

AZ31 마그네슘합금의 시편두께 조건에 따른 실험적 피로균열전파모델 평가

최선순^{1*}

¹삼육대학교 카메카트로닉스학과

Estimation of Empirical Fatigue Crack Propagation Model of AZ31 Magnesium Alloys under Different Specimen Thickness Conditions

Seon Soon CHOI^{1*}

¹Department of Car Mechatronics Engineering, Sahmyook University

요약 본 논문의 목적은 AZ31 마그네슘합금의 균열성장거동의 경향을 묘사할 수 있는 실험적 피로균열전파모델을 시편두께 조건에서 평가하여 적합한 모델을 제시하는 것이다. 평가에 사용된 실험적 모델은 Paris-Erdogan 모델, Walker 모델, Forman 모델, 수정된 Forman 모델이며, 각 모델의 파라미터를 통계적으로 추정하기 위하여 최우추정법을 사용하였다. 두께조건이 피로균열전파거동 예측에 미치는 영향을 고려하면서 적합한 모델을 평가하기 위해 시편두께의 3가지 조건을 변화시키면서 피로균열전파실험을 수행하여 통계적 균열성장 데이터를 획득하였다. 시편두께 조건에 따라 마그네슘합금의 균열성장거동의 경향을 잘 묘사하는 모델은 Paris-Erdogan 모델과 Walker 모델이며, 모델의 파라미터 중 피로균열성장속도지수는 시편두께가 4.75mm와 6.60mm 조건에서 재료상수가 될 수 있음을 밝혀내었다. 그러나 시편두께가 두꺼운 경우에는 양상에 차이를 보이므로 모델 선정 시 신중한 판단이 요구된다.

Abstract It is the primary aim of this paper to propose the empirical fatigue crack propagation model fit to describe a crack growth behavior of AZ31 magnesium alloys under the different specimen thickness conditions. The empirical models estimated are Paris-Erdogan model, Walker model, Forman model, and modified-Forman model. The parameters of each model are estimated by maximum likelihood method. The statistical crack growth data needed for an estimation of empirical models are obtained by fatigue crack propagation tests under the three cases of specimen thickness. It is found that the good empirical models fit to describe a crack growth behavior of AZ31 magnesium alloys under the different specimen thickness conditions are Paris-Erdogan model and Walker model. It is also verified that a fatigue crack growth rate exponent of a empirical model may be a material constant at the specimen thickness conditions of 4.75mm and 6.60mm.

Key Words : Empirical fatigue crack propagation model, Magnesium alloy, Specimen thickness

1. 서론

마그네슘합금은 초경량성, 우수한 비강도와 비강성도 그리고 진동 흡수성이 뛰어난 뿐만 아니라 기계가공성과 리사이클링성도 우수하기 때문에 차세대 금속으로 관심이 고조되고 있다. 지구온난화 대책의 일환인 차량 연비

향상을 위해 경량화의 필요성이 증가함에 따라 알루미늄 합금을 대체하는 재료로 마그네슘합금이 고려되고 있는 매우 매력적인 소재이다. 그리고 열전도성이 좋고 전자파에 대한 차폐성이 우수하여 전자산업에도 많은 활용이 기대되고 있다[1-3].

마그네슘합금이 구조물에 사용될 때 구조물의 특성 중

본 논문은 삼육대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며, 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회논문[4]에 기초하였음.

*Corresponding Author : Seon Soon CHOI(Sahmyook Univ.)

Tel: +82-2-3399-1802 email: choiss@syu.ac.kr

Received December 30, 2013 Revised January 21, 2014 Accepted February 5, 2014

하나인 피로환경으로 인하여 마그네슘합금의 피로특성에 대한 설계 자료가 필요한 실정이다. 그러나 마그네슘합금의 피로균열전파거동에 대한 연구는 매우 부족하며 [5-10], 특히 마그네슘합금의 피로균열전파거동을 예측하는 실험적 모델에 대한 연구는 거의 없으며[11], 특히 모델 파라미터를 통계적 해석으로 추정하여 제시함으로써 피로균열성장의 통계적 거동의 대표성을 나타내는 실험적 모델에 대한 연구 또한 거의 전무한 실정이다. 최[11]는 최대하중 조건을 변화시키면서 마그네슘합금의 피로균열성장의 통계적 거동을 실험과 통계적 해석을 통하여 실험적 모델을 평가한 바 있으나, 시편두께 효과에 대한 검토가 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 시편두께 조건에 따른 피로거동의 통계적 실험데이터를 해석함으로써 AZ31 마그네슘합금의 피로균열전파거동의 경향을 잘 묘사할 수 있는 실험적 모델을 시편두께 조건에 따라 평가하여 제안하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 시편

피로균열전파실험에 사용된 시편의 재료는 AZ31 상용 마그네슘합금이며, 이 재료의 화학적 성질은 Table 1 과 같으며, 기계적 조성은 Table 2에 제시된 바와 같다.

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

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

[Table 2] Mechanical properties of AZ31 magnesium alloy

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
198.3	264.4	21.95

시편은 ASTM E647-00 규격[12]에 따라 폭(W)이 50.8mm인 CT(Compact Tension)형으로 제작하였는데, 피로균열전파거동에 영향을 미치는 기계 가공 잔류응력을 피하기 위하여 모재로부터 직접 채취하여 압연방향과 부하방향은 평행(Longitudinal)하게, 피로균열전파방향은 압연방향과 수직(Transverse)하게, 즉 L-T방향으로 와이 어 방전 가공하여 준비하였다.

2.2 피로균열전파실험

피로균열전파실험에 사용된 장치는 100kN용량의 유압 서보식 피로시험기로서 마이크로컴퓨터를 이용하여 10Hz의 Sine파형으로 일정한 진폭의 하중으로 제어되도록 구성하였으며, 상온의 대기 중에서 ASTM E647-00 규격에 따라 피로균열전파실험을 수행하였다. 피로시험의 최대하중은 2.00kN으로 제어하였다.

시편두께(B) 조건에 따른 AZ31 마그네슘합금의 피로균열전파에 적합한 실험적 모델을 평가하기 위하여 3가지 조건을 변화시키면서 실험하였다. 3가지 시편두께 조건은 상용 마그네슘합금 판재인 4.75mm, 6.60mm, 9.45mm 이며, 각 조건에 대하여 20개씩 CT시편을 준비하여 피로실험을 수행함으로써 피로균열성장에 대한 통계적 데이터를 확보하였다.

기계가공효과를 제거하고 예리한 균열선단을 만들기 위하여 CT시편 노치부의 예비균열길이를 3.0mm로 정하여 피로실험을 실시하였으며, 노치선단으로부터 균열이 3.0mm 전파되었을 때부터 사이클수와 균열길이를 컴퓨터로 자동 계산하여 저장하였다. 균열길이는 컴플라이언스 기법으로 구하기 위하여 클립게이지를 이용하여 하중 작용선상의 균열열림길이를 측정한 후 계산하였다.

3. 실험적 피로균열전파모델

마그네슘합금의 피로균열전파거동을 묘사하는데 적합한 실험적 모델을 평가하기 위하여 Paris-Erdogan 모델, Walker 모델, Forman 모델, 수정된 Forman 모델 등 4가지 실험적 피로균열전파모델을 평가에 사용하였다[11].

3.1 Paris-Erdogan 모델

대표적으로 사용하는 피로균열전파의 실험적 모델은 Paris-Erdogan 식으로서 다음과 같다.

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

여기서 da/dN 과 ΔK 는 각각 피로균열성장속도와 응력확대계수범위이며, a 는 균열크기이며 N 은 피로사이클수이다. 그리고 C_1, m_1 은 각각 피로균열성장속도계수와 피로균열성장속도지수로서 모델의 파라미터이다.

실험에서 획득한 da/dN 과 ΔK 들이 동일한 실험시편들 간에서 균열성장의 변동성을 보일 경우 실험적 모델의 파라미터 C_1, m_1 값에 균열성장의 변동성을 반영하기 위하여 통계적으로 파라미터를 추정하였는데, 여기서는 최우추정법(maximum likelihood method)을 사용하

였다.

식(1)의 양변에 대수를 취한 후 잔차(residual) $\log \bar{R}$ 을 도입하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\log \bar{R} = \log \left(\frac{da}{dN} \right) - \log C_1 - m_1 \log \Delta K \quad (2)$$

여기서 잔차 $\log \bar{R}$ 은 확률적 특성을 나타낸다. 확률변수 \bar{R} 이 평균이 1이고 양의 값을 갖는 로그정규분포를 따른다고 가정하면 $\log \bar{R}$ 는 정규분포를 따르는 확률변수가 된다. 왜냐하면 확률변수가 로그정규분포를 따를 때 확률변수의 로그값은 정규분포를 따르기 때문이다. 확률변수 \bar{R} 의 평균이 1이라고 가정하였으므로 $\log \bar{R}$ 의 평균이 0이 되며 정규분포를 따르는 확률변수로 사용할 수 있게 된다.

$$\log \bar{R} \sim N(0, \sigma_{\log \bar{R}})$$

여기서 $\sigma_{\log \bar{R}}$ 은 잔차 $\log \bar{R}$ 의 표준편차이다.

식(2)를 각각의 실험 데이터에 대하여 표시하면 다음과 같다.

$$\log \bar{r}_i = \log \left(\frac{da}{dN} \right)_i - \log C_1 - m_1 \log \Delta K_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

식(3)을 간단한 형태로 치환하여 표시하면

$$\log \bar{r}_i = y_i - A - m_1 x_i \quad (4)$$

이 된다.

여기서 $y_i = \log \left(\frac{da}{dN} \right)_i$, $A = \log C_1$, $x_i = \log \Delta K_i$

이다.

식(4)의 파라미터 A , m_1 은 잔차 $\log \bar{R}$ 이 정규분포를 따르는 조건을 최우추정법에 적용하여 구하면 된다.

$\log \bar{R}$ 이 정규분포를 따르는 확률변수이므로 확률밀도함수는 다음의 식으로 표현된다.

$$f_{\log \bar{R}}(\log \bar{r}_i) = \frac{1}{\sigma_{\log \bar{R}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{\log \bar{R}}^2} \{ (y_i - A - m_1 x_i) - \mu_{\log \bar{R}} \}^2 \right] \quad (5)$$

여기서 $f_{\log \bar{R}}(\log \bar{r}_i)$ 와 $\mu_{\log \bar{R}}$ 은 각각 잔차 $\log \bar{R}$ 의 확률밀도함수와 평균이다.

잔차 $\log \bar{R}$ 의 평균이 0이므로 식(5)는 다음과 같이 된다.

$$f_{\log \bar{R}}(\log \bar{r}_i) = \frac{1}{\sigma_{\log \bar{R}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{\log \bar{R}}^2} (y_i - A - m_1 x_i)^2 \right] \quad (6)$$

최우추정법을 적용하기 위하여 식(6)을 이용하여 우도 함수(likelihood function), L 을 구하면

$$L = \prod_{i=1}^n f(\log \bar{r}_i) \\ L = \frac{1}{\sigma_{\log \bar{R}}^n (2\pi)^{n/2}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{\log \bar{R}}^2} \sum_{i=1}^n (y_i - A - m_1 x_i)^2 \right] \quad (7)$$

이 된다. 식(7)의 양변에 대수를 취하여 정리하면

$$\log L = -\frac{n}{2} \log(2\pi) - n \log \sigma_{\log \bar{R}} - \frac{1}{2\sigma_{\log \bar{R}}^2} \sum_{i=1}^n (y_i - A - m_1 x_i)^2 \quad (8)$$

이 되며, A , m_1 의 최우추정값을 구하기 위하여 다음의 조건을 식(8)에 적용하였다.

$$\frac{\partial(\log L)}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial(\log L)}{\partial m_1} = 0$$

위 조건을 식(8)에 적용하여

$$(n)A + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) m_1 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (9)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) A + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) m_1 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (10)$$

를 얻었으며, 식(9)와 식(10)을 통하여 파라미터 A , m_1 을 추정할 수 있는 식을 다음과 같이 얻게 되었다.

$$m_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (11)$$

$$A = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i - m_1 \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (12)$$

3.2 Walker 모델

하중비(load ratio) 효과를 고려할 수 있는 실험적 모델인 Walker 모델은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_2 (\Delta K)^{m_2}}{(1-R)^k} \quad (13)$$

여기서 C_2 , m_2 , k 는 Walker 모델의 파라미터로서 각각 피로균열성장속도계수, 피로균열성장속도지수, Walker 지수이며, R 은 하중비이다.

Walker 모델의 파라미터 C_2 , m_2 , k 를 통계적으로 구하기 위하여 3.1절과 같이 최우추정법을 사용하였다.

3.3 Forman 모델

불안정 균열성장의 임계영역을 잘 묘사하는 Forman 모델은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_3 (\Delta K)^{m_3}}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (14)$$

여기서 K_c 는 임계응력확대계수이며, C_3, m_3 는 Forman 모델의 피로균열성장속도계수와 피로균열성장속도지수이다.

Forman 모델의 파라미터 C_3, m_3 는 3.1절과 같이 최우추정법을 사용하여 통계적으로 구하였다.

3.4 수정된 Forman 모델

Forman 모델에 피로균열전파 초기상태를 묘사할 수 있도록 수정된 Forman 모델은 다음과 같다

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_4(\Delta K - \Delta K_o)^{m_4}}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (15)$$

여기서 ΔK_o 는 초기응력확대계수범위이며, C_4, m_4 는 수정된 Forman 모델의 파라미터로서 각각 피로균열성장속도계수와 피로균열성장속도지수이다.

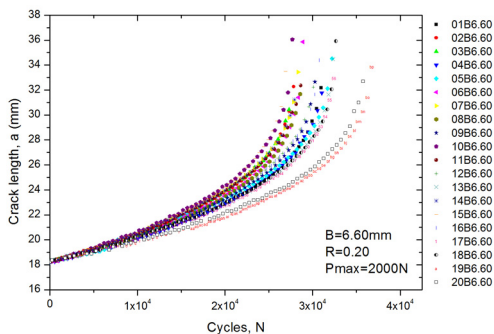
수정된 Forman 모델의 파라미터인 C_4, m_4 도 3.1절과 같이 통계적으로 최우추정법을 사용하여 구하였다.

4. 통계적 해석 및 실험결과 고찰

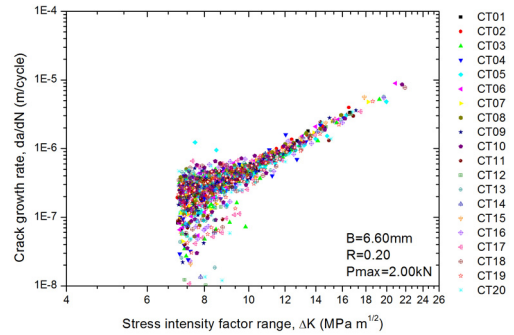
4.1 실험적 피로균열전파모델의 파라미터에 대한 통계적 해석

동일한 시편두께 조건에서 피로균열전파실험을 수행하여 획득한 통계적 피로균열성장 데이터를 균열성장률에 대한 $a \sim N$ 곡선과 $da/dN \sim \Delta K$ 그래프로 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다.

Fig. 1과 Fig. 2는 3가지 시편두께 중 대표적으로 6.60mm 시편두께 조건에 대하여 하중비 0.20, 최대하중 2.00kN 조건으로 20개의 시편을 중복 피로실험한 결과를 나타낸 것이다.



[Fig. 1] Fatigue crack propagations for 20 duplicate specimens under specimen thickness(B) of 6.60mm



[Fig. 2] Fatigue crack growth rate data for 20 duplicate specimens under specimen thickness(B) of 6.60mm

[Table 3] Parameters of empirical fatigue crack propagation model

Model	Parameter	Specimen thickness(B)		
		4.75mm	6.60mm	9.45mm
Paris-Erdogan	C_1	9.4438E-11	1.3982E-10	4.9858E-09
	m_1	3.7787	3.5980	2.0653
Walker	C_2	1.3783E-07	9.0388E-11	7.2347E-05
	m_2	3.7787	3.5713	2.1948
	k	32.0000	-1.077	44.5542
Forman	C_3	6.6814E-07	2.7210E-08	4.3863E-07
	m_3	0.8750	2.2273	0.7593
modified	C_4	7.8496E-06	3.0109E-06	1.7538E-06
Forman	m_4	0.1602	0.3206	0.1323

마그네슘합금의 피로균열성장은 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 서로 다른 시편 간에서도 변동성을 나타내는 거동을 보였을 뿐만 아니라, 동일한 시편 내에서도 변동성을 나타내었다. 그러므로 실험적 피로균열전파모델의 파라미터를 결정할 때에도 제3절에서처럼 통계적 방법을 사용해야 할 필요가 있다.

실험시편 내에서의 변동성을 반영하기 위하여 실험을 통하여 획득한 균열성장 실험값인 $da/dN \sim \Delta K$ 에 제3절의 최우추정법을 적용하여 각 실험적 피로모델의 파라미터를 구하였다. 그리고 실험시편 간의 변동성을 반영하기 위하여 20개의 시편에 대한 피로모델 파라미터들의 중앙값(median)을 기술적 통계처리를 통하여 구하였으며, 본 연구에서 평가하고자 하는 마그네슘합금의 피로균열전파거동에 대한 4가지 실험적 모델의 파라미터 또한 Table 3에 제시하였다.

4.2 실험적 피로균열전파모델 평가

Fig. 3~Fig. 5는 시편두께별로 피로균열성장속도와 실험적 모델의 회귀선을 나타낸 것이다. 균열전파 초기에 공통적으로 균열성장속도의 변동성이 매우 크게 나타났으며 균열이 전파됨에 따라 그 변동성이 차츰 작아지는 경향을 보였으며, 두께가 두꺼울수록 균열전파초기영역(이하 제I영역이라고 함)에 균열성장속도의 변동성이 커지는 양상을 보였다.

또한 균열성장영역(이하 제II영역이라고 표기함)에 걸쳐 Log-Log스케일에서 선형거동 경향을 보였으며 파단영역(이하 제III영역이라고 표기함)에서도 비선형거동을 보이지 않고 선형성이 유지되었다. 이것은 마그네슘합금은 조밀육방격자구조로서 다른 격자구조에 비해 연성이 작기 때문에 연성과파괴가 잘 일어나지 않고 벽개파괴를 일으키는 것과 연관성이 있는 것으로 사료된다. 시편두께가 4.75mm, 6.60mm, 9.45mm의 경우 초기응력확대계수 범위가 각각 $9.772 MPa \sqrt{m}$, $7.037 MPa \sqrt{m}$, $4.916 MPa \sqrt{m}$ 등으로 두께가 두꺼울수록 더 작았으며, 균열성장속도는 동일한 ΔK 에서 시편 두께가 두꺼울수록 더 느렸다[13,14]. 이것은 두꺼운 시편이 두께방향으로 더 큰 소성역이 발생하기 때문으로 사료된다. Paris-Erdogan 모델과 Walker 모델로 예측한 균열성장속도를 나타낸 Fig. 6과 Fig. 7에서도 이러한 경향이 잘 나타나고 있다.

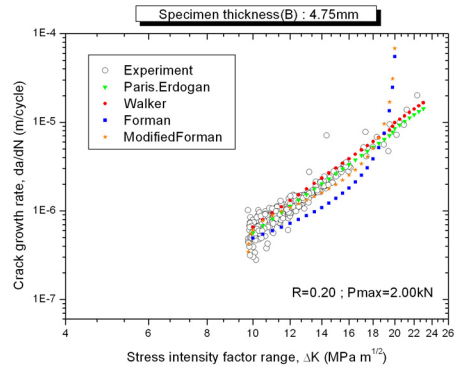
Fig. 3은 시편두께가 4.75mm인 경우에 피로균열성장속도의 실험값과 4가지 실험적 모델을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Paris-Erdogan과 Walker 모델은 제II영역과 제III영역에서 피로균열전파거동의 경향을 잘 묘사하고 있으며 두 모델은 매우 유사하게 거동을 예측하고 있다. 그러나 제I영역의 거동을 정확하게 묘사하지 못하였다.

한편 Forman 모델은 전체적으로 실험값과 많은 차이를 나타내었다. 반면에 수정된 Forman 모델은 대체적으로 제I영역과 제II영역은 잘 묘사하고 있지만 제III영역에서는 실험값과 격차를 보였다.

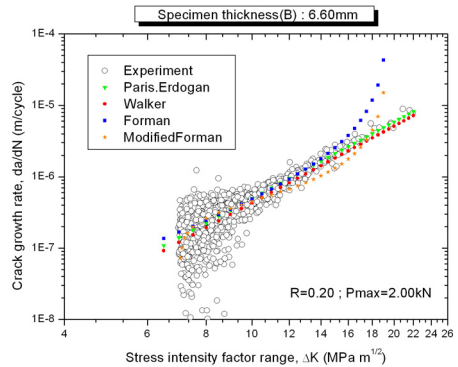
피로균열전파 실험데이터의 경향을 잘 묘사하는 모델은 Paris-Erdogan 모델과 Walker 모델이지만 실험데이터의 변동성을 충분히 반영하지 못하므로 피로균열전파거동의 변동성을 정확히 예측하기 위해서는 확률론적인 방법이 요구된다.

시편두께가 6.60mm인 경우의 피로균열성장속도에 대한 실험값과 4가지 실험적 모델을 Fig. 4에 나타내었다. 시편두께 4.75mm 경우와 같이 피로균열성장속도 데이터가 균열전파 초기에 큰 변동성을 나타내었으며 균열이 전파됨에 따라 변동성이 차츰 줄어들었다. 또한 파단영역

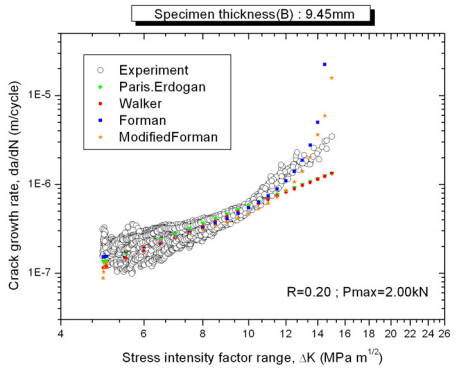
을 포함하여 전체적으로 선형 거동을 나타내면서 제III영역의 비선형성 거동은 나타나지 않았다.



[Fig. 3] Comparison of fatigue crack growth rate data between experiment and empirical models under specimen thickness of 4.75mm



[Fig. 4] Comparison of fatigue crack growth rate data between experiment and empirical modes under specimen thickness of 6.60mm



[Fig. 5] Comparison of fatigue crack growth rate data between experiment and empirical models under specimen thickness of 9.45mm

그림에서 알 수 있듯이 Paris-Erdogan 모델과 Walker 모델이 4.75mm 두께와 경우와 같이 피로균열전파거동의 경향을 잘 묘사하였다. Forman 모델과 수정된 Forman 모델도 피로거동을 비교적 잘 묘사하고 있으나 파단영역에서 실험값과 많은 격차를 나타내었다. 한편 균열초기의 거동은 수정된 Forman 모델이 잘 설명하고 있다.

Fig. 5는 시편두께가 9.45mm인 경우의 피로균열전파 거동의 실험값과 실험적 모델의 회귀선을 나타내었다. 4.75mm와 6.60mm와 같이 균열전파 초기에 변동성을 보이다가 균열이 전파됨에 따라 변동성의 정도가 줄어들고 있는 경향은 유사하나 시편두께 4.75mm와 6.60mm의 경우와 대조적으로 제I영역이 뚜렷하지 않으며 균열초기의 변동성도 크게 나타났다.

그림에서 볼 수 있듯이 Paris-Erdogan 모델과 Walker 모델은 매우 유사한 거동을 나타내면서 제I영역과 제II영역에서 피로실험 데이터를 잘 묘사하다가 파단영역에 가까워지면서 모델의 회귀선이 실험값과 격차를 나타내었다. 반면에 Forman 과 수정된 Forman 모델은 제II영역과 제III영역에서 피로거동 경향을 잘 묘사하였다.

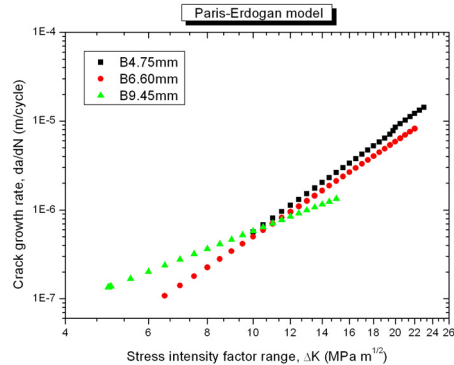
따라서 시편두께에 따른 피로균열전파거동을 보면 시편두께가 두꺼울수록 균열전파 초기에 균열성장속도의 변동성이 크게 발생하였으며 균열이 전파되면서 그 변동성이 작아지는 경향을 나타내었다. 시편의 두께가 두꺼울수록 초기응력확대계수범위가 작아졌으며, 또한 균열성장속도는 동일한 응력확대계수범위에서 시편두께가 두꺼울수록 느려졌다.

또한 피로균열전파 모델을 평가한 결과 시편두께 4.75mm와 6.60mm에서는 Paris-Erdogan 모델과 Walker 모델이 제II영역과 제III영역의 피로거동을 잘 묘사하였으며, 수정된 Forman 모델은 제I영역과 제II영역은 잘 묘사하였지만 파단영역에서는 잘 맞지 않았다. 그리고 Forman 모델은 제II영역에서 실험값과 대체적으로 잘 일치하였으나 수정된 Forman 모델처럼 파단영역에서는 잘 맞지 않았다. 또한 시편두께 9.45mm에서는 Paris-Erdogan 모델과 Walker 모델이 제I영역과 제II영역의 피로거동을 잘 묘사하였으며, Forman 모델과 수정된 Forman 모델은 제II영역과 제III영역의 거동경향을 비교적 잘 묘사하였다.

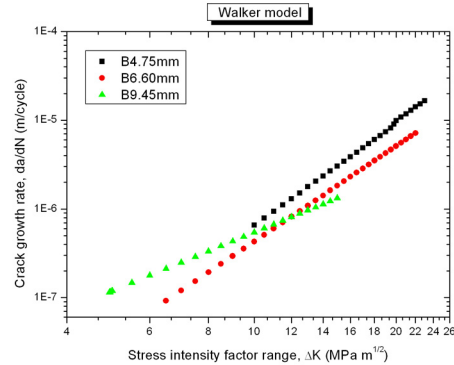
Fig. 6과 Fig. 7에 시편두께 조건별로 예측된 균열성장곡선을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 시편두께 4.75mm와 6.60mm에서는 시편두께 변화에도 불구하고 선형성 기울기가 비교적 일정하게 나타났으며 Log-Log 스케일상의 균열성장곡선의 기울기가 피로균열성장속도 지수를 표시하므로 피로균열성장속도지수를 재료상수로 볼 수 있을 것으로 사료된다. 9.45mm에서는 비선형성을

보이므로 어느 정도의 두께까지 재료상수로 볼 수 있는지는 추가적인 연구가 필요하다.

피로수명예측을 위해서는 파단영역에서 잘 맞지 않는 Forman 모델과 수정된 Forman 모델보다는 파단영역을 잘 묘사하고 있는 Paris-Erdogan 모델과 Walker 모델이 적합하다고 사료된다. 그러나 두께가 두꺼운 경우에는 차이를 보이므로 신중한 판단이 요구된다.



[Fig. 6] Fatigue crack growth rates predicted by empirical Paris-Erdogan model under different specimen thicknesses



[Fig. 7] Fatigue crack growth rates predicted by empirical Walker model under different specimen thicknesses

5. 결론

AZ31 마그네슘합금에서 시편두께 조건에 따른 실험적 피로균열전파모델을 평가하기 위하여 피로실험값에 대한 통계적 해석을 수행하고 각 모델에 대한 적합성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시편두께조건에서 공통적으로 균열전파 초기에 균열성장속도의 변동성이 특히 심하며 균열이 성장됨에 따라 그 변동성이 완화되는 양상을 밝혀내었다.

- 2) 시편두께의 변화에도 균열성장에서 파단영역까지 선형적 거동 양상을 보였지만 두께가 두꺼운 경우에는 파단영역에서 비선형적 거동의 차이가 발생하였다.
- 3) Paris-Erdogan 모델과 Walker 모델이 AZ31 마그네슘합금에서의 피로균열전파거동 경향을 잘 묘사하였으며, 균열성장영역과 파단영역의 거동을 예측하기 위한 모델로 적합할 것으로 판단된다. 그러나 시편두께가 두꺼운 경우에는 차이를 보이므로 신중한 판단이 요구된다.
- 4) 시편두께 변화에도 불구하고 피로균열전파곡선의 기울기가 거의 일정하게 나타남으로써 피로균열성장속도지수를 재료상수로 볼 수 있음을 알아내었다. 그러나 가장 두꺼운 경우에 기울기의 차이를 보이므로 어느 정도의 두께까지 재료상수로 볼 수 있을 지는 향후 연구과제로 남겨둔다.

References

- [1] Z. Y. Nan, S. Ishihara and T. Goshima, "Corrosion Fatigue Behavior of Extruded Magnesium Alloy AZ31 in Sodium Chloride Solution," International Journal of Fatigue, Vol. 30, pp. 1181-1188, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.09.005>
- [2] K. Tokaji, M. Nakajima, and Y. Uematsu, "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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.12.012>
- [3] B. L. Mordike, and T. Ebert, "Magnesium Properties-application-potential," Materials Science & Engineering (A), Vol. 302, pp. 37-45, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- [4] Seon Soon CHOI, "Estimation of Empirical Fatigue Crack Propagation Model of Mg-Al-Zn Alloy under Different Specimen thicknesses," Proceedings of the KOSME Fall Conference 2010, pp. 445-446, October, 2010.
- [5] Seon Soon CHOI, "Effect of Boundary Conditions on Reliability and Cumulative Distribution Characteristics of Fatigue Failure Life in Magnesium Alloy," Journal of the KAIS, Vol. 12, No. 2, pp. 594-599, February, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.2.594>
- [6] Seon Soon CHOI, "AZ31 Effect of Specimen Thickness on Probability Distribution of Fatigue Crack Propagation Behavior in Magnesium Alloy AZ31," Journal of the KSMTE, Vol. 18, No. 4, pp. 395-400, August, 2009.
- [7] Seon Soon CHOI, "Probabilistic Characteristics of Fatigue Behavior Parameter of Paris-Erdogan Law in Mg-Al-Zn Alloy," Transactions of the KSME(A), Vol. 35, No. 4, pp. 375-381, April, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.4.375>
- [8] Seon Soon CHOI, "Prediction of Fatigue Design Life in Magnesium Alloy by Failure Probability," Journal of the KSMTE, Vol. 19, No. 6, pp. 804-811, December, 2010.
- [9] Seon Soon CHOI, Ouk Sub LEE, "Effect of Mean Stress on Probability Distribution of Random Grown Crack Size in Magnesium Alloy AZ31," Journal of the KSMTE, Vol. 18, No. 5, pp. 536-543, October, 2009.
- [10] Seon Soon CHOI, "Estimation of Probability Distribution Fit for Fatigue Crack Propagation Life of AZ31 Magnesium Alloy AZ31," Transactions of the KSME(A), Vol. 33, No. 8, pp. 707-719, August, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2009.33.8.707>
- [11] Seon Soon CHOI, "Estimation of Empirical Fatigue Crack Propagation Model of AZ31 Magnesium Alloys under Different Maximum Loads," Journal of the KAIS, Vol. 13, No. 2, pp. 522-528, February, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.2.522>
- [12] ASTM E647-00, "Standard Test Method of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM International, 2000.
- [13] A. R. Jack and A. T. Price, "Effects of thickness on fatigue crack initiation and growth in notched mild steel specimens," Acta Metallurgica, Vol. 20, pp.857-866, 1972.
- [14] Y. M. Rhyim, Y. J. Lee, Y. W. Chang, C. S. Lee, "Effects of microstructure and specimen thickness on the fatigue crack closure in Al-Li 8090 alloy," Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 32, No. 8, pp.1119-1124, 1995.

최 선 순(Seon Soon CHOI)

[중심회원]



- 1980년 2월 : 부산대학교 화학기 계공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 부산대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 삼육대학교 카메카트로닉스학과 교수

<관심분야>

Probabilistic Fracture Mechanics, Optimal Design, Reliability Estimation, Light Materials