

마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 균열 방향의 영향 Effect of Crack Orientation on Spatial Randomness of Fatigue Crack Growth Rate in FSWed 7075-T651 Aluminum Alloy Joints

정의한* · 김선진**†

Yeui-Han Jeong* and Seon-Jin Kim**†

(접수일 : 2013년 07월 30일, 수정일 : 2013년 09월 10일, 채택확정 : 2013년 09월 11일)

Abstract: In this investigation, the effect of crack orientation on spatial randomness of fatigue crack growth rate (FCGR) in friction stir welded (FSWed) 7075-T651 aluminum alloy joints has been statistically analyzed by Weibull distribution. The fatigue crack growth tests are conducted under three different constant stress intensity factor range (SIFR) control at room temperature with $R = 0.1$ and frequency 10Hz on compact tension (CT) specimen machined at base metal (BM) and weld metal (WM). The experimental fatigue crack growth rate data were obtained for two types of specimens having LT and TL orientations. LT specimens both base metal and weld metal showed higher fatigue crack growth rate as compared to TL specimens. In the lower SIFR region, FCGR were found to be almost 3 times higher in higher SIFR region. The shape parameter of Weibull both LT and TL orientation for FCGR was increased with increasing SIFR, the scale parameter was also increased with increasing SIFR. The smallest value of the shape parameter was shown in weld metal specimens having LT orientation at lower SIFR region.

Key Words : Crack Orientation, Spatial Randomness, Fatigue Crack Growth Rate, Weibull Distribution

1. 서 론

알루미늄 합금의 피로균열전파 거동에 관한 확률·통계적 연구는 비교적 많이 연구되어 왔지만,¹⁻⁵⁾ 신뢰성 공학적 관점에서 마찰교반용접체의 피로균열전파 거동의 통계적 불규칙성을 고찰한 연구는 매우 부족한 실정이다.⁶⁾ 이러한 관점에

서 저자 등은 선행적으로 마찰교반용접체의 피로균열전파 거동의 공간적 불규칙성의 영향을 고찰하기 위한 연구의 일환으로써, 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 LT 방향의 CT(compact tension) 시험편에 의한 일정 응력확대 계수범위 제어 피로균열전파 실험을 수행하여 모재와 용접체에 대한 피로균열전파 거동의 실험적

**† 김선진(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6163

*정의한 : 부경대학교 기계설계공학과

**† Seon-Jin Kim(corresponding author) : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University.

E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6163

*Yeui-Han Jeong : Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

고찰과⁷⁾ 더불어 피로균열전파율의 통계적 확률분포에 대한 기초적 연구를 수행하였다.⁶⁾ 그러나 마찰교반용접재의 피로균열전파의 균열방향에 따라 그 피로균열전파 거동의 양상과 피로균열전파율의 공간적 불규칙성의 특성도 다를 것으로 사료된다.

Lemmen 등⁸⁾은 AA2024-T3 및 AA7075-T6 재의 판재에 대하여 마찰교반용접을 수행하여 용접재를 포함하는 3가지의 다른 균열방향에 대하여 CCT 시험편을 이용하여 균열방향의 영향을 고찰하였다. 이들의 결과에 의하면, 용접재의 피로균열전파 거동은 합금의 형태에도 영향을 받고 있으며, AA7075-T6 재가 다른 재료보다도 균열방향의 영향을 더 많이 받는다고 보고하고 있다. 하지만 그들은 피로균열전파율의 공간적 변동성에 대한 균열방향의 영향에 대하여는 고찰하지 않았으며, 이러한 연구는 손상허용설계의 관점에서 매우 중요하지만 마찰교반용접재에 대한 피로균열전파율의 공간적 변동성을 조사한 연구는 거의 없다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 균열방향의 영향을 명확히 조사하기 위한 목적의 일환으로, TL 균열방향의 CT 시험편에 대하여 일정 응력확대계수 범위 제어 실험을 수행하여 전보의 LT 균열방향의 실험결과⁹⁾와 더불어 피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 균열방향의 영향을 Weibull 통계 해석을 이용하여 고찰하였다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 사용재료 및 마찰교반용접

본 연구에 사용된 재료는 국내 H사에서 제공된 두께 6mm의 Al7075-T651 알루미늄 판재이다. 본 재료에 대한 화학적 성분은 Si 0.08%, Fe 0.19%, Cu 1.61%, Mn 0.052%, Mg 2.52%, Cr 0.19%, Ni 0.0061%, Zn 5.79%, Ti 0.022% 그리고 Al bal.% 이다. 그리고 주요한 기계적 성질은 인장강도 565 MPa, 항복강도 481MPa 그리고 연신율 15% 이다.

본 연구에 사용된 마찰교반용접기는 국내 W사의 3축 스텐드 타입의 터치 패널 조작방식의 직선 마찰교반용접기를 사용하였다. 마찰교반용접 실험은 전보⁹⁾의 LT 균열방향의 시험편과 동일하게 7075-T651의 압연 판재로부터 압연 방향을 100 mm, 폭 방향으로 250mm의 직사각형 크기로 절단하여 압연방향의 수직방향을 용접진행 방향으로 하여 용접을 수행하였다. 마찰교반용접에 사용된 공구 또한 전보⁹⁾의 LT 방향의 것을 사용하였으며, 마찰교반용접 조건도 Table 1과 같이 동일하게 수행하였다.⁹⁾ Fig. 1에 본 연구의 마찰교반용접 실험 과정의 사진을 나타낸다.

2.2 시험편 채취 및 피로균열전파 실험

마찰교반용접된 시험재로부터 Fig. 2와 같이 판재의 압연방향을 균열의 진행방향으로 제작한 TL 균열방향의 표준 CT 시험편을 모재(BM)와 용접재(WM)에 대하여 채취하였다. 그림 중에는 이전에 수행한 LT 균열방향의 시험편에 대한 채취 모식도도 함께 나타내었다.

Table 1 Optimal friction stir welding conditions

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

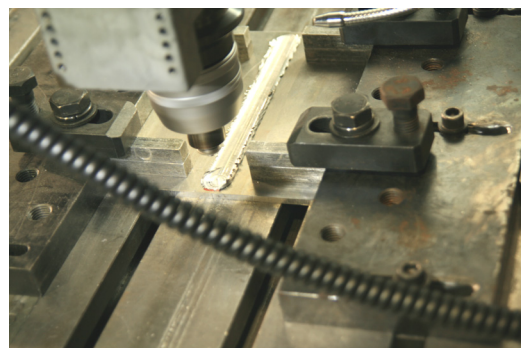


Fig. 1 Photo of friction stir welding process

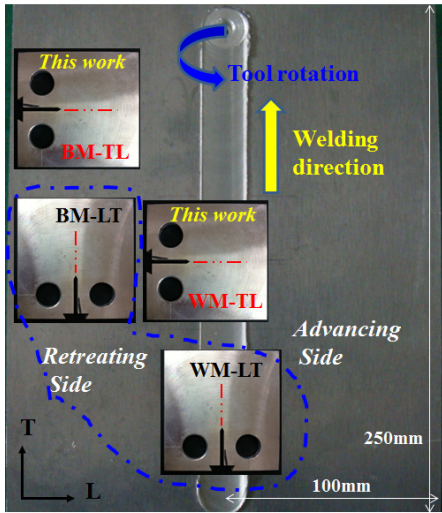


Fig. 2 Schematic diagram of CT specimen cutting

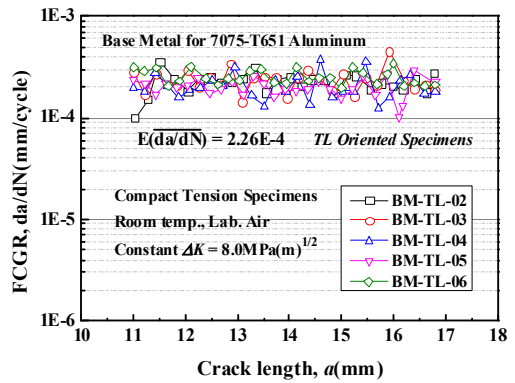
본 연구에서는 균열방향의 영향을 용이하게 평가하기 위하여 상술한 바와 같이 CT 시험편에 대하여 제작하여, 기계 가공시 열 영향이 극소화되도록 앤드밀과 정면카터를 사용하여 가공하였으며, 노치부는 방전가공으로 행하였다. 본 연구에 사용된 시험편의 치수는 ASTM E647 규정¹⁰⁾에 따라 폭 $W=50\text{mm}$, 그리고 두께 $B=5\text{mm}$ 의 W/B 의 비율을 10으로 하였다. 즉 ASTM E647의 $W/20 \leq B \leq W/4$ 의 두께 규정을 만족한다.

피로균열전파 실험은 전기유압서보식 피로시험기(Instron Model 8821S)를 사용하였으며, 시험조건은 응력반복속도 10Hz, 응력비(R) 0.1의 정현파 인장-인장 일정 응력확대계수범위 제어방식으로 LT 균열방향의 시험조건과 동일하게 응력확대계수범위(ΔK) 8.0, 11.5 및 15.0 $\text{MPa}(\text{m})^{1/2}$ 의 3가지 구동력 조건하에서 실험하였다. 한편 균열길이의 측정에는 피로균열전파 시험 중의 하중과 시험편에 부착한 COD(crack opening displacement) 게이지에서 측정된 결과에서 Saxena 등¹¹⁾이 제안한 식을 이용하여 컴플라이언스법에 의하여 측정 해석 하였다. 또한 본 연구에서는 피로균열전파율의 공간적 변동성을 조사하기 위하여, 균열증분(da)이 0.2mm 증가할 때마다의 사이클 수를 측정하여 피로균열전파율(da/dN)을 계산하였다.

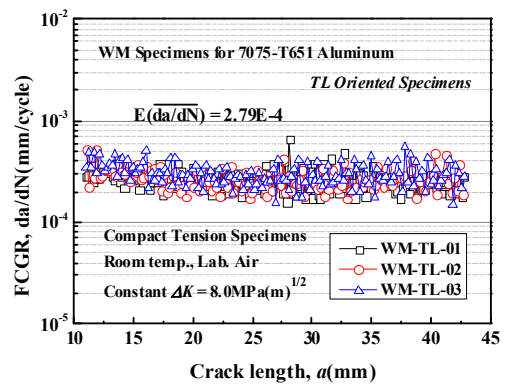
3. 결과 및 고찰

3.1 피로균열전파율의 공간적 변동성

Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 TL 및 LT 균열방향의 응력확대계수범위 8.0 $\text{MPa}(\text{m})^{1/2}$ 일 때의 BM과 WM 시험편에 대한 균열길이에 따른 피로균열전파율(da/dN)의 공간적 변동성을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 TL 및 LT 균열방향의 모든 시험편에서 피로균열전파율은 균열길이에 따라 공간적으로 변동하고 있음을 알 수 있다. 이는 피로균열전파에 대한 재료의 전파저항이 공간적으로 변동성을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

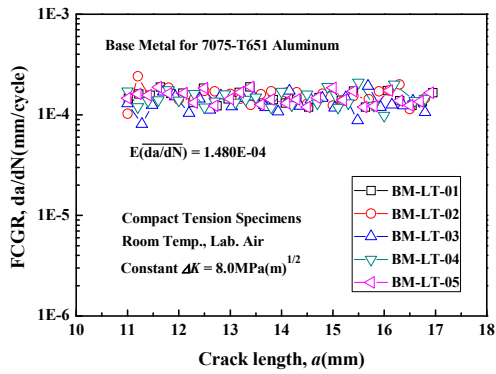


(a) BM specimens

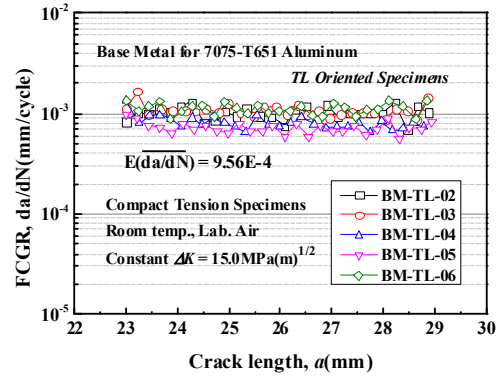


(b) WM specimens

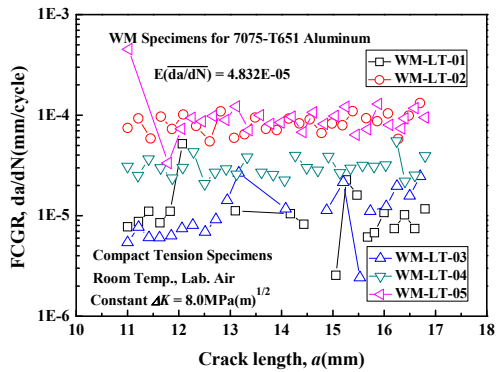
Fig. 3 Spatial randomness of FCGR, da/dN in TL-orientation for $\Delta K = 8.0 \text{ MPa}(\text{m})^{1/2}$



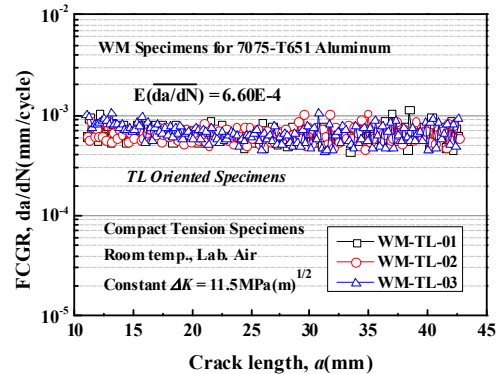
(a) BM specimens



(a) BM specimens



(b) WM specimens



(b) WM specimens

Fig. 4 Spatial randomness of FCGR, da/dN in LT-orientation for $\Delta K = 8.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$

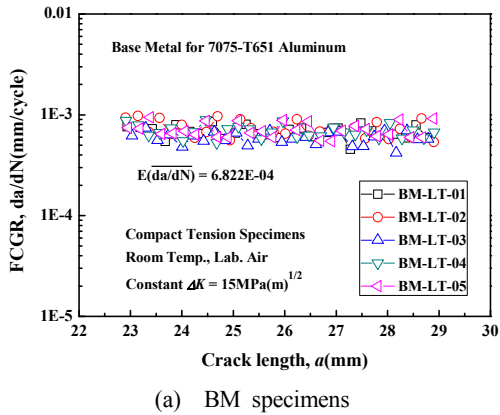
Fig. 5 Spatial randomness of FCGR, da/dN in TL-orientation for $\Delta K = 15.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$

Fig. 3의 구동력의 조건에서 피로균열전파율의 공간적 변동성을 재질에 따라 거시적으로 고찰하면, TL 및 LT 균열방향 모두 WM 시험편의 경우가 BM 시험편보다 공간적 변동성이 다소 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 마찰교반용접재의 미세조직의 영향이라 사료된다.

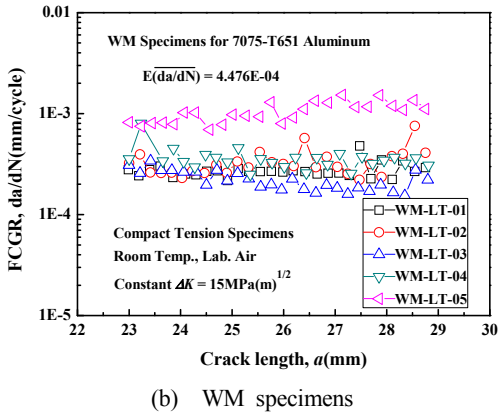
한편, 본 연구의 비교적 구동력이 높은 응력화대계수범위 $15.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ 에서의 TL 및 LT 균열방향의 BM 과 WM 시험편에 대한 균열길이에 따른 피로균열전파율(da/dN)의 공간적 변동성을 Fig. 5 및 Fig. 6에 각각 나타낸다. Fig. 3의 경우와 동일하게 TL 및 LT 균열방향 모두 WM 시험편의 경우가 BM 시험편보다 변동성이 다소 높게 나타

나는 경향을 보이고 있다.

이상의 결과에서도 알 수 있듯이 거시적으로 비교적 낮은 구동력에서는 피로균열전파율의 공간적 변동성이 높게 나타남을 알 수 있고, 비교적 높은 구동력에서는 그 공간적 변동성이 낮아지는 경향을 나타내었다. 이는 구동력이 증가할수록 균열선단에서의 소성영역의 크기가 증가하여 피로균열전파저항의 평균화의 영향에 기인하는 것으로 생각된다. LT 균열방향의 WM 시험편의 경우 낮은 구동력인 $8.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ 에서 시험편간 및 시험편 내에서의 공간적 변동성이 가장 크게 나타났다. 이는 LT 균열방향의 WM 시험편의 경우 교반부의 중심을 통과하는 것으로 마찰교반용접부의 미세조



(a) BM specimens



(b) WM specimens

Fig. 6 Spatial randomness of FCGR, da/dN in LT-orientation for $\Delta K = 15.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$

직과 균열전파 경로의 불규칙성 및 구동력의 조합 등에 기인하는 것으로 사료된다.⁹⁾ 즉, LT 균열방향의 피로균열전파 과정의 메카니즘은 TL 균열방향의 피로균열전파 과정의 메카니즘과는 다를 것으로 생각된다. 본보에서는 균열방향의 영향에 대한 공간적 변동성을 고찰하는 것이 목적이므로 이에 대한 심도 있는 고찰은 향후 과제로 남겨두기로 한다.

이하에서는 Weibull 해석에 의한 피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 균열방향의 영향을 고찰하고자 한다.

3.2 공간적 변동성의 Weibull 해석

피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 TL

균열방향의 영향을 고찰하기 위하여, 전보의 LT 균열방향의 경우와 비교하기 위하여 피로균열전파율(da/dN)의 확률분포를 다음과 같은 2-파라미터 Weibull 분포에 적합하여 고찰하였다.⁹⁾

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

여기서, α 는 피로균열전파율의 변동성을 의미하는 형상 파라미터(shape parameter)이며, 그리고 β 는 63.2% 확률에서의 특성치를 나타내는 척도 파라미터(scale parameter)이다.

Fig. 7은 TL 균열방향의 피로균열전파율의 확률분포를 (1)식의 Weibull 분포에 적합하여, BM 및 WM 시험편에 대한 피로균열전파율의 형상 파라미터의 영향을 나타낸 것이다. 피로균열전파율의 공간적 변동성을 의미하는 형상 파라미터는 BM 및 WM 모두 응력확대계수범위가 증가하면 그 형상 파라미터의 값도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 BM 및 WM 시험편에 대한 구동력에 미치는 기울기는 BM이 0.502, WM이 0.320으로 BM의 경우가 WM 보다 1.6배 정도 높게 나타났다. LT 균열방향과 TL 균열방향의 피로균열전파율의 공간적 변동성을 비교하기 위하여 전보의 해석결과를 포함하여 형상 파라미터의 영향을 Fig. 8에 종합하여 나타내었다.

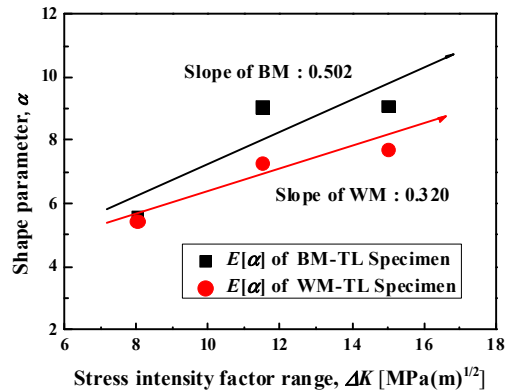


Fig. 7 Effect of shape parameter on BM and WM for TL-orientation

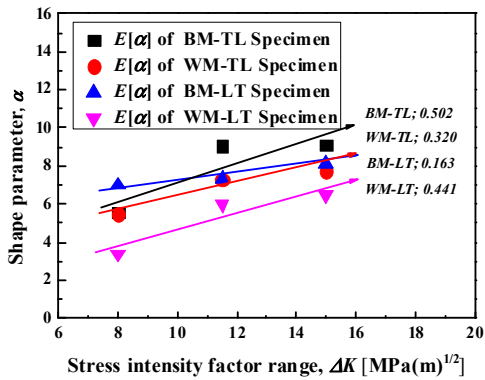


Fig. 8 Effect of shape parameter on TL and LT orientations

Weibull 확률분포에 적합한 피로균열전파율의 변동성을 나타내는 형상 파라미터의 영향은 LT 및 TL 균열방향에 관계없이 응력확대계수범위가 증가하면 모두 증가하는 경향을 나타내었으며, 그 기울기는 TL 균열방향의 BM 시험편에서 0.502로 가장 높게 나타났으며, LT 균열방향의 BM 시험편에서 0.163으로 가장 낮게 나타났다. 즉 구동력의 증가에 따른 공간적 변동성은 TL 균열방향의 BM 시험편에서 가장 낮은 변동성을 나타내는 것을 의미한다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이, 균열방향과 재질에 관계없이 모든 시험편에 있어서 응력확대계수범위가 낮은 $\Delta K=8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$ 에서 형상 파라미터가 가장 낮게 나타났으며, BM 시험편의 경우는 TL 균열방향에서 5.5로 가장 낮게 나타났으며, WM 시험편의 경우는 LT 균열방향에서 3.39로 가장 낮게 나타났다. 이들의 결과를 종합하면 마찰교반용접재의 WM 시험편에 대한 피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 균열방향의 영향은 분명히 존재함을 알 수 있으며, 특히 LT 균열방향의 WM 시험편에서 모든 응력확대계수범위에서 가장 공간적 변동성이 많다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 9와 같이 마찰교반용접부 영역의 동적 재결정된 용접 조직의 불균일성과 잔류응력 등의 영향으로 그 피로균열전파경로가 다소 불규칙하게 변화하고 균열전파의 메카니즘이 편심을 나타내는 것으로 사료된다.^{9,10)}

또한 Fig. 10에 LT 균열방향과 TL 균열방향에 미치는 피로균열전파율의 척도 파라미터의 영향을 종합하여 나타내었다.

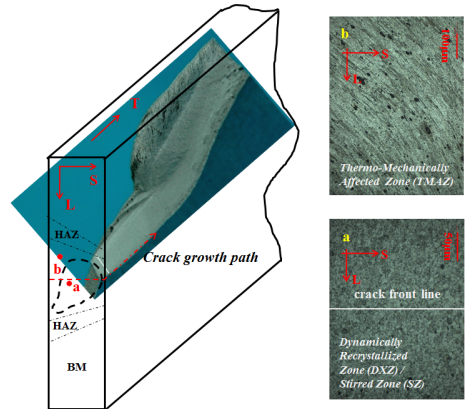


Fig. 9 Mechanism of irregular crack growth path for WM specimen in LT-orientation

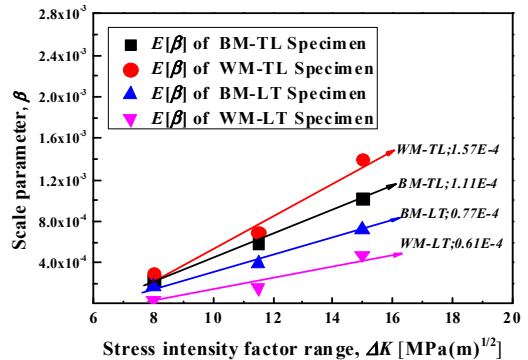


Fig. 10 Effect of scale parameter on TL and LT orientations

Fig. 10에서 알 수 있듯이, 피로균열전파율의 척도 파라미터의 영향은 LT 및 TL 균열방향에 관계없이 응력확대계수범위가 증가하면 모두 증가하는 경향을 나타내었으며, 그 기울기는 TL 균열방향의 WM 시험편에서 가장 높게 나타났으며, LT 균열방향의 WM 시험편에서 가장 낮게 나타났다. 즉 구동력의 증가에 따른 피로균열전파율의 빠르기는 TL 균열방향의 WM 시험편에서 가장 전파율이 빠

름을 알 수 있다.

이상에서 알 수 있듯이 마찰교반용접제의 피로 균열전파율에도 균열방향의 영향이 분명히 존재함을 확인하였고, TL 균열방향의 전파율이 LT 균열 방향의 전파율보다 빠름을 확인하였다.

4. 결 론

마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 균열 방향의 영향을 조사하기 위하여, CT 시험편에 대하여 일정 응력확대계수범위 제어 피로균열 전파 실험을 수행하여 해석 및 고찰한 결과 다음과 같은 중요한 결론을 얻었다.

(1) TL 및 LT 균열 방향의 모든 시험편에서 균열길이에 따라 피로균열전파율이 공간적으로 변동하고 있음을 알 수 있었다.

(2) 피로균열전파율의 공간적 변동성을 Weibull 확률분포를 이용하여 평가할 수 있었으며, 피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 균열 방향의 영향은 분명히 존재함을 알 수 있었다.

(3) 균열 방향과 재질에 관계없이 모든 시험편에 있어서 응력확대계수범위가 비교적 낮은 $\Delta K = 8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$ 에서 형상 파라미터가 가장 낮게 나타났다.

(4) 피로균열전파율의 척도 파라미터는 LT 및 TL 균열 방향에 관계없이 응력확대계수범위가 증가하면 모두 증가하는 경향을 나타내었다.

(5) 최종적으로 LT 균열 방향의 WM 시험편에서 모든 응력확대계수범위에서 가장 공간적 변동성이 크다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012학년도 부경대학교 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2012-70).

References

1. D. A. Virkler, B. M. Hillberry and P. K. Geol,

- 1979, "The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation", Journal of Engineering Materials and Technology, ASME, Vol. 111, pp. 148-153.
2. J. K. Kim and D. S. Shim, "The Variation in Fatigue Crack Growth due to the Thickness Effect", Int. J. of Fatigue, Vol. 22, pp. 611-618.
3. B. Moreno, J. Zapatero and J. Dominguez, 2003, "An Experimental Analysis of Fatigue Crack Growth under Random Loading", International Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 597-608.
4. W. F. Wu and C. C. Ni, 2003, "A Study of Stochastic Fatigue Crack Growth Modeling through Experimental Data", Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 18, pp. 107-118.
5. Z. Lu and Y. Liu, 2011, "Experimental Investigation of Random Loading Sequence Effect on Fatigue Crack Growth", Materials and Design, Vol. 32, pp. 4773-4785.
6. S. H. Ahn and S. J. Kim, 2013, "Statistical Distribution of Fatigue Crack Growth Rate for Friction Stir Welded Joints of 7075-T651", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 86-93.
7. W. H. Jeong and S. J. Kim, 2013, "Experimental Investigation of Fatigue Crack Growth Behavior in FSWed 7075-T651 Aluminum Alloy Joints under Constant Stress Intensity Factor Range Control Testing", Trans. KSME (A), Vol. 37, No. 6, pp. 775-782.
8. H. J. K. Lemmen, R. C. Alderliesten and R. Benedictus, 2011, "Macro and Microscopic Observations of Fatigue Crack Growth in Friction Stir welded Aluminum Joints", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 78, pp. 930-943.
9. Y. H. Jeong and S. J. Kim, 2013, "Spatial Randomness of Fatigue Crack Growth Rate in FSWed 7075-T651 Aluminum Alloy Welded Joints (Case of LT Orientation Specimen)", Trans. KSME (A), Vol. 37, No. 9, pp. 1111-1118.

10. ASTM E647-05, 2005, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01, ASTM International.
11. A. Saxena and S. J. Hudak, Jr., 1978, "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens", Int. Journal of Fracture, Vol. 14, No. 5, pp. 453-468.