

판재 AI 2024-T3 합금재료의 두께효과를 나타내는 형상인자 및 하중인자에 의한 피로관계식

김 승 권¹⁾ · 이 역 섭²⁾ · 장 주 섭^{*3)}

인하대학교 대학원 기계공학전공¹⁾ · 인하대학교 기계공학부²⁾ · 경원대학교 기계자동차공학과³⁾

A Fatigue Related Equation with Shape and Loading Factors Representing Effect of Thickness in Al 2024-T3 Alloy Sheet

Seunggwon Kim¹⁾ · Ouksub Lee²⁾ · Joosup Jang^{*3)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

²⁾Division of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

³⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungwon University, Gyeonggi 461-701, Korea

(Received 18 May 2011 / Revised 12 July 2011 / Accepted 29 July 2011)

Abstract : Aluminum alloys have been used with various thicknesses suitable for light weight of structure. It is known that the thickness effect of material is an important factor affecting fatigue crack propagation under constant fatigue stress condition. In this work, we presented the behavior of fatigue crack propagation in thin plate compared to thick plate Al 2024-T3 alloy with referred thickness effect in a correlative equation determined by the shape factor and the loading factor. We chose two factors that are used in the correlative equation with considering that the experiments were carried out under a constant fatigue stress condition. The thickness ratio of thin plate compared to thick plate and the equivalent effective stress intensity factor ratio depending on thickness were chosen as shape and loading factors. A correlative equation is utilized to determine the equivalent effective stress intensity factor range of thin plate and identify the degree of increasing phenomenon of fatigue life in thin plate compared to thick plate.

Key words : Fatigue crack propagation(피로균열전파), Thickness effect(두께효과), Shape factor(형상인자), Loading factor(하중인자), Fatigue related equation(피로관계식)

Nomenclature

a : half crack length
 N : fatigue cycles
 $2W$: width of specimen
 R : stress ratio
 K : stress intensity factor
 ΔK : applied stress intensity factor range
 m, C : fatigue related material constants
 ΔK_{eff}^{equ} : equivalent effective stress intensity factor

range

R_t : thickness ratio
 U_t^{equ} : equivalent effective stress intensity ratio
 depending on thickness

1. 서론

운송기계구조물에 사용되는 금속재료의 피로파괴거동과 관련하여, 일정한 피로응력조건하에서 재료의 두께에 따라 나타나는 상이한 피로균열성장률(Fatigue Crack Growth Rate, FCGR)은 피로균열전파

*Corresponding author, E-mail: jsjang@kyungwon.ac.kr

특성 중 하나이다.¹⁾

금속재료 및 합금재료에 가해지는 피로조건 중 다양한 응력비, $R(= \sigma_{min} / \sigma_{max})$ 에서의 피로균열성장률(FCGR)에 대한 연구와 함께^{2,12)} 재료의 두께에 따라 나타나는 피로균열성장률(FCGR)의 변화를 분석하는데 소성에 의한 균열 단합 현상으로 인한 영향이 고려되어왔다.^{3,13)}

그리고 일정한 피로응력조건하에서 피로균열성장률(FCGR)의 차이를 일으키는 두께의 영향은 판재 알루미늄합금재료의 피로강도를 평가하는 한 요소로 알려져 있다.⁴⁾

앞선 연구자에 의하면 피로균열전파속도에 미치는 두께의 영향은 다음의 3가지 경향으로 분류된다고 제시하였다: (a) 두께에 반비례하여 감소⁵⁾ (b) 두께의 영향 무시^{6,7)} (c) 두께에 정비례하여 증가,^{1,4)} 그리고 두께에 따른 피로균열성장률(FCGR)의 양상은 시험편에 작용하는 응력비의 크기에 대하여 정비례 혹은 반비례의 결과로 나타날 수 있다고 하였다.⁸⁾

균열선단 부근의 응력장은 재료의 두께와 밀접한 관계를 가지고 있다. 즉 두께가 증가함에 따라 응력장은 평면응력에서 평면변형상태로 변하는게 되며, 이러한 두께 변화에 따른 영향은 평면변형과 비교하여 평면응력조건에서 확대되는 균열선단의 소성영역의 크기 및 잔류응력과 연관되어 있다.³⁾

그리고 두께의 영향은 재료의 하중조건, 시험편의 형상, 실험환경 그리고 응력확대계수범위 등과 함께 피로균열전파거동에서 하나의 변수로 작용할 수 있다.

본 연구에서는 일정한 피로응력조건하에서 후판 대비 박판 Al 2024-T3 합금재료에 나타나는 두께효과를 파악하고, 두께효과에 의한 피로파괴거동을 형상인자 및 하중인자에 의한 관계식으로 알아보고자 한다.

관계식에 사용된 형상인자와 하중인자는 각각 후판 대비 박판시험편의 두께비, R_t 와 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 이다.

또한 본 연구에서 사용된 판재 Al 2024-T3 합금재료의 시험편두께는 모두 3종류이다. 각 두께별 피로시험과 이에 대한 분석으로부터 후판시험편과 박판시험편에서 나타나는 피로수명의 차이를 확인하고 두께별 피로균열전파특성을 파악하고자 한다.

2. 기본 이론

2.1 피로균열전파거동

판재 알루미늄합금재료에 대한 피로시험은 일정 진폭의 하중조건하에서 실시되며, 피로균열성장률(FCGR), da/dN 은 다음의 식 (1)과 같이 계산된다.

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

본 연구에서 사용한 시험편의 유형은 CCT(Center Cracked Tension)이며 CCT 시험편에 대한 응력확대계수범위, ΔK 에는 다음의 식 (2)이 사용된다.⁸⁾

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

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

여기서, ΔK_{app} : 적용응력확대계수범위
 $\Delta \sigma$: 적용응력범위
 a : 균열길이의 1/2
 $2W$: 시험편의 폭

판재시험편에 대한 일반적인 피로시험의 결과로부터 산출하는 da/dN 과 ΔK_{app} 는 Paris' law를 사용하여 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.⁹⁾

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

여기서, m 과 C 는 피로파괴특성을 나타내는 피로관련재료상수(Fatigue related material constant, FRMC)이며, 이 값은 ΔK_{app} 과 da/dN 을 각각 X, Y축으로 하는 그래프에서 최소자승법에 의한 선형조정(Linear fitting)을 통하여 구한다.

2.2 형상인자와 하중인자

본 연구에서 사용된 시험편은 Alcoa사의 Al 2024-T3 계열 합금 압연판으로, 두께는 각각 0.635 mm, 1.016 mm, 2.032 mm으로 구성되어 있다.

각 두께별 피로시험결과는 다음의 Table 1에 나타내었고, 박판(Thin plate)과 후판(Thick plate) 표현의 기준은 주어진 3종류의 시험편두께를 상대후판 및 상대박판으로 분류하는 각 Case 별 두께의 상대비교구분에 의해 정하였다.

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

각 Case에 대한 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 는 다음의 과정을 통하여 나타내었다.

박판시험편에 대한 ΔK_{app} , ΔK_{eff}^{equ} 및 da/dN 으로 부터,

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

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)에서 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 를 다음과 같이 놓으면,

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

식 (5)와 식 (6)으로부터 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 를 아래의 식 (7)과 같이 피로관련재료상수(FRMC)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{da}{dN} &= C \cdot (\Delta K_{app})^m \\ &= C_0 \cdot (U_t^{equ} \cdot (\Delta K_{app})^{m/m_0})^{m_0} \\ \therefore U_t^{equ} &= \left(\frac{C}{C_0}\right)^{1/m_0} \end{aligned} \quad (7)$$

그리고 본 연구에 사용된 시험편의 두께비, R_t 는 다음과 같다.

$$R_t = \frac{\text{Thickness of thin plate}}{\text{Thickness of thick plate}} \quad (8)$$

식 (8)로부터 각 Case 별 두께비, R_t 는 Case A; 0.625, Case B; 0.5, Case C; 0.3125이다.

R_t 와 U_t^{equ} 를 각각 X, Y축으로 하는 선도를 작성하여 형상인자인 두께비, R_t 와 하중인자인 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 의 상호관계식으로 나타낼 수 있다.

3. 시험편 및 실험방법

본 연구에서 사용한 시험편의 재료는 판재 Al 2024-T3 합금이며, 재료의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다.¹⁰⁾

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 properties of Al 2024-T3 aluminum alloy

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

시험편은¹¹⁾ CCT(Center Cracked Tension) 형으로 Fig. 1에 형상을 자세히 나타내었다.

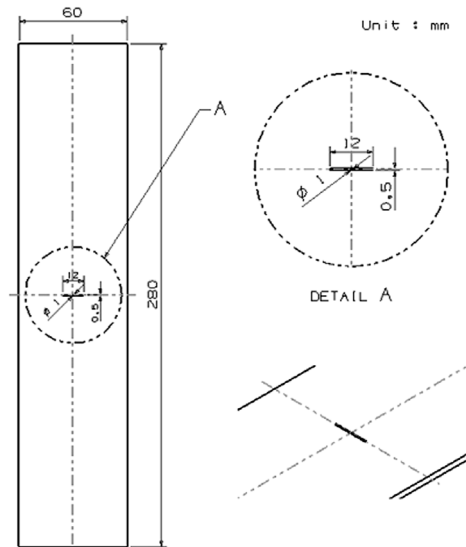


Fig. 1 Geometry of specimen for test

시험편은 T-L 방향으로 제작하였다.²⁾ 여기서, T와 L은 압연방향에 대하여 가로로 작용하는 하중방향과 세로로 작용하는 균열방향을 각각 나타낸다.

가공된 초기균열로부터 일정 진폭하중조건하에서 양방향으로 각각 1 mm씩 성장시킨 자연피로균열의 선단까지를 예비균열길이, $2a_{ini}$ 로 정하였다.

그리고 실험에 사용한 피로시험장치를 Fig. 2에 나타내었다. 실험은 피로시험기의 지그(Jig)에 시험편을 고정한 다음 이동식 현미경(Traveling microscope)으로 시험편의 균열길이를 일정시간 간격을 두고 변형된 길이를 측정하였다.

모든 피로시험은 10 ton 용량의 서보유압시험기를 사용하였으며 피로응력조건은 다음과 같다.

$$\Delta\sigma = 48.228 \text{ MPa}, R = 1/4$$

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

하중파형은 피로응력조건을 만족하는 10Hz의 일정한 진폭으로 사인파(sine wave)를 적용하였다.

후판과 비교하여 박판시험편이 피로에서 감소하는 피로균열성장률(FCGR)의 특성을 분석하기 위해 두께 0.635 mm(3회)와 1.016 mm(3회), 2.032 mm(8회)의 시험편으로 모두 14회의 피로시험을 실시하였다. 각 두께별 피로시험으로부터 피로관련재료상수를 구한 후, 후판 및 박판시험편으로 조합된 3가지 Case에 대한 두께비, R_t 와 두께별 등가유효응력 확대비, U_t^{equ} 를 산출하였다.

시험편의 두께를 제외한 형상 및 피로응력조건 등 전반적인 피로시험조건은 동일하며, 모든 실험은 상온에서 수행하였다.

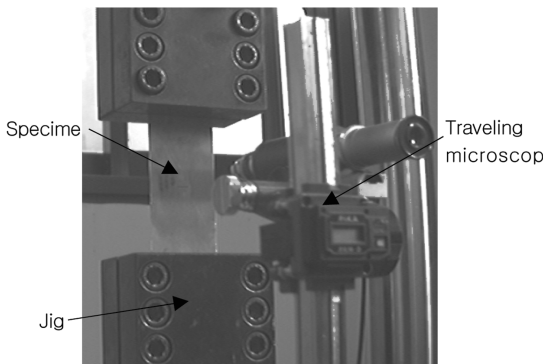


Fig. 2 Experimental setup of fatigue test

4. 결과 및 검토

4.1 두께별 피로균열전파거동

후판과 박판시험편의 피로에서 나타나는 피로균열성장률(FCGR)의 특성을 파악하기 위해 일정한 피로응력조건하에서 두께별로 피로시험을 실시하였다. 그리고 실험결과를 후판 및 박판시험편으로 조합한 3가지 Case로 나누어 분석을 실시하였다.

각 두께별로 표현된 피로시험결과인 균열길이 a 와 하중 반복 사이클 수, N 의 선도를 Fig. 3 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 박판인 경우에 일정한 피로응력조건하에서 시험편의 두께가 감소할수록 피로수명이 반비례하여 증가하는 두께효과를 확인할 수 있다.

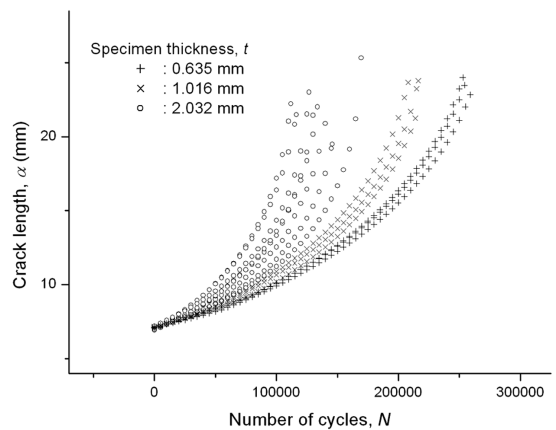


Fig. 3 Crack length plotted against the number of repeated cycles in sheet Al 2024-T3 alloy

Table 4 Average fatigue life depending on thickness

	Thickness of specimen, t		
	0.635 mm	1.016 mm	2.032 mm
Fatigue life	255,349 cycles	212,724 cycles	134,965 cycles

Table 5 Mean value of m , C of thick plates by least square method

Al 2024-T3 alloy	$R = 1/4, \Delta\sigma = 48.228 \text{ MPa}$		
	Thickness, t	m	$\log C$
	0.635 mm	1.86717	-9.10016
	1.016 mm	2.28799	-9.39915
2.032 mm	2.99105	-9.90389	

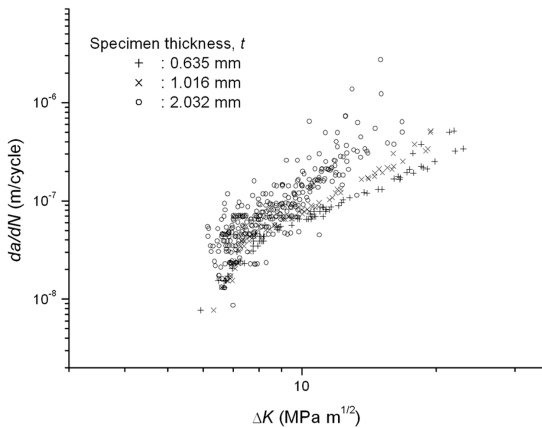


Fig. 4 Relationship between FCGR and stress intensity factor range in sheet Al 2024-T3 alloy

이 결과를 토대로 각 두께별 피로균열성장률 (FCGR), da/dN 과 적용응력확대계수범위, ΔK_{app} 의 선도를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서는 시험편의 두께가 증가할수록 $\frac{da}{dN} - \Delta K_{app}$ 선도 기울기의 비례 상수가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

앞서 나타낸 내용을 부연설명하면, Table 4에는 Fig. 3에 나타난 두께효과의 영향을 평균피로수명으로 나타낸 것으로, 후판시험편에 대한 박판시험편에서의 피로 수명 연장률은 각각 20.03 % (Case A), 57.6 % (Case B), 89.2% (Case C)로 나타났다.

Table 5에서는 Fig. 4의 각 두께별 $\frac{da}{dN} - \Delta K_{app}$ 선도의 기울기, m 이 시험편의 두께에 비례하여 증가하고, Y절편, $\log C$ 가 시험편의 두께에 반비례하여 감소함을 확인할 수 있다.

4.2 형상인자와 하중인자의 상호관계

후판 및 박판시험편의 조합으로 구성된 3가지 Case에서 형상인자인 두께비, R_t 와 하중인자인 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 를 Table 6에 나타내었다.

Table 6의 R_t 는 식 (7), U_t^{equ} 는 식 (8)과 같다.

R_t 를 X축, U_t^{equ} 를 Y축으로 하는 선도를 Fig. 5와 같이 나타내었다.

Table 6 R_t and U_t^{equ} depending on case

Case	R_t	U_t^{equ}
A	0.625	1.38136
		1.21839
		1.30002
B	0.5	1.41439
		1.52993
		1.46572
C	0.3125	1.88833
		1.71543
		1.80267

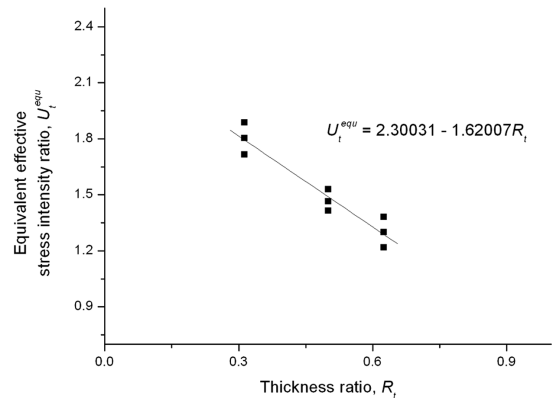


Fig. 5 Relationship between R_t and U_t^{equ}

윗 그림에서 R_t 와 U_t^{equ} 사이의 관계식은 다음의 식 (9)와 같다.

$$U_t^{equ} = 2.30031 - 1.62007R_t \quad (9)$$

이로부터 본 연구에 사용된 판재 Al 2024-T3 합금 재료의 형상인자, R_t 와 하중인자, U_t^{equ} 의 상호관계를 확인할 수 있었다.

5. 결론

판재 Al 2024-T3 합금재료의 피로균열전파특성을 파악하기 위해 일정한 피로응력조건하에서 다양한 두께에 대하여 일정진폭하중조건에서의 피로시험을 실시하였다.

이러한 실험결과를 분석하여 형상인자, R_t 와 하중인자, U_t^{equ} 의 상호관계를 파악해보았다.

또한 일정한 피로응력조건하에서 후판 대비 박판

시험편의 피로균열성장률(FCGR)의 감소 및 피로수명연장현상을 확인하였고, 이러한 두께효과를 형상인자와 하중인자로 구성되는 관계식으로 나타낼 수 있었다.

본 연구의 결과를 요약하면,

- 1) 피로시험에 사용된 시험편의 형상인자인 두께비, R_t 는 판재 Al 2024-T3 합금재료의 피로수명에 영향을 주는 인자임을 실험을 통하여 확인하였다.
- 2) 피로시험에서 나타난 두께효과로부터 시험편의 형상인자와 하중인자로 구성되는 피로관계식을 구할 수 있다.
- 3) 일정한 피로응력조건하에서 진행된 본 연구를 통하여 구한 판재 Al 2024-T3 합금재료의 형상인자와 하중인자의 피로관계식은 다음과 같다. 후관 대비 박판시험편의 형상인자인 두께비, R_t 와 하중인자인 두께별 등가유효응력확대비, U_t^{equ} 의 관계식은 $U_t^{equ} = 2.30031 - 1.62007R_t$ 이다.

피로관계식, $U_t^{equ} = f(R_t)$ 은 박판시험편의 등가유효응력확대계수범위, ΔK_{eff}^{equ} 의 산출에 사용된다. 그리고 일정한 피로응력조건하에서 후관 대비 박판시험편의 피로수명연장현상의 분석에 활용될 수 있다. 다만 본 연구에서 사용된 두께비, R_t 이외의 경우에 대한 피로수명연장현상의 분석에 본 연구의 피로관계식을 직접 적용하는 것은 다소 무리가 따를 수 있다.

따라서 판재 Al 2024-T3 합금재료에 대한 보다 일반화된 피로관계식, $U_t^{equ} = f(R_t)$ 을 얻기 위해서는 다양한 두께의 시험편에 대한 피로시험과 그에 대한 결과의 분석이 요구된다.

References

- 1) D. Broek and J. Schijve, "The Influence of Sheet Thickness on Crack Propagation," Aircraft Engineering, Vol.38, pp.31-33, 1986.
- 2) F. J. McMaster, C. P. Tabrett and D. J. Smith, "Fatigue Crack Growth Rates in Al-Li Alloy, 2090," Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol.21, pp.139-150, 1998.

- 3) W. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure. In: Damage Tolerance in Aircraft Structures," ASTM STP 486, pp.230-242, 1971.
- 4) W. Guo, C. H. Wang and L. R. F. Rose, "The Influence of Cross-sectional Thickness on Fatigue Crack Growth," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.22, pp.437-444, 1999.
- 5) A. R. Jack and A. T. Price, "Effects of Thickness on Fatigue Crack Initiation and Growth in Notched Mild Steel Specimens," Acta Metallurgica, Vol.20, pp.857-866, 1972.
- 6) P. Shahinian, "Influence of Section Thickness on Fatigue Crack Growth in Type 304 Stainless Steel," Nuclear Technology, Vol.30, pp.390-397, 1976.
- 7) K. D. Park, W. T. Ki and Y. J. Shin, "An Evaluation on Corrosion Fatigue Life of Spring Steel by Compressive Residual Stress," Transactions of KSAE, Vol.15, No.1, pp.1-7, 2007.
- 8) H. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin, The Stress Analysis of Cracks Handbook (2nd Edn.), Paris Productions Inc., St. Louis. 1985.
- 9) P. C. Paris and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," Journal of Basic Engineering. Trans. ASME Ser. D 55, pp.528-534, 1963.
- 10) ASTM, "Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate," ASTM B209-95, Vol.1, No.1, pp.125-151, 1995.
- 11) ASTM, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM E647-95, Vol.1, No.1, pp.578-614, 1995.
- 12) O. S. Lee and S. G. Kim, "Prediction and Application of Fatigue Life on Characteristics of Fatigue Crack Propagation of Thin Sheet Alloy," Journal of KSPE, Vol.24, No.2, pp.103-109, 2007.
- 13) S. G. Kim and O. S. Lee, "A Quantitative Analysis of ΔK Conversion Method for the Retardation Behavior of Fatigue Crack Growth in Varying Thickness of Al 2024-T3 Sheet Alloy," Transactions of the KSME(A), Vol.35, No.11, pp.1415-1422, 2011.