

기계가공시 분당가공비를 고려한 최적 절삭 조건에 관한 연구

A Study on Automatic Selection of Optimal Cutting Condition on Machining in View of Economics

이 길 우,* 이 용 성
G. Y. Lee, Y. S. Lee

ABSTRACT

Recently the multi-kind, small-amount manufacturing system has been replacing the mass manufacturing system, and domestic machining industry also is eager to absorb the new technology because of its high productivity and cost reduction. The optimization of the cutting condition has been a vital problem in the machining industry, which would help increase the productivity and raise the international competitiveness.

It is intended in this study to investigate the machining costs per unit time which is essential to the analysis of the optimal cutting condition, to compute the cutting speed that lead to the minimum machining costs and the maximum production to suggest the cutting speed range that enables efficient speed cutting, and to review the machining economy in relation to cutting depth and feed. Also considered are the optimal cutting speed and production rated in relation with feed.

It is found that the minimum-cost cutting speed increases and the efficient cutting speed range is reduced as machining cost per unit time increases since the cutting speed for maximum production remains almost constant. The machining cost is also lowered and the production rate increases as the feed increases, and the feed should be selected to satisfy the required surface roughness. The machining cost and production rate are hardly affected by the cutting depth if the cutting speed stays below 100m/min, however, they are subject to change at larger cutting depth and the high-efficient speed range also is restricted.

It can be established an adaptive optimal cutting conditions can be established in workshop by the auto-selection program for optimal operation. It is expected that this method for choosing the optimal cutting conditions might contribute to the improvement of the productivity and reduced the cost.

It is highly recommended to prepare the optimal cutting condition thus obtained for future use in the programming of G-function of CNC machines. If proper programs that automatically select the optimal cutting conditions should be developed, it would be helpful to the works being done in the machine shops and would result in noticeable production raise and cost reduction.

* 홍익대학교 과학대학
** 단국대학교 기계공학과

key words : Production rate (생산율), Minimum Cost (최소값), Maximum Productivity (최대능율), Tool-Life (공구수명)

1. 서 론

최근 생산 형태가 대량 생산, 대량 소비의 경향으로 흐르고 있어 다양한 제품이 생산되고 있다. 즉 소품종 소량 생산이 주류를 이루고 있다. 이러한 제품 생산의 체제는 연속 대량 생산에 비해 더욱 생산성 및 원가 분석에 심혈을 기울여야 채산성을 유지할 수 있다. 기계 가공에 있어서도 기존의 범용 공작 기계의 사용하는 한계가 국내에서도 절실하게 대두되고 있어, 중·소기업까지도 장비의 NC화(자동화)가 급속히 진행되고 있다. 그러나 기술 인력의 수급이 이들을 따라가지 못하며, 생산 기술력 또한 한계에 부딪혀 업체에서는 여러가지 에로사항에 봉착하고 있다. 그러므로 업체의 이러한 점을 극복하기 위해서는 가공 조건의 최적화가 시급한 실정이다. 가공 조건의 설정은 실가공에 있어서도 중요하지만, 공정설계 및 작업설계 즉 생산 시스템에 필요한 시간과 장비 선정의 기초가 되므로 그 최적화가 반드시 이루어져야 한다. 가공 조건의 최적화는 Ermer 와 Wu¹⁾가 미분 방정식의 계산에 의해 해석적으로 2개의 변수를 사용하여 가공 조건의 최적화를 시도하였고, Crookal²⁾은 같은 방법으로 Performance Envelope의 개념을 세워놓았다. 이같은 연구들은 목적 함수의 특성을 파악하는데는 도움이 되나 제한조건에 있어서는 현실성이 결여되어 있다. Friedman과 Tipnis³⁾는 절삭 조건으로 R-T-F(Cutting rate-Tool life Function) 개념을 소개하고, 밀링작업시의 R-T-F 특성 방정식의 곡선상에 최적 절삭 조건이 존재한다고 하였으나, 이것은 제한적인 조건에서만 성립된다.

또한 Iwata 등⁴⁾은 Probabilistic characteristic을 고려한 최적점(Optimal point)에 있어서의 제약조건 영향을 검토하여, 최적 가공조건이 제약조건에서 계수의 가능한 성

질(Probabilistic nature)에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. Ermer⁵⁾는 가공 조건을 최적화 하기 위해 Geometric programming을 사용했고, Weighting factor를 고려하여 경제적 가공 효과를 소개하였다. 그러나 이것들은 제약조건을 절삭조건에만 국한시켜 현장에서 필요로 하는 표면조도의 제약조건을 만족하지 못해 현장 적용이 곤란하였다. 그러므로 본 논문에서는 제약조건 중 절삭조건 뿐만 아니라 작업 가공 목표, 즉 현장에서 중요시 하는 표면조도를 제약조건에 첨가하여 가공 조건의 최적화를 꾀하였다. 또한 앞의 논문들에서 적응제어나 R-T-F의 개념으로 경제성을 고려한 최적 절삭 조건을 구하였으나 본 논문에서는 국내 업체의 노무비 및 간접비로 최소 가공비를 구하고, 이에 대응하는 최적 절삭 속도 및 최대 생산율을 검토하였다. 그리고 이송변화에 따른 최적 절삭 속도의 영향을 검토하여 생산 가공의 경제성을 재고하였다. 또한 각 업체의 선삭작업에 해당하는 입력 데이터만으로 경제성을 고려한 최적 절삭 조건의 자동 설정을 하기 위한 프로그램을 구축하였다. 그러므로 이와같은 방법으로 현재 업체의 장비와 인원만으로 기계 가공의 최적 조건 선정을 자동화 하므로써 생산성 향상과 원가 절감의 효과를 극대화 할 수 있을 것으로 기대가 된다.

2. 관계이론

2.1 기계가공의 기초적 수학 모델

1) 단위 생산시간

단위 생산시간은 제품 1개를 가공하는데 필요한 시간이 단축된 기계가공은 능률이 높으므로 생산성이 높아지게 된다. 그러므로 가공 조건은 최대 능률기준에 따르게 된다. 자동화 기계의 경우 제품 1개를 가공하기 위한 생산 시간 t 는 크게 나누어 다음 3가지 시간성

분의 합으로 된다.

- ① 절삭 시간(min/pc) : t_f
- ② 비절삭 시간(min/pc) : t_i
- ③ 공구교환 시간(min/pc) : t_c
 $= (t_c \cdot t_f / T)$

여기서 t_c 는 날 한개당 공구 교환시간(min/edge)

실제 절삭가공에만 필요한 정미시간을 實 절삭시간 t_f (min/pc)라고 하며, 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$t_f = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot f \cdot V} = \frac{\lambda}{V} \quad (1)$$

- 여기서, D : 공작물의 가공전 직경(mm)
- L : 공작물의 가공길이(mm)
- f : 이송(mm/rev)
- V : 절삭속도(m/min)
- λ : 절삭 상수($\lambda = \pi D L / 1000 f$)

단위 생산시간 t (min/pc)는 다음과 같이 합이 된다.

$$t = t_f + t_i + t_c \cdot (t_f / T) \quad (2)$$

1 batch를 생산하는데 요하는 공구수명을 구하기 위해서는 절삭속도와 공구 수명의 관계를 알아야 한다. Taylor의 실험식인 절삭속도와 공구수명의 관계식은 다음과 같다.

$$V \cdot T^n = V_r \cdot T_r^n = C \quad (3)$$

- 여기서, V : 절삭속도(mm/min)
- T : 공구수명(min)
- n : 상수
- C : 상수 [공구수명 $T=1$ (mm)에 대한 절삭속도]
- T_r : 주어진 절삭속도
공구수명

식(1)과 식(3)에 대입하면 다음과 같은 식이 된다.

$$t = \frac{\lambda}{V} + t_i + t_c \cdot \frac{\lambda V^{(1/n)-1}}{C^{1/n}} \quad (4)$$

2) 생산율

생산율은 단위 생산시간의 역수로 식은 다음과 같다.

$$q = 1/t = 1/[t_f + t_i + t_c \cdot (t_f / T)] \quad (5)$$

이것의 단위를 다시 시간으로 환산하면, 단위 시간당의 생산갯수인 생산율(또는 생산속도) p (pc/hr)는 다음과 같이 된다.

$$p = \frac{60}{t_f + t_i + t_c \cdot (t_f / T)} \quad (6)$$

3) 단위 생산비용

단위 생산비용은 제품 1개당의 가공비이며, 이 가공비용을 작게 하므로써 생산 원가를 절감시킬 수 있다. 따라서 원통절삭에서는 일정한 속도에서 최소생산가를 얻는 최적절삭속도를 먼저 고려해야 한다. 이때에 작업자와 기계가 N_b 개 부품의 1 batch를 생산하는데, 드는 생산비용 U_{TC} 는 다음과 같은 성분의 합으로 이루어 진다.

- ① 절삭비용(won/pc) : $M \cdot N_b \cdot t_f$
- ② 비 절삭비용(won/pc) : $M \cdot N_b \cdot t_i$
- ③ 공구 교환비용(won/pc): $M \cdot N_t \cdot t_c$
- ④ 공구 비용(won/pc) : $N_t \cdot C_t$

- 여기서, N_t : 사용 공구의 수
- C_t : 공구 1개의 값

고로 단위 생산비용 U_{TC} 는 다음과 같은 식이 된다.

$$U_{TC} = M \cdot t_f + M \cdot t_i + M \cdot t_c \cdot \frac{N_t}{N_b} + C_t \cdot \frac{N_t}{N_b} \quad (7)$$

또한 공구가 총 가공시간 동안에 공작물과 접촉하여 절삭작업을 하였다 고 하면,

1 batch의 가공에 필요한 공구수는 다음과 같다.

$$N_t = N_b \frac{t_f}{T} = N_b \cdot T_r \left(\frac{V_r}{V} \right)^{1/n}$$

$$\frac{N_t}{N_b} = \frac{t_f}{T_r} \left(\frac{V}{V_r} \right)^{1/n} \quad (8)$$

생산비와 절삭속도의 관계는 식(1) 및 식(8)를 식(7)에 대입하면 다음과 같은 식이 된다.

$$U_{TC} = M(t_i \cdot \lambda V^{-1}) + \frac{\lambda}{V^{1/n} T_r} (M \cdot t_c + C_t) V^{(1/n)-1} \quad (9)$$

2.2 기계가공에 있어서 최적절삭속도

1) 최대 능률 절삭속도

일반적으로 고려 되어지는 가공조건(절삭속도, 이송량, 절삭깊이)에 있어서 그중 1개를 결정변수로 하는 절삭 제약조건 $V_{min} \leq V \leq V_{max}$ 으로 하면 식(6)은 V 에 대한 함수이므로 $(\partial t/\partial V) = 0$ 일 때 최대 생산성 절삭속도를 얻게 된다. 따라서 최소비용 절삭속도 (V_{op}) 다음과 같이 된다.

$$V_{op} = \frac{C}{\left[\left(\frac{1}{n} - 1 \right) t_t \right]^n} \quad (10)$$

생산율(혹은 생산속도)을 최대로, 다시말해서 생산시간을 최소로 하는 절삭 속도 V_{op} 는 Fig.1의 도면과 같이 피삭체를 절삭가공할 경우, Taylor의 수정공구 수명방정식 $V \cdot T^n \cdot d^\alpha \cdot f^\beta = C$ (α, β : 절삭상수)와 식(10)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{op} = \frac{C}{\left[t_c \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \cdot \frac{L}{L+a} \right]^n \cdot d^\alpha \cdot f^\beta} \quad (11)$$

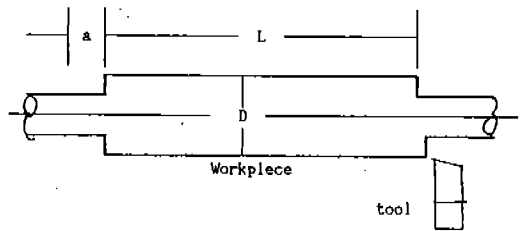


Fig.1 The model for Rough Cutting of Round Bar in Turning (Test material : SM45C, Tool : P20)

이렇게 구한 최대능률(최소시간) 절삭속도 V_{op} 는 보통 최소비용 절삭속도 V_{ic} 보다 크다.

2) 최소비용 절삭속도

식(9)은 절삭속도 V 에 대한 함수이므로, $(\partial U_{TC}/\partial V) = 0$ 일 때 최대 생산성 절삭속도 (V_{ic})는 다음과 같은 식이 된다.

$$V_{ic} = \frac{C}{\left[\left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(t_c + \frac{C_t}{M} \right) \right]^n} \quad (12)$$

그러나 절삭깊이와 이송의 영향을 고려한 수정 공구수명 방정식은 $V \cdot T^n \cdot d^\alpha \cdot f^\beta = C$ (α, β : 절삭상수)로 되며, 이에 따른 최소비용 절삭속도 V_{ic} 는 다음과 같다.

$$V_{ic} = \frac{C}{\left[\left(t_c + \frac{C_t}{M} \right) \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(\frac{L}{L+a} \right) \right]^n \cdot d^\alpha \cdot f^\beta} \quad (13)$$

2.3 단면절삭

원통선삭에서 주축회전수가 일정하면 절삭속도가 일정하게 된다. 그러나 단면절삭에서는 주축절삭속도가 일정하여도 절삭속도는 변하게 된다. Fig.2에서 절삭속도는 절삭반경 r 에 따라 선형적으로 변한다. Fig.3는 1개가 여러개의 가공물을 절삭할 때에 대한 Flank Wear Land 폭의 관계를 나타내고 있다. Fig.3에서 부품 1개의 가공중에 flank We-

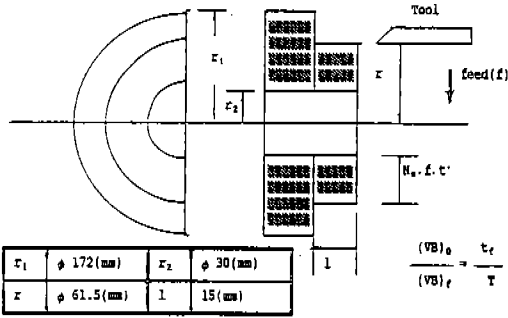


Fig. 2 The model for Section Cutting in Turning

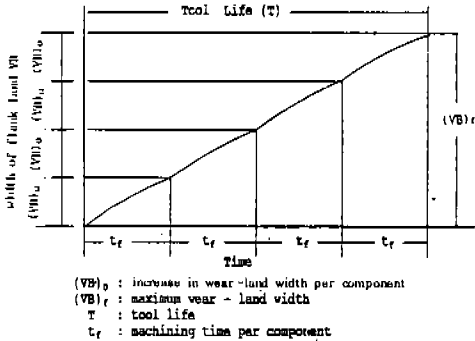


Fig. 3 Cutting Time and Flank Wear - Land Width

ar Land 폭(VB)의 증가율(VB₀)로 한다면 다음과 같은 식으로 된다.

$$\frac{(VB_0)}{t_f} = \frac{(VB)_f}{T}, \quad \frac{(VB_0)}{(VB)_f} = \frac{t_f}{T} \quad (14)$$

여기서 (VB)_f은 공구의 재 연삭을 위한 flank Wear Land 폭이다.

주어진 절삭속도에서 공구가 일정한 率로 마모된다고 하고, $d(VB)/dt'$ = 마모 Land 폭의 증가율이므로, Taylor의 공구방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d(VB)}{d t'} = \frac{(VB)_f}{T}, \quad \frac{(VB)_f}{d(VB)/dt'}$$

$$= T_r \left(\frac{V_r}{V} \right)^{1/n} \quad (15)$$

식(15)에서는 V는 임의 시간에 대한 전삭속도이므로, V는 다음과 같이 정리된다.

$$V = 2 \pi \cdot N_s \cdot r \quad (16)$$

여기서, N_s : 주축 회전수

또 임의 시간에 있어서 절삭반경 r은 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$r = r_1 - N_s \cdot f \cdot t' \quad (17)$$

여기서, r₁ : 가공물의 외측 반경 (mm)

r₂ : 가공물의 내측 반경 (mm)

t' : 단면절삭 시간 (min)

f : 이송 (rev/min)

또 식(15)와 식(16)에서 다음과 같은 관계식이 된다.

$$d(VB) = \frac{(VB)_f}{T_r} \left(\frac{V}{V_r} \right)^{1/n} \cdot dt' = \frac{(VB)_f}{T_r}$$

$$\left(\frac{2\pi N_s r}{V_r} \right)^{1/n} \cdot dt' \quad (18)$$

식(18)을 적분하면 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\int_0^{(VB)_0} d(VB) = \int_{t_0}^{t_f} \left(\frac{(VB)_f}{T_r} \right) \left(\frac{2\pi N_s r}{V_r} \right)^{1/n} \cdot dt' \quad (19)$$

그런데, $dr = -N_s \cdot f \cdot dt'$

고로, $dr' = dr/N_s \cdot f$

$$(VB)_0 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{(VB)_f}{T_r} \left(\frac{2\pi N_s}{V_r} \right)^{1/n} \cdot r^{1/n}$$

$$\left(-\frac{dr}{N_s f}\right)$$

$$\frac{(VB)_o}{(VB)_f} = \left(\frac{2\pi N_s}{V_r}\right)^{1/n} \frac{n}{f N_s T_r(1+n)}$$

$$\begin{aligned} & \cdot (r_1^{(1+n)} - r_2^{(1+n)/n}) \cdot (VB)_o / (VB)_f \\ & = t_f / T = N_t / N_b \end{aligned} \quad (20)$$

그런데 실가공시간 t_f 는 다음과 같다.

$$t_f = r_1 - r_2 / N_s \cdot f \quad (21)$$

식(20)과 식(20)을 식(7)에 대입하면, 단위 생산비용으로 정리된다.

$$\begin{aligned} U_{TC} &= M t_i + M \frac{r_1 - r_2}{M_s \cdot f} + M \left(\frac{2\pi N_s}{V_r}\right)^{1/n} \\ & \frac{n}{f N_s T_r(1+n)} \cdot (r_1^{(1+n)/n} - r_2^{(1+n)/n}) \\ & \cdot t_c + \left(\frac{2\pi N_s}{V_r}\right)^{1/n} \cdot \frac{n}{f N_s T_r(n+1)} \\ & (r_1^{(1+n)/n} - r_2^{(1+n)/n}) C_t \end{aligned} \quad (22)$$

최소 생산에 대한 최소 절삭속도를 구하기 위하여 식(20)을 N_s 에 대하여 미분하면, 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} U_{TC} &= M t_i + M \frac{r_1 - r_2}{f} N_s^{-1} + M \left(\frac{2\pi}{V_r}\right)^{1/n} \\ & \frac{n}{f N_s T_r(1+n)} \cdot (r_1^{(1+n)} - r_2^{(1+n)/n}) \end{aligned}$$

$$\cdot (M t_c + C_t) \cdot N_s^{-(1+n)/n} \quad (23)$$

$a_r = r_2 / r_1$ 라고 하면, 최소비용 단면절삭 회전수 N_s 을 N_{sc} 로 쓰면 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} N_{sc} &= \frac{V_r}{2\pi r_1} \left(\frac{1+n}{1-n} \cdot \frac{M T_r}{M t_c + C_t} \right. \\ & \left. \frac{1 - a_r}{1 - a^{(n+1)/n}} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

식(20)에서 공구수명 T 는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{r_1 - r_2}{f} \left(\frac{V_r}{2\pi}\right)^{1/n} \cdot \frac{f T_r(n+1)}{n} \\ & \cdot \frac{N_s^{-1/n}}{r_1^{(n+1)/n} - r_2^{(n+1)/n}} \end{aligned} \quad (25)$$

식(20)을 식(20)에 대입하면, 다음과 같은 최소 생산비용에 대한 최적 공구수명 T_i 의 식 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} T_{ip} &= \frac{r_1 - r_2}{f} \left(\frac{V_r}{2\pi}\right)^{1/n} \cdot \frac{f T_r(n+1)}{n} \\ & \cdot \frac{N_s^{-1/n}}{r_1^{(n+1)/n} - r_2^{(n+1)/n}} \end{aligned}$$

$$\left[\left(\frac{V_r}{2\pi r_1}\right)^{1/n} \cdot \left(\frac{1+n}{1-n} \cdot \frac{M T_r}{M t_c + C_t} \cdot \frac{1 - a_r}{1 - a^{(n+1)/n}}\right)^{-1} \right]$$

$$T_{ip} = \frac{1+n}{n} \left(t_c + \frac{C_t}{M} \right) \quad (26)$$

최소 생산시간에 대한 최적 공구수명 T_{tp} 와 같이 절삭속도가 일정한 경우와 같다. 즉 식(10)에서

$$\frac{V_{ic}}{n^n} = V_r \left(\frac{1}{1-n} \cdot \frac{M T_r}{M t_c + C_t} \right)^n \quad (27)$$

식(20)와 식(20)에서, 다음과 같은 최소비용 단면 회전수(N_{sc})는 다음과 같다.

$$N_{sc} = \frac{V_{ic}}{2\pi r_1} \left[\left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(\frac{1-a_r}{1-a_r^{(n+1)/n}}\right) \right]^n \quad (28)$$

다음 식(10)과 식(20)에서 최대능률 단면절삭 회전수(N_{sp})는 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$N_{sp} = \frac{V_{op}}{2\pi r_1} \left[\left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(\frac{1-a_r}{1-a_r^{(n+1)/n}}\right) \right]^n \quad (29)$$

2.4 표면조도

기계가공에 있어서는 피삭체에 대한 절삭 가공구의 재료 및 형상, 절삭속도, 절삭깊이, 이송, 절삭유제 등을 결정하여야 하며, 또한 절삭 후 가공면의 표면조도를 만족해야만 한다.

이송방향의 기하학적 표면조도의 근사식은 다음과 같다.

$$H_{max} = [f^2 / (8 \times R)] \times 1000 \quad (30)$$

여기서, H_{max} : 표면조도 (μm)
 R : nose 의 반경 (mm)
 f : 이송 (mm/rev)

2.5 최적 절삭조건 설정시 제약조건

1) 절삭깊이에 대한 제약조건

사용하는 절삭공구의 날끝 형상으로부터 절삭깊이의 최대치 d_{max} 를 결정하고, 그 이상의 절삭깊이가 주어지면 2회 이상의 절삭깊이로 하기로 한다. 그러므로 가공에서의 절삭깊이는 다음과 같은 제약조건을 만족해야 한다.

$$d = (D_1 - D_2) / 2 \leq d_{max} \quad (31)$$

여기서, D_1 : 가공전 공작물의 직경 (mm)
 D_2 : 가공후 공작물의 직경 (mm)

2) 이송에 대한 제약조건

이송에 대한 제약조건은 앞서 기술한 최대 표면조도를 나타내는 식(20)로부터 최대 이송 f_{max} 를 정할 수 있고 그 값은 다음과 같이 된다.

$$f_{max} = \sqrt{8 \cdot R \cdot H_{max} / 1000} \text{ (mm)} \quad (32)$$

공작기계 자체가 가지고 있는 최대, 최소의 이송 한계에 대해서도 고려하여, 가공할 때 주어지는 이송은 다음과 같다.

$$f_{min} \leq f \leq f_{max} \quad (33)$$

을 만족하는 범위내에서 설정되어야 한다.

3) 절삭속도에 대한 제약조건

절삭깊이와 이송이 결정되면 최소 가공비용 절삭속도 V_{ic} 가 절삭공구의 공구수명 방정식을 이용하여 계산되지만, 이 속도로 절삭가공이 가능한지 아닌지를 검토할 필요가 있다. 속도의 제약이 되는 것은, 우선 선반이 갖는 최소 회전수 N_{min} 와 최대 회전수 N_{max} 이고, 따라서 그것들과 가공물의 직경으로부터 얻어지는 최소 절삭속도 V_{min} 과 최대 절삭속도 V_{max} 를 결정할 수 있게 되므로 절삭속도 V 는 다음과 같이 주어진다.

$$\left. \begin{aligned} V_{min} &= \pi \cdot D_1 \cdot N_{min} / 1000 \\ V_{max} &= \pi \cdot D_1 \cdot N_{max} / 1000 \end{aligned} \right) \quad (34)$$

다음으로 선반이 보유하는 주전동기의 허

용마력을 고려하여, 그 이하의 절삭속도로 가공해야 된다. 또한 허용 마력의 절삭속도 V_{hp} 는 다음과 같은 식이 주어진다.

$$V_{hp} = 75 \times 60 \times 0.8 HP / K_s \cdot f \cdot d \quad (35)$$

여기서, K_s 는 재료의 비절삭저항(kg/mm^2) 이며, 다음과 같다.

$$K_s = \exp(\gamma - \delta \ln f) \quad (36)$$

이 값은 각 피삭재의 종류에 대한 변수인 γ 와 δ 에 따라 K_s 의 값을 계산함으로써 절삭동력을 구할 수 있다.

3. 실험

3.1 실험장치 및 방법

CNC 선반(WASINO, Japan, Model: LJ-62K)에서 초경공구 P20 Tip shape (-5, -6, 5, 6, 15, 15, 0.8)으로 SM 45C를 가공하여 공구수명을 검토하였다. 공구수명 판정기준은 여유면 마모폭 $V_B = 0.3 mm$ 로 하였으며, 여유면 마모를 공구 현미경(Magnification: $50 \times \sim 1000 \times$)으로 측정하였다. Table 1는 실험조건과 결과 공구수명을 표시하였다.

Fig.3에서 나타난 바와 같이 단면절삭모형은 절삭속도 $95 \sim 270(m/mm)$. 이송 $0.25 (mm/rev)$, 절삭깊이 $2(mm)$ 로 가공한다. Table 2에 20회 가공시 절삭시간과 여유면 마모를 표시하였다.

Table 1 The Cutting Conditions and The Results Experiment

No.	Cutting depth (mm)	Feed (mm/rev)	Cutting speed (m/min)	Tool life (min)
1			331.2	6.25
2		0.15	364.5	4.53
3			419.3	2.43

4	0.52		452.7	1.56
5			262.2	5.92
6	0.35		281.5	3.74
7			363.2	0.85
8			372.0	0.67
9	0.20		292.8	2.74
10			317.2	2.42
11			367.2	1.67
12			397.6	0.74
13	0.30		230.2	2.74
14			246.1	2.42
15	0.31		325.7	0.67
16			342.6	0.62
17	0.78	0.15	267.0	7.32
18			289.9	5.12
19		1.57	349.4	1.74
20			397.6	0.89
21			237.5	0.25
22			258.2	6.64
23			311.8	7.51
24			328.2	1.32
25	1.5	0.15	309.7	7.03
26			325.5	5.67
27			392.2	1.63
28			398.7	1.24
29		0.20	288.9	5.08
30			312.7	4.57
31	375.8		1.37	
32			378.6	1.14
33	2.0	0.15	375.4	7.08
34			396.2	3.74
35			401.7	1.47
36			437.6	1.21
37		0.30	457.6	5.54
38			478.8	3.24
39	481.7		1.78	
40			499.6	1.57

Table 2 The Section Cutting Condition and The Results in Experiment

number of machining	1	2	3	4	5
cutting time (sec)	18.7	39.4	54.1	77.8	98.5
tool wear (mm)	0.0156	0.032	0.046	0.061	0.075
number of machining	6	7	8	9	10
cutting time (sec)	118.2	137.7	157.6	177.3	197
tool wear (mm)	0.092	0.106	0.123	0.138	0.151
number of machining	11	12	13	14	15
cutting time (sec)	216.7	236.4	256.1	275.5	295.5
tool wear (mm)	0.164	0.181	0.197	0.211	0.224
number of machining	16	17	18	19	20
cutting time (sec)	315.2	334.9	354.6	374.3	394.2
tool wear (mm)	0.242	0.256	0.271	0.287	0.305

4. 결과 및 토의

4.1 길이방향의 절삭가공에 대한 경제성과 절삭조건

1) 절삭속도에 따른 제비용과 생산속도와의 관계

일반적으로 기계가공을 하기 위해서는 제작도면과 가공재료를 전제로 하여 목적에 적합한 공작기계의 종류와 크기를 선정하고, 능률적이고 저가의 가공조건을 선정할 필요가 있다.

Fig.1과 같은 제품을 제작하는 경우에는 소재에서 제품에 이르는 공정설계를 우선으로 한다. 이 경우 선삭 작업을 하므로 선반의 소유동력, 기계의 유량(왕복대의 스윙, 양 센터간의 거리 등), 주축의 회전수, 치구(治具), 기계의 강성, 기계의 설비비 등을 고려하여 적절한 기계를 선정한다. 또한 절삭공구의 선택시 공구의 종류 및 형상을 결정하여야 하며 절삭시 소요되는 각각의 실질삭 비용, 비절삭 비용, 공구교환 비용, 공구 비용 등을 고려하여 능률적인 절삭조건을 결정한다. 지금 Fig.1의 제품을 가공하는 경우 Table 1과에

서 보는 것 같이 실험 데이터를 Taylor의 공구수명 방정식 $V \cdot T^{0.263} d^{0.34} f^{0.204} = 223.08$ 으로부터 최소비용 절삭속도와 최대 능률 절삭속도 및 이윤율을 최대로 하는 절삭속도에 대해 대기업群(A)와 중소기업群(B)인 2개 가공업체群의 分當加工費 M 을 적용시켜 Table 3의 각 항목에 대한 값을 주어 계산한다.

Fig.4에서 나타난 바와 같이 대기업群(A)社 ($M=435 \text{ won/min}$)의 경우, U_{TC} 를 최소로 하는 절삭속도 V_{ic} 는 186.3 m/min 으로 되고, 이때의 공구수명 T 는 공구수명 방정식으로부터 4.48분이 된다. 또 생산속도(생산율) P 를 최대로 하는 절삭속도 V_{op} 는 295.587 m/min 로 되며, 그때의 생산속도 P 는 8.92 pcs/hr 로 계산된다. 결국 이때 작업에서 제품 1개를 제작하는데 필요한 비용을 최저로 하기 위해서는 절삭속도 V_{ic} 는 186.3 m/min 로 가공하면 좋다. 그리고 4.48분마다 공구를 교환해야 한다. 또 그때의 가공비용 U_{TC} 는 3208.3 won/pc 이며, 또한 생산율 P 를 최대로 하는 최대 절삭속도 V_{op} 는 295.59 m/min 이다. 그 때의 공구수명은 0.77분이다. 그리고 그 때의 생산속도는 1시

Table 3 Symbols for Analyzing Economics of Machining Process

Symbol	Item	Value	Unit
M	Sum of labor and indirect cost	435, 200.	won/min
C_t	Tool cost	625	won/cutter
t_L	Loading/unloading time	2.0	min
t_o	Time of workpiece setting time	20.0	min
t_t	Traversal feed time	0.6	min
t_m	Inspection time	2.5	min
t_c	Tool changing time	0.3	min
N_L	Lot size	80	
r	Rapid change speed	2, 300	mm/min
D	Diamter of workpiece	75.0	mm
L	Length of workpiece	350.0	mm
a	Approach length	30.0	mm
f	Feed	0.35	mm/rev
d	Depth of cut	1.0	mm

간에 8.6개 제작할 수 있다. 나머지 중소기업군 Fig.5에서와 같이 (B)社($M=220$ won/min)에서의 최소비용 절삭속도, 최소 가공비용 및 최대능률 절삭속도, 생산을 등도 같은 방법으로 해석한다. 또한 Fig.4, Fig.5에서와 같이 절삭속도를 증가시킬 경우, 총 가공비용은 감소하다가, 최소비용 절삭속도를 경계로 하여 증가하게 된다. 이것은 절삭속도가 증가할 수록 실 절삭 비용은 감소하나 공구교환 비용과 공구 비용이 현저하게 증가하기 때문이다. 또한 생산율은 단위 생산시간의 역수이므로 절삭속도가 증가할 수록 최대능률 절삭속도까지 증가하며 그 후에 감소한다. 이것은 실 절삭시간에 비해 공구교환 시간이 급격히 증가하기 때문이다. 그러므로 분당 가공비가 증가하면 최대능률 절삭속도는 일정하지만, 최소 비용 절삭속도가 증가하여, 고효율 절삭속도 영역이 좁아진다.

2) 이송에 따른 기계가공의 경제성

기계가공의 해석에 있어서 절삭깊이와 이송이 달라지면 가공비도 변화한다. 특히 이송의 영향이 크게 작용한다. 이것을 나타내기 위해서 공구수명 방정식을 사용하여, Table 1과

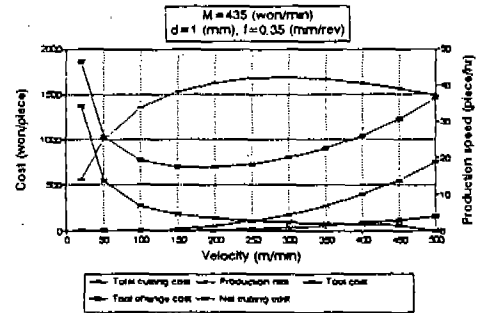


Fig. 4 The Relationship Between Costs and Cutting Speed, and Between Production Rate and Cutting Speed in Machining ($M=435$ won/min)

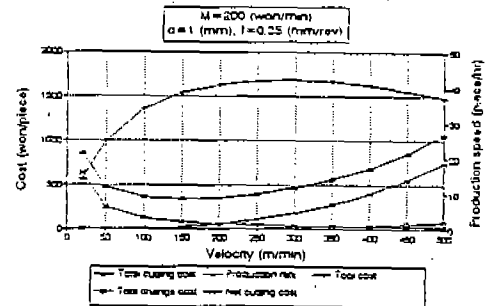


Fig. 5 The Relationship Between Costs and Cutting Speed, and Between Production Rate and Cutting Speed in Machining ($M=200$ won/min)

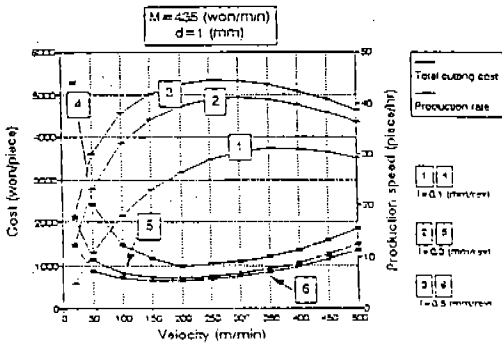


Fig. 6 The Influence of Feed on The Economics of Machining ($M=435$ won/min)

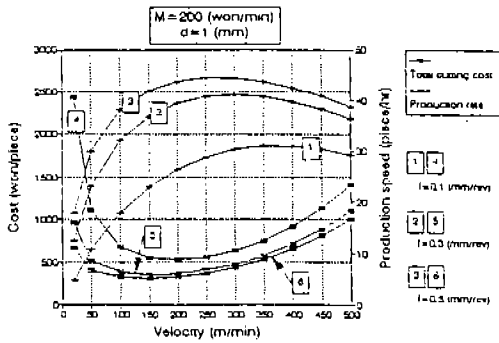


Fig. 7 The Influence of Feed on The Economics of Machining ($M=200$ won/min)

같은 조건으로 절삭속도, 가공비용 및 생산속도에 대한 관계를 Fig.6, Fig.7에서와 같이 이송이 클수록 가공 비용은 낮아지며, 또한 생산율이 높아지는 것을 알 수 있게 된다.

3) 절삭깊이에 따른 기계가공의 경제성

절삭깊이의 변화에 따르는 가공비와 생산율과의 관계를 Fig.8과 Fig.9에 표시한다.

Fig.10과 Fig.11서 절삭깊이가 증가함에 따라 가공비용은 높아지고, 생산율은 낮아지게 된다. 이는 공구수명이 단축되므로 공구교환회수가 빈번해지는 것이다. 절삭속도 100(m/min) 이하에서는 절삭깊이의 변화에 따라 가공비와 생산율은 거의 영향이 미치지 않는다. 절삭깊이의 변화와 고효율 속도영역의 관계에 있어서는 $M=435$ (won/min)인 Fig.4의 경우, $d=1$ (mm)에서 가공비용을 최소로 하는 절삭속도 $V_{ic}=192.2$ (m/min)로 되

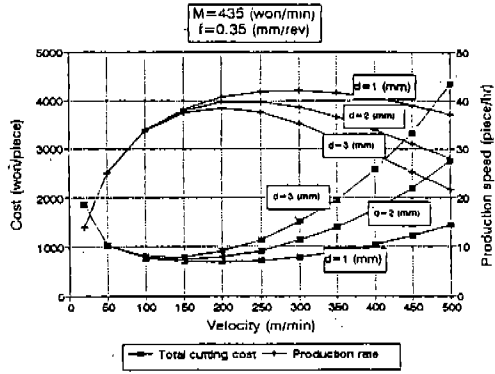


Fig. 8 Effect on Machining Economics at Various Depth of Cut(A. Co.)

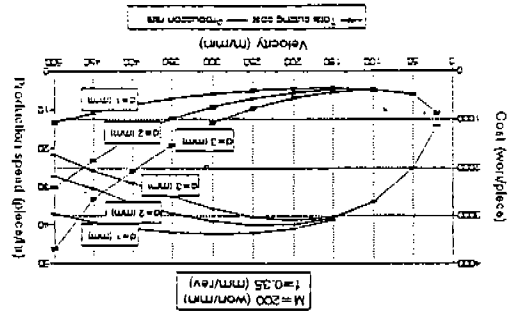


Fig. 9 Effect on Machining Economics at Various Depth of Cut (B. Co.)

고, 생산율을 최대로 하는 절삭깊이 $V_{ap}=304.94$ m/min로 되며, 고효율 속도영역 $V_{rp}=(192.2-304.94)$ m/min이 된다. 또 $d=2$ mm인 경우는 최소비용 절삭속도 $V_{ic}=151.81$ (m/min)이고 최대비용 절삭속도 $V_{op}=204.91$ (m/min)이므로 이때의 고효율 속도영역 $V_{rp}=(151.81-240.92)$ m/min로 된다. $d=3$ mm인 경우, $V_{ic}=132.26$, $V_{op}=209.9$ m/min, $V_{rp}=(132.26-209.9)$ 로 절삭깊이가 증가할수록 점차 고효율 영역은 좁아진다. 즉 절삭깊이와 고효율 속도영역의 관계는 서로 반비례한다. 또 $M=200$ (won/min)인 경우도 $M=435$ (won/min)과 같은 결과가 된다.

4. 2 단면 절삭가공에 대한 경제성

1) 절삭 회전수에 따르는 제비용과 생산속도의 관계

TAYLOR의 수명계수 $V T^n = C$ 에서 $N T^n = C$ (단: N 는 절삭 회전수) 수정하여, $N T^{0.25} = 897$ 로부터 단면가공의 최소비용 절삭 회전수와 최대 능률절삭 회전수 및 이윤율을 최대로 하는 절삭 회전수에 대해 大企業群(A)와 大企業의 下請 中小企業群(C)인 2개 가공업체의 분당가공비(M)를 적용하여 Fig.10과 Fig.9에 표시하였다. Fig.10과 Fig.11에서 보는바와 같이 회전수(N)가 증가할 경우, 총가공비용은 감소하다가, 최소비용 절삭 회전수를 경계로 하여 증가하게 된다. 이것은 절삭 회전수가 증가할 수록 실 절삭비용은 감소하나, 공구 교환비용과 공구비용은 현저하게 증가하기 때문이다. 또한 생산물은 절삭 회전수가 증가할수록 최대능률 절삭 회전수

까지 증가하며, 그 후는 감소하게 된다. 이것은 실절삭 회전수에 비해 공구시간이 급격히 증가하기 때문이다. 따라서 분당가공비가 증가하면 최대능률 절삭 회전수는 일정하지만, 최소비용 절삭 회전수는 증가한다. 그러므로 고효율 절삭 회전수 영역은 좁아진다.

2) 절삭 회전수에 따른 경제성 절삭 가공에 대한 이송

가공비의 변화는 절삭깊이와 이송의 변화에 의하여 영향을 크게 받게 된다. 특히 이송에 대한 변화는 크게 작용하게 된다.

TAYLOR의 수명방정식으로부터 $N \cdot T^n = C$ (단: N 는 절삭 회전수)로 수정하여, $N \cdot T^{0.25} = 897$ 로부터 절삭 회전수, 가공비용, 생산속도에 대한 관계를 Fig.11과 Fig.12에서와 같

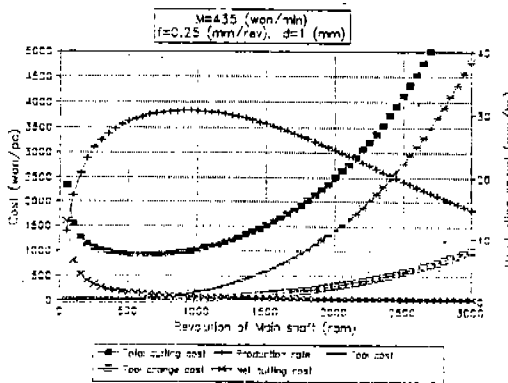


Fig. 10 The Costs and Production Rate as Functions of Main Shaft Speed (rpm), ($M=435$ won/min)

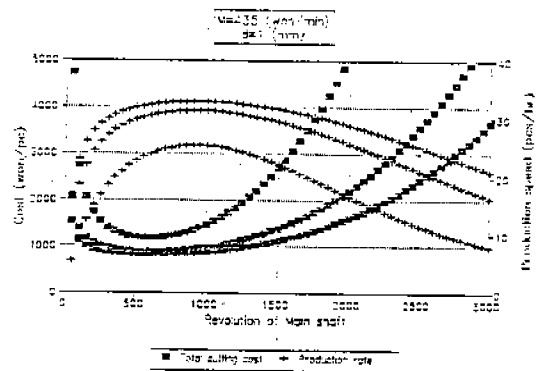


Fig. 12 The Tooling Costs and Production Rate as Functions of Main Shaft Speed When Feed is 1 (mm), ($M=435$ won/min)

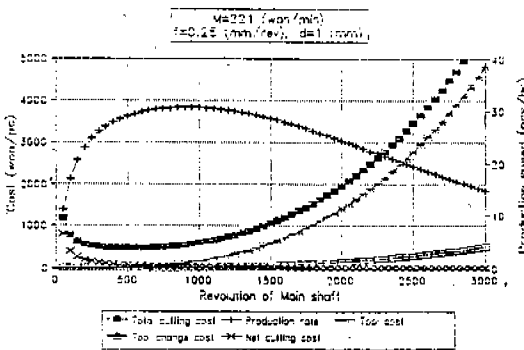


Fig. 11 The Costs and Production Rate as Functions of Main Shaft Speed (rpm) ($M=221$ won/min)

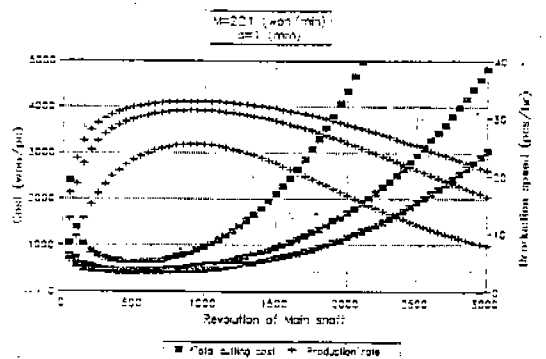


Fig. 13 The Tooling Costs and Production Rate as Functions of Main Shaft Speed When the feed is 1 (mm), ($M=221$ won/min)

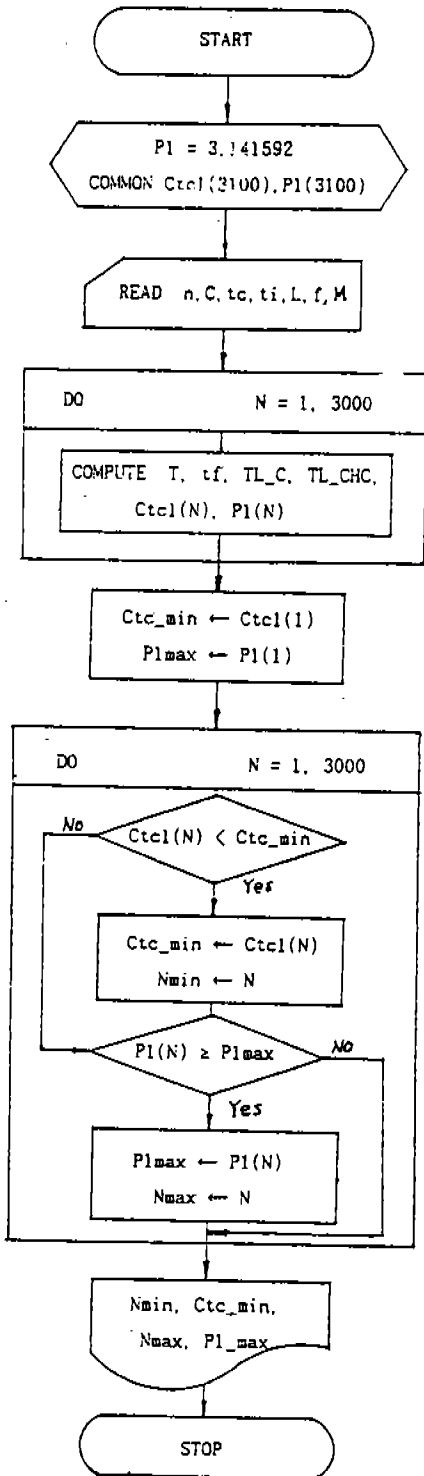


Fig. 14 Flow-chart of Optimal Cutting Condition

이 이송이 증가할 수록, 총 가공비용은 최소 비용 절삭 회전수를 경계로 하여 급속하게 증가하게 된다. 또한 생산율은 절삭 회전수가 증가할 수록 최대능률 절삭 회전수까지는 증가하며, 그 후로는 감소하게 된다.

5. 결 론

이상과 같이 기계 가공에 있어서 분당 가공비를 고려한 최적절삭 조건에 관해 연구한 결과는 다음과 같다.

1) 분당 가공비가 435원인 경우 고효율 영역이 186.3m/min - 259.59m/min 이나 분당 가공비 200원인 경우 고효율 영역이 160.7m/min - 204.9m/min 이므로 분당 가공비가 커질 수록 고효율 절삭속도 영역이 좁아진다.

2) 이송이 커질 수록 가공비율은 낮아지나 생산율은 높아진다. 그러나 이송의 최대값은 제품의 표면조도 값으로 제한한다.

3) 절삭속도 100m/min 이하에서는 절삭깊이에 따르는 가공비는 생산율에 적게 미치나 그 이상에서는 절삭깊이가 커질 수록 고효율 절삭속도 영역이 좁아진다.

4) 단면절삭에서도 절삭깊이의 증가에 따라 최소비용 절삭속도는 높아지고, 최대 능률 절삭속도는 낮아지므로, 또한 고효율 속도 영역은 좁아진다.

5) 현재 실 가공공정에서 적용하고 있는 제한 조건을 고려한 최적 절삭조건 자동선정 프로그램을 구축함으로써 그 결과를 현장에서 적용하여 생산성 향상 및 절감에 기여할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Ermer, D.S., and Wu, S.M., 1967, "The Effect of Experimental Error on the Determination of the Optimum Metal Cutting Conditions," Trans. ASME, Series B, Vol.89, pp.315-322.
2. Crookal, J.R., 1969, "The Performance-Envelope Concept in the Economics of Machining," Int. J. Mach. Tool Des., Vol.9, pp.261-278.

3. Friedman, M.Y., and Tipnis, 1976, "Cutting Rate-Tool Life Characteristic Functions for Material Removal Processes : Part 1-Theory," Trans. ASME, Series B, Vol.98, pp.481-486.
4. Iwata, K, Murotsu, Y., Iwatsudo, T., and Fujii, S., 1972, "A Probabilistic Approach to the Determination of the Optimum Cutting Conditions," Trans. ASME, Series B, Vol.98, pp.1099-1107.
5. D.S. Ermer, D.S., 1971, "Optimization of the Constrained Machining Economics Problem by Geometric Programming," Trans. ASME, Series B, Vol.93, pp.1067-1072.
6. Ermer, D.S., and Wu, S.M., 1966, "Maximum Profit as the Criterion in the Determination of the Optimum Cutting Conditions," Trans. ASME, Series B, Vol.88, pp.435-442.