신뢰성응용연구 신뢰성기술
제12권, 제3호. pp.131-138, 2012

초기 단계의 성능분포를 활용한 신뢰성 인증시험의 설계

정해성

서원대학교 멀티미디어공학과

Design of Reliability Qualification Test Based on Performance Distribution at the Earlier Stage

Hai Sung Jeong

Dept. of Multimedia Engineering, Seowon Univ.

Abstract

A design of reliability qualification test based on performance distribution is developed. In general, the performance of an item degrades as the time goes by and the failure of an item occurs when the performance degradation reaches the pre-determined critical level. This article considers the reliability qualification test based on a more tightened critical value at the earlier stage to reduce the evaluation testing time and cost. A numerical example is provided to illustrate how to use the developed reliability qualification test.

Keywords : critical value, earlier stage, performance distribution, reliability qualification test

논문접수일 : 2012년 07월 30일 논문수정일 : 2012년 08월 16일 게재확정일 : 2012년 09월 15일

1. 서론

높은 신뢰도를 갖는 아이템의 경우 가속수명시험을 실시하더라도 규정된 시험시간 동안에 고장을 발견하지 못하는 경우가 종종 생긴다. 이때에는 수명시험에 의한 신뢰성 평가보다는 시간 경과에 따른 성능 변화와 이에 따른 성능 분포에 기초하여 신뢰성 평가를 실시하는 열화시험이 효과적이다. 열화시험은 시간에 따라 점차 성능이 저하되는 특성치를 갖는 아이템에 대하여 경과 시간별로 성능분포를 측정하고, 그 과정에서 얻어진 특성치를 이용하여 신뢰성을 평가하는 시험이다.

열화시험에 대한 연구는 열화자료에 대한 통계적 분석, 열화시험 설계와 열화자료에 의한 신뢰성 인증시험의 설계로 구분할 수 있다. 이제까지 대부분의 열화시험과 열화자료에 대한 연구는 실험결과를 통계적으로 분석하고 해석하는 데에 집중되어왔다. Nelson(1990), Meeker and Escobar(1998), Meeker et al(1998), 정해성(2003), 배석주(2005) 등이 열화자료의 통계적 분석방법에 대하여 연구했다.

열화시험을 설계하기 위한 연구도 비교적 활발하다. Boulanger and Escobar(1994)는 가속열화시험에서 추정량의 분산을 최소화하는 스트레스 수준, 스트레스 수준별 시료 할당률, 관측시간, 시료수에 대한 설계방법을 연구했다. Yu and Tseng(1999)은 총시험비용을 제한조건으로 한 검사빈도, 시험 종료시간, 시료수 등의 설계방법에 대해 연구했다. 이외에도 열화시험을 설계에 관한 Wu and Chang(2002), Yu and Chiao(2002), Yu(2003) 등의 연구도 있다.

끝으로 열화자료에 의한 신뢰성 인증시험의 설계에 관한 연구가 있다. 금속소재로 이루어진 유압용기에 대해 강도분포에 기초한 신뢰성 인증방법이 NEPA(2000)에서 제시됐다. Sohn and Jang(2001)은 제품 양산시 신뢰성 열화자료에 의한 불량률, 성능 저하 판정기준, 고장허용개수 등을 요소로 하는 수락시험 설계에 관해 연구했다. 박부희 외(2005)는 엄격한 고장판정기준을 구하는 방법과 이를 이용한 비복원 열화시험을 제안하였다. 권영일(2006)은 도료, 실란트, 접착제 등 건설자재에 대한 수명평가와 신뢰성 인증방법에 관한 연구를 하였다. 또한 권영일(2010)은 성능분포에 기초한 신뢰성 인증시험 설계에 관해 연구했다. 권영일(2010)은 임의의 시점에서의 성능 분포는 정규분포를 따른다고 가정했다. 또한 산포를 반영하는 변동계수 σ/μ 는 경과시간과 무관하게 일정하다고 가정했다. 이는 성능의 산포가 성능의 평균에 비례한다는 가정이다.

그러나 일반적으로 성능 분포는 정규분포이외에도 다양한 분포를 가질 수가 있다. 또한 산포를 반영하는 변동계수 σ/μ 는 경과시간과 무관하게 일정하다는 가정도 분포의 형태를 지나치게 제약한다. 본 연구에서는 임의의 시점에서의 성능 분포가 형상모수 σ가 일정한 대수정규분포를 따른다고 가정한 신뢰성 인증시험 설계에 관해 연구하고자 한다.

2. 신뢰성 인증시험의 설계

일반적으로 열화시험에서는 동질성을 갖는 n개의 시료를 시험에 투입하고, 시간 경과에 따라 정해진 시점에서 성능 또는 열화량을 관측한다. 본 연구에서는 성능분포에 대하여 다음과 같이 가정한다.

1. 임의의 관측시점에서의 성능분포는 대수정규분포를 따른다.
2. 관측시간별로 적합되는 대수정규분포의 형상모수 σ가 일정하다.
3. 관측시간별로 적합되는 대수정규분포의 메디안은 관측시간과 Log-Linear 관계이다.

상기 가정 하에서 초기 단계 $t\,(t < l)$에서의 성능분포를 활용한 신뢰성 인증시험의 설계는 다음과 같이 정리될 수 있다.

정리 1. 상기 가정에 의한 아이템에 대하여, 신뢰수준 $(1-\beta)\times 100\,\%$에서 B_{100p}수명이 l임을 보증하기위한 시험방법 및 합격기준은 다음과 같다.
n 개의 시료에 대하여 경과시간 $L=t\ (t < l)$에서의 성능을 관측하여, 관측된 성능 특성치가

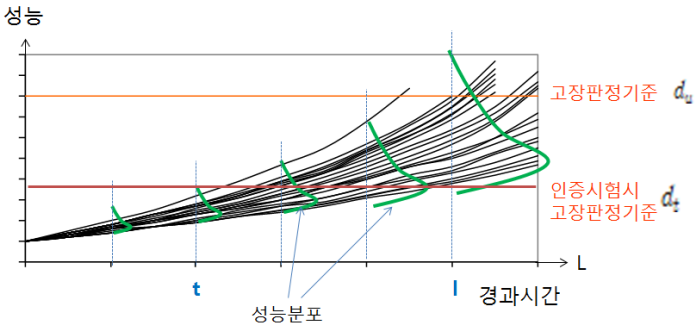
$$d_t = \frac{d_u}{\exp[(z_p + z_q)\sigma + \alpha_1(l-t)]}$$

와 같은 고장판단기준 d_t를 초과하여 고장판정을 받은 것의 수가 $c\,(c < n)$개 이하이면, 합격으로 판정한다.

증 명. 가정된 관측시간에 따른 성능분포와 고장판정기준을 그림으로 표시하면 <그림 1>과 같다. 즉, 임의의 관측시점 L 에 대하여 다음 모형이 가정된다.

$$F(x;L) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln B_{50}(L)}{\sigma}\right) \text{ 와 } B_{50}(L) = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 L) \qquad (1)$$

여기서 x 는 성능(열화량)이며, $\Phi(\cdot)$는 표준정규분포의 누적분포함수이고, $B_{50}(L)$ 는 관측시간 L 에서의 성능분포의 메디안을 나타내는 모수이다.



<그림 1> 관측시간 L 에서의 성능분포와 고장판정기준

위와 같은 가정 하에서 본 연구에서 적용하는 시험방법 및 합격기준은 다음과 같다. 시료수 n에 대하여 주어진 경과시간 $L=t$ 에서 c개 이하가 고장판정을 받는다면, 신뢰수준 $(1-\beta)\times 100\,\%$에서 B_{100p}수명이 l임이 보증된다. 여기서 $t < l$ 이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$H_0 : B_{100p} \le l \quad v.s. \quad H_1 : B_{100p} > l \tag{2}$$

식 (2)와 같은 가설에 대하여, 기각역을 'n개 시료를 시험해서 c개 이하가 고장판정을 받는다.'로 할 경우, 신뢰수준 $(1-\beta)\times 100\,\%$에서의 검정법은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$B_{100p} = l \text{ 하에서 } \sum_{x=0}^{c} \binom{n}{x} (1-q)^x q^{n-x} = \beta \tag{3}$$

여기서 q 는 $B_{100p} = l$인 수명을 갖는 모집단으로부터의 하나의 시료를 $L = t$ 시간 동안 시험했을 때, 성능이 고장판단기준을 넘지 않을 확률이다.

이제 식 (2)와 (3)을 구체적으로 풀어본다. $B_{100p} = l$ 은 다음과 같이 풀어 쓸 수 있다. 먼저 성능분포의 가정으로부터 $L = l$ 시간에서의 성능 X_l의 분포는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$X_l \sim LN(\ln B_{50}(l)\ ,\ \sigma^2) \tag{4}$$

이제 식 (1)과 (4)로부터 $\ln X_l \sim N(\alpha_0 + \alpha_1 l\ ,\ \sigma^2)$ 와 통상적인 고장판정기준 d_u에 대하여, $B_{100p} = l$ 가정 하에서

$$
\begin{aligned}
& \Pr(\ln X_l \geq \ln d_u) \\
= \; & 1 - \Pr(\ln X_l < \ln d_u) \\
= \; & 1 - \Phi\left[\frac{\ln d_u - (\alpha_0 + \alpha_1 l)}{\sigma} \right] \\
= \; & p
\end{aligned}
$$

이로부터, 다음을 얻는다.

$$\alpha_0 + \alpha_1 l = \ln x_u - z_p \sigma \tag{5}$$

이제 $B_{100p} = l$인 수명을 갖는 모집단에서의 시료의 $L = t$ 시간에서의 성능분포에 대하여, 성능값이 인증시험시의 고장판단기준 d_t를 넘지 않을 확률이 q라는 것으로부터 다음을 얻을 수 있다. 즉,
$B_{100p} = l$인 수명을 갖는 아이템의 $L = t$ 시간에서의 성능 X_t의 분포는 다음과 같이 표현된다. $\ln X_t \sim N(\alpha_0 + \alpha_1 t, \sigma^2)$ 와 식 (5)로부터

$$\ln X_t \sim N(\alpha_1 (t - l) + \ln d_u - z_p \sigma, \sigma^2) \tag{6}$$

따라서, $\Pr(\ln X_t \geq \ln d_t | B_{100p} = l) = q$ 와 식 (6)으로부터, 인증시험시의 고장판단기준 d_t를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_t = \frac{d_u}{\exp[(z_p + z_q)\sigma + \alpha_1 (l - t)]} \tag{7}$$

3. 적용예제

<그림 2>는 Lu and Meeker(1993)의 연구에서 사용된 피로-균열 성장 자료를 그림으로 나타낸 것이다. 이 자료는 21개의 시료로부터 시간 경과에 따른 균열의 길이를 관측하여 얻어졌으며, 고장판단기준 d_u은 균열의 길이가 1.6 인치가 되는 순간으로 정하였다.
정해성(2003)은 이로부터 자료관측시간을 0.00으로부터 0.12 million cycles 까지 0.01 million cycle 단위로 관측한 21개 시료의 균열 길이를 이용하여 열화자료분석을 실시했다. 그 결과 다음이 확인되었다.

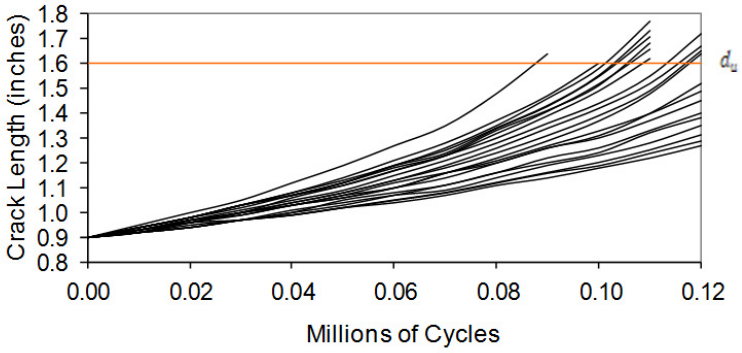
1. 임의의 관측시점에서의 성능의 분포는 대수정규분포를 따른다.
2. 관측시간별로 적합되는 대수정규분포의 형상모수 σ가 일정하다.
3. 관측시간별로 적합되는 대수정규분포의 메디안은 관측시간과 Log-Linear 관계이다.

즉, 임의의 관측시간 L 에 대하여

$$F(x;L) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln B_{50}(L)}{\sigma}\right) \text{ 와 } B_{50}(L) = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 L)$$

로부터 다음의 결과를 얻었다.

$$F(x;V) = \Phi\left\{\frac{\ln x - (-0.1588 + 4.7468\ V)}{0.0937}\right\}.$$



<그림 2> Lu and Meeker(1993)에서 이용된 피로-균열 성장 자료

Lu and Meeker(1993)의 자료와 같은 금속제품에 대하여 0.1 백만 사이클의 B_{10} 수명이 요구되고 있다고 한다. 이 제품의 고장 판단 기준은 균열의 길이가 1.6 인치가 되는 순간이다. 시험장비의 가용성과 시험시료에 소요되는 비용의 제약으로 0.1 백만 사이클보다 적은 경과시간에의 성능분포를 이용하여 신뢰성 인증을 받고자한다. n = 10 개의 시료로 시험하고 허용 고장 수는 c =1 로 하기로 했다. 0.06 백만 사이클에서의 성능분포를 이용하여 신뢰수준 90%로 0.1 백만 사이클의 B_{10} 수명을 보증하는 시험을 설계하면 다음과 같다.

1) 식 (3)으로부터 신뢰수준을 만족하는 q 값을 구한다.
   이 경우, n = 10, c = 1 및 β = 0.1 이므로 q = 0.6630
2) 식 (7)을 이용하여 인증시험조건에서의 고장판정기준값 d_t를 구한다.
   d_u = 1.6, $z_{0.1}$ = 1.2816, $z_{0.6630}$ = -0.4205, l = 0.1, t = 0.06, α_1 = 4.7468, σ = 0.0937 로부터 d_t = 1.22 가 된다.

이는 시료 10개를 시험하여 0.06 백만 사이클에서의 균열의 길이를 관측하여 고장판단기준 1.22 인치가 넘는 것이 1 개 이하이면, 합격, 즉 신뢰수준 90%에서 0.1 백만 사이클의 B_{10}

수명을 보증할 수 있다는 것이다.

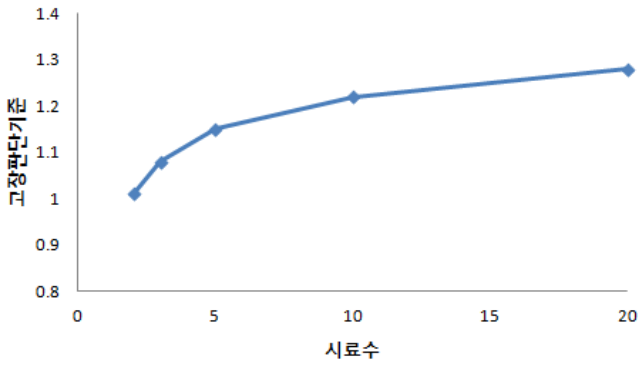
한편 시료수를 줄여 n = 5 개의 시료로 시험하고 허용 고장 수는 동일하게 c = 1 로 하기로 한다면, 같은 90% 신뢰수준에서의 시험조건은 다음과 같이 달라진다.

n = 5, c = 1 및 β = 0.1 로부터 q = 0.6630과 d_t = 1.15 가 되어 인증시험 고장판단기준이 강화된다.

<표 1>과 <그림 3>은 허용 고장 수는 c =1 로 하고, 90% 신뢰수준에서 0.1 백만 사이클의 B_{10} 수명을 보증하는 시험에서의 시료수와 고장판단기준의 관계를 나타낸다. 이로부터 동일한 수명을 보증하기 위해서는 시료가 적어지면, 인증을 위한 고장판정기준이 강화돼야 함을 알 수 있다.

<표 1> 시료수 n과 고장판정기준값의 관계

n	q	고장판단기준
2	0.0517	1.01
3	0.1957	1.08
5	0.4162	1.15
10	0.6630	1.22
20	0.8190	1.28



<그림 3> 시료수 n에 따른 고장판정기준값의 변화

4. 결론

본 연구에서는 성능 변화에 따라 고장이 유발되는 아이템에 대한 신뢰성 인증방법을 제안하였다. 열화시험을 실시하면 규정된 시험시간 이전이라도 수명 평가를 실시할 수 있다. 또한 시험장비의 가용성과 비용 등의 제약으로 초기단계에서 수명평가가 요구되기도 한다. 본 연구에서는 초기단계의 성능분포를 이용한 신뢰성 인증 방법을 설계하고 적용 예제를 제공하였다. 이러한 결과를 이용하여 인증과 개발에 소요되는 기간을 단축시킬 수 있을 것이다. 향후에는 정규분포나 대수정규분포 이외의 성능분포에 의한 신뢰성 인증방법의 설계에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 권영일(2006), 열화성능에 의한 건설자재 수명 평가에 관한 연구, 신뢰성응용연구, 6권, 4호, 275-284.

[2] 권영일(2010), 성능분포에 기초한 신뢰성 인정시험 설계, 신뢰성응용연구, 10권, 1호, 1-9.

[3] 박부희, 임호경, 장중순(2005), 엄격한 고장판정기준을 적용한 비복원 열화시험 설계에 관한 연구, 신뢰성응용연구, 5권, 1호, 167-180.

[4] 배석주(2005), VFD(Vacuum Fluorescent Display) 가속열화시험 응용사례, 신뢰성응용연구, 5권, 4호, 413-425.

[5] 정해성(2003), 열화 자료의 신뢰성 분석과 응용, 신뢰성응용연구, 3권, 2호, 93-101.

[6] Boulanger, M. and Escobar, L. A. (1994), "Experimental Design for a Class of Accelerated Degradation Tests." *Technometrics*, Vol. 36. No. 3, 260-272.

[7] Lu, C. J. and Meeker, W. Q. (1993) "Using Degradation Measures to Estimate a Time-to-Failure Distribution." *Technometrics* 35(2), 161-173.

[8] Meeker, W.Q. and Escobar L.A.(1998), *Statistical Method for Reliability Data*, Wiley.

[9] Meeker, W.Q., Escobar L.A. and Lu, C.J.(1998), "Accelerated Degradation Tests: Modeling and Analysis", *Technometrics*, 40, 89-99.

[10] Nelson, W.(1990), *Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*, John Wiley & Sons.

[11] NEPA/T2.6.1 R2-2000 (2000), Fluid Power Components-Method for Verifying the Fatigue and Establishing the Burst Pressure ratings of the pressure containing envelope of a metal fluid power component, National Fluid Power Association, 2000.

[12] Sohn, S.Y. and Jang, J.S.(2001), "Acceptance Sampling Based on Reliability Degradation Data", *Reliability Engineering and System Safety,* 73(1), 67-72.

[13] Wu, S.J. and Chang, C.T.(2002), " Optimal Design of Degradation Tests in Presence of Cost Constraint", *Reliability Engineering and System Safety,* 76, 109-115.

[14] Yu, H.F(2003), "Designing an Accelerated Degradation Experiment by Optimizing the Estimation of the Percentile", *Quality And Reliability Engineering International,* Vol. 19, Issue 3, 197-214.

[15] Yu, H.F. and Chiao, C.H.(2002), "An Optimal Designed Degradation Experiment for Reliability Improvement", *IEEE Transactions on Reliability,* Vol. 51, No. 4, 427-433.

[16] Yu, H.F., and Tseng, S.T.(1999), "Designing a degradation experiment", *Naval Research Logistics*, Vol.46, 689-706.