

절삭력을 이용한 채터의 감지에 관한 연구

윤재웅*

A Study on the Detection of Chatter Vibration using Cutting Force Measurement

Jae-Woong Youn*

Abstract

In-process diagnosis of the cutting state is essential for the automation of manufacturing systems. Especially, when the cutting process becomes unstable, it induces self-excited vibrations, a frequent cause of poor tool life, rough surface finish, damage to the workpiece and the machine tool itself, and excessive down time. To ensure that the cutting process maintains stable, it is highly desirable to have the capability of real-time monitoring and controlling chatter. This paper describes the detection method of chatter vibration using cutting force in turning process. In order to detect a chatter vibration, the dynamic fluctuation of radial force is analyzed since this component is sensitive to the chatter. The envelope signal of radial force has been calculated by the use of FIR Hilbert transformer, and it was useful to classify the chatter signal from the dynamically unstable circumstances. It was found that the mode and the mode width were closely correlated with the chatter amplitude as well. Finally, back propagation(BP) neural networks have been applied to the pattern recognition for the classification of chatter signal in various cutting conditions. The validity of this system was confirmed by the experiments under the various cutting conditions.

Key Words : 채터(Chatter), 감지방법(Detection Method), 포락 신호(Envelope Signal), 절삭력(Cutting Force), 모드 선도 (Mode Diagram), 인공신경망(Artificial Neural Network)

1. 서론

채터(Chatter)라고 알려져 있는 자려진동은 주로 절삭과 정에서 공작기계 및 공구와 칩사이의 상호작용에 의해 야

기되며 일반적으로는 매우 큰 진폭을 갖는다. 채터의 발생은 전형적으로 절삭부의 불안정한 상태에서부터 시작되는데, 절삭부가 불안정하게 되는 요인으로는 공작물 재료의 불균일성, 공작물 표면상태의 불균일성, 생성되는 칩 형태

* 대구대학교 자동차·산업·기계공학부

의 변화, 절삭유의 성능저하 등으로 인한 공작물과 칩 접 측면에서의 마찰상태 변화 등이 있다. chatter의 방지를 위해, 높은 이송(Feedrate)과 큰 절입량(Depth of cut)은 실질적으로 공작기계의 상태에 따라 제한되고 있다. 한편, 재생채터(Regenerative chatter)는 기계가공에 있어서 가장 중요한 형태의 자력진동(Self-excited vibration)이라고 할 수 있다. 이 현상은 공구가 이전 절삭에서 남은 진동흔적과 같이 어떤 거칠기를 가지고 있는 표면을 절삭할 때 발생한다.⁽¹⁾ 이러한 경우, 절삭깊이의 변화에 따른 절삭력의 변동으로 인하여 진동이 야기되며, 그 결과 가공면에는 다시 진동의 흔적이 남게되어, 채터는 공작기계 또는 공작물의 가공정밀도 관점에서 바람직하지 않은 현상이라 할 수 있다. Fig. 1과 Fig. 2는 각각 전형적인 공작기계의 안정도 차트(Stability chart)와 재생채터의 기본원리를 보여주고 있다.⁽²⁾

절삭중 공정의 불안정으로 인해 자력진동이 발생하게 되면, 공작기계 및 공구계에 피해를 줌은 물론, 공구의 수명이 짧아지고, 공작물의 표면조도가 불량하게 되어 전체적으로 생산성과 가공 정밀도가 나빠지게 된다. 따라서, 가공공정의 안정성을 유지하기 위해서는 가공중 채터의 실시간 감지 및 채터의 방지가 매우 중요하다고 할 수 있다.

채터의 감지를 위해 절삭력, 가속도 또는 음향 신호의 주파수 분석을 이용한 많은 연구가 진행되어 왔다.^(3,4) Subramanian 등은 채터 발생시 진동의 진폭이 크게 증가함을 보였고⁽⁵⁾, Nakazawa 등은 음향과 가속도 신호의 주기성을 파악하여 채터를 감지하는 방법에 대해 소개하였다.⁽⁷⁾ 그러나 대부분의 연구는 공구/공작물계의 동적 특성을 파악하는 데 관점을 두고 연구를 수행하였다. 최근에, 채터를 의미하는 여러 가지 신호와 현상 등을 종합하여 채터를 감지하기 위해 새로운 방법으로서 인공지능경망을 이용하는 방법이 제안되었고,⁽⁶⁾ 채터의 감지 및 제어를 위

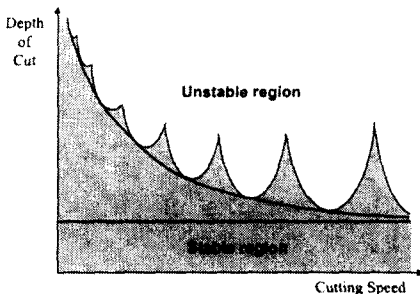


Fig. 1 Typical stability chart for a machine tool

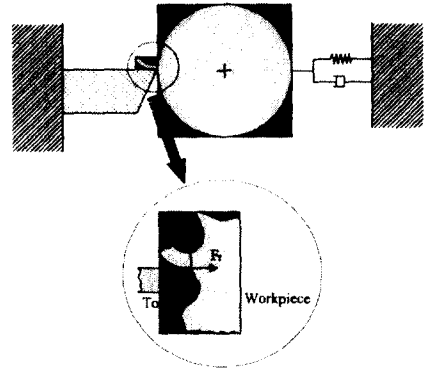


Fig. 2 Schematic diagram of chatter mechanism

해 현장 숙련공의 노하우(Know-how)를 수집하여 퍼지논리로 구현하는 연구도 소개된 바 있다.⁽⁹⁾ 이 연구에서는 채터를 나타내는 특징 신호로서 각 절삭력 비율(Force ratio)의 변화를 체크하였다. 그러나 이상의 연구에서와 같이 단순히 절삭력의 진폭변화, 주파수 분석, 그리고 기타 절삭력비 등을 고려한다면, 절삭조건 및 칩상태의 변화 혹은 구성인선의 발생 등과 같은 가공환경의 변화로부터 채터 신호만을 추출하기가 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 다양한 가공환경의 변화에서도 신뢰성 있는 채터의 감지 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 상대적으로 채터를 가장 잘 반영하는 배분력 성분의 취득을 통한 신호처리에 대해 소개한다. 다양한 가공조건 및 환경변화를 인위적으로 발생시켜 실험을 통해 검증한 결과 본 방법의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

2. 채터에서의 절삭력

가공중 채터가 발생하면, 절삭조건이 매우 낮다고 하여도 Fig. 3 (c)에서와 같이 절삭력의 세 분력 모두가 크게 진동하게 된다. Fig. 3 (a)는 공작물의 채터마크를 이진 영상(Binary image)으로 보여주고 있다. 일반적으로 채터가 발생하는 경우에 채터의 주파수는, Fig. 3 (b)에서와 같이, 단일 피크(peak)의 형태로 나타나지 않고 주변에 약간씩 주파수가 다른 피크가 존재한다. 이 때의 주파수 성분 중 어떤 성분들은 공구-공작물계의 계산된 고유진동수 보다 높고, 다른 어떤 성분들은 고유진동수 보다 낮게 되어 인접한 진동주파수의 결과로 Fig. 3 (c)에서와 같이 맥놀이 현상(Beat phenomena)이 뚜렷하게 나타나고 있다. 채터가 지속되면 경우에 따라 이러한 맥놀이 현상은 없어지면서

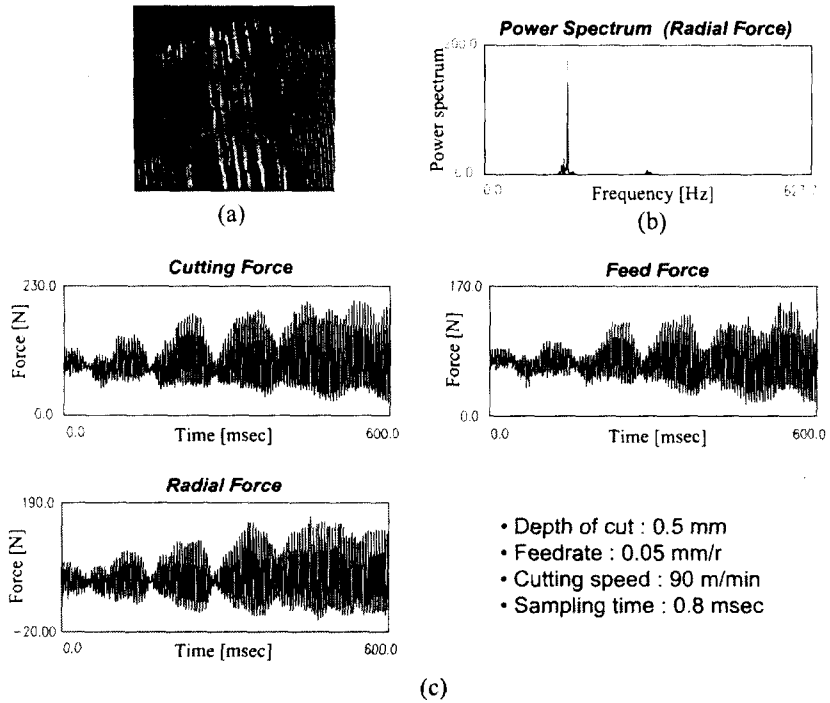


Fig. 3 Fluctuations of cutting force in chatter

(a) Binary image of workpiece surface

(b) Power spectrum of radial force

(c) Cutting force components

단일 주파수로 계속 진동을 하게 되거나, 또는 맥놀이 현상이 지속되기도 하지만 대부분의 실험에서 채터 초기에는 맥놀이 현상이 발생함을 알 수 있었다. 그러나, 본 연구에서는 이와 같은 맥놀이 현상의 존재와 관계없이 채터 신호의 구별이 가능하도록 신호처리 알고리즘을 제안하고자 한다.

절삭조건의 변화 및 가공환경의 변화에 대해 주분력과 이송분력은 민감하게 변화하므로 본 연구에서는 배분력을 감지대상으로 하였다. 일반적으로 배분력은 절삭환경의 변화에는 둔감하지만, Fig. 3 (c)에서와 같이 채터 발생에 대해서는 진동신호가 분명하게 나타나고 있으므로 적절한 선택이라 판단된다.

일반적으로 채터의 감지를 위하여 공구-공작물계에 대한 동적 특성을 파악하고, 고유진동수 근처의 진동신호를 포착하여 채터를 감지하기도 하지만, 이는 가공전 공구/공작물계의 동적 특성을 미리 알고 있어야 하므로 현실적으

로 거의 불가능하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 주파수 특성을 고려하지 않고 신호의 진폭 변화만을 이용하여 채터를 감지하고자 한다. 채터가 발생하는 경우, 절삭력의 가장 현저한 차이는 진동 진폭이 커진다는 사실이다. 본 연구에서는 절삭력을 이용하여 채터를 감지하기 위하여 배분력 신호의 포락신호(Envelope signal)를 이용하고자 한다. 이 방법은 절삭력의 주파수 특성에 무관하게 진폭의 변화를 추적하여 감지함으로써 시스템의 동적특성을 미리 알 필요가 없다는 장점이 있다. 뿐만아니라, 계속적으로 변화하는 절삭환경에 무관하게 실시간(Real-time) 감지가 가능하다.

3. 신호처리 방법

포락 신호는 Hilbert 변환을 통해 계산된다. 시간영역에서 변화되는 신호 $x(t)$ 의 Hilbert 변환된 신호 $\tilde{x}(t)$ 는 다

음과 같이 정의된다.⁽¹⁰⁾

$$\tilde{x} = H[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du \quad (1)$$

따라서 $\tilde{x}(t)$ 는 $x(t)$ 와 $(1/\pi)$ 의 콘볼루션(Convolution)이 되어 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tilde{x} = c(t) * \left(\frac{1}{\pi}\right) \quad (2)$$

$z(t) = x(t) + j \tilde{x}(t)$ 라고 할 때, $z(t)$ 는 크기함수(Magnitude function) $A(t)$ 와 위상함수(Phase function) $\theta(t)$ 로 정의할 수 있고, 이 때 $A(t)$ 는 초기 신호 $x(t)$ 의 포락을 의미하고, $\theta(t)$ 는 $x(t)$ 의 순간적인 위상이라 할 수 있다. 따라서 $z(t)$ 는

$$z(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (3)$$

where $A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)}$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left[\frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} \right]$$

가 된다.

Hilbert 변환은 Fourier 변환 또는 Hilbert 변환을 통해서 계산되어진다.⁽¹¹⁾ 그러나 이러한 방법은 일정한 시간 동안 절삭력 신호를 취득한 후 저장하여 계산하여야 하기 때문에 실시간의 적용에 문제가 있다고 할 수 있다. 실시간 변환기인 Hilbert 변환기(Transformer)를 사용하게 되면 포락 신호에 약간의 잡음(Noise)이 실리긴 하지만 실시간으로 포락 신호를 계산할 수 있기 때문에 Hilbert 변환기를 이용하여 실시간으로 배분력의 포락 신호를 계산하였다.

이산(Discrete) 함수 $\tilde{x}[n]$ 은 다음과 같이 콘볼루션 적분을 통하여 구할 수 있다.

$$\tilde{x}[n] = \sum_{m=0}^{\infty} h[n-m]x[m] \quad (4)$$

그리고

$$A[n] = \sqrt{x^2[n] + \tilde{x}^2[n]} \quad (5)$$

이 된다. 이 식은 이산 콘볼루션 적분이 되며, 전달함수(Transfer function) $h(n)$ 은 다음과 같은 FIR(Finite impulse response) 이산 Hilbert 변환기로 계산할 수 있다.

$$h[n] = \begin{cases} \frac{I_0\{\beta(1 - [(n-n_d)/n_d]^2)\}^{1/2}}{I_0(\beta)} \left\{ \frac{2 \sin^2[\pi(n-n_d)/2]}{\pi(n-n_d)} \right\} & \text{for } 0 \leq n \leq M \\ h[n] = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 I_0 는 영차 베셀함수(Zero-order modified Bessel function)를 의미하며, M 는 Hilbert 변환기의 차수로서 18로 설정하였다(Type III FIR generalized linear phase system). 한편, β 와 n_d 는 상수로 주어지는 값으로서 $n_d = M/2$, $\beta = 2.629$ 로 설정하였다.

Fig. 4 (a)는 채터 발생시의 배분력 신호이다. 포락 신호를 계산하기 전에 배분력의 평균값을 계산해야 한다. 평균값 계산의 의미는 축적된 데이터를 필요로 하므로 실시간 감지용으로는 적당하지 않다. 또한, 이러한 축적된 데이터의 단순 평균값은 절삭조건 등의 변화에 따라 전체적인 레벨의 변화가 발생하므로 절삭환경의 변화에 의한 배분력 레벨의 변화에 대해 대처할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 이동평균값을 계산함으로써 데이터의 축적없이 실시간으로 평균값을 구하고, 이는 배분력의 레벨 변화도 추종할 수 있는 장점을 갖게 된다. 이러한 이동평균값의 계산은 다음과 같다.

$$y[i] = \frac{1}{2 \cdot M + 1} \sum_{k=-M}^M x[i-k] \quad (7)$$

여기서 $y(i)$ 는 특정한 시간에서 배분력 신호 $x(i)$ 의 이동평균값이다. Fig. 4 (b)는 실시간에서 이동평균된 배분력 신호를 보여주고 있다. 이렇게 계산된 이동평균값을 이용하고, 요동(Fluctuation)하는 배분력의 Hilbert 변환기를 통과한 신호는 Fig. 4 (c)와 같다. 그림에서와 같이 고주파 잡음이 실린 포락 신호를 얻을 수 있는데, 이는 실시간 변환을 하면서 불가피한 현상이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4 (d)와 같이 변환된 포락 신호를 한번 더 이동평균을 구하여 계산된 포락 신호의 필터링을 수행하였다.

이러한 모든 공정은 실시간으로 수행된다. 실시간으로 계산하는 도중에 두 개의 에벨롭 신호의 차이가 사전에 정의된 문턱값(Threshold value) 보다 더 커지게 되면 그것은 예기치 않은 절삭력의 진동을 의미한다. 그러나 이러한 절삭력의 동적 요동은 구성인선(Built-up edge), 절입량이 큰 경우 등에서 발생하는 칩절단(Segmentation) 신호 및 기타 주기적으로 변동하는 다른 신호에 의해서도 관측되므로 이를 채터와 구분하는 작업이 필요하다. 본

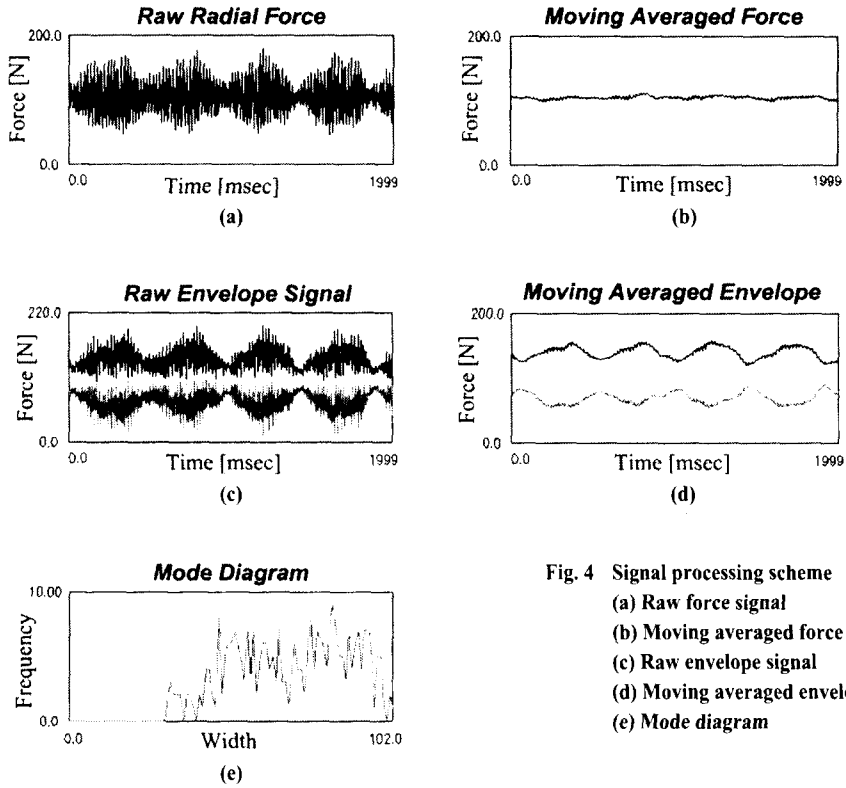


Fig. 4 Signal processing scheme
 (a) Raw force signal
 (b) Moving averaged force
 (c) Raw envelope signal
 (d) Moving averaged envelope signal
 (e) Mode diagram

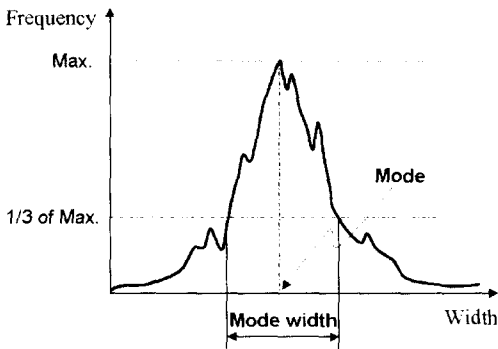


Fig. 5 Typical mode diagram

연구에서는 채터 신호를 다른 주기적 신호 및 절삭력이 크게 요동되는 다른 신호와 구분하기 위해 포락 신호의 분포를 볼 수 있는 모드 선도(Mode diagram)라는 것을 제안하고자 한다.

Fig. 5는 가공중 실시간으로 계산된 두 포락 신호 사이의 거리를 추적하여 그린 모드 선도로서 x축은 두 포락 신호의 상대적 거리(Gap width)를 의미하고, y축은 특정 시간 동안 계산된 그 거리의 빈도수(Frequency)를 의미한다.

본 연구에서는 이 그래프에서 모드(Mode)와 모드폭(Mode width)이라는 두 개의 특성을 정의한다. 모드는 이 그래프에서 빈도수가 가장 많은 두 포락 신호의 상대적 거리를 의미하고, 이는 그 거리의 평균값과는 다른 의미를 갖는다. 한편, 모드폭은 모드에서의 빈도수의 1/3되는 빈도수의 폭을 의미한다. 즉, 채터가 발생한 경우에는 정상적인 절삭이 진행될 때에 비해 절삭력의 변화폭이 크므로 두 포락 신호 사이의 거리가 커져 모드 값은 커지게 된다. 한편, 단순히 절삭력의 요동폭이 큰 경우와 구분하기 위해 모드폭은 두 포락 신호사이의 거리의 분산 정도를 의미한다. 가공중 채터가 발생하게 되면 절삭력의 진동 진폭이 커질 뿐만아니라 그 진폭의 크기도 변화하므로, 이는 모드폭을 넓게 만들도록 작용하게 된다. 또한, 모드의 크기는 상대적인 채터의 강도를 의미하게 된다. 따라서 이

Table 1 Structure of neural network

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| Structure of neural network | 2-4-3-1 (2 hidden layers) |
| Learning rate | 0.7 |
| Momentum rate | 0.9 |
| Shape factor | 1.0 |
| Error bound | 0.01 |
| Number of sample patterns | 65 |

두 개의 특성값은 채터를 잘 묘사할 수 있다고 판단되며, 이는 다른 진동신호나 절삭력의 단순 변동이 큰 경우(구성인선 등)와 차별화되어 나타나기 때문에 채터만을 감지할 수 있는 값으로 판단된다. Fig. 4 (e)의 모드 그래프에서는 모드와 모드폭이 각각 83과 66으로서 이는 채터라는 의미한다고 할 수 있다.

채터의 감지를 위해서는 모드 선도로부터 모드값과 모드폭에 대한 문턱값(Threshold value)의 설정이 선행되어야 한다. 그러나 그와 같은 값의 설정은 가공조건, 공구/공작물 특성 등 제반 가공환경의 변화에 민감하기 때문에 인공지능망의 학습기능을 이용하여 문턱값이 자동으로 설정될 수 있게 하였다. 본 연구에서는 다양한 실제 사용에 있어서 신뢰성이 검증된 바 있는 에러의 역전파(Back propagation) 알고리즘을 이용하여 인공지능망을 구축하였다.⁽¹²⁾ 즉, 채터가 발생한 경우에, 인공지능망의 입력 특징값(Input feature)은 각각 모드와 모드폭 2개의 값으로 하였고, 목표값(Target value)은 채터가 발생한 경우에 0.9, 정상적인 절삭이 이루어진 경우를 0.1로 하여 인공지능망을 미리 학습시켰다. 학습에 이용된 인공지능망의 구조 및 기타 변수들은 Table 1과 같다.

4. 실험

인위적인 채터의 발생을 위해 실험은 세장비가 큰 공작물을 척에 고정시키고 심압대를 사용하지 않거나, 두께가 얇은($t < 3mm$) 파이프의 외경가공을 수행하였다. 이 때 적절할 공구길이를 선정함으로써 초기에는 채터가 없다가 가공이 진행되면서 채터가 발생하도록 하였다. 공작물은 SM45C 강이었고, 공구 홀더는 다양하게 바꾸어가며 특정한 공구형상에 의존하지 않도록 하였으며, 공작물의 길이는 약 150mm ~ 250mm 정도로 다양하게 수행하였다. 실험중, 채터가 심각하게 발생하지 않도록 하기 위해

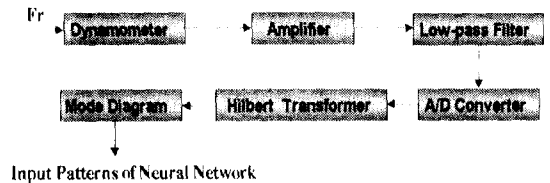
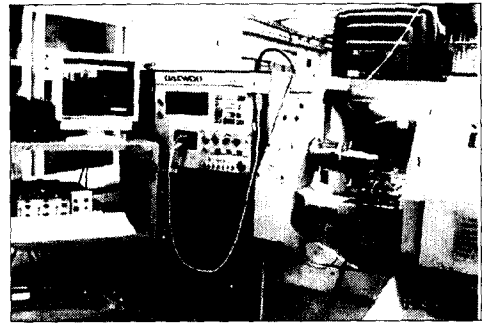


Fig. 6 Experimental setup for chatter detection

절삭조건은 비교적 약하게 하였다. 즉, 절입량이나 이송량이 너무 큰 경우에는 공작물의 안정성이 유지되지 않기 때문에 공작물은 비교적 안정되면서 채터가 발생할 수 있는 가공조건을 선택하였다.

배분력의 측정을 위해서는 압전형의 공구동력계(KISTLER 9257B & Charge amplifier)를 사용하였고, 이 신호는 1.2kHz의 저주파 통과 필터(Low-pass filter)를 통해 정련되었고, 이는 2kHz의 샘플링 주파수로 A/D 변환되었다. 일반적으로 채터는 100Hz ~ 500Hz 사이에서 발생되므로 이 정도의 샘플링 주파수는 채터감지에 충분하다고 판단된다. Fig. 6은 실험장치와 대략적인 신호처리의 순서도이다.

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 채터의 발생 및 진행을 보여주고 있다. 모드 선도를 그리고 채터를 실시간으로 감지하기 위해 300개의 데이터를 이용하였다. 이것은 채터의 감지를 위해 채터의 발생 후 150msec의 시간이 필요함을 의미한다. 그러나 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 채터의 실질적인 발생 시점은 상당히 애매하기 때문에 이 정도의 시간 지연은 큰 의미가 없다고 판단되며, 실시간 감지가 가능하다고 판단된다.

Fig. 8은 이송량이 0.05mm/r에서 0.1mm/r으로 변할 때의 배분력과 이동평균된 포락 신호, 그리고 모드 선도를

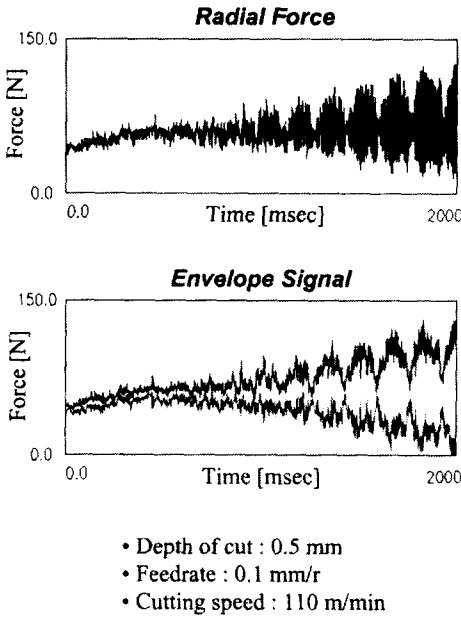


Fig. 7 Onset and development of chatter

보여주고 있다. 배분력 혹은 포락 신호의 단순한 요동량(Fluctuation)만을 이용해 chatter를 감지하고자 한다면 그림과 같이 절삭조건이 가공중 바뀌는 경우에 적절하게 감지할 수 없을 것이다. 그러나 모드 선도를 보면 가공조건이 바뀌지 않는 경우의 모드선도와 유사함을 알 수 있다. 이는 모드선도가 배분력의 이동평균값을 기준으로 한 두 포락신호의 차이를 이용하여 만들어졌기 때문이다.

Fig. 9는 각각 불연속형의 칩(Discontinuous)이 가공중 발생할 때 나타나는 신호로서 칩의 길이가 약 25mm 보다 짧은 경우(Loose chip)와 약 100mm 이하의 길이를 갖는 칩(short chip)에 대해 신호를 추출하였다. 그림에서 보는 바와 같이 칩의 파단 신호가 절삭력에 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이 경우 절삭력의 요동때문에 단순히 절삭력의 요동폭만을 이용하여 chatter를 감지하거나 혹은 절삭력의 주파수 특성을 고려하는 경우에 잘못 판단할 수 있다. 뿐만아니라, 두 포락 신호 사이의 편차만을 이용하여 chatter를 감지한다면, 특히 짧은 칩(Short chip)이 발생하는 경우에는 chatter로 오인할 수 있다. 그러나 모드 선도에서는 거의 정상적인 가공이 일어날 때의 신호와 유사하기 때문에 chatter 신호와 구분될 수 있다. 한편, 이와 같은 칩 파단 신호는 절삭량에 따라 절삭력 신호에 나타날 수도 있고

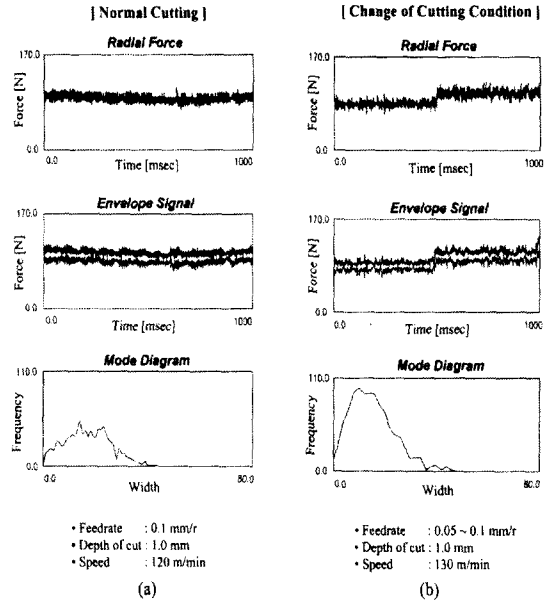


Fig. 8 Envelope signal and mode diagram
(a) Normal cutting
(b) Change of cutting condition(feedrate)

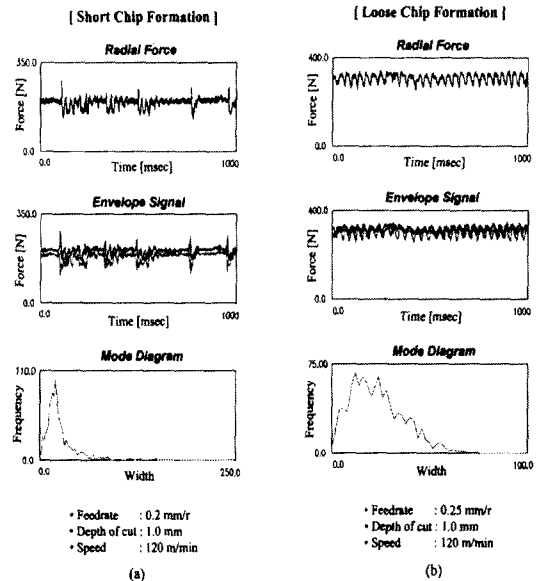


Fig. 9 Envelope signal and mode diagram
(a) Short chip (25mm ≤ chip length < 100mm)
(b) Loose chip (chip length < 25mm)

그렇지 않을 수도 있는 신호이므로 채터의 감지에는 무관하다고 할 수 있다.

Fig. 10은 파복되지 않은 초경공구의 경사면이 심하게 마멸된 상태로 가공한 결과이다. 좀 더 상세한 고찰이 필요하겠지만, 이와 같이 경사면이 심하게 마멸된 경우에 낮은 이송속도($< 0.1 \text{ mm/rev}$)에서 가공칩의 일부가 공구의 마멸된 경사면에 응착되는 모습을 볼 수 있었다. 이는 공구의 절삭날에 구성인선이 발생한 경우의 신호와 동일하다. 여기에서 절삭력 신호가 매우 크게 요동하고 있음을 알 수 있는데, 이 때 역시 절삭력의 절대 요동폭 혹은 두 포락 신호의 편차만으로 채터를 감지하고자 한다면 잘못된 결과를 초래할 수도 있다. 그러나 모드 선도를 보면 역시 정상적인 절삭신호와 유사하기 때문에 채터로 오인하는 경우를 방지할 수 있다. Fig. 11은 일반적인 채터 신호를 보여주고 있다. 채터가 발생하는 경우에 배분력은 상당

히 큰 진폭으로 요동하며, 두 포락 신호의 편차도 크다. 또한, 모드 선도에서는 수평축이 상대적으로 크며 수직축은 짧다. 이는 절삭신호의 진폭이 크게 변화함으로 인해 두 포락 신호의 편차가 넓은 분포를 가지며, 따라서 각각의 폭에 대한 빈도수가 적어지기 때문이다

Fig. 12는 다양한 가공조건에서 취득된 배분력을 이용하여 도시한 모드 선도이다. 각각의 모드 선도는 같은 스케일로 구성되어 있기 때문에 채터 신호가 다양한 가공조건에서의 신호와 쉽게 구분될 수 있다. 즉, 일반적으로 정상적인 가공이 일어나는 경우, 혹은 채터가 아닌 다른 경우에는 모드선도의 그래프 형상이 좁고 높게 나타나는 반면, 채터가 발생한 경우의 신호는 매우 낮고 넓게 퍼진 형상을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 12의 마지막 채터 신호는 기존의 다른 채터 신호와 약간 차이가 있음을 볼 수 있으며, 그 때의 배분력

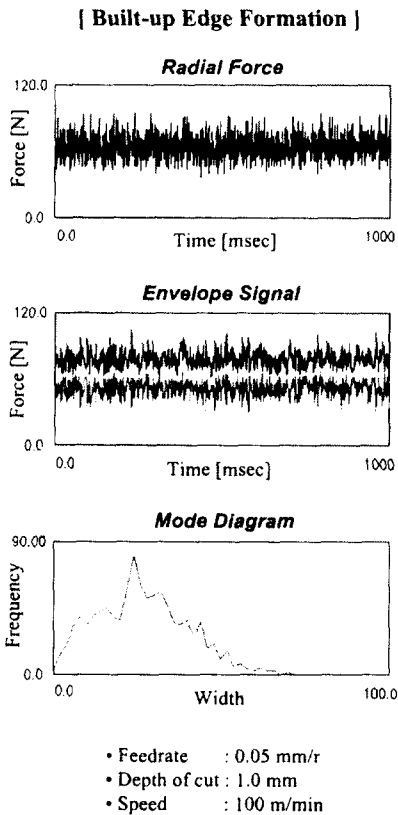


Fig. 10 Envelope signal and mode diagram in the presence of built-up edge

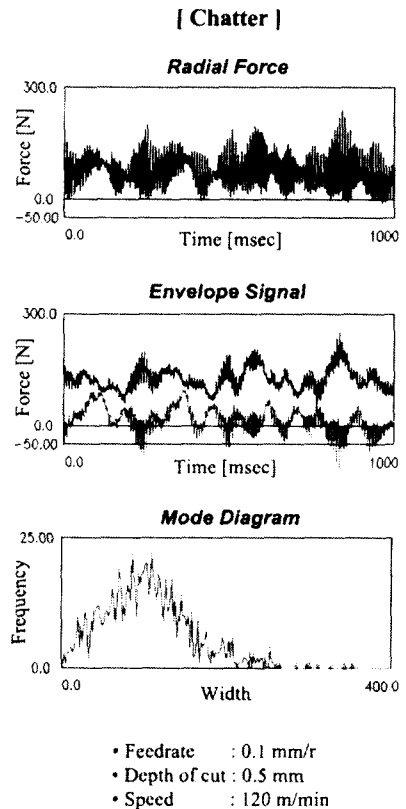


Fig. 11 Envelope signal and mode diagram in chatter

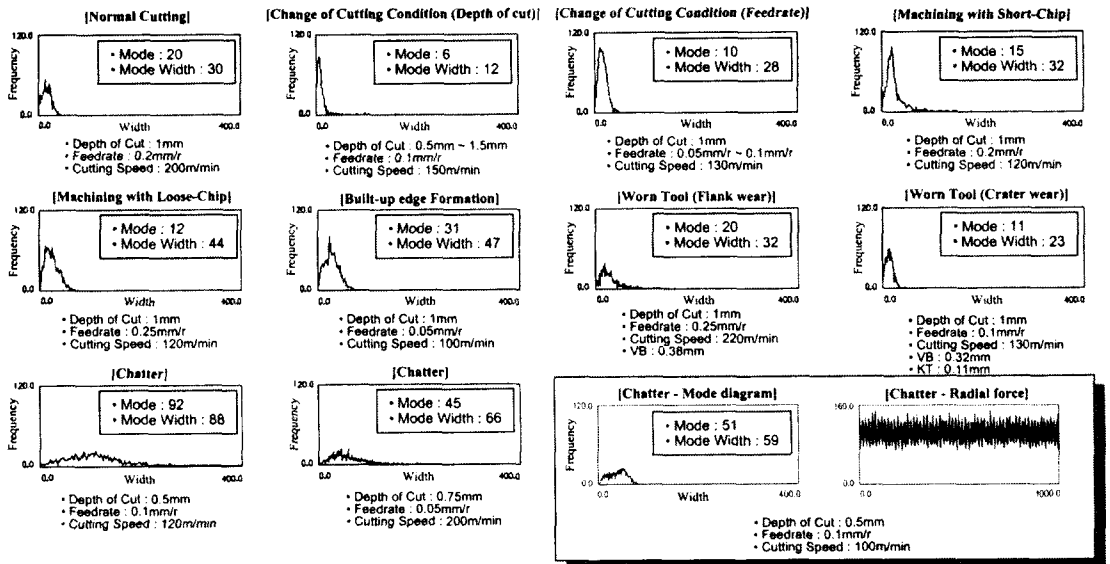


Fig. 12 Mode diagrams in the various cutting conditions

신호는 진폭의 변화가 거의 없는 즉, 맥놀이 현상이 없는 큰 진동신호만으로 나타나고 있다. 이 때의 신호는 마치 구성인선이 존재하는 공구로 가공을 하는 경우의 신호와 흡사하나 모드값과 모드폭의 값이 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 감지를 위한 인공신경망의 학습시, 이를 고려하여 학습한다면 신뢰성 있게 채터신호와 구성인선 신호를 구분할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 방법을 프로그램으로 구현하여 다양한 검증실험을 실시하였다. 먼저, 채터의 감지를 위해, 모든 경우에 모드 선도를 계산하지 않고, 두 포락 신호의 편차가 특정 값(30N으로 설정)을 초과하는 경우에만 모드 선도를 구하였다. 여기에서 설정된 특정값 30N은 실험적으로 선정된 값으로서, 그 크기의 작은 변화에 따라 감지 정확도가 크게 변화되지는 않았다. 따라서 대략적인 값으로서 선정된 것이다. 모드 선도의 계산 여부를 결정하는데 0.13msec의 시간이 소요되었다. 한편, 모드 선도는 300개의 데이터를 축적하여 계산하였는데 이 때, 모드 선도로부터 모드값과 모드폭을 계산하는 데는 1.5msec가 소요되었다. 따라서 300개의 데이터를 축적하는 시간 150msec를 고려하면 최악의 경우 채터를 감지하는데 약 152msec가 소요된다고 할 수 있다. 그러나 실제로 300개의 데이터중 150개의 채터신호가 존재할 때에

도 채터의 감지가 가능하기 때문에 채터의 감지를 위해 약 76 ~ 152msec 정도가 소요된다고 할 수 있다. 그러나 채터의 정확한 시작 시점이라는 것이 매우 애매하므로 이 정도의 시간이라면 채터의 감지에 적절하다고 판단되며 고속가공의 경우는 스핀들 속도에 맞게 샘플링 시간을 빠르게 한다면 더 빠른 감지도 가능할 것으로 생각된다.

한편, 다양한 가공조건 및 공구의 변경 등 가공환경의 변화속에서 본 방법의 신뢰성을 점검한 결과 95% 이상의 감지 신뢰성을 얻을 수 있었다. 감지에 실패한 경우는 미세한 채터의 발생을 감지하지 못하거나 혹은, 매우 극소수의 경우이긴 하지만, 공구 파손 등과 같은 현상을 채터로 잘못 감지하는 경우 등이었다.

6. 결론

본 연구에서는 임의의 동특성을 갖는 선삭가공 시스템에서 채터신호를 감지하는 방법에 대해 제안하였다. 본 방법은 임의의 가공조건 및 환경변화 등에서도 채터를 감지할 수 있는 방법으로서 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 채터 신호를 감지하기 위해 배분력 성분을 상대적으로

로 신뢰성 있는 신호로서 사용하였으며, 이 신호는 chatter 이외의 다른 환경변화에 의해 비교적 영향을 덜 받는 분력이었다.

- (2) chatter신호의 실시간 감지를 위해 Hilbert 변환기를 적용하였고, 이를 통해 포락신호를 계산하였으며, 최종적으로 모드 선도를 제안하였다.
- (3) 모드 선도로부터 계산된 모드값과 모드폭은 가공중 가공조건의 변화, 칩의 형태, 마멸된 공구를 이용한 가공, 구성인선이 존재하는 공구를 이용한 가공 등 가공환경의 다양한 변화에 대해 chatter를 쉽게 구분할 수 있는 특징값으로서 chatter감지의 수단으로 타당하였다.
- (4) chatter의 신뢰성 있는 감지 및 문턱값의 자동설정 등을 위해 인공신경망의 학습기능을 이용하였고, 그 결과 좋은 감지 성능을 얻을 수 있었다.
- (5) chatter의 실시간 감지에 소요된 시간은 약 76 ~ 152 msec 정도였고, 이는 실제 시작 시점이 애매한 chatter의 감지에 충분하다고 판단되며, 필요에 따라 감지 소요시간을 단축할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) G.Boothroyd, Fundamentals of metal machining and machine tools, McGraw-Hill Book Co., 1975.
- (2) H.E.Merritt, "Theory of self-excited machine-tool chatter", Trans. ASME, J.of Eng.for Ind., Vol.87, pp. 447~454, 1965.
- (3) T.Delio, J.Tlusty and S.Smith, "Use of audio signals for chatter detection and control", Trans. ASME, J.of Eng.for Ind., Vol.114, No.2, pp. 146~157, 1992.
- (4) S.Braun, "Signal processing for the determination of chatter threshold", Annals of the CIRP, Vol.24, No.1, pp. 315~320, 1975.
- (5) S.Smith and W.R.Weinfough, "The effect of runout filtering on the identification of chatter in the audio spectrum of milling", Transactions of NAMRI/SME, Vol.22, pp. 173~178, 1994.
- (6) T.L.Subramanian, M.F.DeVries and S.M.Wu, "An investigation of computer control of machining chatter", Trans. ASME, J.of Eng.for Ind., Vol.98, pp. 1209~1214, 1976.
- (7) H.Nakazawa, Y.Miyoshi and K.Shigemura, "Method of detecting onsets of chatter vibration", J. of JSPE, Vol.40, No.2, pp. 207~211, 1980.
- (8) E.Kondo, "Detection of abnormal cutting using pattern recognition of spectrum map(1st report, detection of self-excited chatter vibration)", Trans. JSME C), Vol.63, No. 606, pp. 592~597, 1997 .
- (9) T.Teshima, T,Shibasakam, M.Takuma and M.Kawai, "A Study on the system for sensing of the cutting conditions based on the evaluation of cutting state", Int. J. of JSPE, Vol.26, No.4, pp. 354~355, 1992.
- (10) J.S.Bendat and A.G.Piersol, Random data, analysis and measurement procedures, John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- (11) A.V.Oppenheim and R.W.Schafer, Discrete-time signal processing, Prentice Hall, Inc., 1989.
- (12) D.Rumelhart and J.McClelland, Parallel Distributed processing, Volume 1, Cambridge, MA : MIT Press, 1987.