

이변량 정규분포 하에서 선별형 스크리닝 검사의 설계

홍성훈^{*}·최익준^{*}·이운동^{**}·이민구^{***}·권혁무^{****}

- * 전북대학교 산업정보시스템공학과
- ** 건국대학교 응용통계학과
- *** 충남대학교 정보통계학과
- **** 부경대학교 시스템경영공학과

Design of Rectifying Screening Inspections under a Bivariate Normal Distribution

Sung Hoon Hong^{*}·Ik Jun Choi^{*}·Yoon Dong Lee^{**}·Min Koo Lee^{***}
Hyuck Moo Kwon^{****}

- * Department of Industrial & Information Systems Engineering, Chonbuk National University
- ** Applied Statistics, Konkuk University
- *** Department of Information and Statistics, Chungnam National University
- **** Department of Systems and Management Engineering, Pukyong National University

Key words : Quality Inspection, Performance Variable, Rectifying Screening Inspections, Surrogate Variable

Abstract

Owing to the rapid growth in automated manufacturing systems, screening inspection becomes an attractive practice for removing nonconforming items, and it has been suggested that inspection will essentially become an inherent part of modern manufacturing processes. In this paper, we propose rectifying screening inspections which allow quality practitioners to use performance and surrogate variables interchangeably in real-time applications. Two screening inspections are considered; a statistically-based screening inspection to reduce the current proportion of nonconforming items to a specified AOQ (average outgoing quality) after screening, and an economically-based screening inspection where the tolerance limit is determined so that the expected total cost is minimized. It is assumed that the performance variable and the surrogate variable are jointly normally distributed. For two screening inspections, methods of finding the optimal solutions are presented and numerical examples are also given.

1. 서 론

생산 공정의 자동화와 더불어 품질검사에 있어서도 자동화된 검사기계들이 활용되고 있다. 예를 들어 전자산업에서는 레이저, X-레이, 컴퓨터비전, 패턴 인식기법 등을 활용한 다양한 검사시스템들이 많이

개발되어 있다. 이러한 시스템의 활용은 짧은 시간에 다량의 제품을 검사할 수 있고, 또한 정확/정밀한 측정 결과를 얻을 수 있도록 해주었다. 또한 6시그마, 무결점 운동 등 생산현장에서의 품질혁신 활동에 힘입어, 스크리닝 검사 기법은 산업 현장에 급속히 확산되고 있다. 스크리닝 검사는 출하되는 모든 제품에 대해 검사를 하는 것으로, 다음의 두 가지 방법이 활

† 교신저자 shhong@chonbuk.ac.kr

용 된다; 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 검사의 경우 품질 상태를 정확히 파악하여 제품의 출하 여부를 판정하므로, 항상 만족스런 제품을 고객에 공급할 수 있다는 장점이 있다. 특히 이러한 검사는 공정에 이상요인 발생 시 빠르게 대처할 수 있는 품질 모니터링 시스템과 연계되므로 가장 바람직한 검사 방법이라 할 수 있다. 이 분야의 연구는 Bisgaard et. al(1984), Tang(1988a), Duffuaa and Al-Najjar(1995), Hong and Elsayed(1998), Cho et. al(2000), Moskowitz et. al(2001), Plante(2002), Govindaluri et al. (2004), Lee et al. (2006, 2007), 그리고 Hong and Cho (2007) 등에 의해 많은 연구가 진행되어 왔다.

한편 제품에 따라서는 주 품질특성을 활용한 스크리닝 검사가 어려운 경우가 있다. 파괴검사를 요하는 제품이 그 대표적인 예이다. 또한 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 대용특성을 찾을 수만 있다면 대용특성을 활용한 스크리닝 검사를 실시할 수 있다. 오랜 시간을 필요로 하는 트랜지스터의 수명 검사 대신 노이즈를 측정하거나, 파괴검사를 요하는 용접강도 측정 대신 초음파 검사를 하는 것 등이 대표적인 대용특성의 예이다. 주 품질특성 대신 대용특성을 측정하는 경우 검사비용은 줄일 수 있으나, 대용특성의 검사에 따른 오류가 발생할 수 있다. 즉 대용특성을 측정함으로써 인해 양품을 불량처리(제 1종 오류)하거나, 불량품을 출하하는(제 2종 오류) 오류가 생길 수 있다. 따라서 대용특성을 측정하는 경우 제품의 합격/불합격 판정기준이 되는 대용특성의 공차를 설정하는 것이 중요한 문제가 된다. 대용특성의 공차를 설정하기 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 연구 대상이었다. 이 부류의 대표적인 논문으로는 Owen et al.(1975), Li and Owen(1979), Wong et al.(1985), 그리고 Boys and Dunsmore (1987) 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), Hong(2006) 그리고 Hong et al. (2006) 등은 대용특성의 검사비용, 불량제품의 합격으로 인한 손실비용, 그리고 불합격되는 제품으로 인한 비용 등을 고려하여 경제적인 관점에서 대용특성의 공차를 구하였다.

대용특성을 활용한 스크리닝 절차에 대한 기존의 연구 논문은 1970년 이후, 약 100여편에 이르고 있다. 그런데, 대부분의 연구는 선별 후 양품의 비율을 일정 수준 이상으로 높이거나, 또는 비용 최소화를 이루는 경제적인 관점의 설계에 국한하고 있었다. 대표적 품질검사 기법인 샘플링 검사 방식의 경우 규준형, 선별형, 연속생산형, 조정형, 그리고 경제적 설계 등으로 구분된다는 것과 비교할 때 다양성 면에서 크게 부족하다는 것을 느낄 수 있다. 하지만 최근 들어 대용특성을 활용한 스크리닝 검사는 그 응용 범위를 빠르게 넓혀가고 있다. 예를 들어 판리도에 대한 Lee and Kwon (1999), 연속생산형 스크리닝 검사에 대한 Hong et al.(2001), 그리고 프로세스 모니터링 절차에 대한 Kwon et al.(2001), 그리고 Cho and Govindaluri(2002)의 다 단계 공정에서의 스크리닝 검사 등이 대표적인 예라 할 수 있다. 이 논문에서는 대용특성을 활용한 선별형 스크리닝 검사를 제안하고자 한다. 선별형 샘플링 검사란 검사에서 합격한 로트는 그대로 출하하지만, 불합격 로트에 대해서는 불량품을 전수 선별하는 방법이다. 이를 통해 불만족스런 품질의 제품을 제공하는 공급자에게는 품질 검사에 대한 부담을 가중시켜, 스스로 품질 향상을 꾀하도록 자극을 주기 위한 검사 방식이다. 이 논문에서는 이 개념을 대용특성을 활용한 스크리닝 검사에 그대로 반영해 다음과 같은 절차를 갖는 스크리닝 검사를 제안한다. 먼저 출하되는 모든 제품에 대해 대용특성을 측정한다. 검사에서 합격한 제품은 그대로 출하하지만, 불합격한 제품에 대해서는 주 품질특성을 추가로 측정해 불량 제품을 전수 선별하는 것이다. 즉, 좋은 품질의 제품을 제공하는 공급자에게는 품질 검사 비용을 크게 줄여주지만, 그렇지 못한 공급자에게는 품질 개선을 유도함과 아울러 출하되는 제품의 품질을 보증하기 위한 검사 절차이다. Hong(2006)은 주품질특성이 양품/불량품으로 구분 가능한 이치형 변수이고, 대용특성이 연속형 변수인 상황에서 선별형 스크리닝 절차를 제안한 바 있다. 이 논문에서는 주품질특성 및 대용특성이 모두 연속

형 변수인 상황에서 이변량정규모형에 기초해 Hong (2006)의 연구 결과를 확장하고자 한다.

이 논문과 같이 주 품질특성과 대용특성을 상호 보완적으로 활용하는 스크리닝 검사는 그 동안 일부 연구가 진행되어 왔는데, 2단계 스크리닝 검사가 그 대표적인 예이다. 2단계 스크리닝 검사는 Tang(1988b), Kim et al.(1994), Bai and Kwon (1995), Bai et al.(1995), 그리고 Lee et al.(2001, 2002) 등에 의해 연구되었다. 이는 2회 샘플링 검사의 개념을 스크리닝 검사에 도입한 것으로, 먼저 대용특성을 측정 한 후 품질이 아주 좋거나 또는 아주 나쁘면 제품을 합격 또는 불합격 처리하고, 그렇지 않으면 2단계로 주 품질특성을 추가로 측정해 제품의 합격/불합격 여부를 판정하는 방법이다. 이와 같이 주 품질특성 및 대용특성을 상호 보완적으로 활용한 검사를 적용하기 위해서는 주 품질특성의 측정에 많은 비용이 들지만 파괴 검사를 요하지 않고, 측정 가능해야 한다는 것이다. 또한 주 품질특성과 높은 상관성을 가지며 상대적으로 낮은 검사비용을 갖는 대용특성이 있어야 한다. 이 논문에서 제안하는 선별형 스크리닝 검사 역시 이러한 가정을 만족하는 제품들에 적용 가능한 검사 방식이다. 이러한 품질 특성의 예로 Tang(1988b)과 Kim et al.(1994) 등에서 제시한 전자부품의 내부전압 (주 품질특성) 및 외부전압 (대용특성)의 관계, 그리고 Lee et al.(2001, 2002)의 시멘트 백 중량 (주 품질특성)과 로드-셀의 전류 (대용특성)의 관계를 생각할 수 있다.

이 논문에서는 선별형 스크리닝 절차 설계 시 다음의 두 가지 기준을 고려하고자 한다. 첫째, 선별 후 불량제품의 비율을 일정 수준 이하로 유지하기 위한 통계적 관점에서의 설계, 둘째, 검사에 수반되는 제반 비용 요소, 즉 주 품질특성 및 대용특성의 품질검사비용 그리고 불량제품의 출하로 인한 손실비용으로 구성된 비용함수를 최소화하는 경제적 관점의 설계를 모두 고려할 것이다. 주 품질특성 및 대용특성이 모두 연속형 변수인 상황을 고려할 것이며, 이들의 관련성을 나타내기 위해 이 변량 정규모형을 활용할 것이다.

2. 선별형 스크리닝 검사

검사대상이 되는 제품의 주 품질특성을 Y 라 정의

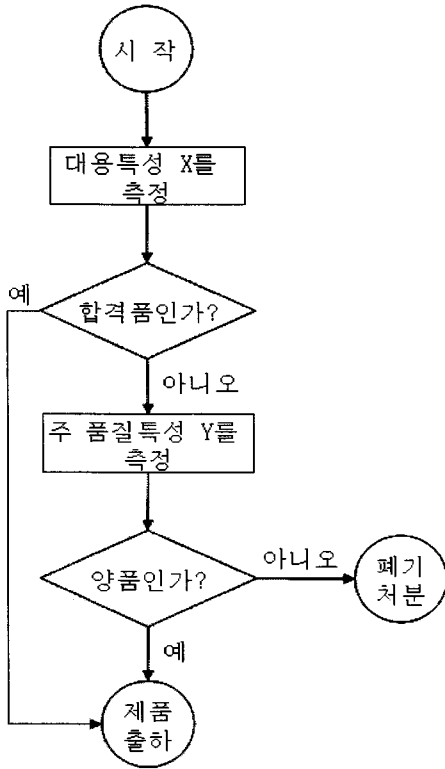
하자. Y 는 규격하한 L 을 갖는 망대특성의 변수이다. 즉, Y 의 측정 값 $y \geq L$ 이면 양품, 그렇지 않으면 불량품으로 간주된다. 앞에서도 설명한 바와 같이 이 논문의 기본 가정은 주 품질특성의 측정이 다소 어렵기는 하나, 파괴검사를 요하지 않고 측정 가능하다는 것이다. 또한 주 품질특성과 높은 상관관계를 갖고 상대적으로 낮은 검사비용을 갖는 대용특성이 존재하며, 이를 X 라 정의하자. 이러한 유형의 가정은 대용특성을 활용한 스크리닝 검사에서는 모두 공통적으로 활용되는 것으로, 예를 들어 Tang(1988b), Kim 등(1994), Bai 와 Kwon(1995), 그리고 Lee 등 (2001, 2002) 등의 논문을 참조할 수 있다.

대용특성을 활용한 검사에서는 주 품질특성과 대용특성의 관계를 올바르게 설정하는 것이 중요하다. 여기서는 X 와 Y 가 평균 (μ_x, μ_y) , 분산 (σ_x^2, σ_y^2) , 그리고 상관계수 $\rho > 0$ 를 갖는 이 변량 정규 모형을 활용한다. 물론 $\rho < 0$ 인 경우도 동일한 방식에 의해 스크리닝 검사를 구할 수 있다. 이 논문에서 제안하는 선별형 스크리닝 검사는 다음과 같은 절차를 갖는다.

- i) 출하되는 모든 제품의 대용특성 X 를 측정한다.
- ii) 대용특성 X 의 측정 값 $x \geq \omega$ 이면 제품을 합격, 그렇지 않은 제품에 대해서는 주 품질특성 Y 를 직접 측정한다.
- iii) 주 품질특성 Y 의 측정 결과 양품이면 합격, 그렇지 않으면 불합격 처리한다.

이러한 검사절차는 공정이 안정 상태일 때 대용특성을 측정하여 검사비용을 줄이며, 공정에 이상요인이 있다는 판단이 서면 주 품질특성을 측정하여 불량품의 출하를 방지하고 공정의 이상요인을 빠르게 탐지할 수 있다는 장점을 갖는다. <그림 1>은 이 검사 절차를 나타낸 것으로, 이는 Dodge와 Romig에 의해 제안된 선별형 샘플링 검사의 개념을 대용특성을 활용한 스크리닝 검사에 도입한 것이다.

선별형 샘플링 검사에서는 불합격된 로트에 대해 양품/불량품을 전수 선별하는 데 반해, 이 논문에서 제안한 검사에서는, 불합격 제품에 대해서는 주 품질특성을 측정해 양품/불량품을 전수 선별한다는 차이점이 있는 것이다. 물론 선별형 샘플링 검사에서의 결정 변수는 샘플의 크기 n 과 합격판정개수 c , 두 가지이지만, 이 논문에서는 대용특성의 기각치 ω 가



<그림 4> 선별형 스크리닝 절차

결정변수이다. 이 논문에서는 ω 를 결정하기 위해 통계적 관점 및 경제적 관점의 설계를 고려할 것이며, 이들은 각각 3장과 4장에서 설명할 것이다.

3. 통계적 관점의 설계 : 선별 후 양품의 비율보증

통계적 관점에서는 검사 후 출하되는 불량제품의 비율, 즉 AOQ (average outgoing quality) 를 보증하는 검사방식을 구하고자 한다. 이를 위해 $h(x, y)$ 를 X 와 Y 의 결합확률밀도함수라 정의하자. 또한 $f(x)$ 를 X 의 주변확률밀도함수, $t(y | x)$ 를 $X = x$ 일 때 Y 의 조건부확률밀도함수라 정의하면

$$h(x, y) = t(y | x)f(x), \quad (1)$$

이 된다. 단, 식 (1)에서 $f(x)$ 는 평균 μ_x , 분산 σ_x^2 인 정규분포이고, $t(y | x)$ 는 평균

$$\mu = \mu_y + \rho(\sigma_y/\sigma_x)(x - \mu_x), \quad \text{분산 } \sigma^2 = \sigma_y^2(1 - \rho^2) \text{인}$$

정규분포를 따르게 된다.

선별형 스크리닝 검사를 적용 할 때, 전체 제품 중 검사에 합격되어 출하되는 제품의 비율은

$$P(X \geq \omega) + P(X < \omega, Y \geq L), \quad (2)$$

이 된다. 식 (2)에서 $P(X \geq \omega)$ 는

$$P(X \geq \omega) = 1 - \Phi(\eta), \quad (3)$$

이 된다. 단, 식 (3)에서 $\eta = \frac{\omega - \mu_x}{\sigma_x}$ 이고, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수이다. 동일한 방법으로 $P(X < \omega, Y \geq L)$ 는

$$\begin{aligned} P(X < \omega, Y \geq L) &= P(X < \omega) - P(X < \omega, Y < L) \\ &= \Phi(\eta) - \Psi(\eta, \xi; \rho), \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다. 단, 식 (4)에서 $\xi = \frac{L - \mu_y}{\sigma_y}$ 이고, $\Psi(\cdot, \cdot; \rho)$ 는 상관계수 ρ 를 갖는 표준이변량정규분포의 누적분포함수이다.

반면 전체 제품 중 출하되는 불량품의 비율은

$$\begin{aligned} P(X \geq \omega, Y < L) &= P(Y < L) - P(X < \omega, Y < L) \\ &= \Phi(\xi) - \Psi(\eta, \xi; \rho), \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 이로부터 선별 후 불량품의 비율 AOQ는

$$\begin{aligned} AOQ &= \frac{P(X \geq \omega, Y < L)}{P(X \geq \omega) + P(X < \omega, Y \geq L)} \\ &= \frac{\Phi(\xi) - \Psi(\eta, \xi; \rho)}{1 - \Psi(\eta, \xi; \rho)}, \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다. 식 (6)으로부터 선별 전 불량품의 비율 $p = \Phi(\xi)$ 를 선별 후 AOQ (p) 수준으로 높이기 위한 η^* 를 구해야 한다. 그런데, 식 (6)은 분모에 이변량정규분포의 누적분포함수 $\Psi(\cdot, \cdot; \rho)$ 를, 그리고 분자에 정규분포의 누적분포함수 $\Phi(\cdot)$ 및 $\Psi(\cdot, \cdot; \rho)$ 를 포함하고 있으므로, η^* 에 대한 식을 해석적으로 구할 수는 없다. 따라서 R 또는 MATLAB 등의 소프트웨어를 활용한 수치적 분석에 의해 η^* 를 구할 수 있다. $\xi = \Phi^{-1}(p)$ 라는 식을 활용하면 식 (6)의 AOQ는 p, η , 그리고 ρ 의 식으로 정

<표 1> $\rho = 0.85$ 일 때 (p, AOQ) 의 여러 값에 따른 η^* 값

		AOQ (%)														
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9
p (%)	0.2	-2.684	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.3	-2.336	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.4	-2.122	-2.898	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.5	-1.967	-2.592	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.6	-1.845	-2.395	-2.966	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.7	-1.745	-2.248	-2.683	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.8	-1.659	-2.130	-2.500	-3.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.9	-1.585	-2.032	-2.361	-2.732	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0	-1.519	-1.947	-2.249	-2.558	-3.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.1	-1.461	-1.873	-2.154	-2.425	-2.762	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.2	-1.407	-1.806	-2.072	-2.318	-2.595	-3.034	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.3	-1.358	-1.747	-2.000	-2.227	-2.468	-2.783	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.4	-1.313	-1.692	-1.935	-2.148	-2.364	-2.621	-3.043	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5	-1.271	-1.642	-1.876	-2.077	-2.276	-2.497	-2.798	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.6	-1.231	-1.595	-1.823	-2.014	-2.199	-2.397	-2.639	-3.050	-	-	-	-	-	-	-
	1.7	-1.195	-1.552	-1.773	-1.957	-2.131	-2.311	-2.519	-2.809	-	-	-	-	-	-	-
	1.8	-1.160	-1.512	-1.727	-1.904	-2.069	-2.236	-2.421	-2.654	-3.055	-	-	-	-	-	-
	1.9	-1.127	-1.474	-1.684	-1.856	-2.013	-2.170	-2.338	-2.536	-2.818	-	-	-	-	-	-
	2.0	-1.096	-1.438	-1.644	-1.810	-1.961	-2.110	-2.265	-2.440	-2.665	-3.059	-	-	-	-	-
	2.1	-1.066	-1.404	-1.606	-1.768	-1.914	-2.055	-2.200	-2.358	-2.550	-2.824	-	-	-	-	-
2.2	-1.038	-1.372	-1.570	-1.728	-1.869	-2.005	-2.141	-2.287	-2.455	-2.674	-3.062	-	-	-	-	
2.3	-1.012	-1.341	-1.536	-1.691	-1.828	-1.958	-2.087	-2.223	-2.375	-2.560	-2.830	-	-	-	-	
2.4	-0.986	-1.312	-1.504	-1.655	-1.789	-1.914	-2.038	-2.166	-2.035	-2.468	-2.681	-3.064	-	-	-	
2.5	-0.961	-1.284	-1.474	-1.622	-1.752	-1.873	-1.992	-2.113	-2.242	-2.389	-2.569	-2.834	-	-	-	
2.6	-0.937	-1.257	-1.444	-1.590	-1.717	-1.834	-1.949	-2.064	-2.186	-2.320	-2.478	-2.687	-3.066	-	-	
2.7	-0.914	-1.232	-1.416	-1.559	-1.684	-1.798	-1.908	-2.019	-2.134	-2.258	-2.400	-2.576	-2.837	-	-	
2.8	-0.892	-1.207	-1.389	-1.530	-1.652	-1.764	-1.871	-1.977	-2.086	-2.203	-2.332	-2.486	-2.692	-3.067	-	
2.9	-0.871	-1.183	-1.363	-1.502	-1.622	-1.731	-1.835	-1.937	-2.042	-2.152	-2.272	-2.410	-2.583	-2.840	-	
3.0	-0.850	-1.160	-1.338	-1.475	-1.593	-1.699	-1.801	-1.900	-2.000	-2.105	-2.217	-2.343	-2.493	-2.696	-3.068	

리할 수 있는 데, <표 1>은 상관계수 $\rho = 0.85$ 인 경우 (p, AOQ) 의 여러 조합에 따른 η^* 값을 정리한 것이다. 물론 상관계수가 0.7, 0.8, 그리고 0.9 등 다른 값을 갖는 경우도 동일한 표를 작성할 수 있다. <표 1>에서 보는 바와 같이 선별 전 불량품의 비율 p 가 클수록, 그리고 AOQ 가 작을수록 η^* 가 증가함을 알 수 있다.

한편, 최적 기각치 ω^* 는 다음과 같이 η^* 의 함수식으로 구할 수 있다.

$$\omega^* = \mu_x + \eta^* \sigma_x, \tag{7}$$

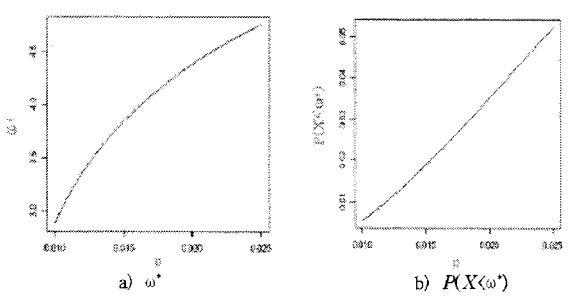
선별형 스크리닝 절차에서의 평균 검사량은 다음과 같다. 먼저, 모든 제품에 대해 대응특성은 우선적으로 검사를 하기 때문에 최적 기각치 ω^* 의 선택에 따른 대응특성의 검사량에는 차이가 없다. 차이는 주 품질특성의 측정 비율에 있게 되는데, 주 품질특성의 측정 비율은 대응특성의 기각치 ω^* 의 함수로 나타난다. 그 비율은

$$P(X < \omega^*) = \Phi\left(\frac{\omega^* - \mu_x}{\sigma_x}\right), \tag{8}$$

이 된다.

예제 1) 어떤 전자부품은 내부전압이 9볼트 이상이면 정상적으로 가동한다. 내부전압이 5.76볼트 이하이면 그 효율이 감소하게 되는데, 이 부품의 내부전압을 측정하기 위해서는 부품을 분해하는 등 어려움이 있으며 비용도 많이 든다. 그러나 이 부품의 내부전압은 외부전압과 높은 상관관계를 갖고 있으며, 외부전압의 측정은 내부전압에 비해 상대적으로 수월하다고 한다. 또한 과거의 경험으로 보면 주 품질특성인 내부전압 Y 와 외부전압 X 는 $\mu_y = 10$ 볼트, $\mu_x = 8$ 볼트, $\sigma_y = \sigma_x = 2$ 볼트, 그리고 $\rho = 0.85$ 인 이변량정규분포를 따른다고 알려져 있다. 특히 최근 한 달 동안의 품질검사 결과를 보면 프로세스는 안정 상태를 유지하고 있으며, 공정불량률은 1.7%인 것으로 파악하고 있다.

품질관리 부서에서는 선별 후 불량제품의 비율을 0.7% 이내로 유지하기 위한 선별형 스크리닝 검사를 적용하고자 한다. 이를 위해 <표 1>으로부터 $p = 1.7\%$ 와 $AOQ = 0.7\%$ 에 해당하는 n^* 를 구하면 -1.957이 되고, 이로부터 대응특성의 최적 기각치 $\omega^* = 8.0 + (-1.957) * 2.0 = 4.086$ 를 얻을 수 있다. 이러한 선별형 스크리닝 검사를 적용할 경우, 전체 제품 중 주 품질특성을 측정하는 제품의 비율은 2.52%가 된다. <그림 2>는 선별 전 불량품의 비율에 따른 최적 기각치 ω^* 와 주 품질특성의 측정 비율을 나타낸 것으로, 선별 전 불량품의 비율이 높을수록 최적 기각치 및 주 품질특성의 측정 비율 모두 증가함을 알 수 있다.



<그림 2> p 값의 변화에 따른 ω^* 와 $P(X < \omega^*)$

4. 경제적 관점의 설계 : 기대비용 최소화

주 품질특성을 직접 측정하는 경우 불량제품은 합

격될 수 없다. 하지만 대응특성을 측정하는 경우는 합격된 제품 속에 불량품이 포함될 수 있다. 물론 불량제품이 고객에게 판매되면 불량제품의 회수 및 교체비용 뿐 아니라 그 기업에 대한 신용이 떨어지는 등 막대한 손실비용이 발생하게 된다. 또한 불합격된 제품도 그로 인해 비용이 발생하게 되는 데, 품질검사에서 고려할 수 있는 비용항목은 다음과 같다.

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

스크리닝 검사의 경제적 설계와 관련된 기존의 연구들은 대체로 위의 세 가지 비용 항목들을 고려해 모형을 구성하고 있다. 하지만 이 논문에서 제안한 선별형 스크리닝 검사에서는 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 정의해보자. 불량품은 규격하한 L 에 미달하는 정도에 따라 $Q(y, L)$ 의 손실비용이 발생한다. $Q(y, L)$ 은 제품의 특성에 따라 여러 가지 함수 형태를 취할 수 있다. 일반적인 논문에서 널리 활용되는 함수 형태는 다음의 3가지이다.

$$Q(y, L) = \begin{cases} a, & \text{상수함수} \\ b(L-y), & \text{일차함수} \\ k(L-y)^2, & \text{이차함수} \end{cases}$$

단, a , b , 그리고 k 는 모두 양의 상수이다. 상수함수는 규격하한에 미달하는 정도에 관계없이 모든 불량품에는 동일한 손실비용이 발생한다고 가정한 함수형태이다. 또한 일차함수와 이차함수는 규격하한에 미달하는 양에 비례해서 손실비용이 발생하는 경우이고, 특히 이차함수는 다구짜가 제안한 손실함수이다.

합격된 제품 속에 포함된 불량제품으로 인한 손실비용은

$$\int_{\omega}^{\infty} \int_{-\infty}^L Q(y,L)h(x,y)dydx, \tag{9}$$

이 된다. 한편, 주 품질특성 및 대응특성의 검사 비용을 각각 c_p, c_s 라 정의하면 단위 제품 당 기대검사 비용은

$$c_s + c_p \cdot P(X < \omega) = c_s + c_p \int_{-\infty}^{\omega} f(x)dx, \tag{10}$$

이 된다. 이로부터 단위 제품 당 총 기대비용함수 ETC 는

$$ETC = c_s + c_p \int_{-\infty}^{\omega} f(x)dx + \int_{\omega}^{\infty} \int_{-\infty}^L Q(y,L)h(x,y)dydx, \tag{11}$$

이 된다.

식 (11)을 최소화하는 ω 값을 구하기 위해 ETC 를 ω 에 대해 1차 편미분하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial ETC}{\partial \omega} = f(\omega) \{-H(\omega) + c_p\}, \tag{12}$$

단, 식 (12)에서 $H(\omega) = \int_{-\infty}^L C_Q(y,L)t(y|\omega)dy$

이다. $\frac{\partial ETC}{\partial \omega} = 0$ 을 만족하는 ω 값을 ω^* 라 정의하면, ω^* 는 다음 식을 만족하는 ω 값이다.

$$H(\omega) = c_p, \tag{13}$$

한편,

$$\frac{\partial^2 ETC}{\partial \omega^2} = \frac{\partial f(\omega)}{\partial \omega} \cdot \frac{\{-H(\omega) + c_p\} + f(\omega)}{\partial \omega}$$

이므로 $\omega = \omega^*$ 일 때 $\frac{\partial^2 ETC}{\partial \omega^2}$ 의 값은

$$\frac{\partial^2 ETC}{\partial \omega^2} = f(\omega) \cdot \frac{\partial \{-H(\omega) + c_p\}}{\partial \omega}, \tag{14}$$

이 된다. 따라서 $\omega = \omega^*$ 일 때, $\frac{\partial H(\omega)}{\partial \omega} < 0$ 임을 보일 수만 있다면 식 (13)에서 구한 ω^* 는 기대비용함수를 최소화하는 값이 된다.

품질손실함수가 상수함수, 일차함수, 그리고 이차함수의 형태를 가질 때 최적 해는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

상수함수:

상수함수의 경우 식 (13)은

$$a \cdot \Phi \left\{ \frac{L - \mu_y - \rho(\sigma_y/\sigma_x)(\omega^* - \mu_x)}{\sigma_y \sqrt{1 - \rho^2}} \right\} = c_p, \tag{15}$$

이 된다. 또한

$$\frac{\partial H(\omega)}{\partial \omega} = -a \frac{\rho}{\sigma_x \sqrt{1 - \rho^2}} \cdot \phi \left\{ \frac{L - \mu_y - \rho(\sigma_y/\sigma_x)(\omega^* - \mu_x)}{\sigma_y \sqrt{1 - \rho^2}} \right\} < 0$$

이다. 따라서 ETC 를 최소화하는 최적해 ω^* 는

$$\omega^* = \mu_x + \frac{\sigma_x}{\rho \sigma_y} \left\{ L - \mu_y - \sigma_y \sqrt{1 - \rho^2} \Phi^{-1} \left(\frac{c_p}{a} \right) \right\}, \tag{16}$$

이 된다. 단 식 (16)에서 $\Phi^{-1}(\cdot)$ 는 표준정규분포 누적분포함수의 역함수이다.

일차함수:

일차함수 식의 전개를 위해 다음의 관계식을 활용할 수 있다: 식의 유도는 Bisgaard et. al (1984) 참조.

$$\int_{-\infty}^L yt(y|\omega)dy = \mu_{\omega} \Phi \left(\frac{L - \mu_{\omega}}{\sigma} \right) - \sigma \phi \left(\frac{L - \mu_{\omega}}{\sigma} \right), \tag{17}$$

단, $\mu_{\omega} = \mu_y + \rho(\sigma_y/\sigma_x)(\omega - \mu_x)$ 이고, $\phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 확률밀도함수이다. 식 (17)을 활용하면 $\partial ETC/\partial \omega = 0$ 를 만족하는 식은

$$\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right)\Phi\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right) + \phi\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right) = \frac{c_p}{b\sigma}, \quad (18)$$

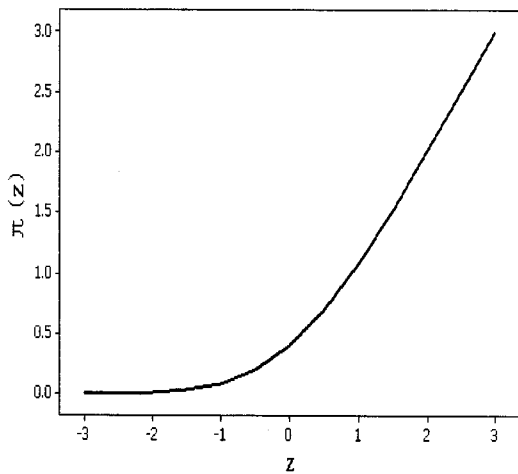
이 된다. 한편, $\Pi(z) = z \cdot \Phi(z) + \phi(z)$ 라 정의하면, 식 (18)은 $\Pi\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right) = \frac{c_p}{b\sigma}$ 이 된다. <그림 3>은 $-3 \leq z \leq 3$ 의 범위에서 $\Pi(z)$ 값을 그래프로 그린 것이다. <그림 3>을 활용하면 μ_ω^* 를 쉽게 구할 수 있다. 즉, $\Pi^{-1}(\cdot)$ 를 $\Pi(\cdot)$ 의 역함수라 정의할 때, $\mu_\omega^* = L - \sigma \cdot \Pi^{-1}\left(\frac{c_p}{b\sigma}\right)$ 이 된다. 또한 최적 기각치 ω^* 는

$$\omega^* = \mu_x + \frac{\sigma_x}{\rho\sigma_y} \cdot (\mu_\omega^* - \mu_y), \quad (19)$$

이 된다. 한편 일차손실함수의 경우

$$\frac{\partial H(\omega)}{\partial \omega} = -b \cdot \frac{\rho\sigma_y}{\sigma_x} \cdot \Phi\left\{\frac{L-\mu_y - \rho(\sigma_y/\sigma_x)(\omega - \mu_x)}{\sigma}\right\} < 0 \quad (20)$$

이다. 따라서 식 (19)에서 구한 ω^* 는 기대비용을 최소화하는 최적해이다.



<그림 3> Π 함수

이차함수:

이차함수 식의 전개를 위해 다음의 관계식을 활용할 수 있다: 식의 유도는 부록 참조.

$$\int_{-\infty}^L y^2 t(y | \omega) dy = (\sigma^2 + \mu_\omega^2)\Phi\left(\frac{L-\mu_\omega}{\sigma}\right) - \sigma(L + \mu_\omega)\phi\left(\frac{L-\mu_\omega}{\sigma}\right), \quad (21)$$

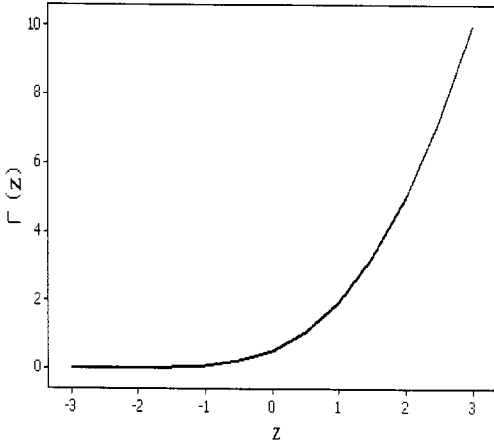
식 (13)과 식 (21)를 활용하면 $\partial ETC/\partial \omega = 0$ 를 만족하는 식은

$$\left\{1 + \left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right)^2\right\}\Phi\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right) + \left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right)\phi\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right) = \frac{c_p}{k\sigma^2}, \quad (22)$$

이 된다. $\Gamma(z) = (1+z^2) \cdot \Phi(z) + z \cdot \phi(z)$ 라 정의하면 식 (22)는 $\Gamma\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right) = \frac{c_p}{k\sigma^2}$ 이 된다. <그림 4>는 $-3 \leq z \leq 3$ 의 범위에서 $\Gamma(z)$ 값을 그래프로 그린 것으로, 이를 이용하면 μ_ω^* 를 쉽게 구할 수 있다. 즉, $\Gamma^{-1}(\cdot)$ 를 $\Gamma(\cdot)$ 의 역함수라 정의할 때, $\mu_\omega^* = L - \sigma \cdot \Gamma^{-1}\left(\frac{c_p}{k\sigma^2}\right)$ 이 된다. 최적 기각치 ω^* 는 식 (19)로부터 구할 수 있다. 한편 이차손실함수에 대한 이차편미분 함수

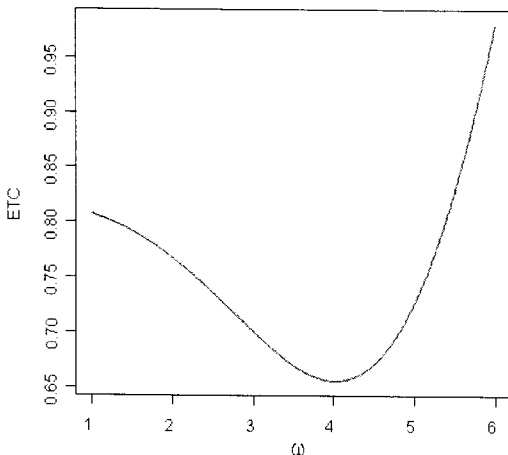
$$\frac{\partial H(\omega)}{\partial \omega} = -2k \frac{\rho\sigma\sigma_y}{\sigma_x} \cdot \left\{\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right)\Phi\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right) + \phi\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right)\right\} \quad (23)$$

이다. 식 (23)에서 우측 항은 $\Pi\left(\frac{L-\mu_\omega^*}{\sigma}\right)$ 이고, <그림 3>에서 보인 바와 같이 이는 항상 양의 값을 갖기 때문에, $\frac{\partial H(\omega)}{\partial \omega} < 0$ 가 성립한다. 따라서 식 (22)에서 구한 ω^* 는 기대비용을 최소화하는 최적해이다.



<그림 4> Γ 함수

예제 2) 이 예제에서는 3장의 통계적 분석과 동일한 예제를 활용하고자 한다. 내부전압 Y 와 외부전압 X 는 $\mu_y = 10$ 볼트, $\mu_x = 8$ 볼트, $\sigma_y = \sigma_x = 2$ 볼트, 그리고 $\rho = 0.85$ 인 이 변량 정규분포를 따르고, 공정불량률은 3.0%인 것으로 파악하고 있다. 또한 대응특성의 품질검사비용 $c_s = 0.5$ (단위: 천원), 주 품질특성의 검사비용 $c_p = 3.0$, 그리고 불량품의 합격으로 인한 품질손실비용은 이차함수의 형태로 $Q(y, L) = 10.0(L - y)^2$ 이라 한다. 이러한 수치를 활용해 최적 기각치를 구한 결과 $\omega^* = 4.02$, 그리고 이 때의 기대비용은 0.655를 얻을 수 있었다. <그림 5>는 ω 값에 따른 기대비용함수를 그림으로 나타낸 것이다.



<그림 5> ω 값의 변화에 따른 ETC

대응특성 및 주 품질특성의 검사비용은 정확히 추정할 수 있으나, 불량제품의 판매로 인한 손실비용은 오류의 가능성을 항상 갖고 있다. 따라서 본 모형이 이 비용항목의 추정 값에 어느 정도 민감하게 반응하는지를 알기 위하여, <표 2>에 비용항목의 잘못된 추정에 따른 기대비용의 증가율을 정리하였다. <표 2>에서 기대비용증가율(PI: percent increase)은 다음 식으로 계산한 것이다.

$$PI = \frac{ETC' - ETC^*}{ETC^*} \times 100(\%), \quad (24)$$

단, 식 (24)에서 ETC^* 는 올바른 비용 항목 추정 값을 사용했을 때의 기대비용이고, ETC' 는 잘못된 비용항목 추정 값을 사용하였을 때의 기대비용이다. <표 2>에서 보는 바와 같이 비용항목을 $\pm 20\%$ 잘못 추정하더라도, 기대비용 증가율은 1%를 초과하지 않음을 알 수 있었으며, 따라서 본 모형이 비용항목에 대해 민감하지 않음을 알 수 있었다.

<표 2> k 값의 잘못된 사용에 따른 ω^* 와 기대비용증가율

k	ω^*	PI(%)
8.0	3.87	0.31
9.0	3.95	0.16
11.0	4.07	0.16
12.0	4.15	0.18

이 논문에서 제안한 선별형 스크리닝 검사는 선별형 샘플링 검사와 같은 개념으로 만족스럽지 못한 품질의 제품을 제공하는 공급자에게 품질 검사를 철저히 하게 하기 위해 활용 가능한 품질검사 방식이다. 따라서 비용적인 측면만이 품질 검사 방식을 선택하는 기준은 아니지만, 비교를 위해 주 품질특성의 활용 없이 대응특성만을 활용하는 고전적인 스크리닝 검사와 비용적인 측면의 비교를 해 보았다. 이를 위해 대응특성만을 활용할 경우의 기대이익함수를 구하면

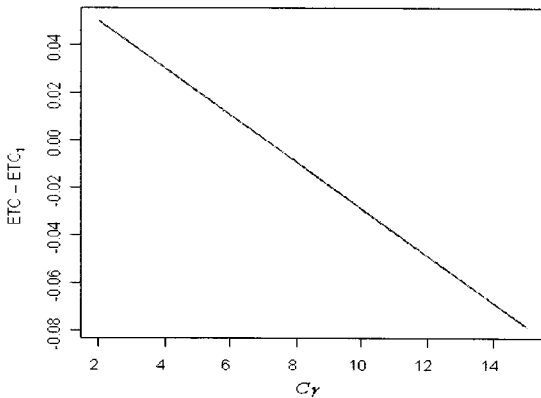
$$ETC_1 = c_s + c_r \int_{-\infty}^{\omega} \int_L^{\infty} h(x, y) dy dx \quad (25)$$

$$+ \int_{\omega}^{\infty} \int_{-\infty}^L Q(y, L) h(x, y) dy dx,$$

가 된다. 식 (25)에서 ρ 은 양품을 불합격시킴으로 인해 발생하는 손실비용이다. 비용의 비교를 위해 선별형 스크리닝 검사의 기대비용을 ETC 대용특성만을 활용한 스크리닝 검사의 기대비용을 ETC_1 라 정의하면,

$$ETC - ETC_1 = c_p \int_{-\infty}^{\omega} f(x) dx - c_r \int_{-\infty}^{\omega} \int_L^{\infty} h(x, y) dy dx = \int_{-\infty}^{\omega} \left[c_p - c_r \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{L - \mu}{\sigma} \right) \right\} \right] f(x) dx,$$

이 된다. 수식에서도 알 수 있는 바와 같이, 양품이 불합격됨에 의한 손실비용이 커질수록 본 모형의 기대비용이 대용특성만을 활용한 스크리닝 절차의 비용보다 작아짐을 알 수 있다. <그림 6>은 c_r 값만 변화시키기에 따른 두 비용의 차이를 그림으로 나타낸 것이다.



<그림 6> c_r 값의 변화에 따른 비용 차이

5. 결 론

이 논문에서는 주 품질특성 및 대용특성을 선택적으로 활용하는 선별형 스크리닝 검사를 제안하였다. 이는 선별형 샘플링 검사의 기본 개념을 스크리닝 검사에 도입한 것으로, 검사에서 불합격된 제품에 대해서는 주 품질특성을 추가로 검사하게 하는 것이다. 즉, 나쁜 품질의 제품을 제공하는 공급자에게는 품질검사를 까다롭게 하여, 공급자로 하여금 스스로 품질 개선에 대한 필요성을 갖도록 유도하는 방식이라 할 수 있다. 대용특성을 활용한 품질검사에 대한 연

구가 최근 들어 품질모니터링 절차, 관리도, 연속생산형 스크리닝 검사 등으로 확대되고 있고, 또한 기업 현장에서 스크리닝 검사를 널리 활용하고 있다는 점을 감안하면, 이 연구의 결과인 선별형 스크리닝 검사 역시 현장 활용 가능성은 충분히 높다고 할 수 있을 것이다.

이 논문에서는 주 품질특성 및 대용특성이 모두 연속형 변수이고, 이 변량 정규분포를 따른다는 가정 하에 모형을 구성하였다. 선별 후 양품의 비율을 일정 수준 이상으로 유지하기 위한 통계적 관점의 스크리닝 검사와, 검사에 수반된 제반 비용 요소를 고려한 경제적 관점의 스크리닝 검사를 구하였다. 통계적 관점의 설계에서는 선별 전 불량률과 선별 후 불량률 값에 따라 최적 검사를 찾을 수 있도록 표를 작성하였으며, 이의 활용을 통해 기업 현장에서 쉽게 활용할 수 있도록 하였다. 경제적 관점의 설계에서는 비용 항목의 잘못된 추정에 따른 모형의 민감도 분석을 하였다. 분석 결과 비용 항목을 $\pm 20\%$ 정도 잘 못 추정하더라도 모형은 크게 민감하지 않다는 결론을 얻을 수 있었다. 최적 기각치를 구하는 과정에서는 R을 활용하였으며, 펜티엄 PC에서 최적 해를 구하는데, 모든 경우 수초 이내의 짧은 시간이 소요되었다. 이 논문에서는 분포와 관련된 모수들인 $(\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y)$ 그리고 상관계수 ρ 를 모두 알고 있다는 가정 하에 모형을 구성하였다. 추후 연구과제로는 위의 모수들을 모르는 상황에서 모형을 구성할 수 있을 것이다. 또한 조정형 샘플링 검사의 개념을 적용한 조정형 스크리닝 검사, 그리고 다 단계 생산 공정에서의 스크리닝 검사 등으로 연구를 확장할 수 있을 것으로 기대한다.

부 록

식 (21)의 유도

$$M(L) \cong \int_{-\infty}^L y^2 t(y | \omega) dy = \int_{-\infty}^L \frac{y^2}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-\mu_\omega)^2}{2\sigma^2}} dy \tag{A1}$$

이다. 식 (A1)에서 $Z = (Y - \mu_\omega) / \sigma$ 라

$$\begin{aligned}
 M(L) &= \int_{-\infty}^{\frac{L-\mu_w}{\sigma}} (z\sigma + \mu_w)^2 \phi(z) dz \\
 &= \sigma^2 \int_{-\infty}^{\frac{L-\mu_w}{\sigma}} z^2 \phi(z) dz + 2\sigma\mu_w \int_{-\infty}^{\frac{L-\mu_w}{\sigma}} z \phi(z) dz \\
 &+ \mu_w^2 \int_{-\infty}^{\frac{L-\mu_w}{\sigma}} \phi(z) dz,
 \end{aligned}
 \tag{A2}$$

이 된다. 식 (A2)의 첫째 항에 대해 부분적분을 하면

$$\begin{aligned}
 \int_{-\infty}^{\frac{L-\mu_w}{\sigma}} z^2 \phi(z) dz &= -\left(\frac{L-\mu_w}{\sigma}\right) \cdot \phi\left(\frac{L-\mu_w}{\sigma}\right) \\
 &+ \Phi\left(\frac{L-\mu_w}{\sigma}\right),
 \end{aligned}
 \tag{A3}$$

이 되고, 식 (17)의 결과를 활용하면 둘째 항은

$$\int_{-\infty}^{\frac{L-\mu_w}{\sigma}} z \phi(z) dz = -\phi\left(\frac{L-\mu_w}{\sigma}\right),
 \tag{A4}$$

이다. 식 (A3)과 (A4)의 결과를 식 (A2)에 대입한 후, 다시 정리하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M(L) &= (\sigma^2 + \mu_w^2) \Phi\left(\frac{L-\mu_w}{\sigma}\right) \\
 &- \sigma(L + \mu_w) \phi\left(\frac{L-\mu_w}{\sigma}\right),
 \end{aligned}
 \tag{A5}$$

참 고 문 헌

- [1] Bai, D.S. and Kwon, H.M. (1995), "Economic Design of a Two-Stage Screening Procedure with a Prescribed Outgoing Quality", *Metrika*, Vol. 42(1), pp. 1-18.
- [2] 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*, Vol. 42, pp. 1081-1097.
- [3] Bisgaard, S., Hunter, W.G., and Pallesen, L. (1984), "Economic Selection of Quality of Manufactured Product", *Technometrics*, Vol. 26, pp. 9-18.
- [4] Boys, R.J. and Dunsmore, I.R. (1987), "Diagnostic and Sampling Models in Screening", *Biometrika*, Vol. 74, pp. 356-374.
- [5] Cho, B.R. and Govindaluri, M.S. (2002), "Optimal Screening Limits in Multi-Stage Assemblies", *International Journal of Production Research*, Vol. 40, pp. 1993-2009.
- [6] Cho, B.R., Kim Y.J., Kimbler, D.L., and Phillips, M.D. (2000), "An Integrated Joint Optimization Procedure for Robust and Tolerance Design", *International Journal of Production Research*, Vol. 38, pp. 2309-2325.
- [7] Drezner, Z. and Wesolowsky, G.O. (1995), "Multivariate Screening Procedures for Quality Cost Minimization", *IIE Transactions*, Vol. 27, pp. 300-304.
- [8] Duffuaa, S.O. and Al-Najjar, H.J. (1995), "An Optimal Complete Inspection Plan for Critical Multicharacteristic Components", *Journal of Operational Research Society*, Vol. 46, pp. 930-942.
- [9] 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*, Vol. 42, pp. 3235-3251.
- [10] Hong, S.H. (2006), "Design of Rectifying Screening Procedures Using a Surrogate Variable", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 32, pp. 51-60.
- [11] Hong, S.H. and Cho, B.R. (2007), "Joint Optimization of Process Target Mean and Tolerance Limits with Measurement Errors under Multi-Decision Alternatives", *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, pp. 327-335.
- [12] Hong, S.H. and Elsayed, E.A. (1998), "Economic Complete Inspections with Multi-Decision Alternatives", *International Journal of Production*

- Research, Vol. 36, pp. 3367-3378.
- [13] 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* Vol. 108, pp. 65-73.
- [14] Hong, S.H., Kwon, H.M., Lee, M.K., and Cho, B.R.(2006), "Joint Optimization in Process Target and Tolerance Limit for L-Type Quality Characteristic, *International Journal of Production Research*, Vol. 44, pp. 3051-3060.
- [15] 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* Vol. 39, pp. 2333-2340.
- [16] Kim, C.T., Tang, K., and Peters, M.(1994), "Design of a Two-Stage Procedure for Three-Class Screening", *European Journal of Operational Research* Vol. 79(3), pp. 431-442.
- [17] Kwon, H.M., Hong, S.H., Lee, M.K., and Kim, S.B.(2001), "A Process Monitoring Procedure Based on a Surrogate Variable for Dichotomous Performance Variable", *IIE Transactions*, Vol. 33, pp. 1129-1133.
- [18] Lee, J. and Kwon, W.J.(1999), "Economic Design of a Two-Stage Control Chart based on Both Performance and Surrogate Variables", *Naval Research Logistics*, Vol 46, pp. 958-977.
- [19] 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* Vol. 138(2), pp. 118-126
- [20] 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* Vol. 33(4), pp. 506-514.
- [21] Lee, M.K., Kwon, H.M., Hong, S.H., and Kim, Y.J.(2007), "Determination of the Optimum Target Value for a Production Process with Multiple Products", *International Journal of Production Economics*, Vol. 107, pp. 173-178.
- [22] Lee, M.K., Kwon, H.M., Hong, S.H., and Ha, J.W.,(2006), "Economic Selection of Sub-process Mean Values for a Mixture Production Process", *International Journal of Production Research*, Vol. 44, pp.4367-4376.
- [23] Li, L. and Owen, D.B.(1979), "Two-Sided Screening Procedures in the Bivariate Case", *Technometrics* Vol. 21, pp. 79-85.
- [24] 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* Vol. 7pp. 127-138.
- [25] Moskowitz, H., Plante, R., and Duffy, J.(2001), "Multivariate Tolerance Design Using Quality Loss", *IIE Transactions* Vol. 33, pp. 437-448.
- [26] Plante, R.(2002), "Multivariate Tolerance Design for a Quadratic Design Parameter Model," *IIE Transactions* Vol. 34, pp. 565-571.
- [26] Tang, K.(1987), "Economic Design of a One-Sided Screening Procedure Using a Correlated Variable", *Technometrics* Vol. 29, pp. 477-485.
- [27] Tang, K.(1988a), "Economic Design of Product Specifications for a Complete Inspection Plan", *International Journal of Production Research*, Vol. 26, pp. 203-217.
- [28] Tang, K.(1988b), "Design of a Two-Stage Screening Procedure Using Correlated Variables: A Loss Function Approach", *Naval Research Logistics* Vol. 35, pp. 513-533.
- [29] Turkman, K.F. and Turkman, M.A.A.(1989), "Optimal Screening Methods", *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, Vol. 51, pp. 287-295.
- [30] Wong, A., Meeker, J.B., and Selwyn, M.R. (1985), "Screening on Correlated Variables: A Bayesian Approach", *Technometrics* Vol. 27, pp. 423-431.