

Al7075-T651의 마찰교반용접된 접합부의 피로균열전파율의 통계적 분포

Statistical Distribution of Fatigue Crack Growth Rate for Friction Stir Welded Joints of Al7075-T651

안석환* · 김선진**†

Seok-Hwan Ahn* and Seon-Jin Kim**†

(접수일 : 2013년 04월 04일, 수정일 : 2013년 05월 13일, 채택확정 : 2013년 06월 25일)

Abstract: This paper deals with the effects of driving force and material properties on statistical distribution of fatigue crack growth rate (FCGR) for the friction stir welded joints of Al 7075-T651 aluminum plate. In this work, the statistical probability distribution of fatigue crack growth rate was analyzed by using our previous constant stress intensity factor range controlled fatigue crack growth test data. As far as this study are concerned, the statistical probability distribution of fatigue crack growth rate for the friction stir welded (FSWed) joints was found to evaluate the variability of fatigue crack growth rate for base metal (BM), heat affected zone (HAZ) and weld metal (WM) specimens. The probability distribution of fatigue crack growth rate for FSWed joints was found to follow well log-normal distribution. The shape parameter of BM and HAZ was decreased with increasing the driving force, however, the shape parameter of WM was decreased and increased with increasing the driving force. The scale parameter of BM, HAZ and WM was increased with the driving force.

Key Words : Friction Stir Welding, Al7075-T651, Fatigue Crack Growth Rate, Statistical Distribution, Log-normal Distribution

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 영국 용접연구소(The Welding Institute, TWI)에서 개발된 고상용접 프로세스로 비소모성 회전공구를 이용하여 재료를 교반, 일체화 한다고 하는 새로운 원리를 이용한 접합 방법이다.^{1,2)} 마찰교반

용접 기술의 공학적 적용을 위해서는 그 마찰교반 용접 접합부의 피로 특성에 대한 이해가 매우 중요하다. 이러한 관점에서 많은 연구자들이 마찰교반 용접부의 피로 특성과 피로균열전파 거동에 대한 연구를 수행하였다.³⁻¹¹⁾ 그러나 이들 연구의 대부분은 피로균열전파거동에 미치는 미세조직과 잔류응력 등의 영향에 관한 연구로 피로균열전파율의 통

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

*안석환 : 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

* Seok-Hwan Ahn : A+ LINC, Pukyong National University

계적 불규칙성을 고찰한 연구는 거의 없다. 또한 그들 연구의 대부분은 균열길이가 증가함에 따라 균열선단의 역학적 구동력이 증가하는 일정 응력진폭 반복하중하의 실험 결과가 대부분이다. Virkler¹²⁾, Wu¹³⁾ 등이 지적하였듯이 피로균열전파 과정이 본래 확률적 특성을 지닌다는 것은 일반적으로 널리 알려진 사실이다. 알루미늄 합금에 대한 피로균열전파율의 통계적 연구는 많이 수행되었지만, 마찰교반용접 접합부에 대한 균열전파율의 통계적 불규칙성을 고찰한 연구는 거의 없다.

일반적인 피로균열전파 실험은 일정 응력진폭하중에서 수행되어 직접적으로 피로균열전파율(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계를 얻는데는 매우 유용한 방법이지만¹⁴⁾, 피로균열전파율의 실험 데이터의 변동성에 미치는 영향을 이해하는 데는 어려움이 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금의 접합부의 피로균열전파율의 불규칙성을 이해하기 위하여, 일정 응력확대계수범위 제어 피로균열전파 실험하에서 수행된 저자 등의 이전의 실험 데이터¹⁵⁾를 활용하여 구동력과 재질에 미치는 피로균열전파율 데이터의 통계적 확률분포를 추정하여 그 피로균열전파율의 통계적 변동특성을 해석 및 고찰하고자 하였다.

2. 이전의 실험 방법 및 절차¹⁵⁾

본 연구에 사용된 시험편 재료는 S사에서 제작된 시판용 7075-T651 알루미늄 판재이다. 본 재료에 대한 화학적 성분과 기계적 성질은 참고문헌¹⁵⁾를 참조 바란다. 마찰교반용접기는 국내 W사의 3축 스텐드 타입의 터치 패널 조작방식의 직선 마찰교반용접기를 사용하였으며, 마찰교반용접 실험에 사용된 재료는 원판 치수 6 × 1250 × 2500 mm의 압연 판재로부터 압연 방향을 250mm, 폭 방향으로 100mm의 직사각형 크기로 절단하여, 압연 방향을 용접 진행 방향으로 하여 마찰교반용접을 수행하였다.

마찰교반용접에 사용된 공구의 치수는 솔더의 직경이 20mm, 그리고 솔더부 직경은 9mm, 선단의

직경은 6.85mm로 하고 프로브의 길이는 5.85mm의 SKD61 공구강으로 프로브 부분의 끝 부분 직경이 작아지는 형상의 나사 형으로 제작하였다. 그리고 마찰교반용접은 선행연구^{16,17)}를 통하여 얻은 조건으로 수행하였다. 실험의 상세한 내용은 참고문헌¹⁵⁾에 기술되어 있다.

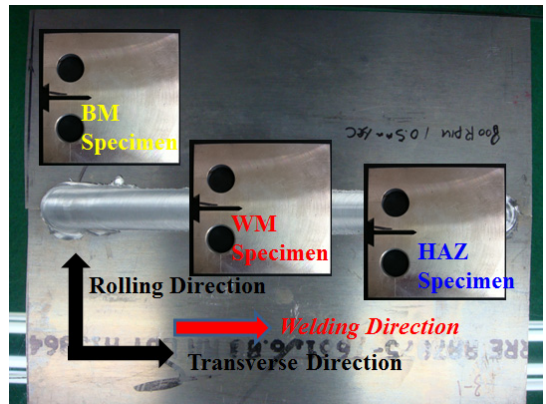


Fig. 1 Schematic illustration of CT specimen cutting

Fig. 1와 같이 마찰교반용접된 판재로부터 ASTM E647 규정에 의하여 CT (compact tension) 시험편을 LT 방향으로 채취하여 두께 5mm의 시험편을 가공하였다. 본 연구에 사용한 시험기는 용량 100kN의 전기유압식 서보 피로시험기인 Instron Model 8821S를 사용하였으며, 시험조건은 실험실의 대기중에서 응력반복속도 10Hz, 응력비 0.1의 정현파 인장-인장 일정 응력확대계수범위제어 방식으로 균열선단의 구동력을 3가지 즉, 8.0, 11.5 및 15.0 MPa(m)^{1/2}로 일정하게 하여 실험을 수행하였다. 균열길이의 측정은 컴필라이언스법으로 측정 기록하였다.

3. 해석 및 고찰

3.1 피로균열전파율의 불규칙성

Fig. 2는 일레로 모재(BM) 시험편에 대한 응력확대계수범위 8.0MPa(m)^{1/2}의 경우에 대한 5개의 시험편에 대한 균열길이(a)와 응력반복수(N)와의 관계를 나타낸 것이다. 각각의 시험편에 대한 피

로균열전파 곡선은 일정응력확대계수범위 제어하의 실험에서 나타나는 직선의 형태를 나타내고 있으며, 시험편에 따라 그 직선의 기울기가 다르며, 또한 직선은 서로 겹치는 경우도 나타남을 보여주고 있다.

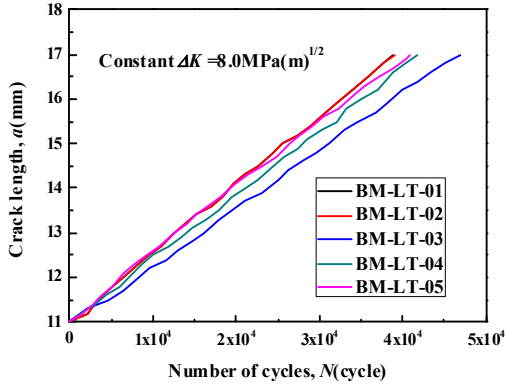


Fig. 2 a-N curves for BM specimens

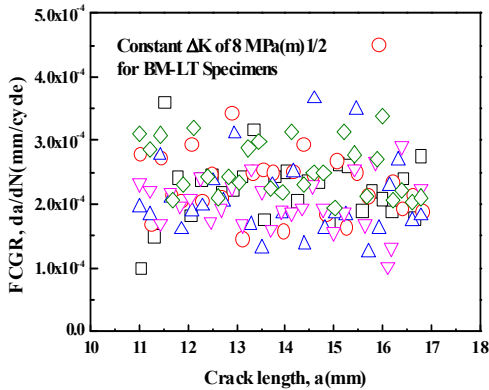


Fig. 3 The stochastic nature of FCGR, da/dN

Fig. 3에 모재(BM) 시험편에 대한 응력확대계수 범위 $8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$ 의 경우에 대한 균열길이에 따른 피로균열전파율의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 균열전단의 구동력이 일정으로 제어되었지만, 그 피로균열전파율은 확률적 불규칙성을 나타내고 있다. 결과적으로 피로균열전파율은 일정하지 않으며, 피로균열전파율의 데이터는 상당한 통계적 변동을 나타낸다.

본 연구의 목적인 피로균열전파율의 통계적 변

동성에 미치는 구동력과 재질의 영향을 명확히 고찰하기 위하여, 먼저 히스토그램(histogram)을 평가하여 적합한 통계적 확률분포를 추정하고 고찰하고자 한다.

3.2 피로균열전파율의 히스토그램

Fig. 4에서 Fig. 6까지는 모재(BM)에 대한 구동력에 따른 피로균열전파율의 히스토그램을 나타낸다. 또한그림 중에 그 산술적 통계치를 구하여 나타내었다. 본 그림에서 알 수 있듯이 피로균열전파율(fatigue crack growth rate, FCGR)은 구동력에 의하여 그 평균(mean)과 변동계수(coefficient of variation, CV)에 영향이 있음을 알 수 있다. 전파율의 평균은 구동력이 증가하면 증가하고, 그 변동계수는 구동력이 증가하면 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 7에서 Fig. 9까지는 용접재(WM)에 대한 구동력에 따른 피로균열전파율의 히스토그램을 나타낸다. 또한 산술적 통계치를 구하여 그림 중에 나타내었다. 본 그림에서 알 수 있듯이 피로균열전파율은 구동력에 의하여 그 평균과 변동계수에 영향이 있음을 알 수 있다. 전파율의 평균은 구동력이 증가하면 증가하나, 그 변동계수는 BM과는 달리 구동력이 증가하면 감소 및 증가하는 경향을 보이고 있다. 한편, 열영향부(HAZ)에 대한 구동력에 따른 피로균열전파율의 히스토그램을 Fig. 10에서 Fig. 12에 나타내었다. 피로균열전파율은 구동력에 의하여 그 평균과 변동계수에 영향을 미침을 알 수 있다.

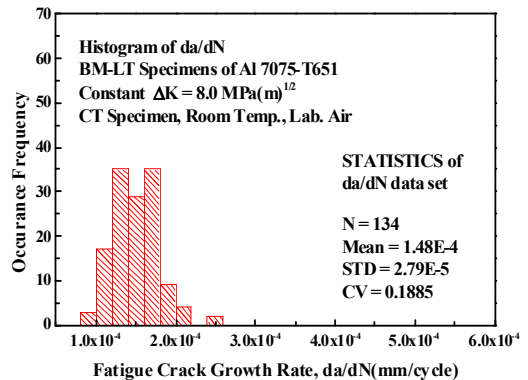


Fig. 4 Histogram of FCGR for $\Delta K=8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$

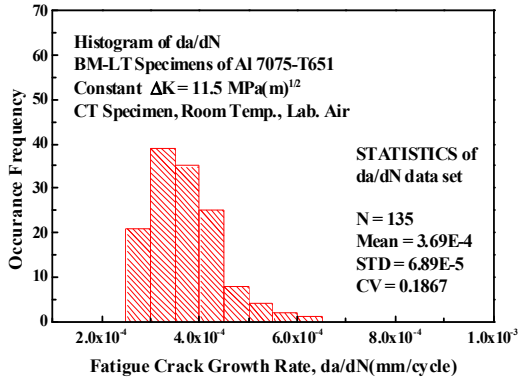


Fig. 5 Histogram of FCGR for $\Delta K=11.5\text{MPa(m)}^{1/2}$

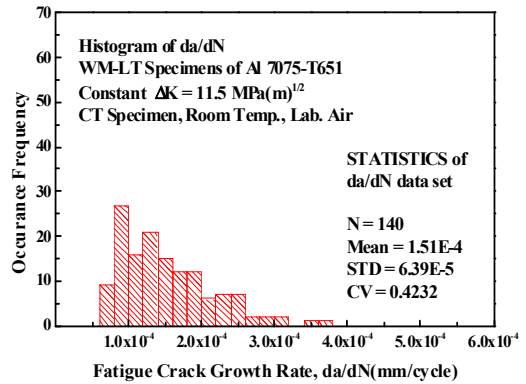


Fig. 8 Histogram of FCGR for $\Delta K=11.5\text{MPa(m)}^{1/2}$

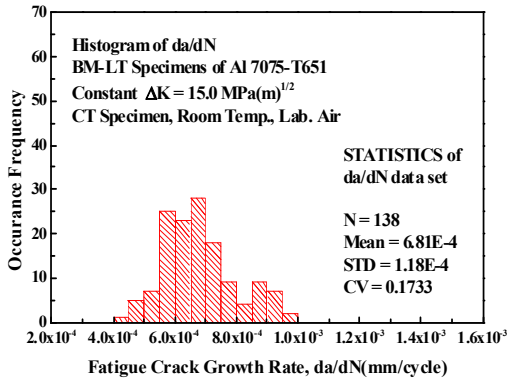


Fig. 6 Histogram of FCGR for $\Delta K=15\text{MPa(m)}^{1/2}$

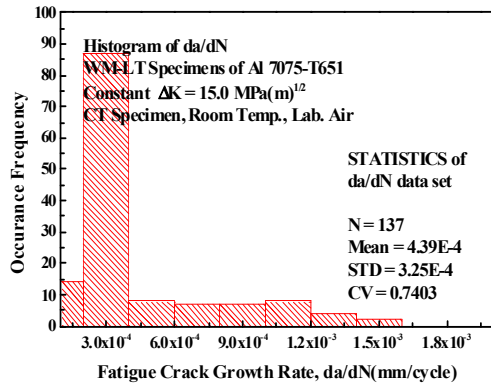


Fig. 9 Histogram of FCGR for $\Delta K=15\text{MPa(m)}^{1/2}$

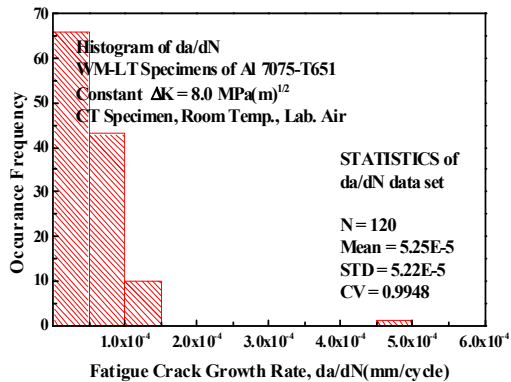


Fig. 7 Histogram of FCGR for $\Delta K=8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$

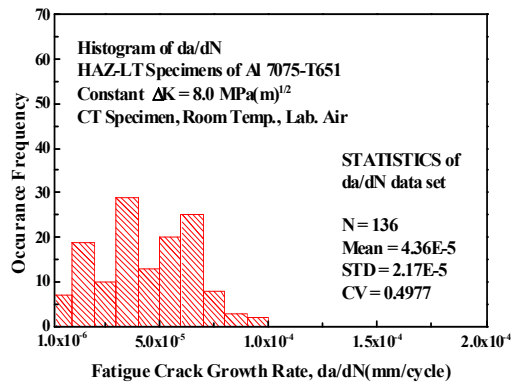


Fig. 10 Histogram of FCGR for $\Delta K=8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$

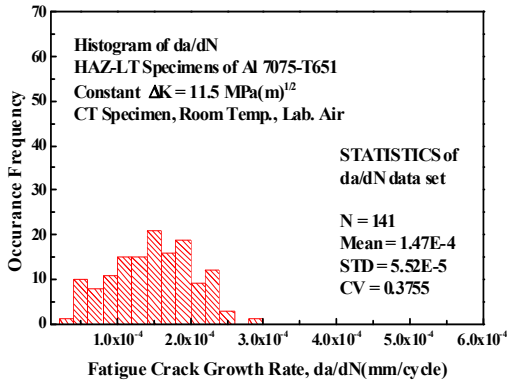


Fig. 11 Histogram of FCGR for $\Delta K=11.5\text{MPa(m)}^{1/2}$

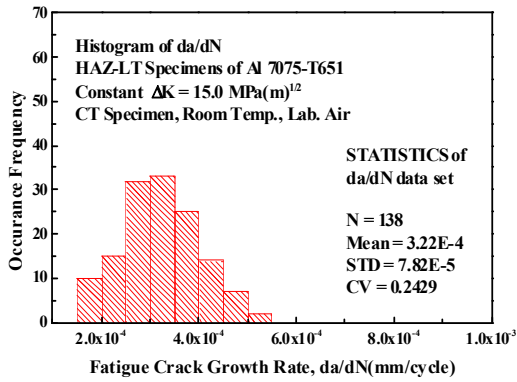


Fig. 12 Histogram of FCGR for $\Delta K=15\text{MPa(m)}^{1/2}$

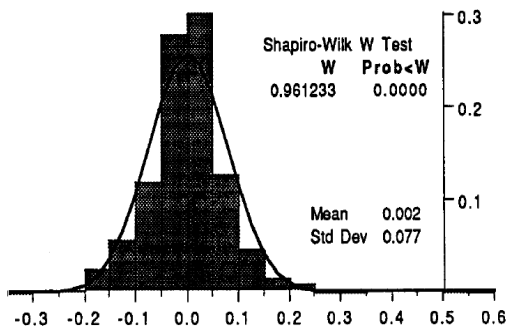


Fig. 13 Histogram and distribution for FCGR¹⁸⁾

종합적으로 히스토그램에 의하여 피로균열전파율의 구동력에 미치는 변동성을 보면, 용접재(WM)에서 특히 낮은 구동력과 높은 구동력에서

그 변동성이 많이 나타나고 있음을 알 수 있다.

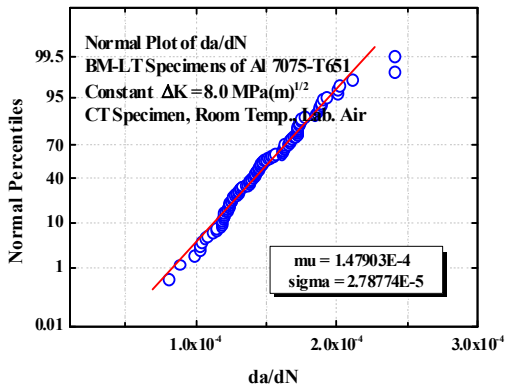
이상의 히스토그램에서 알 수 있듯이, 본 연구의 일정 응력확대계수범위 제어 시험하의 피로균열전파율의 확률밀도함수는 정규분포의 형상과는 다소 다른 형태를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 Wang¹⁸⁾의 일정응력진폭하중하의 2024-T3의 알루미늄 합금에 대한 피로균열전파율의 분포 결과(Fig. 13)와는 다른 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 균열선단의 구동력에 의한 재질의 영향이라 사료된다.

Wang¹⁸⁾은 피로균열전파율의 실험 데이터가 정규분포로 잘 나타낼 수 있다고 하였지만, 본 실험 결과에 의하면 피로균열전파율의 통계적 분포를 추정할 경우는 진의 확률분포를 잘못 추정할 오류가 있음을 확인할 수 있다. 즉, 본 실험에 의한 피로균열전파율의 통계적 분포는 모든 재질과 구동력에서 대부분이 오른쪽 꼬리를 갖는 데이터 양상을 나타내는 것으로, 그 확률분포함수는 대수정규분포 혹은 Weibull 분포에 적합할 것으로 기대된다. 일례로 모재 시험편에 대한 응력확대계수범위 $8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$ 의 경우에 대한 피로균열전파율의 데이터를 정규분포, 대수정규분포 그리고 Weibull 분포 확률지에 각각 적합하여 비교한 결과를 Fig. 14에 나타낸다. 이상의 결과로부터 피로균열전파율의 확률분포는 비교적 정규분포 혹은 대수정규분포에 적합할 것으로 기대된다. 그러나 히스토그램의 고찰과 확률분포함수의 꼬리(tail) 부분의 데이터의 적합성을 고려할 때 대수정규분포가 더욱 적합함을 알 수 있다. 본 연구에서는 대수정규분포에 적합하여 구동력과 재질에 미치는 피로균열전파율의 변동성을 고찰한다.

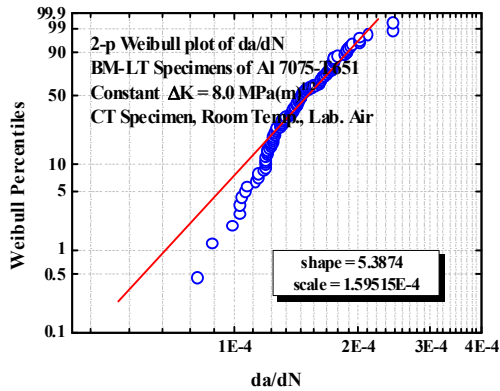
피로균열전파율, da/dN 의 대수정규분포의 확률밀도함수(probability density function, pdf)는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$f(da/dN) = \frac{1}{da/dN\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln da/dN - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

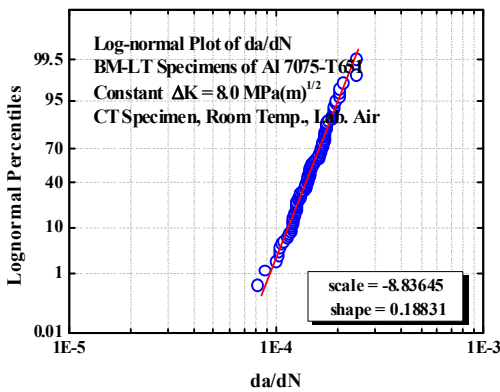
즉, \ln 의 항으로 μ 와 σ 를 갖는 2 파라미터의 확률분포이다. 여기서 μ 와 σ 를 각각 치수 파라미터



(a) Normal plot of FCGR, da/dN



(b) 2-parameter Weibull plot of FCGR, da/dN



(c) Log-normal plot of FCGR, da/dN

Fig. 14 Comparison of statistical distribution for FCGR, da/dN (BM, $\Delta K=8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$)

(scale parameter) 및 형상 파라미터(shape parameter)라 부르기로 한다. 이상의 μ 와 σ 가 결정되면, 대수정규분포의 중심치 및 변동성을 결정할 수 있다.¹⁹⁾

3.3 피로균열전파율의 확률분포 및 변동성

일례로 $\Delta K=8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$ 에서의 HAZ 및 WM의 피로균열전파율을 대수정규분포 확률지에 적합한 것을 각각 Fig. 15 및 Fig. 16에 나타낸다. 피로균열전파율의 데이터는 대수정규분포함수에 잘 따름을 알 수 있다. 본 통계적 데이터의 해석으로부터 알 수 있듯이, 균열의 구동력이 비교적 낮은 $\Delta K=8.0\text{MPa(m)}^{1/2}$ 에서의 BM, HAZ 및 WM의 분포의 치수 파라미터는 BM, HAZ 그리고 WM순으로 감소하였으며, 그 형상 파라미터는 BM, HAZ 그리고 WM순으로 증가하였다.

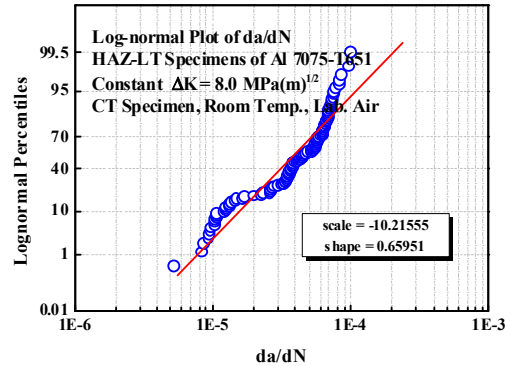


Fig. 15 Log-normal plot of FCGR for HAZ

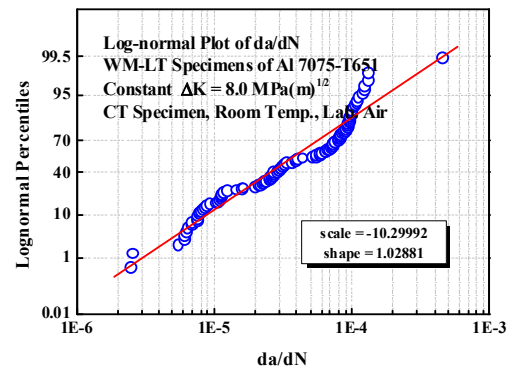


Fig. 16 Log-normal plot of FCGR for WM

즉, 낮은 구동력에서 평균 피로균열전파율은 BM, HAZ 그리고 WM 순으로 낮았으며, 그 불규칙성은 BM, HAZ 그리고 WM 순으로 증가하는 것을 통계적으로 확인 할 수 있다. 이상과 같은 피로균열전파율의 대수정규분포를 이용한 통계적 해석을 통하여 얻은 결과를 종합하여 Fig. 17 및 Fig. 18에 나타낸다.

즉, Fig. 17은 각각의 재질에 따른 구동력에 미치는 영향에 대하여 대수정규분포의 형상 파라미터의 영향을 나타낸 것이며, Fig. 18은 각각의 재질에 따른 구동력에 미치는 영향에 대하여 대수정규분포의 치수 파라미터의 영향을 나타낸 것이다.

대수정규분포의 형상 파라미터는 구동력이 증가하면 BM과 HAZ는 감소하며, WM은 감소하다

가 다시 비교적 높은 $\Delta K=15.0\text{MPa(m)}^{1/2}$ 에서 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 마찰교반 용접부에서의 미세조직과 구동력에 영향에 기인하는 것으로 사료된다. 한편, 대수정규분포의 치수 파라미터는 구동력이 증가하면 모든 재질에서 증가하는 경향을 나타내었다.

이상의 통계적 확률분포의 해석결과의 고찰로부터 마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금의 접합부에 대한 피로균열전파율의 변동성을 대수정규분포로 잘 나타낼 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금의 접합부에 대한 피로균열전파율의 변동성에 미치는 구동력과 재질의 영향을 통계적 확률분포를 추정하여 해석 및 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 피로균열전파율의 데이터를 일정 응력확대 계수범위 제어하여 피로실험을 통하여 얻을 수 있었다.
- (2) 피로균열전파율의 형상 파라미터는 구동력이 증가하면 BM과 HAZ는 감소하며, WM은 감소하다가 다시 높은 응력에서 증가하는 경향을 나타내었다.
- (3) 피로균열전파율의 치수 파라미터는 구동력이 증가하면 BM, HAZ 및 WM의 모든 재질에서 증가하는 경향을 나타내었다.
- (4) 피로균열전파율의 변동성을 대수정규분포로 평가할 수 있음을 확인하였다.

References

1. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murcg, P. Templesmith and C. J. Dawes, 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.

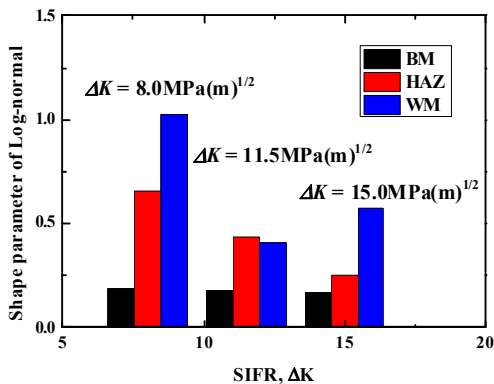


Fig. 17 Effects of shape parameter on driving force

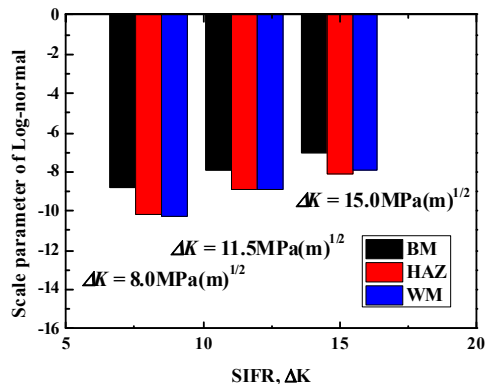


Fig. 18 Effects of scale parameter on driving force

2. Friction Welding Working Group, 2006, "Friction Welding Technology", Ilgangongup- shinmunsa, pp. 176-264.
3. P. S. Pao, S. J. Gill, C. R. Feng and K. K. Sankaran, 2001, "Corrosion-Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded Al 7050", Scripta Materialia, Vol. 45, pp. 605-612.
4. G. Bussu and P. E. Irving, 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. 25, pp. 77-88.
5. R. John, K. V. Jata. and K. Sadananda, 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.
6. S. S. Kim, C. G. Lee and S. J. Kim, 2008, "Fatigue crack propagation of friction stir welded 5083-H31 and 6061-T651 aluminum alloys", Materials Science and Engineering A, Vol. 478, pp. 56-64.
7. G. Pouget, and A. P. Reynolds, 2008, "Residual stress and microstructure effects on fatigue crack growth in AA2050 friction stir welds", International Journal of Fatigue, Vol. 30, pp. 463-472.
8. O. Hatamleh, 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.
9. L. Fratini, S. Pasta and A. P. Reynolds, 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.
10. H. J. 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.
11. T. H. Tra, M. Okazaki and K. Suzuki, 2012, "Fatigue crack propagation behavior in friction stir welding of AA6063-T5: Roles of residual stress and microstructure", International Journal of Fatigue, Vol. 43, pp. 23-29.
12. D. A. Virkler, B. M. Hillberry and P. K. Goel, 1979, "The statistical nature of fatigue crack propagation", Journal of Engineering Materials Technology, Vol. 101, pp. 148-153.
13. W. F. Wu and C. C. Ni, 2007, "Statistical aspects of some fatigue crack growth data", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 74, pp. 2952-2963.
14. C. S. Kusko, J. N. Dupont. and A. R. Marder, 2004, "The influence of Microstructure on Fatigue Crack Propagation Behavior of Stainless Steel Welds", Welding Journal, pp. 6-s-15-s.
15. 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
16. 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.
17. 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.
18. G. S. Wang, 1995, "Intrinsic statistical characteristics of fatigue crack growth rate", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 51, No. 5, pp. 787-803.
19. D. Kececioglu, 1991, "Reliability Engineering Handbook", Volume 1. Prentice Hall, Inc.