

〈論 文〉

복합센서를 이용한 선삭가공중 채터발생의 검출

김기대* · 권원태** · 주종남*** · 이장무***

(1993년 11월 27일 접수)

In-Process Chatter Detection Using Multiple Sensors in Turning

Kim Gi Dae, Kwon Won Tae, Chu Chong Nam and Lee Jang Moo

Key Words : Real Time Chatter Detection(실시간 채터검출), Sensor Fusion(센서융합), Non-dimensional Characteristic Variable(무차원 특성변수), Chatter Detection Indexes(채터검출상수), Threshold(한계치)

Abstract

In this paper, in-process chatter detection methodology which utilizes nondimensional characteristic variables is introduced. To obtain the nondimensional chatter detection indexes which are constant regardless of the cutting conditions during machining with the same tool and workpiece material, both the cutting forces and accelerations are measured and processed in time and frequency domain. The indexes are calculated from the present and past value of the acceleration and cutting force signals in time and frequency domain. The chatter is identified when these chatter detection indexes are bigger than the threshold which is decided by preliminary experiments. The experiment shows that these indexes works very well for in-process chatter detection.

1. 머릿말

최근 NC 및 CNC 공작기계의 발전에 따라 절삭공정이 자동화되어 가고 있으며, 여러대의 공작기계를 결합하여 자동 생산시스템을 개발하는 것이 요구되고 있다. 이러한 시스템에서는 1대의 공작기계에 이상이 생겼을 때 이로 인해 전체공정에 미치는 영향이 매우 크므로 시스템을 원활히 동작시키기 위해서는 가공공정이 정상으로 진행되고 있는지를 감시하여 이상이 있으면 경고를 하여 정상적인 상태로 돌아오게 하는 기능이 필요하다.

이러한 필요성으로 가공중의 이상현상, 즉 공구의 파손이나 마멸, 채터, 연속형 칩, 빌트업에지

등을 예측, 검출하고 억제하여 가공을 원활히 수행하려는 이상진단 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 아직은 실용 단계에 있는 것은 아니고 연구수준에 머무르고 있는 실정이다. 절삭가공 중에 생기는 이상진동을 채터라고 하는데, 이것은 절삭과정에서 발생하는 다른 모든 이상상태와 함께 공작물의 표면거칠기, 공구수명, 가공오차, 그리고 특히 절삭과정의 안정성에 해로운 영향을 주어 생산성을 저하시킨다.

이러한 채터에 대한 지금까지의 연구 동향을 살펴보면 채터진동으로 인한 이상현상을 실험적으로 가공후에 설명하고 있을 뿐이며,^(4,5) 가공중의 채터가 발생하고 있을 때의 실시간 인식은 실제 가공과는 거리가 먼, 예를 들어 공작물의 한쪽만 척에 물려있을 경우에만 행하여져 있다.⁽⁶⁾

이에 본 연구에서는 자동 NC공작기계에서 생기는 여러가지 이상현상 중에서 채터에 대한 “실제

*서울대학교 대학원 기계설계학과

**정회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

***정회원, 서울대학교 기계설계학과

절삭상황에서도 실시간 검출이 가능한 알고리즘"을 개발하고자 하며 또한 검출의 신뢰도를 높이기 위해 공구동력계와 가속도계의 두가지 센서를 사용하는 센서융합 개념을 도입하였다.

2. 역사적 배경

채터가 발생하면 일반적으로 계의 가속도의 진폭이 커지고, 절삭력이 증가하며 커진 진폭에 의해 공작물의 표면조도가 나빠지게 된다. 그러므로 채터로 인하여 공작물에 나쁜 영향을 주기 전에 채터를 검출, 미연에 방지하는 것이 중요하다. 채터를 검출하기 위해 제안된 방법에는 자동회귀평균법을 이용한 시스템의 동적물성의 변화,^(4,5) FFT power spectrum의 형상변화,^(14,17) 실제 공작물의 변위변화,⁽⁶⁾ 등을 측정 또는 계산하여 채터의 발생을 감시하는 방법들이 있다. 자동회귀평균 이동모델을 이용한 채터검출법에는 두가지가 있는데, 그 첫번째는 모델링에 의해 얻어진 전달함수의 분모의 특성함수의 근이 단위원(unit circle)부근에 존재하고 감쇠함수가 0에 가까우며, 그때의 모드의 시스템 전체 파워에 대한 기여도가 100% 가까운 값이 나왔을때, 그때 특성함수의 근으로 얻어진 주파수에서 채터가 일어났다고 판정하는 방법이다.⁽⁷⁾ 두번째 방법은 USA(uniformly sampled autoregressive) 2차 모델로, 두 근이 단위원 안에 있기 위한 특성방정식 계수의 제한조건을 제시하여 그 계수값들의 위치에 따라 진동 판정여부를 결정하였다.⁽⁵⁾ 자동회귀평균 이동모델에 의한 진동판정방법에는 이와 같이 두가지가 제시되었으나 두 방법 모두 계산량이 많아 시간이 오래 걸리므로, 실제 가공중에는 사용되기 어려운 단점이 있다. 온라인 모니터링방법으로는 변위 측정 센서를 이용하여 공구와 공작물 사이의 수평거리를 측정하여 진동을 판정하는 방법이 제시되었다.⁽⁶⁾ 이 방법에서는 절삭조건이 바뀌어서 안정영역에서 불안정영역으로 전이할때 공구와 공작물사이의 수평변위가 처음에는 증가하다가 다시 감소하는 시점이 있는데, 이를 채터의 기준점으로 잡아 모니터링하였다. 이 방법은 간단하면서도 효과적이라는 장점이 있으나, 이 실험의 문제점은 한쪽은 척에 물리고 다른 쪽은 십압대에 고정인 안된, 외팔보 형태의 공작물을 절삭하면서 위치를 측정하는 것이므로 이 방법 또한 실제 가공중 사용하기는 불가능하다.

이 외에도 진동신호를 확률밀도분포함수 영역에서 해석하여 그 크기의 형태변화에 따라 채터 여부를 감시하는 방법,^(14,17) ARMA 모델로 구한 신호의 분산변화를 이용하는 방법,⁽¹²⁾ 절삭력주기 패턴을 이용하는 방법 등이 연구, 제시되었으나, 실제 절삭중 진동을 감시할 수 있을만큼 신뢰도가 높고 간단한 방법은 아직 존재하지 않는다. 이 논문에서는 신뢰도를 높이기 위하여 절삭력과 가속도, 두가지 신호를 이용하여 진동을 감시하는 방법이 제안되었다. 이 절삭력과 가속도신호들로부터 절삭조건에 무관한 지표를 계산하는 방법 또한 제시되어 공구와 공작물의 물성이 변하지 않는 한, 항상 일정한 값을 갖는 한계치를 초기에 결정하여 설정해 놓으면 절삭속도, 절삭깊이, 절삭폭의 변화에 무관하게 채터를 감시할 수 있는 방법이 제안되었다.

3. 채터검출지표

이 절에서는 가속도계와 공구동력계를 이용하여 얻은 가속도신호와 절삭력신호로부터 채터를 감시하기 위한 채터검출지표가 구하여졌다. 채터검출지표는 공구가 공작물을 절삭하는 동안 측정된 가속도신호와 절삭력신호로부터 계속 계산되어지며, 이 계산치를 미리 결정된 한계치와 비교하여 채터여부를 판정하게 된다. 이때 사용된 채터검출지표의 계산방법과 그 물리적인 의미가 다음에 주어져 있다.

3.1 채터발생시의 특성

채터의 발생은 주로 과도한 절삭깊이를 주었을 경우와 같은 부적절한 절삭조건하에서 일어나는데, 같은 공구와 공작물을 사용할 경우 절삭깊이, 절삭속도, 이송률 등의 절삭조건에 대한 함수가 된다. 절삭가공중에 가속도 혹은 절삭력은 계속해서 요동하면서 변화하는데 그 변화 형태는 일반적으로 다음과 같다.

3.1.1 진폭의 증가

채터가 일어나면서 안정영역에서 불안정영역으로 전이되면서 가장 크게 변화하는 것은 진폭의 변화이다. 이 진폭의 변화는 변위의 변화를 의미하는 것이지만 이 변화로 인하여 가속도와 절삭력의 변화도 증가한다. 시간영역에서의 가속도와 절삭력의 진폭변화의 증가량은 주파수영역에서는 고유진동수에서 파워의 최대치의 증가로 나타나게 된다. 채터

는 주로 공구 동역학(machine tool dynamics)의 고유진동수에서 크게 일어나므로 이를 주파수영역에서 해석하면 고유진동수에서 파워가 가장 크게 증가한다. 결과적으로 채터가 발생함에 따라 주파수영역 해석에서 고유진동수에서의 최대 파워가 증가하게 된다.

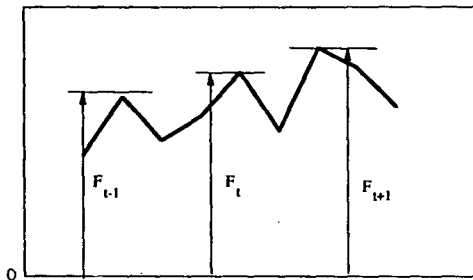
결과적으로 시간영역에서의 진폭의 증가와, 주파수영역에서의 고유진동수에서 최대 파워의 증가량을 감지함으로써 채터를 감지할 수 있다.

3.1.2 진폭의 평균값의 증가

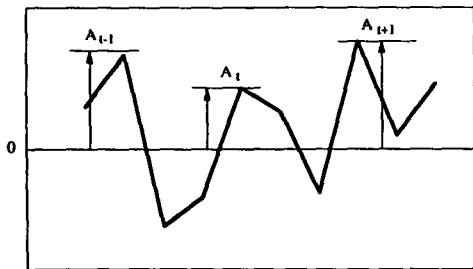
채터의 증가로 진폭이 증가하면 그 영향으로 채터의 평균값이 증가하게 된다. 이렇게 증가하는 평균값은 주파수영역에서는 전체 파워의 증가로 나타나게 된다. 여기서 파워의 증가는 주파수영역에서 x축, 즉 주파수축과 각 주파수에서의 크기를 나타낸 그래프로 둘러싸인 면적의 증가로 나타나게 된다. 결과적으로 시간영역에서 진동의 평균값의 증가와 주파수영역에서 전체 파워의 증가를 측정함으로써 채터를 감지할 수 있다.

3.2 시간영역 채터검출 무차원 특성변수

채터가 발생하면 시간영역에서 나타나는 특성은



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Local maximum of cutting force signal
(b) Local maximum of acceleration signal

3.1절에서 나타난 바와 같이 진폭의 증가와 평균값의 증가이다. 이 진폭의 증가와 평균값의 증가를 채터검출에 이용하기 위하여 6개의 무차원 특성변수가 이 절에서 도입되었다.

(1) 절삭가공중에 나타나는 절삭력과 가속도신호를 확대해서 그린다면 Fig. 1로 나타나는데 절삭력은 가속도와는 달리 절대값이 항상 양으로 나타나고 어느 정도의 일정성분(DC성분)을 가지고 있다. 불안정한 가공일 때의 신호는 절대값과 진폭이 커지는데 이를 나타내기 위하여 신호 하나하나의 값(절삭력신호 F[i], 가속도신호 A[i])을 변수로 하기보다는 매시간 표본화 데이터(sampled data) 개수 마다의 평균값을 변수로 하면 노이즈나 외란의 영향을 없애주고 전체적인 경향을 확연히 볼 수 있다. 이를 위해 표본화 데이터 개수마다 신호의 ‘산’ 부분(local maximum) 절대값의 평균값(F_av[t], A_av[t])을 구하고, ‘골’부분(local minimum)과 ‘산’부분의 차이값인 진폭의 평균값(F_flg[t], A_flg[t])을 계산한다. (Fig. 2)

$$F_{av}[t] = (\sum \text{local maximum } F[i]) / \text{No. of sampled data} \quad (1)$$

$$A_{av}[t] = (\sum \text{local maximum } A[i]) / \text{No. of sampled data} \quad (2)$$

$$F_{flc}[t] = \{ \sum (\text{local maximum } F[i] - \text{local minimum } F[i]) \} / \text{No. of sampled data} \quad (3)$$

$$A_{flc}[t] = \{ \sum (\text{local maximum } A[i] - \text{local minimum } A[i]) \} / \text{No. of sampled data} \quad (4)$$

식(1)~(4)에서 사용된 sampled data의 개수는 3.3절에서 결정되었다.

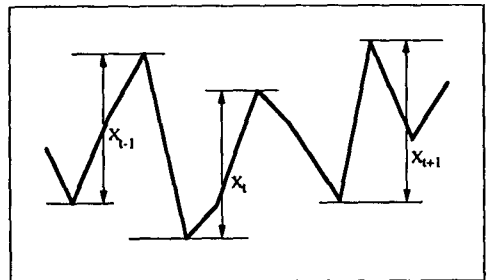


Fig. 2 Amplitude of cutting force and acceleration signal

첫번째 불안정영역 경계 무차원 특성변수는 신호의 표본화 데이터마다의 절대값 평균과 진폭의 평균에 대한 그의 비율로 하였는데 그것은 절삭력의 경우 $Rf0[t]=F_flc[t]/F_av[t]$ 이고, 가속도의 경우 $Ra0[t]=A_flc[t]/A_av[t]$ 로 표시된다.

두번째 불안정영역 경계 무차원 특성변수는 (t-1)번째 표본화 데이터의 절대값 평균에 대한 t번째 표본화 데이터의 절대값 평균의 비율로 하였는데 그것은 절삭력의 경우 $Rf1[t]=F_av[t]/F_av[t-1]$ 이고 가속도의 경우 $Ra1[t]=A_av[t]/A_av[t-1]$ 로 표시된다.

세번째 불안정영역 경계 무차원 특성변수는 (t-1)번째 표본화 데이터의 진폭 평균에 대한 t번째 표본화 데이터의 진폭 평균의 비율로 하였는데 절삭력과 가속도의 경우 각각 $Rf2[t]=F_flc[t]/F_flc[t-1]$, $Ra2[t]=A_flc[t]/A_flc[t-1]$ 로 표시된다.

이 특성변수 중 $Rf0[t]$ 와 $Ra0[t]$ 는 전체 평균값에 대한 진폭의 비를 계산한 것으로 불안정 유무, 즉 채터의 발생여부를 나타내는 변수이고, $Rf1[t]$ 와 $Ra1[t]$ 는 과거의 평균값에 대한 현재의 평균값의 크기를 비교한 것으로 채터가 일어나면 평균값이 커짐을 매 순간마다 비교하여 나타낸 것이다. $Rf2[t]$ 와 $Ra2[t]$ 는 과거 진폭에 대한 현재의 진폭의 크기를 비교한 것으로 채터가 일어나면 진폭이 커지므로 이 값들 또한 커지는데 $Rf1[t]$, $Ra1[t]$, $Rf2[t]$, $Ra2[t]$ 는 안정영역에서 불안정영역으로 전이하는 순간 큰 값을 가지므로 이 값들을 이용하여 바로 그 전이점을 찾을 수 있다.

3.3 주파수영역 채터검출

만일 신호의 FFT power spectrum에서 큰 파워의 피크값이 나타났다면 이는 그 피크주파수의 신호가 전체 신호에서 큰 비중을 차지하고 있음을 나타내고 있는 것이다. 그러므로 안정상태에서 가공을 하다가 채터진동이 일어나면 스펙트럼상에서 큰 변화가 일어나 전체 파워가 커지며, 새로운 주파수에서 파워의 피크값이 생기든지 아니면 더욱 큰 파워의 피크값이 생긴다. 즉, FFT power spectrum에서 없었던 파워의 피크값이 새로이 나타난다면 채터가 발생하였다고 판별한다. 다음은 power spectrum형상변화를 이용하여 무차원 변수를 얻는 과정을 설명하였다.

A/D변환 기본이론에 따르면 FFT 함수를 수행하기 위해서는 알고자 하는 주파수의 2배 이상의

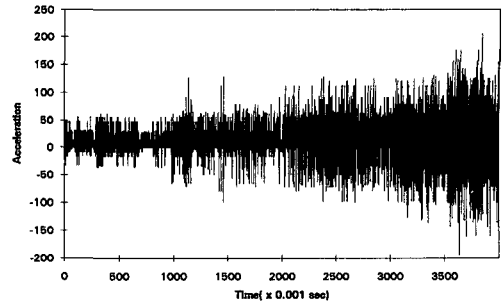


Fig. 3 Acceleration signal in time domain during development of chatter

표본화 주파수가 필요하다. 그러므로 표본화 주파수를 결정하려면 채터의 주파수를 알아내는 것이 선행조건이다. 선행실험을 하여 채터를 발생시킨 결과 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. 이것은 시간영역에서 해석된 것인데 이것을 주파수영역에서 해석하면 주 진동주기가 약 250 Hz 부근에서 발생함을 알 수 있다. 여러번의 실험결과 채터의 주파수가 보통 100~400 Hz 내에 존재하는 것으로 나타나 표본화 주파수는 1 kHz로 하였다. 이 주파수로 가속도와 절삭력 데이터를 표본화하여 FFT함수를 수행하여 각 주파수에서의 파워크기를 구한 뒤, 전체 파워의 평균값을 계산하였다. 즉 임의의 t샘플링 시간, X Hz에서의 절삭력, 가속도의 FFT함수 값은 각각 $Pf[t][Hz]$, $Pa1[t][Hz]$ 로 표시하였고 그 t샘플링 시간에서의 절삭력, 가속도의 FFT함수의 평균값은 각각 다음과 같이 나타내었다.

$$Pf_av[t] = (\sum Pf[t][Hz]) / (\text{Sampling rate}/2) \tag{5}$$

$$Pa_av[t] = (\sum Pa[t][Hz]) / (\text{Sampling Rate}/2) \tag{6}$$

이러한 평균값을 취하기 위한 최적의 시간을 결정하기 위하여 0.064초, 0.256초, 1.024초 마다 평균을 내어 진동의 경향을 살펴본 결과 1.024초가 전체적인 경향을 잘 나타내는 것으로 관찰되어 매 1.024초 마다 데이터를 받아들이고 그 값들을 주파수 해석하였다. 주파수영역에서는 매 Hz 마다의 값을 계산하여 각 Hz에서의 값이 채터가 발생됨에 따라 어떻게 변해가는가를 살펴보기에는 계산 시간도 많이 걸릴뿐만 아니라 전체 power spectrum형상변화를 표현할 수 없기에 대역폭(band width) 32Hz 마다 평균값을 구해 그 평균값들의 변화 추세를 관찰함으로써 채터를 검출하였다. 이렇게

1.024초 마다 데이터의 평균값을 구하고 32Hz 마다 평균값을 취함으로써 계산을 단순화시켰는데 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Pf_bd[t][k] = \left(\sum_{Hz=k \cdot Bd_wdh}^{(k+1) \cdot Bd_wdh} Pf[t][Hz] \right) / Band_width \quad (7)$$

$$Pa_bd[t][k] = \left(\sum_{Hz=k \cdot Bd_wdh}^{(k+1) \cdot Bd_wdh} Pa[t][Hz] \right) / Band_width \quad (8)$$

여기서, Pf_bd[t][k], Pa_bd[t][k]는 각각 절삭력과 가속도의 t시간째 표본화 데이터들이며(t=1이면 1.024초, t=2이면 2.048초, ...) 또한 k번째 대역폭의 파워 평균값을 나타내고(k=1이면 0~32Hz 평균값, k=2이면 32~64Hz 평균값, ...), Band_width는 주파수영역에서 평균값을 취한 대역폭으로 이 식에서는 32Hz이다. 결과적으로 식(7), (8)에 의해 spectrum형상은 단순화된다. 이렇게 결정된 수치들로 채터의 감시가 가능한가를 알아보기 위해, 채터가 발생하고 발달되는 과정을 절삭력과 가속도신호를 주파수영역에서 처리한 그림이 Fig. 4에 주어져 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 약 260Hz 부근에서 절삭력과 가속도의 power spectrum값이 채터가 증가함에 따라 증가함이 뚜렷하게 보여졌다 이중 가장 큰 파워값을 나타내는 절삭력의 주파수대역을 Bf, 가속도의 주파수대역을 Ba로 나타내고 그러한 대역의 파워를 Pf_max[t][Bf], Pa_max[t][Ba]에 저장한다. 이와 같은 값들을 바탕으로 주파수영역에서 다음과 같은 8개의 무차원 특성변수를 구하였다.

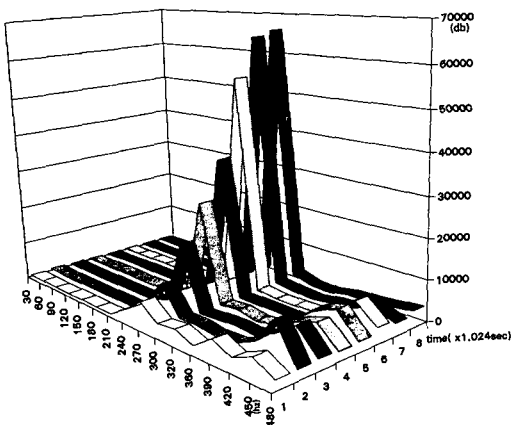


Fig. 4 Acceleration signal in frequency domain during development of chatter

(1) 전체 파워 평균값에 대한 최대(피크)주파수 대역 파워의 비율을 첫번째 불안정영역 경계 무차원 특성변수로 한다.

$$Rpf0[t] = Pf_max[t][Bf] / Pf_av[t] \quad (9)$$

$$Rpa0[t] = Pa_max[t][Bf] / Pa_av[t] \quad (10)$$

여기서, Rpf0[t], Rpa0[t]는 각각 t번째 절삭력과 가속도 표본화 데이터들의 전체 파워 평균에 대한 피크주파수 대역 파워의 비율을 나타내는데, 불안정한 영역일 때에는 큰 파워의 피크값이 나타나므로, 이 변수들은 큰 값을 보인다.

(2) (t-1)번째 표본화 데이터의 파워 평균값에 대한 t번째 표본화 데이터의 파워 평균값이 비율을 두번째 불안정영역 경계 무차원 특성변수로 한다.

$$Rpf1[t] = Pf_av[t] / Pf_av[t-1] \quad (11)$$

$$Rpa1[t] = Pa_av[t] / Pa_av[t-1] \quad (12)$$

(3) 안정영역에서 불안정영역으로 전이함에 따라 새로운 주파수에서 파워의 피크값이 생기던지 아니면 피크가 더욱 발전하므로, 피크주파수 대역 Bf, Ba에서 한 단계 전 표본화 데이터의 Bf, Ba대역에서의 파워 값과의 비율을 세번째 불안정영역 경계 무차원 특성변수로 한다.

$$Rpf2[t] = Pf_bd[t][Bf] / Pf_bd[t-1][Bf] \quad (13)$$

$$Rpf2[t] = Pa_bd[t][Ba] / Pa_bd[t-1][Ba] \quad (14)$$

(4) 피크주파수 대역 Bf, Ba에서의 두 단계 전 표본화 데이터의 Bf, Ba 대역에서의 파워값과의 비율을 네번째 불안정영역 경계 무차원 특성변수로 한다.

$$Rpf3[t] = Pf_bd[t][Bf] / Pf_bd[t-2][Bf] \quad (15)$$

$$Rpf3[t] = Pa_bd[t][Ba] / Pa_bd[t-2][Ba] \quad (16)$$

위의 8개 무차원 특성변수 중 Rpf0[t], Rpa0[t]는 절삭이 불안정하게 이루어질 때에는 항상 큰 값을 가지지만 Rpf1[t], Rpa1[t], Rpf2[t], Rpa2[t], Rpf3[t], Rpa3[t]는 그 전 값에 대한 그 다음값의 변화율을 나타내므로 안정영역에서 불안정영역으로 넘어가는 그 순간에서 큰 값을 가진다.

3.4 채터검출지표

이전 절까지에서 시간영역과 주파수영역에서 가속도와 절삭력을 처리함으로써 14개의 무차원 특성변수가 얻어졌다. 이 중에서 Rf0[t], Ra0[t], Rpf0[t], Rpa0[t] 4개의 값은 안정영역 값에 대한

진폭과 절삭력의 절대치를 나타내는 값으로 채터의 크기에 비례하여 그 값이 커진다. 반면 나머지 10개의 값들은 그전 값 또는 그전전 값에 대한 현재의 상대치를 나타내는 값들로, 안정영역에서 불안정 영역으로 넘어가는 순간을 검출하기 위해 소개되었다. 즉 안정영역에서 채터가 발달되기 시작하면 비록 그 절대치는 작아도 상대적으로 0에 가까운 값에서 진폭이 커지므로 절대치를 비교한 값들보다 상대치를 비교한 값들은 훨씬 커다란 수치를 나타내게 된다. 그러므로 절대치를 비교한 값보다, 상대치를 비교한 값이 채터가 일어나는 순간을 검출하기 용이하다. 하지만 그 다음 순간에는 현재의 값과 바로 전 단계의 값을 비교하는 지수들은 다시 작아지게 되므로, 이렇게 상대치를 비교하는 값들과 절대크기를 비교하는 값들을 적절히 혼합하여 절삭조건에 무관하게 채터를 검출할 수 있는 지표를 찾는 것이 중요하다.

아울러 채터가 발달됨에 따라 각 지표의 크기가 가장 작은 값에서 가장 큰 값으로 변해나갈 때 그 크기의 변화가 제각기 다르므로 이들을 합성해서 만든 채터검출지표에 대한 기여도도 다르게 된다. 예를 들어 $Rf_0[t]$ 가 안정된 시스템에서 0.008정도의 값을 갖고 불안정한 영역에서 0.6정도의 값을 갖는다면 이 값의 채터검출지표에 대한 기여도가 안정영역에서 1.0 정도의 값을 갖고 불안정영역에서 3.0정도의 값을 갖는 $Rf_1[t]$ 에 비하여 채터검출지표에 대한 기여도가 매우 낮을 것이다. 그러므로 각 무차원 변수의 채터검출지표에 대한 기여도를 조절하기 위해 각 무차원 변수의 채터에 대한 변화 상황을 알아내기 위한 실험이 행하여 졌다.

4. 실험에 의한 증명

4.1 실험장치

실험장치는 Fig. 5에서 보여진 바와 같이 공작물을 공구가 절삭하는 동안 절삭력과 가속도를 공구동력계와 가속도계로 측정하는 구조로 되어있다. 이때 공구동력계는 절삭력을 측정하고 가속도계는 공구홀더의 끝에 붙여져 공구홀더의 주력(배분력) 방향의 가속도를 주로 측정하게 된다. 주력방향의 가속도를 측정하는 이유는 그쪽 방향의 진동이 공작물의 표면조도에 가장 큰 영향을 미치기 때문이며, 측정된 절삭력과 가속도는 앰프를 통하여 증폭된 후 필터를 통하여 높은 주파수(1kHz 이상) 영

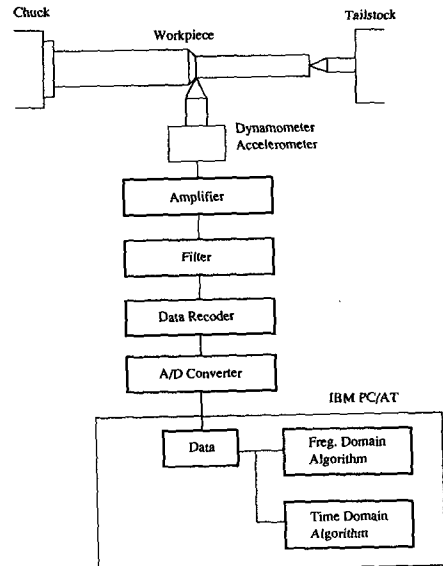


Fig. 5 Experimental set-up

역을 잘라냄으로써 잡음을 제거하게 된다. 이후 이 신호들은 좀더 자세한 해석을 위해 데이터 레코더에 저장되는 한편, A/D변환기에 의해 이산신호로 바뀌어 컴퓨터로 입력되어 해석되게 된다. 이 실험을 위해 사용된 NC 선반은 Daewoo PUMA10S 모델이고 공구동력계는 Kistler-9121이 사용되었다.

4.2 실험결과

4.2.1 채터검출지표의 완성을 위한 실험

시스템이 안정영역에서 불안정영역으로 변해갈 때 각 무차원 변수가 변해간다. 그런데 이 각각의 무차원 변수의 채터에 대한 감도(sensitivity)가 일정하지 않다. 즉 채터가 일어남에 따라 어떤 변수는 많이 변하지만 어떤 변수는 적게 변한다. 이 무차원 변수의 변화량에 따른 채터검출지표의 기여도를 정하기 위해 우선 각 무차원 변수의 절삭조건 변화에 따른 변화량을 알아보기 위한 실험이 선행되었다. 실험은 3가지가 실행되었는데 그것은 3가지 절삭조건, 즉 이송량, 절삭속도, 절삭깊이를 변화시켜 가면서 각 무차원 변수의 변화추이를 살펴 보았다. 우선 이송률을 늘려가면서 시스템이 안정영역에서 불안정영역으로 전이되어갈 때 무차원 변수의 변화를 살펴 보았다. 이것은 절삭폭 또는 절삭깊이를 증가시켜 안정영역에서 불안정영역으로 변화시켜가며 무차원 변수의 변화를 살펴본 것이다.

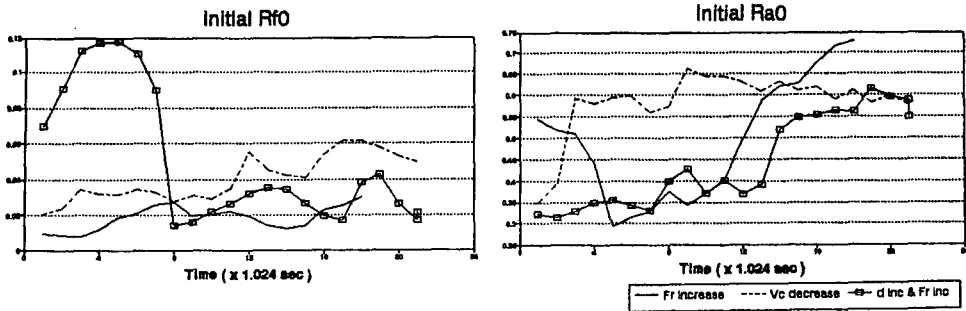


Fig. 6 Variation of Rf0, Ra0

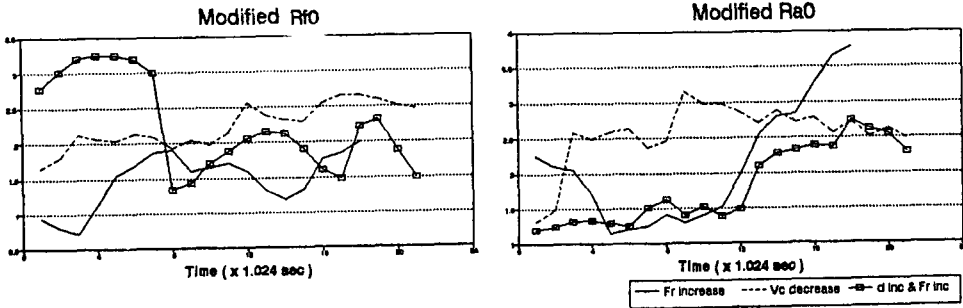


Fig. 7 Variation of modified Rf0, Ra0

또한 절삭깊이와 이송률을 늘려가며 같은 효과를 얻을 수 있으며 세번재로는 절삭속도를 줄여가면서 시스템이 안정영역에서 불안정영역으로 변해가는데 때 무차원 변수의 변화추이를 살펴보았다.

각각의 경우 Rf0와 Ra0의 변화가 Fig. 6에 주어져 있다. 그 이외의 값들은 안정영역에서 1.0 정도의 값을 갖고 불안정영역에서는 7정도의 값을 갖는데 반해 Rf0값은 0.008(극히 안정된 영역)에서 0.6(극히 불안정한 영역)까지 변화하고, Ra0의 값은 0.27(극히 안정된 영역)에서 0.7(극히 불안정한 영역)까지 변화한다. 여기서 볼 수 있듯이 Rf0의 값은 0.27(극히 안정된 영역)에서 0.7(극히 불안정한 영역)까지 변화한다. 여기서 볼 수 있듯이 Rf0 값은 70배 정도까지 변화하고 Ra0 값은 2.5배까지 변화하므로 이 변화율을 맞추어주고, 두 값 모두 안정된 영역일때는 1.0, 불안정영역일 때는 3.0~4.0정도의 값을 갖도록 로그함수와 지수함수를 취하여 다음과 같은 새로운 무차원 변수를 얻었다.

$$Rf0' = \log(Rf0 \cdot 100) + 1 \quad (17)$$

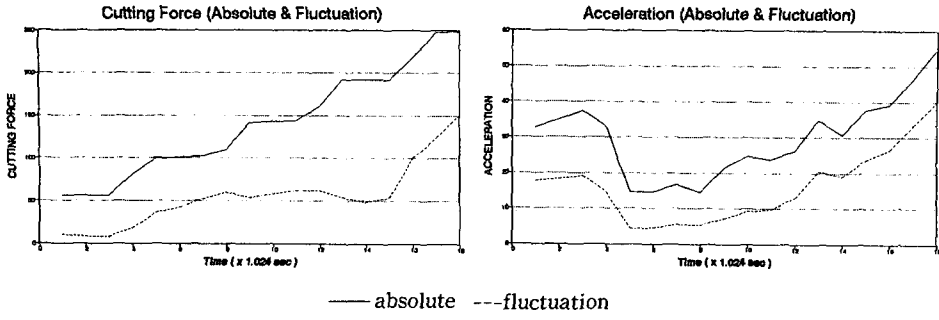
$$Ra0' = 2^{Ra0 \cdot 4 - 1} \quad (18)$$

위에서 Rf0의 경우 log함수를 사용하고, Ra0의

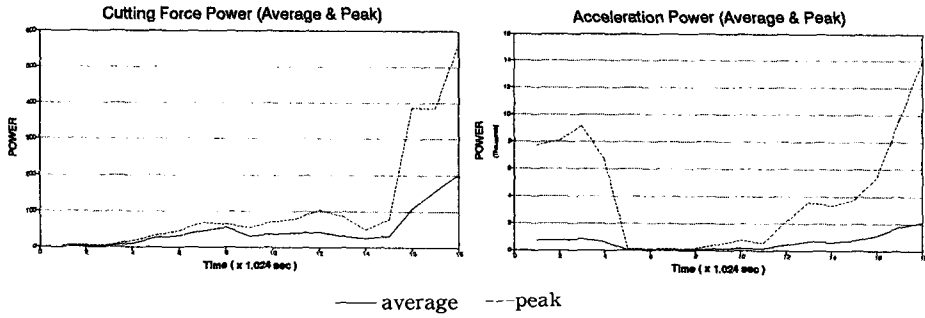
경우 지수함수를 사용한 이유는, 실험결과 Rf0의 변화는 비교적 작은값의 변화에 민감하고 Ra0의 경우는 비교적 큰 값의 변화에 민감하였기 때문이다. 위에서 처럼 Rf0, Ra0를 Rf0'와 Ra0'값으로 수정하였을 때의 그림이 Fig. 7에 주어져 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 수정된 Rf0'와 Ra0'는 의도한 대로 1.0에서 3.0~4.0사이의 값을 갖는다. 이

Table 1 Cutting conditions for inducing chatter

	Feed rate	Cutting speed	Cutting depth
Expeniment 1 Feed rate decrease	40->200 mm/min	80 m/min	1.5 mm
Expeniment 2 Cutting speed increase	120 mm/min	80->50 m/min	1.5 mm
Expeniment 3 Cutting depth decrease	120 mm/min	65 m/min	1->2 mm

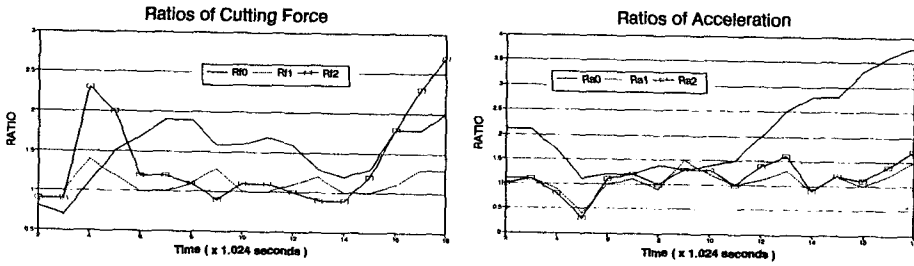


(a) Variation of time domain signal

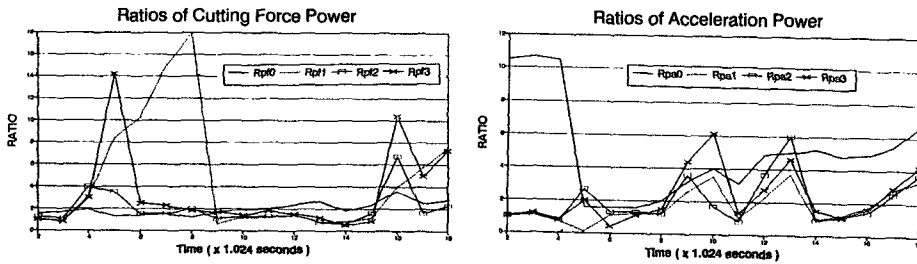


(b) Variation of frequency domain power signal

Fig. 8 (a, b) Variation of cutting force and acceleration signals in time and frequency domain during chatter development (feed rate 40- >200K mm/min., cutting speed 80 m/min., depth of cut 1.5 mm)



(c) Variation of time domain nondimensional characteristic variables



(d) Variation of frequency domain nondimensional characteristic variables

Fig. 8 (c, d) Variation of ratios of cutting force and acceleration signals in time and frequency domain during chatter development (feed Rate 40- >200 mm/min., cutting speed 80 m/min., depth of cut 1.5 mm)

제 $Rf0'$ 와 $Ra0'$ 를 포함한 14개의 무차원 변수를 구하였다. 이 값들이 절삭조건이 변함에 따라 채터가 발생할때 어떻게 변해 나가는가 하는 것을 조사하기 위하여 다음 Table 1에 주어진 조건하에서 실험이 행하여 졌다. 실험 1의 결과가 Fig. 8(a)~(d)에 주어져 있다. 이송률이 증가해감에 따라 Fig. 8.a에서 볼 수 있듯이 절삭력과 가속도가 증가해가고 있고 그에 따라 주파수영역에서 절삭력과 가속도의 파워도 증가해 가고 있다. 이에 따라 Fig. 8(a)~(d)에서 볼 수 있듯이 14개의 무차원 변수 값들도 변해간다. 그 중 가장 채터를 잘 따라가는 변수는 $Rf0'$, $Rf2$, $Ra0'$, $Rpf3$, $Rpa0$ 등으로 볼 수 있고 나머지 무차원 변수들도 어느 정도까지는 채터를 따라감을 볼 수 있다. 한가지 주시하여야 할 것은 채터의 진폭이 이송률이 증가해 감에 따라 선형적으로 증가하지 않고 어느 정도 감소하다가 다시 증가하는 경향이 있다는 것이다. 이것은 다른 절삭조건이 변화할 때도 마찬가지인데 다음과 같이 설명될 수 있다. 채터의 발생상황은 여러가지로 해석되는데 그 중 하나가 Regenerative채터이다. 공구가 깎고 지나간 그 자리를, 다음 번에 다시 공구가 깎고 지날 때에는, 진동에 의해 생긴 표면의 굴곡으로 인하여 깎아야 할 칩의 두께가 달라지므로, 공구 동역학 시스템에 가해지는 힘이 변하게 된다. 이러한 현상때문에 진동이 생기게 되고, 그 진동에 의해 공작물의 표면에서 다시 굴곡을 만들게 되며, 이와같은 현상이 반복될 때, 채터가 발생되어 계속 커지게 된다. 그러나 어느순간 inner modulation과 outer modulation의 위상이 같아지면, 깎아야 할 표면이 굴곡이 있음에도 불구하고 깎아야 할 칩의 두께는 변하지 않으므로 진동폭이 커지지 않게 된다. 이 상태를 어느 정도 유지하면서 진동의 폭이 비교적 작은 상태를 유지하다가 어느 순간 위상이 틀러지게 되고, 그로 인해 진동폭이 다시 커지는 현상을 반복하면 채터의 진폭이 증가하게 된다. 이와 같은 현상은 Fig. 8~10에 걸쳐 전반적으로 나타난다. 이 그림들을 살펴보면 일반적으로 $Rf0'$, $Ra0'$, $Rpf0$ 그리고 $Rpa0$ 가 채터를 가장 잘 나타내고 나머지 변수들도 비교적 채터를 잘 나타낼 수 있다. 하나 특이한 점은 절삭력과 가속도의 시간영역에서의 진폭을 나타내는 그래프가 주파수 영역에서의 최대 파워를 갖는 주파수에서의 크기와 비슷하게 변한다는 것이다. 이것은 3.1절에서 설명된 바와 같이 시간영역에서의 진폭

의 증가는 주파수 영역에서의 고유진동수에서 파워의 증가로 나타났기 때문이다. 이와같이 무차원 변수 중에 서로 중복되는 변수도 있으나 신뢰도를 높이기 위하여 모두 사용하였다.

위의 실험결과 다음과 같은 채터지표가 제안되었다. 우선 시간영역에서 절삭력을 나타내는 $Rf0'$, $Rf1$, $Rf2$ 와 가속도를 나타내는 $Ra0'$, $Ra1$, $Ra2$ 에 균등한 가중치를 주어 FRT, ART를 다음과 같이 구하였다.

$$FRT[t] = Rf0'[t] * Rf1[t] * Rf2[t] \quad (19)$$

$$ART[t] = Ra0'[t] * Ra1[t] * Ra2[t] \quad (20)$$

주파수영역에서는 채터를 좀더 잘 나타내는 $Rpf0$ 와 $Rpa0$ 에 가중치를 주어 다음과 같은 무차원 변수를 만들었다.

$$FRF[t] = \frac{Rpf0[t]}{3} * \log(Rpf1[t] * Rpf2[t] * Rpf3[t] + 10) \quad (21)$$

$$ARF[t] = \frac{Rpa0[t]}{3} * \log(Rpa1[t] * Rpa2[t] * Rpa3[t] + 10) \quad (22)$$

위의 식에서 $Rpf1$, $Rpf2$, $Rpf3$, $Rpa1$, $Rpa2$, $Rpa3$ 를 곱하여 3승근 제곱근을 구한 것은 기하 평균을 구하기 위함이고 \log 함수를 취한 것은 상대적으로 $Rpf0[t]$ 와 $Rpa0[t]$ 에 가중치를 주기 위함이다. \log 의 내부항에 10을 더한 것은 $Rpf1 * Rpf2 * Rpf3$ 의 곱이 1 이하로 내려가 \log 값이 음수가 됨을 방지하기 위함이다. 채터가 발생하여 진동이 생기면 절삭력과 가속도가 동시에 증가하므로 절삭력과 가속도가 동시에 어느 값 이상을 갖는다. 그러므로 다음과 같은 채터검출지표가 제안되었다.

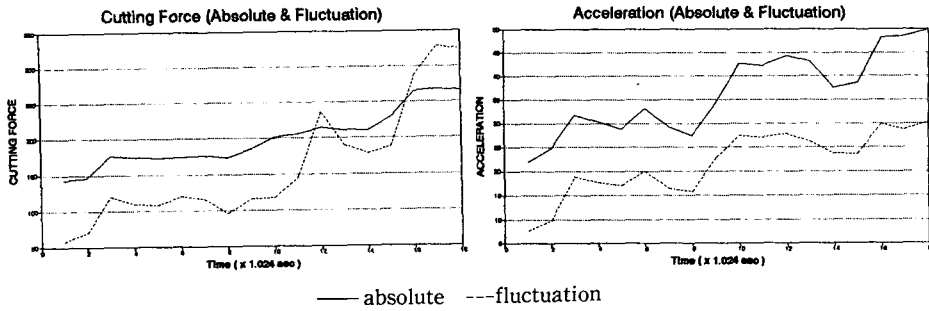
$$FRTF = FRT[t] + FRF[t] \quad (23)$$

$$AR = ART[t] + ARF[t] \quad (24)$$

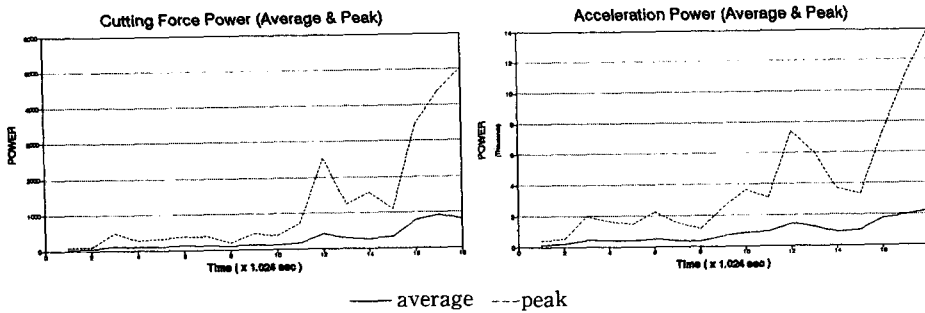
여기서, 제안된 FR과 AR이 동시에 앞의 선행실험에 의해 구해진 한계치보다 커질 때, 채터로 판정하게 된다. 선행실험에 의해 결정된 한계치의 값은 10이었다. 이 값을 가지고 다음 절에서 진동을 검출하는 실험이 수행되었다.

4.2.2 채터검출실험

이 앞절에서 제시된 채터검출지표를 이용하여 채터를 감시하는 알고리즘이 Fig. 11에 주어져 있다. 이 알고리즘 중에서 Na, Nf는 각각 가속도신호,

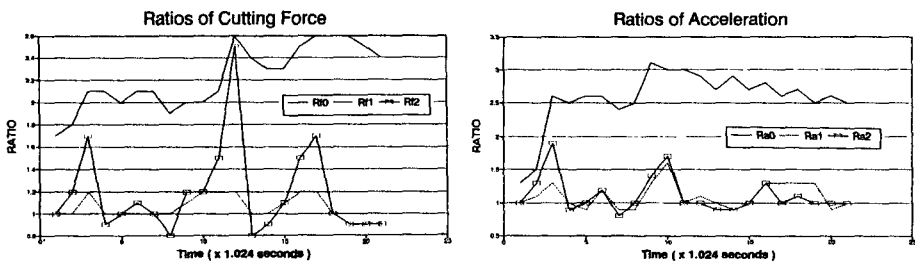


(a) Variation of time domain signal

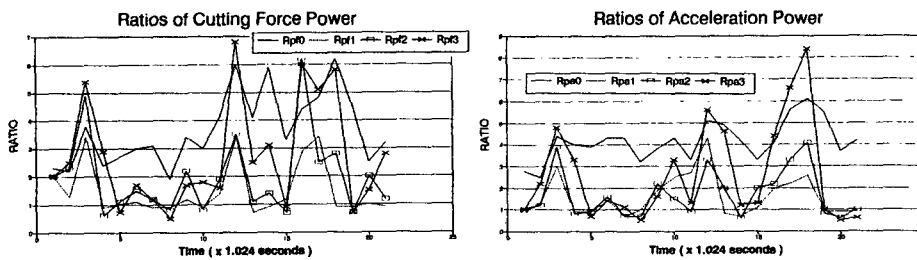


(b) Variation of frequency domain power signal

Fig. 9 (a, b) Variation of cutting force and acceleration signals in time and frequency domain during chatter development (feed rate 120mm/min., cutting speed 80->50 m/min., depth of cut 1.5 mm)

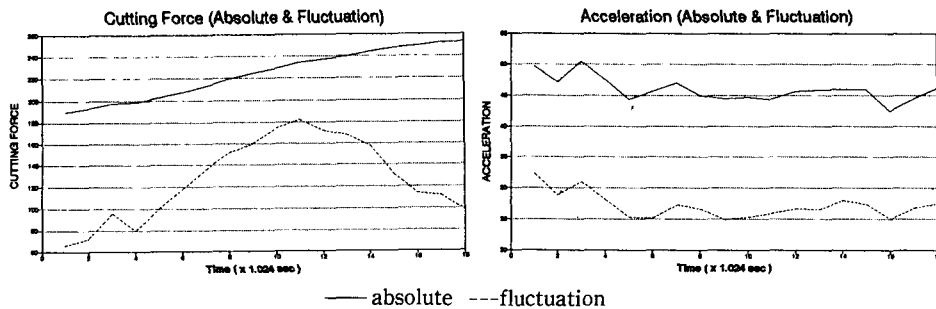


(c) Variation of time domain nondimensional characteristic variables

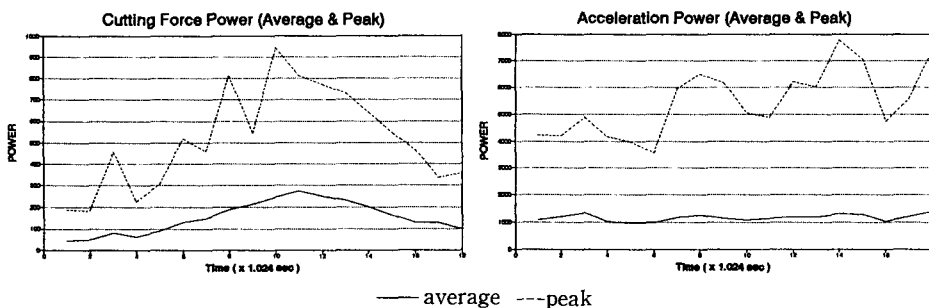


(d) Variation of frequency domain nondimensional characteristic variables

Fig. 9 (c, d) Variation of ratios of cutting force and acceleration signals in time and frequency domain during chatter development (feed rate 120 mm/min., cutting speed 80->50 m/min., depth of cut 1.5 mm)

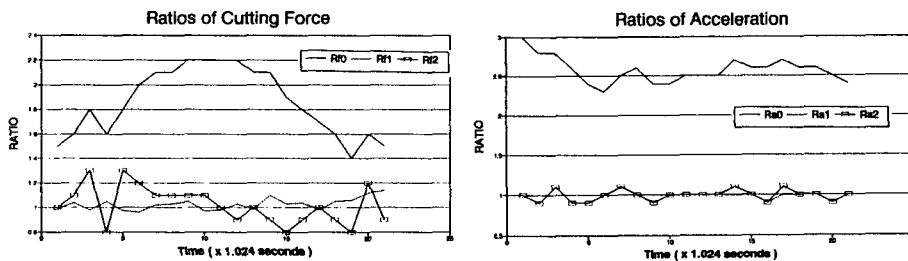


(a) Variation of time domain signal

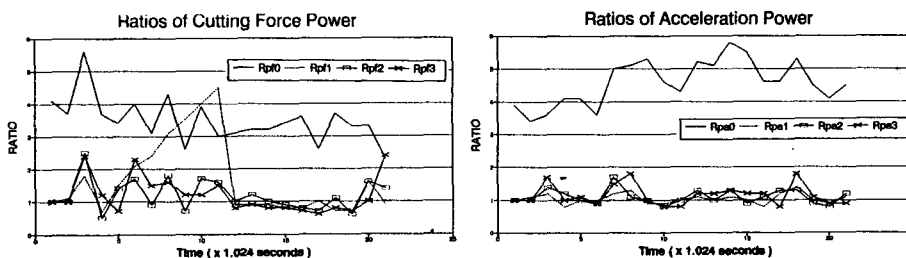


(b) Variation of frequency domain power signal

Fig. 10 (a, b) Variation of cutting force and acceleration signals in time and frequency domain during chatter development (feed rate 120 mm/min., cutting speed 65 m/min., depth of cut 1- > 2 mm)



(c) Variation of time domain nondimensional characteristic variables



(d) Variation of frequency domain nondimensional characteristic variables

Fig. 10 (c, d) Variation of ratios of cutting force and acceleration signals in time and frequency domain during chatter development (Feed rate 120 mm/min., cutting speed 65 m/min., depth of cut 1- > 2 mm)

절삭력신호에 해당하는 한계치로서 선행실험에 의하여 각각 10으로 결정되었다.

이 순서도에서 알 수 있듯이 채터검출지표가 FR과 AR이 동시에 한계치를 넘었을 때 만이 채터로써 판정을 받게 된다. 이러한 알고리즘을 검증하기 위한 실험이 행하여졌는데, 이송률, 절삭속도, 절삭깊이의 절삭 조건중 각각의 조건, 혹은 두개의 조건이 변화함에 따라 생기는 채터를 감지해 낼 수 있는가를 밝혀내는 것이 이 실험의 목적이었다. 실험결과가 Fig. 12~16에 주어져 있다. 그림에서 보여져 있듯이 채터가 발달하였을 때 FR과 AR이 한계치인 10을 넘어감으로써 채터검출을 해내고 있다. 하지만 Fig. 14의 경우 채터가 검출되지 못하였는데 이 경우 실제로 채터가 발생하지는 않았다. 이는 절삭깊이를 1 mm에서 2 mm 증가시킨 것이 채터가 검출될 만큼 과도한 절삭조건을 유도해 내지 못한 것이 그 이유로 생각된다.

여기서 고려되어야 할 사항은 Fig. 13, 15, 16에 보여졌듯이 FR과 AR 두 변수가 모두 한계치를 넘고 난 다음의 각 변수의 거동이다. 일단 채터가 감지되고 난 다음에 각 변수들이 계속 한계치 이상의 값을 갖지 못하고 다시 한계치 이하로 떨어지는 현상이 발생하는데 이는 다음과 같은 이유에서이다. 각 변수 중에 Rf1, Rf2, Ra1, Ra2, Rpf1, Rpf2, Rpf3, Rpa1, Rpa2, Rpa3는 바로 전, 또는 그 이전

의 가속도 또는 절삭력에 대한 현재의 가속도, 절삭력의 비이다. 이 값들은 안정영역에서 불안정영역으로 넘어가는 순간 커다란 값을 갖게 되므로 채터가 발생하는 순간을 포착하기 위해 사용되었다. 하지만 이 값들은 상대치를 나타내므로 일단 불안정영역으로 들어가면 전 단계에 대한 현재의 비가 큰 값을 갖지 못하기 때문에 다시 작아진다. 이 효과가 FR가 AR에 영향을 미쳐 이 값들이 한계치 이하로 내려가는 효과를 가져오게 된다. 하지만 FR과 AR이 동시에 한계치보다 커져있는 순간이 충분히 길기 때문에 이 순간 채터를 감지하고 시스템을 세울 수 있는 시간은 충분하다.

결과적으로 채터검출지수 FR과 AR이 동시에 선행실험에 의해 결정된 한계치(여기서는 10)를 넘어갈때 채터로 판정을 하고 시스템을 정지시키도록

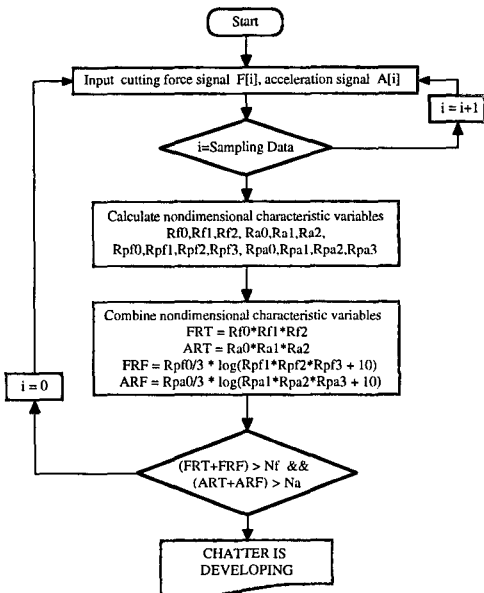


Fig. 11 Flow chart for chatter detection

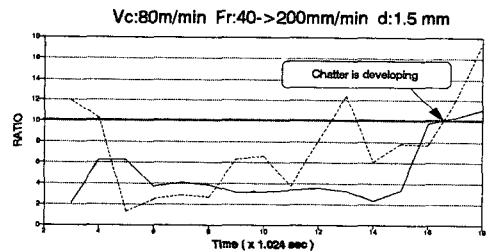


Fig. 12 Chronological variation of indexes (— FR, ---AR) as feed rate changes

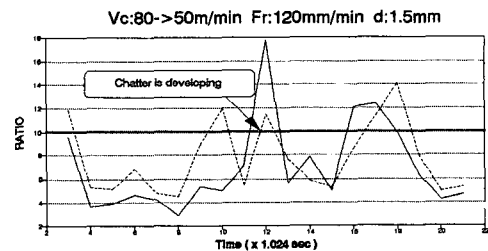


Fig. 13 Chronological variation of indexes (— FR, ---AR) as cutting speed changes

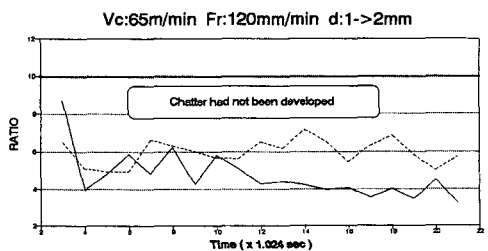


Fig. 14 Chronological variation of indexes (— FR, ---AR) as depth of cut changes

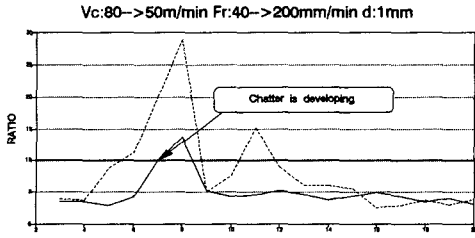


Fig. 15 Chronological variation of indexes (— FR, ---AR) as both cutting speed and feed rate changes

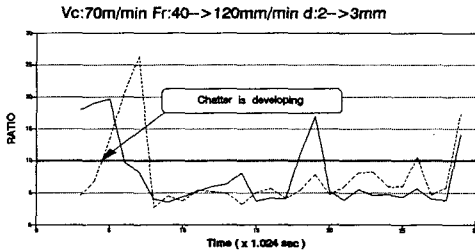


Fig. 16 Chronological variation of indexes (— FR, ---AR) as both feed rate and depth of cut changes

하였는데 실험결과 실제 채터가 발생하는 시기를 매우 잘 포착하였다.

5. 결 론

선삭에서 채터발생을 실시간으로 검출하기 위해 서 공구동력계와 가속도계의 두가지 센서를 사용하여 “실시간 채터검출 알고리즘”을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 절삭과정이 안정영역에서 불안정영역으로 전이함에 따라 절삭력과 가속도신호의 절대값과 진폭이 커지는데 매시간마다 표본화 데이터의 평균값을 취함으로써 전체적인 경향을 뚜렷하게 볼 수 있었다.

(2) 불안정영역으로 전이함에 따라 FFT power spectrum 상에서 큰 피크치의 파워가 생기는데 대폭폭마다의 평균값을 취함으로써 전체적인 경향을 뚜렷하게 볼 수 있었다.

(3) 절삭력과 절대값과 진폭의 평균값 변화경향은 상이하였으나, 가속도의 절대값과 진폭의 평균값 변화 경향은 매우 비슷하게 나타났다.

(4) 불안정영역으로 전이함에 따라 FFT power

spectrum에서 전체 파워의 평균값은 증가하고, 전체 파워 평균값과 피크주파수 대역 파워값과의 비율도 커진다.

(5) 절삭조건과 관계없이 채터발생을 판별하기 위해 다음과 같은 불안정영역 경계 무차원 특성변수를 얻었다.

- ① 현 단계 표본화 데이터 절대값 평균에 대한 진폭 평균의 비,
- ② 한 단계 전 표본화 데이터의 절대값 평균에 대한 현 단계 절대값 평균의 비,
- ③ 한 단계 전 표본화 데이터의 진폭 평균에 대한 현 단계 진폭 평균의 비,
- ④ FFT power spectrum상의 전체 파워 평균에 대한 피크주파수 대역의 파워비,
- ⑤ 한 단계 전 표본화 데이터의 파워 평균에 대한 현 단계의 파워 평균의 비,
- ⑥ 피크주파수 대역에서 한 단계 전 표본화 데이터의 파워에 대한 비,
- ⑦ 피크주파수 대역에서 두 단계 전 표본화 데이터의 파워에 대한 비,

(6) 위에서 밝힌 무차원 특성변수에 가중치를 주어 생성한, 채터발생을 실시간으로 검출할 수 2개의 무차원 변수 FR, AR을 개발하였다.

(7) 이 두개의 무차원 변수가 선형실험에 의하여 결정된 한계치를 동시에 넘어갈 때 채터로 판정하여 시스템을 정지시키도록 하였는데 실험결과 이 알고리즘이 매우 잘 작동하였다.

참고문헌

- (1) Marui, E. Ema S., and Kato, S. 1983, “Chatter Vibration of Lathe Tools. Part1 : General Characteristics of Chatter Vibration,” *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 105, May, pp. 100~106.
- (2) Marui, E., Ema, S. and Kato, S., 1983, “Chatter Vibration of Lathe Tools. Part2 : On the Mechanism of Exciting Energy Supply,” *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 105, May, pp. 107~113.
- (3) Jiluo Zhou, 1987, “On the Cutting Stability of the Lathe under Different Working Conditions,” *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 27, No. 3, pp. 351~356.

- (4) Pandit, S. M., Subramanian, T. L. and Wu, S. M., 1975, "Modeling Machine Tool Chatter by Time Series," *ASME Journal of Engineering for Industry*, February, pp. 211~215.
- (5) Pandit, S. M., Subramanian, T. L. and Wu, S. M., 1975, "Stability of Random Vibrations with Special Reference to Machine Tool Chatter," *ASME Journal of Engineering for Industry*, February, pp. 216~219.
- (6) Rahman, M., 1988, "In-Process Detection of Chatter Threshold," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, February, pp. 44~50.
- (7) Eman, K. and Wu, S. M., 1980, "A Feasibility Study of On-Line Identification of Chatter In Turing Operations" *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 102, November, pp. 315~321.
- (8) Jemielniak K. and Widota, A., 1984, "Suppression of Self-Excited Vibration by the Spindle Speed Variation Method," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 24, No. 3, pp. 207~214.
- (9) Liu, C. R. and Liu, T. M., 1985, "Automated Chatter Suppression by Tool Geometry Control," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 107, May, pp. 95~98.
- (10) Brown, S., 1975, "Signal-Processing for the Determination of Chatter Threshold," *Annals of the CIRP*, Vol. 24, pp. 315~320.
- (11) Cho D. W. and Eman, K. F., 1988, "Pattern Recognition for On-Line Chatter Detection" *Mechanical System and Signal Processing*, 2(3), pp. 279~290.
- (12) 中澤弘 三好由記博, 1978, "びびり安定限界の時系列 豫測法(第1報)," *精密機械* 44巻 9號, pp. 29~35.
- (13) 中澤弘 三好由記博, 1979, "びびり 振動發生限界の検出(第1報)," *精密機械* 45巻 11號, pp. 73~78.
- (14) 민현기, 1989, "절삭시스템의 이상진단에 관한 연구," 서울대학교 공학석사 학위논문.
- (15) Geoffrey Boothroyd, 1981, *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, 1981, Mc Graw Hill, International Student Edition.
- (16) 임제택, 1992, 디지털신호 처리의 기초, 이두수 공편-회중당.
- (17) Gorge Godwin, 1979, *Vibration Monitoring and Diagonosis*, Ralph A. Collacott and Limited John Wiley & Sons, Inc. The Pitman Press.
- (18) Pandit, S. M., 1983, *Time Series and System Analysis with Applications*, John Wiley & Sons, Inc.