

# 소비자 보호를 위한 선별형 샘플링 검사와 신뢰성 샘플링 검사의 최적설계에 관한 연구

강보철\* · 조재립\*\*

\* 전자부품연구원 신뢰성평가센터 · \*\* 경희대학교 산업공학과

## A Study on the Rectifying Inspection Plan & Life Test Sampling Plan Considering Cost

Bo-Chul Kang\* · Jai-Rip Cho\*\*

\* Reliability & Failure Analysis Center, KETI

\*\* Dept. of Industrial Engineering, Kyung Hee University

Keyword : Limiting quality level(LQL), Outgoing quality(OQ), Reliability acceptance  
sampling plan(RASP)

### Abstract

The objectives of this study is to suggest the rectifying sampling inspection plan considering quality cost. Limiting quality level(LQL) plans(also called LTPD plans) and outgoing quality(OQ) plans are considered. The Hald's linear cost model is discussed with and without a beta prior for the distribution of the fraction of nonconforming items in a lot. It is assumed that the sampling inspection is error free.

We consider the design of reliability acceptance sampling plan (RASP) 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 simple linear cost model considering product cost, capability of environment chamber, environmental test cost, and etc. Especially, we consider a reliability of lots that contain some nonconforming items. In this case we assumed that a nonconforming item fail after environmental life test.

Finally, we develop the algorithm of the optimal sampling inspection plan based on minimum costs for rectifying inspection and RASP. And computer application programs are developed So, it is shown how the desired sampling plan can be easily found.

## 1. 서 론

현대 산업사회에서 대량생산이 일반화되면 서부터 품질보증은 매우 중요한 문제로 대두 되고 있다. 고객들 역시 생활수준의 향상과 정보화시대의 성숙에 따라 소비자 중심의 시장 환경에 부응하여 자신들의 안전과 이익을 최대한 보호받으려 하고 있다. 이에 따라 오늘날의 기업환경 속에서 가장 중요시되는 부분은 소비자를 기업활동의 중심으로 하는 품질경영(quality management)을 성공적으로 수행하는데 있다. 이 품질경영의 핵심은 품질보증(quality assurance)이 될 수 있는 제품의 생산과 서비스의 제공에 있다. 과거 품질의 개념은 제품이 소비자에 이동하는 단계에서의 제품의 규격(specification)에 의한 관리를 의미하고 있으나, 오늘날의 품질의 의미는 사용상의 신뢰성(reliability)을 포함하고 있다. 따라서 소비자 보호를 위한 품질보증은 제품의 제조단계에서의 “품질”과 사용 단계에서의 “신뢰성”을 동시에 만족하는 종합적인 활동이 되어야 그 목적을 달성할 수 있다.

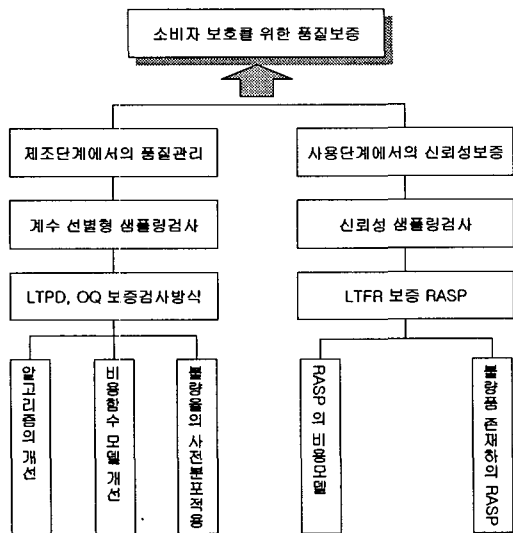
이러한 제품책임(product liability)과 품질 보증의 기능은 애프터서비스의 강화, 통계적 품질관리, 공정개선을 통한 불량률의 감소, FMEA(failure mode & effect analysis), FTA(fault tree analysis), 국제인증의 획득 등 여러 가지 가지적인 방법으로 실현될 수 있다. 그러나 근본적으로 소비자에게 전해지는 제품의 품질을 보증할 수 있는 방법은 출하전 검사의 방법이다. 즉, 검사를 통하여 품질향상을 기대할 수 없으나 실제로 완성된 제품이 규격대로 구성되어 있는지를 확인하고 평가함으로써 그 품질에 대해 확신할 수

있기 때문이다. 전수검사는 시간, 노력, 비용 등의 제약을 갖고 있다. 또한 품질을 조사하기 위하여 반드시 파괴하여야 구별이 되는 제품은 전수검사란 불가능하다. 특히 제품의 신뢰도를 예측하기 위한 수명시험(life test)은 파괴시험임으로 전수검사란 불가능하다. 이러한 검사의 제약을 극복하고 객관적인 품질의 판단을 위한 방법이 바로 샘플링 검사(sampling inspection)이다.

본 연구에서는 소비자 보호를 위한 품질보증 방법으로 제조 품질보증을 위한 샘플링검사와 신뢰성보증 샘플링검사를 주 논제로 설정하였다. 각 검사방식에 대한 연구를 바탕으로 두 검사방식의 연관성을 제조자의 경제적 측면에서 제시하였다. 이를 위해 기존의 연구결과를 고찰하여 경제성, 현실성, 정확성을 확보한 검사방식 개선 및 이의 활용방안을 도출하였다. 먼저 경제적 검사방식 설계를 위해 과거 품질비용의 적용방안에 대한 연구를 기초로 샘플링 기대비용모델을 기준으로 하는 최적 샘플링 검사방식 설계를 위한 알고리즘을 개발하였다. 이의 실용성을 향상시키고자 비주열배이직을 이용하여 프로그램을 구성하였다. 또한 기존에 고려되지 않은 생산자 위험과 소비자위험을 모두 구매자가 선택할 수 있도록 두 제약조건을 만족시킬 수 있는 최적의 검사계획 수립절차를 개발하였다. 마지막으로, 품질보증의 개념을 확대시켜 품질검사와 함께 근래에 더욱 중요성이 커지고 있는 신뢰성 샘플링검사에 대해 고찰하였다. 주 연구결과로 로트 품질을 고려한 신뢰성 샘플링검사 모델과 비용을 고려한 신뢰성시험 검사계획 수립절차를 제시하였다.

## 2. 연구의 범위 및 구성

본 연구는 크게 세가지 주제에 대해 다룬다. 첫째 품질보증의 방법으로서 계수 선별형 샘플링 검사를 대상으로 하며, 두 번째 사용상의 품질인 신뢰성보증의 방법으로 계수 1회 고장률보증 신뢰성 샘플링 검사를 다루며, 마지막으로 두 주제에 대해 품질비용의 개념을 결합하여 비용측면에서의 각 검사방식의 최적해를 위한 알고리즘을 개발 이를 프로그래밍화 하는 것이다.



<그림 1> 연구의 범위 및 구성

이를 위한 본 연구의 세부구성으로

- (1) 기존의 LTPD 보증 방식 설계를 위한 알고리즘과 OQ 보증방식의 설계 알고리즘을 개선하고
- (2) 선형비용모델을 적용한 비용측면의 결과를 도출하며
- (3) LTPD 보증 방식과 OQ 보증방식을 동시에 고려한 최적 검사방식을 제안

하고

- (4) 공정평균 불량률의 사전분포를 이용한 (1), (2)의 확대적용을 시도하였으며
- (5) 신뢰성 샘플링검사의 비용을 고려한 검사방식 설계알고리즘을 개발하고
- (6) 로트내의 불량품 허용하의 신뢰성 샘플링검사방식을 설계하였다.

다음 <그림 1>은 본 연구의 범위 및 구성에 관한 개략도 이다.

## 3. 최소비용 검사계획

본 연구에서는 선별형 샘플링 검사방식 중 소비자 보호측면이 강한 개별로트의 품질보증방식인 로트허용 불량률 보증방식(이하 LTPD 보증방식)과 출검품질 보증방식(이하 OQ 보증방식)에 대하여 다룬다. 선별형 샘플링 검사방식의 설계를 위해 본 논문에서 사용하는 기호는 다음과 같다.

- $N$  : 로트의 크기     $n$  : 샘플의 크기
- $c$  : 합격판정갯수 즉, 로트가 합격판정을 받기 위한 시료내의 최대 불량품수
- $p$  : 불량률     $\bar{p}$  : 공정평균불량률
- $k$  : 로트내의 총불량품수
- $P_a$  :  $(n, c)$  에서 로트가 합격할 확률,
- $P[X=x]$  : 확률변수  $X$ 의 확률
- $b(x; n, p) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$
- : 불량률  $p$ 에서 불량품의 이항분포확률
- $h(x; N, n, p) = \binom{k}{x} \cdot \binom{N-k}{n-x} / \binom{N}{n}$  :
- 로트 불량률이  $p$ 일 때,  $x$ 의 초기하분포확률

단,  $k = N \times p$

위 분포의 누적분포확률은 다음과 같다.

$$B(r; n, p) = \sum_{x=0}^r b(x; n, p)$$

$$E(r; n, p) = 1 - B(r-1; n, p)$$

$$H(x; N, n, p) = \sum_{x=a}^r h(x; N, n, p),$$

$$a = \max[0, n - (N - k)]$$

### 3.1 선별형 샘플링검사의 비용모델

기존의 선별형 검사방식의 경제성에 관한 연구들을 살펴보면 연구결과들이 제시하고 있는 비용모델들은 샘플 및 불합격로트의 처분방식이나, 파괴 및 비파괴에 대한 구분에 따라 다르게 적용해야 하므로, 그 적용성에 한계가 있다. Hald(1981)는 일련의 논문을 발표하면서, 이러한 선별형 샘플링검사의 비용에 대해 일반화시킨 모델을 제시하였다. 이는 총비용에 영향을 미치는 6개의 비용요소를 정의함으로써 완성되었다. Hald(1981)가 제시한 비용요소는 다음과 같다.

- $S_1$  : Cost per item for sampling and testing
- $S_2$  : Additional (perhaps repair) costs for a nonconforming item found in sampling
- $A_1$  : Cost per item associated with the N-n items not inspected in an accepted lot
- $A_2$  : Cost associated with a nonconforming item which is accepted(may be quite large)
- $R_1$  : Cost per item of inspecting the

remaining N-n items in a reject lot  
 $R_2$  : Repair or replacement cost associated with a nonconforming item in the remaining N-n item in a reject lot

이와함께 제시한 비용함수 모델은 다음과 같다.

$$g_1(x, k; N, n, c, p) = \begin{cases} nS_1 + xS_2 + (N-n)A_1 + (k-x)A_2 & \text{if } x \leq c \\ nS_1 + xS_2 + (N-n)R_1 + (k-x)R_2 & \text{if } x > c \end{cases}$$

$G_1$ 를  $g_1$ 값을 취하는 확률변수라 하면 식 (1)과 같이  $g_1$ 의 기대값  $E[G_1]$ 이 선형비용함수가 된다.

$$COST[N, n, c, p] = n K_S + (N - n) \cdot [K_A + (K_R - K_A)(1 - P_d)] \dots\dots\dots (1)$$

- 단,  $K_S(p) = S_1 + S_2 p,$
- $K_A(p) = A_1 + A_2 p,$
- $K_R(p) = R_1 + R_2 p$

따라서 식(1)은 기존의 샘플링비용 측면에서 고려되었던 ATI와 함께 새로운 샘플링검사의 평균비용이라 할 수 있다.

위의 비용모델은 선별형 샘플링검사에서 고려될 수 있는 비용요소를 가장 잘 일반화시킨 것으로 Guenther(1985)는 위의 비용모델을 바탕으로 하여 Dodge-Romig이 제시한 LTPD 보증방식과 AOQL 보증방식 그리고 Hall과 Hassan(1981)이 제시한 OQ 보증방식에 대하여 평균비용을 최소로 하는 검사방식을 구하는 알고리즘을 제시하였다. 여기서는 Hald가 제시한 점근해가 아닌 전산 알고리즘을 통하여 제약을 만족하는 모든해를 구하

여 총비용을 최소로 하는  $(n, c)$ 를 결정한다. Hald가 제시한 비용모델은 Martin(1964)이나 Mandelson(1946)이 제시한 비용모델을 충분히 재현할 수 있다. 즉, 검사의 특성(과피, 비과피)과 로트의 처분방식에 따라 위의 6개 비용요소 값이 변화하며 다양한 모델을 재현할 수 있다. 조재립(1994)은 위의 선행연구를 바탕으로 하여, 국내에서 규격화되어 사용되고 있는 LTPD 보증방식과 AOQL 보증방식의 최소비용 검사계획 수립절차를 제시하고 Guenther (1985)가 제시한 알고리즘을 개선하였다. 본 연구에서도 Hald(1981)가 제시한 6개 비용요소의 선형비용모델을 총비용모델로서 활용하였다. 기존 선행연구들을 비교 분석한 결과 Hald(1981) 및 Guenther (1985)가 사용한 선형비용모델이 가장 일반적인 모델식임을 알 수 있었다. 즉 검사특성 및 처분방식에 따라 6개의 비용요소 값을 변화시켜 가며 동일 모델식을 사용할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 선별형 검사방식의 비용모델로서 Hald(1981)가 제시한 비용모델을 사용하고 최적해를 구하기 위한 알고리즘은 Guenther(1985)가 제시한 알고리즘의 단점 및 한계점을 검토하여 개선하고자 하였다.

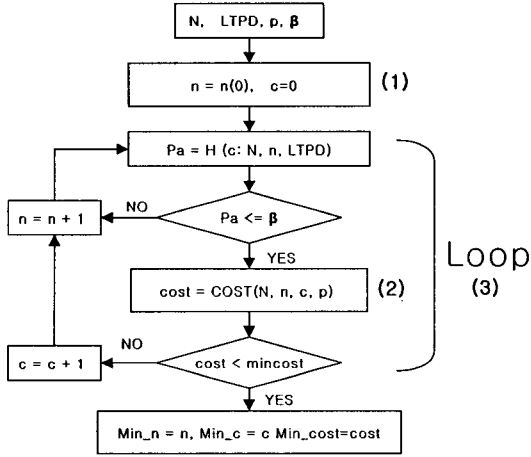
### 3.2 LTPD 보증방식

로트 개개의 불량률에 관심이 있는 경우로서 나쁜 품질의 로트가 합격되는 것을 방지하는 소비자보호의 필요성이 있을 때 이를 보장하기 위한 것이다. 즉, 소비자가 만족하지 못하는 나쁜 품질 로트의 불량률을 로트 허용불량률(LTPD : 이하  $p_t$ 로 한다)로 하

고  $p_t$ 를 불량률로 하는 로트는 소비자 위험  $\beta$ 정도로만 합격시키고자 하는 것이다. 이 경우는 개별 로트마다의 품질을 보증하기 위한 방법으로 여러 구매처에 생산품을 나누어서 출하할 경우라든지, 최종 소비자에 대한 판매의 경우와 같이 로트마다의 품질이 어느 정도 균일하여서 가장 나쁜경우라도 로트 허용불량률은 어떤 값을 넘는 일이 거의 없다는 보증을 얻고자 할 때 쓴다. 따라서, 로트의 불량률을  $p_t$ 로 하고 로트의 합격확률이  $\beta$ 이하로 되는 검사방식  $(n, c)$ 를 찾아내는 방식이다. 이는 점  $(p_t, \beta)$ 를 지나는 OC 곡선을 갖는 샘플링검사방식을 찾는 것과 같다.

$$OC = H(cN, n, p_t) \leq \beta \dots\dots\dots (2)$$

Guenther(1984)가 제시한 알고리즘은 식 (2)을 만족하는  $(n, c)$ 의 조합을 찾아내기 위해서 사전에 초기  $(n_1, c_1)$ 를 결정할 필요가 있었다. 초기  $(n_1, c_1)$ 에 대하여  $n_1$ 을 증가시키며 현재  $c_1$ 에서 합격확률  $P_a$ 를 탐색하며 이중  $P_a \leq \beta$ 를 만족하는  $n_1$  중 최소값을  $c_1$ 에 대한 최적의  $n^*$ 로 결정하여 ATI를 계산한다. 이 과정을 반복하여 그중 ATI를 최소로 하는  $(n^*, c^*)$ 를 최적의 검사계획으로 결정한다. 따라서 사전에 임의의  $(n_1, c_1)$ 를 찾아야 하는 불편함과 불완전한 알고리즘이라는 단점을 가지고 있다. 따라서 <그림 2>와 같이 향상된 알고리즘을 개발하였다.



<그림 2> LTPD 보증방식 설계를 위한 알고리즘의 개략도

<그림 2>의 알고리즘을 구현하기 위하여는 그림에 표시된 (1), (2), (3) 단계의 주요 세부 알고리즘이 결정되어야 한다. 제시한 알고리즘의 효율적인 활용을 위해서는 컴퓨터 응용프로그램의 개발이 필수적인데, 특히 함수로서의 역할을 하는 확률계산 알고리즘과 주 알고리즘 안에서의 연동방법은 알고리즘의 속도개선을 위해 매우 중요한 부분이 되고 있다. <그림 2>를 바탕으로, 각 부분에 대해 설명하면 다음과 같다. 참고로 본 연구에서 구현된 프로그램은 Visual Basic 6.0을 기본으로 제작되었으며, 세부알고리즘 설명을 위한 용어들은 Visual Basic 6.0에서 기본적으로 사용되는 용어임을 밝혀둔다.

(1) 알고리즘의 시작 - n의 초기치 설정문제

LTPD 보증방식을 위한 알고리즘의 시작은  $c=0$  에서 시작되며, 이때 식(2)를 만족하는 초기  $n = n(0)$ <sup>1)</sup>에 대하여는 사전에

1)  $n(0) : c=0$ 에서 샘플수  $n$ 을 정의

수학적 해석으로 구할 수 있다.

$$k = N \cdot p_t \quad \text{에서 } c=0 \text{ 이면}$$

$$H(0; N, n, p_t) = \binom{N-k}{n} / \binom{N}{n} \leq \beta$$

따라서, 이 식을 만족하는  $n$ 의 범위를 구할 수 있다. 몇 번의 정리 후

$$\left(1 - \frac{n}{N - \frac{k-1}{2}}\right)^k \leq \beta \quad \text{로 되는 } n \text{을}$$

구하면 된다. 그러므로,

$$n \geq \left(N - \frac{k-1}{2}\right) \left(1 - \beta^{\frac{1}{k}}\right) \quad \text{따라서, 초기치}$$

$$n(0) = \left(N - \frac{k-1}{2}\right) \left(1 - \beta^{\frac{1}{k}}\right) \dots\dots\dots (3)$$

(2) 초기하분포 확률의 계산

$h(x; N, n, p)$ 의 계산상의 문제점은 총 9개 항목에 대한 팩토리알(factorial) 계산으로서 컴퓨터 프로그램을 활용한다 할지라도 그 속도와 메모리 용량에 많은 문제가 있다. 이의 해결방법으로서 대표적인 것이 log 값으로 변환하여 계산하는 방법이다. 또한 식(11)은 알고리즘의 루프상에서 수많은 반복계산이 이루어지므로 동일한 연산을 반복하게 되는 경우도 발생하므로 이를 루프 상에서 해결할 수 있어야 한다. 로그변환을 이용하여  $h(0; N, n, p_t) = 10^y$ 은 쉽게 구할 수 있으며 순환식을 이용하여 누적 초기하분포 확률을 보다 빠르게 구할 수 있다. 본 연구에서 사용된 누적 초기하분포 확률계산을 위한 전산 알고리즘을 제시하면 다음과 같다.

```

----- 누적초기하분포 확률계산 알고리즘 -----
함수의 정의 : H(N, n, k, x) Double
N : Lot size, n : sample size,
k : Lot 내의 불량품수 또는 N×p
  
```

$x$  : sample 내의 불량품 수  
 변수의 정의  
 $pba, pr0, pr\_next, pr\_before, I,$   
 $a = 0: b = 0: d = 0: e = 0: pr0 = 0:$   
 연산  
 Loop :  $i = 1$  To  $N$  Step 1:  $d = \text{Log}(i) / \text{Log}(10) + c$   
 Loop :  $i = 1$  To  $(N - n)$  Step 1  
       :  $b = \text{Log}(i) / \text{Log}(10) + b$   
 Loop :  $i = 1$  To  $(N - k)$  Step 1  
       :  $a = \text{Log}(i) / \text{Log}(10) + a$ : Next  $i$   
 Loop :  $i = 1$  To  $(N - n - k)$  Step 1  
       :  $e = \text{Log}(i) / \text{Log}(10) + d$ : Next  $I$

$pr0 = 10^{((a + b) - (d + e))}$  '  $x=0$  일때의 확률  
 $pr\_before = pr0$   
 $pba = pr0$   
 Loop : {  $i = 1$  To  $x$  Step 1  
 $pr\_next = pr\_before * (n - (i - 1)) * (k - (i - 1)) / i / (N - n - k + i)$   
 $pr\_before = pr\_next$   
 $pba = pba + pr\_next$  }  
 $H(N, n, k, c) = pba$

(3)  $(n, c)$  조합의 전개를 위한 알고리즘  
 $(n, c)$  조합 전개를 위한 메인 알고리즘은 다음과 같다.

Step. 1 : 로트의 크기  $N$ , LTPD=  $p_t$ ,  $\beta$ , 공정평균불량률 ( $\bar{p}$ ) 비용요인  $S_1, S_2, A_1, A_2, R_1, R_2$  입력

Step. 2 :  $n = n(0)$ ,  $c = 0$

$$k = N \times p_t, \quad kk = N \times \bar{p}$$

Step. 3 : 초기하분포 확률 계산을 위한 log 변환 값 계산

$$a = \sum_{i=1}^{N-k} \log(i), \quad b = \sum_{i=1}^{N-n} \log(i), \quad d = \sum_{i=1}^N \log(i)$$

$$e = \sum_{i=1}^{N-k-n} \log(i), \quad aa = \sum_{i=1}^{N-kk} \log(i), \quad ee = \sum_{i=1}^{N-kk-n} \log(i)$$

Step. 4 : 합격확률  $P_a(p_t) = H_{p_t}(n, k, c)$

Step. 5 : if  $P_a(p_t) > \beta$

$$b = b - \log(N - n), \quad e = e - \log(N - k - n)$$

$ee = ee - \log(N - kk - n)$  로 변환하고

$n$  을 1 증가시키신 후 Step. 4로 이동

if  $P_a \leq \beta$  : Step 6로 이동

Step. 6 :  $COST[N, n, c, p] =$

$$nK_S + (N - n) [K_A + (K_R - K_A)(1 - P_a(\bar{p}))]$$

Step. 7 : 현재의  $COST[N, n, c, p]$  와 이전 단계의  $COST$ 를 비교하여 최소값을 저장

Step. 8 :  $c = c + 1$  로 증가시키고,

$$(N - k - n + 1) \leq 0 \text{ OR } (N - kk - n + 1) \leq 0$$

이면 종료. 그렇지 않으면 Step.4 로 이동

종료 : MinCost를 갖는  $n$  과  $c$ 를 구한다.

### 3.3 OQ 보증방식

Hall and Hassan(1981)에 의해 개발된 검사방식으로 로트의 불량률에 관계없이 이 검사를 받고 나간 로트내의 불량품수가 정해진 확률로서 일정한 갯수 이하임을 보증하기 위한 검사방식이다. 따라서 본 검사방식은 검사로트의 불량률이 일정한 범위 내에서 변동을 가진다 하더라도 검사를 받고나면 로트내의 불량품이 일정갯수 이하임을 높은 확률로 보증하는 방식이다. 단, 검사로트 불량률 변동의 범위는 보증하고자 하는 불량률의 상한치와 하한치를 사전에 결정하여야 한다. 본 검사방식에서

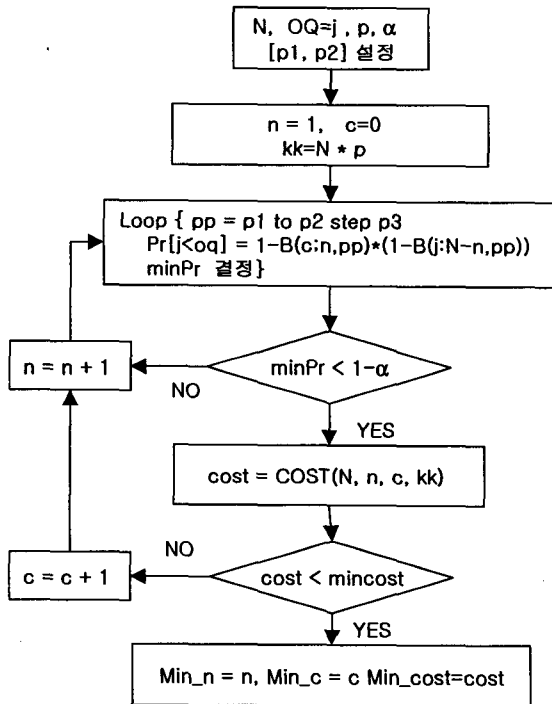
$J$  : 검사 후 lot 불량품수

$j_0$  : 보증하고자 하는 검사후 lot 불량품 수으로 정의한다.

OQ 검사방식은 규격화되어 사용되고 있지는 않으나, 샘플링 검사후의 출검품질을 가장 민감하게 조절이 가능한 검사방식이라 할 수 있다. OQ 검사방식에 관한 알고리즘 역시 Geunther(1984)가 제시하였으나, LTPD

검사방식과 마찬가지로, 사전에 임의의  $(n_1, c_1)$ 를 찾아야 하는 불편함과 불완전한 알고리즘이라는 단점을 가지고 있다. 최적알고리즘을 개발하기 위해서는 검사계획의 주요 파라미터인  $n, c, \bar{p}$ 의 변화에 대한 합격확률  $P_a$ 와 평균총검사수 ATI, 기대비용의 변화양상은  $(n, c)$ 가 결정된 후에는 LTPD 보증방식과 동일하다. 따라서 본 검사방식 알고리즘 설계의 중요 요인은  $N, j=j_0, 1-\alpha, \bar{p}$ 이 주어졌을 때,

$\min_p \Pr[J \leq j_0] \geq 1-\alpha$  을 만족하는 검사방식을 찾는 것이다.



<그림 3> OQ 보증방식 설계를 위한 알고리즘의 개략도

$(n, c)$  조합 전개를 위한 알고리즘은 다음과 같다.

Step. 1 : 로트의 크기  $N, j_0, \alpha$ , 공정평균 불량률  $(\bar{p})$ , 불량률 변동범위  $[p_1, p_2]$

비용요인  $S_1, S_2, A_1, A_2, R_1, R_2$  입력

Step. 2 :  $n=1, c=0$

Step. 3 : 초기하분포 확률 계산을 위한 log 변환 값 계산

$$a = \sum_{i=1}^{N-k} \log(i), b = \sum_{i=1}^{N-n} \log(i), d = \sum_{i=1}^N \log(i)$$

$$e = \sum_{i=1}^{N-k-n} \log(i) \text{ 단, } k = N \times \bar{p}$$

Step. 4 : 불량률 변동범위  $[p_1, p_2]$ 에 대하여

각 불량률에서 확률  $\Pr[J \leq j] =$

$$1 - B(c; n, p) \cdot (1 - B(j; N - n, p)) \text{ 를 계산.}$$

$\min \Pr[J \leq j]$  결정

Step. 5 : if  $\min \Pr[J \leq j] < 1 - \alpha$  :

$b = b - \log(N - n), d = d - \log(N - k - n)$  로 변환하고  $n$  을 1 증가시킨 후 Step. 4로 이동

if  $\min \Pr[J \leq j] \geq 1 - \alpha$  : STEP 6로 이동

Step. 6 : 로트당 평균비용

$$COST[N, n, c, p] =$$

$$nK_S + (N - n) [K_A + (K_R - K_A)(1 - P_a(\bar{p}))]$$

Step. 7 : 현재의  $COST[N, n, c, p]$  와 이전 단계의 COST를 비교하여 최소값을 저장

Step. 8 :  $c = c + 1$  로 증가시키고,

$(N - k - n + 1) \leq 0$ .OR.  $(N - kk - n + 1) \leq 0$  이면

종료 그렇지 않으면 Step.4 로 이동

종료 : MinCost를 갖는  $n$  과  $c$ 를 구한다.

### 3.4 결과분석

제시한 알고리즘에 따라 프로그램을 개발하고 예제를 분석한 결과는 다음과 같다.

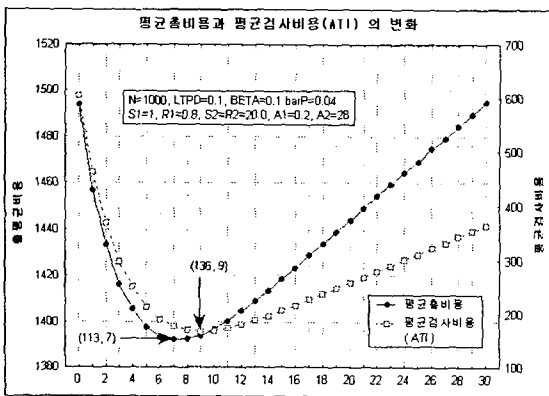


예제 1)  $N = 1000$ ,  $LTPD = 0.1$ ,  $\beta = 0.1$ , 공정평균불량률  $\bar{p} = 0.04$  에 대하여 Guenther (1984, pp. 183)는 비용변수를 다음과 같이 정의하였다.

$S_1 = 0.25$ ,  $R_1 = 0.20$ ,  $S_2 = R_2 = 5.0$ ,  $A_1 = 0.05$ ,  $A_2 = 7.0$  이라 할 때 최적의 검사계획 결과는 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> LTPD 보증 검사방식 결과 (LTPD = 0.1,  $\beta = 0.1$ )

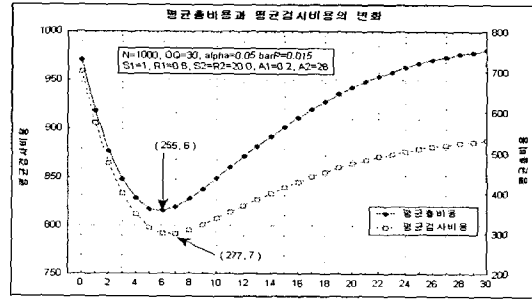
	$n$	$c$	$P_a(0.1)$	$P_a(0.04)$	ATI	기대 비용
KSA 3105	100	6	0.104	0.904	-	-
Guenther (1984)	113	7	-	0.915	187.52	348.78
ATI 기준	136	9	0.099	0.962	166.30	348.44
비용합수 기준	113	7	0.098	0.928	176.58	348.01



<그림 4> LTPD 검사방식에 따른 평균검사비용과 총평균비용의 변화

예제 2) 앞의 예제 1)과 동일한 비용요소를 고려한 OQ 보증방식의 최적해는 다음<그림

5>와 같이 구할 수 있다.

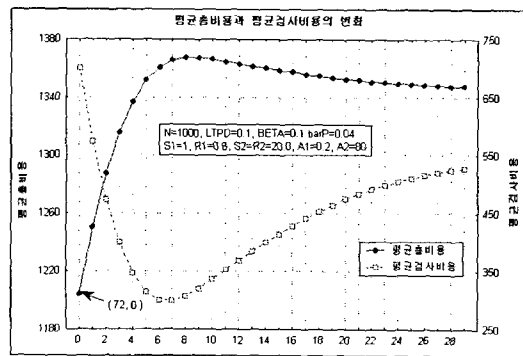


<그림 5> OQ 검사방식에 따른 평균검사비용과 총평균비용의 변화

예제 3) 위의 검사방식에 대하여 손실비용이 상대적으로 커지는 경우 다음과 같이 비용변수값을 변경 하여 최적해를 구하였다.

$S_1 = 1.0$ ,  $R_1 = 0.80$ ,  $S_2 = R_2 = 20.0$ ,  $A_1 = 0.2$ ,  $A_2 = 80$

<그림 6>은 검사방식에 따른 ATI와 총평균비용의 변화를 나타낸다. 최적해는 (72, 0)에서 평균총비용은 1204.4 이다.



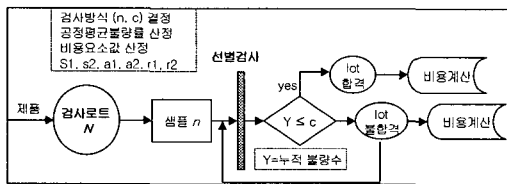
<그림 6> OQ 검사방식에 따른 평균검사비용과 총평균비용의 변화

### 3.5 경제성 분석

제시한 LTPD 및 OQ 검사방식에 대한 예제 결과를 살펴보면 그 비용절감 효과는 크게 나타나지 않고 있다. 이는 로트당 평균검사비용을 기준으로 비교하기 때문이다. 또한 각 비용요소의 측정단위의 영향이 크다고 할 수 있다. 보다 현실적인 경제성을 분석하기 위해서는 현실에 적용하여 그 결과를 산출하여야겠지만, 이는 많은 시간과 노력이 필요하므로 본 연구에서는 시뮬레이션 기법을 이용하여 비용의 효과를 구하였다.

시뮬레이션 기법활용을 위한 기본가정은 다음과 같다.

1. 고정평균불량률은 사전에 구해진 값으로서 가정하여 고정한다.
  2. 로트내의 불량품의 분포는 초기하분포를 가정한다.
  3. 모든 비용은 단위제품의 검사와 제작업에 대하여 그 수에 비례하여 증가한다.
- 이와같은 가정하에 시뮬레이션을 위한 모형은 다음과 같이 구성된다.



<그림 7> 시뮬레이션 모형의 구성

여기서 누적불량수 Y는 보증방식의 경우 초기하분포를 따르는 확률변수이다. 그러므로 본 모형에서는 누적불량수 Y를 초기하분포를 따르는 확률변수를 발생시켜 각 로트의 합격여부를 판정하여 비용을 계산한다. 비용은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{cost} = S_1 \cdot n + S_2 \cdot Y + (N \cdot p - Y) \cdot A_2 + (N - n) \cdot A_1$$

if  $Y \leq c$

$$\text{cost} = S_1 \cdot n + S_2 \cdot Y + (N \cdot p - Y) \cdot R_2 + (N - n) \cdot R_1$$

If  $Y > c$

Visual Basic을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

< 표 2> 시뮬레이션을 이용한 비용분석

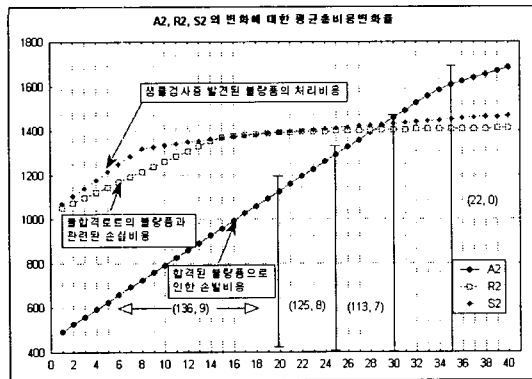
로트 수	LTPD 보증 검사방식 예제 3)			OQ 보증 검사방식 예제 5)		
	(136, 9)	(113, 7)	Δ비용	(277, 7)	(253, 6)	Δ비용
100	139,982	139,837	145	82,071	80,669	1,402
1000	1,394,452	1,393,994	458	820,417	818,416	2,001
5000	6,973,155	6,969,493	3,661	4,102,705	4,082,124	20,581

결과를 보면 비용의 차이는 앞에서 제시한 로트당 평균총비용의 차와 비례함을 알 수 있다. 이는 로트의 불량률이 일정한 상수임을 가정하기 때문에 로트의 수가 증가하여도 합격로트와 불량로트의 비율이 비슷하기 때문이다. 따라서 현실성을 높이기 위해서는 로트의 불량률에 대한 사전분포의 고려가 필요하다.

또한 각 비용요소의 변화가 평균총비용의 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 비용요소 값은 앞의 예에서 사용하였던  $S_1=1.0$ ,

$R_1=0.80$ ,  $S_2=R_2=20.0$ ,  $A_1=0.2$ ,  $A_2=28$  를 적용하였다. 분석은 불량품과의 관련 비용인  $A_2$ ,  $R_2$ ,  $S_2$  에 대하여 실시하였다. 먼저  $A_2$  를 제외한 나머지 비용요소는 제시한 값으로 고정하고  $A_2$ 만을 1에서 40까지 1

단위로 증가시키며, 최적해와 이때의 최소비용을 구하였다. 동일한 방법으로  $R_2$ ,  $S_2$ 에 대하여 적용하였다. 세 변수의 총비용의 변화에 대한 민감도는 다음 <그림 8>와 같다.



<그림 8>  $A_2$ ,  $R_2$ ,  $S_2$ 의 변화에 따른 최소비용의 변화

<그림 8>에서 알 수 있듯이 모든 비용요소가 일정할 때, 비용요소의 변화는 최적검사방식의 변화를 초래하고, 평균비용값을 변화시킨다. 총비용의 변화에 가장 둔감한 비용요소는 불합격로트의 불량품과 관련된 손실비용인  $R_2$ 이다. 이는 불합격 판정을 받기 위한 샘플검사에서 이미 상당수의 불량품이 샘플수  $n$ 에서 제거되었기 때문이다. 특히  $A_2$ 의 변화는 평균총비용의 변화에 가장 큰 영향을 미친다. 비용이 증가함에 따라 최적검사방식의 샘플수  $n$ 은 점차 감소됨을 알 수 있다. 이러한 양상은 비용요소  $S_2$ 에서도 동일하게 나타난다. 그러나 비용요소  $R_2$ 에 대하여는 반대로 비용이 증가함에 따라 최적해의 샘플수  $n$ 은 증가한다. 따라서 평균총비용을 줄이기거나 정확한 비용의 산출을 위

하여는 합격된 불량품으로 인한 손실비용인  $A_2$ 의 산출과 이를 최소화하기 위한 노력이 필요함을 알 수 있다.

### 3.6 불량률의 사전분포를 가정한 베이저안 샘플링

샘플링 계획의 수립에 있어서 공정 평균불량률  $\bar{p}$ 가 모수로 입력되게 된다. 그러나 기존의 샘플링 계획은 공정 평균불량률을 점추정값  $\hat{p}$ 를 가정하여 왔으나 많은 경우 로트별 불량률  $p$ 가 일정하다고 가정하는 것은 비현실적이다. 예를들면 어떤 특정제품을 생산하는 경우에 매 로트별 생산 후 기기는 점검되고 보증된다. 따라서 특정 제품의 로트의 불량률  $p$ 는 일정하다고 생각되나 각 로트별  $p$ 는 어떤 분포를 이룬다고 보아야 한다. 이 분포를 불량률  $p$ 의 사전분포(prior distribution)라 하며 일반적으로 계수 선별형 샘플링 검사방식을 고려하는 경우 고장불량률의 사전분포로서 베타분포( $\beta$  distribution)를 가정한다[Hald, 1960][윤완선 외, 1979][Guenther, 1985]. 베타분포는 2개 모수에 의존하므로 임의의  $\hat{p}_i$ 의 집합에 대하여 분포적합(distribution fitting)을 정도 좋게 얻을 수 있다. 베타분포를 가정하는 경우, 공정불량률  $P$ 는 확률변수로서 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$f(p; a_1, a_2) = \frac{1}{B(a_1, a_2)} p^{a_1-1} (1-p)^{a_2-1}$$

단,  $0 < p < 1$ ,  $a_1 > 0$ ,  $a_2 > 0$ , 이고

$$B(a_1, a_2) = \int_0^1 p^{a_1-1} (1-p)^{a_2-1} dp : \text{베타함수}$$

이러한 가정을 하는 경우 LTPD 보증방식과 OQ 보증방식에 대한 최적해는 앞서 제시

된 알고리즘을 개선하여 구할 수 있다.

불량률의 사전분포로서 베타분포를 가정하는 경우 베타분포의 모수인  $a_1$ 과  $a_2$ 의 값이 필요하게 되는데, 이 경우에는 샘플검사에 의한 개별샘플의 불량률 정보를 이용하여 점추정값으로서 두 모수값을 추정하게 된다. 크기  $n$ 인 샘플  $m$ 개가 있을 때, 각 샘플에 대하여 검사를 실시하여 샘플의 불량률을 구하면

$$\bar{p} = \sum_{i=1}^m (\hat{p}_i / m)$$

$$s^2 = \sum_{i=1}^m (\hat{p}_i - \bar{p})^2 / (m - 1)$$

을 구할 수 있으며, 이를 이용하여  $a_1$ ,  $a_2$ 는 다음 식과 같이 추정할 수 있다[Hald, 1981].

$$\hat{a}_1 = (\bar{p}(\bar{p}q - s^2)) / (s^2 - \bar{p} \cdot q / N)$$

$$\hat{a}_2 = (\hat{a}_1 q) / \bar{p} \quad \bar{q} = 1 - \bar{p}$$

위와 같이 로트불량률의 사전분포에 대한 모수들이 추정되면, 선형비용모델에 의한 새로운 기대비용을 산출할 수 있다. 먼저  $(n, c)$ 로트의 합격확률은 다음과 같이 정리된다.

$$P(c; a_1, a_2, n) = \sum_{x=0}^c \binom{n}{x} \cdot \frac{B(x+a_1, n-x+a_2)}{B(a_1, a_2)}$$

따라서, 몇 번의 정리를 통하여 비용함수는 다음과 같이 산출된다.

$$COST[N, n, c, p] = (K_S - K_M)R(N, n, c) + NK_M$$

여기서,

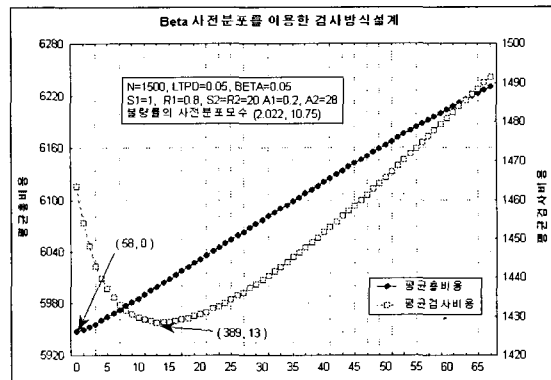
$$R(N, n, c) = n + (N - n) \{ \gamma_1 P(c; x + a_1, n - x + a_2, n) + \gamma_2 [1 - P(c; a_1, a_2, n)] \}$$

$$K_S = S_1 + \frac{a_1}{a_1 + a_2} \cdot S_2,$$

$$K_M = A_1 + \frac{a_1}{a_1 + a_2} \cdot R_2$$

$$\gamma_1 = \left( \frac{A_2 - R_2}{K_S - K_M} \right) \cdot \left( \frac{a_1}{a_1 + a_2} \right),$$

$$\gamma_2 = (R_1 - A_1) / (K_S - K_M)$$



<그림 9> 베타 사전분포를 이용한 검사방식

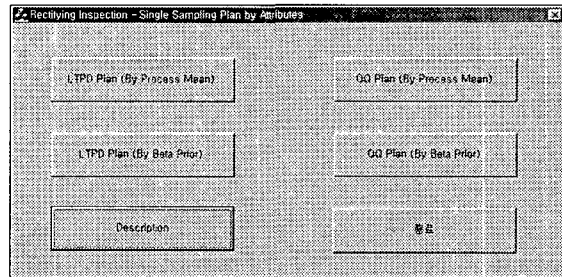
LTPD 보증방식과 OQ 보증방식의 공통점은 개별로트의 품질보증을 위한 방법이라는 데 공통점이 있으나, 검사방식 설계에는 뚜렷한 차이점이 있다. 그 차이점은 보증의 관점인데, LTPD 보증방식의 경우는 소비자 위험  $\beta$  (즉, 나쁜 품질의 로트가 합격할 확률을 제한)를 기준으로 하며, OQ 보증방식의 경우는 좋은 로트를 높은 확률로서 합격 시킴으로써 출검 로트의 품질향상을 기대하고 있다. 이는 샘플링검사의 출발점에서 생각하면 생산자 위험  $\alpha$ 의 관점과 동일한 개념이 된다. 따라서 두 방식을 동시에 고려하면 계수

규준형 샘플링검사 방식과 같이  $(OQ, 1-a)$ ,  $(LTPD, \beta)$  두점의 조건을 만족하는 선별형 샘플링검사 계획을 수립할 수 있다. 정해진  $\alpha$  수준에서는 OQ 보증방식으로 설계하고  $\beta$  수준에서는 LTPD 보증방식으로 설계하여 각각의 검사방식에서  $(OQ, 1-a)$ ,  $(LTPD, \beta)$ 를 만족하는 검사계획 중 비용이 최소인 검사방식을 찾아낼 수 있다. 이는 소비자와 생산자 모두 고려할 수 있는 방법이며, 소비자가 생산자 위험  $\alpha$ 를 선택함으로써 해서 기존의 검사방식에 비해 소비자 보호 효과를 크게 기대할 수 있다.

예제 4) 1500개 제품으로 구성된 검사로트에 대해  $LTPD=0.05$ ,  $\beta=0.05$ 를 보증하며 동시에 로트의 불량률의 변화에도 불구하고 검사받은 로트의 불량률이 0.01이하임을  $\alpha=0.05$ 로 보증하려 하는 경우를 생각해 볼 수 있다. 이 경우 LTPD 보증검사방식과 OQ 보증 검사방식에 대해 각각 구해보면 LTPD 보증의 경우 (389, 13) : ATI=487, (809, 33) : ATI=810을 구할 수 있으며 OQ 보증의 경우 (684, 13) : ATI=1416, (1128, 33) : ATI=1136을 구할 수 있다. 여기서 동일한 합격판정개수에 대해 OQ 보증의 경우가 샘플수가 크므로 (684, 13), (1128, 33) 검사방식 모두  $P_a(LTPD) \leq 0.05$ 를 충분히 만족한다. 따라서 두 검사방식 중 최소비용을 갖는 (1128, 33)의 검사방식을 선택하는 것이 두 검사조건을 만족하는 샘플링검사 방식을 구하는 것이다.

<그림 10>은 LTPD와 OQ 보증방식 샘플링 설계를 위한 메인 프로그램 화면이다. 본 프로그램을 통하여 LTPD와 OQ 보증방식에 대한 설계를 손쉽게 구할 수 있다. 각

검사방식의 Bayesian 샘플링 계획은 사전분포로서 베타분포를 가정하는 경우이다. 따라서 보증방식에 따라 4개의 서브프로그램을 실행하여 해를 구할 수 있다.



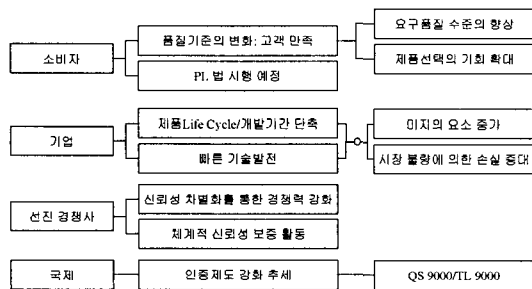
<그림 10> LTPD와 OQ 보증방식 샘플링 설계를 위한 메인 프로그램

#### 4. 고장률보증 신뢰성 샘플링 검사

경쟁체제의 심화와 소비자의 요구가 점점 다양해짐에 따라 제품의 품질과 함께 제품의 신뢰성 역시 중요한 요소로 인식되고 있다. 그러나 원가절감적인 측면과 시장확보적인 측면에서 제조원가를 줄이기 위해 고장률을 고려하지 않고 제품을 설계할 경우 오히려 품질보증비용이 증가하게 된다. 반대로 고장률을 낮게 설계할 경우에 품질보증비용은 줄어든다. 제조원가가 상승하게 된다. 특히, 비용절감과 이윤의 극대화라는 제조업체의 측면에 있어서 제품들은 적당한 수명주기, 다양한 성능에 대한 품질, 그리고 낮은 고장률을 모두 만족시켜야 한다. 따라서 대부분의 제조업체에서는 환경시험과 같은 자체적인 신뢰성 확보 활동들을 수행하고 있다. 그러나 이러한 신뢰성 확보 활동은 그 효과와 신뢰성의 정도를 소비자 혹은 구매자에게 제시하기

에는 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 그동안의 누적된 고장자료를 통하여 제품의 평균수명이나 고장률을 구할 수 있다. 그러나 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 샘플링검사를 수행한다.



<그림 11> 신뢰성보증의 필요성

이 수명시험 샘플링검사를 신뢰성샘플링검사 혹은 RASP (reliability acceptance sampling plan) 라고도 한다. 신뢰성 샘플링검사를 대별하면 고장률과 같은 계수 데이터를

를 기초로 로트의 합부판정을 하는 계수형 샘플링 검사와 MTBF와 같은 계량 데이터를 기초로 판정하는 계량형 샘플링 검사로 나눌 수 있다. 수명시험 샘플링검사는 검사의 종료방법에 따라 다음 두가지로 나뉜다. 제 I 종 관측중단은 로트(lot)로부터 랜덤추출한 제품들을 동시에 시험하여 미리 정해진 시점까지 고장시간을 관측하는 방법이다. 제 II 종 관측중단은 주어진 갯수의 고장이 관측될 때까지 고장시간을 관측하여 로트의 합격여부를 판정한다. 수명시험 샘플링 검사에 대해서는 지금까지 많은 연구가 수행되었다. Epstein과 Sobel(1953), Bulgren과 Hewette(1973), Fairbanks (1988) 등은 수명이 지수분포(exponential distribution)를 따를 때 수명시험 샘플링검사를 제안하였다. 미 국방성 품질관리 및 신뢰성 핸드북(Quality Control and Reliability Handbook) HI08(1960)에서는 제 I 종 관측중단, 제 II 종 관측중단 그리고 축차시험(sequential test)에서 전자부품에 대한 수명시험 샘플링검사를 설명하고 있다. 그러나 앞의 수명시험 샘플링검사는 제품의 사용조건에서 시험하는 경우에 대한 것이다. 따라서 고신뢰도의 제품에 대해서는 긴 시험시간 혹은 많은 시험제품이 소요된다. 그러므로 제품의 Life Cycle이 점점 짧아지는 현실에서 비용과 시간을 고려할 때 현실적으로 불가능한 경우가 많다. 이를 극복하기 위한 하나의 방편으로 가속수명시험(accelerated life testing)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가속수명시험은 제품의 사용조건 보다 열악한 조건에서 시험하여 제품의 고장정보를 빨리 얻고 이를 이용해서 사용조건에서의 수명을 추론하는 방법이다. Wallace(1985)는 MIL - STD - 781의 개선 방향으로 가속수명시험의 도입을 강조하였다. 그러나 가속수

명시험역시 가속계수를 구하기 위한 실험이 필요하고 제품의 구조와 디자인이 변경된 경우 그 적합성을 판단하기 위한 확인 시험이 필요하다. 따라서 실제 제조현장에서 사용하기에는 적절치 못한 경우가 많다. 정상 수명 시험 샘플링 검사에 대한 선행연구는 주로 지수수명분포 가정하의 베이지안 추정을 사용한 샘플링 검사계획에 대한 연구가 활발하다. 정현석 외(1994) 2인은 무고장 기간에 근거한 베이지안 합격판정 샘플링계획을 개발하였다. 그는 평균수명  $\theta$ 의 사전분포로 역변환 감마분포를 가정하여 형상모수가 작고 척도모수가 클수록 무고장 기간 샘플링계획의 기대 종료시간은 더 작은 경향을 보인다는 것을 증명하였다. 또한 이창호(1983)는 제품의 수명분포가 지수분포와 와이블분포(weibull distribution)을 따를 때 생산자 위험  $\alpha$ 와 소비자 위험  $\beta$ 를 고려한 수명시험 샘플링 계획을 제시하였다. 서순근(1996)은 지수수명분포에 대하여 정기검사 및 정시종결 하에서 RASP에 대한 연구결과를 제시하였다. 그러나 이러한 연구들은 모두 검사하는 시료가 양품 즉, 제조상의 품질에는 정상인 시료임을 기본 가정으로 하고 있다. 물론 신뢰성자체가 양품이 의도된 기간동안 정상작동할 확률이므로 그 가정은 타당하다. 그러나 소비자에게 전해지는 제품자체가 완전무결한 전수검사를 통하는 것은 현실적으로 매우 힘든 일이므로, 반드시 불량품은 소비자에게 전달된다. 그러므로, 현실적인 신뢰성을 소비자에게 보증하기 위해서는 검사로트에 불량이 존재하는 경우 평균수명은 짧아지게 되므로 이를 고려한 RASP 가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 로트내 불량을 허용할 때 로트허용고장률(이하 LTR)보증을 위한 RASP를 제시하였다. 또한 RASP의

비용요소 정의하여 환경시험장비를 주로 사용하게되는 수명시험의 경제성에 대해 고찰하였다.

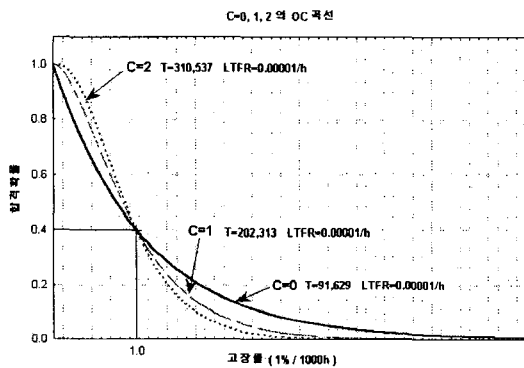
#### 4.1 LTR보증 계수1회 샘플링검사

로트허용 고장률(LTR) 보증 계수 1회 샘플링검사는 바람직하지 않은 로트의 고장률의 상한치를  $\lambda_1$  이라 할 때, 이러한 로트의 합격확률을 소비자 위험  $\beta$  이하로 보증하는 신뢰성 샘플링 검사방식이다. 그러므로, 총시험시간  $T$ 사이 에 발생한 고장갯수  $r$ 이 합격판정갯수  $c$ 보다 적으면 그 로트(lot)는 신뢰수준  $(1 - \beta)$ 으로 합격시키는 샘플링 검사방식이다. 여기서  $T$ 는 각 샘플의 시험시간(고장난 것은 고장날 때까지의 시간)의 누계이다.  $r$ 이 적으면  $T$ 는  $nt$ ( $n$ :샘플수,  $t$ :시험시간)와 거의 같게 됨으로  $T = nt$  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  $n$ 개의 샘플을 채취하여 총 시험시간  $T$ 의 시험을 하고 그 사이에  $r$ 개 고장나는 확률은 포아송 분포를 따른다. 따라서 합격판정갯수가  $C$ 일 때, 고장률이 LTR이상인 로트에서 나온 샘플이 합격할 확률은 다음과 같으며, 이 값이 소비자위험  $\beta$  보다 작

계되는 총시험시간  $T$ 를 구하게 된다.

$$OC = \sum_{r=0}^c \frac{1}{r!} (\lambda_1 T)^r e^{-(\lambda_1 T)} \leq \beta, \quad \lambda_1: LTFR$$

<그림 12> 는  $\beta=0.1$  일 때, 합격판정갯수  $c$ 의 증가에 따른 OC 곡선을 보여준다. 총시험시간  $T(=nt)$  는  $c$ 의 증가에 따라 급격히 증가함을 알수 있다. 또한 로트의 고장률이 LTFR 이하인 경우에는  $c$ 가 클수록 합격확률이 증가한다(생산자 위험이 작아지며). 반대로 로트의 고장률이 LTFR 이상인 경우에는  $c$ 가 클수록 합격확률이 작아진다(소비자 위험이 작아진다). 이는  $c$ 가 증가할수록 총시험시간이 길어져, 시험결과에 대한 신뢰성이 좋아지기 때문이다. 그러나  $c$ 의 증가에 따른 총시험시간이 너무 커지기 때문에 비용 및 시간 등 현실적인 측면에서 보통  $c=0$ 를 사용하고 있다.



<그림 12> C의 증가에 따른 시험시간의 변화 및 OC곡선

이 방법은 원리적으로는 부품의 고장이 우발 고장에 따른다. 즉, 고장 발생 시간이 지수 분포에 따라 시간적으로 보아 고장률이 일정하다고 간주되는 대상품이면 어떠한 곳

에도 적용되는 것이다. 사실상 전자부품의 고장률은 모든 것이 우발 고장에 따른다고는 할 수 없다. 보기를 들면 열화 고장에서는 고장 정의의 시방에 따라 이 가정은 반드시 만족되지 않는다. 그럼에도 불구하고, 부품에 이 방법을 적용하는 이유는 이론적인 엄밀의 정도보다 현실적인 편리도를 의도하고 있기 때문이다. 마모 현상에 따라 집중적으로 고장을 일으킬 수 있는 부품도, 그 시점에 앞선 기간에서도 극히 드문 우발적인 고장이 발생하고 있다고 생각할 수 있는 것이다. 또한 고장률이 감소하는 형의 부품에서도 어느 규정기간의 평균 고장률에 관한 정보가 축적되면 고장률이 시간적으로 변화하는 경우 보기를 들면 와이בל 분포에 기초를 둔 시험 방법을 적용할 수 있고, 보다 실제적인 판정이 가능하게 되므로 항상 같은 노력을 하는 것이 바람직하다.

## 4.2 비용모델

로트허용고장률(LTFR)과 소비자 위험  $\beta$ 가 결정되면 식 (18)에 의해 총시험시간이 결정된다. 실제 검사에 있어서는 여러 가지 비용요소들이 발생하게 되는데 샘플의 단가와 시험시간의 제한 및 시험시간에 따른 비용 등을 고려하여 최적의 샘플크기와 시험시간을 결정해야 한다.

총검사비용은 다음과 같은 간단한 선형식을 고려할 수 있다.

$$TC = C_S + C_{TR} + C_{TA} \dots\dots\dots (4)$$

$TC$  = 총검사비용,  $C_S$  = 샘플비용,

$C_{TR}$  = 검사준비비용,  $C_{TA}$  = 검사진행비용



일반적으로 전자부품의 신뢰성검사는 노출 환경을 일정하게 유지하기 위하여 항온항습 기등의 환경시험장비를 반드시 사용하게 된다. 이때에는 장비의 용적에 따라 동시에 넣을 수 있는 샘플의 수는 한정된다. 특히 고장률 보증시험은 제품을 작동상태로 노출시켜야 되기 때문에 대상 샘플외에 파워, 릴레이, 레코더 등 추가장치가 필요한 경우가 거의 대부분이다. 또한 신뢰성시험은 파괴시험으로 시험에 사용된 샘플역시 비용요소가 된다. 따라서, 식(4)는 생산자가 직접 수명시험을 하는 경우나 외부 공인시험기관을 사용하는 경우 모두 적용이 가능한 일반형태로서 다음과 같이 세분화 될 수 있다.

$$C_S = n_P \times C_P, \quad C_{TR} = n_C \times C_Z$$

$$C_{TA} = n_C \times t \times C_C, \quad t: \text{시험시간}$$

$n_C: x, x-1 < (n_P/n_A) \leq x, x = 1, 2, \dots, n_T$

$C_P$ : 제품순수제조원가

$C_Z$ : 장비당 시험준비비용

$C_C$ : 시간당 환경장비 운용비용

$n_P$ : 샘플수  $n_C$ : 필요환경장비 수

$n_A$ : 환경시험장비당 시험가능 샘플수

$n_T$ : 여유환경시험장비 수

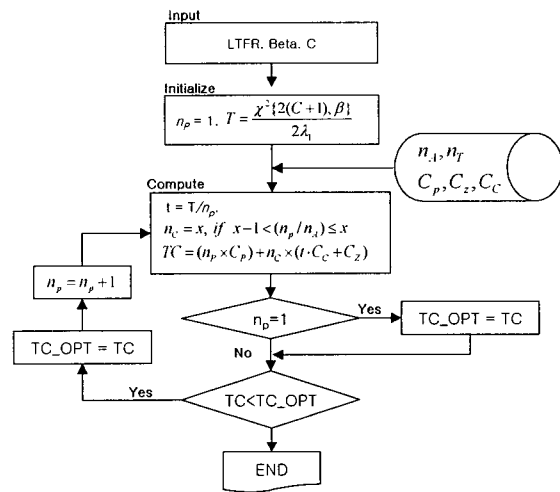
따라서, 식(4)는 다음과 같이 정리된다.

$$TC = (n_P \times C_P) + n_C \times (t \cdot C_C + C_Z) \dots (5)$$

$n_C = x, x-1 < (n_P/n_A) \leq x, x = 1, 2, \dots, n_T$

따라서 이를 이용하여 총검사비용을 최소

로하는  $n$ 과  $t$ 를 결정할 수 있다. 초기샘플의 수를 결정한 후  $n$ 을 조금씩 증가시켜 가며 총검사비용을 탐색한다. 샘플의 수, 시험시간, 환경시험장비 수에 제한에 따라 최적의 검사비용을 도출하는  $n$ 과  $t$ 를 찾아낼 수 있다. 다음 <그림 13>은 식(5)을 이용한 검사방식설계 알고리즘을 보여준다.

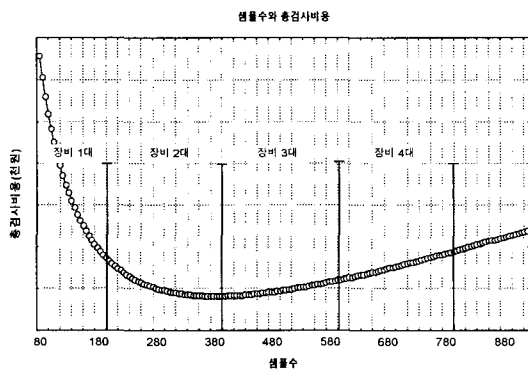


<그림 13> 최소비용 검사방식 설계 알고리즘

다음 <표 3> 과 <그림 14>는 LTFR = 1%/1000h를 신뢰수준 60%에서 보증하기 위한 검사방식에서 도출된 비용모델을 적용한 결과이다. 사용가능한 장비는 총 4대이며, 제품의 단가는 5,000원, 항온항습장비는 시간당 8,000원의 비용이 소요된다. 1대 장비의 유효 샘플수는 200개 이며 현재 사용가능한 유효 장비수는 3대 이다. 이 경우  $n = 385, t = 235h$  일 때 총검사비용은 3,828,981로서 최소이다.

<표 3> LTFR=1%/1000h, 신뢰수준60%

$n$	$t$	장비수 ( $I$ )	총검사비용 ( $TC$ )
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 14> 샘플수와 총검사비용변화

### 4.3 로트품질을 고려한 LTFR 보증 방식

원칙적으로 신뢰성 샘플링 검사에 사용되는 샘플은 무결점 샘플을 원칙으로 하고 있다. 즉, 고장률 시험의 대상이 되는 샘플에 대해서는 전수선별 검사를 실시하여 100% 양품에 대한 신뢰성 시험을 하는 것이다. 이는 신뢰성의 정의 자체가 제품이 양품이라는 전제하에 정해진 사용조건에서 의도되는 기능을 확률로써 표시하는 시간의 함수이기 때

문이다. 따라서 신뢰성 자체의 의미로는 양품만을 대상으로 시험하는 것이 바람직하다. 그러나, 소비자가 사용하는 제품에 대한 신뢰성 보증의 의미로 확대되면 적용상의 무리가 있다. 여기서 보증의 개념은 제품의 MTTF(평균수명)를 정해진 확률로서 인증한다는 개념이다. 그러나, 샘플 자체가 100% 양품임을 기본가정으로 함으로, 이 결과를 실제 제품이 판매되는 시장에 적용하는 것은 바람직하지 않다. 대량생산되는 양산품의 경우, 100% 전수검사를 하는 제품을 제외하더라도 반드시 소비자에게 전달되는 제품에는 불량품이 존재하기 때문이다. 따라서 전수검사를 통해 제품의 품질이 정확히 확보된 샘플에 대한 수명시험 결과는 실제 제품이 소비자 단계에서 사용될 때와 다르게 된다. 그러므로 제품의 정확한 신뢰성을 보증하기 위해서는 제품의 최종 품질검사에 대한 정보를 고려하여 소비자에게 전달되는 제품에 불량품이 있을 가능성을 포함하는 신뢰성 샘플링 검사계획을 수립해야 할 것이다.

로트허용고장률(LTFR) 보증을 위한 기본 가정은 로트의 불량률이 "0"인 경우에 한한다. 그러나 로트내에 불량품이 존재하는 경우도 고려해 볼 수 있다.

로트 내에 불량률이 존재하는 경우는 검사로트가 양품만을 가정하는 경우와 비교하였을 때 동일한 총시험시간  $T$  에 대해  $LTFR = \lambda_1$  에서 소비자 위험을 증가시킨다. 따라서 양품만을 가정한 로트에 대한 보증방식과 동일한 소비자 보호효과를 얻기 위하여는 총시험시간  $T$  는 증가되어야 한다.

먼저 로트내에 불량품이 포함된 경우는 다음과 같이 가정한다.

- (1) 양품의 수명분포는 지수분포를 가정한 다.
- (2) 불량품의 고장밀도함수는 임의의 확률 밀도함수를 가정할 수 있으나 제품이 불량인 경우는 수명시험후 불량원인이 제거될 가능성이 없으므로 수명시험후 언제나 고장을 일으킨다고 가정할 수 있다. 따라서 일정시간안에 불량품이 고장날 확률은 시간에 관계없이 언제나 '1'이다.
- (3) 로트의 평균불량률은 사전에 주어진 값  $p$  이다.

설명을 위한 기호를 정의하면 다음과 같다.

- $X$  : 로트내 제품의 집합  
 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$
- $r$  : 총시험시간  $T$  시간동안의 총고장수
- $B_1$  : 제품이 양품일 사상  $P(B_1) = 1 - p$
- $B_2$  : 제품이 불량품일 사상  $P(B_2) = p$
- $\beta_1$  : LTFR =  $\lambda_1$ 에서 검사로트가 모두 양품 일 경우의 소비자 위험
- $\beta_2$  : LTFR =  $\lambda_1$ 에서 검사로트내에 불량품이 존재하는 경우의 소비자 위험

이 경우에는 수명시험을 실시함에 있어서 샘플내에 불량품이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대해 고려할 수 있다. 먼저 사상  $B_1$  에 대해 다음과 같은 확률을 정의 할 수 있다.

$$P(r = x/B_1) = \frac{1}{x!} (\lambda T)^x e^{-\lambda T}$$

사상  $B_2$  에 대한  $P(r = x/B_2)$  는 미지의 분포함수를 가정할 수 있다. 따라서 정확률 공식을 이용하여  $P(r = x)$ 을 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$P(r = x) = P(r = x/B_1) \cdot P(B_1) + P(r = x/B_2) \cdot P(B_2) \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $P(r = x/B_2)$ 는 미지의 분포함수 이나 가정 (2)에 의해  $P(r = 0/B_2)$ 항상 '0'임을 알 수 있다. 이는 불량품은 반드시 시험시간내에 고장을 발생하기 때문이다. 그러므로 고장갯수  $r = 0$ 인 경우의 확률은 다음 식(7)와 같이 정리할 수 있다.

$$P(r = 0) = e^{-(\lambda T)} \cdot (1 - p) \dots\dots\dots (7)$$

여기서 식 (7)를 해석해보면, 로트내 불량품을 허용하는 경우 임의의 총시험시간  $T$  동안 고장이 나지 않을 확률이 로트내 양품만을 가정하는 경우보다 더 작아지게 된다. 로트내의 불량품이 고장확률을 증가시킴으로써 고장발생 확률은 더욱 커지기 때문이다. 따라서 동일한 시간  $T$  동안 시험했을 때 식(8)과 같이 양품만을 고려하는 경우보다 불량품을 허용하는 경우가 소비자 위험을  $1/(1 - p)$  만큼 증가시킴을 알 수 있다.

$$e^{-(\lambda_1 T)} \leq \beta_2 / (1 - p) = \beta_1 \dots\dots\dots (8)$$

따라서 로트내에 불량품을 허용하는 경우 일정시간  $T$  동안 소비자 위험  $\beta$  에서 LTFR 보증을 위한 샘플링검사방식 설계는

다음과 같이 식(9)로 유도된다.

$$e^{-(\lambda_1 T)} \leq \beta_1 \cdot (1 - p) \dots\dots\dots (9)$$

따라서, 식(9)을 만족하는 총시험시간  $T'$  를 구할 수 있다.

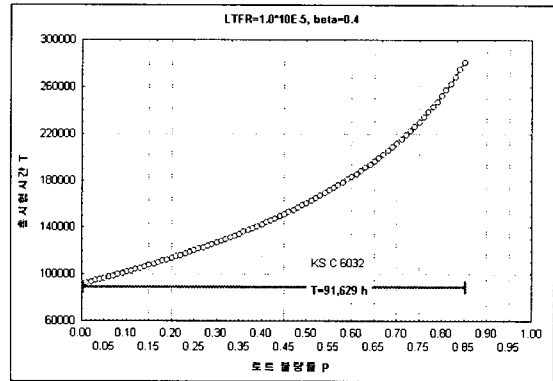
예) 고장률이 지수분포를 따르는 전자부품을 대상으로 LTFR 보증 샘플링검사 방식을 설계하는 경우,  $LTFR = 1.0 \times 10^{-5}/h$ ,  $\beta = 0.4$  를 가정할 때, 식 (17)에 의해 총시험시간  $T = \ln(\beta) / -\lambda = 91,629h$  이다. 따라서  $nt = 91,629$ 를 만족하는 샘플수  $n$ 과 시험시간  $t$  를 결정하여 시험을 실시한다<sup>2)</sup>. 그러나 본 제품은 전수검사를 하지 않으므로 최종 출하제품에는 불량품이 포함된다. 최종 로트의 불량률  $p = 0.03$  임이 알려져 있다. 이 경우  $LTFR = 1.0 \times 10^{-5}/h$ ,  $\beta = 0.4$ 로 보증하고자 하면 총시험시간

$T = \frac{\ln(\beta \cdot (1 - p))}{-\lambda} = 94,675h$  로서 총시험시간은 3,046 단위시간을 증가시켜야 한다.

<그림 15> 은 로트불량률과 고장률시험시간의 관계를 보여준다.

<그림 15> 에서 알 수 있듯이 양품만을 대상으로 하는 LTFR 보증 신뢰성 샘플링 검사방식은 로트의 불량률 즉, 제품 자체의 품질정도를 전혀 반영하지 못하고 있다. 이는 최종 출하전 검사에서 불량품을 모두 가려내지 못하면 달성할 수 없는 신뢰성 보증 수준인 것이다. 따라서 실제 사용에 있어서의 평균수명 보증을 위해서는 출하제품의 품

질수준을 명확히 하고, 이에 대한 평균수명을 보증할 수 있어야 한다.



<그림 15>  $\lambda_1 = 1.0 \times 10^{-5}/h$ ,  $\beta = 0.4$ 를 만족하는 시간  $T$

로트의 불량률이 증가함에 따라 보증하고자 하는 LTFR 수준에서의 총시험시간은 급격히 증가하고 있다. 따라서, 불량률을 감소시키지 못하면 고장률 보증을 위한 검사활동 자체에 많은 시간과 노력을 필요로 하게 된다. 총시험시간의 증가는 본 장 제2절에서와 같은 많은 비용의 증가를 가져온다. 따라서 품질향상을 위한 비용과 신뢰성 샘플링검사를 위한 비용을 동시에 고려하여, 보증하고자 하는 품질수준 및 신뢰성 수준에서의 최적 검사방식을 수립할 필요가 있다.

로트의 품질보증을 위한 LTPD 검사방식과 OQ 검사방식에서는 보증하고자 하는 품질수준에서 개발된 알고리즘을 통해 품질비용을 고려한 최적 검사방식을 구할 수 있다. 이를 통하여 소비자에게 전달되는 최종 제품의 품질수준을 목적으로 하는 보증수준(소비자 위험  $\beta$ )에 맞게 조절할 수 있다. 그러므로, 품질보증 단계에서 조절된 로트의 불

2) KS C 6032 에서는 시험시간  $t = 1000$ 시간 이상을 원칙으로 하고 있다.

량을 고려한 신뢰성 샘플링 검사방식을 도출할 수 있다. 도출된 고장률 보증 검사방식  $(n, t)$ 에서 본 장 제2절의 신뢰성 샘플링의 비용모델을 활용하여 고장률 보증을 위한 비용을 추정할 수 있다. 결국 품질보증 및 신뢰성 보증에서 각각의 소비자 위험이 정해지면, 현재 제품의 공정불량률에 따라 품질 및 신뢰성 보증을 위한 최적의 검사방식을 구할 수 있다.

## 5. 결론 및 요약

본 연구에서는 제품을 사용하는 소비자 보호를 위한 품질보증 및 신뢰성 보증에 대해서 연구하였다. 최근 들어 기업 및 개인 소비자들은 제품의 품질과 함께 제품의 시간적 품질인 신뢰성에도 많은 관심을 가지고 있다. 따라서 신뢰성이 구매의 중요한 요소로 자리잡고 있다. 특히 국내 수입의 많은 부분을 차지하고 있는 전자부품의 경우 그 중요성은 더욱 크다고 할 수 있다. 그러므로 신뢰성 향상 및 보험 등 구체적인 보증활동 및 신뢰성정보의 계량화만이 선진 외국제품에 대한 경쟁우위 확보방안 임은 자명하다. 따라서 국가 차원에서 증가추세에 있는 신뢰성 보증 검사를 대상으로 실제 제품품질을 반영한 고장률 보증 검사방식에 대해서 연구하였다.

연구결과로서 제조품질 보증을 위한 선별형 검사방식의 최적해를 구하는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 Hald(1960-1)가 제시한 비용모델을 사용하였다. 최적해 도출을 위한 알고리즘은 Guenther(1985)가 제시한 알고리즘을 보다 빠른 탐색이 가능하도록 개선하였다. 또한 정확한 초기하분

포의 계산으로 이론의 적용을 보다 명확히 하였다. 본 프로그램을 사용하여 LTPD 및 OQ 보증방식에 대하여 베타분포를 사전분포로 하는 베이저안 샘플링 계획과 평균공정불량률을 사용하는 Non-베이저안 샘플링계획을 동시에 구할 수 있다. 비용요소의 민감도 분석결과는 합격로트의 불량품으로 인한 손실이 총비용의 변화에 가장 큰 영향을 줄 수 있었다. 따라서 불량품의 손실비용과 불량률이 샘플링 비용에도 큰 영향을 줄 수 확인 할 수 있다. 그러므로 불량률 감소 노력과 함께 적절한 판매 후 보증정책이 필요하다.

신뢰성 보증 샘플링 검사의 경제적 모델도 구축하였다. 따라서 환경시험 장비를 사용하는 전자제품의 신뢰성시험에서 제조업체의 시험비용 절감에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 또한 불량품이 존재하는 로트에 대한 신뢰성보증 샘플링 시험은 불량률의 증가에 따라 총시험시간이 증가함을 알 수 있었다.

로트의 품질 보증을 위한 비용과 신뢰성 보증 비용은 반비례 관계가 있다. 최종 출하 로트의 품질을 향상시키기 위해서는 LTPD 보증 검사방식 혹은 OQ 보증 검사방식을 사용한다. 따라서 검사 후 로트의 불량률을 낮추기 위하여는 비용이 증가하게 된다. 반대로 검사 후 로트의 불량률이 작을수록 LTRF 보증을 위한 신뢰성시험 비용은 감소되므로 소비자 보호측면에서 총비용을 최소로 하는 적절한 검사방식을 설정할 수 있다.

## 6. 향후 연구과제

본 연구의 주요논제인 평균샘플링 비용은

로트의 평균불량률에 따라 결정된다. 따라서 연구결과의 정확성은 실제 검사받는 로트의 불량률 예측의 방법에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 과거 로트의 공정 평균불량률과 베이지안 추론을 이용하였다. 그러나 실제 로트의 불량률의 변화(불량품수)에 대한 평균비용의 변화를 정량적으로 비교분석 하지 않고 있다. 따라서 향후 본 연구결과의 현실성을 높이기 위하여는 다양한 형태의 로트불량률의 변화에 따른 평균비용의 변화량을 비교하여 개선방안을 연구할 필요가 있다.

또한, 고장률 부분은 고장률이 일정한 상수인 지수분포를 가정하였는데, 이는 전자부품의 대표적인 신뢰성모형이기 때문이다. 그러나 지수분포 이외에도 와이블 분포 및 베타분포 등 다양한 모형에도 본 논문에서 제안한 신뢰성 샘플링 검사방식에 대한 개념을 적용한 연구가 계속적으로 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

- [1] 서순근(1996), “수명이 지수분포를 따를 때 정기검사 및 정시종결하에서 신뢰성 샘플링검사계획의 개발”, 한국경영과학회지, 제21권 제1호, pp.115-129.
- [2] 이창호(1982), “생산자 위험  $\alpha$ 와 소비자 위험  $\beta$ 를 고려한 수명시험계획과 비용 분석(I)”, 인하대학교 산업과학기술연구소 논문집 제10집, pp. 59-66.
- [3] 정현석 · 진위철 · 염봉진 (1994), “지수 수명분포에 대한 Bayesian 합격판정 샘플링 계획의 개발 및 비교에 관한 연구”, *Journal of the Korea Institute of Industrial Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 15-25.
- [4] 조재립 (1995), “선형비용모델을 이용한 계수선별형 검사방식의 최적설계”, 품질경영학회지, 제23권, 제4호, pp. 74-89.
- [5] 조재립 (2001), 「품질경영」, 청문각.
- [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. and Sobel, M.(1953), “Life Testing”, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 48, pp. 485-502.
- [8] Fairbanks, K.(1988), “A Two-Stage Life Test for the Exponential Parameter”, *Technometrics*, Vol. 30, pp. 175-180.
- [9] Guenther, W. C. (1970), “Procedure for Finding Double Sampling Plans for Attributes”, *Journal of Quality Technology*, Vol. 2, No. 4, pp.219-225.
- [10] Guenther, W. C.(1971), “On the determination of single sampling attribute plans based upon a linear cost model and a prior distribution”, *Technometrics*, Vol. 13, No. 3. pp. 483-498.
- [11] Guenther, W. C.(1977), *Sampling Inspection in Statistical Quality Control* (Griffin’s Statistical Monographs and Courses No. 37), Charles Griffin and Co., London, England.
- [12] Guenther, W. C.(1984), “Determination

- of Rectifying Inspection Plans Single by Attribute", *Journal of Quality Technology* Vol. 16, No. 2, pp. 56-63.
- [13] Guenther, W. C.(1985), "Rectifying Inspection for Nonconforming Items and the Hald Linear Cost Model", *Journal of Quality Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 81-85.
- [14] Hald, A.(1960-1), "Statistical Concepts and Models in the Theory of Sampling Inspection by Attributes", *Nordisk Tidsskrift for Industrial Statistik* 5, pp 144-168
- [15] Hald, A. (1960-2), "The Compound Hypergeometric Distribution and a System of Single Sampling Inspection Plans Based on Prior Distribution and Cost", *Technometrics*, Vol. 17, pp. 81-85.
- [16] Hald, A. (1965), "Bayesian Single Sampling Attribute Plans for Discrete Prior Distributions," *Mat. Fys. Skr. Dan. Vid. Selsk*, Vol. 3, pp 1-18.
- [17] Hald, A. (1981), *Statistical Theory of Sampling by Attributes*, Academic Press, New York.
- [18] Hall, J. E. (1979), "Minimum Variance and VOQL Sampling Plans", *Technometrics*, Vol. 21, pp. 555-565.
- [19] Hall, J. E. and Hassan, M. Z. (1981), "On the Cumulative Distribution of Outgoing Quality : A New Criterion for Sampling Plans", *Technometrics*, Vol. 23, pp. 395-400.
- [20] Mandelson, J. (1946), "Estimation of Optimum Sample Size in Destructive Testing by Attributes", *Industrial Quality Control*, Vol. 3, Nov., pp. 24-26.
- [21] Martin, C. A. (1964), "The Cost Breakeven Quality Point in Attribute Sampling", *Industrial Quality Control*, Vol. 21, pp. 137-144.
- [22] MIL-STD-690C (1993), *Failure Rate Sampling Plans and Procedures*. U.S. Department of Defense, Washington D.C.
- [23] Wallace, W. E.(1985), "Present Practice and Future Plans for MIL-STD-781", *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 32, pp. 21-26.