}{3} \sin \theta - 0.00833M \\ P_{1y} &= \frac{P}{3} \cos \theta - 0.025M \\ P_{2x} &= -\frac{P}{3} \sin \theta + 0.0167M \\ P_{2y} &= \frac{P}{3} \cos \theta \\ P_{3x} &= -\frac{P}{3} \sin \theta - 0.0083M \\ P_{3y} &= \frac{P}{3} \cos \theta + 0.025M \end{aligned} \quad (1)$$

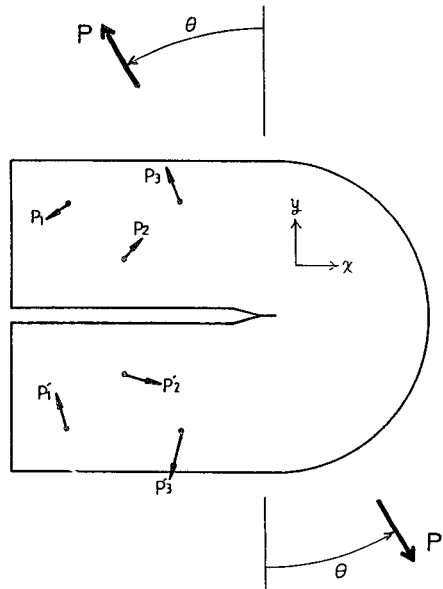


Fig. 4 Load conditions for finite element analysis

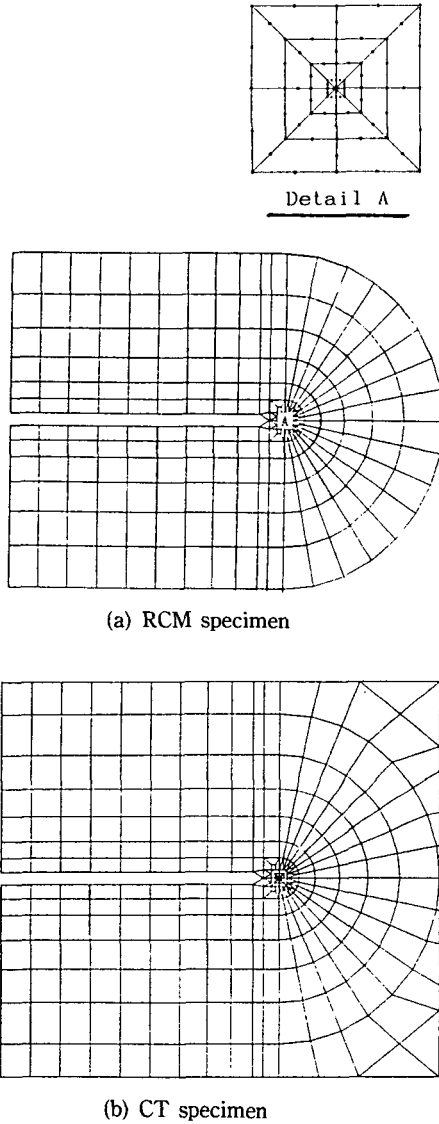


Fig. 5 Finite element mesh for the specimen

여기서 $M = P(40\cos\theta - 25\sin\theta)$ 이고, P'_{1x} , P'_{1y} , P'_{2x} , P'_{2y} , P'_{3x} , P'_{3y} 는 식 (1)에서 θ 대신 $-\theta$ 를 대입하여 구한 다음 y 방향 하중에 대해서는 -1 을 곱하여 얻을 수 있다.

Fig. 5(a)는 균열길이 a 가 40mm일 때의 요소분할 형태를 보여주고 있는데, 균열선단요소로는 중간 결점을 균열선단으로부터 변길이의 1/4에 이동시켜 균열선단에서 $1/\sqrt{r}$ 의 응력특성이 나타나도록 8결점의 등계수 2차 요소를 사용하였다. 해석결과에서 K_I , K_{II} 는 균열선단으로부터 가장 가까운 결점의

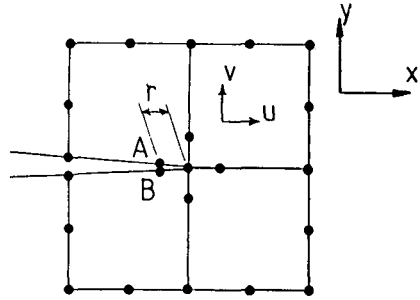


Fig. 6 8-node isoparametric crack tip elements

Table 1 Comparison of computed K_I in CT specimen with ref. (34)'s

a ($W=80$)	Computed $K_I/(P/B)$	Ref. (34) $K_I/(P/B)$	Difference %
40	1.066	1.080	-1.3
45	1.311	1.327	-1.2
50	1.663	1.690	-1.6
55	2.203	2.257	-2.4
60	3.178	3.226	-1.5
65	4.991	5.103	-2.2
70	9.368	9.648	-2.9

변위로부터 식 (2)과 같이 구하였다⁽³⁵⁾.

$$K_I = \frac{2G}{k+1} \sqrt{\frac{\pi}{2r}} (u_A - u_B)$$

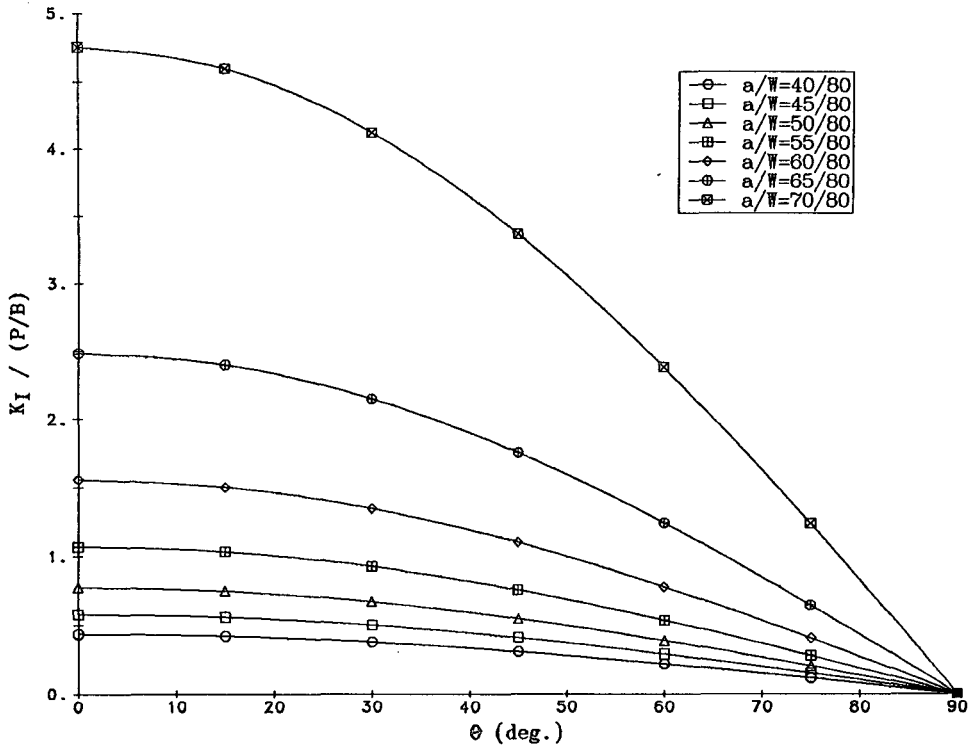
$$K_{II} = \frac{2G}{k+1} \sqrt{\frac{\pi}{2r}} (v_A - v_B)$$

여기서

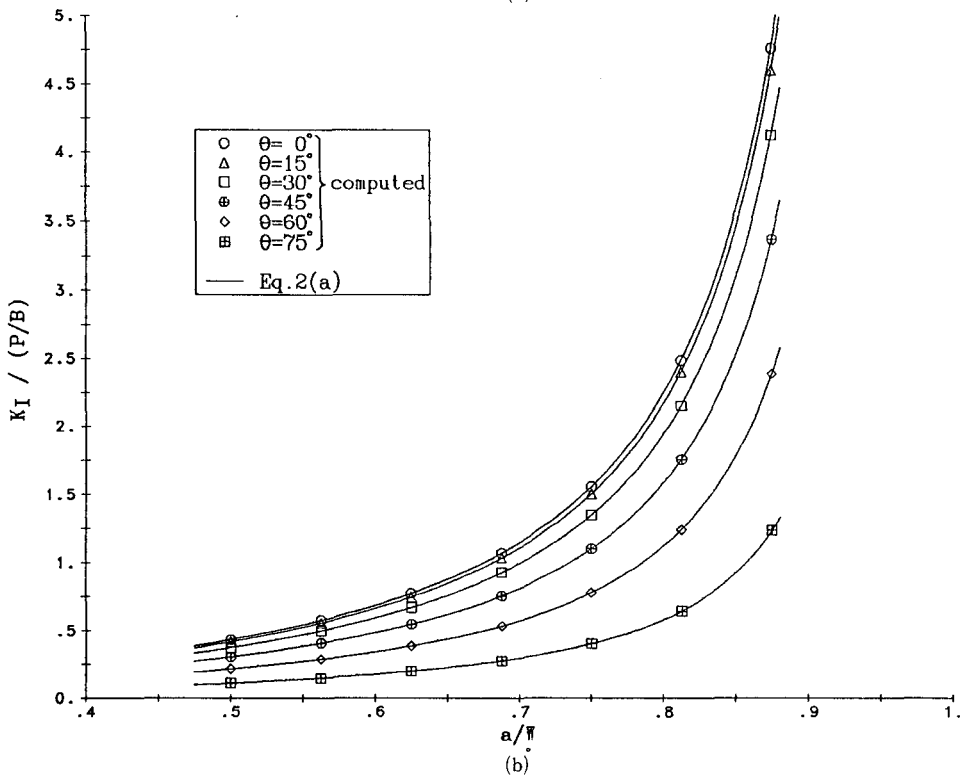
$$k = \begin{cases} (3-\nu)/(1+\nu) : \text{평면응력상태} \\ 3-4\nu : \text{평면변형율상태} \end{cases}$$

이고, G 는 횡탄성계수, ν 는 프와송의 비이며, u_A , u_B , v_A , v_B 는 Fig. 6에서 나타내고 있는 바와 같이 각각 결점 A와 B에서의 x 방향 및 y 방향의 변위이다.

Table 1은 RCM 시험편에서의 응력강도계수의 유한요소해석결과 및 이의 요소분할의 적합성 및 해석의 정확도를 검토하기 위하여, CT 시험편에 대한 기존의 해석결과⁽³⁴⁾와 Fig. 5(b)와 같이 요소분할 한 CT 시험편의 유한요소해석 결과를 비교한 것으로 3%의 오차범위 내에서 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. Table 2 및 Fig. 7, 8은 RCM 시험

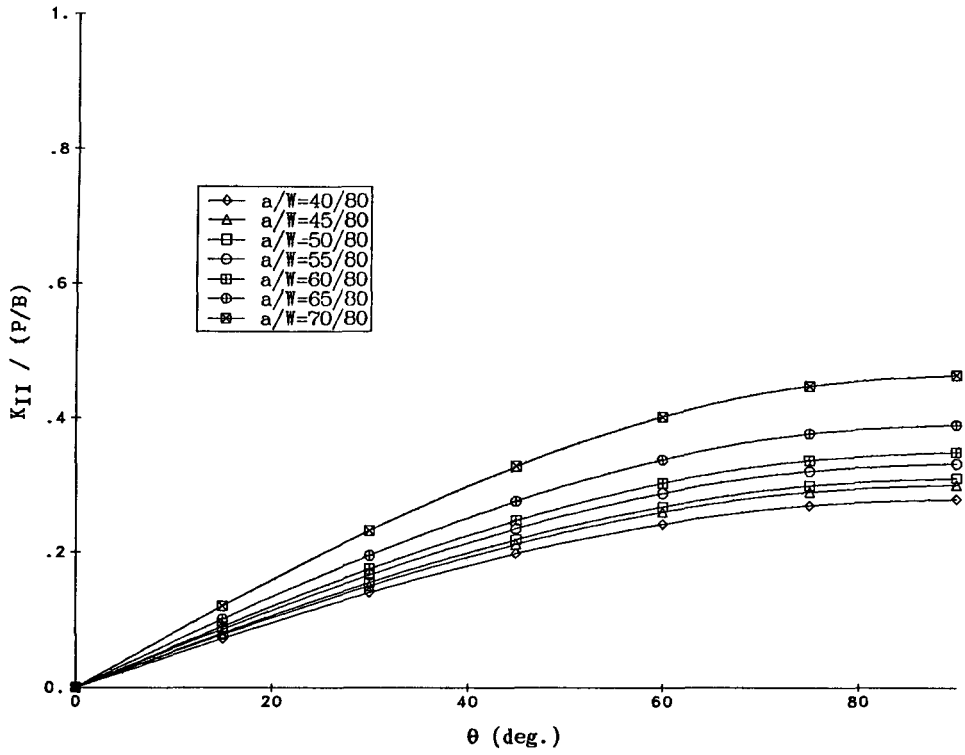


(a)

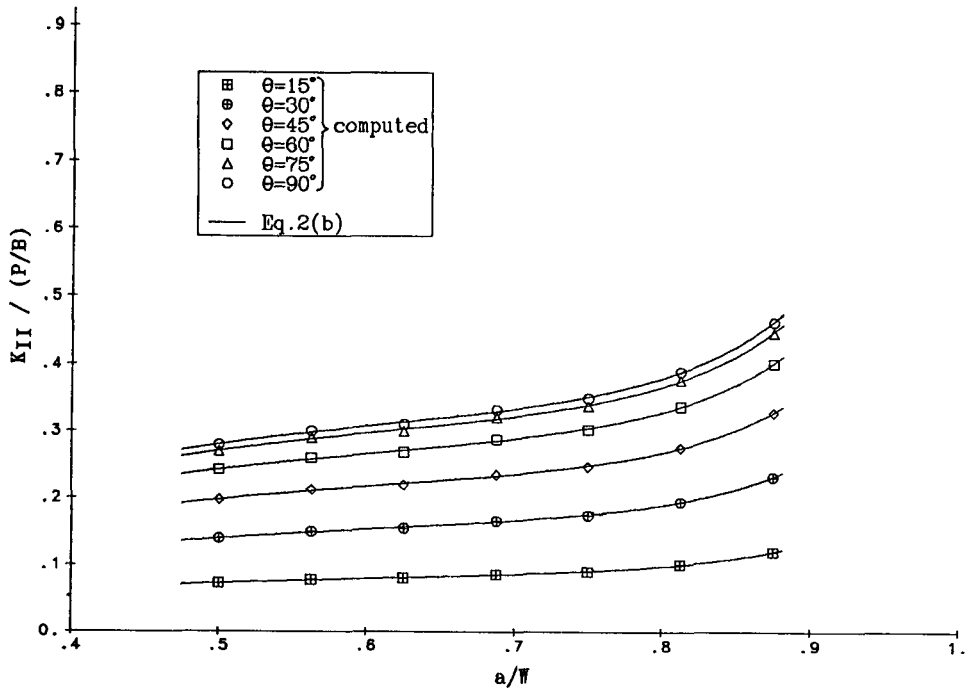


(b)

Fig. 7 K_I in RCM specimen



(a)



(b)

Fig. 8 K_{II} in RCM specimen

Table 2 K_I & K_{II} in RCM specimen

K		θ (deg.)	a (W=80)						
			0	15	30	45	60	75	90
$\frac{K_I}{P/B}$	40	0.433	0.418	0.375	0.306	0.216	0.112	0.0	
	45	0.577	0.557	0.499	0.408	0.288	0.149	0.0	
	50	0.772	0.746	0.669	0.546	0.386	0.200	0.0	
	55	1.068	1.031	0.925	0.755	0.534	0.276	0.0	
	60	1.556	1.503	1.347	1.100	0.778	0.403	0.0	
	65	2.485	2.400	2.151	1.757	1.242	0.643	0.0	
	70	4.756	4.595	4.122	3.368	2.384	1.237	0.0	
$\frac{K_{II}}{P/B}$	40	0.0	0.072	0.140	0.198	0.242	0.270	0.279	
	45	0.0	0.078	0.150	0.212	0.260	0.290	0.300	
	50	0.0	0.080	0.155	0.219	0.268	0.299	0.310	
	55	0.0	0.086	0.166	0.235	0.288	0.321	0.332	
	60	0.0	0.090	0.175	0.247	0.303	0.337	0.349	
	65	0.0	0.101	0.195	0.276	0.338	0.377	0.390	
	70	0.0	0.120	0.232	0.328	0.402	0.448	0.464	

편에서의 균열길이가 40~70mm인 경우에 대하여 하중작용방향을 15도 간격으로 하여 K_I , K_{II} 를 해석한 결과이다.

Table 2 및 Fig. 7(a) 및 Fig. 8(a)에서 살펴보면 K_I 및 K_{II} 는 하중작용방향 θ 에 대해 엄밀한 $\sin \theta$ 및 $\cos \theta$ 의 함수로 나타나는데, 이는 시험편과 시험치구의 결합위치가 균열선단의 응력상태에 영향을 미치지 않으며 하중이 균열선단에 대해 충분히 먼 거리에서 작용하는 것과 같은 효과가 있음을 보여주고 있다. 따라서 $\sin \theta$, $\cos \theta$ 를 포함하고 균열길이 a 에 대해서만 K_I , K_{II} 를 회귀하면 식 (3)과 같다.

$$K_I = \frac{P \cos \theta}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\xi)}{(1-\xi)^{1.5}} (-0.518 + 4.163\xi - 5.178\xi^2 + 2.23\xi^3)$$

$$K_{II} = \frac{P \sin \theta}{B\sqrt{W}} \frac{1}{a} (-1.566 + 15.88\xi - 24.06\xi^2 + 11.29\xi^3) \quad (3)$$

여기서 $\xi = a/W \geq 0.5$, W 는 시험편 폭, B 는 시험편 두께, θ 는 하중작용방향이며, P 는 작용하중의 크기이다. Fig. 7(b) 및 Fig. 8(b)는 균열길이에 대해 K_I , K_{II} 를 나타낸 것이다. 식 (3)로부터 혼합 모드 하중상태, 즉 K_{II}/K_I 은 하중작용방향 θ 와 균열길이 a 를 변화시켜 임의로 얻을 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 RCM 시험편에서의 모드 I 피로균열 진전

Fig. 9는 5083-H115 알루미늄 합금에 대해서

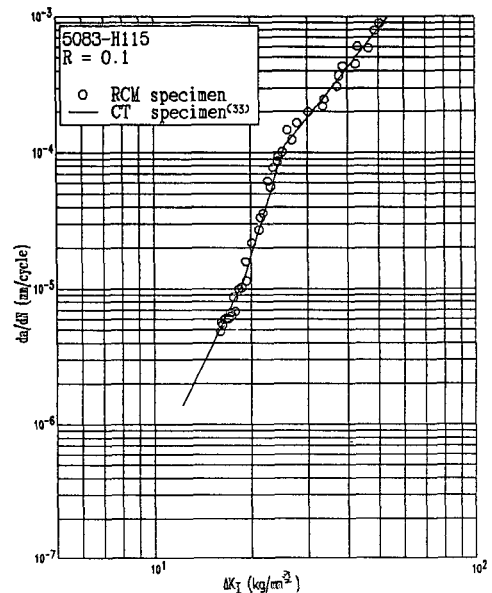


Fig. 9 Mode I fatigue crack growth rates in 5083-H115 aluminum alloy

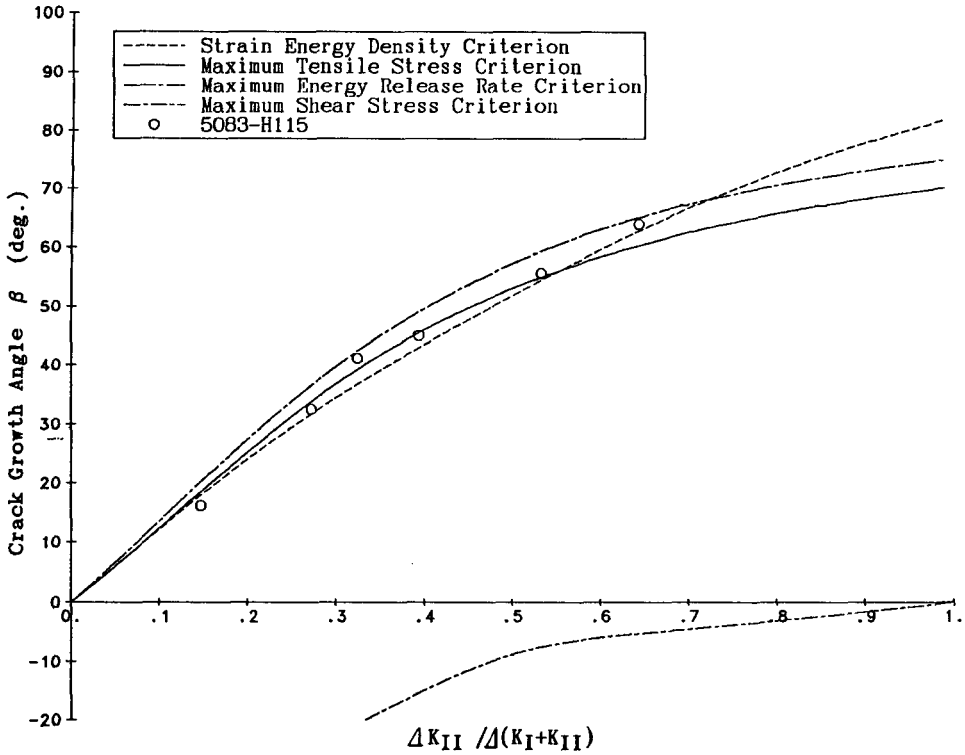


Fig. 10 Direction of crack growth with respect to $\Delta K_{II} / (\Delta K_I + \Delta K_{II})$

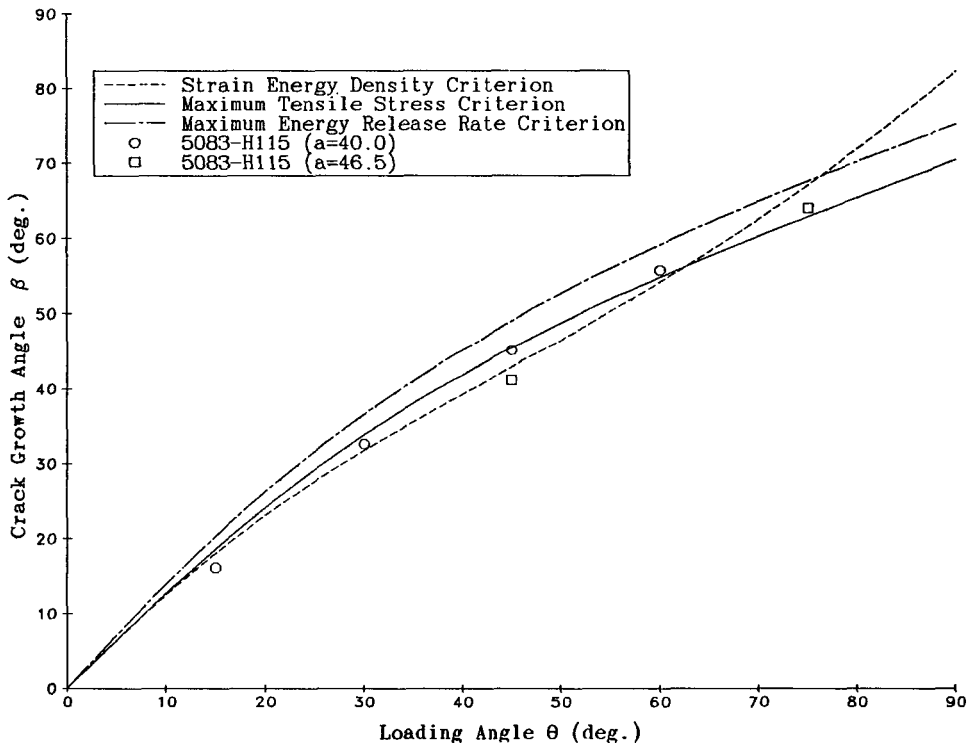


Fig. 11 Direction of crack growth with respect to loading angle

RCM 시험편에서 하중방향 θ 를 0도로 하여 모드 I 피로균열진전실험을 한 결과와 CT 시험편을 사용한 경우⁽³³⁾의 실험결과를 나타내고 있다. 두 시험편의 실험결과가 잘 일치하고 있어 RCM 시험편의 응력강도계수의 해석, 실험장치 및 실험조건이 적합함을 알 수 있다.

4.2 혼합 모드 균열성장 방향

균열길이 a 가 40mm일 때 즉, 균열선단이 하중 작용선과 일치할 때 하중작용방향 θ 를 0, 15, 30, 45, 60도로 한 경우와 $a=46.5$ mm일 때 $\theta=45, 75$ 도로 한 경우에 대해 반복피로 하중을 작용하였다. Fig. 10 및 11은 5083-H115 알루미늄 합금에 대한 균열성장각을 각각 $\Delta K_{II}/(\Delta K_I + \Delta K_{II})$ 및 하중작용방향에 대해 나타낸 것이다. RCM 시험편을 사용하여 혼합 모드 균열진전 실험을 했을 때 데이터의 흠어짐이 적었으며, 최소 변형률 에너지 밀도 조건⁽²⁾, 최대 원주응력 조건⁽¹⁾ 및 최대 에너지 해방률 조건⁽⁶⁾과 잘 일치하고 있는데 최대 전단응력 조건과는 무관하다.

따라서 $\Delta K_{II}/\Delta K_I < 2$ 인 본 실험의 범위 내에서 5083-H115 알루미늄 합금은 K_{II} 가 급속히 0으로 되면서 최대 인장응력 작용면을 따라 균열이 진전함을 알 수 있다.

4.3 피로 균열진전 특성

RCM 시험편에서 균열길이 a 가 40mm일 때 즉, 균열선단이 시험편의 반원호의 중심에 위치할 때 균열선단의 응력상태는 하중방향에 관계없이 균열전면의 영향이 동일한 것으로 가정하면 경사진 균열의 응력강도계수는 Fig. 12와 같이 구할 수 있다. Fig. 13은 모드 I 하중에 의한 예비균열길이 $a=40$ mm로부터 하중작용방향 θ 를 15, 30, 45, 60도로 하여 반복하중을 가했을 때의 피로균열진전속도를 정리한 것이다. 이 때 K_I, K_{II} 는 Fig. 12와 같은 방법으로 계산하였는데 $\Delta K_{II}/\Delta K_I \leq 0.1$ 이었다. 하중작용방향에 관계없이 CT 시험편의 피로균열진전속도와 잘 일치하고 있어 모드 I 균열진전특성에 의존함을 나타내고 있다.

Fig. 14는 경사균열을 초기균열방향으로 투영한 것인데 이 때의 균열진전속도를 ΔK_I 로 정리하면 Fig. 15와 같다. 균열경사각이 30도 이상일 경우 ΔK_I 만으로 나타낸 균열진전속도는 모드 I 균열진전의 경우보다 매우 크게 나타난다. 이것은 ΔK_{II}

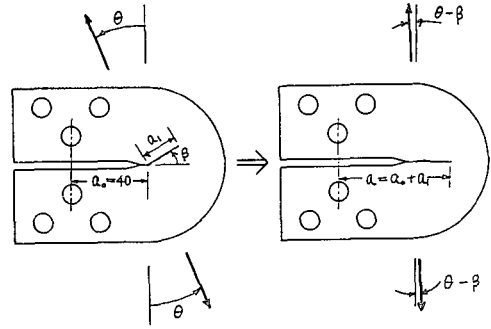


Fig. 12 Crack geometry projected on the direction perpendicular to the loading direction approximately

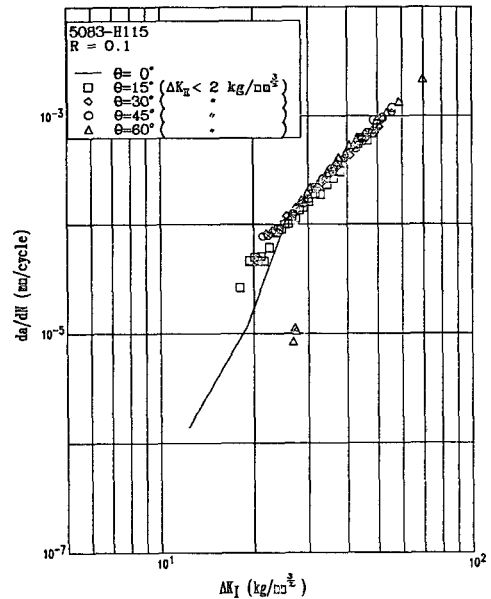


Fig. 13 Crack growth rates v.s. ΔK_I , which is calculated by means of Fig. 12

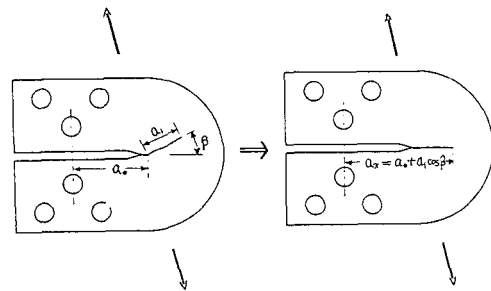


Fig. 14 Crack geometry projected on the initial crack direction

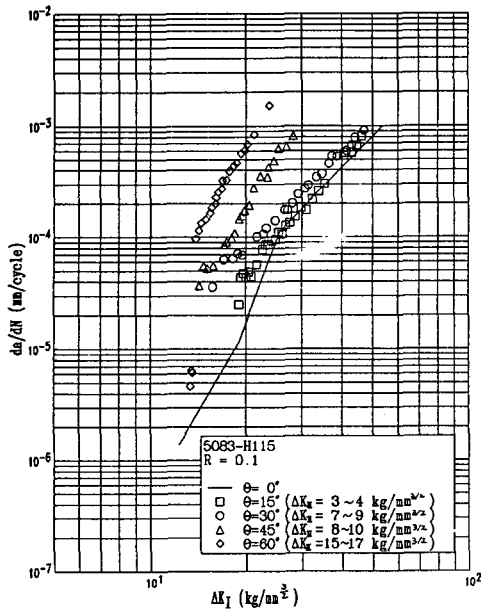


Fig. 15 Crack growth rates v.s. ΔK_I , which is calculated by means of Fig. 14

의 효과를 고려하지 않았으며 균열길이를 초기 균열길이 방향으로 투영하여 균열진전속도를 평가하는 것은 그 물리적 의미가 없기 때문이다.

5. 결 론

혼합 모드 균열문제의 연구를 위하여 하중방향에 따른 균열전면의 자유표면의 영향을 균일하게 한 RCM 시험편을 고안하여 5083-H115 알루미늄 합금의 혼합 모드 균열성장 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) K_I 및 K_{II} 의 조절이 간편하고, 하중작용방향에 따른 균열전면의 자유표면의 영향을 균일하게 한 RCM 시험편은 혼합 모드 균열 성장실험에 편리하게 사용될 수 있다.

(2) RCM 시험편에 대해 응력 특이성을 나타낼 수 있는 균열선단 요소를 사용하여 유한요소해석한 결과 약 3%의 오차범위 내에서 K_I , K_{II} 를 구할 수 있었다. 또한 균열길이 및 하중방향에 따른 K_I , K_{II} 를 수식화 하였다.

(3) 5083-H115 알루미늄 합금의 혼합 모드 균열성장 방향은 $\Delta K_{II}/\Delta K_I < 2$ 인 본 연구의 범위 내에서 최대 원주응력 조건 및 최소 변형을 에너지 밀도조건과 잘 일치하고 있으나 최대 전단응력 조

건과는 무관하다.

(4) RCM 시험편을 사용한 5083-H115 알루미늄 합금의 실험결과는 하중방향에 직각인 방향으로 균열을 투영하여 피로 균열성장 특성을 평가할 수 있으며 모드 I 균열성장특성에 의존함을 쉽게 확인할 수 있었다.

(5) 15도 이하의 경사균열을 초기 균열방향으로 투영하여 균열성장 속도를 평가하면 모드 I 균열성장 속도와 유사하나 30도 이상일 경우는 매우 크게 나타난다.

참 고 문 헌

- (1) Erdogan, F. and Sih, G.C., 1963, "On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear", J. of Basic Engng, Vol. 85D, pp. 519~527.
- (2) Sih, G.C., 1973, "Some Basic Problems in Fracture Mechanics and New Concepts", Engng Fracture Mech., Vol. 5, pp. 365~377.
- (3) Sih, G.C., 1974, "Strain-Energy-Density Factor applied to Mixed Mode Crack Problems", Int. J. of Fracture, Vol. 10, pp. 305~321.
- (4) Sih, G.C., 1973, "Mechanics of Fracture: Methods of Analysis and Solution of Crack Problems XXI-XLV", Noordhoff, Leyden.
- (5) Wong, A.K., 1987, "On the Application of the Strain Energy Density Theory in Predicting Crack Initiation and Angle of Growth", Engng Fracture Mech., Vol. 27, pp. 157~170.
- (6) Hussain, M.A., Pu S.L. and Underwood, J., 1974, "Strain Energy Release Rate for a Crack under Combined Mode I and Mode II", Fracture Analysis, ASTM STP 560, pp. 2~28.
- (7) Wang, M.H., 1985, "A Theory for the Mixed Energy Release Rate", Engng Fracture Mech., Vol. 22, pp. 661~671.
- (8) Zhao Yishu, 1987, "Griffith's Criterion for Mixed Mode Crack Propagation", Engng Fracture Mech., Vol. 26, pp. 683~689.
- (9) Yu, B.Y., 1982, Engng Fracture Mech. Vol. 16, p. 156.
- (10) Fischer, K.F. and G6ldner, H., 1981, Int. J. of Fracture, Vol. 17, R3-R6.
- (11) 結城良治, 秋田清司, 岸成人, 1988, "疲労き裂成長特性に及ぼす二軸応力条件 および その変化の影響", 材料, 第37巻, 第420号, pp. 1084~1089.

- (12) 大塚昭夫, 森要, 大島崇文, 津山青史, 1980, "モード II 形 繰返し負荷を受ける軟鋼およびアルミニウム合金の疲労き裂進展挙動", 材料, 第29巻, 第325号, pp. 1042~1048.
- (13) 大塚昭夫, 東郷敬一郎, 榊原幸二, 吉田亨, 1985, "アルミニウム合金におけるモード II 疲労き裂進展機構とその材料依存性", 材料, 第34巻, 第385号, pp. 1174~1179.
- (14) Royer, J., 1986, "A Specimen Geometry for Plane Mixed Modes", Engng Fracture Mech., Vol. 23, No. 4, pp. 763~775.
- (15) Gross, B., Buzzard, R.J. and Brown, W.F. Jr, 1986, "Elastic Analysis of a Mode II Fatigue Crack Test Specimen", Int. J. of Fracture, Vol. 31, pp. 151~157.
- (16) Davies, J. and So, K.W., 1986, "Further Development of Fracture Test in Mode II, Int. J. of Fracture, Vol. 31, R19-R21.
- (17) Buzzard, R.J., Gross, B., Srawley, J.E., 1986, "Mode II Fatigue Crack Growth Specimen Development", Fracture Mechanics: 17th Volume, ASTM STP 905, pp. 329~346.
- (18) Banks-Sills, L., Arcan, M., 1986, "A Compact Mode II Fracture Specimen, Fracture Mechanics": 17th Volume, ASTM STP 905, pp. 347~363.
- (19) Cramer, S.M. and Pugel, A.D., 1987, "Compact Shear Specimen for Wood Mode II Fracture Investigations", Int. J. of Fracture, Vol. 35, pp. 163~174.
- (20) Fatemi, A. and Socie, D.F., 1988, "A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage including Out-of-Phase Loading", Fatigue Frac. Engng Mater. Struct., Vol. 11, No. 3, pp. 149~165.
- (21) Shah, R.C., 1974, "Fracture under Combined Modes in 4340 Steel", Fracture Analysis, ASTM STP 560, pp. 29~52.
- (22) Yokobori, A.T., Yokobori, T., Sato, K., Syoji, K., 1985, "Fatigue Crack Growth under Mixed Modes I and II", Fatigue Frac. Engng. Mater. Struct., Vol. 8, No. 4, pp. 315~325.
- (23) Chong, K.P. and Kuruppu, M.D., 1988, "New Specimens for Mixed Mode Fracture Investigations of Geomaterials", Engng Fracture Mech., Vol. 30, No. 5, pp. 701~712.
- (24) Chan, K.S. and Cruse, T.A., 1986, "Stress Intensity Factors for Anisotropic Compact-Tension Specimens with Inclined Cracks", Engng Fracture Mech., Vol. 23, No. 5, pp. 863~874.
- (25) Richard, H.A., 1984, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fractures", Advances in Fracture Research (Fracture 84), 6th International Conference on Fracture, 4~10 Dec. 1984.
- (26) Banks-Sills, L., Arcan, M. and Bortman, Y., 1984, "A Mixed Mode Fracture Specimen for Mode II Dominant Deformation", Engng Fracture Mech., Vol. 20, No. 1, pp. 145~157.
- (27) Banks-Sills, L., and Bortman, Y., 1986, "A Mixed-Mode Fracture Specimen: Analysis and Testing", Int. J. of Fracture, Vol. 30, pp. 181~201.
- (28) 佐藤清, 1987, "混合モード負荷によるスリット材の破壊", 日本材料強度学会誌, 第22巻, pp. 20~27.
- (29) Socie, D.F., Hua, C.T. and Worthem, D.W., 1987, "Mixed Mode Small Crack Growth", Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., Vol. 10, pp. 1~16.
- (30) Patel, A.B. and Pandey, R.K., 1981, "Fatigue Crack Growth under Mixed Mode Loading", Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., Vol. 4, pp. 65~77.
- (31) Williams, J.G. and Ewing, P.D., 1972, "Fracture under Complex Stress-The Angled Crack Problem", Int. J. Fracture Mech., Vol. 8, pp. 441~445.
- (32) 大塚昭夫, 東郷敬一郎, 松山秀信, 1987, "アルミニウム合金 2017-T3 および 7075-T6 における混合モード負荷による疲労き裂の発生および進展", 材料, 第36巻, pp. 570~576.
- (33) 禹장우, 진근찬, 김종배, 김재훈, 하태수, 1988, "고강도 알루미늄 합금의 피로균열의 하한계 및 안정 전파거동", 대한기계학회논문집, 제12권, 제2호, pp. 271~277.
- (34) ASTM Designation E647-83, "Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/cycle".
- (35) Shih, C.F., Delorenzi, H.G. and German, M.D., 1976, "Crack Extension Modelling with Singular Quadratic Isoparametric Element", Int. J. of Fracture, Vol. 12, pp. 647~651.