https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.2.132

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

주축 선회형 5축 가공기에서 가속도 센서를 이용한 채터 감지

신재훈^a, 윤재웅^{b*}

Chatter Monitoring in Head-Tilting 5-axis Machining Centers using an Accelerometer Signal

Jae-Hoon Shin^a, Jae-Woong Youn^{b*}

^a Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Daegu University,

201, Daegudae-ro, Gyeongsan, Gyeongbuk-do, 38453, Korea

^b Division of Mechanical Engineering, Daegu University, 201, Daegudae-ro, Gyeongsan, Gyeongbuk-do, 38453, Korea

ARTICLE INFO

Article hist Received Accepted	tory: 4 10	March April	2018 2018			
<i>Keywords:</i> Chatter Monitoring Accelerometer 5-Axis milling Head-tilting						

ABSTRACT

Chatter is caused by the dynamic instability of a machining system. Chatter causes a variety of economic damages, including reduction of tool life, and damage to the machine tools and workpieces. In this study, we propose a method for detecting chatter in head-tilting 5 - axis machine tools. A sensor attached to a fixed part is considered, located at a remote place from the spindle. This study aimed to detect chatter without any prior knowledge of the involved dynamic system, such as tools, machine tools and workpieces. First, the acceleration signal under various machining conditions was analyzed: no change was observed to interfere with the chatter detection. However, with chatter occurring, beating of the acceleration signal was confirmed by two or more adjacent frequency components, which could be the basis of a very good chatter detection approach. Finally, using this concept, a mode diagram was proposed for chatter detection.

1. 서 론

일반적으로 절삭 가공 중 발생하는 진동은 강제진동(forced vibration)과 자려진동(self-exited vibration)으로 나누어진다. 그 중 절삭과정 중 여러 상호작용에 의해 일어난 자려 진동을 채터(chatter)라고 부른다. 채터는 절삭 중 불안정한 상태로부터 의 가공에서 생성된 가공면의 파형에 의해 절삭력이 변화면서 절삭공구를 가진(excitation) 함으로써 발생이 된다. 채터가 일 어날 수 있는 불안정한 상태의 요인으로는 공작물의 표면상태, 절삭유 성능 저하, 빠른 이송속도, 깊은 절입량 등 다양한 요인으

로 발생한다^[1-3]

하며 고속가공의 제한, 공구수명 저하, 가공 상태 불량, 공작기계 자체 손상 및 장기간 작동 중지 등 다양한 경제적인 손해를 주기때 문에 채터를 피하도록 해야 한다. 그러나 다양한 가공 환경 변화에 따라 채터를 원천적으로 차단하는 것은 불가능하므로 적절한 채터 감지를 통해 가공의 불안정은 피해야 할 것으로 판단된다.

일반적으로 채터가 발생하면 공구-공작물계는 큰 진폭으로 진동

하게 되어 가공 표면에 채터 마크가 나타나 표면 거칠기를 나쁘게

그동안, 채터를 감지하기 위해 다양한 연구가 진행되었다. 채터 를 감지하기 위한 방법으로는 주로 공구 동력계를 이용한 신호 측

^{*} Corresponding author. Tel.: +82-53-850-6684 Fax: +82-53-850-6689

E-mail address: jwyoun@daegu.ac.kr (Jae-Woong Youn).

정^[2,4], 마이크로폰을 이용한 음압 신호 분석^[3], 주축 변화 측정 등 다양한 신호를 이용하여 채터를 감지하는 선행 연구가 진행 되었다. 채터 감지 방법으로는 주로 신호의 주파수 해석을 통한 감지가 대부 분이며^[1,5], 음압신호의 표준편차를 이용한 진폭크기 감지방법^[3] 등 다양한 신호처리 방법도 제안되었다. 그러나 비교적 신호의 신뢰성 이 높은 공구동력계는 실제 가공현장에 적용하기에 한계가 있으며, 음압신호 분석을 통한 감지의 경우 외부 작업자의 소음이나 다른 모터 소음 등 다양한 요차요인이 발생 할 수 있다는 문제가 있다. 한편, 주파수 해석을 통한 채터 주파수 영역을 확인하기 위해서는 사전에 임팩트 해머 등을 이용하여 공진 주파수 영역을 확인 하여야 하는 등 채터를 감지하기 위해서는 사전 가공환경의 변화(소재, 공 구, 절삭조건, 감가속, 부가축)에 대한 정보가 필요하므로^[1,6], 실제 적용에 있어서는 어려움이 있다고 할 수 있다.

한편, 최근 가공의 효율성 및 정밀도가 매우 중요해지면서 5축 가공 수요가 늘어나고 있다. 5축 공작기계는 다양한 방식이 적용되 고 있으며 주축 헤드가 선회하는 주축 선회형(head-tilting type)의 5축 가공기가 많이 활용되고 있다. 채터를 감지하기 위한 기존의 연구들에서는 주로 주축에 가까운 곳에서 신호를 수집을 했지만 주축 선회형 5축 가공기의 경우 주축 헤드가 360도 회전을 하기 때문에 기존 방법으로는 적용이 쉽지 않다. 이에, 본 연구에서는 가속도센서를 이용하여 주축 선회형 5축 가공기에서도 적용이 가 능하며, 가공환경에 대한 사전 정보 없이 채터를 감지하는 방법에 대해 제안하고자 한다. 이를 위해 다양한 가공조건 하에서 신호의 변화와 채터 신호와의 차이를 분석하였고, 채터를 감지하기 위한 적절한 신호처리 방법을 제시하고자 한다.

2. 채터 감지 시스템의 구성 및 실험 조건

채터 감지 시스템은 Fig. 1과 같이 구성하였다. 전체 신호 취득 시스템 구성은 채터를 감지하기 위한 가속도 측정 부분과, 가속도 측정 시스템의 신뢰성을 검증하기 위한 보조 수단으로서 절삭력 측정 부분으로 이루어진다.

일반적으로 가공의 이상상태를 감지하기 위한 센서의 부착 위치 는 가공이 이루어지는 공구 끝단과 가까울수록 유리하다고 할 수 있다. 그러나, 본 연구의 목적은 헤드가 선회하는 5축 가공기에서 의 채터 감지이므로 주축의 선회와 무관한 고정 부위에 가속도 센 서를 부착하여야 한다. 이는 센서 케이블의 꼬임 등의 문제 때문이 다. Fig. 2는 주축 선회형 5축 가공기에 가속도 센서를 부착한 모습 이다. 실제 채터 감지는 가공 부위로부터 멀리 떨어져 있는 고정단 에부착한 가속도 센서 신호를 이용하였으나, 신호의 차이를 분석하 기 위해 공구 끝단과 가까운 곳에 가속도 센서를 추가로 부착하여 참고 신호로 활용하였다.



Fig. 1 Experimental setup for data Acquisition



Fig. 2 Accelerometer sensor position

한편, 가속도 신호 및 절삭력 신호는 Labview 프로그램을 이용 하여 시간 영역 및 주파수 영역의 신호를 측정하고 분석하였고, 궁 극적으로는 별도의 Visual C⁺⁺ 프로그램을 개발하여 채터를 감지 하였다. 채터 감지 프로그램은 고정단에 부착된 가속도 센서 신호 만을 활용하였으며, 절삭력 신호는 채터 신호 분석을 위한 참고 자 료로만 활용하였다.

실험은 주축 선회형 5축 복합가공기에서 실시하였으며, 소재는 SM45C 및 SKD11 등 다양한 소재를 이용하여 실험함으로써 특 정 소재에만 적용 가능한 채터감지 방법이 되지 않도록 하였다. 공 구의 경우 지름 10~20 mm, 2날 및 4날 초경 엔드밀을 사용하였 고, 공구의 길이도 40~70 mm까지 가변적으로 하여 가공을 진행 함으로써 다양한 공구에 대한 채터감지의 신뢰성을 확인할 수 있도 록 실험하였다. 채터가 심각하게 발생할 경우 공구의 파손 등 문제 가 생길 수 있어, 절삭깊이 및 이송속도 등의 절삭조건은 Table 1에서와 같이 적절한 범위 내에서 수행하였다. 한편, 데이터 취득

Experimental conditions				
Tool	Φ 10 mm ~ Φ 20 mm, 2~4-blade			
Tool length	$40 \text{ mm} \sim 70 \text{ mm}$			
Workpiece material	SKD 11, SM45C			
Axial depth of cut	5~20 mm			
Radial depth of cut	0.5~2 mm			
Feedrate	30~300 mm/min			
RPM	2500~5000 RPM			
Sampling Time	6 kHz			
Number of data	65,536			





Fig. 3 Accelerometer signal for different sensor position

을 위한 조건 역시 Table 1에 묘사되어 있다.

3. 다양한 가공조건 변화에 따른 가속도 신호 분석

3.1 가속도 신호의 특성 분석

3축 가속도 센서를 이용하여 각 X, Y, Z축의 신호를 받아 각 축별 신호크기 및 경향을 분석 하였다. 각 축별로 신호를 확인했을 때각 축 별 신호의 형태는 유사하게 나타났으며 가공에 해당하는 신호가 가속도 센서에 반영되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 각 축의 신호 크기에 있어서는 X축의 신호가 상대적으로 가장 크게 나타나 본 연구에서는 가속도 X 축의 신호를 채터 감지에 활용하 고자 한다. 한편, 가속도 센서의 위치를 헤드 위쪽의 고정단에 부착 한 경우(upper sensor)와 공구 쪽에 가까운 위치에 부착한 경우 (lower sensor) 두 가지에 대해 신호 특성을 분석하였다. 앞에서도 언급한 바와 같이 센서의 위치는 가공 부위와 가까울수록 선명한 신호를 얻을 수 있으나, 헤드 선회형 5축 가공기의 경우 센서 케이 불이 꼬여 파단될 수 있으므로 위쪽 고정단에 부착된 센서를 활용 해야 한다. Fig. 3은 가공부위와 가까운 위치에 있는 가속도 신호와 가공 부위로부터 멀리 떨어진 위치에서의 가속도 신호를 비교한 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 아래쪽 가속도 신호가 보다



Fig. 4 Comparison of cutting force and accelerometer signals

분명한 것을 알 수 있다. 그러나 신호의 크기는 좀 작지만, 위쪽 부분의 가속도 신호도 충분히 가공 신호를 보여주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 공구의 날 개수가 각각 2개인 경우와 4개인 경우, 절삭 력과 가속도 신호를 비교한 그림이다. 절삭력 신호가 공구의 회전 에 따른 가공 신호를 보다 명확하게 보여주고 있지만, 가속도 신호 역시 충분히 가공 신호를 보여줌을 알 수 있다. 절삭력의 경우, 날 의 개수에 따라 절삭력의 크기 차이가 분명하게 나타나고 있지만, 가속도 신호의 경우 날의 개수가 가속도 신호의 진폭에 큰 차이를 보여주지 않고 있으며 주파수 성분은 그 차이를 보여주고 있어, 가 속도 신호를 이용하여 가공의 이상상태를 파악하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터, 가공부위에서 먼 곳에 위치한 가속도 센서를 활용하여 가공 신호의 특성을 파악하는 것이 가능하며, 2날 공구 및 4날 공구 등 공구의 기하학적 형상에 상관없이 가공 신호를 감 지하는 것이 가능할 것으로 판단되었다.

3.2 가공조건 변화에 따른 가속도 신호 분석

본 연구의 목적은 가공에 대한 사전 정보 없이, 또한 가공 조건





등에 대한 사전 정보 없이 채터를 감지하는 것이다. 따라서 가공 조건의 변화에 대한 가속도 신호가 어떤 특성을 보이는지 신호의 특성을 파악하는 것이 필요하다. 또한 가공조건의 변화에 대한 가 속도 신호의 변화와 채터가 일어났을 때의 신호가 어떤 차이를 보 이는지에 대한 확인이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 가 공조건의 변화 및 채터 시 가속도 신호의 변화를 파악하기 위해 다음과 같은 사전 실험을 실시하였다.

먼저, Fig. 5(a)는 공구의 회전 속도 변화에 따른 가속도 신호의 변화 모습을 보여주고 있다. 실험은 회전 속도를 500 RPM씩 증가 시켜가며 실시하였으며, 4날 10 mm 공구를 사용하여 2,500 RPM 에서부터 5,000 RPM까지 증가시켰다. Axial depth of cut (이후 A.O.C로 표기)의 경우 20 mm, Radial depth of cut (R.O.C로 표기)의 경우 0.5 mm, 이송속도는 200 mm/min으로 하여 가공하 였다. 회전 속도변화에 따라 진동의 진폭이 일부 커지는 것을 볼 수 있었는데, 이것은 주축계의 진동 특성으로 판단되며 그것이 비 례 관계에 있지 않았다. 또한, 주피수 특성 등도 큰 변화는 없는 것으로 확인되었다.



Fig. 6 Accelerometer signal for the different axial depth of cut

한편, Fig. 5(c)는 이송속도 변화에 대한 신호의 변화 특성을 보여주고 있다. 실험은 이송속도를 30~300 mm/min까지 30 mm/mim 단위로 증가시켜가며 실시하였으며, 지름 10 mm, 4날 공구를 사용 3,500 RPM, A.O.C 10 mm, R.O.C 1.5 mm로 하였 다. 이송속도 변화에 있어서는 진동 진폭이 어느 정도 비례하면서 상승되는 모습을 보여주고 있는데, 이것은 가공 부하의 증가에 따 른 진동이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 주파수 신호의 특성 변화는 없는 것으로 파악되었다.

Fig. 6은 절삭깊이 변화에 대한 가속도 신호의 변화를 보여주고 있다. 가공조건은 A.O.C를 4~20 mm까지 5 mm 씩 증가시켜가며 실험을 실시하였으며, 4날 10 mm 공구를 사용하고 3,000 RPM, R.O.C 0.4 mm, 이송속도는 100 mm/min으로 가공 하였다. 절삭 깊이 변화에 따른 가속도 신호의 변화는 절삭깊이 증가에 따라 진 동 진폭이 비례적으로 증가하는 모습을 볼 수 있는데, 이것은 이송 속도 변화와 마찬가지로 가공 부하가 커지면서 진동의 진폭도 커지 는 것으로 판단된다. 그러나, 그림에서 보는 바와 같이 주파수 신호 특성의 변화는 거의 나타나지 않는 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 채터 신호의 분석에 앞서 가공조전 변화에 따른 가속도 신호의 특성을 먼저 파악하였다. 절삭속도, 이송속도 및 절 삭 깊이 등의 가공조건 변화에 따라 가속도 신호는 진동 진폭의 변화가 있음을 확인하였다. 대부분 가공의 부하가 커질수록 진동의 진폭은 커지는 것을 확인할 수 있었으나, 신호의 형상 변화 및 주파 수 신호 특성의 변화는 거의 없었고, 단순한 진동 진폭이 변화됨을 알 수 있었다. 이것은 향후 채터 신호의 특성을 파악하는데 매우 중요한 전제 조건이 될 것으로 판단된다.



(b) Accelerometer signal



(c) Surface Photograph





(b) Chatter condition Fig. 8 Accelerometer signal at the different condition

4. 채터의 감지

4.1 채터 발생시 가속도 신호 분석

채터의 발생을 확인하기 위하여 가공조건을 바꿔가며 채터 발생 을 확인하였다. 처음 채터가 발생하는 조건은 4날 10 mm 공구를 사용했을 때 4,000 RPM, A.O.C 15 mm, R.O.C 0.5 mm, 이송속 도 150 mm/min일 때 채터가 발생하였다. Fig. 7은 공구 회전속도 를 제외한 다른 가공조건은 동일하게 하고, 공구 회전속도를 3,500



rpm에서 4,000 rpm으로 번갈아가며 신호를 받았을 때의 신호를 보여주고 있다. 4,000 rpm에서 채터가 일어난 상황으로서 절삭력 신호는 채터가 발생하였을 때 절삭력이 전체적으로 낮아졌으나 가 속도 신호의 경우 진폭이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 채터 발생 시의 공구의 휘어짐 현상과 진동이 발생함에 따라 절삭력은 전체적 으로 낮아지고, 진동 진폭은 커지는 것으로 판단된다. 한편, Fig. 7(c)로부터 가공면의 채터 마크를 확인할 수 있다.

Fig. 8은 정상 상태일 때와 채터 상태일 때의 가속도 신호를 좀 더 자세히 보여주고 있다. 채터가 발생할 경우, 전체적인 진동의 진폭이 커지기도 하지만, 진동의 신호가 맥놀이 형태로 나타남을 알 수 있다. 이것은 채터가 발생할 경우에 진동이 단일 주파수에서 형성되지 않고, 인접한 복수개의 진동 주파수가 관찰됨을 알 수 있었고, 이러한 현상이 맥놀이 형태로 나타나게 되는 것이다. 본 연구 에서는 다수의 실험에서 동일한 현상을 발견하였고, 이러한 현상을 이용하여 채터 감지 알고리즘을 수립하고자 한다.

4.2 채터 검출 방법

앞에서도 언급한 바와 같이, 채터는 공구-공작물계에 대한 동적 특성을 사전에 파악하고 있다면 신호의 주파수 분석을 통하여 대략 적으로 어떤 주파수에서 채터가 일어날 지를 판단할 수 있다. 그러 나 본 연구의 목적은 가공에 관한 사전 정보 없이 채터를 파악하는 것이다. 이것은 실제 현장에서 활용한다는 관점에서 보면 매우 중 요한 것이라고 생각된다.

앞 절에서 언급한 바와 같이, 일반적인 가공조건의 변화에 대해 가속도 신호는 그 진폭의 변화는 있었지만 파형의 변화는 없었다. 그러나 채터가 발생할 경우에는 진동 신호의 파형이 맥놀이 현상처 럼 나타남을 확인할 수 있었고, 여기서는 이러한 채터 신호의 특성 을 기반으로 하여 채터를 감지하고자 한다. 이러한 맥놀이 현상은 Fig. 9(a)에서와 같은 신호의 모습을 보이게 되고, 이러한 가속도 신호의 포락신호(envelope signal)를 이용하여 채터를 감지하고자 하였다. Fig. 9는 전체적인 신호처리 알고리즘을 보여주고 있다. 먼저, 측정된 가속도 신호의 포락신호를 추출하고, 고주파 잡음을 제거하기 위해 이동평균 방법으로 필터링한다. 그 후 포락신호가 얼마나 크게 나오는 지를 확인하기 위해 본 연구에서는 모드선도 (mode diagram) 정의하고 채터를 정량적으로 판단하고자 하였다. 이 방법의 경우, 공구-공작물계에 대한 사전 정보없이 채터를 감지 할 수 있다는 장점이 있다.

포락신호는 힐버트변환(Hilbert transform)에 의해 계산될 수 있는데, 힐버트 변화된 신호 $\tilde{x}(t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

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

 $\tilde{x}(t) \doteq x(t)$ 와 (1/*m*)의 콘볼루션이 된다. 이때 z(t) = x(t) + j $\tilde{x}(t)$ 라고 할 때, z(t) = 3기함수 A(t)와 위상함수 G(t)로 정의할 수 있고, A(t) = 3기신호 x(t)의 포락 신호를 의미하고, G(t) = x(t)의 순 간적인 위상이라 할 수 있다. 결국 $z(t) = \theta(t) = \tan^{-1}[\tilde{x}(t)/x(t)],$ $A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} = 통해$

$$z(t) = A(t)e^{j\theta(t)}$$
(2)

가 된다.

신호를 실시간으로 변환하기 위하여 Hilbert 변환기를 사용하게 되면 잡음이 실리긴 하지만 실시간으로 변환을 계산할 수 있기 때 문에 Hilber 변환기를 사용하여 신호를 계산하였다.

이산함수의 경우 다음과 같이 콘볼루션 적분하여 구할 수 있다.

$$\tilde{x}[n] = \sum_{m=0}^{\infty} h[n-m]x[m]$$
(3)

$$A[n] = \sqrt{x^2[n] + \tilde{x}^2[n]}$$
(4)

이 된다. 이 식은 이산 콘볼루션 적분이 되며, 전달함수 *h*(*n*)은 Finite impulse response 이산 Hilbert 변환기로 계산 된다.

$$h[n] = \frac{I_0 \beta (1 - [(n - n_d)/n_d]^{\frac{1}{2}}}{I_0(\beta)} \frac{2}{\pi} \frac{Sin^2 [\pi (n - n_d)/2]}{n - n_d}$$

for $0 \le n < M$ (5)

$$h[n] = 0$$
 otherwise

이 식에서 *L*영차 베셀함수를 의미하며, *M*은 Hilber 변환기의 차수로서 18로 설정하였다. *n_d=M*/2, β =2.629로 설정하였다.

Fig. 9(a) 와 같이 측정된 가속도 신호는 Hilbert 변환기를 통해 Fig. 9(b)와 같이 고주파 잡음이 실린 포락 신호를 나타내게 되며, 이를 이동평균함으로써 포락 신호의 저주파 필터링을 수행하여 Fig. 9(c)와 같은 신호를 얻을 수 있었다. 필터링된 포락신호는 두 개의 곡선으로 나타나게 되는데, 두 곡선 사이의 거리가 클수록 그



Fig. 10 Concept of mode diagram



Fig. 11 Comparison of normal cutting condition and chatter

리고 두 곡선 사이의 거리의 변화가 클수록 채터의 정도가 크다는 것을 다양한 실험으로부터 알 수 있었다. 이 두가지 요소를 정량적 으로 나타내기 위해 본 연구에서는 모드선도(mode diagram)라는 것을 제안하고자 한다.

Fig. 10은 모드선도의 개념을 보여주고 있다. 그림에서 X축은 두 포락 신호의 상대적 거리를 의미하고, Y축은 두 포락신호 사이 거리의 빈도수를 의미한다. 만약 두 포락신호의 거리가 가깝다면 모드선도는 왼쪽에, 멀다면 오른쪽으로 치우치게 될 것이다. 또한, 두 포락신호가 균일하게 나타난다면 모드선도는 좁게 나타날 것이고, 두 포락신호가 진동하는 형태로 나타난다면 모드선도는 넓게 펴진 형태로 나타날 것이다. 실험 결과, 채터가 발생할 경우에는 두 포락신호의 거리가 멀어지고 진동하는 형태로 나타나기 때문에 모드선도는 오른쪽으로 넓게 펴진 형태로 나타나게 되며, 일반적인 가공상태에서는 왼쪽에 좁은 형태를 보이게 된다. 본 연구에서는 모드선도에서 모드(mode)와 모드폭(mode width)이라는 두 개의 특성치를 정의하였고, 이를 이용하여 채터를 정량적으로 묘사하고 자 한다. 모드는 모드선도에서 그래프의 최대값을 의미하고, 모드 폭은 모드값의 1/3되는 지점에서의 그래프 폭을 의미한다.

Fig. 11은 정상 상태와 채터 상태에서 측정된 가속도 신호를 이 용하여 그려진 모드선도를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 모드선 도는 채터 상태일 경우 명확한 차이를 보여주고 있다. 한편 Fig.



Fig. 12 Chatter detection software



12는 채터를 감지하기 위해 Visual C⁺⁺로 별도로 작성된 프로그램 을 보여주고 있다. 한편, Fig. 12에서 볼 수 있듯이, 신호의 측정을 위해서는 샘플링(sampling) 주파수를 입력하여야 한다. 본 연구에 서 제시하는 방법은 동적신호를 정량적으로 분석하는 것이 아니므 로 샘플링 주파수는 크게 중요하지 않다. 그러나, 동적 신호변화를 충분히 파악할 수 있을 정도의 샘플링은 필요하며, 5 kHz 정도면 충분하다고 판단된다.

5. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 제안된 채터 감지 알고리즘의 적절성을 판단하 기 위해 Fig. 13과 같이 다양한 정상 가공상태에서 모드선도를 도출하였다. 먼저, 절삭속도의 공구의 회전속도를 2,000 rpm에서



Fig. 14 Mode diagrams for chatter conditions

Table 2 Experimantal results

	Cutting condition	Mode Diagram		
	Cutting condition	Mode	Mode Width	
Change of cutting condition	RPM=2000	30	63	
	RPM=2500	32	63	
	RPM=3000	32	65	
	f=50 mm/min	58	93	
	f=100 mm/min	48	72	
	f=150 mm/min	45	65	
	Axiald.o.c=1 mm	22	63	
	Axiald.o.c=3 mm	40	65	
	Radiald.o.c=3 mm	32	83	
	Radiald.o.c=6 mm	47	102	
Chatter	Chatter 1	88	283	
	Chatter 2	102	209	
	Chatter 3	130	183	
	Chatter 4	90	166	
	Chatter 5	112	193	
	Chatter 6	82	135	

3,000 rpm으로 변화시켰고, 축방향의 절삭깊이는 1 mm에서 3 mm로, 이송속도의 경우에는 50 mm/min에서 150 mm/min으로 가공 중 각각 변경했을 때 모드선도를 확인해 보았다. 가공에 대한 사전 정보는 없다고 가정했을 때, 정상적인 가공상태에서의 모드선 도는 그림에서와 같이 좁고 가는 형태로 대부분 유사한 모습을 보 여주고 있다. 모드선도에서 모드값은 대부분 20~40 정도의 범위에서 나타났고, 모드폭은 60~80 정도의 범위에서 나타나는 것으로 확인하였다

이러한 결과로부터 단순한 절삭조건의 변화는 모드선도 상에서 대부분 일정한 범위 내에서 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

한편, 채터가 발생한 경우의 모드선도는 Fig. 14에서 볼 수 있듯 이 기존의 정상적인 가공 상태와는 다른 양상을 보이고 있다. 먼저 모드값의 경우에는 80~100 이상, 모드폭은 200이 넘는 값을 보여 주고 있다. 이것은 채터가 발생함에 따라 진동 신호의 맥놀이 현상 이 강하게 나타나며, 이에 따른 가속도 신호의 포락신호가 큰 폭으 로 요동치기 때문이다.

Table 2는 다양한 가공조건의 변화와 채터 상태에서의 모드값과 모드폭 값을 보여주고 있다. 채터의 감지를 위해서는 보다 다양한 공작기계, 소재 및 공구에 따른 실험결과를 토대로 채터 여부를 판 단하는 문턱값(threshold value)을 결정할 필요가 있겠지만, 본 연 구의 결과는 대체로 모드값 > 80이고 모드폭 > 180일 때 채터가 발생했다고 판단할 수 있을 것으로 보인다. 본 연구에서 제시한 문 턱값은 일부 억지스러울 수 있으나, 채터 감지에는 충분한 여유를 부여한 값이라고 할 수 있다. 향후, 이 부분에 대해서는 좀 더 다양 한 가공 환경 및 조건에서 문턱값을 결정할 필요가 있을 것이라 판단되며, 또 다른 가능성으로서는 다양한 가공 환경에서 머신러닝 (machine learning) 기법 등을 도입한 자동 문턱값의 결정도 가능 할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 주축 헤드가 선회하는 5축 공작기계에서 채터를 감지할 수 있는 방법을 제안하였다. 주축 선회 5축 공작기계의 의 미는 주축과 가까운 곳에 센서를 부착할 수 없는 상황에서 먼 곳에 위치한 고정단에 센서를 부착한 경우를 의미한다. 이때, 비교적선 명하지 않은 가속도 신호를 측정하여 채터를 감지해야 하기 때문에 채터 감지의 신뢰성이 낮아질 가능성이 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 공구, 공작기계 및 소재 등의 동적 시스템에 대한 사전 정보가 없어도 채터를 감지하는 것을 목표로 했기 때문에 먼 저 다양한 가공조건에서의 가속도 신호를 분석하였다. 절삭속도, 이송속도 및 절삭깊이 등의 가공조건 변화와 공구의 직경, 날의 개 수 및 공구 길이 등의 가공환경 변화에 대한 가속도 신호의 변화는 시간 영역에서의 진폭변화 및 주파수 성분의 변화가 일부 있지만, 채터감지를 방해할 만큼의 변화는 없다는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 채터가 발생한 경우에는, 인접한 두 개 이상의 주파수 성분 이 가속도 신호의 맥놀이 현상을 유발하며, 이것은 매우 좋은 채터 감지 수단이 될 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 채터 감지를 위해 모드선도라는 개념을 제안하 였다. 모드선도는 가속도 신호를 힐버트 변환하여 포락신호를 생 성하고, 두 포락신호의 상대적인 거리 변화를 기준으로 계산하였 다. 모드 선도에서 모드 값과 모드폭 값은 정상적인 가공상태와 채터를 구분할 수 있는 매우 좋은 정량적 기준이 됨을 확인하였고, 다양한 실험 결과 모드 값이 80 이상이고, 모드폭 값이 180 이상 일 때 채터 감지가 가능함을 확인하였다. 향후, 이 부분에 대해서 는 좀 더 다양한 가공 환경에서 문턱값을 결정할 필요가 있을 것으 로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

References

- [1] Zhang, X., Yu, T., Wang, W., 2016, Chatter Stability of Micro end Milling by Considering Process, Nonlinearities and Process Damping, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 87 2785-2796.
- [2] Kim, Y. K., Yoon, M. C., Ha, M. K., Sim, S. B., 2002, A Study on the Behaviors of Chatter in Milling Operation, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology, 1:1 123-132.
- [3] Jo, M. H., Kim, J. Y., Lee, J. H., Kim, J. S., 2014, Signal Acquisition for Effective Prediction of Chatter Vibration in, Milling processes, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 23:4 325-329.
- [4] Jeong, N. S., Yang, M. Y., 2009 Analytical Prediction of Chatter Vibration in Milling Process, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, 33:3 210-217.
- [5] Yoon, M. C., Chin, D. H., 2006, Time Series Modeling and Spectrum Analysis for Chatter Mode in Endmilling Dynamics, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 29 1125-1133.
- [6] Shi, Y., Mahr, F., Wagner, U., Uhlmann, E., 2012, Chatter Frequencies of Micromilling Processes: Influencing Factors and Online Detection Via Piezoactuators, International Jornal of Machine Tools & Manufacture, 56 10-16.
- [7] Youn, J. W., 2000, A Study on the Detection Chatter Vibration Using Cutting Force Measurement, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 9:3 150-159.
- [8] Kim, M. K., 2001, Diagnosis of Chatter Vibration Using Frequency Domain in a Milling Process, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 10:3 12-18.
- [9] Seo, J. W., Park, H. W., 2015, Prediction of the Chatter During the Milling Process of the Machine Tool, J. Korean Soc. Precis. Eng., 32:5 441-446.
- [10] Park, J. H., 1999, A study on the Prediction of Chatter Stability in Milling Process Using Frequency Response Function, Master's Dissertation, Kum-oh National Institute of Technology, Republic of Korea.