

〈論 文〉

측면홈 시험편을 이용한 평면 변형률 피로 균열 진전에 관한 연구

김종한* · 송지호*

(1991년 8월 29일 접수)

Investigation of Plane Strain Fatigue Crack Growth Behavior by Using Side-Grooved Specimens

Jong Han Kim and Ji Ho Song

Key Words : Fatigue Crack Growth(피로균열진전), Side-groove(측면홈), Plane Stress(평면응력), Plane Strain(평면변형률), Stress Intensity Factor Evaluation(응력강도계수평가), Effective Thickness(유효두께)

Abstract

Plane-strain fatigue crack growth behavior of 7075-76 aluminium alloy was investigated by using side-grooved through-thickness center cracked tension(CCT) specimens. The effect of side-groove on the stress intensity factor value was examined. The effective thickness expression of $B_e = B_o - (B_o - (B_o - B_N)^2) / B_o$ is the most appropriate to evaluate the stress intensity factor of side-grooved CCT specimen for fatigue testing. Fatigue crack growth rates can be well described by the effective stress intensity factor range based on closure measurements, for both side-grooved and uniform thickness specimens. Provided that the thickness of specimen meets the requirements for valid plane-strain fracture toughness, uniform thickness specimen data may be assumed to approximately represent the plane strain through-thickness crack growth behavior.

1. 서 론

피로균열진전거동에 있어서 평면변형률(plane strain)상태에서의 진전거동과 평면응력(plane stress)상태에서의 진전거동이 다르다는 것은 잘 알려진 사실이며, 실제 구조물에서 가장 많이 발생하는 균열 형태인 표면균열(surface crack)과 같이 응력상태가 균열선단 주위에 따라 변화하는 경우는 이 응력상태의 차이로 인해 균열진전거동 평가에 어려움이 많아진다. 일반적으로 표면균열진전거동

연구에서는 평면변형률상태의 균열 깊이점과 평면응력상태인 표면의 균열 길이점 거동을 분리하여 연구할 필요가 있으며, 또한 표면균열의 진전 거동을 예측하거나 평가, 혹은 비교하기 위해서는 앞서 재료의 기본 특성으로서의 관통균열(through-thickness crack)에 대한 진전거동을 구해 둘 필요가 있다. 평면응력 상태의 관통균열 진전거동은 시험편의 표면에서 그 거동을 관찰함으로써 비교적 쉽게 얻어질 수 있으나 평면변형률 상태하의 관통균열 진전거동은 시험편두께 중앙부근에서 일어나는 거동이므로 그 상세를 평가하기가 쉽지 않다.

평면변형률 조건의 문제는 재료의 파괴특성등의 연구에서 매우 중요하다. 예를 들어 평면변형률 파

*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

파괴인성치 K_{Ic} 나 J_{Ic} 를 구할 때에는 충분한 두께를 갖는 시험편을 사용하여 평면 변형을 조건을 만족하도록 하는 것이 일반적이다. 특히 표면부근의 평면응력상태의 영향을 감소시키기 위하여 적절한 측면홈(side-groove)을 만들어 평면 변형을 조건에 접근시킴으로써 균열진전시 표면과 내부의 응력상태 차이에 의해 일어나는 터넬링(tunnelling) 현상이나 쉬어립(shear lip) 현상을 제거하고 직선형태의 균열선단을 얻음으로 기본적인 평면변형률 상태의 특성을 얻는 경우도 있다. 다만 측면 홈을 내게 되면 파괴현상이나 응력상태가 반드시 2차원적만은 아니므로, 3차원적인 해석이 필요하나, 해석이 그다지 용이하지 않으므로 측면홈이 없는 시험편에 대한 해석 결과를 간편하게 이용하고자 하는 노력들이 많이 이루어져 왔다. 일반적으로 관통균열의 응력강도계수(stress intensity factor)등에 미치는 측면홈의 영향을 고려하는 방법으로는 시험편 두께 B 를 적절히 수정한 후, 2차원 해석을 통해 얻어진 파괴역학 파라미터(parameter) 평가에 대한 기존의 식을 그대로 사용하는 간편한 방법이 있다. 지금까지 제안된 두께의 수정방법으로는 다음과 같은 것들이 있다.

$$B_e = (B_o + B_N)^{1/2} \quad (1)$$

$$B_e = B_o - (B_o - B_N)^2 / B_o \quad (2)$$

$$B_e = B_N \quad (3)$$

여기서 B_e 는 유효두께(effective thickness)이며 B_o , B_N 는 각각 초기시험편의 두께와 측면홈의 크기를 뺀 순두께(net thickness)를 말한다.

식 (1)은 균열진전시 균열선단의 에너지 방출률(energy release rate) G 가 측면홈의 유, 무에 무관하게 재료의 각 점에서는 같을 것이라는 가정하에 G 를 응력강도계수의 형태로 변환시킬 때 나온 것으로 Novak와 Rolfe⁽¹⁾, LeFort와 Mowbray⁽²⁾는 WOL(wedge opening load) 시험편의 경우 K_{Ic} 를 구할 때 이 식이 이론이나 실험결과와 잘 맞는다고 보고하고 있다. 또 shih 등⁽³⁾은 A533-B 재의 45° 측면홈을 가진 CT 시험편에 대한 유한요소 해석과 실험을 통해 측면홈이 25% 이하일 때 컴플라이언스(compliance)나 응력강도계수의 평가시 유효두께로는 식(2)가 적당하다는 제안을 하고 있다. 그리고 J_{Ic} 결정에 있어서는 deLorenzi와 Shih⁽⁴⁾ 등이 A533-B 강의 CT 시험편에 대한 유한요소 해석을 통해 식 (3)이 적당하다고 하고 있다. 한편

Macdonald와 Pajot⁽⁵⁾는 CT시험편에 대한 3차원 유한요소 해석을 통해 응력강도계수를 평가한 결과 식 (1)로 평가한 경우보다 3-4% 큰 값을 얻고 있으며, Ichikawa와 Takamatsu⁽⁶⁾는 2024-T3 알루미늄 합금의 CT 시험편에 대한 J_{Ic} 의 실험적 평가에 있어서 앞에서 언급한 식 (3)보다는 식 (1)이나 식 (2)가 더 잘 맞는다는 연구결과를 발표하고 있어 동일한 측면홈에 대해서도 구하는 인자에 따라, 또 연구자에 따라 다른 결과를 보이고 있다. 참고로 ASTM 규정^(7,8)에서는 3점 굽힘시험편(three point bend specimen)과 CT시험편에 대해 응력강도의 경우는 식(1), 컴플라이언스(compliance)의 변화에 대해서는 식 (2), J_{Ic} 의 경우는 식 (3)을 각각 사용하도록 권장하고 있다. 이상의 연구결과는 대체로 파괴인성치 평가와 관련된 것이다.

한편 피로균열진전 연구에 있어서 측면홈이 있는 시험편을 사용하여 평면변형률 조건하의 균열진전 거동을 검토한 예로 Kikukawa등⁽⁹⁾의 연구가 있으나, 측면홈의 응력강도계수에 미치는 영향을 계통적으로 검토함이 없이 간단히 식 (3)을 사용하고 있다. 이외의 연구로는 Hess등⁽¹⁰⁾의 연구가 있으나 매우 단편적인 내용으로 어떠한 결론을 얻기에는 미흡한 것이다.

본 연구에서는 특히 앞서 지적한 표면균열의 진전거동에 관한 연구와도 관련하여 측면홈을 가진 중앙관통균열(side-grooved center cracked tension) 시험편에 대해 피로균열 진전실험을 수행하고, 평면변형률 조건의 만족여부 및 응력강도계수 평가방법에 관하여 검토하여 비교적 새로운 결과를 얻었으므로 여기에 보고하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 알루미늄합금 7075-T6이며 그 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2에 나타나 있다. 시험편의 형상은 Fig. 1에 나타나 있으며 초기균열은 $2a_o = 16\text{mm}$ 가 되도록 방전가공(EDM)하여 제작하였다. 측면홈이 없는 경우에도 시험편 두께는 알루미늄재료의 평면변형률 파괴인성치 K_{Ic} 측정시에 요구되는 평면변형률조건⁽¹¹⁾에 대응하는 $B > 5(K_{max}/\sigma_y)^2$ 를 만족하도록 6mm로 하였다. 여기서 K_{max} 는 피로시험중 가해진 최대응력강도계수이며, σ_y 는 재료의 항복응력이다. 측면홈

Table 1 Chemical composition (in Wt. %) of 7075-T6

Material	Mn	Si	Cr	Fe	Cu	Mg	Zn	Al
7075-T6	0.10	0.16	0.23	0.24	1.54	2.64	5.34	

Table 2 Mechanical properties of 7075-T6

Tensile strength σ_B (Mpa)	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (Mpa)	Elongation δ (%)	Reduction of area Ψ (%)
630	555	13.5	15.4

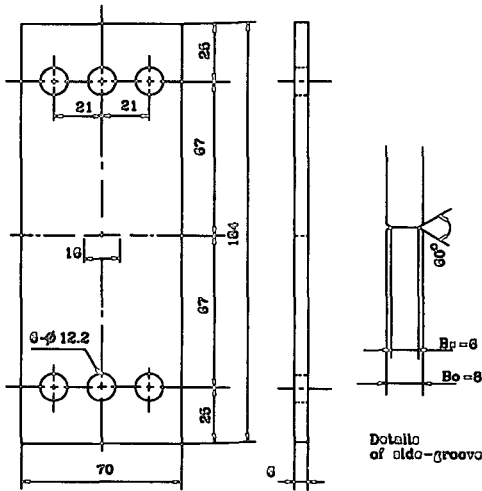


Fig. 1 Geometry of CCT specimen (in mm).

을 낸 시험편의 순두께 B_N 은 측면홈이 없는 시험편의 두께 6mm와 일치하도록 하였으며, 측면홈은 깊이가 1mm로, 이른바 25% 측면홈이며, 측면홈의 노치반경은 0.25mm, 노치각은 60°이다.

2.2 실험장치 및 실험방법

실험은 MTS사의 유압서어보 시험기를 사용하여 수행하였다. 균열길이와 균열단힘은 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 제하탄성컴플라이언스법 (unloading elastic compliance method)^(12,13)에 의해 시험중단 없이 연속적으로 측정하였으며, 이 때 필요한 균열 열림변위는 시험편 중앙에 고무밴드를 이용하여 고정된 변위계 (extensometer, MTS Model 632.11c-20)의 출력을 사용하였다. 특히 가능한 한 균열 단힘측정의 감도를 높이기 위해 표점거리를 5.7

mm가 되도록 개조하여 사용하였다. 균열길이-컴플라이언스 보정곡선 (calibration curve)은 비치마크법 (beach mark technique)에 의해 구하였다. 실험은 13Hz의 속도로 응력비 $R (=K_{min}/K_{max}) = -1, 0, 0.1, 0.3$ 에 대해 수행하였다. 중앙관통균열의 응력강도계수는 Tada⁽¹⁴⁾의 다음식을 사용하여 평가하였다.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{\sec(\alpha\pi/2)} \cdot (1 - 0.025\alpha^2 + 0.06\alpha^4) \tag{4}$$

여기서 $\alpha = 2a/W$, W 는 시험편 폭이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 측면홈이 없는 중앙관통균열 시험편에 대한 균열진전속도를 응력강도계수 폭 ΔK 와 유효 응력강도계수폭 (effective stress intensity factor range) ΔK_{eff} 로 정리한 것이다. 여기서 유효응력강도계수폭 ΔK_{eff} 는 가해진 최대응력강도계수 K_{max} 와 균열열림점의 응력강도계수 K_{op} 의 차이, 즉 $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ 로 정의된다. 응력강도 계수 폭 ΔK 로 정리하면 응력비 R 의 영향이 나타나 응력비가 클 수록 동일한 ΔK 에 대해 진전속도가 빨라지나, ΔK_{eff} 로 정리하면 응력비의 영향이 없어지고 하나의 곡선으로 모여, 균열단힘이 균열진전을 지배하는 중요한 인자임을 알 수 있다. Fig. 3은 측면 홈을 낸 중앙관통균열 시험편과 측면홈이 없는 중앙관통균열 시험편의 결과를 응력비 $-1, 0, 0.1, 0.3$ 에 대해 각각 비교한 것으로, 유효두께

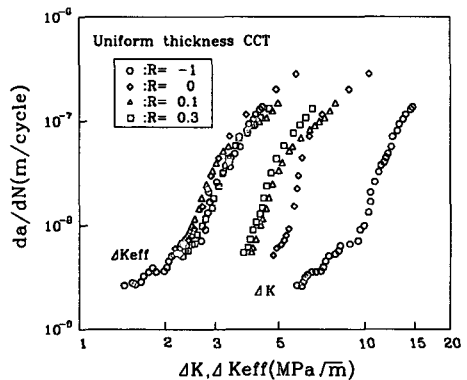


Fig. 2 Fatigue crack growth rates of uniform thickness CCT specimen as a function of ΔK and ΔK_{eff} .

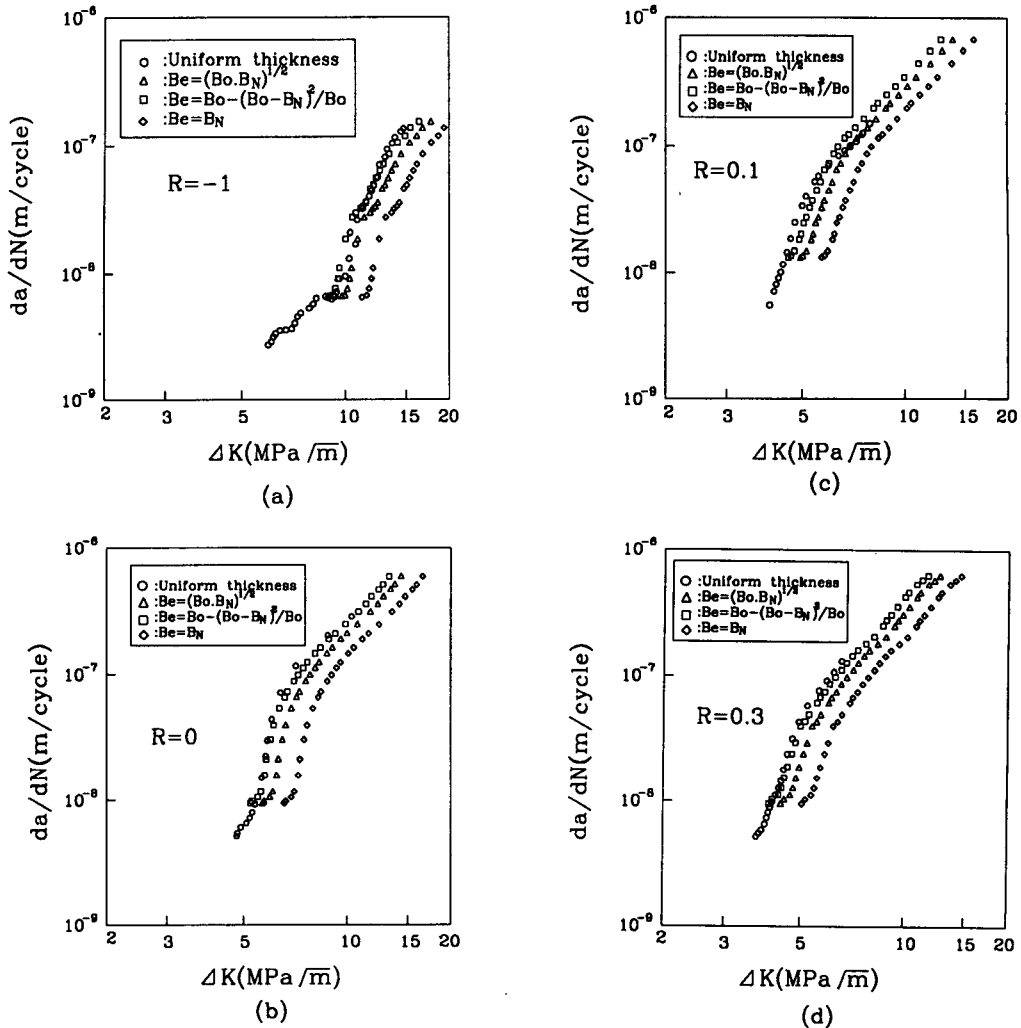


Fig. 3 Comparison of various effective thickness expressions to account for the effect of side-grooves on stress intensity factor evaluation (for da/dN versus ΔK plots).

에 따른 응력강도계수폭과 균열진전속도 da/dN 과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 원기호로 나타낸 것이 측면홈이 없는 균일두께 시험편에 대한 응력강도계수폭과 균열진전속도와의 관계이며, 삼각형, 사각형, 마름모꼴의 기호로 표시한 데이터가 측면홈을 낸 시험편에 대해서 유효두께를 각각 식 (1), 식 (2), 식 (3)으로 평가한 응력강도계수폭으로 균열진전 속도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 응력비 R 에 관계없이, 가장 오른쪽에 위치하고 있는 마름모꼴 데이터, 즉 식 (3)을 적용한 경우는 측면홈이 없는 시험편에 대한 실험결과와 큰 차이를 보이고 있다. 한편 ASTM에서 CT

나 3 점굽힘시험편에 대해 추천하고 있는 식 (1)에 의한 결과(삼각형 기호)도 측면홈이 없는 시험편결과와 비교하여 응력강도계수폭을 약간 과대 평가하고 있는 반면, 식 (2)에 의한 데이터가 균일두께 시험편 결과와 가장 가까운 결과가 되고 있다.

Fig. 4는 유효응력강도계수폭 ΔK_{eff} 와 진전속도 da/dN 의 관계에 대한 유효두께 평가식의 영향을 나타낸 것이다. 이 경우 역시 응력강도계수폭으로 정리한 경우와 동일한 경향을 보이고 있다.

지금까지의 결과를 종합하면 $da/dN - \Delta K$ 관계 및 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 관계 모두에 식 (2)로 평가한 응력강도계수폭에 의한 결과가 측면홈이 없는 시험

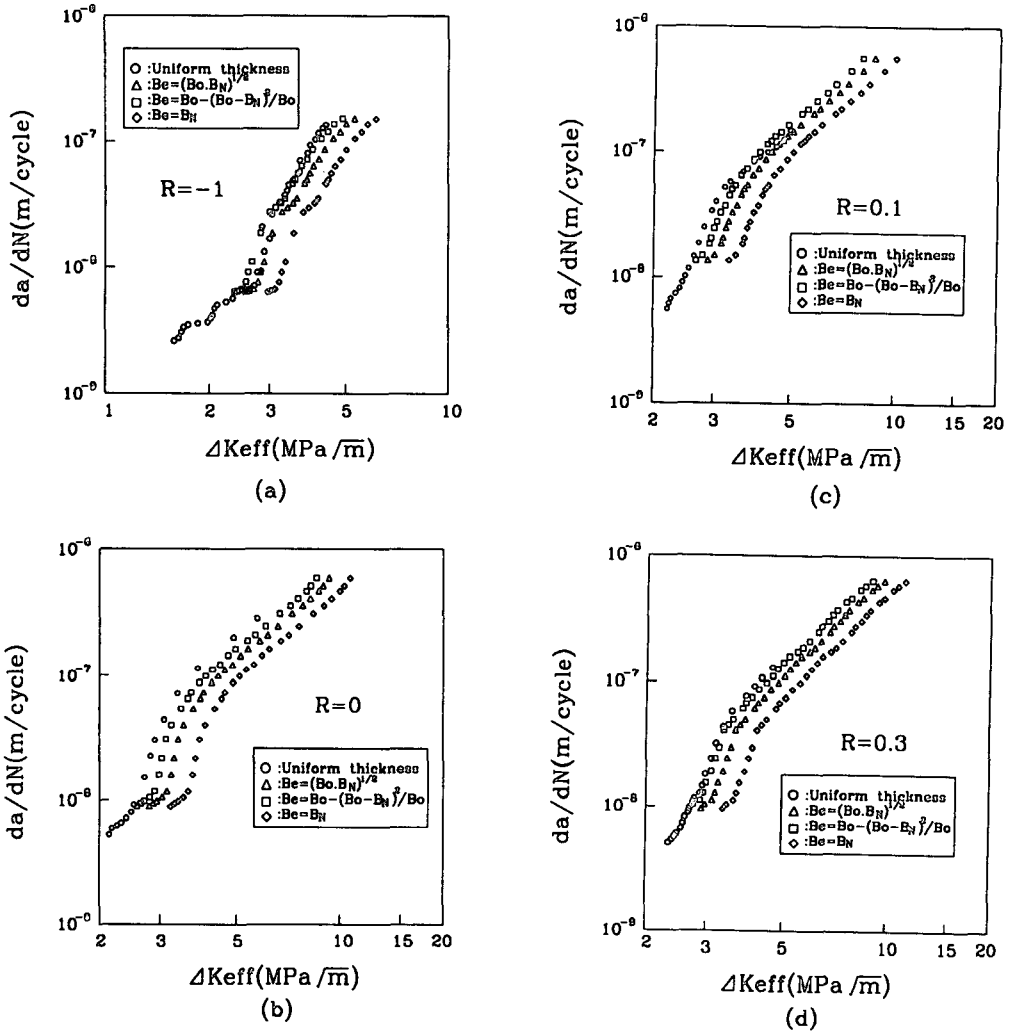


Fig. 4 Comparison of various effective thickness expressions to account for the effect of side-grooves on stress intensity factor evaluation (for da/dN versus ΔK_{eff} plots).

편의 결과와 일치하거나 가장 가까운 결과를 주고 있다.

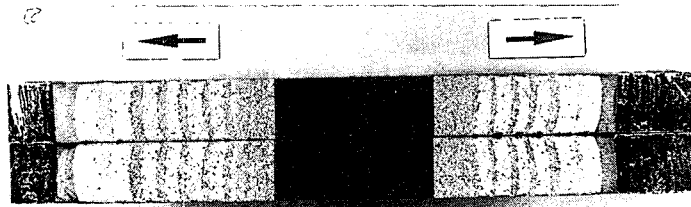
Fig. 5는 측면홈이 없는 경우와 측면홈을 낸 경우의 파단면을 거시적으로 관찰한 것으로 파단된 상하면을 걸쳐 나타낸 것이다. 측면홈이 없는 경우는 시험의 중간중간에 불력하중 (block loading)을 가해 비치마크 (beach mark)를 낸 것으로, 평면응력상태인 시험편 표면의 진전이 느리고 평면변형률 상태라고 볼 수 있는 시험편 중심부의 진전속도가 약간 빨라 균열선단은 통상적인 엄지손톱 (thumb nail) 형상이 되고 있다. 측면홈을 낸 시험편의 경우는 일정진폭 실험을 하고 최종 길이에서 비치마크

를 낸 것으로 측면홈이 없는 시험편과는 달리 표면이 약간 빠르거나 전체적으로 직선에 가까운 형상을 보이고 있어 본 시험편에 도입된 측면홈이 적 절함을 알 수 있으며 균열진전은 거의 평면변형률 상태에서 일어나고 있다고 가정하여도 좋을 것이다. 일반적으로 평면변형률 상태의 진전속도가 평면응력상태의 균열진전속도보다 빠르다는 점을 고려하면, Fig. 3,4의 결과로부터 본 재료의 경우 유효두께 평가식으로는 식 (2)가 가장 적당하다고 할 수 있다.

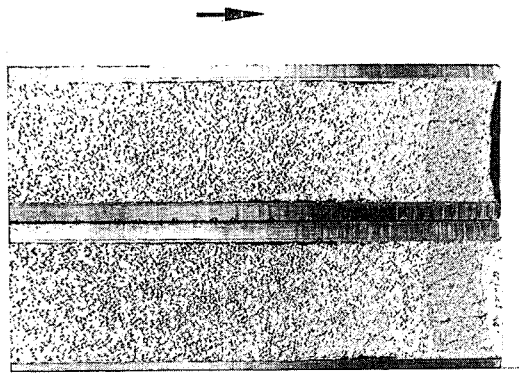
Fig. 6은 측면홈을 낸 중앙관통균열 시험편 결과를 식 (2)의 유효두께 식을 사용하여 평가한 응력강

도계수폭으로 정리한 것으로 Fig. 6(a)는 da/dN - ΔK , da/dN - ΔK_{eff} 의 관계이며, Fig.6(b)는 균열 열림비 (crack opening ratio) $U(=(K_{max}-K_{op})/(K_{max}-K_{min}))$ 에 대해 정리한 것으로 그림중에는 측면흡이 없는 경우(검은 기호)도 함께 표시하고 있다. 균열진전속도는 측면흡을 낸 경우에도 균열

단힘을 고려한 ΔK_{eff} 로 잘 정리됨을 알 수 있다. U 와 ΔK 의 관계는 부분적으로 약간의 차이를 보이는 경우도 있으나 측면흡이 없는 경우의 결과와 대체적으로 잘 일치하고 있다고 할 수 있다. 이 결과는 본 연구에서와 같이 측면흡이 없는 시험편의 경우에도 파괴인성평가에서 요구되는 평면변형률

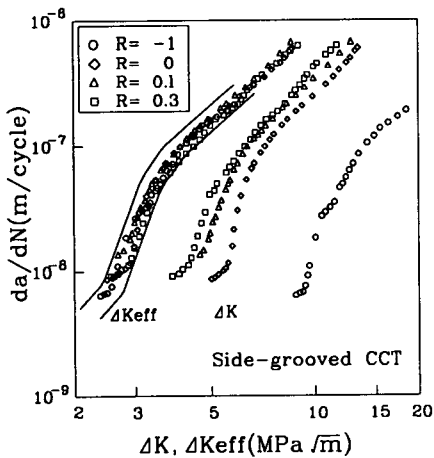


(a) Uniform thickness CCT

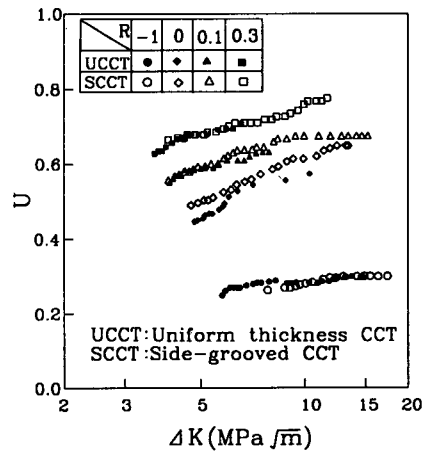


(b) Side-grooved CCT

Fig. 5 Macroscopic fracture surfaces. Arrows indicate fatigue crack growth direction.



(a)



(b)

Fig. 6 Fatigue crack growth behavior of sidegrooved specimens.

조건을 만족하는 두께를 가진 시험편이면 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 관계 및 균열열림비 U 의 거동은 측면홈이 있는 시험편의 경우와 거의 일치하는 양상이 되어 측면홈이 없는 시험편에서 표면의 평면응력 상태는 거시적인 균열 진전거동에는 그다지 크게 영향을 미치지 않음을 의미하고 있다. 평면변형률 조건하의 균열진전거동은 현 시점에서는 가장 적합한 측면홈을 낸 시험편을 사용하여 구하는 것이 바람직하나 본 연구결과로부터 알 수 있듯이 파괴인성 평가에서 평면변형률조건을 만족하는 두께의 측면홈이 없는 통상적인 시험편의 피로실험결과를 평면변형률 상태의 진전거동이라고 가정하여도 큰 오차는 없으리라 기대되어 철강재료에 대한 검증을 계획하고 있다.

4. 결 론

알루미늄합금 7075-T6의 평면변형률 피로균열진전 거동을 검토하기 위하여 측면홈이 있는 중앙균열시험편과 측면홈이 없는 통상적인 시험편에 대해 피로균열진전실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열진전속도는 측면홈의 유, 무에 관계없이 균열단함을 고려한 유효응력강도계수쪽으로 잘 정리된다.

(2) 측면홈을 가진 피로시험편의 응력강도계수 평가에 적합한 유효두께로는 $B_e = B_o - (B_o - B_N)^2 / B_o$ 가 바람직하다.

(3) 측면홈이 없는 시험편의 경우에도 파괴인성치 평가시의 평면변형률 조건을 만족하는 두께인 경우에는 거의 평면변형률 피로균열진전거동을 나타낸다고 가정해도 큰 차이가 없으리라 기대된다.

참 고 문 헌

(1) Novak, C.N.R. and Rolfe, S.T., 1969, "Modified WOL Specimen for $K_{I,SSC}$ Environmental Testing", J. Materials, Vol.4, No.3, pp.701~728.
 (2) LeFort, P. and Mowbray, D., 1978, "Calibration of the Side-Grooved Modified Wedge-Opening-Load Specimen", J. Testing and Evaluation, JTEVA, Vol.6,

No.2, pp.114~119.
 (3) Shih, C.F., deLorenzi, H.G. and Andrews, W.R., 1977, "Elastic Compliance and Stress Intensity Factors for Side-Grooved Compact Specimens", Int. J. Fract.13, pp.544~548.
 (4) deLorenzi, H.G. and Shih, C.F., 1983, "3-D Elastic-Plastic Investigation of Fracture Parameters in Side-Grooved Compact Specimen", Int. J. Fract. 21, pp.195~220.
 (5) Macdonald, B.D. and Pajot, J.J., 1990, "Stress Intensity Factors for Side-Grooved Fracture Specimens", J. Testing and Evaluation, JTEVA, Vol.18, No.4, pp.281~285.
 (6) Ichikawa, M. and Takamatsu, T., 1987, "An Experimental Investigation of Effective Thickness for Evaluation of J_{IC} Using Side-Grooved Specimens", J. Soci. Mater. Sci. Japan 36, pp.107-110(in Japanese).
 (7) Annual Book of ASTM Standards, 1988, ASTM E 813-87.
 (8) Annual Book of ASTM Standards, 1988, ASTM E 1152-87.
 (9) Kikukawa, M., Jono, M. and Kondo, Y., 1980, "An Estimation Method of Fatigue Crack Propagation Rate Under Varying Loading Conditions of Low Stress Intensity Level", Advances in Fracture Research, edited by Francois, D. et al., Pergamon Press Oxford & New York, pp. 1799~1806.
 (10) Hess, J.P., Grandt, A.F., Jr and Dumanis, A., 1983, "Effect of Side-Grooves on Fatigue Crack Retardation", Fatigue Engng Mater. Struct.6, pp. 189~199.
 (11) Annual Book of ASTM Standards, 1988, ASTM B 645-84.
 (12) Kikukawa, M., Jono, M. and Tanaka, K., 1976, "Fatigue Crack Closure Behavior at Low Stress Intensity Levels", Proc.ICM 2, pp.254~277.
 (13) Park, J.H., Song, J.H., Earmme, Y.Y., Kim, C.Y. and Kang, K.J., 1988, "Personal Computer-Based Fatigue Testing Automation and Improvements in Fatigue Behavior Monitoring", Trans. Korea Soc. Mech. Engrs 12, pp.123~130
 (14) Tada, H., Paris, P. and Irwin, G., 1985, The stress analysis of cracks Handbook, 2nd Ed., Del Reaserch Corporation.