

◆ 특집 ◆ IT 융합 생산/가공기계 지능화 기술

공작기계 채터진동 스마트 보정제어 기술

Smart Compensation for Chatter Control of Machine-Tool

김동훈^{1,✉}, 송준엽¹, 고동연²
Dong-Hong Kim^{1,✉}, Jun-Yeob Song¹, and Dong-Yeon Koh²

¹ 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 (Department of Ultra Precision Machines and Systems, Korea Institute of Machinery and Materials)

² (주)스맥 기술연구소 (R&D Center, SMEC Co., Ltd.)

✉ Corresponding author: kdh680@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7148

Manuscript received: 2014.10.22 / Revised: 2014.12.9 / Accepted: 2014.12.17

The machining-chatter stands for a sudden relative vibration appeared between a material and a tool while processing with a machine. This chatter is key factor that seriously affects the quality of processed materials as well as being a factor which causes serious damages to the tool and the machine. This study is related to the monitoring and smart control of chatter problem that can compensate machining-chatter faster and produce processed goods with more precision by autonomous compensation. The above-mentioned machining-chatter compensator includes the chatter vibration sensor and the chatter compensator that estimates the compensation value according to the sensor detecting the chatter vibration of machine-tool and the chatter vibration detected from the sensor while having a feature of being organized by interlocking with the machine-tool controller.

Key Words: Smart compensation (스마트 보정), Chatter control (채터제어), Key factor (주요 영향인자), Machine-tool Controller (공작기계 제어기)

1. 서론

공작기계를 이용한 가공시 열변형 다음으로 가공정밀도에 큰 영향을 미치는 것이 채터진동이다. 채터진동은 공작기계를 이용한 가공 과정에서 소재와 공구사이에 나타나는 급격한 상대진동으로

이러한 진동은 가공 소재 품질에 심각한 영향을 미치는 요소일 뿐만 아니라 가공 톨과 기계에 손상을 유발시키는 원인으로 작용한다.^{1,2}

따라서 가공성과 안정성을 확보하기 위해서는

채터진동은 반드시 제거되어야 하여야 한다. 이러한 공작기계의 가공시 발생하는 채터진동은 특정한 절삭조건에서 발생한다. 이러한 경우 가공 기계의 톨 구동속도(Spindle Rate)나 이송속도(Feed Rate), 절삭깊이 등을 조절함에 의해 채터진동을 줄일 수 있다.³⁻⁵ 기존의 연구사례를 살펴보면 다음과 같다. 채터진동을 줄이는 기존의 채터진동 보상 방법은 공작기계에 가공물을 물려놓은 후 여러 가공조건으로 실험을 수행할 때 작업자의 시각적인 정보즉, 육안으로 가공시 공구가 심하게 떨리

는지를 판단하고 이를 DB 화해서 다음의 가공 수행시 chatter진동이 일어나지 않도록 하는 가공조건 검사 방법과, 육안을 대신하여 가속도 센서로 데이터를 획득하고 이를 분석하여 각 가공조건에 대한 chatter진동의 유무를 분류하여 다음 작업시 chatter진동이 일어나지 않도록 가공조건을 선정하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 이러한 chatter진동 조정 방법들은 실시간 보상의 개념이 아니어서 미리 가공전에 충분한 실험 데이터를 확보한 후 이 실험 데이터를 근거로 chatter진동을 보상하여야 하므로 chatter진동의 보상에 많은 시간과 노력이 소요되는 단점이 있었다.^{6,7} 따라서 실시간(Real-time)으로 chatter진동에 따른 적합한 제어가 되지 않으면 가공률이 파손되거나 파손되지 않더라도 가공된 소재의 표면 조도(Surface Roughness)가 저하된다. 따라서, 본 연구에서는 공작기계의 이러한 chatter진동을 보상하기 위하여 chatter진동 감지 및 예측모델에 대한 부분을 임베디드 디바이스화 하고 이송속도 및 회전속도 조절을 위한 기능을 컨트롤러인 CNC (Computerized Numerical Controller)에 실장 (Implementation)하여 적용하고자 한다.

2. chatter진동 신호처리 프로세스

열변형 다음으로 가공정밀도에 큰 영향을 미치는 것이 chatter진동이기때 가공성과 안정성을 확보하기 위해서는 chatter진동은 반드시 제거되어야 하는 항목이다. 공작기계의 가공시 발생하는 chatter진동은 특정 절삭조건에서 발생하므로 이러한 절삭조건을 실험적으로 규명하기 위해 Fig. 1처럼 스피들 축의 x, y, z 방향에 가속도 센서를 부착하여 실험 조건에 따른 특성을 파악하고자 한다.

절삭은 이송속도와 절입깊이, 스피들 회전수를 달리하면서 각 축의 가속도 신호를 측정한다

2.1 가공 신호 분석

절삭가공은 절입두께와 이송속도(Feed Rate) 그리고 스피들 회전수(Spindle Rate)를 변경하면서 가공을 수행하였고, chatter진동 신호의 측정은 가속도 센서를 대상 공작기계의 각 축에 마그네틱으로 부착하여 신호를 획득하였고, 획득시 샘플링 주파수는 20kHz로 하였다. Fig. 2에 기본적인 신호취득 및 주파수 분석을 나타내었다.

분석대상의 신호는 절삭조건 중 스피들 속도와 절입깊이는 일정할 때 이송속도의 변경에 따라 발

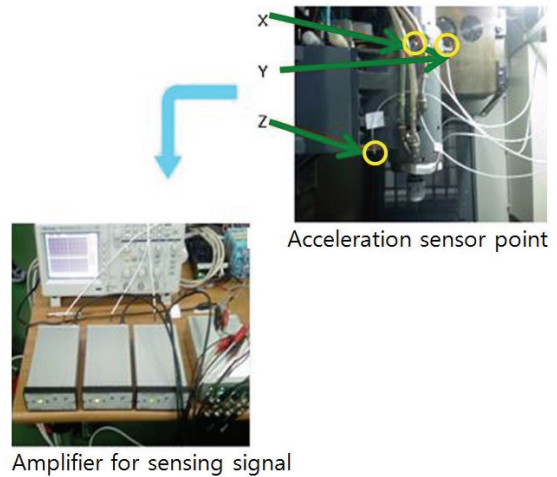


Fig. 1 Experimental set-up for chatter vibration test

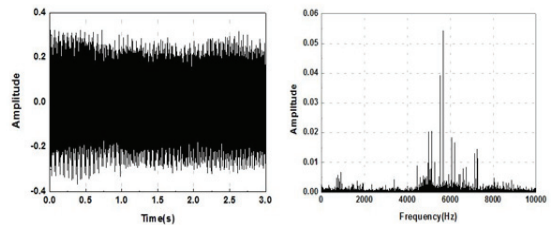


Fig. 2 Raw signal and FFT in case of depth of cut (0.8mm) and spindle speed (1000rpm)

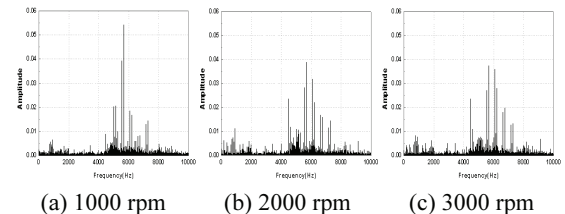


Fig. 3 Frequency analysis with respect to change in feed rate

생하는 과도한 chatter진동 및 절삭력으로 인해 공구가 파손된 경우의 절삭조건에 해당하는 신호를 분석한다. 먼저, 절삭조건을 절입두께를 0.8mm, 회전속도를 1000rpm, 이송속도를 500mm/min로 하여 신호를 분석하였다.

그리고 Fig. 3처럼 chatter진동 특성을 다양하게 분석하기 위해 이송속도를 500, 1500, 2500mm/min씩 증분하면서 실험한 신호의 FFT 분석을 수행하였다.

이송속도가 증가할수록 0~500, 430~460, 6000~

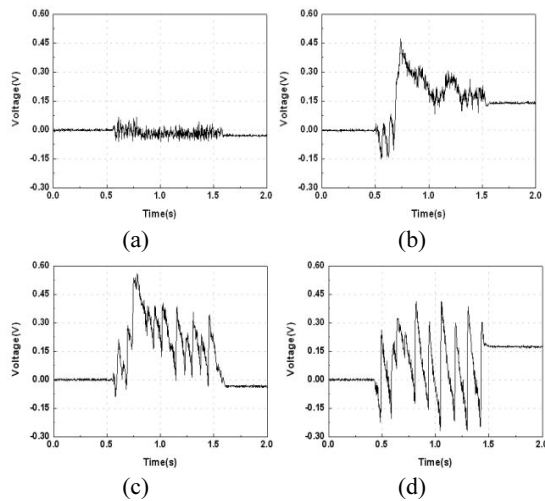


Fig. 4 (a) 1000rpm, 0.2mm, 500mm/min, (b) 1000rpm, 0.8mm, 500mm/min, (c) 1000rpm, 0.8mm, 1500 mm/min, (d) 1000rpm, 0.8mm, 2500mm/min

7000 사이에 존재하는 주파수의 진폭이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 이송속도가 3000mm/min에서 공구가 파손이 일어났다. 이송속도의 증가에 따른 chatter 진동의 크기를 비교하기 위해 가공된 표면을 레이저 센서로 측정된 결과를 다음의 그림에 나타내었다.

절삭조건 변화에 따른 가공면의 표면 거칠기 변화 Fig. 4(a)는 절삭깊이가 0.2mm일 경우의 가공된 면의 표면 거칠기를 나타내고 있다. (b), (c), (d)는 회전수 1000rpm, 절삭깊이 0.8mm의 동일한 가공 조건에서 이송속도를 3단계로 변화시켜 가공했을 시 나타나는 표면의 거칠기를 보여준다.

위의 결과에서 절입깊이가 깊을수록 chatter진동으로 인한 표면거칠기가 증가함을 볼수 있을 뿐만 아니라 동일한 절삭조건에서 이송속도가 증가할수록 chatter진동이 증가함을 알수 있다. Fig. 4에서 설명된 변화하는 3가지 주파수 대역중 이송속도의 증가에 따른 (즉 chatter진동의 증가) chatter 진동을 판별하기 좋은 주파수 대역은 6000Hz~7000Hz임을 확인하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 DSP에서 실시간 데이터를 획득함에 있어서 선행되어야 하는 필터는 밴드패스 필터임을 알 수 있다.

2.2 디지털 필터

가속도 센서로부터 입력되는 신호로부터 chatter 진동을 실시간으로 판단하기 위해서는 chatter진동

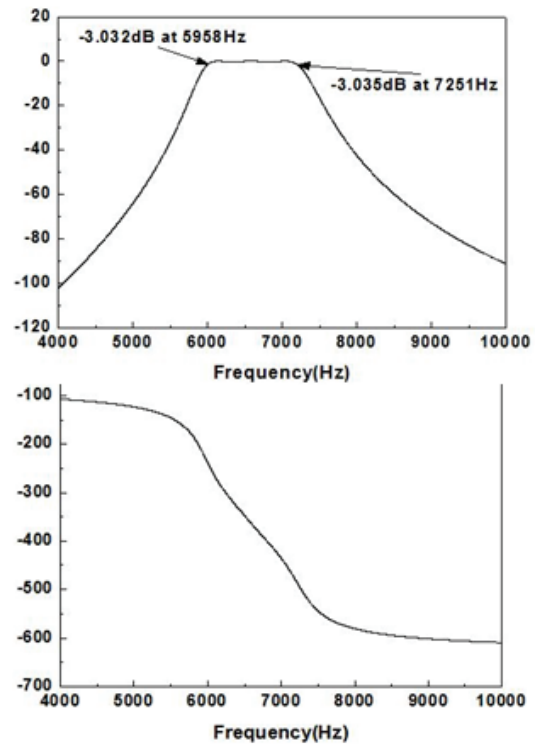


Fig. 5 Frequency response of continuous filter

주파수 대역을 판단해야 한다. 따라서 본 연구에서는 chatter 진동과 관련된 주파수 대역을 Raw 신호로부터 추출하기 위해 Chebyshev 타입의 디지털 BandPass 필터를 사용한다.

필터 설계의 세부 항목은 아래와 같다.

- i) BandPass 필터 주파수(CutOff 주파수): 6kHz ~7kHz
- ii) 필터 타입 : Chebyshev
- iii) 필터 감쇠비: 10dB (5500Hz, 7500Hz)
- iv) 필터 종류 : Digital
- v) 리플 : 0.1dB

위의 필터 스펙으로 설계된 연속시간 필터 전달함수 G(s)는 아래와 같다.

$$G(s) = \frac{4.61 * 10^{11} s^3}{s^6 + 1.271 * 10^4 s^5 + 5.23 * 10^9 s^4 + 4.38 * 10^{13} s^3 + 8.92 * 10^{18} s^2 + 3.696 * 10^{22} s + 4.962 * 10^{27}} \quad (1)$$

위의 설계된 연속시간 필터의 성능 평가는 Matlab에서 수행되었다. Fig. 5는 필터의 주파수역

성능을 나타내는 Gain과 Phase의 변화를 나타내고 있다.

설계된 연속시간 밴드패스 필터는 처음에 주어진 설계 사양과 비교하였을시 7000Hz의 CutOff 주파수에서 약간의 차이가 나지만 전체적으로 설계 사양을 추종하는 주파수역 특성을 나타내었다. 따라서 DSP에서 필터를 적용하기 위해서는 연속시간 필터를 이산시간계의 필터로 변환해야한다. Bilinear Transform 변환 방법을 이용하여 구한 이산시간 밴드패스 필터는 아래와 같다.

$$G(z) = \frac{4.78 \cdot 10^{-5} z^6 - 1.434 \cdot 10^{-4} z^4 + 1.434 \cdot 10^{-4} z^2 - 4.78 \cdot 10^{-5}}{z^6 - 5.395z^5 + 12.58z^4 - 16.17z^3 + 12.08z^2 - 4.974z + 0.885} \quad (2)$$

이산시간 필터를 최종적으로 DSP에 적용하기 위해서 필터의 차분방정식을 구해보면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Y[k] = & -0.885Y[k-6] + 4.974Y[k-5] \\ & -12.08 \cdot Y[k-4] + 16.174Y[k-3] \\ & -12.581Y[k-2] + 5.395Y[k-1] \\ & -4.780 \cdot 10^{-5} X[k-6] + 1.434 \cdot 10^{-4} X[k-4] \\ & -1.434 \cdot 10^{-4} X[k-2] + 4.780 \cdot 10^{-5} X[k] \end{aligned} \quad (3)$$

위에서 구해진 차분방정식을 실제 데이터에 적용하여 필터 성능을 검증해 보았다. 대상신호는 회전수 1000rpm, 절입깊이 0.8mm, 이송속도 500mm/min의 Raw 신호로 하였다. Fig. 6(b)는 Raw 신호인 (a)에 위에서 설계한 밴드패스 필터를 적용한 결과를 나타내고있다.

Fig. 7(a)는 Raw 신호의 FFT를 (b)는 필터 된 신호의 FFT 변환을 통한 주파수 분석 결과를 나타내고 있다. 설계된 필터는 원 신호의 5000Hz 이하의 신호와 8000Hz 이상의 신호는 거의 완벽히 제거하는 성능을 나타내었고, 초기에 설정된 6000~7000Hz의 밴드 대역에서의 원래신호와 비교했을 시 약간의 오차를 나타내고 있는데 이는 필터의 타입을 Chebyshev로 하였기 때문이다. Chebyshev 필터는 감쇠비는 크지만 리플을 가지고 있는 특성 때문에 밴드대역내의 신호의 레벨이 정확히 요구되는 분야에서 적용하기가 어렵고 대신에 Butterworth 필터가 적당하다. 그러나 본 연구에서는 절삭조건에 따른 신호 패턴의 레벨이 중요하기에 감쇠비가 큰 Chebyshev 필터를 적용해도 무리가 없을 것으로 여겨진다.

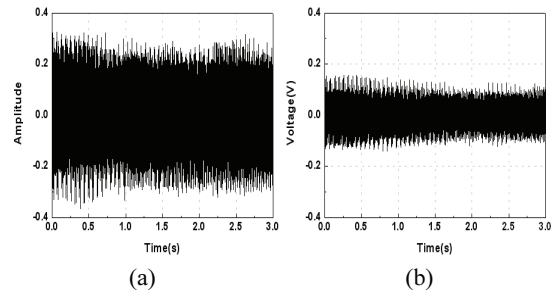


Fig. 6 Comparison of raw signal and filter signal for bandpass filter verification

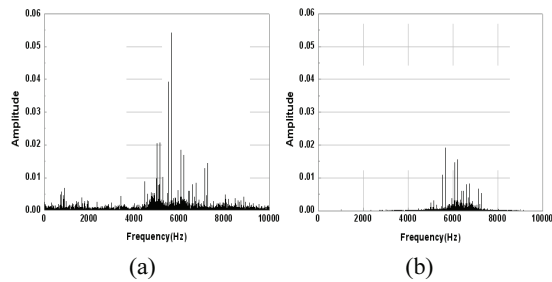


Fig. 7 Comparison of frequency for in transforming FFT

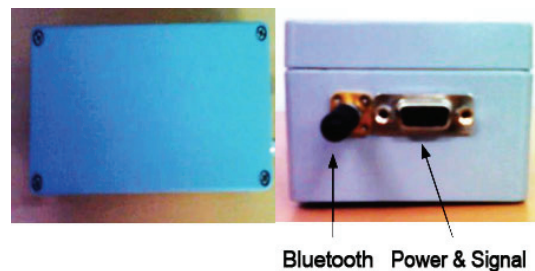


Fig. 8 Designed for embedded device

3. chatter진동 감지 및 판단용 임베디드 디바이스 개발

3.1 임베디드 디바이스 개발

Fig. 8은 본 연구에서 개발된 chatter진동 감지 및 판단용 임베디드 디바이스를 나타내는 사진이다. 연산은 연산은 TMS320C2407A 40Mhz CPU를 사용하였다. A/D 변환 획득 데이터에서 노이즈 제거를 위해 설계된 필터의 차분방정식 알고리즘을 인터럽트 루틴에 적용하였다. Bluetooth는 실제 보상기 내부에서 chatter진동이라 판단했을 경우 이를 보상하기 위한 새로운 지령을 CNC공작기계로 전달하는 역할을 한다. 이러한 무선 통신의 이점은 여러

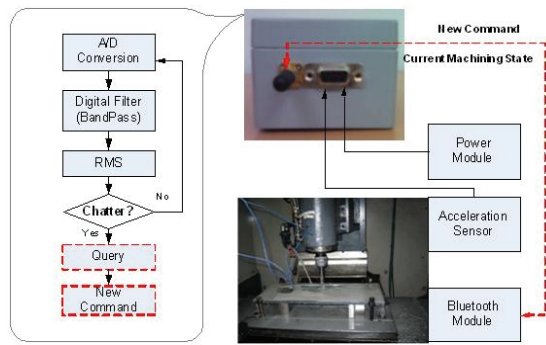


Fig. 9 Flow chart of interaction between compensation embedded device for chatter vibration and CNC

이스와 CNC공작기계의 상호 작용도를 개략적으로 나타내고 있다.

채터진동의 발생을 감지 및 판단하기 위해서 먼저 Stand-Alone 타입의 마이크로 프로세서 장치를 설계 및 제작하고, 채터진동을 판단하는 알고리즘과 이를 줄이기 위해 NC공작기계와 상호통신 가능한 시스템을 구축하였다. 본 연구의 목적에 부합되도록 개발된 채터 판단 및 저감 프로그램이 임베디드 디바이스에 Firmware되어 있다. Fig. 10 처럼 Firmware된 프로그램의 메인 루틴의 주요 구성은 크게 아래와 같이 이루어져 있다.

3.1.1 초기화

초기화 부분은 DSP 처리속도와 관계된 PLL 설정, 채터진동의 유무를 판단하는 기준 신호로 사용되는 가속도 신호를 샘플링 하기 위한 A/D Converter 설정, SCI 설정, 샘플링의 기준 신호인 내부 타이머 설정, 그리고 샘플링과 직접 관계되는 인터럽터 설정을 포함해 총 5가지로 구성되어 있다. 본 연구에서는 샘플링 주파수는 SCI를 통해 변경될 수 있도록 하였으며 디폴트 값은 20kHz로 설정되었다. A/D변환 채널수와 입력전압레벨은 조정이 가능하도록 되어있으며, 통신 속도는 38400bps로 고정하였다.

3.1.2 인터럽터 프로세서

A/D 샘플링은 초기화에서 등록된 인터럽터 루틴에서 수행된다. 인터럽터가 발생할 경우 메인 프로그램은 현재 A/D 상태를 체크한 후 A/D 된 결과가 버퍼내에 존재하면 이 결과를 내부 변수에 저장한다. 인터럽터가 발생한 횟수를 카운터하는 변수를 버퍼의 크기와 비교하여 버퍼가 포화되었을 시 인터럽터와 관계된 타이머의 활성 상태를 비활성 시켜 인터럽터 발생을 중지시키고, NC공작기계에서 수행되고 있는 감시 프로그램에 '>' 문자를 전송한다. 인터럽터를 중지시키는 이유는 실제 버퍼내에 저장되어 있는 데이터를 분석하는데 소요되는 시간은 인터럽터 주기보다 많은 시간이 걸리기 때문이다. 데이터의 분석(디지털 필터와 채터 판단 알고리즘 등)을 위해서 인터럽터와 관계된 타이머를 비활성 상태로 만들어 인터럽터를 중지시킨다, 그리고 메인 프로그램에서 데이터 분석 프로세서가 완료된 후 다시 비활성된 타이머를 활성시켜 인터럽터 서비스 루틴이 수행되도록 한다. 이러한 관계를 Fig. 11에 나타내었다.

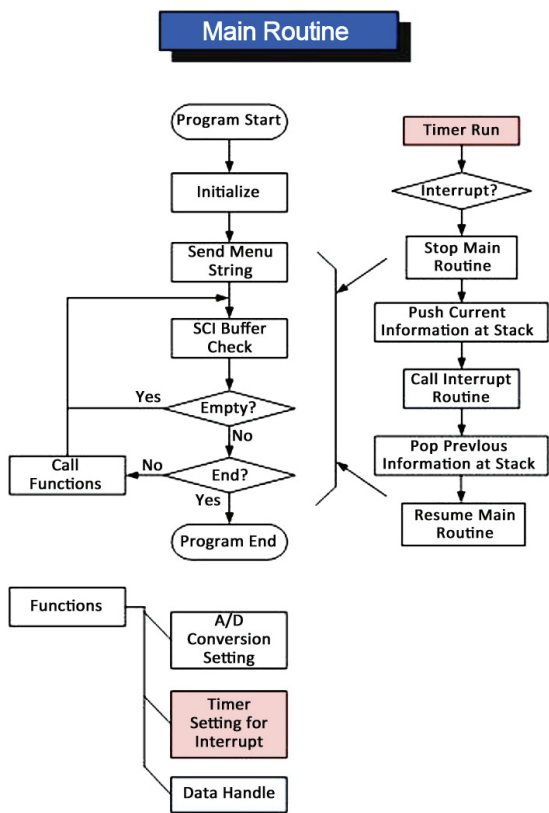


Fig. 10 Main routine

대의 공작기계에서 발생하는 채터진동을 실시간적으로 동시에 보상하고자 할 때 서버 클라이언트 구조 구축의 효율성을 제공하는 잇점을 가지고 있다. 또한 유선의 단선이나 피복의 파괴방지도 가능하다. 그리고 9핀으로 구성된 연결잭에는 디바이스 내부의 DSP 전원과 가속도 센서 신호를 연결하는 기능을 가지고 있다. Fig. 9는 개발된 디바

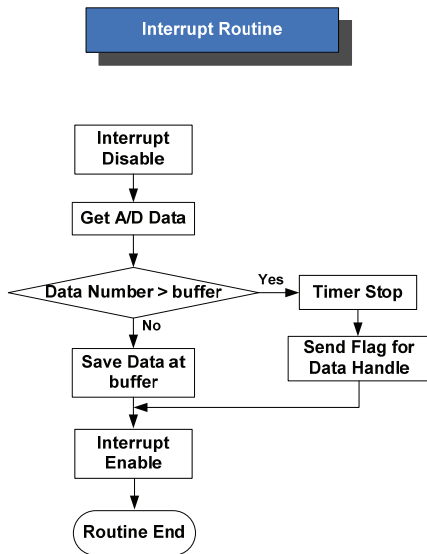


Fig. 11 Interrupt routine flow chart

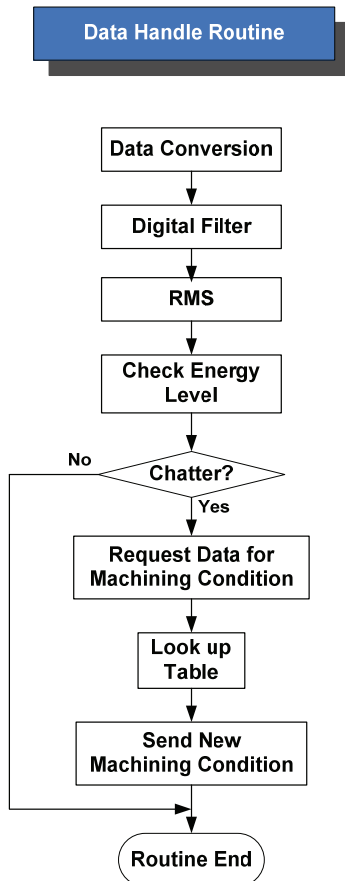


Fig. 12 Data handle flow chart of chatter compensation

3.1.3 Data 핸들 프로세서

채터진동을 판별하기 위해 고속으로 샘플링되는 신호와 이를 처리하는 과정을 Fig. 12에 나타내었다. A/D 변환을 통해 획득된 신호는 DSP내부에 설정된 버퍼에 저장된다. DSP내부의 버퍼는 용량이 그다지 크지 않기에 버퍼의 크기는 제한되어 있다. 따라서 실시간으로 신호를 저장할 때 버퍼가 오버플로우 되지 않도록 하였고, 버퍼가 완전히 채워졌을 경우 이 버퍼의 신호를 설계된 밴드 패스 필터인 차분방정식에 적용하여 필터된 신호를 저장하였다. 그리고 필터된 신호의 에너지 레벨을 평가하기 위해 Root Mean Square를 취하여 이를 채터 진동의 판별기준으로 삼았다. 채터가 발생했다고 판별할 경우 시리얼 통신으로 현재 대상 공작기계에 가공상태를 요청하고, 공작기계가 현재 절삭조건(이송속도, 회전수등)을 DSP에 전달하면 이를 기준으로 하여 새로운 절삭조건을 공작기계에 지령하였다. 이러한 실시간 반복 계측 및 보상알고리즘을 통해 채터 진동을 보상하였다.

4. 가공중 온라인 실시간 CNC 자율보정 결과

Fig. 13은 가공중 온라인 실시간 CNC 자율보정을 위하여 구축된 시스템 환경을 나타낸다. 각 축의 진동을 획득하는 센서부와 이러한 신호를 증폭하고 기본 노이즈를 제거하는 증폭부 그리고 증폭부의 신호를 실시간 획득하는 DSP와 DSP의 보정 신호를 공작기계로 전송하는 전송부 및 DSP의 보정 신호를 수행하는 NC 커널부로 구성된다.

- 작동 메커니즘 순서는 다음과 같다.
- 가속도 센서의 신호를 DSP(Digital Signal Processor) 내부의 A/D변환 모듈을 이용하여 획득한다.
 - 획득된 신호에서 채터 진동을 분별하기 위해 디지털 필터 알고리즘이 수행된다. 필터 처리된 신호의 에너지 레벨을 판단하기 위해 RMS(Root Mean Square)가 수행된다.
 - RMS레벨이 특정 범위를 넘어가면 채터진동이라 판단하고 이를 보상하기 위한 값을 RS232모듈에 전달한다.
 - RS232모듈은 전달된 값을 블루투스 모듈로 전달한다.
 - 블루투스 모듈은 데이터를 수신장치로 무선으로 전달한다.
 - 공작기계내에서 실행되는 프로그램이 이를

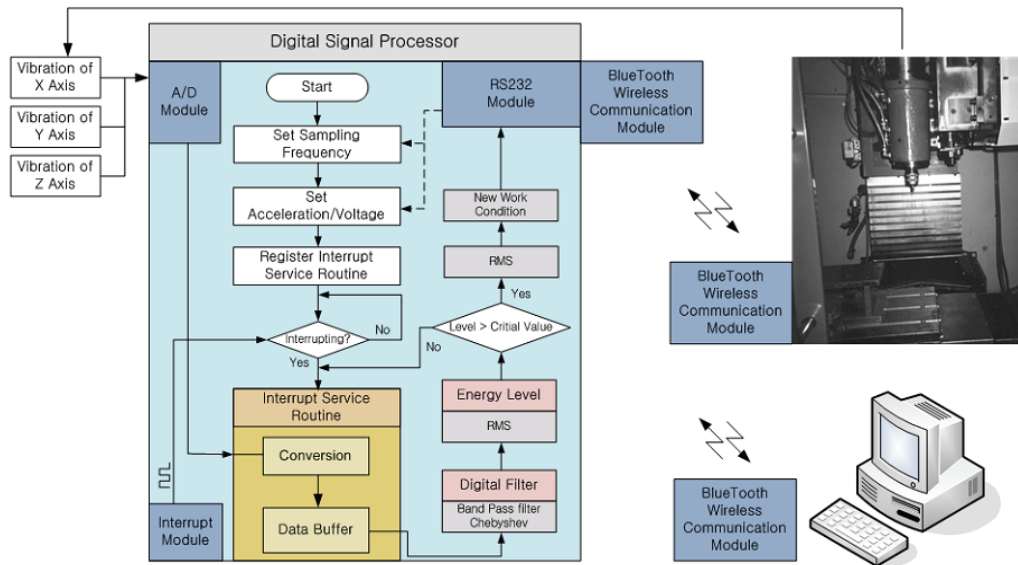


Fig. 13 Flow chart of real-time vibrarion damping system

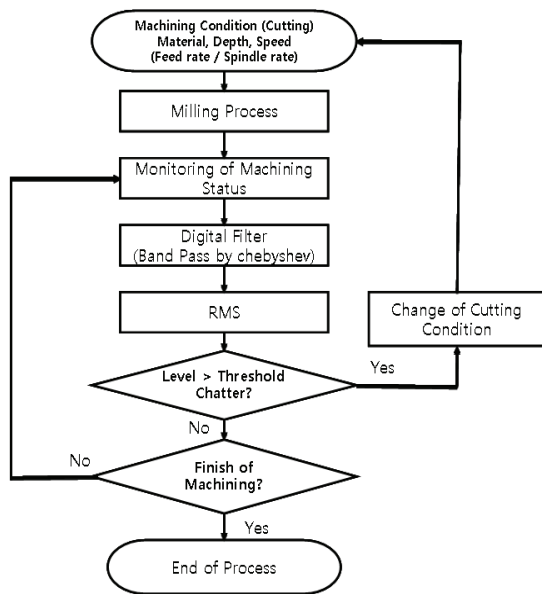


Fig. 14 Flow chart of real-time chatter compensation

받아서 분석하고 보상값을 적용하기 위해 컨트롤러와 관계된 라이브러리를 호출하여 실행한다.

- 보상값이 적용되어 채터진동이 감소한다.

Fig. 14에 채터진동을 가공중 보상하기위한 플로우를 나타내었다.

Table 1 Comparison of measured roughness and feedrate

	Before	After
Feed rate (mm/min)	200mm/min	Avg 152/mm
Roughness (um)	4.2um	4um

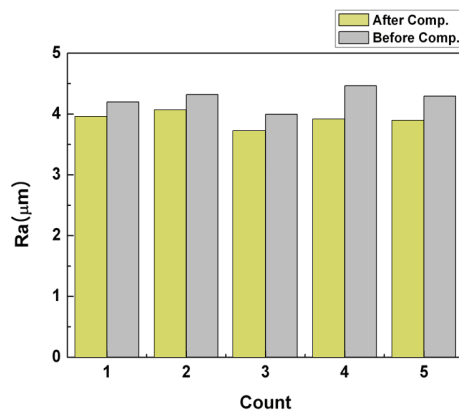


Fig. 15 Comparison of surface roughness before and after chatter comperison

CNC 내부적인 채터 보정 방법은 실험적으로 선행된 채터시 발생하는 RMS한계값과 현재 계측된 RMS 값의 비를 공작기계의 Feedrate 변화율 지령으로 하여 NC커널에 지령하는 방식을 채택하였다. 실험조건은 다음과 같다.

- 가공회수 : 5회
- 스피들 회전속도 : 1000rpm
- 공구 이송속도 : 200mm/min

DSP내부에서 실시간 일어나는 과정에서 필요한 계측 데이터를 추출하는 것은 가공이 진행되는 과정에서는 상당히 어려움이 있다. 본 연구에서는 적용된 DSP에서 동작기계 NC지령 값을 추출하고, 이때의 가공 표면을 스타일러스로 측정하여 채터 보정이 없는 경우와 비교하였다. 그 결과를 아래의 Fig. 15에 나타내었다.

5회 반복 실험을 통한 채터 보상 전후의 성능 개선율은 최저치가 약 5%정도로 나타났다. 각 실험에 대한 성능개선율을 Fig. 15에 나타내었다. 5회 반복 실험한 결과에 대한 보정전후의 지령값의 평균과 표면거칠기의 평균값을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

5. 결론

본 연구의 목적은 가공물과의 마찰 및 스피들 회전에 따른 채터진동에 기인한 가공품 표면거칠기 저하를 가공중 자율 제어하기 위한 것으로 다음과 같은 내용을 수행하였다. 실시간으로 가공상태의 신호를 획득한 후 채터진동의 유무를 결정하는 디지털 필터를 구현하였다. 디지털 필터의 설계 및 RMS를 통한 에너지레벨 측정을 통하여 가속도 신호를 기준으로 하기 때문에 샘플링 속도가 높고 또한 채터진동을 보상하기 위한 자동보상기가 마이컴(DSP) 기반으로 되어 있는 환경하의 고속 샘플링 및 적은 샘플수와 같은 제약조건에서 채터진동 신호를 가공중 실시간으로 판단이 가능하였다. 이러한 내용은 하드웨어적으로 Firmware되어 임베디드 디바이스로 구현 적용되었으며, 이를 기반으로 CNC에 인터페이스 프로그래밍함으로써 스피들 속도, 공구이송 속도, 절입깊이 등이 가공중 실시간 자율 보상되도록 하였다. 보상을 적용하는 방법에서의 차별성은 채터진동 발생시 동적으로 가공조건을 변화시킬 수 있도록 한 부분과 임베디드 디바이스 형태의 보상기에서의 출력된 보상값의 적용을 위한 프로그램을 차제 개발한 것이다. 또한 획득된 보상값을 임베디드 디바이스 내부 컨트롤러에서 동작기계 제어기인 CNC로 무선통신으로 전달함으로써 실시간적으로 동작기계가 채터진동에 제어하도록 하는 기능이 구현되었다.

REFERENCES

1. Kim, D. H. and Song, J.-Y., "Ubiquitous-Based Mobile Control and Monitoring of CNC Machines for Development of u-Machine," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 455-466, 2006.
2. Kim, D.-H. and Song, J.-Y., "Knowledge-Evolutionary Intelligent Machine-Tools: Part 1: Design of Dialogue Agent based on Standard Platform," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, No. 11, pp. 1863-1872, 2006.
3. Cheah, R. S.-S., Lee, B.-S., and Lim, R. L., "Design and Implementation of an MMS environment on ISODE," *Computer Communications*, Vol. 20, No. 15, pp. 1354-1364, 1997.
4. Kim, D.-H., Kim, S. H., and Koh, K. S., "CNC-implemented Fault Diagnosis and Web-based Remote Services," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 5, pp. 1095-1106, 2005.
5. Wright, P. K., "Principles of Open-Architecture Manufacturing," *Journal of manufacturing systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 187-202, 1995.
6. Yellowley, I. and Pottier, P. R., "The Integration of Process and Geometry within an Open Architecture Machine Tool Controller," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 2, pp. 277-293, 1994.
7. Budak, E. and Altintas, Y., "Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling-Part II: Application of the General Formulation to Common Milling Systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 120, No. 1, pp. 31-36, 1998.