

비용요소를 고려한 치수공차설계

강병철

LG전자

윤원영

부산대학교산업공학과(기계기술연구소)

Dimension-Tolerance Design with Cost Factors

Byong Chul Kang

LG Electronics

Won Young Yun

Dept. of Industrial Engineering(RIMT) of Pusan National University

Abstract

In this paper, dimension tolerance design for components is studied. Three cost factors are considered: machining cost, rework cost, and loss related to product quality which is affected by the tolerances of components.

We propose a procedure to determine the optimal tolerances of components and apply the procedure to design the tolerances of fine motion stage in semiconductor machine. We compare the proposed procedure with the existing model for determining tolerance economically.

1. 서론

설계 부문에서는 고객 요구에 부합하는 상품을 적기에 시장에 출하하기 위해 신제품 개발이나 신 모델 출시를 계획적으로 행해 저 가격의 제품을 제공하는 것이 고객 만족도를 높이는 필요 조건이다. 제품 개발 절차는 고객 요구파악, 제품 기획, 시스템 설계, 파라미터 설계, 공차 설계로 대별된다. 설계자는 고객이 요구하는 다양한 기능과 품질의 제품을 최소 비용으로 가공, 조립 할 수 있는 제품 설계를 실시하는 것이 가

장 중요한 임무이다[7, 11].

고객의 요구 파악으로부터 기능이 결정되면 그 기능을 만족하면서 가공, 조립, 출하 비용을 최소화하는 경제적인 제품을 설계하여야 한다. 이를 위해서는 재료나 사용 부품의 사양, 규격품 사용의 유무, 정도(Accuracy)를 종합적으로 검토해 시스템 설계, 파라미터 설계, 공차 설계를 실시하여 최종적으로 제품 설계 도면에 정리한다. 시스템 설계에서는 요구되는 기능을 충족하는 제품의 원형(Prototype)을 개발하는 것으로서, 같은 기능을 같은 다수의 시스템 대안에서 하나의 대안을 선택하는 과정이다[7, 11].

파라미터 설계에서는 시스템을 구성하는 부품의 특성치인 설계 변수를 결정할 때 특성치와 비용 관계를 충분히 검토해 품질과 비용의 절충(Trade-off)을 통해 최적 특성치의 조건을 결정하는 단계이다.

공차 설계 단계는 파라미터 설계에서 이루어진 설계 변수들의 최적 조건하에서 설계 변수들의 가공 조립에서의 허용 범위를 결정하는 단계이다. 치수 공차나 정도에 따라서 가공 방법, 가공에 필요한 설비나 기계의 능력(Capacity)이 선택 결정된다. 설비 능력에 의해 가공 시간이 요구 정도에 의해 가공 공정수나 사용기계의 선정이 달라진다. 따라서 공차 설계에 있어서 공차를 필요 이상 엄격하게 설정하게 되면 가공 공정 수가 늘고 고도의 설비, 기계의 사용이 요구되어 비용이 과다하게 발생한다.

그러므로 설계자는 제품 품질에 대한 영향을 분석, 검토하여 부품의 정도나 공차를 결정하여야 하며 재료나 부품 가공비용의 절감 및 가공 조립 방법의 단순화 등을 위해 설계 단계에서 공차와 비용의 관계를 분석하여 최적의 공차를 설계하여야 한다.

공차 설계 분야에서 조립 공차, 치수 공차 등 다양한 공차가 존재하나, 본 연구는 치수 공차에 국한하여 공차설계의 기존연구에 관한 설명을 다루고자 한다. 지금까지 공차 설계에 대한 연구는 기술자들의 경험과 기계적인 특성 연구, 확률론의 이용 등 다양하게 이루어져 왔다. 설계시 각 부품의 치수나 사양은 가공과 조립을 거치면서 편차가 존재하며 이 편차의 원인으로는 재료 자체의 편차, 가공 기계 자체의 편차, 공구의 시간에 따른 변화에 의한 편차, 작업자의 변화에 의한 편차 등이 있다. 그러므로 설계시 이들에 대한 공차를 결정하게 된다[2, 7].

공차의 크기는 최종 제품의 조립 공정의 결정, Tool 선정, 준비 비용, 요구되는 작업자의 숙련도, 검사 및 측정 비용, 재작업 비용에 많은 영향을 미친다. 특히 제품의 각종 공차를 부여하므로 발생하는 제품 특성치의 산포는 제품의 기능과 수명에 직접적 영향을 주므로 소비자들의 제품에 대한 품질 평가는 공차의 크기에 의해 영향을 받게 된다. 일반적으로 공차를 결정 하고자 할 때 설계자는 기능 만족을 위해 공차를 엄격하게 부여하고자 하며, 제조에서는 공차를 다소 크게 가져가므로 부품의 조립을 용이하게 하고 제조 비용을 줄이려고 한다. 따라서 이러한 설계와 제조 부문간의 상충되는 요구를 합리적으로 결정하기 위해서 공차를 설계상의 기능 만족과 제조 비용을 동시에 고려하며 경제적인 공차 설계를 실시하는 것이 매우 중요하다. 즉 제품의 조립공차가 주어져 있을 때에 각 부품에 궁극적으로 제품 공차를 만족 할 수 있도록 공차를 할당하는 문제이다.

본 연구는 제품 특성치인 제품의 치수 공차가 주어져 있는 경우, 제품 특성치에 영향을 주는 부품들의 치수 공차를 경제적으로 결정하는 문제에 대한 연구이다. 공차 설계를 위한 기존 연구 방법으로는 1) 가공 조립된 제품의 표준 편차를 조사하여 공차 만족 여부 안을 고려하여 부품 공차를 정하여 주는 확률적, 확정적 방법[3, 7, 9] 2) 손실 함수를 고려하여 정하여 주는 방법으로 크게 대별된다.

Garrett와 Hall(1968)는 로봇트의 4절 기구(Linkage)에 대하여 링크 길이 공차와 간극의 효과를 모의 실험 방법으로 규명하고 민감도 해석을 통하여 최적 설계까지 제안했으며, 류제하(1984)는 제조 공차와 간극을 가진 제조 비용과 기계적인 오차를 동시에 최적화 시키는 공차 최적화 기법을 제안하였다. 확률적 문제로의 접근을 위해서 모든 기계에 대해서 기구학적 방정식, 즉 목적 함수와 신뢰 조건을 유도하고 수학적 계산을 수행하였다. 그러나 이러한 확률 이론을 적용한 공차 설계는 단품의 적용에는 가능하나 복잡한 기계 계에 적용 하기는 한계가 있다.

한편으로 공차 설계 방법 중 실험 계획법에 기초를 둔 접근 방법은 손석만(1995), 박경호 등(1996)은 다구찌 기법의 직교 배열법을 이용하고 성능 오차를 유도하여 단계별 공차 할당 방법을 제시하였다. 신동길(1994)은 몬테 카를로 실험을 이용하여 신뢰도를 구하고 다구찌 방법을 응용하여 각 변수의 공차를 할당하는 방법을 제시하였다. Lee등(1993)은 공차 설계 문제를 수리 계획법으로 모형화 하였으며 Kapur와 Cho(1996)는 다수 품질 특성치에 대한 공차 설계를 경제적으로 결정하는 비용 모형을 제안하였다.

지금까지의 연구는 제품 설계에 있어서 시스템의 성능과 이를 만족 시킬 수 있는 공차 설계에 중점이 두어져 있거나, 공차와 관련된 비용을 고려한 경우(Kapur와 Cho, 1996)에도 공차 크기와 비용 관계를 연속 함수로 가정하므로써 실제 현장에서의 주요 사례인 단속적 비용 함수(공차의 크기와 비용간에 계단형태의 단속함수관계) 모형을 고려하지는 못했다.

본 논문은 공차크기와 비용간의 단속함수인 경우 부품들의 치수 공차를 경제적으로 결정하는 문제에 관한 것으로 공차 크기와 관련된 3가지의 비용을 정의하고 총비용을 최소화하는 공차를 결정하는 절차를 제안하고 사례연구를 통해 제안된 절차의 유용성을 입증 하고자 한다.

2. 비용에 의한 치수 공차 결정

2.1 치수 공차와 손실 함수

공차를 결정하는 공차 설계 방법 중 본 연구의 중심 내용인 비용들을 도출하기 위해 다구찌의 손실 함수를 간단히 소개하고자 한다[류제하, 1984].

다구찌는 품질을 제품이 출하되어 사용되어질 때 야기되는 사회적 손실로 정의하고 목표치에서 멀어질 때 손실의 비중을 더 주자는 의미에서 특성치의 목표 특성에 따라

손실 함수를 2차식으로 근사화하여 다음과 같이 정의하였다. 기준치가 망목특성인 경우 치수가 y 일 때의 손실 크기 $L(y)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$L(y) = k(y - m_0)^2 \quad (1)$$

식 (1)에서 규격은 $m_0 \pm \Delta_0$ 이고 기대 손실은 다음과 같다.

$$L = E[L(y)] = k[\sigma_2 + (\mu - m_0)^2] \quad (2)$$

만일 제품 치수(제품 특성치)가 하위 부품들의 치수(부품 특성치) t_1, t_2 에 의해 결정되는 경우에 즉 $Y = f(t_1, t_2)$ 로 표현 될 때 제품 특성치 Y 의 분산은 근사적으로 다음과 같다[Kapur, Cho, 1996].

$$\text{Var}(Y) = [\partial Y / \partial t_1 | t_1 = m_1, t_2 = m_2]^2 \sigma_1^2 + [\partial Y / \partial t_2 | t_1 = m_1, t_2 = m_2]^2 \sigma_2^2 \quad (3)$$

m_1, m_2 : 부품특성치 t_1, t_2 기준치

σ_1, σ_2 : 부품특성치 t_1, t_2 표준편차

그리고 t_1, t_2 가 주어진 경우의 기대 손실은 다음과 같다.

$$E[L(t_1, t_2)] = k[\text{Var}(Y) + (f(m_1, m_2) - m_0)^2] \quad (4)$$

2.2 치수공차와 비용

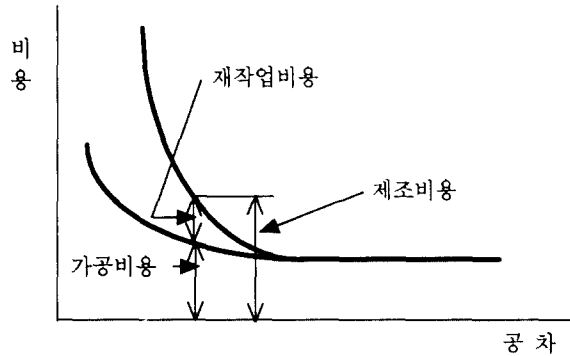
부품의 치수공차(부품특성치의 공차)를 경제적으로 결정하기 위하여 공차크기와 관련된 비용들을 고려하여야한다. 이에는 크게 부품의 가공에 관련된 비용과 부품이 조립되어 제품의 특성치에 의해 야기되는 비용으로 구분된다. 먼저 부품의 가공과 관련된 비용을 보면 다음과 같다.

1) 부품가공과 관련된 비용

부품 특성치의 공차 크기에 따라 영향을 받는 부품가공시의 비용으로는 가공 비용과 허용 규격을 벗어나므로서 발생하는 재작업 비용이 있으며 이 비용들은 가공이 공차의 크기에 관계없이 단일 프로세스에 의해 이루어지는 경우와 공차의 크기에 따라 가공프로세스가 다른 복합 프로세스의 경우에 따라 비용 모델이 다르게 된다[신동길, 1994].

① 단일 프로세스 비용 모델

가공 프로세스가 바뀌지 않는 단일 프로세스일 경우 가공비용과 공차의 크기에 하나의 함수 관계가 성립하며 <그림 1>과 같다. 이모형은 기존의 연구에서 가정된 모형이다.



< 그림 1 > 단일 프로세스에 의한 비용 모델

공차의 크기와 가공비용의 관계식으로 기존의 연구에서 사용된 연속형 비용 함수 모델은 4가지가 존재한다[Oyvind Bjorke, 1978]. 예로서 그 중에서

$$\text{지수형 관계모형 : } C(t) = a \exp(-t/b) + f$$

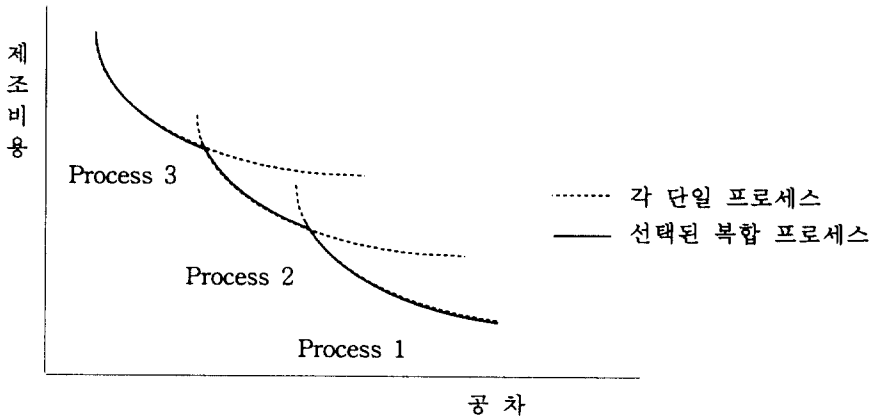
여기에서 t 는 공차크기, a, b 는 다양한 제작비용에 대한 상수이고, f 는 고정비용이다. 위의 함수 모델은 공차와 가공 비용간의 관계를 표시한 모델이며, 비용 함수는 단일 프로세스의 비용 모델로서 복합 프로세스에는 근사적으로 적용 될 수 있다. 3장의 사례 연구에서는 위의 지수형관계모형을 적용하여 분석하였다.

② 복합 프로세스 비용 모델

요구 정밀도에 따라 다른 프로세스가 채택 될 경우 공차 크기와 비용간에 하나 이상의 함수 관계가 존재하므로 발생하는 비용 모델이며 <그림 2>와 같다. 한 제품을 만드는데 사용될 수 있는 여러 프로세스의 각각 비용 모델 중에서 특정 공차 크기에 대해 가장 낮은 비용이 드는 프로세스를 선택하게 된다.

2) 제품 특성치와 관련된 비용

부품이 다른 부품과 조립되어 제품 특성치와 관련되어 나타나는 비용을 추정하기 위해서는 현재 부품 특성치가 제품 특성치에 어떠한 영향을 주며 그 크기가 얼마인지를 파악해야 한다. 제품 특성치와 관련된 비용은 제품 특성치가 규격을 벗어나므로서 발생하는 기대 손실 비용인 식(2)으로 표시되며, 부품 특성치의 분산이 제품 특성치의 분산에 미치는 영향인 관계식(3)를 반영하여 계산한다.



< 그림 2 > 복합 프로세스에 의한 비용 모델

2.3 비용 결정 절차

부품공차를 경제적으로 결정하기 위해서는 부품의 공차크기에 관련된 앞절에서 설명된 가공비용, 재작업 비용, 손실 비용을 추정해야 한다. 각 비용 요소 결정의 절차는 다음과 같다.

1) 가공비용의 산출

제품 설계가 완료되면 공정 설계를 행한다. 제품 설계에서의 도면과 설계 정보를 통해 가공 방법의 선정, 가공 기계 및 순서 결정, 가공비용 및 시간 계산 등의 과정을 거친다. 복합 프로세스일 경우의 비용 함수 모델에서 알 수 있듯이 공차에 따라 채택되는 최적 가공 프로세스가 바뀌므로 공정 설계 단계에서 가공 프로세스가 최적화 될 수 있도록 하여야 한다.

가공 프로세스가 결정이 되면 다음으로 가공 프로세스의 표준시간, 표준 비용이 산출되어야 한다. 표준시간의 설정은 구체적인 작업계획 작성을 통하여 ① 공정 순서의 결정 ② 가공 장비의 결정 ③ 표준 작업 시간(준비 시간 + 가공 시간)을 결정한다.

다음은 기종별 시간당 가공비용을 산출하여야 한다. 시간당 가공비용의 구성은 설비 기계의 고정비, 설비의 비례비, 직접공 노무비, 공통비로 구성되어 있으며 구체적인 내용은 다음과 같다.

- 설비기계의 고정비: 설비기계의 감가 상각비, 고정 자산세/보험료, 건물의 감가상각비(세금, 보험료 포함), 건물의 보전비, 임차료 등
- 설비의 비례비 : 에너지비(전력/가스등), 수선비등
- 직접공 노무비 : 직접공의 임금, 급여, 제 수당, 퇴직금, 법정 복리비 등
- 공 통 비 : 특정한 직장내의 공통비(노무비, 설비비, 경비), 직장 전체의 공통 배부액 (간접부서의 노무비, 설비비, 경비등)

그러므로 표준 작업 시간과 시간당 가공비용부터 계산된 가공비용 (CM)은 다음과 같다.

$$C_M = \sum_{i=1}^n S_i * C_m \quad (5)$$

S_i : i 요소작업의 표준시간(가공 시간 + 준비 시간)

c_m : 시간 비용

n : 총 요소 작업수

기존의 공차-비용 모델에서는 공차의 크기에 따른 비용의 함수를 연속 함수로서 모형화하였으나 복합 프로세스 가공 모형에서는 연속 함수를 사용하는 것이 큰비용 추정 오류를 야기 할 수 있다.

2) 재작업 비용의 산출

재작업 비용은 부품 특성치가 규격을 벗어났는지를 검사하는 검사 비용과, 허용 한계를 벗어나 수정이 필요할 경우의 수정 비용으로 나타나며 계산 절차는 다음과 같다.

- ㉠ 검사 시간 산출(T_i) : 가공된 부품의 양품 여부를 확인하기 위해 필요한 시간을 추정한다. 검사 비용은 검사원의 등급, 측정기 종류, 검사 절차 등에 따라 달라진다.
- ㉡ 재가공 시간 산출(T_m) : 불량 내용 및 불량 정도를 확인하여 재작업의 범위를 결정하여, 재작업 순서 및 장비를 선정하고 대상물에 대한 재작업 시간을 계산한다.
- ㉢ 재작업 시간당 비용 산출(C_h) : 개당 재작업 비용은 검사에 소요되는 비용과 수정 작업을 위해 소요되는 비용의 합으로 나타난다.
- ㉣ 기대 재작업 비용은 개당 재작업 비용에 재작업 비율인 불량률을 곱하므로 구해진다. 규격을 벗어날 확률은 초기 설계 단계에서는 가공 기계의 능력(Machine capability)을 감안하여 계산하고, 실제 측정 데이터가 있을 시는 측정 데이터의 분산을 고려하여 정한다.

$$C_R = [(T_s + T_m) * C_h + T_i * C_i] * (1 - q) \quad (6)$$

T_s : 개당 준비 시간,

T_m : 개당 재가공 시간

T_i : 개당 검사 시간,

C_i : 개당 검사 비용

C_h : 개당 재가공 비용

q : 규격 내에 들 확률

3) 제품 특성치의 손실 비용산출

부품 특성치의 치수 변화가 제품 특성치에 미치는 영향 중 제품 특성치의 규격을 벗어남(부품검사에서 합격하였으나 이들이 조립을 거친 후 제품으로서 요구되는 규격

을 만족하지 못하는 경우)으로 발생하는 손실(두 부품 특성치의 경우)은 부품 특성치(치수) t_1, t_2 가 제품 품질 특성 $Y = f(t_1, t_2)$ 로 표현되면 제품 특성치의 분산은 식(3)을 활용하여 구하고, 제품 특성치의 손실은 다음과 같다.

$$\text{2차 손실함수 } C_p = k\sigma^2 \quad (7)$$

$$\text{불량 확률 손실함수 } C_p [1 - 2 \int_0^{\frac{4}{\sigma}} (1/\sqrt{2x}) \exp(-t^2/2) dt] \quad (8)$$

4) 총비용 모델 설정

앞에서 산출된 3가지 비용 요소의 합이 총비용이 된다. 즉

$$C_t = C_M + C_r + C_p \quad (9)$$

이며 총비용은 부품 특성치의 공차 함수이고 이 비용 함수를 최소화하는 공차크기를 결정하므로써 경제적인 공차설계가 이루어지는 것이다.

2.4 최적 공차 설계의 절차

앞 절에서 제시된 비용산출방법들을 고려하여 부품 특성치의 공차와 관련된 총비용을 최소화하는 공차 설계는 다음과 같이 요약 정리 될 수 있다.

[단계 1] 공차를 결정하고자 하는 부품 특성치들과 이 특성치에 영향을 받는 제품 특성치를 결정한다. 결정된 제품 특성치의 목표치와 공차가 결정된다.

[단계 2] 파라메타 설계에 의해 제품 특성치와 부품 특성치 들과 관계식을 결정한다.

[단계 3] 제품 특성치와 부품 특성치들과의 관계식에 근거하여 제품 특성치를 만족하는 범위에서 부품 특성치의 초기 공차들을 할당한다.

[단계 4] 할당된 초기 공차에서 어느 기종으로도 가공 가능하여 비용이 일정하여 공차와 관련된 비용에 영향이 작은 부품 특성치들은 제외시키고 모델을 단순화한다.

[단계 5] 선정된 부품 특성치들과 관련된 가공비용, 제작업 비용, 제품 특성치에 관련된 손실 비용을 계산한다.

[단계 6] 초기 공차를 기준으로 공차 범위가 느슨할 경우, 엄격할 경우로 나누어 총비용을 계산한다.

[단계 7] 총비용이 최소화되는 부품 특성치들의 공차들을 결정하고, 민감도 분석을 통하여 설계 개선을 실시한다.

이상은 공차와 관련된 비용을 고려한 최적 치수 공차 설계에 대한 절차에 대해 언급하였으며 이러한 절차의 유용성은 사례연구를 통해 검증을 실시하고자 한다.

3. 사례 연구

2절에서 제안된 비용에 의한 공차결정의 사례 연구로서 반도체 장비나 광디스크제조 장비 등에 요구되는 초정밀 위치 결정 구조 설계를 위해서 가장 핵심적인 미세 이송 기구(Fine motion stage)에 대한 경제성을 고려한 공차 설계를 실시 하고자 한다.

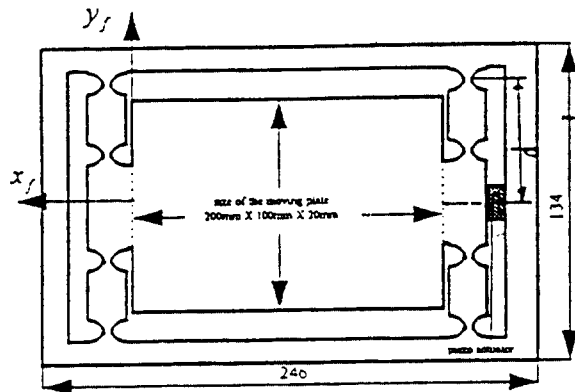
우선 미세 이송 기구의 품질 특성치인 위치 정도 $< \pm 0.4 \mu\text{m}$, Stroke: $20 \mu\text{m}$ (제품 특성치)를 만족하기 위한 파라메타 설계를 실시하여, 탄성 힌지(hinge)의 강성과 토크(Torque) 방정식을 구하고 강성이 최소화되는 탄성 힌지의 형상을 확정한다. 파라메타 설계에 의해 확정된 미세이송기구의 제품 특성치에 영향을 미치는 부품 특성치인 탄성 힌지의 공차설계를 행한다.

여기에서는 미세이송기구의 파라메타 설계 자체가 목적이 아니므로 기존 설계된 데이터활용하고 구체적 전개는 생략하기로 한다.

채택된 미세 이송 기구 및 탄성 힌지의 구조는 <그림 3>, <그림 4>와 같다.

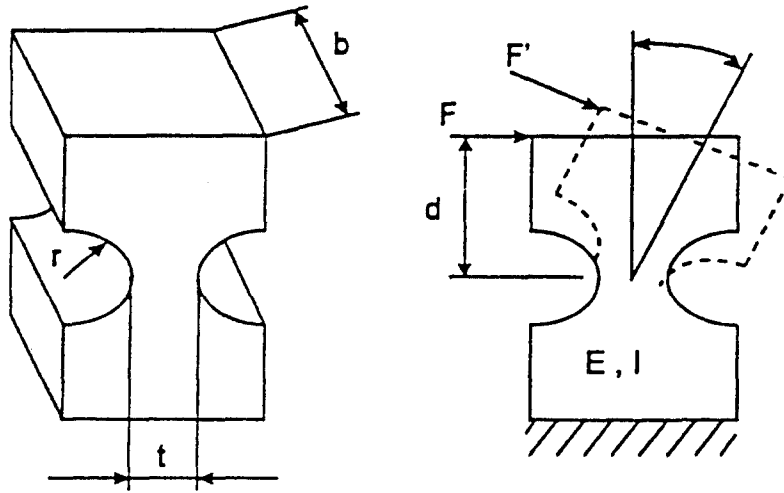
2절에서 제안한 공차 설계 단계에 따라 사례연구를 실시하고 실제 적용 공차와 비용을 검증하고자 한다.

제 1 단계 : 서브 마이크론의 정밀도를 얻는 초정밀 메커니즘의 개발을 위해 미세이송기구 측면에서 탄성 힌지 구조가 채택되었으며, 고 강성의 미세이송기구의 설계를 위해서 CAE(Computer aided engineering)를 활용하였으며, CAE 결과를 이용하여 설계, 제작하여 품질 특성이 Stage의 위치정도 $< \pm 0.4 \mu\text{m}$ 및 Stroke: $20 \mu\text{m}$ 가 되도록 이송기구를 모델링하고 위치 응답 실험을 행하였다.



d : 힘이 걸리는 부위에서 탄성 힌지 notch 끝단까지의 거리

< 그림 3 > 미세이송 조정기구의 구조



(a) 탄성 힌지의 치수 (b) 힘 F 에 의한 탄성 힌지의 변화

< 그림 4 > 탄성 힌지의 형상

제 2 단계 : 미세이송기구의 품질 특성에 결정적 영향을 주는 미세이송기구의 구조, 탄성 힌지의 재질, 형상 및 형상에 따른 특성을 파악하기 위해 파라메타 설계를 행한다.

미세이송기구의 구조 및 탄성 힌지의 형상은 <그림 3>, <그림 4>와 같이 결정되었으며, 파라메타 설계에 의해 결정된 탄성 힌지의 강성식 및 토크식은 식(10), (11)과 같다.

$$\text{강성식 } K = M / \Theta = 2/9\pi * E * b * (t/r)^{1/2} t^2 \tag{10}$$

$$\text{토크식 } M = F * d \tag{11}$$

$$\Theta = M / K$$

M : 힌지의 토크

t : 힌지의 가장 좁은 부분 치수

r : notch의 반경

F : 힘

E : 재료의 탄성계수

b : 힌지의 폭

Θ : 각 변위

위치 정도를 나타내는 변수 x 에 대한 함수로 나타내면 식(12)과 같으며 변수 x (제품 특성치)에 영향을 미치는 부품 특성치는 r, t 이다.

$$x = 22.5 * 10^{-5} * F * r^{1/2} * t^{-5/2} \quad (12)$$

제 3 단계 : 결정된 부품 특성치 t, r 에 초기 공차를 할당한다. t 의 초기 공차를 Δ_1 라하고 x 가 공차를 만족시키는 Δ_1 를 구하면 $\Delta_1 = 8 \mu\text{m}$ 이 된다.(단 r 의 공차 $\Delta_2 = 5 \Delta_1$ 으로 두고 r/t 는 일정하다고 가정한다.)

$$\text{변위 } x \text{의 정밀도 } -0.4 < x = F/K < +0.4$$

Stroke: $20 \mu\text{m} \pm 0.4$ 를 만족하는 부품 특성치 d 의 초기 공차 Δ_d 를 다음 식에 의해 구하면 $\Delta_d = 2.22\text{mm}$ 가 된다.($s = 10 \mu\text{m}$, $d = 55\text{mm}$)

$$\tan \Theta = s/d, \quad 0.4 < s = d \tan \Theta < +0.4$$

제 4 단계 : 할당된 초기 공차 중, 공차 범위가 커서 어떠한 기종으로도 가공 가능할 경우($100 \mu\text{m}$ 이상 일 경우)에는 앞의 공차-비용 함수 모델에서 알 수 있듯이 가공비용이 일정하게 되어 모델을 단순화시키기 위해 제외시킨다. 따라서 d 의 할당된 초기 공차가 $\Delta_d = 2.2\text{mm}$ 는 제외하고 t, r 만 고려하여 전개하고자 한다.

제 5 단계: 선정된 초기 공차와 관련된 비용을 계산한다.

1) 가공비용의 계산

우선 설정된 부품 특성치 t, r 이 다양한 공차로서 가공 작업을 하는데 드는 가공비용을 계산하기 위해 탄성 한지의 작업 계획 <표 1>을 작성하였으며 이를 토대로 공차에 따른 기종별 가공 시간과 가공비용에 대한 <표 2>를 구하였다. 가공비용은 시간당 가공비용과 가공 시간을 곱한 식(6)를 활용하여 계산하였다.

<표 2>에서와 같이 공차에 따라 가공 절차가 차이가 나며 각 기계기종별로 가공비용의 차이가 남을 알 수 있다. 탄성 한지를 가공하기 위해서는 공차 정도에 관계없이 기본적인 가공 프로세스인 범용 밀링(MF), 성형 밀링(MU), 열처리 작업(HQ)은 공동으로 수행되며, 공차 범위가 $10 \mu\text{m}$ 이상 일 때는 성형 연마(GP)를 하며, 그 이하 일 때는 정밀 성형 연마 후 정밀 투명 연삭(GF)을 실시하며, $1 \mu\text{m}$ 이하 일 때는 랩핑 공정(FL)이 추가된다.

<표 2>는 공차가 $10, 50 \mu\text{m}$ 이외에는 가공 프로세스가 다른 복합 프로세스에 의한 비용 모델을 따르며, 공차가 $100 \mu\text{m}$ 이상 일 경우에는 가공비용이 일정하여, 공차-비

용 함수 모델을 통한 최적 공차를 설정하는 것은 의미가 없음을 알 수 있다. 여기서 부품 특성치 t, r 에 따른 가공비용은 <표 3>과 같다.

공차와 비용 관계를 앞에서 언급된 지수형관계모형을 적용하여 자료로부터 회귀 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$C(t) = 217 \exp(-t/4) + 66 \tag{13}$$

이 모델은 부품 특성치 t, r 를 연속적 변수로 취급하여 전개한 경우이므로, 비연속적인 실제 비용 모델에 대하여는 근사적으로 사용 가능하다.

< 표 1 > 탄성 한지의 작업 계획표

공정 번호	내 용	작 업 장 소	기계 그룹	보 조 장 비	작업자 등 급	표준시간 (분)
MF	① 6면 완성 가공 ②~⑤ 6면 연삭 여유적용	비향온실	범용 밀링	F/Cutter Vice	D	8(2)
MU	① R형상 완성 ②~⑤ R 형상 황삭 가공	"	성형 밀링	E/Mill Vice	C	6(1)
HQ	HRC 6000 열처리	"	담금질	열처리로	B	60(60)
GP	② 6면/R 완성가공 R Dressing 1회	향온실	성형 연삭	Vice R-Dress	B	42(26)
	③ 6면/R 완성가공 R Dressing 2회					58(38)
GD	④ 6면 완성가공	"	정밀성형 연삭	직각 Jig	A	42(10)
	⑤ 6면 완성가공					60(10)
GF	④ R성형 2회 완성	"	정밀투명 연삭	Chart (20배)	A	30(10)
	⑤ R성형 3회 완성					50(10)
FL	⑤ 형상 랩핑	"	랩핑	정반Jig	A	60(40)

< 표 2 > 공차에 따른 가공비용

기종 공차(μm)	MF	MU	HQ	GP	GD	GF	FL	가공비용 (분)
±100	8	6	60	-	-	-	-	66.0
± 50	8	6	60	42	-	-	-	96.0
± 10	8	6	60	58	-	-	-	107.0
± 5	8	6	60	-	42	30	-	140.6
± 1	8	6	60	-	60	50	60	230.1
기종별가공비 (원)	58.2	57.5	52.5	42.9	61.1	63.7	50	-

(단 상기 규격 안에 특성치가 들 확률은 $m \pm 3\sigma$ 인 99.73% 임)

< 표 3 > 부품 특성치 t, r 에 따른 가공비

t 의 공차 (μm)	가공비용 (원)	r 의 공차 (μm)	가공비용 (원)
15.0	39,625	80	12,000
12.5	40,313	60	24,000
10.0	41,000	40	32,750
7.5	57,800	20	38,250
5.0	74,600		

(공차의 크기와 무관한 기본적 프로세스에 의한 비용 66,000원은 제외)

2) 재작업 비용

개당 재작업 비용은 불량 내용 및 불량 정도에 따라 달라진다. 단성 한지 t, r 의 공차 범위에 따른 재작업 비용은 식(6)를 활용하여 계산하면 <표 4>와 같다.

< 표 4 > 부품 특성치 t, r 에 따른 재작업 비용

(t 에 대한 재작업 비용)

t 의 공차 (μm)	재작업 기종	재작업 시간 (분)		재작업 비용 (원)
		준비시간	재가공시간	
15.0	GP	38	20	112
12.0	GP	38	21	114
10.0	GP	38	22	116
7.5	GP	12	20	145
	GF	10	10	
5.0	GP	12	30	201
	GF	10	20	

(r 에 대한 재작업 비용)

r 의 공차 (μm)	재작업 기종	재작업 시간 (분)		재작업 비용 (원)
		준비시간	재가공시간	
80	GP	26	10	69
60	GP	26	16	81
40	GP	28	22	93
20	GD	12	20	108

(단 기계능력은 3σ 인 99.73%임)

재작업 시간은 공차 범위에 따라 차이가 나므로, 이의 실측 데이터를 적용하였으며, 재작업 프로세스는 $10\mu\text{m}$ 이상일 경우에는 재작업을 성형 연삭(GP) 만으로 실시하며, $10\mu\text{m}$ 이하일 경우에는 정밀 성형 연삭(GD), 정밀 투명 연삭(GF)로 하며, $1\mu\text{m}$ 이하일 경우에는 여기에다 랩핑 작업이 추가되어 재작업을 실시한다. 단 재가공 비용은 기계능력(Machine capability)이 3σ 로 규격에 들 확률이 99.73%로 두고, 재작업

시간은 규격의 벗어남 정도 및 공차수준에 따라 차이가 나므로 여기에서는 실제 측정치로 계산하였다. 단 준비시간은 기종별 준비시간을 적용하였으며, 검사시간, 공차 범위에 따라 차이가 나므로 10 μm 이상 일 경우에는 측정 도구를 버어니어캘리퍼스를 사용하여 검사시간 2분으로 10 μm 이하 일 경우에는 마이크로 메타를 사용하여 검사시간 5분으로 계산하여 재가공시간에 포함하였다.

3) 제품특성치 관련 기대 손실

제품 특성치가 규격을 벗어나므로서 발생하는 기대 손실은 제품 특성치 t 의 분산 (σ_x^2)을 식(3)를 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= [\partial x/\partial t | t=1, r=2]^2 \sigma_1^2 + [\partial x/\partial r | t=1, r=2]^2 \sigma_2^2 \\ &= [5.625 \times 10^{-2}]^2 \sigma_1^2 + [0.563 \times 10^{-2}]^2 \sigma_2^2 \end{aligned} \tag{14}$$

t 및 r 의 분산을 식(14)에 대입하여 x 의 분산을 구하여 2차 연속 손실 함수를 이용하여 손실 비용을 구한 것이 경우 1이며, x 의 공차가 0.4 μm이므로 이를 이용하여 표준 정규 분포표에서 제품 특성치가 규격을 벗어날 확률에 해당 불량 비용을 곱하여 제품 특성치의 손실을 구한 것이 경우 2이며, <표 5>와 같다.

< 표 5 > 부품 특성치 t, r 에 따른 손실 비용

t 공차 (μm)	t 표준편차	r 공차 (μm)	r 표준편차	x 의 분산 (σ_x^2)	손실비용 (원)	
					경우 1	경우 2
15.0	5.0	80	26.7	0.1017	101,700	211,000
		60	20	0.0918	91,800	184,000
		40	13.3	0.0847	84,700	168,000
		20	6.7	0.0807	80,700	159,000
12.5	4.1	80	26.7	0.0758	75,800	147,000
		60	20	0.0659	65,900	119,000
		40	13.3	0.0588	58,800	99,000
		20	6.7	0.0546	54,600	87,000
10.0	3.3	80	26.7	0.0571	57,100	95,000
		60	20	0.0471	47,100	66,000
		40	13.3	0.0401	40,100	46,000
		20	6.7	0.0659	35,900	34,000
7.5	2.5	80	26.7	0.0424	42,400	52,000
		60	20	0.0325	32,500	26,000
		40	13.3	0.0254	25,400	12,000
		20	6.7	0.0212	21,200	6,000

5.0	1.7	80	26.7	0.0280	28,000	24,000
		60	20	0.0218	21,800	7,000
		40	13.3	0.0148	14,800	1,000
		20	6.7	0.0106	10,600	10

* 경우 1 : 2차 손실 함수 이용, 경우 2 : 제품 특성치의 불량률이용

4) 총비용을 최소화하는 공차 설계

이상에서는 부품 특성치 t, r 의 공차 크기에 따른 세가지 비용들을 계산하였으므로 이들 비용을 합하므로 총비용을 구하고 이를 최소로 하는 부품 특성치들의 최적 공차 크기를 결정한다. <표 6>에서 알 수 있듯이 부품 특성치 t, r 에 대한 총비용을 계산한 결과 $\Delta_1 = 7.5 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 20 \mu\text{m}$ 일 때 최소 비용이 발생하므로 이를 최적 공차로 선정한다.

< 표 6 > 부품 특성치 t, r 에 의한 총 비용

(불량률에 의한 손실 비용 : 개당 불량 비용 1백만원 일 경우)

t 공차 (μm)	r 의 공차 (μm)	가공비용 (원)	재작업 비용 (원)	손실비용 (원)	총비용 (원)
15.0	80	117,625	181	211,000	328,806
	60	129,625	194	184,000	313,819
	40	138,375	205	168,000	306,580
	20	143,875	220	159,000	303,095
12.5	80	118,313	183	147,000	265,496
	60	130,313	195	119,000	249,508
	40	139,063	207	99,000	238,270
	20	144,563	222	87,000	231,785
10.0	80	119,000	185	95,000	214,185
	60	131,000	197	66,000	197,197
	40	139,750	209	46,000	185,959
	20	145,250	224	34,000	179,474
7.5	80	135,800	214	52,000	188,014
	60	147,800	226	26,000	174,026
	40	156,550	238	12,000	168,788
	20	162,050	253	6,000	168,303*
5.0	80	152,600	270	24,000	176,870
	60	164,600	282	7,000	171,282
	40	173,350	294	1,000	174,644
	20	178,850	309	10	179,169

5) 4)에서는 제품 특성치의 손실을 제품 특성치 불량률에 불량 비용을 곱하여 구하였으나 만일 2차 손실 함수를 가정하게 되면 총 손실 비용은 <표 7>과 같이 $\Delta_1 = 10 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 80 \mu\text{m}$ 일 때 최소 비용이 발생하는데 이것은 4)의 경우와 상이한 최적 값으로 제품 특성치의 손실을 구하는 방법에 따라 최적 공차가 다르므로 손실 함수의 사용에 주의해야 함을 알 수 있다.

6) 분석 및 검토

<표 6>, <표 7>를 검토해 보면 실제 총비용에 영향이 많은 비용은 재작업 비용보다는 가공비용 및 제품 특성치 손실 관계에 따라 총비용이 달라짐을 알 수 있다.

1개당 손실 비용이 감소할 경우(1백만원 → 5십만원)에 총비용을 계산해 보면 <표 8>과 같이 $\Delta_1 = 10 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 80 \mu\text{m}$ 에서 최소 비용이 발생함을 알 수 있다.

< 표 7 > 부품 특성치 t, r 에 의한 총 비용

(손실 함수에 의한 손실 비용 : 개당 손실 비용 1백만원 일 경우)

t공차 (μm)	r의 공차 (μm)	가공비용 (원)	재작업 비용 (원)	손실비용 (원)	총비용 (원)
15.0	80	117,625	181	101,700	219,506
	60	129,625	194	91,800	221,619
	40	138,375	205	84,700	223,280
	20	143,875	220	80,700	224,795
12.5	80	118,313	183	75,800	194,296
	60	130,313	195	65,900	196,408
	40	139,063	207	58,800	198,070
	20	144,563	222	54,600	199,385
10.0	80	119,000	185	57,100	176,285*
	60	131,000	197	47,100	178,297
	40	139,750	209	40,100	180,059
	20	145,250	224	35,900	181,374
7.5	80	135,800	214	42,400	178,414
	60	147,800	226	32,500	180,526
	40	156,550	238	25,400	182,188
	20	162,050	253	21,200	183,503
5.0	80	152,600	270	28,000	180,870
	60	164,600	282	21,800	186,682
	40	173,350	294	14,800	188,444
	20	178,850	309	10,600	189,759

< 표 8 > 부품 특성치 t, r 에 의한 총 비용

(개당 손실 50만원 일 경우)

t 공차 (μm)	r 의 공차 (μm)	가공비용 (원)	재작업 비용 (원)	손실비용 (원)	총비용 (원)
15.0	80	117,625	181	50,850	168,657
	60	129,625	194	45,900	175,719
	40	138,375	205	42,350	180,930
	20	143,875	220	40,350	184,445
12.5	80	118,313	183	37,900	156,396
	60	130,313	195	32,950	163,458
	40	139,063	207	29,400	168,670
	20	144,563	222	27,300	172,085
10.0	80	119,000	185	28,550	147,735*
	60	131,000	197	23,550	154,747
	40	139,750	209	20,050	160,009
	20	145,250	224	17,950	163,424
7.5	80	135,800	214	21,200	157,214
	60	147,800	226	16,250	164,276
	40	156,550	238	12,700	169,488
	20	162,050	253	10,600	172,903
5.0	80	152,600	270	14,000	166,870
	60	164,600	282	10,900	175,782
	40	173,350	294	7,400	181,044
	20	178,850	309	5,300	184,459

<표 9>는 가공비용을 공차의 연속 함수로 가정하여 자료로부터 회귀식을 구하여서 최적값을 구한 것으로 $A_1 = 10 \mu\text{m}$, $A_2 = 20 \mu\text{m}$ 일때 최소 비용이 발생하므로 <표 6>, <표 7>의 결과와 상이함을 알 수 있다.

종합적으로 최적 비용에 미치는 영향에 대해 분석을 하면 다음과 같다.

- (a) 가공비용의 경우 t, r 의 공차의 함수로 나타나므로 공차가 매우 엄격할 때와, 느슨할 때에 따라 총비용은 달라진다. 사례에서 공차가 $10 \mu\text{m}$ 이하 일때는 가공비가 급격히 증가하고 공차가 $100 \mu\text{m}$ 일때는 가공비는 거의 일정하게 된다.
- (b) 재작업 비용은 부품 특성치의 공차가 규격을 벗어나 재작업을 해야 할 확률 및 재작업 시간의 변화에 따라 달라지므로 공차가 엄격할수록 재작업 시간이 증가하여 재작업 비용은 늘어나나 본 사례에서는 그 영향이 매우 적게 나타났다. 재작업 시간은 대량 생산일 경우에는 대당 준비시간이 총 재작업 수량으로 나누어져 줄어 들고, 대신 검사시간이 증가하여 검사 비용을 별도 고려하여야 하나,

상기 사례에서와 같이 단품 수주 생산일 경우에는 해당 준비시간이 차지하는 비중이 증가하고 검사 시간의 비중은 줄어든다.

< 표 9 > 부품 특성치 t, r 에 의한 총비용

(연속 함수를 이용한 경우)

t 공차 (μm)	r 의 공차 (μm)	가공비용 (원)	제작업 비용 (원)	손실비용 (원)	총비용 (원)
15.0	80	71,100	181	101,700	172,981
	60	71,100	194	91,800	163,094
	40	71,100	205	84,700	156,005
	20	72,600	220	80,700	153,520
12.5	80	75,500	183	75,800	151,483
	60	75,500	195	65,900	141,595
	40	75,500	207	58,800	134,507
	20	77,000	222	54,600	131,822
10.0	80	83,800	185	57,100	141,085
	60	83,800	197	47,100	131,097
	40	83,800	209	40,100	124,109
	20	85,300	224	35,900	121,424*
7.5	80	99,300	214	42,400	141,914
	60	99,300	226	32,500	132,026
	40	99,300	238	25,400	124,938
	20	100,800	253	21,200	122,253
5.0	80	128,200	270	28,000	156,470
	60	128,200	282	21,800	150,282
	40	128,200	294	14,800	143,294
	20	129,700	309	10,600	140,609

- (c) 제품 특성치가 제품공차를 벗어나므로서 발생하는 손실은 부품 특성치인 부품 공차가 제품 특성치의 품질 특성에 미치는 영향 (특성치간 관계식)에 따라 달라진다. 부품 특성치인 t, r 에 대해 불량 비용을 구하였으나 r 에 의한 영향은 상대적으로 작음을 알 수 있었다.

위 사례에서와 같이 t, r 의 공차 크기를 $\Delta_1 = 15 \mu\text{m}$ 그리고 $\Delta_2 = 80 \mu\text{m}$ 일때, 불량률에 의한 손실비용은 328,806원이고 $\Delta_1 = 7.5 \mu\text{m}$ 그리고 $\Delta_2 = 20 \mu\text{m}$ 일때 최소 손실비용 168,303원으로 공차 크기가 줄어들면 불량 비용은 줄어드나 가공비가 급격히 늘어 총비용은 증가함을 알 수 있다. 반대로 치수 공차 크기를 크게 하면 가공비

는 줄어드나 재작업 비용 및 불량 비용이 증가하여 또한 총비용도 증가한다. 따라서 전체 비용을 고려하여 공차 설계를 하여야만 최적화할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 부품 특성치의 공차를 경제적으로 결정하는 절차를 제안하고 이 절차를 사례 연구를 통해 검토한 논문이다.

공차크기결정방법 중 공차와 관련된 총비용을 최소화시키는 모델을 제시하였다. 고려된 비용으로 부품 공차의 비용 요소를 확장하여, 부품 공차에 의해 제품 품질 특성에 미치는 영향인 손실을 고려하였으며, 공차와 관련된 비용 요소를 구하는 절차를 제시하였으며 손실 함수에서 고려되는 2차 손실 함수와 함께 불량만 고려한 손실 함수를 동시에 적용하여 공차 설계 결정 예를 제시하였다.

사례 연구를 통해 초정밀 메커니즘의 설계 시의 치수 공차에 대해 총비용을 감안한 최적 공차를 할당하였으며, 기존의 연속형 비용 함수 모형과도 비교하였다.

이론적 공차-비용 모델과 사례에서의 실제 비용 모델을 동시에 고찰하므로써 연속적인 경우와 비연속형 함수에 대해 동시에 적용 가능하도록 하였으며 가공시 가공비용은 비연속형 비용 함수를 사용하는 것이 보다 현실적임을 보였다.

사례에서와 같이 초정밀 메커니즘일수록 설계자가 총비용을 고려한 공차 설계를 하는 체계적 방법이 정립되므로써 전체 목표원가를 달성하기가 쉽다. 그리고 공차에 의해 기능상의 문제가 예상되는 부품이 실제 제작 과정에서 규격을 벗어날 경우에 제안된 절차를 따르므로, 불량에 의한 손실을 예측할 수 있을 것이며 이에 대한 적절하고 신속한 대응이 가능하리라 판단된다.

본 논문은 주로 제조 비용 측면에서의 공차의 최적 설계하는 방법에 대해 전개하였으나, 나아가 시스템 설계 단계에서부터 전체 제품 및 공정 설계시의 총비용을 고려하여 제품의 원가 경쟁력을 확보하는 것이 매우 중요하다.

따라서 공차 설계의 이전 단계인 제품기획, 시스템설계 및 파라미터설계 단계에서의 기능을 만족하면서 제조 비용을 최소화하는 연구가 보다 활발히 이루어져 제품 개발의 전체 과정에서 제반 비용과의 관계 정립을 통한 총비용 최소화의 설계 방안의 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] 박성현, 박영현, 이명주(1997), 「통계적 공정관리」, 민영사, pp. 441-450.
- [2] 송지복, 조규갑, 김정삼(1980), 「공정설계」, 성안당.
- [3] 류제하(1984), “제조 공차와 간극을 가진 제조비용을 고려한 추계적 최종 설계,”

- 한국과학기술원 석사학위논문.
- [4] 박경호, 한형석, 박태원(1996), “다구찌기법을 이용한 구의 공차설계에 대한 연구,” 「정밀공학회지」, 제13권, pp. 66-76.
 - [5] 손석만(1995), “동력학계의 강건 설계및 공차 할당,” 한국과학기술원 석사학위논문.
 - [6] 신동길(1994), “Monte Carlo Simulation과 다구찌 방법을 이용한 치차의 공차 할당,” 한국과학기술원 석사학위논문.
 - [7] Oyvind Bjorke(1978), 「Tolerancing」, TAPIR.
 - [8] Kailash Kapur, Byung-Rae Cho(1996), “Economic design of the specification region for multiple quality characteristics,” *IIE Transactions*, Vol. 27, pp. 237-248.
 - [9] R.E Garret, A.S. Hall(1968), “Optimal synthesis of randomly generated linkage:,” *Trans, ASME, J. Engineering for Industry*, pp.475-480.
 - [10] Woo Jong Lee, Tong. C. Woo and Shuo-Yan Chou(1993), “Tolerance synthesis for nonlinear systems based on nonlinear programming,” *IIE Transactions*, Vol. 25, pp. 51-61.
 - [11] 坂田眞一(1995), “Cost別 低減の考の方,” 「Nikkei Mechanical」, pp. 106-111.