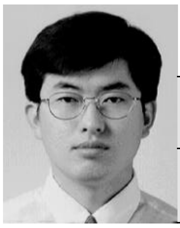
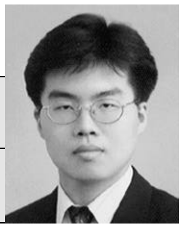
원전기기 부품의 수명추정 및 활성화 에너지측정



김 재 형

(KIMM 환경설비연구부)

'89 - '93 한국과학기술원 기계공학과(학사)
'93 - '95 포항공과대학교 기계공학과(석사)
'95 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



김 유 창

(KIMM 환경설비연구부)

'90 - '95 연세대학교 환경과학과(학사)
'95 - '97 광주과학기술원 환경공학과(석사)
'97 - 현재 한국기계연구원 연구원

김 병 덕

(KIMM 환경설비연구부)

'75 한국해양대학교 기관학과(석사)
'77 - '81 동지상선 1등 기관사
'81 - '83 충남대학교 기계공학(석사)
'94 한국해양대학교 시스템 공학(박사)
'91 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

원전기기의 성능평가를 할 때 실제사용조건과 시간에 맞추어 시험을 할 경우 많은 경비와 인력이 소모가 되므로 주로 실제 사용조건보다 열악한 조건에서 시험을 하여 시험기간을 단축하는 가속화 수명시험을 한다. 이 때 시험의 조건은 다른 일반적인 시험처럼 정해져서 주어지는 것이 아니라 시험대상이 요구되는 수명에 따라 시험자가 결정하여야 한다. 한편 가속화 수명시험의 어려운 점은 가속상태에서의 시험결과를 사용상태의 수명으로 변환시켜주는 관계를 밝혀내는 것인데 이때 사용되는 것이 활성화 에너지에 의한 가속인자이다. 가속인자는 정상적인 사용조건에서 어떤 고장원인의 수명을 가속시험조건에서의 수명으로 나누어진 값으로 시험조건을 결정하는데 결정적인 역할을 한다. 이러한 가속인자는 활성화 에너지의 함수로서 활성화 에너지는 온도, 습도 등의 변수에 의한 수명의 영향을 나타내는 지표이다. 잘못된 활성화 에너지 값은 잘못된 가속인자를 통한 시험조건을 만들어 올바른 수명검증이 어려워진다. 지금까지는 주로 시험의뢰자가 외국 시험기관에 의뢰하여 활성화 에너지값을 구하여 많은 시간 및 비용이 낭비되어 왔다. 활성화 에너지에 대한 데이터베이스도 재료의 상태를 정확히 정의할 수 없는 관계로 믿을 수 없어 가능한 한 보수적으로 값을 선택하여 사용하였다. 이 결과 시험대상은 더욱 더 가혹한 상태에서 시험을 하게 되어 시험의 성공확률이 떨어지는 결과를 가져오게 되었다. 본 연구에서는 원

전기기에서 가장 취약한 재료로서 많이 다루어져서 수명을 결정하는 고무 O ring의 수명추정과 활성화 에너지를 결정하기 위한 방법을 찾고자 한다. 이를 위해 시험목적, 가속화 시험계획, 수명추정, 수명과 스트레스의 관계식등의 이론적 배경을 제시하고 고무 O ring에 적용하고자 한다.

2. 가속화 시험의 목적

일반적으로 가속화 시험을 통해 시험대상의 평균 수명을 추정할 수 있으며 어떤 기간 이상 고장나지 않을 확률(생잔확률)을 추정하거나 100p%의 대상물이 고장나기까지의 기간(100p% 분위수)을 추정할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 가속화 시험을 통해 이러한 목적을 기본적으로 달성하면서 최종적으로 활성화 에너지를 찾는 것을 목적으로 하겠다. 추정된 활성화 에너지는 요구되는 수명을 보장하는 시험을 하기 위한 시험조건을 산출하는 가속인자를 계산하는데 사용된다.

이후의 가속화 시험계획과 수명추정은 다음과 같은 가정하에 검토하기로 하겠다.

① 스트레스 z와 대수수명의 평균은 아래와 같이 선형관계이다.

$\mu(z) = r_0 + r_1 z$

여기서 r_0와 r_1은 자료로부터 추정된 모수이다.

② 대수수명의 표준편차 σ는 스트레스에 관계없는 상수이다.

그림 1에서 위의 가정에 대하여 상세히 볼 수 있다. 세 가지 스트레스 z_L, z_M, z_H에서 시험한 결과가 각 스트레스 수준의 축에 "×"로 표시되어 있고 z_0는 사용스트레스 수준이다. 각 스트레스 수준에서의 평균대수수명은 스트레스 수준과 선형관계를 이루므로 가정사항 ①을 만족한다. 또 각 스트레스 수준에서의 대수수명의 위치모수는 다르지만 형태모수(표준편차 σ)는 모두 같은 수명분포를 따른 다는 가정 ②를 보여준다.

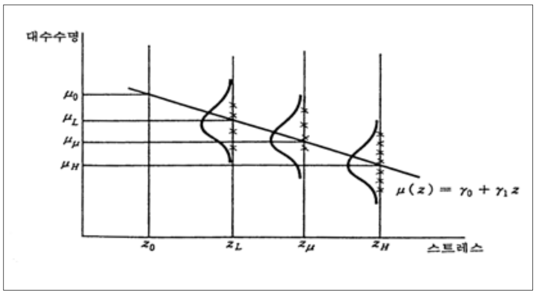


그림 1. 세가지 스트레스 수준의 수명추정(×: 시험결과)

3. 가속화 시험계획

가속화 시험계획은 신뢰성 분석에서 중요한 위치를 차지한다. 만약 잘못 계획된 시험이 수행되면 분석결과가 만족스럽지 못하여 다시 하게되고 그 결과로서 인적·물적 자원이 많이 소모되는 나쁜 결과를 가져온다. 그러므로 시험대상에 대한 자료수집이 시험계획을 세우는데 있어서 중요한 역할을 하게된다. 만약 아무런 자료가 없을 때는 몇 번의 시행착오를 해야 하며 이를 계획하기 위해 나중에 하게 될 자세한 시험을 고려하여야 한다.

가속화 수명시험을 위한 자료 수집계획이란 어떤 스트레스에서 시험을 하고 각 스트레스에서의 표본을 몇 개를 할 것인가를 결정하는 것이다. O Ring의 경우 스트레스는 온도조건에 해당이 되는데 가장 간단히 생각할 수 있는 것은 사용온도범위를 등간격으로 놓고 표본수를 일정하게 나누는 전통적인 방법일 것이다. 이 방법도 좋은 결과를 가져올 수 있지만 나쁜 결과도 가져올 수 있다는 사실을 고려해야 한다.

이러한 시험계획을 세우는데 좀더 체계적이고 수학적인 방법이 개발되어 왔다. 단일 고장원인을 가진 경우에 대하여 최적계획, 전통적 계획, 미커-한 계획 등이 많이 알려져 있는 방법이다. 여기서는 대수수명 추정량의 분산을 최소화하도록 시험스트레스 수준을 결정하고, 각 수준별 표본의 할당비율을 결정하는 것이 주요 내용이다. 본 연구에서는 절충계획인 미커-한 계획을 이용하여 가속화 시험계획을 세우려고 한다.

가속화 시험 결과의 신뢰성은 전적으로 시험결과인 자료의 품질에 달려 있다. 특별히 수명과 스트레스 사이의 자료, 즉 정해진 스트레스 수준에서의 시간-실패 자료를 가지고 수명이 추정 되면 활성화 에너지가 추정된다. 좋은 자료와 함께 적절한 확률분포와 수명-스트레스 모델이 선정될 때 그 결과는 정확해 진다.

자료는 시험대상의 실패와 성공에 기초하여 두 가지 형태, 즉 완전자료(Complete Data)와 중도절단자료(Censored Data)로 분류된다. 모든 시험대상이 모두 고장날 때까지 실험하여 얻은 자료를 완전자료라고 한다. 또한 모든 시험대상물의 고장시간을 모두 파악하지 못한 경우로써 고장이 나기 전에 시험에서 제외되거나 또는 여러 가지 여건상 충분한 시험시간을 줄 수 없는 경우에 얻어진 자료를 중도절단자료라고 한다. 중도절단자료에는 제1종 중도절단과 제2종 중도절단이 있다.

제1종 중도절단(type 1 censoring)은 시험을 시작하기 전에 시험을 끝내는 시점, 즉 중도절단 시간 L을 미리 정하여 놓고 그 시간까지만 시험을 한다. 중도절단 시간 L시점까지 고장나지 않은 시험대상물에 대해서는 다만 그 고정시간이 L보다 크다는 사실만 알게 된다. 이 경우 시험기간이 L로 정해지므로 시간계획을 하는데는 편리하나 L 시간 동안 몇 개의 시험 대상물이 고장날 지 알 수 없으므로 추정값에 대한 통계적 정확도는 보장되기 어렵다.

제2종 중도절단(type 2 censoring)은 표본의 수보다 적은 일정수 r개의 시험대상물만 고장나면 시험을 중단하는 경우이다. 이때는 n개의 표본중 r개의 시험 대상물에 대한 고장시간을 확보하게 되므로 이 자료로부터 추정된 평균수명은 측정값들이 일정한 통계적 정확도를 유지하게 되는 이점이 있다. 반면 r개가 고장날 때까지 시험기간이 얼마나 소요될 지 알 수 없으므로 시간계획에는 무리가 따를 수도 있다.

여기서는 실제 많이 사용되는 중도절단자료에 대하여 자세하게 살펴보고자 한다. 중도절단자료

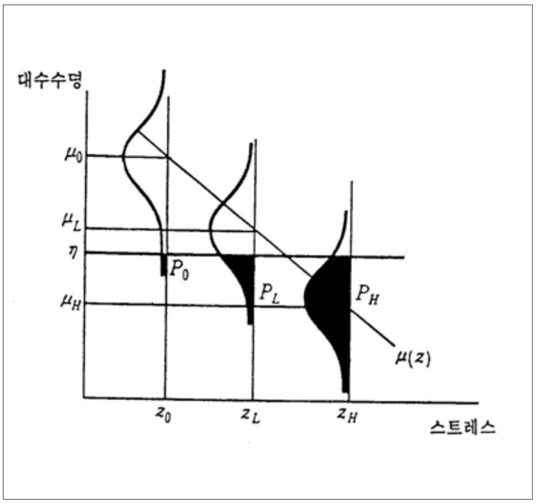


그림 2. 스트레스 수준에 따른 고장날 확률(y=ln T)

의 시험계획에서 유의해야 할 것은 중도 절단시간 L까지만 시험을 하므로, 시험스트레스 수준의 높고 낮음에 따라 표본의 할당비율이 달라져서 수명관찰값의 수가 달라진다는 점이다. 최악의 경우에는 어떤 스트레스 수준에서 관찰값을 구하지 못하는 경우도 생길 수 있다. 그림 2는 각 스트레스 수준에서 시험 대상물이 중도절단 시간까지 고장날 가능성을 보여준다. P_H는 스트레스 z_H에서 고장날 확률이고, P_L는 스트레스 z_L에서 고장날 확률이다. $\eta = \log L$로서 대수중단 절단시간이다.

시험대상이 사용범위에서 가능한 최고의 시험스트레스를 z_H라하고, 사용 스트레스를 z_0라 할 때, 스트레스 수준과 표본수를 결정하는 시험계획을 세우기 위한 특성값은 아래와 같다.

$$a = (\eta - \mu_H)/\sigma = (\eta - \gamma_0 - \gamma_1 z_H)/\sigma$$
$$b = (\mu_0 - \mu_H)/\sigma = \gamma_1 (z_0 - z_H)/\sigma$$
$$\eta = LogL$$

시험계획을 세우기 위해 먼저 특성값 a, b를 계산해야 하는데, a와 b은 모형의 모수 γ_0, γ_1 그리고 σ의 함수이다. 완전자료에서는 시험계획 결정과정이 모수값에 의존하지 않지만, 중도절단

자료에서는 경험이나 비슷한 자료 또는 이전의 시험결과를 토대로 한 모수의 근사값을 구해야 한다. 이러한 값이 없을 때는 몇 번의 시행착오를 하거나 또는 다른 공학적인 개념에서 모수값을 유추해야 한다.

일반적으로 중도절단자료에 대한 시험계획에는 최량전통적계획, 넬슨과 키엘핀스크(Nelson and Kielpinski, 1976)의 최적계획, 미커와 한(Meeker and Hahn, 1985)이 제안한 절충계획이 있는데 여기서는 미커-한의 절충계획을 중심으로 알아보고자 한다.

미커와 한(Meeker and Hahn, 1985)이 제안한 절충계획은 세가지 스트레스 수준 (z_L, z_M , z_H) 과 표본할당율을 다룬다. 상위스트레스 수준 z_H는 시험대상물이 가능한 최대 스트레스이고 하위스트레스 z_L은 다음과 같이 결정된다. 먼저 사용스트레스와 상위 스트레스, z_0와 z_H에서 대수중도절단시간까지 고장날 확률 P_0, P_H를 아래의 식에 의하여 결정해야 한다.

$$P_0 = \Phi(a-b) = \Phi\{(\eta - \gamma_0 - \gamma_1 z_0)/\sigma\}$$
$$P_H = \Phi(a) = \Phi\{(\eta - \gamma_0 - \gamma_1 z_H)/\sigma\}$$

다음에 추정하려는 백분위수의 비율 p와 P_0와 P_H를 가지고 대수정규분포와 와이블 분포에서 ζ를 결정한 후 z_L과 z_M을 다음과 같이 계산한다.

$$z_L = z_0 + \zeta(z_H - z_0)$$
$$z_M = (z_L + z_H)/2$$

표본수의 할당은 하위, 중위, 상위 스트레스에 4:2:1의 비율을 사용한다.

사용스트레스 z_0에서의 대수수명에 대한 $100p$% 분위수의 추정량에 대한 점근적 분산은 다음과 같다.

$$V\{\hat{\eta}_p(z_0)\} = \sigma^2(R' V^*/n)$$

여기서 σ는 대수 정규분포에 대한 대수표준편차이고, 와이블 분포에서는 $\sigma = 1/\beta$이다. R'와 V^*는 대수정규분포와 와이블분포에서 찾을 수 있는데 이는 p, P_0, P_H의 함수이다.

$\eta_p(z_0)$에대한 $100(1-\alpha)$% 신뢰구간의 폭이 $\pm w$가 되도록 하는 표본수 n은 다음과 같이 정해진다.

$$n = R' V^*(z_{\alpha/2}\frac{\sigma}{w})^2$$

4. 검사방법

고장시간 관찰을 연속적으로 하는 연속검사와 일정한 시간을 두고 관찰하는 구간검사방법이 있다.

5. 시험방법

5.1 스트레스 부과방법

스트레스를 부과하는 방법에는 일정스트레스, 계단식 스트레스, 점진적 스트레스, 확률적 스트레스를 방법이 있다.

일정한 스트레스 부과방법은 실제 환경에서 가장 많이 이용되고 있는데, 적용이 간편하고 다음과 같은 장점을 갖고 있다. 첫째 일정 스트레스 부과는 시험시 스트레스의 유지가 편리하며, 둘째 일정 스트레스 수준 하에서의 가속화 시험모형은 널리 개발된 상태이며 경험적인 검증도 많이 이루어져 있다. 또한 신뢰성 추정을 위한 자료분석법도 개발되어 컴퓨터화되어 있다.

계단식 스트레스 부과방법은 시험대상물에 일정한 간격마다 더 높은 스트레스를 부과하는 방법이다. 점진적 스트레스 부과방법은 시험대상에 스트레스를 연속적으로 증가시키면서 시험하는 방법이다. 주기적인 스트레스 부과방법은 주기적인 스트레스를 받는 시험대상에 고장이 발생할 때까지 주파수를 바꾸어 가며 스트레스를 가한다.

확률적 스트레스 부과방법은 불규칙한 스트레스를 받는 시험대상에 평균값과 표준편차를 달리하면서 스트레스를 가한다.

5.2 가속화 시험의 종류

가속화 시험의 종류에는 코끼리 시험, 환경스트레스 검사, 단일시험조건, 다중시험조건, 초기 고장시한이 있다. 코끼리 시험에서는 한 개 또는 몇 개의 시험 대상물을 이용하며 시험대상물에 매우 강력한 한가지 스트레스가 가해진다. 환경스트레스 검사에서는 진동의 부과와 온도변화를 겸비한 일종의 가속화 시험이다.

단일 시험조건을 적용하기 위해서는 가속인자를 아는 경우나 형태모수가 같은 경우 또는 고장의 유형을 아는 경우에 사용된다. 가속인자모형의 경우 각 회사의 고유한 경험에 의한 알고 있는 가속인자에 가속시간을 곱하면 실제사용환경에서의 사용시간으로 간주되는 방법이다.

다중시험조건에서는 신뢰도 추정을 위한 대부분의 과다 스트레스 시험에서는 여러 가지의 스트레스 수준을 적용한다. 따라서 시험 대상물이 각 스트레스 수준으로 할당되어 가속화 시험이 수행된 후 정상상태의 수명분포를 추정하게 된다. 이때 시험에는 두 개 이상의 스트레스 변수가 포함될 수 있다. 이러한 경우에는 여러 스트레스 수준의 조합으로 구성되는 각기 다른 시험조건에서 시험대상물을 관찰하는 것이다.

초기고장시한이란 정상상태 또는 가속상태에서 얼마나 오래 견딜 수 있는지를 의미하며, 제조과정에서 불량품을 제거하기 위한 작업이다.

6. 추정방법

수명추정을 위한 통계적 방법들은 크게 모수적 방법과 비모수적 방법으로 나눌 수 있는데 일반 산업현장에서는 확률지를 이용한 그래프 추정법을 많이 이용하기도 한다.

6.1 모수적 방법

모수적 방법이란 가속화 시험계획에 의해 측정된 수명자료가 어떤 확률분포를 따른다고 가정하고 수명이나 생잔확률 등을 추정하는 방법이다. 실제로 수명자료가 확률분포를 따른다는 가정은 표본수를 많이 한 시험결과를 통해 알 수 있고 수학적으로도 규명 되었다. 이러한 수명자료의 특징은 비록 수명자료가 많지 않더라도 일정한 신뢰도를 가지고 수명을 추정할 수 있는 좋은 장점을 가지게 된다. 주로 많이 사용되는 확률분포는 지수분포, 와이블분포, 정규분포 그리고 대수정규분포가 있다.

가속화 시험계획에 의해 측정된 수명자료와 가정된 확률분포를 가지고 모수를 추정하면 원하는 목적, 즉 수명과 생잔확률 추정을 할 수 있게된다. 확률분포가 지수분포일때는 모수추정이 해석적으로 가능하지만 그 외의 확률분포에서는 수치해석적 방법이 사용되어야 한다. 그 중에서 가장 선호되는 방법이 최대우도추정량(maximum likelihood estimates: MLE)이고 차선책으로 최소제곱추정방법을 쓴다.

먼저 확률분포에 대해 알아보고자 한다. 많은 확률분포중에 자료에 적합시키기 좋아서 많이 사용되는 와이블 분포에 대해 알아보겠다. 와이블 확률밀도 함수에서 모수 m은 형태모수로서 η에 대하여 m이 클수록 봉우리가 오른쪽으로 이동하면서 분포의 형태를 결정한다. m은 대개 1과 3사이의 값이 많이 쓰이는데 $m=1$일 때 와이블 분포는 지수분포와 같다. 위험함수는 $m<1$ 때는 감소하고, $m>1$때는 증가함수이다. 또 η는 척도모수로서 η가 커질수록 분포의 퍼진 정도가 커진다.

X: 고장시간에 대한 확률변수
x : 관찰된 고장시간 (확률변수 X의 특정한 값)
확률밀도함수 :

$$f(x)=\frac{m}{\eta^m}(x-\gamma)^{m-1}e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^m},\quad x\geq 0,\quad m\geq 1,\quad \eta>0$$

일반적으로는 위치모수 γ는 0 인 경우가 많이 쓰인다.

$\gamma=0$이면, 와이블 분포의 확률밀도 함수는 다음과 같다.

$$f(x)=\frac{m}{\eta^m}x^{m-1}e^{-(\frac{x}{\eta})^m},\ x\geq 0,\ m\geq 1,\ \eta>0$$

누적분포함수: $F(x)=1-\exp\left\{-(\frac{x}{\eta})^m\right\}$

기대값 : $E(X)=\eta\Gamma\left\{1+\frac{1}{m}\right\}$

여기서 $\Gamma(v)=\int_0^\infty z^{v-1}e^{-z}dz$이고

자연수 v에 대하여 $\Gamma(v)=(v-1)!$이다.

분산 :

$$V(X)=\eta^2[\Gamma(1+\frac{2}{m})-\left\{\Gamma(1+\frac{1}{m})\right\}^2]$$

100p%분위수 : $x_p=\eta\{-\ln(1-p)\}^{\frac{1}{m}}$

위험함수 : $h(x)=\frac{m}{\eta}(\frac{x}{\eta})^{m-1},\ x>0$

수명자료가 이러한 와이블 분포를 이룬다고 가정하고 모수를 추정하고자 할 때 먼저 대수우도함수를 구하여 수치적으로 모수를 구해야 한다. 완전자료는 중도절단자료에서 중도절단시간이 무한대일 때와 같고 한가지 일 때와 같다. 따라서 경쟁적 고장원인의 중도절단자료에 대한 모수추정방법을 먼저 설명하고, 그 자료의 특수한 형태로서 완전자료와 한가지 고장원인에 대한 모수추정을 살펴보고자 한다.

경쟁적 고장원인은 여러 개의 고장원인이 서로 독립적으로 직렬관계를 갖는 경우인데, 제1종 중도절단에 대하여 먼저 다루고, 제2종 중도절단의 경우로 확대하기로 한다. 제1종 중도절단자료에 대해 먼저 아래와 같이 표기를 정의하기로 하겠다.

n : 시험대상물수

s : 고장원인수

	제1종 중도절단
고장시간중단절단시간	$x_{ij},\ (i=1,\cdots,s,\ j=1,\cdots,r_i)$ $L_{(l)},(l=1,\cdots,n-r)$

r_i : 고장원인 i에 의한 고장개수, $i=1,2,\cdots,s$

$r=\sum_1^s r_i$: 총고장수

$L_{(l)}$: 고장나니 않은 대상물의 중도절단시간, $l=1,2,\cdots,n-r$

x_{ij} : 고장원인 i에 의한 j번째 고장시간, $i=1,2,\cdots,\ j=1,2,\cdots,r_i$

η_i : 고장원인 i에 대한 척도모수

각 고장원인에 대한 형태모수가 $m_i=m$으로서 모두 같은 경우에 대수우도함수는 다음과 같이 된다.

$$\ln L(\eta,m)=\ constant+r\ln m-\sum_{i=1}^{s}r_i\ln\eta_i+(m-1)\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{r_i}\ln x_{ij}\ -(\sum_{i=1}^{s}1/\eta_i)(\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{r_i}x_{ij}^m+\sum_{l=1}^{n-r})$$

최대우도추정량(MLE)를 구하기 위하여 위 식을 모수들에 대하여 미분하여 0으로 놓으면 다음과 같은 두 개의 방정식으로 정리된다.

(a) $\hat{\eta}_i=(\hat{x}+\sum_{l=1}^{n-r}L_{(l)}{}^{\hat{m}})\ /r_i,\ \ i=1,\cdots,s$

(b) $$(\frac{r}{\hat{m}}+\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{r_i}\ln x_{ij})(\hat{x}+\sum_{l=1}^{n-r}L_{(l)}{}^{\hat{m}})/r = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{r_i}x_{ij}{}^{\hat{m}}\ \ln x_{ij})+\sum_{l=1}^{n-r}L_{(l)}{}^{\hat{m}}\ \ln L_{(l)}$$

여기서 $\hat{x}=\sum\sum x_{ij}{}^{\hat{m}}$ 이다. 위 식으로부터 모수의 추정량에 대한 해를 구할 수 없으므로 컴퓨터를 이용한 반복적 계산방법을 쓴다. 먼저 (b)식으로부터 $\hat{m}$을 반복적 계산방법으로 구하여 (a)식에 대입하면 $\hat{\eta}_i$는 쉽게 구해진다. 반복적 계산방법은 뉴톤(Newton)의 방법이 많이 사용된다.

제2종 중도절단자료의 분석은 제1종 중도절단자료와 비슷하다. 제1종 중도절단자료에서의 고장시간과 중도절단시간을 제2종 중도절단시간에서

는 다음과 같이 바꾼다.

즉 고장시간을 고장원인을 고려하지 않은 순서 통계량 $z_{(l)}$로 바꾸며, 중도절단시간은 r번째 고장나는 시간 $z_{(r)}$로서 한 개의 값이다. 위의 표기를 식(a), 식(b)에 대입하면 다음과 같은 방정식이 성립된다.

(c) $\widehat{\eta}_i = \{\hat{x} + (n-r)\ z_{(r)}{}^{\widehat{m}}\}/r_i,\ \ i = 1, \cdots, s$

(d) $\frac{1}{r}\left\{\frac{r}{\widehat{m}} + \sum_{l=1}^{r} \ln z_{(l)}\right\}\{\hat{x} + (n-r)z_{(r)}\}$
$= \sum_{l=1}^{r}(\ z_{(l)}{}^{\widehat{m}}) + (n-r)\ z_{(r)}{}^{\widehat{m}}\ \ln z_{(r)}$

여기서 $\hat{x} = \sum_{l=1}^{r} z_{(l)}{}^{\widehat{m}}$ 이다. 위 식으로부터 모수의 추정량에 대한 해를 구할 수 없으므로 완전자료의 경우는 중도절단이 없으므로 식(a)의 대수우도함수에서 $n-r=0$이다. 따라서 우도 함수의 맨 마지막 항을 제외하고 미분하여 정리하면 식(a), 식(b)는 아래와 같이 바뀐다.

(e) $\widehat{\eta}_i = \hat{x}/r_i,\ \ i = 1, \cdots, s$

(f) $(\frac{r}{\widehat{m}} + \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{r_i} \ln x_{ij})/r = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{r_i}(\ x_{ij}{}^{\widehat{m}}\ \ln x_{ij})$

위 식으로부터 반복적 계산방법에 의하여 추정량을 구한다. 추정량에 대한 분산의 점근값인 CRLB는 무쉬버거(1971)부터 다음과 같이 유도된다.

$$CRLB(\widehat{\eta_{1,}} \cdots, \widehat{\eta}_s, \widehat{m}) = n^{-1}\begin{bmatrix} G_{s,s} & F_{s,1} \\ F_{1,2} & H \end{bmatrix}$$

여기서 $\gamma = 0.5772157$(Euler의 상수)이고 기타 표기들은 다음과 같다.

$$G_{s,s} = \frac{1}{\eta}\begin{bmatrix} \eta_1^3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \eta_s^3 \end{bmatrix} + \frac{6(1-\gamma+\ln\eta)^2}{\pi^2}\eta \cdot \eta$$

$$F_{s,1} = \{6m(1-\gamma+\ln\eta)/\pi^2\}\eta$$

$$H = 6m^2/\pi^2,\ \ \frac{1}{\eta} = \sum_{i=1}^{s} 1/\eta_{i,}\ \ \eta = (\eta_1, \cdots, \eta_s)$$

고장원인이 한가지인 경우는 각종 자료의 형태에 대하여 $s=1$로 생각하면 된다.

6.2 그래프 추정법

수치 해석적 방법은 패키지를 사용하거나 프로그램을 작성해야 되는 어려움이 있다. 그러나 그래프를 이용한 추정법은 이러한 어려움이 없이 모수를 추정할 수 있고 그 이론적 타당성은 입증되었다. 그래프 추정법은 기본적으로 가정한 확률분포의 확률지에 측정한 수명자료를 표시하여 눈으로 어림짐작하여 직선과 점사이의 거리를 최소화하도록 직선을 그은 후 각각의 모수를 추정한다. 확률지는 수명자료가 표시되었을 때 직선의 형태가 되면 수명자료에 대해 가정된 확률분포를 잘 따르도록 제작되었다. 확률지에 수명자료를 표시하려면 수명자료를 정리하여 누적확률을 구하고 각각의 확률분포에서 요구하는 값으로 바꾸어 준 후 확률지에 점을 찍어 표시하면 된다. 이를 각각의 확률분포에 대한 점산도라고 한다. 그래프 추정법에서 그려지는 점산도는 정규 확률점산도, 와이블 확률점산도, 대수정규 확률점산도, 단순 중도절단 자료에 대한 확률점산도, 위험확률점산도 등이 있다.

6.3 비모수적 방법

수명분포를 결정하기 어려울 때, 확률분포를 가정하지 않고 수명을 추정하는 방법이다. 이 방법은 수명 자료에 대한 경험적 확률이나 빈도수 등을 사용하여 수명 테이블을 만들어 간단한 계산 과정을 거쳐 수명을 추정한다. 비교적 절차가 간편하고, 수명분포에 구애받지 않는 장점이 있지만 적절한 수명분포를 가정할 수 있는 자료에 대해서는 모수적 방법으로 더 정확한 추정을 할 수 있다.

7. 수명과 스트레스의 관계식

일반적으로 스트레스가 높을수록 수명은 작아지는데 이러한 관계를 밝히는 식이 수명과 스트

레스의 관계식이다. 수명-스트레스 관계식은 단순히 스트레스에 대한 수명을 추정할 뿐 아니라 정상적인 사용환경에서의 수명을 예측하는데 사용된다. 즉 높은 스트레스에서 추정된 수명을 사용환경에서의 수명으로 바꿀 수 있는 것이다. 즉 정상적인 사용조건에서 어떤 고장원인의 수명이 x 이고 가속시험조건에서는 x'이라면 가속인자 k 는 다음과 같이 정의된다.

$$x = kx'$$

흔히 많이 사용되는 관계식에는 아레니우스 관계식, 역승관계식, 지수관계식, 지수-승 관계식, 2차 관계식, 다항 관계식, 탄력성-유연성 관계식, 어링 관계식이 있는데 여기서는 아레니우스 관계식과 역승관계식에 대해서만 살펴보겠다.

7.1 아레니우스 관계식

아레니우스 관계식은 제품수명이 온도의 함수인 경우에 널리 사용되며 전기절연체, 트랜지스터식 기기, 반도체 기기, 윤활유와 그리스, 백열전구 필라멘트 등에서 적용되어져 왔다. 화학적 반응률에 대한 아레니우스 법칙에 기초해 있기 때문에 이 관계식은 화학적 반응이나 금속확산 작용에 기인하여 고장나는 많은 제품을 나타내기 위해 사용된다. 이 관계는 특정범위의 온도에 대해 정확하다.

아레니우스 비율 법칙에 따르면 온도에 의한 단순 화학반응 비율은 다음과 같다.

$$\text{비율} = A'\exp(-E/kT)$$

E : 반응의 활성화 에너지
k : 볼쯔만 상수(8.6171E-5)
T : 켈빈 절대온도
A′ : 상수(제품의 특성이나 시험조건에 따른 물성치)

다음에 설명될 관계는 화학적 반응에 기인한 간단한 형태의 고장에 기반을 두고 있다. 그 제품은 어떤 기준량의 화학물질이 반응했을 때, 고장나는 것으로 간주한다. 이러한 관계는

$$(\text{임계값}) = (\text{비율}) \cdot (\text{고장날때까지의시간})$$

이고 마찬가지로 고장날 때까지의 시간은 다음과 같다.

$$(\text{고장날때까지의시간}) = (\text{임계값})/(\text{비율})$$

이는 고장까지의 시간 x가 비율에 대한 반비례함을 보여주며 다음과 같은 아레니우스 수명 관계식을 도출할 수 있다.

$$x = A\exp(E/kT)$$

여기서 A는 제품외형, 표본크기, 제조 및 시험방법, 그 외 요인들에 의한 상수이다. 여러 가지 고장원인을 갖는 제품은 각 고장원인마다 서로 다른 A값과 E값을 갖는다.

아레니우스 수명관계식의 대수형태는 다음과 같이 선형화된 관계로 나타낸다.

$$\log x = \gamma_0 + \gamma_1/T$$

따라서 수명의 대수값 $\log x$는 절대온도의 역수인 1/T의 선형함수이다. 실제로 계수추정과정에서 대수수명에 대한 스트레스 변수는 계산 편의상 1/T대신에 $z = 1000/T$을 이용한다.

7.2 역승관계식

역승관계식은 제품 수명을 가속화 스트레스의 함수로 모형화 시키는데 널리 사용되고 있다. 이 관계식은 역승법칙이라 부르기도 하고 줄여서 승법칙이라고 한다. 여기서의 법칙은 보편적으로 그 관계식이 성립됨을 말하며, 이론에 근거를 둔 것

이 아니라 경험에 의해 많은 제품들에 적합하다는 것이다. 볼트의 내구력시험에서 전자절연체와 유전체, 보울베이링과 로울러 베어링, 백열등(필라멘트), 프래시램프, 기계적 부하에 따른 간단한 금속피로, 열주기에 따른 금속피로 등의 응용분야가 있다. 가속화 스트레스 변수 z가 양수라고 가정할 때, 제품의 수명 x와 스트레스 z의 역승관계식은 다음과 같다.

$$x(z) = A/z^{\gamma_1}$$

여기서 A와 γ_1은 제품외형, 표본크기, 제조 및 시험방법 등의 특성값이 되는 모수이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x(z) = (A'/z)^{\gamma_1} = A''(z_0/z)^{\gamma_1}$$

여기서 z_0는 특정한 스트레스 수준이다. 모수 γ_1은 승 또는 지수라 부른다.

7.3 모수추정

○ 아레니우스-와이블 모형

아레니우스-와이블 모형은 스트레스에 대한 아레니우스 의존도와 와이블 분포를 합쳐 놓은 것이다. 아레니우스-와이블모형의 가정사항은 다음과 같다.

① 스트레스 수준 z에서의 제품수명은 와이블분포를 따른다.
② 와이블 형태모수 m은 스트레스에 독립적인 상수이다.
③ 대수수명의 평균 $\mu = \ln\eta$는 스트레스 z의 선형함수로서 다음과 같다.

$$\mu(z) = \ln\eta(z) = \gamma_0 + \gamma_1 z$$

여기서 γ_0, γ_1, σ는 제품과 시험방법의 특성값이다.

수명추정은 그래프법과 수치해석법으로 할 수 있다. 그래프법의 경우는 와이블분포 확률지를 이용하여 각 스트레스 수준에서의 수명을 알 수 있고 아레니우스 확률지를 이용하면 수명과 스트레스 사이의 관계를 알 수 있다. 수치해석 방법으로 많이 사용하는 것은 SAS가 있으며 요즈음은 MATLAB, MATHEMATICA, EXCEL 등이 있으며 또는 VISUAL BASIC, C, FORTRAN으로 직접 프로그램을 코딩해도 된다. 본 실험실에서 위의 모든 방법을 수행할 수 있다.

그래프법이나 수치해석법에 의해서 구한 r_1을 가지고 아레니우스 식에서 활성화 에너지를 $E = r_1 k/\log(e) \approx 2.3025 r_1 k$를 구할 수 있다.

○ 역승-와이블 모형

역승-와이블모형의 가정사항은 다음과 같다.
① 스트레스 수준 z에서의 제품수명은 와이블분포를 따른다.
② 와이블 형태모수 m은 스트레스에 독립적인 상수이다.
③ 척도모수 η는 스트레스 z의 역승함수로서 다음과 같다.

$$\eta(z) = e^{\gamma_0}/z^{\gamma_1}$$

여기서 γ_0, γ_1, σ는 제품과 시험방법의 특성값이다.
평균대수수명 $\mu(z)$는 다음과 같다.

$$\mu(z) = \gamma_0 + \gamma_1(-\log z) = \gamma_0 + \gamma_1 z'$$

수명추정을 위한 그래프법의 경우는 와이블분포 확률지를 이용하여 각 스트레스 수준에서의 수명을 알 수 있고 대수-대수 확률지를 이용하면 수명과 스트레스 사이의 관계를 알 수 있다. 수치

해석 방법은 상용화된 패키지나 프로그램을 직접 만들어 사용하면 된다.
그래프법이나 수치해석법에 의해서 구한 r_1을 가지고 아레니우스 식에서 활성화 에너지를 $E=r_1k/\log(e)\approx2.3025r_1k$를 구할 수 있다.

8. O Ring의 가속화 시험

O Ring은 저항온도계나 ICI 등에서 습기나 물을 차단하는 재료로서 많이 사용되는 비금속 재료로서 비교적 수명이 작아서 제품의 전체수명을 좌우한다. 지금까지는 원전기기의 경우 이러한 물질의 활성화 에너지를 주로 해외에서 측정한 값을 사용하는 바람에 큰 외화 낭비가 있었다. 본 연구에서는 실제 실험에 앞서 신뢰성 평가의 기법을 O ring에 적용하는 계획을 작성하고자 한다. 아래에 시험을 위한 선택사항을 나열하였다.

목적 : 재료의 활성화 에너지 측정
시험방법 : 일정스트레스
수명추정방법 : 최대우도추정과 그래프 추정
자료의 형태 : 중도절단 자료
수명분포 : 와이블 분포
검사방법 : 구간검사
가속시험계획 : 미커-한의 절충계획

8.1 시료선정 및 가속수준의 결정

본 연구에서는 (주)우진의 제품의 원료인 O Ring(Silicone O ring, Paker S604-70)을 대상으로 한다. 중도절단 자료에서 스트레스 수준을 결정하기 위해서 경험이나 비슷한 자료 또는 이전의 시험결과를 토대로 모수의 근사값을 구해야 한다. 만약 공급자가 적절한 데이터를 주지 못할 경우 O Ring의 사용온도가 48℃이고 최대온도가 112℃인 것을 고려하여 4개의 지점에서 등간격으로 같은 수의 표본을 할당하는 전통적 계획을 수립하여 시험을 수행한 후 그 분석결과가 만족스럽지 못하면 그 결과를 기준으로 하여 미커-한 계획을 세운다. 미커-한 계획에서 스트레스 수준을 결정하기 위해서는 모형의 모수 r_0, r_1, σ가 필요하다. 공급자로부터의 자료에서 모형의 모수를 선택한 후 특성값 a, b를 구한다. 그 후 상위스트레스 z_H와 사용스트레스 z_0에서의 고장날 확률 P_0, P_H를 구한 후 ζ를 와이블 분포에서 구한 후 하위스트레스 z_L와 z_M를 구한다.

구분	T_L	T_M	T_H
온도	$48+\zeta(112-48)$	$(T_L+T_H)/2$	112℃

8.2 시료수의 배분 및 시험시간의 결정

총시료수는 공급자 및 자료를 참조한 후 결정하고 만약 500개로 한다면 최적배치계획에 따라 다음과 같이 한다.

구분	T_L	T_M	T_H
개수	71	143	286

총 시험시간도 공급자 및 자료를 참조한 후 결정하고 만약 504(21일, LOCA 시험기간을 고려)시간 이라면 특성치 측정시간을 다음과 같이 한다.

시험시간(시간)	특성치 측정시간(시간)
504	50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600

8.3 고장판단기준

O Ring이 고장날 경우 물이나 습기 침투가 주요결과이므로 O Ring에 파손이 없나 살펴본다. 또는 O Ring이 실제 설치될 때 일정량의 스트레스를 받은 상태임을 고려하여 항온조에 설치할

때 일정한 변형율을 주어 온도를 높여 주면 O Ring의 파괴는 더 쉽게 관찰되리라 생각된다 (외국의 활성화 에너지 데이터 베이스를 보면 파라미터로서 변형율이 포함되어 있음). 이 외에 절연저항 측정, 절단여부 관찰, 무게 측정, 경도 측정 등이 있으나 공급자와 함께 실제 설치상황을 고려하여 결정한다.

특성	판단기준
절연저항	> 10E11Ohm
절단여부	연결상태
무게측정	무게 변화율
경도측정	경도 변화율

8.4 결과분석

- 각 시편별로 수명자료를 정리한다.
- 그래프 법이 수치해석 법에 의해 수명추정 및 활성화 에너지를 구한다.

9. 결 론

본 연구에서는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 신뢰성 평가의 이론적 배경을 시험목적, 시험방법, 시험구간, 시험계획, 수명추정방법, 스트레스와 수명의 관계 등으로 나누어 검토하여 현재 원전기기 성능평가와 관련해서 활성화 에너지를 구하는 데 직접적인 도움이 되도록 하였다.

(2) 원전기기에서 자주 사용되는 부품인 O Ring의 가속화 시험계획 및 분석에 대한 절차를 세울 수 있었다.

(3) 현재 우리 부서의 실험장비 및 분석장비로도 활성화 에너지를 구하는 업무를 수행하는데 부족함이 없음을 알게 되었다.

(4) 차후 실험을 통한 경험과 노화우를 계속 축적하여 실질적인 결과 즉 과제창출에 기여할 수 있으리라고 판단된다.

(5) 현재 원전기기 성능평가 업무에서 힘든 부분이었던 활성화에너지를 측정할 수 있는 능력을 확보할 수 있는 기초가 되리라 판단된다.

참 고 문 헌

[1]. David J. Groebel 외 2인, “Determination and Interpretation of Activation Energy Using Accelerated-Test Data", 2001 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Philadelphia, Pennsylvania, USA, January 22-25, 2001

[2]. ReliaSoft Corporation, "Accelerated Life Testing Reference", ReliaSoft Publishing, 1998

[3]. 윤상운, “신뢰성 분석”, TQM 연구회, 자유아카데미, 1996년 8월

[4]. Nelson, Wayne, "Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses", John Wiley&Sons, 1990