

# 가속모델 개발방법 소개

정 동 수 | 한국기계연구원 신뢰성평가센터, 책임연구원 | e-mail : jds667@kimm.re.kr

가속시험은 사용조건보다 가혹한 시험조건을 사용하여 짧은 시간에 제품의 수명을 평가한다. 이 글에서는 가속시험에 활용되는 가속모델에 대한 개발절차와 유효성 검증방법을 간단하게 소개하고자 한다.

**제** 품의 개발주기가 점점 단축되는 시대적 상황에 대응하고 글로벌 시장에서 제품의 경쟁력을 확보하기 위하여 기업들은 단기간에 높은 신뢰도를 갖춘 제품을 개발하는 데 노력하고 있다. 수명시험 혹은 내구시험은 사용조건에서 제품의 신뢰도를 평가하는 하나의 시험기술로 사용되지만 많은 시간과 비용이 필요하다. 가속시험은 제품의 신뢰도가 증가할수록 늘어나는 시험시간 문제를 해결하기 위해 인위적으로 제품의 수명을 단축시키는 시험 방식이다. 즉, 사용조건보다 가혹한 조건에서 시험하여 짧은 시간에 제품의 고장을 발생시켜 얻은 수명데이터를 가지고 신뢰성을 평가한다.

## 스트레스 부가 방법

가속시험에 이용되는 스트레스는 부과하는 방법에 따라 여러 가지로 구분될 수 있다. 대표적인 스트레스 부과방법으로는 일정 스트레스 시험(Constant Stress Test), 계단형 스트레스 시험(Step Stress Test), 점진적 스트레스 시험(Progressive Stress Test), 주기적 스트레스 시험(Periodic Stress Test)이 있다.

일정 스트레스 시험은 제품에 부과하는 스트레스를 시험의 종결시점까지 일정하게 유지하는 시험방법으로 가장 널리 사용되는 가속시험이다. 그림 1은 사용조건보다 높은 3개의 스트레스 수준  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ 에서 시험하는 일정 스트레스 시험의 스트레스 수준과 고장시점을 나타낸 것으로, x 표시는 고장시점을 나타내고, →는 관측중단시점을 나타

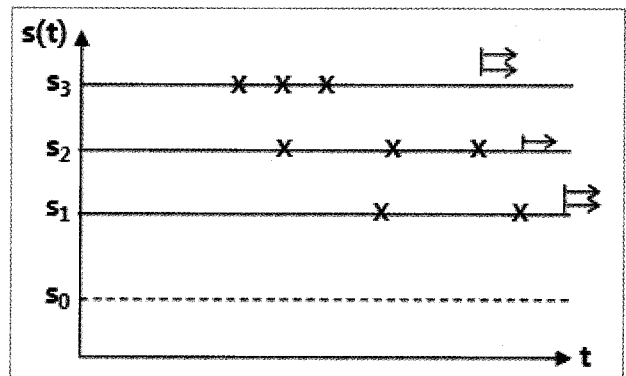


그림 1 일정 스트레스 시험

내며,  $s_0$ 은 사용조건인 스트레스 수준이다. 대부분의 제품은 사용할 때 일정한 스트레스를 받으므로 일정 스트레스 시험은 제품의 실제 상황을 잘 반영하며, 시험을 수행할 때 스트레스 수준의 유지 및 관리가 편하다는 장점이 있다. 그리고 이 경우에 대한 가속모형이 이론적으로 많이 연구되어 있고, 자료의 분석과 시험방법의 최적화에 대한 많은 연구결과가 있어서 이용에 편리하다.

계단형 스트레스 시험은 스트레스 수준을 계단형으로 변화시키는 시험이다. 주어진 스트레스 수준에서 시험을 시작하여 일정시점까지 고장을 관측하고 이 시점까지 고장이 안 난 제품에 대해서 스트레스를 더 높은 수준으로 높여 일정시간 시험한다. 그리고 이 시점까지 고장이 안 난 제품에 대해서 더 높은 스트레스 수준에서 시험하는 과정을 반복한다. 그림 2는 계단형 스트레스 시험에서 스트레스 수준의 변화를 그림으로 나타낸 것이다. 계단형 스트레스 시험은 제품의 고장데이터를 빠른 시간 내에 얻을 수

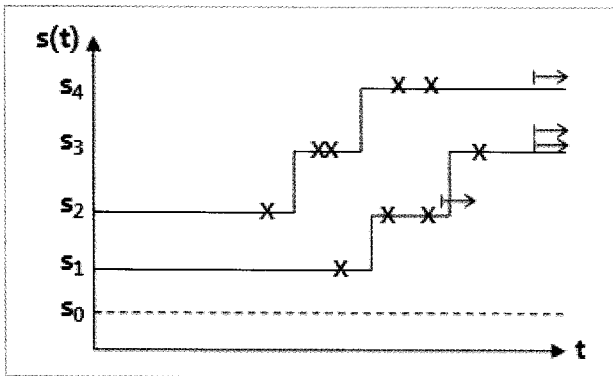


그림 2 계단형 스트레스 시험

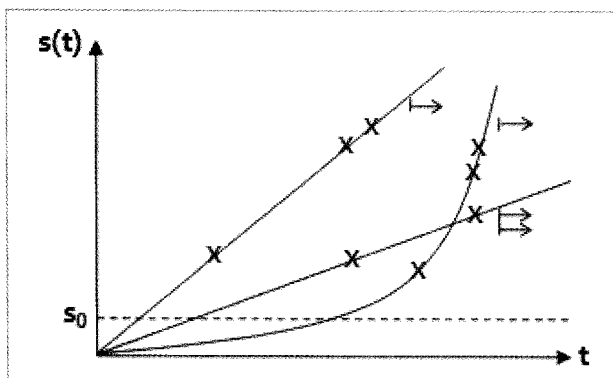


그림 3 점진적 스트레스 시험

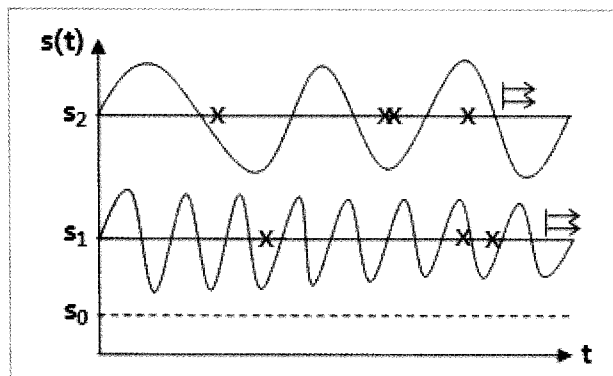


그림 4 주기적 스트레스 시험

있는 장점이 있으나 고장데이터에 대한 통계적 분석을 위해서는 스트레스의 누적효과를 나타내는 모형에 대한 가정이 필요하고, 제품의 실제 사용 환경을 잘 반영하지 못하는 단점이 있다.

점진적 스트레스 시험은 제품에 가하는 스트레스 수준을 연속적으로 증가시키는 시험을 말한다. 그림 3은 점진

적 스트레스 시험에서 스트레스 수준의 변화를 그림으로 나타낸 것이다. 이 시험에서 스트레스를 시간에 따라 선형적으로 증가시키는 시험을 램프형 스트레스 시험(Ramp Stress Test)이라 부른다. 점진적 스트레스 시험은 계단형 스트레스 시험에서 스트레스 수준변화시점의 간격을 극소화하는 경우와 동일하므로 계단형 스트레스 시험의 장단점을 그대로 가진다.

그림 4의 주기적 스트레스 시험은 시험제품에 가하는 스트레스의 수준이 사인곡선(Sine Curve)과 같이 주기적으로 변화하는 시험이다. 많은 기계의 부품으로 사용되는 금속재료는 압축력과 인장력을 반복적으로 받는다. 이런 제품의 경우에 가속시험은 실제 사용조건보다 큰 압축력과 인장력을 반복적으로 가하는 시험을 수행하며 이런 형태의 시험이 주기적 스트레스 시험이다.

## 가속계수

가속계수(AF: Acceleration Factor)는 가속시험의 중요한 개념으로 사용조건 수명을 가속조건 수명으로 나눈 비로 정의한다. 여기서, 수명이란 신뢰성 척도 관점이며, 수명분포의 대표 값(평균수명, 고장률, 특성수명,  $B_{100p}$  수명 등)을 비교하여 가속계수를 계산하며, 반드시 동일한 기준을 사용한다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{alt}}$$

여기서,  $L_{use}$ 는 사용조건 수명이며,  $L_{alt}$ 는 가속조건 수명을 나타낸다.

가속계수의 주된 사용목적은 높은 스트레스 수준에서 얻은 수명을 이용하여 낮은 스트레스 수준(사용조건)의 수명을 예측하는 것이다. 가속계수를 사용할 때, 두 스트레스 수준에서의 수명분포는 동일한 형상을 가지는 것으로 가정한다.

## 가속모델 개발 방법

### 고장모드로부터 가속모형 선정

기계류부품에서 많이 사용되는 가속모형은 고장모드에

따라 크게 세 가지로 분류된다.

아레니우스 모형은 온도에 의한 가속시험에서 가장 널리 사용되는 가속모형이다. 스웨덴의 화학자 Svante August Arrhenius는 액체, 기체, 또는 고체가 화학반응을 할 때 발생하는 활성화 에너지와 온도의 반응률에 대한 연구를 통해 아레니우스 방정식을 발표하였다. 온도가 높아지면 불안정한 상태(활성화 상태)에 있는 분자 수가 많아지고 분자 활동이 활발하여 분자 간 충돌횟수가 많아지므로 반응속도가 증가한다. 따라서 품목의 온도상승은 그 품목에 잠재되어 있는 고장을 유발한다. 가령, 전기모터의 대부분의 고장은 베어링에서 야기되는 과도한 열에 기인한다.

$$L = C \cdot e^{\frac{E_A}{k \cdot T}}$$

여기서, C는 모형의 상수이며, T는 절대온도(°C +273.16)이며,  $E_A$ 는 활성화 에너지이며, k는 볼츠만 상수 ( $8.623 \times 10^{-5}$  eV/K)이다.

역승 모형은 전압, 부하, 압력 등 온도이외의 비열 스트레스를 이용하여 절연체, 베어링, 백열전구 등의 가속시험에 널리 사용되는 가속모형이다.

$$L = \frac{1}{K \cdot V^n}$$

여기서, K와 n은 모형의 상수이며, V는 비열 스트레스이다. 역승모형에서 비열 스트레스가 수명에 미치는 영향은 n에 의해 결정된다. n의 절대 값이 클수록 스트레스의 영향력도 커진다. 따라서 n=0이면 스트레스가 수명에 미치는 영향이 없음을 나타낸다.

온도-비열 모형은 온도와 비열 스트레스(전압, 부하, 압력 등)를 동시에 가속 스트레스 인자로 적용하는 경우 아레니우스 모형과 역승모형을 결합할 수 있으며 다음과 같이 표현한다.

$$L = \frac{C}{V^n} \cdot e^{\frac{E_A}{k \cdot T}}$$

스트레스 인자가 2개 이상이 고려되면 인자들 간의 교호작용(Interaction)이 수명에 영향을 줄 수 있게 된다. 상기 식들은 교호작용이 적용되지 않는 경우이며 교호작용은 복잡하여 다음 기회에 설명하기로 한다.

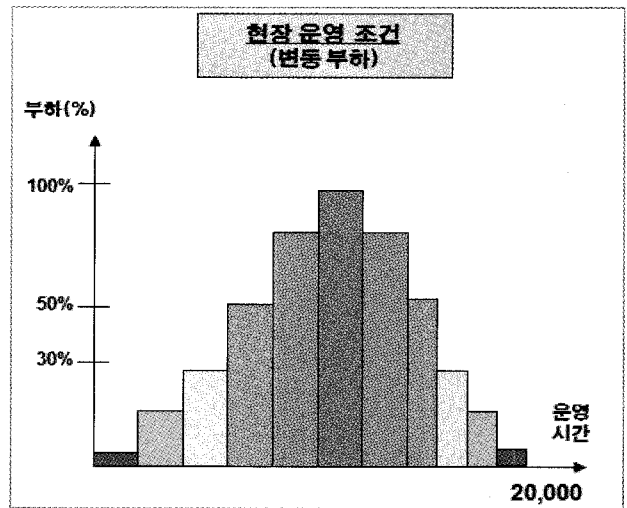


그림 5 현장운영조건

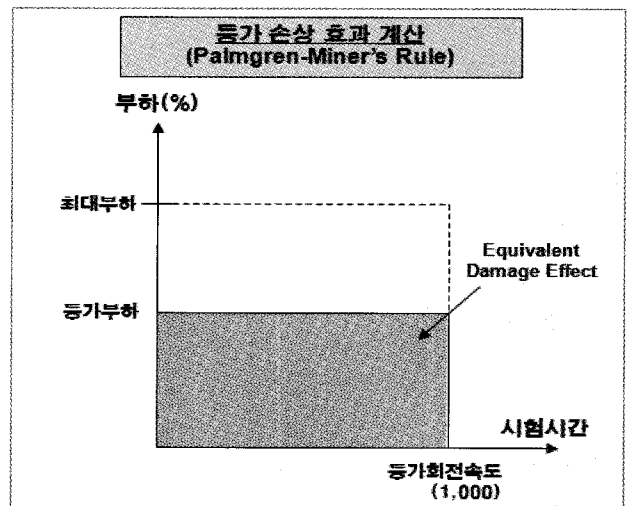


그림 6 등가손상효과 계산

### Palmgren-Miner's Rule을 이용한 등가손상효과 계산

현장 운영조건으로부터 그림 5와 같은 변동부하와 사용시간을 조사한 후 Palmgren-Miner's Rule을 이용하여 그림 6과 같이 한 개의 등가부하와 한 개의 시험시간으로 표현되는 등가손상효과를 계산한다. 즉 변동부하와 사용시간에 의한 전체 누적손상은 등가손상효과와 동일함을 의미하고 있다.

### 스트레스 수준 결정

일반적으로, 기계공학 분야의 관련규격을 살펴보면 가속

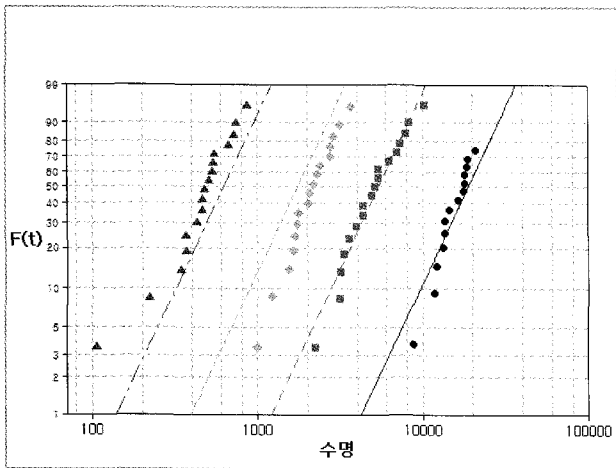


그림 7 와이בל 분포로부터 가속모델 확인

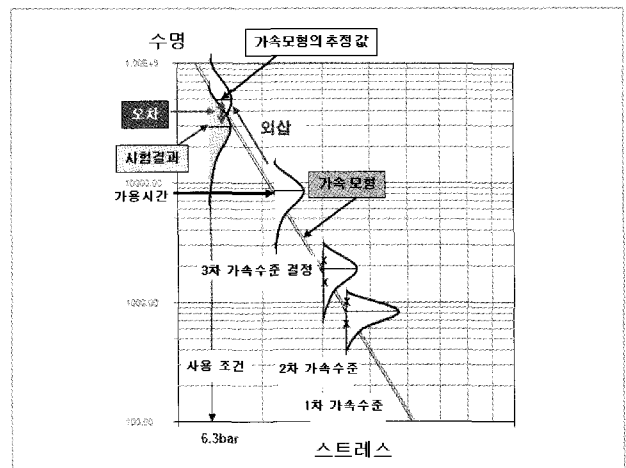


그림 8 CALT를 적용한 가속모델 교정

스트레스 수준은 규격한계의 120%, 133%, 그리고 150%를 사용한다. 관련 정보가 없는 경우에는 실험을 통하여 사용 조건에서 발생하는 고장모드가 변하지 않는 수준으로 결정한다. 한 예로 계단형 스트레스 부과방법이 있다. 처음에는 부품에 특정시간 동안 일정한 스트레스를 부과한 후 고장이 발생하지 않을 경우 좀 더 높은 수준의 스트레스를 부과하는 방식이다. 고장이 발생할 때까지 스트레스를 단계적으로 증가시키면 최대 스트레스를 얻을 수 있다.

### 가속모델의 유효성 검증

일반적으로 가속시험을 통해서 사용조건 수명을 예측한다. 하지만 사용조건 수명데이터를 얻을 수 있는 경우라면 가속모델의 유효성 검증할 수 있다. 가속모델의 유효성 검증은 사용조건 시험결과와 가속모델로부터 얻은 추정 값을 비교하여 실시한다. 와이בל 분포를 예로 들면, 우선 가속모형과 사용조건 결과로부터 추정된 형상모수가 같은지 확인한다. 다음으로 가속모형의 척도모수가 사용조건 척도모수의 신뢰구간에 포함되면 가속모형의 유효성이 존재한다고 할 수 있다.

### 맺음말

최근 사용자들이 제품의 신뢰성에 대한 인식이 증가하면서 기업들은 제품의 설계단계부터 생산단계까지 신뢰성을 증진시키기 위하여 부단히 노력하고 있으며 신뢰성 평가의 중요한 기법인 가속시험에 대한 각별한 관심을 보이고 있다. 특히, 개발주기가 점점 단축되고 있는 시대적 상황과 향후, 점차 가중되는 PL법에 적극적으로 대응하기 위해서는 신뢰성 평가 기술과 더불어 가속시험의 중요성이 크게 부각되고 있다. 이러한 가속시험은 현장고장을 예측하고 진단하는 개발단계뿐만 아니라 현장고장을 유도하고 설계지원을 통하여 신뢰성을 향상시키는 양산제품에도 효과적으로 활용되고 있다.

가속시험을 결정하는 가속모델에 대한 유효성을 증가시키기 위해서는 운영조건, 고장모드, 그리고 스트레스의 종류 등에 대한 현장정보가 충분히 수집되어야 한다. 부품을 공급하는 개발업체에서 이러한 정보를 수집하기란 쉽지가 않다. 따라서 완제품을 조립하는 수요기업은 현장에서 수집된 고장정보를 개발업체에 제공하였으면 한다. 부품의 신뢰성 향상은 곧 완제품의 신뢰성 향상과 직결되기 때문에 부품업체와 완제품업체가 서로 상생하기 위해서는 긴밀한 정보교류와 상호협력이 무엇보다도 절실하다.

CALT : 교정가속수명시험(Calibrated Acceleration Life Test)