

AZ31 마그네슘합금 시편의 두께가 피로균열진전거동의 확률분포에 미치는 영향

최선순*

(논문접수일 2009. 5. 10, 심사완료일 2009. 6. 30)

Effect of Specimen Thickness on Probability Distribution of Fatigue Crack Propagation Behavior in Magnesium Alloy AZ31

Seon-Soon CHOI*

Abstract

As the variables affecting the fatigue behavior have uncertainty, the fatigue crack propagation is stochastic in nature. Therefore, the fatigue life prediction is critical for the design and the maintenance of many structural components. In this study, fatigue experiments are conducted on the specimens of magnesium alloy under the different thicknesses of specimen. The effects of specimen thickness on the probability distribution of the fatigue crack propagation life and the crack size are estimated experimentally. The probability distribution of the crack size and the fatigue life for different specimen thicknesses are investigated by Anderson-Darling test and the best fit for those probability distributions are also presented.

Key Words : Magnesium alloy(마그네슘합금), Fatigue crack propagation(피로균열진전), Probability distribution(확률분포)

1. 서론

마그네슘합금은 비강도와 비강성이 우수하며, 차폐성과 기계가공성이 매우 탁월하여 전자산업 뿐만 아니라 경량화에 대한 요구가 증대되고 있는 자동차산업에서도 그 활용성에 대한 관심이 고조되고 있다.

일반적으로 마그네슘합금은 두 가지 범주, 즉 단련용 합금과 주조용 합금으로 분류되고 있다.

주조용 합금은 단련용 합금에 비하여 제조 유연성과 저비용과 같은 장점을 가지고 있어서 최근에 자동차산업에서 활용도가 높아지고 있다. 반면에 단련용 합금은 주조용 합금보다 기계적 특성이 매우 우수하기 때문에 하중을 지지하는 곳에 활용될 수 있다.

단련용 합금은 사용 중에 발생할 수 있는 피로현상이 증대한 고려사항이므로 단련용 마그네슘합금의 피로특성을 평가하는 것이 매우 필수적이다⁽¹⁾.

* 삼육대학교 카메카트로닉스학과 (choiss@syu.ac.kr)
주소: 139-742 서울시 노원구 공릉2동 26-21

그러나 마그네슘합금에 대한 피로특성에 대한 연구가 최근에 진행되고 있지만 피로균열진전거동에 관한 보고는 미미한 실정에 있다^(2,3). 구조재에 작용하는 하중이나 재료의 불균질성 그리고 사용환경의 변동성등으로 인하여 구조재의 피로균열진전 거동은 확률론적인 특성을 나타내고 있다. 이러한 특성은 마그네슘합금이 적용되고 있는 구조재에서도 동일한 문제로 대두되고 있지만 마그네슘합금의 피로균열진전 거동에 대한 확률론적인 평가는 매우 드물게 보고되고 있다⁽⁴⁻⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 마그네슘합금에 피로균열이 진전될 때, 특정한 수명에서 진전된 균열크기와 특정한 균열에 이르렀을 때의 피로균열진전수명의 확률분포 특성을 평가하고 시편의 두께가 이러한 균열크기와 피로수명의 확률분포에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

피로균열진전실험에 사용된 재료는 상용 마그네슘합금 AZ31이며 재료의 화학적 성분조성은 Table 1과 같다. 또한 기계적 성질은 항복강도가 198.3MPa이고 인장강도는 264.4MPa이며 연신율은 21.95%이다.

2.2 실험시편

실험에 사용된 시편의 형상은 ASTM E647-00⁽⁷⁾규격에 따라 CT(Compact Tension)형을 선택하였으며, 크기는 폭(W)이 50.8mm이고 두께(B)가 4.75mm, 6.60mm, 9.45mm인 3종류의 시편을 사용하였다.

CT시편은 피로균열진전거동에 영향을 미치는 기계가공 잔류응력을 피하기 위하여 모재로 부터 직접 채취하였으며, L-T방향으로 와이어 방전가공하여 준비하였다.

2.3 피로균열진전실험

시편두께가 피로균열진전거동의 확률분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 2.2절의 CT시편을 이용하여 상온의 대기 중에서 ASTM E647-00⁽⁷⁾규격에 따라 피로균열진전실험을 수행하였으며, 실험장치는 100kN 용량의 유압 서보식 피

로시험기를 마이크로컴퓨터를 이용하여 주파수 10Hz의 sine 파형으로 일정진폭하중제어가 되도록 구성하였다. 피로시험 하중은 최대 2.00kN, 최소 0.40kN의 하중으로 제어하였다.

마그네슘합금 AZ31의 시편두께를 4.75mm, 6.60mm, 9.45mm의 3종류로 구분하여 각각 20개, 24개, 20개 씩 피로균열진전실험을 수행하였으며, 이를 통하여 두 종류의 피로데이터를 수집하였다. 즉 특정한 수명에서의 진전 균열크기 데이터와 특정 크기의 균열로 진전할 때의 피로균열진전수명 데이터를 확보하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 특정한 수명에서 진전된 균열크기의 확률분포 특성

먼저 피로균열진전실험에서 확보한 피로균열 데이터와 피로수명 데이터가 3-파라미터 Weibull분포를 따른다고 가정을 하였으며, 확률분포 적합성 검정법 중 Anderson-Darling 검정법을 이용하여 분포의 적합성을 검증하였다. 이를 위하여 상용 통계해석 프로그램인 Minitab R15를 이용하여 5% 유의수준에서 검정을 수행하였다. Anderson-Darling 검정의 통계치 AD가 유의수준 5%에서 0.744보다 작으면 피로데이터가 Weibull분포에 적합하다고 판단할 수 있다⁽⁸⁾. 그리고 피로데이터에 대한 AD값이 작을수록 Weibull분포에 더 적합하다고 본다.

Fig. 1의 가로축은 균열크기를 나타낸 것으로서 균열크기 값에서 위치파라미터를 뺀 값을 표시하였으며, 세로축은 균열크기의 누적확률을 나타낸 것이다. 그림내의 점 도형은 각 피로수명에서의 균열크기에 대한 실험 데이터이며, 직선은 확률분포의 적합선으로서 실험데이터가 적합선에 가깝게 분포할수록 확률분포에 더 적합한 것으로 본다.

Fig. 1은 3가지 두께의 시편에서 피로균열이 진전될 때 특정한 수명에서의 균열크기를 각 두께 별로 3-파라미터 Weibull 확률지에 나타낸 것이다. 먼저 3-파라미터 Weibull분포에 피로균열 데이터가 적합하게 분포하는지를 조사한 결과 Anderson-Darling 검정의 통계치 AD가 5% 유의수준에서 4.75mm의 경우 0.277~0.471의 값을, 6.60mm의 경우 0.161~0.486의 값을, 9.45mm의 경우 0.234~0.473값을 보임으로써 3-파라미터 Weibull분포를 피로균열 데이터의 확률분포로 사용할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 균열 초기에는 분포적합선의 기울기가 크다가 균열이 진전될수록 분포적합선의 기울기가 작아지는 경향을 보였는데 이 기울기는 데이터의 산포를 의미한다. 즉 기울기가 클수록 데이터가 좁게 산포함을 의미한다. 그러므로 두께 내에서든지 두께 간에서든지 균열초기에

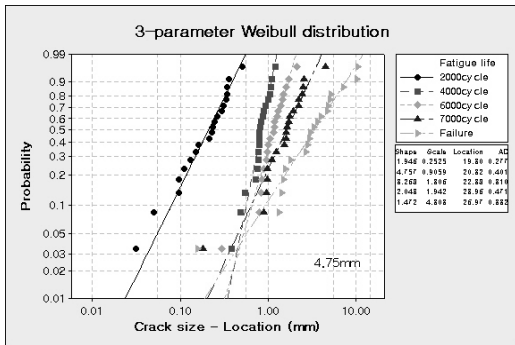
Table 1 Chemical composition of magnesium alloy AZ31 (wt, %)

Al	Zn	Si	Mn	Cu	Fe	Mg
3.29	0.95	0.04	0.31	0.003	0.01	Bal.

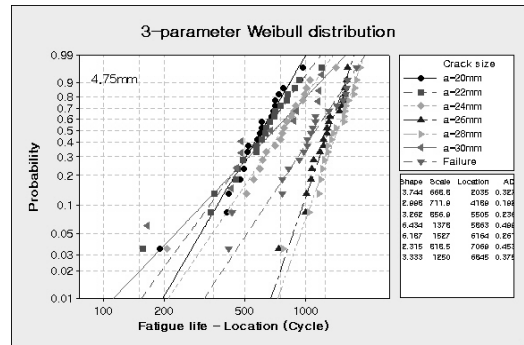
는 균열크기가 좁은 산포를, 균열이 진전될수록 넓은 산포를 나타내면서 큰 변동성을 보였다. 분포적합성의 기술기가 크다는 것은 같은 피로수명에서 특정 균열크기에 도달할 누적 확률이 커진다는 것을 의미하며, 이것은 균열이 특정크기로

급속하게 진전하는 것으로 해석할 수 있으므로 이를 급속진전모드라고 본 논문에서 정의한다.

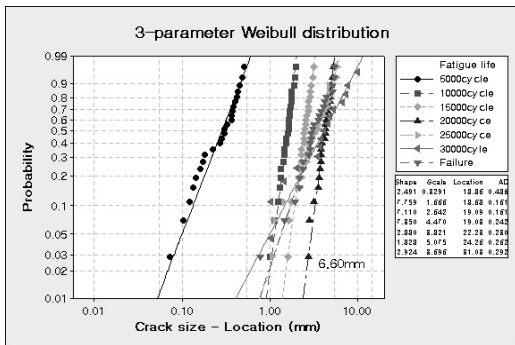
따라서 균열검사 보수계획을 수립할 때 활용할 중요한 판단 자료가 될 수 있다.



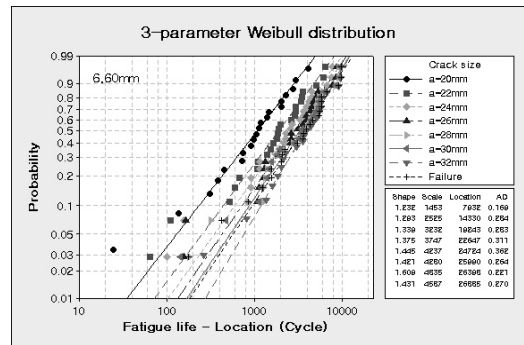
(a) Specimen thickness=4.75mm



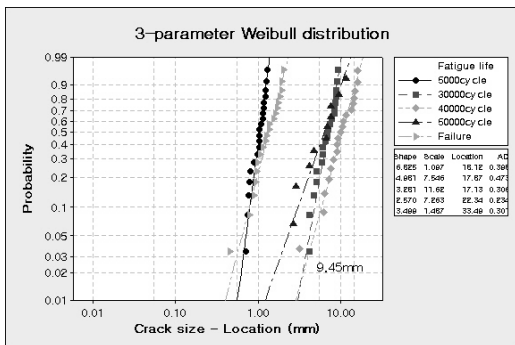
(a) Specimen thickness=4.75mm



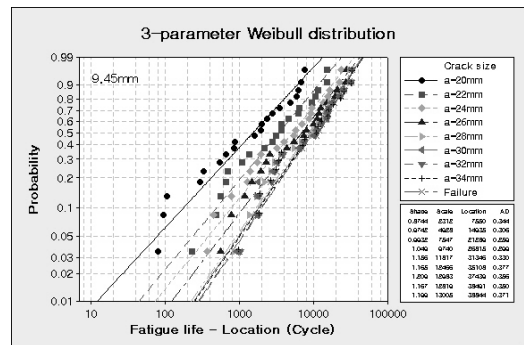
(b) Specimen thickness=6.60mm



(b) Specimen thickness=6.60mm



(c) Specimen thickness=9.45mm



(c) Specimen thickness=9.45mm

Fig. 1 Probability distribution of crack size at specified fatigue crack propagation life for different specimen thicknesses

Fig. 2 Probability distribution of fatigue crack propagation life to reach specified crack size for different specimen thicknesses

3.2 특정한 균열로 진전할 때의 피로균열진전수명의 확률분포 특성

특정한 균열로 진전할 때의 피로균열진전수명을 3-파라미터 Weibull확률지에 두께별로 Fig. 2에 나타내었다. 이 분포에 피로수명 데이터가 적합하게 분포하는지를 조사한 결과 Anderson-Darling 검정의 통계치 AD가 5% 유의수준에서 4.75mm의 경우 0.192~0.499의 값을, 6.60mm의 경우 0.169~0.362의 값을, 9.45mm의 경우 0.259~0.377값을 보임으로써 3-파라미터 Weibull분포를 피로수명 데이터의 확률분포로 사용할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 같은 두께의 경우 균열이 진전될수록 피로수명의 분포적합선 기울기가 커지는 경향을 보였는데, 이는 동일한 균열에서 특정 피로수명에 도달할 확률이 크다는 것을 의미하며 설계 수명에 이르는 속도가 빨라진다는 것으로 해석할 수 있으므로 이것을 본 연구에서 급속파손 모드라고 정의한다.

그리고 두께가 얇은 경우 편차가 크게 나타남으로써 얇은

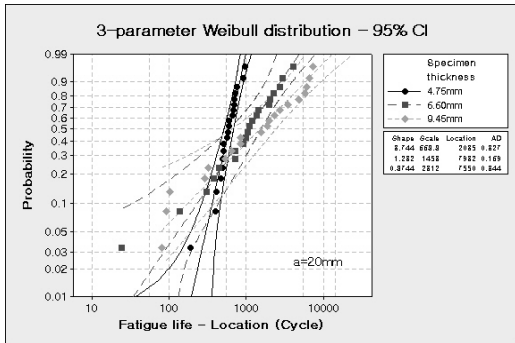
두께의 경우 구조재의 설계수명에 대한 신중한 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

또한 시편두께 간에서도 두께가 얇을수록 피로수명의 확률분포적합선 기울기가 더 크게 나타남으로 동일한 균열에서 시편두께가 얇을수록 특정 피로수명에 이를 확률이 커지는 양상을 예측할 수 있다.

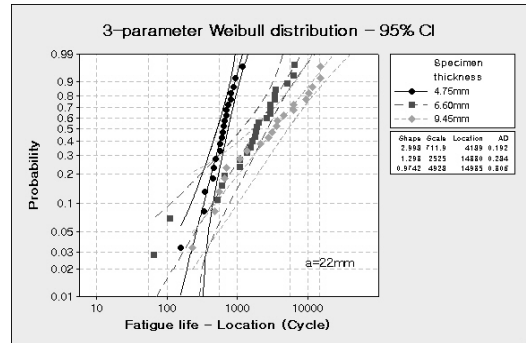
3.3 시편두께 별 피로균열진전수명의 확률분포 비교

Fig. 3에서 분포적합선(직선)을 기준으로 양쪽에 곡선이 있는데 이 곡선은 95% 신뢰구간을 나타내는 것으로 좌측의 곡선이 하한계이고 우측의 곡선이 상한계를 표시한다. 피로 실험 데이터들이 분포적합선상에서 좌, 우측으로 벗어나더라도 95% 신뢰구간 안에 분포될 때 확률분포에 적합하다고 판단한다.

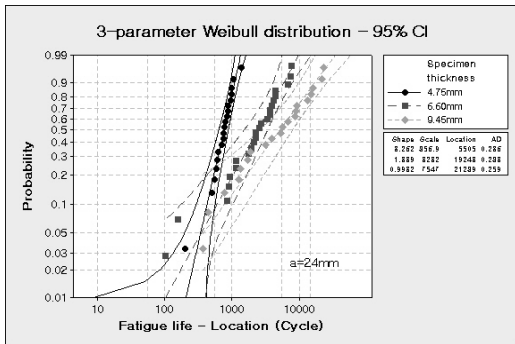
균열이 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34mm로 진전될 경우 피로균열진전수명의 데이터가 3-파라미터 Weibull분포의 95% 신뢰구간 내에 분포함을 Fig. 3(a)~(h)에서 볼 수 있



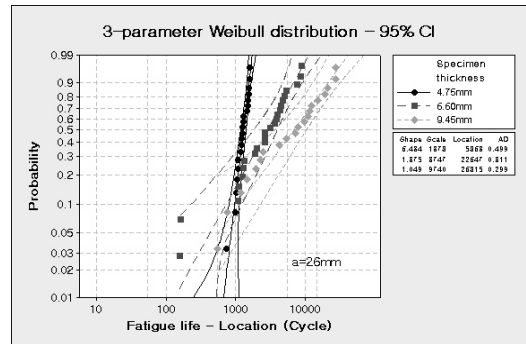
(a) Crack size=20mm



(b) Crack size=22mm



(c) Crack size=24mm



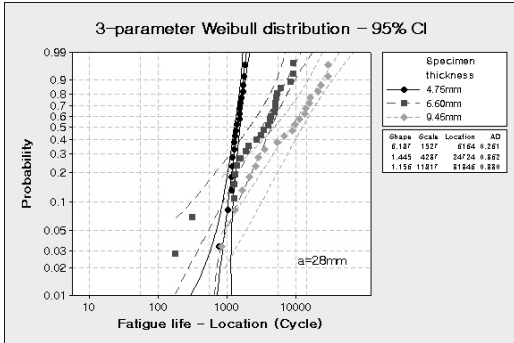
(d) Crack size=26mm

Fig. 3 Comparison of probability distributions of fatigue crack propagation lives at each crack propagation

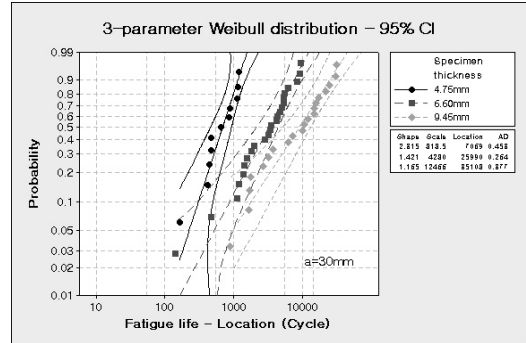
으며, 또한 Fig. 3(i)에서 처럼 균열이 진전되어 파손될 때에도 피로수명 데이터가 95% 신뢰구간 내에 분포함으로써 마그네슘합금 AZ31의 피로균열진전거동을 확률론적으로 해석할 경우 3-파라미터 Weibull확률분포함수를 사용할 수 있음을 확인하였다.

Anderson-Darling검정의 통계치 AD를 조사해 보면 균열

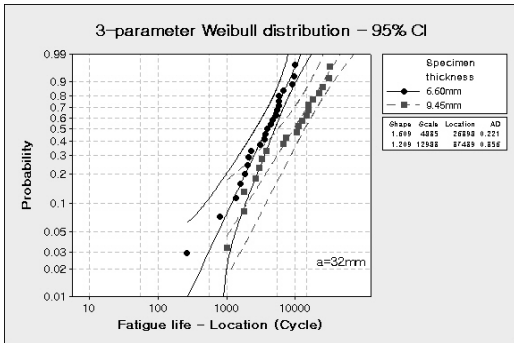
진전이 20mm일 때 0.169~0.344값을, 22mm일 때 0.192~0.306값을, 24mm일 때 0.236~0.283값을, 26mm일 때 0.299~0.499값을, 28mm일 때 0.261~0.362값을, 30mm일 때 0.264~0.453값을, 32mm일 때 0.221~0.356값을, 34mm일 때 0.350값을, 그리고 파손되었을 때 0.270~0.375값을 나타냄으로써 Weibull분포에 적합한지를 판정하는 임계치



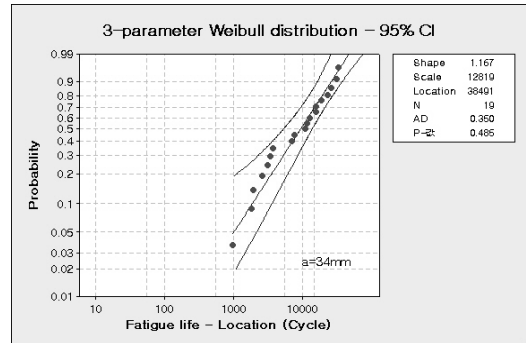
(e) Crack size=28mm



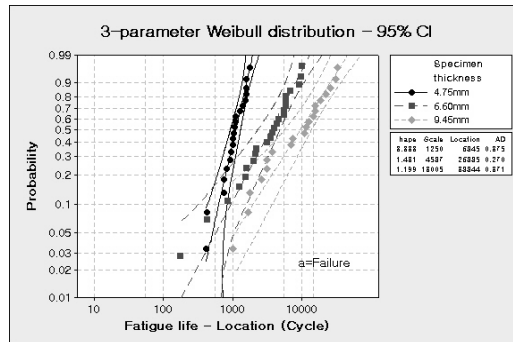
(f) Crack size=30mm



(g) Crack size=32mm



(h) Crack size=34mm(thickness=9.45mm)



(i) Crack size=failure

Fig. 3 Comparison of probability distributions of fatigue crack propagation lives at each crack propagation (Continued)

0.744보다 모두 작은 값이므로⁽⁸⁾ 피로균열진전수명에 적합한 확률분포는 3-파라미터 Weibull분포임이 재차 검증되었다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 균열진전의 모든 영역에서 시편두께가 4.75mm인 경우 분포적합선의 기울기가 가장 크고 그다음은 6.60mm의 경우이며 가장 두꺼운 9.45mm인 경우 제일 작게 나타났다. 그러므로 두께가 얇을수록 분포적합선의 기울기가 크며 급속파손모드 양상을 보일 것으로 사료된다.

또한 Fig. 3(f)~(i)에서는 두께가 두꺼울수록 균열이 더 많이 진전된 후에 파손됨을 보였으며, 이것은 두께가 얇을 경우 분포적합선의 기울기가 커져서 급속파손모드양상을 나타내는 반면, 시편의 두께가 두꺼울 경우 기울기가 작아지면서 파손메커니즘의 속도가 느려지기 때문인 것으로 사료된다. 그러므로 분포적합선의 기울기인 형상파라미터(Shape parameter)를 파손메커니즘의 속도를 결정하는 척도로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 마그네슘합금의 CT시편을 사용하여 피로균열진전실험을 수행하였으며, 실험을 통하여 확보한 피로균열 데이터와 피로수명 데이터를 이용하여 마그네슘합금에 피로균열이 진전될 때 특정한 수명에서 진전된 균열크기와 특정한 균열에 이르렀을 때의 피로균열진전수명의 확률분포 특성을 평가하고 시편의 두께가 이러한 균열크기와 피로수명의 확률분포에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마그네슘합금 AZ31의 피로균열진전거동 시 시편두께의 변화에 따른 피로균열크기의 확률분포와 피로균열진전수명의 확률분포로는 3-파라미터 Weibull분포가 적합하였다.
- (2) 피로균열의 확률분포에서 사이클 초기에는 균열크기의 산포가 좁으면서 급속진전모드를, 사이클이 진행될수록 넓은 산포를 나타내면서 완속진전모드 양상을 나타내었다.
- (3) 시편두께가 같은 경우 균열이 진전될수록, 진전균열크기가 같은 경우 두께가 얇을수록 피로수명의 산포가 좁아지면서 급속파손모드 양상을 보였다.
- (4) 3-파라미터 Weibull분포함수의 형상파라미터를 파손메커니즘의 속도를 결정하는 척도로 활용할 수 있음이 재확인되었다.

후 기

본 연구는 삼육대학교 공모과제비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Tokaji, K., Nakajima, M., and Uematsu, Y., 2009, "Fatigue crack propagation and fracture mechanisms of wrought magnesium alloys in different environments," *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, Issue 7, pp. 1137~1143.
- (2) Lee, Y. B. and Oh, B. D., 2005, "Characteristics of fatigue crack propagations with respect to the angles between rolling and tensile loading directions of steel plates," *Transactions of KSMTE*, Vol. 14, No. 3, pp. 74~80.
- (3) Lee, J. I., Kim, T. W., and Kwak, J. S., 2008, "A study on deburring process for thin magnesium plate," *Proceedings of The KSMTE Fall Conference 2008*, pp. 302~306.
- (4) Sivapragash, M., Lakshminarayanan, P. R., and Karthikeyan, R., 2008, "Fatigue life prediction of ZE41A magnesium alloy using Weibull distribution," *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 1549~1553.
- (5) Shih, T. S., Liu, W. S., and Chen, Y. Je, 2002, "Fatigue of as-extruded AZ61A magnesium alloy," *Materials Science & Engineering(A)*, Vol. 325, pp. 152~162.
- (6) Choi, S. S., 2009, "Effect of Specimen Thickness on Probability Distribution of Fatigue Crack Propagation Behavior in Magnesium Alloy," *Proceedings of The KSMTE Spring Conference 2009*, pp. 196~202.
- (7) ASTM, 2000, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM E647-00, ASTM International, Pennsylvania.
- (8) Dodson, B., 2006, *The Weibull Analysis Handbook*, ASQ Quality Press, Wisconsin, pp. 115~117.