

판재 Al 2024-T3 합금재료에서 나타나는 두께별 피로균열진전지연거동에 관한 ΔK 환산법의 정량적분석

김 승 권* · 이 역 섭*†

* 인하대학교 기계공학과

A Quantitative Analysis of ΔK Conversion Method for the Retardation Behavior of Fatigue Crack Growth in Varying Thickness of Al 2024-T3 Sheet Alloy

Seung Gwon Kim* and Ouk Sub Lee*†

* Division of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received April 25, 2011 ; Revised September 14, 2011 ; Accepted October 7, 2011)

Key Words : Fatigue Crack Growth(피로균열진전), Thickness Effect(두께효과), Crack Growth Retardation Behavior(균열진전지연거동), Correlative Equation(상호관계식), Equivalent Effective Stress Intensity Factor Range(등가유효응력확대계수범위)

초록: 운송기계구조물의 제작에 사용되는 판재 알루미늄 합금재료는 일정한 피로응력조건하에서 두께에 따라 균열진전속도의 차이를 보인다. 이러한 두께효과는 판재 알루미늄합금의 주요한 피로파괴특성 중 하나이다. 본 연구에서는 일정한 피로응력조건하에서 실시한 후판 및 박판 Al 2024-T3 합금재료의 피로 시험을 통하여 두께효과를 파악하고, 이를 형상인자인 두께비, R_t 및 하중인자인 두께별 등가유효응력 확대비, U_t^{equ} 에 의한 상호관계식, $U_t^{equ} = f(R_t)$ 로 나타내었다. 그리고 두께효과에 의한 후판 대비 박판시 험편의 균열진전 지연거동을 ΔK 환산법을 사용하여 정량적으로 분석하였다. 두께효과의 경향을 정량적으로 나타내기 위해 두께감소율(DoT)과 응력확대계수범위, ΔK 의 감소율(DoS) 등의 값을 구하여 이들의 상호관계를 규명하였다.

Abstract: Sheet aluminum alloys used in manufacturing of machine structures for transportation show the difference of crack growth speed depending on thickness under the constant fatigue stress condition. The referred thickness effect is a major fatigue failure property of sheet aluminum alloys. In this work, we identified the thickness effect in fatigue test of thick plate and thin plate of Al 2024-T3 alloy under the constant fatigue stress condition, and presented the thickness effect to a correlative equation, $U_t^{equ} = f(R_t)$ which is determined by the shape factor, thickness ratio, R_t and the loading factor, equivalent effective stress intensity ratio depending on thickness, U_t^{equ} . And we analyzed quantitatively the crack growth retardation behavior in thin plate compared to thick plate by the thickness effect using ΔK conversion method. We obtained such values as decrement of thickness(DoT), decrement of stress intensity factor range, ΔK (DoS) and identified the relation between them to present the nature of thickness effect in this work.

- 기호설명 -

a : 균열길이
 N : 피로하중사이클수
 $2W$: 시편의 폭
 R : 하중비(응력비)

K : 응력확대계수
 ΔK_{app} : 적용응력확대계수범위
 m, C : 피로관련재료상수
 R_t : 두께비
 U_t^{equ} : 두께별 등가유효응력확대비
 ΔK_{eff}^{equ} : 등가유효응력확대계수범위
 DoT : 두께감소율
 DoS : ΔK 감소율

† Corresponding Author, leeos@inha.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

다양한 두께의 판재형태로 운송기계장치의 제작에 사용되는 금속재료의 피로파괴거동에 관한 연구는 안전설계를 위해 고려되어야 하는 중요한 사항이다. 그리고 일정한 피로응력조건하에서 금속재료의 두께에 따라 나타나는 균열진전지연거동 (Crack growth retardation behavior, CGRB)과 이로 인해 발생하는 피로수명의 차이는 주요한 피로파괴 특성에 의한 현상 중 하나이다.

금속재료의 기본적인 피로조건 중 응력비, R 은 피로균열성장률(Fatigue crack growth rate, FCGR)에 변화를 주는 요소이다.^(1,12) 피로균열성장률(FCGR)의 변화를 분석하는데 금속재료의 두께에 따라 나타나는 소성에 의한 균열단합현상의 영향이 알려져 있다.^(2,13)

그리고 일정한 피로응력조건하에서 피로균열성장률(FCGR)에 대한 두께의 영향은 금속재료의 피로강도를 평가하는 한 요소로 작용한다.⁽³⁾ 이러한 두께의 영향은 두께효과로 정의되며, 피로균열성장률(FCGR)과 관련하여 다음의 세가지 유형으로 요약된다. (a) 두께에 반비례하여 피로균열성장률 감소⁽⁴⁾ (b) 두께의 영향 무관⁽⁵⁾ (c) 두께에 정비례하여 피로균열성장률 증가하는⁽⁶⁾ 경향을 보인다.

균열선단 부근의 응력장은 두께가 증가함에 따라 평면응력에서 평면변형이 두드러지는 상태로 바뀌게 된다.

한편 평면변형과 비교하여 평면응력조건에서 확대되는 균열선단의 소성영역의 크기는 두께효과와 밀접하게 연관되어 있다. 일정한 피로응력조건하에서 알루미늄합금재료의 두께효과는 응력확대계수범위, ΔK 의 환산과정을 통하여 두께에 따른 피로파괴특성을 나타내는 하나의 인자로 작용할 수 있다.

본 연구에서는 일정한 응력조건하에서 후판 대비 박판 AI 2024-T3 합금재료의 피로시험에서 나타나는 두께효과를 파악하고, 이를 시험편의 형상인자 및 실험의 하중인자에 의한 상호관계식으로 나타내보았다.

상호관계식에 사용되는 형상인자와 하중인자는 각각 후판 대비 박판시험편의 두께비, R_t 와 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 로 구성된다. 그리고 상호관계식을 통해 후판 대비 박판시험편에서 나타나는 두께효과를 ΔK 로 환산하여 정량적으로 분석하였다.

환산과정은 상호관계식으로부터 박판시험편의

등가유효응력확대계수범위, ΔK_{eff}^{equ} 의 결정을 통해 이루어진다.

2. 기본이론 및 실험

2.1 판재 AI 2024-T3 합금재료의 피로균열전파

본 연구의 피로시험은 일정진폭하중조건하에서 시험편의 두께별로 구분하여 실시되며, 시험편의 유형은 CCT(Center Cracked Tension)이다.

피로균열성장률(FCGR), da/dN 과 응력확대계수범위, ΔK 는 다음의 식 (1), (2)와 같다.^(7,8)

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \tag{1}$$

여기서,

N_i 와 N_{i+1} : i 와 $i+1$ 번째 하중반복사이클수

a_i 와 a_{i+1} : $N = N_i$ 와 $N = N_{i+1}$ 의 균열길이

$$\Delta K = \Delta K_{app} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(g) \tag{2}$$

$$f(g) = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \cdot (\text{Polynomial term})$$

여기서,

ΔK_{app} : 작용응력확대계수범위

$\Delta \sigma$: 작용응력범위

a : 균열길이의 1/2

$2W$: 시험편의 폭

Paris' law 를⁽⁹⁾ 통한 da/dN 과 ΔK_{app} 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K_{app})^m \tag{3}$$

식 (3)에서 m 과 C 는 피로파괴특성을 나타내는 피로관련재료상수(Fatigue related material constant, FRMC)이며, ΔK_{app} 와 da/dN 을 각각 X, Y 축으로 하는 그래프에서 최소자승법에 의한 Linear fitting 을 통해 구한다.

2.2 두께비, R_t 와 두께별 등가유효응력확대비,

U_t^{equ} 의 상호관계

본 연구에서 사용된 판재 AI 합금시험편의 두께는 모두 3 종류이며, 각각 0.635 mm, 1.016 mm,

Table 1 Relative division of fatigue test

Thickness\Case	Case A	Case B	Case C
Thin plate (mm)	0.635	1.016	0.635
Thick plate (mm)	1.016	2.032	2.032

2.032 mm 이다.

각 두께별 피로시험결과는 아래의 표와 같이 후판 및 박판으로 조합된 3 개의 Case 로 분류하였다. 각 Case 에 대한 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 는 아래의 과정을 통하여 정의된다.

먼저 박판시험편에 대한 da/dN 및 ΔK_{app} , ΔK_{eff}^{equ} 로부터,

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K_{app})^m = C_0 \cdot (\Delta K_{eff}^{equ})^{m_0} \quad (4)$$

여기서,

m_0, C_0 : 후판시험편의 FRMC

m, C : 박판시험편의 FRMC

위의 식 (4)를 ΔK_{eff}^{equ} 에 관하여 정리하면,

$$\Delta K_{eff}^{equ} = \left(\frac{C}{C_0} \right)^{1/m_0} \cdot (\Delta K_{app})^{m/m_0} \quad (5)$$

식 (5)에 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 개념을 적용하여 나타내면 다음의 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta K_{eff}^{equ} = f(U_t^{equ}, \Delta K_{app}) = U_t^{equ} \cdot (\Delta K_{app})^{m/m_0} \quad (6)$$

그리고 식 (6)을 식 (4)에 대입하여 정리하면,

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K_{app})^m = C_0 \cdot \left(U_t^{equ} \cdot (\Delta K_{app})^{m/m_0} \right)^{m_0} \quad (7)$$

$$\therefore U_t^{equ} = \left(\frac{C}{C_0} \right)^{1/m_0} \quad (8)$$

식 (7) 및 식 (8)을 통하여 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 를 피로관련재료상수(FRMC)의 함수로 나타낼 수 있다. 피로시험에 사용된 판재 Al 2024-T3 합금재료의 두께비, R_t 는 아래의 식 (9)와 같다.

$$R_t = \frac{\text{Thickness of thin plate}}{\text{Thickness of thick plate}} \quad (9)$$

Table 2 Chemical composition of Al 2024-T3 aluminum alloy

(wt. %)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.5	0.23	4.46	0.58	1.44	0.04	0.03	0.02	Bal.

Table 3 Mechanical property of Al 2024-T3 aluminum alloy

Yield strength (MPa) (0.2 % offset)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
345	500	17

두께비, R_t 는 Case A; 0.625, Case B; 0.5, Case C; 0.3125 이다. 시험편의 형상인자인 두께비, R_t 에 대한 실험의 하중인자인 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 의 경향을 파악하기 위해 R_t 와 U_t^{equ} 를 각각 X, Y 축으로 하는 선도를 작성하여 R_t 와 U_t^{equ} 의 상호관계식으로 얻을 수 있다.

2.3 두께감소율에 따른 박판시험편의 응력확대계수범위, ΔK 의 조절효과

본 연구에서는 판재 Al 2024-T3 합금재료의 피로시험에서 나타나는 두께효과를 파악하고, 나아가 두께효과를 정량적으로 분석하는데 목적이 있다. 이를 위해 두께효과를 응력확대계수범위의 변동값으로 환산하여 나타내고자 하였다.

우선 정량적인 분석을 위한 요소로서 각 Case 별 두께감소율(Decrement of Thickness, DoT)과 이에 따른 응력확대계수범위, ΔK 의 감소율(Decrement of Stress intensity factor range, DoS)을 정의하였다. 그리고 이를 정량적으로 분석하여 두 요소 사이의 관계를 파악해 보았다.

R_t , U_t^{equ} 및 ΔK 등을 사용하여 두께감소율(DoT)과 응력확대계수범위, ΔK 의 감소율(DoS)을 식으로 표현할 수 있으며 아래의 식 (10), (11)과 같다.

$$DoT (\%) = (1 - R_t) \times 100 \quad (10)$$

$$DoS (\%) = \left(1 - \frac{\Delta K_{eff}^{equ}}{\Delta K_{app}} \right) \times 100$$

$$= \left(1 - U_t^{equ} \cdot (\Delta K_{app})^{\frac{m}{m_0}-1} \right) \times 100 \quad (11)$$

두께감소율(DoT)과 응력확대계수범위, ΔK 의 감

소율(DoS)을 각각 X, Y 축으로 하는 선도를 작성하여 상호관계를 파악할 수 있다.

2.4 시험편의 두께에 따른 피로균열전파시험

본 연구의 시험편재료는 판재 Al 2024-T3 합금이며, 재료의 화학적 조성 및 기계적 성질은 Table 2 와 Table 3 에 각각 나타내었다.⁽¹⁰⁾

시험편은 CCT(Center Cracked Tension) 형이고 길이방향이 압연방향과 수직한 T-L 방향이다.

Fig. 1 에 시험편의 형상을 자세히 나타내었다.⁽¹¹⁾ 예비균열길이 $2a_{ini}$ 는 가공된 초기균열길이로부터 일정진폭하중조건하에서 양방향으로 각각 1 mm 씩 성장한 자연피로균열의 선단까지 측정하여 채택하였다. 시험편의 두께를 제외한 형상 및 피로응력 조건 등 전반적인 피로시험조건은 동일하며, 모든 실험은 상온에서 수행되었다. 모든 피로시험은 10 ton 용량의 서보유압시험기를 사용하였으며 피로 하중조건은 다음과 같다.

$$\Delta\sigma = 48.228 \text{ MPa}$$

$$(\sigma_{max} = 64.304 \text{ MPa}, \sigma_{ys} \text{ 의 } 18.6 \%)$$

$$\text{하중비, } R = 1/4$$

하중파형은 위의 피로응력조건을 만족하는 10Hz 의 일정진폭 sine wave(사인파)이다. 두께 0.635 mm 와 1.016 mm, 2.032 mm 의 시험편에 대하여 모두 20 여차례의 실험을 실시하였으며, 실험

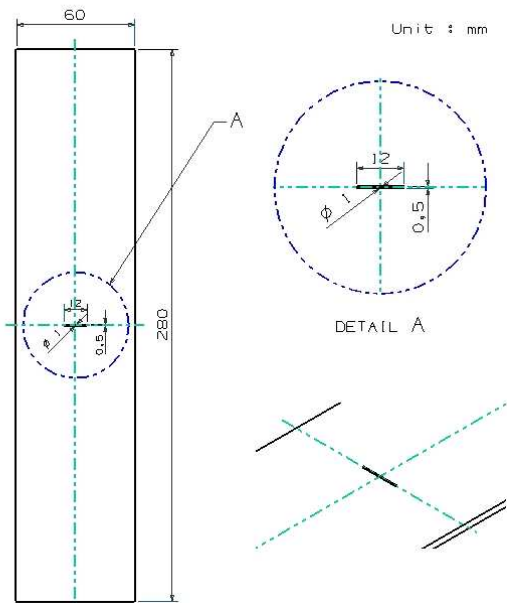


Fig. 1 Geometry of specimen

결과는 각 두께별로 분류되어 피로관련재료상수의 산출에 사용하였다. 후판시험편 및 박판시험편으로 조합된 3 가지 Case 에 대한 두께비, R_t 와 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 로부터 형상인자와 하중인자의 상호관계식, $U_t^{equ} = f(R_t)$ 을 얻을 수 있다.

3. 결과 및 검토

3.1 판재 Al 2024-T3 합금재료의 두께에 따른 피로균열전파특성

판재 Al 2024-T3 합금재료의 피로시험에서 나타나는 균열진전지연거동(CGRB)의 차이를 파악하기 위해 일정한 응력조건하에서 두께별 피로시험을 실시하였다. 각 두께별 피로시험결과인 균열길이, a 와 하중반복사이클수, N 의 선도를 Fig. 2 에 나타내었다.

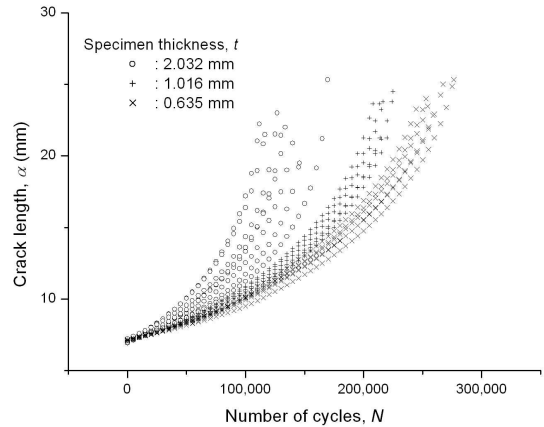


Fig. 2 Crack length plotted against the number of repeated cycles in Al 2024-T3 alloy

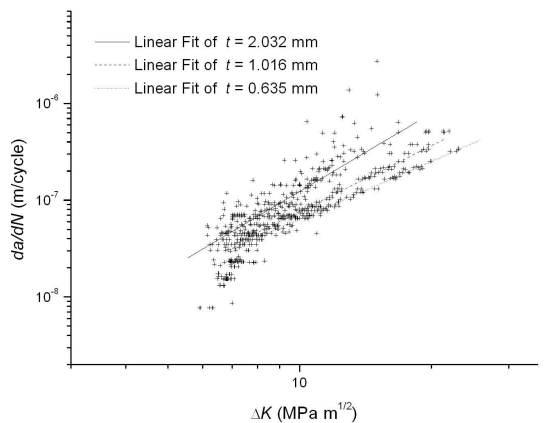


Fig. 3 Relationship between FCGR and stress intensity factor range in Al 2024-T3 alloy

Table 4 Average fatigue life depending on thickness

	Thickness of specimen, t		
	0.635 mm	1.016 mm	2.032 mm
Average fatigue life	270,817 cycles	221,408 cycles	134,965 cycles

Table 5 Mean value of m , C depending on thickness by least square method

	$R = 1/4, \Delta\sigma = 48.228 \text{ MPa}$		
	Thickness, t	m	$\log C$
Al 2024-T3	0.635 mm	1.97962	-9.174
	1.016 mm	2.26105	-9.37876
	2.032 mm	2.99105	-9.90389

각 두께별 피로균열성장률(FCGR), da/dN 과 적용응력확대계수범위, ΔK_{app} 의 선도를 Fig. 3 에 나타내었다.

본 연구의 피로균열진전시험으로부터 획득한 Al 2024-T3 합금재료의 두께에 따른 평균피로수명과 피로관련재료상수(FRMC)는 다음의 Table 4 및 Table 5 와 같다.

Fig. 2 및 Table 4 로부터 본 연구의 판재 Al2024-T3 합금재료는 일정한 피로응력조건하에서 박판시험편의 피로수명이 후판시험편에 비해 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있다.

Table 5 의 피로관련재료상수(FRMC)인 m , C 는 각 두께별 $da/dN - \Delta K_{app}$ 선도인 Fig. 3 의 Region II 에서 최소자승법에 의한 Linear fitting 을 통하여 구하였다. 이는 시험편의 일반적인 피로파괴특성인 Region II 의 피로관련재료상수를 본 연구의 분석에 공통으로 적용해보고자 하는 이유에서 비롯하였다. 이로부터 $da/dN - \Delta K_{app}$ 선도의 기울기, m 은 시험편의 두께에 정비례함을 알 수 있다.

위의 결과를 요약해 보면, 시험편의 두께효과로부터 나타나는 후판 대비 박판시험편의 피로수명연장현상은 $da/dN - \Delta K_{app}$ 선도의 기울기, m 과 반비례하고 Y 절편, C 와 정비례함을 확인할 수 있다.

3.2 형상인자와 하중인자의 상호관계식

후판 및 박판의 조합으로 구성된 3 가지 Case 에 대하여 시험편의 형상인자인 두께비, R_t 와 시험의 하중인자인 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 를 산출하여 다음의 표에 나타내었다.

Table 6 Thickness ratio, R_t and equivalent effective stress intensity ratio depending on thickness, U_t^{equ}

Case	R_t	U_t^{equ}	
A	0.625	1.35819	1.11593
		1.19617	1.24722
		1.27730	1.16872
B	0.5	1.41439	1.45873
		1.52993	1.56467
		1.46572	1.50704
C	0.3125	1.88833	1.62771
		1.71543	1.77049
		1.80267	1.68559

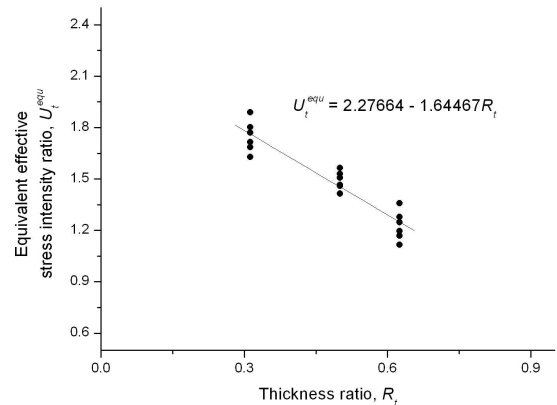


Fig. 4 Relationship between R_t and U_t^{equ}

여기서, U_t^{equ} 와 R_t 는 각각 식 (8), (9)와 같다.

R_t 를 X 축, U_t^{equ} 를 Y 축으로 하는 선도, Fig. 4 로부터 판재 Al 2024-T3 합금의 형상인자, R_t 와 하중인자, U_t^{equ} 의 관계를 파악할 수 있다. 본 연구의 R_t 와 U_t^{equ} 사이의 상호관계식은 $U_t^{equ} = 2.27664 - 1.64467 R_t$ 이다.

3.3 피로시험에서 나타나는 두께효과의 정량적 분석

판재 Al 2024-T3 합금재료의 형상인자, R_t 와 하중인자, U_t^{equ} 사이의 상호관계식, $U_t^{equ} = f(R_t)$ 로부터 후판 대비 박판시험편에서 나타나는 두께효과를 응력확대계수범위, ΔK 의 변화로 환산할 수 있다. 이에 대한 정량적인 분석을 위해 실험에서 적용되는 ΔK_{app} 와 함께 관계식, $U_t^{equ} = f(R_t)$ 에 의한 환산값인 등가유효응력확대계수범위, ΔK_{eff}^{equ} 를 구하여 서로 비교하였다.

먼저 각 Case 에 대한 박판시험편의 ΔK_{app} 및 ΔK_{eff}^{equ} 의 분포를 다음의 $da/dN - \Delta K_{app} \cdot \Delta K_{eff}^{equ}$ 선도로 나타내 보았다.

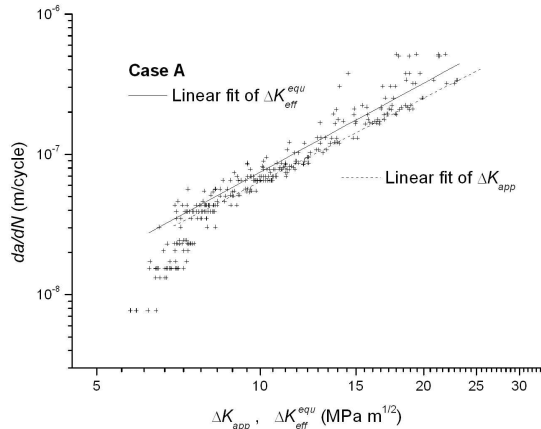


Fig. 5 Fatigue crack growth data of thin plate on Case A

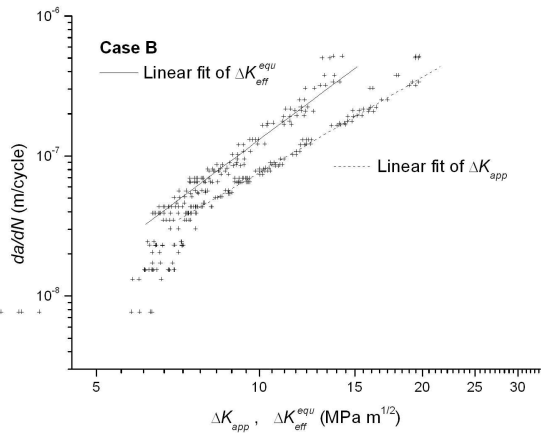


Fig. 6 Fatigue crack growth data of thin plate on Case B

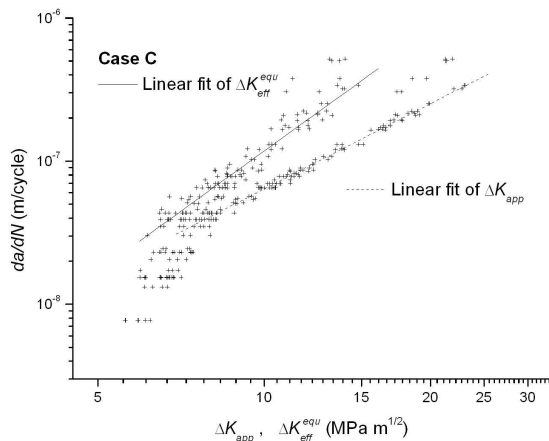


Fig. 7 Fatigue crack growth data of thin plate on Case C

후판의 두께가 1.016 mm 인 Case A 에 대하여 0.635 mm 의 두께를 갖는 박판시험편의 ΔK_{eff}^{equ} 값을 산출하고, ΔK_{app} 와 함께 Fig. 5 에 나타내었다. 그리고 후판의 두께가 2.032 mm 인 Case B 및 Case C 에 대하여 각각 1.016 mm 와 0.635 mm 의 두께를 갖는 박판시험편의 ΔK_{eff}^{equ} 값을 산출하고 ΔK_{app} 와 함께

Table 7 Mean value of m, C of thin plate in $da/dN - \Delta K_{app} \cdot \Delta K_{eff}^{equ}$ diagram depending on each case by least square method

Case	Thickness of thin plate,	ΔK_{app}		ΔK_{eff}^{equ}	
		m	$\log C$	m	$\log C$
A	0.635 mm	1.97962	-9.174	2.10787	-9.23492
B	1.016 mm	2.26105	-9.37876	2.88687	-9.76946
C	0.635 mm	1.97962	-9.174	2.78841	-9.71802

Table 8 Average decrement of ΔK on each case

	Case A	Case B	Case C
DoT (%)	37.5	50	68.75
ADoS (%)	8.27794	19.05994	24.6891

Figs. 6, 7 에 나타내었다.

위의 선도로부터 각 Case 별 박판시험편의 ΔK 감소의 경향을 확인할 수 있다. 이러한 ΔK 의 변화를 다음과 같이 분석해 보았다.

우선 위의 $da/dN - \Delta K_{app} \cdot \Delta K_{eff}^{equ}$ 선도에 대한 Linear fitting 을 통하여 박판시험편의 ΔK_{app} 및 ΔK_{eff}^{equ} 에 대한 피로관련재료상수(FRMC)인 m, C 값을 구하여 Table 7 에 나타내었다.

Table 7 을 통하여 ΔK 의 감소효과에 의해 박판 시험편의 피로관련재료상수(FRMC)인 m 값이 $da/dN - \Delta K_{app}$ 선도와 비교하여 $da/dN - \Delta K_{eff}^{equ}$ 선도에서 증가함을 알 수 있다. 그리고 각 Case 별 후 판 대비 박판시험편의 두께감소율(DoT)과 응력확대계수범위, ΔK 의 평균감소율(ADoS)은 다음과 같다.

DoT 와 ADoS 는 식 (12)와 식(13)으로부터 구하였다.

$$DoT (\%) = (1 - R_i) \times 100 \tag{12}$$

$$ADoS (\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta K_{app} - \Delta K_{eff}^{equ}}{\Delta K_{app}} \times 100 \tag{13}$$

여기서,

n : 각 Case 별 박판시험편의 개수

Table 8 을 통하여 두께감소율(DoT)이 높을수록 응력확대계수범위, ΔK 의 평균감소율(ADoS)이

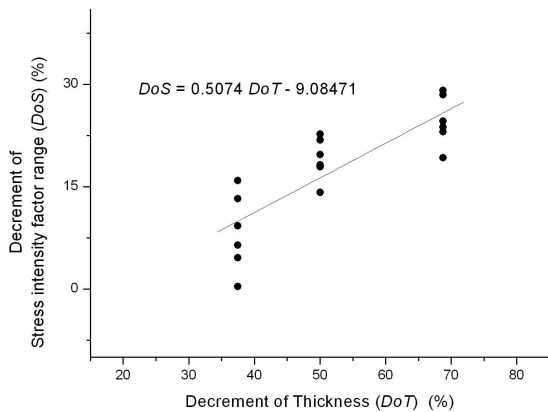


Fig. 8 Relationship between DoT and DoS

증가함을 알 수 있다. 두께감소율(DoT)과 응력확대계수범위, ΔK 의 감소율(DoS)을 선도로 표시하면 다음의 Fig. 8과 같다.

Fig. 8을 통하여 DoT와 DoS는 서로 정비례하며, 상호관계식은 $DoS = 0.5074 \cdot DoT - 9.08471$ 이다.

4. 결론

관재 AI 2024-T3 합금재료의 피로균열전파특성 중 하나인 두께효과를 정량적으로 분석하기 위해 각 두께별로 일정진폭하중조건에서의 피로시험을 실시하였다.

일정한 피로응력조건하에서 후판 대비 박판시험편의 두께효과에 의한 피로균열성장률(FCGR) 감소 및 피로수명연장현상 등을 시험편의 형상인자, R_t 와 실험의 하중인자, U_t^{equ} 의 상호관계식, $U_t^{equ} = f(R_t)$ 로 나타내었다.

그리고 상호관계식, $U_t^{equ} = f(R_t)$ 를 활용하여 본 연구에서 파악된 상대적으로 두께가 얇은 박판시험편의 두께효과를 ΔK 의 변화로 환산하여 정량적으로 분석하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 일정한 피로응력조건하에서 두께별 시험편에 나타나는 두께효과의 영향으로 후판 대비 박판시험편의 피로수명이 연장되는 경향을 보인다. 이는 시험편의 두께에 대하여 피로관련재료상수인 $da/dN - \Delta K_{app}$ 선도의 기울기, m 은 정비례하며 Y절편, C 는 반비례함을 의미한다.

(2) 피로시험에서 나타난 두께효과로부터 형상인자인 두께비, R_t 는 관재 AI 2024-T3 합금재료의 피로수명에 영향을 주는 인자이며, 시험편의 형상인자인 두께비, R_t 와 실험의 하중인자인 두께별

등가유효응력확대비, U_t^{equ} 로 구성되는 상호관계식, $U_t^{equ} = f(R_t)$ 를 구하였다. 본 연구의 상호관계식은 $U_t^{equ} = 2.27664 - 1.64467 R_t$ 이다.

(3) 두께효과가 피로균열성장거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석해보고자 일정한 피로응력조건하에서 상대적으로 두께가 얇은 박판시험편의 두께효과를 ΔK 의 변화로 환산하여 나타내었다. 그리고 환산과정에 의한 ΔK 의 변화에 대하여 피로관련재료상수(FRMC) 및 두께감소율(DoT) 대비 ΔK 감소율(DoS) 변화의 차원에서 각각 분석할 수 있으며 분석결과는 다음과 같다.

(4) 두께비, R_t 가 본 연구의 $0.3125 \leq R_t \leq 0.625$ 인 구간에서, 시험편의 두께가 감소할수록 피로수명은 연장되며 피로관련재료상수(FRMC)이자 $da/dN - \Delta K_{app}$ 선도의 기울기, m 은 감소하고 Y절편, C 는 증가하는 결과로 나타남을 알 수 있다.

그리고 시험편의 두께감소율(DoT)과 응력확대계수범위, ΔK 의 감소율(DoS)은 서로 정비례하며 상호관계식은 $DoS = 0.5074 \cdot DoT - 9.08471$ 임을 분석과정을 통하여 파악하였다.

본 연구와 더불어 평면변형률조건을 만족하는 두꺼운 시험편의 피로균열성장거동에서 나타나는 두께효과에 관한 연구를 추가한다면 폭넓은 두께의 AI 2024-T3 합금재료에서 나타나는 두께효과의 파악과 이에 대한 비교고찰이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Costa, J.D.M. and Ferreira, J.A.M., 1998, "Effect of Stress Ratio and Specimen Thickness on Fatigue Crack Growth of CK45 Steel," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 30, 65~73.
- (2) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," In: *Damage Tolerance in Aircraft Structures*, ASTM STP 486, 230~242.
- (3) Codrington, J. and Kotousov, A., 2009, "A Crack Closure Model of Fatigue Crack Growth in Plates of Finite Thickness Under Small-Scale Yielding Conditions," *Mechanics of Materials*, 41, 165~173.
- (4) Jack, A.R. and Price, A.T., 1972, "Effects of Thickness on Fatigue Crack Initiation and Growth in Notched Mild Steel Specimens," *Acta Metallurgica*, 20, 857~866.
- (5) Shahinian, P., 1976, "Influence of Section Thickness on Fatigue Crack Growth in Type 304 Stainless Steel," *Nuclear Technology*, 30, 390~397.

- (6) Broek, D. and Schijve, J., 1986, "The Influence of Sheet Thickness on Crack Propagation," *Aircraft Engng.*, 38, 31~33.
- (7) Shim, D.S., Hwang, D. Y. and Kim, J. K., 2002, "Prediction of Crack Growth in 2124-T851 Al-Alloy Under Flight-Simulation Loading," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 8, pp. 1487~1494.
- (8) Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., 1985, *The Stress Analysis of Cracks Handbook (2nd Ed.)*. Paris Productions, Inc., St. Louis.
- (9) Paris, P.C. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Journal of Basic Engineering*. Trans. ASME Ser. D 55, 528~534.
- (10) ASTM Designation : B209-95, 1995, *Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate*. Vol.1, No.1, pp.125~151.
- (11) ASTM Designation : 647-95, 1995, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. Vol.1, No.1, pp.578~614.
- (12) Lee, O. S. and Kim, S. G., 2007, "Prediction and Application of Fatigue Life on Characteristics of Fatigue Crack Propagation of Thin Sheet Alloy," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 103~109.
- (13) Kim, S. G., 2011, "Retardation Behavior of Fatigue Crack Growth and Fatigue Life Prediction of Thin Sheet Al 2024-T3 Alloy," *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 31~36.