

# 확률적 피로한도를 도입한 S-N곡선: 모형, 분석법, 활용

서 순근 | 동아대학교 산업경영공학과, 교수 | e-mail : skseo@dau.ac.kr  
조 유 희 | (주)한국신뢰성기술서비스, 과장 | e-mail : yhcho@korts.co.kr

이 글에서는 기계공학 분야에서 가장 널리 쓰이는 가속수명시험법의 하나인 피로시험에 최근에 개발된 확률적 피로한도를 도입한 모형과 이의 유용성에 대해 소개한다.

**산**업의 발전과 더불어 기계 구조물이 복잡, 정밀, 대형화 추세에 따라 대형사고 또는 기계파손이 빈번히 발생하고 있다. 다양한 사고원인 중에서 파손의 가장 중요한 원인으로 피로(fatigue)를 들 수 있으며 미 정부 보고서에 의하면 이에 따른 경제적 손실이 GNP의 3%에 이른다고 한다. 피로란 교량, 비행기, 기계 부품 등과 같이 동적인 변동응력을 받는 구조물에서 나타나는 파손의 일종으로, 항복강도나 반복 정적하중보다 매우 낮은 응력상태에서 일어나는 파손이다. 이런 피로파손은 어떠한 파손 징후를 나타내지 않고 갑자기 일어나므로 아주 위험한 대형 사고를 일으킨다.

일반적으로, 피로한도(fatigue limit) 또는 내구한도(endurance limit)는 그림 1과 같이 꺾임점이 존재하여 수평화되는 응력수준으로, 이 근처에서 수명이 무한하다고

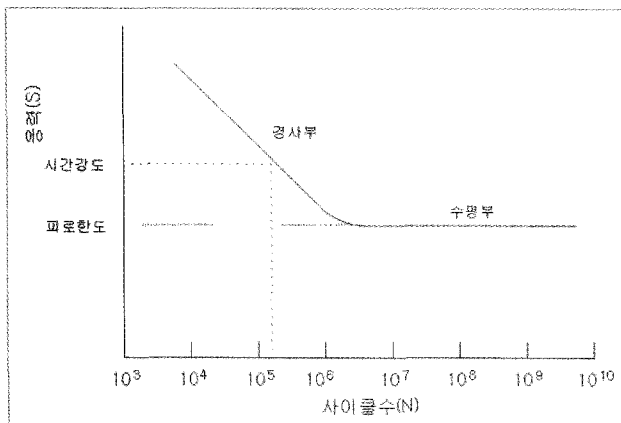


그림 1 피로 한도를 나타내는 재료의 S-N곡선

간주한다. 현재까지도 이런 피로한도의 존재와 정의에 대해 논의가 계속되고 있지만 주로  $10^7$  ( $10^5 \sim 10^8$ ) 사이클에서의 피로강도로서 실험에 의해 결정되고 이런 피로로 인해 발생하는 사고로부터 피해를 방지하기 위해 기계나 구조물 설계 시 재료의 수명을 평가하여 안전 수명 설계(safe-life design) 및 제조에 반영하게 된다. 피로시험(fatigue test)을 통해 피로한도와 그림 1의 S-N 곡선(피로곡선)을 추정한다.

한편 가속수명시험은 시험기간을 단축하기 위한 목적으로 기준조건(통상 사용조건)보다 가혹한 조건에서 실시하는 시험이다. 고 스트레스 수준에서 스트레스를 인가하는 스트레스 가속과 간헐 동작 시 반복횟수를 증가시키거나 연속동작 시 지속시간을 늘이는 시간 가속을 실시하여 제품의 고장 메커니즘을 촉진하여 수명을 측정하는 시험방법이다. 따라서 가속조건 of 시험결과로부터 기준조건의 수명 또는 고장률을 추정하기 위해 두 조건 사이에 존재하는 규칙성을 활용하여 가속계수 등을 구하며, 일반적으로 두 조건에서의 고장 메커니즘이 동일해야 한다. 요즘은 고 신뢰도를 갖는 제품에 대한 적절한 신뢰성 평가 시 직면하게 되는 시간과 시험단위 수의 제약을 극복하여 짧은 기간에 제품의 신뢰도와 성능을 파악하기 위해서는 가속수명시험이 거의 유일한 대안이 되고 있다.

피로시험은 기계공학 분야에서 널리 쓰이는 가속수명시험법의 일종으로, 파손모형 중에서 가장 오래된 응력-수명 접근법인데 고 사이클 영역에 적용된다. 획득된 피로시

험자료로부터 그림 1과 같이 S-N곡선을 구하여 피로한도와 설계수명 등을 예측하는데, ASTM, JSME, KS규격에서는 그림 1과 같이 종축에 응력, 횡축에 피로수명(사이클 수)을 취한다. 이로부터 회귀분석기법 등을 이용하여 S-N 곡선을 적합시키며, 피로한도가 존재하는 경우는 staircase 시험 등을 통하여 이를 파악한다. 그러나 스트레스가 낮아지면 산포가 급격히 증가되는 경향을 보이고 있으며, 양 대수변환(또는 사이클 수만 대수변환)을 적용하더라도 산포가 증가되어 피로곡선을 모형화하는 데 어려움이 존재하고 있다. 즉, 널리 쓰이는 회귀모형을 이용한 최소제곱법은 각 수준에서 산포가 같다고 가정하고 있으므로, 이 방법에 의한 모수(기울기, 피로한도) 추정치의 통계적 효율성이 떨어지고 있다.

더불어 그림 1의 경사부와 수평부가 bi-linear형태가 되어 완곡하게 연결되지 못하는 단점, 경사부와 피로한도를 동시에 다루지 못하고 별도로 적합해야 되는 기존의 피로곡선 모형을 보완하기 위한 새로운 이론이 소개되고 있는데, 대표적인 것이 Pascual과 Meeker(1999)의 확률적 피로한도(Random Fatigue Limit)모형으로 실제 피로시험 자료에 성공적으로 적용되고 있다.

### 확률적 피로한도 모형

피로한도는 균열전파를 초래하는 최소 스트레스 수준으로 해석될 수 있는데, 균열 지점, 발생방위, 크기, 개수 등에 의존하므로 확률적이라고 보는 것이 합리적이다. 확률적 피로한도모형(이하 RFL 모형)은 기존의 S-N 곡선의 통계적 모형에 피로한도의 확률적 분포를 도입한 것으로 스트레스 수준에서 다음과 같이 모형화 하고 있다.

$$W = \ln(N) = \beta_0 + \beta_1 \ln(S - \gamma) + \varepsilon \quad (1)$$

여기서, 응력(S)과 수명에 해당되는 사이클 수(N)을 대수 변환할 때 선형인 경우로,  $\gamma$ 는 피로한도,  $\varepsilon$ 은 오차,  $W = \ln(X)$ ,  $V = \ln(\gamma)$ 가 된다.

Pascual과 Meeker(1999)는 대수변환된 피로한도(V)와 특정 V에서의 대수 수명(W|V)이 각각 정규분포를 따른 경우(즉, 피로한도와 수명이 모두 대수정규분포를 따른

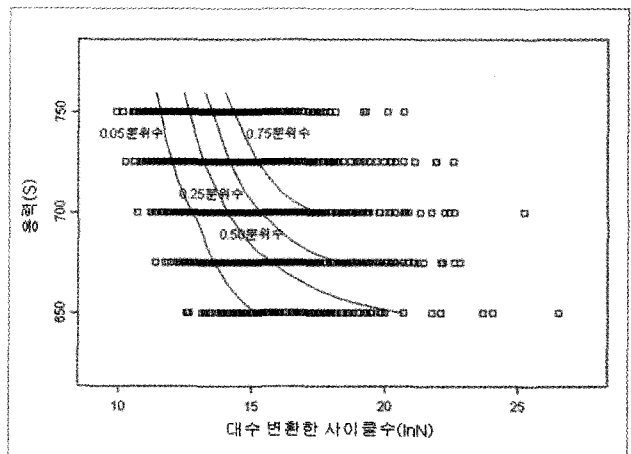


그림 2 응력이 감소할수록 대수변환된 수명의 산포가 증가되는 RFL 모형

때)가 한정된 사례에 적합하였지만, 수명과 피로한도가 각각 와이블 또는 대수정규분포를 따른 경우(즉, 대수변환된 수명과 피로한도가 각각 최소 극단값(smallest extreme value)분포와 정규분포를 따른 때)의 네 가지 조합 중에서 가장 우수하다고 보고하고 있다. 따라서 이 글에서는 V, W|V가 모두 정규분포를 따른 경우의 피로한도 모형을 고려한다.

RFL 모형은 경사부와 수평부의 연결지점을 곡선 형태로 좀 더 부드럽고 묘사할 수 있으며, 기존의 연구들은 응력 스트레스와 수명을 대수변환 시키더라도 응력이 감소하면 산포가 증가하고 있는 현상을 수용할 수 있는 모형을 추가로 가정하였지만, RFL 모형은 이런 별도의 추가 모형에 대한 가정을 하지 않고 그림 2와 같이 관측중단을 고려하더라도 대수변환된 수명의 사분위수 범위(0.75 분위수(제 3 사분위수)에서 0.25 분위수(제 1사분위수)를 차감한 값)가 스트레스가 낮을수록 증가되고 있으므로 이런 현상을 충족하고 있다는 측면에서 이점을 가진다고 할 수 있다.

### RFL 모형하에서 통계적 분석법

본 절에서는 피로한도의 존재, 산포의 스트레스 의존성 등 피로자료의 제반특성을 대체적으로 가지고 있으며 관측중단자료(run-outs, censored data)의 포함여부에 따라 대별되는 AAW(Annealed Aluminum Wire) 자료와 Steel Wire 자료를 대상으로 RFL 모형에 적합하는 과정

을 예시한다.

AAW 자료는 10곳의 응력 수준에서 20개 시험편으로 시험한 것으로 완전자료이며, Steel Wire 자료 75개의 시료수로 동일 응력 수준에서 다수 개가 시험된 자료와 그렇지 않은 자료로 이루어져 있고 관측중단자료를 포함하고 있다. 이 두 자료에 대해 Meeker와 Escobar에 의해 신뢰성 분석을 위해 개발한 SLIDA(S-plus Life Data Analysis)를 이용하여 RFL 모형의 모수(식 (1)의  $\beta_0, \beta_1$ ,

표 1 확률적 피로한도모형 적합 결과

피로시험자료	AAW 자료	Steel Wire 자료
	$\beta_0=14.090$	$\beta_0=25.33$
	$\beta_1=-0.961$	$\beta_1=-2.304$
모수 추정값	$\sigma=0.336$	$\sigma=0.181$
	$\mu_r=3.920$	$\mu_r=6.265$
	$\sigma_r=0.010$	$\sigma_r=0.070$

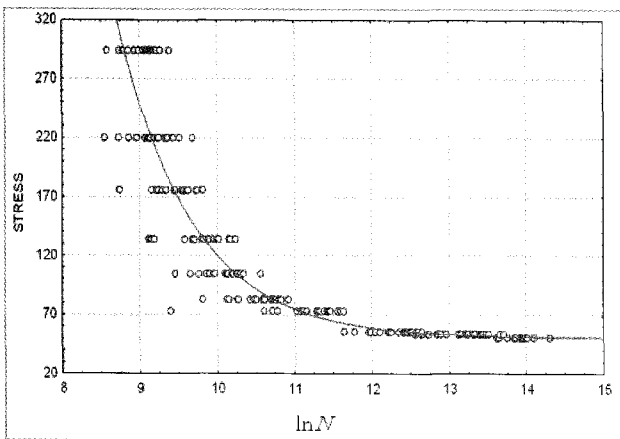


그림 3 AAW 자료에 RFL 모형을 적합한 결과

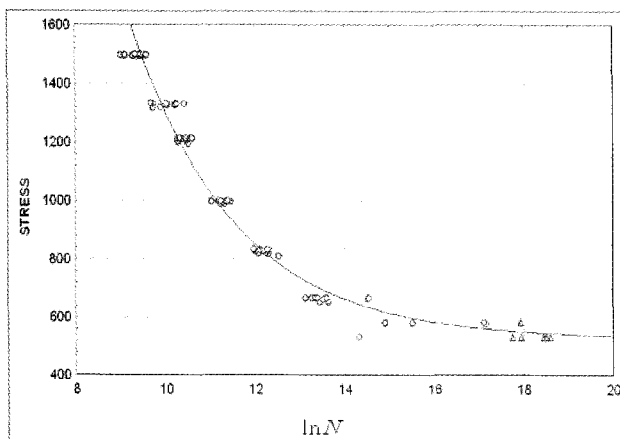


그림 4 Steel Wire 자료에 RFL 모형을 적합한 결과

$V=ln(\gamma)$ 의 평균  $\mu_\gamma$ 과 표준편차  $\sigma_\gamma, \varepsilon$ 의 표준편차(여기서  $\varepsilon$ 의 평균은 "0"임)로 5가지 임)를 추정된 결과가 표 1에 요약되어 있다. 여기서 모수 추정법으로 통계적 성질이 우수하고 관측중단자료를 다룰 수 있는 최우추정법(maximum likelihood estimation)을 채택하고 있다.

표 1의 모수 추정결과를 이용하여 AAW 자료와 Steel Wire 자료에 RFL 모형의 적합도를 도시적으로 파악하기 위하여 그래프로 표현한 것이 그림 3과 그림 4이며, 'o' 표시('Δ'는 관측중단자료)는 실제 자료값을 나타내므로 이 점들과 적합된 곡선을 이용하여 모형의 적합도를 평가할 수 있다. 그림 3과 그림 4를 보면 AAW 자료와 Steel Wire 자료에 RFL 모형이 잘 적합되고 있음을 알 수 있으며, 기 개발된 여러 모형보다 적합도가 우수하다고 판명되었다.(참고문헌 (1) 참조)

### RFL 모형하에서 가속수명시험계획

피로시험은 S-N 곡선 적합, 특정 피로수명에서의 피로강도 또는 피로한도를 추정하는 데 활용되며, 이에 관한 다수의 시험계획이 알려져 있지만 이들의 타당성과 유용성이 실험과 시뮬레이션 등에 의해 확인되고 있지 않다. 피로한도만을 추정하는 방법으로 probit 법이 활용되나 요구되는 시료 수가 많으며, 추정의 정밀도마저 높지 않다고 알려져 있으며, 이의 대안으로 staircase(up-and-down)법이 추천되고 있다. 즉, 피로시험법 중 가장 널리 쓰이는 JSME S002 통계적 피로시험법에 소개된 14 S-N 시험법은 14-15개의 시험편으로 S-N 곡선의 경사부에 속하는 4개의 응력 수준에서 각 응력당 2개씩 8개를 시험하며, 수평부는 6개를 할당하여 피로한도를 구하는 staircase법을 채택하여 경사부와 수평부(피로한도의 중앙값 또는 평균)를 동시에 구할 수 있는, 현업에서 가장 많이 활용되는 시험법이다. 그러나 이 시험방법의 통계적 효율성, 시험수준과 할당시료개수의 타당성, 시험계획의 가정에 대한 강건성(robustness), staircase법의 스트레스 간격 등의 validation에 관한 연구가 미흡한 편이다.

피로시험이 속하는 가속수명시험 계획은 몇 군데서 시

협할 것인가, 그 수준은 어디인가, 투입되는 시료수와 각 수준에 할당되는 시료의 비율은 어떻게 할 것인가, 각 수준의 시험시간 등을 규정하는 것으로 통계적 효율과 경제성을 고려하여 적절히 설계되어야 한다. 여기서 설계기준은 주로 피로한도의 특정 분위수의 추정 정밀도, 모든 모수들의 정밀도, 시험비용 등이 될 수 있다.

RFL 모형하에서의 시험계획으로 통계적 정밀도를 최대화하는 3 수준의 시험계획(각 응력 수준과 시료의 할당비율 제공)이 개발되어 있는데(참고문헌 (2) 참조), 모형이 적정하다면 세 곳의 시험으로 충분하지만 모형을 타당성을 평가할 수 있도록 4 곳 이상(14 S-N법은 경사부만 4 곳임)에서 시험되는 실용적 시험계획의 개발과 이를 규격화하는 연구가 요망된다.

### RFL 모형의 적용 사례

피로시험자료에 RFL 모형을 적용하여 모형의 유용성을 입증하는 다수의 연구 중에서 Zhu 등(2006)은 그림 6(여기서 SDAS는 이차 수지상 간격(Secondary Dendrite Arm Spacing)임)의 자동차 엔진 부품에 사용되는 Al-Si-Cu(E319) 합금의 피로현상에 미세구조와 온도(20°C, 150°C, 250°C)의 영향을 조사하기 위해 사이클 동안 시험을 수행하였다. 초음파 피로시험을 통해 획득한 자료에 피로한도를 구하기 위해 널리 활용하고 있는 staircase 방법과 수명은 대수정규분포를 따르고 피로한도가 와이블 분

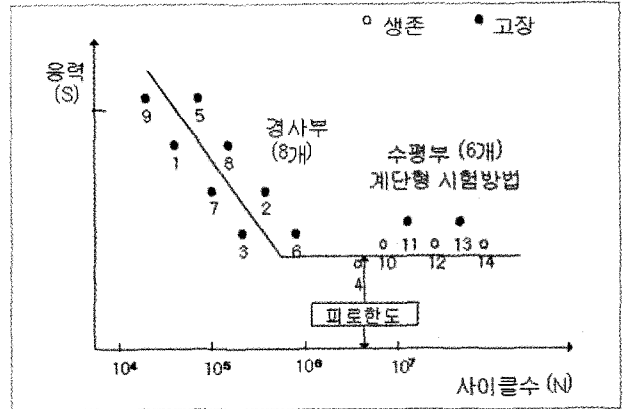


그림 5 14 S-N 방법에 의한 피로한도시험

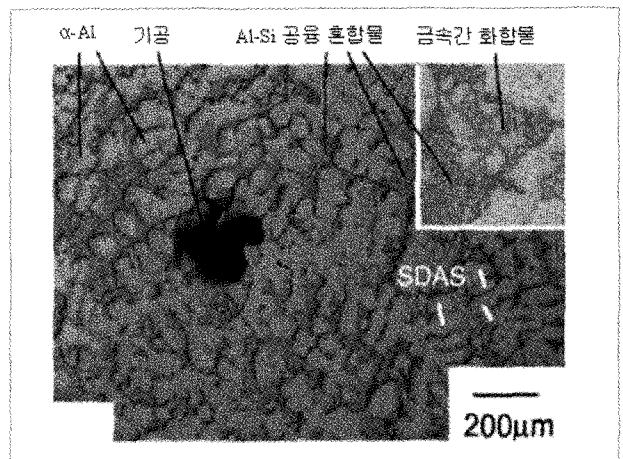


그림 6 E319 합금의 미세구조

표 2 E319 합금의 피로한도 추정결과

분석법	20°C	150°C	250°C
Staircase 방법(MPa)	85	75	58
확률적 피로한도모형(MPa)	84	76	58

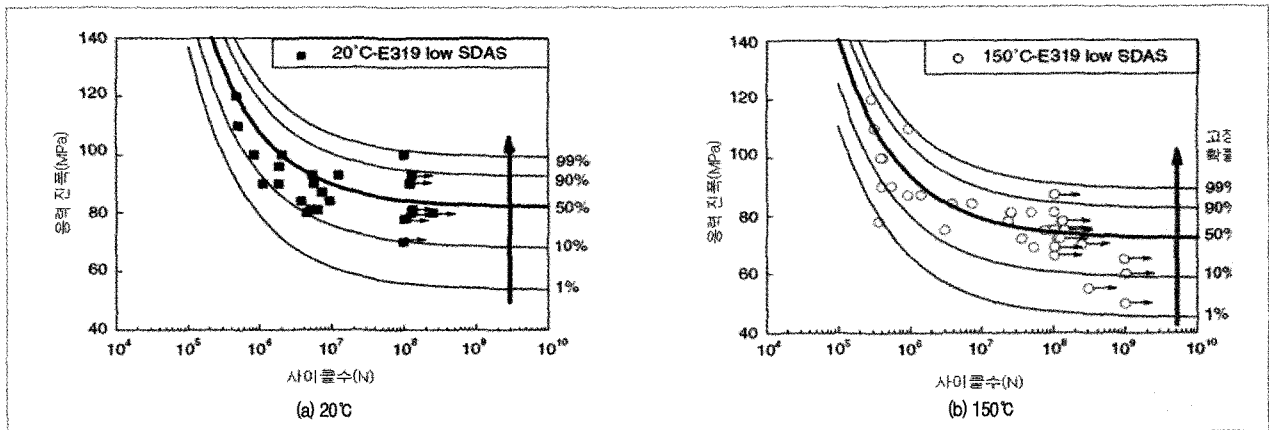


그림 7 20°C와 150°C에서의 E319 합금 자료에 대한 RFL 모형 적합 결과

포를 따를 경우 RFL 모형을 적용하여 구한 피로한도를 표 2와 같이 추정하여 비교하였다.

또한 20°C와 150°C에서 E319합금 자료에 적합한 RFL 모형 결과가 그림 7의 (a)와 (b)에 P-S-N 곡선 형태로 도시되어 있는데, 경사부와 피로한도를 동시에 구하고 있으며 온도가 높아지면 수명과 피로한도가 감소됨을 알 수 있다. 표 2에서와 같이 staircase 시험법과 RFL 모형을 적용하여 구한 피로한도가 거의 유사함을 보이고 있으므로 RFL 모형이 피로한도를 구하는데 효과적인 통계적 접근법임을 예증하고 있다.

## 향후 연구 방향

기계재료의 피로수명을 구하기 위해 수행되는 피로시험은 가속수명시험의 일종인데, 이를 통해 획득된 피로시험 자료는 변환된 스트레스 하에서도 발생하는 산포의 증가 경향, 경사부와 수평부가 꺾임 형태로 연결되는 현상, 경사부와 수평부를 동시에 적합할 수 있는 통계적 기법의 활용이 힘든 단점을 가진 기존의 피로곡선 모형을 보완한 확률적 피로한도(RFL)모형은 실제 피로시험자료에 성공적으로 적용되고 있으나, 기계공학 분야에는 통계적 이론의 생소함, 활용 software의 접근의 어려움 등으로 특히 국내에서는 알려져 있지 않는 편이다.

향후 다음과 같은 연구가 수행되면 이런 난점을 충분히 해소할 수 있을 것이다.

첫째, 현재 개발된 소프트웨어인 SPLIDA는 학술용이며, S+ 언어가 구동되어야한 사용할 수 있으므로 보다 범

용적인 소프트웨어의 개발과 보급이 필요하다.

둘째, 공학분야를 주로 다루는 일부 응용통계학자와 기계금속 전문가 집단에만 알려져 있는 RFL 모형의 활용도를 제고하기 위해 현업에서 획득된 피로한도가 존재하는 다양한 피로시험의 자료에 적용하여 RFL 모형의 타당성과 우수성을 광범위하게 평가할 필요가 있다.

셋째, 전술한 바와 같이 RFL모형 하에서 규격화 할 수 있는 피로시험법의 개발을 위해서는 기계, 금속, 산업공학과 통계학 분야 전문가의 학제적 연구가 절실히 요구된다.

## 참고문헌

- (1) 서순근, 조유희(2003), "피로곡선 모형의 통계적 분석 및 비교," 품질경영학회지, 31권, pp. 165-182.
- (2) Pascual, F. G.(2003), "Theory for Optimal Test Plans for the Random Fatigue-Limit Model," Technometrics, Vol. 45, pp. 130-141.
- (3) Pascual, F. G. and Meeker, W. Q.(1999), "Estimating Fatigue Curves with the Random Fatigue-Limit Model," Technometrics, Vol. 41, pp. 277-290.
- (4) Zhu, X., Shyam, A., Jones, J. W., Mayer, H., Lasecki, J. V. and Allison, J. E.(2006), "Effects of Microstructure and Temperature on Fatigue Behavior of E319-T7 Cast Aluminum Alloy in Very Long Life Cycles," International Journal of Fatigue, Vol. 28, pp. 1566-1571.

## 기계용어해설

### 염욕(鹽浴)(Salt Bath; 솔트 배스)

염화바륨, 염화 나트륨 등의 염류를 용해하고 그 속에서 강 등의 금속재료를 고르게 가열하여 열처리 효과를 거둘 수 있는 가열법의 일종.

### 염수속도법(Salt Velocity Method; 鹽水速度法)

식염수의 전기전도도가 보통의 물에 비해서 매우 높다는 것을 이용하여 물의 유량을 측정하는 방법.