

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.9.999>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

마찰교반용접된 AA7075-T651 판재의 피로균열전파저항의 공간적 불규칙성에 미치는 초기균열위치의 영향[§]

김 선 진^{**}

* 부경대학교 기계자동차공학과

Effect of Initial Crack Location on Spatial Randomness of Fatigue Crack Growth Resistance in Friction Stir Welded AA7075-T651 Plates

Seon Jin Kim^{**}

* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received June 5, 2014 ; Revised July 8, 2014 ; Accepted July 9, 2014)

Key Words: Fatigue Crack Growth Resistance(피로균열전파저항), Friction Stir Welding(마찰교반용접), Initial Crack Location(초기균열위치), Spatial Randomness(공간적 불규칙성)

초록: 본 연구에서는 마찰교반용접된 AA7075-T651 판재의 피로균열전파저항의 공간적 불규칙성에 미치는 초기균열위치의 영향에 대하여 고찰되었다. 본 연구의 목적은 3가지 다른 초기균열위치에 따른 피로균열전파저항의 통계적 성질을 특성화하는 것이다. 본 연구에서는 피로균열전파저항 계수를 하나의 확률과정으로 취급하였다. 본 연구를 통하여 모든 초기균열위치의 시험편에 대한 피로균열전파저항 계수는 2-파라미터 Weibull 분포에 잘 따름을 알 수 있었다. 피로균열전파저항 계수의 확률분포의 형상 파라미터는 BM-ICL 시험편이 7.50으로 가장 크게 나타났으며, WM-ICL 시험편이 2.61로 가장 낮았다. 또한 피로균열전파저항 계수의 자기상관함수는 초기균열위치 시험편에 관계없이 모두 지수함수로 평가될 수 있음을 알았다.

Abstract: In the present paper, the effects of initial crack location on spatial randomness of fatigue crack growth resistance (FCGR) in friction stir welded (FSWed) AA7075-T651 plates were studied. The objective of this study is to characterize the statistical properties of FCGR for three different types of initial crack location (ICL) specimens. In this work, the FCGR coefficients were treated as a spatial random process. It was found that the FCGR coefficients for all initial crack location specimens closely followed a two parameter Weibull distribution. The shape parameter of the Weibull distribution for BM-ICL specimens showed the largest value of 7.50, and that for the WM-ICL specimens showed the smallest value of 2.61. In addition, the autocorrelation functions for all the ICL specimens followed the exponential function.

1. 서론

마찰교반용접 부재의 피로균열전파 거동에 관한 연구는 최근 여러 연구자들에 의하여 많이 연구 되어 왔다.⁽¹⁻¹⁰⁾ 이들 연구의 대부분은 주로 일정진폭하중하의 피로균열전파에 미치는 미세조직

의 영향, 잔류응력의 영향 혹은 경도 등에 관하여 연구되었다. 하지만 마찰교반용접 부재에 대한 피로균열전파율의 변동성을 취급한 연구는 매우 부족하다. 이러한 관점에서 저자 등은 일정응력확대계수범위 제어하의 피로실험을 통하여 최적의 용접조건에서 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금의 접합부에 대한 실험적 고찰⁽¹¹⁾과 피로균열전파율의 변동성에 미치는 구동력과 재질의 영향을 통계적 확률분포를 이용하여 고찰한 바 있다.^(12,13)

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 부산지회 춘계 학술대회(2014. 5. 16., 농심호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, sjkim@pknu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

그러나 신뢰성공학적 관점에서 피로균열전파수명을 확률론적으로 추정하려고 할 때, 피로균열전파율의 확률변수화하는 방법에는 크게 3가지로 나눌 수 있다.^(14,15) 첫째로 파라미터치가 시험편간 변동하는 방법, 둘째로, 파라미터가 동일 시험편 내에서만 변동하는 방법 그리고 셋째로 파라미터가 동일 시험편 내에서 변동하고 동시에 시험편 간에서도 변동한다고 하는 방법이다. 마찰교반용 접부재의 피로균열전파 과정은 용접 과정의 미세 조직과 잔류응력 등의 영향으로 그 피로 저항이 하나의 시험편 내에서도 다를 것으로 사료된다.

이러한 관점에서 저자 등의 이전의 일정진폭하중하의 피로균열전파 실험 데이터를 활용하여,⁽¹⁶⁾ 본 연구에서는 마찰교반용접된 AA7075-T651 판재의 3가지 다른 초기균열위치를 갖는 CT 시험편에 대하여 피로균열전파저항의 공간적 불규칙성의 영향을 신뢰성공학적 관점에서 새롭게 고찰하는 것을 목적으로 한다.

2. 해석 방법

파괴역학에 근거한 피로균열전파 거동을 평가하는 식에는 여러 가지가 있지만, 가장 널리 사용되는 Paris-Erdogan 식을 이용하는 것으로 한다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

여기서, C 및 m 은 각각 피로균열전파계수 및 전파지수로 모두 재료 상수이다.

본 연구에서는 신뢰성이론에 기초하여 식 (1)의 재료상수 C 를 다음과 같이 모델화한다.⁽¹⁴⁾ 즉,

$$C(a) = \frac{C_1}{C_2(a)} \tag{2}$$

여기서 a 는 균열선단에서의 위치를 나타내고, C_1 은 시험편간의 편차를 나타내는 양의 확률변수이고, C_2 는 동일 시험편 내에서의 편차를 나타내는 하나의 공간적 확률과정이라 가정한다. 이때, 식 (1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_1}{C_2(a)} (\Delta K)^m \tag{3}$$

여기서, C_1 과 m 이 고정 되었다고 하면 각 시험편 내에서의 피로균열전파의 공간적 변동성을 평가할 수 있다. 이 식으로부터 피로균열전파의 공

간적 변동성을 하나의 확률과정으로 취급하는 것이 가능하다.⁽¹⁷⁾

본 연구에서는 균열전파 경로에 연한 어떤 위치에서의 피로균열전파저항은 그 점에서의 균열전파에 대한 재료강도를 나타낸다는 의미에서 식 (3)을 다음과 같이 취급한다.

$$C_2(a) = C_1(\Delta K)^m \frac{dN}{da} \tag{4}$$

즉, 피로균열전파율의 변동 대신에 재료의 피로균열전파 저항의 공간적 변동성을 고려하는 것이 더 유용하다. 이후 $C_2(a)$ 를 피로균열전파에 대한 재료의 피로균열전파저항 계수라 부른다.

이 $C_2(a)$ 의 공간적 확률과정의 예를 Fig. 1에 나타낸다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 일정진폭하중하의 피로 실험에서 하나의 시험편에 대한 m 과 C_1 을 결정하고 어떤 유한구간 Δa 에서의 dN 을 구하면 실험적으로 피로균열전파 저항 계수를 구할 수 있다. Fig. 1의 그림 중에 나타내었듯이 1차원적인 이론적 문제로 취급하면 간단히 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{2,\Delta a}(a) = \frac{1}{\Delta a} \int_x^{a+\Delta a} C_2(a) da \tag{5}$$

여기서, $C_2(a)$ 는 Fig. 1에서와 같이 Δa 마다의 평균치가 아니고 연속한 함수라 가정하였다. 즉, $C_{2,\Delta a}(a)$ 의 평균치는 $C_2(a)$ 의 평균치와 일치하는 것을 알 수 있다.

실험적으로 얻어지는 피로균열전파저항 계수는 균열선단에서의 평균치이므로 실험적 dN/da 의 측정은 통상의 일정 하중반복수 간격이 아니고 일정 균열길이의 간격으로 행할 필요가 있다.

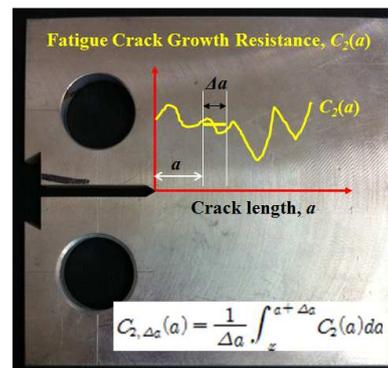


Fig. 1 Schematic diagram of fatigue crack growth resistance (FCGR) coefficient, $C_2(a)$

본 연구에서의 실험적 균열의 측정간격, Δa 은 1.0mm로 일정하게 하였다. 한편, 본 연구에서의 $C_{2,\Delta a}(a)$ 의 확률분포에 대해서는 최소치의 극치분포에 따른다고 가정하여, 재료강도가 극치분포 중에서도 Weibull 분포에 따르는 예가 많으므로 다음과 같은 2-파라미터 Weibull 분포에 따른다고 가정하여 해석하였다.

$$F_{C_2}(C_2) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{C_2}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (6)$$

여기서, α 는 형상 파라미터이고, β 는 척도 파라미터를 나타낸다.

한편, 균열길이에 대한 피로균열전파저항의 공간적 불규칙성을 고찰하고 그 자기상관함수의 영향을 알아보기 위하여, 시험편의 균열길이에 대한 전파저항계수의 잔차(ξ_i)를 다음과 같다.

$$\xi_i = C_2(a_i) - \overline{C_2}(a_i) \quad (7)$$

그 자기상관함수($R_C(\tau)$)는 다음 식으로 구하였다.

$$\begin{aligned} R_C(\tau) &= E[C(a+\tau)C(a)] \\ &= R_C(k\Delta a) \\ &= \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} \xi_i \xi_{i+k} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\tau = k\Delta a$, k 는 래그(lag)수이다.

3. 이전의 실험방법 및 결과

본 연구에서 사용된 재료는 7075-T651 알루미늄 합금 판재이며, 본 연구에서 수행된 용접방법과 상세한 실험 방법은 전보를 참조 바란다.⁽¹⁶⁾

초기균열위치에 따른 CT 시험편의 채취방법에 대한 이해를 돕기 위하여 Fig. 2에 그 개념도를

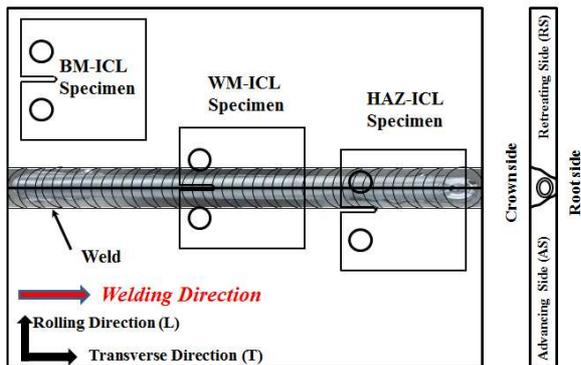


Fig. 2 Schematic diagram for CT specimen cutting

나타내었다. 즉, 초기균열위치가 모재인 BM 시험편과, 용접부의 중심을 지나는 WM 시험편 그리고 열영향부를 지나는 HAZ 시험편의 3가지 종류에 대하여 실험이 수행되었다. 한편 피로균열전파 실험은 ASTM E647 규정에 의하여 응력비(R) 0.1, 하중범위(ΔP) 2.44kN 그리고 주파수 (Frequency) 10Hz로 일정진폭하중하에서 각각 2개의 시험편에 대하여 수행되었다.

Fig. 3은 본 실험에서 수행된 6개의 모든 시험편에 대한 응력반복수 N 과 균열길이 a 와의 관계를 나타낸 것이다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 초기균열위치에 따라 그 피로균열전파저항에 변동이 존재함을 알 수 있다. 그리고 Table 1은 식 (1)에 적합한 평균적 결과치를 나타낸다.

4. 해석결과 및 고찰

Fig. 4는 실험적으로 구한 균열길이에 따른 피고균열전파 저항의 공간적 변동성을 초기균열위치의 시험편에 대하여 나타낸 일례이다. 그림에서 알 수 있듯이 피로균열전파 저항의 공간적 변동성이 모든 시험편에 대하여 나타나고 있으며, 균열길이에 따라 다른 양상의 공간적 불규칙성을 나타내고 있다. 3가지 형태의 시험편에 대한 공간적 불규칙성을 좀 더 명확히 고찰하기 위하여 식 (8)에 의한 잔차를 균열길이에 대하여 나타낸 것이 Fig. 5이다. 초기균열위치가 모재인 BM-ICL

Table 1 Summary of m and C for equation (1)

	BM-ICL	WM-ICL	HAZ-ICL
m	2.6	3.3	3.2
C	8.90E-7	8.06E-8	6.12E-8

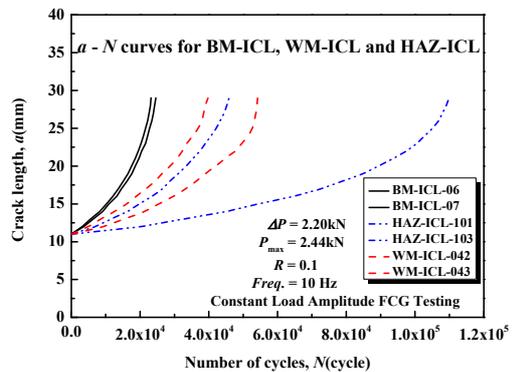


Fig. 3 $a-N$ curves for a constant amplitude loading (BM-ICL, WM-ICL and HAZ-ICL)

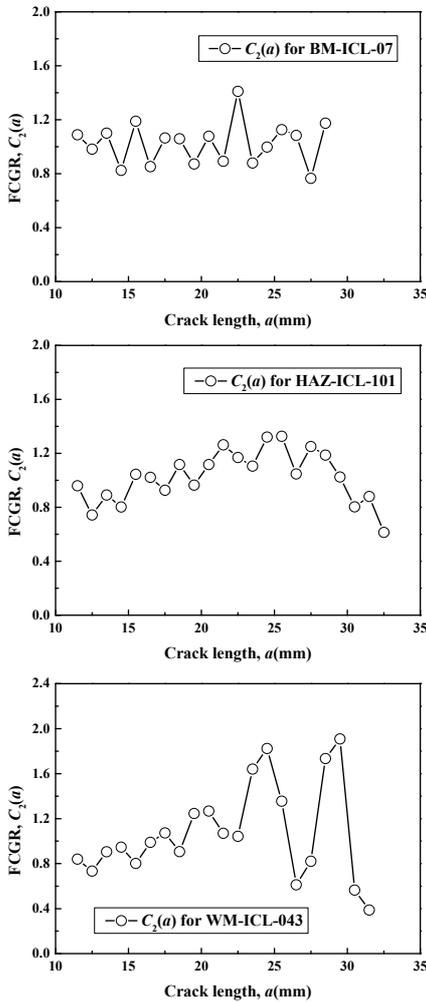


Fig. 4 Spatial randomness of FCGR, $C_2(a)$ in BM, HAZ and WM initial crack location specimens

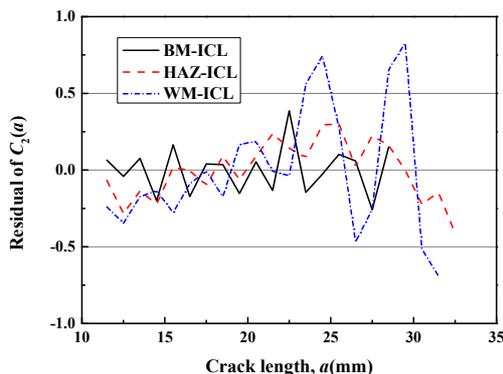


Fig. 5 Comparison of scatter of the residual of $C_2(a)$ on BM, HAZ and WM specimens

시험편에서는 비교적 일정한 형태의 공간적 변동성을 나타내고 있으나, 용접재의 시험편인 WM-ICL 시험편과 열영향부재의 시험편인 HAZ-ICL 시험편의 경우에는 모재 시험편에 비하여 변동

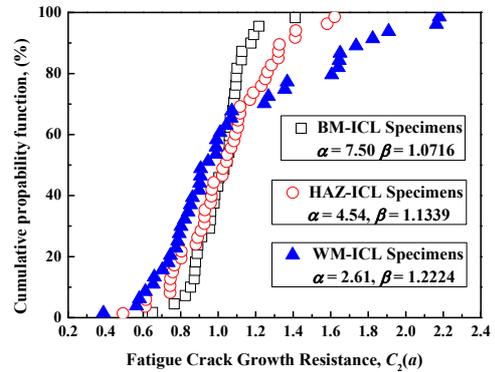


Fig. 6 Weibull plots of FCGR, $C_2(a)$

성이 높음을 알 수 있고 균열위치에 따라서도 매우 다른 양상의 변동성을 보여주고 있다. 이는 마찰교반용접에 의한 미세조직과 잔류응력 그리고 균열전파 경로의 상이 및 이들과 구동력의 조합 등에 의한 영향이라 사료된다. 한편, 초기균열 위치에 따른 전 시험편에 대한 피로균열전파저항 계수를 식 (6)의 Weibull 분포에 의하여 플롯한 누적확률분포함수를 Fig. 6에 나타낸다. 피로균열 전파저항 계수는 2-파라미터 Weibull 분포함수에 잘 따름을 알 수 있었다. 초기균열위치에 따른 시험편에 대한 그 확률분포함수를 적합하여 구한 형상 파라미터와 척도 파라미터를 정리하여 Fig. 6에 함께 나타내었다. 분포함수의 형상 파라미터는 BM-ICL 시험편이 가장 높게 나타났으며, WM-ICL 시험편이 가장 낮게 나타났다. 이는 용접재에서 초기균열이 전파하는 경우 공간적으로 변동이 가장 크다는 것을 의미한다. 이는 Fig. 5에서의 결과와도 잘 일치하고 있다. 한편 피로균열전파 저항의 특성치를 나타내는 척도 파라미터를 고찰하면 WM-ICL 시험편이 가장 크다는 것을 알 수 있었으며, BM-ICL의 경우가 가장 낮게 나타났다.

이것은 피로균열전파율이 BM-ICL 시험편에서 가장 높고, HAZ-ICL 시험편의 경우가 피로균열 전파율이 낮다는 것을 의미한다. 이의 결과는 저자 등의 동일 재료에 대한 마찰교반용접재의 일정 응력확대계수범위 제어 피로실험 결과와도 매우 잘 일치하고 있다.⁽¹²⁾

한편 식 (8)에 의한 초기균열위치에 따른 시험편에 대한 평균적 자기상관함수를 구하여 나타낸 일례를 Fig. 7에 나타낸다. 여기서 알 수 있듯이, 초기균열위치의 시험편에 관계없이 그 자기상관

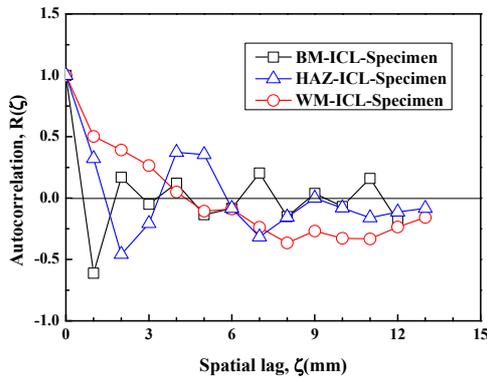


Fig. 7 Experimental autocorrelation functions

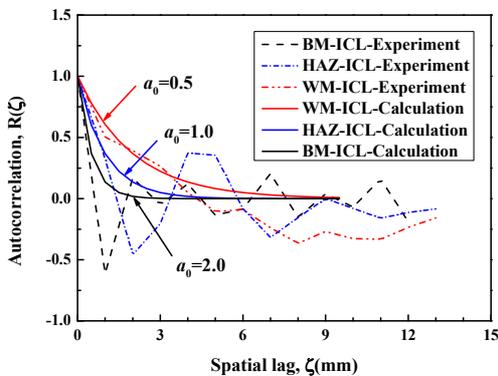


Fig. 8 Comparison of the autocorrelation functions for experiment and calculation

함수는 백색잡음의 지수함수로 평가할 수 있음을 알 수 있다. 즉,

$$R_C(\xi) = e^{-a_0|\xi|} \quad (9)$$

여기서 a_0 는 상관거리(correlation length)를 나타내는 정수이다. 초기균열위치의 시험편에 따라 그 상관거리는 다소 차이가 나타남을 알 수 있다. 따라서 식 (9)에 의하여 적합한 이론적 계산 결과를 본 실험 결과와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. BM-ICL 시험편의 경우는 a_0 가 약 2.0, HAZ-ICL의 시험편의 경우는 a_0 가 약 1.0 그리고 WM-ICL 시험편의 경우는 a_0 가 약 0.5 정도로 추정된다. 여기서 a_0 가 작다는 것은 분산이 크다는 것을 의미한다.⁽¹⁸⁾

이상의 결과로부터 아주 흥미 있는 결과를 얻었다. 본 연구의 초기균열위치에 따른 시험편에 있어서, 균열전파저항의 공간적 변동성을 나타내는 분포의 형상 파라미터와 균열전파저항의 특성을 나타내는 척도 파라미터와의 사이에는 상호 반비례하는 관련이 있음을 주목하고 싶다. 또한 초기균열위치에 따라 상관거리에 영향을 미침을

알 수 있었다.

본 연구를 통하여 마찰교반용접재의 피로균열 전파저항의 공간적 변동성을 하나의 확률과정으로 이해할 수 있었으며, 확률과정의 시뮬레이션 방법⁽¹⁸⁾을 활용하면 피로균열전파의 확률론적 수명 예측이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

(1) 초기균열위치의 시험편에 따라 피로균열 전파저항의 공간적 변동성과 그 양상이 다름을 알았다.

(2) 피로균열전파저항 계수는 2-파라미터 Weibull 분포에 잘 따름을 알 수 있었다.

(3) 피로균열전파저항 계수의 형상 파라미터는 BM-ICL 시험편이 7.50으로 가장 크게 나타났으며, WM-ICL 시험편이 2.61로 가장 낮았다.

(4) 피로균열전파저항 계수의 자기상관함수는 초기균열위치의 시험편에 관계없이 모두 지수함수로 평가될 수 있다.

(5) 지수함수로 추정된 상관거리의 정수 a_0 는 BM-ICL 시험편의 경우가 2.0, HAZ-ICL의 시험편의 경우가 1.0 그리고 WM-ICL 시험편의 경우가 0.5 정도로 추정되었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Bussu, G. and Irving, P. E., 2003, "The Role of Residual Stress and Heat Affected Zone Properties on Fatigue Crack Propagation in Friction Stir Welded 2024-T351 Aluminum Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 77~83.
- (2) Pouget, G. and Reynolds, A. P., 2008, "Residual Stress and Microstructure Effects on Fatigue Crack Growth in AA2050 Friction Stir Welds," *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, pp. 463~472.
- (3) Kim, S. S., Lee, C. G. and Kim, S. J., 2008, "Fatigue Crack Propagation Behavior of Friction Stir Welded 7083-H31 and 6061-T651 Aluminum Alloys," *Materials Science and Engineering A* 478,

- pp. 56~64.
- (4) Fratini, L., Pasta, S. and Reynolds, A. P., 2009, "Fatigue Crack Growth in 2024-T351 Friction Stir Welded Joints: Longitudinal Residual Stress and Microstructural Effects," *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 495~500.
- (5) Maduro, L. P., Baptista, C. A. R. P., Torres, M. A. S. and Souza, R. C., 2011, "Modeling the Growth of LT and TL-Oriented Fatigue Cracks in Longitudinally and Transversely Pre-Strained Al 2524-T3 Alloy," *Engineering Procedia*, Vol. 10, pp. 1214~1219.
- (6) Lemmem, H. J. K., Iderliesten, R. C., Benedictus, R., 2011, "Macro and Microscopic Observations of Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded Aluminum Joints," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, pp. 930~943.
- (7) Hatamleh, O., Lyones J. and Forman, R., 2007, "Laser and Shot Peening Effects on Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded 7075-T7351 Aluminum Alloy Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 421~434.
- (8) Tra, T. H., Okazaki, M. and Suzuki, K., 2012, "Fatigue Crack Propagation Behavior in Friction Stir Welding of AA6063-T5: Roles of Residual Stress and Microstructure," *International Journal of Fatigue*, Vol. 43, pp. 23~29.
- (9) Dai, Q, Liang, Z., Chen, G., Meng, L. and Shi, Q., 2013, "Explore the Mechanism of High Fatigue Crack Propagation Rate in Fine Microstructure of Friction Stir Welded Aluminum Alloy," *Materials Science and Engineering A* 580, pp. 184~190.
- (10) Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., 2005, "Friction Stir Welding and Processing," *Materials Science and Engineering*, R 50, pp. 1~78.
- (11) Jeong, Y. H. and Kim, S. J., 2013, "Experimental Investigation of Fatigue Crack Growth Behavior in Friction Stir Welded 7075-T651 Aluminum Alloy Joints under Constant Stress Intensity Factor Range Control Testing," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 6, pp. 775~782
- (12) Jeong, Y. H. and Kim, S. J., 2013, "Spatial Randomness of Fatigue Crack Growth Rate in Friction Stir Welded 7075-T651 Aluminum Alloy Welded Joints(case of LT Orientation Specimen)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 9, pp. 1109~1116.
- (13) Ahn, S. H. and Kim, S. J., 2013, "Statistical Distribution of Fatigue Crack Growth Rate for Friction Stir Welded Joints of Al7075-T651," *Trans. of the KSPSE*, Vol. 17, No. 4, pp. 86~93.
- (14) Sobbxzyk, K., 1993, "Stochastic Approach of Fatigue," Springer-Verlag, Wien-New York, pp. 1~301.
- (15) Ichkawa, M. and Nakamura, T., 1988, "Methods for Randomization of Parameters in the Fatigue Crack Propagation Law $da/dN=C(\Delta K)^m$," *Trans. of the Materials*, Vol. 34, No. 378, pp. 321~326.
- (16) Kong, Y. S. and Kim, S. J., 2014, "Macro and Microscopic Observations of Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded 7075-T651 Aluminum Alloy Plates," *Trans. of the KSPSE*, Submitted.
- (17) Ortiz, K. and Kiremidjian, A. S., 1986, "Stochastic Modelling of Crack Growth," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 29, pp. 317~334.
- (18) Itagaki, H., Ishizuka, T. and Kim, S. J., 1991, "Effect of Spatial Distribution of Material Properties on the Experimental Estimation: Part 1 Fatigue Crack Growth," *Journal of Society of Naval Architects Japan*, Vol. 170, pp. 327~336.