

## 알루미늄 합금의 균열진전거동에 관한 연구 A Study on the Effect of Aluminum Alloy on the Crack Growth Behaviour

\* 이종형, \*\* 이현환, \*\*안세원, \*\*\*박신규  
\* Jong-Hyung Lee, \* \* Hyun-Whan Lee, \* \* \* Se-Won An , \* \* \* \* Shin-Kyu Park

### <Abstract>

According to the development of the aircraft industry, the fatigue strength of Aluminum Alloy becomes a great important material, but it seems that we don't understand an effect on the crack growth behaviour very well. This thesis is not only studied about the five kinds of 2017-T3, 2023-T3, 5083-0, 7075-T6, 7N01-T6 among the Aluminum Alloy which are the main materials of the aircraft, but also small or large relations against the fatigue strength of them. The consequence of the research was being progressed the accordance with the order. That is, The order is 2024-T3 > 2017-T3 > 7N01-T6 > 7075-T6 > 5083-0. These inclusion came out the acceleration phenomena in the crack growth behaviour among the high  $\Delta K$  section Nevertheless I figured out their effects were being ignored at the 2b step.

*Key Words : aircraft industry, crack growth behaviour, five kinds of 2017-T3, 2023-T3, 5083-0, 7075-T6, N01-T6 among the Aluminum Alloy*

### 1. 서 론

항공기 산업의 진보에 따라 고강도 알루미늄합금의 피로강도에 대해서 많은 관심을 갖게 되었다. 알루미늄의 균열진전

---

\* 정회원, 금오공과대학교 기계공학부 교수 \* Professor, School of Mechanical Engineering , K.I.T  
\*\* 김천농공고등학교 자동차과 교사 \*\* Gim Cheon Agriculture & Technical High School of Auto-mobile  
\*\*\* 금오공과대학교 생산기계 대학원 \*\*\* School of Mechanical Engineering , K.I.T  
\*\*\*\* 대구기능대학 \*\*\*\* Dae Gu Polytechnic College

알루미늄 합금의 균열진전거동에 관한 연구

거동은 파괴 사고해석에 있어서 파괴의 진행 상황을 알 수 있는 돌도 없는 직접적 증거를 주는 것을 말할 필요도 없지만. 파괴의 연구에 있어서도, 시료 내부의 파괴상황을 직접적으로 포착하는 수단으로써 다른 방법으로는 대체하기 어려운 귀중한 정보를 제공한다.

최근의 파괴역학의 진보 및 보급도 늘었고 균열진전거동이 파괴역학과 관련하여 취급하는 기회가 대단히 많아 매우 중요한 원인분석 및 결과를 도출하는데 사용되어진다.

특히, 고강도 알루미늄합금의 재료는 시효경화성 합금으로 기계적 성질이 개선되고 강도가 크고 성형성이 좋아 항공기 재료로 널리 사용된다. 그러나 고강도 알루미늄합금의 재료는 내력이 상승하고 연신이 감소함은 물론 응력부식 균열성이 있어 자연균열을 일으키는 경향이 있어 피로파괴의 원인으로 대두되고 있음이 사실이다. 항공기의 사고 대부분이 변동 피로하중에 의한 피로파괴의 요인으로 밝혀짐에 기인한다.

항공기는 기능적 특성상 고도의 안전성이 요구되며 항공기 운용상 변동피로하중에 노출되어 대부분의 구조적 파손은 이러한 피로 파괴에 기인하는 것으로 알려져 있으며 특히 오늘날 항공기의 경량화 되어 감에 따라 고강도 알루미늄합금의 피로강도에 대해서 많은 관심을 갖게 되었다. 특히 앞으로 항공기 구조에 대해서 손상허용설계가 도입되는 것은 기정의 사실로 피로균열진전 저항의 평가는 절실한 문제이다. 이와 같은 문제는 이미 외국에서는 활발히 조사되고 있다. 그러나 피로균열진전 저항을 지배하는 재료인자에 대해서 계통적인 이해는 얻어지고 있지 않은 것이 현실이다. 특히 2017-T3

합금, 2024-T3 합금, 5080-0합금, 7075-T6 합금, 7N01-T6합금 사이의 균열진전거동에 있어서 큰 차이는 옛날부터 문제가 되어, 아직 미해결로 남아 있다.

그래서 본 연구에서는 2017-T3합금, 2024-T3 합금, 5080-0합금, 7075-T6 합금, 7N01-T6합금 5종류의 피로균열의 차이를 분석하여서 피로 균열 진전 저항에 지배되는 균열진전거동에 미치는 영향에 대하여 연구하고자 한다.

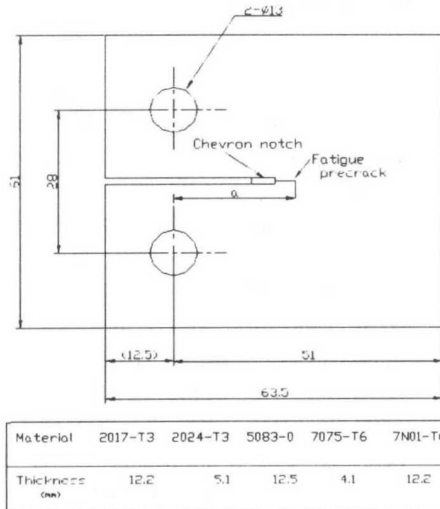


Fig. 1 Geometry of specimen

Table 1 Chemical Composition(wt %)

Material	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
2017-T3	4.18	0.61	0.32	0.70	0.54	0.194	0.034	-
2024-T3	4.3	-	-	0.6	1.5	-	-	-
5083-0	0.02	0.16	0.22	0.73	4.69	-	0.16	0.01
7075-T6	1.6	-	-	-	2.5	5.6	0.3	-
7N01-T6	0.057	0.078	0.27	0.44	1.51	4.13	0.26	0.102

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

실험에 사용한 재료는 알루미늄합금 2017-T3, 2024-T3, 5083-0, 7075-T6, 7N01-T6의 5종류이다. 그 화학성분, 기계적성질 및 열처리조건은 각각 Table 1, 2, 3에 표시하고 있다.

시험편은 Fig.1에 나타내는 평면치수가 1 inch인 compact 시험편을 사용하였다. 시험편 두께는 Fig. 1 중에 있는 표에 나타내고 있다.

또, 시험편의 채취방위는 압연방향이 균열면과 직교하는 L-T방위이다.

Table 2 Mechanical Properties Of Specimens

Material	$\sigma_{ys}$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\sigma_B$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{Flow}$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{ys}^c$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\delta$ %	$\Psi$ %
2017-T3	32.9	45.5	39.2	52.0	23.0	-
2024-T3	35.0	48.9	42.0	45.7	19.9	-
5083-0	14.7	29.5	22.1	34.3	19.3	20.9
7075-T6	52.1	57.5	54.8	60.5	12.3	-
7N01-T6	29.9	35.7	32.8	-	13.8	33.5

2.2 피로시험

시험편에  $a/w=0.25$  정도의 chevron notch를 넣은 후 하중점감법 (load decreasing)에 의해 예균열을 삽입하였다. 예균열 삽입 시작때의  $\Delta K$ 는  $30 \sim 40 \text{ kgf/mm}^{3/2}$  40이다. 또, 예균열 삽입 후, 시험시작 할때의  $\Delta K_i$ 보다 낮은  $\Delta K$ 에서 균열을 0.5~2.0 mm 정도로 하였다.  $\Delta K_i$ 의 값은 Table 4와 같다. 그 후 소정의 응력비(0.06, 0.4)로서 하중제어에 의해 편진 피로균열 진전시험을 행하였다. 이 경우 우선 최초에 하중증감(decreasing)시험에 의해 낮은 균열

Table 3 Solution Heat Treatment

Material	Anneal	Solution Heat treatment	Quench	Precipitation Hardening Treatment
2017-T3	-	495~510℃	Water Cooling	-
2024-T3	-	490~500℃	Water Cooling	-
5083-0	340~410℃ Air or Water Cooling	-	-	-
7075-T6	-	460~500℃	Water Cooling	115~125℃ 22 hr
7N01-T6	-	440~460℃	Air or Water Cooling	115~125℃ 24 hr

진전거동영역을 구하고, 그 다음에 일정 하중시험에 의해 높은 균열진전거동영역을 구하였다. 하중증감시험을 행할 때에는 지연효과를 피하기 위하여 1회의 측정마다  $\Delta K$ 의 폭을 충분히 적은값(-0.2~-0.5  $\text{kgf/mm}^{3/2}$ )으로 하고, 균열도 충분히 길게 했다. 또 하한계응력 확대계수 범위  $\Delta K_{th}$ 를 결정 할때는  $10^6$ 회의 반복에서 균열이 0.01 mm이하밖에 길게 하지 않고, 균열진전거동이  $10^{-8} \text{ mm/cycle}$  이하로 되도록  $\Delta K$ 의 값을 채용하였다.

실험에 사용한 시험기는 close loop방식의  $\pm 10$  ton 전기유압식 피로시험기이고 정현파형의 반복 인장-인장 피로시험을 행하였다. 균열진전거동은 시험을 중단하고 금속현미경에 의해 100~200배의 배율로서 시험편 양표면의 균열길이를 측정하여 구하였다. 계산은 양표면의 균열길이의 평균값을 사용하였다.

또, 응력확대계수범위  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ 은  $0.2 \leq a/w \leq 1.0$ 의 범위에서 충분한 정도를 갖는 다음식에서 구하였다.

$$\Delta K = f(a/w) \cdot \Delta P/B \cdot W^{1/2} \alpha^2$$

$$f(\alpha) = (2 + \alpha)(0.866 + 4.64 \alpha - 13.32 + 14.72 \alpha^3 - 5.6 \alpha^4)/(1 - \alpha)^{3/2}$$

여기에서  $\alpha$ 는 시험편 양표면에서 측정된 균열길이의 평균치,  $W$ 는 시험편폭,  $B$ 는 시험편 두께,  $\Delta P$  ( $P_{max}-P_{min}$ )는 하중범위이다.

Table 4 Value Of  $\Delta K_i$

Material	$\Delta K_i(\text{kgf}/\text{mm}^{3/2})$
2017-T3	20.0
	25.1
	35.4
2024-T3	23.1
5083-0	25.5
7075-T6	20.2
7N01-T6	20.1

### 3. 실험결과

#### 3.1 균열진전거동에 미치는 영향

Fig.2 ~ 6은 각각 2017-T3, 2024-T3, 5083-O, 7075-T6 및 7N01-T6합금의 응력비  $R=0.06$ 에서의 균열진전거동과 응력확대계수범위의 관계를 나타내고 있다.

그림중의  $\circ$ ,  $\diamond$  표시는 거시적 균열진전 속도  $da/dN$ 과 응력확대계수범위  $\Delta k$ 의 관계를 나타낸 것이다.

$\diamond$ 표시에서 나타내는 점은 하중증감 (decreasing) 시험에서 구한 data이고  $da/dN \leq 10^{-5} \text{mm}/\text{cycle}$ 의 범위에서 얻어지고 있다.

$\circ$ 표시는 하중일정시험에서 구한 것으로서  $da/dN \geq 10^{-5} \text{mm}/\text{cycle}$ 의 범위에서 얻어지고 있다.

또,  $\blacktriangle$ 표시에서 얻어지는 점은 후에 나타내는 striation의 평균간격  $S$ 를  $\Delta K$ 에

대해서 Plot한 것이다.  $da/dN$ 과  $S$ 의 양자는 소규모 항복상태가 만족되고 있다고 생각되는 범위에서 좋은 일치를 나타내고 있다.

Fig. 7에 각 재료의  $R=0.06$ 에서의  $da/dN-\Delta K$  관계를 정리한 것을 나타냈다. 여기에서 밝혀진 바와같이 동일한  $\Delta K$ 에 있어서 각재료의  $da/dN$ 의 대소관계는 낮은  $\Delta K$  레벨을 제외하면  $2024-T3 < 2017-T3 < 7N01-T6 < 7075-T6 < 5083-O$ 로 되어 있다.

다음으로 Fig. 8은 2017-T3합금의  $R=0.4$ 에서의  $da/dN, S$ 와  $\Delta K$ 의 관계를 나타낸 것이다.  $R=0.06$ 결과와 비교하면 종래의 결과와 같이  $R$ 이 큰 0.4의 쪽이 동일한  $\Delta K$ 에 있어서  $da/dN$  및  $S$ 함께 큰값을 나타내고 있다.

Fig. 2~6 및 Fig. 8에 나타내는  $da/dN$  및  $S$ 와  $\Delta K$ 의 관계를 Paris법칙에 근거해서 다음식으로 둔 때에 최소2승법에 의해 구한  $D_1, m_1$  및  $D_2, m_2$ 의 값을 각각 Table 5, 6에 나타냈다.

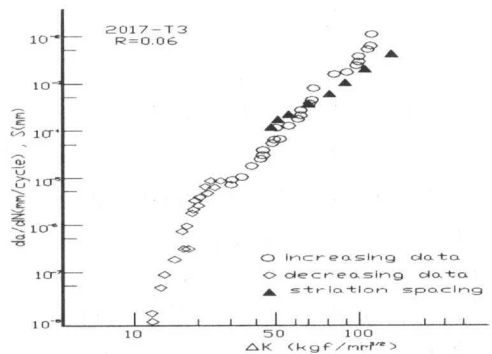


Fig. 2 Relationship between of  $da/dN$  and  $\Delta K$  (2017-T3)

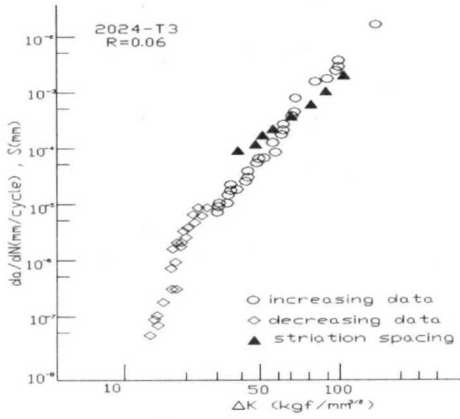


Fig.3 Relationship Between of da/dN and ΔK (2024-T3)

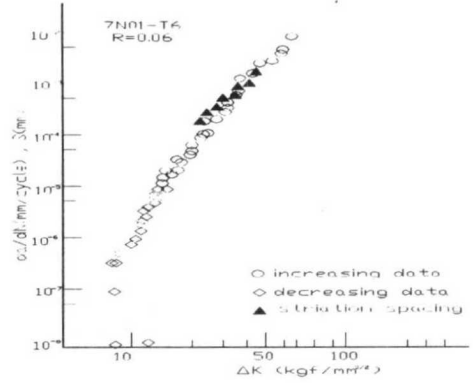


Fig. 6 Relationship between of da/dN and ΔK (7N01-T6)

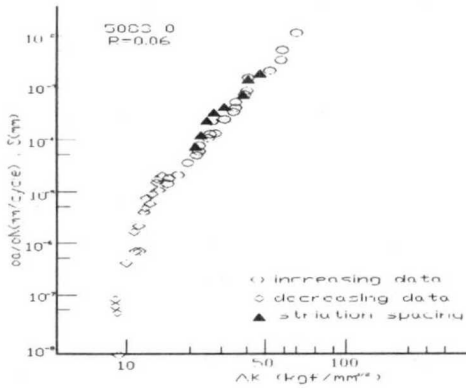


Fig. 4 Relationship between of da/dN and ΔK (5083-0)

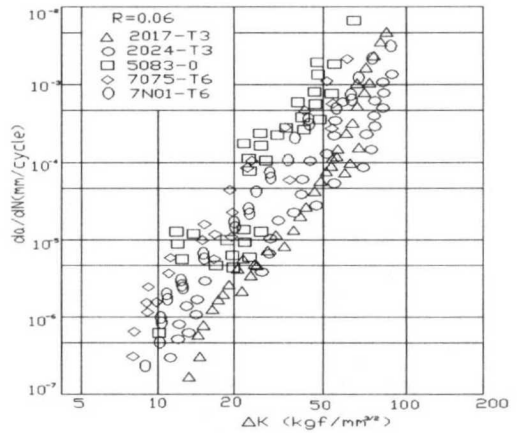


Fig. 7 Relationship between of da/dN and ΔK

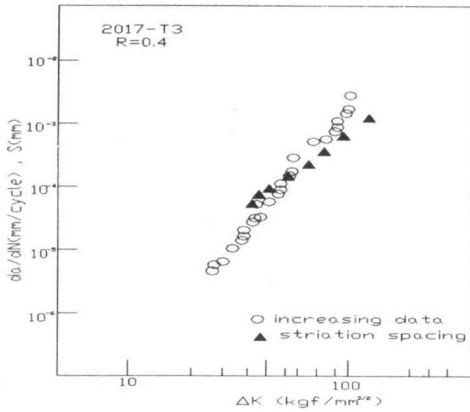


Fig. 8 Relationship between of da/dN and ΔK, S-ΔK (2017-T3 , R=0.4)

Table 5 Value of D<sub>1</sub>, m<sub>1</sub>

Material	D <sub>1</sub>	m <sub>1</sub>	
2017-T3 (R=0.4)	6.84×10 <sup>-11</sup>	4.24	ΔK=25~65
(R=0.06)	4.73×10 <sup>-11</sup>	4.09	ΔK=35~75
2024-T3(R=0.06)	4.38×10 <sup>-10</sup>	3.45	ΔK=35~80
5083-0 (R=0.06)	1.10×10 <sup>-8</sup>	2.89	ΔK=25~60
7075-T6(R=0.06)	1.61×10 <sup>-8</sup>	2.73	ΔK=23~70
7N01-T6(R=0.06)	9.53×10 <sup>-9</sup>	2.76	ΔK=26~80

Table 6 Value Of D<sub>2</sub>, m<sub>2</sub>

Material	D <sub>2</sub>	m <sub>2</sub>
2017-T3(R=0.4)	1.65×10 <sup>-8</sup>	2.74
(R=0.06)	3.34×10 <sup>-9</sup>	3.02
2024-T3(R=0.06)	3.16×10 <sup>-8</sup>	2.32
5083-0 (R=0.06)	6.01×10 <sup>-8</sup>	2.41
7075-T6(R=0.06)	9.92×10 <sup>-8</sup>	2.21
7N01-T6(R=0.06)	8.90×10 <sup>-8</sup>	2.18

#### 4. 결론

2017-T3, 2024-T3, 5083-0, 7075-T6 및 7N01-T6의 5종류의 Al 합금에 대해서 피로균열진전거동을 조사하여 이하의 결론을 얻었다.

(1) 5종류의 Al 합금의 피로균열진전 저항의 대소 관계는 저 ΔK 레벨을 제외, 2024-T3 > 2017-T3 > 7N01-T6 > 7075-T6 > 5083-0 로 되고 2XXX 계 합금의 피로균열진전 저항은 5XXX 계 및 7XXX 계의 그것보다도 꽤 높다.

(2) 개재물은 고 ΔK 영역에 있어서 균열진전거동에 가속현상을 일으키지만, 제2b 단계에 있어서는 그 영향을 거의 무시된다.

(3) da/dN 및 S와 ΔK의 관계를 Paris법칙에 근거해서 최소 2승법에 의해 구한 식은 다음과 같다.

$$da/dN = D_1 \cdot (\Delta K)^{m_1}$$

$$S = D_2 \cdot (\Delta K)^{m_2}$$

후 기

본 연구는 2003년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문으로 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 1) Hahn, G.T., and Simon, R., Engng. Fract. Mech., Vol.5, p, 523 (1973)
- 2) Bathias, c., Engng. Fract. Mech., Vol.10, p.267 (1978)
- 3) Mackay, T.L. Engng. Fract. Mech., Vol.11, p.753 (1979)
- 4) Kobayashi, H., Nakamura, H. and Nakazawa, H., Proc. 3rd ICM, Vol.3, p.529 (1979)
- 5) Srawley, F.E., Intl. J. Fract. Mech., Vol.12, p.475 (1976)
- 6) Batheas, c., Engng. Fract. Mech., Vol.10, p.267 (1978)
- 7) Kobayashi, H., JHPI, Vol.12, no.5,

p.247(1974)

- 8) Kershaw, J. and Liu, H. W., *Inter. J. Fracture Mech.*, Vol. 7, No. 3, p. 269 (1971)
- 9) Elber, W., *ASTM STP*, 486, p. 230 (1971)
- 10) Liu, H. W., *Scripta Metallurgica*, Vol. 14, p. 525 (1980)

---

(2003년 11월 29일 접수, 2004년 5월 20일 채택)