

파손확률에 따른 마그네슘합금의 피로설계수명 예측

최선순*

(논문접수일 2010. 10. 25, 심사완료일 2010. 11. 25)

Prediction of Fatigue Design Life in Magnesium Alloy by Failure Probability

Seon Soon CHOI*

Abstract

The fatigue crack propagation is stochastic in nature, because the variables affecting the fatigue behavior are random and have uncertainty. 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 AZ31 under various conditions such as thickness of specimen, the load ratio and the loading condition. The probability distribution fit to the fatigue failure life are investigated through a probability plot paper by these conditions. The probabilities of failure at various conditions are also estimated. The fatigue design life is predicted by using the Weibull distribution.

Key Words : Fatigue(피로), Life prediction(수명예측), Magnesium alloy(마그네슘합금), Weibull distribution(Weibull 분포), Failure probability(파손확률)

1. 서론

마그네슘합금은 기계의 고성능 추구하고 에너지 절감목적에 부합하는 매우 매력 있는 재료이다. 왜냐하면 경량성, 비강도, 비강성도, 뒨핑성, 전자파 차폐성 뿐만 아니라 기계가공성과 리사이클성과 같은 장점이 있기 때문이다⁽¹⁻⁴⁾.

그러므로 최근에 구조용 재료로 많은 분야에서 마그네슘합금에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히, 자동차산업에서

경량화의 필요성이 매우 커짐에 따라 알루미늄합금을 대체하는 재료로 마그네슘합금이 고려되고 있다.

이는 높은 비강도 특성을 적절히 활용하면 자동차를 경량화시킬 수 있으면서 중량대비 출력 또한 높일 수 있으므로 연비 향상효과와 함께 환경 친화적인 효과를 동시에 거둘 수 있기 때문이다.

일반적으로 마그네슘합금은 두 가지 범주, 즉 단련용 합금(wrought alloy)과 주조용 합금(casting alloy)으로 분류되

* 삼육대학교 카메카트로닉스학과 (choiss@syu.ac.kr)
주소: 139-742 서울시 노원구 화랑로 815

고 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 중대한 고려사항이므로 단련용 마그네슘합금의 피로특성을 평가하는 것이 매우 필수적이다⁽⁵⁾.

최근에 마그네슘합금의 활용에 대한 관심이 증가됨에 따라 피로특성에 관한 보고도 증가하고 있는데 이러한 보고들은 대부분 피로강도, 피로수명, 반복주기 손상(cyclic deformation), 부식피로 등에 관한 것이며, 반면에 피로균열 전파거동에 관한 보고는 적은 편이다^(1,5-8).

피로거동에 영향을 미치는 변수들이 불확실성을 가지면서 변동성을 나타내고 있으므로 피로균열전파거동은 본질상 확률론적인 특성이 있다. 그러므로 구조물을 설계하고 보수하기 위하여 피로수명을 예측하는 것은 매우 중대하다. 그럼에도 불구하고 마그네슘합금의 피로거동에 관한 확률론적인 특성은 극히 드물게 보고되고 있다^(3,4,6-8).

따라서 마그네슘합금의 피로파손수명에 대한 확률론적인 특성을 체계적으로 규명하기 위하여 여러 가지 실험조건에 대한 피로균열전파실험을 수행하였으며, 피로 데이터를 확률지에 적용하여 피로파손수명에 적합한 확률분포를 결정하였다. 또한 결정된 확률분포를 이용하여 설계에 필요한 피로수명을 예측하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 시편

실험에 사용된 재료는 상용 마그네슘합금 AZ31이며, 이 재료의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table1과 Table2에 각각 제시된 바와 같다.

시편의 형상은 ASTM E647-00⁽⁹⁾규격에 따라 CT(Compact Tension)형을 사용하였으며, 크기는 폭(W)이 50.8mm이고 두께(B)가 4.75mm, 6.60mm, 9.45mm인 3종류로 실험을 수행하였다.

CT시편은 피로균열전파거동에 영향을 미치는 기계가공 잔류응력을 피하기 위하여 모재로부터 직접 채취하였으며, 압연방향과 부하방향은 평행하게, 피로균열전파방향은 수직하게, 즉 L-T방향으로 와이어방전가공하여 준비하였다.

Table 1 Chemical composition of 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 magnesium alloy

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

Table 3 Fatigue loading conditions

Boundary conditions	Value
Thickness, B(mm)	4.75 , 6.60 , 9.45
Load ratio, R	0.05 , 0.10 , 0.20 , 0.30
Maximum load (kN)	2.00 , 2.25 , 2.50
Frequency (Hz)	10
Wave form	Sine

2.2 피로균열전파실험

실험 시스템은 100kN용량의 유압 서보식 피로시험기를 마이크로컴퓨터로 일정진폭하중제어가 되도록 구성하였으며, 상온의 대기 중에서 Table3의 하중조건으로 ASTM E647-00규격에 따라 피로균열전파실험을 수행하였다.

CT시편 노치부의 기계가공효과를 제거하고 예리한 균열 선단을 만들기 위하여 예비균열길이를 3.0mm로 정하여 피로실험을 실시하였으며, 균열이 노치선단으로부터 3.0mm가 진전되었을 때부터 사이클 수와 균열길이를 컴퓨터로 자동 계산하여 저장하였다. 균열길이는 클립게이지를 이용하여 하중작용선상의 균열열림길이를 측정하여 컴플라이언스 기법(compliance technique)으로 계산하였다. 또한 시편이 파단 될 때까지 균열을 진전시켜서 최종적으로 피로파손수명을 측정하였다.

마그네슘합금의 피로파손수명에 관한 확률분포 적합성을 종합적으로 고찰하기 위하여 다양한 실험조건, 즉 시편두께와 하중비, 그리고 최대하중 조건을 변화시키면서 실험하였다. 시편두께(B)는 4.75mm조건으로 20개, 6.60mm조건으로 24개, 9.45mm 조건으로 20개의 시편에 대하여 피로실험을 실시하였으며, 하중비(R)는 0.05, 0.10, 0.20, 0.30 조건으로 각각 20개씩, 그리고 최대하중(P_{max})은 2.00kN, 2.25kN, 2.50kN조건으로 각각 20개씩 실험을 수행하여 피

피로파손수명 데이터를 확보하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로파손수명의 확률분포 특성

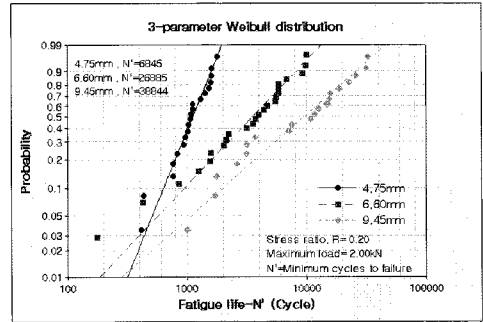
시편두께와 하중비, 그리고 최대하중을 변화시키면서 마그네슘합금에 대하여 피로균열전파실험을 수행한 결과 각 실험조건 간에 피로파손수명의 산포가 발생하였으며, 동일한 실험조건 내에서도 피로파손수명은 변동성을 보였다. 따라서 피로수명을 설계하기 위해서는 먼저 피로수명에 적합한 확률분포를 결정해야 한다.

본 연구에서는 정규분포, 로그정규분포, 2-파라미터 Weibull 분포와 3-파라미터 Weibull분포 등 4가지 확률분포에 대하여 피로파손수명의 분포 적합성을 비교, 분석하였다. 이를 위하여 상용 통계해석 프로그램인 MINITAB R15를 사용하여 각 실험조건 별로 5% 유의수준(α)에서 분석하였다.

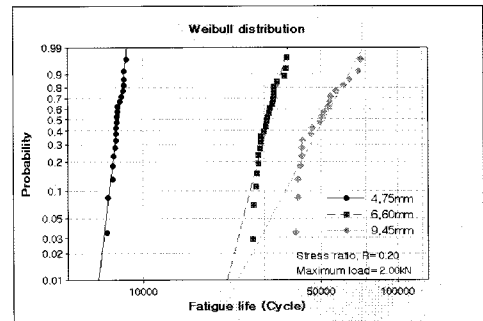
Fig. 1~Fig. 3은 시편두께, 하중비, 그리고 최대하중 실험 조건에서 확보한 피로파손수명 데이터를 각 확률지에 각각 나타낸 것이다. 그림에서 가로축은 피로파손수명이며 세로 축은 이 값에 대한 누적분포함수의 추정 값인데 메디안랭크 법(median rank)을 사용하여 구하였다. 그리고 그림에서 직선은 실험데이터를 정규분포와 로그정규분포는 최소자승법 (least squares method)으로, 2-파라미터 Weibull분포와 3-파라미터 Weibull분포는 최우추정법(maximum likelihood method)으로 각 확률분포의 파라미터를 추정하여 그린 회귀직선이며, 이것은 또한 각 확률분포가 실험데이터에 잘 적합한 지를 나타내는 적합선이기도 하다.

Fig. 1에서 시편두께가 4.75mm인 경우 모든 확률분포에서 실험데이터가 적합선에 가깝게 분포하면서 분포적합성을 보였으나 6.60mm에서는 2-파라미터 Weibull분포와 정규분포보다는 3-파라미터 Weibull분포와 로그정규분포가, 9.45 mm에서는 3-파라미터 Weibull분포가 실험데이터에 더 양호한 적합성을 나타내었다. 따라서 전체 시편두께 조건에서 볼 때 3-파라미터 Weibull분포가 더 양호한 적합성을 나타내었다.

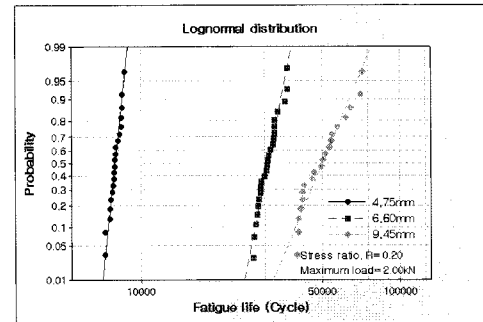
Fig. 2에서 볼 수 있듯이 하중비가 0.05와 0.10 그리고 0.20에서는 3-파라미터 Weibull분포와 로그정규분포 및 정규분포가 실험데이터와 양호한 적합성을 나타내었으며, 하중비 0.30에서는 3-파라미터 Weibull분포만이 적합성을 보였다. 이로써 하중비 조건에서도 3-파라미터 Weibull분포가 피로파손수명의 확률분포 특성을 해석하는데 더 적합하다고 사료된다.



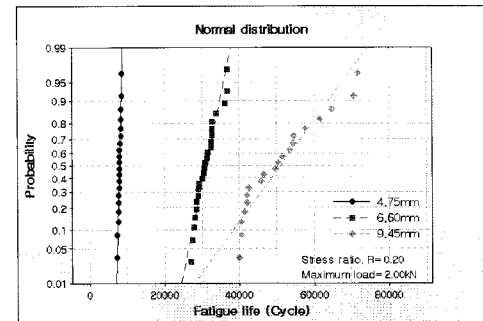
(a) 3-Parameter Weibull



(b) 2-Parameter Weibull

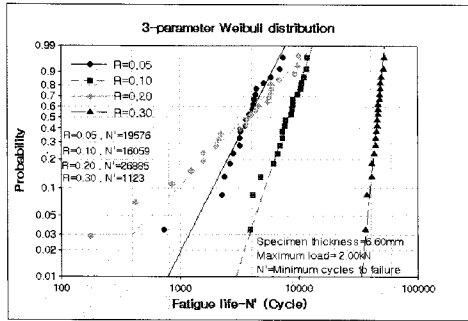


(c) Lognormal

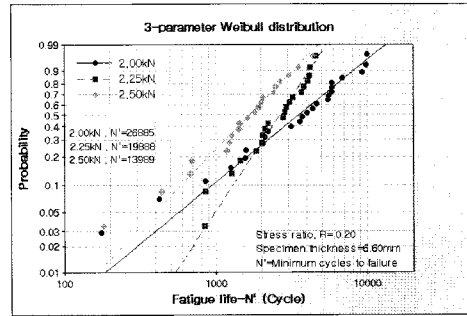


(d) Normal

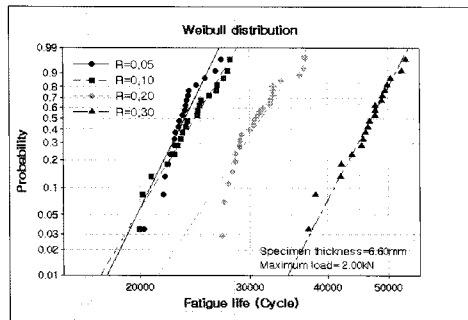
Fig. 1 Probability distribution of fatigue failure life for different specimen thicknesses



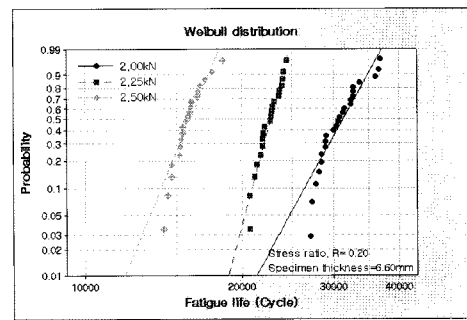
(a) 3-Parameter Weibull



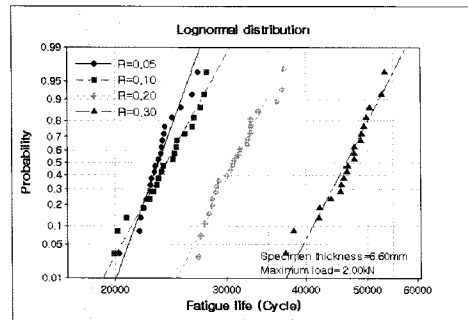
(a) 3-Parameter Weibull



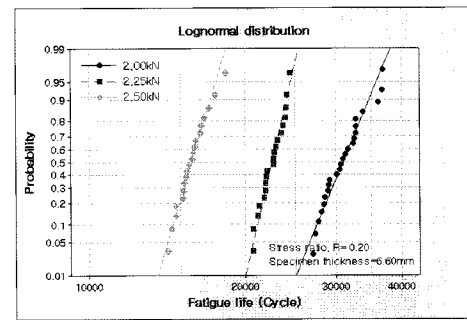
(b) 2-Parameter Weibull



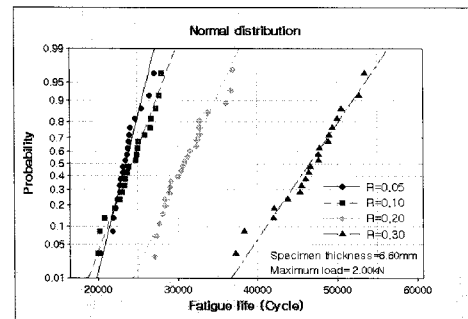
(b) 2-Parameter Weibull



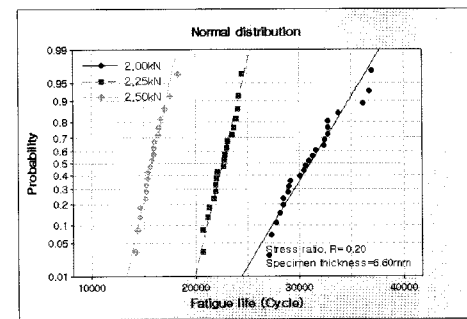
(c) Lognormal



(c) Lognormal



(d) Normal



(d) Normal

Fig. 2 Probability distribution of fatigue failure life for various load ratios

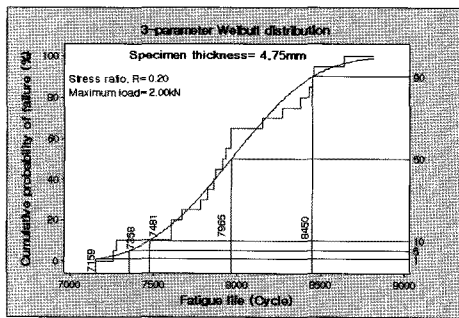
Fig. 3 Probability distribution of fatigue failure life for different maximum loads

또한 Fig. 3에서 최대하중이 커질수록 피로파손수명은 감소하였으며, 2.25kN과 2.50kN인 경우 2-파라미터 Weibull 분포를 제외한 나머지 3가지 확률분포에서 실험데이터가 분포적합선에 가깝게 분포하면서 양호한 분포적합성을 보였다. 그러나 2.00kN에서는 3-파라미터 Weibull분포와 로그 정규분포가 더 적합한 양상을 보이므로 전체 최대하중 조건에서 볼 때 3-파라미터 Weibull분포와 로그정규분포가 피로 파손수명을 해석하는데 더 적합하다고 판단된다.

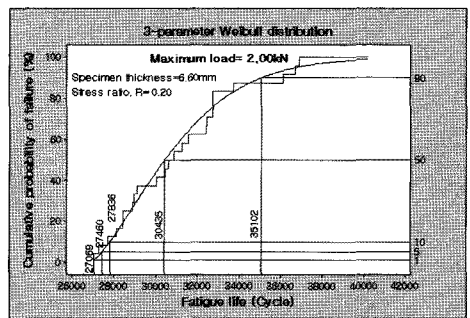
따라서 Fig. 1~Fig. 3에서 모든 실험조건에 대하여 종합적으로 고찰해 볼 때 마그네슘합금의 피로파손수명의 확률분포는 3-파라미터 Weibull분포가 더 적합한 것으로 나타났다.

3.2 파손확률에 따른 피로설계수명

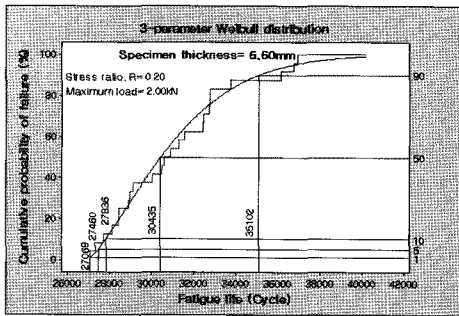
마그네슘합금에 대한 피로수명의 확률론적 특성을 평가하고 예측하는데 3-파라미터 Weibull분포를 사용하는 것이 적합하다는 결론을 3.1절에서 내렸으므로 앞으로 피로설계



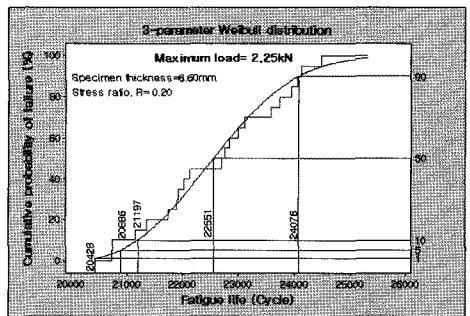
(a) B=4.75mm



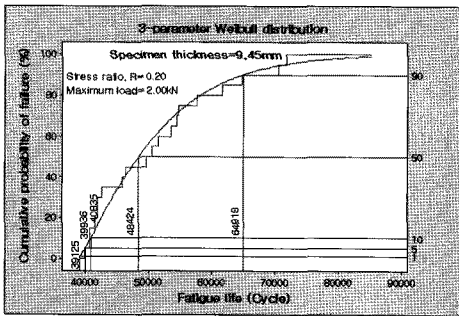
(a) Pmax=2.00kN



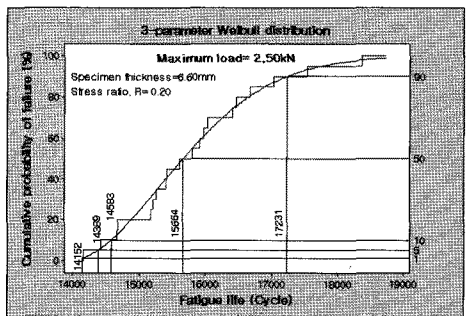
(b) B=6.60mm



(b) Pmax=2.25kN



(c) B=9.45mm



(c) Pmax=2.50kN

Fig. 4 Empirical cumulative distribution function for different specimen thicknesses

Fig. 5 Empirical cumulative distribution function for different maximum loads

수명을 예측하기 위하여 식 (1)과 같이 3-파라미터 Weibull 누적분포함수(CDF)를 사용하기로 한다.

$$F_N(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n - N'}{w}\right)^k\right], n \geq 0, k > 0, w > 0 \quad (1)$$

여기서 n 은 실험에서 관측된 피로파손수명이며, N', k, w 는 3-파라미터 Weibull분포의 3가지 파라미터로서 각각 위치 파라미터(location parameter) 또는 최소수명(minimum life), 형상 파라미터(shape parameter) 또는 Weibull 기울기, 척도 파라미터(scale parameter) 또는 특성수명(characteristic life)이다.

피로설계수명 N_D 는 피로파손이 일어날 확률을 최소화시킬 수 있도록 정해져야 하므로 파손확률 p_f 는

$$p_f = P(N < N_D) \quad (2)$$

이 되며, 이것은 다음과 같이 누적분포함수와 같게 된다.

$$p_f = P(N < N_D) = F_N(n) \quad (3)$$

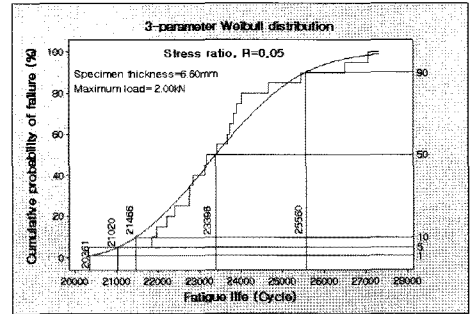
랜덤변수 N 이 3-파라미터 Weibull분포에 적합할 경우 피로파손확률은 식 (1)과 식 (3)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_f = F_N(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n - N'}{w}\right)^k\right] \quad (4)$$

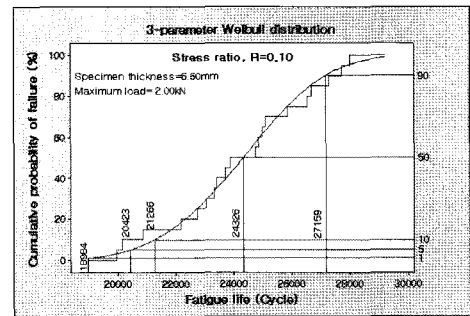
따라서 Weibull 파손확률에 대응하는 피로설계수명은 식 (5)로 예측할 수 있다.

$$N_D = N' + w \left[\ln\left(\frac{1}{1 - p_f}\right) \right]^{1/k} \quad (5)$$

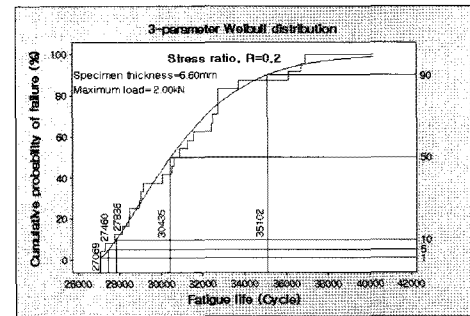
Fig. 4~Fig. 6은 시편두께와 최대하중, 그리고 하중비 등의 각 실험조건에 따라 피로파손수명의 누적파손확률을 도출한 경험적 누적분포함수이며, 그림에서 계단모양의 붉은색 선은 피로실험에서 얻은 피로파손수명 데이터이며 파란색 곡선은 실험데이터를 3-파라미터 Weibull분포로 추정하



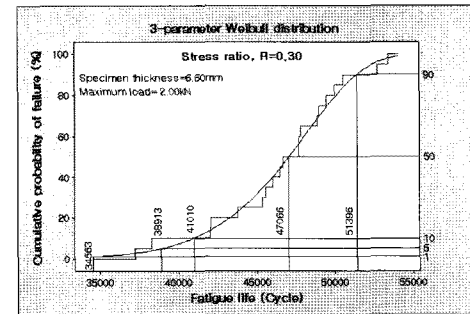
(a) R=0.05



(b) R=0.10



(c) R=0.20



(d) R=0.30

Fig. 6 Empirical cumulative distribution function for various load ratios

Table 4 Parameters of 3-parameter Weibull distribution

Conditions		k	w (cycle)	N' (cycle)
B (mm)	4.75	3.333	1250	6845
	6.60	1.431	4587	26885
	9.45	1.199	13005	38844
R	0.05	2.676	4381	19576
	0.10	4.057	9045	16059
	0.20	1.431	4587	26885
	0.30	13.33	47223	1123
Pmax (kN)	2.00	1.431	4587	26885
	2.25	2.652	3058	19888
	2.50	1.818	2049	13989

여 얻은 분포적합선이다. 파손확률을 이용하여 수명을 설계할 때 일반적으로 1%, 5%, 10%누적확률에 대응하는 백분위수를 설계수명으로 사용한다. 그림에서는 설계누적파손확률 1%, 5%, 10% 뿐만 아니라 50%, 90% 파손확률에 대응하는 피로설계수명 예측 값 까지 함께 표시하였다.

마그네슘합금에 대한 피로설계수명 예측식인 식 (5)를 사용하기 위해서는 확률분포 파라미터 값이 있어야 한다. 3-파라미터 Weibull분포함수의 파라미터는 형상 파라미터 k 와 척도 파라미터 w , 그리고 위치 파라미터 N' 이 있는데 이들 분포 파라미터를 구하기 위하여 최우추정법(maximum likelihood method)을 사용하였으며 그 결과 값을 Table 4에 정리해 놓았다.

따라서 식 (5)와 Table 4의 확률분포 파라미터를 이용함으로써 마그네슘합금의 피로설계수명을 예측할 수 있게 되었다.

4. 결론

본 연구는 마그네슘합금의 피로설계수명을 예측하기 위하여 일정진폭 하중 하에서 시편두께와 하중비, 그리고 최대하중 등 다양한 실험조건으로 피로균열전파실험을 수행하여 확보한 피로파손수명 데이터를 정규분포, 로그정규분포, 2-파라미터 Weibull분포, 3-파라미터 Weibull분포에 적용하여 피로파손수명을 지배하는 확률분포를 평가하였다. 그리고 결정된 확률분포를 이용하여 파손확률에 따른 피로설계수명을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마그네슘합금의 피로파손수명은 확률론적인 특성을 나타내고 있음을 밝혔다.
- (2) 마그네슘합금에 대한 피로파손수명의 확률론적 특성을 평가하고 예측하는데 3-파라미터 Weibull분포를 사용하는 것이 적합함을 밝혔다.
- (3) 피로설계수명식과 함께 3-파라미터 Weibull분포의 파라미터를 다양한 조건별로 제시함으로써 파손확률에 따른 마그네슘합금의 피로설계수명을 예측할 수 있게 하였다.

후 기

본 연구는 삼육대학교 공모과제비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 이 논문은 대한기계학회 2009년 춘계학술대회 발표논문⁽¹⁰⁾에 기초하였다.

참 고 문 헌

- (1) Tokaji, K., Kamakura, M., Ishiizumi, Y., and Hasegawa, N., 2004, "Fatigue Behaviour and Fracture Mechanism of a Rolled AZ31 Magnesium Alloy," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, pp. 1217~1224.
- (2) Mordike, B. L. and Ebert, T., 2001, "Magnesium Properties-application-potential," *Materials Science & Engineering(A)*, Vol. 302, pp. 37~45.
- (3) 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.
- (4) Shih, T.-S., Liu, W.-S., and Chen, Y.-J., 2002, "Fatigue of As-extruded AZ61A Magnesium Alloy," *Materials Science & Engineering(A)*, Vol. 325, pp. 152~162.
- (5) 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.
- (6) Choi, S. S., 2009, "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.

- (7) Choi, S. S. and Lee, O. S., 2009, "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.
- (8) Choi, S. S., 2009, "Estimation of Probability Distribution Fit for Fatigue Crack Propagation Life of AZ31 Magnesium Alloy," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 8, pp. 707~719.
- (9) ASTM E647-00, 2000, *Standard Test Method of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM International, Pennsylvania.
- (10) Choi, S. S. and Lee O. S., 2009, "Fatigue Life Prediction of Magnesium Alloy AZ31," *Proceedings of the KSME (Materials and Fracture Division) Spring Conference 2009*, pp. 233~243.