

가속시험을 이용한 신뢰성평가

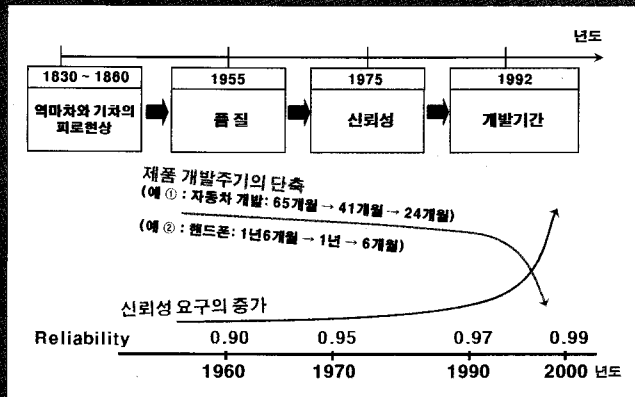
김도식, 장무성 한국기계연구원

[요약문]

가속시험은 제품의 신뢰도가 증가할수록 늘어나는 시험시간 문제를 해결하기 위해 인위적으로 제품의 수명을 단축시키는 시험방식이다. 즉, 사용조건보다 가혹한 조건에서 시험하여 짧은 시간에 제품의 고장을 발생시켜 얻은 수명데이터를 가지고 사용조건 신뢰성을 평가한다. 본고에서는 가속시험과 가속모형에 대해 살펴보고 기계류 부품에 적용 가능한 가속시험 방법론, 끝으로 예제를 통해 가속시험을 이용한 신뢰성평가 방법을 소개하고자 한다.

1. 서론

글로벌 경쟁에서 경쟁사에 비해 우위를 선점하기 위해서 기업들은 단기간에 높은 신뢰도를 갖춘 제품을 개발하는데 노력하고 있다. 하지만 신뢰도가 높은 제품의 경우, 수명에 대한 정보를 사용조건에서의 신뢰성시험으로 얻기 위해서는 많은 시간과 비용이 필요하다. 게다가 수명주기가 짧은 제품의 경우에는 신뢰성 자료를 얻는 시점이 제품의 수명주기보다 길어져 현실적으로 무의미한 경우도 발생한다^[1]. 따라서 시험기간을 단축하기 위해서 사용조건보다 가혹한 조건에서 실시하는 가속시험(Accelerated Test)을 실시하게 된다. 가속시험은 수명데이터를 빨리 얻을 수 있는 장점으로 인하여 산업현장에서의 수요가 점차적으로 늘어나고 있다.



가속시험을 통해서 얻을 수 있는 효과를 보면, 설계 및 양산단계의 개발기간 단축 및 비용절감과 사용조건에서의 평균수명, 고장률, B10 수명 등을 단기간에 추정하여 제품의 신뢰성을 평가하는 효과를 얻을 수 있다.

본고에서는 가속시험에 대해 살펴보고, 가속모형으로 아레니우스(Arrhenius) 모형, 역승(Inverse Power Law) 모형, 온도-비열(Temperature-Nonthermal) 복합모형, GLL(General Log-Linear) 모형을 소개하고자 한다. 그

리고 기계류 부품에 적용 가능한 가속시험 방법론과 예제를 통해서 가속시험을 이용한 신뢰성평가 방법을 설명하고자 한다.

2. 가속시험의 소개

2.1 가속시험의 종류

가속시험은 시험목적에 따라 정성적 가속시험(Qualitative Accelerated Test)과 정량적 가속시험(Quantitative Accelerated Test)으로 구분할 수 있다^[2]. 혹은 2가지 가속시험에 환경 스트레스 검사(ESS; Environmental Stress Screening)와 번인(Burn-in) 시험을 추가하여 3가지로 구분할 수도 있다^[3].

정성적 가속시험은 고장 자체에 대한 정보나 고장모드만을 얻기 위한 시험으로서 Elephant Tests, Pressure Cooker Tests, Highly Accelerated Life Test(HALT), Shake and Bake Tests 등으로 부르기도 한다. 정성적 가속시험은 하나의 가혹한 스트레스 수준이나 몇 개의 스트레스 조합, 또는 시간에 따라 변하는 스트레스(스트레스 사이클링, 저온-고온 등) 하에서 소수의 샘플들로 시험한다. 정성적 시험을 통과하면 그 품목은 합격되며, 그렇지 못한 경우는 고장원인을 제거하기 위한 설계 개선작업에 들어간다. 원칙적으로 이 시험에서는 사용조건에서의 신뢰도를 정량적으로 구하지는 않는다. 그러나 정량적 시험의 설계에 필요한 스트레스의 유형이나 수준 등에 관한 중요한 정보를 제공한다^[2].

정량적 가속시험은 제품의 수명특성이나 고장률 등 신뢰도에 관한 정량적 정보를 얻기 위한 시험을 말한다. 정량적 가속시험 방법으로 사용률(Usage rate) 가속과 고 스트레스(Overstress)에 의한 가속방법 등이 널리 사용된다^[2].

본고에서 주로 설명하는 가속시험은 정량적 가속시험을 말한다.

ESS는 진동, 온도변화, 충격의 조합 하에서 제품에 가속시험을 실시하는 것과 관련 있는데, ESS는 2가지 중요한 목적이 있다. 첫째는 개발기간동안 설계 및 제조 결함을 밝혀내는 것이다. 즉, 사용현장에서 발견되는 고장이지만 육안검사나 전기시험을 통해 검출되지 않는 잠재적 결함을 확인하여 제거하는 것이다. 둘째는 양산단계에서 번인을 가속화하여 신뢰도를 향상시킨다^{[3][4]}.

번인은 ESS의 특별한 경우로 고객에게 전달되기 전에 불량품을 선별하는 시험이다. ESS와 번인은 샘플이 아니라 전체 모집단에 시험을 실시한다^[4].

2.2 가속방법

2.2.1 사용률 가속

실제 사용조건에서 연속적으로 사용하지 않는 제품을 연속적으로 가동시킴으로써 고장시간을 단축시키는 방법이 사용률 가속방법이다. 예로 1주일에 7시간 가동하는 식기 세척기를 24시간 가동하면 시험시간을 24배 단축시킬 수 있다. 이 시험방식에서 얻어진 수명자료에 대해서는 사용조건 시험자료 분석기법과 동일한 방식으로 분석하여 제품의 수명특성들을 해석할 수 있다^[2]. 사용률을 높여 가속시키는 예로, 베어링을 실제 사용속도보다 빠르게 시험하거나, 절연 내구시험에 사용하는 교류전압을 60Hz대신 412Hz에서 시험하는 경우, 냉장고 문의 내구 개폐시험, TV의 on-off 스위치시험 등이 존재한다^[5].

2.2.2 고 스트레스 가속

PC, 변압기 등과 같이 연속적으로 사용하는 제품들에 대해서는 사용률 가속시험방법에 의한 시험시간 단축효과는 기대하기 어렵다. 이 경우에는 사용조건보다 높은 스트레스를 부과하여 제품의 수명을 단축시키는 방법을 사용한다. 가속조건에서 얻어진 수명시험데이터를 이용하여 사용조건에서의 수명특성 값을 예측한다. 이 때 가속인자로는 온도, 습도, 전압, 진동, 압력, 부하 등이 많이 사용된다. 일반적으로 부품이나 소재의 강도는 설계여유를 고려하여 주

어진 사용조건 부하보다 높은 수준으로 설계된다. 시간이 경과함에 따라 강도가 서서히 저하되어 사용조건 부하보다 강도가 작아지면 고장이 발생한다. 인위적으로 부하, 즉, 스트레스를 높임으로서 고장을 사용조건에서보다 빨리 유발시키는 방법이 고 스트레스에 의한 가속시험이다^[2].

2.3 가속 스트레스의 부과방법

가속시험은 제품에 스트레스를 부과하는 방법에 따라 여러 가지로 구분할 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 2는 사용조건보다 높은 3개의 스트레스 수준 S_1, S_2, S_3 에서 시험하는 일정 스트레스 시험의 스트레스 수준과 고장시점을 나타낸 것으로, x 표시는 고장시점과 관측중단시점을 나타내며, S_0 은 사용조건 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^[1].

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 3은 계단형 스트레스 시험에서 스트레스 수준의 변화를 그림으로 나타낸 것이다. 계단형 스트레스 시험은 제품의 고장데이터를 빠른 시간 내에 얻을 수 있는 장점이 있으나 고장데이터에 대한 통계적 분석을 위해서는 스트레스의 누적효과를 나타내는 모형에 대한 가정이 필요하고, 제품의 실제 사용 환경을 잘 반영하지 못하는 단점이 있다^[1].

점진적 스트레스 시험은 제품에 가하는 스트레스 수준을 연속적으로 증가시키는 시험을 말한다. 그림 4는 점진적 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^[1].

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^[1].

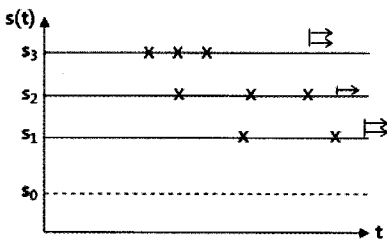


그림 2. 일정 스트레스 시험

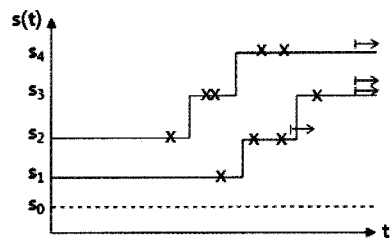


그림 3. 계단형 스트레스 시험

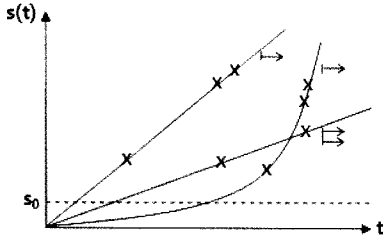


그림 4. 점진적 스트레스 시험

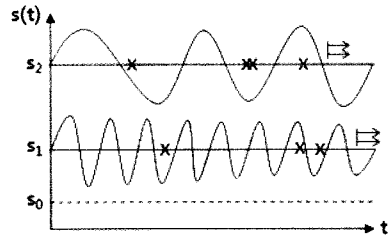


그림 5. 주기적 스트레스 시험

2.4 가속성의 성립조건

가속시험은 품목의 스트레스(온도, 압력, 전압, 습도, 진동 등)를 사용조건보다 높게 부과하여 고장 발생 속도를 증가시키는 시험이다. 가속시험이 가능하기 위해서는 고장모드의 일치와 가속성이 반드시 성립해야만 한다.

동일품목에 동일한 스트레스를 부과하더라도 스트레스의 수준에 따라 서로 다른 고장모드가 발생할 수 있다. 시험 시간을 단축하기 위해 스트레스를 너무 높게 부과하게 되면 제품의 고장은 빨리 발생하지만, 사용조건과 다른 고장모드가 발생하기도 한다. 고장모드의 일치란 스트레스를 가혹하게 부과하더라도 고장모드가 변하지 않고 사용조건에서 발생하는 고장모드를 재현하는 것을 말한다.

수명데이터의 분석결과로부터 가속성의 성립여부를 확인할 수 있는데, 사용조건과 가속조건 수명분포 추정선의 기울기(와이블분포의 경우 형상모수 β)가 그림 6과 같이 평행하게 나타나는 경우에 가속성이 성립한다고 한다.

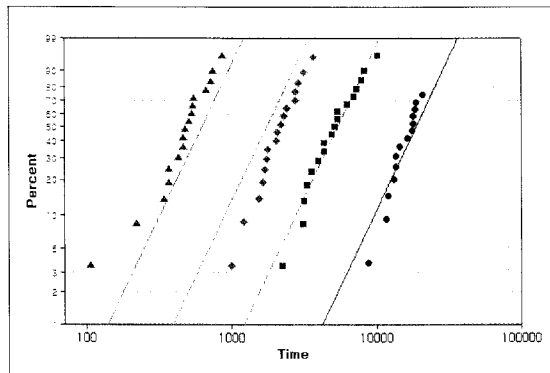


그림 6. 가속시험의 가속성 확인

2.5 가속계수

가속계수(AF; Acceleration Factor)는 가속시험의 중요한 개념으로 사용조건 수명을 가속조건 수명으로 나눈 비로 정의하며, 식 (1)과 같이 표현한다. 여기서 수명이란 신뢰성 척도 관점이며, 수명분포의 대표 값(평균수명, 고장률, 특성수명, B_{100p} 수명 등)을 비교하여 가속계수를 계산하며, 반드시 동일한 기준을 사용한다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{alt}} \tag{1}$$

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^[6]. 가속계수를 사용할 때, 두 스트레스 수준에서의 수명분포는 동일한 형상을 가지는 것으로 가정한다. 만약 고장데이터의 수명분포가 와이블분포인 경우 두 스트레스 수준에서의 형상모수는 동일해야만 가속계수를 활용하는 의미가 있다. 와이블분포의 평균수명(MTTF; Mean Time to Failure)을 이용하면 가속계수를 식 (2)와 같이 척도모수(특성수명)의 비로 표현할 수 있다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{alt}} = \frac{MTTF_{use}}{MTTF_{alt}} = \frac{\eta_{use} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_{use}}\right)}{\eta_{alt} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_{alt}}\right)} \quad (2)$$

여기서, $\beta_{use} = \beta_{alt}$, η 는 와이블분포의 척도모수이며, $\Gamma(\cdot)$ 는 감마함수이다.

3. 가속모형

3.1 아레니우스(Arrhenius) 모형

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 반응율에 대한 연구를 통해 아레니우스 방정식을 발표하였다^[5].

온도가 높아지면 불안정한 상태(활성화 상태)에 있는 분자 수가 많아지고 분자활동이 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^[2].

아레니우스 모형의 식은 수명이 반응율의 역수에 비례한다는 원리로부터 다음과 같이 표현한다.

$$L = C \cdot e^{\frac{B}{T}} = C \cdot e^{\frac{E_A}{k \cdot T}} \quad (3)$$

여기서, C는 모형의 상수이며, T는 절대온도($^{\circ}\text{C} + 273.16$)이며, $B = E_A/k$ 이다. E_A 는 활성화 에너지이며, k는 볼츠만 상수($8.623 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)이다^[2].

식 (3)에서 모수 B값을 구하기 위해서는 활성화 에너지를 알아야 한다. 그러나 대부분의 실제 현장에서는 활성화 에너지 값을 알기는 어려우므로 C, B 모두 모형의 상수로 취급한다. 아레니우스 모형에서 B값이 클수록 온도 스트레스가 수명에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있다. 아레니우스 모형에서의 가속 계수는 식 (4)와 같으며, T_u 는 사용조건인 절대온도이며, T_a 는 가속조건인 절대온도이다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{alt}} = \frac{C \cdot e^{\frac{B}{T_u}}}{C \cdot e^{\frac{B}{T_a}}} = e^{\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a} \right)} \quad (4)$$

3.2 역승(Inverse Power Law) 모형

역승모형은 전압, 부하, 압력 등 온도이외의 비열 스트레스를 이용하여 절연체, 베어링, 백열전구 등의 가속시험에 널리 사용되는 가속모형이다. 역승모형의 식은 아래와 같다.



$$L = \frac{1}{K \cdot V^n} \tag{5}$$

여기서, K와 n은 모형의 상수이며, V는 비열 스트레스이다. 식 (5)의 양변에 자연로그를 취하면

$$\ln(L) = -\ln(K) - n\ln(V) \tag{6}$$

와 같이 직선관계로 표현할 수 있다. 여기서 K와 n을 추정하기 위해 그래프에 의한 방법을 주로 사용하며, 직선의 절편과 기울기를 이용하여 각각 구한다.

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.

역승모형에 의한 가속 계수는 식 (7)과 같으며, T_u는 사용조건인 비열 스트레스 수준이며, T_a는 가속조건인 비열 스트레스 수준이다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{alt}} = \frac{\frac{1}{K \cdot V_u^n}}{\frac{1}{K \cdot V_a^n}} = \left(\frac{V_a}{V_u} \right)^n \tag{7}$$

3.3 온도-비열(Temperature-Nonthermal) 모형

온도와 비열 스트레스(전압, 부하, 압력 등)를 동시에 가속 스트레스 인자로 적용하는 경우 아레니우스 모형과 역승모형을 결합하여 온도-비열 모형을 고려할 수 있으며, 식 (8)과 같이 표현한다.

$$L = \frac{C}{V^n} \cdot e^{\frac{B}{T}} = \frac{C}{V^n} \cdot e^{\frac{E_a}{k \cdot T}} \tag{8}$$

여기서, C와 n은 모형의 상수이며, T는 절대온도(°C+273.16), V는 비열 스트레스이며, B=E_a/k이다.

스트레스 인자가 2개 이상이 고려되면 인자들 간의 교호작용(Interaction)이 수명에 영향을 줄 수 있게 된다. 일반적으로 스트레스 인자 3개가 포함된 3인자 교호작용은 무시할 수 있으나, 2인자 교호작용의 경우 수명에 영향을 미칠 수 있다. 하나의 인자의 수준효과가 다른 인자의 수준에 따라서 변화하는 경우 교호작용이 존재한다고 말한다. 식 (8)은 교호작용을 고려하지 않은 가속모형이며, 만약 교호작용을 포함한다면 온도-비열 모형의 식은 (9)와 같이 표현할 수 있으며^[6], e ^{$\frac{A \ln(V)}{kT}$} 이 교호작용 항이다.

$$L = \frac{C}{V^n} \cdot e^{\frac{E_a}{kT}} \cdot e^{\frac{A \ln(V)}{kT}} \tag{9}$$

온도-비열 모형의 식 (8)을 이용하여 가속계수를 구하면 식 (10)과 같다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{alt}} = \frac{\frac{C}{V^n} \cdot e^{\frac{E_a}{k \cdot T_u}}}{\frac{C}{V^n} \cdot e^{\frac{E_a}{k \cdot T_a}}} = \left(\frac{V_a}{V_u} \right)^n \cdot e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a} \right)} \tag{10}$$

3.4 GLL(General Log-Linear) 모형

GLL 모형은 가속 스트레스 인자의 수가 2개 이상이거나 설계 변수가 포함된 경우, 2인자 교호작용이 포함된 경우에 적용할 수 있다. GLL모형은 회귀모형 중의 하나이며, GLL 모형의 수학적 식은 아래와 같다^[7].

$$L = e^{\left(\alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j X_j\right)} \quad (11)$$

여기서, α_0, α_1 는 모형의 계수이며, X 는 적절하게 변환된 가속 스트레스(혹은 설계 변수)이며, n 은 스트레스의 총 개수이다. X 는 스트레스 유형에 따라 적절하게 변환되는데 스트레스 인자가 온도인 경우에는 $1/(C+273.16)$ 로, 비열 스트레스(압력, 전압, 진동 등)인 경우에는 $\ln(X)$ 로 변환한다.

스트레스 인자가 온도, 압력, 전압인 경우 GLL 모형의 식과 가속 계수는 식 (12), (13)과 같다.

$$L = e^{\left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{X_1} + \alpha_2 \ln(X_2) + \alpha_3 \ln(X_3)\right)} \quad (12)$$

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{alt}} = \frac{e^{\left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{X_{1u}} + \alpha_2 \ln(X_{2a}) + \alpha_3 \ln(X_{3a})\right)}}{e^{\left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{X_{1a}} + \alpha_2 \ln(X_{2a}) + \alpha_3 \ln(X_{3a})\right)}} = e^{\alpha_1 \left(\frac{1}{X_{1u}} - \frac{1}{X_{1a}}\right)} \cdot \left(\frac{X_{2u}}{X_{2a}}\right)^{\alpha_2} \cdot \left(\frac{X_{3u}}{X_{3a}}\right)^{\alpha_3} \quad (13)$$

여기서, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 모형의 계수이며, X_{1u} 는 사용조건 of 절대온도, X_{1a} 는 가속조건 of 절대온도, X_{2u} 는 사용조건 of 압력, X_{2a} 는 가속조건 of 압력, X_{3u} 는 사용조건 of 전압, X_{3a} 는 가속조건 of 전압이다. GLL 모형의 모수를 추정하기 위해서 ALTA 혹은 Minitab 프로그램을 활용할 수 있다.

4. 기계류 부품의 가속시험 방법론

4.1 고장모드 및 현장운영조건 확인

품질기능 전개(QFD; Quality Function Deployment), 고장나무분석(FTA; Fault Tree Analysis), 고장모드 및 효과분석(FMEA; Failure Mode and Effect Analysis), 고장 물리분석 등을 이용하여 품목의 주요 고장모드와 스트레스 인자를 찾는다. 또한 품목에 대한 현장 운영조건을 확인한다.

4.2 Palmgren-Miner's Rule을 이용한 등가손상효과 계산

현장 운영조건 of 변동 부하에 대해 Palmgren-Miner's Rule을 이용하여 등가손상효과를 계산한다.

$$\begin{aligned} P_1^{\lambda} L_1 + P_2^{\lambda} L_2 + P_3^{\lambda} L_3 + \dots + P_i^{\lambda} L_i &= D \\ P_e^{\lambda} (L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_i) &= P_e^{\lambda} \cdot T = D \\ P_e &= \left(\frac{P_1^{\lambda} L_1 + P_2^{\lambda} L_2 + P_3^{\lambda} L_3 + \dots + P_i^{\lambda} L_i}{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_i} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 L_i 는 i 번째 시간, P_i 는 i 번째 부하, λ 는 손상지수, T 는 전체시간, D 는 전체 누적손상, 그리고 P_e 는 등가손상효과를 나타낸다.

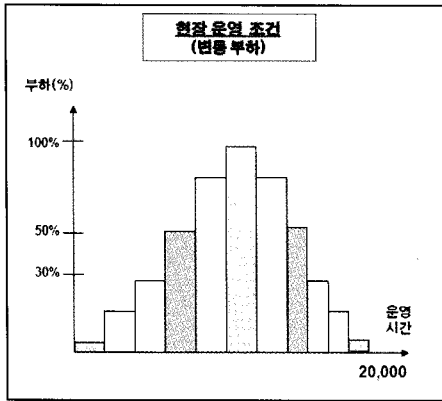


그림 7. 현장운영조건

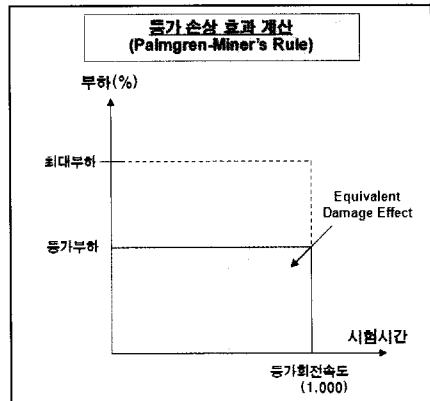


그림 8. 등가손상효과 계산

4.3 계단형 스트레스(Step Stress)를 이용한 항복점 및 파괴한계 결정

항복점과 파괴한계를 찾기 위해 계단형 스트레스 부과방법을 적용한다. 처음에는 부품에 특정시간 동안 일정한 스트레스를 부과한다. 만약 고장이 발생하지 않는다면, 좀 더 높은 수준의 스트레스를 부과한다. 이와 같이, 부품이 고장 날 때까지 스트레스를 단계적으로 증가시킨다. 계단형 스트레스 부과방법의 장점은 일정 스트레스 부과방법보다 고장을 더 빨리 발생시키는 것이다.

4.4 가속 스트레스 인자의 적절한 스트레스 수준 범위 확인

가속 스트레스 인자에 대한 적절한 스트레스 수준 범위를 확인한다. 일반적으로 가속인자의 스트레스 수준은 규격 한계와 작동한계 사이에서 결정한다. 또한 가속인자의 스트레스 수준 최대값은 사용조건에서 발생하는 고장모드가 변하지 않는 최대수준으로 결정한다.

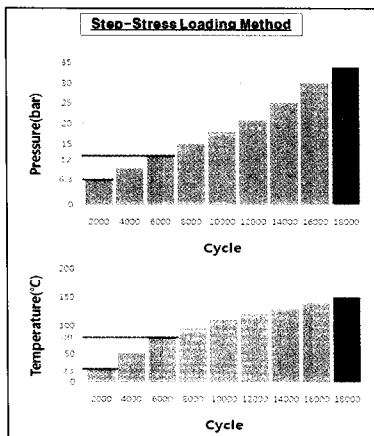


그림 9. 계단형 스트레스 부과방법

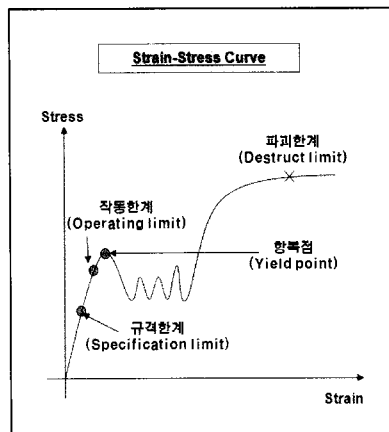


그림 10. 적절한 스트레스 수준 범위 확인

4.5 가속 스트레스 수준 결정

일반적으로, 관련규격을 살펴보면 기계공학 분야의 경우에는 가속 스트레스 수준으로 120%, 133%, 그리고 150%를 사용한다. 하지만 관련 정보가 없는 경우에는 4.6절의 방법을 이용하여 가속 스트레스 수준을 결정할 수 있다.

4.6 가속 스트레스 인자의 3가지 스트레스 수준에서 가속시험 실시

가속 스트레스 인자의 3가지 스트레스 수준에서 가속시험을 실시한다. 기계공학 분야에서 적용하는 규칙 외 스트레스 수준 결정방법으로 단계적인 방법으로 결정할 수 있다. 우선 제품의 고장이 발생하는 최대 스트레스 수준을 결정한다.

- (1) 최대 스트레스 수준의 90% 값을 1차 가속수준으로 하여 시험을 실시한다.
- (2) 1차 가속수준의 90% 값을 2차 가속수준으로 하여 시험을 실시한다.
- (3) 1차 및 2차 가속수준의 시험결과와 가용한 시험시간을 고려하여 3차 가속수준을 결정한 후 시험을 실시한다.

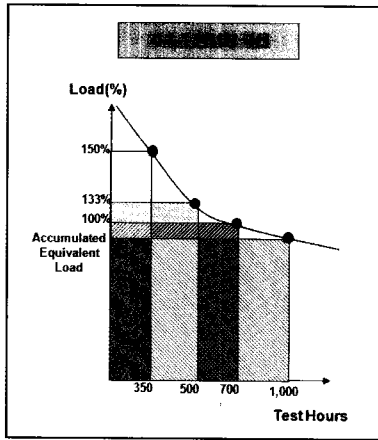


그림 11. 가속 스트레스 수준 결정

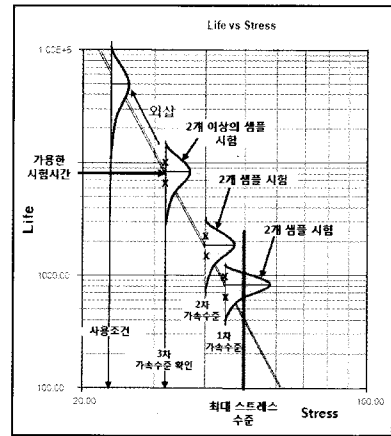


그림 12. 3가지 스트레스 수준에서 가속시험 실시

4.7 가속시험의 가속성 확인

가속시험의 고장데이터를 이용하여 각 스트레스 수준에 대한 수명분포 플롯(Plot)을 작성한다. 플롯에서 각 가속 수준에 타점된 점들의 직선들이 서로 평행하다면 가속시험을 위해 가정한 수명분포와 선정한 가속 스트레스는 적절하다고 판단한다. 즉, 가속성이 성립한다고 할 수 있다. 또한 정량적 분석으로는 모수에 대한 동일성 검정을 실시할 수 있다. 와이블분포의 경우 형상모수의 동일성 검정을 실시하여 통계적으로 다르지 않다는 결론을 얻으면 가속시험의 가속성은 성립하는 것이다.

4.8 가속모형의 유효성 검증

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

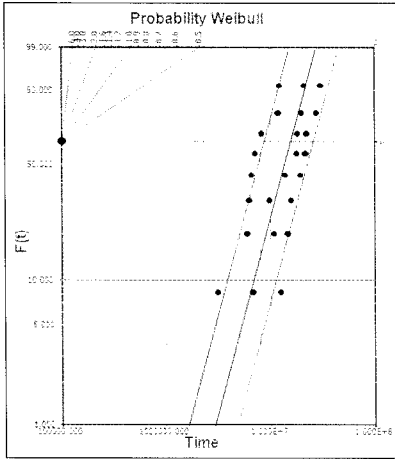


그림 13. 가속시험의 가속성 확인

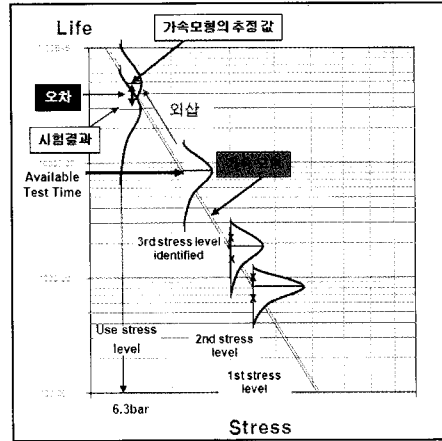


그림 14. 가속모형의 유효성 검증

4.9 교호작용을 고려한 가속모형

하나의 가속인자가 아니고 2개의 가속인자가 포함된 가속모형인 경우에는 2인자 교호작용을 고려해야만 한다. 교호작용의 확인은 분산분석(ANOVA; Analysis of Variance)을 통해서 확인할 수 있으며, 교호작용이 유의하지 않은 경우에는 교호작용 항을 제거하고, 유의한 경우에는 교호작용을 포함하여 가속모형을 수립한다. 교호작용이 포함된 온도-비열 복합모형의 예는 식 (15)와 같다.

$$L = \frac{C}{V^n} \cdot e^{\frac{E_a}{kT}} \cdot e^{\frac{A \ln(V)}{kT}} \quad (15)$$

5. 가속시험을 이용한 신뢰성 평가 예제

가속시험을 이용하여 신뢰성 평가를 설명하기 위해 임의의 기계 부품을 선정하였다. 부품의 주 고장모드는 마모이며, 가속 스트레스 인자는 온도로 결정하였다. 또한 온도 스트레스 수준은 각각 130℃, 110℃, 90℃로 하였으며, 각 수준에서 2개의 샘플을 시험하여 수명데이터(사이클)를 얻었다. 가속 스트레스 인자를 온도로 결정하였기 때문에 가속모형은 아레니우스 모형을 선택하였으며, 또한 수명분포는 과거 경험을 바탕으로 하여 와이블분포로 결정하였다. 우리가 알고자 하는 것은 사용조건에서 부품의 평균수명(MTTF)과 B₁₀ 수명이다. 부품이 현장에서 사용되는 온도는 23℃이다.

3가지 각 스트레스 수준에서 얻은 수명데이터를 이용하여 와이블 플롯을 작성하면 와이블분포를 잘 따르는 것을 알 수 있다. 그림 15는 와이블 플롯 결과이며, 수명데이터가 직선 주위에 있는 곡선(신뢰구간을 나타냄)안에 타점되어 있다면 우리가 선정한 수명분포를 따른다고 판단한다.

3가지 스트레스 수준에서 얻은 수명데이터를 와이블-아레니우스 모형으로 분석하면 그림 16과 같이 기울기가 평행하므로 가속성은 성립하며, 그림 17의 결과로부터 와이블분포의 형상모수는 3.22이며, 활성화 에너지는 0.7847이고, 사용조건 특성수명(척도모수)은 식 (16)에 23℃를 대입하여 구하면 21,397,007 사이클이 된다. 식 (16)은 그림 17의 결과 값들을 이용하여 계산할 수 있으며, 이러한 분석은 Minitab 프로그램을 이용하였다^[8]. 그리고 23℃와 100℃간의 가속계수(AF)는 식 (17)과 같이 569.5가 된다. 즉, 100℃ 시험결과의 특성수명(혹은 MTTF, B₁₀ 수명)을 구한 뒤 569.5를 곱해주면 23℃의 특성수명 값이 되는 것이다.

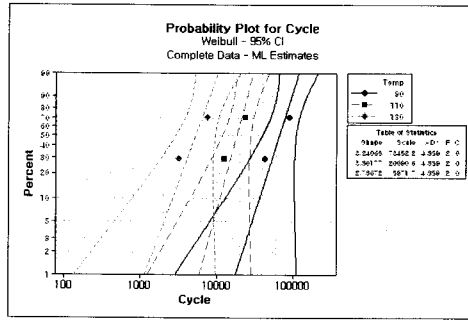


그림 15. 3가지 스트레스 수준의 와이블 플롯

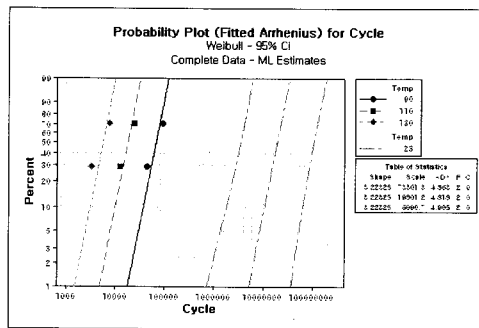


그림 16. 와이블-아레니우스 플롯

Regression Table

Predictor	Coef	Standard Error	Z	P	95.0%	Normal CI
					Lower	Upper
Intercept	-13.8723	2.96544			-19.6845	-8.06018
Temp	0.784684	0.0976037	-4.68	0.000	0.593384	0.975983
Shape	3.22325	1.09948	8.04	0.000	1.65174	6.28995

그림 17. 와이블-아레니우스 Minitab 분석결과

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

$$\ln(L) = \ln(C) + \frac{E_A}{k \cdot T} = \ln(C) + \frac{E_A}{8.617 \cdot 10^{-5} \times (C + 273.16)}$$

$$\ln(L) = -13.8723, E_A = 0.7847$$

$$L = e^{\left(-13.8723 + \frac{0.7847}{8.617 \cdot 10^{-5} \times (23C + 273.16)}\right)} = 21,397,007 \quad (16)$$

$$AF = e^{\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_r}\right)} = e^{\frac{0.7847}{8.617 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{296.16} - \frac{1}{373.16}\right)} = 569.5 \quad (17)$$



사용조건(23℃)의 평균수명(MTTF)과 B₁₀ 수명을 구하기 위해 식 (18)과 (19)를 이용할 수 있다.

$$MTTF = \eta \times \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) = 21,397,000 \times \Gamma \left(1 + \frac{1}{3.22} \right) = 19,170,112 \quad (18)$$

$$B_{10} = \eta \times (-\ln(1-p)) = 21,397,000 \times (-\ln(1-0.1)) \frac{1}{3.22} = 10,637,430 \quad (19)$$

6. 결 론

최근에는 신뢰성이 우수한 제품이 증가하고 있기 때문에 제품 설계 및 생산단계에서 신뢰성 평가를 단기간에 수행하기 위해서는 가속시험에 대한 이해가 필요하다. 이에 본고에서는 가속시험의 종류, 가속방법, 가속 스트레스의 부과방법(일정, 계단형, 점진적, 주기적), 가속성의 성립조건을 살펴보았다. 또한 기계류 부품에 적용할 수 있는 가속 모형으로 아레니우스 모형, 역승모형, 온도-비열 모형과 다중 스트레스 인자 혹은 설계변수가 포함되었을 때 적용할 수 있는 GLL 모형을 알아보았다. 끝으로 기계류 부품의 가속시험 방법론을 제시하였고, 기계류 부품의 가속시험 예제를 이용하여 신뢰성 분석 및 예측에 대해 설명하였다.

✻ 참고 문헌

- [1] 배도식, 전영록, “신뢰성 분석”, 아르케, 1999.
- [2] 정해성, 권영일, 박동호, “신뢰성 시험 분석 평가”, 영지문화사, 2005.
- [3] Misra, K.B., “Handbook of Performability Engineering”, Springer, 2008.
- [4] Nelson, W., “Accelerated Testing, Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis”, Wiley-Interscience, 1990.
- [5] 기술표준원, “신뢰성용어 해설서”, 2005.
- [6] Yang, G., “Life Cycle Reliability Engineering”, Wiley, 2007.
- [7] ReliaSoft, “Accelerated Life Testing Reference”, ReliaSoft Publishing, 2007.
- [8] Minitab Inc., “Minitab 15 Software Help Function”, 2006.



김 도 식

- 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부 시스템 신뢰성연구실 선임연구원
- 관심분야 : 건설기계산업, 유·공압 기기, 시스템 신뢰성
- E-mail : dohsik@kimm.re.kr



장 무 성

- 한국기계연구원 신뢰성평가센터 선임연구원
- 관심분야 : 가속수명시험, 시스템 신뢰성 평가
- E-mail : mirucms@kimm.re.kr