

일정 응력확대계수범위 제어 시험하의 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 피로균열전파 거동의 실험적 고찰 (LT 방향의 시험편에 대하여)[§]

정의한* · 김선진**†

* 부경대학교 기계설계공학과, ** 부경대학교 기계자동차공학과

Experimental Investigation of Fatigue Crack Growth Behavior in Friction Stir Welded 7075-T651 Aluminum Alloy Joints under Constant Stress Intensity Factor Range Control Testing (For 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 December 28, 2012 ; Revised March 5, 2013 ; Accepted March 6, 2013)

Key Words: Fatigue Crack Growth(피로균열전파), Friction Stir Welding(마찰교반용접), Constant Stress Intensity Factor Range Control Testing(일정 응력확대계수범위제어시험), 7075-T651 Aluminum Alloy(7075-T651 알루미늄 합금)

초록: 본 연구에서는 마찰교반용접재의 피로균열전파 거동의 공간적 불규칙성을 고찰하기 위한 연구의 일환으로써, 최적의 조건에서 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 LT-방향의 각각 5개의 피로균열전파 시험편에 대하여 일정 응력확대계수범위 제어하의 피로균열전파 실험을 수행하여 마찰교반용접부의 교반용접부재(WM)와 열영향부재(HAZ) 그리고 모재(BM)에 대한 피로균열전파 거동을 실험적으로 고찰하였다. WM재의 피로균열전파율이 가장 빠르게 나타났으며, 그 다음 HAZ재와 WM재 순으로 나타났다. 게다가 시험편간 피로균열전파율의 변동성은 WM시험편에서 가장 높았고, 반면 BM재에서 가장 낮게 나타났다.

Abstract: In this study, as a series of studies aimed at investigating the spatial randomness of fatigue crack growth for friction stir welded (FSWed) 7075-T651 aluminum alloy joints, the fatigue crack growth behavior of FSWed 7075-T651 aluminum alloy joints was investigated for LT orientation specimens. Fatigue crack growth tests were conducted under constant stress intensity factor range (SIFR) control for 5 specimens of the FSWed 7075-T651 aluminum alloy, including base metal (BM), heat affected zone (HAZ), and weld metal (WM) specimens. The mean fatigue crack growth rate of WM specimens was found to be the highest, whereas that of HAZ and WM specimens was the lowest. Furthermore, the variability of fatigue crack growth rate was found to be the highest in WM specimens and lowest in BM specimens.

1. 서론

최근 환경보호와 에너지 절감에 대한 요구가 높아지면서 항공기, 자동차, 철도, 선박 등 각종

수송기기의 경량화를 위한 기술의 필요성이 대두되는 가운데 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)기술은 알루미늄이나 마그네슘 등의 경량 합금을 접합하는 차세대 용접 기술로 주목 받고 있다.⁽¹⁾

마찰교반용접은 1991년 영국의 용접연구소(The Welding Institute, TWI)에서 개발된 고상용접 프로세스로, 비소모성 회전공구를 이용하여 재료를

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, sjkim@pknu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

교반, 일체화한다고 하는 새로운 원리를 이용한 접합 방법이다.^(2,3) 모재를 회전시켜 마찰열을 이용하여 접합하는 기존의 마찰용접(Friction Welding, FW)과는 달리, 마찰교반용접은 용접부에 삽입된 환봉의 회전공구(tool)를 용접할 두 재료 사이 용접라인을 따라 회전 이동시킴으로써, 용접부를 가열, 연화, 소성 유동화시켜 고상으로 용접하는 원리이다.⁽²⁾ 이 용접법은 용융이나 응고 등에 의한 균열이나 기공의 발생이 없고, 용접 변형이 적다는 등의 여러 가지 장점이 있어 1990년대 중반부터 수송기기를 중심으로 여러 산업 분야에서 실용화가 이루어진 괄목할 만한 용접기술로 인식되고 있다.^(4,5)

고강도 알루미늄인 7075-T651에 대한 마찰 교반 용접에 대한 연구는 국내외적으로 많이 연구되어 왔지만, 일반적으로 2XXX계열이나 7XXX계열과 같은 고강도 알루미늄 합금의 용접 조건 범위는 비교적 넓은 조건 범위를 갖는 6XXX계열과는 달리 좁은 용접 조건 범위를 보이고 있다.⁽⁶⁾ 따라서 실용적 응용 관점에서 그 사용조건에 맞는 7075-T651에 대한 최적 마찰교반용접 조건에 대한 연구는 중요하다.

상기와 같은 관점에서 저자 등은 선행적으로 두께 6mm의 Al 7075-T651 알루미늄 판재에 대하여, 회전공구의 회전속도와 이송속도를 변수로 하여 용접조건이 마찰교반용접부의 인장강도와 경도 및 미세조직에 미치는 영향을 고찰하여 마찰교반용접의 최적조건을 결정한 바 있다.^(7,8)

그러나 항공우주, 선박, 철도 차량 혹은 교량 등과 같은 실제적 응용 분야에서는 그 피로 성질이 결정적인 경우가 많다.⁽⁴⁾ 그러므로 마찰교반용접기술의 광범위한 공학적 응용을 위해서도 마찰교반용접 접합부의 피로 특성을 이해하는 것이 매우 중요하다. 이와 같은 관점에서 많은 연구자들에 의하여 S-N 거동과 피로균열전파 거동을 포함한 마찰교반용접 접합부의 피로 특성 평가에 관한 많은 관심과 연구가 수행되어져 왔다.^(4,9-24) 특히 피로균열전파 거동에 대한 연구의 대부분은 피로균열전파 거동에 미치는 미세조직과 잔류응력의 영향, 용접 개재물의 영향, 결정립의 미세화에 의한 영향, 응력비의 영향, 환경에 의한 영향 그리고 용접 법에 따른 영향 등이 많이 보고되고 있다.⁽¹¹⁻²⁴⁾ 그러나 마찰교반용접 접합부의 피로균열전파 거동의 통계적 불규칙성을 고찰한 연구는 매우 부족한 실정이다.⁽²⁵⁾ 또

한 대부분의 피로균열전파 실험은 일정 응력진폭하중하에서 수행되었다. 이러한 실험법은 직접적으로 피로균열전파율(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계를 얻는 데는 매우 유용한 방법이지만,⁽²⁶⁾ 피로균열전파율의 변동성에 미치는 영향을 이해하는 데는 어려움이 있다. 이에 반하여 일정 응력확대계수범위 제어 실험은 균열 선단의 역학적 구동력을 일정하게 함으로써 피로균열전파 저항에 미치는 미세조직의 영향이나 변동성의 영향을 이해하는데 유용하다.⁽²⁶⁾

이러한 관점에서, 마찰교반용접재의 피로균열전파 거동의 공간적 불규칙성을 파악하기 위한 연구의 일환으로써, 본보에서는 최적의 조건에서 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 LT-방향의 피로균열전파 시험편에 대하여 일정 응력확대계수범위 제어하의 피로균열전파 실험을 수행하여 마찰교반용접부의 교반용접부재(WM)와 열영향부재(HAZ) 그리고 모재(BM)에 대한 피로균열전파 거동을 실험적으로 고찰한 결과를 보고하고자 한다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 시험편 재료는 S사에서 제작된 두께 6mm의 Al 7075-T651 알루미늄 합금 판재이다. 본 재료에 대한 화학적 성분과 기계적 성질은 전보^(7,8)를 참조 바란다.

2.2 최적 마찰교반용접 조건

본 연구에 사용된 마찰교반용접기는 국내 W사의 3축 스텐드 타입의 터치 패널 조작방식의 직선 마찰교반용접기를 사용하였다. 사용된 시험편은 원판 치수 6×1250×2500mm, 무게 3.576kg의 압연 판재로부터 폭 방향 250mm, 압연 방향으로 100mm의 직사각형 크기로 절단하여, 압연방향을 용접 진행 방향으로 하여 마찰교반용접을 수행하였다. Al 7075-T651 합금의 최적의 마찰교반용접 조건을 결정하기 위해서는 많은 변수가 있지만, 통상적으로 공구의 삽입깊이는 일정으로 되도록 제어되는 것으로서, 실질적으로는 공구의 회전속도와 용접 이송속도가 중요한 변수로 된다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 저자 등의 선행 연구를 통하여 얻은 두께 6mm의 시험편에 대하여 Table 1과 같은 최적 조건하에서 마찰교반용접을 수행하였다.^(7,8)

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

본 실험의 마찰교반용접 과정의 모식도를 Fig. 1에 나타낸다.

2.3 시험편 채취 및 피로균열전파실험

마찰교반용접재의 피로균열전파거동의 평가하기 위한 시험편은 ASTM E647 규정에 의한 폭이 50mm 그리고 두께 5mm인 CT (compact tension) 시험편을 Fig. 2와 같이 LT 방향의 모재(BM)와 용접교반부인 용접부재(WM) 및 열영향부재(HAZ)에 대하여 채취하였다. 시험편의 채취방향은 압연방향과 균열의 전파방향이 수직이 되도록 LT 방향 시험편에 대하여 제작 하였으며, 기계 가공시 평면부는 열 영향이 극소화 되도록 앤드밀과 정면커터를 사용하여 가공하였으며, 노치부는 방전가공으로 행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 용접재 시험편의 노치는 용접선의 정 중앙에 오도록 채취 가공하였다. 즉 피로균열이 마찰교반용접부의 중심에 존재하는 교반부(stirred zone)[본 시험편을 WM 시험편으로 통칭한다] 및 열영향부[본 시험편은 HAZ 시험편으로 통칭한다]를 지나도록 하였다.

본 연구의 피로균열전파 시험에 이용한 실험 시스템은 시험편에 하중을 부하하는 용량 100kN의 전기유압서보식 피로시험기(Instron Model 8821S)를 사용하였으며, 시험조건은 실험실의 대기중에서 응력 반복속도 10Hz, 응력비(R) 0.1의 정현파 인장-인장 일정응력확대계수범위 제어 방식으로, Fig. 3과 같이 균열전단의 응력 조건을 일정하게 하게 유지하여 피로균열전파율의 변동성을 좀 더 명확하게 고찰할 목적으로, 즉 하나의 시험편에 대하여 일정 응력확대계수범위(ΔK)를 8, 11.5 그리고 15MPa(m)^{0.5} 조건하에서 실험을 수행하였다. 각각의 재질에 대하여 총 5개의 시험편에 대하여 실험을 수행하였다. 한편 균열길이는 피로균열전파 시험 중에 COD(Crack Opening Displacement)게이지를 이용하여 컴플라이언스법에 의하여 측정, 데이터를 해석하였다. 피로균열전파율의 결정은 시컨트법을 이용하였다.

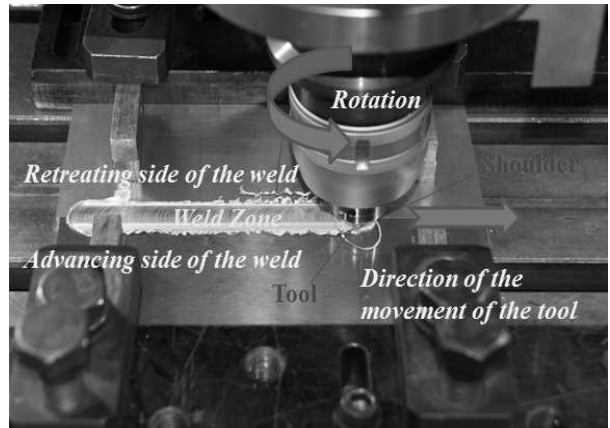


Fig. 1 Schematic illustration of FSW process

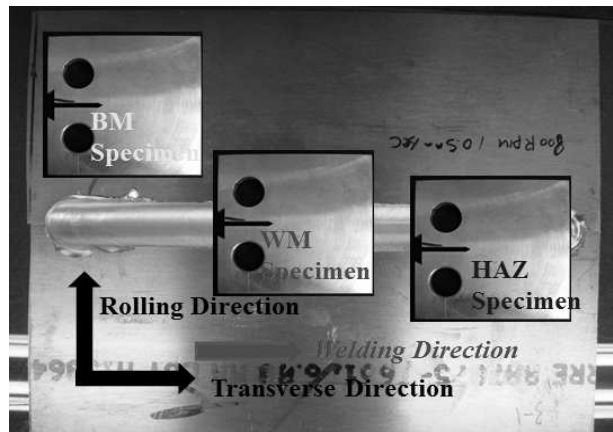


Fig. 2 Schematic diagram of CT specimen cutting

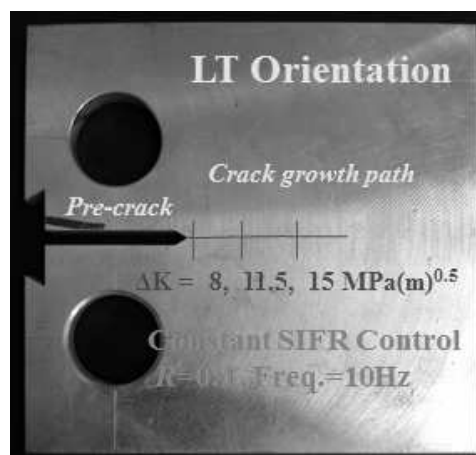
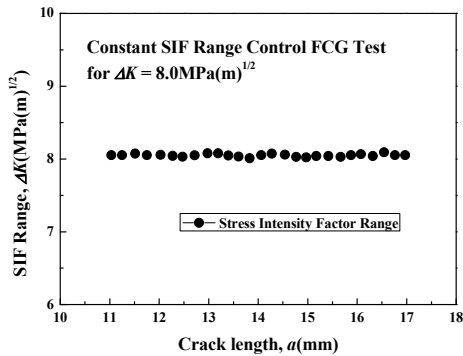
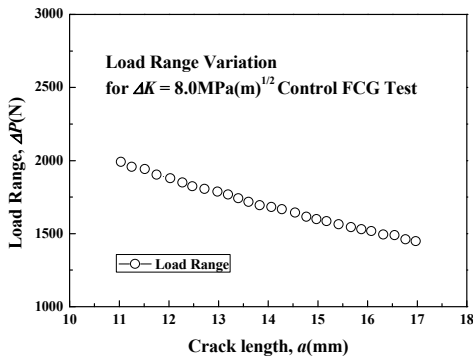


Fig. 3 FCG testing conditions for constant ΔK

이하에서는 본 실험에서 수행한 일정 응력확대계수범위(SIFR) 제어 피로균열전파(FCG) 실험 방법에 대하여 간략히 기술한다.



(a) Variation of SIF range



(b) Variation of load range

Fig. 4 Conditions of SIFR control for FCG test

통상적인 피로균열전파실험은 하중진폭범위를 일정하게 제어함으로써 균열이 진전함에 따라 균열선단의 응력확대계수가 증가하는 실험으로 균열선단의 소성영역이 점진적으로 증가하는 실험인 반면, 일정 응력확대계수범위 제어 피로균열전파시험의 알고리즘은 균열선단의 소성영역을 일정하게 유지하게 하기 위하여 균열이 진전함에 따라 하중진폭범위를 감소시켜 균열 위치에 상관없이 응력확대계수범위를 일정하게 유지하는 실험방법이다.⁽²⁶⁾ Fig. 4는 본 실험에서 제어한 하나의 예로 응력확대계수범위 $8.0\text{MPa(m)}^{0.5}$ 에 대하여 균열길이가 11mm에서 17mm까지 전파 할 때의 응력확대계수범위와 하중범위의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 하중범위가 Fig. 4의 (b)와 같이 제어함으로써 응력확대계수범위를 일정하게 유지할 수 있다. 본 연구에서 제어한 응력확대계수범위는 변동계수가 약 0.01로 모든 실험에서 잘 제어되었음을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰교반용접재의 광학현미경 조직

Fig. 5는 7075-T651 알루미늄 합금의 마찰교반용접부의 횡방향 단면 사진과 그 개념도를 나타낸다. 마찰교반용접부는 크게 4가지 영역으로 나눌 수 있다. a로 표시된 영역은 용접 과정에 의하여 영향을 받지 않는 모재(BM) 부분이며, b의 영역은 열영향을 받는 열영향부(HAZ) 부분이며, c의 영역은 열적 기계적으로 영향을 받는 일명 열적-기계적 영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)를 나타내며, 그리고 d의 영역은 소성변형의 발생을 동반한 미세한 결정립을 갖는 교반부(Stir Zone, SZ)를 나타낸다. Fig. 6에 Fig. 5의 a, b, c 및 d에서의 광학현미경 조직을 나타낸다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, “b”의 열영향부 영역에서는 용접 중 열에 의하여 국부적으로 기계적 성질이 변화하지만, 그 결정립 구조는 거의 모재의 구조로 되어 있음을 확인할 수 있다. “c”의 열적기계적영향부(TMAZ)는 공구의 어깨 및 핀에 의하여 영향을 받는 영역으로, 미세조직은 다소 변화하지만 여전히 모재의 미세조직과 비슷한 조직으로 나타냄을 확인할 수 있다. “d”의 용접부 중심에는 교반부라 부르는 소성 변형이 동반된 미세한 결정립을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이 영역의 크기는 개략적으로 핀의 직경 정도로 알려져 있다. 교반부는 모재와 비교하여 마찰교반용접 과정 중의 동적 재결정에 의하여 훨씬 미세한 결정 구조를 가짐을 확인할 수 있었다.

3.2 실험적 피로균열전파 곡선

Fig. 7은 응력확대계수범위 8.0, 11.5 및 $15.0\text{MPa(m)}^{0.5}$ 의 3개의 구동력에 대한 WM, HAZ 및 BM 시험편에 대한 응력 반복수 N 과 균열길이 a 와의 관계를 나타낸다. 각각의 응력확대계수범위에 따라 피로균열전파 거동이 서로 다를 수 있고, ΔK 가 증가할수록 피로균열성장률이 빠르게 전파함을 알 수 있다. 또한, 각각의 응력확대계수범위에서 마찰교반용접된 WM 시험편의 경우가 BM 보다 시험편간 변동이 매우 큼을 알 수 있으며, 또한 시험편내에서도 전파율의 불규칙성이 존재함을 알 수 있다. 이는 동적 재결정

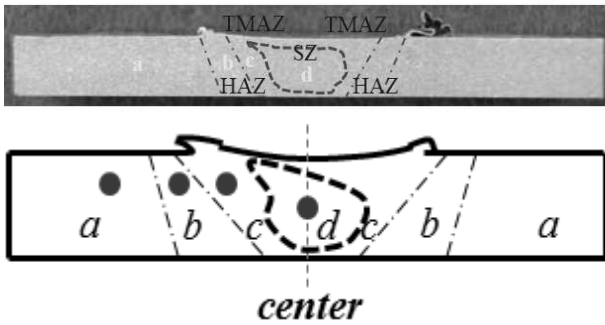


Fig. 5 Cross-section view of friction stir weld regions in Al 7075-T651

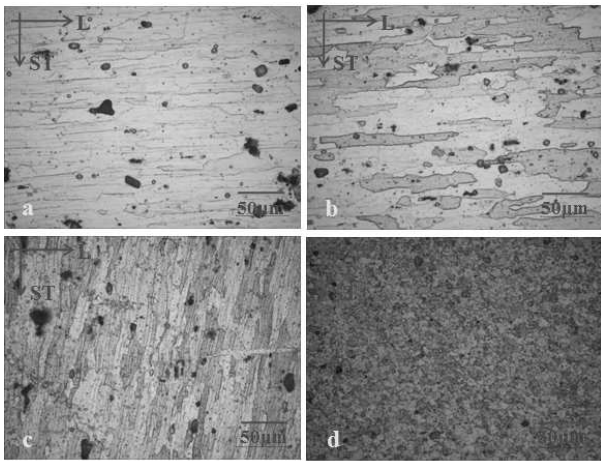


Fig. 6 Optical micrographs of the FSWed 7075-T651 specimen in the (a) BM, (b) HAZ, (c) TMAZ, and (d) SZ (WM)

에 의한 미세조직의 영향이라 사료된다. 또한 이러한 영향은 전파수명의 변동성에도 영향을 줄 것으로 기대된다. 피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 재질의 영향에 대하여는 향후에 상세히 보고하고자 한다.

3.3 피로균열전파율과 응력확대계수범위와의 관계

Fig. 8은 일정 응력확대계수범위 제어 피로 시험에 의하여 얻은 마찰교반용접재의 HAZ, WM 그리고 모재 BM 시험편에 대한 피로균열전파율 (da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계를 나타낸 것이다. 본 실험의 조건범위하에서 마찰교반용접재의 HAZ 및 WM 시험편의 피로균열전파율이 모재 BM 시험편보다 모두 낮음을 알 수 있다. 이는 미세조직 변화에 따른 항복강도의 변화에도 기인하는 것으로 HAZ, WM의 항복강도가 BM의 항복강도보다 작게 되어 전파율이 낮은 것

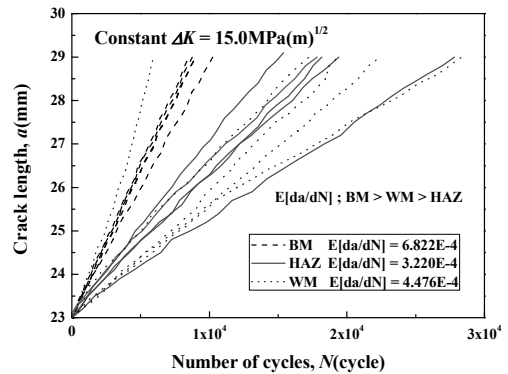
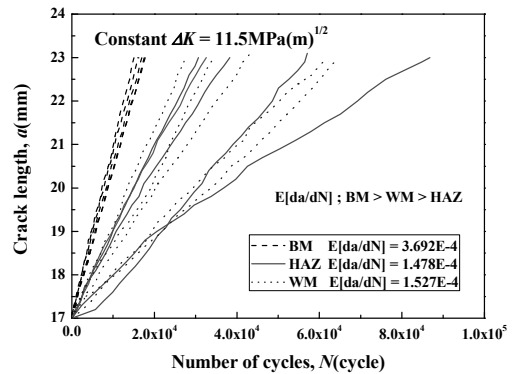
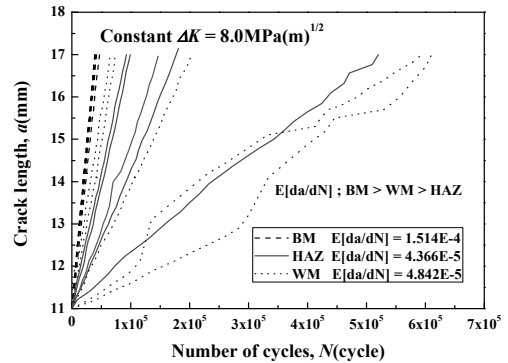


Fig. 7 a-N curves for WM, HAZ and BM specimens regarding to each stress intensity factor range, ΔK

으로 사료된다.⁽²⁶⁾ 한편, 평균적 피로균열전파율에 대한 Paris 방정식⁽²⁷⁾의 전파지수 m 과 전파계수 C 를 최소자승법에 의하여 구한 값을 그림 중에 나타내었다. 이상에서 알 수 있듯이, 모재 BM 시험편의 경우 전파지수 m 과 전파계수 C 는 각각 2.40과 $1.05E-06$ (mm/cycle)의 값을 얻었다. 이에 대하여 HAZ 시험편의 경우는 m 과 C 는 각각 3.19 및 $5.85E-08$ (mm/cycle), 그리고 WM 시험편의 경

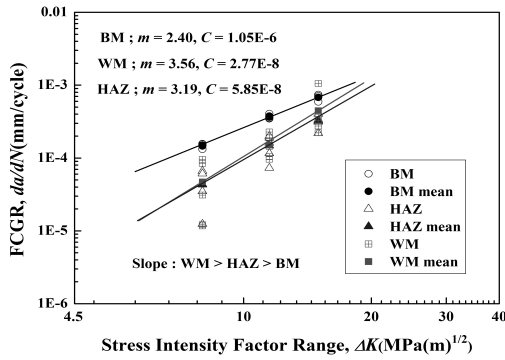


Fig. 8 FCGR vs. ΔK for BM, HAZ and WM

우 지수 m 과 계수 C 는 각각 3.56 및 $2.77E-08$ (mm/cycle)를 나타내었으며, 비교적 낮은 구동력에서 BM보다 확실히 전파율이 낮았으며, 구동력이 증가할수록 WM시험편이 가장 빠르게 전파함을 알 수 있다. 이러한 경향은 미세조직과 잔류응력 그리고 구동력의 상호작용에 의하여 나타나는 것으로 사료된다.^(13,15)

3.4 재질에 따른 피로균열전파율의 변동성

BM, HAZ 및 WM 시험편에 있어서의 피로균열전파율의 변동성을 파악하기 위하여, 그 피로균열전파율의 거동을 도식적으로 정리하여 Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11에 각각 나타낸다. BM의 경우 변동성이 비교적 낮게 나타났으며, HAZ와 WM에서는 비교적 크게 변동함을 이해할 수 있다. 특히 낮은 구동력인 $\Delta K=8MPa(m)^{0.5}$ 인 경우에 있어서 HAZ 및 WM 시험편에서는 그 피로균열전파율의 변동이 매우 크게 나타났다. 전체적으로는 WM 시험편의 경우가 가장 높은 변동성을 보였다. 이러한 변동성의 영향은 여러 가지가 있을 수 있으나, 마찰교반용접에 의한 용접부의 조직변화 및 잔류응력 등에 의한 영향과 이들의 영향으로 인한 균열전파 경로의 불규칙한 상호작용 등의 영향으로 사료된다. 한편, 각각의 재질에 따른 전파율의 변동성의 영향을 이해하기 위하여, BM, WM 그리고 HAZ 시험편에 대한 피로균열전파율의 시험편간 변동계수를 구하여 Fig. 12에 나타내었다. BM의 경우 응력범위에 관계없이 약 7%로 가장 낮게 나타났으며, 피로균열전파율의 변동계수는 응력확대계수범위가 낮은 $\Delta K=8MPa(m)^{0.5}$ 에서 높은 값을 나타내었으며, 모든 응력범위에서 WM시험편의 경우가 가장 높게 나타났다. 본 연구에서는 재질에 따른 피로균열

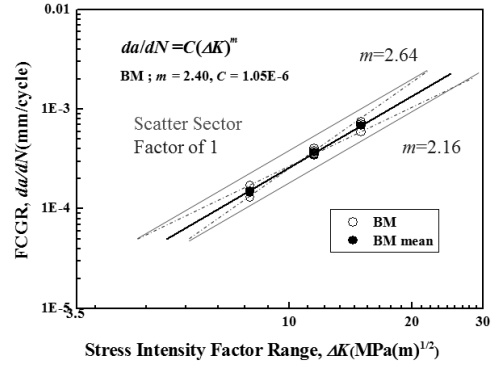


Fig. 9 FCGR vs. ΔK for BM

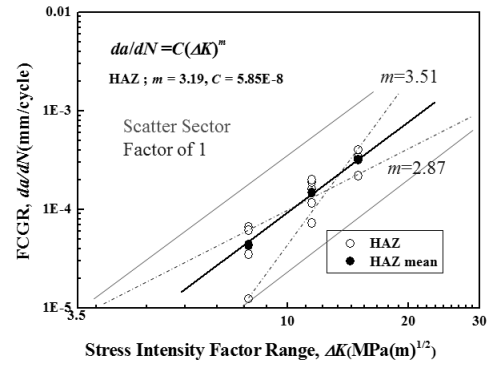


Fig. 10 FCGR vs. ΔK for HAZ

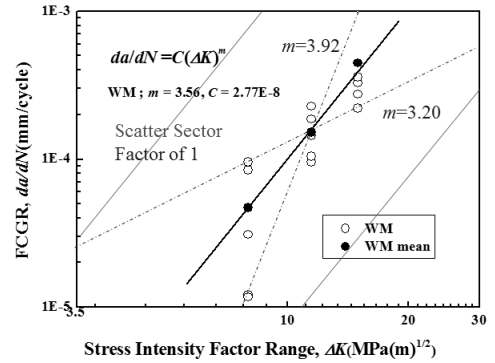


Fig. 11 FCGR vs. ΔK for WM

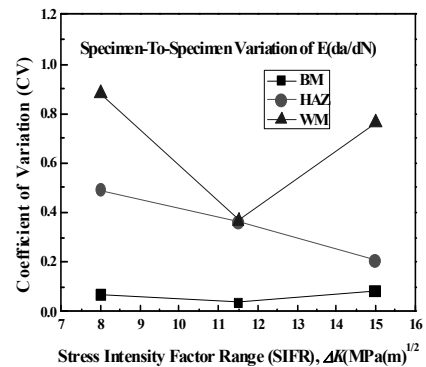


Fig. 12 Effect of CV on SIFR according to material properties, BM, WM and HAZ

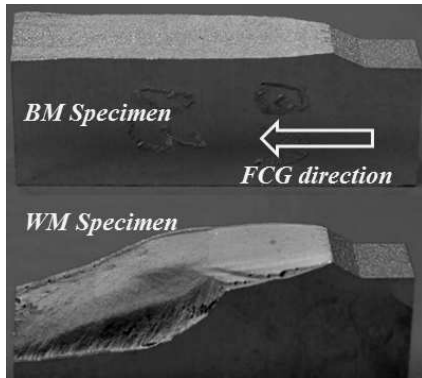


Fig. 13 Morphology of FCG path for BM and WM

전파 거동을 실험적으로 고찰하는 것이므로, 변동성의 영향에 대한 상세한 고찰은 차후에 보고하고자 한다. BM의 경우는 모든 시험편에서 피로균열전파 경로가 하중에 수직으로 진행하고 평평한 전파과정을 보였지만, HAZ 및 WM의 경우에 있어서는 BM 시험편과 동일한 전파경로를 보이는 시험편과 Fig. 13과 같이 균열의 진행방향이 사선방향으로 진행되는 시험편도 존재하였다.

마찰교반용접재의 CT 시험편에 의한 일정 응력확대계수범위제어 피로균열전파실험을 통하여 LT-방향의 피로균열전파 거동을 실험적으로 고찰한 결과를 종합하면, 응력확대계수범위가 낮은 영역($\Delta K=8$)에서는 WM 시험편에서 피로균열전파율이 가장 낮게 나타났으며, 그다음 HAZ 그리고 BM 순으로 높게 나타났다. 또한 응력확대계수범위가 높은 영역($\Delta K=15$)에서는 HAZ 시험편에서 피로균열전파율이 가장 낮게 나타났으며, 그다음 WM 그리고 BM 순으로 높게 나타났다. 한편 피로균열전파율에는 변동성이 존재함을 확인하였으며, 피로균열전파율의 변동계수는 모든 응력확대계수범위에서 WM 시험편이 가장 높게 나타났다.

4. 결론

마찰교반용접된 Al7075-T651 판재에 대한 일정 응력확대계수범위제어 피로실험을 수행하여 실험적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일 조건의 구동력하에서도 그 피로균열전파율은 마찰교반용접재의 HAZ, WM 시험편과 BM 시험편에서 아주 다르게 나타났다.

(2) 평균적 피로균열전파율은 WM 시험편 ($m=3.56$)이 가장 빠르고, 그 다음 HAZ ($m=3.19$)

그리고 BM ($m=2.4$) 시험편 순으로 나타났다.

(3) 시험편간 피로균열전파율의 변동성은 WM 재의 경우가 가장 높게 나타났으며, 그 다음 HAZ, 그리고 BM 순으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Shtrikman, M. M., 2008, "Current State and Development of Friction Stir Welding," *Welding International*, Vol. 22, No. 11, pp. 806~815.
- (2) Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Templesmith, P. and Dawes, C. J., 1991, "Friction-Stir Butt Welding," GB Patent No. 9125978.8, International Patent Application No. PCT/GB92/02203.
- (3) Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Templesmith, P. and Dawes, C. J., 1995, U. S. Patent No. 5460317.
- (4) Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., 2005, "Friction Stir Welding and Processing," *Materials Science and Engineering R* 50, pp. 1~78.
- (5) Fuller, C. B., Mahoney, M. W., Calabrese, M. and Micona, L., 2010, "Evolution of Microstructure and Mechanical Properties in Naturally Aged 7050 and 7075 Al Friction Stir Welds," *Materials Science and Engineering A* 527, pp. 2233~2240.
- (6) Friction Welding Working Group, 2006, "Friction Welding Technology," *Ilgangonhupshi munsa*, pp. 176~264.
- (7) Kim, C. O. and Kim, S. J., 2011, "Effects of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate," *KSPSE*, 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 Al-7075-T651 Plate," *KSPSE*, Vol. 15, No. 3, pp. 58~64.
- (9) Biallas, G., Braun, R., Donne, C. D., Staniek, G. and Kaysser, W. A., 1999, in "Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding," Thousand Oaks, Ca, USA, June 14-16.
- (10) Pao, P. S., Lee, E., Feng, C. R., Jones, H. N. and Moon, D. W., 2003, in "Friction Stir Welding and Processing II," TMS, Warrendale, PA, USA.

- (11) Pao, P. S., Gill, S. J., Feng, C. R. and Sankaran, K. K., 2011, "Corrosion-Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded Al7050," *Scripta Materialia*, Vol. 45, pp. 605~612.
- (12) 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 Aluminium Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, pp. 77~88.
- (13) John, R., Jata, K. V. and Sadananda, K., 2003, "Residual Stress Effects on Near-threshold Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welds in Aerospace Alloys," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 939~948.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) Moreira, P. M. G. P., de Jesus, A. M. P. Ribeiro, A. S. and de castro, P. M. S. T., 2008, "Fatigue Crack Growth Friction Stir Welds of 6082-T6 and 6061-T6 Aluminium Alloy: A Comparison," *Theoretical and Applied fracture Mechanics*, Vol. 50, pp. 81~91.
- (18) 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.
- (19) Hatamleh, O., 2009, "A Comprehensive Investigation on the Effects of Laser and Shot Peening on Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded AA 2195 Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 974~988.
- (20) Benedetti, M., Beghini, M., Fontanari, V. and Monelli, B., 2008, "Fatigue Cracks Emanating from Sharp Notches in High-Strength Aluminium Alloys: The Effect of Loading Direction, Kinking, Notch Geometry and Microstructure," *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 1996~2005.
- (21) Lemmem, H. J. K., Alderliesten, 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.
- (22) Schubbe, J. J., 2009, "Fatigue Crack Propagation in 7050-T7451 Plate Alloy," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 76, pp. 1037~1048.
- (23) 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.
- (24) 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. xx, 2012, Accepted 4 Feb. 2012
- (25) Kim, C. O., Sohn, H. J. and Kim, S. J., 2011, "Friction Stir Welding of 7075-T651 Aluminum Plates and Its fatigue Crack Growth Property," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 10, pp. 1347~1353.
- (26) Kusko, C. S., Dupont, J. N. and Marder, A. R., 2004, "The Influence of Microstructure on Fatigue Crack Propagation Behavior of Stainless Steel Welds," *Welding Journal*, January, 2004, pp. 6~14.
- (27) Paris, P. C. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Growth Propagation," *Trans. ASME J. Basic Eng.* Vol. 85, pp. 528~534.