

기계가공 최적화를 위한
가이드시스템에 관한 연구

최 종근* 양 민양**

**A Study on Guide System for
Optimization of Machining Process**

Jong Geun Choi* Min Yang Yang**

Abstract

The optimization in the machining process has been a long-standing goal of the manufacturing community. The optimization is composed of two main subjects; one is to select an optimum cutting condition, and the other is to detect the emergency situation and take necessary actions in real-time base.

This paper proposes a reliable and practical guide system whose purpose is the optimization of cutting conditions, and the detection of tool failure in the machining process. The optimal cutting conditions are determined through the estimation of tool wear rate and the establishment of accessible field from the measured cutting temperature and force. Tool breakage is detected by the normal force component acting on minor flank face extracted from on-line sensed feed force and radial force.

In experiments, the proposed guide system has proved availability for the decision of reliable cutting conditions for the given tool-work system and the detection of tool breakage in ordinary cutting environments.

* 금성사 중앙연구소

** 정희원 한국과학기술원 생산공학과

NOMENCLATURE

c_1	: 노무비[won/min]	K_m	: 기계적 마멸계수
c_2	: 공구비[won/edge]	K_t	: 열화학적 마멸계수
d_1	: 마멸면 폭[mm]	L	: 여유면 마멸길이[mm]
F	: 추정 주 절삭력[kgf]	Q	: 공구재료의 활성화 에너지[kcal/mole]
F_c, F_f, F_r	: 측정 주 이송 배분력[kgf]	R	: 만능 기체상수[kcal/mole °k]
F_s	: 칩 유동 마찰력[kgf]	t_c	: 공구교환 소요시간[min/edge]
F_t	: 공구 여유면 수직 작용력[kgf]	t_m	: 순수 절삭시간[min/part]
F'_t	: 공구 부 여유면 수직 작용력[kgf]	λ	: 공구 절삭각(tool lip angle)

1. 서 론

오늘날 생산현장에서 이루고자하는 공장자동화의 실현은 크게 기계가공·운반·시스템제어의 세 부분으로 생각될 수 있는데 이중 기계가공은 절삭현상의 복잡성에 기인하여 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 최적효율을 얻을 수 있는 무인가공 시스템의 개발에는 이르지 못하고 있다.

절삭가공 시스템에서 효율의 극대화는 가공조건 최적화, 공구 수명 및 긴급상황의 판단과 조치 등에 대한 제어기능의 활성화에 의해서 이루어질 수 있다. 가공조건 최적화를 위한 노력은 1960년대 말 부터 연구가 시작된 적응제어(Adaptive Control) 시스템에 집중되어 왔으나 이들 시스템은 절삭 변수의 온라인 측정(On-line sensing) 및 실시간 제어(Real time control)의 어려움과 이에 따른 견고성(Robustness)의 부족에 기인하여 비교적 간단한 몇몇 구속 적응제어(Adaptive control constraint)를 제외하면 실용화되지 못한 실정이다.

효율 극대화를 위한 또 하나의 중대 요소로서 긴급상황의 판단과 조치기능은 가공중 돌발적으로 발생할 수 있는 공구의 파손이나 충돌등을 감지하여 다른 기능에 앞서 우선적으로 수행될 수 있는 긴급 제어기능을 말하며 자동화의 도입에서 일차적으로 부여되어야 할 요소라 할 수

있다. 이를 위해 널리 사용되고 있는 방법으로는 공구의 격심한 파손 또는 충돌에 의해 발생하는 과부하를 직접 이용하는 기계적 안전장치나 소효동력의 변동을 감지하여 판단하는 방법등이 알려져 있으나 공구의 수명 및 미소한 파손의 경우에도 감지할 수 있는 측정방법 및 판단수단은 아직 미비한 상태로 남아있다. 본 연구는 이와같은 여건에서 현재 이용 가능한 측정 및 제어 기술을 합리화하여 가공중인 공작물에 대한 최적 가공조건을 실시간(Real time)에서 예측하고 그 결과를 정보화하여 이를 이용 다음 공정에서 가공조건을 보완해 나감으로써 궁극적으로 최적 절삭조건에서 가공이 이루어질 수 있도록 절삭 입력변수를 유도하며 아울러 가공 도중 발생할 수 있는 공구의 파손에 대해서는 실시간 점검을 가능케하는 기계가공 가이드 시스템을 구상하였다.

이러한 가이드 시스템의 활용 방안으로는 기계 가공 전문가 시스템(Machining Expert System) 구성의 일환으로서

- 실 가공시 최적 절삭조건을 통한 비숙련 기능인(Unskilled machinist)에게 정보제공.
- 공정설계(Operation planning)시 공정 설계자 또는 파트 프로그래머(Part programmer)에 대한 가공자료 제공.

- 데이터 베이스 구축을 통한 장기적인 절삭정보의 확보.
 - 인간-기계 보완 시스템(Man-Machine System) 및 인간 감시 통제 시스템(Human Supervisory Control System)에서의 이용.
- 등을 들 수 있겠다. Fig.1은 그 한 예로서 이러한 가이드 시스템이 생산 계획 및 통제 시스템, 공정설계 시스템과 연결되어 구현된 컴퓨터 감시 통제 시스템(Supervisory Computer Control System)을 보여준다.

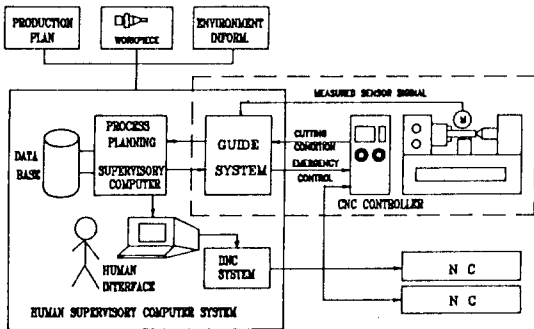


Fig.1 Machining Guide System

2. 공구의 마멸율(Tool Wear Rate)의 예측

절삭가공에 대한 최적조건의 평가지표로서 도입되는 성능지수(Performance index)는 가공조건의 주어지는 이송, 절삭속도 및 절삭깊이 등의 절삭변수 외에 공구 마멸율(Tool wear rate)을 필요로 한다. 지금까지 연구된 바에 의하면 공구 마멸기구(Tool wear mechanism)는 여러가지 현상의 복합작용으로 설명되고 있으나[1, 2, 3] 크게 대별하여 연삭마멸(Abrasion)이나 점착(Adhesion)처럼 공구와 피삭재간의 상호 작용에 의하여 공구재의 입자(Grain) 또는 입자군이 거시적(Macroscopic)으로 제거되는 기계적 마멸과 확산(Diffusion), 용해(Dissolution)에서와 같이 공구와 피삭재 원자 상호간의 작용이 가공중 발생하는 많

은 열로 인하여 활성화되어 미시적(Microscopic)으로 물질이동(Mass transfer)이 일어나는 열 화학적 마멸로 나누어 볼 수 있다.

기계적 마멸의 경우 마멸율은 주로 마멸재료의 기계적 성질에 의하여 영향을 받게 되며 Rabonowicz의 이론에 따르면 마멸재료의 경도 H_t 에 따라 다음과 같이 표현될 수 있다. [4, 5]

$$\Delta W_m = K_{m1} \frac{F_t}{H_t} V \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

열 화학적 마멸은 재료의 열 화학적 안정성에 의하여 영향을 받게 되는데 이들은 온도에 따라 일반적으로 Arrhenius의 법칙에 따라 변하는 것으로 알려져 있으므로 이는

$$\Delta W_t = K_{t1} \sqrt{V \cdot L} \exp\left(-\frac{Q}{RT_e}\right) \Delta t \dots\dots\dots (2)$$

로 나타낼 수 있다[4, 6]. 여기서 공구 선단의 형상을 고려하면 여유면(Flank face)의 마멸 체적 ΔW 는

$$\Delta W = L \cdot \Delta L \cdot d_1 \cdot \tan(\lambda) \dots\dots\dots (3)$$

로 표시될 수 있고, 플랭크면 수직작용력 F_t 는 측정되는 절삭력으로 부터 분리되어 얻어지기가 어려운 반면 F_t/Ld_1 로 표현되는 수직압력 P_m 은 마멸길이 L 에 관계없이 일정하게 유지되는 것으로 알려져 있으므로 [6, 7, 8]이 관계와 식(1), 식(2)를 통합하여 정리하면 플랭크면의 마멸율 dL/dt 은

$$\frac{dL}{dt} = K_m \frac{P_m}{H_t} V + K_t \sqrt{\frac{V}{L}} \exp\left(-\frac{Q}{RT_e}\right) \dots\dots\dots (4)$$

로 주어진다.

한편 공구마멸은 일반적으로 여유면 마멸(Flank wear)과 크레이터 마멸(Crater wear)이 동시에 존재하여 두 마멸 모두가 공구 수명에 직접 관계되나 크레이터마멸의 경우 과도한 마멸로 인한 공구 선단의 갑작스런 파손(Tool breakage)을 초래하기 전까지 실제 가공에의 악영향이 거의 없으며 또한, 현재 널리 사용되고 있는 피복공구

(Coated tool)의 경우 그 양이 매우 적게 나타나므로 본 연구에서는 여유면 마멸 만으로 공구 마멸율을 대신 하였다.

3. 최적 가공조건 결정

Fig. 2는 공작기계에 설치된 센서(Sensor)로부터 온라인 측정되는 출력 공정변수(Output process variable)를 이용하여 최적 가공조건을 찾기 위한 추적 시스템의 계통도(Systematic diagram)이다. 본 시스템에서 최적 절삭조건 결정을 위해 측정하는 출력 공정변수는 절삭온도와 주절삭력이다. 이들 정보로부터 먼저 절삭력 및 절삭온도 모델의 계수들에 대한 보정(Adaptation)과 이를 이용한 입력변수 f, v 평면내에서 제한 조건의

설정이 이루어지고 다음에는 설정된 허용가능영역(Accessible field)내에서 공구 마멸모델을 통한 성능지수의 평가와 함께 최적 가공조건 추적 실행된다.

최적 절삭조건을 결정하는 문제에 있어서 주어진 성능지수를 최대 혹은 최소로 하는 것만으로는 절삭공정 자체에 존재하는 제한조건(Constraint)으로 인하여 실제적인 최적 가공조건에 도달할 수 없는 것이 일반적이다. 절삭공정에서 이러한 제약조건의 대부분은 절삭력과 직접 또는 간접으로 밀접한 관계에 있으므로 현재의 가공조건과 측정되는 절삭력으로부터 다른 가공조건에 대한 절삭력을 미리 예측할 수 있다면 이러한 제한영역을 결정할 수 있게 된다. 이에 필요한 절삭력 모델을 다음과 같이 설정하였다. [9]

$$F_c = kd \cdot f^x \cdot v^y \dots\dots\dots(5)$$

또 성능지수를 평가하기 위하여 앞서 제시한 공구 마멸모델(Tool wear model)은 실험하고자 하는 조건에서의 절삭온도를 필요로 하므로 현재의 가공조건으로부터 평가하고자 하는 가공조건에 대한 온도의 예측이 필요하다. 모델에 의한 절삭온도의 예측은 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔으며 일반적으로 식(6)으로 표현될 수 있다. [8, 10]

$$T = \eta \cdot f^p \cdot v^q \dots\dots\dots(6)$$

절삭력 및 절삭온도 모델의 각 계수는 실험을 통한 정보로부터 구해질 수 있지만 사용되는 공구, 피삭재 및 그 밖의 매 순간 달라지는 공구 마멸을 포함한 많은 절삭환경에 대하여 항상 적절히 유지되기 어려우므로 그 보정을 필요로 한다. 절삭력 모델의 경우 가장 큰 영향인자가 절삭깊이의 변화임을 감안하여 상수 kd 를 매 순간 입력되는 F_c 를 근거로 보정되도록 하였고, 절삭온도 모델은 측정변수를 이용한 지수가중 반복최소자승법(Recursive Least Square Method)을 적용하여 보정하였다. 이 방법은 절삭이 이루어지는 동안 온라인 측정 되어지는 새로운 측정치에

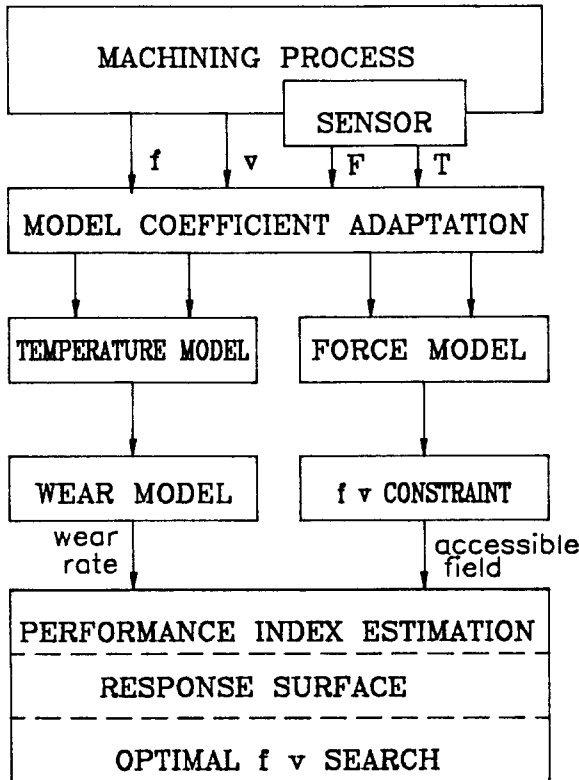


Fig. 2 Systematic diagram for decision of optimal cutting condition

가중치(Weight)를 주고 계수 보정을 반복해 나가는 방법이며(9, 11), 이 방법의 적용에 필요한 보정식 및 선형화된 입출력 변수들은 부록에 수록하였다.

앞서 설명한 바와 같이 실제 최적 가공조건은 주어진 절삭환경에 내재되어있는 제약조건 내에서 결정되어야 한다. 선삭가공에서 주어지는 제약조건은 대략 다음과 같이 간추려 질 수 있다.

- 기술적 제약 (Technical constraint) :

$$f_{min} < f_m < f_{max} \quad v_{min} < v_m < v_{max} \quad \dots\dots\dots(7)$$

- 절삭동력 제약 (Power constraint) :

$$f_p < \left(\frac{P_c}{k_d \cdot v^y} \right)^{\frac{1}{x}} \quad v_p < \left(\frac{P_c}{k_d \cdot f^x} \right)^{\frac{1}{y}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

- 절삭토크 제약 (Torque constraint) :

$$f_t < \left(\frac{2T_c}{k_d \cdot v^y \cdot D} \right)^{\frac{1}{x}} \quad v_t < \left(\frac{2T_c}{k_d \cdot f^x \cdot D} \right)^{\frac{1}{y}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

- 절삭력 제약 (Force constraint) :

$$f_f < \left(\frac{F_c}{k_d \cdot v^y} \right)^{\frac{1}{x}} \quad v_f < \left(\frac{F_c}{k_d \cdot f^x} \right)^{\frac{1}{y}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

여기서 V_t , V_f 는 보편화된 가공조건에서 충분히 크게 되므로 실제 고려에서 제외하였다. (9)

어느 순간에 주어진 절삭조건이 최적점(Optimal point)인가에 대한 판단은 성능지수(Performance index)로 표현되는 평가식을 통한 다른 절삭조건과의 비교에 의하며 이러한 비교가 적절히 이루어져야만 최적 가공조건이 추적 가능하다. 실제 최적 가공조건은 이루고자 하는 생산목표에 따라 다르게 나타날 수 있으며 그 각각에 대해서도 다른 성능지수가 도입되어야 함은 물론이다. 그 대표적인 세 경우를 고려하면 다음과 같다.

- 능률대비 최소비용 기준 (Minimum unit material removal cost) :

$$\frac{c_1 \left(t_m + t_c \frac{t_m}{T} \right) + c_2 \frac{t_m}{T}}{MRR} \quad \dots\dots\dots(11)$$

- 최소 생산비용 기준 (Minimum production cost)

$$c_1 \left(t_m + t_c \frac{t_m}{T} \right) + c_2 \frac{t_m}{T} \quad \dots\dots\dots(12)$$

- 최대 생산을 기준 (Maximum production rate) :

$$t_m + t_c \frac{t_m}{T} \quad \dots\dots\dots(13)$$

주어진 성능지수를 앞서 제시된 모델들과 입력 제어변수 f , v 에 대하여 평가하여 주어진 제약조건 내에 존재하는 극한치를 찾아가는 추적 알고리즘으로는 Step by step Method를 적용하였고, 또 이 방법의 취약점인 능선(Ridge)에서의 정체를 피하기 위하여 일단 Step by step에 의한 추적이 완료되면 대각선 방향으로 추적을 시도하는 방법인 Mugele's Method를 병행하였다.

4. 공구수명의 예측 및 공구파손의 실시간 진단

절삭중 공구의 과도한 마멸은 가공표면의 정도를 해치고 대부분의 경우 chatter를 유발시키므로 이에 앞선 공구의 적절한 교환이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 식(4)로부터 매 순간 평가되는 마멸율을 시스템 시각으로 적분하여 얻어지는 마멸량을 가지고 공구수명을 예측하였다.

가공중 공구의 파손은 마멸과는 달리 순간적으로 발생하며 절삭온도, 절삭력, 가공물 표면경도 등에 급격한 변화를 가져온다. 그러나 이러한 변동은 예상치 못한 절삭조건 변화에 의해서도 일어날 수 있으므로 이들의 감지로부터 공구의 파손 여부를 판단하기 위해서는 공구파손이외의 절삭 환경변화에 의한 측정치 변동성분을 배제할 수 있는 방법이 제시되어야 한다.

본 시스템은 온라인 측정되는 이송분력(Feed force)과 배분력(Radial force)으로부터 공구 부여유면(Minor flank face)에 작용하는 수직력 성분을 산출하여 공구파손 여부의 감지에 적용하였다. 공구동력계로부터 측정되는 이송분력과 배분력은 Fig.3에서 나타난 바와 같이 부여유면(Flank

face)과 부여유면에 작용하는 수직력 F_t, F'_t , 그리고 공구 윗면(Rake face)에서 칩(Chip)의 유동으로 인하여 발생하는 마찰저항력 F_s 의 합성된 결과이며, 이때 F_s 는 수평력 F'_s 과 수직력 F''_s 으로 분리될 수 있다. 칩유동(Chips flow)이 주 절삭날(Major cutting edge)과 수직방향으로 이루어지는 것으로 가정하고 공구형상을 고려하여 이송분력과 배분력 각각에 대한 합력을 구하면

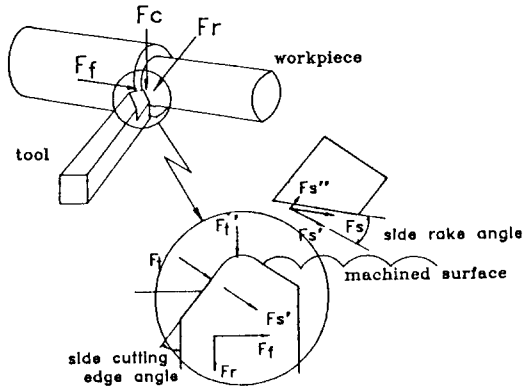


Fig. 3 Normal force on minor flank face flank

$$F_r = (F_t + F'_s) \cos(i) \dots\dots\dots (14)$$

$$F_t = (F_t + F'_s) \sin(i) + F'_t \dots\dots\dots (15)$$

으로 표현되며 식(14), 식(15)로부터 F'_s, F_t 를 소거하여 F'_t 에 대한 식으로 표현하면,

$$F'_t = F_r - F_r \tan(i) \dots\dots\dots (16)$$

로 나타난다. 여기서 노우즈(Nose)에 작용하는 수직력 F'_t 는 배분력과 이송분력 그리고 공구의 형상에 의해 주어지는 옆면 절삭날각(Side cutting edge angle) i 만으로 산출될 수 있음을 알 수 있다.

또 절삭날(Cutting edge)에 작용하는 수직력은 이송속도나 절삭깊이등의 절삭크기(Cutting size) 변화에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있고[6, 7], 공구의 마멸에 의해서는 점진적인 증가만이 나타나므로 식(16)으로부터 F'_t 의 급격한 변화의 감지는 공구파손에 대한 온라인 진단을 가능케 하는 것으로 기대할 수 있다.

5. 실험 및 결과 분석

5-1. 절삭온도 및 절삭력 측정

절삭온도의 측정은 Groover[12]가 제안한 방법으로 인서트 팁(Insert tip)의 바닥면에 설치된 두 개의 원격 표준열전대(Remote standard thermocouple)로부터 측정된 두점의 온도를 이용 팁 선단의 온도를 추정하는 방법을 적용하였다. 이 방법의 장점은 일반적으로 원격 열전대에서 존재하는 과도응답(Transient response) 지연의 단점을 보완하여 빠른 응답특성을 얻을 수 있고, Tool-work 열전대에 의한 측정에서 요구되는 피삭재와 사용공구의 매 조합에 대한 검정(Calibration)이 불필요하다는 데 있다. Fig.4에서 보여지는 인서트 팁에서 세점 P_0, P_1, P_2 에 대하여 에너지 평형식을 적용하고 간략화하면 P_0 점에서의 온도 T_e 는

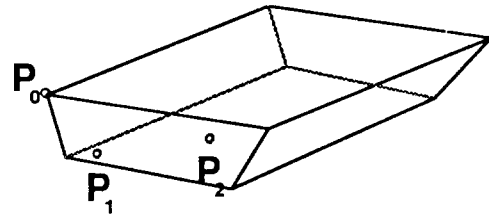


Fig. 4 Insert tip and temperature sensing

$$T_e = a T_1 + b \frac{dT_1}{dt} - c T_2 \dots\dots\dots (17)$$

로 쓰여지며, 여기서 계수 a, b, c 는 실험을 통하여 얻어지는 $T_1, T_2, dT_1/dt$ 에 대한 곡선과 Tool-Work 열전대로부터 입력되는 실제 팁 선단 온도 T_e 에 대한 정보를 가지고 최소자승법(Least Square Method)으로 구해진다.

실험결과 Fig.6에 나타난 바와 같이 실제 절삭 온도를 의미하는 Tool-Work 열전대의 출력전압은 절삭의 시작과 함께 높은 값을 유지하는 반면, 두개의 원격 표준열전대로부터의 출력은 절삭시간과 함께 증가되어 일정시간이 지난 후에야 정상상태(Steady state)에 도달함을 보여주는데

이를 토대로 얻어진 식(18)에 의한 공구선단온도 추정결과는 비교적 만족스러움을 알 수 있다.

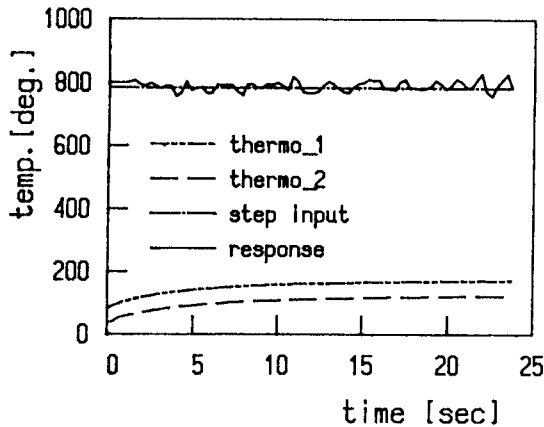


Fig.5 Estimation of tool tip temperature by remote thermocouple

$$T_e = 9.956 T_1 + 12.914 \frac{dT_1}{dt} - 7.523 T_2 \dots\dots(18)$$

절삭력과 절삭온도는 공구마멸등으로 인하여 절삭이 진행됨에 따라 변화될 수 있으나 일반적으로 안정된 가공에서는 급격한 변동이 없으므로 대략 공구마멸이 0.1(mm)정도 되었을 때의 값을 취하였다. 여러 절삭조건에서의 실험을 통하여 식(5), (6)의 계수 kd, x, y 와 η, p, q 를 산출하여 얻어진 절삭력과 절삭온도모델은 식(19), (20) 과 같다.

$$F_c = 243.30 f^{0.779} v^{-0.072} \dots\dots\dots(19)$$

$$T_e = 252.89 f^{0.148} v^{0.276} \dots\dots\dots(20)$$

5-2. 마멸 모델 계수의 결정

열 화학적 마멸현상은 절삭온도와 밀접한 관계를 갖으므로 절삭온도가 비교적 낮게 유지되는 가공조건에서 이에 의한 마멸은 작을 것으로 생각되며, 이때의 마멸은 순수 기계적 마멸에 의한다고 할 수 있다. 이를 고려하여 온도가 낮은 절삭조건에서의 실험치로부터 기계적 마멸계수 K_m

을 산출하고 열 화학적 마멸계수 K_t 는 고온절삭조건에서의 마멸량으로부터 앞서 산출된 K_m 을 이용한 기계적 마멸량을 뺀 값으로부터 구한다. 이 방법으로 얻어지는 K_m 과 K_t 의 경우 전자는 과대하게 후자는 과소평가 되는 경향이 있으므로 보다 좋은 결과를 얻기 위하여 구해진 K_t 를 고려한 K_m 을 다시 구하고 이로부터 다시 K_t 를 산출하는 과정을 1회 반복함으로써 그 편차를 개선하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- Mechanical wear coefficient : $K_m = 2.361 \times 10^{-4}$

- Thermo-chemical wear coefficient : $K_t = 2.267 \times 10^{13}$

Table 1은 마멸모델 식(3)의 평가에 필요한 자료이다.

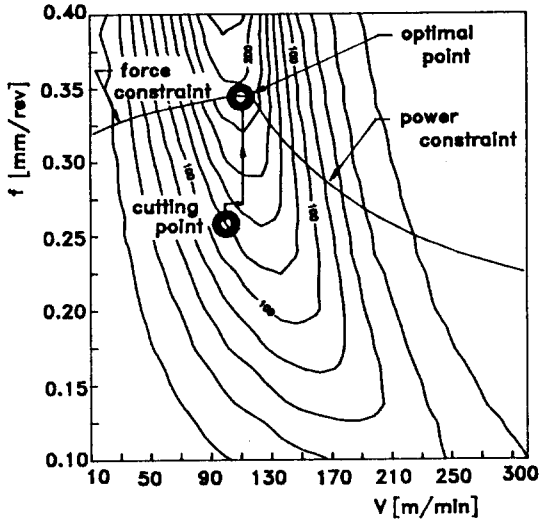
Table 1. Information related to wear model

Tool hardness at temperature T_0	$H_0 = 75.5$ (Rc)
Tool hardness at temperature T	$H_t = H_0 (T/T_0)^a$
Activation energy for tool tip	$Q = 84.5$ e3(kcal/mole)
Universal gas constant	$R = 1.973$ (kcal/mole ^o k)
Constant related to tool tip hardness	$a = -0.05$

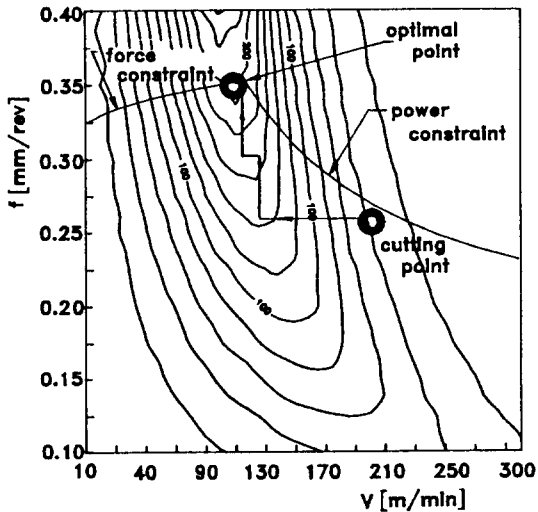
5-3. 최적 절삭조건외 추적 실험

실험은 각 절삭조건에서의 절삭시 추적되는 최적 가공조건이 어느 정도 일관성을 갖는지의 여부를 조사하고, 또 어느 한 조건에서 계속 절삭할 경우 공구마멸에 따른 절삭온도 및 절삭력 변화 등의 절삭환경 변화에 의한 영향 및 측정되는 신호의 요동(Fluctuation)에 따른 표류(Drift) 정도를 조사함으로써 시스템의 견고성(Robustness)을 알아보기 위하여 실행되었다. Fig. 6의 (a), (b), (c)는 주어진 동일한 성능지수에 대하여 각각 서로 다른 절삭조건에서 절삭할 때 나타나는 응답표면(Response surface)과 이에 따른 시스템의 최적 가공조건 추적 과정을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 어느 경우에도 추적된 가공조건은 별차이가 없었으며 주어진 절삭력 모델에 의하여 형성된 제한조건 또한 거의 일치하였

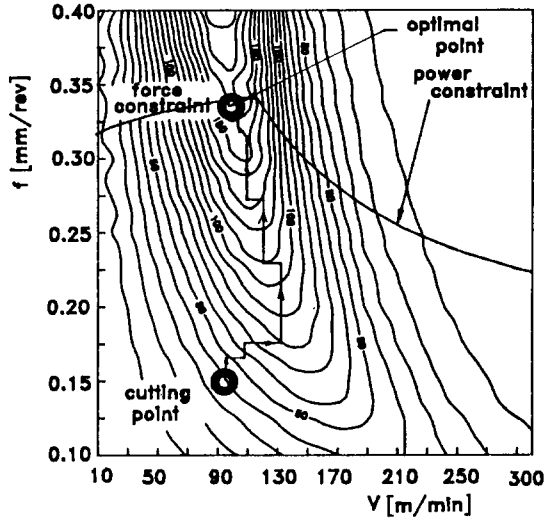
다. Fig.7은 앞서 주어진 어느 한 절삭조건에서 절삭시간의 경과에 따라 추적된 최적 가공조건의 변화 양상을 보여주는데 시간에 따른 변동도 매우 적음을 알 수 있다.



(a) $f = 0.26$ [mm/rev]
 $v = 100$ [m/min]

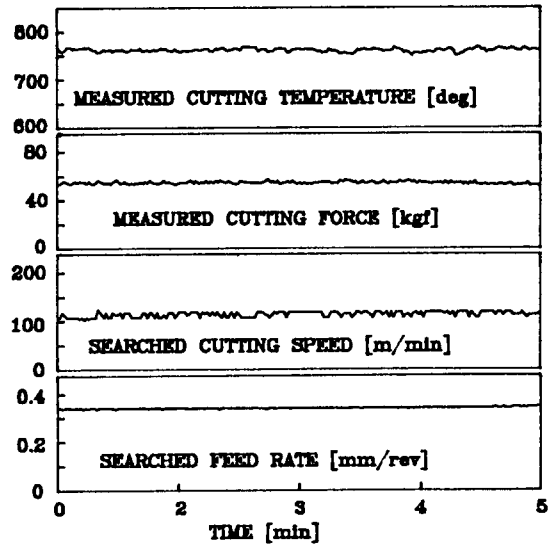


(b) $f = 0.26$ [mm/rev]
 $v = 200$ [m/min]



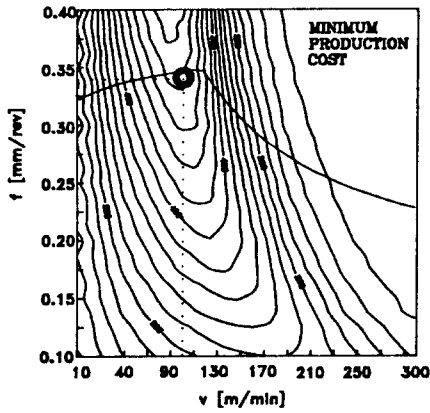
(c) $f = 0.15$ [mm/rev]
 $v = 100$ [m/min]

Fig. 6 Optimal cutting condition search at various cutting conditions

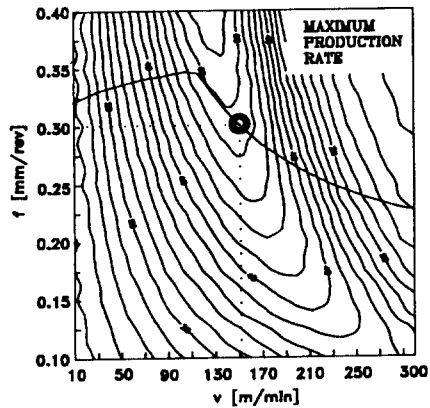


CUTTING CONDITION
FEED RATE = 0.26 [mm/rev]
CUTTING SPEED = 100 [m/min]

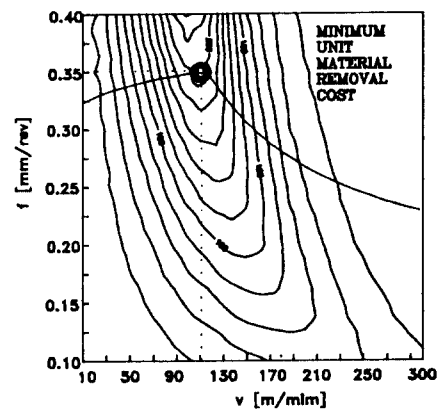
Fig. 7 Drift of optimal cutting condition



(a) Minimum production cost PI



(b) Maximum production rate PI



(c) Minimum unit material removal cost

Fig.8 Response surface for various PI

부가된 실험은 앞서 세 형태로 주어진 각각의 성능지수가 최적 절삭조건에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서 실행되었다. Fig.8의 (a), (b), (c)는 모두 같은 절삭조건에서 식(11), 식(12) 그리고 식(13)으로 주어지는 각각의 성능지수에 따라 나타난 응답표면과 추적된 최적 절삭조건이며, Table 2는 이때 적용된 성능지수의 평가를 위한 생산 및 기술자료이다.

Table 2. Production cost and time and technical information

Operator cost per time	$C_1 = 50(\text{won}/\text{min})$
Tool cost per edge	$C_2 = 1000(\text{won}/\text{edge})$
Tool changing time per edge	$t_c = 1.0(\text{min}/\text{edge})$
Material removal rate	$\text{MRR} = 1000f v d(\text{mm}/\text{min})$
Workpiece length	$D = 100(\text{mm})$
Workpiece diameter	$l = 200(\text{mm})$
Tool life criterion	$W_0 = 0.3(\text{mm})$
Power constraint	$P_c = 150(\text{kgf m}/\text{s})$
Torque constraint	$T_c = 5000(\text{kgf m})$
Force constraint	$F_c = 70(\text{kgf})$
Technical feed constraint	$f_{\text{max}} = 0.4(\text{mm}/\text{rev})$
Technical cutting speed constraint	$v_{\text{max}} = 300(\text{m}/\text{min})$

그림에서 나타난 바와 같이 최소 생산비용기준 성능지수에 의해서는 절삭속도가 가장 낮게 요구되어 공구의 수명증가를 기대하고 있으며 이와는 반대로 최대생산율기준 성능지수의 경우 높은 절삭속도를 취하여 공구의 수명 감소를 생산량의 증대로 보상하려는 경향을 보여준다. 또, 능률 대비 최소비용기준 성능지수의 적용시에는 그 사이에 해당되는 절삭조건을 추적하므로써 기존의 결과들과 일치됨을 알 수 있다. 특히 기존의 구속적용제어(ACC: Adaptive Control Constraint)가 추구하는 절삭조건은 이 경우 대략 능률대비 최대 생산율의 경우와 일치됨을 볼 수 있으므로 생산비용이나 생산율 측면에서 절삭조건이 고려될 경우에는 ACC의 방법이 적절하지 않음을 알 수 있다.

5-4. 공구수명 및 공구파손 진단 실험

Table 3은 몇몇 가공조건에서 절삭시간 10분에

Table 3. Comparison of measured and predicted wear for various cutting conditions

test	feed (mm/rev)	cutting speed (m/min)	measured wear (mm/min)	predicted wear (mm/min)
1	0.5	200	0.24	0.27
2	0.074	165	0.15	0.13
3	0.074	300	0.42	0.51
4	0.1	150	0.13	0.10
5	0.1	200	0.27	0.26
6	0.1	300	0.54	0.58
7	0.15	150	0.14	0.12
8	0.2	200	0.38	0.38
9	0.2	250	0.41	0.42
10	0.2	300	0.72	0.90
11	0.26	150	0.19	0.18
12	0.26	200	0.32	0.33

hard particle

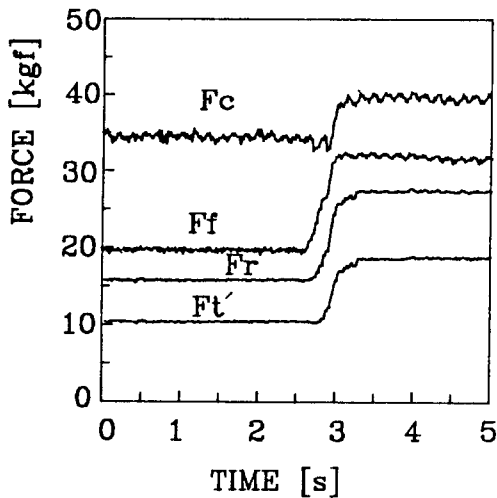
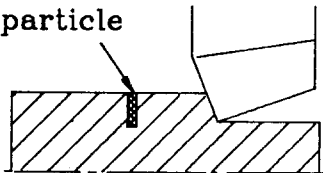


Fig. 9 Minor flank normal force for tool breakage

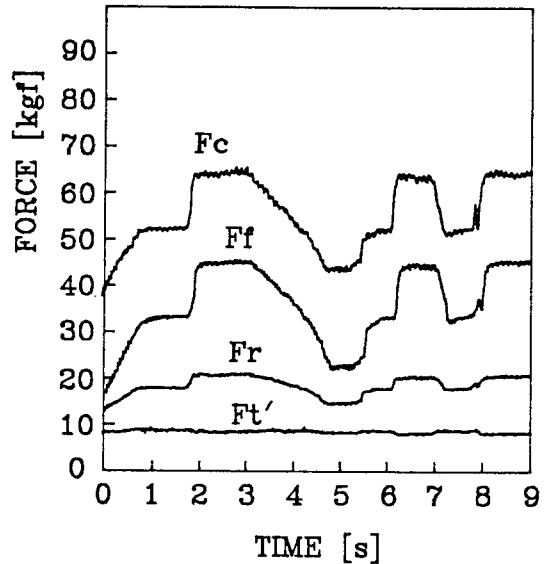
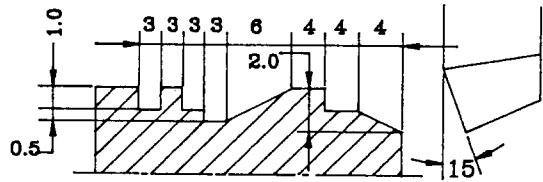


Fig. 10 Cutting force for stepped and tapered workpiece

대한 공구마멸의 예측치와 실제 측정치를 비교한 것으로 주어진 공구 피삭재 조합에 대해서는 식 (4)로 주어지는 마멸정보가 유용함을 알 수 있다.

공구파손 진단을 위한 실험은 식(16)으로 산출되는 F'_t 이 공구파손(Breakage)의 경우와 절삭조건이 급격히 바뀐 경우 어떻게 나타나는지를 조사하고 이를 바탕으로 공구파손의 진단 가능 여부를 확인하기 위해 실행되었다. 공구파손에 대한 절삭력을 얻기 위해 가공물에 직경 1.0(m)의 작은 구멍에 매우 단단한 입자를 삽입하여 가공도중 공구가 파손되도록 하였으며, Fig.9는 이때 측정된 세 분력과 식(16)에 의한 F'_t 의 변화를 나타낸 것이다.

절삭조건의 급속한 변화에 대한 절삭력의 측정
은 단이 지고 테이퍼가 있는 가공물(Stepped
and tapered workpiece)을 한번에 같은 지름으로
가공하여 절삭깊이의 변화를 유도하여 실험하였
다. Fig.10은 이에 대한 실험결과이며 이 경우
F_z'의 변화를 보면 단이 진 부분에서는 절삭깊이
의 급격한 증대에도 불구하고 오히려 약간 감소
되는 경향을 보였고 절삭깊이가 점진적으로 증가
되는 부분에서도 특별한 증대가 발견되지 않아
그 결과가 만족스러움을 보여주고 있다. 또, 절
삭조건의 변화요소로서 이송속도의 변화를 고려
할 수 있으나 일반적으로 가공표면의 균질성등의
요구에 의해 가공중 어느 한 가공면에 대한 이
송의 변화는 주지 않으므로 고려에서 제외하였다.

6. 결 론

공장 자동화의 한 요소로서 기계가공의 최적화
를 이루기 위한 방안으로 본 연구에서 제안된
가이드 시스템의 효용성을 실험결과를 토대로 요
약하면 다음과 같다.

1. 기계적 마멸과 열 화학적 마멸의 합 의 형
태로 제시된 공구마멸 모델은 절삭조건 및 측정
변수의 변화에 좋은 응답특성을 보여 주었으며
이로서 신뢰할 만한 최적 절삭조건의 추적을 가
능케 하였다.
2. 절삭온도 및 절삭력의 예측을 위해 도입
된 모델은 각 계수의 적응 보정에 의해 유용한
값의 추정을 가능하도록 하였으며 시스템의 견고
성(Robustness)에 기여하였다.
3. 두 원격 열전대(Remote thermocouple)에
의한 절삭온도의 측정방법은 유용하였고, 그 편
차는 최적 가공조건의 결정에 별 영향을 주지
않았으며 특히 실용적인 측면에서 우수하였다.
4. 공구 부 여유면(Minor flank face)에 작용
하는 수직력의 측정을 통한 공구 파손의 감지방
법은 절삭깊이의 변화와는 무관하게 파손여부의
판단을 가능케 하였다.
5. 구성된 시스템에 의해서 얻어지는 가공정

보는 비숙련 기능인과 파트 프로그래머(Part pro
grammer)에게 유용한 정보를 제공할 수 있을
것으로 기대된다.

부록 : 지수가중 최소자승법에 의한 모델 계수의 보
정

일반적으로 모델이

$$Y(k) = a_0(k) + a_1(k) x_1(k) + a_2(k) x_2(k) + \dots$$

$$= [A(k)]^T [X(k)] \dots \dots \dots (A)$$

여기서 Y(k) = k번째 추정치
x_i(k) = k번째 입력변수
a_i(k) = k번째 모델계수

로 주어졌을 때 RLS방법에 의한 계수의 보정식은

$$[A(k+1)] = [A(k)] + [G(k+1)]$$

$$\{ [Y(k+1)] - [A(k)]^T [X(k+1)] \} \dots \dots \dots (B)$$

여기서

$$[G(k+1)] = \frac{[P(k+1)] [X(k+1)]}{g + [X(k+1)]^T [P(k)] [X(k+1)]}$$

$$\dots \dots \dots (C)$$

여기서

$$[P(k+1)] = \frac{1}{g}$$

$$\left\{ [P(k)] - \frac{[P(k)] [X(k+1)] [X(k+1)]^T [P(k)]}{g + [X(k+1)]^T [P(k)] [X(k+1)]} \right\}$$

$$\dots \dots \dots (D)$$

로 쓰여진다.

RLS방법에 의한 계수 보정은 추정계수 벡터[A]
에 대한 초기치가 필요하며 이 값은 전형적인
몇몇 입력변수[X]에 대한 실험치로부터 미리 구
해져야 한다. 또한 이득 매트릭스(Gain matrix)
[P]는 일반적으로 초기에 [P(0)] = δ [1]의 형태
로 주어지는데 여기서 δ는 0보다 큰 스칼라(Sc
alar)값이다. 실제 RLS 알고리즘에서 [A]와 [P]

에 대한 초기치의 선정은 크게 중요하지 않으며
가중지수 g 의 선정이 더 중요하다. 표준 RLS에
서는 $g=1$ 로 두는데 일반적으로 $0 < g < 1$ 인 경우
지수적(Exponentially)으로 가중되며 공정입력 변
수가 어느정도 일관성을 갖으면 추정오차

$$e(k) = y(k) - [a(k)]^T [x(k)] \dots\dots\dots(E)$$

는 0으로 수렴하는 것으로 알려져 있다.

이 방법의 적용을 위해 앞 절에서 설정한 절차은
도 모델을 선형화하면, 측정변수(Measured var-
iable) $Y(k)$ 는

$$Y_T(k) = \ln(T(k)) \dots\dots\dots(F)$$

로 되며 입력변수 벡터(Input variable vector)
 $[X_i(k)]$ 는

$$[X_T(k)] = [1 \ln(f(k)) \ln(v(k))]^T \dots\dots(G)$$

로 주어지고 추정계수 벡터(Estimated coefficient
vector) $[A(k)]$ 는

$$[A_T(k)] = [\ln(\eta(k)) \ p(k) \ q(k)]^T \dots\dots\dots(H)$$

로 나타나므로, 이 식들을 식(20)에 적용하여 매 측
정때마다 η, p, q 를 보정할 수 있다.

參 考 文 獻

1. H. Takeyama and R. Murata
"Basic Investigation of Tool Wear"
ASME, J. of Eng. for Industry Feb. 1963 p. 33
2. C. Rubenstein
"An Analysis of Tool Life Based on
Flank-Face Wear Part I : Theory
ASME, J. of Eng. for Industry Feb. 1976
p. 221-227
3. C. Rubenstein
"An Analysis of Tool Life Based on
Flank-Face Wear Part II : Comparison of
Theory with Experimental Obser- bations"

- ASME, J. of Eng. for Industry Feb. 1976
p. 227-232
4. E. Kannatey-Asibu, Jr.
"A Transport-Diffusion Equation in Metal
Cutting and its Application to Analysis of
the Rate of Flank Wear"
ASME, J. of Eng. for Industry Feb. 1985
Vol. 107 p. 81
5. E. Usui, T. Shirakashi and T. Kitagawa
"Analytical Prediction of Cutting Tool
Wear"
WEAR 1984 Vol. 100 p. 129
6. G. Boothroyd, J. M. Eagle and A. W. J.
Chishonlm
"Effect of Tool Flank Wear on the
Temperatures for Generated During Metal
Cutting"
Int. J. Mach. Tool Des. Res. 8th Conference
Sep. 1987 p. 195
7. A. Bhattacharyya and I. Han
"Analysis of Tool Wear Part I : Theoretic
cal Model of Flank Wear"
ASME, J. of Eng. for Industry Aug. 1969
p. 720
8. P. K. Venuvinod, W. S. Lau and C. Rubenstein
"The Rules of Discrete Contact on the
Flank Wear Land in Determining Cutting
Tool Temperature in Othogonal Cutting"
Int. J. Mach. Tool Des. Res. 1983 Vol. 23 N. 4
p. 245
9. Y. Koren, A. G. Ulsoy and K. Danai
"Tool Wear and Breakage Detection Using
a Process Model"
Annals of the CIRP Vol. 35/1/1986 p. 283
10. J. G. Chow and P. K. Wright
"On-line Estimation of Tool/Chip Interface
Temperature a for Turning Operation"
ASME, J. of Eng. for Industry Feb. 1988 p. 56
11. Ljung, L. and Soderstrom, T.

- "Theory and Practice of Recursive Identification"
MIT Press, Cambridge, Massachusette, 1983.
12. M. P. Groover and G. E. Kane
"A Continuing study in the Determination of Temperature in Metal Cutting Using Remote Thermocouples"
ASME, J. of Eng. for Industry May 1971
p. 603
13. Min-Shong Lan and Yangve Naerheim
"In-Process Detection of Tool Breakage in Milling"
ASME, J. of Eng. for Industry Aug. 1986
Vol. 108 p. 191
14. R. Bedini, G. G. Lisini and P. C. Pinotti
"Experiments on Adaptive Control of a Milling Machine"
ASME, J. of Eng. for Industry Feb. 1976
p. 239