

마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 판재의 피로균열전파의 거시적 및 미시적 관찰

Marco and Microscopic Observations of Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded 7075-T651 Aluminum Alloy Plates

공유식* · 김선진**†

Yu-Sik Kong* and Seon-Jin Kim**†

(접수일 : 2014년 01월 02일, 수정일 : 2014년 03월 18일, 채택확정 : 2014년 03월 25일)

Abstract: In this paper, in order to investigate the effects of marco and microscopic observations of fatigue crack growth in friction stir welded (FSWed) 7075-T651 aluminum alloy plates, fatigue crack growth tests were performed under constant amplitude loading condition at room temperature with three different pre-cack locations, namely base metal (BM-CL) and two kinds of pre-crack locations in welded joints, weld metal (WM-CL) and heat affected zone (HAZ-CL) specimens. The fatigue crack growth behavior of FSWed 7075-T651 aluminum alloy plates were discussed based on the marco and microscopic fractographic observations. The marcoscopic aspects of surface crack growth path for BM-CL and HAZ-CL specimens indicate relatively straight lines, however, the crack growth paths of WM-CL specimens grow first straight and by followed toward the TMAZ and HAZ. The microscopic aspects of fatigue fracture for BM-CL and HAZ-CL specimens indicate typical fatigue striation, but WM-CL showed intergranular fracture pattern by micro structural changes of FSW process.

Key Words : Friction Stir Welding, 7075-T651 Aluminum Alloy, Fatigue Crack Growth, Striation

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 영국 용접연구소에서 개발된 고상용접 프로세스로, 비소모성 회전공구를 이용하여 재료를 교반 일체화한다고 하는 새로운 원리를 이용한 접합 방법이다.¹⁾ 이 용접법은 특히 용융이나 응고 등에 의한 균열이나 기공의 발생이 적고, 용접변형이 적다는 등의 여러 가지 장점이 있어 오늘날

철도차량, 선박, 자동차, 항공우주 등의 수송기기를 중심으로 많은 산업분야에서 활용되고 있다.²⁻³⁾

철도차량, 선박, 자동차, 항공우주 등의 수송기기 부품에 대한 마찰교반용접 부재의 실제적 적용에 있어서는 필연적으로 반복하중에 의한 피로의 영향을 고려할 필요가 있다. 특히 피로파괴가 안전성 및 신뢰성에 깊이 관여하고 있는 경우에는 이러한 마찰교반용접부재의 피로 특성에 대한 변동성을 고려한 확률·통계적방법을 활용한 신

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

*공유식 : 부경대학교 A+ LINC 사업단

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

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

*Yu-Sik Kong : A+ LINC, Pukyong National University

뢰성공학적 접근방법이 필요하다.

이러한 관점에서 저자 등은 선행적으로 두께 6mm의 7075-T651 알루미늄 합금 판재에 대하여, 최적 마찰교반용접조건의 결정에 관한 연구^{4,5)}와 더불어 최적 마찰교반용접 조건에서 용접된 용접부에 대하여 일정 응력확대계수범위 제어 피로실험을 수행하여 피로균열전파율의 공간적 불규칙성⁶⁾과 피로균열전파율의 시험편내에서의 공간적 변동성⁷⁾을 통계적으로 고찰한 바 있다.

하지만 마찰교반용접 기술의 광범위한 공학적 응용을 위해서는 마찰교반용접재의 접합부에 대한 초기균열의 시험편의 위치에 따른 피로균열전파거동의 특성을 파면학적으로 고찰하는 것도 매우 중요하다. 이러한 관점에서 Lemmen 등⁸⁾도 알루미늄 판재의 마찰교반용접재의 피로균열전파거동에 미치는 초기 균열의 위치에 따른 파괴거동을 거시적 및 미시적 관점에서 파면학적으로 연구하였다. 그러나 현재 이러한 초기 균열위치에 따른 파면학적 피로균열전파 거동을 특히 7075-T651 알루미늄 합금 판재의 마찰교반용접재에 대하여 고찰한 연구는 거의 없다.

이상과 같은 관점에서 본 연구에서는 저자 등의 선행연구의 최적 용접조건에서^{4,5)} 7075-T651 알루미늄 판재를 맞대기 마찰교반용접을 수행하고, 그 마찰교반용접된 용접부재료로부터 LT 방향의 3가지 다른 초기균열 위치에서의 CT 시험편을 채취하여, 상온에서 일정진폭하중하의 피로균열전파 실험을 수행하였다. 즉, 본 연구의 주요한 목적은 마찰교반용접부의 정중앙에서 용접선과 평행하게 균열이 전파하는 시험편(WM-CL로 명명), 마찰교반용접부의 하단, 즉 솔더부 끝에서 용접선과 평행하게 초기균열이 전파하는 시험편(HAZ-CL로 명명) 그리고 모재에서 채취한 시험편(BM-CL로 명명)에 대한 3가지의 다른 초기균열위치가 피로균열전파 거동에 거시적 및 미시적으로 어떻게 영향을 미치는가를 고찰하는 것이다.

2. 실험방법 및 절차

본 연구에서 사용된 재료는 Al7075-T651이며,

그 화학적 성분과 기계적 성질은 전보와 동일하다.^{4,7)} 마찰교반용접재료로부터 시험편을 채취한 3가지 다른 시험편의 개념도를 Fig. 1에 나타낸다. 각 시험편은 ASTM E647 규정⁹⁾에 의하여 CT 시험편을 LT 방향으로 채취하여 두께 5mm의 표준 시험편을 가공하였다.

본 연구의 피로균열전파 실험에 사용된 시험기는 용량 100kN의 전기유압식 서보 피로시험기(INSTRON 8821S)를 사용하였으며, 실험조건은 최대하중 2.44kN, 하중범위 2.20kN, 응력비 0.1 그리고 10Hz의 주파수로 일정진폭하중하의 실험을 3종류의 시험편에 대하여 각각 2개씩 수행하였다. 한편 피로균열의 측정에는 컴플라이언스법(Compliance Method)을 이용하여 자동으로 측정하였다.

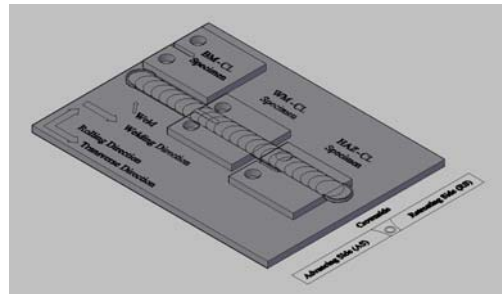


Fig. 1 Schematic illustration for CT specimen cutting

3. 결과 및 고찰

3.1 피로균열전파 거동

Fig. 2는 본 연구에서 수행한 일정진폭하중하의 6개의 모든 시험편에 대한 응력반복수 N 과 균열길이 a 와의 관계를 나타낸 것이다. 초기균열위치에 관계없이 모든 시험편에 대한 $a-N$ 와의 관계는 일정진폭하중하의 전형적인 형태의 곡선을 보여주고 있다. 그러나 동일조건에서의 초기균열위치의 시험편에 있어서도 그 곡선의 기울기는 각각 다르게 나타나고 있다. 즉 BM-CL의 시험편에서는 그 기울기의 차이는 거의 없고, WM-CL 및 HAZ-CL의 경우에는 크게 차이가 나타남을 알 수 있다. 이로부터 초기균열위치에 따라 균열전파율의 변동성에 큰 영향이 있음을 이해 할 수 있다.

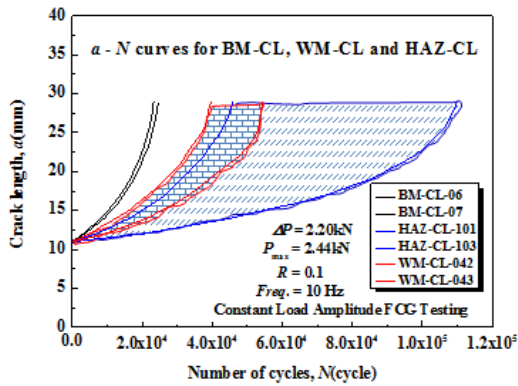


Fig. 2 a-N curves for all testing specimens

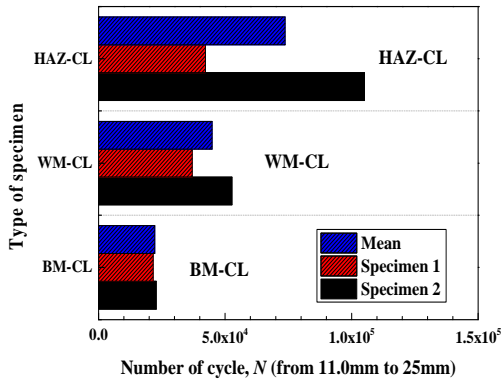


Fig. 3 Effect of specimen type on fatigue crack growth life

한편 피로균열전파에 대한 재료의 저항을 평가하기 위하여 초기균열위치에 따른 각각의 시험편에 대하여 11mm에서 25mm 전파할 때까지의 피로균열전파수명을 구하여 Fig. 3에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 HAZ-CL 시험편이 BM-CL 및 WM-CL 시험편보다도 그 피로균열전파수명이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이는 마찰교반용접에 의한 미세조직과 잔류응력 등의 상호작용에 기인하는 것으로 사료된다.¹⁰⁾

3.2 피로균열전파율과 응력확대계수범위와의 관계

초기균열위치에 따른 피로균열전파율과 응력확대계수범위와의 관계를 아래식과 같은 Paris-Erdog

-an 법칙¹¹⁾에 의하여 평가하고자 하였다.

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

여기서 da/dN 은 피로균열전파율(Fatigue Crack Growth Rate, FCGR)를 나타내며, ΔK 는 응력확대계수범위(Stress Intensity Factor Range, SIFR), 그리고 C 및 m 은 각각 재료에 대한 전파계수 및 전파지수를 나타낸다.

BM-CL, WM-CL 및 HAZ-CL 시험편에 대한 피로균열전파율과 응력확대계수범위와의 관계를 종합화하여 Fig. 4에 나타낸다. 이상의 결과로부터 알 수 있듯이 동일 일정진폭하중하의 실험결과에서 응력확대계수범위가 $25\text{MPa(m)}^{1/2}$ 이하에서는 피로균열전파율이 BM-CL이 가장 높음을 알 수 있고, 그 다음 WM-CL 그리고 HAZ-CL 순으로 낮게 나타났다. 식 (1)의 Paris-Erdogan 법칙에 대하여 회귀직선으로 적합한 결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1 Summary of m and C for Paris-Erdogan law

	BM-CL	WM-CL	HAZ-CL
m	2.6	3.3	3.2
C	$8.90\text{E-}7$	$8.06\text{E-}8$	$6.12\text{E-}8$

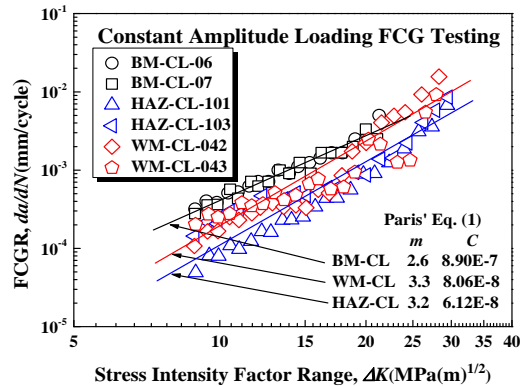
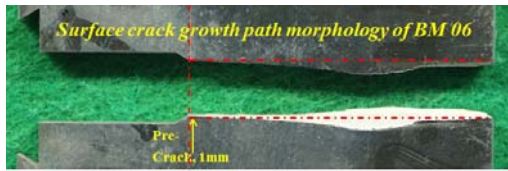


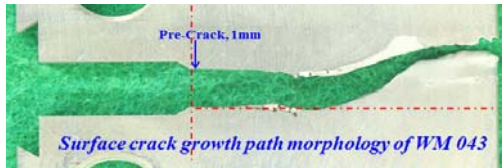
Fig. 4 FCGR vs. SIFR for BM-CL, WM-CL and HAZ-CL

3.3 피로균열전파 표면의 거시적 및 미시적 관찰

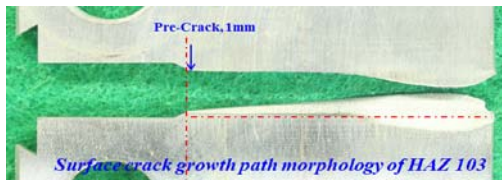
Fig. 4에서 보여주듯이 피로균열전파율은 응력 확대계수범위가 증가함에 따라 모든 시험편 형태에서 거시적으로 증가하는 현상을 보여주고 있지만, WM-CL 및 HAZ-CL 시험편의 경우 피로균열전파율의 증가 거동이 BM-CL 시험편의 경우와는 다소 다른 변동성을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 고찰하기 위하여 먼저 각 시험편 표면에서의 거시적 균열전파 경로를 관찰하였다. 일례로 Fig. 5는 실험 종료 후 CT 시험편 표면의 피로균열전파 경로의 거시적 파단면 양상의 사진을 나타낸 것이다. 그리고 본 사진의 각 시험편에 대한 균열길이에 대한 피로균열전파율의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. BM-CL 시험편의 경우, Fig. 5 및 Fig. 6의 (a)에서 보는 바와 같이 균열길이에 따른 피로균열전파율은 대수좌표상에서 거의 선



(a) BM-CL-06 Specimen

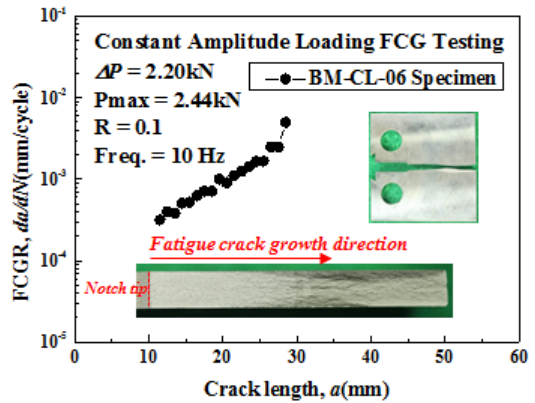


(b) WM-CL-043 Specimen

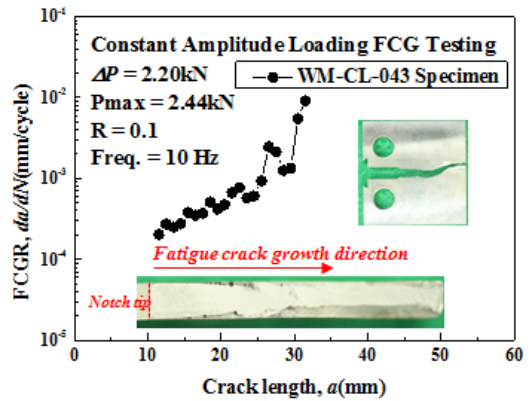


(c) HAZ-CL-103 Specimen

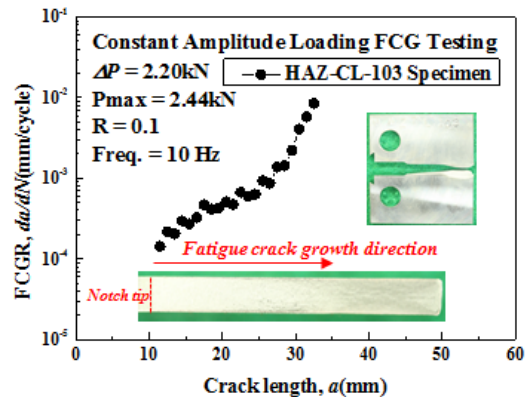
Fig. 5 Macroscopic morphology of fatigue crack growth path



(a) BM-CL-06 Specimen



(b) WM-CL-043 Specimen



(c) HAZ-CL-103 Specimen

Fig. 6 FCGR vs. crack length and fatigue fracture surface

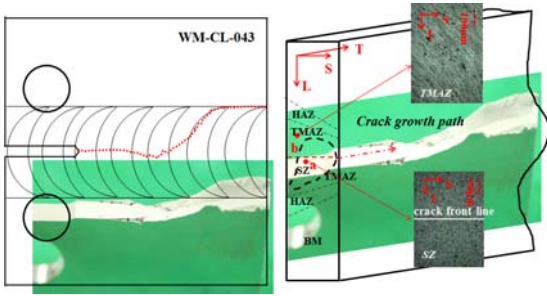


Fig. 7 Crack growth mechanism for WM-CL specimen

형적으로 증가하는 일반적인 금속재료에서의 피로균열전파율의 거동을 잘 나타내고 있으며, 급속파괴가 일어나기 전까지 거시적으로 직선적인 균열전파 경로를 나타내고 있다. 그러나 WM-CL 시험편의 경우, 초기에는 피로균열전파율이 다소 변동성이 존재하나 거시적으로는 BM-CL 시험편의 경우와 동일하게 직선적인 관계를 보이다가 그 후 전파율이 급속히 증가하고 균열전파의 지연을 일으키고 증가하여 급속파괴에 이르는 양상을 보여주고 있다. Fig. 7과 같이 초기에는 마찰교반용접재의 재결정조직이 형성되는 교반부 정중앙을 통하여 비교적 느리게 안정적으로 균열이 전파하다가 그 전파경로가 열영향부(TMAZ)와 열영향부(HAZ)쪽으로 경로를 변경하여 열영향부의 위치에서 급속파괴에 이르는 양상을 나타냈다.

한편 HAZ-CL 시험편의 경우, 초기에는 피로균열전파율이 가장 느리게 전파하면서 균열길이 25mm 이상되면 급속히 전파율이 증가하면서 파괴에 이르는 양상을 보여주고 있다. 시험편의 표면의 피로균열 전파경로는 거시적으로 BM-CL과 비슷한 양상을 보여주지만 피로균열전파율에는 WM-CL 시험편과 같이 변동성이 존재하는 것으로 사료되며, Fig. 4와 같이 비교적 낮은 응력확대계수범위에서는 그 피로균열전파율이 가장 낮음을 알 수 있었다. 이는 마찰교반용접에 의한 경도의 변화와 잔류응력 등의 영향에 기인하는 것으로 사료된다.

3.4 피로균열전파의 미시적 관찰

Fig. 8은 BM-CL 시험편에 대한 피로파괴면의 파면학적으로 고찰하기 위한 관찰위치를 나타내며, Fig. 9는 각 위치에서의 피로파괴면의 SEM 사진을 나타낸 것이다. Fig. 10 및 Fig. 11은 각각 WM-CL 시험편에 대한 관찰위치와 각 위치에서의 피로파괴면의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 12 및 Fig. 13은 각각 HAZ-CL 시험편에

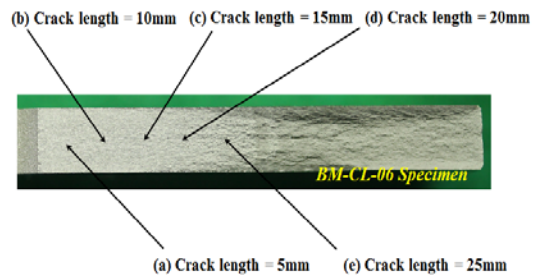


Fig. 8 Observation location of SEM for BM-CL specimen

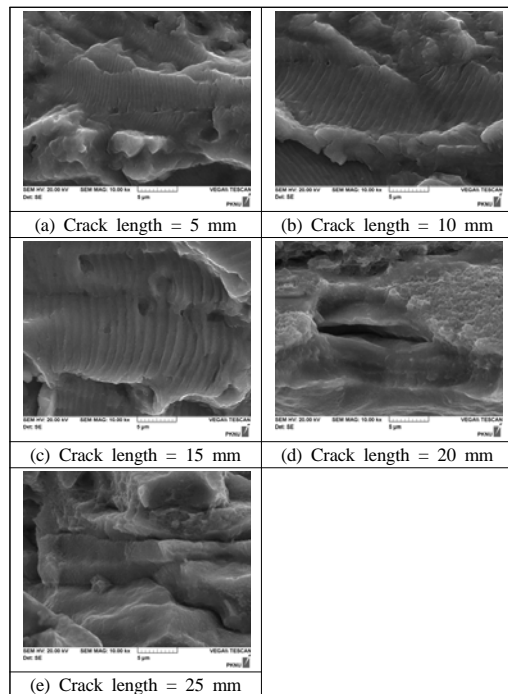


Fig. 9 SEM images of BM-CL specimen

대한 관찰위치와 각 위치에서의 피로파면의 SEM 사진을 나타낸다.

BM-CL 시험편의 파괴표면은 알루미늄 합금의 전형적인 피로파괴 파면을 잘 보여주고 있다. BM-CL 시험편의 파단면은 아주 미세한 스트라이에이션(fine striation)의 존재를 잘 보여주고 있으며, 스트라이에이션의 크기는 균열길이가 증가할수록 점진적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 더욱 균열이 진전하여 피로균열전파율이 높은 영역에서는 Fig. 9(e)에서 보는 바와 같이 입계파괴의

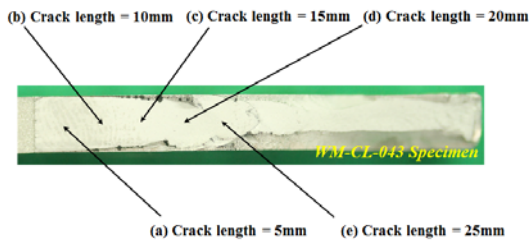


Fig. 10 Observation location of SEM for WM-CL specimen

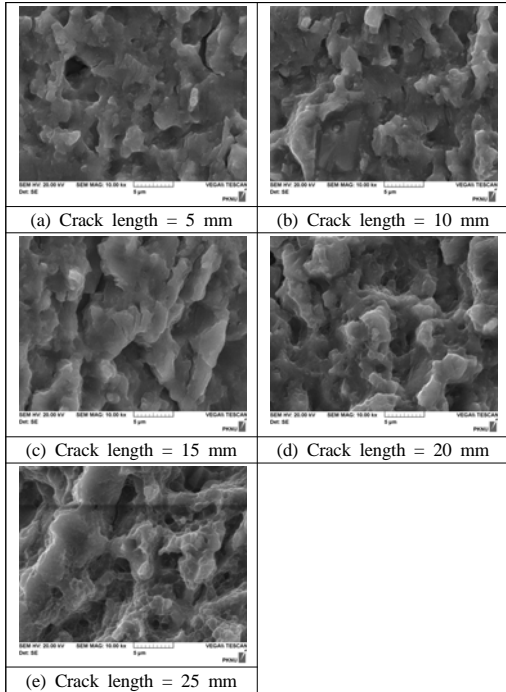


Fig. 11 SEM images of WM-CL specimen

양상으로 최종 파괴에 이르는 것으로 나타났다. 한편 HAZ-CL 시험편의 경우도 BM-CL 시험편과 차이는 있지만 전형적인 스트라이에이션이 관찰되었다. 반대로 WM-CL 시험편의 경우는 BM-CL 시험편과는 다르게 마찰교반용접부의 교반부를 진행하는 것으로 전반 교반부에서는 스트라이에이션이 잘 보여지지 않는 취성파괴 특징인 입계의 벽개 파괴 양상을 보여주고 있다. 한편 균열이

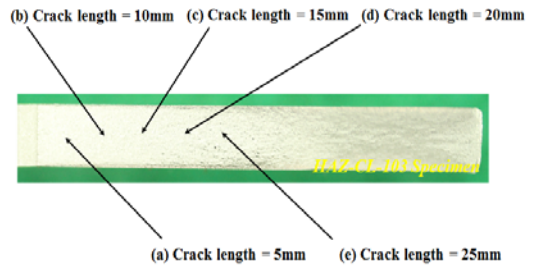


Fig. 12 Observation location of SEM for HAZ-CL specimen

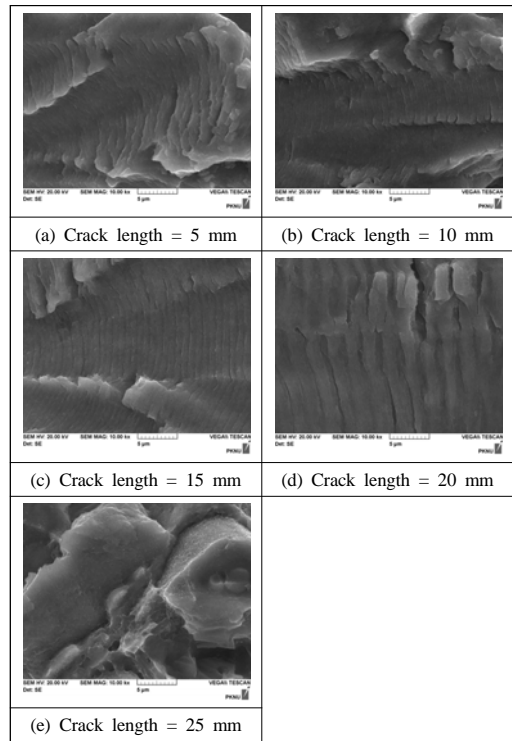
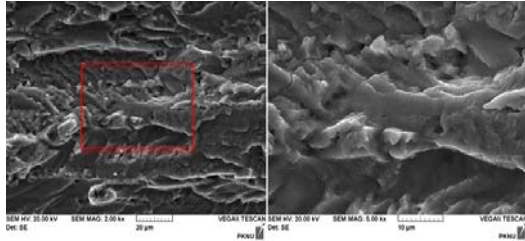
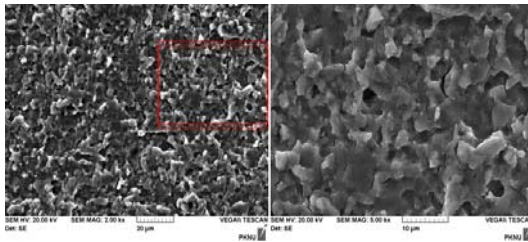


Fig. 13 SEM images of HAZ-CL specimen

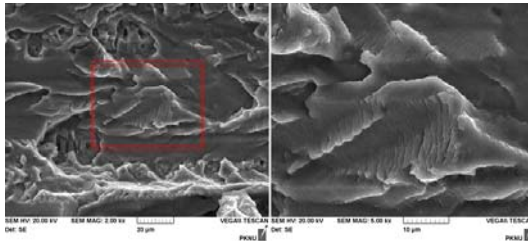
25mm 지점에서는 표면에 미세균열이 내재하여 전파하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 6 (b)에서와 같이 피로균열전파율이 감소하는 것과 전파율이 변동하는 양상과 관련이 있다고 사료된다.



(a) BM-CL specimen at low SIFR



(b) WM-CL specimen at low SIFR



(c) HAZ-CL specimen at low SIFR

Fig. 14 Comparison of fracture surfaces for specimen types

한편, 균열길이가 노치선단에서 5mm 전파한 위치인 비교적 낮은 구동력($\Delta K = 10 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)인 경우에 대하여 BM-CL, WM-CL 및 HAZ-CL 시험편에 대한 파면면을 비교하기 위하여 Fig. 14에 낮은 비율로 다시 나타내었다. BM-CL과 HAZ-CL 시험편에서는 전형적인 스트라이에이션이 관찰되는 피로파면을 나타내었고, WM-CL 시험편에 있

어서는 입계의 피로균열전파 모드가 관찰되었다. 이상의 결과로부터 마찰교반용접부재의 초기균열 위치에 따른 시험편의 형태에 의한 피로균열전파 거동을 거시적 및 미시적 관점에서 이해할 수 있음을 알았다.

Fig. 14는 마찰교반용접된 7075-T651의 용접부에 대한 BM, HAZ 및 WM 시험편에 대하여 균열 길이가 각각 약 10mm 전파했을 때의 위치에서의 SEM 촬영 사진을 나타낸다. BM과 HAZ 시험편에서는 전형적인 스트라이에이션이 관찰되는 피로 파면을 나타내었고, WM 시험편에 있어서는 입계의 피로균열전파 모드가 관찰되었다. 이상의 결과로부터 마찰교반용접부의 시험편의 종류에 따른 피로균열전파 거동의 양상을 거시적 및 미시적 관점에서 이해할 수 있음을 알았다.

4. 결 론

7075-T651 알루미늄 판재의 마찰교반용접제에 대하여 3가지의 다른 초기균열위치가 피로균열전파 거동에 미치는 거시적 및 미시적 영향에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 동일 조건의 일정진폭하중하의 피로균열전파실험을 수행하여 실험적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열위치에 따른 피로균열전파수명은 BM-CL, WM-CL 그리고 HAZ-CL 시험편 순으로 높게 나타났다.

(2) 응력확대계수범위가 $20\text{MPa(m)}^{1/2}$ 이하에서 피로균열전파율은 BM-CL 시험편이 가장 높았으며, 그리고 HAZ-CL 시험편에서 가장 낮게 나타났다. 한편 Paris 법칙에 적합한 전파지수 m 값은 BM-CL이 2.6, WM-CL이 3.3 그리고 HAZ-CL이 3.2로 WM-CL 시험편이 가장 크게 나타났다.

(3) BM-CL 및 HAZ-CL 시험편의 경우는 표면에서의 피로균열전파 경로가 하중의 작용축에 비교적 수평한 직선의 전파경로를 보였으나 WM-CL 시험편의 경우 구동력이 증가함에 따라 그 전파경로가 열영향부쪽으로 이동하는 전파경로를 보였다.

(4) SEM에 의한 미시적 파면의 관찰 결과, BM-CL과 HAZ-CL 시험편에서는 전형적인 스트라이에이션이 관찰되는 피로파면을 나타내었고, WM-CL 시험편에 있어서는 입계의 피로균열전파 모드가 관찰되었다.

후 기

본 과제(결과물)은 교육부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 본 연구의 실험과 SEM 촬영에 도움을 준 최필호, 임영곤 대학원생께도 감사드립니다.

Reference

1. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Church, P. Templesmith, and C. J. Dawes, "Friction Stir Butt Welding", International Patent Appl. No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Appl. No. 9125978.8; December 1991. US Patent No. 5,460,317; October 1995.
2. R. S. Mishra and Z. Y. Ma, 2005, "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering, R50, pp. 1-78.
3. Friction Welding Working Group, 2006, "Friction Welding Technology", Ilgan-gongup-shinmun-sa, pp. 176-264.
4. C. O. Kim and S. J. Kim, 2011, "Effects of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 61-68.
5. C. O. Kim, H. J. Sohn and S. J. Kim, 2011, "Effects of Welding Condition on Hardness and Microstructure of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 58-64.
6. Y. H. Jeong and S. J. Kim, 2013, "Spatial Randomness of Fatigue Crack Growth Rate in Friction Stir Welded 7075-T651 Aluminum Alloy Welded Joints", Transaction of Korean Society for Mechanical Engineers, Vol. 37, No. 9, pp. 1109-1116.
7. S. H. Ahn and S. J. Kim, 2013, "Statistical Distribution of Fatigue Crack Growth Rate for Friction Stir Welded Joints of Al7075-T651", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 86-93.
8. H. J. K. Lemmem, R. C. Alderliesten and R. Benedictus, 2011, "Marco and Microscopic Observations of Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded Aluminum Joints", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 78, pp. 930-943.
9. ASTM E647-05, 2005, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01, ASTM International.
10. S. S. Kim, C. G. Lee and S. J. Kim, 2008, "Fatigue Crack Propagation Behavior of Friction Stir Welded 7083-H31 and 6061-T651 Aluminum Alloys", Materials Science and Engineering A478, pp. 56-64.
11. P. C. Paris and F. Erdogan, 1963, "A Critical Analysis of Fatigue Crack Growth Propagation", Transaction of ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 85, pp. 528-536.