

마그네슘합금의 피로파손수명의 누적확률분포특성과 신뢰성에 미치는 경계조건의 영향

최선순^{1*}

¹삼육대학교 카메카트로닉스학과

Effect of Boundary Conditions on Reliability and Cumulative Distribution Characteristics of Fatigue Failure Life in Magnesium Alloy

Seon Soon CHOI^{1*}

¹Department of Car Mechatronics Engineering, SAHMYOOK University

요 약 본 논문은 마그네슘합금 AZ31의 피로파손수명의 확률론적 특성과 신뢰성에 미치는 경계조건의 영향을 평가하였다. 경계조건으로 시편두께와 응력비 그리고 최대피로하중을 적용하였으며, 각 경계조건별로 세부 실험조건에 대한 피로균열전파실험을 수행하여 피로파손수명에 대한 통계 데이터를 획득하였다. 마그네슘합금의 피로파손수명의 통계적 해석을 위하여 3-모수 와이블분포를 사용하였다. 시편두께가 두꺼울수록, 응력비가 클수록, 그리고 최대피로하중이 작을수록 통계적 피로파손수명이 길게 나타났다. 반면에 시편두께가 얇을수록, 응력비가 작을수록, 그리고 최대피로하중이 클수록 신뢰성이 급격히 감소하였다.

Abstract In this paper, the effect of the boundary conditions on the reliability and the cumulative distribution characteristics of the fatigue failure life is analyzed in a magnesium alloy AZ31. The boundary conditions are specimen thickness, stress ratio, and maximum fatigue load. The statistical data of the fatigue failure life are obtained by fatigue crack propagation tests under the detail conditions for each boundary condition. The 3-parameter Weibull distribution is used to analyze a statistical characteristics of the fatigue failure life in magnesium alloy AZ31. It is found that the statistical fatigue failure life is long in the case of a thicker specimen, a larger stress ratio, and a smaller maximum fatigue load. Under the opposite cases, the reliability on the fatigue failure life is rapidly dropped.

Key Words : Magnesium alloys, Fatigue failure life, Reliability, Weibull distribution, Specimen thickness, Stress ratio, Maximum fatigue load

1. 서론

마그네슘합금은 밀도가 알루미늄합금의 2/3 수준으로서 상용금속 중에서 가장 가벼운 소재이며, 비강도와 비강성도가 높아 차세대 금속으로서 기대가 되고 있다. 전기 및 열전도도가 뛰어나며 전자파에 대한 차폐성이 탁월하여 전자산업에도 많이 활용되고 있다. 또한 진동과

충격에 대한 댐핑성이 좋으며 기계가공성과 리사이클성도 우수하여 매우 매력있는 재료이다[1-3].

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 친화적

본 논문은 삼육대학교 공모과제비 지원으로 수행되었으며, 대한기계학회 춘계학술대회 발표논문[4]에 기초하였음.

*교신저자 : 최선순 (choiss@syu.ac.kr)

접수일 11년 01월 05일

수정일 (1차 11년 02월 02일, 2차 11년 02월 09일)

게재확정일 11년 02월 10일

인 효과를 동시에 거둘 수 있기 때문이다.

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 피로 현상이 중대한 고려 사항이므로 단련용 마그네슘합금의 피로 특성을 평가하는 것이 매우 필수적이다 [3].

피로균열진전거동에 영향을 미치는 변수들이 불확실성을 가지면서 변동성을 나타내고 있으므로 피로균열진전거동은 본질상 확률론적인 특성이 있다. 그러나 마그네슘합금의 피로균열진전거동에 관한 확률론적인 특성은 드물게 보고되고 있다[4-10].

따라서 본 연구에서는 시편두께, 응력비, 최대피로하중 등 여러 가지 경계조건에서 마그네슘합금 AZ31에 대하여 피로균열진전실험을 수행함으로 각 경계조건이 피로균열이 진전되어 파단될 때의 수명인 피로파손수명의 누적분포특성과 신뢰성에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 시편

실험시편의 재료는 마그네슘합금 AZ31이며, 이 재료의 기계적 성질과 화학적 조성은 각각 표 1과 표 2에 제시된 바와 같다.

[표 1] 마그네슘합금 AZ31의 기계적 성질

항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신율(%)
198.3	264.4	21.95

[표 2] 마그네슘합금 AZ31의 화학적 조성(wt,%)

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

시편은 폭(W)이 50.8mm인 CT(Compact Tension)형으로서 ASTM E647-00 규격[11]에 따라 압연방향과 부하방향은 평행하게, 피로균열진전방향은 수직하게, 즉 L-T 방향으로 와이어 방전 가공하여 준비하였다. 그리고 피로균열진전거동에 영향을 미치는 기계가공 잔류응력을 피

하기 위하여 모재로 부터 직접 채취하였다.

2.2 피로균열전파실험

실험에 사용된 시스템은 100kN용량의 유압 서보식 피로시험기를 일정한 진폭의 하중으로 제어되도록 마이크로컴퓨터로 구성하였으며, 상온의 대기 중에서 ASTM E647-00 규격에 따라 피로균열진전실험을 수행하였다.

CT시편 노치부의 기계가공효과를 제거하고 예리한 균열선단을 만들기 위하여 예비균열길이를 3.0mm로 정하여 피로실험을 실시하였으며, 균열이 노치선단으로부터 3.0mm가 진전되었을 때부터 사이클수와 균열길이를 컴퓨터로 자동 계산하여 저장하였다. 균열길이는 클립게이지를 이용하여 하중작용선상의 균열열림길이를 측정하여 컴플라이언스기법으로 계산하였다.

피로파손수명은 예비균열에서 시작하여 시편이 최종 파단될 때 까지의 사이클로 정의하며, 피로균열진전실험에서 파단 시의 사이클을 측정하여 얻었다.

AZ31의 피로파손수명에 대한 신뢰성 평가를 위하여 시편의 두께와 응력비와 최대피로하중 조건을 변화시키면서 실험하였다. 시편두께의 영향을 고찰하기 위하여 4.75mm, 6.60mm, 9.45mm조건으로 각각 20개씩의 시편에 대하여 피로실험을 하였으며, 응력비의 영향을 위해 0.05, 0.10, 0.20, 0.30조건으로 각각 20개씩, 그리고 최대 피로하중이 피로파손수명의 신뢰성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 2.00kN, 2.25kN, 2.50kN조건으로 각각 20개씩 실험을 수행하여 피로파손수명에 대한 통계 데이터를 확보하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로파손수명의 누적확률분포특성에 미치는 경계조건의 영향

마그네슘합금에 대한 피로파손수명의 확률론적 특성은 3-모수 와이블분포(3-parameter Weibull distribution)가 가장 적합하므로[10] 경계조건이 피로파손수명의 누적확률분포 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 3-모수 와이블분포를 적용하였다.

3.1.1 시편두께의 영향

피로파손수명에 대한 시편두께의 상관관계를 분석하기 위하여 최대피로하중 2.00kN과 최소피로하중 0.40kN의 일정한 하중진폭으로 부하시키면서 3가지 두께(4.75, 6.60, 9.45mm)의 시편에 대하여 실험을 수행하여 얻은

피로파손수명 데이터를 그림 1과 같이 3-모수 와이블분포로 추정하여 나타내었다. 그림에서 가로축은 피로파손수명을 나타내며 세로축은 이 값에 대한 누적분포함수의 추정값인데 메디안랭크법(median rank)을 사용하여 구하였다. 실험 데이터의 3-모수 와이블분포의 파라미터는 최우추정법(maximum likelihood method)으로 추정하였다. 그림 1(a)에서 곡선은 추정된 파라미터를 이용하여 그린 Weibull 누적분포함수이며 계단형태의 선은 실험을 통해 얻은 통계데이터를 나타낸 것이다. 그림 1(b)는 점도형인 통계적 실험데이터를 3-모수 와이블(3-parameter Weibull) 확률지에 나타낸 것이다. 그림에서 직선은 실험데이터의 확률분포 파라미터를 최우추정법으로 추정하여 그린 회귀직선이며, 이것은 또한 확률분포가 실험데이터에 적합한 지를 나타내는 분포적합선이기도 하다. 직선을 기준으로 양쪽에 있는 곡선은 95% 신뢰구간을 나타내는 것으로 좌측의 곡선이 하한계이고 우측의 곡선이 상한계를 표시한다. 피로실험 데이터들이 분포적합선상에서 좌, 우측으로 벗어나더라도 95% 신뢰구간 안에 분포될 때 확률분포에 적합하다고 판단한다. 그림 1(b)를 보면 95% 신뢰구간 안에 실험데이터들이 분포하므로 3-모수 와이블분포가 양호한 분포적합성을 나타내었다. 그림 1(a)에서 가장 급격한 누적분포곡선을 보이는 두께 4.75mm의 경우가 그림 1(b)에서도 분포적합선의 기울기가 가장 크게 나타났다.

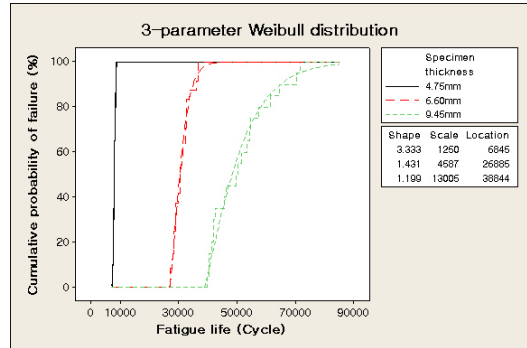
그림 1과 같이 시편의 두께가 얇을수록 분포적합선의 기울기가 커지는 급속파손모드 양상이 나타났다. 급속파손모드라 함은 피로파손수명데이터의 산포가 좁게 분포하는 경우로서 평균수명 부근에서 파손이 발생할 확률이 높다는 것으로 정의한다. 그리고 두께가 두꺼울수록 피로파손수명이 증가하는 양상을 나타내었다. 이것은 마그네슘합금은 육방조밀결자 구조를 가지고 있어서[12] 균열의 진전을 위한 슬립밴드 발생이 어렵기 때문에 크기효과를 가지는 두께조건에서 이러한 양상이 나타나는 것으로 사료된다.

3.1.2 응력비의 영향

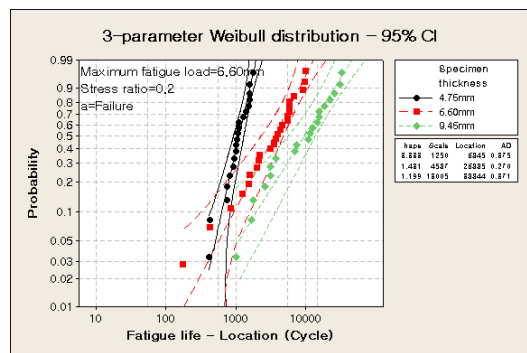
응력비와 피로파손수명분포의 상관관계를 검토하기 위하여 6.60mm 두께의 시편에 최대피로하중 2.00kN을 부하시키면서 4가지 응력비(R=0.05, 0.10, 0.20, 0.30) 조건에 대하여 실험을 수행하여 얻은 피로파손수명의 누적확률분포를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 응력비가 커질수록 피로파손수명의 중앙값이 우측으로 이동하면서 증가하는 것으로 나타났다.

또한 응력비가 클수록 피로파손수명의 분포가 넓게 나타났다. 이것은 응력비가 클수록 응력의 진폭이 작으므로

균열 열림이 작게 되어 균열진전을 위한 슬립밴드 발생이 더 어렵게 되면서 균열진전이 느려질 뿐만 아니라 동시에 균열진전기간이 길어지므로 불확실성이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

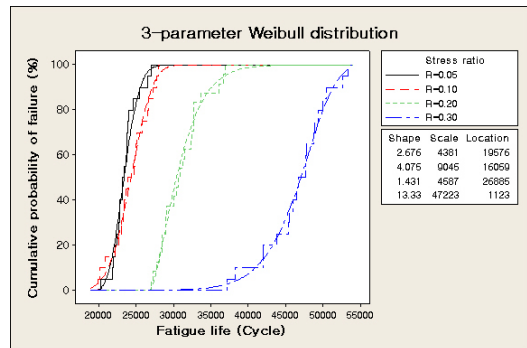


(a) 누적분포함수

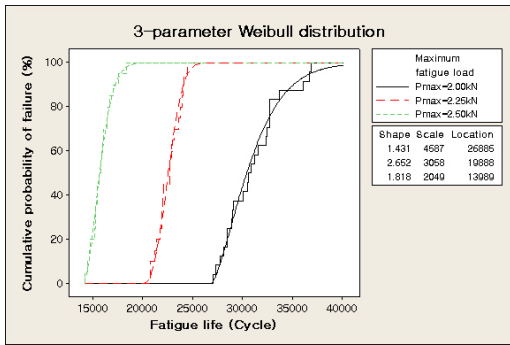


(b) 분포적합성

[그림 1] 시편두께 조건에 따른 피로파손수명의 누적분포함수와 분포적합성



[그림 2] 응력비 조건에 따른 피로파손수명의 누적분포함수



[그림 3] 최대피로하중 조건에 따른 피로파손수명의 누적 분포함수

3.1.3 최대피로하중의 영향

그림 3은 6.60mm 시편에 대하여 0.20의 응력비상태에서 최대피로하중을 2.00kN, 2.25kN, 2.50kN으로 변화시키면서 얻은 피로파손수명의 누적확률분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대피로하중이 커질수록 피로파손수명은 감소하였으며, 2.00kN보다 2.50kN의 경우가 급속파손모드 양상을 보이므로 평균수명부근에서 파손될 확률이 높을 것으로 판단된다.

3.2 피로파손수명의 신뢰성에 미치는 경계조건의 영향

마그네슘합금 AZ31에 대한 피로파손수명의 확률론적 특성은 3-모수 와이블분포가 가장 적합하므로 피로신뢰성 평가를 위하여 식 (1)과 같이 3-모수 와이블분포함수(CDF)를 사용하였다.

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

$F_N(n)$ 은 확률변수(N)가 n 이 될 때까지의 파손될 확률, 즉 확률변수 N 이 n 이하가 될 확률을 의미하며, n 은 실험에서 관측된 피로파손수명이며, N_o, k, w 는 3-모수 와이블분포의 3가지 파라미터로서 각각 위치모수(location parameter) 또는 최소수명(minimum life), 형상모수(shape parameter) 또는 Weibull 기울기, 척도모수(scale parameter) 또는 특성수명(characteristic life)이다.

$$F_N(n) = P(N < n), n \geq 0 \quad (2)$$

누적분포함수 $F_N(n)$ 을 파손분포함수(failure distribution

function) 또는 비신뢰성함수 (unreliability function)라 하기도 한다.

신뢰성(reliability)이란 어떤 n 에서 시스템이 특정 기능을 수행할 수 있는 확률, 즉 파손수명이 n 이상이 될 확률로 정의할 수 있으므로

$$R_N(n) = P(N > n) = 1 - F_N(n) \quad (3)$$

이 된다. 여기서 $R(n)$ 을 신뢰성함수(reliability function)라 한다.

식 (1)과 식 (3)에 의하여 신뢰성함수는 다음과 같이 표시할 수 있다..

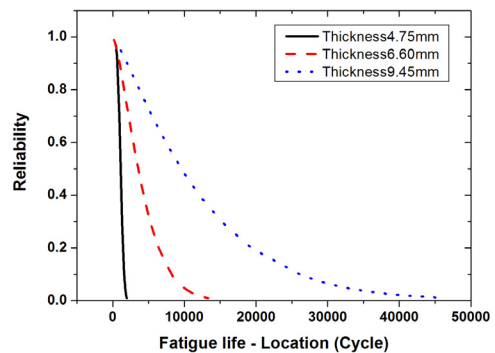
$$R(n) = \exp\left[-\left(\frac{n - N_o}{w}\right)^k\right] \quad (4)$$

따라서 3-모수 와이블분포를 따르는 피로파손수명의 신뢰성은 식 (4)를 이용하여 평가할 수 있다.

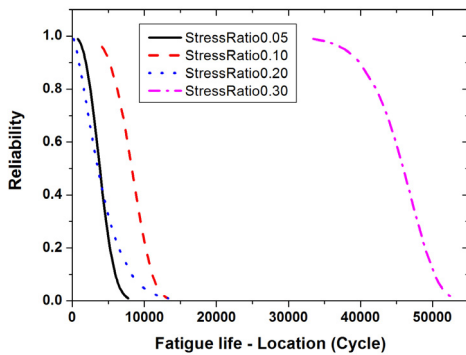
그림 4는 시편두께가 4.75mm, 6.60mm, 9.45mm시편에 대한 피로파손수명의 신뢰성을 나타낸 것으로 두께가 얇을수록 수명에 따른 신뢰성이 급격히 떨어짐을 보였다. 그러므로 두께가 얇을 경우 구조설계 시 세심한 주의를 요한다.

그림 4에서 형상모수가 3.333인 두께 4.75mm의 경우가 형상모수 1.199인 9.45mm 경우에 비해 수명에 따른 신뢰성이 급격히 떨어짐을 보였다. 따라서 형상모수가 클수록 신뢰성이 급격히 떨어지므로 형상모수가 신뢰성의 변동을 결정하는 척도로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

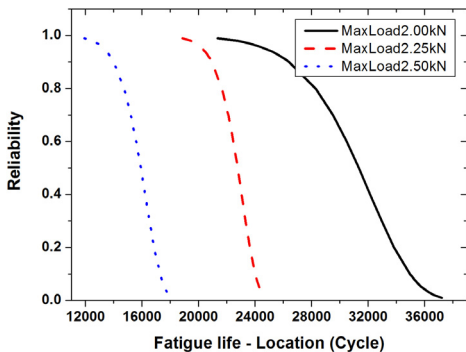
응력비의 변화에 대한 신뢰성을 그림 5에 나타내었는데, 응력비가 작을수록 수명에 따른 신뢰성이 급격히 떨어짐을 보였다.



[그림 4] 시편두께 조건에 따른 피로파손수명의 신뢰성함수



[그림 5] 응력비 조건에 따른 피로파손수명의 신뢰성합수



[그림 6] 최대피로하중 조건에 따른 피로파손수명의 신뢰성합수

그림 6은 최대피로하중이 2.00kN, 2.25kN, 2.50kN인 경우의 피로파손수명에 대한 신뢰성을 나타낸 것으로서 최대피로하중이 클수록 수명에 따른 신뢰성이 급격히 감소하였다.

4. 결론

마그네슘합금 AZ31에서 시편두께와 응력비 그리고 최대피로하중 등이 피로파손수명의 누적확률분포특성과 신뢰성에 미치는 영향을 3-모수 와이블분포를 사용하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시편두께가 두꺼울수록, 응력비가 클수록, 그리고 최대피로하중이 작을수록 통계적 피로파손수명이 길어짐을 밝혔다.
- 2) 시편두께가 얇을수록 급속파손모드를 나타내므로 마그네슘합금을 이용한 구조설계 시 두께효과에 대한 세밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

- 3) 시편두께가 얇을수록, 응력비가 작을수록, 그리고 최대피로하중이 클수록 피로파손수명에 따른 신뢰성이 급격히 떨어짐을 규명하였다.

참고문헌

- [1] Tokaji, K., Kamakura, M., Ishiizumi, 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.
- [2] Mordike, B. L. and Ebert, T., "Magnesium Properties-application-potential," *Materials Science & Engineering (A)*, Vol. 302, pp. 37-45, 2001.
- [3] 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.
- [4] 최선순, 이억섭, "통계적인 경계조건이 마그네슘합금 AZ31의 피로신뢰성에 미치는 영향," *대한기계학회 2009년도 신뢰성부문 춘계학술대회 논문집*, pp. 48-57, 5월, 2009.
- [5] Sivapragash, M., Lakshminarayanan, P. R., and Karthikeyan, R., "Fatigue Life Prediction of ZE41A Magnesium Alloy Using Weibull Distribution," *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 1549-1553, 2008.
- [6] Shih, T.-S., Liu, W.-S., and Chen, Y.-J., "Fatigue of As-extruded AZ61A Magnesium Alloy," *Materials Science & Engineering(A)*, Vol. 325, pp. 152-162, 2002.
- [7] 최선순, "AZ31 마그네슘합금 시편의 두께가 피로균열진전거동의 확률분포에 미치는 영향," *한국공작기계학회지*, Vol. 18, No. 4, pp. 395-400, 8월, 2009.
- [8] 최선순, "AZ31 마그네슘합금의 피로균열진전수명에 적합한 확률분포 평가," *대한기계학회논문집 A권*, 제 33권, 제8호, pp. 707-719, 8월, 2009.
- [9] 최선순, 이억섭, "평균응력이 AZ31 마그네슘합금의 랜덤진전균열크기 확률분포에 미치는 영향," *한국공작기계학회지*, Vol. 18, No. 5, pp. 536-543, 10월, 2009.
- [10] 최선순, "파손확률에 따른 마그네슘합금의 피로설계수명 예측," *한국공작기계학회지*, Vol. 19, No. 6, pp. 804-811, 12월, 2010.
- [11] ASTM E647-00, "Standard Test Method of Fatigue Crack Growth Rates," *ASTM International*, 2000.
- [12] Anderson, T. L., "Fracture Mechanics," *CRC Press, Florida*, 1995.

최 선 순(Seon Soon CHOI)

[정회원]



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

<관심분야>

Probabilistic Fracture Mechanics, Reliability Estimation