

대용특성을 이용한 선별형 스크리닝 절차의 설계

홍성훈[†]

전북대학교 산업정보시스템공학과

Design of Rectifying Screening Procedures Using a Surrogate Variable

Sung-Hoon Hong

Department of Industrial and Information Systems Engineering, Chonbuk National University,
Chonju, 561-756

When the nature of measuring a performance variable is destructive or very expensive, it is attractive to use a surrogate variable which is highly correlated with the performance variable and less expensive to measure. In this paper, we propose rectifying screening procedures using the performance and surrogate variables. Two screening procedures are considered; a statistically-based screening procedure to reduce the current proportion of nonconforming items to a specified lower value after screening, and an economically-based screening procedure where the screening limit is determined so that the expected cost is minimized. It is assumed that the surrogate variable given the performance variable is normally distributed with known mean and standard deviation. For two screening procedures, methods of finding the optimal solutions are presented and numerical examples are also given.

Keywords: performance variable, quality inspection, rectifying screening procedures, surrogate variable

1. 서론

오랜 역사와 높은 기술 수준을 자랑하던 굴지의 기업들도 한순간에 몰락하거나 구조조정 또는 인수합병 등을 통해 생존의 길을 모색하는 예를 우리는 종종 경험하고 있다. 이렇게 생존게임으로 표현되는 기업 간의 경쟁은 더욱 치열해지고 있으며, 이러한 현실에서는 지속적인 품질개선을 통한 강한 경쟁력 확보가 무엇보다 중요하다. 이에 따라 품질검사 분야에서 과거에 널리 활용되었던 샘플링 검사를 탈피해 출하되는 모든 제품의 품질을 검사하는 스크리닝 절차가 산업현장에서 널리 활용되는 추세에 있다. 즉, 무결점체제를 갖추어 제품의 품질 경쟁력 및 나아가 기업의 경쟁력을 확보하는 전략을 구사하고 있는 것이다.

스크리닝 절차는 다음의 두 가지 방법이 활용된다. 첫째는,

관심의 대상이 되는 주 품질특성(performance variable)을 직접 측정하는 것이고, 둘째는, 주 품질특성과 높은 상관관계를 갖는 대용특성(surrogate variable)을 측정하는 것이다. 주 품질특성에 기초한 스크리닝 절차의 경우 품질상태를 정확히 파악하여 제품의 출하 여부를 판정하므로, 항상 만족스런 제품을 고객에 공급할 수 있다는 장점이 있다. 특히 이러한 검사는 공정에서 이상요인 발생 시 빠르게 대처할 수 있는 품질 모니터링 시스템과 연계되므로 가장 바람직한 검사방법이라 할 수 있다. 이 분야의 연구는 Tang(1988a), Hui(1991), Duffuaa and Al-Najjar (1995), Hong and Elsayed(1998), Plante(2002), Kim and Cho (2003) 그리고 Govindaluri *et al.*(2004) 등에 의해 많은 연구가 진행되어 왔다.

한편 제품에 따라서는 주 품질특성을 측정하기 어려운 경우가 있다. 파괴검사를 요하는 제품이 그 대표적인 예이다. 또한

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의해 연구되었음(KRF-2004-041-D00778).

[†] 연락저자 : 홍성훈 교수, 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 전북대학교 산업정보시스템공학과 Fax : 063-270-2333

E-mail : shhong@chonbuk.ac.kr

2005년 12월 접수, 2006년 1월 수정본 접수, 2006년 2월 게재 확정.

품질특성을 측정하는 데 많은 비용이 드는 경우 주 품질특성을 활용한 품질검사는 도리어 비경제적일 수 있다. 이러한 경우 주 품질특성과 높은 상관관계를 갖고 검사비용이 상대적으로 저렴한 대응특성을 찾을 수만 있다면 대응특성을 활용한 스크리닝 검사를 실시할 수 있다. 오랜 시간을 필요로 하는 트랜지스터의 수명검사 대신 노이즈를 측정하거나 파괴검사를 요하는 용접강도 측정 대신 초음파검사를 하는 것 등이 대표적인 대응특성의 예이다. 특히 최근 들어 레이저, 초음파검사, 컴퓨터 비전, 패턴인식기법 등 다양한 비파괴검사 기술이 개발되어 대응특성을 활용한 검사기법의 산업계 보급에 큰 도움이 되고 있다. 주 품질특성 대신 대응특성을 측정하는 경우 검사비용은 줄일 수 있으나, 대응특성의 검사에 따른 오류가 발생할 수 있다. 즉 대응특성을 검사함으로써 양품을 불량처리(제 1종 오류)하거나, 불량품을 출하하는(제 2종 오류) 오류가 생길 수 있다. 따라서 대응특성을 측정하는 경우 제품의 합격·불합격의 판정기준이 되는 대응특성의 기각치를 구하는 것이 중요한 문제가 된다. 대응특성의 기각치를 구하기 위한 연구는 1970년대 중반 이후 최근까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 초기 연구는 모두 통계적인 관점을 고려하여 선별 후 양품의 비율을 일정 수준 이상으로 높이는 것이 주 연구대상이었다. 이 부류의 대표적인 논문으로는 Owen *et al.*(1975), Li and Owen(1979), Wong *et al.*(1985), Boys and Dunsmore(1987), Hong *et al.*(2001), 그리고 Hong(2005) 등이 있다. 한편 Tang(1987), Turkman and Turkman(1989), Bai *et al.*(1995), Drezner and Wesolowsky(1995), Hong *et al.*(1998), Lee *et al.*(2001), 그리고 Lee and Elsayed(2002) 등은 대응특성의 검사비용, 불량제품의 합격으로 인한 손실비용, 그리고 불합격되는 제품으로 인한 비용 등을 고려하여 경제적인 관점에서 대응특성의 기각치를 구하였다.

주 품질특성 또는 대응특성을 활용한 전수검사에 관한 기존의 연구들에서는 대부분 주 품질특성 또는 대응특성 중 단지 하나의 특성만 측정해 제품의 합격 여부를 판정하였다. 그런데 이 두 가지 품질특성을 활용한 검사절차는 각각 나름대로의 장·단점을 갖고 있다. 첫째, 주 품질특성을 측정하는 경우는 품질상태를 정확히 파악하여 고객에게 만족스런 제품만을 공급할 수 있다는 장점이 있다. 또한 공정에 이상요인 발생 시 빠르게 대처할 수 있다. 그러나 단위당 검사비용이 많이 드는 제품의 경우는 과도한 검사비 지출이 문제가 된다. 또한 자격을 갖춘 검사원의 확보, 과도한 검사량, 그리고 시간상의 어려움도 있을 수 있다. 한편 주 품질특성 대신 이와 높은 상관관계를 갖고, 또한 낮은 검사비용을 갖는 대응특성을 활용한다면 검사비용은 크게 줄일 수 있으나, 대응특성의 측정에 따른 검사오류가 생길 수 있다. 또한 공정에 이상요인 발생 시 이를 탐지하는 데 상당한 시간을 필요로 한다. 이러한 점에 착안해 주 품질특성 또는 대응특성을 상호보완적으로 활용해 각 검사방식의 단점을 보완하기 위한 연구들이 진행되어 왔는데 이 단계 스크리닝 절차가 그 대표적인 예이다. 이는 2회 샘플링 검

사의 개념을 스크리닝 절차에 도입한 것으로, 먼저 대응특성을 측정한 후 품질이 아주 좋거나 또는 아주 나쁘면 제품을 합격 또는 불합격 처리하고, 그렇지 않으면 이 단계로 주 품질특성을 추가로 측정해 제품의 합격/불합격 여부를 판정하는 방법이다. Tang(1988b)이 스크리닝 절차에 이 개념을 최초로 도입한 이후, Kim *et al.*(1994)은 제품 품질을 세 등급으로 구분하는 문제에, Bai and Kwon(1995) 그리고 Bai *et al.*(1995)은 불량품의 비율을 일정 수준 이하로 낮추면서 기대비용을 최소화하는 문제에, Lee and Kwon(1999)은 관리도의 경제적 설계에, 그리고 Lee *et al.*(2001)과 Lee and Elsayed(2002)는 최적공정 평균 설정 문제에 이 단계 스크리닝 절차의 개념을 적용하였다. <Table 1>은 이 단계 스크리닝 절차의 개념을 도입한 논문들을 표로 정리한 것이다. 한편 이와 같이 주 품질특성 및 대응특성을 상호 보완적으로 활용한 검사를 적용하기 위해서는 주 품질특성의 측정에 많은 비용이 들지만 파괴검사를 요하지 않고, 측정 가능해야 한다는 것이다. 또한 주 품질특성과 높은 상관성을 가지며 상대적으로 낮은 검사비용을 갖는 대응특성이 있어야 한다. 이러한 품질특성의 예로 Tang(1988b)과 Kim *et al.*(1994) 등에서 제시한 전자부품의 내부전압(주 품질특성) 및 외부전압(대응특성)의 관계, 그리고 Lee *et al.*(2001)과 Lee and Elsayed(2002)의 시멘트 백 중량(주 품질특성)과 로드-셀의 전류(대응특성)관계를 생각할 수 있다.

Table 1. Classifications of two-stage screening procedures

Basic model	Tang (1988b)
Three class screening	Kim <i>et al.</i> (1994)
Prescribed outgoing quality	Bai and Kwon (1995) Bai <i>et al.</i> (1995)
Control chart	Lee and Kwon (1999)
Optimum target value	Lee <i>et al.</i> (2001) Lee and Elsayed (2002)

이 논문에서는 위와 같은 특성을 갖는 제품에 대해 적용할 수 있는 새로운 개념의 스크리닝 절차를 제안하고자 한다. 선별형 샘플링 검사의 기본개념을 스크리닝 절차에 도입한 것으로, 검사절차의 기본개념은 검사결과에 따라 대응특성 및 주 품질특성을 선택적으로 측정하는 것이다. 선별형 샘플링 검사란 검사에서 합격한 로트는 그대로 출하하지만, 불합격 로트에 대해서는 불량품을 전수 선별하는 방법이다. 이를 통해 불만족스런 품질의 제품을 제공하는 공급자에게 품질검사에 대한 부담을 가중시켜, 스스로 품질향상을 꾀하도록 자극을 주기 위한 검사방식이다. 이 논문에서는 이 개념을 대응특성을 활용한 스크리닝 절차에 그대로 반영해 다음과 같은 검사절차를 제안한다. 먼저 출하되는 모든 제품에 대해 대응특성을 측정한다. 검사에서 합격한 제품은 그대로 출하하지만, 불합격한 제품에 대해서는 주 품질특성을 추가로 측정해 불량 제품

을 전수 선별하는 것이다. 즉, 좋은 품질의 제품을 제공하는 공급자에게는 품질검사 비용을 크게 절감해 주지만, 그렇지 못한 공급자에게는 품질개선을 유도함과 아울러 출하되는 제품의 품질을 보증하기 위한 검사절차이다. 이와 유사한 개념의 스크리닝 절차가 Hong *et al.*(2001)과 Hong(2005)에 의해 제안된 연속생산형 스크리닝 절차이다. 하지만 이 논문들의 경우 흐름생산 체계하에서 대용특성과 주 품질특성을 번갈아 측정함으로써 제품흐름의 지연을 유발할 수 있다는 지적을 받아왔다. 반면 이 논문에서 제안된 선별형 스크리닝 절차의 경우 대용특성의 검사에서 불합격된 제품들은 따로 모은 후, 별도로 주 품질특성을 측정할 수 있다. 따라서 대용특성 및 주 품질특성을 번갈아 측정함으로써 인해 생길 수 있는 제품흐름의 지연을 막을 수 있다는 장점을 갖는다.

이 논문에서는 선별형 스크리닝 절차설계 시 다음의 두 가지 기준을 고려하고자 한다. 첫째, 선별 후 불량제품의 비율을 일정 수준 이하로 낮추기 위한 통계적 관점에서의 설계 둘째, 검사에 수반되는 제반 비용요소, 즉 주 품질특성 및 대용특성의 품질검사비용 그리고 불량제품의 출하로 인한 손실비용으로 구성된 비용함수를 최소화하는 경제적 관점의 설계를 모두 고려할 것이다. 주 품질특성은 양품/불량품으로 구분 가능한 이치형 변수, 대용특성은 연속형 변수인 상황을 고려할 것이며, 주 품질특성 값이 주어진 경우 대용특성의 조건부 확률분포가 정규분포를 따른다는 가정하에 모형을 구성할 것이다.

2. 선별형 스크리닝 절차

검사대상이 되는 제품의 주 품질특성을 T 라 정의하자. 양품일 때 $T=0$, 불량품일 때 $T=1$ 을 취하는 계수형 확률변수이다. 이 논문의 기본가정은 주 품질특성의 측정은 큰 비용을 필요로 하지만, 파괴검사를 요하지 않고 측정 가능하다는 것이다. 또한 주 품질특성과 높은 상관관계를 갖고 상대적으로 낮은 검사비용을 갖는 대용특성이 존재하며 이를 X 라 정의하자. 대용특성을 활용한 검사에서는 주 품질특성과 대용특성의 관계를 올바르게 설정하는 것이 중요한데, 이 논문에서는 $T=i, i=0,1$ 일 때, X 의 조건부 확률분포는 평균 μ_i ($\mu_0 > \mu_1$), 분산 σ_i^2 인 정규분포를 따른다고 가정한다. 물론 $\mu_0 < \mu_1$ 인 경우도 동일한 방법에 의해 최적검사방식을 구할 수 있다. Boys and Dunsmore(1987), Bai *et al.*(1995), 그리고 Hong *et al.*(2001) 등 주 품질특성이 이치형 변수인 경우를 고려한 이 분야의 다른 연구 논문들도 동일한 가정을 한 바 있다.

이 논문에서 제안하는 검사절차는 다음과 같다.

- i) 출하하는 모든 제품의 대용특성 X 를 측정한다.
- ii) 대용특성 X 의 측정값이 $x \geq \omega$ 이면 제품이 합격, 그렇지 않은 제품들은 따로 모은 후 주 품질특성 T 를 추가로 측정한다.

- iii) 주 품질특성 T 의 측정결과 양품이면 합격, 그렇지 않으면 불합격 처리한다.

위의 검사절차는 공정이 안정상태일 경우 대용특성을 측정하여 검사비용을 줄이며, 공정에 이상요인이 있다는 판단이 서면 주 품질특성을 측정하여 불량품의 출하를 방지하고 공정의 이상요인을 빠르게 탐지할 수 있다는 장점을 갖는다. <Figure 1>은 이 검사절차를 나타낸 것으로, 이는 Dodge와 Romig에 의해 제안된 선별형 샘플링 검사의 개념을 대용특성을 활용한 스크리닝 절차에 도입한 것이다. 선별형 샘플링 검사에서는 불합격된 로트에 대해 모든 제품을 전수 선별하는데 반해, 이 논문에서 제안한 검사에서는 불합격 제품에 대해서는 주 품질특성을 측정해 양품불량품으로 전수 선별한다는 차이점을 갖는다. 물론 선별형 샘플링 검사에서의 결정변수는 샘플의 크기 n 과 합격판정개수 c , 두 가지이지만, 선별형 스크리닝 절차에서는 대용특성의 기각치 ω 가 결정변수이다. 이 논문에서는 대용특성의 기각치 ω 를 결정하기 위한 기준으로 통계적 관점과 경제적 관점을 고려할 것이며, 이들은 각각 3장과 4장에서 설명할 것이다.

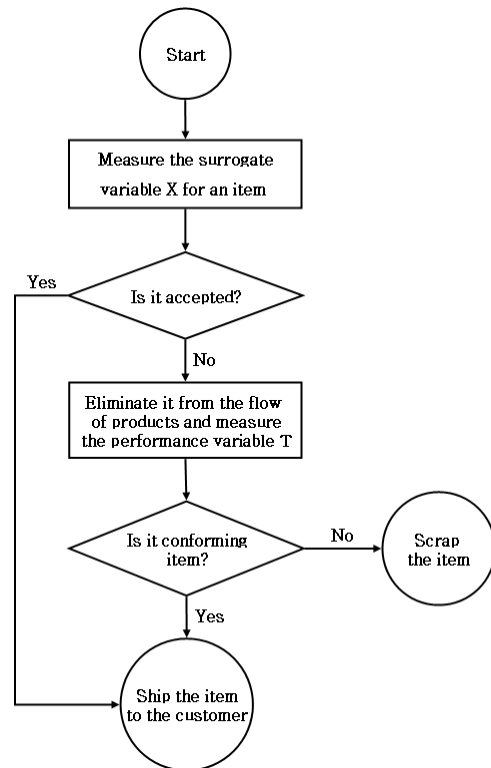


Figure 1. The operating procedure of a proposed screening inspection.

3. 통계적 관점의 설계: 선별 후 양품의 비율 보증

선별형 스크리닝 절차를 적용할 때, 전체 제품 중 검사에 합격

되어 출하되는 제품의 비율은

$$P(X \geq \omega) + P(X < \omega, T = 0) \quad (1)$$

이 된다. 선별 전 불량품의 비율을 $p = P(T = 1)$ 라 정의하면, 식 (1)에서 $P(X \geq \omega)$ 는

$$\begin{aligned} P(X \geq \omega) &= P(X \geq \omega, T = 0) + P(X \geq \omega, T = 1) \\ &= P(T = 0)P(X \geq \omega | T = 0) + P(T = 1)P(X \geq \omega | T = 1) \\ &= (1 - p)(1 - \gamma_0) + p(1 - \gamma_1) \end{aligned} \quad (2)$$

이 된다. 단 식 (2)에서 $\gamma_i = \Phi\left(\frac{\omega - \mu_i}{\sigma_i}\right)$, $i = 0, 1$ 그리고 $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수이다 동일한 방법으로 $P(X < \omega, T = 0)$ 는

$$\begin{aligned} P(X < \omega, T = 0) &= P(T = 0)P(X < \omega | T = 0) \\ &= (1 - p)\gamma_0 \end{aligned} \quad (3)$$

이 된다. 반면 전체 제품 중 검사에 합격되어 출하되는 불량품의 비율은

$$\begin{aligned} P(X \geq \omega, T = 1) &= P(T = 1)P(X \geq \omega | T = 1) \\ &= p(1 - \gamma_1) \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 이로부터 선별 후 불량품의 비율 p_a 는

$$\begin{aligned} p_a &= \frac{P(X \geq \omega, T = 1)}{P(X \geq \omega) + P(X < \omega, T = 0)} \\ &= \frac{p(1 - \gamma_1)}{(1 - p)(1 - \gamma_0) + p(1 - \gamma_1) + (1 - p)\gamma_0} \\ &= \frac{p(1 - \gamma_1)}{1 - p\gamma_1} \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. 식 (5)로부터 선별 전 불량품의 비율 p 를 선별 후 p_a ($< p$) 수준으로 낮추기 위한 최적 기각치 ω^* 는 다음과 같다.

$$\omega^* = \sigma_1 \Phi^{-1}\left(\frac{p - p_a}{p - p \cdot p_a}\right) + \mu_1 \quad (6)$$

단, 식 (6)에서 $\Phi^{-1}(\cdot)$ 는 누적표준정규분포의 역함수이다. <Table 2>는 선별 전후의 불량률 p 및 p_a 값에 따른 $\Phi^{-1}\left(\frac{p - p_a}{p - p \cdot p_a}\right)$ 값을 구한 것이다. 이 표를 활용한다면 별도의 복잡한 계산과정 없이 최적 기각치 ω^* 를 쉽게 구할 수 있다. <Table 2>에서 보는 바와 같이 선별 후 불량품의 비율을 낮추기 위해서는 $\Phi^{-1}\left(\frac{p - p_a}{p - p \cdot p_a}\right)$ 값이 커야 한다는 것을 알 수 있다.

선별형 스크리닝 절차에서의 평균 검사량은 다음과 같다. 먼저, 모든 제품에 대해 대응특성을 우선적으로 검사하기 때

문에 최적기각치 ω^* 의 선택에 따른 대응특성의 검사량에는 차이가 없다. 차이는 주 품질특성의 측정비율에 있게 되는데 주 품질특성의 측정비율은 대응특성의 기각치 ω 의 함수로 나타난다. 그 비율은

$$\begin{aligned} P(X < \omega) &= P(T = 0)P(X < \omega | T = 0) \\ &\quad + P(T = 1)P(X < \omega | T = 1) \\ &= (1 - p)\Phi\left(\frac{\omega - \mu_0}{\sigma_0}\right) + p\Phi\left(\frac{\omega - \mu_1}{\sigma_1}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다.

예제 1) 자동차의 연료주입장치에 쓰이는 부품인 노즐의 주 품질특성 중 하나는 노즐이 연료를 올바르게 분사시켜주는지의 여부이다. 이 기능의 검사를 위해서는 노즐을 통해 실험용 기름을 분사한 후, 분사되는 연료의 형태를 관찰함으로써 노즐의 작동상태를 알 수 있다. 그러나 이 검사는 상당한 시간과 비용을 필요로 한다. 따라서 연료주입장치 작동 시 노즐의 바늘 부분이 몸체부분 위로 나오는 순간, 새어나오는 공기의 유동량을 대응특성으로 활용하여 노즐의 품질을 검사할 수 있다. 과거의 검사기록들을 토대로 분석한 결과 노즐이 정상적으로 작동할 때 공기의 유동량은 분당 평균 15.0리터이고, 표준편차는 3.0리터인 정규분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 또한 노즐이 불량일 때의 유동량은 평균 10.0리터, 표준편차 3.0리터인 정규분포를 따른다. 특히 최근 한 달 동안의 품질검사 결과를 보면 프로세스는 안정상태를 유지하고 있으며, 공정불량률은 1.2%인 것으로 파악하고 있다.

품질관리 부서에서는 선별 후 불량제품의 비율을 0.5% 이내로 유지하기 위한 선별형 스크리닝 절차를 적용하고자 한다. 이를 위해 <Table 2>로부터 $p = 1.2\%$ 와 $p_a = 0.5\%$ 에 해당하는 $\Phi^{-1}\left(\frac{p - p_a}{p - p \cdot p_a}\right)$ 를 구하면 0.218이 되고, 이로부터 대응특성의 최적기각치 $\omega^* = 3.0 \cdot 0.218 + 10.0 = 10.654$ 를 얻을 수 있다. 이러한 선별형 스크리닝 절차를 적용할 경우, 전체 제품 중 주 품질특성을 측정하는 제품의 비율은 7.99%가 된다. <Figure 2>는 선별 전 불량품의 비율에 따른 최적기각치 ω^* 와 주 품질특성의 측정비율을 나타낸 것으로, 선별 전 불량품의 비율이 높아질수록 최적기각치 및 주 품질특성의 측정비율 모두 증가함을 알 수 있다.

4. 경제적 관점의 설계: 기대비용 최소화

주 품질특성을 활용한 검사에서는 불량제품이 합격될 수 없으나, 대응특성을 활용한 검사에서는 합격된 제품 속에 불량품이 포함될 수 있다. 물론 불량제품이 고객에게 판매되면 불량제품의 회수 및 교체비용뿐 아니라 그 기업에 대한 신뢰도가

Table 2. The value of $\Phi^{-1}\left(\frac{p-p_a}{p-p \cdot p_a}\right)$ for different combinations of (p, p_a)

		p_a (%)														
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
p (%)	0.2	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.3	0.433	-0.429	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.4	0.677	0.003	-0.672	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.5	0.844	0.256	-0.250	-0.839	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.6	0.971	0.434	0.004	-0.427	-0.964	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.7	1.071	0.570	0.184	-0.176	-0.562	-1.064	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.8	1.155	0.679	0.324	0.005	-0.314	-0.670	-1.146	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.9	1.255	0.770	0.436	0.145	-0.134	-0.425	-0.759	-1.216	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	1.287	0.847	0.530	0.260	0.006	-0.247	-0.518	-0.836	-1.276	-	-	-	-	-	-
	1.1	1.341	0.915	0.611	0.356	0.121	-0.107	-0.342	-0.598	-0.902	-1.330	-	-	-	-	-
	1.2	1.389	0.974	0.682	0.438	0.218	0.008	-0.203	-0.423	-0.667	-0.961	-1.377	-	-	-	-
	1.3	1.433	1.027	0.744	0.510	0.301	0.105	-0.088	-0.285	-0.494	-0.729	-1.013	-1.420	-	-	-
	1.4	1.472	1.075	0.800	0.574	0.375	0.189	0.009	-0.171	-0.357	-0.557	-0.783	-1.160	-1.458	-	-
	1.5	1.508	1.119	0.850	0.632	0.440	0.263	0.093	-0.074	-0.244	-0.421	-0.614	-0.833	-1.103	-1.494	-
	1.6	1.542	1.159	0.896	0.684	0.499	0.329	0.167	0.010	-0.147	-0.309	-0.479	-0.665	-0.878	-1.142	-1.526
	1.7	1.573	1.196	0.939	0.732	0.552	0.388	0.234	0.085	-0.063	-0.212	-0.367	-0.531	-0.711	-0.919	-1.178
	1.8	1.602	1.230	0.978	0.755	0.600	0.442	0.293	0.151	0.011	-0.128	-0.271	-0.420	-0.579	-0.754	-0.957
	1.9	1.629	1.262	1.014	0.816	0.645	0.491	0.348	0.211	0.078	-0.054	-0.187	-0.324	-0.468	-0.622	-0.794
	2.0	1.654	1.292	1.047	0.853	0.686	0.537	0.398	0.266	0.138	0.013	-0.113	-0.241	-0.373	-0.512	-0.663
	2.1	1.678	1.320	1.079	0.888	0.725	0.579	0.444	0.316	0.193	0.073	-0.046	-0.167	-0.290	-0.418	-0.553
	2.2	1.701	1.346	1.109	0.921	0.761	0.618	0.486	0.362	0.244	0.128	0.014	-0.100	-0.216	-0.335	-0.459
	2.3	1.722	1.371	1.137	0.952	0.794	0.654	0.526	0.405	0.290	0.179	0.069	-0.040	-0.150	-0.261	-0.377
	2.4	1.743	1.395	1.163	0.981	0.826	0.689	0.563	0.446	0.334	0.226	0.120	0.015	-0.089	-0.195	-0.304
	2.5	1.762	1.418	1.188	1.008	0.856	0.721	0.598	0.483	0.374	0.274	0.167	0.066	-0.034	-0.135	-0.238
	2.6	1.780	1.439	1.212	1.035	0.884	0.752	0.631	0.518	0.412	0.310	0.210	0.113	0.017	-0.080	-0.178
	2.7	1.798	1.459	1.235	1.059	0.911	0.781	0.662	0.552	0.447	0.348	0.251	0.157	0.064	-0.029	-0.123
	2.8	1.815	1.479	1.257	1.083	0.937	0.808	0.691	0.583	0.481	0.384	0.289	0.198	0.107	0.018	-0.072
	2.9	1.831	1.498	1.277	1.106	0.961	0.834	0.719	0.613	0.513	0.417	0.325	0.236	0.148	0.062	-0.025
	3.0	1.847	1.516	1.297	1.127	0.984	0.859	0.746	0.641	0.543	0.449	0.359	0.272	0.187	0.103	0.019

Table 2. The value of $\Phi^{-1}\left(\frac{p-p_a}{p-p \cdot p_a}\right)$ for different combinations of (p, p_a)

(Continued)

		p_a (%)													
		1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
p (%)	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.7	-1.577	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.8	-1.211	-1.585	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.9	-0.993	-1.242	-1.611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.0	-0.830	-1.025	-1.271	-1.636	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.1	-0.700	-0.864	-1.056	-1.298	-1.659	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.2	-0.591	-0.735	-0.896	-1.085	-1.324	-1.681	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.3	-0.498	-0.627	-0.768	-0.926	-1.112	-1.348	-1.701	-	-	-	-	-	-	-
	2.4	-0.416	-0.534	-0.660	-0.798	-0.954	-1.137	-1.371	-1.721	-	-	-	-	-	-
	2.5	-0.343	-0.452	-0.568	-0.691	-0.827	-0.980	-1.162	-1.393	-1.739	-	-	-	-	-
	2.6	-0.277	-0.380	-0.486	-0.599	-0.721	-0.854	-1.006	-1.185	-1.413	-1.757	-	-	-	-
	2.7	-0.217	-0.314	-0.414	-0.519	-0.629	-0.749	-0.880	-1.029	-1.206	-1.433	-1.774	-	-	-
	2.8	-0.162	-0.254	-0.349	-0.446	-0.549	-0.658	-0.775	-0.905	-1.052	-1.227	-1.451	-1.790	-	-
	2.9	-0.112	-0.199	-0.289	-0.381	-0.477	-0.578	-0.685	-0.800	-0.928	-1.074	-1.274	-1.469	-1.806	-
	3.0	-0.065	-0.149	-0.234	-0.322	-0.412	-0.506	-0.605	-0.710	-0.824	-0.950	-1.094	-1.266	-1.486	-1.821

떨어지는 등 커다란 손실비용이 발생하게 된다. 또한 불합격된 제품도 그로 인해 비용이 발생하게 되는데, 품질검사에서 고려할 수 있는 비용항목은 다음과 같다.

- 가) 주 품질특성 및 대용특성의 검사비용
- 나) 양품이 검사에서 불합격됨으로 인한 손실비용(제 1종 오류 손실비용)
- 다) 합격된 제품 속에 포함된 불량품으로 인한 손실비용(제 2종 오류 손실비용)

스크리닝 절차의 경제적 설계와 관련된 기존의 연구들은 대체로 위의 세 가지 비용항목들을 고려해 모형을 구성하고 있다. 하지만 이 논문에서 제안한 선별형 스크리닝 절차에서는 불합격된 제품들은 주 품질특성으로 전수 선별하기 때문에 제 1종 오류로 인한 손실비용은 발생하지 않게 된다. 따라서 이 모형에서는 두 번째 비용항목은 고려할 필요가 없다. 모형 구성을 위해 먼저 불량품의 합격으로 인한 손실비용을 a 라 정의하자. 그러면 단위 제품당 기대손실비용은

$$a \cdot P(X \geq \omega, T=1) = a \cdot P(T=1) \cdot P(X \geq \omega | T=1) = ap \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\omega - \mu_1}{\sigma_1}\right) \right\} \quad (8)$$

이 된다. 한편, 주 품질특성 및 대용특성의 검사비용을 각각 c_p, c_s 라 정의하면 단위 제품당 기대검사비용은

$$c_s + c_p \cdot P(X < \omega) = c_s + c_p(1-p)\Phi\left(\frac{\omega - \mu_0}{\sigma_0}\right) + c_p p \Phi\left(\frac{\omega - \mu_1}{\sigma_1}\right) \quad (9)$$

이다. 이로부터 단위 제품당 총 기대비용함수 ETC 는

$$ETC = ap + c_s + c_p(1-p)\Phi\left(\frac{\omega - \mu_0}{\sigma_0}\right) - p(a - c_p)\Phi\left(\frac{\omega - \mu_1}{\sigma_1}\right) \quad (10)$$

이 된다.

식 (10)을 최소화하는 ω^* 값을 구하기 위해 ETC 를 ω 에 대해 1차 편미분하면 다음 식을 얻을 수 있다; 식의 유도는 부록 1 참조.

$$\frac{\partial ETC}{\partial \omega} = \frac{c_p(1-p)}{\sigma_0} \cdot \Phi\left(\frac{\omega - \mu_0}{\sigma_0}\right) \left[1 - \exp\left\{ \frac{1}{2\sigma_0^2\sigma_1^2} (A\omega^2 + 2B\omega + C) \right\} \right] \quad (11)$$

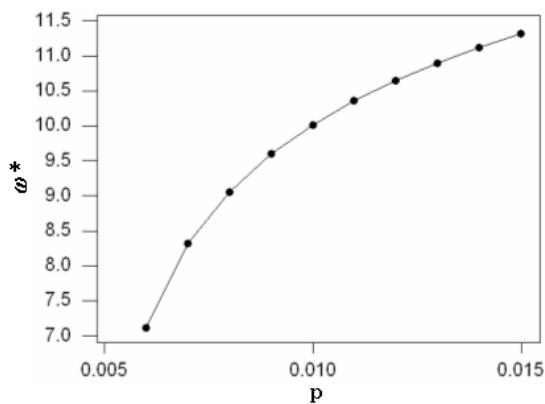
단, 식 (11)에서 $A = \sigma_1^2 - \sigma_0^2$, $B = \sigma_0^2\mu_1 - \sigma_1^2\mu_0$, 그리고 $C = \sigma_1^2\mu_0^2 - \sigma_0^2\mu_1^2 + 2\sigma_0^2\sigma_1^2 \ln\left\{ \frac{p(a - c_p)}{c_p(1-p)} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \right\}$ 이다.

만일 $\sigma_0^2 = \sigma_1^2 = \sigma^2$ 이라면 기대이익함수 ETC 는 단봉함수이며, $\frac{\partial ETC}{\partial \omega} = 0$ 를 만족하는 ω^* 는

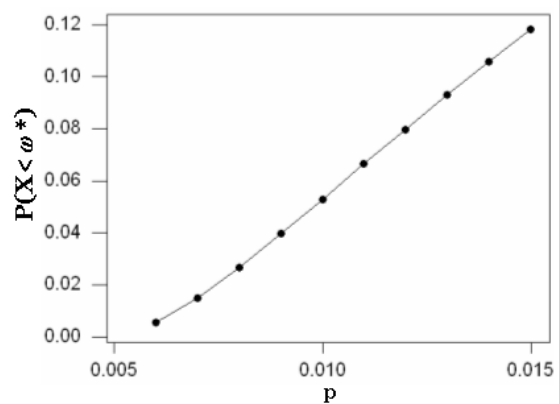
$$\omega^* = \frac{\mu_0 + \mu_1}{2} + \sigma^2 \ln\left\{ \frac{p(a - c_p)}{c_p(1-p)} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \right\} / (\mu_0 - \mu_1) \quad (12)$$

임을 쉽게 보일 수 있다. 만일 $\sigma_0^2 \neq \sigma_1^2$ 이라면 식 (12)로부터 $\frac{\partial ETC}{\partial \omega} = 0$ 를 만족하는 ω 는 $A\omega^2 + 2B\omega + C = 0$ 의 관계식을 만족해야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 판별식 $B^2 - AC > 0$ 의 조건을 만족한다면 식 $\frac{\partial ETC}{\partial \omega} = 0$ 는 서로 다른 두 개의 해 $\omega = (-B \pm \sqrt{B^2 - AC})/A$ 를 갖게 되며, $\omega = (-B - \sqrt{B^2 - AC})/A$ 일 때, $\frac{\partial^2 ETC}{\partial \omega^2} > 0$, 그리고 $\omega = (-B + \sqrt{B^2 - AC})/A$ 일 때, $\frac{\partial^2 ETC}{\partial \omega^2} < 0$ 이 된다. 증명은 부록 2 참조. 따라서 기대이익함수를 최소화하는 $\omega^* = (-B - \sqrt{B^2 - AC})/A$ 이 됨을 알 수 있다.

한편 판별식 $B^2 - AC \leq 0$ 인 경우, 만일 $\sigma_0^2 < \sigma_1^2$ 이면



a) ω^*



b) $P(X < \omega^*)$

Figure 2. The values of ω^* and $P(X < \omega^*)$ as a function of p .

$\frac{\partial ETC}{\partial \omega} \leq 0$, 만일 $\sigma_0^2 > \sigma_1^2$ 이면 $\frac{\partial ETC}{\partial \omega} \geq 0$ 이다. 이 경우 최적 기각치 ω^* 는 각각 ∞ 와 $-\infty$ 의 값을 갖게 되는데, 이는 대응특성을 검사할 필요 없이 모든 제품을 불합격 또는 모든 제품 합격의 판정을 내리는 것이다. 이 때의 기대비용은 각각 c_b 와 a_p 가 된다. 이상의 결과를 요약하면 최적해는 다음과 같이 된다.

$$\omega^* = \begin{cases} \frac{\mu_0 + \mu_1}{2} + \sigma^2 \ln \left\{ \frac{p(a - c_p)}{c_p(1 - p)} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \right\} / (\mu_0 - \mu_1), & \sigma_0^2 = \sigma_1^2 \text{ 일 때} \\ \frac{-B - \sqrt{B^2 - AC}}{A}, & \sigma_0^2 \neq \sigma_1^2 \text{ 이고 } B^2 - AC > 0 \text{ 일 때,} \\ \infty, & \sigma_0^2 < \sigma_1^2 \text{ 이고 } B^2 - AC < 0 \text{ 일 때,} \\ -\infty, & \sigma_0^2 > \sigma_1^2 \text{ 이고 } B^2 - AC < 0 \text{ 일 때} \end{cases} \quad (13)$$

예제 2) 경제적 관점의 스크리닝 절차를 설명하기 위해 예제 1에서 사용한 자동차 연료주입장치의 노즐 문제를 여기에서도 활용한다. 즉, $\mu_0 = 15.0$, $\mu_1 = 10.0$, $\sigma_0 = \sigma_1 = 3.0$, 그리고 선별 전 불량품의 비율은 $p = 0.012$ 이다. 또한 대응특성의 품질검사비용 $c_s = 7$ (단위: 백원), 주 품질특성의 검사비용 $c_p = 25$, 그리고 품질손실비용 $a = 1200$ 으로 알려져 있다. 이러한 수치를 활용해 최적기각치를 구한 결과 $\omega^* = 11.491$, 그리고 이 때의 기대비용은 14.656을 얻을 수 있었다.

대응특성 및 주 품질특성의 검사비용은 정확히 추정할 수 있으나, 불량제품의 판매로 인한 손실비용은 오류의 가능성을 항상 갖고 있다. 따라서 이 모형이 이러한 비용항목의 추정값에 어느 정도 민감하게 반응하는지를 알기 위하여, <Table 3>에 비용항목의 잘못된 추정에 따른 기대비용의 증가율을 정리하였다. <Table 3>에서 기대비용 증가율(PL; percentage loss)은 다음 식으로 계산한 것이다.

$$PL = \frac{ETC' - ETC^*}{ETC^*} \times 100(\%) \quad (14)$$

단, 식 (14)에서 ETC^* 는 올바른 비용항목 추정값을 사용했을 때의 기대비용이고, ETC' 는 잘못된 비용항목 추정값을 사용하였을 때의 기대비용이다. <Table 3>에서 보는 바와 같이 비용항목을 $\pm 10\%$ 또는 $\pm 20\%$ 잘못 추정하더라도, 기대비용 증가율은 1%를 초과하지 않음을 알 수 있었으며, 따라서 본 모형이 비용항목에 대해 민감하지 않음을 알 수 있었다.

Table 3. Optimum screening limit and percentage losses obtained by using improper cost parameters

a	ω^*	PL (%)
960	11.080	0.51
1080	11.297	0.12
1320	11.666	0.10
1440	11.825	0.35

<Figure 3>는 선별 전 불량품의 비율 p 의 변화에 따른 최적 기각치 ω^* 의 변화를 나타낸 것으로 p 값이 증가함에 따라 ω^* 도 완만히 증가함을 알 수 있다.

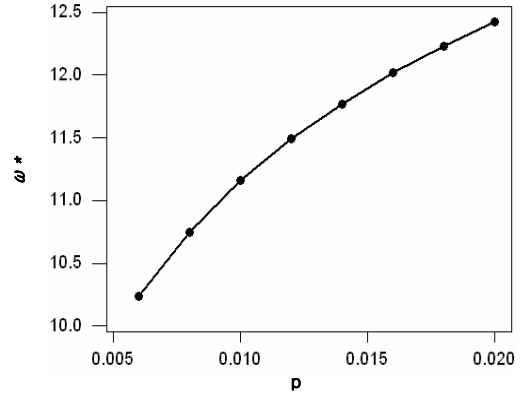


Figure 3. Optimum screening limits as a function of p .

이 논문에서 제안한 선별형 스크리닝 절차는 선별형 샘플링 검사와 같은 개념으로 만족스럽지 못한 품질의 제품을 제공하는 공급자에게 품질검사를 철저하게 하기 위해 활용 가능한 품질검사방식이다. 따라서 비용적인 측면만이 품질검사방식 선택의 고려대상은 아니지만, 분석을 위해 주 품질특성의 활용 없이 대응특성만을 활용하는 고전적인 스크리닝 절차와 비용비교를 해 보았다. 이를 위해 대응특성만을 활용할 경우의 기대이익함수를 구하면

$$ETC = c_s + aP(X \geq \omega, T = 1) + c_rP(X < \omega, T = 0) \quad (15)$$

가 된다. 식 (15)에서 c_r 은 양품을 불합격시킴으로써 발생하는 손실비용이다. 비용의 비교를 위해 선별형 스크리닝 절차의 기대비용을 ETC_1 대응특성만을 활용한 스크리닝 절차의 기대비용을 ETC_2 라 정의하면,

$$ETC_1 - ETC_2 = c_pP(X < \omega) - c_rP(X < \omega, T = 0) \quad (16)$$

이 된다. 수식에서도 알 수 있는 바와 같이, 양품을 불합격시킴

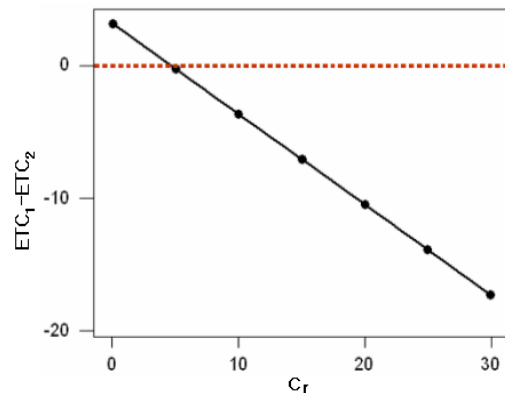


Figure 4. Cost differences as a function of c_r .

으로써 파생된 손실비용이 커질수록 본 모형의 기대비용이 상대적으로 작아짐을 알 수 있다. <Figure 4>는 본 논문의 예제와 동일한 수치를 사용한 후, c_p 값만 변화시킴에 따른 두 비용의 차이를 그림으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이 예제의 경우 $c_p > 5$ 이라면, 이 논문에서 제안한 선별형 스크리닝 절차가 비용 면에서도 유리하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

이 논문에서는 주 품질특성 및 대응특성을 선택적으로 활용하는 선별형 스크리닝 절차를 제안하였다. 이는 선별형 샘플링 검사의 기본개념을 스크리닝 절차에 도입한 것으로, 검사에서 불합격한 제품에 대해서는 주 품질특성을 추가로 검사하는 것이다.

즉, 나쁜 품질의 제품을 제공하는 공급자에게는 품질검사를 까다롭게 하여, 공급자로 하여금 스스로 품질개선에 대한 필요성을 갖도록 유도하는 방식이라 할 수 있다. 대응특성의 측정결과를 활용한 연구가 최근 들어 품질 모니터링 절차 관리도, 연속생산형 스크리닝 절차 등으로 확대되고 있고, 또한 기업현장에서 스크리닝 절차를 널리 활용하고 있다는 점을 감안하면, 이 논문에서 제안한 선별형 스크리닝 절차 역시 현장활용 가능성은 충분히 높다고 할 수 있을 것이다.

이 논문에서는 주 품질특성은 양품불량품으로 구분 가능한 이치형 변수, 대응특성은 연속형 변수인 경우를 고려하였다. 특히 주 품질특성 값이 주어진 경우 대응특성의 조건부 확률 분포가 정규분포를 따른다는 가정을 하였다. 선별 후 양품의 비율을 일정 수준 이상으로 유지하기 위한 통계적 관점의 스크리닝 절차와, 검사에 수반된 제반 비용요소를 고려한 경제적 관점의 스크리닝 절차를 구하였다. 통계적 관점의 설계에서는 선별 전 불량률과 선별 후 불량률 값에 따라 최적검사를 찾을 수 있도록 표를 작성하였으며, 이의 활용을 통해 기업현장에서 쉽게 활용할 수 있도록 하였다. 경제적 관점의 설계에서는 비용항목의 잘못된 추정에 따른 모형의 민감도분석을 하였다.

분석결과 비용항목을 $\pm 15\%$ 정도 잘못 추정하더라도 모형은 크게 민감하지 않다는 결론을 얻을 수 있었다. 최적기각치를 구하는 과정에서는 MATLAB을 활용하였으며, 펜티엄 PC에서 최적해를 구하는 데, 모든 경우 수초 이내의 짧은 시간이 소요되었다.

이 논문에서는 분포와 관련된 모수들인 (μ_i, σ_i) , $i=0, 1$ 을 모두 알고 있다는 가정하에 모형을 구성하였다. 추후 연구 과제로는 위의 모수들을 모르는 상황에서 모형을 구성할 수 있을 것이다. 또한 주 품질특성과 대응특성이 모두 연속형 변수인 문제로 모형을 확장 가능하다고 생각되며, 이 경우 기존 연구자들이 일반적으로 가정한 이 변량 정규모형을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

부록

부록 1: $\frac{\partial ETC}{\partial \omega}$ 식의 유도

$$\begin{aligned} \frac{\partial ETC}{\partial \omega} &= \frac{c_p(1-p)}{\sigma_0} \cdot \Phi\left(\frac{\omega-\mu_0}{\sigma_0}\right) \\ &\quad - \frac{p(a-c_p)}{\sigma_1} \cdot \Phi\left(\frac{\omega-\mu_1}{\sigma_1}\right) \\ &= \frac{c_p(1-p)}{\sigma_0} \cdot \Phi\left(\frac{\omega-\mu_0}{\sigma_0}\right) \\ &\quad \left[1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \cdot \frac{p(a-c_p)}{c_p(1-p)} \cdot \Phi\left(\frac{\omega-\mu_1}{\sigma_1}\right) / \Phi\left(\frac{\omega-\mu_0}{\sigma_0}\right)\right] \\ &= \frac{c_p(1-p)}{\sigma_0} \Phi\left(\frac{\omega-\mu_0}{\sigma_0}\right) \\ &\quad \left[1 - \exp\left\{-\frac{(\omega-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(\omega-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2} + \ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_1} \cdot \frac{p(a-c_p)}{c_p(1-p)}\right)\right\}\right] \\ &= \frac{c_p(1-p)}{\sigma_0} \cdot \Phi\left(\frac{\omega-\mu_0}{\sigma_0}\right) \\ &\quad \left[1 - \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_0^2\sigma_1^2}(A\omega^2 + 2B\omega + C)\right\}\right] \quad (A1) \end{aligned}$$

부록 2: $\omega = (-B \pm \sqrt{B^2 - AC})/A$ 값에서 $\frac{\partial^2 ETC}{\partial \omega^2}$ 값 계산.

$\frac{\partial ETC}{\partial \omega} = 0$ 를 만족하는 ω 값에서 $\frac{\partial^2 ETC}{\partial \omega^2}$ 식을 유도하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 ETC}{\partial \omega^2} &= \frac{c_p(1-p)}{\sigma_0} \cdot \Phi\left(\frac{\omega-\mu_0}{\sigma_0}\right) \left(-\frac{\omega-\mu_0}{\sigma_0^2}\right) \\ &\quad - \frac{p(a-c_p)}{\sigma_1} \cdot \Phi\left(\frac{\omega-\mu_1}{\sigma_1}\right) \left(-\frac{\omega-\mu_1}{\sigma_1^2}\right) \\ &= \frac{p(a-c_p)}{\sigma_1} \Phi\left(\frac{\omega-\mu_1}{\sigma_1}\right) \left(-\frac{\omega-\mu_0}{\sigma_0^2}\right) \\ &\quad + \frac{p(a-c_p)}{\sigma_1} \Phi\left(\frac{\omega-\mu_1}{\sigma_1}\right) \left(-\frac{\omega-\mu_1}{\sigma_1^2}\right) \\ &= \frac{1}{\sigma_0^2\sigma_1^3} p(a-c_p) \Phi\left(\frac{\omega-\mu_1}{\sigma_1}\right) (-A\omega - B) \quad (A2) \end{aligned}$$

일반적으로 $a > c_p$ 이므로, 식 (A2)의 부호는 마지막 항인 $-A\omega - B$ 에 의해 결정된다. $\omega = (-B - \sqrt{B^2 - AC})/A$ 이라면, 이 값은 $\sqrt{B^2 - AC}$ 가 되며, 반대로 $\omega = (-B + \sqrt{B^2 - AC})/A$ 이면 $-\sqrt{B^2 - AC}$ 가 된다.

참고문헌

Bai, D.S., Kwon, H.M., and Lee, M.K. (1995), An Economic Two-Stage Screening Procedure with a Prescribed Outgoing Quality in Logistic and Normal Models, *Naval Research*

- Logistics*, **42**, 1081-1097.
- Bai, D.S. and Kwon, H.M. (1995), Economic Design of a Two-Stage Screening Procedure with a Prescribed Outgoing Quality, *Metrika*, **42**, 1-18.
- Boys, R.J. and Dunsmore, I.R. (1987), Diagnostic and Sampling Models in Screening, *Biometrika* **74**, 356-374.
- Drezner, Z. and Wesolowsky, G.O. (1995), Multivariate Screening Procedures for Quality Cost Minimization, *IIE Transactions*, **27**, 300-304.
- Duffuaa, S.O. and Al-Najjar, H.J. (1995), An Optimal Complete Inspection Plan for Critical Multicharacteristic Components, *Journal of Operational Research Society*, **46**, 930-942.
- Govindaluri, M.S., Shin, S., and Cho, B.R. (2004), Tolerance optimization Using the Lambert W Function: An Empirical Approach, *International Journal of Production Research*, **42**, 3235-3251.
- Hong, S.H. (2005), Design of a Continuous Screening Procedure in the Bivariate Normal Model, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **31**, 99-105.
- Hong, S.H. and Elsayed, E.A. (1998), Economic Complete Inspections with Multi-Decision Alternatives, *International Journal of Production Research*, **36**, 3367-3378.
- Hong, S.H., Kim, S.B., Kwon, H.M., and Lee, M.K. (1998), Economic Design of Screening Procedures When the Rejected Items Are Reprocessed, *European Journal of Operational Research*, **108**, 65-73.
- Hong, S.H., Lee, M.K., Kwon, H.M., and Kim, S.B. (2001), A Continuous Screening Procedure Using the Performance and Surrogate Variables, *International Journal of Production Research*, **39**, 2333-2340.
- Hui, Y.V. (1991), Economic Design of a Complete Inspection Plan with Feedback Control, *International Journal of Production Research*, **29**, 2151-2158.
- Kim, C.T., Tang, K., and Peters, M. (1994), Design of a Two-Stage Procedure for Three-Class Screening, *European Journal of Operational Research*, **79**, 431-442.
- Kim, Y.J. and Cho, B.R. (2003), Determining the Optimum Process Mean for a Skewed Process, *International Journal of Industrial Engineering*, **10**, 555-561.
- Lee, J.H. and Kwon, W.J. (1999), Economic Design of a Two-Stage Control Chart based on Both Performance and Surrogate Variables, *Naval Research Logistics*, **46**, 958-977.
- Lee, M.K., Hong, S.H., and Elsayed, E.A. (2001), The Optimum Target Value under Single and Two-Stage Screenings, *Journal of Quality Technology*, **33**, 506-514.
- Lee, M.K. and Elsayed, E.A. (2002), Process Mean and Screening Limits for Filling Processes under Two-Stage Screening Procedure, *European Journal Of Operational Research*, **138**, 118-126.
- Li, L. and Owen, D.B. (1979), Two-Sided Screening Procedures in the Bivariate Case, *Technometrics*, **21**, 79-85.
- Owen, D.B., McIntire, D., and Seymour, E. (1975), Tables Using One or Two Screening Variables to Increase Acceptable Product Under One-Sided Specifications, *Journal of Quality Technology*, **7**, 127-138.
- Plante, R. (2002), Multivariate Tolerance Design for a Quadratic Design Parameter Model, *IIE Transactions*, **34**, 565-571.
- Tang, K. (1987), Economic Design of a One-Sided Screening Procedure Using a Correlated Variable, *Technometrics*, **29**, 477-485.
- Tang, K. (1988a), Economic Design of Product Specifications for a Complete Inspection Plan, *International Journal of Production Research*, **26**, 203-217.
- Tang, K. (1988b), Design of a Two-Stage Screening Procedure Using Correlated Variables: A Loss Function Approach, *Naval Research Logistics*, **35**, 513-533.
- Turkman, K.F. and Turkman, M.A.A. (1989), Optimal Screening Methods, *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, **51**, 287-295.
- Wong, A., Meeker, J.B., and Selwyn, M.R. (1985), Screening on Correlated Variables: A Bayesian Approach, *Technometrics*, **27**, 423-431.