

Determination of the Wear Limit to the Process Mean Shift Problem with Varying Product and Process Variance

Do-Kyung Lee[†]

School of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology

생산량과 공정분산이 변하는 공정평균이동 문제의 마모한계 결정

이 도 경[†]

금오공과대학교 산업공학부

Machines and facilities are physically or chemically degenerated by continuous usage. One of the results of this degeneration is the process mean shift. The representative type of the degeneration is wear of tool or machine. According to the increasing wear level, non-conforming products cost and quality loss cost are increasing simultaneously. Therefore a periodic preventive resetting the process is necessary. The total cost consists of three items: adjustment cost (or replacement cost), non-conforming cost due to product out of upper or lower limit specification, and quality loss cost due to difference from the process target value and the product characteristic value among the conforming products. In this case, the problem of determining the adjustment period or wear limit that minimizes the total cost is called the 'process mean shift' problem. It is assumed that both specifications are set and the wear level can be observed directly. In this study, we propose a new model integrating the quality loss cost, process variance, and production volume, which has been conducted in different fields in previous studies. In particular, for the change in production volume according to the increasing in wear level, we propose a generalized production quantity function $g(w)$. This function can be applied to most processes and we fitted the $g(w)$ to the model. The objective equation of this model is the total cost per unit wear, and the determining variables are the wear limit and initial process setting position that minimize the objective equation.

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

1. 서 론

생산을 위해 사용하는 모든 설비들은 지속적인 사용으로 인해 설비의 노후화가 진행된다. 설비의 노후화에 의한 결과로서 제품은 설계상에의 최초 공정 규격으로부터 이탈이 발생하여 부적합품이 증가하며, 생산량은 감소하여 공정의 생산성이 저하된다. 마모를 포함하여 열

화가 진행되면, 품질특성치들의 평균은 규격의 상방향이나 하방향 중에서 어느 한 방향으로 이동하게 되는데, 이를 공정평균이동이라 한다. 열화현상이 진행되어 공정에 많은 비용을 초래하는 일정 시점에서는 설비의 교체나 조정이 필요하게 된다. 이 때, 공정 운영에 들어가는 비용을 최소화하는 조정시기 혹은 마모한계를 결정하는 문제를 공정평균이동 문제라 한다.

총비용의 구성은 조정비용(혹은 교체비용), 제품이 상한 규격이나 하한규격을 벗어남에 의한 부적합비용 그리고 적합품들 중에서 공정목표값과의 차이에 의한 품질손실 비용 등의 세 가지 항목으로 구성된다. 조정비용은 1회성

이며 마모정도와 무관한 상수이지만, 부적합비용과 품질손실비용은 마모가 진행됨에 대해 증가한다. 목적함수를 구성하는 이 세 가지 항목은 모두 비용이므로, 총비용을 최소로 하는 조정시기 즉, 마모한계는 생산을 하지 않을 때 총비용이 '0'이 되어 모형이 성립하지 않는다. 그러므로 궁극적인 모형은 단위 마모당 총비용을 최소화하는 마모한계 결정 형태로 전환된다. 이 경우, 마모가 진행됨에 의해 단위 마모당 감소하는 조정비용과 증가하는 부적합비용 및 품질손실비용 간의 절속관계에 의해 단위 마모당 총비용을 최소화하는 최적 마모한계를 결정하게 된다.

공정평균이동 문제는 '마모가 진행됨에 의해 증가하는 부적합비용을 고려하여 언제 설비를 조정할 것인가?'에 대한 접근을 시작으로 여러 방향으로 연구가 진행되어 왔다. 이들 연구들의 방향을 간략히 정리하면 다음과 같다. 1) 제품에 대한 부적합품 기준에 있어 한쪽 규격 혹은 양쪽 규격의 설정 2) 부적합품에 대한 적합품 대비 차등 판매 가격 설정 3) 적합품에 대한 품질손실비용의 설정. 4) 마모수준의 증가에 대해 공정분산의 변화 5) 마모수준의 증가에 대해 생산량의 변화 6) 마모수준의 증가에 대해 설비의 고장률 증가 7) 마모수준의 직접 관측 가능 여부 8) 재료비가 매우 고가라는 가정 하에 하한의 한쪽 규격만 설정하는 일명 '켄 공정 문제' 등이다.

본 연구에서는 위의 연구 분야들 중에서 1)의 기준에서는 양쪽 규격을 전제로 하며, 7)의 기준에서는 마모수준의 직접 관측이 가능한 경우를 전제로 하여 3), 4) 그리고 5)번째 분야를 통합한 모형을 제시하고자 한다. 즉, 적합품에 대해서도 품질비용 모형을 적용하고 마모수준 증가에 대해 공정분산과 생산량이 동시에 변화하는 경우에 대한 공정평균이동 문제의 모형을 제시한다.

2. 기존 연구

서론의 마지막 부분에서 언급한 공정평균이동 문제의 여덟 가지 연구 분야들 중에서 본 연구와 연관한 기존 연구들은 다음과 같다.

공정평균이동에 관한 분야는 Manuele[11]가 공구의 마모로 인한 선형이동 문제로 최초로 제기했다. 이 후 이 분야의 초기 연구들에서 Quesenberry[13], Schneider[15] 등은 마모수준을 직접 알 수 없는 경우, 생산한 제품의 특성치를 측정하여 관리도나 회귀모형을 사용하여 마모수준을 간접적으로 추정하고, 이를 통해 조정시기를 결정하는 연구를 제시했다.

마모수준을 직접적으로 측정할 수 있거나 마모수준을 알 수 있는 경우에 대한 연구들은 다음과 같다. 부적합비용 항목에 있어, 규격에 대한 설정 기준으로 Gibra[5]는 한

쪽 규격만 설정했으며, Kamat[6]은 양쪽 규격을 설정했다.

공정평균이동 문제에 손실함수를 도입한 연구로는 다구찌 손실함수와 규격상한을 적용한 Rahim과 Tuffaha[14] 연구가 있다. Bolyes[3]가 비대칭인 다구찌의 2차 손실함수 C_{pm} 를 제안한 이후, 이를 이용하여 공정평균이동 문제 를 취급한 Chen[4], Makis[10] 그리고 Ahn과 Jang[1]의 연구가 있다. 본 연구에서도 품질손실비용을 포함하므로 이 손실함수를 사용한다. 그러나 본 연구는 손실함수에 대한 세부 연구가 아닌 통합모형이므로 다구찌의 2차 손실함수를 그대로 적용한다.

생산량의 변화에 분야에서는 Lee와 Park 등[9]이 마모수준 증가에 대해 생산량이 정규분포를 따르는 경우를 제시했다. 그러나 이 설정은 단지 초기 잠시의 디버깅 기간에서나 생각해 볼 수 있는 수준일 뿐, 생산량이 정규분포처럼 마모수준 증가에 대해 증가하다가 감소한다는 설정은 현실적으로 거의 부합하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 생산량의 변화에 대해 대부분 경우에 부합하는 감소하는 형태의 일반화 함수를 제시하고 이를 통합모형에 적용한다.

공정분산의 변화에 대한 연구들로 Arcelus 등[2]은 조정기간 안에서 몇 단계의 마모구간을 설정하고, 공정분산이 마모 구간별로 알려진 상수라고 설정한 모형을 제시했다. Lee[8]는 마모수준의 증가에 대해 공정분산이 마모구간과 무관하게 연속적으로 증가하며, 증가하는 공정분산의 형태에 대해 concave하게 증가하는 함수인 모형을 제시하여 공정분산에 대한 모형을 일반화했다.

3. 모형의 구성

3.1 마모수준과 부적합률

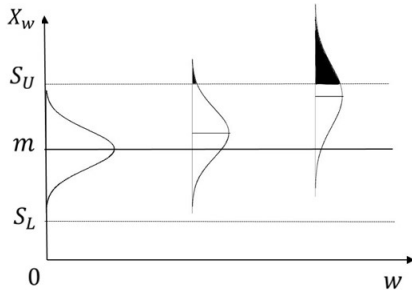
제품 생산을 위해 설비를 가동하면 마모와 같은 설비의 열화현상이 진행된다. 그러므로 제품 특성치 X 는 마모수준에 의해 영향을 받는다. 마모 수준을 w 로 나타낼 때, 마모수준 w 에서 생산된 제품의 특성치를 X_w 로 표시하기로 한다. 공정이 안정되어 있을 때, X_w 는 정규분포를 따른다. 정규분포는 평균과 분산을 매개변수로 하는 확률분포함수다.

마모수준 w 에서의 공정평균을 $\mu(w)$ 로 나타낼 때, $\mu(w)$ 는 식 (1)과 같다.

$$\mu(w) = \mu_I + w \quad (1)$$

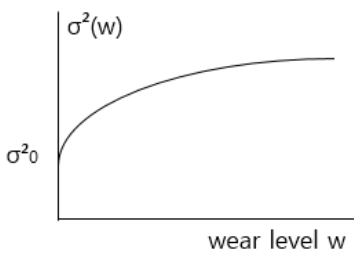
식 (1)의 μ_I 는 마모수준 w 가 공정의 재조정 시기인 마모한계 w_I 에 도달했을 때 조정 후 초기 공정평균이다. μ_I 를 공정 목표값인 m 으로 설정할 수도 있으나, 마모는 한

방향으로만 진행된다. 따라서 마모수준 w 증가에 대해 공정 부적합률 $P(w)$ 는 <Figure 1>의 검은색 부분과 같이 단조 증가 형태를 취한다.



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

앞으로 진행될 마모에 대해 미리 이를 반영하여 μ_I 를 m 보다 작게 설정함으로써, 구간 중 평균 부적합률을 낮출 수 있다. 그러므로 μ_I 는 본 모형의 결정변수인 마모한계 w_I 과 더불어 다른 하나의 결정변수다. <Figure 1>에서 S_U 와 S_L 은 각각 상한규격과 하한규격이다. 마모에 의한 제품의 영향에 대해 Park 등[12]은 마모에 대한 가공결과가 피삭재와 절삭공구(인서트 팁)의 상대적 강도와 회전 속도, 이송속도 등에 의해 영향을 받음을 제시했다. Lee [8]는 마모수준 w 에서의 공정분산 $\sigma^2(w)$ 를 실측자료를 분석하여 <Figure 2>의 관계를 도출했으며, 이를 식 (2)의 함수로 나타내었다.



<Figure 2> $\sigma^2(w)$ with Wear Level w

$$\sigma^2(w) = \sigma_0^2 + \alpha w^\beta, \quad (2)$$

단 $\alpha \geq 0, 0 \leq \beta \leq 1$

식 (2)에서 σ_0^2 는 설비의 초기 분산 즉, 마모가 진행되기 전의 공정분산으로 설비의 고유 정밀도다. 결과적으로 마모수준 w 에서의 X_w 는 식 (3)의 정규분포를 따르며, 공정 부적합률은 식 (4)와 같다.

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

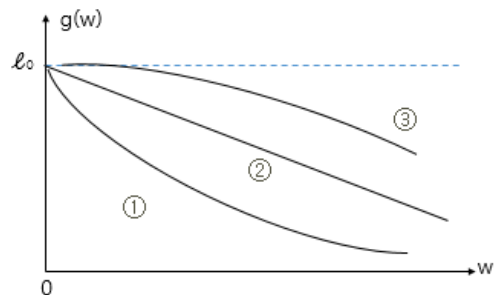
$$f(X_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{\{X_w - (\mu_I + w)\}^2}{2(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)}\right]$$

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

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

3.2 생산량 함수와 부적합품 비용

조정구간 $[0 \sim w_I]$ 에서의 전체 부적합비용을 산출하기 위해서는 개별 마모수준 w 에서 부적합률과 함께 마모수준 w 에서의 생산한 제품량이 필요하다. 마모의 진행에 따라 열화 현상에 의해 단위 마모당 제품 생산량 또한 작게 혹은 크게 영향을 받는다. 일반적으로 마모 증가에 대한 제품 생산량은 감소하며, 감소 형태는 해당 공정의 특성에 의해 다양한 형태를 취할 수 있다. 마모수준 w 와 제품 생산량 $g(w)$ 의 관계를 <Figure 3>에 나타내었다. <Figure 3>에서 l_0 는 공정을 조정된 직후, 마모가 진행되지 않은 $w=0$ 에서의 제품 생산량이다.



<Figure 3> $g(w)$ with Wear Level w

본 연구에서 도입하는 마모수준에 따른 제품 생산량 $g(w)$ 에 대해 다음의 식 (5)의 함수를 제시한다.

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

식 (5)의 γ 는 척도모수로서 $\gamma=0$ 인 경우는 생산량이 마모수준에 영향을 받지 않는 기존의 연구들과 동일한 모형이 된다. δ 는 형상모수이며, δ 값의 범주에 따라 $g(w)$ 는 다음의 모습을 취한다.

- 1) $0 < \delta < 1$, $g(w)$ 는 convex한 감소함수
- 2) $\delta = 1$, $g(w)$ 는 선형 감소함수
- 3) $\delta > 1$, $g(w)$ 는 concave한 감소함수

위의 δ 에 범주에 대한 1), 2) 그리고 3)의 $g(w)$ 형태는 각기 <Figure 3>의 ①, ② 그리고 ③에 해당한다.

초기 공구 조정위치 μ_I 하에서 마모수준 w 에서의 제품 부적합비용 $C_d(w, \mu_I)$ 는 부적합률 $P(w, \mu_I)$ 와 제품 생산수 $g(w)$ 그리고 단위 부적합품당 처리비용 D 의 곱으로 계산되며, 식 (6)과 같다.

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

마모한계를 w_I 이라 할 때, 구간 $[0 \sim w_I]$ 에서의 부적합 비용은 마모수준 w 에 대한 $C_d(w, \mu_I)$ 의 누적 기댓값이며, 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} E[C_d(w_I, \mu_I)] &= \int_0^{w_I} C_d(w, \mu_I)dw \\ &= D \left[\int_0^{w_I} (l_0 - \gamma w^\delta) dw \right. \\ &\quad \left. - \int_0^{w_I} \int_{S_L}^{S_U} (l_0 - \gamma w^\delta) f(X_w) dX_w dw \right] \end{aligned} \quad (7)$$

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

3.3 생산량 함수와 품질손실비용

규격을 만족하는 적합품들은 비용이 발생하지 않는다는 기존 개념에서 벗어나, 적합품이더라도 설계상의 공정 목표값 m 과 편차에 따른 차이를 비용으로 전환한 것이 품질손실비용이다.

마모수준 w 에서의 제품 특성치를 X_w 라 할 때, 다구찌의 손실함수 $L(X_w)$ 는 식 (8)과 같다.

$$L(X_w) = k(X_w - m)^2 \quad (8)$$

식 (8)에서 공정 목표치 $m = (S_L + S_U)/2$ 이며, k 는 공정의 특성에 해당하는 비용계수다. 손실함수의 형태에 대해서 여러 공정상황 하에서의 변형에 대한 연구들이 있으나, 본 연구의 모형은 품질손실함수에 대한 세부 연구가 아니므로 다구찌의 손실함수를 그대로 적용한다.

Lee[7]는 적합품에 대해서 식 (2)의 일반화 함수의 공정분산을 도입하여 다구찌 품질손실비용 항목을 산정하는 모형을 제시했다.

마모수준 w 에서 1개 적합품에 의한 품질손실비용은 식 (9)와 같다. 초기 공구 조정위치 μ_I 및 이 때 생산한 제품량 $g(w)$ 를 고려한 품질손실비용 $C_Q(w, \mu_I)$ 는 식 (10)과 같다.

$$\int_{S_L}^{S_U} k(X_w - m)^2 f(X_w) dX_w \quad (9)$$

$$C_Q(w, \mu_I) = g(w) \int_{S_L}^{S_U} k(X_w - m)^2 f(X_w) dX_w \quad (10)$$

전체 구간 $[0 \sim w_I]$ 에서 발생하는 총품질손실비용은 w 에 대한 $C_Q(w, \mu_I)$ 의 누적 기댓값이므로 $E[C_Q(w, \mu_I)]$ 로 표현할 수 있으며, 식 (11)과 같다.

$$E[C_Q(w, \mu_I)] = \int_0^{w_I} g(w) \int_{S_L}^{S_U} k(X_w - m)^2 f(X_w) dX_w dw \quad (11)$$

$$= k \int_0^{w_I} (l_0 - \gamma w^\delta) \int_{S_L}^{S_U} (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w dw$$

단, $f(X_w)$ 는 식 (7)과 동일한 함수다.

3.3 생산량 함수를 고려한 최종모형

제품생산 시점 즉, 마모수준 $w=0$ 에서 조정시기 w_I 까지 발생하는 총비용은 세 가지 항목으로 구성된다. 이들 중 두 가지는 앞의 3.2절에서 언급한 부적합비용과 3.3절에서 언급한 품질손실비용이다. 나머지 항목은 1회의 조정에서 발생하는 조정비용이다. 조정비용은 마모수준과 무관한 상수이므로 이를 H 로 표현할 때, 초기 공구 조정위치 μ_I 하에서 전체비용 $TC(w_I, \mu_I)$ 는 다음과 같다.

$$TC(w_I, \mu_I) = H + E[C_d(w_I, \mu_I)] + E[C_Q(w_I, \mu_I)] \quad (12)$$

서론에서 언급한대로 총비용 $TC(w_I, \mu_I)$ 는 비용만의 함수이므로 이를 최소화 하는 마모한계 $w_I=0$ 이다. 즉, 제품을 생산하지 않는 것이 최적이 되므로 모형이 성립하지 않는다. 조정비용 H 와 나머지 두 비용간의 절속관계가 존재하여 모형이 성립하기 위해서는 $TC(w_I, \mu_I)$ 를 마모한계로 나누어 단위 마모당 총비용을 최소화하는 모형으로의 전환이 필요하다. 그러므로 모형의 최종 목적식은 식 (13)이 되며, 이를 최소화 하는 마모한계를 결정하는 모형이다.

$$TC(w_I, \mu_I) / w_I = [H + E[C_d(w_I, \mu_I)] + E[C_Q(w_I, \mu_I)]] / w_I \quad (13)$$

또한, 단위 마모당 총비용 식 (13)은 서론에서 언급한 이유에 의해 초기 공구 조정위치 μ_I 에 의해서도 목적식의 증감이 발생한다. 그러므로 목적식 $TC(w_I, \mu_I) / w_I$ 를 최소화하는 모형의 결정변수는 마모한계 w_I 과 더불어 μ_I 의 두 개가 된다. 이상에서 언급한 사항을 모두 고려한 모형의 최종 목적식의 최종 형태는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &TC(w_I, \mu_I) / w_I \\ &= H / w_I + \frac{D}{w_I} \left[\int_0^{w_I} (l_0 - \gamma w^\delta) dw \right. \\ &\quad \left. - \int_0^{w_I} \int_{S_L}^{S_U} (l_0 - \gamma w^\delta) f(X_w) dX_w dw \right] \\ &\quad + \frac{k}{w_I} \int_0^{w_I} (l_0 - \gamma w^\delta) \int_{S_L}^{S_U} (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w dw \end{aligned} \quad (14)$$

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

4. 결론

본 연구는 공정평균이동 문제에 대한 것이다. 우리는 본 연구를 통해 기존 논문들에서 별도로 연구되어 오던 생산량의 변화, 적합품에 있어서의 품질손실비용 그리고 공정분산의 변화를 동시에 고려하는 모형을 제시했다. 특히, 마모수준의 증가에 대한 생산량의 변화에 대해서 대부분의 공정에 적용할 수 있는 일반화된 함수 $g(w)$ 를 제시하고 이를 모형에 적합시켰다. 이렇게 생산 현장에서 발생하는 여러 상황을 통합한 모형을 제시함으로써, 현장에서는 본 연구의 모형을 바로 적용 가능할 것으로 생각한다.

본 모형의 목적식에는 마모한계와 초기 공정조건의 두 개의 결정 변수 외에도 11개의 매개변수가 포함되어 있다. 이들 매개변수들은 서로 독립적이지 않으며, 매우 많은 부분적 연관성을 가지고 있다. 그러므로 실제 수치적 분석을 위해서는 현장에서 사용하고 있는 자료가 필요하다.

모형의 목적식을 최소화하는 두 개의 결정변수 즉, 마모한계 w_l 과 μ_l 가 존재함에 대해서는 이론적으로 증명할 수는 없다. 증명이 불가능한 두 가지 이유는 첫째, 목적식에 적분불능함수인 정규분포가 포함되어 있는 점과 둘째, 품질손실비용이 상한규격과 하한규격을 기준으로 규격 안에서만 존재한다는 점이다. 그러나 목적식을 구성하는 항목에서 마모당 조정비용은 단조 감소의 convex 함수이며, 부적합비용은 단조 증가함수이고 품질손실비용은 규격 안에서 단조 증가의 convex 함수임을 알 수 있다. 이들 세 항목으로 구성되는 목적식이 convex 함수임을 보장할 수는 없으나, 적어도 단봉 함수가 됨은 논리적으로 예상 가능하다.

본 연구에 이어 추후 연구에서는 간단하게는 마모수준의 증가에 대해 조정비용도 증가하는 함수 형태로 모형을 일반화 할 수 있을 수 있을 것이며, 품질손실함수에 대해 보다 일반 형태인 C_{PM}^+ 를 도입할 수 있을 것이다. 그리고 이동평균문제의 다른 분야와 본 모형을 추가로 통합한 모형의 전개도 가능할 것으로 생각한다.

Acknowledgement

This study has been supported by a research fund of Kumoh National Institute of Technology, Korea(2018-104-049).

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] 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.
- [7] Lee, D.K., Determination of the retting 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Makis, V., Optimal tool replacement with asymmetric quadratic loss, *IIE Transaction*, 1996, Vol. 28, No. 6, pp. 463-466.
- [11] Manuele, J., Control chart for determining tool wear, *Industrial Quality Control*, 1945, Vol. 1, No. 6, pp. 7-10.
- [12] 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.
- [13] Quesenberry, C.P., A SPG approach to compensating

- a tool-wear process, *Journal of Quality Technology*, 1988, Vol. 20, No. 4, pp. 220-229.
- [14] 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.
- [15] Schneider, H., Colm O’Cinneide, and Tang, K., Optimal production process subject to AOQL constraint, *Naval Research Logistics Quarterly*, 1988, Vol. 35, No. 3, pp. 383-396.

ORCIDDo-Kyung Lee | <http://orcid.org/0000-0003-3225-0261>