

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.12.1317>

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

마찰교반용접된 A17075-T651 용접부의 피로균열전파 거동에 미치는 시험편 채취방향의 영향[§]

정 의 한* · 김 선 진**

* 부경대학교 대학원 기계설계공학과, ** 부경대학교 기계자동차공학과

Effect of Specimen Orientation on Fatigue Crack Growth Behavior in Friction Stir Welded Al7075-T651 Joints

Yeui Han Jeong* and Seon Jin Kim**

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

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

(Received February 4, 2014 ; Revised August 6, 2014 ; Accepted August 18, 2014)

Key Words: Fatigue Crack Growth(피로균열전파), Friction Stir Welding(마찰교반용접), Specimen Orientation(시험편 채취방향), Constant Stress Intensity Factor Range(일정응력확대계수범위)

초록: 본 연구의 목적은 마찰교반용접된 A17075-T651의 피로균열전파 거동에 미치는 시험편의 채취방향의 영향을 고찰하기 위한 것이다. 피로균열전파 실험은 마찰교반용접된 공시재료로부터 모재와 용접재에 대하여 CT 시험편을 채취하여 일정응력확대계수범위 제어하에서 수행되었다. 균열이 용접선에 수직하여 전파하는 것(TL 시험편으로 명명)과 균열이 용접선과 나란히 전파하는 시험편(LT 시험편으로 명명)에 대하여 3가지 다른 응력확대계수범위에서 실험이 수행되었다. 시험편의 채취 방향에 따라 피로균열 전파거동에 주요한 영향을 미침을 알 수 있었다. Paris 법칙에 적합시킨 결과 지수 m값은 WM-LT 시험편이 3.56으로 가장 높게 나타났다.

Abstract: The aim of this paper is to investigate the effects of crack orientation on fatigue crack growth behavior in friction stir welded (FSWed) Al 7075-T651. Fatigue crack growth testing was conducted on compact tension (CT) specimens machined from the friction stir welds and the base metal under constant stress intensity factor range control. Tests were performed with the crack propagating nominally perpendicular to the weld line (termed the TL specimen) and the crack propagating in a parallel direction of the weld line (termed the LT specimen), and with three different constant stress intensity factor ranges. Both these specimen orientations were found to have a considerable effect on the fatigue crack growth behavior. Paris's law was adopted for the analysis of experimental results; the exponent m of the WM-LT specimen was determined to be 3.56, which was the largest value in this experimental conditions.

- 기호설명 -

a : 균열길이(mm)
N : 사이클수(cycle)
da/dN : 피로균열전파율(mm/cycle)
m : Paris 법칙의 지수

C : Paris 법칙의 상수
 ΔK : 응력확대계수범위(MPa(m)^{1/2})
E[LT(da/dN)] : LT 방향의 평균 피로균열전파율
E[TL(da/dN)] : TL 방향의 평균 피로균열전파율

1. 서론

고강도 알루미늄 합금인 A17075-T651에 대한 피로 거동에 관한 연구는 국내외적으로 비교적 많이 연구되어 왔지만,⁽¹⁻³⁾ 마찰교반용접에 대한 피로균열전파

§ 이 논문은 대한기계학회 2013년도 학술대회(2013. 12. 18.-20., 강원랜드) 발표논문임.

† Corresponding Author, sjkim@pknu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

거동에 대한 연구는 비교적 적다.⁽⁴⁾ 이러한 관점에서 저자 등은 최적 마찰교반용접 조건에서 용접한 Al7075-T651에 대한 LT 균열 방향의 시험편에 대하여 일정 응력확대계수범위 제어 시험하의 피로균열전파시험을 수행하여 용접재(WM)와 모재(BM)에 대한 균열의 구동력에 미치는 피로균열전파 거동을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.^(5,6) 3가지 다른 종류의 응력확대계수범위, 즉 $\Delta K=8.0, 11.5$ 그리고 $15.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ 에 대한 피로균열전파율의 변동성을 고찰한 결과, 그 피로균열전파율에는 불규칙성이 존재함을 보고하였다. 마찰교반용접재의 WM재의 경우가 그 변동성이 BM재 보다 높게 나타났다. 그러나 상기의 연구에서 행한 결과는 LT 채취방향의 시험편에 대한 결과이고, TL 채취방향의 조건에서도 동일한 결과가 나타날지는 알 수 없다. 균열의 전파방향에 따른 용접재의 피로균열전파율의 공간적 변동성을 고찰하는 것은 신뢰성 확보를 위한 안전 설계에 매우 유용한 지식을 시사해 줄 것으로 기대된다.

이러한 관점에서 본보에서는 마찰교반용접된 용접재(여기서는 WM으로 표현)와 모재(BM)에 대하여 TL 채취방향의 표준 CT 시험편을 용이하여 일정응력확대계수범위 제어 피로균열전파 실험을 수행함으로써 TL 채취방향의 시험편과 전보^(5,6)의 LT 채취방향의 시험편에 대한 피로균열전파 거동을 비교한 결과를 보고하고자 한다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 시험편 재료는 국내 H사에서 제작된 두께 6mm의 Al7075-T651 알루미늄 합금 판재이다. 본 재료에 대한 그 화학적 성분과 기계적 성질은 전보^(5,6)에 상세히 기술되어 있으므로 지면관계상 본보에서는 생략한다.

2.2 마찰교반용접

본 연구에 사용된 마찰교반용접기는 국내 W사의 3축 스탠드 타입의 터치 패널 조작방식의 직선 마찰교반용접기를 사용하였으며, Y축 스트로크는 최대용량 1,000mm이다. 마찰교반용접 실험에 사용된 재료는 원판 치수 6x1250x2500mm, 무게 3.576kg의 압연 판재로부터 압연 방향을 100mm, 폭방향으로 250mm의 직사각형 크기로 절단하여, 횡방향을 용접 진행 방향으로 하여 마찰 교반용접을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 마찰교반용접 조건은 저자 등

의 선행 연구의 결과^(7,8)를 이용하여 Table 1과 같은 용접변수를 선정하여 마찰교반용접을 주의 깊게 수행하였다.

2.3 피로균열전파실험 방법 및 절차

피로균열전파 실험에 대하여도 전보의 LT 채취 방향의 실험과 동일하게 수행하였으나,^(5,6) 이해를 돕기 위하여 여기서는 간략히 서술하고자 한다. 피로균열전파 거동을 평가하기 위한 시험편은 ASTM E647 규정⁽⁹⁾에 의한 폭이 50mm 그리고 두께 5mm인 표준 CT 시험편을 사용하였다. 시험편의 채취방향은 압연 방향과 균열의 전파방향이 같은 TL 채취방향의 시험편에 대하여 제작 하였으며, WM 그리고 BM 재에 대한 시험편의 채취, 가공한 개념도를 Fig. 1에 나타낸다. 참고로 LT 채취방향의 시험편에 대한 WM 및 BM 재의 채취, 가공한 개념도도 그림 중에 함께 나타내었다. 시험조건은 전보의 LT 시험편과 동일하게 실험실의 대기중에서 응력반복속도 10Hz, 응력비 0.1의 정현파 인장-인장 일정응력확대계수제어 방식으로, BM재의 재질에 대하여 동일한 구동력, 즉 응력확대계수범위 8.0, 11.5 그리고 $15.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ 조건하에서 각각 5개의 시험편에 대하여 실험을 수행하였다. WM재의 경우도 3가지의 동일 구동력에서 각각 3개의 시험편에 대하여 수행하였다.

Table 1 FSW conditions for this study

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

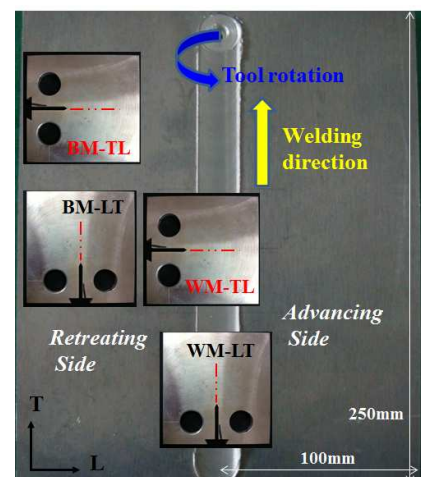


Fig. 1 Schematic illustration of specimen cutting for crack orientation

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열 방향에 따른 피로균열전파 거동(BM재)

Fig. 2는 LT 채취방향과 TL 채취방향의 모재 (BM) 시험편에 대한 3가지의 구동력 8.0, 11.5 및 15.0 MPa(m)^{1/2}에 대한 응력반복수 *N*과 균열길이 *a*와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 구동력의 조건에서 하나의 시험편에 대한 *a-N*의 관계는 일정응력확대계수범위 제어하의 전형적인 형태인 직선의 형태를 잘 보여주고 있다. 동일 실험조건의 모든 구동력에 있어서도 그 곡선의 기울기가 각각 다르게 나타나고 있다. 즉, 시험편간 피로균열전파 거동에는 변동이 존재함을 알 수 있다. 이것은 피로균열전파에 대한 재료의 전파저항의 국부적 평균치가 시험편간에서 변동한다고 할 수 있으며, 또한 하나의 시험편에서도 직선의 기울기가 다소 다르게 나타나는 것은 피로균열전파 저항의 국부적 평균치가 변동하는 것으로 사료된다. 응력확대계수범위가 비교적 낮은 Δ*K*=8.0 MPa(m)^{1/2}에서는 다른 응력확대계수범위 보다 피로균열전파 거동의 불규칙성이 큰 것으로 나타났다. 이는 피로균열전파 저항에 미치는 구동력의 크기, 미세조직 등의 조합에 의한 영향인 것으로 사료된다. 본 실험에 의한 각각의 응력확대계수범위에서 5개의 시험편에 의한 그 평균 피로균열전파율을 Table 2에 정리하여 나타내었다. 모든 구동력에서 TL 채취방향의 피로균열전파율이 높게 나타났다.

한편, 피로균열전파율과 응력확대계수범위와의 관계를 Fig. 3에 나타낸다. 본 실험의 조건에서 피로균열전파율(da/dN)의 크기는 TL 채취방향의 시험편이 LT 채취방향의 경우보다 평균적으로 높게 나타났다. 이상에서 알 수 있듯이 동일 응력확대계수범위에 TL의 피로균열전파율이 높다는 것을 알 수 있다. Paris 법칙⁽¹⁰⁾에 적합한 결과를 요약하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

for LT crack orientation;

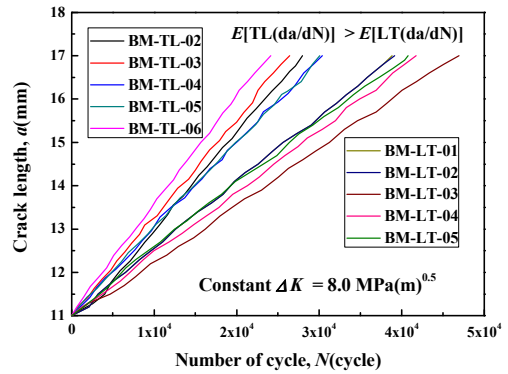
$$\frac{da}{dN} = 1.05 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.40} \quad (1)$$

for TL crack orientation;

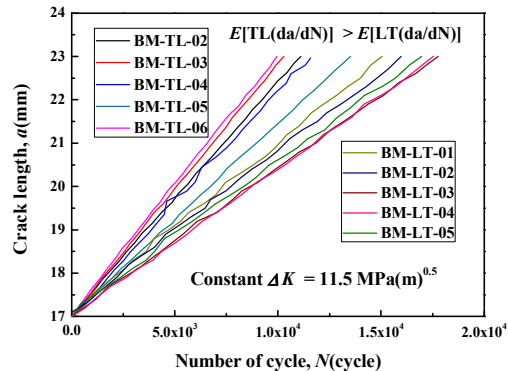
$$\frac{da}{dN} = 1.92 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.30} \quad (2)$$

Table 2 Mean FCGR for crack orientation

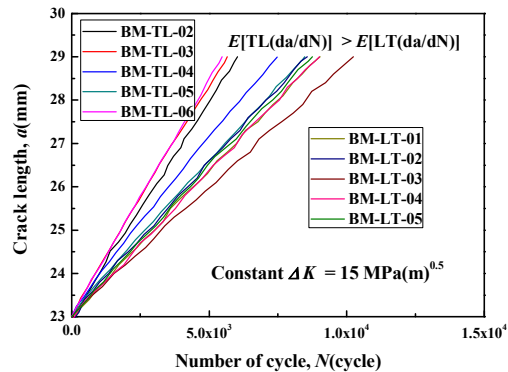
SIFR [MPa(m) ^{1/2}]	E[LT(da/dN)] [mm/cycle]	E[TL(da/dN)] [mm/cycle]
8.0	1.51E-4	2.26E-4
11.5	4.69E-4	5.50E-4
15.0	6.82E-4	9.56E-4



(a) Case of Δ*K*=8.0 MPa(m)^{1/2}



(b) Case of Δ*K*=11.5 MPa(m)^{1/2}



(c) Case of Δ*K*=15.0 MPa(m)^{1/2}

Fig. 2 *a-N* curves for case of BM specimens

TL 시험편의 경우가 *m*이 2.30으로 LT 시험편의 2.40보다는 다소 적은 값을 보였다. 이는 균열

이 전파함에 따라 피로균열전파율은 TL 시험편의 경우가 다소 느리게 전파함을 의미한다. 이는 Fig. 4와 같이 압연에 의한 재료의 미세조직의 영향에 기인한다고 할 수 있다. 미세조직은 강도와 밀접한 관련이 있으며 LT 방향의 항복강도는 약 517 MPa이며, TL 방향의 항복강도는 약 481 MPa이다. 문헌⁽¹¹⁾에 의하면 본 재료의 파괴인성치는 LT와 TL의 경우 각각 28.6 및 24.2 MPa(m)^{1/2}로 TL의 경우가 다소 낮음을 알 수 있다.

3.2 균열 방향에 따른 피로균열전파 거동(WM)

Fig. 5는 LT 채취방향과 TL 채취방향에 대한 마찰교반용접재(WM) 시험편에 대한 3가지의 구동력 8.0, 11.5 및 15.0 MPa(m)^{1/2}에 대한 응력반복수 *N*과 균열길이 *a*와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 2의 모재의 경우와 동일하게 모든 구동력의 조건에서 하나의 시험편에 대한 *a-N*의 관계는 일정응력확대계수범위 제어하의 전형적인 형태인 직선의 형태를 보여주고 있다. LT 채취방향의 WM 시험편인 경우 동일 실험조건에 있는 모든 구동력에 있어서도 그 곡선의 기울기가 TL 채취방향의 WM 시험편보다도 매우 다르게 나타나고 있다. 즉, LT 채취방향의 WM 시험편에 있어서는 시험편간 피로균열전파거동에 많은 변동성이 존재함을 알 수 있다. 이것은 피로균열전파에 대한 재료의 전파저항의 국부적 평균치가 LT 채취방향의 WM 시험편에서 시험편간에서 변동한다고 할 수 있으며, 특히 LT 채취방향의 WM 시험편에서는 하나의 시험편에서도 직선의 기울기가 매우 다르게 나타난 것은 피로균열전파 저항의 국부적 평균치가 크게 변동하는 것으로 사료된다.

응력확대계수범위가 비교적 낮은 $\Delta K = 8.0$ MPa(m)^{1/2}에서는 다른 응력확대계수범위 보다 피로균열전파 거동의 불규칙성이 큰 것으로 나타났다. 이는 피로균열전파 저항에 미치는 구동력의 크기와 마찰교반용접에 의한 미세조직의 국부적 차이 등의 조합에 의한 영향인 것으로 사료된다.^(5,6) 그러나 TL 채취방향의 WM 시험편에서는 시험편간 피로균열전파거동의 변동성이 알 수 있듯이 균열전파의 채취방향에 의하여 피로균열전파 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

본 실험에 의한 3가지 다른 종류의 응력확대계

Table 3 Mean FCGR for crack orientation

SIFR [MPa(m) ^{0.5}]	E[LT(da/dN)] [mm/cycle]	E[TL(da/dN)] [mm/cycle]
8	4.69E-5	2.79E-4
11.5	1.53E-4	6.60E-4
15	4.46E-4	1.31E-3

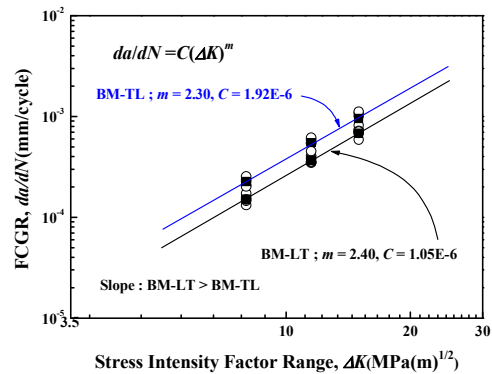


Fig. 3 da/dN - ΔK for case of BM specimens

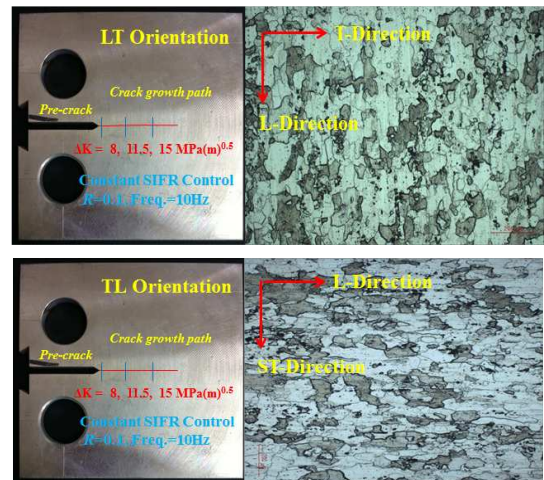
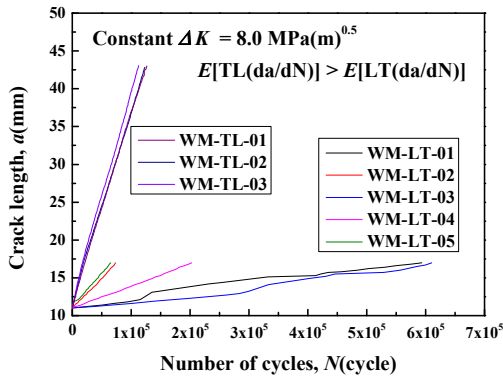


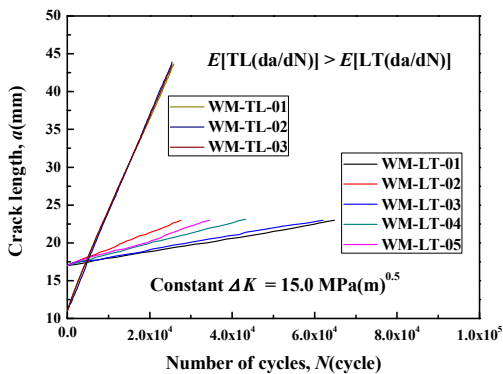
Fig. 4 CT specimen illustration and the microstructure for LT and TL specimen orientation

수범위에서 WM 시험편에 대한 그 평균 피로균열전파율을 구하여 Table 3에 정리하여 나타내었다. 모든 구동력에서 TL 채취방향의 평균 피로균열전파율이 LT 채취방향의 시험편 보다 매우 높게 나타났다. 이는 모재의 경우와 유사한 결과를 보였다.

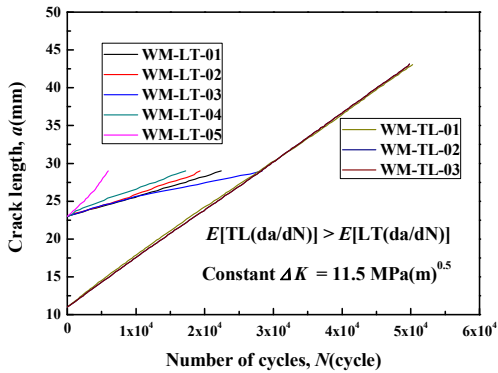
한편, WM 시험편에 대한 균열방향에 따른 피로균열전파율과 응력확대계수범위와의 관계를 Fig. 6에 나타낸다. 본 실험의 조건에서 피로균열전파율의 크기는 TL 채취방향의 경우가 LT 채취



(a) Case of $\Delta K=8.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$



(b) Case of $\Delta K=11.5 \text{ MPa(m)}^{1/2}$



(c) Case of $\Delta K=15.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$

Fig. 5 a-N curves for case of WM specimens

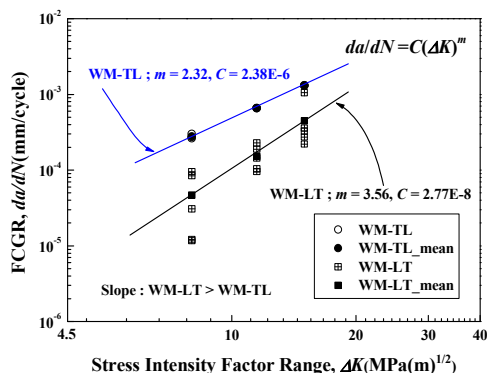


Fig. 6 da/dN - ΔK for case of WM specimens

방향의 경우보다 평균적으로 높게 나타났다. 이 상에서 알 수 있듯이 동일 응력확대계수범위에서는 TL 채취방향의 경우가 피로균열전파율이 높다는 것을 알 수 있다. WM 시험편에 대한 균열 방향에 따른 피로균열전파율을 Paris 법칙에 적합한 결과를 요약하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

for LT crack orientation;

$$\frac{da}{dN} = 2.77 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.56} \quad (3)$$

for TL crack orientation;

$$\frac{da}{dN} = 2.38 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.32} \quad (4)$$

TL 시험편의 경우가 m이 2.32으로 LT 시험편의 3.56보다는 적은 값을 보였다. 이는 균열이 전파함에 따라 피로균열전파율은 TL 시험편의 경우가 다소 느리게 전파함을 의미한다. 이는 마찰교반용접재의 미세조직의 영향에 기인한다고 할 수 있다. 미세조직은 또한 강도와 밀접한 관련이 있으며 WM-LT 방향의 항복강도는 약 281MPa이며, TL 방향의 항복강도는 약 296MPa이다. 항복강도의 경우는 모재의 경우와는 반대의 결과를 보이고 있다. 이는 특히 전보^(5,6)에서 언급한 교반부에서의 마찰교반용접 과정 중의 동적 재결정에 의한 미세한 결정구조의 차이로 균열이 용접 방향과 동일하게 진행하는 LT 시험편과 Fig. 2에서와 같이 용접 방향을 가로로 균열이 전파하는 TL 시험편은 그 피로균열전파 거동에 차이가 나타나며 TL 시험편의 경우가 동일 구동력에서 전파율이 훨씬 빠르게 진행함을 알았다. 본 연구에서는 시험편의 채취방향에 따른 피로균열전파 거동의 거시적 평가가 목적이지만, 향후 이에 대한 상세한 고찰이 요구된다.

이하에서는 각각의 재질에 대한 시험편의 채취 방향에 미치는 피로균열전파의 거시적 거동에 대하여 비교 평가하고자 한다.

3.3 시험편 채취방향에 따른 BM과 WM의 비교

Fig. 7에 LT 및 TL 채취방향에 따른 BM과 WM재에 대한 피로균열전파율(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계를 종합하여 다시 나타내었다. 비교의 목적으로 Paris 법칙에 적합한 결과를 다시 Table 4에 정리하여 나타내었다. 본 실험

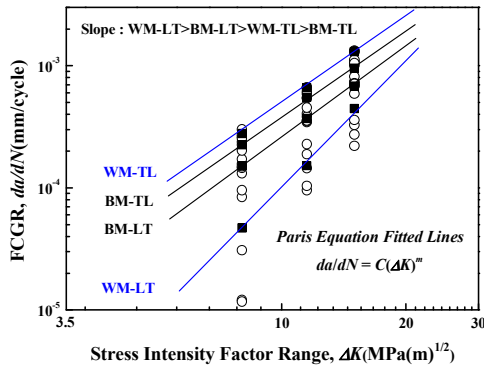


Fig. 7 Comparison of fatigue crack growth behavior of BM and WM for specimen orientation

조건의 범위에 대한 실험결과는 시험편 채취방향에 의하여 BM과 WM 시험편의 피로균열전파율이 의존하고 있다는 것을 명확히 알 수 있다.

그림에서 알 수 있듯이 WM-LT의 시험편이 다른 시험편의 피로균열전파율에 비하여 상당히 낮다는 것을 알 수 있다. 특히 응력확대계수범위가 낮은 $\Delta K = 8.0 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ 에서 더욱 낮다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 마찰교반용접재의 미세조직과 특히 낮은 구동력에서의 항복강도의 감소에 따른 소성영역의 크기의 증가로 균열전파율이 감소하는 것으로 사료된다. 하지만 균열전파에 대한 피로균열전파율은 Fig. 7과 Table 4에서 알 수 있듯이 그 기울기 값이 WM-LT의 시험편이 3.56으로 본 실험의 BM과 WM의 시험편의 채취방향에 따른 결과에서 가장 큰 값을 보였다. BM과 WM의 시험편에 대하여는 모두 TL 채취방향의 시험편이 LT 채취방향의 시험편 보다 기울기는 작게 나타났다. WM 시험편에 있어서 LT 채취방향과 TL 채취방향의 피로균열전파의 모식도를 미세조직과 함께 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 LT 채취방향의 시험편은 마찰교반용접부의 교반부 중심에서 균열이 전파하다가 미세조직과 국부적 강도의 차이에 의하여 전파경로에 차이가 발생하며, 비교적 피로균열전파율이 매우 느리며 또한 시험편간에도 그 전파율에는 변동이 큰 것으로 사료된다.⁽⁶⁾ 이에 반해 TL 채취방향의 시험편은 마찰교반용접선을 가로지르는 균열전파이므로 Fig. 9와 같이 열영향부(b)를 지나 열적기계적영향부(c), 교반부(d) 그리고 다시 열적기계적영향부(c)와 열영향부를 지나가는 전파경로이다. 이들의 영역에서 그 피로

Table 4 Paris equation coefficients for BM & WM

crack orientation	BM		WM	
	LT	TL	LT	TL
<i>C</i>	1.05E-6	1.92E-6	2.77E-8	2.38E-6
<i>m</i>	2.40	2.30	3.56	2.32

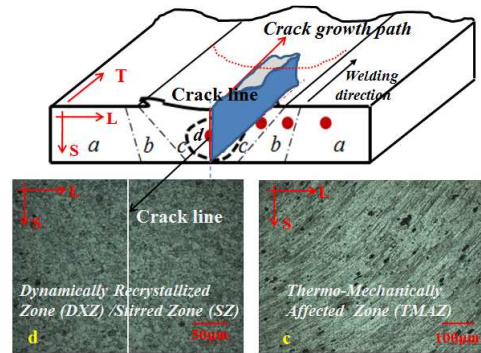


Fig. 8 Schematic illustration of fatigue crack growth path and the microstructures for WM-LT specimen

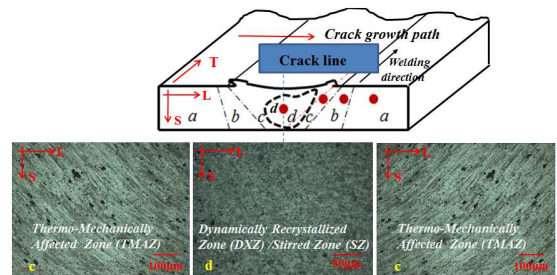


Fig. 9 Schematic illustration of fatigue crack growth path and the microstructures for WM-TL specimen

균열전파율의 차이는 다소 나타나지만 피로균열전파율은 LT 채취방향의 시험편보다 훨씬 빠르게 전파하는 것으로 나타났다.

4. 결론

Al7075-T651 합금 판재의 마찰교반용접된 용접재(WM)와 모재(BM)에 대하여 시험편의 채취방향에 따른 표준 CT 시험편을 용이하여, 일정응력확대계수범위 제어 피로균열전파 실험을 수행하여 TL 채취방향 시험편과 LT 채취방향 시험편의 피로균열전파 거동을 비교 고찰한 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) WM-LT 시험편의 피로균열전파율이 다른 시험편의 피로균열전파율에 비하여 상당히 낮았

다. 특히 응력확대계수범위가 작은 $\Delta K=8.0$ MPa(m)^{1/2}에서 더욱 낮다는 것을 알 수 있었다.

(2) Paris 법칙의 지수 m 값이 WM-LT의 시험편이 3.56으로 본 실험의 BM과 WM의 시험편 채취방향에 따른 결과에서 가장 큰 값을 보였다.

(3) BM과 WM의 시험편에 대하여는 모두 TL 채취방향의 시험편이 LT 채취방향의 시험편 보다 그 기울기는 작게 나타났다.

(4) BM과 WM재에 대한 시험편의 채취방향에 따른 피로균열전파 거동을 Paris 법칙에 적합한 식을 다음과 같이 얻었다.

for BM-LT specimen;

$$\frac{da}{dN} = 1.05 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.40}$$

for BM-TL specimen;

$$\frac{da}{dN} = 1.92 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.30}$$

for WM-LT specimen;

$$\frac{da}{dN} = 2.77 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.56}$$

for WM-TL specimen;

$$\frac{da}{dN} = 2.38 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.32}$$

참고문헌

(References)

- (1) Zhao, T., Zhang, J. and Jiang, Y., 2008, "A Study of Fatigue Crack Growth of 7075-T651 Aluminum Alloy," *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, pp. 1169~1180.
- (2) Lee, E. U., Glinka, G., Vasudevan, A. K., Iyyer, N. and Phan, N. D., 2009, "Fatigue of 7075-T651 Aluminum Alloy Under Constant and Variable Amplitude Loadings," *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 1858~1864.
- (3) Suh, C. M., Kim, C. and Kim, T. J., 2011, "VHCF Characteristics of A7075-T651 under Pressure Variation by Shot Peening Treatment," *Trans. Korean Soc. Ocean Eng.*, Vol. 25, No. 6, pp. 72~79.
- (4) Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., 2005, "Friction Stir Welding and Processing," *Materials Science and Engineering*, R 50, pp. 1~78.
- (5) 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.
- (6) 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," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 9, pp. 1109~1116.
- (7) Kim, C. O. and Kim, S. J., 2011, "Effects of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of Al7075-T651 Plates," *Trans. Korean Soc. Pow. Sys. Eng.*, Vol. 15, No. 2, pp. 61~68.
- (8) Kim, C. O., Sohn, H. J. and Kim, S. J., 2011, "Effects of Welding Condition on Hardness and Microstructure of Friction Stir Welded Joints of Al7075-T651 Plates," *Trans. Korean Soc. Pow. Sys. Eng.*, Vol. 15, No. 3, pp. 58~64.
- (9) ASTM E 647-00, 2002, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03. 01, MD, U.S.A., pp. 603~644.
- (10) Paris, P. C. and Erdogan, F., 1960, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, pp. 528~534.
- (11) http://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/, Alloy 7075 Plate and Sheet