

주축 변위 센서를 이용한 선삭 중의 절삭 진동 측정

김일해*, 김진현⁺, 장동영⁺⁺

CUTTING VIBRATION MONITORING USING A SPINDLE DISPLACEMENT SENSOR IN TURNING

IlHae Kim*, JinHyun Kim⁺, DongYoung Jang⁺⁺

Abstract

Monitoring chattering is also important for realizing an unmanned machining system. While many researches were done on this area, it is still a difficult job to detect very small amplitude amount of chattering. A monitoring system using a capacitive spindle displacement sensor was developed to monitor cutting vibration in turning in this research. The variance of the measured spindle displacement signals using the developed sensor was calculated and utilized to quantify the small vibration in machining. The results were compared with variance obtained using a tool dynamometer. The result showed that the developed system could be utilized in monitoring the subtle changes of cutting vibrations with high sensitivity confidence.

Key Words : chattering, capacitive sensor, spindle displacement, monitoring

1. 서론

사람의 개입없이 채터를 감지하고 방지하는 것은 무인 가공시스템을 실현시키는데 필수적 기술이다. 가공품질에 영향을 주는 채터는 공구의 수명을 단축시키고 제품의 재가공을 유발시키므로 적절한 시기의 제품 생산을 어렵게 한다. 최근에는 항공기나 바이오장치와 같은 하이테크

제품에 적용되는 난삭재 가공 시에 발생하는 소량의 진동을 감시하는 분야에도 중요성이 부각되었다.

많은 연구들이 분석적 방법뿐만 아니라 실험적인 방법들로 수행되었다. 다중채터모드, 채터 안정성, 안정영역의 불확정성, 채터 발생 시의 혼란적 거동을 이해하기 위해 비선형 모형이 폭넓게 연구되었다.⁽¹⁾ 채터 발생은 여러 인자들에 복합적으로 관련되어 해석적으로

* 김일해, (주)캠시스 (chyarlie@nate.com)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172 생산공학과관 006호
+ 김진현, 서울대학교 기계항공공학부
++ 장동영, 서울산업대학교 산업정보시스템공학과, 정밀기계설계연구소

구현하기는 매우 어렵다. 따라서 현행 연구의 대부분은 실시간 채터 감지와 방지를 위한 방법의 제안에 집중되고 있다.⁽²⁾ 많은 방식의 센서가 채터 신호를 감지하기 위해 사용되고 있지만, 절삭력을 측정하는 방식이 가장 민감도와 신뢰성이 높은 것으로 인식되고 있다.

본 논문은 절삭력에 상응하는 인자로서 주축의 변위를 이용하였다. 주축-시편계의 강성은 일반적인 가공범위에서 일정하므로 주축의 변위는 절삭력에 선형적이다. 매우 높은 분해능으로 주축 변위를 측정한다면 주축의 반경 방향 변위 신호는 채터 감시를 위한 절삭력 신호와 증가하다고 할 수 있다. 따라서 값이 비싸며 공구를 설치하기에도 큰 난점을 지닌 공구동력계는 문제점을 극복할 수 있다.

선삭 가공 시 전형적인 채터 주파수는 200~600 Hz 사이의 범위에 있다.^(2,3,5,6) 이 범위의 채터는 주축-시편계과의 모드연성진동에 기인한다. 반면에 2~5 kHz의 보다 높은 채터 주파수들은 고유진동수에서 공구 홀더의 연성 진동에 기인한다. 이러한 범위의 채터는 일반적으로 가속도계 또는 AE센서들로 측정된다.

Anwar⁽³⁾는 공구와 절삭시편의 구조적 동역학이 서로 독립적이라는 것을 강조했다. 즉, 저주파 채터는 주축-시편계에서, 고주파 채터는 공구 홀더에서 기인한다고 할 수 있다. Spiewak⁽⁷⁾은 채터 감시 센서로서, 가속도계가 고주파 영역에서 유리하고 공구동력계는 저주파 영역에서 적합함을 나타내었다. 본 논문의 CSDS는 10 kHz의 넓은 대역폭에 걸쳐 일관성을 가지므로 채터 감시 센서로서 적합하다.

2. 실험 장치

2.1 정전 용량형 주축변위센서(CSDS)

본 논문에서는 채터 신호 감시를 위해 원통형 정전 용량형 주축변위센서가 사용되었다. 선행된 정밀기계의 주축성능평가에 대한 연구를 통하여 절삭력과 주축변위의 선형관계를 적용한 절삭력 감시를 위한 센서로서 사용되었다.

CSDS를 사용하는 것은 몇 가지의 장점이 있다. CSDS는 비접촉 센서이기 때문에 센서 적용으로 인하여 절삭 동특성이 변하지 않는다. 또한 넓은 대역폭을 가지고 있기 때문에 정적인 변수들과 함께 고주파 진동을 측정해낼 수 있다. 덧붙여 주축센서이기 때문에 베어링 결함과 주축의 열적 상태 등의 주축상태를 감시해낼 수 있다.

정전 용량형 센서로부터 전압을 읽어들이는 데에는 전하 전달법이 사용되었다.⁽⁹⁾ 이것은 CMOS 아날로그 스위치들

과 전류 적분 증폭기로 구성되어서 100 kHz~5 MHz까지의 영역에서 측정 주파수를 제공할 수 있다. CSDS의 형상은 Fig.1과 같다.

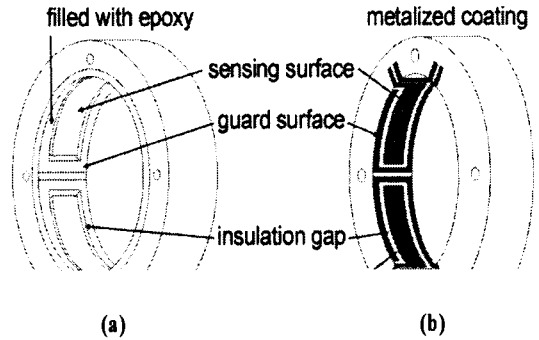


Fig. 1. Sensor constructions and part descriptions of the CSDS used for monitoring the spindle displacement
(a) sensor segments are isolated with high strength epoxy
(b) sensor segments are coated on the ceramic by metalizing and coating

원통형 센서는 원주를 따라 동등하게 나누어진 4조각의 정전 용량형 센서로 구성된다. 각각의 조각들로부터 출력된 값들은 몇 단계의 연산을 통하여 최종적인 주축의 x, y방향의 변위로서 구해진다.

대상체의 진원도 오차는 3 μm 이하이어야 하며 센서면과 대상체 사이의 간격은 민감도와 측정 범위를 고려할 때 0.1~0.2 mm 범위에서 맞춰져야 한다. 일반적으로 센서는 황동과 높은 강도를 지닌 에폭시 합성물로 제작되나, 보다 높은 열적 안정성과 잡음을 줄이기 위해서는 세라믹 몸체에 금속을 코팅하는 방식으로 제작할 수 있다.

정전 용량형 센서의 최대 분해능은 전체 센서 시스템의 잡음 수준에 의해 결정된다. Fig.2에 보인 센서 시스템은 10 nm까지의 분해능과 10 kHz의 대역폭을 갖도록 제작되었다.

선삭 가공에서는 일반적으로 채터 주파수가 공구-시편계에서 발생된 진동은 1 kHz, 공구 홀더에서 발생된 진동은 2~5 kHz 영역에서 나타난다. 이러한 채터 주파수 영역은 대역폭이 10 kHz인 CSDS에 의해 적용될 수 있다. 선반 실험 결과에 의하면 채터의 발생을 감지하기 위해서는 약 10 nm의 고분해능이 요구됨을 알 수 있다.

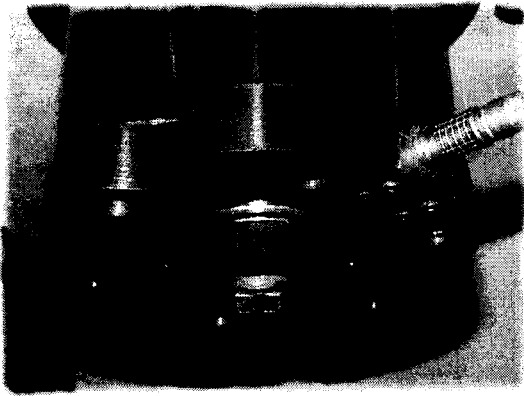


Fig. 2. Installed CSDS on a vertical milling machine spindle

1 kHz이상의 고주파 진동의 실제 측정결과는 본 실험에서 관찰되지 않았다. Fig.2는 수직 밀링머신에 장착된 주축 센서이다. 이 변위 센서는 대역폭이 넓기 때문에 고속가공에 적용시키기에 적합하다.

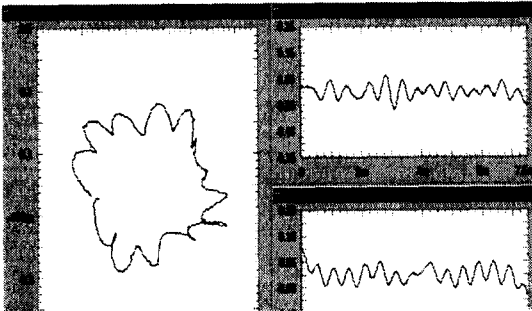


Fig. 3. Signal example of the CSDS at milling spindle operating at 8000 rpm with a bearing fault condition

Fig.3은 8000 rpm에서 베어링 결함 신호의 한 예를 보여 준다. 진동 주파수는 주축 속도의 16배인 2133 Hz이고 최대 진폭은 0.1 μm 이다. 중간크기의 금형 가공 시에 사용되는 이 밀링머신은 고속가공 시 금형부품의 모서리 부분에서 chatter가 발생되기 시작하였다. 측정은 1회전 당 512개의 데이터를 DT3100 A/D board를 통해 HP-VEE 프로그램으로 처리하였다.

2.2 장치구성

선삭 실험은 화천 중공업의 HI-ECO10으로 수행되었다.

절삭시편은 HRC 65로 열처리된 AISI D2 공구강을 사용하였고, 공구 인서트는 NTK사의 세라믹과 CBN 인서트를 사용하였다. 공구동력계는 Kistler사 모델을 사용했으며, 자체 영향에 의한 chatter 발생을 피하기 위해 낮은 속도의 가공에서만 비교 데이터로 이용하였다.

2.3 신호처리

chatter 인자로서는 Ismail^(2,19)에 의한 R-value를 사용하였다.

$$R\text{-value} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} F Y_d^2}{\sum_{i=1}^{n_s} F Y_s^2}} \quad (1)$$

$$n_s = \frac{\text{Sampling rate (Hz)} \times 60}{\text{Spindle speed (rpm)}} \quad (2)$$

위의 식에서 $F Y_d$ 는 절삭력의 고주파 성분이고 $F Y_s$ 는 저주파 성분이다. 본 논문에서는 모두 CSDS 신호로 대체되었다. 주축 속도와 chatter 주파수 영역을 고려하여 저주파, 고주파 필터를 적용시켰으며 샘플링 수는 주축의 속도에 따라 고정시켰다.

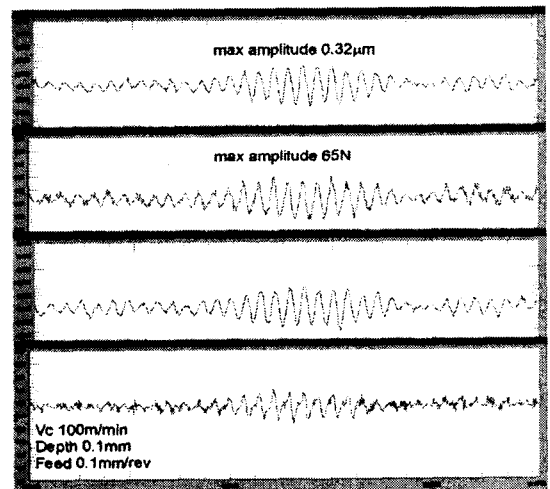


Fig. 4. One revolution amount of vibration signals are shown for comparison between the CSDS and force signals by the Kistler dynamometer in chatter mode

CSDS 출력 신호는 우선 푸리에 변환되어 정적인 신호와

1차항을 소거하여 주축 궤적을 나타내는 사인, 코사인 성분을 제외시켰다. 이를 역푸리에 변환을 시키면 식 (1)은 1회 전 시의 분산에 해당되어 채터 인자로 사용된다. 이러한 분산값들은 절삭상태의 진동 수준을 감시하기 위해 사용된다. free run 시 주축의 상태를 측정하는 것은 비정상적인 진동의 경계값을 설정하는 데에 매우 용이하다.

Fig.4는 CSDS의 출력과 절삭력을 나타낸다. CSDS의 출력값은 정적인 항과 1차항이 제거된 후 재구성된 것이다. x, y방향 데이터가 모두 제시되었으며, 측정된 최대 진폭은 CSDS에서 0.32 μm 으로 관측된 65N의 절삭력이 작용한 경우이다.

3. 실험 결과

3.1 모드연성채터

주축의 임펄스 응답은 직경이 60 mm이고 길이가 150 mm인 시편을 대상으로 측정되었다. Kistler 가속도계는 Fig.5에 보이듯이 A05 지점에 부착되었다. 시편과 주축을 따라 kistler 임펄스 해머에 의해 충격을 가해 HP35670 FFT analyzer를 통하여 응답을 얻었다.

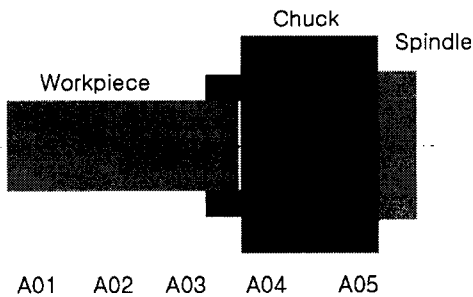


Fig. 5. Diagram of impact points to measure the natural frequency of the spindle-workpiece system using the impulse hammer and accelerometer

실험에서 주축-절삭시편 시스템의 고유진동수는 704 Hz로 측정되었으며 척의 조임력으로 인한 것으로 보이는 332~380 Hz의 연성 진동이 나타났다.

본 논문에서의 채터 신호는 최근 1년 동안의 하드터닝 데이터에서 선택되었다. 이중 대부분의 신호가 모드연성채터로 분류되었다. Fig.6은 분산을 통한 CSDS와 절삭력의 모드연성채터 신호를 보여준다.

채터는 같은 조건으로 2번 절삭을 수행할 때 발생되었다.

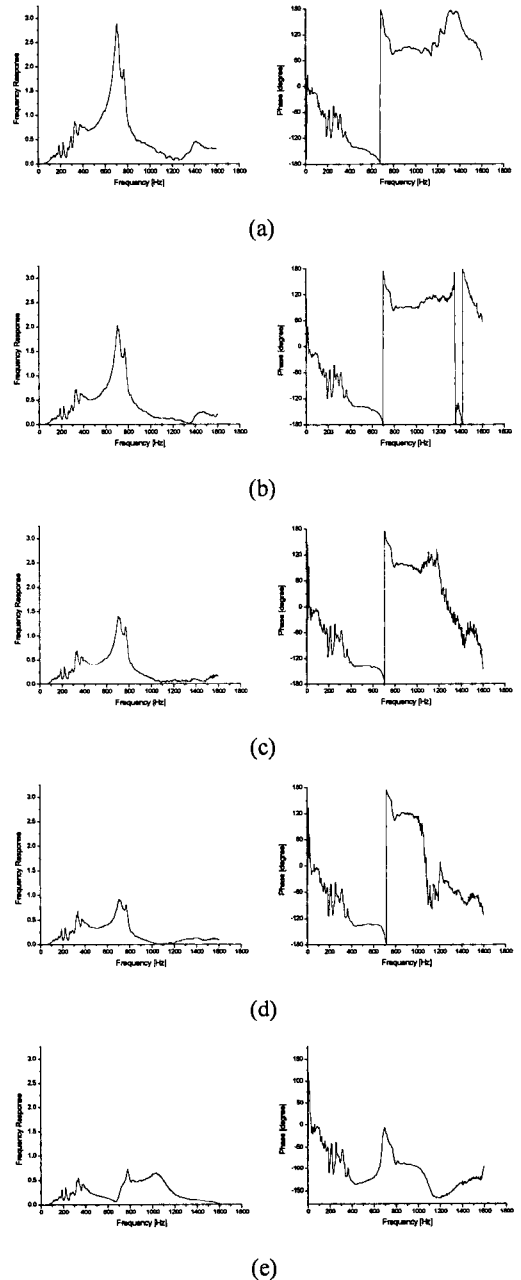


Fig. 6. Magnitude and phase of impulse response of Hwacheon CNC lathe at points as shown in Fig. 6. (a) Impulse response and phase at node A01, (b) at node A02, (c) at node A03, (d) at node A04, (e) at node A05

3번째 절삭에서는 주축회전속도 594 rpm, 절삭속도 120 m/min, 피드 0.15 mm/rev, 절입깊이 0.25 mm, 시편 직경 65 mm의 조건으로 수행되었다. 선행된 2번의 절삭에서는 배분력이 202 N, 주분력이 220 N으로 측정되었으며, 절삭이 시작될 때 주축의 회전 중심 변위량이 절입깊이 방향으로 0.639 μm , 접선 방향으로 0.677 μm 로 나타났다.

세라믹 공구 인서트의 플랭크 마모량은 134.6 μm , 표면 거칠기는 Ra 값이 0.98 μm , R_{max} 값이 39.8 μm 이었다. 모드연성채터는 이 조건으로 3번째 절삭이 시작될 때 발생하였다. Fig.7의 주축과 절삭력 궤적의 방향의 차이는 CSDS와 공구동력계가 초기에 30°만큼 기울어져 설치된 것에 기인한다.

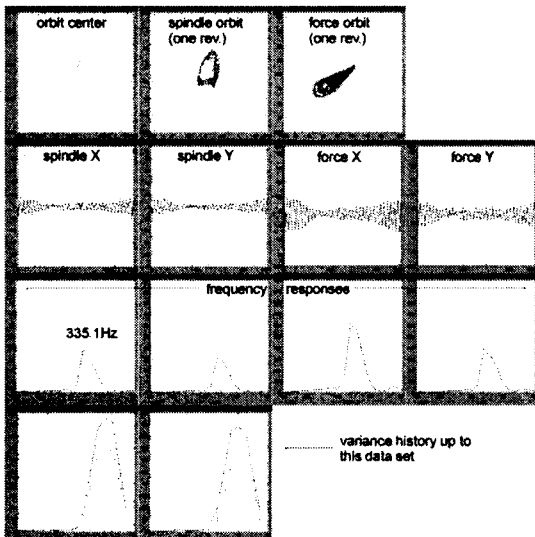
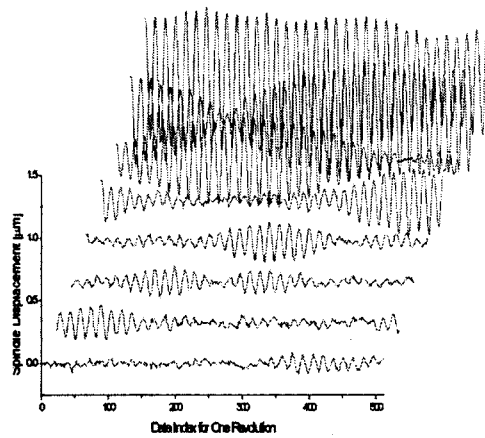


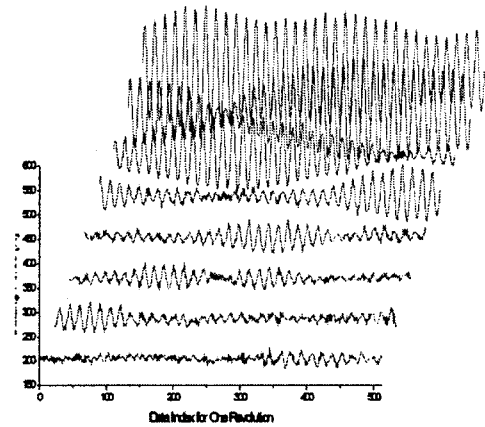
Fig. 7. Basic measurement results of the monitoring system when a mode coupled chatter occurred

Fig.7에서 모든 그래프는 중심궤적과 분산값을 제외시킨 주축 1회전 시의 데이터를 나타낸다. 그래프의 궤적 중심은 가공이 시작될 때의 주축 회전중심과 이동량을 나타낸다.

주축계의 최대 진폭은 50 N의 절삭력이 작용할 때 약 0.3 μm 의 변위에 해당하였다. 채터 주파수는 CSDS와 공구동력계에서 모두 335.1 Hz로 동일하게 나타났다. 332~380 Hz 범위에 수십 가지의 모드연성채터와 다른 모든 채터 주파수가 존재하며, 관찰된 채터의 유형으로부터 CSDS가 공구동력계를 대체할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8. Sequential lists of the measured chatter signals of (a) the CSDS and (b) the cutting force in the depth of cut direction

Fig.8은 채터가 발생한 초기단계부터 완전히 성장할 때까지의 데이터를 연속적으로 보인 것이다. 각각의 파형은 1회전 시의 신호이며 반경 방향의 성분을 나타낸다.

일단 주축-시편계의 고유진동수가 알려져 있으면, 이와 같은 모드연성채터를 만들기는 쉬우며, 채터의 유형은 CSDS나 공구동력계에서 모두 동일하게 나타났다.

3.2 재생채터

Fig.9는 사전 절삭에 의해 남겨진 채터 흔적에 의해 발생한 재생채터의 경우를 보여준다. 재생채터는 몇 초간 지속되

다가 곧 모드연성채터로 바뀐다. 진동의 진폭은 초기에는 점점 감소되다가 모드연성채터로 바뀌는 순간 진동은 증가한다.

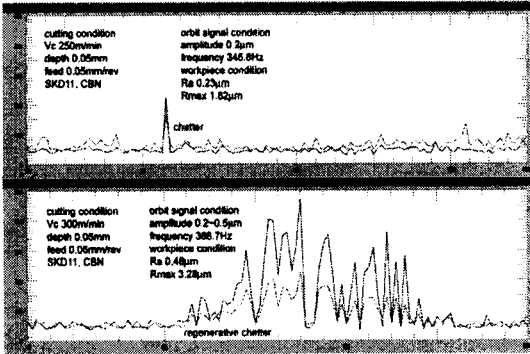


Fig. 9. Variance results of the CSDS when the regenerative chatter was monitored while machining the mode coupled chatter mark left by previous cut

Fig.9의 두 가지 데이터는 CSDS로부터의 분산값을 나타낸다. 공구동력계는 300 m/min의 고속가공에서는 채터를 유발하기 때문에 사용되지 않았다. 재생채터는 남겨진 채터 흔적에서 발생한 뒤, 5초 후에는 채터 주파수가 366.7 Hz에서 모드연성주파수인 342.3 Hz로 변화되었다.

표면거칠기는 250 m/min의 속도로 가공 시 모드연성채터로 인한 Ra값이 0.23 μm , 재생채터로 인한 값은 3지점의 평균값이 0.48 μm 로 측정되었다. 표면거칠기에서 보듯이, 실제 진폭은 모드연성채터인 경우 0.2 μm , 재생채터인 경우는 0.5 μm 를 넘지않았다. CBN 인서트의 공구 마모 상태는 거의 변화가 없었으며, 실제 플랭크 마모량도 다른 선삭에서의 초기단계인 35 μm 정도로 유지되었다.

일반적으로 선반 주축의 베어링 강성은 상당히 크기 때문에 작은 양의 진동을 감지하기 위해서는 20 nm이하의 높은 분해능이 요구된다. 공구동력계가 널리 쓰이고 있지만 고속가공영역에서는 CSDS가 보다 우월함을 보인다. 즉, 절삭 동역학에 거의 영향을 주지 않으면서 높은 민감도와 단일 이득 대역폭을 지닌 센서로서 고속가공에서 유리함을 나타낸다.

3.3 그 밖의 진동 신호의 감지

(1) 다중채터모드

Fig.12에서 다중채터모드가 323.7과 355.3 Hz에서 관측

된다. 첫 번째 경우는 주축-절삭시편 계의 연성에 의한 것으로, 두 번째 경우는 공구동력계에 붙은 공구홀더의 연성에 의한 것으로 예상된다. 이 데이터는 채터 발생 후 몇 초뒤의 것이다. 이러한 다중채터모드는 몇 초내에 완전히 성장한 채터로 발전되며, Fig.7에 나타났듯이 채터 주파수는 335.1 Hz로 단일화된다. 절삭속도는 120 m/min, 절입깊이는 0.25 mm, 피드는 0.15 mm/rev였으며 AISI D2 공구강에 대해 세라믹 인서트가 사용되었다. Anwar⁽³⁾가 언급했듯이 진동 연성은 채터 발생 초기에 주축-시편계와 공구동력계-공구홀더에서의 두 가지 모드 모두를 불러일으키는 것으로 예상된다. 또한 Dong⁽⁴⁾은 가속도 데이터가 주축계로부터 발생된 것이고 다른 데이터는 공구홀더계에서 발생됨을 보였다. 그리고 coherence값은 두 가지 주파수에서 근접하였다.

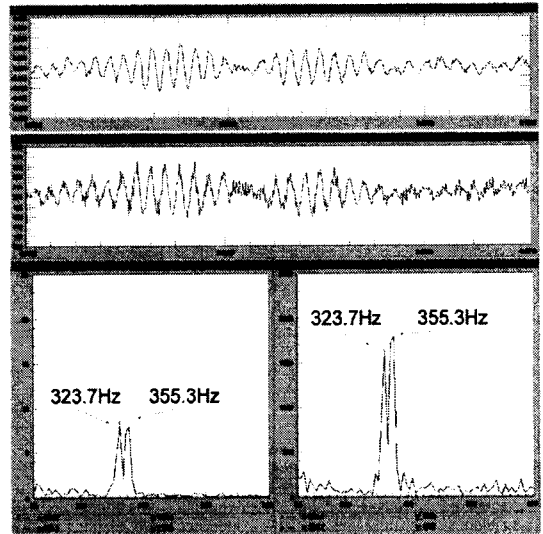


Fig. 12. Multiple chatter modes measured during the turning operation

(2) 칩업힘

일반적인 선삭이 진행되는 동안 칩은 짧은 시간동안 마모된 공구 인서트 주변으로 영키는 경우가 발생한다. 그래프의 수직축은 분산 신호를 강조하기 위해서 과장되어 매우 작은 눈금으로 표현되었다. 이 때의 절삭조건은 절삭 속도 100 m/min, 절입깊이 0.05 mm, 피드 0.05 mm/rev이다. 절삭 시편은 같은 재질이며, 공구는 세라믹 인서트를 사용하였다. 이 결과는 같은 조건으로 6번의 절삭 후에 관찰된 것으로 7 번째 절삭 후에 플랭크 마모량은 104 μm 으로 측정되었다.

Fig.13은 CSDS와 절삭력의 분산 결과를 보여준다. 칩은 143초에서 영커 주축-시면계의 0.08 mm이하의 최대 진동을 유발시키며 1초간 지속되었다. 이 때의 주파수는 주축-시면계의 첫 번째 고유 진동수인 373.8 Hz이었다.

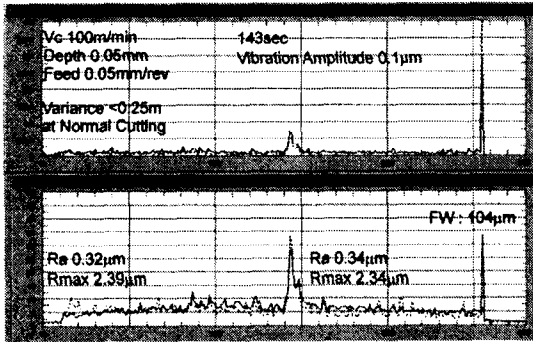


Fig. 13. Variance histories from the CSDS and dynamometer during the whole cutting length when the chip was entangled at cutting time of 143 second

Dong⁽⁴⁾은 이러한 형태의 진동은 공구홀더에 부착된 가속도계의 coherence값으로부터 채터를 구별해낼 수 있다고 보고했다. 그러나 칩얽힘에 의한 진동은 작은 양이어서 생산성을 위한 절삭 조건과는 차이가 있으며, 실제 가공에서 발생하는 진동은 채터를 일으키기에 충분한 에너지를 갖는다.

Dong의 결과와는 달리, 본 논문의 진동수는 주축-시면계 고유진동수의 영역 내에 존재했다. 이러한 결과는 CSDS의 민감도가 가공 상태를 감지하기에 충분히 높다는 것을 보여준다. 칩얽힘에 의한 표면저칠기와 진동의 변화는 매우 작아서 바로 옆에 있는 작업자도 거의 알 수 없으며, 단지 붉은 색으로 얽히는 칩을 잠시 동안 볼 수 있을 뿐이다.

4. 결론

정전 용량형 주축변위센서는 절삭 가공 시 진동감시시스템에 적용되어 신뢰할 수 있는 결과를 보였으며, 이에 필요한 민감도를 지니고 있음을 확인했다. 그리고 R-value의 단순형태인 분산값은 채터량을 정량화하는데 매우 효과적이었다. 주축변위위자가 공구동력계를 대체하여 사용된 것은 절삭력과 주축베어링의 강성이 선형관계를 이루고 있기 때문이다. CSDS가 공구동력계나 다른 센서들에 비하여 유연성이 떨어지고 초기 설치가 난해한 반면, 매우 높은 민감도를 지니고 다른 절삭 동역학에 영향이 적음을 알 수 있다.

참고 문헌

- (1) Bukkapatnam, S. T. S., Lakhtakia, A., Kumara, S. R. T., and Satapathy, G., 1995, "Characterization of Nonlinearity of Cutting Tool Vibrations and Chatter," Proc. of the ASME Materials Division, Vol.69-2, IMECHE, pp.1207-1223.
- (2) Soliman, E., and Ismail, F., 1998, "A Control System for Chatter Avoidance by Ramping the Spindle Speed," J. of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, Vol.120, pp.674-683.
- (3) Anwar, S., Chandra, A., and Ousterhout, K. B., 1994, "Predictive Control of Chatter Instabilities in Single Point Turning," Manufacturing Science and Engineering, Vol.68-2, ASME, pp.767-782.
- (4) Dong, W., Joe Au, Y. H., and Mardapittas, A., 1992, "Machine Tool Chatter Monitoring by Coherence Analysis," Int. J. Prod. Res., Vol.30, No.8, pp.1901-1924.
- (5) Tarng, Y. S., Hseih, Y. W., and Li, T. C., 1996, "Automatic Selection of Spindle Speed for Suppression of Regenerative Chatter in Turning," Int. J. Adv. Manuf. Tech., Vol.11, pp.12-17.
- (6) Chiou, R. Y., and Liang, S. Y., 2000, "Analysis of Acoustic Emission in Chatter Vibration with Tool Wear Effect in Turning," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol.40, pp.927-941.
- (7) Spiewak, S. A., 1995, "Acceleration Based Indirect Force Measurement in Metal Cutting Process," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.35, No.1, pp.1-17.
- (8) Ismail, F., and Kubica, E., 1995, "Active Suppression of Chatter in Peripheral Milling, Part I," Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 10, pp.299-310.
- (9) Huang, S. M., Fielden, J., Green, R. G., and Beck, M. S., 1998, "A New Capacitance Transducer for Industrial Applications," J. Phys. E: Sci. Instrum. 21, pp.251-25.