

신뢰성보증을 위한 2단계 수명시험방식 설계

권영일

청주대학교 산업공학과

360-764, 충북 청주시 상당구 내덕동 36

Tel: 043-229-8519 E-mail: yikwon@cju.ac.kr

Abstract.

신뢰성 보증을 위한 인증시험(reliability qualification test)이나 수락시험(reliability acceptance test)에 있어서 가장 널리 사용되는 시험방식 중의 하나가 무고장 시험방식(zero-failure test)이다. 무고장 시험방식이 선호되는 이유는 요구수명을 주어진 신뢰수준으로 보장하는 시험방식들 중에서 적용이 비교적 수월하며 상대적으로 시험기간이나 시료수를 줄일 수 있다는 점 때문이다. 그러나 무고장 시험의 경우, 시험을 의뢰하는 입장에서는 고장이 하나라도 발생하면 불합격 된다는 부담감을 가질 수 있으며 생산자 위험이 커진다는 단점도 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 보완한 2단계 시험방식을 설계, 제안하고 시험시간, OC곡선 등 시험방식의 특성을 무고장 시험방식과 비교, 분석하였다.

1. 서론

수명시험을 실시할 때 흔히 겪는 문제의 하나는 관측되는 고장 데이터 수가 매우 적거나 무고장인 경우가 많다는 점이다. 특히 자동차, 전기, 기계류 부품 중에는 대형, 고가의 장비가 많고 수명시험에 소요되는 비용(시험장비, 에너지 사용료 등)도 다른 전자, 소형 전기 부품 등에 비해 월등히 높은 경우가 많다. 따라서 총 시험비용과 시간의 제약으로 불가피하게 소수의 시료만으로 한정된 시간 동안에 시험을 종료해야 하는 상황이 발생한다. 그 결과 관측되는 고장 수도 극히 적거나 무고장 상태에서 시험이 종료된다.

따라서 현장에서 신뢰성 보증을 위해 가장 널리 사용되는 시험방식 중의 하나가 무고장 시험방식(zero-failure test)이다. 무고장 시험방식이 선호되는 이유는 요구수명을 주어진 신뢰수준으로 보장하는 시험방식들 중에서 적용이 비교적 수월하며, 상대적으로 시험기간이나 시료수를 줄일 수 있다는 점 때문이다.

지금까지 연구된 대표적인 신뢰성 인증시험 규격이나 방식으로는 지수분포에 대한 Quality Control and Reliability Handbook 108, MIL-STD-690, MIL-STD-781 등이 있으며, 와이블 분포에 대한 방식으로는 미 국방성의 Quality control and reliability technical reports 인 TR-3 (1961), TR-4 (1962), TR-6 (1963)을 비롯하여 Fertig 와 Mann (1980)의 정수중단에 의한 샘플링 검사방식, 그리고 와이블 및 대수정규분포에 적용할 수 있는 Schneider (1989)의 연구결과 등이 있다. 그밖에 비용모델에 근거한 경제적인 샘플링 검사방식들이 Kwon (1993, 1996), Bai 와 Kwon (1993) 등에 의해 연구되었다.

본 연구에서는 자동차, 전기, 전자, 기계류 부품 등의 수명분포로 널리 사용되는 와이블 분포에 대해 무고장 합격기준을 적용한 시험방식의 대안으로 사용 할 수 있는 2단계 시험방식을 제안하였다. 무고장 시험의 경우, 시험을 의뢰하는 입장에서는 고장이 하나라도 발생하면 불합격 된다는 부담감을 가질 수 있으

며 생산자 위험이 커진다는 단점도 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 보완한 2단계 시험방식을 설계, 제안하고 시험시간, OC 곡선 등 시험방식의 특성을 무고장 시험방식과 비교, 분석하였다. 인증시험방식은 MIL-STD-690C 에서와 같은 소비자위험 보증방식 (신뢰수준 $CL=1$ -소비자위험)을 사용하였다.

2. 2단계 수명시험의 설계

2.1 보증수명과 형상모수에 대한 가정

여기서는 수명이 와이블분포를 따르는 경우 B_{10} 수명 또는 특성수명 (characteristic life) θ 를 주어진 신뢰수준 CL 로 보증하는 시험방식을 설계한다. 일반적으로 와이블 분포의 형상모수값 β 는 대상부품 별로 과거의 경험이나 시험자료로부터 구할 수 있는 경우가 많다. 특히 시료수가 적거나 고장이 거의 관측되지 않는 상황에서 형상모수값 β 가 미지인 경우의 와이블 분석은 그 결과의 불확실성 (uncertainty)이 크고 분석자체가 불가능한 경우도 있다. 이러한 경우 시험부품의 특성이나 과거 경험으로부터 도출된 형상모수값의 추정치를 사용하는 것이 불확실성을 크게 감소시키는 것으로 알려져 있다 (The new Weibull handbook, 2000 참조). 따라서 본 연구에서는 형상모수값 β 값을 알고 있다고 가정한다.

2.2 시험절차와 합격기준

1. n개 시료로 동시에 시험을 시작한다.
2. 시간 t_1 까지 시험한다. t_1 까지 고장수를 $N(t_1)$ 이라 할 때
 - 1) $N(t_1)=0$ 이면 합격,
 - 2) $N(t_1)=1$ 이면 t_2 까지 시험 계속
 - 3) $N(t_1)\geq 2$ 이면 불합격이다.
3. 2)의 경우 t_2 까지의 고장수를 $N(t_2)$ 라 할

때

- 1) $N(t_2)=1$ 이면 합격
- 2) $N(t_2)\geq 2$ 면 불합격이다.

단 시험 중 고장 난 시료는 새것으로 교체하지 않는다 (비교체시험).

2.3 시험방식 설계

1단계 t_1 에서의 합격확률을 PA_1 , 2단계 t_2 에서의 합격확률을 PA_2 라 하면 총 합격확률은

$$PA = PA_1 + PA_2 \quad (1)$$

이다.

여기서 2.2 절의 시험절차 및 합격기준에 의하면 PA_1 및 PA_2 는 각각 다음과 같이 구해진다:

$$PA_1 = Pr\{N(t_1) = 0\} \quad (2)$$

$$= e^{-\frac{nt_1^\beta}{\theta^\beta}}$$

$$PA_2 = Pr\{N(t_1) = 1\}$$

$$\times Pr\{N(t_2) = 1 | N(t_1) = 1\} \quad (3)$$

$$= n(1 - e^{-\frac{t_1^\beta}{\theta^\beta}})e^{-\frac{(n-1)t_2^\beta}{\theta^\beta}}$$

위의 합격확률식을 이용하여 B_{10} 수명 또는 특성수명 θ 를 주어진 신뢰수준 CL 로 보증하는 시험방식을 다음과 같이 설계 한다:

- 1) 보증수명인 B_{10} 수명(또는 특성수명 θ)을 갖는 시험대상부품에 대해

- 1단계 합격비율 = π ,
- 2단계 합격비율 = $1 - \pi$

를 정한다. (예: $\pi = 0.7$, $1 - \pi = 0.3$)

2) $PA_1 = (1 - CL)\pi$, $PA_2 = (1 - CL)(1 - \pi)$ 를 만족하는 t_1 , t_2 를 구한다. 그 결과는 다음과 같다.

$$t_1 = \theta \left[\frac{-\ln\{(1 - CL)\pi\}}{n} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

$$t_2 = \theta \left[\frac{\ln\left\{ \frac{n(1 - e^{-(\frac{t_1}{\theta})^\beta})}{(1 - CL)(1 - \pi)} \right\}}{n - 1} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (5)$$

여기서 θ 는 B_{10} 수명에 등가되는 척도모수를 말한다.

3. 설계 사례

수명이 형상모수값이 $\beta = 1.5$ 인 와이블 분포를 따르는 부품에 대해 $n = 10$ 개의 시료로 다음의 수명을 보증하는 시험방식을 생각해 보자.

- 보증수명 $B_{10} = 1,000$ 시간
- 신뢰수준 $CL = 0.9$

이때 $B_{10} = 1,000$ 시간에 등가되는 척도모수는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta = \frac{B_{10}}{[-\ln(1 - 0.1)]^{1/\beta}} = 4,482.8$$

3.1 무고장 시험방식

크기 n 의 샘플로 동시에 시험을 진행할 때 시간 t 에서의 불신도를 $F(t)$, 신뢰도를 $R(t)$ 이라 하면, t 까지의 고장갯수는 모수가 n , $F(t)$ 인 이항분포를 따른다. 따라서 신뢰수

준 CL (소비자 위험 $= 1 - CL$)을 만족하는 t 는 다음의 관계식으로부터 구해진다.

$$1 - CL = \sum_{x=0}^n \binom{n}{x} F(t)^x R(t)^{n-x} \quad (6)$$

$$= R(t)^n$$

에서

$$R(t) = (1 - CL)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

수명이 형상모수가 β 인 와이블 분포를 따를 경우

$$R(t) = e^{-(\frac{t}{\theta})^\beta} = (1 - CL)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

이므로

$$t = \theta \left(\frac{-\ln(1 - CL)}{n} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (9)$$

이 된다. 여기서 B_{10} 수명과 척도모수 θ 의 관계

$$\theta = \frac{B_{10}}{[-\ln(1 - 0.1)]^{\frac{1}{\beta}}} \quad (10)$$

를 이용하면, 보증수명 $B_{10} = 1,000$ 시간을 신뢰수준 $CL = 0.9$ 로 보증하는 무고장 시험시간은 다음과 같이 구해진다:

$$t = B_{10} \left[\frac{\ln(1 - CL)}{n \times \ln(1 - 0.1)} \right]^{1/\beta} = 1,684 \text{시간}$$

즉 10개의 시료로 1,684시간 동안 시험하여 고장이 없어야 보증수명 $B_{10} = 1,000$ 시간을 신뢰수준 60%로 보증할 수 있다.

3.2 2단계 시험방식

$\pi = 0.7$, $1 - \pi = 0.3$ 로 둘 때 동일한 수명을 보증하는 2단계 시험방식의 t_1 및 t_2 는 각각 다음과 같이 구해진다:

$$t_1 = \theta \left[\frac{-\ln((1-CL)\pi)}{n} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$= 1,853.8 \text{ 시간}$$

$$t_2 = \theta \left[\frac{\ln \left\{ \frac{n(1 - e^{-(\frac{t_1}{\theta})^\beta})}{(1-CL)(1-\pi)} \right\}}{n-1} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$= 2,762.8 \text{ 시간}$$

따라서 2단계 시험절차 및 합격판정기준은 다음과 같다:

- 1) n=10 개 시료로 시험을 시작하여 $t_1=1,854$ 시간동안 무고장이면 합격이다.
- 2) $t_1=1,854$ 시간 동안 2개 이상 고장이 발생하면 불합격이다.
- 3) $t_1=1,854$ 시간 동안 1개의 고장이 발생하면 판정을 보류하고 $t_2=2,763$ 시간동안 시험을 계속한다.
- 4) t_2 까지 더 이상 고장이 발생하지 않으면 (총 고장수 =1) 합격, 고장이 1개라도 발생하면 (총 고장수 2개 이상) 불합격이다.

참고로 무고장 시험(1회 시험)과 동일한 신뢰수준에서 동일한 수명을 보증하는 2단계 시험의 경우, 무고장시험(1회 시험)에 비해 시험 시간이 길어진다. 그 반면 생산자 위험은 감소한다.

4. 두 시험방식의 OC 곡선

여기서는 수명이 형상모수값이 $\beta=1.5$ 인 와이블 분포를 따르는 경우에 대해, 주어진 수명 (B_{10} 또는 θ)을 신뢰수준 90%로 보증하는 무고장 시험방식 및 2단계 시험방식의 OC곡선을 비교해 보기로 한다. 2단계 시험방식의 설계에서 $\pi = 0.7$, $1 - \pi = 0.3$ 을 사용하였다.

보증수명(B_{10} , θ)과 시험대상부품의 실제수

명(B_{10}^* , θ^*)의 비율을 d 라 할 때, 즉

$$d = \frac{B_{10}^*}{B_{10}} = \frac{\theta^*}{\theta} \quad (11)$$

일때, d 값에 따른 두 시험방식의 합격확률과 OC 곡선이 각각 표 1과 그림 1에 주어져 있다.

표 1. 두 시험방식의 합격확률 비교

d	합격확률 PA	
	무고장 시험	2단계 시험
0.2	0.0000	0.0000
0.4	0.0001	0.0000
0.6	0.0071	0.0036
0.8	0.0400	0.0314
1	0.1000	0.1000
1.5	0.2855	0.3611
2	0.4430	0.5830
2.5	0.5585	0.7265
3	0.6420	0.8152
3.5	0.7035	0.8709
4	0.7499	0.9069
4.5	0.7857	0.9310
5	0.8139	0.9475

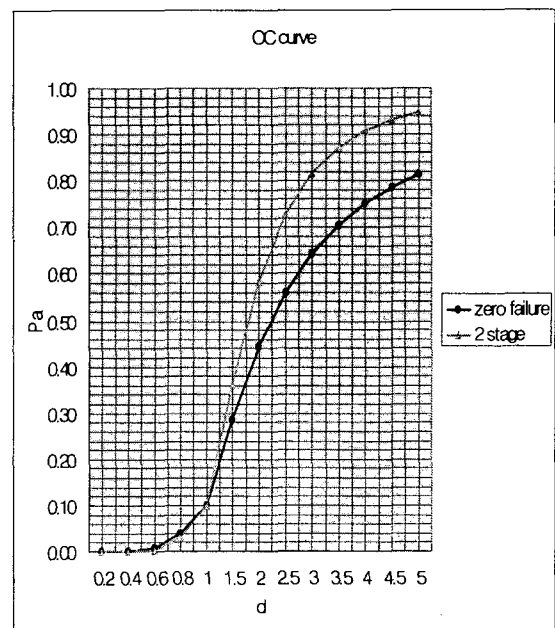


그림 1. 두 시험방식의 OC곡선

그림에서 2단계 시험방식이 무고장 시험방식에 비해 판별력이 우수함을 볼 수 있다. 특히 보증수명에 비해 실제수명이 길수록(신뢰도가 높은 부품일수록), 2단계 방식이 무고장 시험방식에 비해 생산자 위험이 크게 감소하는 것으로 나타난다.

5. 결 론

본 연구에서는 제품이나 부품의 신뢰성 보증을 위해 현장에서 널리 사용되고 있는 무고장 합격기준에 의한 수명시험방식의 대안으로서 2단계 수명시험방식을 제안하였다.

동일한 수명을 동일한 신뢰수준으로 보증하는 경우, 2단계 시험방식은 무고장 시험방식에 비해 시험시간은 다소 증가하나, 전반적인 판별력의 증가와 함께 생산자위험이 크게 감소되는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] 기계류부품 신뢰성 인증시험 규격, 한국기계연구원 신뢰성평가센터, 2001.
- [2] Bai, D.S. and Kwon, Y.I., "Economic Designs of Life Test Sampling Plans for Repairable Products", *Engineering Optimization*, Vol.20, pp 287-302, 1993.
- [3] Fertig, K.W., and Mann, N.R., "Life Test Sampling Plans for Two Parameter Weibull Population," *Technometrics*, 22, pp 165-177, 1980.
- [4] Kwon, Y.I., "A Bayesian Life Test Sampling Plan for Product with Weibull Lifetime Distribution Sold under Warranty", *Reliability Engineering and System Safety*, 53, No.1, pp 61-66, 1996.
- [5] Kwon, Y.I., "A Bayesian Life Test Sampling Plan for Non-repairable Products Sold under Warranty", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol.13, No.5, pp 40-49, 1996.
- [6] Kwon, Y.I., "An Economic Life Test Sampling Plans for Repairable Products with Exponential Inter-failure Time Distribution", *Journal of the Korean Society for Quality Control*, Vol.21, No.1, pp 108-120, 1993.
- [7] MIL-STD-690C, Failure Rate Sampling Plans and Procedures, U.S. Dept. of Defense, Washing D.C., 1993.
- [8] MIL-STD-781D, Reliability Design Qualification and Acceptance Test: Exponential Distribution, U.S. Dept. of Defense, Washing D.C., 1986.
- [9] Quality Control and Reliability Handbook 108, U.S. Dept. of Defense, Washington D.C., 1960.
- [10] Schneider, H., "Failure Censored Variable Sampling plans for Lognormal and Weibull Distributions," *Technometrics*, 31, pp 199-206, 1989.
- [11] The New Weibull Handbook, Robert B. Abernethy, 2000.
- [12] TR-3, Sampling Procedures and Tables for Life and Reliability Testing Based on Weibull Distribution (Mean Life Criterion), Quality Control and Reliability Technical Report, U.S. Dept. of Defense, Washing D.C., 1961.
- [13] TR-4, Sampling Procedures and Tables for Life and Reliability Testing Based on Weibull Distribution (Hazard Rate Criterion), Quality Control and Reliability Technical Report, U.S. Dept. of Defense, Washing D.C., 1962.
- [14] TR-6, Sampling Procedures and Tables for Life and Reliability Testing Based on Weibull Distribution (Reliable Life Criterion), Quality Control and Reliability Technical Report, U.S. Dept. of Defense, Washing D.C., 1963.