

▣ 응용논문

비용을 고려한 신뢰성 샘플링검사 설계에 관한 연구

The Study on the Failure Rate Sampling Plan
Considering Cost

조재립*
Cho, Jai-Rip

Abstract

This study considers the design of life test sampling inspection plans by attributes for failure rate level qualification at selected confidence level. The lifetime distribution of products is assumed to be exponential. MIL-STD-690C and KS C 6032 standards provide this procedures. But these procedures have some questions to apply in the field. The cost of test and confidence level($1-\beta$ risk) are the problem between supplier and user. So, we suggest that the optimal life test sampling inspection plans using expected cost model considering product cost, capability, environmental test cost, etc.

1. 서 론

경쟁체제의 심화와 소비자의 요구가 점점 다양해짐에 따라 제품의 품질과 함께 제품의 신뢰성 역시 중요한 요소로 인식되고 있다. 이때 생산되는 제품은 원가절감적인 측면과 시장확보적인 측면에서 제조원가를 줄이기 위해 고장률을 고려하지 않고 제품을 설계할 경우 오히려 품질보증비용이 증가하게 되고, 고장률을 낮게 설계할 경우에 품질보증비용은 줄어으나 제조원가가 상승하게 된다. 특히, 비용절감과 이윤의 극대화라는 제조업체의 측면에 있어서 제품들은 적당한 수명주기, 다양한 성능에 대한 품질, 그리고 낮은 고장률을 모두 만족시 켜야 한다. 따라서 대부분의 제조업체에서는 환경시험과 같은 자체적인 신뢰성확보 활동들을 수행하고 있다. 그러나 이러한 신뢰성확보 활동은 그 효과와 신뢰성의 정도를 소비자 혹은 구매자에게 제시하기에는 다소 무리가 있다. 제품의 고장률 정보는 대부분 공개되지 않으며 단지 환경시험 결과만을 나타내는 경우가 일반적이다. 신뢰성 검사는 파괴검사로 이는 비용의 측면에서 많은 시간과 손실비용을 초래하기 때문이다. 그러나 신뢰성문제가 대두되고 있는 현실에서 구매자들은 제품의 신뢰성에 대한 보다 명확한 자료를 필요로 하고 있다. 물론 그 동안의 누적된 고장자료를 통하여 제품의 평균수명이나 고장률을 구할 수 있으나, 구매자들의 관심은 지금현재 구매하고자 하는 제품의 신뢰성에 대한 제조자의 정량적 표현과 사후 보상문제에 대한 명확한 근거에 있다. 따라서 현재 양산되는 제품 혹은 로트(lot)에 대한 신뢰성검사의 필요성은 점점 더 커지고 있다.

샘플링검사는 제품의 합격여부를 결정하기 위해서 널리 사용된다. 특히 제품의 품질특성치가 수명일 때 제품의 합격여부를 결정하기 위해서는 수명시험 샘플링(life test sampling)검사를 수행하며, 수명시험 샘플링검사를 신뢰성샘플링(reliability sampling)검사라고도 한다[11]. 신뢰성 샘플링검사를 대별하면 고장률과 같은 계수 데이터를 기초로 로트의 합부판정을 하는 계수형 샘플링 검사와 MTBF와 같은 계량

* 경희대학교 산업공학과

데이터를 기초로 판정하는 계량형 샘플링 검사로 나눌 수 있다. 수명시험 샘플링검사는 로트(lot)로부터 랜덤추출한 제품들을 동시에 시험하여 미리 정해진 시점까지 고장시간을 관측하거나(제 I 종 관측중단), 주어진 갯수의 고장이 관측될 때까지 고장시간을 관측하여(제 II 종 관측중단) 로트의 합격여부를 판정한다. 수명시험 샘플링 검사에 대해서는 지금까지 많은 연구가 수행되었다. Epstein과 Sobel(1953, 1955), Bulgren과 Hewette(1973), Fairbanks(1988)등은 수명이 지수분포(exponential - distr I bution)를 따를 때 수명시험 샘플링검사를 제안하였다. 미 국방성 품질관리 및 신뢰성 핸드북(Quality Control and Reliability Handbook) H108(1960)에서는 제 I 종 관측중단, 제 II 종 관측중단 그리고 축차시험(sequential test)에서 전자부품에 대한 수명시험 샘플링검사를 설명하고 있다[5]. 그러나 앞의 수명시험 샘플링검사는 제품의 사용조건에서 시험하는 경우에 대한 것이므로 고신뢰도의 제품에 대해서는 긴 시험시간 혹은 많은 시험제품이 소요되어 제품의 Life Cycle이 점점 짧아지는 현실에서 비용과 시간을 고려할 때 현실적으로 불가능한 경우가 많다. 이를 극복하기 위한 하나의 방편으로 제품의 사용조건 보다 열악한 조건에서 시험하여 제품의 고장정보를 빨리 얻고 이를 이용해서 사용조건에서의 수명을 추론하는 가속수명시험(accelerated life testing)이 고려될 수 있으며 Wallace(1985)는 MIL-STD - 781의 개선 방향으로 가속수명시험의 도입을 강조하였다. 그러나 가속수명시험 역시 가속계수를 구하기 위한 실험이 필요하고 제품의 구조와 디자인이 변경된 경우 그 적합성을 판단하기 위한 확인 시험이 필요하므로 실제 제조 현장에서 사용하기에는 적절치 못한 경우가 많다.

따라서 본 연구에서는 생산자가 소비자에게 완제품의 신뢰성을 보증하기 위한 방법으로 로트허용고장률(LTFR) 보증방식의 샘플링검사 방식을 택하는 경우를 고려하였다. 여기서 문제는 비용으로서 총검사비용은 신뢰수준, 제품단가, 시험시간, 검사장비수, 장비사용비 등에 직접적으로 영향을 받는다. 본 연구에서는 LTFR 보증방식의 실제 적용에 있어서 총 검사비용을 최소화 하는 검사방식 설계를 다룬다.

2. LTFR보증 계수 1회 샘플링 검사

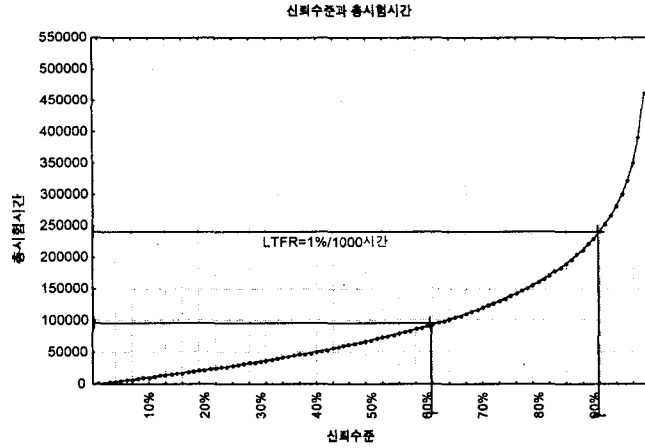
총시험시간 T사이에 발생한 고장갯수 r이 합격판정갯수 C보다 적으면 그 로트(lot)는 신뢰수준(1- β)으로 합격시키는 샘플링 검사방식이다. 여기서 T는 각 샘플의 시험시간(고장난 것은 고장날 때까지의 시간)의 누계이며, r이 적으면 T는 nt(n:샘플수, t:시험시간)와 거의 같게 됨으로 총시험시간 T = nt 즉 부품시간(component hour)으로 간주한다. 본 연구에서는 제품의 고장밀도함수가 지수분포를 따르는 경우를 가정한다. 이 가정은 제품의 실제 고장률이 지수분포를 따르지 않는다 하더라도 이 고장이 우발고장에 따름을 가정한 것이다. 특히 Burn-in 과정을 통해 제품의 초기고장이 제거되는 로트(lot)를 대상으로 하는 경우 이 가정은 타당성이 있다. MIL-STD-690C와 이를 준용한 KS C 6032의 고장률 시험방식을 예로 들 수 있다. 제품의 고장밀도함수가 지수분포를 따르는 경우 그 로트에서 n개의 샘플을 채취하여 총 시험시간 T의 시험을 하고 그 사이에 r개 고장나는 확률은 포아송 분포를 따른다. 따라서 합격판정갯수가 C일 때, 고장률이 LTFR이하인 로트에서 나온 샘플이 합격할 확률은 다음 식(1)과 같으며, 이 값이 소비자위험 β보다 작게되는 총시험시간 T를 구하게 된다[1, 4, 10].

$$P(\text{고장이 } c \text{ 개 이하일 확률}) = \sum_{x=0}^c \frac{1}{x!} (\lambda_1 T)^x e^{-\lambda_1 T}, \quad \lambda_1: \text{LTFR} \tag{1}$$

임의의 고장률을 가정하는 경우 합격판정계수 C가 늘어남에 따라 총시험시간이 커지므로 여기서는 C=0인 경우를 가정한다. 이때,

$$P(\text{고장이 } c \text{ 개 이하일 확률}) = e^{-\lambda_1 T} \leq \beta, \quad \therefore T \geq -\frac{\ln \beta}{\lambda_1} \tag{2}$$

<그림 1>은 합격판정갯수 C=0에서 소비자 위험과 이에 따른 총시험시간을 나타내고 있다. MIL규격과 KS 규격에서는 신뢰수준을 90%, 60%에 대하여 규정하고 있으며, 현실적인 면을 고려하여 60%신뢰수준을 주로 사용하고 있다.



<그림 1> LTFR=1%/1000h 보증방식의 신뢰수준과 총시험시간(C = 0)

또한, 다음의 불완전 Gamma함수를 부분적분에 따라 반복 계산해 보면 (1)식과 같음을 알 수 있다.

$$P = \frac{1}{\Gamma(\gamma+1)} \int_{\lambda T}^{\infty} t^{\gamma} e^{-t} dt \quad (3)$$

자유도 ϕ 의 χ^2 분포 $F(\chi^2) = \frac{1}{P(\frac{\phi}{2})} \int_0^{\frac{\chi^2}{2}} e^{-x} x^{\frac{\phi}{2}-1} dx$ 에서 위쪽 확률 P 는

$$1 - F(\chi^2) = \frac{1}{P(\frac{\phi}{2})} \int_{\frac{\chi^2}{2}}^{\infty} e^{-x} x^{\frac{\phi}{2}-1} dx = P \quad (4)$$

이므로 (3) 식과 비교하면 $\frac{\chi^2}{2} = \lambda T$, $\phi = 2(\gamma+1)$ 로 된다. 따라서,

$$\chi^2(\phi, P) = \chi^2\{2(\gamma+1), P\} = 2\lambda T \quad (5)$$

결국 $LTFR = \lambda_1$ 인 로트를 소비자 위험 β 이하에서 합격시키는 계수 1회 샘플링검사에서 합격판정갯수가 C 일 때 $2\lambda_1 T$ 는 자유도 $2(C+1)$ 의 χ^2 분포를 따르므로 총시험시간 T 는 식(6)과 같다. 식(6)은 합격판정갯수 $C \geq 1$ 인 경우에 유용하게 사용할 수 있다.

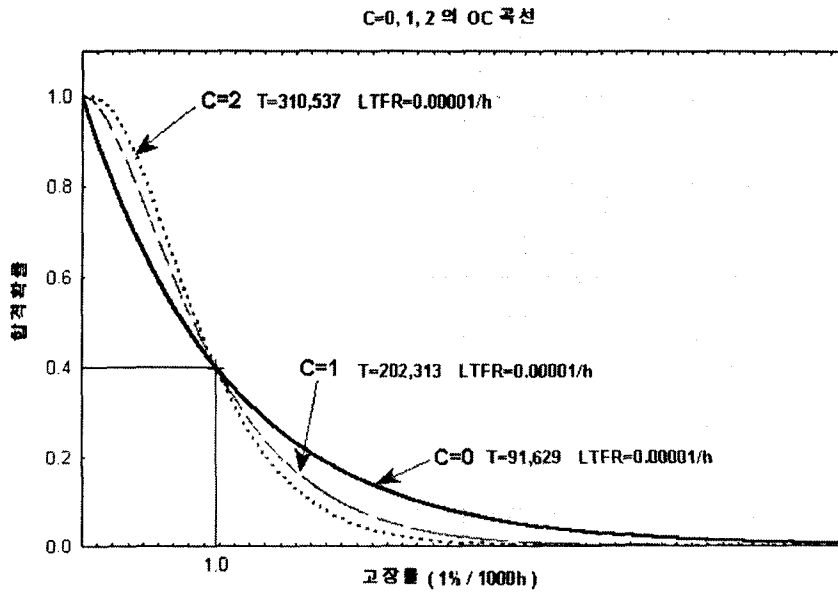
$$2\lambda_1 T \geq \chi^2\{2(C+1), \beta\} \quad \therefore T \geq \frac{\chi^2\{2(C+1), \beta\}}{2\lambda_1} \quad (6)$$

3. 비용을 고려한 검사방식 설계

3.1 검사비용모델

LTFR과 소비자 위험 β 가 결정되면 식 (2) 또는 (6)에 의해 총시험시간이 결정된다. 그러나 실제 검사에 있어서는 여러 가지 비용요소들이 발생하게 되는데 샘플의 단가와 시험시간의 제한 및 시험시간에 따른 비용 등을 고려하여 최적의 샘플크기와 시험시간을 결정해야 한다. 일반적으로 신뢰성검사는 노출 환경을 일정하게 유지하기 위하여 환경시험장비 등을 사용하게 되는데, 이러한 환경시험장비를 사용한 검사는 동일기관의 장비에서 동시에 시작되어야 하므로 여유장비의 제약이 따르게 된다. 또한 장비의 크기에 따라 동시에 넣을 수 있는 샘플의 수가 한정되어 있다. 특히 고장률 보증시험은 제품을 작동상

태로 노출시켜야 되기 때문에 파워, 릴레이 등 추가장치가 필요한 경우가 많다. 또한 보증시험자체의 효력을 발생하기 위해서는 생산자입장에서 수행하는 자체 수명시험보다는 주기적인 장비의 검·교정과 우수한 검사인력이 확보되어 있는 공인시험기관에서 수행한 시험결과가 필요하다. 따라서 총검사비용은 다음과 같은 선형식을 고려할 수 있으며 가장 간단한 기본적 형태는 다음 식(7)과 같이 샘플손실비용, 검사준비비용, 검사진행비용으로 구성된다. 단, 식(7)은 합격판정갯수 $C=0$ 인 경우를 가정한다. 합격판정갯수가 증가함에 <그림 2>와 같이 총시험시간 T 는 증가하므로 이는 시험시간 t 와 샘플수를 증가시켜 총시험비용은 증가하게 된다.



<그림 2> C의 증가에 따른 시험시간의 변화 및 OC곡선

$$TC = C_S + C_{TR} + C_{TA} \tag{7}$$

TC = 총검사비용, C_S = 샘플비용,

C_{TR} = 검사준비비용, C_{TA} = 검사진행비용

식(7)은 생산자가 직접 수명시험을 하는 경우나 외부 공인시험기관을 사용하는 경우 모두 적용이 가능한 일반형태로서 다음과 같이 세분화 될 수 있다.

$$C_S = n_p \times C_p \quad : \quad n_p = \text{샘플수} \quad C_p = \text{제품순수제조원가}$$

$$C_{TR} = n_c \times C_z \quad : \quad n_c = \text{필요 환경장비수} \quad C_z = \text{장비당 시험준비비용}$$

$$C_{TA} = n_c \times t \times C_c \quad : \quad C_c = \text{시간당 환경장비 운용비용} \quad t = \text{시험시간}$$

$$n_c = x, \quad x-1 < (n_p/n_A) \leq x, \quad x = 1, 2, \dots, n_T$$

n_A = 환경시험장비당 시험가능 샘플수

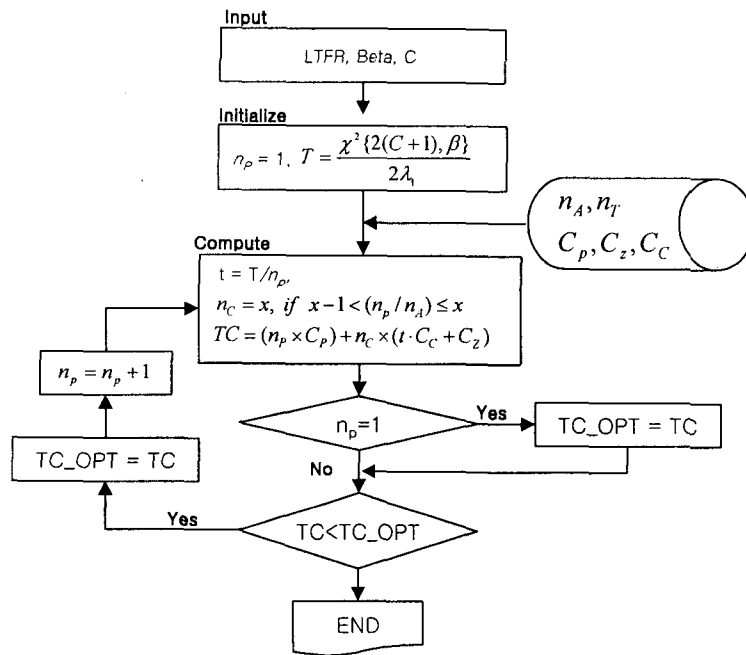
n_T = 여유환경시험장비 수

따라서, 식(7)은 다음과 같이 정리된다.

$$TC = (n_p \times C_p) + n_c \times (t \cdot C_c + C_z) \tag{8}$$

$$n_c = x, \quad x-1 < (n_p/n_A) \leq x, \quad x = 1, 2, \dots, n_T$$

따라서 식(8)을 이용하여 총검사비용을 최소화하는 n 과 t 를 결정하면 된다. 초기샘플의 수를 결정한 후 n 을 조금씩 증가시켜 가며 총검사비용을 탐색한다. 샘플의 수, 시험시간, 환경시험장비 수의 제한에 따라 최적의 검사비용을 도출하는 n 과 t 를 찾아낼 수 있다. 다음 <그림 3>은 식(8)을 이용한 검사방식 설계 알고리즘을 보여준다.

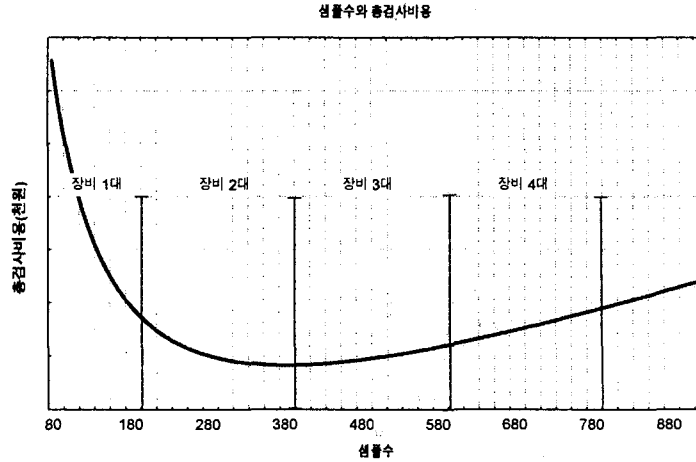


<그림 3> 최소비용 검사방식 설계 알고리즘

다음<그림 4>는 LTFR = 1%/1000h를 신뢰수준 60%에서 보증하기 위한 검사방식(C=0)에서 도출된 비용모델을 적용한 결과이다. 고장률 보증을 위해 항온항습 장비를 이용한 정상수명 시험을 선택하였으며, 시험기관의 유휴 환경장비는 총 4대이며, 제품의 단가는 5,000원, 항온항습장비는 시간당 8,000원의 비용이 소요된다. 1대 장비에는 지그를 포함하여 200개의 샘플이 들어갈 수 있으며, 지그 제작비용을 포함한 검사준비비용은 미미하여 비용에 포함하지 않았다. 계산 결과 $n = 385$, $t = 235$ h 일 때 총검사비용은 3,828,981로서 최소이다.

<표 1> LTFR=1%/1000h, 신뢰수준 60%에서 총검사비용

n	t	장비수	총검사비용
10	9162.907	1	73,353,258
100	916.2907	1	7,830,326
200	458.1454	1	4,665,163
300	305.4302	2	3,943,442
385	237.9976	2	3,828,981
600	152.7151	3	4,221,721



<그림 4> 샘플수와 총검사비용변화

4. 결 론

좋은 검사방식은 사전분포나 비용요인의 변화에 맞추어 항상 새로운 것이 될 수 있도록 일종의 feed back mechanism을 가져야 할 것이다[3]. 본 연구는 특히 외부 공인시험기관에서 제품의 수명시험을 실시하는 경우를 주 대상으로 하고 있다. 이는 앞으로 신뢰성 수명시험이 업체 자체보다는 공인된 외부기관에서 실시될 것으로 예상되기 때문이다. 제시된 모델과 알고리즘을 통하여 샘플의 단가, 장비사용료, 보유장비수를 기본으로 총검사비용을 최소화하는 샘플수 n 과 시험시간 t 를 전산 프로그램을 통하여 빠르게 탐색할 수 있다. 따라서 비용요인의 변화에 대하여 항상 최적의 검사계획을 획득할 수 있다. 이는 제조자가 제품의 최저 신뢰성을 보증하기 위한 방법으로서 신뢰성 샘플링 검사를 수행할 때 직접적인 비용에 대한 정보를 빠르게 획득할 수 있는 점에서 유효하게 사용될 수 있다. 특히 신뢰성 검사 장비를 보유하고 있지 않은 기업이나, 외부 공인기관으로 부터의 시험을 필요로 하는 경우 보다 효율적인 검사설계를 할 수 있으며, 중간측정을 하는 경우 주기적인 보증 유지시험을 통하여 제품의 신뢰성 자료를 확보할 수 있다.

본 연구에서 제시한 비용모델은 직접적인 검사비용을 고려하여 빠른 의사결정을 할 수 있는 검사방식 설계 방법으로서 기업이 신뢰성 수명시험을 꺼리는 가장 큰 이유중 하나인 비용문제를 합리적으로 도출할 수 있다. 또한 비용모델은 제품의 종류 및 용도, 검사의 주변환경 등 많은 요소에 의해 비용요인이 변할 수 있으므로, 항상 모델이 유연성을 가지고 있어야 한다. 따라서 비용모델은 비용에 관한 관점에 따라 다양하게 개선 될 수 있다. 추후 개선방향으로는 로트의 고장률이 LFR 이상인 경우 합격한 제품이 발생시키는 신뢰성 손실비용을 비용모델에 포함시켜 총손실비용을 최소화하는 신뢰수준의 결정, 신뢰성 보증의 유지를 위한 검사주기와 관련된 최적의 로트(lot)크기의 결정, 고신뢰성을 가지는 좋은 로트가 불합격하는 경우를 비용으로 고려한 비용모델 등을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 배도선, 전영록(1999), 「신뢰성분석」, 아르케.
- [2] 송서일의(1999), “품질보증정책하의 ESS비용모형에 관한 연구”, 춘계학술대회, pp.352-, 10 page(s), 대한품질경영학회, The Korean Society for Quality Management.
- [3] 이병근 외(1985), “계수선별형 샘플링검사의 경제성에 관한 연구”, Journal of the KSQC, Vol.13, No. 2.
- [4] 이상용(1999), 「신뢰도 공학」, 형설출판사.
- [5] 전영록(1995), “지수수명분포에 대한가속수명시험 샘플링검사방식의 설계”, 품질경영학회지, 제23권 제4호, pp13-26.
- [6] Bulgren, W. and Hewette, J.(1973), “Double Sample Tests for Hypotheses about the Mean of an Exponential Distribution”, Technometrics, Vol. 15, pp. 187-190.
- [7] Epstein, B.(1954), “Truncated Life Tests in the Exponential Case”, Annals of Mathematical Statistics, Vol. 25, pp. 555-564.
- [8] Epstein, B. and Sobel, M.(1953), “Life Testing”, Journal of the American Statistical Association, Vol. 48, pp. 485-502.
- [9] Fairbanks, K.(1988), “A Two-Stage Life Test for the Exponential Parameter”, Technometrics, Vol. 30, pp. 175-180.
- [10] MIL-STD-690C(1993), Failure Rate Sampling Plans and Procedures. U.S. Department of Defense, Washington D.C.
- [11] Robert Dovich & Bill Wortman(1998), 「The Reliability Engineer Primer」, Quality Council of Indiana.
- [12] Wallace, W. E.(1985), “Present Practice and Future Plans for MIL-STD-781”, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 32, pp. 21-26.