

Mg-Al-Zn 합금의 최대하중 조건에 따른 확률론적 피로균열전파모델 연구(III) : 확률변수의 내삽 이용

최선순*

*삼육대학교 카메카트로닉스학과

e-mail: choiss@syu.ac.kr

A Study on Probabilistic Fatigue Crack Propagation Model in Mg-Al-Zn Alloys under Maximum Load Conditions (III) : Using Interpolation of Random Variable

Seon Soon CHOI*

*Dept. of Car Mechatronics Engineering, SAHMYOOK University

요 약

본 논문의 주목적은 확률변수의 내삽을 이용하여 Mg-Al-Zn합금에 적합한 확률론적 피로균열전파모델을 평가하여 제시하는 것이다. 모델을 평가하기 위하여 최대하중조건을 변화시키면서 피로균열전파 실험을 수행하였으며, 실험을 통해 통계적 피로데이터를 확보하였다. 균열성장의 불확실성을 묘사하기 위하여 실험적 피로균열전파모델에 확률변수를 도입한 확률론적 피로균열전파모델을 제안하였으며, 각 모델의 파라미터는 최우추정법으로 추정하였다. 제안된 모델의 적합성을 평가하기 위하여 균열성장애 따른 확률변수의 내삽데이터를 이용하였으며, 평가한 결과 Mg-Al-Zn합금에 적합한 모델은 '확률론적 Paris-Erdogan모델'과 '확률론적 Walker모델'임을 규명하였다.

1. 서론

21세기의 블루칩이라고 불리는 마그네슘은 이제 차세대 초경량소재로 관심을 받고 있다. 마그네슘합금이 구조물에 사용될 때 반복되는 진동으로 인해 피로현상이 발생된다. 피로균열전파거동(이하 피로거동이라고 표기)을 보이는 구조물의 안전한 설계와 유지보수를 위해서는 피로수명을 예측할 수 있는 모델이 필요하다. 또한 이러한 피로현상은 실제로 많은 불확실성을 내포하고 있어서 확률론적인 해석이 필요하다. 그러나 마그네슘합금의 피로특성에 대한 연구는 드물게 보고되고 있으며[1~2], 특히 확률론적 피로거동을 예측할 수 있는 모델에 대한 보고는 매우 드문 실정이다[3~8]. 따라서 본 연구에서는 확률론적 피로거동을 예측할 수 있는 모델을 확률변수 개념을 도입하여 제안하고 확률변수의 통계데이터의 내삽을 이용하여 확률론적 피로균열전파모델(이하 피로모델이라고 표기)의 적합성을 평가하고 적합모델을 제안하고자 한다.

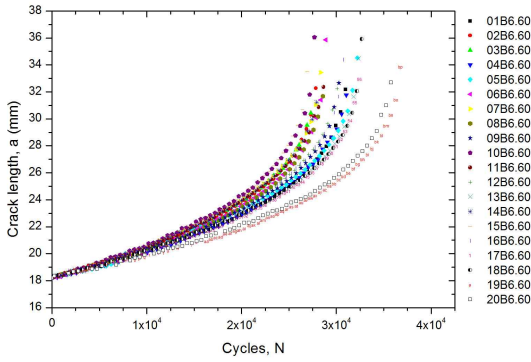
2. 실험방법

실험에 사용된 재료는 상용 마그네슘합금 AZ31이고, 시편형상은 CT형상으로 준비하였으며, ASTM E647-00[9]에 따라 실험조건을 최대하중(P_{max}) 2.00kN, 2.25kN, 2.50kN 등의 3가지에 대하여 각각 20개씩 피로균열전파 실험을 수행하여 균열성장 데이터를 확보하였다.

3. 확률론적 피로균열전파모델

실험을 통하여 얻은 균열성장 데이터를 [그림 1]에 나타내었다. [그림 1]은 피로실험 데이터 중에서 최대하중 2.00kN 조건에서 얻은 20개의 피로사이클에 따른 균열성장 데이터이다. 그림에서처럼 동일한 실험조건이었음에도 불구하고 시편에 따라 균열성장이 산포를 이루는 양상을 보였다.

따라서 기존의 실험적 피로모델로서는 균열성장의 확률론적 거동을 예측하는 것에는 한계가 있으므로 일반적으로 피로모델로 많이 사용되고 있는 Paris-Erdogan 모델, Walker 모델, Forman 모델, 그리고 수정된 Forman 모델에 변수 Z 를 도입한 확률변수모델을 제안하고, $\log Z$ 의 내삽(interpolation)을 이용하여 모델의 적합성을 평가하였다.



[그림 1] 균열성장의 확률론적 거동 (P_{max}=2.00kN)

1) ‘확률론적 Paris-Erdogan 모델’

$$\frac{da}{dN} = Z_1 C_1 (\Delta K)^{m_1} \quad (1)$$

이 모델의 log Z는 식(1)의 양변에 대수를 취하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\log Z_1 = \log \left(\frac{da}{dN} \right) - \log C_1 - m_1 \log \Delta K$$

2) ‘확률론적 Walker 모델’

$$\frac{da}{dN} = Z_2 \frac{C_2 (\Delta K)^{m_2}}{(1-R)^k} \quad (2)$$

이 모델의 log Z는 식(2)의 양변에 대수를 취하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\log Z_2 = \log \left(\frac{da}{dN} \right) - \log C_2 - m_2 \log \Delta K + k \log (1-R)$$

3) ‘확률론적 Forman 모델’

$$\frac{da}{dN} = Z_3 \frac{C_3 (\Delta K)^{m_3}}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (3)$$

이 모델의 log Z는 식(3)의 양변에 대수를 취하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\log Z_3 = \log \left\{ \left((1-R)K_c - \Delta K \right) \left(\frac{da}{dN} \right) \right\} - \log C_3 - m_3 \log \Delta K$$

4) ‘확률론적 수정 Forman 모델’

$$\frac{da}{dN} = Z_4 \frac{C_4 (\Delta K - \Delta K_o)^{m_4}}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (4)$$

이 모델의 log Z는 식(4)의 양변에 대수를 취하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\log Z_4 = \log \left\{ \left((1-R)K_c - \Delta K \right) \left(\frac{da}{dN} \right) \right\} - \log C_4 - m_4 \log (\Delta K - \Delta K_o)$$

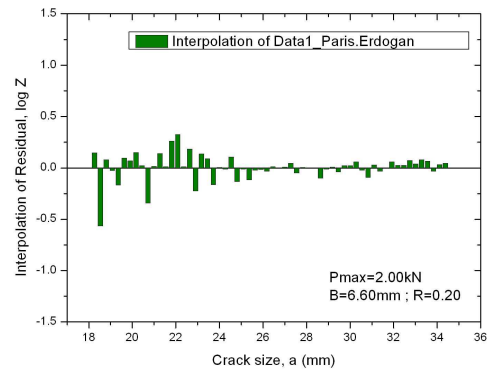
각 확률론적 피로모델의 파라미터 log C_i, m_i 를 구하기 위하여 확률변수 Z_i의 분포를 로그정규분포로 가정하였으며, 확률변수 log Z_i에 최우추정법을 적용하여 파라미터를 추정하였다.

4. 실험결과 및 통계해석

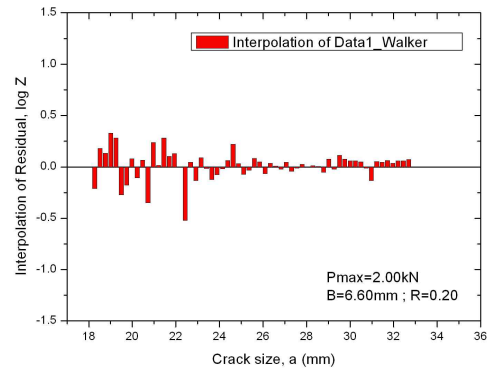
Mg-Al-Zn 합금의 균열성장의 변동성을 묘사할 수 있

는 확률론적 피로모델의 적합성을 평가하기 위하여 균열성장률에 따라 각 모델의 확률변수 log Z의 내삽데이터를 [그림 2]~[그림 4]에 나타내었다.

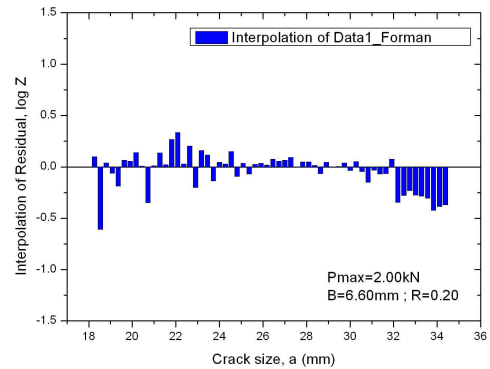
확률변수 log Z의 내삽데이터가 0이 되는 것은 균열성장속도(da/dN)의 실험값과 확률론적 피로모델로 추정된 값의 잔차(Residual)가 0이 된다는 것을 의미한다. ‘동일한 균열크기에서 log Z의 내삽데이터의 위치’가 0축선에 가까울수록 확률변수 log Z가 균열성장과정에 독립적임을 의미하므로, 만약 log Z의 내삽데이터가 0축선에 근접하게 나타난다면 그 확률변수 log Z를 추정된 확률변수모델은 피로균열전파의 확률론적 거동을 묘사하는데 적합하다고 판단할 수 있다.



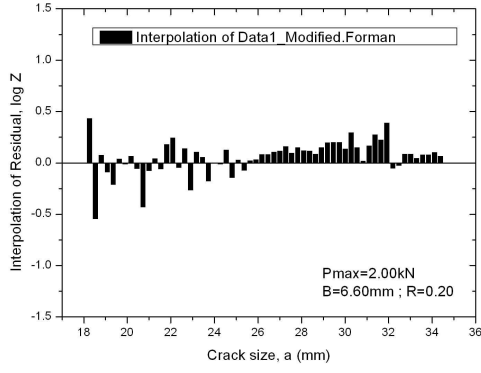
(a) ‘확률론적 Paris-Erdogan 모델’



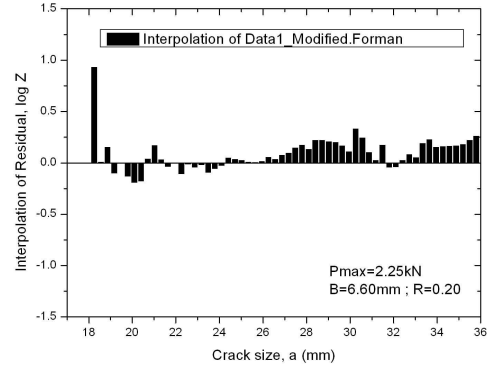
(b) ‘확률론적 Walker 모델’



(c) ‘확률론적 Forman 모델’



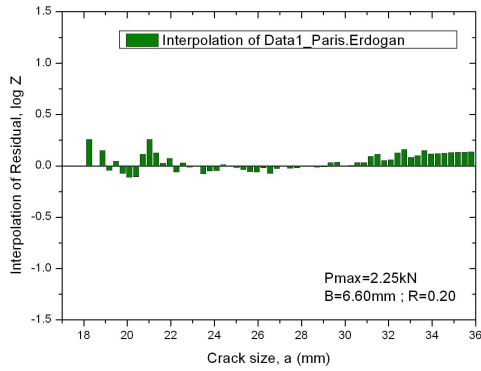
(d) '확률론적 수정 Forman모델'



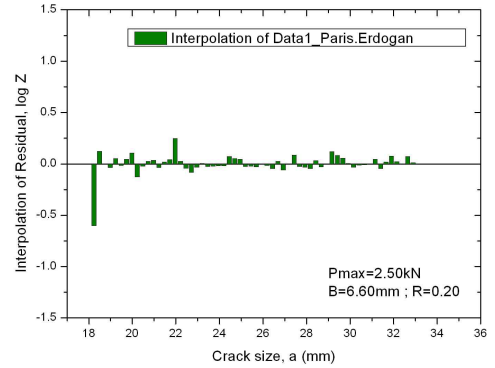
(d) '확률론적 수정 Forman모델'

[그림 2] 최대하중 2.00kN 조건에서의 균열성장에 따른 확률변수 $\log Z$ 의 내삽

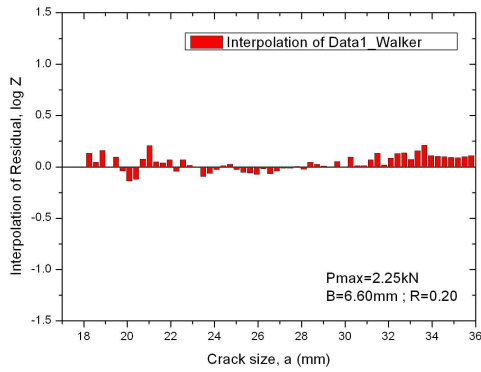
[그림 3] 최대하중 2.25kN 조건에서의 균열성장에 따른 확률변수 $\log Z$ 의 내삽



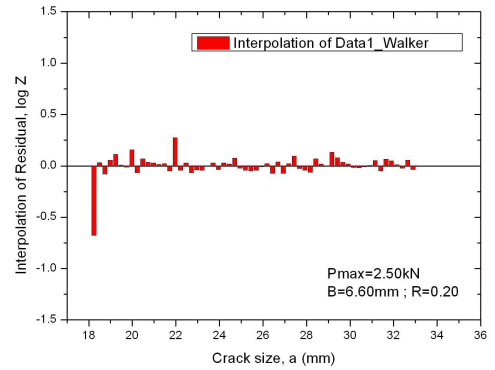
(a) '확률론적 Paris-Erdogan모델'



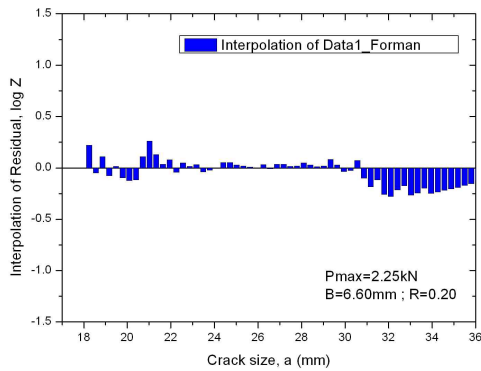
(a) '확률론적 Paris-Erdogan모델'



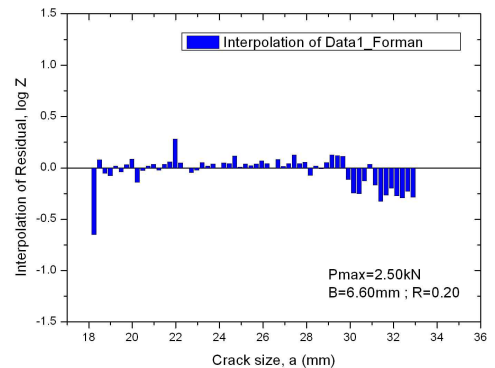
(b) '확률론적 Walker모델'



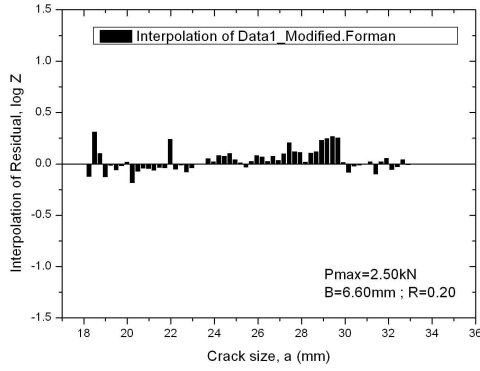
(b) '확률론적 Walker모델'



(c) '확률론적 Forman모델'



(c) '확률론적 Forman모델'



(d) ‘확률론적 수정 Forman 모델’

[그림 4] 최대하중 2.50kN 조건에서의 균열성장예 따른 확률변수 $\log Z$ 의 내삽

5. 결론

Mg-Al-Zn 합금의 피로균열전파 거동을 예측할 수 있는 확률론적 피로모델의 적합성을 최대하중 조건으로 피로 실험을 하여 얻은 실험데이터와 확률변수에 대한 통계적 해석을 통하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험적 피로모델에 도입한 변수 Z 가 마그네슘합금의 피로균열성장의 변동성을 묘사하는 확률변수가 될 수 있음을 밝혔다.
- 2) 마그네슘합금의 확률론적 피로거동을 예측하기에 적합한 모델은 ‘확률론적 Paris-Erdogan 모델’과 ‘확률론적 Walker 모델’임을 규명하였다.

참고문헌

[1] Tokaji, K., Nakajima, M., and Uematsu, Y., “Fatigue Crack Propagation and Fracture Mechanisms of Wrought Magnesium Alloys in Different Environments,” *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, Issue 7, pp. 1137~1143, 2009.

[2] Tokaji, K., Kamakura, M., Ishizumi, Y., and Hasegawa, N., “Fatigue Behaviour and Fracture Mechanism of a Rolled AZ31 Magnesium Alloy,” *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, pp. 1217~1224, 2004.

[3] 최선순, “마그네슘합금의 피로파손수명의 누적확률 분포특성과 신뢰성에 미치는 경계조건의 영향,” *한국산학기술학회 논문지*, 제12권, 제2호, pp. 594~599, 2011.

[4] 최선순, “Mg-Al-Zn 합금의 Paris-Erdogan법칙에

따른 피로거동 파라미터의 확률론적 특성,” *대한기계학회논문집 A권*, 제35권, 제4호, pp. 375~381, 2011.

[5] 최선순, “파손확률에 따른 마그네슘합금의 피로설계수명 예측,” *한국공작기계학회지*, Vol. 19, No. 6, pp. 804~811, 2010.

[6] 최선순, 이억섭, “평균응력이 AZ31 마그네슘합금의 랜덤진전균열크기 확률분포에 미치는 영향,” *한국공작기계학회지*, Vol. 18, No. 5, pp. 536~543, 2009.

[7] 최선순, “AZ31 마그네슘합금 시편의 두께가 피로균열진전거동의 확률분포에 미치는 영향,” *한국공작기계학회지*, Vol. 18, No. 4, pp. 395~400, 2009.

[8] 최선순, “AZ31 마그네슘합금의 피로균열진전수명에 적합한 확률분포 평가,” *대한기계학회논문집 A권*, 제33권, 제8호, pp. 707~719, 2009.

[9] ASTM E647-00, “Standard Test Method of Fatigue Crack Growth Rates,” *ASTM International*, 2000.