

밀링가공의 최적절삭조건 선정

윤 선 일
기계학부

< 요약 >

절삭가공에서 최적절삭조건의 선정은 가공정밀도와 생산성의 관점에서 매우 중요한 문제이다. 본 논문에서는 최소생산가와 최대생산율을 얻기 위한 두 개의 제한조건에 대해 최적절삭조건을 선정하는 방법을 연구하였다. 표면조도와 허용동력을 만족하는 최적절삭조건을 선정하는 방법과 인서트의 초기위치오차를 고려하여 표면조도를 만족할 수 있는 최적절삭조건을 선정하는 방법을 연구하였다. 공구가격의 변화에 따른 목적함수와 표면조도의 변화에 따른 목적함수를 구하여 최적절삭조건을 선정하는 방법을 연구하였다.

Determination of Optimum Cutting Conditions in Milling Operation

Yoon, Sun Il
Sch. of Mechanical Engineering

< Abstract >

Determination of optimum cutting conditions is very important problem viewed in machining precision and productivity. In this paper, optimum cutting conditions under two constraints are determined to obtain minimum production cost and maximum production rate. Methods are determined to obtain optimum cutting conditions satisfying surface roughness and allowable power. Methods are determined to obtain optimum cutting conditions by objective function varying tool cost and surface roughness.

Key Words : Objective function(목적함수), Surface roughness(표면조도), Tool life(공구수명), Specific cutting resistance(비절삭저항)

1. 서 론

절삭가공에 있어서, 생산기술자가 제품을 경제적으로 생산하기 위해서는 기계의 사양이나 요구되는 제품의 정밀도 등을 고려

하여 목적에 맞는 절삭조건을 선택하여야 한다. 특히 과거에 비해 임금이 크게 오르고, 자동화로 인하여 기계의 가격이 고가화됨에 따라, 기계의 효율적 운용이 점점 더 중요하게 되었다. 따라서 목적에 맞는 절삭

조건을 선정하는 것은 가공정밀도와 생산성의 관점에서 매우 중요한 문제이다.

절삭조건 최적화에 대한 연구로는 Wu와 Ermer[1]가 미분방정식의 계산으로 두 개의 변수에 대한 절삭조건 최적화를 연구하였고, Ermer[2]는 부등제한조건을 고려한 최적조건 선정에 Geometric programming을 사용하여 프로그램의 유용성을 보였으며, Iwata[3] 등은 최대 절삭력과 허용동력 그리고 안정영역의 제한조건을 결정론(deterministic)이 아닌 확률적(probabilistic)계수로 치환하여 최적절삭조건을 찾았다. 그러나 이제까지의 연구는 비교적 해석이 용이한 선삭에 관한 연구가 대부분이었고, 제한조건의 사용에 있어서도 이론식을 그대로 사용하여 실제작업에 적용하기는 다소 무리가 따른다.

따라서 본 논문에서는 밀링가공에서 최소생산가와 최대생산율을 얻기 위한 두 개의 제한조건에 대해 최적절삭조건을 선정하는 방법을 연구하였다. 표면조도와 허용동력을 만족하는 최적절삭조건을 선정하는 방법과 인서트의 초기위치오차를 고려하여 표면조도를 만족할 수 있는 최적절삭조건을 선정하는 방법을 연구하였다. 또한 공구가격의 변화에 따른 목적함수와 표면조도의 변화에 따른 목적함수를 구하여 최적절삭조건을 선정하는 방법을 연구하였다.

II. 이론해석

1. 표면조도

가. 노우즈 반경이 있는 경우의 이론표면조도

노우즈 반경이 있는 경우의 이론표면조도(H_{max})는 연속되는 두 날의 노우즈 부분이 그리는 원호의 교점의 높이와 같고, 그림 1.에서 날당이송과 노우즈 반경의 함수로 식(1)과 같이 유도된다.

$$H_{max} = R[1 - \sin \theta] =$$

$$R \left[1 - \sin \left(\cos^{-1} \frac{f_t}{2R} \right) \right] \quad (1)$$

여기서

R : 노우즈 반경(mm)

f_t : 날당이송(mm/tooth)

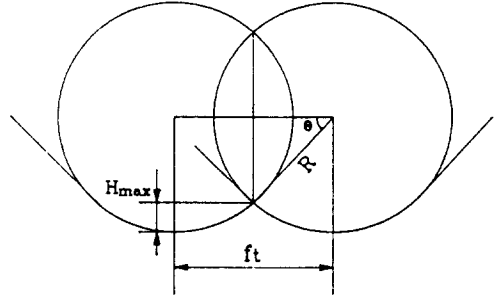


그림 1. Theoretical surface roughness with nose radius

나. 인서트 초기위치오차를 고려한 이론표면조도

실제 밀링작업에 있어서는 커터제작시의 오차의 인서트규격의 오차로 인하여 축방향 인서트 초기위치오차(axial runout)와 반경방향 인서트 초기위치오차(radial runout)가 존재하게 되고, 축방향 인서트 초기위치오차는 절삭 깊이를 변화시키고, 반경방향의 인서트 초기위치오차는 날당이송을 변화시켜 이론표면조도를 변화시킨다.

인서트 초기위치오차가 존재하는 경우의 이론 표면조도는 그림 2.에서 식(2)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} H_{max} &= R[1 - \sin \theta] \\ &= R \left[1 - \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{(f_t + R_R)^2 + A_R^2}}{2R} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{A_R}{f_t + R_R} \right) \right\} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

여기서

A_R : 축방향 인서트 초기위치오차(mm)

R_R : 반경방향 인서트 초기위치오차(mm)

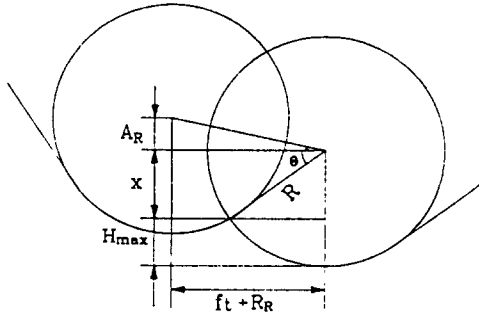


그림 2. Theoretical surface roughness with runout

다. 이송에 따른 가공면의 형상

정면밀링은 앞날과 후속하는 날의 상대적인 인서트 초기위치오차가 일정하지 않으므로, 절삭후 표면형상의 형성에 관여하는 날은 이송에 따라 다르게 나타난다. 그림 3은 이송이 인서트 초기위치오차에 비해 비교적 작은 경우 표면형상의 형성에 관여하는 날이 불규칙함을 보인 예이다.

그림에서 1-8번째의 날이 차례로 절삭하는 경우, 2번째 날이 절삭한 후의 최대높이는 1번째 날과 2번째 날에 의해 결정되지만, 3번째 날이 절삭한 후의 최대높이는 1번째 날과 3번째 날의 의해 결정된다. 그 다음 거칠기의 형성은 3번째 날과 5번째 날에 의해 형성되고, 인서트 초기위치오차가 상대적으로 아주 작은 8번째의 날은 절삭작용에도 관여하지 않게 된다. 이와 같이 절삭을 완전히 끝마친 후의 표면조도는 앞날과 후속하는 날의 상대적인 인서트 초기위치오차의 이송에 따라 결정된다.

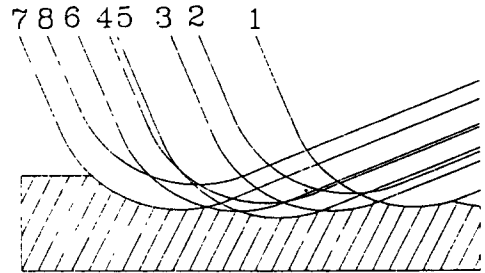


그림 3. Surface according to small feed

2. 목적함수

생산기술자의 관심은 주로 수요가 안정되었을 때는 최소생산가에 있고, 수요가 급증하거나 제품의 단가가 올랐을 경우에는 최대생산율에 있으므로 각각의 경우에 대해 목적함수를 유도한다.

가. 생산가

단위제품을 생산하는데 소요되는 비용(Cost)은 단위제품을 생산하는데 소요되는 시간과 단위시간에 대한 비용의 곱으로 나타낼 수 있고, 단위제품을 생산하는데 걸리는 시간은 다음과 같이 3가지로 구성된다.

- ① 비절삭시간(T_L) : 소재의 운반 및 착탈, 스위치조작 등 절삭외의 시간
- ② 실절삭시간(T_M) : 기계가 공작물을 실제 절삭하는 시간
- ③ 공구교환시간(T_C) : 수명이 다한 공구(인서트)를 교환하는 시간

따라서 한 개의 제품을 생산하는데 소요되는 비용은 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$Cost = C_0 \left\{ T_L + T_M + T_C \frac{T_{MC}}{T} \right\} + C_i \frac{T_{MC}}{T} \quad (3)$$

여기서

C_0 : 단위시간당 공구비를 제외한 간접비

4 윤 선 일

(won/min)

- C_i : 공구가격(won/touch),
- T_L : 단위제품당 비절삭시간(min/pc)
- T_M : 단위제품당 실절삭시간(min/pc)
- T_c : 공구교환시간(min)
- T_{MC} : 단위제품당 실절삭시간(min/pc)
- T : 공구수명(min/touch)

식(3)을 가공변수를 포함하는 식으로 바꾸기 위해 그림 4와 같은 공작물을 가공할 경우 각 항들은 아래의 관계식에 의해 가공변수를 포함한 식으로 나타낼 수 있다.

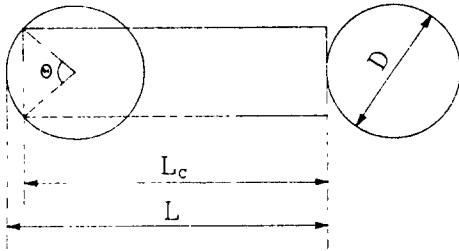


그림 4. Feeding length of a table

단위 제품을 생산하는데 소요되는 시간인 실절삭시간 T_M 은 1회 절삭에 소요되는 시간과 절삭횟수의 곱으로 식(4)과 같이 표현된다.

$$T_M = \frac{L}{V_f} \cdot C_n = \frac{L}{V_f} \cdot \frac{d_1}{d} \quad (4)$$

여기서

- L = 테이블의총이송길이(mm)
- V_f : 이송속도(mm/min)
- C_n : 절삭횟수 ($C_n = d_1/d$, C_n :정수)
- d_1 : 단위제품의 가공에 필요한 절삭깊이 (mm)
- d : 1회의 절삭길이(mm)

단위 제품을 생산할 때 공구와 공작물이 접촉하는 시간 T_M 은 1회 절삭시의 접촉시간과 절삭횟수의 곱으로 식(5)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} T_{MC} &= \frac{L_c}{V_f} \cdot \frac{\theta}{2\pi} \cdot C_n \\ &= \frac{L_c}{V_f} \cdot \frac{\theta}{2\pi} \cdot \frac{d_1}{d} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

- L_c : 공작물의 길이(mm)
- θ : 접촉각(rad)

또 공구수명 T 는 Taylor의 실험식 ($VT^{1/n} = C$)과 ($V = \frac{\pi DN}{1000}$)의 관계식에서 식(6)으로 표현된다.

$$T = \left\{ \frac{C}{V} \right\}^n = \left\{ \frac{1000C}{\pi DN} \right\}^n \quad (6)$$

여기서

- C : 공구수명 상수
- $1/n$: Taylor 상수
- V : 절삭속도(m/min)
- D : 커터 지름(mm)
- N : 회전속도(rev/min)

가공변수로 표현된 위의 식(4), (5), (6)을 식(3)에 대입하면 생산가에 대한 식은 식(7)으로 표현된다.

$$Cost = C_o \left\{ TL + \frac{L \cdot d_1}{V_f \cdot d} + \frac{\frac{L_c \cdot \theta \cdot d_1}{V_f \cdot 2\pi \cdot d}}{\left\{ \frac{1000C}{\pi \cdot D \cdot N} \right\}^n} \right\}$$

$$+ C_i \left\{ \frac{Lc \cdot \theta \cdot d_1}{Vf \cdot 2\pi \cdot d} \right\} \left\{ \frac{1000C}{\pi \cdot D \cdot N} \right\}^n \quad (7)$$

다시 식(7)을 설계변수를 제외한 항을 상수로 놓고 식을 간략히 하면 생산가에 대한 목적함수는 다음의 식(8)으로 표현된다.

$$Cost = Co \left\{ C_1 + C_2 \frac{1}{Vf \cdot d} + C_3 \frac{N^n}{Vf \cdot d} \right\} + C_i \left\{ C_4 \frac{N^n}{Vf \cdot d} \right\} \quad (8)$$

여기서

$$C_1 = T_L$$

$$C_2 = L \cdot d_1$$

$$C_3 = Tc \left\{ \frac{Lc \cdot \theta \cdot d_1 \cdot (\pi D)^n}{2\pi (1000C)^n} \right\}$$

$$C_4 = \frac{Lc \cdot \theta \cdot d_1 \cdot (\pi D)^n}{2\pi (1000C)^n}$$

나. 생산율

생산율은 단위제품을 생산하기 위해 소요되는 시간 T_p 의 역수이고, 생산시간 T_p 는 $T_L + T_M + Tc \frac{TMc}{T}$ 이므로 생산율 Pr 은 다음 식으로 표시된다.

$$Pr = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{C_1 + C_2 \frac{1}{Vf \cdot d} + C_3 \frac{N^n}{Vf \cdot d}} \quad (9)$$

그런데 생산율을 최대화하는 것은 단위제품을 생산하기 위해 소요되는 시간을 최소화하는 것과 같으므로, 생산가와 생산율 대신 생산시간을 함께 목적함수로 표현하면 식(10)과 같다.

$$W = fa Cost + (1-fa)Tp \quad (10)$$

여기서 fa 가 1이면 생산가에, 0이면 생산시간(생산율)에 역점을 둔다.

3. 제한조건

가. 표면조도

다듬질가공의 절삭조건을 선정해야하는 경우에는 표면조도가 제한조건으로 작용하며, 앞의 2-1.에서 유도한 인서트 초기위치 오차를 고려한 이론표면조도를 제한조건으로 사용한다.

회전속도와 이송속도는 요구되는 표면조도를 만족하는 범위 안의 값을 취하여야 한다.

나. 허용동력

밀링작업의 범위는 허용동력을 만족해야 하며, 밀링머신의 전체동력(HP_t)은 절삭동력(HP_c)과 이송동력(HP_f)으로 구성된다. 앞에서 유도한 절삭력모델을 이용하여 각 분력의 최대값을 계산하고, 이들을 이용하여 아래의 식(11)으로 허용동력을 계산한다.

$$HP_t = \frac{HP_c}{\eta_c} + \frac{HP_f}{\eta_f} = \frac{P_c \cdot V}{60 \times 75} \frac{1}{\eta_c} + \frac{P_f \cdot V_f}{60 \times 75 \times 1000} \frac{1}{\eta_f} = \frac{P_c \cdot \pi DN}{60 \times 75 \times 1000} \frac{1}{\eta_c} + \frac{P_f \cdot V_f}{60 \times 75 \times 1000} \frac{1}{\eta_f} \quad (11)$$

여기서

P_c : 절삭분력(kgf)

P_f : 이송분력(kgf)

η_c : 절삭효율

η_f : 이송효율

다. 가공변수에 대한 제한조건

① 회전속도

공작기계의 구조상 회전속도의 범위는 무한한 것이 아니므로, 기계의 가용할 수 있는 회전속도의 범위 안에서 절삭조건을 선택하여야 한다.

② 이송속도

이송속도의 범위는 공작기계가 가용할 수 있는 범위를 나타내며, 최저속도와 최대속도 안에서 이송속도가 선택되어야 한다.

③ 절삭깊이

절삭깊이 선택의 범위는 공구(인서트)의 치수와 형상(리드각, 노우즈반경)에 의해 결정되며 최대 절삭깊이보다 작아야 한다.

4. 최적화기법

최적화 기법의 표준형태는 다음 식과 같다.

$$Find \quad X = [X_1, X_2, X_3]^T \quad (12)$$

$$Minimize \quad Cost = f(X)$$

$$S.T \quad h_i = h(X) \quad i= 1 \text{ to } p$$

$$g_j \leq g(X) \quad j= 1 \text{ to } m$$

여기서 X_1, X_2, X_3 는 가공변수로 회전속도, 이송속도, 절삭깊이를 말하며 Cost는 목적함수로서 생산가 혹은 생산율을 선택할 수 있고, h_i, g_j 는 허용동력과 표면조도로서 제한조건을 나타낸다.

앞에서 유도한 목적함수와 제한조건을 바탕으로 다듬질가공이 필요한 경우를 고려하여 최적절삭조건을 얻도록 알고리즘을 구성하였다. 최적화를 위한 알고리즘의 흐름은 다음과 같다.

입력데이터가 주어지면, 우선 다듬질 조건을 선정하기 위해, 이용 가능한 회전속도(RPM)의 전 범위에 대하여 표면조도를 만족하는 최대이송속도의 범위를 선택하고, 다

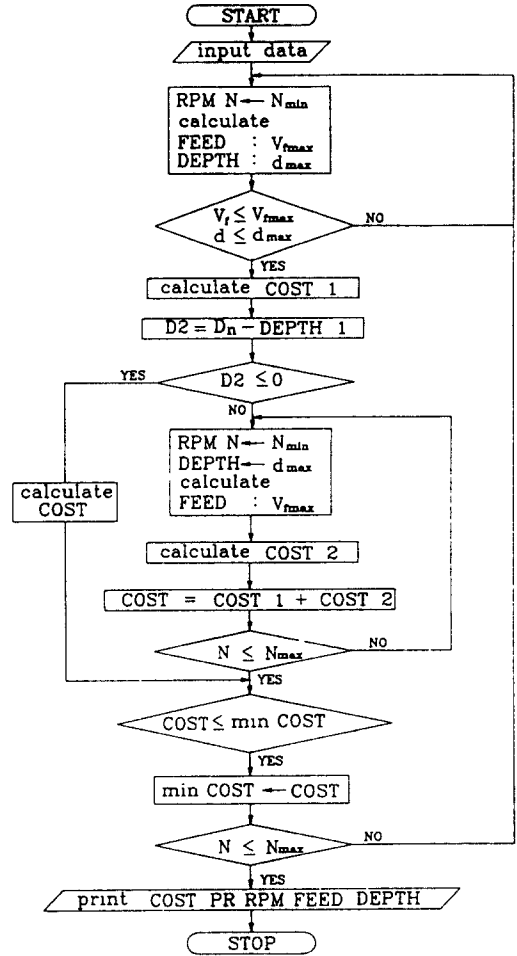


그림 5. Flow-chart for optimization

시 선택한 범위의 이송속도에 대해 허용동력을 만족하는 최대절삭깊이를 구한다. 이 때 각 조건에 따른 목적함수도 계산된다. 다음으로 황삭조건을 얻기 위해, 다듬질조건에서 정해진 절삭깊이를 뺀 나머지 깊이에서 공작기계의 이용 가능한 회전속도와 이송속도에 대해 허용동력을 만족하는 절삭깊이를 찾고, 아울러 목적함수를 계산한다. 최종적으로 다듬질조건과 황삭조건 목적함수의 합이 최소인 절삭조건을 초적절삭

조건으로 한다. 그림 5.에 프로그램의 플로우차트를 나타내었다.

III. 실험

목적함수에 사용되는 상수(1/n, C)와 허용동력에 사용되는 비절삭저항을 구하고, 표면조도에 대한 검증을 위해 다음의 실험을 행하였다.

1. 실험장치

본 실험에서 사용된 장치의 제원은 아래와 같다

표 1. Specification of experimental set-up

MILLING MACHINE	WMV -1100(1100 * 280)mm
CUTTER	M 115 SP 04 R/L-10 대한중삭 LEAD ANGER : 15 ° DIAMETER : 100mm
INSERT	SPGN 120308 P20 NOSE RADIUS : 0.8
WORKPIECE	129 * 89 * 45 mm
DYNAMOMETER	KISTLER TYPE 9257 A
CHARGE APLIFIER	KISTLER TYPE 5008E KPM-2300
OSCILLOSCOPE	TEKTRONIX(2201 DOGITAL STORAGE)
A/D CONVERTER	COONVERSION RAE : 30 KHZ RESOLUTION : 12 BIT INPUT RANGE : 10 V
TOOL MICRO-SCOOPE	MITUTOYO TYPE BI-5
SURFACE ROUGHNESS TESTER	MITUTOYO TYPE EMD-R75C

2. 실험방법

가. 공구수명

공구수명의 판정은 목적하는 바에 따라 각각 다른 기준을 채택하게 되지만 본 논문에서는 ISO규정을 따랐다. ISO규정은 노우즈 반경부와 절입경계부의 1/4을 제외한 절인부의 평균마모폭을 측정하여, 마모폭의 값이 0.3mm에 이르렀을 때 공구수명이 다 된 것으로 하였다.

실험은 절삭깊이를 1.3mm로 일정하게 하고 날당이송도 0.0206 - 0.0239(mm/tooth)로 비슷하게 하여, 회전속도(절삭속도)만을 변화시키면서 공구현미경으로 여유면 마모폭 VB를 측정하여 그 값이 0.3mm에 이르렀을 가를 확인하였다.

나. 표면조도

표면조도의 측정은 목적하는 바에 따라 다르지만 본 논문에서는 한국, 일본, 독일, 프랑스에서 많이 사용하고 있는 최대높이 표면조도를 채택하였다. 실험방법은 각 조건에서 가공된 공작물 표면을 촉침식 표면조도계로 측정하였다.

다. 비절삭저항(허용동력)

공구동력계를 밀링머신의 테이블에 부착하여 X, Y, Z 방향의 힘을 측정하였다. 여기서 얻어진 각 방향의 평균력을 매순간마다의 절삭면적을 시물레이션하여 비절삭계수를 구하는 프로그램에 넣어 비절삭저항을 구한 다음 이 비절삭저항을 절삭력 시물레이션 프로그램에 사용하여 X, Y, Z 방향의 분력을 구한 후, 식(11)을 이용하여 허용동력을 계산하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 입력데이터

표 2.는 프로그램에 대한 입력데이터이다.

표 2. Input data

간접비	400 (won/min)
공구가격	7200 (won/8날)
비절삭시간	10 (min)
스위치 조작시간	0.5 (min)
공구 교환시간	1 (min)
공구 수명상수	784.2
Taylor 상수	0.797
공작물 치수(길이*폭)	129*79 (mm ²)
커터의 날수	8
커터의 직경	100 (mm)
축방향 리드각	15 (deg)
반경방향 코너각	75 (deg)
노우즈 반경	0.8 (mm)
절삭동력 효율	0.75
이송동력 효율	0.75
허용동력	5.0 HP
표면조도	4.0 (μm)
회전속도 범위	100 - 1000 (RPM)
이송속도 범위	35 - 540 (mm/min)
절삭깊이 범위	0.1 - 6.0 (mm)

2. 결과 및 고찰

가. 공구가격의 변화에 따른 목적함수와 가공변수의 변화

표 3.은 주어진 입력데이터에서 공구가격만을 변화시키며, 이에 따른 설계변후와 목적함수의 변화를 나타낸 것이다. 도표에서 공구가격이 50,000원 이하에서는 최소생산가와 최대생산율위 절삭조건이 같게 나오지만, 공구가격이 점점 상승함에 따라 최소생산가를 얻기 위한 회전속도(RPM)는 점점 늦어진다. 이는 절삭속도를 느리게 하여 공구수명을 늘이는 방향으로 회전속도가 변하고 있음을 나타낸다.

표 3. Variation of objective functions and design variables according to that of tool cost

공구가격 (won/8 *tooth)	목적함수	RPM (RPM)	FEED (mm/min)	DEPTH (mm)	COST (won/pc)	PR (pc/min)
30000	COST	480	60	2.00	7783.25	
	PR	480	60	2.00		0.07379
40000	COST	480	60	2.00	8570.84	
	PR	480	60	2.00		0.07379
50000	COST	480	60	2.00	9358.43	
	PR	480	60	2.00		0.07379
60000	COST	480	50	2.00	10127.96	
	PR	480	60	2.00		0.07379
70000	COST	360	45	2.00	10871.53	
	PR	480	60	2.00		0.07379
80000	COST	320	40	2.00	11594.38	
	PR	480	60	2.00		0.07379
90000	COST	280	35	2.00	12301.89	
	PR	480	60	2.00		0.07379
100000	COST	280	35	2.00	12988.45	
	PR	480	60	2.00		0.07379

그림 6.은 공구가격이 변화함에 따라 최소생산가와 회전속도의 변화를 나타낸 것이다. 공구가격이 증가함에 따라 최소생산가의 변화는 공구가격이 증가하는 만큼 선형으로 증가하고, 회전속도의 변화는 50,000원과 90,000원 사이에서 감소함을 알 수 있다.

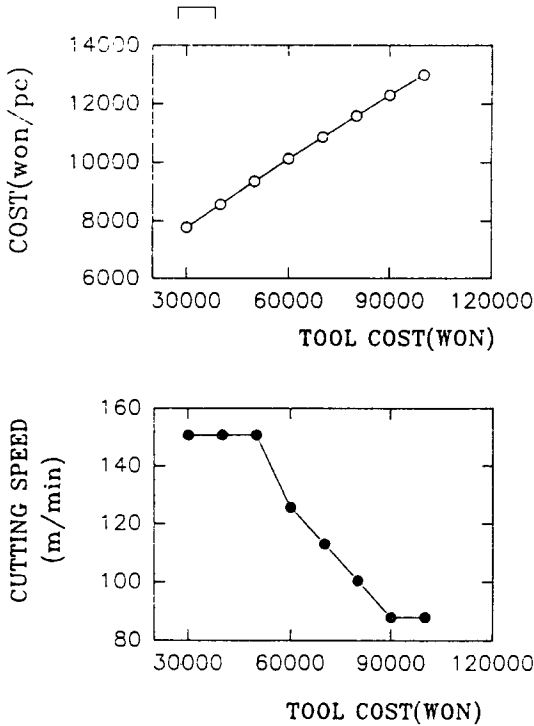


그림 6. Variation of cost and cutting speed according to that of tool cost

나. 표면조도 변화에 따른 목적함수와 가공 변수의 변화

표 4. Variation of objective functions and design variables according to that of required surface roughness

표면조도 (μm)	RPM (RPM)	FEED (mm/min)	DEPTH (mm)	COST (won/pc)	PR (pc/min)
3.0	590	60	2.00	5705.26	0.07367
4.0	480	60	2.00	5633.12	0.07379
5.0	410	60	2.00	5589.31	0.07387
6.0	360	60	2.00	5559.14	0.07392
7.0	250	60	2.00	5496.66	0.07403
8.0	200	60	2.00	5470.36	0.07408
9.0	180	60	2.00	5460.28	0.07410
10.0	140	60	2.00	5440.99	0.07413

표 4.는 주어진 입력데이터에서 표면조도만을 변화시키며 이에 따른 설계 변수와 목적함수의 변화를 나타낸 것으로, 요구되는 표면조도가 높은 제품일수록 최소생산가는 급격히 증가하고 최대생산율은 급격히 감소한다. 이것은 표면조도의 제한조건이 완화될수록, 절삭속도를 감소시켜 공구 수명을 늘이는 방향으로 회전속도가 선정됨을 뜻한다.

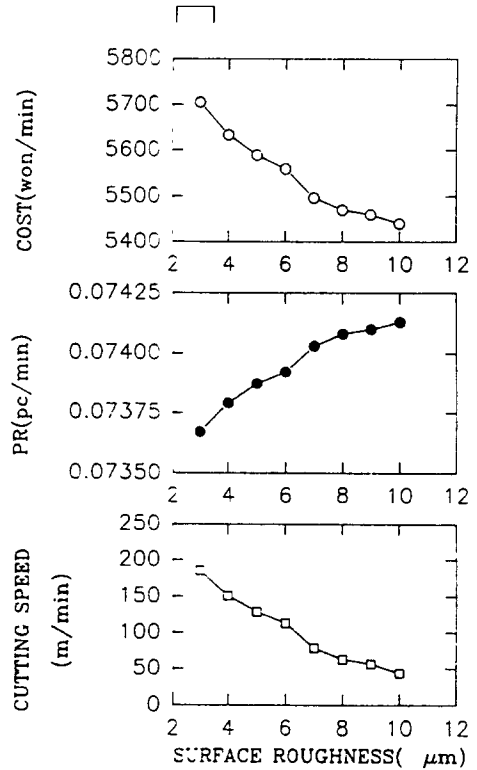


그림 7. Variation of objective functions and cutting speed according to that of surface roughness

그림 7.은 표면조도의 변화에 따른 목적 함수와 절삭속도의 변화를 도시하였다. 그림에서 표면조도의 변화에 따른 최소생산가와 회전속도의 변화가 완전히 일치함을 알 수 있다.

V. 결 론

밀링가공의 최적절삭조건의 선정을 위하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 밀링가공에서 주어진 표면조도와 허용동력을 만족하면서 최소생산가 및 최대생산을 얻을 수 있는 회전속도, 이송속도, 절삭깊이를 선정하는 방법을 연구하였다.
2. 인서트 초기위치오차를 고려하여 가공면의 표면조도를 만족할 수 있는 합리적인 절삭조건을 선정할 수 있다.
3. 공구가격의 변화에 따른 목적함수와 가공변수의 변화에 따른 최적 절삭조건을 선정할 수 있다.
4. 표면조도 변화에 따른 목적함수와 생산성을 향상시킬 수 있는 최적 절삭조건을 선정할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Ermer, D.S. and Wu, S.M., "The effect of experimental error on the determination of the optimum metal cutting conditions", ASME, pp. 315-322., (1967)
2. Ermer, D.S., "Optimization of the constrained machining economics problem by geometric programming", ASME, pp. 1067-1072, (1971)
3. Iwata, K., Murotsu, Y., Iwatsubo, T. and Fujii, S. "A probabilistic approach to the determination of the optimum cutting conditions", ASME, pp.1099-1107, (1972)
4. Friedman, M.Y. and Tipnis, "Cutting rate-Tool life characteristic functions for material removal process", ASME, pp.481-486, (1976)
5. Martelloti M.E., "An analysis of the milling process", Trans. of ASME, Vol.67, pp.67, (1945)
6. Fu H., Devor, R.E. and Kappor, S.G., "A mechanistic model for prediction", ASME J of Engr. Ind . , Vol 106, pp.81-99, (1984)
7. Gygax, P.E., "Dynamics of single tooth milling", Annals of CIRP, Vol. 28, pp. 65-71., (1979)
8. Ruzhong Z. and Wang, K.K., "Modeling of cutting force pulsation on face milling", Annals of CIRP, Vol. 321, pp.21-26, (1983)
9. Kim, H.S., "Milling dynamics in closed-loop system", Phd. thesis, University of wisconsin-Madison, (1987)