

7075-T651 알루미늄 판재의 마찰교반용접과 피로균열전파 특성[§]

김치옥* · 손혜정* · 김선진**†

* 부경대학교 대학원, ** 부경대학교 기계자동차공학과

Friction Stir Welding of 7075-T651 Aluminum Plates and Its Fatigue Crack Growth Property

Chi Ok Kim*, Hye Jeong Sohn* and Seon Jin Kim**†

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Pukyong National Univ.,

** Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Pukyong National Univ.

(Received June 10, 2011 ; Revised August 17, 2011 ; Accepted August 18, 2011)

Key Words: Friction Stir Welding(마찰교반용접), Rotation Speed(회전 속도), Travelling Speed(이송 속도), Fatigue Crack Growth(피로균열전파), Crack Driving Force(균열의 구동력)

초록: 마찰교반용접은 일반적인 용접법에 비하여 기계적 성질, 용접결함의 감소, 재료 절감 그리고 짧은 생산시간과 같은 장점 때문에 제작공정에 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구의 목적은 이전의 실험 결과를 이용하여 마찰교반용접의 최적 조건을 검토하고 최적의 마찰용접조건에서 접합된 7075-T651 알루미늄 판재의 3가지 다른 영역, 즉 용접재, 열영향부재 그리고 모재에 대한 피로균열전파의 거동을 고찰하는 것이다. 최적의 마찰교반용접조건은 회전속도 800rpm, 이송속도 0.5mm/sec로 결정되었으며, 최적의 마찰교반용접에서 용접된 시험편에 대한 피로균열전파율은 3가지 영역의 재질, 즉 용접재, 열영향부재, 모재와 균열의 구동력에 크게 의존함을 보였다.

Abstract: Friction stir welding (FSW) method has extensively been used in manufacturing methods because of the several advantages over conventional welding methods, such as better mechanical properties, reduced occurrence of joining defects, high material saving, and low production time, etc. The aim of this paper is to review the optimal FSW conditions using the previous experimental results and is to investigate the fatigue crack growth rate in three different zones, WM, HAZ and BM for FSWed Al7075-T651 aluminum plates. As far as our experiments are concerned, the optimal conditions are obtained as rotation speed, 800rpm and travelling speed, 0.5mm/sec. The fatigue crack growth rate showed strong dependency on three different zones WM, HAZ and BM, and crack driving force.

1. 서론

모재를 회전시켜 마찰열을 이용하여 접합하는 기존의 마찰용접(Friction Welding, FRW)⁽¹⁾과 달리, 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 용접부에 삽입된 환봉의 회전 공구(Tool)를 이용하여 용접할 두 재료 사이의 용접라인을 따라 회

전 이동시킴으로써, 용접부를 가열, 연화, 소성 유동화시켜 고상으로 용접하는 원리이다.⁽²⁾

최근 환경보호와 에너지 절감에 대한 요구가 높아지면서 자동차, 철도, 선박 및 항공기 등 각종 수송기기의 경량화를 위한 기술의 필요성이 대두되는 가운데, 마찰교반용접 기술은 알루미늄이나 마그네슘 등의 경량 합금을 접합하는 차세대 용접기술로 주목 받고 있다.⁽³⁻⁵⁾

이러한 관점에서 많은 연구자들에 의하여 알루미늄 합금에 관한 마찰교반용접의 여러 가지의 프로세스 개발, 접합부의 특성이나 조직에 관한

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 신뢰성부문 춘계 학술대회(2011. 5. 19.-20., 서울과기대) 발표논문임

† Corresponding Author, sjkim@pknu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

많은 연구가 행하여지고 있지만,^(5~10) 아직 해명할 문제가 남아 있으며, 또한 접합원리나 현상에 관한 더 많은 이해를 요구하고 있다.⁽¹¹⁾

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.⁽¹¹⁾ 따라서 실용적 관점에서 그 사용조건에 맞는 알루미늄 합금에 대한 마찰교반용접조건에 대한 이해가 요구되며, 또한 마찰교반용접재에 대한 피로균열전파거동의 특성에 대한 파악이 매우 중요하다. 그러나 실용적 중요성에도 불구하고 알루미늄 합금재에 대한 용접조건이나 미세조직 등에 관한 연구는 많으나 마찰교반용접재의 피로균열전파 거동에 대한 연구는 비교적 많지 않다.^(12~14)

이러한 관점에서 본 연구에서는 Al 7075-T651의 판재의 마찰교반용접의 최적 용접조건을 결정하기 위하여, 회전공구의 회전속도와 이송속도를 변수로 하여 용접조건이 마찰교반용접부의 경도와 미세조직에 미치는 영향을 고찰한 저자들의 결과를 리뷰하고,^(15,16) 이 최적 마찰교반용접 조건에서 용접한 재료를 이용하여 일정 응력확대계수 제어 피로균열전파시험을 수행하여 마찰교반용접재(FSWed)의 재질과 균열의 구동력에 미치는 피로균열전파 거동의 특성을 고찰하고자 하였다. 이는 향후 피로균열전파 수명예측법 개발에 신뢰성공학적 응용이 가능하리라 사료된다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 실험에 사용된 재료는 국내 H사에서 제작된 두께 6mm의 Al7075-T651 알루미늄 판재이다. 본 재료에 대한 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2에 나타낸다.

2.2 마찰교반용접 실험장치 및 실험조건

본 연구에 사용된 마찰교반용접기는 국내 W사의 3축 스텐드 타입의 터치 패널 조작방식의 직선 마찰교반용접기를 사용하였으며, Y축 스트로크는 최대용량 1,000mm이다. 마찰교반용접 실험에 사용된 재료는 원판 치수 6×1250×2500mm, 무

Table 1 The chemical composition of Al 7075-T651

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
7075-T651	0.08	0.19	1.61	0.052	2.52
Req.	≤	≤	1.2~	≤	2.1~
Comp.	0.40	0.50	2.0	0.30	2.9
Material	Cr	Ni	Zn	Ti	
7075-T651	0.19	0.0061	5.79	0.022	
Req.	0.18~	≤	5.1~	≤	
Comp.	0.28	0.05	6.1	0.20	

Table 2 The mechanical properties

	Longitudinal Direction	Transverse Direction	Remarks/Unit
TS	565	583	≥ 540/MPa
YS	481	517	≥ 460/MPa
EL	15	13	≥ 9%

게 3.576kg의 압연 판재로부터 Fig. 1과 같이 압연 방향을 250mm, 폭 방향으로 100mm의 직사각형 크기로 절단하여, 압연방향을 용접 진행 방향으로 하여 마찰교반용접을 수행하였다.

본 실험의 마찰교반용접에 사용된 공구의 치수는 솔더의 직경이 20mm, 그리고 프로브의 솔더부 직경은 9mm, 선단의 직경은 6.85mm로 하고 프로브의 길이는 5.85mm의 SKD61 공구강으로 프로브 부분의 끝 부분 직경이 작아지는 형상의 나사 형으로 설계, 제작하였다(Fig. 2 참조).

Al 7075-T651 합금의 최적의 마찰교반용접 조건을 결정하기 위해서는 많은 변수가 있지만, 통상 프로브의 삽입깊이는 일정으로 되도록 제어되는 것으로써, 실질적으로는 공구의 회전속도와 용접 이송속도가 중요한 변수로 된다. 본 연구에서는 두께 6mm의 7075-T651의 최적 용접조건을 결정하기 위하여 여러 문헌 조사^(5,11)와 경험에 의하여 용접변수를 선정하여 실험을 수행하였다. 최적 마찰교반용접 조건을 결정하기 위한 구체적 실험과 결과는 참고문헌을 참조하기 바란다.^(15,16)

2.3 피로균열전파실험 방법 및 절차

본 연구의 주된 목적인 마찰교반용접재의 피로

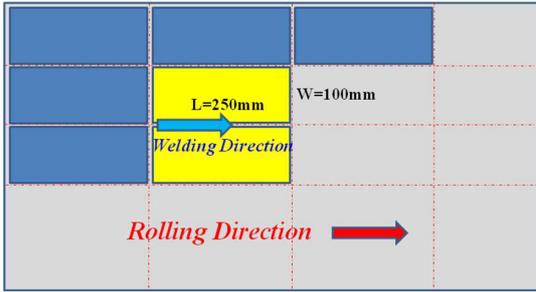


Fig. 1 Specimen cutting and welding direction

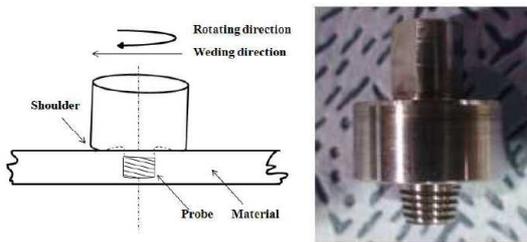


Fig. 2 Schematic diagram and photo of FSW tool

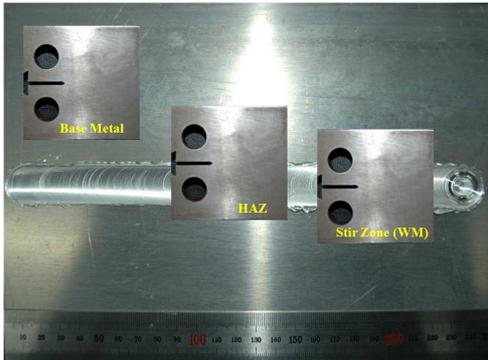


Fig. 3 Schematic diagram of CT specimen cutting



Fig. 4 Schematic diagram of FCG test for driving force

균열전파거동의 특성을 평가하기 위한 시험편은 ASTM E647 규정에 의한 폭이 50mm 그리고 두께 5mm인 CT (compact specimen) 시험편을 사용

하였다. 시험편의 채취방향은 압연방향과 균열의 전파방향이 같은 TL 시험편에 대하여 제작 하였으며, 기계 가공시 평면부는 열 영향이 극소화 되도록 앤드밀과 정면커터를 사용하여 가공하였으며, 노치부는 방전가공으로 행하였다. 용접재 (WM, Weld Metal), 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone) 그리고 모재(BM, Base Metal)에 대한 시험편의 채취, 가공한 개념도를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 열영향부 시험편의 노치는 용접 중앙선에서 10mm 떨어진 위치에 오도록 채취하였으며, 용접재 시험편의 노치는 용접 선에서 정 중앙에 오도록 채취 가공하였다.

피로균열전파 시험에 이용한 시스템은 시험편에 하중을 부하하는 용량 100kN의 전기유압서보식 피로시험기(Instron Model 8821S)를 사용하였으며, 시험조건은 실험실의 대기중에서 응력반복속도 10Hz, 응력비 0.1의 정현파 인장-인장 일정응력확대계수제어 방식으로, 각각의 재질에 대하여 동일 실험자가 Fig. 4와 같이 동일한 구동력($\Delta K=8, 11.5, 15\text{MPa(m)}^{0.5}$) 조건하에서 실험을 수행하였다. 균열길이는 피로 시험중에 COD (Crack Opening Displacement)게이지를 이용하여 컴플라이언스법에 의하여 측정 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 최적 마찰교반용접조건에의 리뷰^(15,16)

Fig. 5는 마찰교반용접된 용접재에서 모든 용접 조건에 따른 인장시험 결과를 종합화하여 나타낸 그림이다.⁽¹⁵⁾

본 실험에 사용된 두께 6mm의 7075-T651 알루미늄 판재의 모재에 대한 인장강도는 종방향인 565MPa, 횡방향인 583MPa 그리고 항복강도는 종방향인 485MPa, 횡방향인 517MPa로 나타났다. 그리고 시험편의 과단위치는 모두 열영향부 측에서 나타났다. 한편, 경도와 조직시험 관찰 결과 회전속도 800rpm, 용접 이송속도 0.5mm/sec에서 용접조건이 우수하였으며, 인장강도와 조직, 경도를 고려한 최적의 조건임을 확인하였다. 최적조건에 대한 미시조직을 Fig. 6에 나타낸다. 접합시 발생한 마찰열과 소성유동에 의해 동적 재결정 영역이 발생하여 Fig. 6의 (d)와 같이 결정립이 매우 미세한 것으로 나타났으며, 이는 경도의 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 동적 재결정 영역이 발생하여 인장 시험편의 과단은

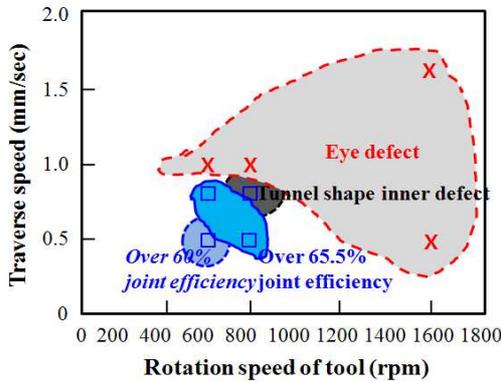


Fig. 5 Results of tensile tests for FSWed joint

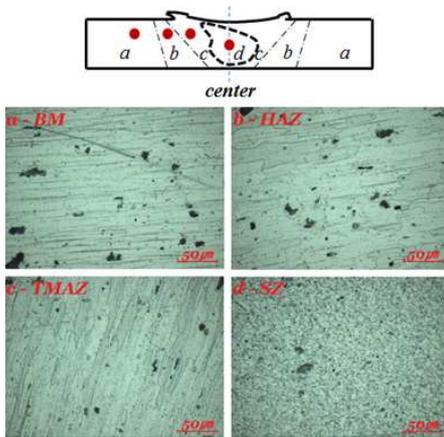


Fig. 6 Microstructures of FSWed joint and base metal

통상적으로 열영향부에서 나타났다.

이상의 결과로부터 최적용접조건에서 용접을 다시 수행하여 Fig. 3과 같이 CT 표준 시험편을 채취, 피로균열전파시험을 수행한 결과를 이하에서 논한다.

3.2 마찰교반용접재의 피로균열전파 거동

Fig. 7은 용접재(WM), 열영향부재(HAZ), 그리고 모재(BM)에 대하여 응력확대계수범위가 각각 8, 11.5 및 15MPa(m)^{0.5}의 3개의 조건에 대한 하나의 CT 시험편에 대한 응력 반복수 N과 균열길이 a와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 재질에 따라 피로균열전파 거동이 서로 다를 수 있고, 응력확대계수범위가 8, 11.5 그리고 15MPa(m)^{0.5}로 증가할수록 피로균열전파가 빠르게 전파함을 알 수 있다. 한편 각 재질에 따른 평균 피로균열전파율을 응력확대계수범위에 따라 나타낸 것이 Fig. 8이다. 전체적으로 모든 응력확대계수범위에서 모재의 경우가 평균 피로

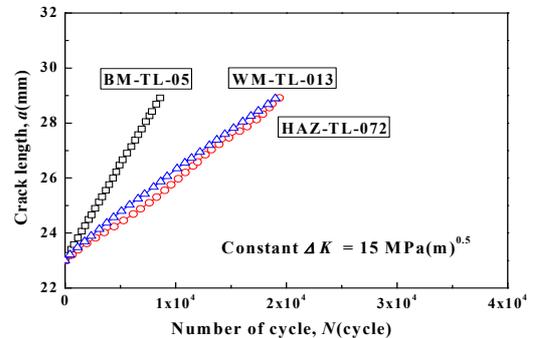
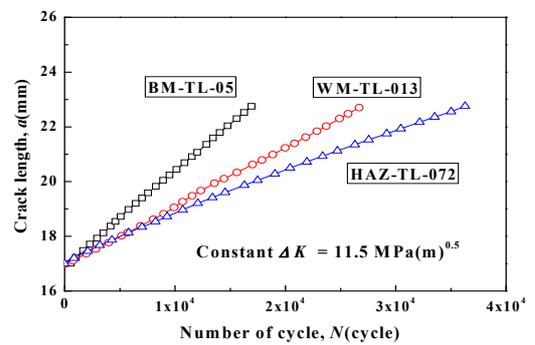
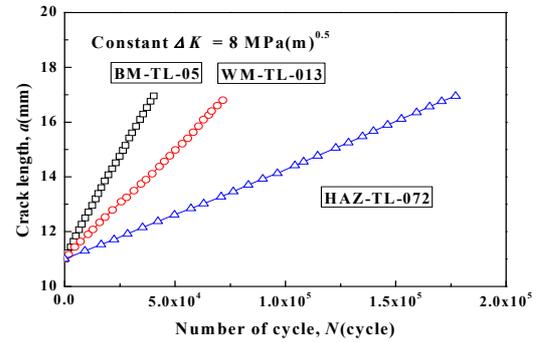


Fig. 7 a-N curves for ΔK= 8, 11.5 and 15 MPa(m)^{0.5}

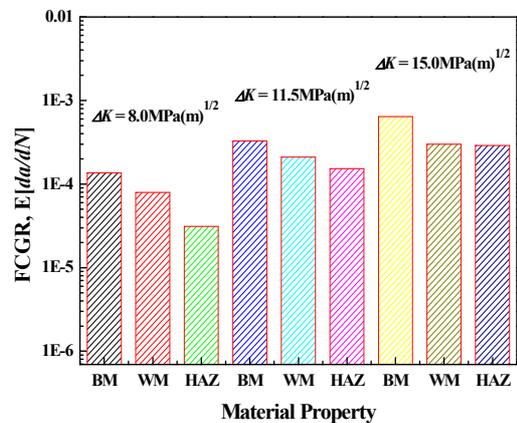


Fig. 8 Mean FCGR according to material property and stress intensity factor range

균열전파율이 가장 높게 나타났으며, 그 다음 용접재의 경우가 크게 나타났고, 마지막으로 열영향부재의 경우가 가장 낮게 나타났다. 비교적 응력확대계수범위가 낮은 $\Delta K=8\text{MPa(m)}^{0.5}$ 에서는 그 차이가 분명하나 응력확대계수범위가 높은 $\Delta K=15\text{MPa(m)}^{0.5}$ 에서는 WM재와 HAZ재에 큰 차이가 없었다. 이는 구동력이 높은 경우에는 전파율이 매우 빠르게 증가할 것으로 예상되며, 또한 시험편간 변동을 고려하면 용접재가 빠를지 HAZ재가 빠를지 현재 결론 짓기에는 무리가 있다. 그러나 타의 연구 결과⁽¹⁴⁾에서와 같이 높은 구동력에서는 전파율이 빠르다는 것은 일치하고 있다. 향후 더 많은 시험편에 대한 고찰이 필요하다고 생각된다.

이상의 결과를 종합하면, 모든 시험편에서 균열진전이 응력반복수에 따라 비교적 부드러운 직선 형태를 나타내고 있으며, 이는 일정 응력확대계수제어 피로균열전파 시험의 전형적인 $a-N$ 곡선의 결과를 보이고 있다. 그러나 응력확대계수범위가 비교적 높은 $15\text{MPa(m)}^{0.5}$ 에서는 직선의 형태가 WM재와 HAZ재가 다소 불규칙한 결과를 보여주고 있다. 이것은 마찰교반용접에 의한 피로균열전파율의 변동이 비교적 높은 응력확대계수 범위 레벨에서 시험편내의 피로균열전파 저항의 변동이 가속화되고 균열선단에서의 소성영역의 크기의 영향인 것으로 사료된다. 이러한 원인은 여러가지가 있을 수 있지만, 마찰교반용접에 의한 미세조직의 변화와 용접 잔류응력에 의한 것이라 사료된다.⁽¹²⁻¹⁴⁾

3.3 피로균열전파율의 변동성

Fig. 9는 용접재(WM), 열영향부재(HAZ), 그리고 모재(BM)에 대하여 응력확대계수범위가 각각 8, 11.5 및 $15\text{MPa(m)}^{0.5}$ 의 3개의 조건에 대한 CT 시험편에 대한 피로균열전파율 da/dN 과 균열길이 a 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 하나의 시험편내에서도 균열길이에 따른 피로균열전파율 da/dN 에는 공간적으로 변동을 나타내고 있으며, 각각의 재질과 응력확대계수범위에 따라 그 변동성이 다름을 알 수 있다.

모재, 용접재 그리고 HAZ재에 대하여 응력확대계수범위가 각각 8, 11.5 및 $15\text{MPa(m)}^{0.5}$ 의 3개의 조건에 대한 피로균열전파율 da/dN 의 변동계수(COV)도 Fig. 9의 괄호 안에 나타내었다. 모재

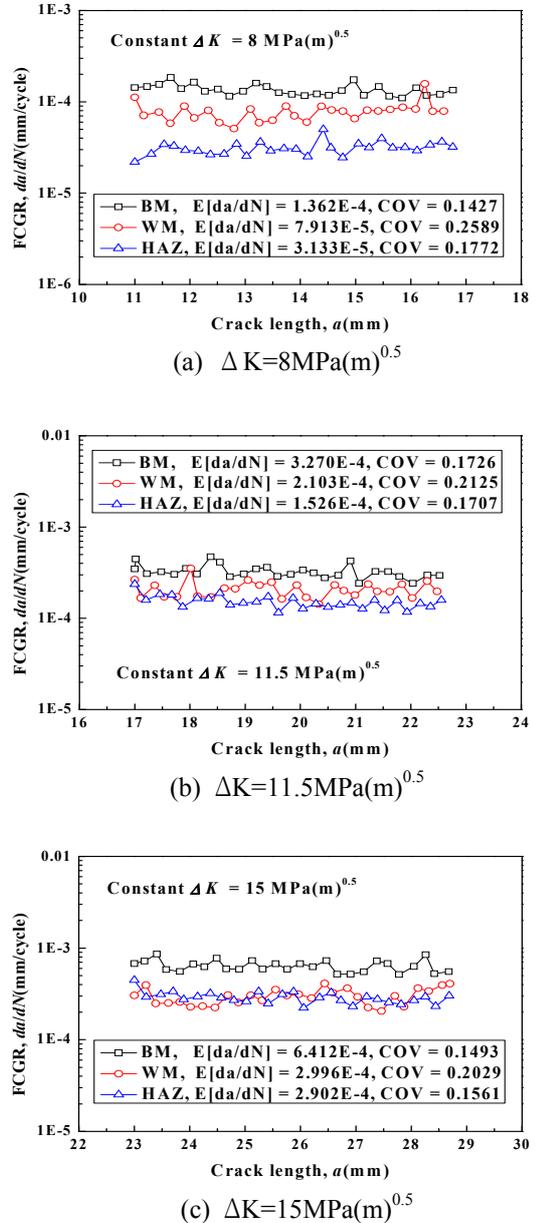


Fig. 9 Variability of FCGR according to crack length range

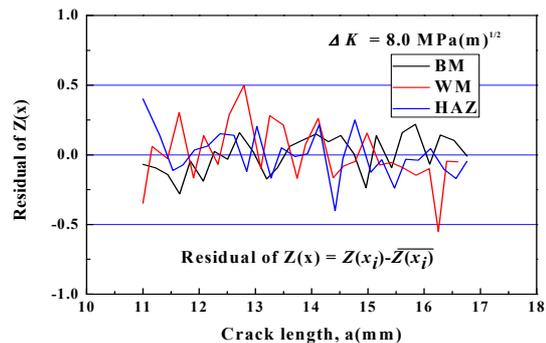


Fig. 10 Variability for residual of FCG resistance

의 경우 피로균열전파율의 변동계수는 $\Delta K=11.5 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ 에서 17.26%로 가장 높게 나타났으나, 3가지 응력 레벨에서 평균적으로 약 15%정도를 나타냈다. 그 다음 높게 나타난 것이 HAZ재로 응력 레벨이 낮은 $\Delta K=8 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ 에서 17.72%를 나타냈으며, 응력레벨이 증가할수록 그 변동계수는 감소하였다. 또한 용접재의 경우가 모든 응력 범위에서 가장 높게 나타났으며, $\Delta K=8 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ 에서 25.89%의 변동을 보였다. 그리고 응력 레벨이 증가할수록 그 변동계수는 낮게 나타났다. 이러한 경향은 마찰교반용접의 미세조직, 경도 그리고 용접잔류응력 등의 상호작용과 구동력의 증가에 따른 재료의 평균화에 의한 영향이라 사료되며, 차후 이에 대한 고찰이 더 필요하다고 생각된다.

한편 피로균열전파율(da/dN)의 변동성을 좀 더 명확하게 고찰하기 위하여 저차 등⁽¹⁷⁾이 제안한 확률모델을 이용하여, 일정 응력확대계수제어 피로균열전파시험에 의한 피로균열전파 저항의 $Z(x)$ 를 아래와 같이 구하여, 그 잔차(residual)의 영향을 고찰하였다.

$$Z(x_i) = \left(\frac{da}{dN} \right) / \left(\overline{\frac{da}{dN}} \right) \quad (1)$$

여기서, x_i 는 피로균열 선단의 위치를 나타내며, $\left(\overline{\frac{da}{dN}} \right)$ 는 평균 피로균열전파율을 나타낸다. 본 조사에서 얻은 하나의 결과로 $\Delta K=8 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ 에서의 피로균열전파 저항, $Z(x)$ 의 잔차를 구하여 Fig. 10에 나타낸다. 이상에서 알 수 있듯이 WM재의 경우가 가장 큰 변동성을 나타냄을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 최적의 마찰교반용접의 조건에서 용접한 Al 7075-T651 알루미늄 판재에 대하여 일정 응력확대계수 제어 피로균열전파 실험을 수행하여, 3가지 다른 종류의 구동력(여기서는 $\Delta K=8, 11.5$ 그리고 $15 \text{ MPa(m)}^{0.5}$)에 대한 피로균열전파율의 변동성을 고찰한 결과, 하나의 시험편 내에서도 균열길이에 따라 그 피로균열전파율에는 불규칙성이 존재함을 알 수 있었다. 또한 마찰교반용접재의 WM재의 경우가 그 변동성이 가

장 높게 나타났으며, 그 다음 HAZ재, 그리고 BM순으로 나타났다. 그리고 WM과 HAZ재의 경우 구동력이 증가하면 피로균열전파율의 변동계수는 감소하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과의 일부로 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) ASM, 1993, ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering, Vol. 6, ASM International, pp. 150~172.
- (2) Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murcg, M. G., Templesmith, P. and Dawes, C. J., 1991, "Friction Stir Butt Welding," International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991, US Patent No. 5,460,317, Oct. 1995.
- (3) Kim, M. S., 2009, Current State and Prospect of Domestic Friction Stir Welding Industry, Welding Technology, Vol. 8, pp. 51~62.
- (4) Shtrikman, M. M., 2008, "Current State and Development of Friction Stir Welding," *Welding Journal*, Vol. 22, No. 11, pp. 806~815.
- (5) Jang, S. K., Han, M. S. and Jeon, J. I., 2007, "Effects of Tool Rotation and Transition Speed during Friction Stir Welding of Al 7075-T651 Alloy," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 31, No. 14, pp. 532~539.
- (6) Shinoda, T. and Kondo, Y., 1997, "Friction Stir Welding of Aluminum Plate," *Welding International*, Vol. 11, No. 3, pp. 179~184.
- (7) Sato, Y. S., Kokawa, H., Ikeda, K., Enomoto, M., Jogan, S. and Hashimoto, T., 2001, "Microtexture in Friction Stir Weld of an Aluminum Alloy," *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 32A, pp. 941~948.
- (8) Fuller, C. B., Manohney, M. W., Calabrese, M. and Micona, L., 2010, "Evolution of Microstructure and Mechanical Properties in Naturally Aged 7075 and 7075 Al Friction Stir Welds," *Materials Science*

- and Engineering A*, Vol. 527, pp. 2233~2240.
- (9) Hatamleh, O., Forth, S. and Reynolds, A. P., 2010, "Fatigue Crack Growth of Peened Friction Stir-Welded 7075 Aluminum Alloy Different load Ratios," *Journal of Materials Engineering Performance*, Vol. 19, pp. 99~106.
- (10) Jang, S. K. and Jeon, J. I., 2006, "Experimental Behaviors of Weld Zone Property of the Butt and Lap Jointed Specimen Friction-Stir-Welded with 2mm 1050 Aluminum Alloy Sheet," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 30, No. 2, pp. 187~193.
- (11) Friction Welding Working Group, 2006, Friction Welding Technology, Ilgankongupshimunsa, pp.176~264.
- (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 Aluminum Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, 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) Kim, S. S., Lee, C. G. and Kim, S. J., 2008, "Fatigue Crack Propagation Behavior of Friction Stir Welded 5083-H31 and 6061-T651 Aluminum Alloys," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 478, pp. 56~64.
- (15) Kim, C. O. and Kim, S. J., 2011, "Effect of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of Al 7075-T651 Plate," *Trans. of KSPSE*, Vol. 15, No. 2, pp. 61~68.
- (16) Kim, C. O., Sohn, H. J. and Kim, S. J., 2011, "Effect of Welding Condition on Hardness and Microstructure of Friction Stir Welded Joints of Al 7075-T651 Plate," *Trans. of KSPSE*, Vol. 15, No. 3, pp. 58~64.
- (17) Kim, S. J. and Oh. S. K., 1996, "Effect of Specimen Thickness on Probabilistic Fatigue Crack Growth," *Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 4, pp. 219~226.