

피로균열진전에 미치는 시편 두께의 영향

Effect of Specimen Thickness on Fatigue Crack Growth

김재훈* · 김영균** · 윤인수**

J.H. Kim · Y.K. Kim · I.S. Yoon

(1998년 8월 4일 접수, 1998년 10월 19일 채택)

ABSTRACT

The effect of specimen thickness on fatigue crack growth behavior has been carried out by compact tension specimens of thickness of 3mm, 10mm and 25mm for maraging steel and Al 7075-T6. The closure points were determined during the test by means of a clip-gage situated at the notch mouth.

Specimen thickness have no apparent influence on the fatigue crack growth rate of maraging steel, but the crack growth rate of 25mm thickness specimen for Al 7075-T6 is faster than that of 3 and 10mm specimens. The difference of crack growth rates can be successfully explained by considering the different stress state of plane strain and plain stress due to the variation of specimen thickness. Also the crack opening ratio of 25mm specimen is greater than those of 3 and 10mm specimens. When a side groove is introduced in a 10mm specimen, the crack growth rate is approximately similar to that of 25mm specimen. The effective thickness expression of $B_e = B_0 - (B_0 - B_N)^2 / B_0$ is the most appropriate to evaluate the crack growth rate of side-grooved specimen. Fatigue crack growth rates can be well described by ΔK_{eff} of the crack closure points in regardless of all thickness and side-grooved specimens.

1. 서론

최근 항공기나 압력용기와 같이 높은 신뢰성

을 요구하는 기기나 구조물에 대한 설계에 손상 허용설계(damage tolerance design)방법이 많이 적용되고 있어 균열진전에 대한 연구는 그 중요

* 충남대학교 기계설계공학과

** 한국가스공사 연구개발원

성을 더해 가고 있다.

주로 피로균열진전에 관한 연구는 동일한 두께와 형상을 갖는 시편의 응력비에 따른 균열진전거동의 차이에 대한 연구가 집중적으로 이루어져왔다^{1,2)}. 그러나 실제 구조물에서는 두께가 일정하지 않아, 두께의 변화에 따라 응력상태가 달라질 수 있으며 제조과정이나, 사용 중에 구조물에 존재하게 되는 결함은 표면균열(surface crack)의 형태를 갖는 경우가 대부분이다. 표면균열에서는 표면부근의 평면응력상태(plane stress)와 내부의 평면변형률상태(plane strain)가 동시에 존재하여 각각의 다른 양상의 균열진전특성을 가지고 균열이 진전하기 때문에 이들의 정확한 균열진전거동을 파악하기 위해서는 이러한 응력상태에 따른 균열진전특성의 차이를 분석하여 실제 구조물의 설계에 적용하는 것이 바람직하다³⁻⁸⁾.

본 연구는 재료의 항복응력이나 시편 두께의 비교 범위에 따라 균열진전의 차이가 있을 수 있다고 판단되어 재료의 선택에 있어서는 항복응력이 비교적 큰 마레이징강과 작은 Al 7075-T6을 선택하였다. 또한 시편 두께를 3, 10, 25 mm로 범위를 비교적 크게 하였으며 응력비 $R=0.1$ 로 설정하였다. 시편 두께의 변화에 따른 안정성장영역의 균열진전거동과 균열단합점을 검출하여 비교 고찰하였다. 특히 균열단합값 측정 시에는 시편 전체의 균열단합거동을 측정하도록 하여 단순한 시편 두께의 치수변화가 아닌 두께의 변화에 따른 응력상태의 변화를 고려하여 균열진전특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

실험에서 사용된 재료는 비행기의 랜딩기어, 급형재료로 많이 사용되는 고강도 고인성 재료인 마레이징강과 항공기 구조용으로 많이 쓰이는 Al 7075-T6 로써 각각의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2 및 Table 3과 같다. 시편은 Fig. 1과 같이 CT시편으로 ASTM E 647⁹⁾에 따라 설계하였으며 시편의 채취방향은 균열진전방향이 판재의 압연방향과 수직인 I-T방향으로 하였다. 시편의 두께는 3, 10, 25mm로 변

화를 주었다. Al 7075-T6의 두께 10mm 시편에는 Fig. 2와 같이 노치각도 45° , 노치반경 0.5 mm로 하는 측면홈을 주어 순두께가 7.5mm가 되도록 하는 25% 측면홈 시편이 되도록 하였다.

사용한 시험기는 20톤용 SHIMADZU 전기유압식 피로시험기로 4톤을 최대하중 범위로 하고 하중 반복수는 5Hz, 파형은 정현파, 응력비는 $R=0.1$ 로 하여 일정하중하에서 실험하였다. 균열길이의 측정은 100배 디지털 이동현미경을 사용하여 앞면과 뒷면에서 1/1000mm까지 측정하여 평균값을 취하였다. 균열단합점¹⁰⁾은 정확한 값을 산출하기 위해서 0.1Hz로 하중 반복수를 낮추어 측정하였다.

Table 1 Chemical compositions of maraging steel(wt%)

Composition Material	Ni	Co	Mo	Ti	Al	C	Mn	Si	P	S
Maraging	17	7	4.6	0.3	0.05	~	~	~	~	~
	~	~	~	~	~	0.03	0.1	0.1	0.01	0.01
	19	8.5	5.2	0.5	0.15					

Table 2 Chemical compositions of Al 7075-T6(wt%)

Composition Material	Cu	Mg	Zn	Cr	Fe	Si	Mn	Ti
Al7075-T6	1.20	2.10	5.10	0.18	~	~	~	~
	~	~	~	~	0.7	0.5	0.3	0.2
	2.0	2.90	6.10	0.40				

Table 3 Mechanical properties of specimens

Properties Material	Yield Strength σ_y (MPa)	Tensile Strength σ_u (MPa)	Young's Modulus E(MPa)	Poisson's Ratio, ν
Maraging steel	1690.1	1754.9	182352.9	0.31
Al7075-T6	507.8	598.03	70980.4	0.33

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열진전속도에 미치는 시편 두께의 영향

Fig. 3은 마레이징강을 응력비, $R=0.1$ 에서 시편두께의 변화에 대한 $da/dN-\Delta K$ 선도이다. 균열진전속도가 시편 두께의 변화에 관계없이 하

나의 곡선으로 모이고 있어 진전속도의 차이가 없음을 알 수 있다.

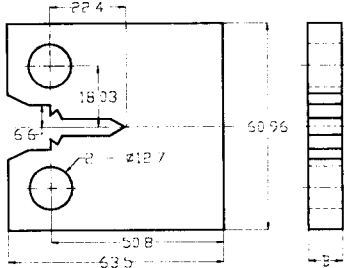


Fig. 1 Geometry of CT specimen

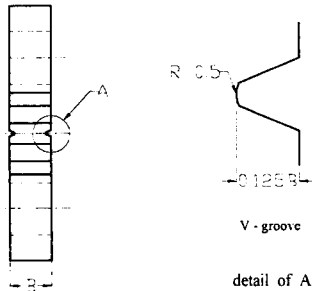


Fig. 2 Geometry of side-grooved CT specimen

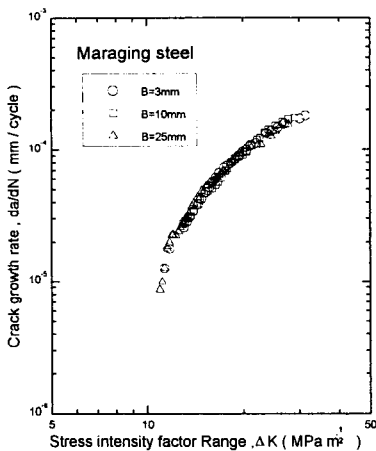


Fig. 3 Fatigue crack growth rate as a function of ΔK for maraging steel

Fig. 4는 균열열림비가 두께의 변화에 거의

영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 본 실험에 적용된 하중범위에서 $B > 5(K_{max}/\sigma_y)$ 의 평면변형률조건¹¹⁾을 만족하는 시편의 두께는 1.5mm 정도로 마레이징강 시편은 평면변형률조건을 만족하고 있기 때문에 시편 두께의 변화가 균열진전 속도에 영향을 미치지 않고 있다.

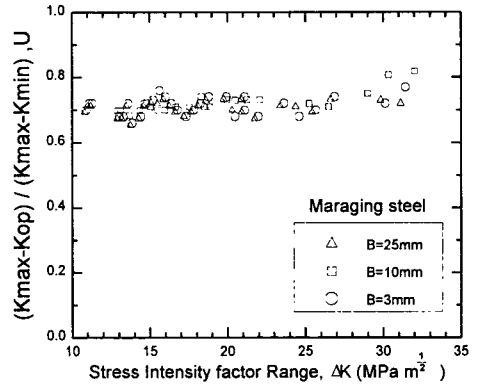


Fig. 4 Comparison of crack closure opening ratio of all thickness specimen for maraging steel

Fig. 5는 Al 7075-T6를 응력비 $R=0.1$ 에서 시편 두께의 변화에 대한 $da/dN-\Delta K$ 선도이다. 균열진전속도는 두께 3mm, 10mm 시편보다 25mm 시편에서 균열진전속도가 더 빠르게 성장하고 있으며, 두께 3mm와 10mm 시편에서는 균열진전속도의 차이가 거의 없이 동일 곡선상에서 진전하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 균열 열림비는 균열진전속도의 결과와 비슷하게 25mm 시편에서 3mm, 10mm 시편 보다 더 크게 나타났다. 그리고 3, 10mm 시편의 균열열림비는 거의 동일하게 나타났다. 본 실험에 적용된 하중범위에서 평면변형률 조건을 만족하는 시편의 두께는 5mm 정도로 10, 25mm 시편에서는 평면변형률상태를 만족하나 3mm 시편은 만족하지 못하여 평면응력상태로 예측된다. 그러나 실제 실험결과에서는 평면변형률상태로 예측된 10mm 시편이 예측과는 달리 평면 응력상태로 본 3mm 시편에 가까운 진전거동을 나타내고 있어 Al 7075-T6에서는 마레이징강의 실험결과와 달리 평면변형률 조건의 평력상태에 측이 정확하게 적용되지 않았다.

Al 7075-T6에서 나타난 균열진전속도의 차이는 시편 두께의 변화에 의한 것이라기 보다는 두께의 변화에 따른 응력상태의 변화, 그리고 이에 따른 균열열립비의 차이에 의하여 진전속도가 다르게 나타난 것이다. 이렇게 응력상태에 따라 균열진전거동이 차이가 발생한다는 것은 마레이징강에서 두께의 변화에 관계없이 진전속도가 같게 나타난 것이나, Al 7075-T6의 두께 3, 10mm 시편 비교에서 두께의 변화가 있음에도 진전속도의 변화가 나타나지 않은 것으로 잘 알 수 있다.

특히 Fig. 7에서 평면응력상태에서의 균열열립이 표면균열에서 U_c/U_a 값이 일반적으로 나타나는 값과 비슷한 0.85-0.95 범위에 있어 본 연구결과에 신뢰성을 더해준다³⁾.

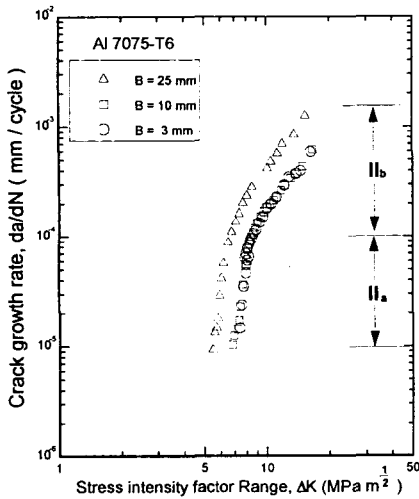


Fig. 5 Fatigue crack growth rate as a function of ΔK for Al 7075-T6

이렇게 응력상태에 따라 균열진전거동의 차이가 발생하므로 균열진전거동을 정확하게 예측하기 위해서는 시편 두께의 변화에 따른 응력상태를 정확하게 평가하는 것이 중요하다. 그러나 아직 피로 균열진전거동을 정확하게 적용되는 응력상태 평가법이 제안되어 있지 않아 파괴인성에 사용된 응력상태 평가법을 사용할 수 있으나, 본 연구결과와 같이 재료에 따라 결과가 상이하게 나타날 수 있음을 알 수 있다.

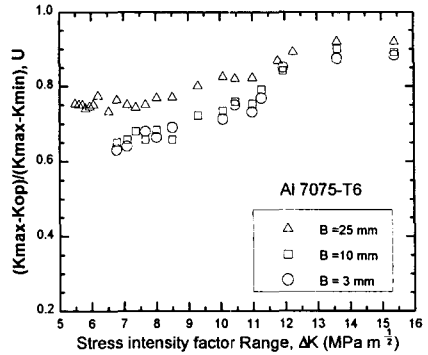


Fig. 6 Comparison of crack closure opening ratio of all thickness specimen for Al 7075-T6

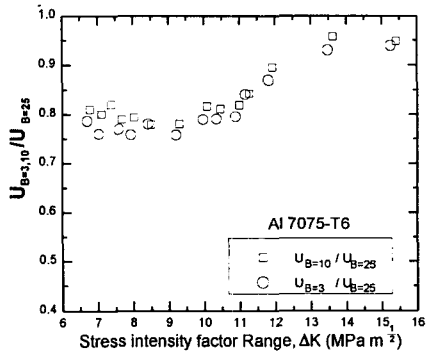


Fig. 7 Comparison of crack closure opening ratios of 10, 3mm thickness specimen and 25mm thickness specimen for Al 7075-T6

Table 4 Material constants m and C of maraging steel

Thickness	Constants	
	m	C
3 mm	2.35	5.21 E-9
10 mm	2.41	3.73 E-9
25 mm	2.7	1.31 E-9

Table 5 Material constants m and C of Al 7075-T6

B (mm)	Region	m	C
3 mm	II-a	14.24	4.51E-25
	II-b	2.318	5.42E-8
10 mm	II-a	14.24	4.92E-25
	II-b	2.318	5.75E-8
25 mm	II-a	13.41	4.51E-25
	II-b	3.23	5.42E-8

Table 4와 5는 마레이징강 및 Al 7075-T6에 대한 Paris식¹⁾에서의 재료상수 m 과 C 를 나타낸 것이다. 마레이징강은 두께가 증가할수록 미소한 크기로 m 이 증가함을 알 수 있다. 알루미늄 합금에서는 재료내부에 존재하는 미시조직상의 개재물의 영향이나 소성역의 크기 또는 응력상태의 변화¹²⁾에 기인하여 10^{-4} m/cycle 부근에서 변곡점이 발생되고 있어 균열진전거동은 이 점을 기준으로 II-a와 II-b로 나눌 수 있다. 이렇게 균열진전거동을 두가지 영역으로 나누어 관찰했을 때 균열진전의 가속화를 표시하는 균열진전속도 변화율값 m 이 II-a에서는 평면응력상태(3mm, 10mm)가 평면변형률상태인 25mm 시편보다 더 컸으나 II-b에서는 반대로 평면변형률 상태(25mm)에서 더 크게 나타났다.

3.2 측면홈 시편의 피로균열진전거동

평면변형률조건을 만족하지 못하는 시편의 경우에는 측면홈을 주어 평면변형률상태에 가까운 결과를 얻을 수 있다고 보고되고 있다¹³⁾. 따라서 평면응력 상태에 가까운 진전거동을 보이는 Al 7075-T6의 10mm 시편에 측면홈을 주어 실험한 결과를 시편 두께 10mm와 25mm 시편 결과와 비교하여 균열진전거동에 미치는 측면홈의 영향을 고찰하여 보았다.

과피 인성에서는 측면 홈의 영향을 고려하는 방법으로는 시편의 두께 B 를 적절히 수정한 유효 두께 B_e 를 기존의 세가지 식에 그대로 적용하도록 제안된 두께의 수정방법은 다음과 같다¹⁴⁾.

$$B_e = B_o - (B_o + B_N)^2 / B_o \dots\dots\dots (1)$$

$$B_e = (B_o \times B_N)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

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

여기서 B_e 는 초기 두께(effective thickness)이다. B_o 는 각각 측면홈이 없을 때의 초기 시험편의 두께이며 B_N 은 측면홈의 크기를 뺀 순두께(net thickness)를 나타내고 있다.

Fig. 8은 측면홈을 낸 시편을 3가지 유효두께 평가식에 의해 구한 결과와 측면홈이 없는 10mm 시편의 결과를 비교하기 위해 함께 나타낸 $da/dN - \Delta K$ 선도이다. 측면홈을 가진 시편의 균열진전속도는 유효두께 평가식 중 2가지의 경우

의 균열진전속도보다 크게 나타났다. 또한 II-a 영역과 II-b영역으로 나누어 보았을 때, II-a영역에서의 균열진전속도 변화율이 측면홈 시편에서 얻은 결과는 측면홈이 없는 시편과는 다르게 나타나고 있어 전체적인 균열진전거동이 평면응력상태인 10mm 시편과는 다르게 나타나고 있다.

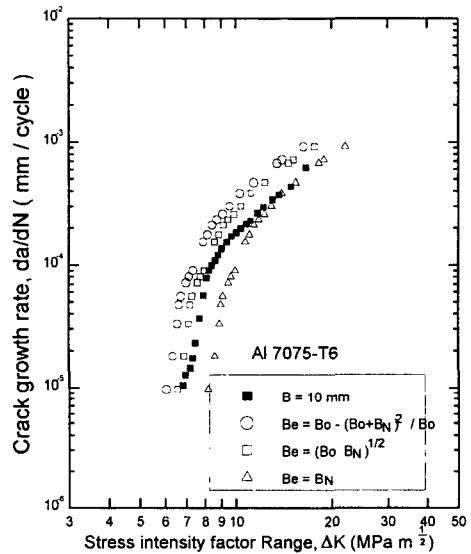


Fig. 8 Comparison of various effective thickness expression to account for the effect of side-grooved on ΔK evaluation

Fig.9는 측면홈을 낸 시편을 3가지 유효두께 평가식에 의해서 구해진 결과와 측면홈이 없는 25mm 시편의 결과를 비교하기 위해 나타낸 $da/dN - \Delta K$ 선도이다. 두께 평가식에 의한 측면홈 시편의 균열진전속도가 유효두께 평가식에서 구해진 값보다 작게 나타나고 있다. 측면홈 시편의 시험결과를 II-a영역과 II-b영역으로 나누어 비교해 보았을 때, II-b영역에서의 균열진전속도 변화율이 10mm 시편의 비교와는 달리 25mm 시편과의 비교에서는 거의 비슷하게 나타나고 있다.

Fig. 10은 측면홈 시편과 25mm 시편의 균열열림비를 ΔK 변화에 따라 정리한 것이다. 두께 25mm 시편과 측면홈 시편의 균열열림비가 거의 비슷하게 나타나고 있는 것으로 보아 측면홈

시편의 응력상태가 평면변형을 상태에 가깝다는 것을 알 수 있다. 이렇게 측면홈을 지닌 시편이 평면변형률상태에 있다면 세 가지 유효 두께 평가식중 $B_e = B_0 - ((B_0 - B_N)^2 / B_0)$ 에 의한 평가식이 평면변형률 상태의 진전거동에 가장 가까운 거동을 나타내므로, CT 시편의 피로균열진전거동에서의 측면홈 시편의 유효두께 평가식은 $B_e = B_0 - ((B_0 - B_N)^2 / B_0)$ 이 가장 적합하다고 할 수 있다. 이는 CCT 시편에 대한 연구결과와 같게 나타나고 있다¹⁴⁾.

Table 6은 Al 7075-T6에 대하여 II-a, II-b 영역에서 재료상수 m값과 C값을 구한 것이다. 이와 같이 평면 변형률상태를 만족하지 못하고 평면응력상태의 거동을 보이는 두께 10mm의 시편에 측면홈을 주어 얻은 균열진전속도와 균열 열림비가 평면변형률 상태인 25mm 시편에 가깝게 나타났다.

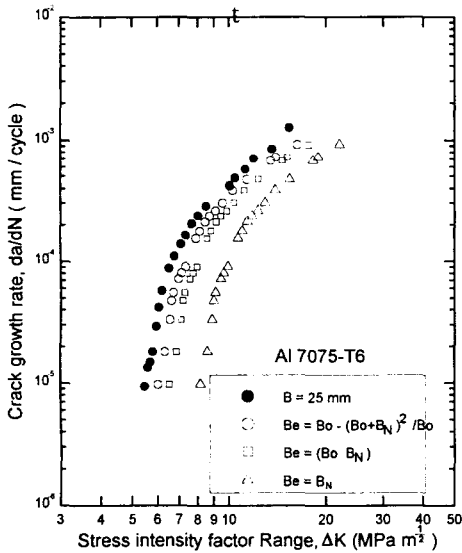


Fig.9 Comparison of various effective thickness expression to account for the effect of side-grooved on ΔK evaluation

3.3 유효응력확대계수폭에 의한 균열진전속도

앞절에서는 두께의 변화에 따른 균열진전거동과 측면홈 시편의 균열진전거동에서의 균열단 힘점을 측정하였다. 이러한 균열단 힘점을 이용하

여 유효응력확대계수 폭 ΔK_{eff} 를 사용하여 정리하여 균열진전속도 da/dN 으로 정리한 결과는 Fig. 11, 12, 13, 14와 같다.

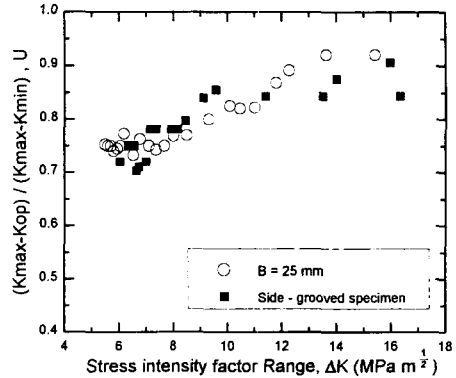


Fig. 10 Crack opening ratios of side-grooved specimen and 25mm thickness specimen as a function of ΔK

Table 6 Material constants m and C of side-grooved specimen

Region	m	C
II-a	12.9	2.53E-22
II-b	3.156	6.07E-9

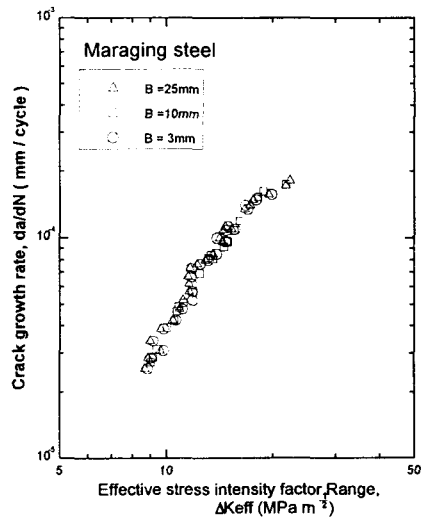


Fig. 11 Fatigue crack growth rate as a function of ΔK_{eff} for maraging steel

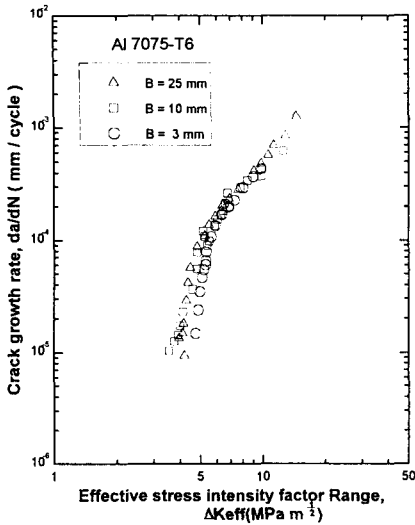


Fig. 12 Fatigue crack growth rate as a function of ΔK_{eff} for Al 7075-T6

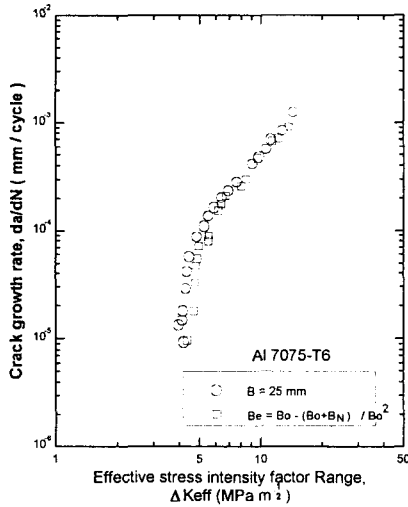


Fig. 13 Fatigue crack growth rate as a function of ΔK_{eff} for 25mm thickness specimen and side-grooved specimen for Al 7075-T6

Fig. 11의 마레이징강과 Fig. 13의 측면홈 시편의 비교에서는 Fig. 4와 Fig. 10에서 알 수 있듯이 균열열림비의 차이가 거의 없어 균열 진전 속도가 하나의 곡선으로 잘 정리되고 있다. Fig. 12는 Al 7075-T6에 대해 ΔK_{eff} 를 사용하여 정리

하였을 때 균열 진전 속도는 응력상태의 차이에 관계없이 비교적 하나의 곡선으로 잘 정리되었다.

또한 Fig. 14에서와 같이 Al 7075-T6의 모든 시편에 대해 ΔK_{eff} 를 사용하여 정리하였을 때 응력상태 및 측면홈 시편에 관계없이 하나의 곡선으로 잘 모아짐을 알 수 있다. 따라서 응력상태의 변화 및 측면홈에 따른 균열진전속도는 일차적으로 균열단합 현상에 의해 지배되는 것으로 사료된다.

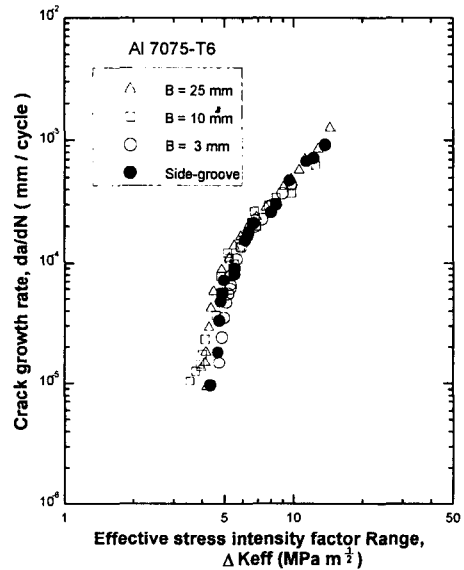


Fig. 14 Fatigue crack growth rate as a function of ΔK_{eff} for all thickness and side-grooved specimens for Al 7075-T6

4. 결 론

마레이징강 및 Al 7075-T6에 대하여 시편 두께 3, 10, 25mm로 변화를 주어 피로균열진전시험을 수행하고 균열진전속도에 미치는 두께의 영향을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시편 두께의 변화에 따른 마레이징강의 균열진전속도의 영향이 나타나지 않으나, Al 7075-T6의 경우는 두께 변화에 따라 응력 상태의

- 변화에 기인하는 균열 진전 속도의 차이가 나타난다.
- 2) Al 7075-T6에서 두께 25mm의 균열진전속도는 두께 3, 10mm의 진전속도보다 빠르며 이 차이는 본 연구에서 측정된 균열 단힘으로 잘 설명된다.
 - 3) Al 7075-T6에서 평면응력상태인 두께 3, 10 mm의 균열열림비 $U_{B=3}$, $U_{B=10}$ 가 평면 변형률상태인 두께 25mm의 균열열림비 $U_{B=25}$ 보다 작으며, $U_{B=10}/U_{B=25}$, $U_{B=3}/U_{B=25}$ 는 0.75~0.95의 범위에 있다.
 - 4) 평면변형률상태를 만족하지 못하는 두께 10 mm의 시편에 측면홈을 도입하면 평면변형률 상태에 가까운 균열진전속도와 균열열림비를 얻을 수 있다.
 - 5) 측면홈을 낸 시편의 유효두께 평가식은 $B_e = B_0 - ((B_0 - B_N)^2 / B_0)$ 을 이용하면 균열진전속도를 정확히 평가 할 수 있다.
 - 6) 균열단힘을 측정하여 유효응력확대계수폭으로 평가하면, 균열진전속도는 시편 두께 및 측면홈의 유무에 관계없이 비교적 잘 일치한다.

참 고 문 헌

- 1) P.C. Paris, and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Transactions of ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 85, No. 4, pp. 528~534, 1963.
- 2) W. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, pp. 230~259, 1971.
- 3) N.A. Fleck, I.F.C. Smith and R.A. Smith, "Closure Behavior of Surface Cracks", Fatigue Engineering Material Structure, Vol. 6, pp. 225~239, 1983.
- 4) W.J. Mills and R.W. Hertzberg, "The Effect of sheet thickness on fatigue crack retardation in Al 2024-T3 Aluminum Alloy", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 705~711, 1975.

- 5) F.A. Heiser, and W. Mortimer, "Effect of thickness and orientation on fatigue crack growth in 4340 steel", Metal Transactions, Vol. 3, pp. 2119~2123, 1972.
- 6) H.G. Delorenzi and C.F. Shih, "3-D Elastic-Plastic Investigation of Fracture Parameters in Side-Grooved Compact Specimen", International Journal of Fracture, Vol. 21, No. 3, pp. 195~220, 1983.
- 7) W.G. Clark and H.E. Trout, "Influence of Temperature and Section Size on Fatigue Crack Growth Behavior in Ni-Mo-V Alloy Steel", Engng. Fracture Mechanics, Vol. 1, No. 2, pp. 107~123, 1970.
- 8) S.K. Putatunda and J.M. Rigsbee, "Effect of Specimen Size on Fatigue Crack Growth Rate In AISI 4340 Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 22, No. 2, pp. 335~345, 1985.
- 9) ASTM E 647-91, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", pp. 674~701, 1975.
- 10) 菊川眞, 城野政弘, 田中建一, 高谷勝, "除荷弾性 Compliance法 による 低進展速度 領域 ねける 疲労きす 亀裂進展速度とき 亀裂開閉口挙動の測定", 材料, Vol. 276, pp. 899~903, 1975.
- 11) Annual Book of ASTM Standards, ASTM B 645-84, 1988.
- 12) 角田, R.M. Pelloux, "高力 Al 合金 にねける 微小切欠きの 疲労裂傳はおよび 坡斷壽命への影響", 材料, 第27巻, 第299號, pp. 961~966, 1978.
- 13) K.A. Shirakumar and J.C. Newman, Jr., "Verification of effective thickness for side-grooved compact specimen", Engng. Fracture Mechanics, Vol. 43, No. 2, pp. 269~275, 1992.
- 14) 김중환, 송지호, "측면홈 시험편을 이용한 평면 변형률 피로균열 진전에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제16권, 제1호, pp. 63~69, 1992.