

# A Maintenance Model Applying Loss Function Based on the Cpm+ in the Process Mean Shift Problem in Which the Production Volume Decreases

Do-Kyung Lee<sup>†</sup>

School of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology

## 생산량이 감소하는 공정평균이동 문제에서 Cpm+ 기준의 손실함수를 적용한 보전모형

이 도 경<sup>†</sup>

금오공과대학교 산업공학부

Machines and facilities are physically or chemically degenerated by continuous usage. The representative type of the degeneration is the wearing of tools, which results in the process mean shift. According to the increasing wear level, non-conforming products cost and quality loss cost are increasing simultaneously. Therefore, a preventive maintenance is necessary at some point. The problem of determining the maintenance period (or wear limit) which minimizes the total cost is called the 'process mean shift problem'. The total cost includes three items: maintenance cost (or adjustment cost), non-conforming cost due to the non-conforming products, and quality loss cost due to the difference between the process target value and the product characteristic value among the conforming products. In this study, we set the production volume as a decreasing function rather than a constant. Also we treat the process variance as a function to the increasing wear rather than a constant. To the quality loss function, we adopted the Cpm+, which is the left and right asymmetric process capability index based on the process target value. These can more reflect the production site. In this study, we presented a more extensive maintenance model compared to previous studies, by integrating the items mentioned above. The objective equation of this model is the total cost per unit wear. The determining variables are the wear limit and the initial process setting position that minimize the objective equation.

**Keywords :** Process Mean Shift, Process Variance, Production Quantity, Cpm+, Quality Loss Function

### 1. 서 론

모든 설비들은 지속적인 사용으로 인해 설비의 노후화가 진행된다. 일부 설비 특성은 사용하지 않고 시간만 경과하더라도 노후화는 진행된다. 설비의 노후화는 여러 열

화현상에 의해 진행되며, 이는 필연적으로 설비의 고장이 나 생산성 저하를 가져온다. 그러므로 특정 시점에서는 설비의 보전이 필요하게 된다. 고장의 경우 설비의 보전은 해당 시점에서 필수적이다. 그러나 설사 고장이 아니더라도 생산성 측면에서 수리나 재조정과 같은 설비의 보전 또한 필요하다. 본 연구는 고장은 제외한 생산성 측면에서의 보전 모형에 대한 것이다.

열화현상에는 여러 형태가 있는데, 이 현상이 심화됨에 따라 해당 설비에서 생산하는 제품들은 설계상의 공정규격

Received 15 January 2021; Finally Revised 16 February 2021;  
Accepted 26 February 2021

<sup>†</sup> Corresponding Author : dklee@kumoh.ac.kr

으로부터 이탈이 발생하여 부적합품이 증가하며, 생산량은 감소하여 공정의 생산성이 저하된다. 열화현상 중 한 가지인 마모가 진행되면, 제품의 품질특성치는 규격의 상방이나 하방 중에서 어느 한 방향으로 이동하게 되는데, 이를 공정평균이동이라 한다. 마모가 진행되어 제품생산에 많은 비용을 초래하는 일정 시점에서는 설비의 교체나 조정이 필요하게 된다. 이때, 공정운영에 들어가는 총비용을 최소화하는 보전시기를 결정하는 문제를 ‘공정평균이동 문제’라 한다.

총비용은 조정비용(혹은 교환비용), 부적합비용 그리고 품질손실비용 등의 세 가지 항목으로 구성된다. 조정비용은 생산을 중단하고 설비의 조정하거나 교환하는 비용이며, 부적합비용은 제품이 상한규격이나 하한규격을 벗어나는 부적합품들에 의한 비용이며, 품질손실비용은 적합품들 중에서 품질특성치와 설계상의 공정목표값과의 차이에 의한 비용이다. 총비용을 구성하는 세 가지 항목은 모두 비용이다. 이들 중 조정비용은 일회성이며 마모 정도와 무관한 상수이지만, 나머지 두 비용은 마모가 진행됨에 대해 증가한다. 그러므로 총비용을 최소로 하는 보전시기는 생산을 하지 않는 경우가 되어 수리적 모형이 성립하지 않는다. 그러므로 궁극적인 보전모형은 단위 시간당(혹은 마모당) 총비용을 최소화하는 보전시기 결정 형태로 전환된다. 이 경우, 마모가 진행됨에 의해 단위 마모당 감소하는 조정비용과 증가하는 부적합비용 및 품질손실비용 간의 절속관계에 의해 단위 마모당 총비용을 최소화하는 최적 보전시기를 결정하게 된다.

공정평균이동 문제는 여러 방향으로 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 공정평균문제에서 이렇게 여러 방향으로 진행되어 온 기존 연구들을 통합한 보전모형을 제시한다. 그러므로 우선 본 연구의 보전모형을 기존 연구들의 모형의 틀에서 설명하면 다음과 같다. 첫째, 열화 정도를 나타내는 마모수준을 관측에 의해 직접 아는 경우와 설비에 의해 생산된 제품들로부터 간접적으로 추정하는 두 가지 경우가 있다. 본 연구는 측정으로 인해 마모수준을 직접 알 수 있는 모형이다. 둘째, 망소특성이나 망대특성을 갖는 소수의 품질특성치를 제외한 대부분 제품들의 경우, 상한과 하한의 양쪽 규격이 있는 망목특성이 일반적이므로, 본 연구의 모형에서는 상한과 하한의 양쪽 규격을 설정한다. 셋째, 마모수준이 증가하면 공정평균의 이동과 함께 조임이 풀려 공정분산의 증가함이 일반적이다. 그러므로 본 연구에서는 공정분산을 상수가 아닌 마모수준에 따른 함수 형태로 설정한다. 마모수준에 대한 공정분산의 함수에 대해서는 3.1절에 설명했다. 넷째, 설비가 노후화 되면, 일정기간 동안 생산하는 제품의 수량도 감소함이 일반적이다. 본 연구에서는 이러한 마모수준과 생산량 감소와의 관계를 모든 공정에 적용할

수 있는 일반화 함수를 설정한다. 생산량 함수에 대해서는 3.2절에 그 전개과정을 서술했다. 마지막으로 적합품에서 발생하는 품질손실비용에 있어서는  $C_{pm}$  개념을 도입함으로써 규격 안에서 공정목표값에 미달한 경우와 초과한 경우를 구분하여 보다 일반화한 품질손실비용 모형을 도입한다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 다섯 가지 부분적인 모형들을 모두 통합한 공정평균이동 문제에 대한 보전모형을 제시함으로써, 실제 생산현장에서 발생하는 공정평균이동 문제를 보다 더 현실적으로 해결할 수 있을 것이다.

## 2. 기존 연구

Manuele[14]는 연속되는 생산에 기인한 공구의 마모로 인해, 생산된 제품들의 품질특성치가 선형으로 변화하는 문제를 제기했다. 그리고 이 상황에 대해 전체 비용 측면에서 수리적 모형을 제시하고 이를 최소화하는 모형을 제시했는데, 이것이 공정평균이동 문제의 최초 논문이다.

Manuele[14] 이후 초기 연구들에서는 현재 같은 측정 센서들의 미비로 인해, 마모수준을 직접 알 수 없는 경우에 대한 보전모형들이 주로 소개되었으며, Quesenberry[16], Schneider[18] 등은 생산한 제품의 특성치를 측정하여 관리도나 회귀모형을 사용하여 마모수준을 간접적으로 추정했다.

이어서 소개하는 연구들은 마모수준을 알 수 있는 경우에 대한 연구들로서 다음과 같다. 부적합비용항목에 있어, 규격에 대한 설정 기준으로 Gibra[5]는 한쪽 규격만 설정했으며, Kamat[7]는 Gibra[5]의 연구를 확장하여 양쪽 규격의 모형을 제시했다. 본 연구의 보전모형도 양쪽 규격에 해당한다. 손실함수를 도입한 연구로는 다구찌 손실함수와 규격상한을 적용한 Rahim과 Tuffaha[17] 연구가 있다. 이 후 Bolyes[3]가 다구찌의 2차 손실함수를 목표값을 중심으로 비대칭인  $C_{pm}$ 으로 확장한 이후, 이를 품질손실비용에 적용한 모형으로는 Chen[4], Makis[13], Ahn과 Jang[1] 그리고 Lee[8]의 연구가 있다. 본 연구에서도  $C_{pm}$  기준의 품질손실함수를 사용한다. 이 전의 연구들은 단위 마모당 생산량을 상수로 설정하거나 계단함수로 처리했으나, Lee와 Park 등[12]은 마모수준 증가에 대해 생산량이 정규분포를 따르는 경우를 제시했다. 그러나 생산량이 정규분포처럼 마모수준 증가에 대해 증가하다가 감소한다는 설정은 현실적으로 거의 부합하지 않는다. 이에 Lee[10]는 마모당 생산량의 모든 변화를 나타낼 수 있는 일반 함수를 제시했다. 본 연구에서는 생산량의 변화에 대해 Lee[10]의 일반화 함수를 보전모형에 도입한다. 마모수준에 대한 공정분산의 변화에 대한 모형에 있어서

대부분 공정분산을 상수로 처리했으나, Arcelus 등[2]은 조정기간 안에서 몇 단계의 마모구간을 설정하고, 공정분산이 마모 구간별로 알려진 상수라고 설정한 모형을 제시했다. 이후 Lee[11]는 마모수준의 증가에 대해 공정분산이 concave하게 증가하는 함수인 모형을 제시하여 공정분산에 대한 모형을 일반화했다. 본 연구에서는 공정분산의 변화에 대해 Lee[11]의 모형을 도입한다.

### 3. 모형의 구성

#### 3.1 마모수준과 부적합률

설비를 사용할수록 마모와 같은 설비의 열화현상이 진행된다. 그러므로 제품의 품질특성치를  $X$ 라 할 때,  $X$ 는 당연히 마모수준에 영향을 받는다. 마모수준을  $w$ 로 나타낼 때,  $w$ 에서 생산된 품질특성치를  $X_w$ 로 표시하기로 한다. 공정이 안정되어 있을 때,  $X_w$ 는 정규분포를 따른다.  $w$ 에서의 공정평균을  $\mu(w)$ 로 나타낼 때,  $\mu(w)$ 는 식 (1)과 같다.

$$\mu(w) = \mu_I + w \tag{1}$$

식 (1)의  $\mu_I$ 는  $w$ 가 설비의 보전시기인 마모한계  $w_I$ 에 도달했을 때, 보전조치(조정이나 교환) 후의 초기 공정평균이다.  $\mu_I$ 를 설계상의 공정목표값인  $m$ 으로 설정할 수도 있으나, 앞으로 진행될 마모에 대해 미리 이를 반영하여  $\mu_I$ 를  $m$ 보다 작게 설정함으로써, 보전기간 동안의 평균 부적합률을 낮출 수 있다. 그러므로  $\mu_I$ 는 본 모형의 결정변수인 보전시점의 마모수준 즉, 마모한계  $w_I$ 과 더불어 다른 하나의 결정변수다. 마모에 의한 제품의 영향에 대해 Park 등[15]은 마모에 대한 가공결과가 피삭재와 절삭공구(인서트 팁)의 상대적 강도와 회전속도, 이송속도 등에 의해 영향을 받음을 제시했다.

부적합률을 계산하기 위해서는 평균  $\mu(w)$ 이 외에 정규분포의 다른 매개변수인 분산이 필요하다. 마모수준이 증가하면 공정평균의 이동과 함께 유격의 증가로 인해 공정분산의 증가함이 일반적이다. 이에 대해 Lee[11]는 절삭공정에서의 실측자료를 분석하여,  $w$ 에서의 공정분산  $\sigma^2(w)$ 를 식 (2)의 함수로 나타내었다.

$$\sigma^2(w) = \sigma_0^2 + \alpha w^\beta, \text{ 단 } \alpha \geq 0, 0 \leq \beta \leq 1 \tag{2}$$

식 (2)에서  $\sigma_0^2$ 는 설비의 초기 분산 즉, 마모가 진행되기 전의 공정분산으로 설비의 고유 정밀도다.  $\alpha$ 는 척도모수이며,  $\beta$ 는 concave한 증가를 나타내기 위한 형상모수다. 따라서  $X_w$ 는 식 (3)의 정규분포를 따른다. 공구의

초기위치가  $\mu_I$ 이고 마모수준이  $w$ 일 때, 제품의 공정 부적합률  $P(w, \mu_I)$ 를 식 (4)에 나타냈다. 식 (4)에서  $S_L$ 은 규격하한(LSL : lower specification limit)이며,  $S_U$ 는 규격상한(USL : upper specification limit)이다.

$$X_w \sim N(\mu_I + w, \sigma_0^2 + \alpha w^\beta) \tag{3}$$

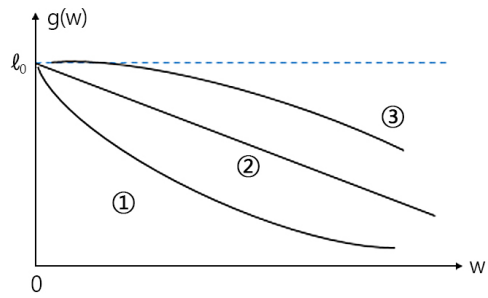
$$f(X_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{\{X_w - (\mu_I + w)\}^2}{2(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)}\right]$$

$$P(w, \mu_I) = 1 - \Pr(S_L \leq X_w \leq S_U) \tag{4}$$

$$= 1 - \int_{S_L}^{S_U} f(X_w) dX_w$$

#### 3.2 부적합품 비용

보전구간  $[0 \sim w_I]$ 에서의 전체 부적합비용을 산출하기 위해서는  $P(w, \mu_I)$ 와 함께  $w$ 에서 생산한 제품량이 필요하다. 열화현상에 의해 단위 마모당 제품 생산량 또한 영향을 받는다. 일반적으로 마모 증가할수록 생산량은 감소하며, 감소 형태는 해당 공정의 특성에 의해 다양한 형태를 취할 수 있다.  $w$ 에서의 제품 생산량을  $g(w)$ 로 나타낼 때, Lee[10]는 이 관계를 식 (5)의 함수로 제시했으며, 이를 <Figure 1>에 나타내었다. <Figure 1>에서  $l_0$ 는 공정을 조정된 직후 즉, 마모가 진행되지 않은  $w=0$ 에서의 단위 마모당 제품 생산량이다.



<Figure 1>  $g(w)$  with Wear Level  $w$

$$g(w) = l_0 - \gamma w^\delta, \text{ 단, } \gamma \geq 0, \delta > 0 \tag{5}$$

식 (5)의  $\gamma$ 는 척도모수로서  $\gamma=0$ 인 경우는 생산량이 마모수준에 영향을 받지 않는 기존의 연구들과 동일한 모형이 된다.  $\delta$ 는 형상모수이며,  $\delta$ 값의 범주에 따라  $g(w)$ 는 ①, ② 그리고 ③의 다양한 모습을 취한다.  $\mu_I$  및  $w$ 하에서의 제품 부적합비용을  $C_d(w, \mu_I)$ 로 나타낼 때,  $C_d(w, \mu_I)$ 는  $P(w, \mu_I)$ 와  $g(w)$  그리고 단위 부적합품당 처리비용  $D$ 의 곱으로 계산되며, 식 (6)과 같다.

$$C_d(w, \mu_I) = P(w, \mu_I) g(w) D \quad (6)$$

마모한계(보전시기)를  $w_l$ 이라 할 때, 구간  $[0 \sim w_l]$ 에서 발생하는 총부적합비용은  $w$ 에 대한  $C_d(w, \mu_I)$ 의 누적 기댓값이며, 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{구간 } [0 \sim w_l] \text{에서의 총부적합비용} \\ &= \int_0^{w_l} C_d(w, \mu_I) dw \quad (7) \\ &= D \left[ \int_0^{w_l} g(w) dw - \int_0^{w_l} \int_{S_L}^{S_U} g(w) f(X_w) dX_w dw \right] \end{aligned}$$

### 3.3 품질손실비용

‘규격을 만족하는 적합품들은 비용이 발생하지 않는다.’는 기존 개념에서 벗어나, 적합품이더라도 설계상의 공정 목표값  $m$ 과 품질특성치와의 이격 수준을 비용으로 전환한 것이 품질손실비용이다.

#### 3.3.1 공정능력지수와 품질손실함수

손실함수 개념은 공정능력지수에서 비롯되었다. 공정능력지수는 실제 공정산포와 설계상 허용 가능한 공차를 비교한 수치이며, 해당 공정이 주어진 규격을 어느 정도로 충족하는지를 나타내는 지수이며 공정 정밀도의 개념이다. 공정능력지수는 Juran[6]이 최초로 제시했다. 그는 품질특성치의 표준편차의 6배를 자연공차로 지칭하고, 이를 사용한  $C_p$ 라는 공정능력지수를 제시했으며 식 (8)과 같다.  $C_p$  발표 이후, 치우친 정도나 산포의 상황을 지수에 반영하는  $C_{pk}$ ,  $C_{pm}$  그리고  $C_{pm+}$  등의 다양한 공정능력지수들이 발표되어 왔다.

$$C_p = (USL - LSL) / 6\sigma \quad (8)$$

이러한 규격대비 공정의 변동을 비용화한 것이 다구찌의 품질손실비용이다. 품질특성치를  $X_w$ 에 대한 다구찌의 손실비용  $L(X_w)$ 는 식 (9)와 같다.

$$L(X_w) = k(X_w - m)^2 \quad (9)$$

식 (9)에서  $m = (LSL + USL) / 2$ 이며,  $k$ 는 공정의 특성에 해당하는 비용계수다.

#### 3.3.2 $C_{pm+}$ 와 품질손실비용

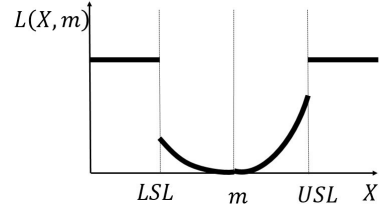
식 (9)의 손실비용함수는  $m$ 을 기준으로  $X_w$ 가  $m$ 를 미달하거나 초과함에 무관한 좌우 대칭형 함수다. 식 (9)의 손실비용함수는  $m$ 을 중심으로 비대칭의 경우를 반영할

수 없다는 점과  $X_w$ 가  $LSL$  혹은  $USL$  값과 동일할 때 부적합 처리비용  $D$ 에 비용계수  $k$ 를 반드시 일치시켜야하는 단점이 있다.

이에 반해 본 연구에서 도입하는  $C_{pm+}$ 는 미달 혹은 초과와의 결과에 따라 비용계수  $k$ 를 달리하는 공정능력지수다. 따라서  $C_{pm+}$ 는 좌우 비대칭 경우도 반영할 수 있으며, 비용계수 또한  $D$ 로부터 자유로운 공정능력지수로서 식 (10)과 같다.  $C_{pm+}$ 를 적용한 1개 적합품  $X$ 의 손실비용  $L(X, m)$ 은 식 (11)과 같으며, <Figure 2>에 나타내었다.

$$C_{pm+} = (USL - LSL) / 6\sqrt{E[L(X, m)]} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} L(X, m) &= k_1(X - m)^2, \quad (LSL \leq X \leq m) \quad (11) \\ &= k_2(X - m)^2, \quad (m \leq X \leq USL) \end{aligned}$$



<Figure 2> Loss Function based on the  $C_{pm+}$

식 (11)에 의해 마모수준  $w$ 에서 1개 적합품  $X_w$ 에 의한 품질손실비용은  $L(X_w, m)$ 로 나타낼 수 있다. 그러나  $X_w$ 는 정규분포를 따르는 확률변수이므로, 모형에서의 1개 적합품당 품질손실비용은  $L(X_w, m)$ 의 기댓값이 되어야 하며, 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} E[L(X_w, m)] &= \int_{S_L}^m k_1(X_w - m)^2 f(X_w) dX_w \quad (12) \\ &+ \int_m^{S_U} k_2(X_w - m)^2 f(X_w) dX_w \end{aligned}$$

그러므로 생산량  $g(w)$ 를 고려한 마모수준  $w$ 에서의 품질손실비용은  $g(w)[L(X_w, m)]$ 이다. 구간  $[0 \sim w_l]$ 에서 발생하는 총품질손실비용은  $w$ 에 대한  $g(w)[L(X_w, m)]$ 의 누적 기댓값이므로 식 (13)으로 표현할 수 있다.

$$\text{총품질손실비용} = \int_0^{w_l} g(w) E[L(X_w, m)] dw \quad (13)$$

### 3.4 $C_{pm+}$ 를 적용한 최종 보전모형

보전구간  $[0 \sim w_l]$ 에서 발생하는 전체 비용  $TC(w, \mu_I)$ 는 식 (7)의 총부적합비용, 식 (13)의 총품질손실비용 그리고 마모수준과 무관한 상수인 1회 보전비용  $H$ 의 합으로

구성된다. 이 때, 모형의 전체비용  $TC(w_I, \mu_I)$ 는 다음 식 (14)와 같다.

$$TC(w_I, \mu_I) = \tag{14}$$

$$+D \left[ \int_0^{w_I} g(w) dw - \int_0^{w_I} \int_{S_L}^{S_U} g(w) f(X_w) dX_w dw \right]$$

$$+ \int_0^{w_I} g(w) E[L(X_w, m)] dw + H$$

전체 비용  $TC(w_I, \mu_I)$ 는 비용만의 함수이므로 이를 최소화 보전시기는  $w_I=0$  이 되므로 수리적 모형이 성립하지 않는다. 조정비용  $H$ 와 나머지 두 비용간의 절속관계가 존재하여 모형이 성립하기 위해서는  $TC(w_I, \mu_I)$ 를 마모한계로 나누어 단위 마모당 전체 비용  $TC(w_I, \mu_I)/w_I$ 을 최소화하는 모형으로의 전환이 필요하다. 그러므로 모형의 최종 목적식은 식 (15)가 되며, 이때 결정변수는 식 (15)를 최소화하는 마모한계  $w_I$ 과 초기 공구조정위치  $\mu_I$ 이다. 앞서 언급한 모든 사항들을 모두 통합한 보전모형은 다음과 같다.

Minimize  $TC(w_I, \mu_I)/w_I$ , Subject to  $w_I, \mu_I$

$$TC(w_I, \mu_I)/w_I = \tag{15}$$

$$+ \frac{D}{w_I} \left[ \int_0^{w_I} g(w) dw - \int_0^{w_I} \int_{S_L}^{S_U} g(w) f(X_w) dX_w dw \right]$$

$$+ \frac{1}{w_I} \int_0^{w_I} g(w) E[L(X_w, m)] dw + \frac{H}{w_I}$$

단,  $g(w) = l_0 - \gamma w^\delta$ , ( $\gamma \geq 0, \delta > 0$ )

$$f(X_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[ -\frac{\{X_w - (\mu_I + w)\}^2}{2(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)} \right]$$

$$(\alpha \geq 0, 0 \leq \beta \leq 1)$$

$$E[L(X_w, m)] = \int_{S_L}^m k_1 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w$$

$$+ \int_m^{S_U} k_2 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w$$

### 4. 결 론

본 연구는 공정평균이동 문제에 대한 것이다. 본 연구에서는 기존 연구들에서 지금까지 부분적으로 진행되어 온 여러 모형들을 통합한 보전모형을 제시했다.

본 보전모형에서는 마모수준의 증가에 대해 생산량이 상수가 아닌 감소함을 반영할 수 있는 함수  $g(w)$ 를 도입

했다. 공정분산에 대해서도 상수가 아닌 마모수준에 대해 함수  $\sigma^2(w)$ 로 설정함으로써 실제 가공공정을 반영할 수 있도록 했다. 특히 품질손실비용에 대해  $C_{pm}+$  개념을 도입하여, 품질특성치가 공정 목표값에 미달하거나 초과하는 경우에 대해 각기 달리 적용하게 함으로써 보다 실제 현장의 특성을 반영할 수 있도록 했다. 이렇게 생산 현장에서 발생하는 다양한 제반 상황들을 통합한 모형을 제시함으로써, 현장에서는 본 연구의 보전모형을 바로 적용할 수 있을 것으로 생각한다.

목적식  $TC(w_I, \mu_I)/w_I$ 을 최소화하는 두 개의 결정변수  $w_I$ 과  $\mu_I$ 가 존재함에 대해 이론적으로 증명할 수는 없다. 증명이 불가능 이유는 목적식에 적분불능 함수인 정규분포가 포함되어 있는 점과 보전구간  $[0 \sim w_I]$ 에서 목적식이 상한규격과 하한규격을 기준으로 미분 불가능 계단함수이기 때문이다.

추후 연구에서는 본 연구에서 상수로 처리한 보전비용을 마모수준에 대해 함수화 함으로써 보다 정교한 보전모형을 생각할 수 있으며, 크게는 전체 모형에 고장률을 도입한 보전모형으로도 전개도 가능하리라 생각한다.

### Acknowledgement

This study has been supported by a research fund of Kumoh National Institute of Technology, Korea(2019-104-087).

### References

- [1] Ahn, G.H. and Jang J.S., Determination of Starting Value and the Resetting Time for a Production Process with Linear Shift in a Process Mean, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 1998, Vol. 26, No. 4, pp. 51-64.
- [2] Arcelus, F.J., Banerjee, P.K., and Chandra, R., Optimal Production Run for a Normally Distributed Quality Characteristics Exhibiting Non-Negative Shifts in Process Mean and Variance, *IIE Transactions*, 1982, Vol. 14, No. 2, pp. 90-98.
- [3] Boyles, R.A., The Taguchi Capability Index, *Journal of Quality Technology*, 1991, Vol. 23, No. 1, pp. 17-26.
- [4] Chen, C.H., Determining the Optimum Process Mean based on Asymmetric Quality Loss Function and Rectifying Inspection Plan, *IEEE : Industrial Engineering Management Conference*, 2004, pp. 1080-1084.
- [5] Gibra, I.N., Optimal Control Processes Subject to Linear Trends, *The Journal of Industrial Engineering*, 1967, Vol. 18, No. 1, pp. 35-41.

- [6] Juran, J.M., Quality Handbook, McGraw-Hill Companies, Inc., 1962.
- [7] Kamat, S.J., A Smoothed Bayes Control of a Variable Quality Characteristic with Linear Shift, *Journal of Quality Technology*, 1976, Vol. 8, No. 2, pp. 98-104.
- [8] Lee, D.K., Determination of the Resetting Time to the Process Mean Shift based on the  $C_{pm}^+$ , *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2018, Vol. 41, No. 1, pp. 110-117.
- [9] Lee, D.K., Determination of the Resetting Time to the Process Mean Shift by the Loss Function, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2017, Vol. 40, No. 1, pp. 165-172.
- [10] Lee, D.K., Determination of the Wear Limit to the Process Mean Shift Problem with Varying Product and Process Variance, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2020, Vol. 43, No. 3, pp. 95-100.
- [11] Lee, D.K., Determination of Wear Limit and the Initial Position of Tool for a Machining Process, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 1994, Vol. 17, No. 31, pp. 91-98.
- [12] Lee, J.H., Park, T.H., Kwon, H.M., Hong, S.H., and Lee, M.K., Optimum Target Values for Manufacturing Processes when Drifting Rate in the Process Mean is Normally Distributed, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 2010, Vol. 38, No. 4, pp. 98-104.
- [13] Makis, V., Optimal Tool Replacement with Asymmetric Quadratic Loss, *IIIE Transaction*, 1996, Vol. 28, No. 6, pp. 463-466.
- [14] Manuele, J., Control Chart for Determining Tool Wear, *Industrial Quality Control*, 1945, Vol. 1, No. 6, pp. 7-10.
- [15] Park, D.K., Lee, J.S., and Jo, G.H., A Study on the Wearing Analysis of Insert Tip and Chip's Shape in Turning Operations, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2015, Vol. 16, No. 4, pp. 2430-2435.
- [16] Quesenberry, C.P., A SPG Approach to Compensating a Tool-Wear Process, *Journal of Quality Technology*, 1988, Vol. 20, No. 4, pp. 220-229.
- [17] Rahim, M.A. and Tuffaha, F., Integrated Model for Determining the Optimal Initial Settings of the Process Mean and the Optimal Production Run Assuming Quadratic Loss Functions, *International Journal of Production Research*, 2004, Vol. 42, No. 16, pp. 3281-3300.
- [18] Schneider, H., Colm O'Conneide, and Tang, K., Optimal Production Process Subject to AOQL Constraint, *Naval Research Logistics Quarterly*, 1988, Vol. 35, No. 3, pp. 383-396.

#### ORCID

Do-Kyung Lee | <http://orcid.org/0000-0003-3255-0261>