

<論 文>

시계열 분석 방법에 의한 절삭공구의 마멸에 관한 연구

김 광 준* · 황 흥 연**

(1984년 4월 24일 접수)

A Study on the Cutting Tool Wear by Time Series Approach

Kwang Joon Kim and Hong Yun Hwang

Abstract

A new indirect tool wear sensing technique is proposed using time series analysis. The acceleration measured on the tool post in the vertical direction during turning is sampled with uniform interval, and fitted following the ARMA modeling procedures.

Various signal characteristics are observed in respect with the progress of flank wear. From those observations it is believed that;

- The variance of the signal is approximately proportional to the increase of flank wear
- The absolute power of a dynamic mode decreases in the beginng of cutting until the maximum flank wear increases up to 0.4~0.5mm, and then increases.
- The other characteristics are not so much related to the tool wear as the signal variance and the absolute power of a dynamic mode.

Hence, the absolute power of a dynamic mode seems to be a good factor for the indication of tool-change time regardless of tool material or cutting conditions.

1. 서 론

공작기계에 의한 절삭작업중 적절한 시기에 있어서의 공구교환은 양질의 절삭표면 상태를 유지함과 동시에 절삭조건의 최적화 및 공작기계구조물의 보호를 위해서 필수적이다. 일반적으로 같은 형태의 가공이 한 종류의 공구로 다량 수행되는 경우(mass production)에는 경험 및 시행착오(trial and error) 방법을 통하여 공구교환에 적합한 시간을 결정할 수 있다. 그러나

수치제어 공작기계 혹은 머시닝센터(machining center)를 주로 사용하는 다품종 소량 생산 작업에서 공구의 교환시기를 경험에 의해서 시행착오적으로 결정하는 것은 생산원가를 매우 크게 증가시키기 때문에 결코 바람직하지 못하다.

근래에 강조되고 있는 기계가공형태인 FMS(Flexible Manufacturing System)의 핵심요소라 할 수 있는 수치제어 공작기계를 보다 효과적으로 사용하기 위해서는 공구의 마멸을 온라인(on-line)으로 절삭중에 감지함으로써 적절한 시기에 공구를 교환할 수 있어야 한다. 절삭작업을 중단하지 않고 공구의 마멸을 직접 측정하는 것은 거의 불가능하기 때문에, 여러가지 간접적인 방법들이 제안되었으나 아직까지 실험실단계에 불

* 정희원, 한국과학기술원 생산공학과

** 한국과학기술원 생산공학과

과하다.

본 연구에서는 그러한 간접적인 방법의 하나로써 공구대로부터 가속도신호를 절삭시간의 경과에 따라 측정 한 후, 시계열자료를 모델화하는 전산프로그램을 사용하여 적합한 모델을 구하고 그로부터 유도되는 여러 특성들을 관찰함으로써 보다 현실적인 방법론을 제시 하고자 하였다.

2. 작업조건하에서의 공구마멸 감지

최근에 들어 컴퓨터기술의 발전에 힘입어 적응 제어 이론이 적용되면서 절삭과정의 최적화, 자동화가 점차적으로 이루어지고 있다. 이러한 최적화, 자동화를 위해서 가장 중요하면서도 아직까지 뚜렷한 해결책이 없는 것이 공구교환의 적합한 시기를 결정하는 것인데, 그러기 위해서는 절삭을 중단시킴이 없이 공구의 마멸 상태를 감지할 수 있어야 한다.

일반적으로 절삭중 발생하는 공구의 마멸을 감지하는 방법은 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 구분되는데, 직접적인 방법에서는

- 광학 센서
- 전기저항 센서
- 방사성원소를 이용한 센서
- 공기압 센서

등을 이용하여 마멸면을 직접 관찰하거나, 마멸량을 직접 측정하며, 간접적인 방법에서는

- 절삭력
- 진동
- 절삭면의 거칠기
- 온도
- 모우터속에서의 전류
- Acoustic Emission

등을 측정하여 실제 마멸길이의 진전상태와 관련시킴으로써 간접적으로 마멸길이를 추정한다⁽¹⁾. 이 중에서 직접적인 방법은, 측정의 정확성을 기할수는 있으나, 실험장치가 복잡하고 비용이 많이들기 때문에, 아직까지 실용화된 방법이 거의없는 상태이다.

간접적인 방법중에서도 측정이 비교적 용이한 것으로서는 절삭력, 진동상태, AE(Acoustic Emission) 신호 등을 들 수 있는데, 현재 이들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Micheletti⁽²⁾는 스트레인 게이지를 이용한 공구동력계를 사용하여 세 축 방향으로의 정적인 절삭력을 측정 한 후 공구마멸과의 상관관계를 구했고, Lindstrom⁽³⁾ 등은 삽입식 공구의 인서트 밑에 인

서트 크기의 압전판(piezoplate)을 설치하여 수직방향으로의 동절삭력을 측정하고 주파수 영역에서 해석하였다.

Weller 등⁽⁴⁾은 공구대에 부착시킨 가속도계로부터 측정된 신호를 필터(signal filter)를 사용하여 고주파(4~8KHz)와 저주파(0~4KHz)로 양분한 후 그 세기 비의 변화와 공구의 마멸상태를 관련시켰다. 즉 고주파의 저주파에 대한 상대적인 세기가 공구의 마멸진전에 따라 어느 시점에서 급격히 증가하는 것으로 밝히고 있다. 한편 Shumsheruddin 등⁽⁵⁾은 밀링작업중 가속도계를 공구대에 부착시키고 그로부터 측정된 수평 방향의 가속도 신호를 주파수 영역(6KHz 까지)에서 해석함으로써 공구의 마멸과 더불어 가속도 신호의 스펙트럼(spectrum) 진폭이 증가함을 보이고 있다.

Moriwaki 등^(6,7,8)은 절삭중 AE(Acoustic Emission) 신호를 측정하여 해석함으로써 공구의 마멸 및 파손을 감지할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 즉 AE 신호를 주파수영역에서 관찰함(500KHz 까지)으로써 공구마멸 증가와 함께 스펙트럼이 증가함을 보이고 있으며⁽⁶⁾, 공구의 파손시에는 파손면적에 비해하는 크기의 AE 신호가 절삭속도에 큰 관련없이 검출된다고 밝히고 있다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 측정의 용이성을 고려하여 선삭작업중에 공구대로부터 가속도를 측정하였으며, 그 자료들을 시계열 모델화하고 모델로부터 산출되는 여러가지 특성매개변수를 절삭시간의 경과에 따라 세밀히 관찰함으로써 공구의 마멸을 보다 쉽게 감지할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다^(9,10,11,12).

3. 시계열 모델화 방법론 및 그에 의한 신호특성

3.1. ARMA 모델화 방법론

한 필의 시계열 자료가 주어졌을 때 그 자료의 특성 해석이나 예측을 위해서는 수학적인 모델을 필요로 한다. 주어진 시계열 자료를 $X_t, t=1, 2, \dots, N$ (N : 자료의 개수)라 할때 backshift operator $B(B^k X_t = X_{t-k})$ 를 사용하여 시계열 모델을 세우는 대표적인 방법은 다음과 같다.

첫째,

$$\Phi(B)X_t = a_t \tag{1}$$

$$\Phi(B) = 1 - \sum_{i=1}^n \phi_i B^i$$

a_t : White noise

$$E[a_t a_{t-k}] = \delta_k \sigma_a^2$$

δ_k : Kronecker delta

E : Expectation

$\phi_i, i=1, 2, \dots, n$: Autoregressive parameter

둘째,

$$X_t = \theta(B)a_t \tag{2}$$

$$\theta(B) = 1 - \sum_{i=1}^n \theta_i B^i$$

$\theta_i, i=1, 2, \dots, m$: Moving average parameter

셋째,

$$\Phi(B)X_t = \theta(B)a_t \tag{3}$$

이상의 세가지 모델을 각각 Autoregressive(AR) 모델, Moving Average (MA) 모델, Autoergressive Moving Average (ARMA) 모델이라 하며, AR(n), MA(m), ARMA(n, m)으로 나타낸다. 각 모델의 매개변수를 구하는 근본적인 방법론은 white noise로 가정한 a_t 의 자승의 합 즉, $\sum_{i=1}^n a_i^2$ 을 최소화시키는 것인데, 그렇게 하기 위해서 식 (1)의 AR 모델에는 선형 최소 자승법(linear least squares method)을 적용시킬 수 있고 식 (2)와 (3)의 경우에는 a_t 가 매개변수들의 선형 함수로 일반적으로 표시될 수 없기 때문에 비선형 최소 자승법(nonlinear least squares method)을 적용시켜야 한다. 같은 수의 매개 변수를 사용해야 한다면 (1), (3), (2)의 순서로 계산 시간과 함께 어려운 정도가 증가하겠지만 정확성의 면에서 본다면, 즉 $\sum a_i^2$ 을 가장 극소화 할 수 있는 면에서 본다면, 주어진 자료에 대한 아무런 사전 지식이 없다는 조건하에서 어느 모델이 가장 바람직하다고 결론을 내릴 수는 없다. 근래에 들어서는 비선형 최소 자승법과 전산속도의 발전에 힘입어 AR 부분과 MA 부분 찾수에 대한 임의조정이 가능한 세번째 식의 ARMA 모델이 일반적인 것으로 사용되고 있다.

ARMA 모델을 세우기 위해 사용되는 비선형최소자승법은 각 매개변수의 초기치를 필요로 하는데 Box와 Jenkins⁽¹³⁾는 주어진 자료로부터

$$r_k = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^N x_i x_{i-k} \tag{4}$$

로 계산되는 자기상관계수(autocorrelation)와 그로부터 파생되는 편자기 상관계수(partial autocorrelation)의 time lag k 에 대한 형상으로부터 모델의 차수를 결정하고 매개변수의 초기치를 계산한다. 그러나 Wu와 Pandit⁽¹¹⁾는 식 (4)에 의해 계산되는 자기 상관계수가 이론적인 값인 $E[x_t x_{t-k}]$ 를 항상 잘 대표하지는 못한다는 이유를 내세워 다른 방법을 택하고 있다. 그는 역함수(inverse function)를 이용한 ARMA 모델의 매개 변수에 대한 초기치 계산 방법을 제안하고 있는데,

한 벌의 시계열 자료 X_t 에 대한 역함수는 다음과 같이 정의된다⁽¹¹⁾.

$$I(B)X_t = a_t \tag{5}$$

$$I(B) = 1 - I_1 B - I_2 B^2 - I_3 B^3 \dots$$

식 (3)으로 표시되는 ARMA(n, m) 모델의 초기치는 식 (5)를 식 (3)에 대입하여 나오는 다음식

$$\Phi(B)X_t = \theta(B)a_t = \theta(B)I(B)X_t, \tag{6}$$

$$\Phi(B) = \theta(B)I(B)$$

으로부터 계산할 수 있다. 즉, 다음식 (7)의

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_n B^n) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_m B^m) \times (1 - I_1 B - I_2 B^2 - I_3 B^3 - \dots) \tag{7}$$

양변에 있는 $B^i, i=1, 2, \dots$,의 계수를 비교함으로써 $\phi_i, i=1, 2, \dots, n, \theta_j, j=1, 2, \dots, m$,을 구할 수 있다. 식 (5)로 정의된 역함수는 무한 차수의 AR 모델이지만 식 (7)을 이용하여 ϕ_i, θ_j 의 초기치는 근사적으로 AR(p) $p \geq n+m$ 모델로부터 구할 수 있다.

ARMA 모델을 만드는데 아직까지 많이 알려져 있는 것은 Box & Jenkins에 의한 것으로 그 절차는 다음과 같다.

- (i) 자기 상관 계수와 편자기 상관계수를 자료로부터 계산하여 모델의 차수 및 매개변수의 초기치 결정
- (ii) 비선형 최소 자승법을 이용한 매개변수 값들의 산출
- (iii) 산출된 모델의 적합성 판정 및 부적합시 모델의 수정

한편 Wu와 Pandit에 의한 ARMA 모델화 과정은 다음과 같다^(11,12).

- (i) 가정된 차수의 ARMA 모델에 대하여 역함수를 이용한 매개변수 초기치의 계산
- (ii) 비선형 최소 자승법을 이용한 매개변수 값들의 산출
- (iii) 산출된 모형의 적합성 판정 및
- (iv) 부적합시 모델의 차수를 증가시켜 가면서 (i), (ii), (iii)의 절차 반복

두 방법론의 큰 차이점은 적합한 차수의 결정과 주어진 차수의 모델의 초기치 계산이다. 차수가 낮을 경우에는 식 (4)에 의해 이론적인 자기상관 관계를 어느 정도 근사적으로 구할수 있기 때문에, Box와 Jenkins 방법이 적용되어도 좋지만, 대부분의 복잡한 경우 특히 공학적인 자료, 예를 들어 공작기계의 절삭 과정에서 나온 진동 신호를 일정한 간격으로 끊어 입을 경우 등에는 식 (4)에 의해 이론적인 자기 상관 계수를 근

Flow chart of ARMA modeling program

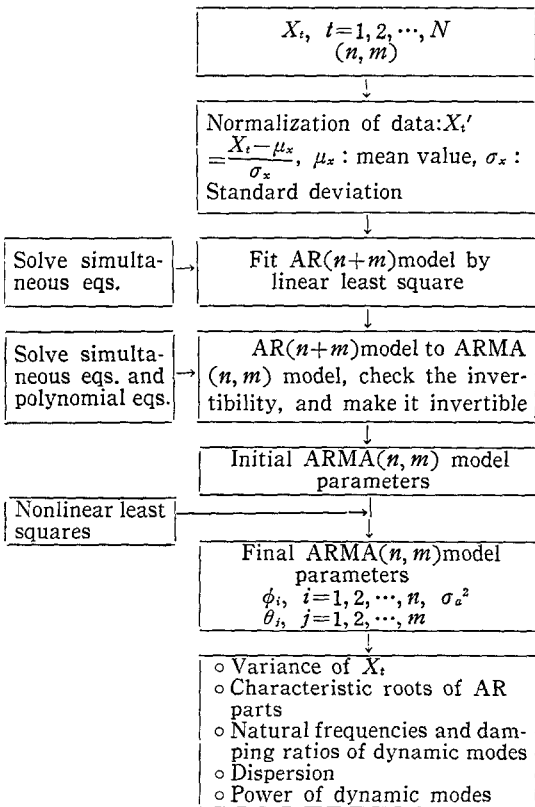


Fig. 1 Flow chart of ARMA(n, m) modeling program

사적으로 구하기 어렵다. 그러므로 식 (4)에 의존해서 모델의 차수와 매개 변수의 초기치를 구하는 것은 바람직 하지 않거나 부적합한 모델로 판정될 경우 수정을 하는 방법론이 조직적이지 못하다. Wu와 Pandit의 ARMA 모델화 과정은 낮은 차수의 모델로부터 높은 차수의 모델로의 반복 방법을 사용하기 때문에⁽¹¹⁾ 적합한 모델의 결정에 계산시간이 어느정도 더 걸릴지 모르나, 식 (4)로 정의된 자기 상관 계수에 크게 의존하지 않는다는 점과 부적합시에는 모델의 차수를 증가 시킴으로써 원하는 만큼의 정확한 모델을 얻을 수 있다는 면에서 상당히 방법론이 조직적이라 할 수 있다.

Wu와 Pandit에 의한 ARMA 모델화를 위한 전산 프로그램의 흐름도가 Fig. 1에 보여진다.

3.2. ARMA 모델에 의한 신호특성

랜덤(random) 한 신호의 대표적인 통계적 성질은 1차 모멘트인 평균치와 2차 모멘트인 분산으로서, 이중 평균치는 많은 경우에 0으로 간주해도 무방하다.

분산은 측정된 자료로부터 직접 식 (4)에 의해 구해질 수 있지만 측정된 신호가 스토캐스틱 프로세스(stochastic process)일 때에는 통계적인 오차문제가 발생하게 된다.

전절에서 설명한 Wu와 Pandit의 방법에 따라 일단 적합한 ARMA 모델이 얻어지면 그 모델로부터 이론적인 분산값 뿐만 아니라 여러가지 동적 특성을 얻을 수 있다. 식 (3)의 AR부분을 다음과 같이 바꾸어 쓸 경우,

$$\Phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_n B^n \quad (8)$$

$$= \prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i B)$$

특성해 λ_i 가 복소수라면 그에 해당하는 특성 주파수는

$$\omega_i = \frac{1}{\Delta} \left\{ \frac{[I_n(\lambda_i \lambda_i^*)]^2}{4} + \left[\cos^{-1} \frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2(\lambda_i \lambda_i^*)^{1/2}} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

(rad/sec)

Δ : Sampling interval(sec)

로 주어지고 감쇠율 ζ_i 는 다음식에 의해 주어진다.

$$\zeta_i = \left\{ \frac{[I_n(\lambda_i \lambda_i^*)]^2}{[I_n(\lambda_i \lambda_i^*)]^2 + 4 \left[\cos^{-1} \frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2(\lambda_i \lambda_i^*)^{1/2}} \right]^2} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

또한 ARMA 모델로부터 얻어지는 이론적인 분산 γ_0 는 식 (4)에 의한 분산과는 구분되며,

$$\gamma_0 = \sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{g_i g_j}{1 - \lambda_i \lambda_j} \sigma_a^2, \quad (11)$$

$$d_i = \sum_{j=1}^m \frac{g_i g_j}{1 - \lambda_i \lambda_j} \sigma_a^2, \quad (12)$$

로 나타내진다. 식 (12)의 d_i 는 i 번째 모우드의 세기를 나타내며, 또한 g_i 는 다음과 같이 주어진다.

$$g_i = \frac{\Theta(B)}{\prod_{k=1}^n (1 - \lambda_k B)} \Big|_{B=\lambda_i^{-1}} \quad (13)$$

식 (11)에서 d_i/γ_0 는 한 모우드가 전체 모우드에 대하여 가지는 상대적인 세기(relative power)를 의미하며 dispersion이라 불리운다. 따라서 임의의 모우드의 dispersion과 그 신호의 이론적인 분산을 알 경우 그 모우드의 절대적인 세기(absolute power)는 γ_0 와 dispersion의 곱으로 계산될 수 있다.

$$\text{즉 } AP_i = \gamma_0 \times \left(\frac{d_i}{\gamma_0} \right) \quad (14)$$

식 (11)로 주어지는 분산 (variance)을 푸리에 변환하면 측정된 신호의 이론적인 스펙트럼이 다음 식으로 표시될 수 있음을 알 수 있다.

$$S(f) = \frac{\sigma_a^2 \Delta}{2\pi} \cdot \frac{|\Theta(B)|^2}{|\Phi(B)|^2} \Big|_{B=e^{-j2\pi f \Delta}} \quad (15)$$

종합적으로 요약하면, 일단 적합한 ARMA 모델이 얻어질 경우에 그로부터

- 이론적인 분산 γ_0
- 동적 모드드의 특성주파수 및 감쇠율
- Dispersion
- Absolute power

등이 자동적으로 산출될 수 있다.

4. 마멸실험 및 측정신호 해석

4.1. 실험조건 및 장치

(1) 가속도계의 부착위치 및 방향

절삭시 공구의 진동을 가장 예민하게 측정할 수 있는 곳은 공구의 선단주위로 판단 되었으나, Fig. 2에 보인 바와 같이 캐터발생을 방지할 목적으로 공구의 오우버행(over hang) 길이를 가능한 한 줄였기 때문에 가속도계를 부착시키기가 어려워 공구대 위로부터 가속도를 측정하였다.

공구의 마멸과 관련된 진동방향은 수직방향으로 알려져있고, 실제 여러절삭 조건에서 수직·수평 두방향으로 가속도를 측정한 결과 수직방향의 진동이 상대적으로 매우 컸기 때문에 본 연구에서는 수직방향의 가속도를 측정하였다. 이때 사용된 가속도계(BBN 508 B)는 압전식으로서 2~30,000Hz의 주파수 범위를 가지고 있다.

(2) 절삭조건

본 연구에 사용된 선반(Lodge & Hipley Co.)은 무단변속이 가능하기 때문에, 절삭의 진행으로 시편의 직경이 바뀔때 따라 분당회전수 (rpm)를 조절하여 절삭속도를 일정하게 유지하였다. 시편은 일반 기계구조용 탄소강재(KS 기호 SM, JIS S45C에 상당)로서 크기

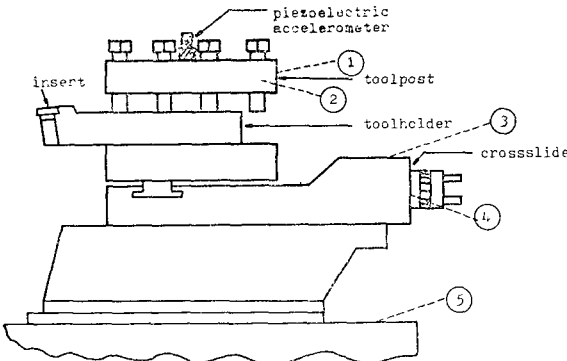


Fig. 2 Position of accelerometer

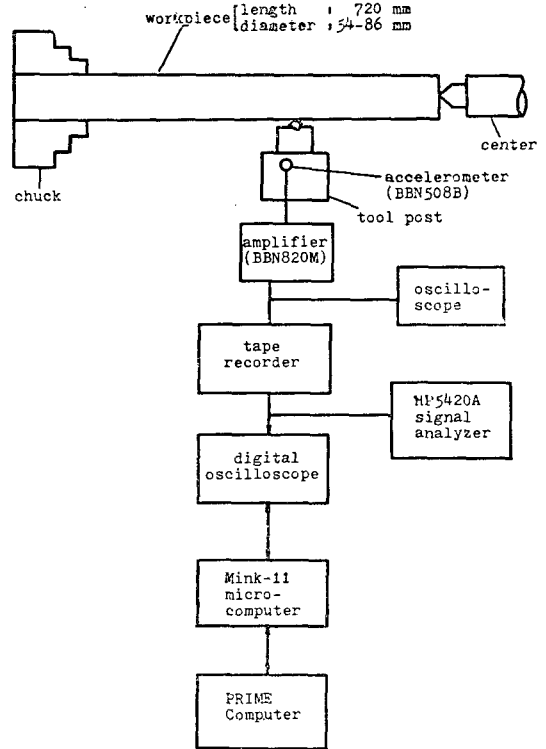


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

는 Fig. 3의 실험장치 개략도에 보여진다. 공구의 마멸과 관련이 있는 주파수범위는 매우 높아서 동작기계 전체구조물의 고유 진동수와 크게 관련이 없지만 구조물의 취약성에서 비롯되는 캐터방지를 위하여 시편의 직경이 비교적 큰 것을 택하였다.

절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 등의 결정에 있어서는 여러번의 기초실험을 토대로 Table 1에 보인 바와 같이 정하여 안정절삭이 되도록 하였다. 사용된 공구는 삽입식(대한중석제품 : PSBNR/L)으로서 4각인서트이며 절입각은 75°이다. 인서트의 재료는 텅스텐카바이드(대한중석 제품 : KTP20, ISO 규격 P20에 상당)이고, 공구의 공칭 여유각은 7°이며 노우즈반경(nose radius)은 0.8mm이다.

Table 1 Cutting conditions

	Cutting speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)
Condition 1	90	0.3	1.0
Condition 2	180	0.3	1.0
Condition 3	180	0.2	1.0

(3) 플랭크 마멸 길이의 측정

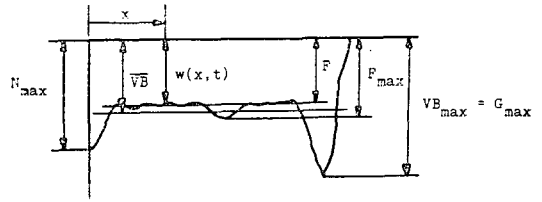
플랭크면의 전형적인 마멸형상은 Fig. 4 와 같으며, 마멸정도를 측정하는 기준은 여러가지가 있으나, 본 연구에서는 기초실험결과 \overline{VB} 와 VB_{max} 이 비교적 안정된 것으로 판단되어 \overline{VB} 와 VB_{max} 을 공구마멸척도로 삼았다.

Fig. 5 에서는 절삭속도 3m/sec, 이송속도 0.2mm/rev, 절삭깊이 1mm의 조건에서 세번 반복 실험하여 측정된 \overline{VB} 곡선과 VB_{max} 곡선을 보여준다. 마멸기구 자체가 랜덤 프로세스(random process)로서 어느 정도의 분산이 있게 마멸이라는 점과 특히 마멸의 초기단계에서 분산이 일반적으로 큰 영향이 있다는 점을 고려할 때 Fig.5의 플랭크 마멸곡선은 비교적 안정성 있음을 보여준다. Fig.6은 절삭조건 2에서 절삭이 시작된 후 7분, 26분, 57분이 경과한 후의 플랭크 마멸형상을 공구현미경(Gaertner, X50)을 사용하여 관찰한 것이다.

(4) 진동신호의 측정 및 신호처리

진동신호는 이송이 시작된 얼마 후 약 30초동안 기록하였으며 한번의 이송이 끝날때마다 인서트를 빼내어 공구현미경으로 마멸길이를 측정하였다.

Fig.3에 나타낸 바와 같이 공구대로부터 측정된 가속도는 증폭기를 거쳐 테이프 레코더에 저장하였다가 디지털 신호분석기를 통하여 분석하는 한편, 디지털 오실로스코프(Nicolet Model 206)를 사용하여 샘플링한 후 컴퓨터에 보내어서 시계열 모델 프로그램으로 분



- $VB_{max} = \max[w(x,t)]$
- G_{max} : Maximum at leading edge
- N_{max} : Maximum at nose edge
- $\overline{VB} = \frac{\int_0^{d'} w(x,t) dx}{d'}$, $d = \frac{d'}{\cos\theta}$
- θ : side cutting edge angle
- \overline{F} : Average of plateau
- F_{max} : Maximum in the plateau

Fig.4 Feature of typical flank wear land

석하였다.

4.2. ARMA 모델에 의한 해석

각 실험조건에서 측정된 연속신호는 $20\mu\text{sec}$ (Nyquist Frequency: 25KHz)의 샘플링 간격으로 샘플링된 후 ARMA 모델 프로그램으로 해석되었다. 이때 하나의 적합한 ARMA 모델을 세우는 데 사용된 자료의 수는 512였다. Table 2에는 앞에서 이미 설명된 바와 같이, 적합한 ARMA 모델의 차수, 자료로부터 직접 계

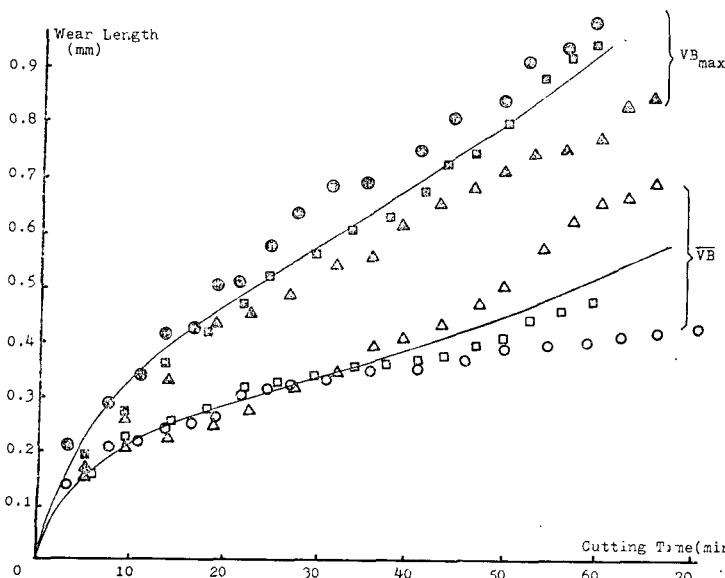
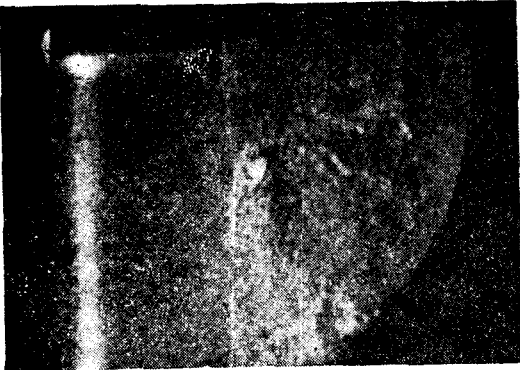


Fig. 5 Development of flank wear with cutting time (cutting condition 3)



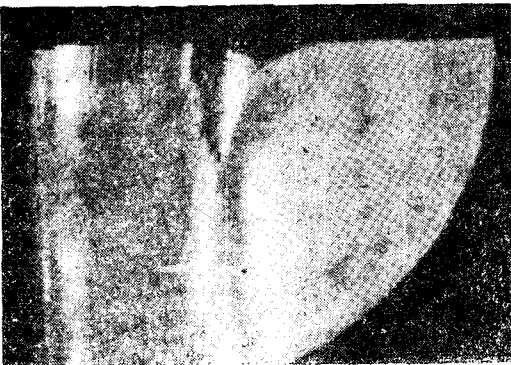
$N_{max} : 0.146\text{mm}$ $VB_{max} : 0.290\text{mm}$
 $\overline{VB} : 0.135\text{mm}$

(a) Cutting time: 7' 7''



$N_{max} : 0.334\text{mm}$ $VB_{max} : 0.510\text{mm}$
 $\overline{VB} : 0.257\text{mm}$

(b) Cutting time : 26' 6''



$N_{max} : 0.542\text{mm}$ $VB_{max} : 0.841\text{mm}$
 $\overline{VB} : 0.297\text{mm}$

(c) Cutting time : 57'

Fig. 6 Progressive flank wear with cutting time (cutting condition 3)

산된 분산 I_0 , ARMA 모델에 의한 분산 γ_0 , 모우드별 특성주파수, 감쇠율, 상대적인 세기 및 절대적인 세기가 각 실험조건에서 절삭시간의 경과에 따라 증가하는 마멸길이의와 함께 보여준다.

Fig. 7에서는 각 절삭조건에서 \overline{VB} 및 VB_{max} 이 절삭 시간에 따라 증가하는 모습을 보여주고 있는데, 같은 이송속도에서는 절삭속도가 클수록 마멸율이 크며 같은 절삭속도에서는 이송속도가 클 때 마멸율이 크다는 것을 알 수 있다.

절삭조건 2와 3에서 \overline{VB} 의 변화를 살펴보면 절대 마멸길이는 절삭조건 3일때가 더 크지만 마멸율은 조건 2일때 더 큰 것을 알 수 있는데 이러한 현상은 절삭초기에 기인한다⁽⁴⁴⁾. 일반적으로는 Fig. 8에 보인 것처럼 어느정도의 마멸이 일정한 율(rate)로 진행될 후 마멸길이가 급격히 증가하는 것으로 알려져 있으나 본 실험의 경우에는 \overline{VB} 가 0.6mm에 이르기까지 혹은 절삭시간이 80분이 경과하기까지 그런 특성이 나타나지 않고 있다.

Table 2에 나타낸 바와 같이 I_0 와 γ_0 가 많은 차이를 보이지 않기 때문에 Fig. 9에서는 각 절삭조건에서 절삭시간의 경과에 따른 ARMA 모델에 의한 이론적인 분산 γ_0 만의 변화 모습을 보였다. 같은 이송속도에서는 절삭속도가 빠를 때 전체적인 진동량이 크며 같은 절삭속도에서는 이송속도가 클 때 진동량이 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 7과 비교하여 종합적으로 설명하면, 단위시간당 절삭량이 증가할수록 공구 플랭크면의 마멸 길이와 함께 진동량도 증가함을 알 수 있으며 공구 진동량 혹은 분산의 변화는 공구의 마멸에 근사적으로 비례한다는 사실도 알 수 있다.

동적모우드의 감쇠율과 관련하여 Pandit의 첫번째 실험결과⁽⁹⁾에서는 공구의 고유 진동 모우드의 감쇠율이 절삭시간의 경과에 따라 감소한다고 밝히고 있지만 Table 2에 보인 바와 같이 본 실험에서는 공구의 마멸이 어느 모우드의 감쇠율과도 상관이 없음을 보여주고 있다.

Fig. 10에서는 두 동적 모우드의 절대적인 세기가 절삭 시간의 경과에 따라 변하는 모습을 보여주고 있다. 두번째 모우드에서는 각 절삭조건에 따른 특징을 발견할 수 없지만, 첫번째 모우드의 세기는 절삭조건에 크게 상관없이 절삭이 진행됨에 따라 감소하다가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 매우 흥미로운 발견으로 Pandit의 두번째 결과⁽¹⁰⁾와 일치하고 있으며, 공구마멸을 감지하는데 획기적인 기여를 할 가능성이 큰 것으로 판단된다. 왜냐하면 Fig. 9에 보인 진동신호의 분

Table 2 Variation of the ARMA model characteristics with cutting time

Exp. No.	Cutting Time min - sec	Wear Length (mm)		ARMA Order	T_0	γ_0	Peak Frequency (KHz)		Damping Ratio		Dispersion(%)		Absolute Power ($\times 10^{-2}$)					
		VB max	VB				Mode 1	Mode 2	Other Mode	Mode 1	Mode 2	Other Mode	Mode 1	Mode 2	Other Mode			
1	6 - 07	0.091	0.055	(8,7)	0.025	0.025	6.7	14.6	17.2	0.029	0.085	0.025	31.6	52.5	3.8	0.79	1.31	0.10
2	17 - 52	0.124	0.111	(8,7)	0.027	0.028	6.8	14.3	18.7	0.030	0.158	0.039	29.0	64.0	0.3	0.81	1.79	0.01
3	28 - 53	0.240	0.133	(6,5)	0.024	0.024	6.6	15.4		0.014	0.116		31.4	55.8		0.75	1.32	
4	38 - 18	0.318	0.143	(8,7)	0.024	0.025	6.6	14.1	9.5	0.011	0.091	0.309	24.3	58.9	13.0	0.61	1.47	0.33
5	48 - 08	0.382	0.152	(6,5)	0.023	0.023	6.6	14.8	16.6	0.061	0.197	0.100	16.8	44.6	21.8	0.39	1.03	0.50
6	57 - 13	0.438	0.152	(8,7)	0.026	0.027	6.6	14.9	17.1	0.035	0.197	0.026	25.1	27.1	9.0	0.68	0.73	0.24
7	65 - 43	0.500	0.163	(8,7)	0.025	0.025	7.4	12.3	16.8	0.126	0.079	0.062	37.1	24.2	26.9	0.93	0.61	0.67
8	73 - 33	0.551	0.185	(8,7)	0.030	0.031	6.5	14.7		0.020	0.158		32.7	60.7		1.01	1.88	
9	80 - 38	0.592	0.190	(6,5)	0.033	0.033	6.6	12.1	15.7	0.014	0.295	0.157	28.0	40.0	28.0	0.92	1.32	0.92
1	3 - 30	0.170	0.094	(6,5)	0.080	0.084	7.0	9.8		0.054	0.191		75.1	22.5		6.31	1.89	
2	6 - 58	0.225	0.135	(6,5)	0.063	0.066	7.1	9.6		0.061	0.248		72.0	20.6		4.75	1.36	
3	10 - 13	0.318	0.142	(6,5)	0.085	0.086	7.0	9.5		0.048	0.208		54.8	35.8		4.71	3.08	
4	13 - 23	0.439	0.160	(8,7)	0.098	0.099	6.6	9.6	14.1	0.029	0.150	0.120	38.8	54.0	0.5	3.84	5.35	0.05
5	16 - 30	0.514	0.172	(8,7)	0.090	0.091	6.9	9.2	17.7	0.134	0.223	0.019	41.2	56.4	-0.1	3.75	5.13	-0.01
6	19 - 30	0.520	0.230	(8,7)	0.143	0.143	6.8	9.6	16.6	0.027	0.168	0.056	51.2	46.3	0.1	7.06	6.39	0.01
7	22 - 27	0.520	0.257	(8,7)	0.142	0.139	6.6	9.6	16.1	0.028	0.135	0.026	33.0	60.8	0.8	4.59	8.45	0.11
8	25 - 17	0.621	0.278	(6,5)	0.116	0.119	6.8	8.9	14.8	0.044	0.071	0.341	39.7	63.5	-3.2	4.72	7.56	-0.38
9	27 - 58	0.680	0.304	(8,7)	0.185	0.184	6.7	9.9	16.6	0.022	0.146	0.107	53.0	45.7	-0.3	9.75	8.41	-0.06
10	30 - 38	0.703	0.330	(6,5)	0.187	0.195	6.9	10.4		0.062	0.186		74.8	20.0		14.59	3.68	
1	4 - 55	0.192	0.177	(8,7)	0.053	0.050	6.9	10.3	20.2	0.068	0.093	0.061	67.1	36.6	0.0	3.36	1.81	0.0
2	9 - 45	0.272	0.233	(8,7)	0.095	0.098	7.1		5.7% 19.9	0.019		0.07% 0.149	30.9		-0.1	69.3% 3.03		6.79% -0.01
3	14 - 10	0.368	0.242	(8,7)	0.081	0.081	6.4	11.1	16.1	0.011	0.085	0.071	40.7	64.5	0.4	3.30	5.22	0.03
4	18 - 35	0.433	0.257	(8,7)	0.076	0.075	6.3	11.1	2.0	0.028	0.079	0.949	20.8	73.1	5.5	1.56	5.48	0.41
5	22 - 40	0.478	0.314	(8,7)	0.084	0.087	6.4	12.0	19.5	0.043	0.025	0.030	17.4	82.6	0.0	1.51	7.19	0.0
6	26 - 50	0.525	0.318	(8,7)	0.075	0.067	6.6	11.9	3.5	0.026	0.039	0.128	46.8	50.4	2.8	3.14	3.38	0.19
7	30 - 00	0.574	0.332	(8,7)	0.086	0.080	7.6	12.1	4.1	0.035	0.048	0.26	41.2	32.9	25.9	3.30	2.63	2.07
8	34 - 00	0.608	0.352	(8,7)	0.132	0.138	6.5	11.5	16.2	0.015	0.058	0.032	37.5	64.6	0.5	5.18	8.91	0.07
9	37 - 45	0.627	0.360	(6,5)	0.098	0.098	6.2	11.6	13.0	0.340	0.152	0.384	55.9	42.4	1.6	5.48	4.16	0.16
10	41 - 5.5	0.689	0.364	(8,7)	0.150	0.155	6.4	11.5	15.6	0.020	0.089	0.081	36.8	41.3	6.3	5.70	6.40	0.98

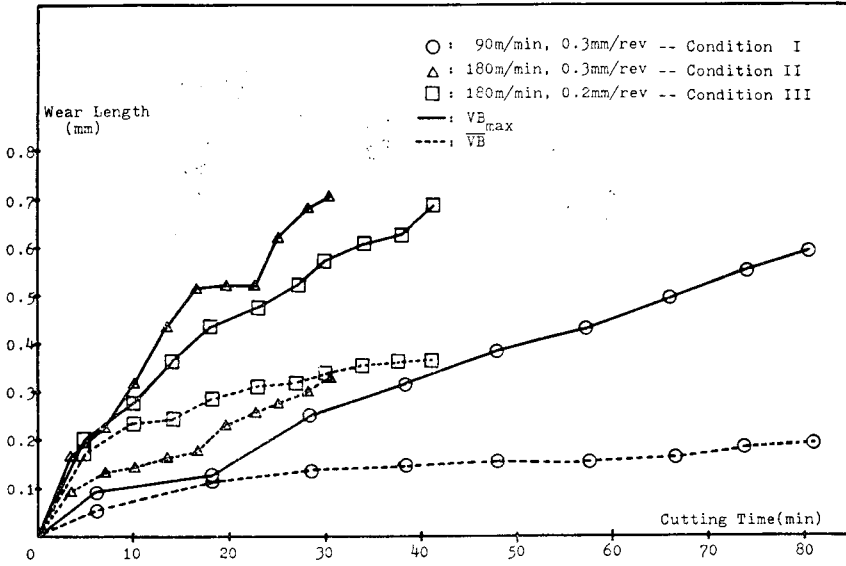


Fig. 7 Length of flank wear vs. cutting time

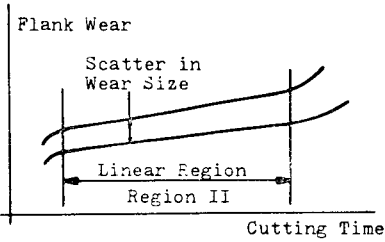


Fig. 8 Scatter of tool wear behavior

산도 그렇고 다른 여러 연구가들에 의한 간접적인 방법도 그렇듯이, 공구의 마멸에 비례하는 인자를 사용하여 공구 교환시기를 결정할 경우, 각 절삭조건 및 공구재료에 따라 공구수명에 대한 기본자료가 반드시 필요한 반면, Fig. 10에서처럼 공구마멸의 진전에 따른 변화의 기울기(derivative)가 변화하는 인자가 있을 경우 그 변화점을 중심으로 공구교환시기를 정하면 되기 때문이다. Fig. 11에서는 첫번째 동적 모드에서의 세

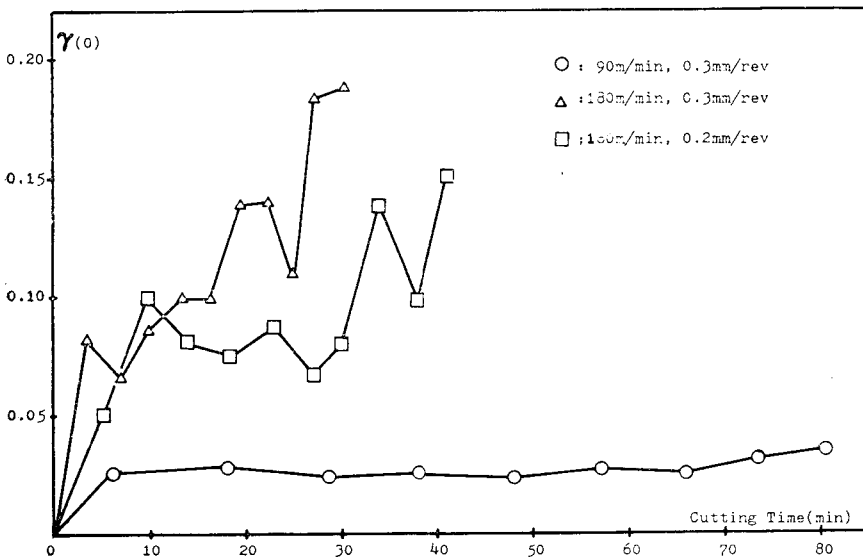


Fig. 9 Variation of theoretical variance $\gamma(0)$ with cutting time

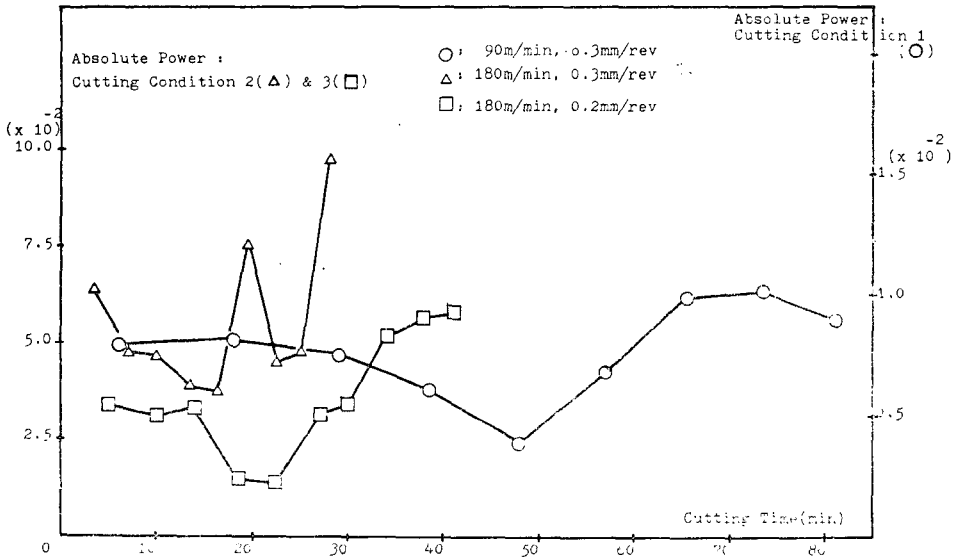


Fig. 10(a) Absolute power of the 1st mode vs. cutting time

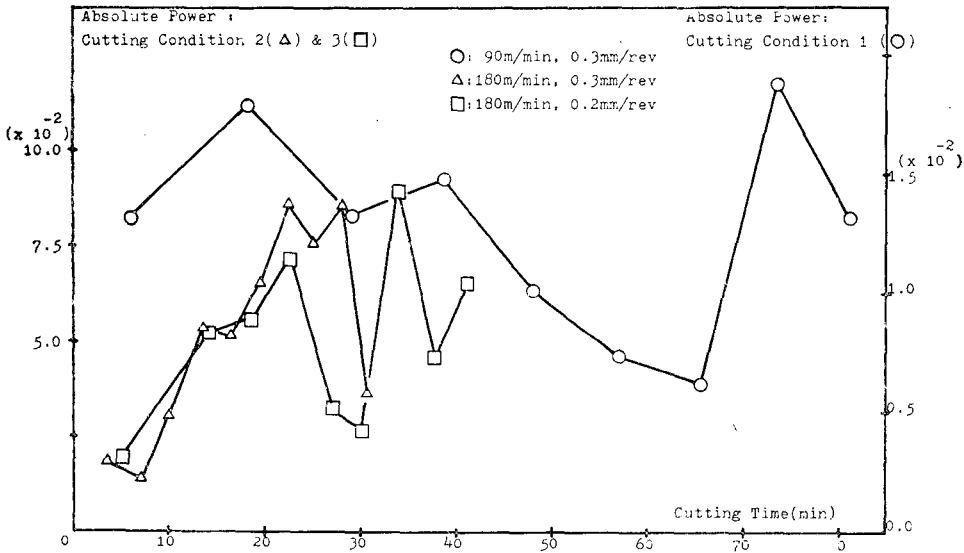


Fig. 10(b) Absolute power of the 2nd mode vs. cutting time

기와 플랭크면의 최고 마멸길이 VB_{max} 과의 관계를 보여주고 있는데 기울기가 변화하는 곳에서의 마멸길이 $0.4 \sim 0.5mm$ 인 것을 고려하면 공구교환의 적합한 시기를 산출할 수 있을 것으로 고려된다.

한편 Table 2로부터, 첫번째 모드인 $6.2KHz \sim 7.6KHz$ 는 절삭조건에 상관없이 나타나고 있으며 두번째 모드는 각 절삭조건마다 많은 차이를 보이고 있다는 것을 알 수 있다(절삭조건 1 : $14KHz$ 주위, 절

삭조건 2 : $9.6KHz$ 주위, 절삭조건 3 : $11KHz$ 주위). 따라서 $6.2KHz \sim 7.6KHz$ 의 모드는 절삭조건에는 관련이 없고, 공구대의 고유진동수와 관련이 있을 것으로 판단되는데, 확인의 목적으로 Fig. 2에 보인 바와 같이 절삭조건 2에서 공구대 위로부터 수직방향으로의 측정 외에 방향 및 지점을 바꾸어 가속도를 측정할 후 ARMA 모델을 구하여 주요 진동 모드를 계산하여 보았다. 즉 지점 ① 및 ④에서는 수평방향(절삭길이 방

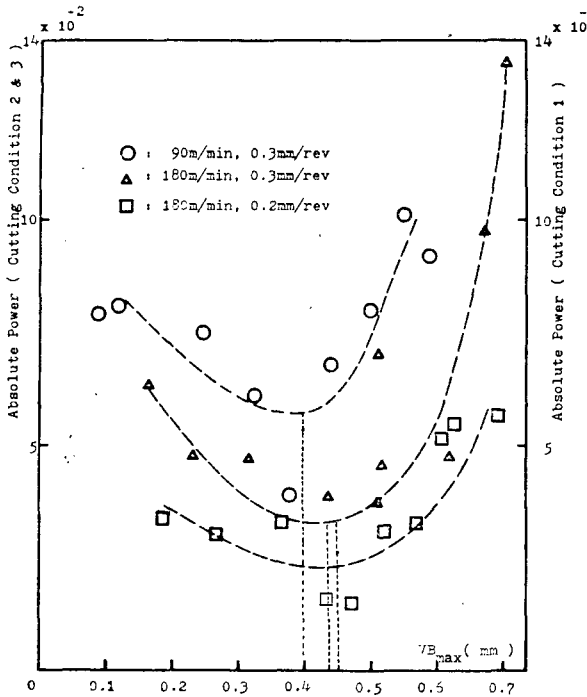


Fig. 11 Change of absolute power of the first mode vs. maximum groove length VB_{max}

향)으로, 지점 ③ 및 ⑤에서는 수직방향으로 ②에서는 수평방향(이송방향)으로 진동신호를 측정하였다. ①, ②, ④의 경우에는 6~7KHz의 모우드가 두번째 모우드인 11~12KHz에 비해 무시할 수 있을 정도로 작은 반면, ③ 및 ⑤의 경우에는 6~7KHz의 모우드가 뚜렷하게 나타났는데, 이에 비추어 첫번째 모우드인 6~7 KHz는 공구대가 수직방향으로 가지는 고유진동수로 추정된다.

Fig. 11에서 보인 바와 같이 첫번째 모우드(6.2~7.6 KHz)의 세기가 공구마멸의 진행에 따라 어느정도 감소하다가 증가하는 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉 절삭초기에는 플랭크면의 실제 여유각(true clearance angle)이 양으로 주어지기 때문에 penetration 효과⁽¹⁵⁾의 영향으로 진동이 일어나기 쉬우나 마멸이 진행됨에 따라 여유각이 0°에 접근하면서 진동이 억제되며 그후 마멸이 계속 심화되면서 절삭력이 증가하여 진동이 다시 커질 것으로 판단된다.

5. 결 론

절삭시의 공구대 위로부터 측정된 진동가속도 신호

에 ARMA 모델을 적용하여 공구마멸의 진행을 간접적으로 감지하기 위한 방법론을 제시하였다.

공구마멸의 진행과 더불어 진동신호의 분산도 그에 비례하여 증가하는 모습을 보임으로써 마멸감지를 위한 하나의 인자로 이용할 수 있는 가능성을 제시하였다. 그러나 절삭조건에 따라 공구수명을 결정짓는 마멸길이 및 시간이 변화하므로 그에 대한 기본적인 자료가 필수적이다. 한편 동적 모우드의 감쇠율의 변화는 마멸감지를 위한 수단으로 적합하지 않음도 지적되었다. 반면에 어느 모우드의 절대적인 세기는 공구마멸의 진행에 따라 절삭조건에 상관없이 초기에는 감소하다가 어느정도의 마멸후에 증가하는 모습을 보임으로써 공구 교환의 적합한 시기를 결정하기 위한 좋은 인자임이 밝혀졌다. 이때 이 동적 모우드는 공구대의 수직방향으로의 고유진동수인 것으로 판단되며, 모우드 세기의 변화는 마멸진행에 따른 여유각 및 마멸 길이와 관련된 것으로 믿어진다.

반복적인 실험 및 해석이 더욱 진행되어야 하겠지만, 공구대의 수직방향으로의 고유진동수에 해당하는 모우드의 세기가 공구교환에 적합한 교환시기를 감지할 수 있으므로, 일단 그러한 특성주파수가 결정되면 시계열 모델을 이용할 필요없이 간단한 회로 혹은 신호필터를 사용하면 온라인으로도 충분히 활용될 수 있다고 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 1983년도 연구비 지원으로 진행되었으며 이에 대하여 상기 재단에 대단히 감사하게 생각하는 바입니다.

참 고 문 헌

- (1) Micheletti, G.G., Koenig, W. and Victor, G.G., Koenig, W. and Victor, H.R., In-Process Tool Wear Sensors for Cutting Operations, Annals of the CIRP, pp.483~496, 1976
- (2) Micheletti, G.F., Relationship between Cutting Forces and Tool Wear in Steel Turning, Proceedings of the 7th Int. MTDR Conference, 1966
- (3) Lindstrom, B. and Linberg, B., Measurements of Dynamic Cutting Forces in the Cutting Process, A New Sensor for In-Process Measurements, Proceedings of the 24th Int. MTDR Conference, pp.137~142, 1983

- (4) Weller, E.J., Schrier, H.M. and Weichbrodt Bjorn, What Sound Can be Expected From a Worn Tool? Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, pp. 524~534, 1969
- (5) Shumsheruddin, A. and Lawrence, J.C., In-Process Prediction of Milling Tool Wear, Proc. of the 24th M.T.D.R. Conference, pp. 201~214, 1983
- (6) Iwata, K. and Moriwaki, T., An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear, Annals of the CIRP, pp. 21~26, 1977
- (7) Moriwaki T., Detection for Cutting Tool Fracture by Acoustic Emission Measurement, Annals of the CIRP, pp. 35~40, 1980
- (8) Moriwaki, T., Application of Acoustic Emission Measurement to Sensing of Wear and Breakage of Cutting Tool, Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., pp. 154~160, 1983
- (9) Pandit, S.M., Suzuki, H. and Kahng, C.H., Application of Data Dependent System to Diagnostic Vibration Analysis, Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, pp. 233~241, 1980
- (10) Pandit, S.M. and Kashou., A Data Dependent Systems Strategy of On-Line Tool Wear Sensing, Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, pp. 217~223, 1982
- (11) Pandit, S.M. and Wu, S.M., Time Series and System Analysis with Applications, J-Wiley, New York, 1983
- (12) Wu, S.M., Dynamic Data System: A New Modeling Approach, Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, pp. 708~714, 1977
- (13) Box, G.E.P. and Jenkins, G.M., Time Series: Forecasting and Control, Holden-Day, San Francisco, 1976
- (14) Ber, A. and Kaldor, The First Seconds of Cutting, Wear Behaviour, Annals of the CIRP, pp. 13~17, 1982
- (15) S.A. Tobias Machine Tool Vibration, John Wiley & Sons, New York, 1965
- (16) 황홍연, Dynamic Data System(DDS) 방법을 이용한 공구마멸에 관한 연구, 한국과학기술원 생산공학과 석사논문, 1984