

# NC 선반가공에서 공구 조정주기의 경제적 설계

배 문 태\*, 윤 원 영\*\*, 목 학 수\*\*

## Economic Design of Tool Resetting Period in NC Machining

Moon-Taek Bae\*, Won-Young Yun\*\*, Hak-Soo Mok\*\*

### ABSTRACT

This paper is related to economic design of tool-resetting period in NC machining. In NC lathe machining, the mean and variance of components dimension fluctuate in slow time and we should reset tool program to compensate the variation from the fluctuation. In this paper, we propose the procedure determining the optimal resetting period based on the total expected operating cost which consists of resetting cost and the quality cost related to dimension variation. As a case study, using experimental data about dimension changes of a lathe machining, we obtain the regression equations of mean and variance of the dimension fluctuation, total expected operating cost, and optimal resetting period.

**Key Words** : NC Lathe Machining(선반가공), Optimal Resetting Period(최적조정주기), Quality Cost(품질비용), Total Expected Operation Cost (총기대운영비용)

### 1. 서 론

절삭 가공은 공구의 마멸로 인해 가공의 치수 변화가 발생되며, 자동 생산 설비에서는 가공 치수 변화로 대량 불량품이 발생할 수 있으며, 절삭 가공에 있어서 문제점은 크게 네 가지로 요약할 수 있다.

첫째, 가공의 치수 불량품이 조립공정으로 이동하여 조립될 경우 재작업 비용 및 불량품의 선별 작업으로 인한 추가 비용을 발생시킨다. 둘째, 가공으로 인한 불량을 예방하기 위해 빈번한 NC 공작기계의 프로그램 보정 및 설비 Setup으로 각종 손실을 발생시킨다. (부품의 Load-

ing, 척킹, 가공, Unloading, 검사 손실, 불량품 폐기 비용). 셋째, 부품 가공은 조립 작업보다 선행되지만, 단납기를 요구하는 제품은 부품 생산 차질로 인하여 조립 작업에 영향을 주어, 판매 기회 손실을 초래하며, 소비자로부터 신뢰를 잃게 된다. 넷째, 가공 작업자가 바뀔 경우 가공 조건이 설정되어 있다하더라도 빈번한 공구 마멸 보정으로 표준 작업 준수가 어렵다. 이런 문제점으로 절삭비용의 상승은 제품의 가격 상승으로 이어지며, 결국 기업 경쟁력을 약화시키는 요소가 된다.

따라서 절삭 비용을 줄이기 위한 방안으로 NC 공작기계에서 이미 설정된 절삭 조건을 통하여 부품을 가공함으

\* LG전자(주) 리빙시스템 사업본부  
 \*\* 부산대학교 산업공학과, 기계기술연구소

로써 치수 정보를 수집하여 사전에 치수 변화를 예측하고 절대 치수와 비교 할 수 있는 시스템을 개발하여 가공 비용을 최소화하여야 한다(Fig. 1).

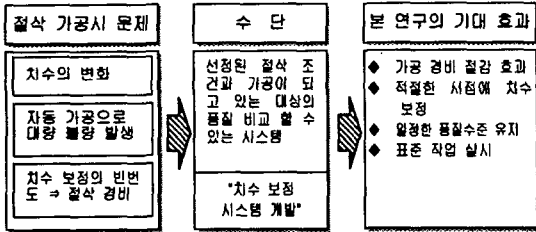


Fig. 1 Definition of problem

NC공작기계의 경우 선정된 절삭조건 하에서 공구마멸의 적절한 보정 횟수를 선정하여 실시함으로써 가공 경비 절감효과를 얻을 수 있고, 가공 치수가 규격을 벗어 나기 전에 치수 보정이 가능하므로 일정한 품질 수준을 유지할 수 있고, 표준작업이 가능하다. 이러한 효과를 얻을 수 있도록 하기 위해 적절한 시점에 공구마멸의 보정을 통해 치수 보정이 가능하도록 가공 치수의 추이에 관한 정보를 이용하여 품질비용을 최소화할 수 있는 치수 보정 절차를 구축함은 매우 중요한 현장 문제이다.

본 연구와 관련된 기존의 연구로는 품질 특성치가 확률적으로 나타나는 경우 최적의 가공 방법을 선정하거나 허용차를 결정하고자 하는 연구는 다양하게 이루어졌는데, 이들 연구에서는 공구의 시간에 따른 마멸을 고려하지 않은 초기 공구 작업 방법(최적 초기 평균결정 문제)에 집중하고 있다<sup>(1)(2)(3)</sup>. 그리고 재가공 비용의 최소화에 관한 연구와 공구 마멸을 미리 예측 하는 방법에 대한 연구가 진행되었지만 마멸 진행에 대한 모형 개발에 집중되어 있다<sup>(4)(5)</sup>.

공구 마멸의 예측에 관한 연구는 금형가공에서 절삭력 모델에 의한 공구 마멸의 예측에 관한 것으로서 공구의 이상 상태를 감시 하는 방법에는 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 하나는 절삭공구의 형상변화를 직접 측정하는 광학적인 방법과, 다른 하나는 절삭력, 진동, 가공표면 거칠기, 온도, AE (Acoustic Emission) 등과 같은 절삭과정 중에 발생하는 물리적인 Parameter를 이용한 간접적인 방법이 있다. 이러한 연구는 절삭력에 의한 공구 마멸을 예측한 간접적인 방법을 이용했다<sup>(6)</sup>.

시간에 따라 공구마멸이 진행되는 상황에서 보정주기의 경제적 설계에 대한 연구로서 Arcelus와 Banerjee<sup>(7)</sup>, 그

리고 Drezner와 Wesolowsky<sup>(8)</sup>가 선형적으로 공구 평균이 변화하는 경우 보정 주기와 초기 가공조건 설정에 대해 연구하였다.

본 논문은 시간에 따라 확률적으로 변화하는 공구 상태를 파악하고 공구의 보정 주기를 결정하는 것이 목적이며, 보정주기를 경제적으로 선정하고자 평균 변화에만 적용이 가능한 기존의 수리적 논문의 연구를 발전시켜 본산의 시간에 따른 변화도 동시에 고려하여 실제 NC공작기계에서 공구의 마멸이 진행되는 동안 최적의 공구 마멸 보정을 통한 공구의 마멸 보정 비용의 최소화에 관한 절차를 제안하고자 한다.

## 2. 최적 보정주기 결정 절차

본 절에서는 최적 보정주기를 결정하는 절차를 제안하고자 한다. 여기서 보정주기는 최적으로 결정할 경우 최적화 기준은 총 기대 운영비용으로 가정하는데 이 총 기대 운영비용은 보정을 할 때 사용되는 비용과 보정을 하지 않으므로 발생하는 품질 손실비용의 합으로 계산된다. 그러므로 먼저 품질 손실 비용에 대해 설명하고자 한다.

규격은 KS A 3001 품질 관리용어에 정의된 바에 의하면 "표준 중에 주로 물건에 직접 또는 간접적으로 관계되는 기술적인 사항에 관하여 규정된 기준"이다. 따라서 넓은 의미에서의 규격의 대상으로는 (1)자재와 최종제품, (2)공정, (3)시험방법, (4)검사방법, (5)제품의 사용 방법 등이 모두 포함된다. 본 연구에서는 규격의 좁은 의미에 해당하는 제품의 치수에 한정된 기술적인 규격(Technical specification)에 대하여 기술한다. 기술적인 규격은 두 가지 요소, 즉 공칭치수(Nominal size)와 허용차(Tolerance)에 의하여 이루어진다. 공칭치수는 기준이 되는 치수를 말하고 허용차는 기준치로부터 품질특성의 허용한계(Tolerance limit)까지를 말한다. 기존의 품질 관리에서 품질비용은 불합격률(규격을 벗어나는 비율)에 비례하는 것으로 상정하였다. 그러나 현재 품질비용은 공칭치수(목표치)를 벗어나는 정도에 따라 품질비용이 발생한다는 연구 결과들이 나오고 있다<sup>(9)(10)</sup>. 즉 품질을 합리적으로 평가하기 위해서 품질공학에서 사용하는 것이 품질손실(Quality Loss) 비용이다<sup>(9)(10)</sup>. 즉 품질특성치의 목표치  $\tau$ 가 주어진 경우 치수  $y$ 의 손실비용은 식(1)과 같이 규격은 만족하는 경우에도 목표치와의 차이의 제곱으로 발생한다.

$$L(y) = \frac{A}{\Delta^2} (y - \tau)^2 \quad (1)$$

여기서  $k$ 는  $A/\Delta^2$  인 상수이고,  $A$  는 불합격품의 손실비용이며  $\Delta$ 는 허용차의 크기이다. 그러므로 품질 특성치가 평균이  $m$ 이고 분산이  $\sigma^2$  인 확률분포를 따르는 변수인 경우 기대손실(품질비용)은 식(2)와 같다.

$$EQC = \frac{A}{\Delta^2} \{\sigma^2 + (m - \tau)^2\} = k\{\sigma^2 + (m - \tau)^2\} \quad (2)$$

그리고 본 논문에서는 평균과 분산이 시간에 따라 변화하므로 보정주기가  $N$ 인 경우 단위시간당 평균운영 함수는 식(3)과 같다.

$$C(N) = \frac{k \sum_{t=1}^N \{\sigma(t)^2 + (m(t) - \tau)^2\} + \text{공구위치보정비용}}{N} \quad (3)$$

여기서  $m(t)$  는  $t$  시점에서의 공정평균이며  $\sigma(t)^2$  는  $t$  시점에서의 공정 분산이고  $N$  은 보정주기로서 결정 변수이다. 본 논문의 목적인 기대 운영비용을 최소화하는 보정주기를 구하기 위하여는 식(3)의 특성치와 관련된 분산과 평균의 변화식을 구해야 하고 각종비용요소를 구하여야 한다. 이를 위한 각 단계별 상세 내용에 대해 살펴보면 다음과 같다.

**단계 1.** 선정된 가공 조건 파악 및 자료 수집방법 결정: 여러 가지의 조건에서 실험을 실시할 수 있으나 사용할 조건을 정립하고, 가공 갯수에 따라서 공정의 평균과 분산을 산출할 수 있도록 부분군(Subgroup)을 설정한다. 이때 부분군 크기가 적으면 치수변화의 추이 파악이 어렵고, 부분군 크기를 크게 잡으면 많은 자료의 측정이 필요하다. 따라서 가공의 대상 설비 및 피절삭물(Part)의 성격에 따라서 다소 다르나 부분군 크기는 10~50개가 적당하다.

**단계 2.** 가공 수행 및 자료 수집: 자료수집 시 계측기 검정을 실시하여야 한다. 검사자가 동일한 계측기로 반복 측정하였을 때 얻어지는 변동값(반복성: Repeatability)과 서로 다른 측정자가 동일부품의 동일 계측기로 측정하였을 때 얻어지는 변동값(재현성: Reproducibility)을 확인 하여 계측기 R&R 값이 30% 이상은 일반적으로 자료를 신뢰할 수 없다<sup>[11]</sup>. 계측기 R&R 고려하여 자료를 수집한다.

**단계 3.** 각 부분군 표본의 평균, 분산 추정: 시간의 변

화에 따라서 결정한 부분군 자료의 평균과 분산을 각각 구한다.

**단계 4.** 시간에 따른 평균 분산의 변화식을 도출: 각 부분군에서 산출한 평균, 분산을 회귀식(Regression)을 통하여 실험식을 산출하며, 산출된 실험식이 정규분포 곡선을 따르는지 확인을 해야 한다. 계측자료로부터 관계식을 유도하는 방법에는 통계 분석용 프로그램(Minitab)을 활용할 수 있다<sup>[11]</sup>.

**단계 5.** 공구의 위치 보정 후의 공정 변화 관찰: 실험식에서 자료를 산출하여 공정 능력지수와 평균을 산출하여 최적의 공구 마멸 보정 시점을 결정하고, 공구 마멸 보정 전 자료와 보정 후 가공 치수 자료가 유의차가 있는지 검정을 통하여 확인해야 한다.

**단계 6.** 가공비용 요소 산정 및 평가: 절삭 가공시 발생되는 비용요소는 다음과 같이 구성되어 있다.

- 1) 재료비 : 1개의 제품을 구성하는 원재료 비용
- 2) 준비비용 : 준비시간에 대응해서 필요한 비용
- 3) 절삭비용 : 절삭에 대응해서 필요한 비용
- 4) 검사비용 : 1개 제품 생산 후 검사에 필요한 경비
- 5) 공구교환비용 : 공구교환 시간에 대응해서 필요한 비용
- 6) 공구비 : 제품 1개를 생산하는데 필요한 절삭날의 비용 (공구 연마비, 공구 연삭기)
- 7) 간접비 : 1개 제품을 생산하는데 필요한 간접 경비 (공작기계 감각 삼각비, 사무비, 잡비 등)

**단계7.** 단위 생산 수량당 기대 운영비용 함수를 산출한다.

**단계8.** 비용 함수를 최소화 하는 공구 마멸 보정 주기를 구한다.

### 3. 사례연구

앞 절에서 정리된 최적 공구 마멸 보정시점을 결정하는 절차를 실제 사례에 적용하였다. 이 사례는 L사에서 생산하는 생활용 온수 순환용 펌프에 관한 것이다. 온수 순환용 펌프는 보일러의 온도 상승에 따라 물의 온도를 감지하는 온도 조절기에 의해 펌프에 전원이 공급 되도록 되어 있으며, 이렇게 전원이 공급되면, 모터가 회전을 하게 된다. 모터의 회전에 의해 물을 공급하는 임펠러가 같이 회전을 함으로써 물에 에너지를 부여 하여 물을 순환시키는 역할을 수행 하게 된다<sup>[12]</sup>.

온수 순환 펌프의 주요부품은 모터와 엔드 브라켓, 메카니칼 씰, 임펠러, 케이싱 등으로 구성되어 있으며 누수

방지를 위해 엔드 브라켓(Fig. 2)의 메카니칼설계 가공 치수가 중요하다.

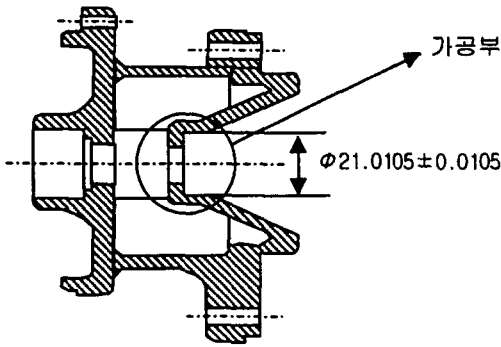


Fig. 2 End Bracket

엔드브라켓의 가공에는 NC선반이 사용되며, 공구는 Inserted tip이 사용된다. 공구의 마멸은 공구와 공작물 사이의 접촉 압력이 커져서 이 접촉 부분이 절삭열에 의해 고온이 되어 이로 인한 공구마멸이 더욱 증대된다. 이 공구 마멸의 증가로 인하여 파손이 되기 전에 공구를 교체 해야 한다. 공구가 마멸이 진행되는 동안 가공치수에 직접 영향을 미치므로 적절한 시점에 NC선반의 프로그램을 통하여 공구의 마멸 보정을 실시하지 않으면 대량 불량 발생을 야기시키며 불량품은 재작업을 하거나 폐기를 해야 한다. 그러나 현재 보정은 숙련자의 경험에 의해 기준없이 진행되고 있어 최적의 경제적 공구 마멸 보정 주기를 현장 자료를 토대로 결정해 주는 것이 무엇보다도 필요하다.

현재 부품의 가공 작업순서와 부품의 이동경로는 다음 Fig. 3과 같다.

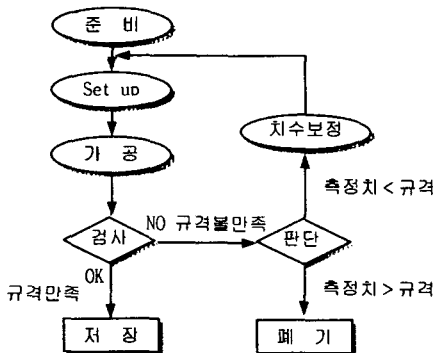


Fig. 3 Machining flow of End Bracket

이를 위해 3절에서 제안된 절차를 따라 보정 주기 결정을 실시하였다.

(단계 1) 가공변화를 파악하기 위한 실험 조건 파악: 절삭 가공시 사용 되는 가공부품, 사용공구, 절삭조건, 사용기계는 여러 종류로 구성할 수 있으나 본 연구에서 사용되어진 조건은 Fig. 4와 같다.

가공재료	피삭재의 명칭	펌프 End Bracket (A)
	재질	GC200
	경도	150 (로크웰 경도)
	가공 전의 열처리 상태	Annealing
사용공구	명칭	Turning tool holders
	절삭날의 재료 종류	Insert tip CPMT090304GP (TN60)
	형식(메이커)	한국아금
	공구의 지지 방법	2 Point 볼트체결
절삭조건	회전수(rpm)	3,300
	이송 속도(mm/rev)	0.1
	절삭 깊이(mm)	0.15
	척압력(Kgf/mm <sup>2</sup> )	20.0
	절삭 유체	건식작업
사용 기계		NC 선반
실험에 사용 할 Data		Subgroup 10 개 시료 (Data)

Fig. 4 Material, tool and machining condition

(단계 2) 자료분석: 가공 자료를 수집하기 전에 Gauge R & R을 구하여 자료의 신뢰성을 판단한 후 가공 자료를 수집한다. 가공 자료의 평균과 분산의 시간적 추이를 알아보기 위해 자료의 부분군을 10개씩으로 하며, 연속으로 15회 측정, 총 가공시료 150개를 측정하였다. 측정된 자료를 통하여 각 로트별 평균과 분산을 산출하였으며, 수집 자료는 부록3과 같으며, 실린더 게이지로 측정을 했다. Fig. 5로부터 평균과, 분산의 변화를 알 수 있고, 자료의 평균, 분산의 자료를 통계 분석용 프로그램 (Minitab version 10.5)을 이용하여 시간에 따른 변화식을 유도 했다.

순서	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
평균(m)	21.0154	21.0148	21.0141	1.0138	21.0128	21.0117	21.0117	21.0106
분산(s)	0.00084	0.00092	0.00099	0.00103	0.00114	0.00119	0.00116	0.00117
순서	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	
평균(m)	21.0093	21.0088	21.0088	21.0081	21.0088	21.0081	21.0078	
분산(s)	0.00125	0.00132	0.00132	0.00137	0.00140	0.00137	0.00151	

Xi: i 번째 부분군

Fig. 5 Mean and variance of data

시간에 따른 평균과 분산의 변화선형식을 정리하면 다음과 같다.

● 절삭 가공시 평균의 변화 추이 관계식  

$$m(t) = 21.0157 - 0.000587t \dots (4)$$

● 분산의 변화 추이 관계식  

$$\sigma(t)^2 = 0.000865 + 0.000042t \dots (5)$$

평균추이의 선형식의 결정계수  $R^2 = 95.1\%$  이고, 분산의 경우  $R^2 = 95.3\%$  이므로 유도된 식은 선형적으로 변화한다는 것을 알 수 있다.(부록 1)

**(단계 3) 공구 마멸 보정 후 공정 관찰**

공구의 보정후의 상태가 초기상태로 복원되는가를 확인하기 위해 139개 가공 및 공구 마멸 보정 후 가공부품 20개를 측정 한 자료는 Fig. 6 과 같다. 139개 가공 후 공구 마멸을 보정하고, 가공한 부품을 측정 한 자료 20개와 초기 가공부품 자료 20개(부록 2)의 평균과 분산을 97.5% 신뢰도로 검정한 결과 유의차가 없었다. 즉, 공구 마멸 시작시점의 상태와 보정 후 가공 치수가 같다고 할 수 있다.(부록 3)

No	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
치수	21.015	21.015	21.014	21.014	21.017	21.016	21.016	21.018	21.017	21.015
No	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20
치수	21.016	21.016	21.015	21.014	21.015	21.016	21.015	21.015	21.014	21.013

Fig. 6 Data of dimension after resetting

**(단계 4) 비용 구성 요소 산출**

엔드 브라켓을 가공하는데 소요되는 비용은 여섯항목으로 구분 할 수 있고, 모두 변동비로 구성되어 있다(Fig. 7).

비용 항목	변동비	비 용	비 고
1. 원재료비	◎	670 원/1 개	불량품 폐기시 발생
2. 준비비용	◎	4,000 원/1 회	40 분 소요됨
3. 절삭비용	◎	136.5 원/1 개	가공비, Setup, Loading, Unloading
4. 검사비용	◎	25 원/1 개	검사비(합,부판정)
5. 공구교환비용	◎	2,000 원/1 회	Tip 교환시 20 분 소요됨
6. 공구비	◎	3,000 원/1 Tip	500 개 가공 가능함
	◎	300 원/1 회	평균 100 개 가공 후 Resetting

Fig. 7 Cost factors

엔드 브라켓 가공의 표준 시간당 비용은 Fig. 3의 엔드 브라켓 가공 Flow에 준해 생산을 할 경우에 소요되는 비용은 가공비용과 재작업 비용으로 구분할 수 있으며, 가공비용은 806.5원이며, 재작업 비용은 불량격품이 발생되었을 때 소요되는 단위 생산수량에 관한 비용으로 136.5원이므로 단위 생산수량당 재작업 비용은 943원이 다(Fig. 8).

단위요소비용	가공 비용	재작업 비용	표준시간 (초)	단위비용 (원)	비고
1. 재료비	◎	-	-	670.0	-
2. 준비비용	◎	◎	1.2	2.0	-
3. 공구교환비용	◎	◎	2.4	4.0	가공후 불량 발생으로 인한 재작업 시 추가 비용발생됨 (136.5 원)
4. Loading	◎	◎	5.0	8.3	
5. Set up	◎	◎	5.0	8.3	
6. 가공시간	◎	◎	50.0	83.3	
7. Unloading	◎	◎	5.0	8.3	
8. 검사시간	◎	◎	8.0	13.3	
9. 공구비	◎	◎	-	6.0	
10. 치수 보정	◎	◎	1.8	3.0	
Total	806.5 원	136.5 원	78.4	806.5	

주) 평균 2,000 개 부품 가공후 모질교환을 함.

Fig. 8 Machining costs per unit

간접비는 공작기계의 감가상각이 완료된 경우는 감가상각비를 제외하고 사무비 및 잡비로 구성되어지나, 사무비 및 잡비는 기업의 여러 가지 요소와 복합적으로 구성되어 있으므로 본 연구에서는 고려하지 않는다.

**(단계 5) 단위 시간당 총 기대 운영비용 계산**

공구 마멸 보정 주기 시점의 생산수량을 N 이라고 할 때 단위 생산 수량당 평균 비용을 구하기 위하여 먼저 제품당 손실 비용함수를 구하여야 한다. 손실함수는 Fig. 9 와 같다.

비용과 관련된  $k = A \div \Delta^2$  이므로, 본 사례에서는  $k = 8,553,288$ 원이다<sup>(9)(10)</sup>. 그러므로 t 시점에서 부분군 크기가 10이므로 단위 생산 수량당 평균비용 C(N)은 식 (3)에 식(4), (5)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

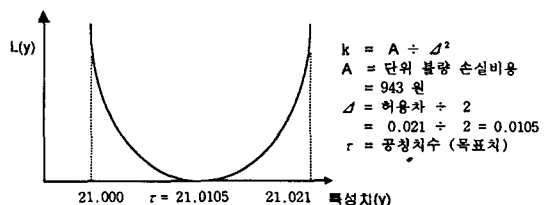


Fig. 9 Loss function

$$C(N) = \frac{10k \sum_{t=1}^N \{ \sigma(t)^2 + [m(t) - \bar{t}]^2 \} + Cr}{N}$$

Cr: 치수 보정 비용

$$= \frac{85,532,880 \sum_{t=1}^N \{ 0.000865 + 0.000042t \}^2 + \{ (21.0157 - 0.000587t) - 21.0105 \}^2 + 300}{N}$$

$$= \frac{85,532,880 \sum_{t=1}^N \{ 0.00002779 - 0.000006032t + 0.000000346t^2 \} + 300}{N}$$

위의 식을 최소화하는 N을 구하면 N = 13일 때 C(N) = 653원이다. (Fig. 10)

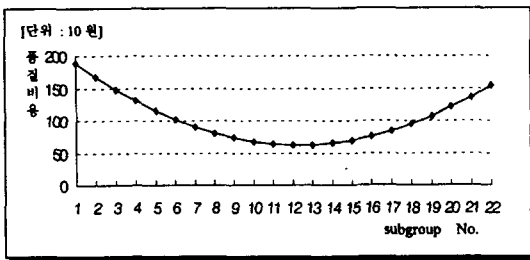


Fig. 10 Total expected operating cost

즉, 130개 가공했을 때 단위 생산수량 당 평균 비용은 653원이다. 따라서 130개 가공 후 공구 마멸을 보정해야 한다.

#### 4. 결론

본 연구는 NC선반을 이용한 절삭 가공의 최적 조건 설정 후 가공 부품의 치수 변화를 평균과, 분산의 변화추이에 따라 사전에 공구의 마멸 보정을 예측할 수 있는 방안 에 대해 연구를 했다.

치수변화에 가장 영향을 많이 끼치는 공구의 마멸을 사전에 파악하여 적절한 시점에 공구의 위치 보정을 실시 함으로써 사전에 대량 불량 발생을 방지할 수 있으며, 또한 제작업으로 인한 가공 손실을 방지할 수 있었다. 본 연구를 위해서 우선적으로 적용 대상 공정의 최적조건을 설정하고, 그 이후에 많은 자료를 수집하였다.

개발된 절차를 온수 순환 펌프의 핵심 부품인 엔드 브라켓을 가공 공정에 실행함으로써, 최적의 절삭 공구의 위치 보정을 통해 생산성 향상을 기여하는데 그 가능성을 확인하였다. 자료의 축적, 자료 분석, 관계식 유도 계산 등과 같은 내용을 전산화 함으로써 보다 효율적으로 연구를 수행할 수 있는 방안 제시와 가공형상에 따른 최적 절삭조건 설정 및 피삭재에 따라 효과적인 공구를 적용하

는 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- Hunter, W. G. and Kartha, C. D., "Determining the Most Profitable Target Value for a Production Process," Journal of Quality Technology, 9, pp. 176-180, 1977.
- Tang, J., "Design of Two-stage Screening Procedure Using Correlated Variables : A Loss Function Approach," Naval Research Logistics, 35, pp. 513-533, 1988.
- Tang, K. and Lo, J. J., "Determination of the Optimal Process Mean When Inspection is Based on a Correlated Variable," IIE Transactions, 25, pp. 66-72, 1993.
- Rubenstein, C., "An Analysis of Tool Life Based on Flank-Face Wear," Trans. ASME, J. Eng. Ind., 1976.
- Koren, Y., "Flank Wear Model of Cutting Tools Using Control Theory," Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 100, 1978.
- Arcelus, F. J. and Banerjee, P. K., "Selection of the Most Economical Production Plan in a Too-wear Process," Technometrics, 27, pp. 433-437, 1985.
- Drezner, Z. and Wesolowsky, G. O., "Optimal Control of Linear Trend Process with Quadratic Loss," IIE Transactions, 21, pp. 66-72, 1989.
- 조재성, "금형강 가공에서 절삭력 모델에 의한 공구 마멸의 예측," pp. 32-33, 1996.
- 박성현, "응용 실험 계획법," 영지문화사, pp.183, pp. 274, pp. 359, 1994.
- Phadke, M. S., "Quality Engineering Using Robust Design," Prentice Hall, 1989.
- G.E Company, "Concepts and Tools of Six-Sigma for Transactional Quality," G. E Appliances Company Proprietary, pp. 1-2, 1996.
- LG전자, "LG펌프 서비스 기술 교본," LG전자, pp.18, 1996.

부록 1.

One-Way Analysis of Variance

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	p
Factor	1	0.0000006	0.0000006	0.56	0.459
Error	38	0.0000424	0.0000011		
Total	39	0.0000430			

Individual 97.5% CIs For Mean  
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-+---+---+		
보정 전	20	21.0151	0.0009	(*-)		
보정 후	20	21.0154	0.0012	(*-)		
Pooled StDev = 0.0011				21.0150	21.0175	21.0200

·검정 신뢰 구간 : 97.5 %

·분산 검정값 P=0.459는 0.025보다 크므로 공구 마멸 보정 전과 보정 후 분산차가 없음.

부록 3.

Two Sample T-Test and Confidence Interval

보정 전과 보정 후 평균 검정(Two sample T-test)

	N	Mean	StDev	SE Mean
공구 마멸 보정 전	20	21.01510	0.00091	0.00020
공구 마멸 보정 후	20	21.01535	0.00118	0.00026

보정 전 20개 자료의 평균과 보정 후 20개 자료의 평균차의 98% 신뢰구간: (-0.00103, 0.00053)

보정 전 평균과 보정 후 평균의 동일성에 관한 T-test 결과:

T통계량 = -0.75, P값 = 0.46 자유도 = 38

·검정 신뢰 구간 : 97.5 %

·평균검정 P=0.46은 0.025보다 크므로 공구 마멸 보정 전과 보정 후 평균치차가 없음.

부록 2.

부품치수 측정 Data

번호	단위 mm							
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
1	21.015	21.016	21.015	21.014	21.012	21.014	21.012	21.010
2	21.014	21.015	21.014	21.015	21.014	21.013	21.013	21.010
3	21.015	21.014	21.013	21.013	21.013	21.013	21.011	21.011
4	21.015	21.015	21.015	21.012	21.011	21.013	21.013	21.010
5	21.016	21.016	21.013	21.013	21.015	21.010	21.012	21.010
6	21.016	21.015	21.014	21.015	21.013	21.011	21.011	21.009
7	21.017	21.015	21.016	21.013	21.011	21.011	21.012	21.012
8	21.016	21.015	21.014	21.014	21.013	21.012	21.010	21.013
9	21.015	21.013	21.014	21.015	21.013	21.012	21.013	21.011
10	21.015	21.014	21.013	21.014	21.012	21.012	21.010	21.010

번호	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15
1	21.009	21.011	21.009	21.008	21.007	21.009	21.009
2	21.008	21.010	21.009	21.009	21.008	21.009	21.009
3	21.008	21.010	21.010	21.007	21.010	21.009	21.008
4	21.010	21.009	21.007	21.009	21.008	21.010	21.009
5	21.009	21.008	21.009	21.010	21.010	21.008	21.009
6	21.009	21.009	21.010	21.008	21.009	21.008	21.008
7	21.008	21.009	21.011	21.008	21.010	21.009	21.005
8	21.012	21.008	21.008	21.010	21.010	21.008	21.008
9	21.010	21.007	21.008	21.007	21.009	21.007	21.007
10	21.010	21.007	21.007	21.007	21.009	21.008	21.008