

온도·진동 복합요인에 대한 최적 시험방법에 관하여

장 주 수 | (주)모아소프트, 대표 | e-mail : jsjang@moassoftware.co.kr

일반적으로 부품 또는 유닛의 수명에 가장 직접적인 영향을 주는 요인은 온도 또는 진동으로 알려져 있다. 따라서 많은 시험방법이 개발되어 있으나 주어진 시간에 시험의 목적을 달성할 수 있는 최적의 방법론에 대해서는 드물게 연구되어 있는 실정이다. 이 글에서는 일반화되어 알려진 두 개의 모델을 복합하여 최적의 시험시간과 시험조건을 살펴보기로 한다.

신뢰성 시험

신뢰성시험분야는 크게 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 하나는 부품 또는 유닛 단위의 수명을 추론하기 위한 가속수명시험이 그 것이며, 다른 하나는 수명 이외의 것 고장메커니즘 또는 고장유형 등을 추론하기 위한 시험 등이 여기에 해당된다.

일반적으로 가속수명시험은 부품의 정상상태(steady-state)에서의 수명을 추론하기 위한 방법으로 이미 알려진 하나의 고장유형 또는 여러 가지 유형을 복합하여 시험하는 방법이다. 반면 비 수명시험은 환경시험(ESS : Environmental Stress Screening)으로 알려져 있으며, 이 시험방법의 근본적인 목적은 설계 또는 양산단계 등에서 발견하기 어려운 결함요인을 찾는 것이다. 이러한 내용을 고장률의 상태변화를 나타내는 bath-tube 곡선과 연계하면 그림 2와 같이 설명할 수 있다.

그림 2는 신뢰도공학에서 개념적으로 사용하는 고장률-시간과의 관계를 나타내는 욕조곡선(bath-tube curve)이다. 모든 부품, 유닛 또는 시스템은 그림과 같은 경향의 고장률 변화를 갖는다는 것이 잘 알려져 있다.

그림 2에서 초기고장 구간은 초기고장구간 또는 Wear-In Time Period로 알려져 있으며, 설계초기 양산 단계의 제품은 고장률이 안정화단계에 접어들기 전까지 일반적으로 높다는 것을 의미한다. 따라서 환경시험 등과 같은 시험이 필요하다는 의미이고, 정상상태 구간은 제품이 안정

화 단계 또는 정상 사용단계에 도달했을 때를 의미한다. 일반적으로 이러한 안정화 상태에서의 고장률은 일정한 값으로 가정하며 상당히 긴 시간동안 지속된다고 가정한다. 마지막 노화상태 구간은 사용단계를 지나 노화단계에 이르러 고장률이 시간에 따라 서서히 증가는 단계를 의미한다. 이 3-구간을 신뢰성과 연결하며 설명하면 다음과 같다.

그림 2에서 (1)부터 (2)로의 상태변화와 (1)부터 (3)까지의 상태변화는 주로 환경시험을 어떻게 하느냐에 달려 있

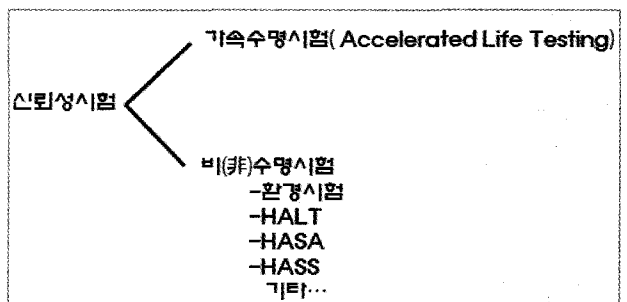


그림 1 신뢰성시험의 종류

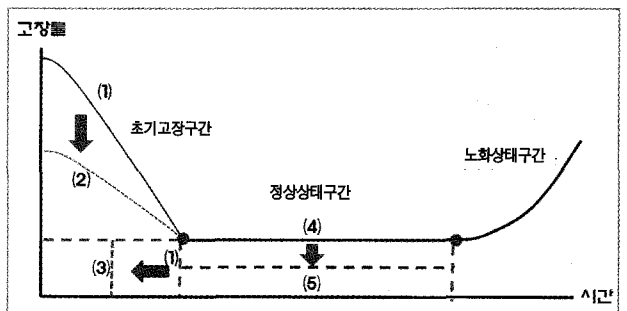


그림 2 Bath-tube 곡선

다. 즉 초기고장구간(burn-in period)의 고장률과 시험시간을 최적화함에 따라 시간과 비용을 절약할 수 있다는 의미이다.

한편 (4)부터 (5)상태로의 변화는 주로 설계기술 또는 적절한 수명시험을 통해 달성할 수 있으며, 주로 고장률을 낮추는 데 그 목적이 있다. 주로 이러한 방법으로 가속수명시험이 이용된다.

온도-진동 복합 ESS 모델

ESS, 즉 환경시험은 주로 고장 메커니즘을 걸러내기(screening)위한 시험방법으로 부품뿐만 아니라 유닛 레벨에서도 수행할 수 있는 기법이다. 특히 복수개의 고장유형을 복합하여 사용하는 경우가 많은데, 온도-진동 요소를 복합한 모델은 기계 또는 전기전자 장치의 유닛 레벨에서 자주 이용되는 기법이다.

온도 피로와 수명관계

온도에 대한 피로(fatigue)를 온도의 주기적인 변화의 누적으로 정의할 때 다음과 같은 관계식이 성립한다^(1, 2). 여기서 온도의 주기적인 변화를 Cycle로 정의하고 고장까지 도달하는 온도의 Cycle을 n_{TC} 로 정의하면 Cycle의 수는 대수-정규(Log Normal Distributed)분포한다는 것이 알려져 있다.

$$f_{TC}(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma n}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(n) - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1)$$

따라서 시험을 통해 Cycle의 평균과 편차를 알 수 있다면, 고장과 Cycle의 관계를 식 (2)를 통해 추론할 수 있다.

$$F_{TC}(n) = \int_0^n f_{TC}(t) dt = F\left(\frac{\ln(n) - \mu}{\sigma}\right) \quad (2)$$

단, 식 (2)에서 $\Phi(\cdot)$ 는 정규분포 $N(0,1)$ 의 cdf를 의미한다.

진동 피로와 수명관계

온도와 마찬가지로 진동에 대한 피로누적은 다음과 같이 정의할 수 있다⁽²⁾. 진동 Cycle을 n 이라 하면 식 (3)과 같

이 표현할 수 있다.

$$f_{RV}(n) = \left\{ \frac{\beta}{M} \left(\frac{n}{M} \right)^{\beta-1} \right\}, 0 \leq n \leq M. \quad (3)$$

단, 여기서 β 는 Weibull 분포의 형상모수이며, Cycle $n > M$ 인 경우 식 (3)은 0의 값을 갖는다. 한편 M 은 Cycle n 의 모수로 고장까지의 최대 Cycle의 수이다.

식 (2)와 마찬가지로 진동피로와 Cycle의 관계는 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$F_{RV}(n) = \int_0^n f_{RV}(t) dt = \left(\frac{n}{M} \right)^\beta \quad (4)$$

온도-진동 복합피로와 수명관계

식 (2)와 식 (4)를 통해 온도-진동 복합모델을 정의할 수 있다. 이를 위해 새로운 확률변수

$$X = \frac{N_{RV}}{M} \leq 1, Y = \frac{N_{TC}}{N} \leq 1$$

를 도입하면, $Z = X Y$, $0 \leq X \leq 1$, $0 \leq Y \leq 1$, 따라서 $0 \leq Z \leq 1$ 이고, 이러한 변환을 통해 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$F_z(z) = (N_{TC})^{\beta+1} \exp\left[\frac{(\beta+1)^2 \sigma^2}{2} - (\beta+1)\mu\right] z^\beta \times \Phi(\bullet) \quad (5)$$

단, N_{RV} , N_{TC} 는 각각 진동과 온도의 Cycle 수이며,

$$\Phi(\bullet) = \Phi\left\{\frac{\ln(a/N) - \ln(z) + \mu - \sigma^2(\beta+1)}{\sigma}\right\} \quad \text{이다.}$$

최적의 온도-진동 복합피로 Cycle 수

식 (5)는 온도-진동 사이의 최적 Cycle 수의 조합이다. 즉 적절한 온도 Cycle의 수와 진동 Cycle의 수를 조합하여 잠재적 결함을 걸러 낼 수 있는 확률을 나타낸 것이다. 따라서 최적의 Cycle 수의 조합을 찾는 것은 식 (5)의 확률을 최대화하는 것이므로, 식 (5)를 통해 $\partial(F_z(z))/\partial z = 0$ 인 조건을 구하면 다음과 같다.

$$N_{RV}^* N_{TC}^* = MNz^* \\ = MN \exp[\ln(a/N) + \mu - \sigma^2(\beta+1) - \sigma U^*] \quad (6)$$

여기서 *표시된 값은 최적의 Cycle 수를 의미하며 U^* 는 식 (7)을 통해 얻을 수 있다.

$$\frac{\phi(U^*)}{\Phi(U^*)} = \beta\sigma \quad (7)$$

단, $\phi(\cdot)$ 는 표준정규분포를 의미한다.

온도-진동 복합 ESS 모델 예제

다음은 최적의 온도-진동 Cycle 수의 조합을 찾아내는 예제이다. 식 (1)에서 $\sigma=0.8225$, $\mu=5.1614$ 가 주어지고, 식 (2)에서 $M=4,0915$, $\beta=5$ 가 주어졌다고 가정하자. 이때, 99% 이상 Screening 확률을 가지는 최적의 Cycle 수를 구한다고 하자. 식 (1)에서, $N = e^{\mu+z0.99\sigma} = e^{\mu+2.326\sigma} = 1,181$ cycles 를 얻는다. 또한 $a=(0.99)^{1/\beta}=0.99499$ 를 얻을 수 있으며, 이것을 통해 식 (7)의 $U^*=-3.88$ 를 얻을 수 있다. 다시 식 (6)을 이용하면, 최적의 조합은 $N_{TC}^* N_{RV}^* = 298,394$ cycles²이며, 이것을 평면에 도시하면 다음 그림 3과 같다.

참고문헌

(1) Hertzberg, R.W., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 3rd

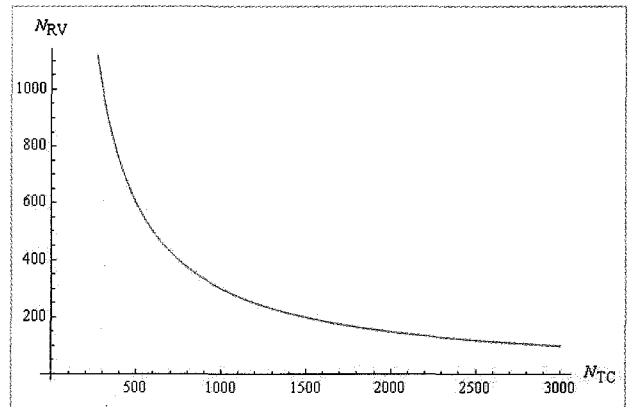


그림 3 온도-진동 최적 Cycles의 조합

edition, John Wiley, New York, 688pp.,1989.

(2) Chenoweth, H.B., Vibration-Thermal Screening Reliability Prediction, Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.91-96, 1982.

(3) Harry, W. McLean, HALT, HASS, and HASA Explained, ASQ Quality Press, 2000.

기계용어해설

갱 다축 드릴 머신(Gang Drilling Machine; 병렬 다축 드릴링 머신)

동일 베이스 상에 스피들을 한 줄로 여러 개 배열해서 한 몸으로 한 드릴링 머신.

가스 질화(Gas Nitriding)

암모니아 가스 속에서 500~550℃의 온도로 72시간 정도 가열한 질화강의 표면에 질화철이 생성되어 단단해지는 것.

가스 실드(Gas Shield)

용접에서 가스 발생식인 피복용접봉으로 다량의 일산화탄소, 탄산가스, 수소 등의 가스를 발생시켜 아크와 용접부를 대기로부터 차단, 보호하여 용융금속의 환원성을 높이는 것.

기어 셰이퍼(Gear Shaper)

피니언이나 래크형 커터와 기어의 소재에 그 피치원 또는 피치선이 구름 접촉이 되도록 상대운동을 시키면서 커터의 왕복절삭운동으로 기어를 절삭하는 형식의 기계.