

측정오류를 고려한 가드밴드 기반 스크리닝 검사방식의 설계

김 영 진^{*†}

* 부경대학교 시스템경영공학부

Design of Screening Inspection Procedures Based on Guard Bands Considering Measurement Errors

Young Jin Kim^{*†}

* Department of Systems Management and Engineering, Pukyong National University

Abstract

Purpose: The purpose of this study is to investigate the design optimization modeling of screening procedures based on the assessment of misclassification errors.

Methods: Misclassification errors due to measurement variability are derived for normally distributed quality characteristics. Further, an optimization model for ensuring the level of outgoing quality is proposed and demonstrated through an illustrative example.

Results: It is shown that two types of misclassification errors (i.e., false acceptance and false rejection) may be properly compromised through an analytical assessment of measurement errors and an optimization modeling. It is also discussed that a variety of optimization modeling may be enabled based on the derivation of measurement errors.

Conclusion: It may be concluded that the design of screening inspection may further be facilitated by including the effect of measurement errors on the performance of screening inspection procedure.

Key words: Screening Inspection, Measurement System, Guard Band

• Received 26 November 2013, revised 7 December 2013, accepted 7 December 2013

† Corresponding Author(youngk@pknu.ac.kr)

© 2013, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

스크리닝(Screening) 검사는 주로 공정의 최종 단계에서 제품의 출검품질(Outgoing Quality) 향상을 목적으로 개별 제품에 대한 전수검사를 실시함으로써 부적합품을 선별하는 과정을 의미한다. 검사장비의 자동화 기술이 발전됨에 따라 검사의 속도뿐만 아니라 정확도가 개선되어 스크리닝 검사의 적용 사례가 확대되고 있으며, 이전의 샘플링 검사를 대신하여 공정의 마지막 단계에서 부적합품을 제거하는데 스크리닝 검사가 효과적인 것으로 인식되고 있다 (Park 1998). 스크리닝 검사에서는 제품의 주요 품질특성에 대한 측정이 이루어지며, 개별제품에 대한 합부판정은 측정결과를 바탕으로 이루어지므로 효과적인 측정시스템을 구축하는 것은 스크리닝 검사에서 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 하지만 측정 관련 설비, 작업자, 작업환경 등 다양한 변동요인으로 인하여 모든 측정시스템에서 어느 정도의 오류는 불가피하게 발생하게 되며, 이러한 측정오류로 초래되는 제품의 품질특성에 대한 그릇된 평가결과는 과다한 품질비용을 유발하는 원인이 될 수도 있다. 따라서 측정시스템의 변동요인을 명확하게 분석하고 이를 바탕으로 스크리닝 검사방식을 설계하는 것은 중요하다. 측정시스템의 변동으로 인한 측정오류에 관한 연구는 1980년대 이후 널리 이루어지고 있다 (Chandra and Schall 1988, Tang and Schneider 1988, Chen and Chung 1996, Lin et al. 1997, Mader et al. 1999).

측정시스템의 변동이 초래하는 품질비용으로는 측정오류로 인한 개별제품의 오분류로 발생하는 비용을 들 수 있다. 측정오류로 인하여 부적합품이 적합품으로 판정되어 고객에게 판매되는 경우 발생하는 외부품질비용과 적합품이 부적합품으로 판정되어 재작업 또는 폐기되어 발생하는 내부품질비용이 대표적인 예이다. 이러한 관점에서 Mader et al. (1999)은 스크리닝 검사방식에서 측정오류의 경제적 파급효과에 대한 분석을 실시하였다. 이러한 측정오류의 경제적 파급효과를 고려한 스크리닝 검사방식의 설계에 관한 연구도 활발하게 이루어졌다. 측정오류는 측정의 정밀도와 직접적인 관련이 있으며 정밀도가 높을수록 측정오류로 인한 품질비용은 낮아지는 한편, 정밀도 높은 측정시스템을 구현하기 위해서는 추가적인 비용이 요구된다.

측정오류로 인한 품질비용과 정밀도 향상을 위한 비용을 고려하여 비용이 최소화되는 정밀도 수준을 결정하는 스크리닝 검사방식의 경제적 설계에 관한 선구적인 연구로 Chandra and Schall (1988)과 Tang and Schneider (1988)을 들 수 있다. 이들 연구에서 측정의 정밀도는 반복측정을 통해 향상시킬 수 있다는 점에 착안하여 총비용이 최소화되는 반복측정횟수를 결정하는 문제를 분석하였다. 이후 Chen and Chung (1996)은 규격하한만 존재하는 충전공정을 대상으로 반복측정을 통한 측정의 정밀도를 결정하는 문제를 다루었다. 또한 충전공정의 경우에는 공정의 평균수준 또한 중요한 비용요소이므로 측정의 정밀도와 더불어 최적의 공정평균을 결정하는 방안을 제시하였다. 최근 Kim et al. (2007)은 양측규격이 모두 존재하는 생산 공정을 대상으로 한 스크리닝 검사의 경제적 설계에 관해 다루었다. 측정의 정밀도는 이전 연구와 마찬가지로 반복측정을 통해 조정할 수 있는 것으로 가정하였으며, 추가적으로 가드밴드(Guard Band)의 개념을 적용하였다. 가드밴드란 합부판정을 내리는 기준으로 규격한계를 사용하는 대신 별도의 검사한계를 두는 것을 의미한다.

앞서 살펴본 바와 같이 스크리닝 검사에 관한 이전 연구는 측정오류의 경제적 파급효과를 고려한 스크리닝 검사의 경제적 설계에 관한 연구가 대부분이며, 이를 위하여 측정오류로 인한 실패비용이나 측정정밀도를 향상시키기 위한 비용 등을 고려하였다. 하지만 이러한 비용요소는 실제적으로 추정이 어렵거나 불가능한 경우가 많을 뿐만 아니라 제품의 절대적인 출검품질 수준을 보장할 수 없다는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 공정의 출검품질 수준을 보장하기 위한 스크리닝 검사의 설계에 관해 다루고자 한다. 구체적으로는 Kim et al. (2007)에서 제시된 가드밴드의 개념을 이용하여 공정의 출검품질 수준을 보장하기 위한 최적의 검사한계를 도출하는 모형을 제시할 것이다. 본 논문

의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 측정오류로 인한 개별 제품의 오분류에 관한 분석을 바탕으로 가드밴드를 이용하여 출검품질 수준을 보장하기 위한 모형을 제시하며, 3장에서는 이전 연구에서 논의된 예제를 이용하여 제안된 모형의 적용성과 그 결과에 대해 논의한다. 마지막으로 결론에서는 제안된 연구모형과 결과를 요약하고 추후 연구주제에 대해 토의한다.

2. 가드밴드 기반의 스크리닝 검사

스크리닝 검사에서 측정시스템의 변동으로 인하여 발생할 수 있는 측정오류는 적합품을 부적합품으로 잘못 판정하는 제 1 종 오류와 부적합품을 적합품으로 잘못 판정하는 제 2 종 오류로 구분할 수 있다. 제 1 종 오류가 발생하는 경우에는 적합품을 재작업하거나 폐기하게 되므로 내부실배비용을 초래할 수 있으며, 제 2 종 오류가 발생하는 경우에는 부적합품을 고객에게 판매하게 되어 고객 불만을 초래하거나 추가적인 품질보증비용을 유발하게 되는 등 측정오류는 불필요한 비용을 수반하므로 스크리닝 검사방식을 설계할 때 측정오류는 필수적으로 고려되어야 한다. 한편, 스크리닝 검사에서 개별 제품에 대한 합부판정은 측정결과에 따라 이루어짐에도 불구하고 규격한계를 기준으로 스크리닝 검사를 실시하는 것은 효율적이지 않다. 이에 Grubbs and Coon (1954)은 개별 제품의 합부판정 시 규격한계 내부에 일정한 폭의 가드밴드를 두고 이를 검사한계로 사용할 것을 제안하였다. 이후 계측학(Metrology)분야를 중심으로 가드밴드를 이용한 검사방식에 대한 연구가 활발하게 이루어졌으며, ISO를 비롯하여 ASME, MIL-STD 등 다양한 표준에서 가드밴드의 설정에 관한 지침을 제공하고 있다 (Rishi 2012). 하지만, 측정오류에 대한 객관적이고 정량적인 평가를 바탕으로 하는 검사방식의 설계에 대해 다룬 연구는 많지 않다.

제 1 종 오류의 확률을 줄이기 위해서는 검사한계를 되도록 넓게 잡는 것이 유리하지만 제 2 종 오류의 발생확률은 상대적으로 증가하게 된다. 반대로 제 2 종 오류의 확률을 줄이기 위해서는 검사한계를 좁히는 것이 유리하나 제 1 종 오류의 발생확률은 증가한다. 따라서 가드밴드를 이용한 스크리닝 검사의 설계를 위하여 두 종류의 측정오류를 절충한 의사결정이 요구된다. 예를 들어 Grubbs and Coon(1954)은 두 종류의 측정오류의 발생확률이 동일하도록 하거나, 측정오류 발생확률의 합이 최소가 되도록 하는 가드밴드의 설정을 제안하였다. 하지만 일반적인 가설검정 절차에서는 제 1 종 오류의 발생확률에 제한(즉, 유의수준)을 두고 제 2 종 오류의 발생확률을 최소화하는 의사결정 방법을 주로 사용한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \underset{v, w}{\text{Minimize}} && \beta \\ & \text{subject to} && \alpha \leq \alpha_0, \end{aligned}$$

위 식에서 α 와 β 는 각각 제 1 종 및 제 2 종 오류의 발생확률을 나타내며, α_0 는 유의수준을 나타낸다. 한편 v 와 w 는 검사한계의 하한과 상한을 각각 의미하며, 최적의 검사한계 v^* 와 w^* 를 찾기 위해서는 측정오류의 발생확률을 도출하여야 한다.

품질특성을 확률변수 X 라 하고, 평균이 μ 이고, 분산이 σ^2 인 정규분포를 따른다고 가정한다. 또한 X 에 대한 측정값을 확률변수 Y 라 하고, $X=x$ 일 때 Y 의 조건부 분포는 평균이 x 이고, 분산이 $\sigma_{y|x}^2$ 인 정규분포라고 가정하자. 개별 제품의 합부판정은 측정값 Y 가 검사한계 내에 속하는지에 따라 결정된다. 즉, $Y \in [v, w]$ 이면 적합품이며 그렇지 않으면 부적합품으로 판정한다. 품질특성 X 의 규격한계 하한과 상한을 각각 L, U 라 하면, 제 2 종 오류 확률은 $\beta = P\{Y \in [v, w] | X \notin [L, U]\}$ 로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\beta = \left[\int_{v-U}^{w-\infty} \int_U h(x,y) dx dy + \int_{v-\infty}^w \int_U h(x,y) dx dy \right] \cdot \left[1 - \int_L^U f(x) dx \right]^{-1}$$

위 식에서 $f(x)$ 는 X 의 주변밀도함수이며, $h(x,y)$ 는 X 와 Y 의 결합밀도함수로서 이는 평균벡터가 (μ, μ) 이고 공분산행렬 Σ 가 다음과 같이 주어지는 이변량 정규분포를 따름을 증명할 수 있다.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \text{Var}(X) & \text{Cov}(X,Y) \\ \text{Cov}(X,Y) & \text{Var}(Y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x^2 \\ \sigma_x^2 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$$

여기서 σ_y^2 은 Y 의 분산을 나타내며, $\sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2$ 임을 알 수 있다. 한편 식 (2)를 정리하면 제 2종 오류 확률은 다음과 같이 v 와 w 의 함수로 표현할 수 있다.

식 (2)에서 분자항의 첫 번째 이중적분은 다음과 같이 적을 수 있다.

$$\int_{v-U}^{w-\infty} \int_U h(x,y) dx dy = \int_U \int_{v-x}^w h(x,y) dy dx = \int_U \left[\int_v^w g(y|x) dy \right] f(x) dx$$

여기서 $g(y|x)$ 는 Y 의 조건부 밀도함수를 나타내며, $Y|_{X=x} \sim N(x, \sigma_{y|x}^2)$, $X \sim N(\mu, \sigma_x^2)$ 이므로 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_U \left[\int_v^w g(y|x) dy \right] f(x) dx &= \int_U \left[\int_{(v-x)/\sigma_{y|x}}^{(w-x)/\sigma_{y|x}} \phi(z) dz \right] f(x) dx = \int_U \left[\Phi \left(\frac{w-x}{\sigma_{y|x}} \right) - \Phi \left(\frac{v-x}{\sigma_{y|x}} \right) \right] f(x) dx \\ &= \int_{(U-\mu)/\sigma_x}^{\infty} \Phi \left(\frac{w - (\mu + \sigma_x \lambda)}{\sigma_{y|x}} \right) \phi(\lambda) d\lambda - \int_{(U-\mu)/\sigma_x}^{\infty} \Phi \left(\frac{v - (\mu + \sigma_x \lambda)}{\sigma_{y|x}} \right) \phi(\lambda) d\lambda, \end{aligned}$$

여기서 $\Phi(\cdot)$ 과 $\phi(\cdot)$ 은 각각 표준정규분포의 누적분포함수와 밀도함수를 나타낸다. 다음의 관계식을 이용하면 (Chen and Chung, 1996)

$$\int_K^{\infty} \Phi(a + b\lambda) \phi(\lambda) d\lambda = \text{BVN} \left(\frac{a}{\sqrt{1+b^2}}, -K; \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \right)$$

식 (3)은 아래의 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\int_v^w \int_U^\infty h(x, y) dx dy = \text{BVN} \left(\frac{w - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{U - \mu}{\sigma_x}; -\gamma \right) - \text{BVN} \left(\frac{v - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{U - \mu}{\sigma_x}; -\gamma \right)$$

여기서 $\text{BVN}(a, b; \psi)$ 은 상관계수가 ψ 인 이변량 표준정규분포의 누적분포함수를 의미한다. 이와 유사하게 식 (2)에서 분자항의 두 번째 이중적분은 다음과 같이 유도된다.

$$\int_{v-\infty}^w \int_{-\infty}^L h(x, y) dx dy = \Phi \left(\frac{w - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}} \right) - \Phi \left(\frac{v - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}} \right) + \text{BVN} \left(\frac{v - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{L - \mu}{\sigma_x}; -\gamma \right) - \text{BVN} \left(\frac{w - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{L - \mu}{\sigma_x}; -\gamma \right)$$

식 (4), (5)를 식 (2)에 대입하면 제 2 종 오류의 발생확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \left[\begin{aligned} &\Phi \left(\frac{w - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}} \right) - \Phi \left(\frac{v - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}} \right) \\ &+ \text{BVN} \left(\frac{w - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{U - \mu}{\sigma_x}; -\gamma \right) - \text{BVN} \left(\frac{w - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{L - \mu}{\sigma_x}; -\gamma \right) \\ &- \text{BVN} \left(\frac{v - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{U - \mu}{\sigma_x}; -\gamma \right) + \text{BVN} \left(\frac{v - \mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{L - \mu}{\sigma_x}; -\gamma \right) \end{aligned} \right] \times \left[1 - \Phi \left(\frac{U - \mu}{\sigma_x} \right) + \Phi \left(\frac{L - \mu}{\sigma_x} \right) \right]^{-1}$$

한편, 제 1 종 오류 확률도 유사한 과정을 거쳐 아래의 식 (7)와 같이 유도할 수 있다.

$$\alpha = \left[\int_w^{\infty} \int_L^U h(x,y) dx dy + \int_{-\infty}^v \int_L^U h(x,y) dx dy \right] \cdot \left[\int_L^U f(x) dx \right]^{-1}$$

$$= \left[\Phi\left(\frac{U-\mu}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{L-\mu}{\sigma_x}\right) + \text{BVN}\left(\frac{w-\mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{U-\mu}{\sigma_x}; -\gamma\right) - \text{BVN}\left(\frac{w-\mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{L-\mu}{\sigma_x}; -\gamma\right) - \text{BVN}\left(\frac{v-\mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{U-\mu}{\sigma_x}; -\gamma\right) + \text{BVN}\left(\frac{v-\mu}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{y|x}^2}}, -\frac{L-\mu}{\sigma_x}; -\gamma\right) \right]$$

$$\times \left[\Phi\left(\frac{U-\mu}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{L-\mu}{\sigma_x}\right) \right]^{-1}$$

식 (6), (7)과 같이 측정오류의 확률을 검사한계 v 와 w 의 함수로 나타낸 후, 식 (1)에 대입하여 최적해를 구함으로써 제 1 종 오류의 확률이 유의수준을 넘지 않는 범위 내에서 제 2 종 오류의 확률이 최소화되는 (즉, 출검품질의 수준이 최대화되는) 검사한계를 구할 수 있다. 식 (1)의 최적해는 Hooke and Jeeves (1966)의 알고리즘을 매트랩으로 구현하여 구하였으며, 이변량 표준정규분포의 누적확률을 계산하기 위하여 Legendre 다항식을 바탕으로 하는 Gaussian Quadrature 공식을 이용한 근사법(Drezner and Wesolowsky 1990)을 적용하였다.

3. 수치 예제

측정오류를 고려한 스크리닝 검사방식의 설계에서 출검품질을 일정 수준 이상으로 유지하기 위한 최적의 검사한계를 구하는 절차를 Mader et al. (1999)에서 다룬 간단한 수치 예제를 통하여 논의하고자 한다. 광학스캐너에 사용되는 램프의 주요 품질특성은 휘도(Luminance)이며, 이는 조도계를 이용하여 제곱미터당 칸델라(Candela Per Square Meter, cd/m²) 단위로 측정된다. 현재 생산되는 램프의 휘도는 평균이 35,200 cd/m² 이고, 표준편차는 4,100 cd/m² 로 알려져 있으며, 휘도에 대한 규격한계는 상한과 하한이 각각 42,000 cd/m² 와 30,000 cd/m² 로 주어진다. 한편 사용되는 조도계의 측정분산은 기술적인 한계로 인하여 774.6 cd/m² 정도로 알려져 있다. 즉,

$$\mu = 35,200, \sigma_x = 4,100, \sigma_{y|x} = 774.6, L = 30,000, U = 42,000$$

통상 가설검정 절차에서 유의수준은 5%로 하는 것이 일반적이므로 $\alpha_0 = 0.05$ 로 두고 식 (1)에 주어진 모형의 최적해를 구하면 검사한계의 최적해는 $(v^*, w^*) = (30351.3, 41701.5)$ 로 나타나며 이 때 제 2 종 오류 확률은 $\beta^* = 0.0742$ 로 나타난다. 만약 가드밴드를 적용하지 않고 규격한계를 기준으로 스크리닝 검사를 실시하는 경우에는 제 1 종 및 제 2 종 오류의 확률은 $(\alpha, \beta) = (0.0310, 0.1284)$ 로 계산된다. 제 1 종 오류의 확률은 0.031 에서 0.050 으로 0.019 정도 늘어나는 반면, 제 2 종 오류의 확률은 0.1284 에서 0.0742 로 0.0542 정도 감소하게 된다. 아래 Figure 1 은 검사한계 (v, w) 값에 따라 제 2 종 오류 확률 β 가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있으며, 그림에서 점 A와 B는 최적 검사한계 (v^*, w^*) 와 규격한계 (L, U) 를 기준으로 스크리닝 검사를 시행하는 경우를 각각 나타낸다. 제

1 종 오류의 발생확률이 0.05 가 되는 검사한계는 점선으로 표시하였다.

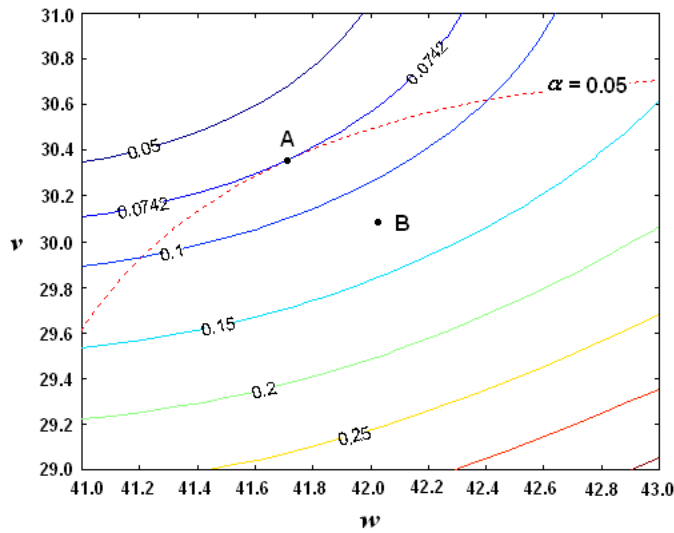


Figure 1. Contour plot of type II error probability β with respect to screening limit (v, w)
(Unit: 1,000 cd/m²)

4. 결론 및 토의

측정오류의 발생확률을 효과적으로 추정할 수 있다면 스크리닝 검사방식의 설계를 위한 다양한 최적화 모형을 검토할 수도 있다. 예를 들어, ASME B89.7.3.1 - 2001(Rishi 2012)에서 제안한 것과 같이 검사한계의 결정은 검사공정의 경제성을 고려하여야 하며 이러한 의사결정은 업종별 요구사항에 따라 다르게 나타난다. 제 2 종 오류의 발생에 수반되는 비용이 상대적으로 높은 것이 일반적이거나 업종에 따라서는 제 1 종 오류의 확률을 줄이는 것이 더욱 경제적인 경우도 있다. 검사에 불합격한 제품 중 측정오류로 인해 오분류된 적합품이 포함될 수 있으며, 검사에 합격한 제품 중에서도 측정오류로 인해 부적합품이 포함될 수 있다. 여기서 제 1 종 및 제 2 종 오류의 발생에 따른 추가 비용을 각각 C_α , C_β 라고 할 때, 검사공정과 관련된 평균비용은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E[TC] = C_\alpha \cdot \alpha \cdot \left[1 - \int_L^U f(x) dx \right] + C_\beta \cdot \beta \cdot \int_L^U f(x) dx$$

위 식에서 α 와 β 는 각각 식 (7)과 (6)에 주어진 바와 같다. 식 (1)의 모형에서 목적함수를 비용최소화로 두고 적절한 제약식을 고려하여 최적해를 구함으로써 비용을 고려한 검사한계를 구할 수 있게 된다. 예를 들어, 수치예제에서 제 1 종 오류로 인한 추가비용보다 제 2 종 오류로 인한 추가비용이 5배 정도 높아 $C_\alpha = 0.5$, $C_\beta = 2.5$ 라고 가정하자. 식 (8)에 주어진 평균비용을 최소화하는 경제적인 검사한계를 구하면 $(v^*, w^*) = (30699.6, 41361.7)$ 이며, 단위당 검사비용은 0.045 로 나타난다. 검사한계 (v, w) 값에 따른 평균비용의 변화를 Figure 2에 나타내었다.

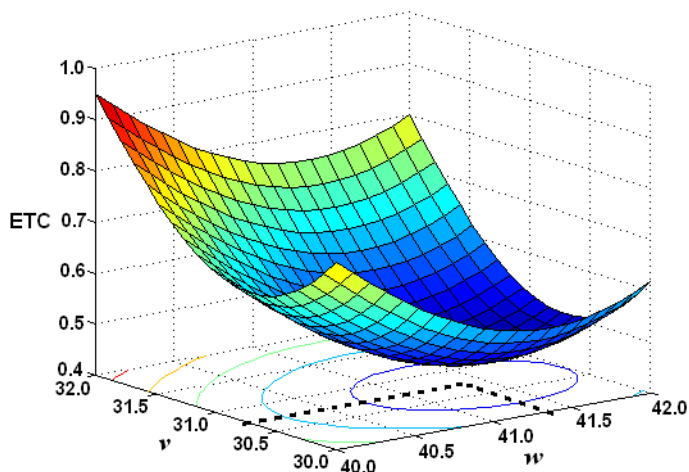


Figure 2. Surface plot of expected inspection cost with respect to screening limit (v, w)
(Unit: 1,000 cd/m²)

이와 같이 측정오류의 유형별 발생확률에 대한 효과적인 추정을 통해 다양한 상황에 대한 스크리닝 검사공정의 설계 문제를 다룰 수 있게 된다. 본 연구에서는 출검품질의 수준을 보장하기 위한 모형과 평균 검사비용의 최소화를 위한 모형을 예시로 다루었으나, 제안된 방법론을 적용하여 공정, 제품 또는 업종의 특성에 따라 다양한 모형을 수립하여 적용함으로써 스크리닝 검사의 효율적인 계획수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, 다구치가 제안하여 널리 적용되고 있는 품질손실함수를 고려한 스크리닝 검사의 경제적 설계나 비대칭적인 규격한계를 가지는 제품에 대한 스크리닝 검사의 설계 등에 대한 추후 연구가 진행 중이다.

REFERENCES

- Chandra, Jeya, and Schall, Susan. 1988. "The Use of Repeated Measurements to Reduce the Effect of Measurement Errors." *IIE Transactions* 20:83-7.
- Chen, Shieh-Liang, and Chung, Kun-Jen. 1996. "Selection of the Optimal Precision Level and Target Value for a Production Process: The Lower-Specification-Limit Case." *IIE Transactions* 28:979-85.
- Drezner, Zvi, and Wesolowsky, George O. 1990. "On the Computation of the Bivariate Normal Integral." *Journal of Statistical Computation and Simulation* 35:101-7.
- Grubbs, Frank A., and Coon, Helen J. 1954. "On Setting Test Limits Relative To Specification Limits." *Industrial Quality Control* 10:15-20.
- Hooke, Robert, and Jeeves, T. A. 1966. "Direct Search of Numerical and Statistical Problems." *Journal of ACM* 8:212-29.
- Jeong, Seong Hoon, Kongsuwan, Pauline, Truong, Nguyen Khoa Viet, and Shin, Sangmum. 2013. "Optimal Tolerance Design and Optimization for a Pharmaceutical Quality Characteristics." *Mathematical Problems in Engineering*. doi: 10.1155/2013/706962.
- Kim, Young Jin, Cho, Byung-Rae, and Kim, Nam Ki. 2007. "Economic Design of Inspection Procedures Using Guard Band When Measurement Errors Are Present." *Applied Mathematical Modelling* 31:805-16.
- Lin, Chih-Young, Hong, Chien-Long, and Lai, Jiing-Yih. 1997. "Improvement of a Dimensional Measurement Process Using Taguchi Robust Designs." *Quality Engineering* 9:561-73.
- Mader, Douglas P., Prins, Jack, and Lampe, Rod E. 1999. "The Economic Impact of Measurement Error." *Quality*

Engineering 11:563-74.

Park, Young-Hyun. 1998. "A Study of Quality Costs in a Multicomponent and Low Volume Products Automated Manufacturing System." *Quality Improvement Through Statistical Methods* (ed. B. Abraham) 405-14.

Rishi, Swanand. 2012. "Guard-Banding Methods - An Overview." *Proceedings of AdMET 2012* (Paper No. UM001). London: UK.

Tang, Kwei, and Schneider, Helmut. 1988. "Selection of the Optimal Inspection Precision Level for a Complete Inspection Plan." *Journal of Quality Technology* 20:153-6.