

# 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 피로균열전파율의 공간적 불규칙성 (LT 방향의 시험편에 대하여)<sup>§</sup>

정의한\* · 김선진\*\*†

\* 부경대학교 대학원 기계설계공학과, \*\* 부경대학교 기계자동차공학과

## Spatial Randomness of Fatigue Crack Growth Rate in Friction Stir Welded 7075-T651 Aluminum Alloy Welded Joints (Case of LT Orientation Specimen)

Yeui Han Jeong\* and Seon Jin Kim\*\*†

\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Pukyong Nat'l Univ.

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

(Received March 7, 2013 ; Revised June 19, 2013 ; Accepted July 8, 2013)

**Key Words:** Fatigue Crack Growth(피로균열전파), Friction Stir Welding(마찰교반용접), Spatial Randomness(공간적 불규칙성), Weibull Distribution(와이블 분포)

**초록:** 본 연구의 목적은 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부에 대한 피로균열전파율의 공간적 불규칙성을 고찰하기 위한 것이다. 본 연구에서는 이전의 피로균열전파 실험 데이터를 활용하였다. 피로균열전파율의 공간적 불규칙성을 명확히 이해하기 위하여, 피로균열전파 실험은 일정 응력확대 계수범위 제어하에서 수행되었다. 재질, 즉 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 용접재와 모재에 대하여 피로균열전파율의 공간적 불규칙성을 조사하기 위하여 실험 데이터가 해석되었다. 결론적으로 용접재의 변동성이 모재의 변동성보다 높게 나타났으며, Weibull 통계 해석에 의하여 변동성을 평가할 수 있음을 알았다.

**Abstract:** This study aims to investigate the spatial randomness of fatigue crack growth rate for the friction stir welded (FSWed) 7075-T651 aluminum alloy joints. Our previous fatigue crack growth test data are adopted in this investigation. To clearly understand the spatial randomness of fatigue crack growth rate, fatigue crack growth tests were conducted under constant stress intensity factor range (SIFR) control testing. The experimental data were analyzed for two different materials-base metal (BM) and weld metal (WM)-to investigate the effects of spatial randomness of fatigue crack growth rate and material properties, the friction stir welded (FSWed) 7075-T651 aluminum alloy joints, namely weld metal (WM) and base metal (BM). The results showed that the variability, as evaluated by Weibull statistical analysis, of the WM is higher than that of the BM.

### 1. 서론

현존하는 중요한 대형 기계 구조물, 예를 들면 항공기, 선박, 잠수함, 원자력 플랜트 등은 물론 각종기계 구조물의 부재는 제작 후 현재에 이르

기까지 다양한 요인에 의하여 경년 열화 (degradation)와 더불어 지진, 태풍, 충격 등 외적 요인의 손상에 의하여 그 신뢰성(reliability), 가용성(availability) 혹은 안전성(safety)에 중대한 문제를 일으키는 경우가 적지 않다. 이러한 관점에서 신뢰성 기반의 잔여 유용수명 예측 기술의 연구가 국내외적으로 진행되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 그리고 최근 예방정비에서 발생하는 문제를 해결하기 위하여 고장예지 및 관리(Prognostics and Health

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013년도 춘계 학술대회 (2013. 3. 27.-29., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, [sjkim@pknu.ac.kr](mailto:sjkim@pknu.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

Management, PHM)기술이라는 새로운 개념의 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(4,5)</sup> PHM의 예지기술 (Prognostics Technology)은 다양한 분야에서 연구되고 있지만, 그 중에서도 피로균열전파에 대한 연구가 가장 많다.<sup>(6)</sup>

피로에 민감한 기계·구조물의 경우, 설계의 단계에서 뿐만 아니라 구조물의 고장예지 및 관리 (PHM) 관점에서도 부재 또는 구조물의 피로 특성에 대한 불규칙성과 그 수명분포를 추정하고 대상물의 신뢰성 평가를 행하는 것이 우선적으로 중요하다.

항공우주, 선박, 자동차, 철도차량 등의 중요한 기계 구조물에 대하여 마찰교반용접 부재를 적용하려고 할 때, 설계 및 실제적 운용에 있어서 피로파괴가 안전성 및 신뢰성에 깊이 관여하고 있는 경우에는 이러한 용접부재의 피로 특성에 대한 변동성을 고려할 수 있는 확률통계론적 수명예측과 해석에 필요한 충분한 확률 통계적 실험 데이터의 수집과 획득 및 정보가 필요하다. 많은 연구자들이 손상허용설계 및 PHM의 관점에서 피로균열전파를 하나의 확률과정이라 취급하여 많은 연구를 수행하였지만,<sup>(7-10)</sup> 마찰교반용접재에 대한 피로균열전파에 관한 연구는 비교적 많이 수행 되었지만<sup>(11-15)</sup> 균열전파의 불규칙성을 고려한 신뢰성평가를 행한 연구는 거의 없다.

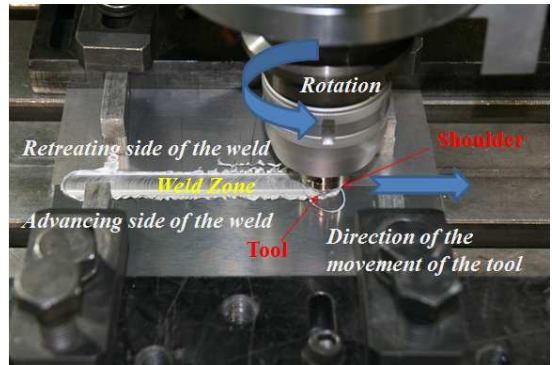
이러한 관점에서, 본 연구에서는 최적의 조건에서 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접 부재의 피로균열전파율의 공간적 불규칙성을 명확히 고찰하기 위한 연구의 일환으로, 본보에서는 이전의 LT-방향의 CT 시험편에 대하여 일정 응력확대계수범위 제어하의 피로균열전파 실험을 수행한 실험 데이터를 활용하여,<sup>(16)</sup> 마찰교반용접재의 용접부(Weld Metal, WM)와 모재 (Base Metal, BM)에 대한 균열길이에 대한 피로균열전파율의 시험편내에서의 공간적 불규칙성을 통계적으로 고찰하고자 하였다.

## 2. 이전의 실험방법 및 절차<sup>(16)</sup>

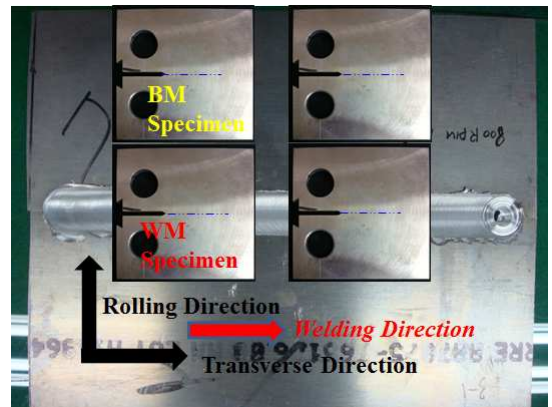
본 연구에 사용된 재료는 두께 6mm의 Al 7075-T651 알루미늄 판재이다. 마찰교반용접 실험에 사용된 재료는 원판 치수 6×1250×2500mm, 무게 3.576kg의 압연 판재로부터 압연 방향 250mm, 폭 방향으로 100mm의 직사각형 크기로

**Table 1** Optimal FSW conditions in this work

Shoulder Diameter (mm)	Rotating Speed (rpm)	Welding Speed (mm/s)	Probe Length (mm)	Probe Diameter (mm)
20	800	0.5	5.85	9.0



**Fig. 1** Schematic illustration of FSW process



**Fig. 2** Schematic diagram of CT specimen cutting

절단하여, 압연방향의 수직방향을 용접 진행 방향으로 하여 마찰교반용접을 수행하였다. 마찰교반용접에 사용된 공구의 치수는 숄더의 직경이 20mm, 그리고 프로브(혹은 공구)의 숄더부 직경은 9mm, 선단의 직경은 6.85mm로 하고 공구의 길이는 5.85mm의 SKD61 공구강으로 공구 부분의 끝 부분 직경이 작아지는 형상의 나선형으로 설계, 제작하여, Table 1과 같은 최적 조건에서 마찰교반용접을 수행하였다. Fig. 1에 마찰교반용접 과정의 모식도를 나타낸다.

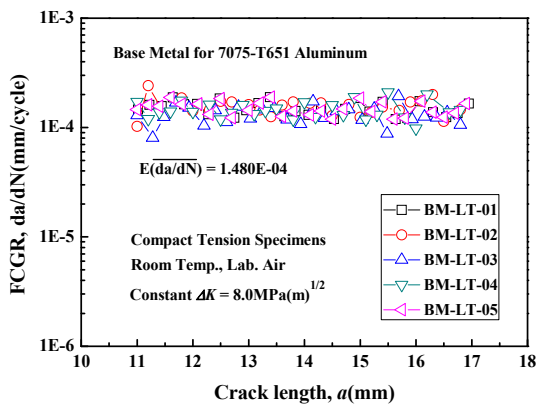
본 실험에서 행한 일정 응력확대계수범위 제어 피로균열전파 실험의 상세한 내용은 참고문헌<sup>(11)</sup>에 기술되어 있지만 여기서는 간단히 기술한다.

실험에 사용된 시험편은 폭이 50mm 그리고 두께 5mm인 CT (compact specimen) 시험편을 Fig. 2와 같이 LT 방향의 모재와 용접부에 대하여 채취하였다. 시험편의 채취방향은 압연방향과 균열의 전파방향이 직각이 되도록 LT 방향 시험편에 대하여 제작 하였다. 즉, 균열이 마찰교반용접부의 중심에 존재하는 교반부(stir zone)를 지나도록 하였다. 피로균열전파 시험은 전기유압서보식 피로 시험기(Instron Model 8821S)를 사용하였으며, 시험조건은 응력반복속도 10Hz, 응력비 0.1의 정현파 인장-인장 일정 응력확대계수범위 제어방식으로 3가지의 구동력 조건하에서 실험을 수행하였다. 한편 균열길이는 COD 게이지를 이용하여 컴플라이언스 법에 의하여 측정하였다.

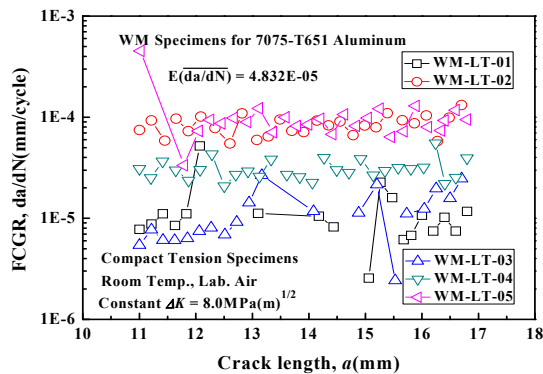
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 피로균열전파율의 공간적 불규칙성

Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5는 각각 응력확대계수



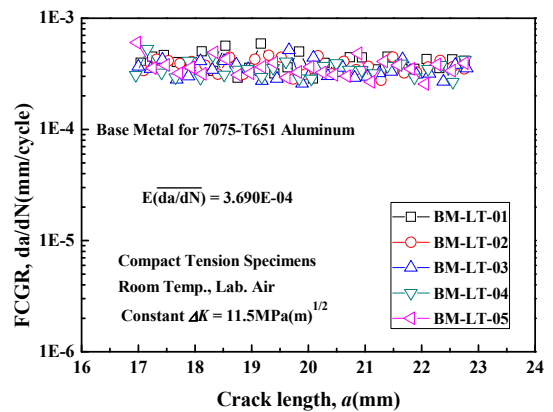
(a) Spatial randomness for BM specimens



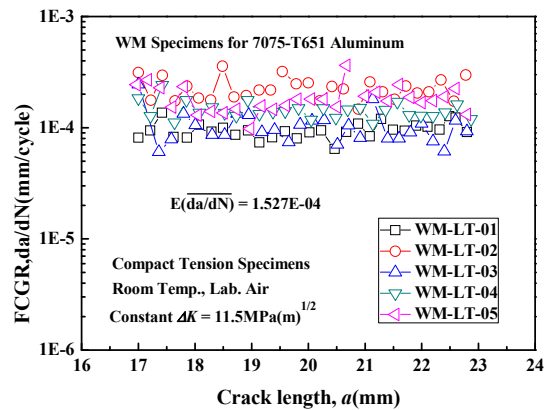
(b) Spatial randomness for WM specimens

Fig. 3 Spatial randomness of FCGR, da/dN, for  $\Delta K = 8.0\text{MPa(m)}^{0.5}$

범위가 8.0, 11.5 및 15.0MPa(m)<sup>0.5</sup>에 대한 BM과 WM 시험편의 피로균열전파율 da/dN의 균열증분(da=0.2mm) 마다의 공간적 불규칙성을 나타낸 것이다. 모든 그림에서 da/dN은 균열길이에 따라 공간적으로 변동하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 균열증분에 대한 재료의 피로균열전파저항이 공간적으로 불규칙성을 나타내는 것으로 생각할 수 있다. 피로균열전파율의 공간적 불규칙성을 BM 시험편과 비교하여 보면 WM 시험편의 경우가 공간적 불규칙성이 매우 크다는 것을 알 수 있으며, 또한 시험편간의 공간적 불규칙성도 WM 시험편에서 크게 나타남을 알 수 있다. WM의 경우  $\Delta K$ 가 비교적 낮은 8.0 및 높은 15.0MPa(m)<sup>0.5</sup>에서 da/dN의 공간적 변동계수가 높게 나타났다. 이는 WM의 경우 마찰교반용접 과정의 미세조직의 변화와 균열전파 경로의 불규칙, 구동력의 영향에 기인하는 것으로 사료된다.

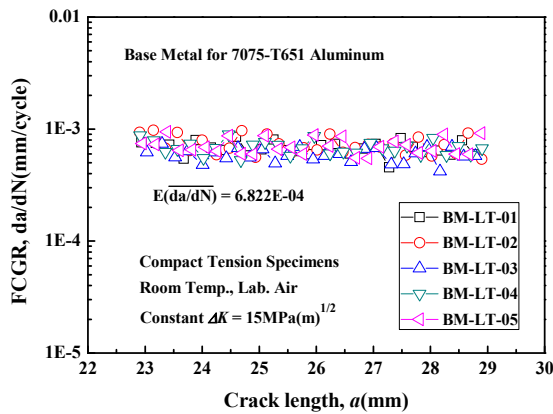


(a) Spatial randomness for BM specimens

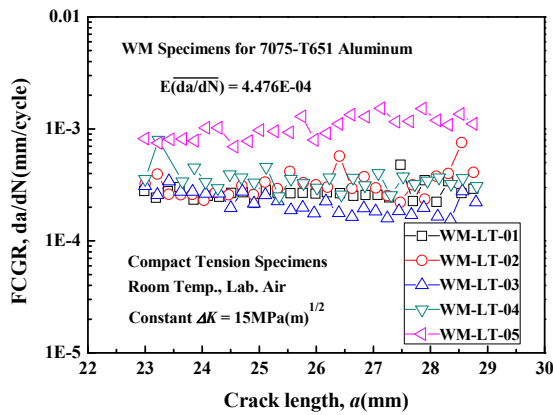


(b) Spatial randomness for WM specimens

Fig. 4 Spatial randomness of FCGR, da/dN, for  $\Delta K = 11.5\text{MPa(m)}^{0.5}$



(a) Spatial randomness for BM specimens



(b) Spatial randomness for WM specimens

Fig. 5 Spatial randomness of FCGR.  $da/dN$  for  $\Delta K = 15.0\text{MPa(m)}^{0.5}$

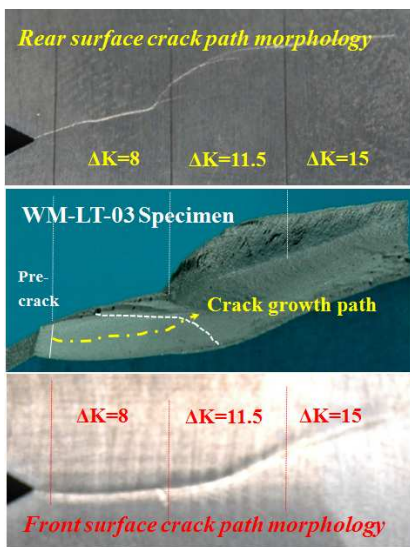


Fig. 6 Fracture surface of WM-LT-03 specimen

일례로 Fig. 6은 Fig. 3의 WM-LT-03 시험편에 대한 균열전파과정의 파단면 사진을 나타낸다.

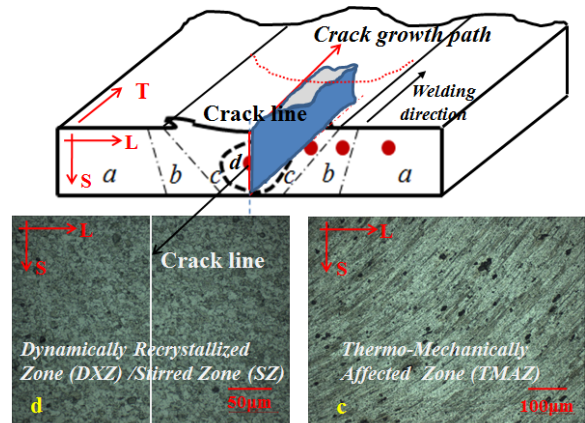


Fig. 7 Mechanism of non-directional (irregular) fatigue crack growth path for WM specimen

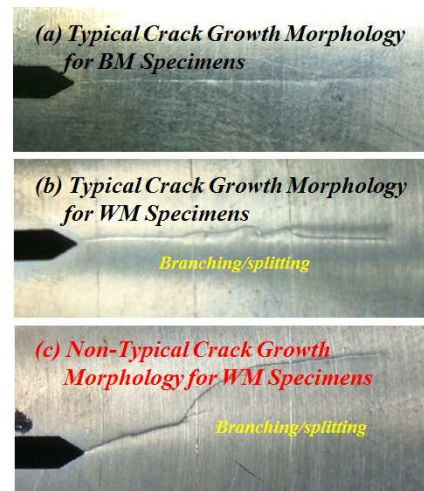


Fig. 8 Morphology of FCG in BM and WM

본 WM 시험편의 경우와 같이 앞면에서는 거의 하중 작용에 대하여 수직으로 전파하였으나 뒷면에서는 증가하는 전단슬립 형태의 전파 경로를 보임으로써,  $da/dN$ 이 비교적 낮게 나타났으며, 또한  $da/dN$ 의 변동도 크게 나타나는 것으로 사료된다. 이와 같이 균열전파경로가 하중의 작용 방향에 따라 앞면과 뒷면에서 균열의 전파경로가 수직으로 나타나지 않는 시험편이 5개의 시험편 중 2개의 시험편에서 나타났다. 이는 Fig. 7과 같이 마찰교반부(SZ) 영역의 동적 재결정된 미세한 용접 조직의 불균일성과 잔류응력 등의 영향으로 그 피로균열전파경로가 열적기계적영향부(TMAZ)로 이동된 것으로 생각된다.<sup>(16)</sup> 이것이 균열전파의 메카니즘이 편심(eccentricity)을 나타내는 것으로 사료된다.<sup>(17)</sup> BM 시험편의 경우는 모든 시험편에서 Fig. 8(a)와 같이 하중의 작용

방향에 수직으로 균열이 전파하는 양상을 보였으며, WM 시험편의 경우는 BM과 같이 하중의 작용 방향에 완전히 수직으로 전파하는 경우와 Fig. 8(c)와 같이 균열의 진행 방향이 수직이 아닌 사선 방향으로 진행되는 경우도 존재하였다. 특히 이들의 시험편에서는 피로균열전파율의 공간적 불규칙성이 매우 크게 나타나게 됨을 알았다. 또한 이들 시험편에 있어서 평균 피로균열전파율이 매우 낮았으며, 시험편간 변동에도 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.2 공간적 불규칙성의 고찰

시험편내에서의 피로균열전파율(FCGR)의 공간적 불규칙성을 고찰하기 위하여 각각의 재질에 대하여 동일 응력확대계수범위에서의 균열길이  $da=0.2$ 의 증분에서 측정된  $dN$ 를 구하여,  $da/dN$ 의 공간적 불규칙성을 동일 구동력의 전 시험편에 대하여 고찰하였다. 일례로 Fig. 9 및 Fig. 10에 BM 및 WM에 대한  $\Delta K = 8.0\text{MPa}(m)^{0.5}$ 에서의 FCGR의 히스토그램을 각각 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 도수분포표를 이용하여 확률분포를 추정해보면 대칭형태인 정규분포보다는 대수정규분포 혹은 Weibull 분포에 적합한 것으로 기대된다. 특히 후자는 응용범위가 넓고, 수치계산이 용이하기 때문에 피로균열전파수명의 확률분포로 많이 사용되고 있다.<sup>(18)</sup> 본 연구에서도 이상과 같은 관점에서 피로균열전파율의 분포를 아래의 2-파라미터 Weibull 분포에 적합하여 고찰하였다.

$$F\left(\frac{da}{dN}\right) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{da/dN}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 불규칙성을 의미하는 형상 파라미터(shape parameter)이며, 그리고  $\beta$ 는 특성치를 의미하는 척도 파라미터(scale parameter)이다.

Fig. 11는 피로균열전파율의 확률분포를 식 (1)의 Weibull 분포에 적합하여, BM 및 WM에 대한 응력확대계수범위에 미치는 피로균열전파율의 형상 파라미터의 영향을 나타낸 것이다. 시험편내에서의 피로균열전파율의 불규칙성을 의미하는 형상 파라미터는 BM 및 WM 모두 구동력이 증가하면 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 그 기울기는 WM의 경우가 BM보다 약 2.7배 정도 높게 나타남을 알았다.

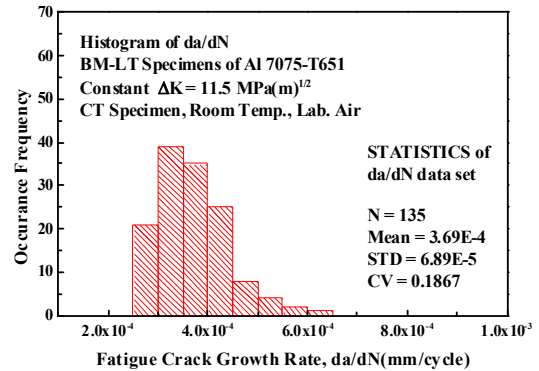


Fig. 9 Histogram of FCGR for BM specimens

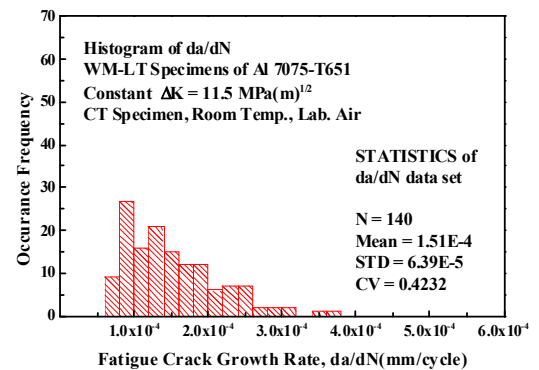


Fig. 10 Histogram of FCGR for BM specimens

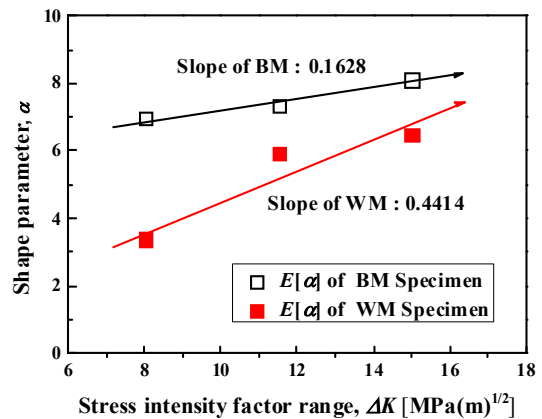


Fig. 11 Effect of shape parameter on SIFR

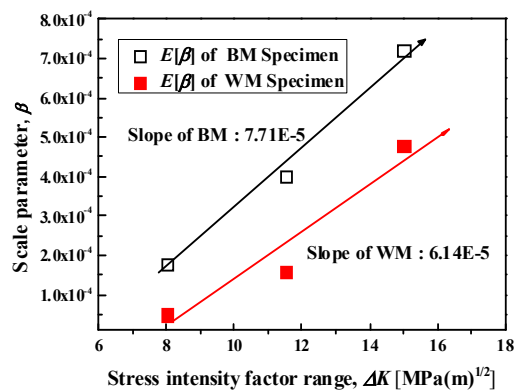


Fig. 12 Effect of scale parameter on SIFR

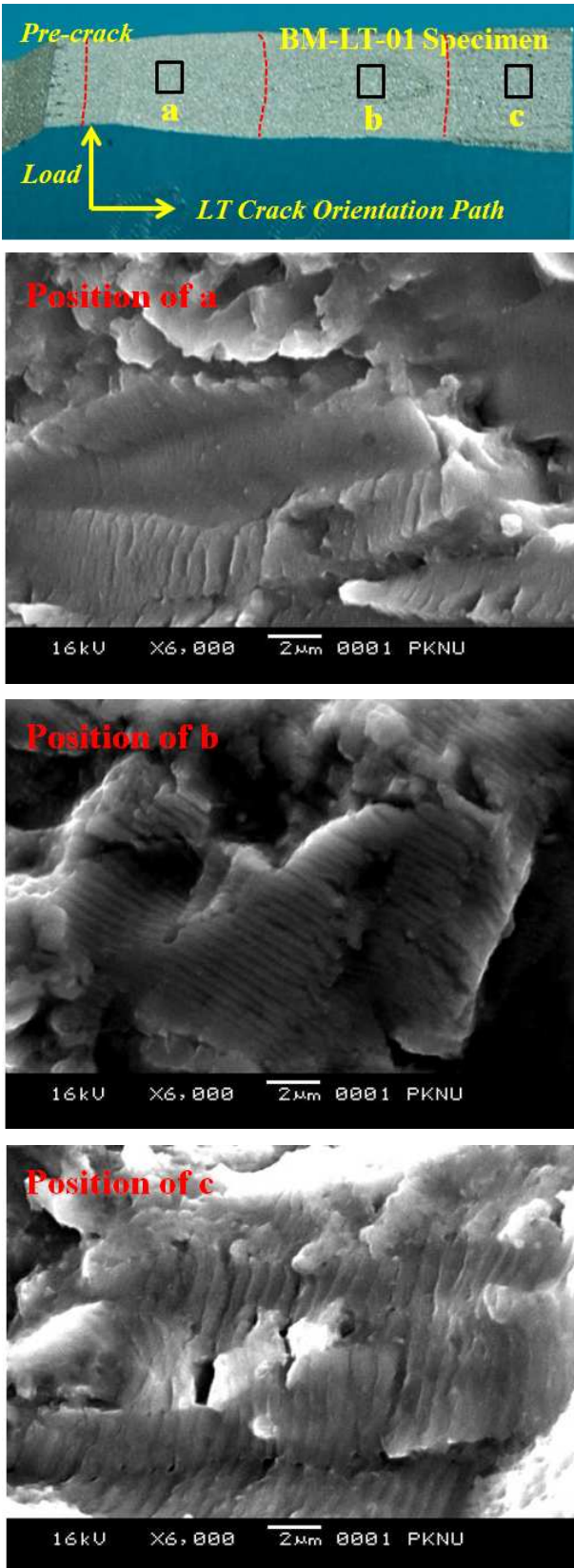


Fig. 13 SEM fractographs of BM specimen for (a)  $\Delta K=8$ , (b)  $\Delta K=11.5$  and (c)  $\Delta K=15$  regimes

모든 응력확대계수범위에서 피로균열전파율의 불규칙성은 WM 시험편이 높게 나타났으며, 특히 응력확대계수범위가 낮은  $\Delta K = 8.0MPa(m)^{0.5}$ 에서 WM 시험편의 형상 파라미터가 3.39로 매우 낮게 나타났다.

또한 Fig. 12에는 응력확대계수범위에 따른 시험편내에서의 피로균열전파율의 척도 파라미터의 영향을 나타낸 것이다. 척도 파라미터도 BM, WM 모두 구동력이 증가하면 증가하는 경향을 나타 내었으며, 그 기울기는 WM의 경우가 BM보다 약 2.7배 높음을 알았다. 평균 피로균열전파율은 WM의 경우가 BM보다 작다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 피로균열전파 과정의 파면 관찰

Fig. 13 및 Fig. 14는 각각 파괴된 모재(BM) 시험편과 용접재(WM) 시험편에 대하여 균열전파의 파괴 단면을 주사형 전자현미경(SEM)에 의하여 조사한 것이다. Fig. 13는 모재 시험편에 대한 응력확대계수범위가 각각 8.0, 11.5 및 15.0MPa(m)<sup>0.5</sup>의 3개의 구동력 조건하에서 관찰한 SEM의 사진이다. 모재의 시험편에 있어서는 피로균열전파의 전형적인 스트라이에이션(striation)이 모든 구동력조건하에서 나타났으며, 구동력이 증가할수록 스트라이에이션의 간격이 비교적 균일하게 증가함을 보여주고 있다. 이는 균열선단에서의 구동력 증가에 따른 피로균열전파저항에 대한 재료의 평균화의 영향으로 피로균열전파율이 증가하며, 또한 피로균열전파율의 공간적 불규칙성이 고응력의 구동력에서는 낮게 나온다고 하는 실험결과와도 잘 일치한다.<sup>(19)</sup>

Fig. 14는 Fig. 8(b)와 같은 거시적 균열전파 경로가 하중의 작용 방향과 균열이 수직 방향으로 전파하는 용접 시험편에 대하여, 응력확대계수범위가 각각 8.0, 11.5 및 15.0MPa(m)<sup>0.5</sup>의 3개의 구동력 조건하에서 관찰한 SEM의 사진이다. 모재 시험편의 경우와 비교하면 동일 구동력의 조건하에서 스트라이에이션의 간격은 좁게 나타났으며, 또한 불규칙성이 비교적 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이 거시적으로 균열가지 현상 등이 관찰되었다. 이는 용접 시험편의 경우 피로균열전파율이 각 구동력에서 모재 시험편 보다 느리고, 그 변동계수도 크게 나타날 것으로 예상됨을 알 수 있다.

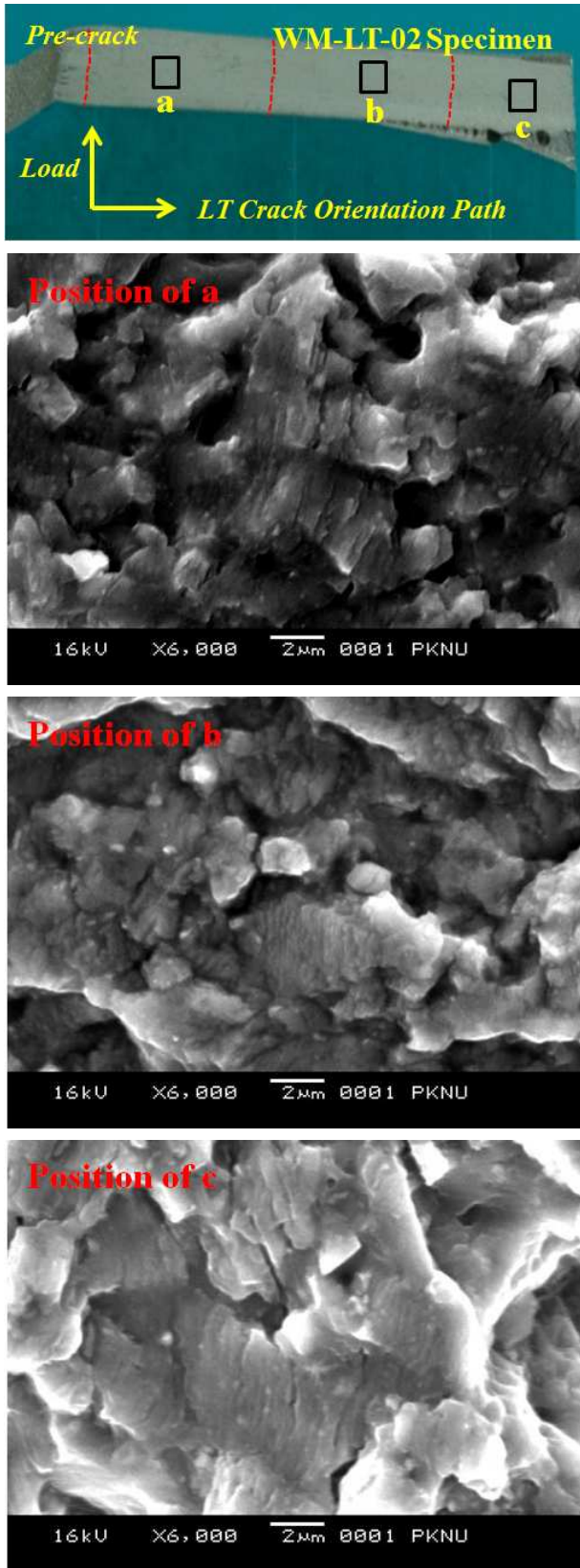


Fig. 14 SEM fractographs of WM specimen for (a)  $\Delta K=8$ , (b)  $\Delta K=11.5$  and (c)  $\Delta K=15$  regimes

#### 4. 결 론

마찰교반용접한 Al 7075-T651 판재에 대한 일정 응력확대계수제어 피로균열전파실험 데이터를 이용하여, 3가지 종류의 구동력에 대한 피로균열전파율의 시험편내에서의 공간적 불규칙성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일 시험편내에서도 균열길이에 따라 피로균열전파율( $da/dN$ )이 공간적으로 불규칙성을 나타내었으며, 또한 각 시험편 마다 평균적 피로균열전파율이 다름을 확인하였다.

(2) 피로균열전파율의 공간적 불규칙성을 Weibull 통계 해석을 통하여 평가할 수 있었으며, 모든 응력확대계수범위에서 피로균열전파율의 불규칙성은 WM 시험편에서 높게 나타났다.

(3) 특히 응력확대계수범위가 낮은  $\Delta K=8.0$  MPa(m)<sup>0.5</sup>의 영역에서 WM 시험편의 형상계수는 3.39로 가장 낮게 나타났다. 그리고 구동력이 증가하면 피로균열전파율( $da/dN$ )의 척도 파라미터는 WM, BM 모두 증가함이 확인되었다.

(4) WM 시험편의 경우가 BM 보다 스트라이에이션의 간격이 좁게 나타났으며, 또한 그 간격의 불규칙성이 비교적 크게 나타났다.

#### 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- (1) Rama Chandra Murthy, A., Palani, G. S. and Nagesh, R. L., 2009, "Remaining Life Prediction of Cracked Stiffened Panels under Constant and Variable Amplitude Loading," *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, No. 6, pp. 1125~1139.
- (2) Zio, E. and Peloni, G., 2011, "Particle Filtering Prognostic Estimation of the Remaining Useful Life of Nonlinear Components," *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 96, No. 3, pp. 403~409.
- (3) Casarendra, W., Yang, B. S. and Kim, S. J., 2009, "Residual Life Prediction of Crack Growth Rate Based on Particle Filter and Numerical Analysis," *KSPSE 2009 Autumn Conference Proceedings*, pp. 53~58.

- (4) Workshop, 2007, "Diagnostics, Prognostics, and Health Management (DPHM): from Theory and to Practice," *IAI*, July 11~13. 2007.
- (5) Zio, E. and Di Maio, F., 2012, "Fatigue Crack Growth Estimation by Relevance Vector Machine," *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No.12, pp. 10681~10692.
- (6) Leem, S. H., An, D., Choi, J. H., 2011, "Bayesian Parameter Estimation for Prognosis of Crack Growth under Variable Amplitude Loading," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 10, pp. 1299~1306.
- (7) Virkler, D. A., Hillberry, B. M. and Goel, P. K., 1979, "The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation," *Trans, ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 101, pp. 148~153.
- (8) Ortiz, K. and Kiremidjian, A. S., 1986, "Time Series Analysis of Fatigue Crack Growth Rate Data," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 24, No. 5, pp. 657~675.
- (9) Sobczyk, K., 1993, "*Stochastic Approach of Fatigue*," Springer-Verlag, Wien-New York, pp. 1~301.
- (10) Jeong, H. C. and Kim, S. J., 2003, "Probabilistic Fatigue Crack Growth Behavior under Constant Amplitude Loads," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 27, No. 6, pp. 923~929.
- (11) Hatamleh, O., Lyons, 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.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) Jeong, Y. H. and Kim, S. J., 2013, "Experimental Investigation of Fatigue Crack Growth behavior in FSWed 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.
- (17) Lemmen, H. J. K., Iderliesten, R. C. and 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.
- (18) Itagaki, H., Ogawa, T. and Yamamoto, S., 1977, "Bayesian Approach for the Estimation of the Probability Distribution of Fatigue Life," *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol. 141, pp.244~249.
- (19) Kim, S. J., 2003, "Characteristics of Parameters for the Distribution of Fatigue Crack Growth Lives under Constant Stress Intensity factor Control," *Trans of KSOE*, Vol. 17, No. 2, pp. 54~59.