

기계류부품 신뢰성평가를 위한 가속시험법

권영일 | 청주대학교 산업공학과, 교수 | e-mail : yikwon@cju.ac.kr

이 글에서는 일반적인 가속시험의 원리와 시험방법, 그리고 기계류 부품에 적합한 가속시험모형들에 대해 간략히 소개하고자 한다.

가속시험(accelerated testing)은 제품이나 부품의 설계/개발, 생산, 시험과정에서 단기간에 성능이나 신뢰성을 향상, 평가하고 입증하기 위한 시험법으로 개발되어 왔다. 가속시험은 통상 정상적인 사용환경보다 더 가혹한 시험환경을 적용함으로써 대상제품이나 부품의 고장이나 수명에 대한 정보를 얻는 데 필요한 시험시간을 단축시키는 방법을 사용한다. 여기서는 일반적인 가속시험의 원리와 시험방법, 그리고 기계류 부품의 가속시험에 적합한 가속시험모형들에 대해 간략히 소개하기로 한다.

가속수명시험의 종류와 용도

정성적 가속시험

주로 제품의 개발단계에서 설계개선이나 검증을 위해 결함, 고장 또는 고장모드 정보를 얻기 위해 수행하는 시험이다. 정성적 가속수명시험(qualitative accelerated tests)은 하나의 가혹한 스트레스 수준이나 몇 개의 스트레스 조합, 또는 시간에 따라 변하는 스트레스(스트레스 사이클링, 저온-고온 등) 하에서 소수의 샘플들로 시험한다. 시험에서 모두 살아남으면 그 디자인은 합격되며, 그

렇지 못한 경우는 고장원인을 제거하기 위한 제품설계 개선작업에 들어간다. 이 시험에서는 사용조건의 신뢰도를 정량적으로 구하지는 않는다.

정량적 가속수명시험

정량적 가속수명시험(ALT : quantitative Accelerated

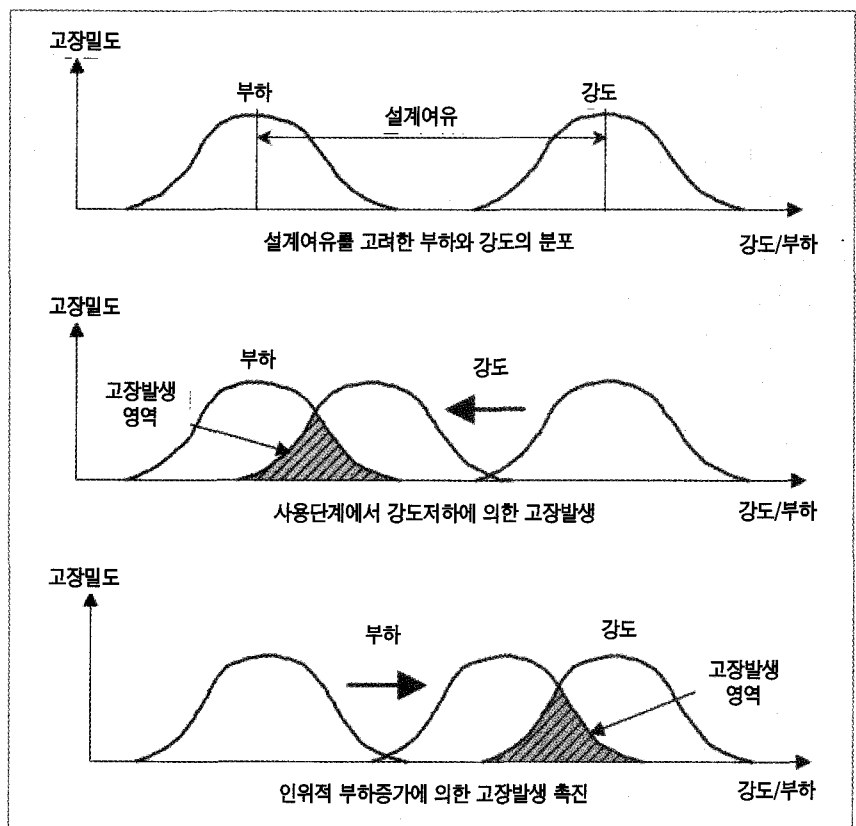


그림 1 고 스트레스 가속시험 원리



그림 2 전형적인 스트레스의 범위

Life Tests)은 사용조건에서의 제품수명(신뢰도)을 정량적으로 구하기 위한 방법이다. ALT에는 사용률가속과 고 스트레스가속 방법이 있다.

1) 사용률 가속시험

실제 사용조건에서 간헐적으로 사용되는 제품에 대해 시험상황에서는 가능한 범위 내에서 연속적으로 가동시킴으로써 고장시간을 단축시키는 방법이다. 예를 들어 하루에 1시간 가동하는 공기압축기를 하루 12시간씩 가동하면 시험시간을 12배 단축시킬 수 있다.

2) 고 스트레스 가속시험

변압기와 같이 24시간 연속 사용하는 제품들에 대해서는 사용률 가속시험방법의 효과를 볼 수 없다. 이때는 사용조건에서보다 높은 스트레스를 가하여 제품의 수명을 단축시키는 방법을 사용한다. 고 스트레스에 의한 가속시험 원리가 그림 1에 주어져 있다. 일반적으로 부품이나 소재의 강도는 설계여유를 고려하여 주어진 사용조건 부하보다 높은 수준으로 설정된다. 사용단계에서는 시간이 경과함에 따라 강도가 서서히 저하되어 사용조건 부하보다 강도가 작아지면 고장이 발생한다. 인위적으로 부하, 즉 스트레스를 증가시킴으로써 사용조건에서보다 빨리 고장을 유발시키는 방법이 고 스트레스에 의한 가속시험이다.

가속시험 설계

스트레스의 적용 방법

가속시험(ALT)의 주 목적은 사용조건에서의 수명을 구하는 것이다. 사용조건에서의 수명을 구하기 위해서는 스트레스 수준과 수명과의 관계식이 필요하다. 스트레스-수명 간의 관계가 밝혀져 있더라도 관계식의 모수 값들에 따라 사용조건 수명 예측치도 달라진다. 스트레스를 적용

하는 방법으로는 일정한 크기의 스트레스를 가하는 방법(constant stress), 계단형으로 스트레스를 증가시키는 방법(step stress), 연속적으로

스트레스를 증가시키는 방법(progressive stress), 그리고 랜덤하게 스트레스를 적용하는 방법(random stress) 등이 있다. 이들 시험방법들 중, 스트레스 적용방식의 어려움이나 모델의 복잡성으로 인해 일정한 스트레스에 의한 가속시험방법이 가장 널리 사용되고 있다.

스트레스와 스트레스 수준 결정

가속시험에서 스트레스 유형과 스트레스 수준은 사용조건에서 관측하고자 하는 고장(고장모드)을 유발시킬 수 있도록 선택되어야 한다. 또한 사용조건에서 발생하지 않는 고장을 유발시키지 않아야 한다. 따라서 대부분의 가속시험에서 적용 스트레스의 수준은 규격한계(specification limit)는 초과하되 설계한계(design limit)는 초과하지 않도록 한다.

시험시간을 단축하면서도 사용조건수명을 정확히 구하기 위해서는 스트레스와 스트레스 수준의 선택, 그리고 가속시험의 설계가 매우 중요하다. 기계류 부품의 가속시험에는 통상 다음과 같은 스트레스들이 단일 또는 복합적으로 적용된다.

- 진동(vibration)
- 압력(pressure), 압력사이클링(pressure cycling)
- 온도(temperature), 온도사이클링(temperature cycling)
- 습도(humidity)
- 부하(load), 토크(torque)
- 속도(speed), 회전속도(rpm)

기계류부품 가속시험모형

수명분포

기계류부품의 수명분포로서 가장 일반적인 분포가 와이불분포(Weibull distribution)이다. 1937년 Waloddi

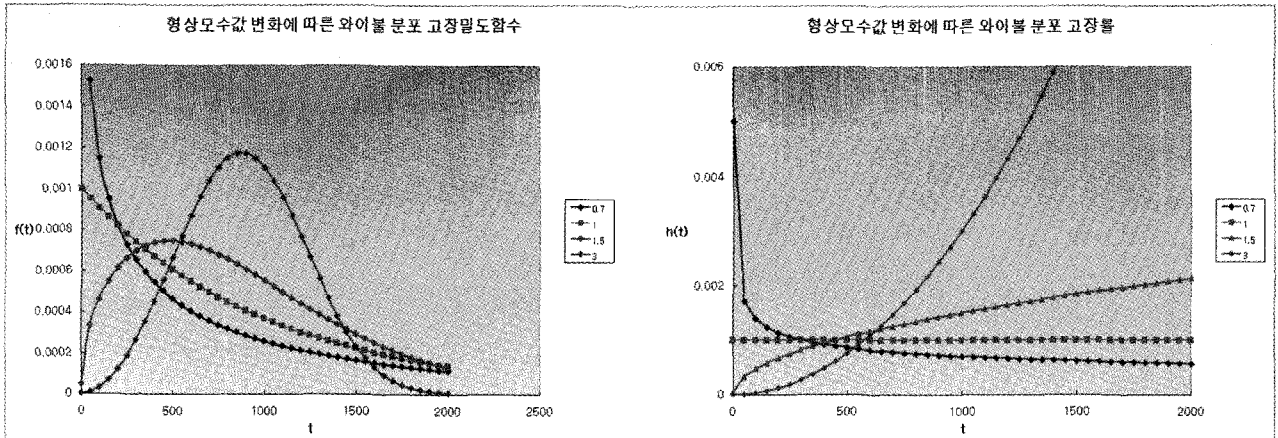


그림 3 형상모수 β 값에 따른 와이불분포 모양 및 고장률 추이 변화

Weibull에 의해 고안 된 이후 각종 베어링, 펌프, 기어박스, 밸브 등을 포함한 다양한 기계류부품의 수명 묘사에 적합한 것으로 확인되고 있으며 가장 널리 사용되고 있다. 와이불분포는 형상모수(shape parameter)와 척도모수(scale parameter)에 의해 그 특성이 결정된다. 형상모수 값은 분포의 형상 또는 고장률 특성(고장률 증가추이)에 영향을 미치며 부품이나 재료의 유형과 특성에 따라 결정된다. 척도모수는 수명에 직접 영향을 미치는 모수이다. 형상모수 값이 클수록 고장률이 급속히 증가하며, 동일한 형상모수를 갖는 부품의 수명은 척도모수 값의 크기에 정비례한다. 그림 3은 형상모수 값에 따른 와이불분포의 모양과 고장률 추이를 나타내고 있다.

와이불 분포 이외에도 지수분포나 대수정규분포 등이 기계류 부품의 수명분포로서 자주 사용되고 있다.

수명-스트레스 관계

적합한 수명분포가 선택되면, 다음은 그림 4와 같이 스트레스 수준 V 와 수명특성 $L(V)$ 의 관계를 규명, 결정해야 한다. 수명특성이란 평균수명, B_x 수명, 중앙수명 등을 의미한다. B_x 수명이란 전체제품의 $x\%$ 가 고장나는 시점 또는 신뢰도가 $(100-x)\%$ 유지되는 시점을, 중앙수명(median life)은 전체제품의 50%가 고장나는 시점, 즉 B_{50} 수명을 말한다.

기계류 부품의 가속시험에 적합한 대표적인 스트레스-수명 관계모형으로 다음과 같은 것들이 있다.

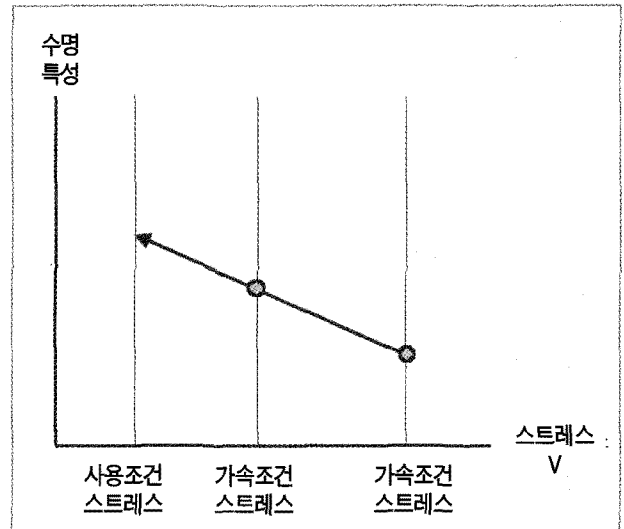


그림 4 스트레스-수명 관계

1) 아레니우스(Arrhenius) 모형

아레니우스 모형은 수명이 반응률의 역수에 비례한다는 내용으로 주로 온도를 스트레스로 적용하는 가속시험에 사용된다.

$$L(T) = Ce^{\frac{B}{T}}$$

위 관계식에서 T 는 스트레스 수준(절대온도)을 나타내며, C, B 는 결정해야 할 관계식의 모수이다.

아레니우스모형에서 사용조건온도 T_u 와 가속조건온도 T_a 에서의 수명의 배율을 나타내는 가속계수(acceleration factor)는 다음과 같다.

$$AF = \frac{L(T_u)}{L(T_a)} = e^{B(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a})}$$

여기서 $B=B_A/K$ 로서 B_A 는 활성화에너지(activation energy:eV)를, K 는 볼츠만상수 $8.623 \times 10^{-5} eV/K$ 를 말한다. 가속계수에 직접 영향을 미치는 모수 B 는 활성화 에너지와 관련된 모수이며 가속시험데이터로부터 추정하여 사용할 수 있다.

예를 들어 사용조건 온도가 섭씨 30도인 전기모터에 대해 온도가속시험을 실시한 결과 $B=8,650$ 으로 추정되었다면, 가속시험 온도별 가속계수는 표 1과 같이 구해진다.

2) 역승모형

역승모형(inverse power law relationship)은 전압, 압력, 진동, 토크, displacement, strain range, 온도 사이클링 등과 같은 스트레스에 대해 주로 사용되며, 기계류 부품의 가속시험에 있어서 가장 대표적인 가속모형이라고 할 수 있다. 역승모형에서 스트레스 V 와 수명 $L(V)$ 의 관계는 다음과 같다.

$$L(V) = \frac{1}{KV^n}$$

표 1 $B=8,650$ 일 때 시험 온도별 가속계수

온도 °C	AF
30	1.00
40	2.49
50	5.85
60	13.06
70	27.82

온도 사이클 또는 진동에 의한 금속의 피로수명을 모형화하는데 사용되는 Coffin-Manson 관계식, 금속 및 기계분야에서 스트레스와 피로수명간의 관계(S-N 곡선)를 모형화한 Basquin 식, 그리고 베어링에 적용되는 부하와 B_{10} 수명과의 관계를 모형화한

Palmgren 식 등도 역승모형에 속한다. 역승모형에서는 스트레스의 로그값과 수명의 로그값이 선형관계를 갖는다. 역승모형에서의 가속계수는 $AF=(V_u/V_a)^n$ 이며 모수 n 의 영향을 받는다. 이 n 값은 가속시험데이터로부터 추정할 수 있다. 표 2는 몇몇 재료나 부품에 대한 경험적 n 값을 나타낸다.

예를 들어 볼베어링에 대해 인가하중을 증가시키는 가속시험에서 $n=3.0$ 으로 알려져 있다. 사용조건 하중보다 50% 증가한 하중으로 가속시험을 실시할 경우 가속계수는 다음과 같다.

$$AF = \left(\frac{V_a}{V_u}\right)^3 = \left(\frac{1.5 \times V_u}{V_u}\right)^3 = 3.375$$

3) 복합 스트레스 모형

온도와 온도 이외의 스트레스(진동, 압력 등) 두 개를 복합적으로 적용하는 경우, 아레니우스 모형과 역승모형을 조합한 복합 스트레스 모형을 사용할 수 있다. 두 개 이상의 스트레스를 적용한 가속시험에서는 스트레스들간의 교호작용 존재여부를 확인하는 것이 중요하다. 다음은 두 스트레스간에 교호작용(interaction)이 없는 경우 적용할 수 있는 가속모형이다. 여기서 V 는 비열(non-thermal) 스트레스(압력, 전압, 진동 등)를, T 는 절대온도를 말한다.

$$L(V,T) = \frac{C}{V^n e^{-\frac{B}{T}}}$$

4) Miner's rule

이 원리는 부품이 받는 누적손상(cumulative damage)이 일정량에 이르면 피로고장(fatigue failure)이 발생한다는 논리에 근거하고 있다. 부품이 k 수준의 스트레스 S_1, S_2, \dots, S_k 에 노출되며, 스트레스 S_i 에서의 부품수명(number of cycles to failure)을 N_i 라 하자. 한 부품에 대해 각 스트레스 S_i 가 적용된 기간(cycles)을 n_i 라 할 때, 스트레스 S_i 에서의 부품이 입는 손상(damage), 즉 수명의 감소분을 n_i/N_i 로 정의한다. 이 때 이 부품에 적용된 누적손상은 $CD = \sum_{i=1}^k n_i/N_i$ 고, 이 값이 1에 도달하면 고장이 발생한다는 것이 마이너 법칙의 요지이다.

표 2 금속, 기계, 전자부품에 대한 경험적 n 값

금속류	2 - 3
전자부품 솔더 접합부	2 - 3
볼 베어링	3
실린더형 롤러 베어링	10/3
마이크로전자 플라스틱 밀봉재	4 - 8
마이크로전자 패시베이션 레이어	12
마이크로회로 크레터링	7
Al-Au 금속간 피로고장	4 - 7

표 3 사용조건에서 각 스트레스 수준의 적용시간 비율

1	500	0.7
2	700	0.2
3	900	0.1

다음은 스트레스 S_i 와 수명 N_i 간에 역승관계 $N_i = c/s_i^n$, ($c=constant$)가 성립하는 기어(steel gear)에 대한 가속시험을 생각해 보자. 이 유형의 기어에 대한 멱수 n 값은 5로 알려져 있으며, 사용환경에서 이 부품이 각 스트레스 S_i 에 노출되는 시간비율 w_i 는 표 3과 같다. 이 사용조건(duty cycle)에서 수명 N_a 는 마이너법칙에 의해 $N_a = 1 / \left\{ \sum_{i=1}^3 w_i / N_i \right\}$ 로 도출된다. 만약 스트레스 수준 S_a 한 조건에서 가속시험을 실시한다면 가속계수 AF 는 다음과 같이 구해진다.

$$AF = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 w_i \left(\frac{S_i}{S_a} \right)^n}$$

가속시험에서 스트레스수준 S_a 를 S_3 로 설정하면 가속계수는

$$AF = \frac{1}{0.7 \left(\frac{500}{900} \right)^5 + 0.2 \left(\frac{700}{900} \right)^5 + 0.1 \left(\frac{900}{900} \right)^5} = 5.155$$

가 되어, 사용조건에 비해 수명을 약 5분의 1로 단축시킬 수 있다. 예를 들어 가속시험에서의 B_{10} 수명이 800,000사이클로 추정되었다면, 사용조건에서의 B_{10} 수명은 $B_{10} = 5,155 \times 800,000 = 4,124,000$ (사이클)로 추정된다.

기계용어해설

접선 키(Tangent Key)

키 홈을 축의 접선 방향으로 내어 서로 반대 방향의 구배를 가진 2개의 키를 짝지은 것으로, 플라이 휠과 같이 무거운 물건이나 급격한 속도변화가 있는 부분을 강력하게 체결하는 방법의 일종.

접선계수(Tangent Modulus; 接線係數)

응력-변형 선도상에서 곡선의 각 점 상에 그은 접선의 탄젠트를 취한 것으로, 탄성 한도 내에 있으면 영률과 일치.

타코메터(Tachometer Generator)

측정하고자 하는 구동축에 발전기를 장착하고, 발전기에서 발생한 전력을 측정하여 축의 회전수를 측정하는 데 쓰이는 속도계용 발전기.

테일 로드(Tail Rod)

횡형 기관의 피스톤 중량을 지탱하기 위하여 피스톤 로드를 피스톤의 반대쪽으로 연장한 부분으로, 피스톤과 실린더 벽의 마모를 감소시키고 증기의 누설을 줄이기 위하여 설치하는 것.

탭 볼트(Tap Bolt)

죄려고 하는 부분이 두껍거나, 또는 관통 볼트의 머리가 숨겨져서 죄기 곤란할 때 상대방에 직접 암나사를 깎아 너트 없이 죄서 체결하는 볼트. =set bolt

샌드 블라스트(Sand Blasting)

주물이나 강재 등의 표면에 붙어있는 모래나 스케일 등을 제거하기 위하여 모래분사기로 모래를 금속 표면에 분사하는 작업.