

■ 연구논문

제조시스템에서의 품질비용에 관한 연구

장석주

대불공과대학교 산업공학과

이성웅

전남대학교 산업공학과

박영현

강남대학교 산업공학과

A Study of the Quality Costs in Manufacturing Systems

Seog-Ju Chang

Dept. of Industrial Engineering, Daebul University

Sung-Woong Lee

Dept. of Industrial Engineering, Chonnam National University

Young-Hyun Park

Dept. of Industrial Engineering, Kang Nam University

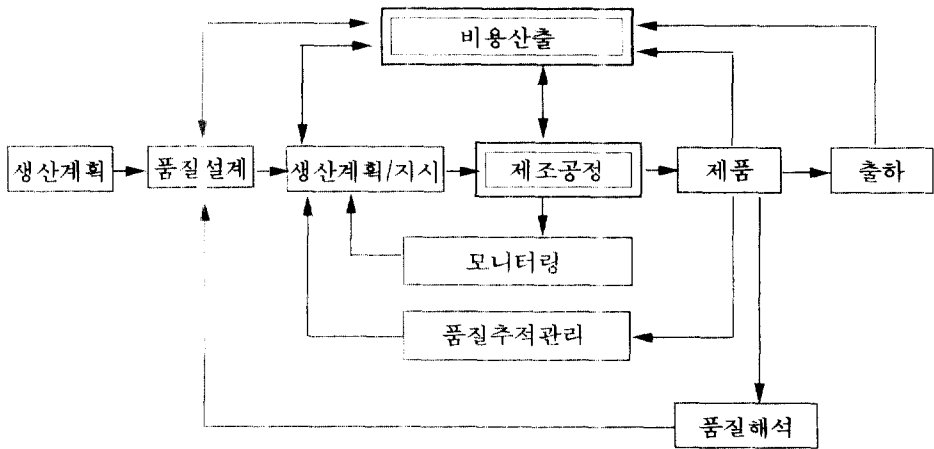
Abstract

This paper illustrates a method of developing a function of quality costs in manufacturing systems. It begins with a discussion of the problem statement of this research. A review of existing literatures related to quality costs and economic design of quality inspection methods are discussed. Next mathematical models that quantify the production cycle time and quality costs are formulated. This paper ends with an example that demonstrates the usefulness of the model and highlights the importance of using a system approach. The main contribution of this work is the more realistic considerations of the four types of quality costs (prevention cost, appraisal cost, internal failure cost, external failure cost) in manufacturing systems.

1. 서론

오늘날과 같은 무한 경쟁시대에서 경쟁력을 갖기 위하여는 제조기업은 좋은 제품을 적절한 시기에 경쟁력 있는 가격으로 조달해야 한다. 많은 기업들은 제품의 설계나 생산분야에 신기술을 도입하여 생산성을 향상시키고 좋은 품질의 제품을 균일하게 생산하며, 인건비나 재고를 감축시켜서 원가를 절감하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 이에 반하여 제조공장에서 품질검사를 효율적으로 운영하며 이에 따르는 품질비용과 생산비용을 수집, 분석 및 산출하는 데에는 기존의 방법을 그대로 사용하고 있어서 현 제조 환경에서 사용하기에는 한계점이 있다.

효율적인 품질검사의 운영과 비용관리는 단순히 양품과 불량품의 구분과 비용 산출에 한계 된 것이 아니다. 이에 따른 정보의 피드백에 의하여 균일한 품질의 제품을 생산할 수 있으며, 불량품의 생산을 방지함으로써 생산성을 높이고, 품질비용을 낮춤으로써 생산원가를 절감할 수 있고, 적절한 시기에 제품을 납품하며, 나아가서 고객을 만족시킴으로써 구매력을 증가시키는 결과를 가져오게 된다. 즉 기존에 개발된 경제적 관리도 설계방법을 응용하고, 비용 산출 방법을 발전시켜 제조시스템에서 효율적으로 품질검사를 운용하고 비용을 더욱 정확히 추정하여 더 좋은 품질의 제품을 더 적은 비용으로 생산할 수 있는 방안을 제시하는 것이 중요하다. 특히 자동 생산시스템에서는 컴퓨터를 이용하여 설비의 제어 뿐만아니라 공정에 대한 관리가 전산화되어 있어 품질관리와 원가관리를 신속히 그리고 정확히 수행할 수 있다. 회사의 규모나 업종에 따라 차이가 있으나 공정단계에서는 일반적으로 <그림 1>처럼 품질관리 종합시스템의 구성과 그에 따른 비용산출 체계로 구성된다. 품질관리와 직접 관련이 있는 시스템으로는 모니터링, 품질추적관리, 품질해석으로 구분 될 수 있다. 제품의 비용산출은 품질설계시 계략적으로 추정되고, 생산계획 및 지시 중에, 제조 공정 중에, 그리고 제품을 생산한 후 출하시에도 시행된다. 이처럼 여러 공정에 걸쳐 비용은 산출되며 그 비용은 다시 품질설계, 생산계획 및 지시, 제조 공정에 중요한 정보가 된다.



< 그림 1 > 품질관리 종합시스템

그러나 실질적으로 대부분의 공장에서는 공정 중에 비용산출을 수행하지 않으며, 비용을 산출하더라도 이러한 자료가 거의 품질관리에 영향을 미치지 못하고 있는 실정이다. 최근의 조사에 의하면 현재와 같은 경쟁 환경하에서는 품질에 관련된 비용은 매우 중요하다고 한다. 한 예로써, 텔레커뮤니케이션 제조 공장에서 제품을 제조하는데 소요되는 품질비용은 1달러 당 33센트가 품질 평가비용이나 불량품처리에 쓰인다고 한다. 결국 품질관리방법은 경제적인 면을 고려하여야 하며, 특히 경제적인 면을 고려한 품질검사 방법을 수행하여야 한다.

경제적인 면을 고려한 품질검사 방법이 여러 연구가들에 의하여 발전되어 왔다. 그 대표적인 예로써, 단일 공정하에서 Duncan(1956)은 \bar{x} -관리도를 사용한 비용모델을 개발하였다. 이 모델은 샘플링비용, 이상요인 판단비용, 공정 이탈상태에서 발생하는 비용등을 고려하여 최적의 검사 주기, 샘플링 크기, 그리고 관리한계선을 결정하였다. 그 후 Tang(1987), Lee와 Rosenblatt(1988) 등에 의하여 생산시스템에서 효율적으로 활용될 수 있도록 개발되었다. 그러나 이런 경제적 모델은 품질에 관련된 비용을 충분히 포함시키지 못하여 실질적으로 사용하기에는 한계점이 있다고 할 수 있다.

Juran(1951)이 품질비용에 대하여 논한 이후 많은 사람들이 품질시스템에 대하여 연구하여 왔다. 특히 Feigenbaum(1961)이 그의 저서에서 품질비용을 예방비용(prevention cost), 평가비용(appraisal cost), 내부실패비용(internal failure cost), 외부실패비용(external failure cost)로 분류한 이후, 많은 학자들은 품질비용에 대하여 연구하여 왔다. Lindsay와 Bishop(1964)은 동적계획법을 이용하여 품질비용을 고려한 100% 전수검사와 무검사를 비교하였고, Hassan과 Knowles(1979)는 목표로 정한 평균 출하 품질한계를 달성하는 상황에서 비용을 최소화 시킬 수 있는 모델을 개발하였다. Thomas, Safie, 그리고 Svestka (1986)는 여러가지 품질검사 대안을 비용의 최소화로 선택할 수 있도록 하였다. 그리고 최근에는 Kaplan(1983), Clark (1985), Roth와 Morse (1986), Godfrey 와 Pasewark(1988), Son과 Hsu(1991), Clark과 Milligan(1994)는 제조공정에서의 품질비용 산출에 대한 방법을 분석하거나 모델을 개발하였다.

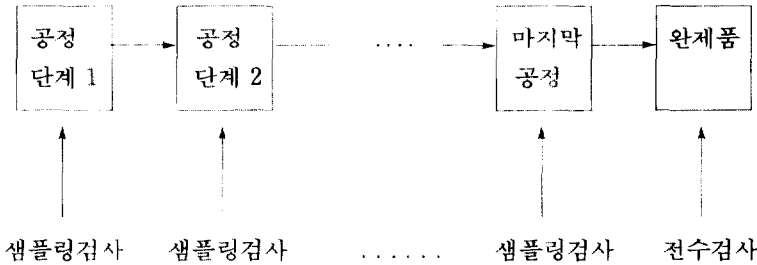
Lundvall과 Juran(1979), Schrader(1986), Plunkett과 Dale(1988)등은 네 가지 품질비용을 조사하고 그들간의 관계를 분석하였다. 최근 류한주와 김달곤(1994)은 품질시스템의 활용방안과 그 한계에 대하여 분석하였다. 그러나 아직까지 품질에 관련된 비용산출에는 모든 연구가들이 만족할 만한 정립된 정설이 없는 실정이다. 특히 비구조화된 품질비용(ill-structured quality costs)의 산출에는 아직 많은 문제점과 논란의 여지가 있다.

본 연구에서는 기존에 개발된 비용모델을 다공정을 요하는 제조시스템에 맞도록 비용모델을 발전시켜 품질비용을 산출하며, 나아가서 제품의 품질을 향상시키고 공정을 안정시키며 궁극적으로 원가절감을 이루게하며 고객에게 만족스러운 제품을 제공하도록 하는 것이다. 품질비용으로는 제조환경하에서 발생하는 예방비용, 평가비용, 내부실패비용, 외부실패비용, 그리고 불량품 납품으로 인한 간접적인 비용을 포함하였다. 또한 획일적인 단순 샘플링에서의 품질검사가 아니라 각 공정의 상황 즉 불량률, 샘플링 간격, 제품특성치의 분산 등의 변화에 따라 품질비용의 변화를 예측하여 더 경제적인 품질검사 방법을 제시하여 더 적은 비용으로 생산할 수 있도록 하였다.

2. 품질비용모델의 개발

2.1 생산주기

〈그림 2〉와 같은 서로 독립적인 생산설비로 이루어진 제조시스템에서 몇 단계의 공정을 요하는 제품을 생산한다고 하자. 각 공정중에 샘플 n 개를 샘플 간격 t 마다 제품의 특성치를 관리도의 중심선 μ_0 , 관리상한 $\mu_0 + q\sigma/\sqrt{n}$, 관리하한 $\mu_0 - q\sigma/\sqrt{n}$ 인 \bar{x} -관리도를 사용하여 공정의 이상 유무를 점검한다고 하자. 만일 특성치가 관리한계선을 벗어날 경우 제조공정을 정지시키고, 그 원인을 파악하여 이상이 있을 경우 그 원인을 제거하고 제조는 계속 진행되며, 공정이 끝난 제품은 다음 공정으로 넘어간다. 모든 공정이 끝난 제품은 최종 검사단계에서 전 공정에 걸쳐 제작된 품질특성치를 검사받게 된다. 만일 불량 발생하였을 경우 재가공 여부를 판단하여 재가공이 가능한 것은 가공하고, 만일 재가공이 불가능 한 경우에는 폐기시킨다고 하자.

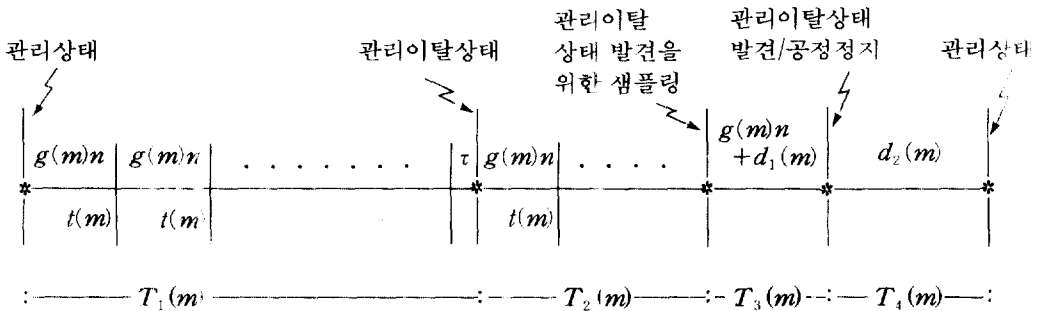


〈그림 2〉 제조공정과 품질검사

공정 m 에 대한 생산주기는 〈그림 3〉과 같이 4종류의 시간으로 표현 될 수 있다. 첫째로는 이상요인이 발생할 때까지의 시간으로 $T_1(m)$ 으로 표시되며 이는 포아송 분포에 따른다고 가정한다. 둘째는 이상요인이 발생했을 때 이를 처음으로 감지할 수 있는 시간으로 $T_2(m)$ 으로 표시하고, 셋째는 샘플을 채취하여 그 이상요인을 파악하는데 요하는 시간으로 $T_3(m)$ 으로 표시한다. 마지막으로 $T_4(m)$ 은 이상요인을 제거하는데 필요한 시간이다. 여기서 샘플링 간격을 $t(m)$, 샘플 수를 n , 1개를 샘플링하여 규격에 맞는가를 확인하는데 소요되는 시간을 $g(m)$ 이라고 한다. 다음은 공정분석에 필요한 가정이다.

- * 제품은 서로 독립적인 생산설비에서 가공되며, 어떤 특정 설비에 이상요인이 발생하여 공정이 정지되더라도 그 전후의 생산설비의 기계적인 작동은 영향을 받지 않는다.
- * 공정은 샘플 n 개를 샘플 간격 $t(m)$ 마다 샘플링하여 이를 평균한 후에 \bar{x} -관리도를 이용하여 모니터링 한다. 여기서 중심선은 $\mu_0(m)$ 이고 관리상한은 $\mu_0(m) + q(m)\sigma(m)/\sqrt{n}$, 관리하한 $\mu_0(m) - q(m)\sigma(m)/\sqrt{n}$ 로써 $\sigma(m)$ 는 제품특성치의 모집단 표준편차이고 $q(m)$ 는 관리한계선 결정계수이다.

- * 이상요인은 크기 $\delta(m)$ 로 랜덤하게 발생하여, 제품특성치의 평균이 $\mu_0(m)$ 에서 $\mu_0 + \delta(m)\sigma(m)$ 이나 혹은 $\mu_0 - \delta(m)\sigma(m)$ 으로 이동한다.
- * 샘플 평균치가 관리한계선 밖으로 이탈하였을 경우 이상요인을 점검하며 이상요인이 발견되었을 경우 제조공정은 정지되고 이상요인을 $d_0(m)$ 시간에 걸쳐 제거한다.
- * 생산설비의 이상요인은 포아송 분포에 따라 평균 $\theta(m)$ 로 발생한다. 따라서 이상요인은 지수분포에 따라 평균 $1/\theta(m)$ 로 발생한다.
- * 측정시스템은 이상요인이 포아송 분포에 따라 평균 $y(m)$ 로 발생한다. 따라서 이상요인은 지수분포에 따라 평균 $1/y(m)$ 로 발생한다.



〈 그림 3 〉 생산주기의 구성

m 공정에서 포아송 분포에 따라 이상요인이 발생하는 평균치가 $\theta(m)$ 이므로, $T_1(m)$ 은 지수분포를 따르며 $T_2(m)$ 의 기대치는 다음과 같다.

$$T_1(m) = 1/\theta(m) \tag{1}$$

샘플링 간격 $t(m)$ 동안에 다음과 같은 3가지 상황이 발생하게 된다. (1) 간격 $t(m)$ 동안에 공정이 관리상태 (in-control)인 경우, (2) 간격 $t(m)$ 동안에 일부는 공정이 관리상태에 있고, 일부 기간동안은 공정이 관리이탈상태 (out-of-control)인 경우, 그리고 (3) 전 간격 동안 공정이 관리이탈상태인 경우이다. $T_2(m)$ 의 그 기대치는 다음과 같다(Montgomery (1984)).

$$T_2(m) = t(m) / (1 - \beta(m)) - \tau(m) \tag{2}$$

각 공정에서의 샘플링 간격은 $t(m)$ 로써 동일하다고 가정한다면, $\tau(m)$ 는 $[1 - \{1 + \theta(m)t(m)\} \exp\{-\theta(m)t(m)\}] / [\theta(m)\{1 - \exp(-\theta(m)t(m))\}]$ 이 된다. $1 - \beta(m)$ 는 간격 $t(m)$ 동안

전 구간이 관리이탈상태일 경우의 비율이다.

m 번째 공정중 샘플링을 하고 이상요인을 발견하는데 소요되는 시간, $T_3(m)$ 의 기대치는

$$T_3(m) = g(m)n + d_1(m) \tag{3}$$

이다. 여기서 $g(m)$ 은 m 번째 공정에서 한개의 샘플을 검사하는데 소요되는 시간이며, $d_1(m)$ 은 m 번째 공정에서 이상요인이 발생하였을 때 그 요인을 찾아내는데 소요되는 시간이다. m 번째 공정에서 이상요인을 제거하여 공정이 안정상태로 회복되는데 소요되는 시간, $T_4(m)$ 는 다음과 같다.

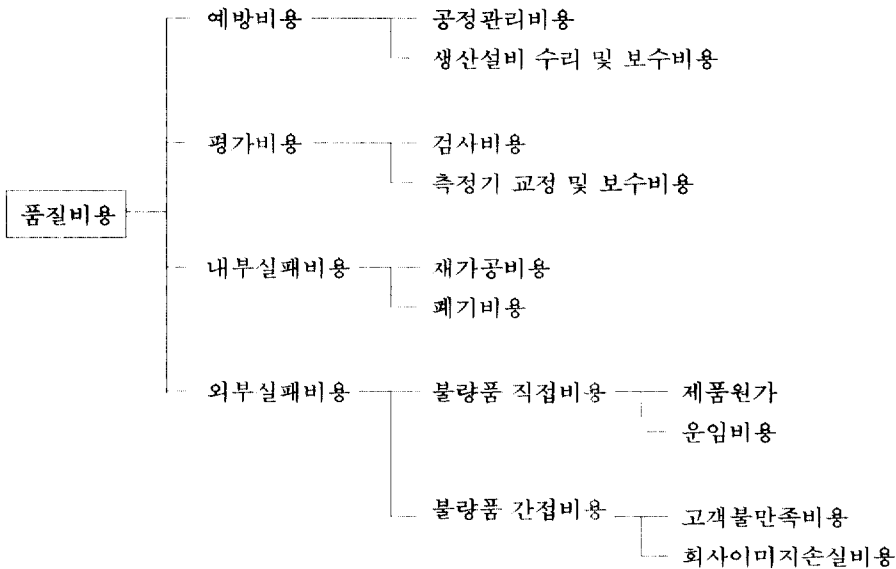
$$T_4(m) = d_2(m) \tag{4}$$

따라서 공정 m 의 생산주기의 기대치는 다음과 같다.

$$E(Tc(m)) = 1/\theta(m) + \{t(m)/(1-\beta(m)) - \tau(m)\} + \{g(m)n + d_1(m)\} + d_2(m) \tag{5}$$

2.2 품질비용

본 논문에서는 <그림 4>처럼 품질비용을 예방비용, 평가비용, 내부실패비용, 외부실패비용으로 다루었다. 그러나 단지 제조단계에서 발생하는 비용만을 고려하였다.



< 그림 4 > 품질비용

2.2.1 예방비용

예방비용에는 포괄적인 면에서 불량품을 예방할 목적으로 기획설계, 제조, 판매단계에서 발생하는 모든 제반활동에 필요한 비용등이 포함된다. 그러나 본 논문에서는 생산주기 동안에 발생하는 두가지의 비용을 고려하였다. 첫째는 공정관리비용으로 공정 중에 제품이 규격에 맞는 제품을 생산하고 있는가를 모니터링하는 비용($Cp1$)이다. 둘째는 생산설비 수리 및 유지비용으로 다음의 두가지 경우를 고려하였다. (1) 공정에 이상이 없으나 샘플링에 의하여 공정에 이상이 있다고 잘못 판단되어 공정이나 설비를 점검하는 비용($Cp2$)과, (2) 공정에 이상요인이 발생하여 이를 제거하고 안정상태로 공정이나 설비를 수리 혹은 보수하는데 발생하는 비용($Cp3$)이다.

공정관리비용은 생산주기 중 관리이탈상태가 발견되어 생산을 중단할 때까지 생산공정을 관리하는 비용이므로, 이상요인을 제거하는데 소요되는 시간 $T_1(m)$ 을 제외한 생산주기를 단위시간 당 공정관리비용 $b_1(m)$ 을 곱한 값이다. 따라서 총 공정관리비용의 기대치는 다음과 같다.

$$E(Cp1) = \sum_{m=1}^M b_1(m) \cdot \{T_1(m) + T_2(m) + T_3(m)\} \quad (6)$$

$\alpha(m)$ 을 잘못된 경고가 m 공정의 T_1 기간 동안에 발생할 확률이라고 하면,

$$\alpha(m) = 2 \int_0^{\infty} \phi(z) dz \quad (7)$$

이고, $b_2(m)$ 를 잘못된 경고를 조사하는 비용이면, $Cp2$ 의 기대치는 다음과 같다.

$$E(Cp2) = \sum_{m=1}^M b_2(m) \cdot \alpha(m) \cdot S(m) \quad (8)$$

여기서 $S(m)$ 은 관리상태에서 관리이탈상태로 공정이 바뀌었을 때까지의 샘플링 횟수이며, 수식으로 나타내면 $S(m) = \exp\{-\theta(m)t(m)\} / [1 - \exp\{-\theta(m)t(m)\}]$ 이다. $b_3(m)$ 를 이상요인을 제거하는데 필요한 비용이라고 하면, $Cp3$ 의 기대치는

$$E(Cp3) = \sum_{m=1}^M b_3(m) \quad (9)$$

따라서 단위 생산주기당 예방비용의 기대치는

$$E(C1) = \sum_{m=1}^M b_1(m) \cdot \{T_1(m) + T_2(m) + T_3(m)\} \quad (10)$$

2.2.2 평가비용

평가비용은 크게 검사비용과 측정기의 교정 및 보수비용으로 구분된다. 검사비용으로는 공정 중에 발생하는 샘플링 검사비용과 마지막 공정 후의 전수검사비용으로 구분된다. 샘플링 검사에 소요되는 비용으로는 고정비용과 변동비용이 있다. m 공정에서 샘플링 검사에 소요되는 고정비용을 $a_1(m)$ 이라고 하고 단위부품 당 변동비용을 $a_2(m)$ 로 하였을 때, n 개를 샘플링하여 검사 한 비용은 $a_1(m) + a_2(m) \cdot n$ 이 된다. 생산주기 동안에 샘플 횟수의 기대치는 생산주기 기대치에서 이상요인을 찾아내는데 소요되는 $d_1(m)$ 과 이상요인을 제거하는데 소요되는 $d_2(m)$ 을 제외 한 값을 샘플 간격 $t(m)$ 으로 나눈 값이다. 따라서 생산주기 당 샘플링 검사비용의 기대치는 다음과 같다.

$$E(Ci1) = \sum_{m=1}^M \{a_1(m) + a_2(m) \cdot n\} \{T_1(m) + T_2(m) + T_3(m) - d_1(m)\} t(m) / t(m) \quad (11)$$

전수검사비용은 마지막 공정 후에 전 공정에 대한 제품의 품질을 검사하는데 소요되는 비용이다. 고정비용을 a_3 이라고 하고, 각 공정후의 품질검사 변동비용을 $a_4(m)$ 이라고 한다면, 전 공정을 걸쳐 T_N 제품을 생산하였다면 T_N 개를 검사하는데 소요되는 비용은 다음과 같다.

$$E(Ci2) = a_3 + \zeta \cdot T_N \sum_{m=1}^M a_4(m) g(m) \quad (12)$$

공정 m 에서 1개를 샘플링 검사하는데 소요되는 시간이 $g(m)$ 이고 마지막 공정후에 1개의 제품에 대하여 전 공정을 검사하는 시간을 G 라고 하자. 일반적으로 각 공정 후에 개별적으로 검사한 시간의 합계, $\sum_{m=1}^M g(m)$, 보다는 마지막 공정후 제품을 검사하는데 소요되는 시간 (G)이 적게든다. 여기서 $\zeta = G / \sum g(m)$ 는 전수검사에 의한 시간의 효율성을 나타내는 것으로 $0.0 < \zeta \leq 1.0$ 이다.

측정기가 포아송 분포에 따라 이상요인이 발생하는 평균치를 y 라고 하면, 측정기에 이상이 처음 발생할 때 까지의 시간은 지수분포에 따라 $1/y$ 이다. 1회 교정 및 보수비용을 a_5 이므로, 마지막 공정 후 T_N 를 측정하는 동안 측정기를 교정 및 보수하는데 소요되는 비용은 다음과 같다.

$$E(Ci3) = a_5 \cdot G \cdot T_N \cdot y \quad (13)$$

여기서 G 는 1개를 전수검사하는데 소요되는 시간이다. 따라서 총 평가비용은 다음과 같다.

$$E(C2) = \sum_{m=1}^M [\{a_1(m) + a_2(m) \cdot n\} \{T_1(m) + T_2(m) + T_3(m) - d_1(m)\} t(m) / t(m) + a_4(m) \cdot g(m) \cdot \zeta \cdot T_N] + a_3 \cdot a_5 \cdot G \cdot T_N \cdot y \quad (14)$$

2.2.3 내부실패비용

내부실패비용은 공정 중에 발생하는 불량품으로써 외부로 반출되기 전에 회사 내에서 발견되어 폐기시키거나 재작업을 함으로써 파생되는 비용이다. $p_1(m)$ 과 $p_2(m)$ 을 m 공정에서 관리상태에 있을 때와 관리이탈상태 일 경우에 불량품이 발생할 확률이라고 하자. 이때 각각의 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_1(m) &= 1 - \phi \left[\frac{\{SU(m) - \mu_0(m)\}}{\sigma(m)} \right] + \phi \left[\frac{\{SU(m) - \mu_0(m)\}}{\sigma(m)} \right] \\ p_2(m) &= 1 - \phi \left[\frac{\{SU(m) - \mu_0(m) - \delta(m)\sigma(m)\}}{\sigma(m)} \right] \\ &\quad + \phi \left[\frac{\{SU(m) - \mu_0(m) - \delta(m)\sigma(m)\}}{\sigma(m)} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $\phi(\cdot)$: 표준 정규분포의 누적확률

$SU(m)$: m 공정의 제품 상한규격값

$SL(m)$: m 공정의 제품 하한규격값

$\mu_0(m)$: m 공정의 관리도 중심선

$\sigma(m)$: m 공정의 제품 표준편차

$\delta(m)$: m 공정의 이상요인에 의한 공정변동크기

m 공정에서 단위 시간당 $N(m)$ 개의 제품이 생산되므로 공정이 안정상태에 있을 경우 예상되는 불량품의 개수는 $p_1(m)N(m)$ 이고, 공정이 이탈상태에 있는 경우에 예상되는 불량품의 개수는 $p_2(m)N(m)$ 이다. 생산주기 중 $T_1(m)$ 동안은 공정이 안정상태에 있고, $T_2(m) + T_3(m)$ 동안은 공정 이탈상태이므로 생산주기 동안에 예상되는 불량품의 개수, $N_d(m)$ 와 합격품의 개수, $N_o(m)$ 는 다음과 같다.

$$N_d(m) = p_1(m) \cdot N(m) \cdot T_1(m) + p_2(m) \cdot N(m) \cdot \{T_2(m) + T_3(m)\} \quad (16)$$

$$N_o(m) = \{1 - p_1(m)\} N(m) \cdot T_1(m) + \{1 - p_2(m)\} N(m) \cdot \{T_2(m) + T_3(m)\}$$

각 공정에서 제조된 제품의 불량률은 다음과 같다.

$$p(m) = \frac{N_d(m)}{N_d(m) + N_o(m)} \quad (17)$$

최종 검사단계에서 전수검사 후에 재가공 할 것인지 아니면 폐기 할 것인지 결정하게 된다. 그러나 숙련된 작업자가 검사를 하더라도 양품을 불량품으로 판정하거나, 불량품을 양품으로 판정 할 확률은 항상 존재하게 된다. 만일 e_1 을 양품을 불량품으로 판정 할 비율(제 1 종의 과오)이라고 하고, e_2 를 불량품을 양품이라고 판정 할 비율(제 2 종의 과오)라고 하며, 재가공 할 경우에 단위 제품 당 평균 재가공 비용이 Cw 이고, 불량품을 재가공 하여 양품으로 가공 할 비율을 γ 라고 하면, 소요되는 재가공 비용은 다음과 같다.

$$E(Cf1) = Cw\{e_1 \cdot N_a(M) + \gamma \cdot (1-e_2) \cdot N_d'(M)\} \quad (18)$$

$N_a(M)$ 은 양품의 수이고 $N_d(M)$ 은 불량품의 수이다. 그리고 $N_d'(M)$ 은 1 공정만이 불량인 수를 나타낸다면, $\gamma \cdot (1-e_2) \cdot N_d'(M)$ 은 최종검사에서 적발된 불량품이 가공되어 양품으로 전환 되는 양이다.

그러나 최종 검사단계에서 불량품을 가공하여 양품의 제품으로 만드는 것이 불가능 할 경우에는 폐기하여야 할 것이다. 앞서서도 논의 된 것 처럼 폐기되는 제품은 여러 공정을 거쳐 인건비, 재고비, 가공비등이 축적되어 원자재 비용에 가치가 추가된 것이다. $Cs(0)$ 를 원재료 가치라 하고 m 공정에 의한 제품 가치의 추가를 $Op(m)$ 이라고 한다면, 모든 공정이 끝난 후의 제품의 가치는 다음과 같다.

$$Cs(M) = Cs(0) + \sum_{m=1}^M Op(m) \quad (19)$$

불량품을 재가공하였으나 양품으로 전환시키지 못하여 폐기시킬 경우에 발생하는 비용을 $Cs(M)$ 라고 하면, 생산주기 당 폐기비용은 다음과 같다.

$$E(Cf2) = Cs(M) [(1-\gamma)(1-e_2)N_d(M) + \{N_d(M) - N_d'(M)\}] \quad (20)$$

따라서 생산주기 당 예상되는 내부실패 비용은 재가공비용과 폐기비용으로 구성되므로 다음과 같다.

$$E(C3) = Cw\{e_1 \cdot N_a(M) + \gamma \cdot (1-e_2) \cdot N_d'(M)\} \\ + Cs(M) [(1-\gamma)(1-e_2)N_d(M) + \{N_d(M) - N_d'(M)\}] \quad (21)$$

2.2.4 외부실패비용

외부실패비용은 불량품이 공장내에서 선별되지 못하고, 외부로 납품되었을 경우에 발생하게 된다. 여기에 포함되는 비용으로는 크게 불량품 납품으로 인한 직접비용과 간접비용으로 구성된다. 불량품 직접비용으로는 납품된 불량품은 폐기시키고 양품을 다시 납품하는데 파생되는 제품원가와 운임비용이 포함된다. 불량품이 양품으로 잘못 판정되는 예상 개수는 $e_2 \cdot N_d(M)$ 이다. 전 공정 후 제품원가는 $Cs(M)$ 이고 운임비용을 Cz 라고 하면, 생산주기당 불량품 납품으로 인한 직접비용의 기대치는 다음과 같다.

$$E(Ce1) = \{Cs(M) + Cz\}e_2 \cdot N_d(M) \quad (22)$$

불량품 간접비용은 고객의 요구를 만족시키지 못하는 불량품을 납품하였을때 파생되는 비용으로 고객 불만비용과 회사 이미지 손실비용이 포함된다. 이 비용은 다른 비용에 비하여 정량적으로 예측하기가 매우 어려우나 미래에 제품의 판매에 크게 영향을 미치게 된

다. 만일 1개의 불량품으로 인하여 파생되는 평균 불만비용 및 회사이미지 손실비용을 Cy 라고 한다면, 불량품 간접비용은 다음과 같이 예측된다.

$$E(Ce2) = Cy \cdot e_2 \cdot N_d(M) \quad (23)$$

따라서 생산주기 당 예상되는 외부 손실비용은 불량품 직접비용과 불량품 간접비용이 포함되므로 다음과 같다.

$$E(C4) = \{Cs(M) + Cz + Cy\} \cdot e_2 \cdot N_d(M) \quad (24)$$

결국 총 품질비용의 기대치는 식 (10), (14), (21), (24)에 의하여 다음과 같다.

$$E(C) = E(C1) + E(C2) + E(C3) + E(C4) \quad (25)$$

3. 수치 예제와 분석

4 단계의 공정을 요하는 제품을 10,000개 생산한다고 하자. <표 1>은 4 단계 공정에 대한 제품특성치의 규격, 샘플링 방침 그리고 지금까지 제조된 제품의 품질특성치의 통계치이고, <표 2>는 각 공정에 대한 품질비용이다. 각 공정에서 제조되는 제품의 평균 크기는 각각 20cm, 25cm, 15cm, 30cm 이고, 각 공정중에 만들어진 제품의 표준편차는 1단계에서는 0.05, 그리고 2, 3, 4 단계에서는 각각 0.03, 0.04, 0.04이다. 이는 1 단계의 공정이 매우 불안정하고 2 단계 공정은 다른 공정에 비해 안정되어 있다는 것을 알 수 있다. 각 공정중에 5개의 샘플링을 2 시간 간격으로 행하고, 관리도는 3σ 한계선을 사용하고 있다. 시간 당 생산량은 1 공정에서는 50개, 2 공정에서는 30개, 3 공정에서는 30개, 그리고 4 공정에서는 50개를 생산하고 있다.

시간 당 생산설비에서 이상요인이 발생하는 빈도의 평균값은 각각 0.02, 0.01, 0.02, 0.015 이다. 각 공정에서 발생한 불량품의 재가공 비율은 평균 80%이고, 만일 2 공정 이상에서 발생한 불량품의 경우에는 재가공이 불가능하여 폐기시키는 것으로 하며, 재가공은 라인외 설비에서 실시한다. 1개를 샘플링하여 측정하는데 소요되는 시간은 0.01 시간이고, 제 1종의 과오율은 0.01, 제 2종의 과오율은 0.005이며 전수검사에 의한 효율성은 60%로 가정하였다.

4 단계에 걸쳐 제조된 제품의 결과는 <표 3>과 같다. 1 공정에서 공정이 안정상태인 경우에 불량률이 발생할 확률은 4.56%이고, 공정이 이탈상태인 경우에 불량률이 발생할 확률은 84.13%로 매우 높은 것을 알 수 있다. 총 생산량 10,000개 중에서 1공정이 불합격인 제품은 669.5개로 불합격율은 약 6.695%에 이르고 있다. 이에 반해 2 공정에서는 공정이 안정상태에서 불량률이 날 확률은 0.08%이고, 공정 이탈상태에서는 57.95%이며, 불합격인 제품의 수 115.2개로 불량률은 1.15%인 것을 알 수 있다. 3 공정에서는 296.5개의 불량품을 생산하였고, 4 공정에서는 254.2개의 불량품을 제조하였다. 제품 중에서 두가지 공정을

이 불량인 경우는 58.5개이다. 세가지 공정이 불량인 경우의 확률은 0.01%로 약 1개로써 매우 낮으며, 제품 중에서 4가지 공정이 전부 불량인 경우는 거의 없다고 하겠다.

4 단계의 공정에 걸쳐 생산된 총 10,000개 중에서 합격품 수의 기대치는 8,722.1개이고, 불량품의 수는 1,277.9개 이다. 불량품 중에서 1,218.4개는 1개의 공정이 불량이므로 재가공이 가능하고, 59.5개는 2 공정 이상이 불량이므로 폐기시켜야 한다. 재가공이 가능한 1,218.4개 중에서 식 (18)에 의해 969.8개는 재가공하여 합격품으로 처리되고, 248.6개는 폐기시키게 된다. 따라서 총 10,000개를 가공하여 9,691.9개는 합격품으로 외부에 납품될 수 있고, 308.1개는 폐기시키게 된다. 결국 재가공 후의 불량률은 3.08% 이다.

〈 표 1 〉 제품특성치 파라미터와 통계치

파라미터	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$
$\mu_0(m)$ (제품 모평균: cm)	20	25	15	30
$\sigma(m)$ (제품 모집단 표준편차)	0.05	0.03	0.04	0.04
$SU(m)$ (제품 상한규격값: cm)	20.1	25.1	15.1	30.1
$SL(m)$ (제품 하한규격값: cm)	19.9	24.9	14.9	29.9
$t(m)$ (샘플링 간격: 시간)	2	2	2	2
$n(m)$ (샘플링 크기: 개)	5	5	5	5
$q(m)$ (관리한계선 결정계수)	3.0	3.0	3.0	3.0
$\delta(m)$ (이상요인 변동크기)	3.0	3.0	3.0	3.0
$N(m)$ (단위 시간당 생산량: 개)	50	30	30	50
$\theta(m)$ (생산설비 이상요인 발생빈도)	0.02	0.01	0.02	0.015
γ (측정기 이상요인 발생빈도)	0.01	0.01	0.01	0.01
γ (재가공 합격비율: %)	80	80	80	80
$1-\beta(m)$ (전구간 공정이탈상태율)	0.90	0.90	0.90	0.90
$d_1(m)$ (이상요인 찾는시간: 시간)	0.1	0.15	0.1	0.15
$d_2(m)$ (이상요인 제거시간: 시간)	0.5	0.3	0.4	0.4
$g(m)$ (샘플링 시간: 시간)	0.01	0.01	0.01	0.01
e_1 (제 1종의 과오율)	0.01	0.01	0.01	0.01
e_2 (제 2종의 과오율)	0.005	0.005	0.005	0.005
ζ (전수검사 효율성: %)	0.6	0.6	0.6	0.6

〈 표 2 〉 다 공정에서의 품질비용

(단위 : 원)

	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
$b_1(m)$ (공정관리 비용)	5,000	5,000	5,000	5,000
$b_2(m)$ (잘못된 경고 조사비용)	20,000	20,000	20,000	20,000
$b_3(m)$ (이상요인 제거비용)	30,000	30,000	30,000	30,000
$a_1(m)$ (샘플링검사 고정비용)	1,000	1,000	1,000	1,000
$a_2(m)$ (샘플링검사 변동비용)	200	250	250	200
$a_4(m)$ (전수검사 변동비용)	200	250	250	200
$Cw(m)$ (재가공비용)	3,000	3,000	3,000	3,000
$Op(m)$ (제품 추가 가치)	2,000	3,000	3,000	2,000
$Cs(0)$ (원자재 가치)	5,000			
a_3 (전수검사 고정비용)	2,000			
a_5 (측정기 보수비용)	10,000			
$Cs(M)$ (폐기비용)	15,000			
Cz (운임비용)	1,000			
Cy (불만/이미지 손실비용)	20,000			

〈 표 3 〉 각 공정에 대한 결과

파라메터	공 정 (m)			
	1	2	3	4
p_i	4.56%	0.08%	1.24%	1.24%
p_j	84.13%	57.95%	65.54%	65.54%
불합격품	669.5	115.2	296.5	254.2
합격품	9330.5	9884.8	9703.5	9745.8
불량률	6.695%	1.152%	2.965%	2.542%

위에서 분석한 제조시스템은 많은 양을 재가공하여야 하므로 생산성이 떨어지고 재가공 비용이 높다. 그리고 재가공 후 불량률이 3.08%라는 것은 최근의 품질요구 추세에는 매우 미흡하다고 하겠다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 다음의 두가지 방법을 고려하였다. 첫째는 샘플링 간격의 단축이고, 둘째는 분산의 원인을 파악하여 그 원인을 개선하는 것이다.

첫째 방법으로 지금까지는 5개의 샘플을 2시간 간격으로 조사하여 이상요인의 존재 여부를 판독하였다. 그러나 공정이 이탈상태에서 계속 생산을 하므로써 많은 불량품이 발생한 것으로 생각된다. 따라서 1 공정에서 샘플링 간격을 2시간에서 30분 간격으로 줄이고, 비교적 불량률이 적은 2 공정은 1시간 간격으로 샘플링 검사를 하고, 3 공정에서는 2시간에서 30분 간격으로 줄였으며, 4 공정에서는 2시간에서 1시간으로 샘플링 간격을 줄였다. 그에 대한 결과는 <표 4>와 같다.

여기서 알 수 있듯이 1 공정에서 불량품은 669.5개에서 528개로 약 1.415%의 불량률이 감소하였고, 2 공정에서는 115.2개의 불량품이 51.6개로 감소하였다. 3 공정에서는 296.5개에서 182.3개로 감소하였고, 4 공정에서는 254.2개에서 196.6개로 감소하였다. 이는 샘플링 검사의 간격을 짧게 함으로써 이상요인이 발생한 것을 조기에 발견하여 그 원인을 제거함으로써 품질향상에 크게 기여한다는 것을 알 수 있다. 그러나 재가공 전의 전체 불량률은 9% 이상이므로 여전히 근본적인 문제의 해결은 아니라는 것을 알 수 있다. 총 9,791.26개는 합격품이고 208.74개는 불량품으로 폐기된다. 즉 재가공 후의 합격률은 약 98%이다.

두번째 방법으로 분산의 원인을 파악하여 그 원인을 제거함으로써 품질개선을 한 경우를 분석하여 보자. 샘플링 간격은 여전히 1, 2, 3, 4 공정에 대하여 각각 30분, 1시간, 30분, 1시간으로 5개의 샘플을 채취하였다. 그리고 1 공정에서 제조되는 제품의 표준편차는 0.05에서 25% 감소된 0.0375로 하였고, 3 공정에서의 제품 표준편차도 0.04에서 25% 감소된 0.03, 4 공정에서도 제품의 표준편차를 0.04에서 25% 감소된 0.03으로 공정을 개선하였다. 그리고 비교적 분산이 적은 2 공정은 표준편차가 0.03에서 12.5% 감소된 0.02625로 개선되었다고 하자.

< 표 4 > 샘플링 간격 단축시의 결과

파라미터	공 정 (m)			
	1	2	3	4
p_1	4.56%	0.08%	1.24%	1.24%
p_2	84.13%	57.95%	65.54%	65.54%
불합격품	528.0	51.6	182.3	196.6
합격품	9472.0	9948.4	9817.7	9803.4
불량률	5.280%	0.516%	1.823%	1.966%

이에 대한 결과는 <표 5>와 같다. 공정이 안정상태에서의 불량률(p_1)이 4.56%에서 0.76%로 감소하였고, 공정이 이탈상태에서의 불량률(p_2)도 84.13%에서 62.93%로 감소한 것을 알 수 있다. 이로인해 불량품의 수가 132.2개로 감소되었다. 2 공정에서는 p_1 이 거의 0.00%이고 p_2 는 20.9%로 감소되어 불량품의 수가 23.6개로 감소되었다. 3 공정에서는 p_1 이 0.08%이고 p_2 는 57.905%로 감소되어 불량품의 수가 60.25개로 감소되었다. 또한 4 공정에서도 p_1 이 0.08%, p_2 가 57.95%이며 불량품의 수도 73.4개로 감소되었다. 총 285.8개의 불량품중에서 단일 공정이 불량인 282.1개를 재가공하여 합격품으로 전환한 후 총 합격품의 수는 9939개로써 99.39%의 합격품을 생산하였다.

< 표 5 > 샘플링간격 단축과 분산 감소시의 결과

파라메터	공 정 (m)			
	1	2	3	4
p_1	0.76%	0.00%	0.08%	0.08%
p_2	62.93%	20.90%	57.95%	57.95%
불합격품	132.2	23.6	60.25	73.4
합격품	9867.8	9976.4	9939.75	9926.6
불량률	1.322%	0.236%	0.6025%	0.734%

이를 종합적하여 보면 샘플링 간격을 단축하고 분산의 원인을 규명하여 연속적인 개선에 의해 전체 불량률이 2.858%(재가공 전)로서 원래 상황에 비하여 9.90% 감소하였고, 단순히 샘플링 간격을 짧게 하였을 경우에 비해 6.44% 감소한 것으로 나타났다. 따라서 불량률이 높을 경우에는 샘플링 검사 간격을 단축시켜 샘플링 횟수를 늘림으로써 공정이상을 조기에 발견시킬 수 있으며, 무엇보다 중요한 것은 제품 특성치의 분산 원인을 규명하여 분산을 감소시켜 균일한 제품을 생산하도록 하여야 한다.

샘플링 간격을 단축하고 분산을 감소시킨 두번째 방법인 경우에 품질비용이 어느 정도 인지를 구하여 보지. 예방비용에는 공정관리비용과 생산설비 유지비용이 포함된다. 공정을 관리하고 생산설비를 유지하기 위하여 1 공정에서 1,139,410원, 2 공정에서 1,598,725원, 3 공정에서 1,899,036원, 4 공정에서 1,099,201원 등으로 총 5,736,372원이 필요하다.

평가비용은 크게 검사비용과 측정기 유지비용이 포함된다. 그리고 검사비용은 각 공정중에 샘플링검사와 전 공정을 마친 후 전수검사하는 비용이 포함된다. 먼저 샘플링검사와 측정기 유지비용을 각 공정으로 구분하면, 1 공정에서는 818,406원, 2 공정에서는 701,678원, 3 공정은 1,563,689원, 4 공정에서는 438,820원이 필요하다. 그리고 전 공정이 끝난 후 전수검사에는 5,402,000원이 필요하다.

내부실패비용은 공정 중에 발생한 불량품을 외부로 반출되기 전에 회사내에서 발견하여 재가공하거나 폐기시킴으로써 발생한 비용이다. 전체 소요된 재가공비용은 965,080원이고, 폐기비용은 897,569원으로써 총 1,862,649원이다.

외부실패비용은 직접비용과 간접비용으로 구분된다. 직접비용은 22,864원이고 간접비용은 28,580원으로 총 51,444원으로 매우 적은 편이다. 이는 전수검사에 의해 극히 일부(1.429개)만이 불량품을 합격품으로 판정하여 납품하였기 때문이다. 그러나 단순히 샘플링 검사에 의하여 판정한 후 납품을 하면 285.8개의 불량품을 납품하게 되어 총 외부실패비용이 10,288,800원에 달하게 된다. 이는 전수검사에 필요한 5,402,000원에 비해 4,886,800원이 더 많은 금액이다.

4가지 품질비용을 합하면 총 16,274,132원으로 제품 당 1,627원의 품질비용이 예상된다. 이는 원자재 가치에다 가공비를 포함한 제품의 단가가 15,000원이므로 약 11%가 제조단계에서 발생하는 품질비용이다. 이 금액에다 설계와 기획단계에서 발생하는 품질비용, 품질평가에 필요한 설비비용 및 유지비, 그리고 간접인건비와 운영비 등이 포함되면 품질비용은 이보다 더 높다.

4. 결론

오늘날과 같은 산업 경쟁시대에서는 소비자가 원하는 유형의 제품을 경쟁력있는 가격에 좋은 품질의 제품을 적절한 시기에 공급하여야만 살아남을 수 있다. 이런 경쟁속에서 제품을 균일하고 저렴하게 공급하기 위하여는 공정관리와 품질관리가 매우 중요하다. 그러나 좋은 설비를 가지고 제품을 생산하더라도 항상 불량품을 제조할 가능성은 존재한다. 특히 다공정을 요구하는 주요 부품의 경우에는 제조시스템에서 품질규격에 맞는 제품을 생산하고 있는가를 주의 깊게 관찰하고 모니터링하여야 한다. 왜냐하면 제품의 품질은 단순히 합격, 불합격을 떠나서 생산비용, 생산성, 나아가서 미래의 구매력등 회사에 결정적으로 중요한 역할을 할 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 제조공정에서 품질비용을 추정하는 모델을 개발하였다. 품질비용에 크게 영향을 미치는 요소는 여러가지가 있는 것을 알 수 있다. 특히 제품의 품질특성치의 분산과 검수방침이 품질과 품질비용에 중요한 변수이라는 것을 알 수 있다. 품질관리자나 품질측정기에 의한 손실, 즉 제 1종의 과오와 제 2종의 과오도 중요한 변수이다. 분산이 크고 공정에 이상이 발생할 확률이 클 경우에는 조기에 공정의 이상유무를 발견할 수 있는 검사방안을 사용하여야 한다. 그러나 전수검사의 경우 생산량이 클 경우에는 생산성을 저하시킬 수도 있으며, 기계가공 분야에서는 불량품 생산의 원인이 될 수도 있다는 것을 주의하여야 한다.

품질비용을 네가지로 각각 분리하여 구함으로써 단순히 비용산출만을 하는 것이 아니라, 품질비용을 제조단계에서 정량화하여 모든 인원이 품질의 중요성을 인식하여 계속적으로 공정을 향상시키고 품질을 향상시켜서 궁극적으로 총 품질비용을 낮추고 품질을 향상시키며, 나아가서 기업의 경쟁력을 향상시킨다는 면에서 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 류한주, 김달곤 (1994), "품질비용시스템의 구축절차와 한계에 관한 소고," 「품질경영학회지」, 22권, 4호, pp. 132-151.
- [2] Clark, J. (1985), "Costing for Quality at Celanese," *Management Accounting*, March, pp. 42-46.
- [3] Clark, J. and Milligan, G. (1994), "How Sweet It Is-Quality Management in a Honey House: the Sticky Quality Problems of Honey," *Quality Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 379-399.
- [4] Duncan, A. J. (1956), "The Economic Design of X-chart Used to Maintain Current Control of a Process," *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 51, No. 274, pp. 228-242.
- [5] Feigenbaum A. V. (1961), *Total Quality Control*, New York: McGraw-Hill
- [6] Godfrey, J. T. and Pasewark, W. R. (1988), "Controlling Quality Costs" *Management Accounting*, March, pp. 48-51.
- [7] Hassan, M. Z. and Knowles, T. W. (1979), "An Optimal Quality Control Design for a Single-Product Serial Manufacturing Systems," *Journal of Quality Technology*, Vol. 11, pp. 20-27.
- [8] Juran, J. M. (1951). *Quality Control Handbook*, New York: McGraw-Hill .
- [9] Kaplan, R. S. (1983), "Measuring Manufacturing Performance: New Challenge for Managerial Accounting Research," *The Accounting Review*, Vol. 58, pp. 686-705.
- [10] Lee, H. and Rosenblatt, M. (1988), "Economic Design and Control of Monitoring Mechanisms in Automated Production Systems," *IIE Transactions*, Vol. 20, No. 2, pp. 201-209.
- [11] Lindsay, G. and Bishop, A. (1964), "Allocation of Screening Inspection effort: a Dynamic Programming Approach." *Management Science*, Vol. 10, pp. 342-352.
- [12] Lundvall, D. M. and Juran, J. M. (1979), "Quality Cost," *Quality Control Handbook*. New York: McGraw-Hill .
- [13] Montgomery, D. C. (1984), *Statistical Quality Control*, New York: Wiley .
- [14] Plunkett, J. J. and Dale, B. G. (1988), "Quality Costs: a Critique of Some Economic Cost of Quality Models," *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 11, pp. 1713-1726.
- [15] Roth, H. P. and Morse, W. P. (1986), "Let's Help Measure and Report Quality Costs," *Management Accounting*, August, pp. 50-53.
- [16] Schrader, L. J. (1986), "An Engineering Organization's Cost of Quality Program," *Quality Progress*, January, pp. 29-34.
- [17] Son, Y. K. and Hsu, L. (1991), "A Method of Measuring Quality Costs,"

International Journal of Production Research. Vol. 29, pp. 1785 – 1794.

- [18] Tang, K. (1987), "Economic Design of One-Sided Screening Procedure Using a Correlated Variable," *Technometrics*, Vol. 29, No. 4, pp. 477 – 485.
- [19] Thomas, M. U., Safie, F. and Svestka, J. A. (1986), "Developing Optimal Inspection Policies," *Research Paper*, Cleveland State University.