

Facility Maintenance Model for Process Mean Shift Problem in Automated Process

자동화공정에서 공정평균이동 문제의 설비보전 모형

Do-Kyung Lee¹

이도경¹

¹ Professor, Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea,
dklee@kumoh.ac.kr

Abstract: Factory automation is already spreading globally for various reasons such as rising labor costs, energy efficiency, and ensuring safety. Automated facilities are composed of robots and sensors that collect data. In order to ensure continuous production, which is the biggest advantage of factory automation, and to minimize total operating costs, an optimized facility maintenance schedule including the process mean shift problem presented is needed. Because the facility maintenance models in automated factories must be applied to actual sites, maintenance models that include theoretical assumptions or partial models cannot be used. Therefore, in order to find the wear limit(or maintenance cycle) and initial position of equipment that minimizes the total cost, we propose an integrated process mean shift model which is composed of three items, namely nonconformity cost, quality loss cost, and maintenance cost. We present generalized functions that can reflect the characteristics of individual items rather than constants for various parameters, including process variance and production volume, that make up individual items. This allows us to estimate parameters that minimize total cost through the algorithms using data collected by sensors and derive the optimal maintenance cycle and initial equipment location. Regarding the maintenance cost, due to the quality assurance policy, we considered cases in which maintenance within a certain period is provided free of charge or at the same cost. We converted the maintenance cost into a function so that the cost increase after the warranty period can reflect various types. As a result, we believe that this study can be applied to various automated facilities. This is a process mean shift model for cases where the facility deteriorates due to continuous production and corresponds to a preventive maintenance model that excludes catastrophic failures due to abnormal causes such as power outages or defects in the facility itself.

Keywords: Process Mean Shift, Factory Automation, Facility Maintenance, Quality Loss Function, Adjustment Cost Function

요약: 공장자동화는 인건비 상승, 에너지 효율, 안전 확보 등의 다양한 이유에 의해 이미 세계적으로 확산하고 있는 추세이며, 자동화 설비는 기본적으로 데이터를 수집하는 센서 및 로봇들로 구성된다. 공장자동화의 가장 큰 장점인 연속 생산을 보장하고, 총 운영비용을 최소화하기 위해서는 무엇보다, 본 연구에서 제시하는 공정평균이동 문제를 포함한 최적화된 설비보전 일정이 필요하다. 자동화 공장에서의 설비보전 모형은 실제 현장에 적용되어야 하므로, 이론적 가정이 포함된 보전모형이나 부분적인 모형은 사용할 수 없다. 그러므로 본

Received: August 13, 2023; 1st Review Result: September 15, 2023; 2nd Review Result: October 17, 2023
Accepted: November 25, 2023

연구에서는 실제 자동화 설비의 총비용을 최소로 하는 마모한계 혹은 보전주기 및 설비의 초기 위치를 찾기 위해, 공정평균이동 모형을 구성하는 세 가지 항목인 부적합 비용, 품질손실비용 및 보전비용을 통합한 모형을 제시한다. 그리고 개별 항목들을 구성하는 공정분산, 생산량 등을 비롯한 여러 매개변수들에 대해 상수가 아니라 해당 항목들의 특성을 반영할 수 있는 일반화 함수를 제시한다. 이로써 센서들에 의해 수집된 데이터를 사용하여 알고리즘을 통해 전체 비용을 최소화하는 매개변수들을 추정할 수 있으며, 최적 보전주기와 초기 설비위치를 도출할 수 있다. 특히, 보전비용에 대해서는 품질보증 정책으로 인해, 일정 기간 이내의 보전에 대해서는 무상 혹은 동일 비용으로 제공하는 경우 및 이 기간 이후의 비용 증가에 대해 다양한 형태로 반영할 수 있도록 보전비용을 함수화 하였다. 이로써 본 연구가 다양한 자동화 설비에 적용 가능하리라 생각한다. 이 설비보전 모형은 지속적인 생산으로 인해 설비가 열화하는 경우에 대한 공정평균이동 모형으로, 정전이나 설비 자체의 불량과 같은 이상원인에 의한 파국고장은 제외한 예방보전 모형에 해당한다.

핵심어: 공정평균이동, 공장자동화, 설비보전, 품질손실함수, 조정비용함수

1. 서론

공장자동화는 여러 요인으로 인해 현대 제조 환경에서 필수적인 사항이 되었다. 자동화는 중단 없이 정확하고 일관성 있는 작업을 가능하게 함으로써, 일관된 제품 품질을 보장하여 생산 효율성과 비용절감을 크게 향상시킬 수 있으며 노동쟁의에 의한 태업이나 파업과 무관하게 사업의 연속성을 보장한다. 또한, 위험한 작업을 자동화함으로써, 기업은 작업장 안전을 향상시키고 점차 강화되는 산업재해법에 대응할 수 있다. 이에 더하여 공장자동화는 여러 센서들로부터 데이터를 수집하고 이를 분석하여 최적의 공정 작업조건을 제시함으로써 기업의 경쟁력을 높인다.

공장자동화에는 큰 초기 비용이 수반되므로 이의 도입에 앞서 자동화의 특징들을 명확히 이해하고, 도입 목적이 이에 부합하는지에 대한 분석이 선행되어야 한다. 일단 확정된 자동화 시스템을 변경하기 위해서는 생산의 단절로 인한 비용 및 기타 비용이 발생하므로 자동화 도입 전에 제조공정이 공정표준이나 작업표준에 의한 일관성을 확보하고 있는지의 확인이 필요하다. 자동화 설비 운영은 데이터, 센서 및 통신 시스템에 의존한다. 그러므로 공장자동화는 자동화 설비들 이외에 이들을 운영할 수 있는 데이터 기반 연결이 필요하다. 데이터를 수집하는 센서들, 센서들에서 수집된 데이터를 서로 연결해줄 IoT 및 이들을 총체적으로 운영할 클라우드 시스템과 어플리케이션이 필요하다.

공장자동화의 가장 큰 장점인 연속 생산을 보장하기 위해서는 무엇보다, 본 연구에서 제시하는 공정평균이동 문제를 포함한 최적화된 설비보전 일정이 필요하다.

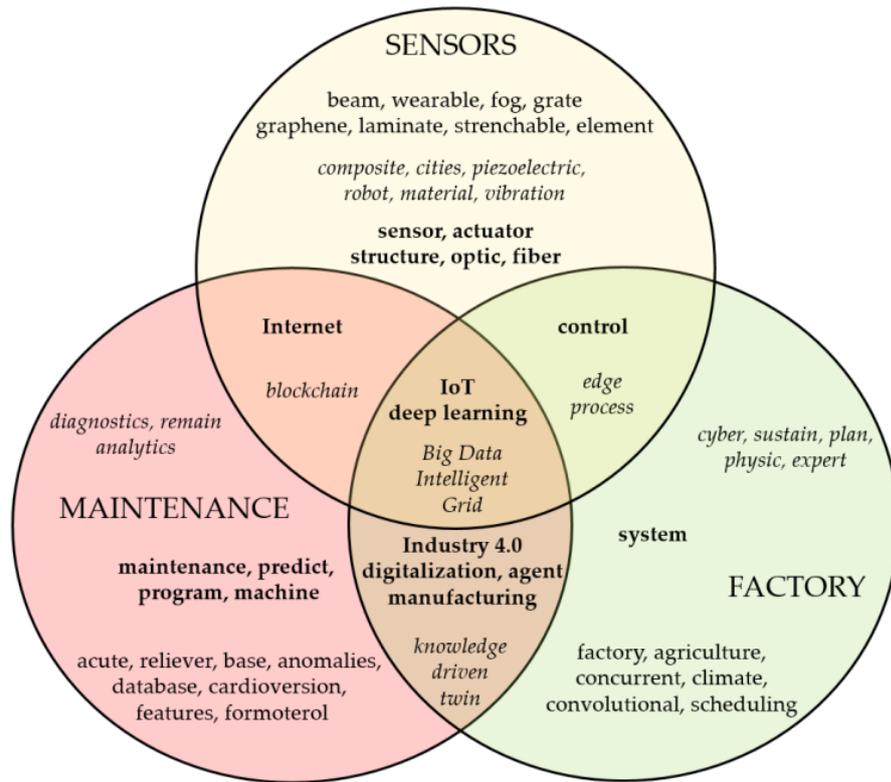
공장자동화에서 설비보전의 역할은 다음과 같다.

1) 자동화 공장은 복잡한 기계, 로봇 및 시스템에 의존한다. 계획된 설비보전은 이러한 자산을 고장으로부터 보호하여 상당한 비용 손실을 방지할 수 있으며, 예기치 않은 가동 중지시간을 줄인다. 가동 중지는 공장 내부에서의 비용만 유발하는 것이 아니라, 납기지연이라는 경영상의 큰 손실 또한 유발할 수 있다.

2) 자동화 장비는 제조업체에게 상당한 설비투자를 요구한다. 일상적인 검사, 운할 및 수리를 포함한 적절한 설비보전은 이들 고가 자산의 평균수명을 연장한다. 이는 비용이

많이 드는 수리, 조정 및 파국고장으로 인한 교체비용 및 내외부 실패비용을 최소화 할 수 있다.

3) 자동화 설비에서 많은 센서들을 통해 생성되는 데이터로부터 열화 및 고장패턴을 분석하여 보다 실무적인 예방보전이 가능하다. 이를 위해서는 인공지능의 비전시스템과 같은 물리적 추가 설비가 필요하다. 그리고 이를 해석하기 위한 기계학습(ML: machine learning)을 포함한 알고리즘이 요구된다. 공장자동화에서 설비보전은 단순한 일상적인 작업이 아니며, 자동화 시스템의 기능, 효율성 및 수명을 유지하는 전략적 필수 요소다. Martin 등[1]은 이들 관계를 [그림 1]로 나타내었다.



[그림 1] 감지를 기반으로 분석된 영역의 주요 용어

[Fig. 1] The Top Terms in Analysed Areas based on the Detection

자동화 설비는 [그림 1]에서와 같이 수많은 상호 연결된 구성 요소의 원활한 기능에 좌우되며, 본 연구에서 다루는 ‘공정평균이동(process mean shift)’ 문제와 같은 설비보전 활동을 통해, 설비는 최적의 성능을 유지할 수 있으며, 설비 보전의 최적주기 결정을 통해 부적합품 비용, 다구찌의 품질손실비용(quality loss cost) 및 보전비용의 총합을 최소화 할 수 있다. 본 연구에서는 실제 자동화 설비의 총비용을 최소로 하는 마모한계(보전주기) 및 설비의 초기 위치를 찾기 위해, 기존 연구에서 개별적으로 취급되어진 공정분산, 생산량, 품질손실비용 및 보전비용과 관련한 매개변수들을 통합한 모형을 제시함과 동시에 개별 매개변수들에 대해서 상수가 아닌 해당 특성을 반영한 일반화 함수를 적용한다.

2. 공정평균이동 분야 관련 연구

2.1 열화현상과 문제점

모든 설비들은 지속적인 사용에 의해 그 성능이 저하된다. 이를 열화현상이라고 하며, 이들 열화현상은 본 연구의 대상인 ‘공정평균이동’을 유발한다. 대표적인 열화현상의 유형으로 열 마모(소성변형), 연마 마모, 접촉 마모 그리고 크레이터 마모 등이 있다. 이들 외에도 공정변화를 유발하는 열화 유형으로서는 치핑 및 파손, 노치 마모 그리고 에지 치핑 등이 있으며, 이들은 고온이나, 경화, 탄성 저하 등으로 공구 마모를 가속화하고 절삭 부하를 증가시켜, 설비 수명을 줄이고 궁극적으로는 부적합품이나 설비 파손을 유발한다.

산업 환경에서 열화현상은 여러 부문에 걸쳐 광범위한 영향을 미치는데, 이의 결과에 대해 정리하면 다음과 같다. 1)성능저하: 시간이 지남에 따라 장비 구성 요소는 마모로 인해 성능이 저하된다. 이로 인해 운영 효율성이 감소하고 출력 품질이 저하되며 고장이 증가한다. 이러한 성능 저하는 생산성 저하, 일정 지연 및 고객 불만을 야기한다. 2)유지보수 비용 증가: 장비가 노후화됨에 따라 보수 요구 사항이 증가한다. 수리는 더욱 빈번해지고 복잡해진다. 특히 자동화공정의 고가 장비에서 발생하는 이 문제는 공정을 유지함에 있어 핵심적이며, 본 연구에서 대상이 되는 분야다. 3)계획되지 않은 중단 시간: 노후 장비는 갑작스러운 고장에 취약하여 계획되지 않은 가동중단으로 이어진다. 이로 인해 생산일정이 중단되어 매출 손실, 납기지연으로 인한 계약 불이행 비용 그리고 수주 불발로 인한 기회비용 등이 발생한다. 4)감가상각: 노후 장비의 재판매 또는 회수 가치는 당연히 줄어들지만, 자동화 설비와 같은 분야의 경우 감가상각의 정도는 일반적으로 그 정도가 크다. 특정 산업분야의 변화 속도에 따라 감가상각 반영 정도가 상이하므로, 반도체, 항만 등의 산업분야로 한정된 연구들이 발표되고 있다.

2.2 설비마모에 따른 설비보전 정책

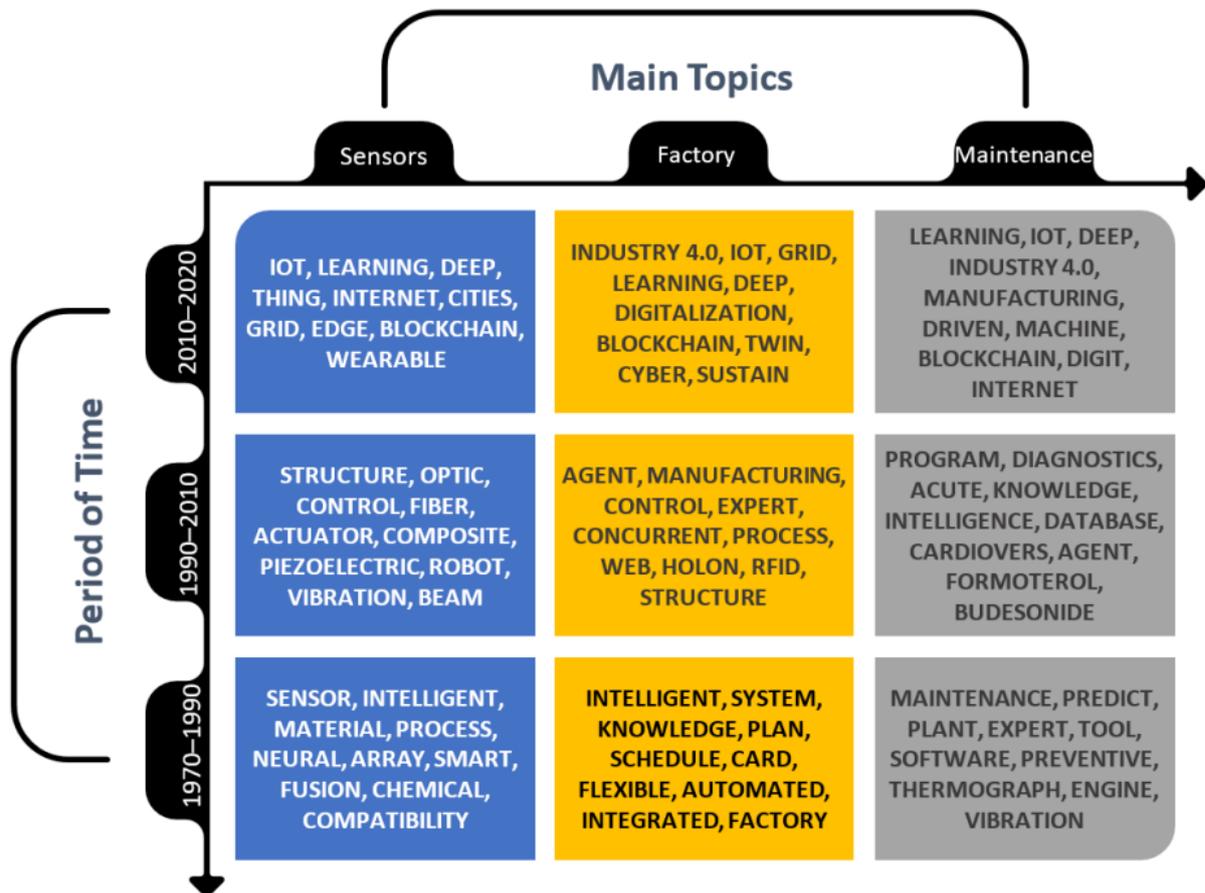
모든 설비는 유지 보수 활동이 필요하지만, 과도한 유지보수는 불필요한 비용으로 이어질 수 있고, 느슨한 유지보수는 생산성 저하를 포함하여 앞서 언급한 여러 형태의 비용을 야기한다. 그러므로 공장 운영 전반의 총비용을 최소화하는 설비보전 정책(보전주기 결정)이 필요하다. 이 때, 설비보전비용을 포함하여 공정 운영에 들어가는 총비용을 최소화하는 조정 시기 혹은 마모한계를 결정함을 ‘공정평균이동 문제’라 한다. 외부의 이상원인 없이 공정이 안정된 상태 즉, 우연원인에 의해서만 공정이 진행된다면, 품질특성치들은 앞서 언급한 열화현상으로 인해 최초 설계상의 목표값에서 규격의 상방이나 하방 중에서 어느 한 방향으로 이동하게 되는데, 이를 공정평균이동이라 한다. 이런 자연스러운 공정평균의 이동에 대해, ‘6시그마’에서는 단기와 장기 공정능력지수에서 구분하며, 정상적인 열화에 의한 평균의 이동 정도는 설계상 목표값 대비 공정 표준편차의 1.5배를 기준으로 하고 있다.

공정평균이동 모형의 총비용은 설비의 보전비용, 생산 제품들이 상한 혹은 하한규격을 벗어남에 의한 부적합비용 그리고 적합품들 중에서 제품특성치와 공정 목표값과의 차이에 의한 품질손실비용의 세 가지 항목으로 구성된다. 부적합비용과 품질손실비용은 열화가 진행됨에 대해 증가한다. 모형의 총비용을 구성하는 이 세 가지 항목은 모두 비용이므로, 총비용을 최소로 하는 조정 시기는 생산을 하지 않을 때인 ‘0’이 되어 모형이

성립하지 않는다. 그러므로 목적함수는 총비용에서 단위 마모당 총비용 형태로 전환한다. 이 경우, 마모가 진행됨에 의해 단위 마모당 감소하는 조정비용과 반대로 증가하는 부적합비용 및 품질손실비용 간의 절속관계에 의해 목적함수를 최소화하는 최적 보전 시기를 도출할 수 있다.

2.3 기존 연구

공정평균이동에 관한 연구는 Manuele[2]가 공구의 마모로 인한 선형이동 문제로 최초로 제기했다. Quesenberry[3], Schneider 등[4]은 생산한 제품의 특성치를 측정하여 관리도나 회귀모형을 사용하여 마모수준을 간접적으로 추정하고, 이를 통해 보전시기를 결정하는 연구를 제시했는데, 이들 연구들은 센서와 같은 계측 장비가 미미해서 마모수준을 직접 알 수 없었던 초기 공정 시스템에 대한 연구들이었다.



[그림 2] 감지분석 주제 요약

[Fig. 2] The Summary of Detection Analysis for Main Topics

센서를 통해 마모수준을 알 수 있는 경우에 대한 연구들에 대해 Martin 등[1]은 연대별로 정리하였는데 이를 [그림 2]에 나타내었다. 이 그림에서 보는 것처럼 2010년까지는 프로그램, 지식기반, 데이터 베이스 등의 이론적 연구가 주 연구대상이었으며, 2010년 이 후에는 이전까지의 이론적 모형에 대해 통신을 위주로

진행되고 있다. 이 후에는 이론적 확장보다는 산업계 전반의 새로운 화두인 인공지능을 적용하는 방향으로 전개되고 있다. AI는 대규모 데이터 세트를 실시간으로 분석하여 이에 따라 매개변수를 조정하여 제조 프로세스를 최적화할 수 있다. 여기서 주목해야 할 사항은 AI를 적용할 이론적 설비보전 모형이 실제 공정을 제대로 반영하고 있어야 한다는 것이다. 특히, 모형에 포함되어 있는 매개변수의 유형이 고정된 상수값이 아닌 함수 형태이어서 확장성과 유연성을 담보해야 AI에 의한 의사결정이 최적이라는 보장을 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 기존의 공정평균이동 문제의 보전모형에서 상수로 가정한 모든 매개변수들에 대해 시스템의 특성을 반영한 함수를 제시한다.

부적합비용 항목에 있어, 규격에 대한 설정 기준으로 Gibra[5]는 한쪽 규격만 설정했으며, Kamat[6]은 양쪽 규격을 설정했다. 이들 연구는 Quesenberry[3], Schneider[4]와 달리 마모수준을 직접적으로 측정할 수 있거나 마모수준을 알 수 있는 경우이며, 본 연구도 여기에 해당한다.

다구찌는 규격을 만족하는 적합품일지라도, 특성값과 설계 목표값과의 차이에 대해 이를 비용으로 처리함이 바람직하다고 제안했다. Rahim과 Tuffaha[7]는 이 개념을 공정평균이동 문제에 도입했으며, 이것이 품질비용 항목이다. Bolyes[8]는 설계상의 목표값을 기준으로 상한과 하한규격 방향에 대해 각기 다른 비대칭 2차 손실함수 $C_{pm} +$ 를 제시하여, 다구찌의 손실함수를 확장시켰다. 이후 Chen[9], Makis[10], 그리고 Lee[11]는 $C_{pm} +$ 를 공정이동평균 문제에 도입한 모형을 제시했다. 본 연구에서도 품질손실비용에 대해 $C_{pm} +$ 손실함수를 사용한다.

마모수준에 대한 공정분산의 특성에 대해, 대부분의 연구들은 상수로 처리해 왔다. 그러나 실제 상황에서는 마모가 진행됨에 따라 설비 유격 즉, 공정분산이 증가한다. Arcelus 등[12]은 몇 단계의 임의 마모구간을 설정하고, 공정분산이 마모 구간별로 알려진 상수라고 설정한 모형을 제시했다. Lee[13]는 절삭공정의 실측 자료들을 사용하여, 공정분산은 마모수준 증가에 대해 concave한 증가함을 보였다. 그리고 그는 공정분산의 증가를 함수로 제시하고 이를 공정평균이동 문제에 적용한 모형을 제시했다.

마모수준에 대한 생산량 변화에 있어서, 이전 연구에서는 상수로 설정했었다. Lee와 Park 등[14]은 마모수준 증가에 대해 생산량이 정규분포를 따르는 경우를 제시했다. 그러나 생산량이 마모수준 증가에 대해 증가하다가 감소한다는 설정은 초기 디버깅 기간에서나 생각해 볼 수 있을 뿐, 설비의 생애주기에 있어서는 현실성이 없다. 이에 대해 Lee[15]는 마모수준 증가에 대해 생산량이 감소하는 형태의 일반화 함수를 제시하고, 이를 반영한 공정평균이동 모형에 반영했다.

보전비용에 있어 기존 공정평균이동 연구들이 사용기간이나 마모정도와 무관한 상수로 처리되어 왔다. 일반적으로 사용시간이 소요될수록 보전비용은 비감소 즉, 증가하거나 적어도 동일함이 일반적이다. Chang 등[16]을 비롯한 다수의 과국고장 및 수리 보전 모형에서는 교체비용은 동일한 큰 비용이 소요되며, 수리나 조정과 같은 예방 보전비용은 마모수준에 대해 동일하거나 증가 형태로 설정한다. 본 공정평균이동 연구에서는 이 개념을 도입하여, 보전비용을 마모수준에 대한 상수를 포함한 비감소함수를 제안하며, 이를 반영한 확장된 공정평균이동 모형을 제시한다.

3. 공정평균이동 보전모형

3.1 마모수준과 부적합비용

설비의 마모수준을 w 로 나타낼 때, 마모수준 w 에서 생산된 제품 특성값을 X_w 로 표시하기로 한다. 공정이 안정되어 있을 때, X_w 는 정규분포를 따르며, 평균과 분산을 매개변수로 하는 확률함수다. 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 보전시기인 마모한계 w_I 에 도달했을 때, 보정하는 장비의 초기 위치다. μ_I 를 공정 목표값인 m 으로 설정할 수도 있으나, 앞으로 진행될 마모에 대해 미리 이를 반영하여 μ_I 를 m 보다 작게 설정함으로써, 보전구간 중 평균 부적합률을 낮출 수 있다. 그러므로 μ_I 는 본 모형의 결정변수인 보전시기 즉, 마모한계 w_I 과 더불어 또 다른 결정변수다. 마모수준에 따라 공정의 변동은 증가한다. 절삭공정에서 마모수준과 피삭재의 실측자료를 분석하여, 마모수준과 공정분산의 관계를 식 (2)의 함수로 나타내었다.

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

식 (2)의 σ_0^2 는 설비의 초기 분산으로서 마모가 진행되기 전 설비의 고유 정밀도다. α 는 증가를 나타내는 양의 값을 갖는 척도모수이며, β 는 concave한 증가를 나타내는 형상모수다. 그러므로 마모수준 w 에서의 제품 특성값 X_w 는 식 (3)의 정규분포를 따른다. 이 때, 초기 위치 μ_I 하에서 상한규격 S_U 와 하한규격 S_L 을 벗어나는 공정 부적합률 $P(w, \mu_I)$ 는 식 (4)와 같다.

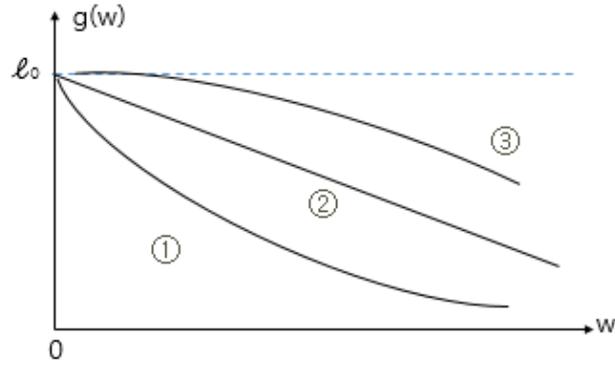
$$X_w \sim N(\mu_I + w, \sigma_0^2 + \alpha w^\beta),$$

$$f(X_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{\{X_w - (\mu_I + w)\}^2}{2(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)} \right] \quad (3)$$

$$P(w, \mu_I) = 1 - Pr(S_L \leq X_w \leq S_U) = 1 - \int_{S_L}^{S_U} f(X_w) dX_w \quad (4)$$

3.2 생산량 함수와 부적합품 비용

보전주기 $[0 \sim w_I]$ 에서의 전체 부적합비용을 산출하기 위해서는, 마모수준 w 에서 부적합률과 함께 생산한 제품수가 필요하다. 마모의 진행에 따라 단위 마모당 제품 생산량 또한 영향을 받는다. 일반적으로 마모가 증가할수록 제품 생산량은 감소하며, 감소 형태는 해당 공정의 특성에 의해 다양한 형태를 취할 수 있다. Lee[15]가 제시한 마모수준 w 와 제품 생산량 $g(w)$ 의 관계를 [그림 3]에 나타내었다. [그림 3]에서 l_0 는 공정을 조정하지 않은 후, 마모가 진행되지 않은 $w = 0$ 에서의 제품 생산량이다.



[그림 3] 마모수준 w 에 따른 제품 생산량 $g(w)$

[Fig. 3] Production Quantity $g(w)$ with Wear Level w

마모수준과 제품 생산량 $g(w)$ 의 관계는 식 (5)와 같다.

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

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

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, 식 (6)과 같다.

$$C_d(w, \mu_I) = DP(w, \mu_I)g(w) \tag{6}$$

마모한계를 w_l 이라 할 때, 구간 $[0 \sim w_l]$ 에서의 부적합비용은 w 에 대한 $C_d(w, \mu_I)$ 의 누적기댓값이므로, 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[C_d(w_l, \mu_I)] &= \int_0^{w_l} C_d(w, \mu_I) dw \\ &= D \left[\int_0^{w_l} (l_0 + \gamma w^\delta) dw - \int_0^{w_l} \int_{S_l}^{S_u} (l_0 + \gamma w^\delta) f(X_w) dX_w dw \right] \end{aligned} \tag{7}$$

3.3 생산량 함수와 품질손실비용

적합품이더라도 설계상의 공정 목표값 m 과 편차에 따른 차이를 비용으로 전환한 것이 품질손실비용이다. 특성치 X_w 에 대한 다구찌의 품질손실함수(quality loss function)를 일반화한 $C_{pm}+$ 및 이에 의한 품질손실비용 $L(X_w, m)$ 은 각각 식 (8), (9)와 같다.

$$C_{pm}+ = (USL - LSL) / 6\sqrt{E[L(X, m)]} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} L(X_w, m) &= k_1(X_w - m)^2, (LSL \leq X_w \leq m) \\ &= k_2(X_w - m)^2, (m \leq X_w \leq USL) \end{aligned} \tag{9}$$

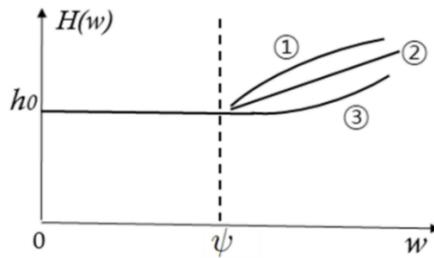
식 (9)에서, k_1 은 하한방향 손실비용계수이며, k_2 는 상한방향 손실비용계수다. w 에서의 품질손실비용은 적합품당 품질손실비용 $L(X_w, m)$ 의 기댓값 $E[L(X_w, m)]$ 과 이때의 생산량 $g(w)$ 의 곱이며, 구간 $[0 \sim w_L]$ 에서 발생하는 총품질손실비용 $C_Q(w_L, \mu_I)$ 는 구간의 누적으로 식 (10)에 나타내었다.

$$C_Q(w_L, \mu_I) = \int_0^{w_L} g(w) E[L(X_w, m)] dw$$

$$= \int_0^{w_L} g(w) \left\{ \int_{S_L}^m k_1 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w + \int_m^{S_U} k_2 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w \right\} dw \quad (10)$$

3.4 보전비용 함수

본 연구에서는 보전비용을 비감소함수로 설정하고 이를 $H(w)$ 로 나타낸다. 마모수준에 대한 보전비용함수 $H(w)$ 는 공정특성에 따라 다양한 형태를 취할 수 있으며, 이를 [그림 4]와 식 (11)에 나타내었다.



[그림 4] 보전비용함수 $H(w)$

[Fig. 4] Maintenance Cost Function $H(w)$

λ 는 척도모수로서 $\lambda=0$ 의 경우, 보전비용은 마모수준과 무관한 일정 비용 h_0 가 되어 기존 연구들의 상수 설정을 포함한다. h_0 는 마모수준과 무관한 최소 조정비용이다. ψ 는 위치모수로서 일정 사용기간 혹은 횟수 ψ 이후부터 보전비용이 증가함을 의미한다. 이는 많은 경우 품질보증이나 제품책임(PL: Product Liability)의 정책으로 인해, 이 기간 이내의 보전에 대해서는 설비 제공 기업이 무상 혹은 일정비용으로 제공하는 경우를 설명할 수 있다. θ 는 형상모수로서 그 값의 범주에 따라 [그림 4]에서 ①, ②, ③의 증가 형태를 취한다. 비용 증가에 있어서도 설비 혹은 공정 특성에 따라 여러 형태가 있을 수 있다. [그림 4]의 ②는 $\theta=1$ 이며, 보전비용이 마모정도에 대해 선형 증가함을 설명한다. ① $0 < \theta < 1$ 구간은 보전비용이 증가하는 하되, 증가율은 감소하는 concave 증가를, 그리고, ③ $\theta > 1$ 영역은 보전비용이 증가하면서 증가율 또한 증가하는 즉, 승수적 증가인 convex 증가를 설명할 수 있다.

$$H(w) = h_0 + \lambda(w - \psi)^\theta \quad \text{단 } (h_0, \lambda, \theta, \psi \geq 0) \quad (11)$$

3.5 공정평균이동 문제의 최종모형

제품생산 시점 즉, 마모수준 $w=0$ 에서 보전주기 w_L 까지 발생하는 모형의 전체비용 $TC(w_L, \mu_I)$ 는 앞 절에서 언급한 세 가지 항목 즉, 부적합비용, 품질손실비용 그리고 보전비용의 합으로 구성된다. 초기위치 μ_I 하에서 마모한계 w_L 까지의 전체비용 $TC(w_L, \mu_I)$ 는 식

(12)와 같다.

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

총비용 $TC(w_l, \mu_l)$ 는 비용만의 함수이므로, 이를 최소화 하는 마모한계 $w=0$ 이다. 즉, 제품을 생산하지 않는 것이 최적이 되므로 모형이 성립하지 않는다. 보전비용 $H(w)$ 과 나머지 두 비용간의 절속관계가 존재하여 모형이 성립하기 위해서는 $TC(w_l, \mu_l)$ 를 마모한계로 나누어 단위 마모당 전체비용을 최소화하는 모형으로의 전환이 필요하다. 그러므로 모형의 최종 목적식은 식 (13)이 되며, 이를 최소화 하는 마모한계 및 초기 장비위치를 결정하는 모형이다.

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

이상에서 언급한 사항을 모두 고려한 모형의 목적식 최종 형태는 식 (14)와 같다.

Minimize $TC(w_l, \mu_l)/w_l$, Subject to w_l, μ_l

$$\begin{aligned} \frac{TC(w_l, \mu_l)}{w_l} = & \frac{h_0 + \lambda(w - \psi)^\theta}{w_l} + \frac{D}{w_l} \left[\int_0^{w_l} (l_0 + \gamma w^\delta) dw - \int_0^{w_l} \int_{S_l}^{S_U} (l_0 + \gamma w^\delta) f(X_w) dX_w dw \right] \\ & + \int_0^{w_l} \frac{(l_0 + \gamma w^\delta)}{w_l} \left\{ \int_{S_L}^m k_1 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w + \int_m^{S_U} k_2 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w \right\} dw \quad (14) \end{aligned}$$

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

4. 결론

본 연구에서는 공정평균이동 문제에서 보전비용에 대해 상수가 아닌 마모수준에 대한 비감소의 일반 함수 $H(w)$ 를 제시함으로써, 공정평균이동 문제의 적용 범위를 확대했다. 또한 지금까지 부분적으로 진행되어 온 기존의 여러 최신 보전모형들을 통합한 보전모형을 제시했다. 본 모형에서 도입한 보전비용 이외의 항목들의 특성은 다음과 같다.

- 1) 공정분산에 대해 상수가 아닌 마모수준에 대한 비감소 함수 $\sigma^2(w)$ 를 도입
 - 2) 단위 마모당 생산량에 대해 상수가 아닌 마모수준에 대한 비증가함수 $H(w)$ 를 도입
 - 3) 품질손실비용에 대해 목표값 대비 상방과 하방 계수를 별도 지정하는 C_{pm} 를 도입
- 이로써 본 연구의 모형은 실제 현장에서 발생하는 다양한 제반 상황들을 보다 더 실무적으로 반영할 수 있다.

모형의 목적식을 최소화하는 두 개의 결정변수 즉, 최적 마모한계 w_l 과 초기 설정 위치 μ_l 를 수리적으로 정리된 형태로 제시하는 것이 바람직하지만, 이는 두 가지 이유에 의해 불가능하다. 첫째, 목적식에 적분 불능 함수인 정규분포가 포함된 점과 둘째, 부적합비용이 상한규격과 하한규격을 기준으로 계단함수 즉, 불연속함수이기 때문이다. 그러나 목적식을 구성하는 항목에서 마모당 조정비용은 단조 비증가 convex 함수이고, 부적합비용은 규격 구간 밖에서 단조 증가함수이며, 품질손실비용은 규격 안에서 단조 증가의 convex 함수이므로, 이들 세 항목의 합인 목적식은 convex 함수임을 보장할 수는

없으나, 적어도 단봉함수가 됨은 알 수 있다. 그러므로 보전구간 안에서 목적식을 최소화하는 마모한계 w_l 과 μ_l 가 존재함은 분명하다.

본 연구에서는 공정평균이동 모형에서 마모수준과 무관하게 상수로 처리되어온 공정분산, 생산량, 품질손실비용 및 보전비용 등의 항목들에 대해 해당 특성을 반영한 매개변수들로 구성된 일반화 함수를 제시하고, 이들을 통합한 모형을 제시했다. 이로써 자동화 설비에서 발생하는 다양한 상황을 반영할 수 있으리라 생각하며, 추후 연구에서는 본 모형에 과국고장을 고려한 교체 및 조정에 대한 신뢰성 보전모형으로의 확대 전개를 생각할 수 있을 것이다.

5. 감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 대학 연구과제비로 연구되었음(2021~2022년).

References

- [1] Martin Pech, Jaroslav Vrchota, Jiří Bednář, Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review, MDPI Sensors, (2021), Vol.21, No.4, pp.1-40.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s21041470>
- [2] J. Manuele, Control Chart for Determining Tool Wear, Industrial Quality Control, (1945), Vol.1, No.6, pp.7-10.
- [3] C. P. Quesenberry, A SPG Approach to Compensating a Tool-Wear Process, Journal of Quality Technology, (1988), Vol.20, No.4, pp.220-229.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00224065.1988.11979114>
- [4] H. Schneider, Colm O'Conneide, K. Tang, Optimal Production Process Subject to AOQL Constraint, Naval Research Logistics Quarterly, (1988), Vol.35, No.3, pp.383-396.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/1520-6750\(198806\)35](http://dx.doi.org/10.1002/1520-6750(198806)35)
- [5] I. N. Gibra, Optimal Control Processes Subject to Linear Trends, The Journal of Industrial Engineering, (1967), Vol.18, No.1, pp.35-41.
- [6] S. J. Kamat, A Smoothed Bayes Control of a Variable Quality Characteristic with Linear Shift, Journal of Quality Technology, (1976), Vol.8, No.2, pp.98-104.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00224065.1976.11980724>
- [7] M. A. Rahim, F. Tuffaha, 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207540410001666233>
- [8] R. A. Boyles, The Taguchi Capability Index, Journal of Quality Technology, (1991), Vol.23, No.1, pp.17-26.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00224065.1991.11979279>
- [9] C. H. Chen, Determining the optimum process mean based on Asymmetric Quality Loss Function and Rectifying Inspection Plan, IEEE : Industrial Engineering Management Conference, (2004)
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/iemc.2004.1408858>
- [10] V. Makis, Optimal tool replacement with asymmetric quadratic loss, IIIE Transaction, (1996), Vol.28, No.6, pp.463-466.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07408179608966292>
- [11] D. K. Lee, A Maintenance Model Applying Loss Function Based on the Cpm+ in the Process Mean Shift Problem in Which the Production Volume Decreases, Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering, (2021), Vol.44, No.1, pp.45-50.

DOI: <http://dx.doi.org/10.11627/jkise.2021.44.1.045>

- [12] F. J. Arcelus, P. K. Banerjee, R. Chandra, 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/05695558208975043>
- [13] D. K. Lee, 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11627/jkise.2017.40.1.165>
- [14] J. H. Lee, T. H. Park, H. M. Kwon, S. H. Hong, M. K. Lee, 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11627/jkise.2017.40.1.165>
- [15] D. K. Lee, 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11627/jkise.2020.43.3.095>
- [16] C. C. Chang, S. H. Sheu, Y. L. Chen, Optimal replacement model with age-dependent failure type based on a cumulative repair-cost limit policy, *Applied Mathematical Modelling*, (2013), Vol.37, No.1-2, pp.308-317.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.02.031>