

채터진동의 인프로세스 감시를 위한 실시간 복합계측 시스템(1)

김 정 석,* 강 명 창,** 박 철***

Real-time Multi-sensing System for In-process Monitoring of Chatter Vibration(1)

Jeong-Suk Kim,* Myeong-Chang Kang,** Cheol Park***

ABSTRACT

Chatter Vibration is an unwanted phenomenon in metal cutting and it always affects surface finish, tool life, machine life and the productivity of machining process. The real-time detection of the chatter vibration is necessarily required to automation system. In this study, we constructed the multi-sensing system using Tool Dynamometer, Accelerometer and AE sensor. Especially, Acoustic Emission(AE) generated during turning was investigated the possibility for real-time detection of chatter vibration. Turning experiments were performed using carbide insert tip under realistic cutting conditions and tapered workpiece of SM45C.

Consequently, the real-time detection using multi-sensing system can be used for In-process monitoring of chatter vibration.

Key Words : Chatter Vibration(채터진동), Multi-sensing System(복합계측 시스템), Real-time Detection(실시간 검출), Threshold Level(기준값)

1. 서 론

가공 분야에서 많은 부분을 차지하고 있는 절삭가공은 기구의 구성이 복잡하고, 불확정한 요인을 많이 포함하고 있다. 그 중에서 절삭가공 중에 발생하는 공구와 공작물의 상대진동 즉, 채터진동(Chatter Vibration)

은 절삭 가공면의 정밀도, 공작기계 및 공구의 수명, 가공 공정의 생산성에 영향을 미치며, 공작기계 부품의 설계 및 구성, 가공 공정의 자동화에 중요한 변수로 작용하고 있다.⁽¹⁾

채터진동에 대한 발생기구나 이론적 해석방법에 관하여는 그동안 많은 연구⁽²⁾가 이루어져 왔으나, 그 발생점

* 부산대학교 정밀기계공학과, 정밀정형 및 금형가공 연구센터, 기계기술연구소

** 부산대학교 기계기술연구소 전임연구원

*** 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

을 객관적으로 결정하기 위한 엄밀한 규정은 아직 마련되어 있지 않은 실정이다. 지금까지 채터진동 발생점의 실시간 검출에 관한 연구는 여러가지 방법⁽³⁾으로 이루어져 왔지만 센서의 감도저하에 따른 검출정보의 신뢰성 등이 문제로 제기되고 있다.

따라서, 채터진동의 발생점을 효과적으로 인프로세스 감시하기 위하여 각 센서에 의한 채터진동 발생점에 대한 명확한 규명이 있어야 하며, 효과적인 실시간 검출 방법이 마련되어야 한다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 공구동력계(Tool Dynamometer), 가속도 센서(Accelerometer) 그리고 AE(Acoustic Emission) 센서를 이용한 복합계측 시스템(Multi-sensing System)을 구축하여 채터진동을 실시간 검출한 후, 가공 상태에 관련된 정보의 양을 크게 늘려서 검출 정보의 질을 향상시키고자 하였고, 지금까지 공구 마멸 및 파손 등을 효과적으로 검출하기 위해 사용되어왔던 AE 센서를 채터진동의 검출에 적용함으로써 AE 센서에 의한 채터진동의 인프로세스 감시 가능성을 제시하고자 한다. 또한 절삭조건에 의한 채터진동의 특성을 알아보기 위해 절삭속도와 이송량의 변화에 따른 안정성 판별기준인 한계절삭폭을 알아보려고 한다.

2. 다중 센서에 의한 채터진동 실시간 검출

2.1 복합계측 시스템의 구성

무인 기계가공 공정에서 사용되고 있는 각종 센서에 대한 특성 검토가 이루어진 이래 일부 센서는 검출 타당성이 밝혀져 실용화되어 있는 것도 있으나, 측정 대상의 변화에 따른 센서의 적용 가능성과 센서의 감도저하에 따른 검출 정보의 신뢰성 문제 등과 같은 과제들이 많이 남아 있는 실정이다.⁽⁵⁾

이 점을 보완하기 위하여 최근 많이 검토되고 있는 것이 다중 센서를 이용한 복합계측 시스템이다. 이는 가공 공정의 상태에 관련된 정보의 양을 크게 늘려서 검출 정보의 질을 향상시키는 데 목표를 두고 있으며, 감시 시스템의 유효 검출 범위를 크게 늘리는 효과도 기대할 수 있는 장점이 있다.⁽⁶⁾

종래의 기계가공 시스템에서는 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 단일 센서를 사용하여 기계가공 상태의 정보를 검출해 왔으나 최근의 지능형 기계가공 시스템에서는 Fig. 1(b)와 같이 다중 센서를 사용하여 각 센서에

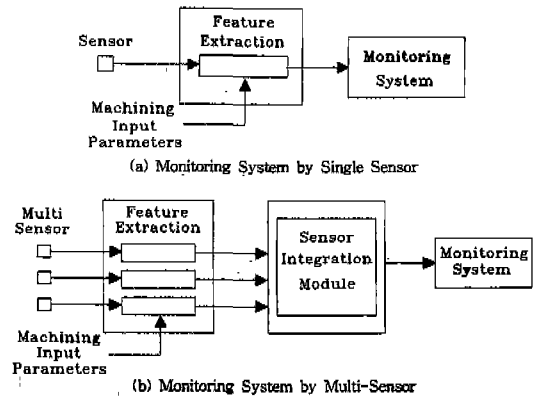


Fig. 1 Schematics of Monitoring System

서 검출된 신호들을 종합 분석하는 복합계측 시스템으로 발전되어가고 있다.

복합계측이란 어느 대상을 측정하는데 있어 하나의 센서만을 사용하지 않고, 특성에 맞는 몇 개의 센서를 복합적으로 사용함으로써 계측 시스템의 신뢰성을 높일 수 있는 것을 의미한다. 복합계측의 형태로는 대상물의 특징 중 하나만을 계측하기 위해서 다수의 센서를 사용하는 경우와 몇 개의 특징을 측정하는데 있어 하나의 센서만으로는 측정하기가 곤란하기 때문에 측정 대상의 특징을 가장 잘 계측할 수 있는 센서를 복합적으로 구성하는 경우가 있다. 특히, 후자의 경우는 하나의 센서로 측정이 가능한 특성과 또 다른 센서로 측정이 가능한 특성 등을 중첩시킴으로써 계측의 신뢰성 향상 및 다양한 범위의 계측이 가능하기 때문에 공작기계나 가공 시스템에서 가공 공정을 감시하거나 절삭 공구의 이상상태 감시에 이용된다.

본 연구에서는 절삭가공 중 채터진동을 계측하기 위하여 공구동력계, 가속도 센서, AE 센서를 이용한 복합계측 시스템을 구성하고, 실시간 영역에서 각 센서의 특성을 조사하여 신뢰성 있는 채터진동 발생점을 검출하고자 한다. 또한 AE 센서를 이용하여 인프로세스 감시의 가능성을 조사하였다.

2.2 실시간 검출장치 및 실험방법

절삭가공에서 채터진동의 발생점을 실시간 검출하기 위해 실험장치를 Fig. 2와 같이 구성하였고, 실험에 사용한 장비들은 Table 1에 나타내었다.

절삭실험은 범용선반을 개조하여 DC 모터로부터 주축과 이송축을 무단변속할 수 있게 만든 선반에서 행하

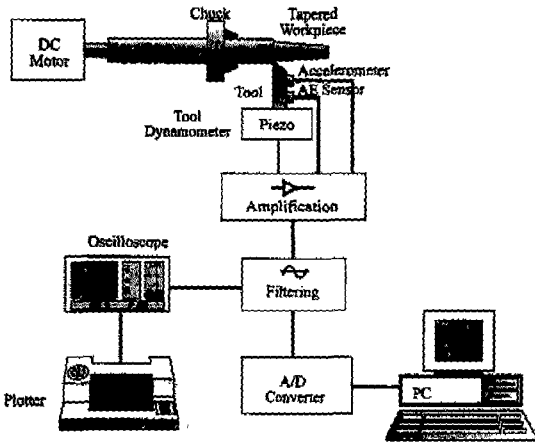


Fig. 2 Experimental Set-up for Real-time Detection of Chatter Vibration

Table 1 Specification of Experimental Instruments

Instruments	Model	Maker
Lathe	2640	Round Top
Oscilloscope	Type 9400A	LeCroy
AE sensor	R-15	PAC
Accelerometer	Type 4344	B & K
Tool Dynamometer	Type 9257A	KISTLER
Conditioning Amplifier	Type 2626	B & K
Charge Amplifier	Type 5007	KISTLER
RMS Converter	Type 2511	B & K
A/D Converter	PCL - 718	Advantech
Plotter	Type 7440A	HEWLETT PACKARD
Tool Holder	CTGPR-2525	KOREA TUNGSTEN
Tool Holder Tip	TPGN	KOREA TUNGSTEN

였으며, 절삭방법은 원통절삭의 상황으로 행하였다. 공작물은 중탄소강(SM45C)으로 채터진동의 발생점을 용이하게 검출하기 위해서 6°의 테이퍼를 갖는 가변 절삭 폭의 형태로 제작하여 사용하였고, 공작물의 외경은 75(mm), 돌출길이(Overhang Length)는 150(mm)로 하였다.

사용한 공구는 경납땀한 P20 계열의 소결공구로서 기하학적 형상은 ISO 규정에 의한 표시로 (0, 6, 6, 6, 15, 0, 0.4)이다. 절삭조건은 구성인선이 발생하지

Table 2 Cutting Conditions

Cutting Speed (m/min)	80, 90, 100, 110, 120
Feed Rate (mm/rev)	0.08, 0.10, 0.12, 0.14
Width of Cut (mm)	1.0

않고, 공구 경사면을 따라 유출되는 칩의 형태가 유동형(Flow type)이 되기 위한 절삭조건을 선택하여 결정하였다.

설정 절삭깊이는 1(mm)로 하여 가공하였고, 본 연구에서 실험한 절삭조건은 Table 2에 나타내었다.

본 실험에 들어가기 전에 공작물의 편심영향을 제거하기 위하여 전가공을 수행하였고, 절삭저항에 있어서 마찰 특성이나 공작물의 진동 영향을 일정하게 유지하기 위하여 절삭유는 사용하지 않았다.

채터진동 발생점을 실시간 검출하기 위해 공구동력계, 가속도 센서, AE 센서를 공구홀더에 부착하여 사용하였다. 각 센서에 의해 시간에 따른 신호의 변화량을 오실로스코프로 검출하여 신호의 특성을 파악한 후 A/D 변환기를 통해 그 변화량을 조사함으로써 채터진동 발생점을 실시간 검출하였다. 또한, 절삭조건에 따른 채터진동의 특성을 파악하기 위하여 채터진동이 발생할 때의 절삭폭을 한계 절삭폭으로 정의⁽⁷⁾하고 그 변화량을 측정하였다.

3. 다중신호의 실시간 검출 방법

채터진동 발생점의 실시간 검출을 위하여 공구동력계에 의한 절삭력의 변동성분을 고려하였다. 이 동적성분은 여러 유용한 정보를 포함한 신호로서, 다기능 복합형 센서를 실현하는 하나의 유용한 수단으로 생각된다.⁽⁸⁾ 절삭력은 가공 중에 계속해서 요동하면서 변화하는데 그 변화형태는 채터가 일어나면서 안정영역에서 불안정영역으로 전이되면서 절삭력 변동성분의 진폭이 급격히 변화한다.

절삭과정의 진행과 함께 공구동력계를 이용하여 절삭속도 80(m/min), 이송량 0.1(mm/rev)일 때 절삭과정이 안정할 때와 채터진동이 발생할 때의 신호를 Fig. 3과 같이 검출하였다.

절삭과정이 안정할 때는 그 절삭력의 변화량이 작으나 채터진동이 시작됨과 동시에 절삭력의 변화량이 급

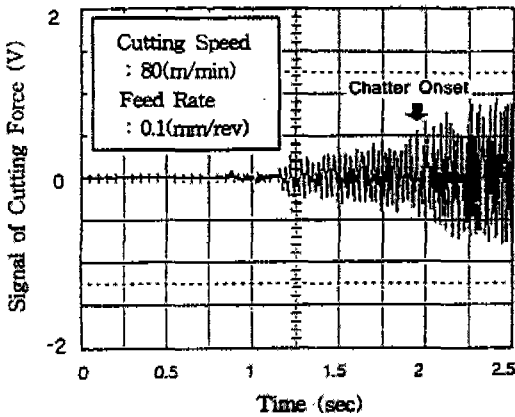


Fig. 3 Signal of Cutting Force for both Stable and Unstable Cutting

격하게 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이 시점을 감시함으로써 채터진동 발생점을 실시간 검출할 수 있다.

또한 실험 후에 공작물의 채터마크를 확인한 결과, Fig. 4에 나타난 바와 같이 채터진동이 발생하면 각 진동수에 상응하는 채터주파수와 나선모양의 형상을 가진 채터마크가 형성되어 있으며, 이로부터 Fig. 3의 신호형태와 잘 일치함을 알 수 있다.

가속도센서는 외부 진동에 의한 센서 내의 중추의 변위를 이용하여 가속도를 측정하는 센서로 0.2(Hz)~수십(KHz)까지의 미소 진동을 검출할 수 있기 때문에 많은 부분에 다양하게 응용되고 있다.⁽⁹⁾

공구 선단 절삭점의 주분력 방향에 가속도 센서를 부착하고 채터진동 발생에 따른 신호를 검출하여 Fig. 5에 나타내었다.

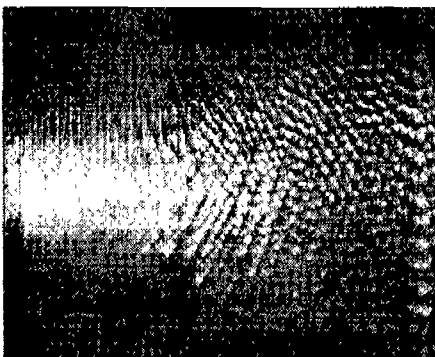


Fig. 4 Chatter Mark of Workpiece (Cutting Speed:80 m/min, Feed Rate:0.1 mm/rev)

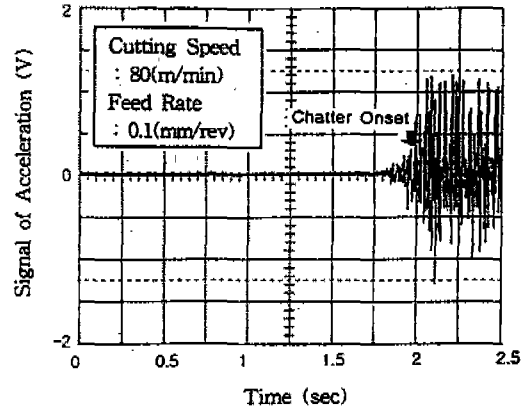


Fig. 5 Signal of Acceleration for both Stable and Unstable Cutting

절삭과정이 안정할 때는 그 가속도의 변화량이 작으나 채터진동이 발생함과 동시에 가속도의 변화량이 두드러지게 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이 시점을 감시함으로써 채터진동 발생점을 실시간 검출할 수 있다.

본 실험의 절삭조건에 의한 채터진동의 특성을 알아 보기 위해 주파수 영역에서 채터주파수를 조사한 결과가 Fig. 6에 나타나 있는데, 안정영역에서 96(Hz)의 주파수가 채터진동이 발생함에 따라 193(Hz)의 주파수로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 특정대역의 주파수성분은 채터진동의 동적 불안정을 판별하는데 매우 유용한 정보로 이용할 수 있음을 시사해 주고 있다.

일반적으로 AE 센서는 100~1000(KHz)의 AE 신호를 검출하여 공구의 마멸이나 재료의 특성을 감지하기 위해 주로 사용되어 왔다.⁽¹⁰⁾

AE 신호가 아닌 다른 신호들은 지금까지 외란으로

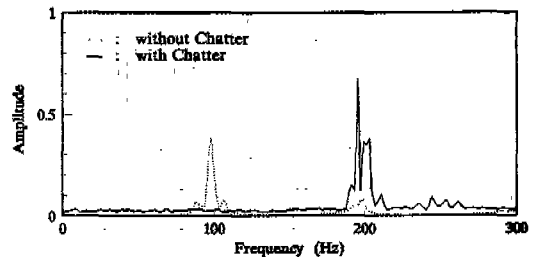


Fig. 6 Chatter Frequency in Unstable Cutting (Cutting Speed:80 m/min, Feed Rate:0.1 mm/rev)

치부되어 필터링기법에 의해 제거되었다. 그러나 그 센서의 구조 특성상 일반적인 진동신호에 대해서도 반응하기 때문에 지금까지 외란을 제거하기 위해 사용해 왔던 필터링기법을 chatter진동에 해당하는 신호를 검출할 수 있게 조정함으로써 chatter진동 발생에 따른 신호특성을 검출할 수 있다.

AE 신호의 특성을 파악하는 데 가장 일반적으로 사용되는 파라미터는 신호의 실효치 전압인 RMS(Root Mean Square) 전압이다.

AE 신호의 RMS 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{RMS}(t) = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} V^2(t) dt} \quad (1)$$

여기서, $V_{RMS}(t)$ 는 RMS 전압, $V(t)$ 는 AE 센서의 출력치, Δt 는 데이터 입력 시간이다.

AE 센서에 의한 chatter진동의 검출 가능성을 알아보기 위해 AE 센서에서 나오는 신호를 증폭기로 보내어 밴드패스필터를 통과시킨 후 RMS 변환기로 보내어 변환시킨 후 신호를 오실로스코프를 이용하여 절삭과정이 안정할 때와 chatter진동이 발생할 때의 신호를 검출하여 Fig. 7에 나타내었다.

절삭과정이 안정할 때는 신호의 변화량이 작으나 chatter진동이 발생함에 따라 AE 센서의 RMS 값의 변화량이 두드러지게 증가하고 있음을 알 수 있다.

따라서, 이 시점을 감시함으로써 공구동력계와 가속도 센서처럼 AE 센서에서도 chatter진동 발생점을 실시간 검출할 수 있다.

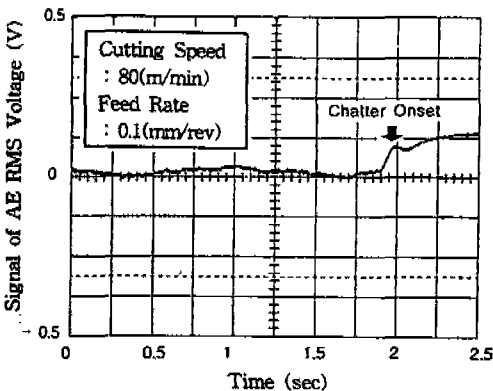


Fig. 7 Signal of AE RMS Voltage for both Stable and Unstable Cutting

4. chatter진동 발생점의 실시간 검출 결과

절삭조건에 따라 chatter진동이 발생하였을 때의 신호는 안정된 절삭과정 동안의 신호에 비하여 몇 배 이상 크다는 것이 실험적으로 밝혀졌다. 즉 측정된 신호의 변화량을 알 수 있으면, 안정영역과 chatter진동 발생영역을 구분하기 위한 기준값을 미리 설정한 후에 그 기준값(Threshold Level)과 그 측정된 값을 비교함으로써 chatter진동 발생점을 인프로세스 감시에 이용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 다중 센서에 의한 chatter진동 발생점을 검출하여 주어진 절삭조건에 따른 특성을 조사하고, 효과적으로 chatter진동 발생점을 인프로세스 감시하기 위한 기준값을 제시하였다.

4.1 공구동력계에 의한 실시간 검출 결과

공구동력계를 통하여 검출된 절삭력을 증폭기로 보내어 증폭시킨 후 A/D 변환기로 변환하여 절삭조건의 변화에 따른 절삭력의 변화량을 Fig. 8에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 주어진 절삭속도의 범위 내에서 안정영역의 평균변화량은 3.7~4.8(N)임을 알 수 있고, 이 평균변화량의 3.3~3.8배인 12.5~18.5(N)일 때의 시점이 chatter진동 발생점임을 알 수 있다. 또한, 절삭속도가 증가함에 따라 chatter진동이 더 늦게 발생함을 알 수 있다.

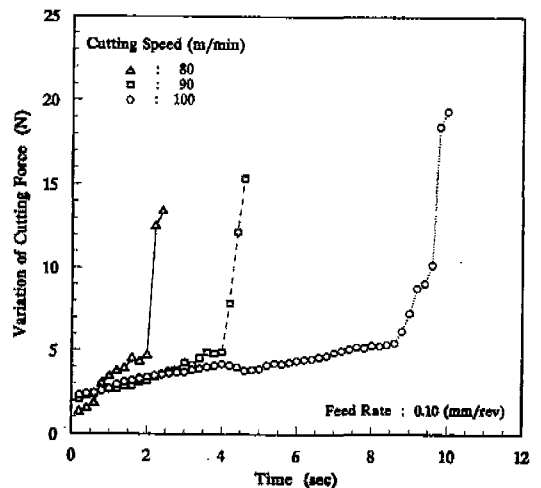


Fig. 8 Variation of Cutting Force Signal measured by Tool Dynamometer

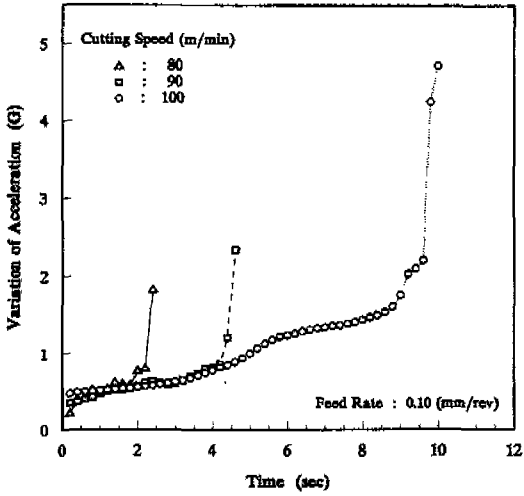


Fig. 9 Variation of Acceleration Signal measured by Accelerometer

따라서, 안정영역에서의 평균변화량의 3배 정도를 기준값으로 선정하여 매 샘플링 시간마다 검출되는 절삭력의 변화량과 비교함으로써 채터진동 발생점을 실시간 검출할 수 있다.

4.2 가속도 센서에 의한 실시간 검출 결과

가속도 센서를 통하여 검출된 가속도 신호를 증폭기로 보내어 증폭시킨 후 A/D 변환기로 변환하여 검출된 가속도 신호의 변화량을 Fig. 9에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 주어진 절삭속도의 범위 내에서 안정영역의 평균 변화량은 0.48~0.93(G)임을 알 수 있고, 이 평균변화량의 3.7~4.5배인 1.82~4.25(G)일 때의 시점이 채터진동 발생점임을 알 수 있다.

따라서, 안정영역에서의 평균변화량의 3배 정도를 기준값으로 선정하여 매 샘플링 시간마다 검출되는 가속도 신호의 변화량과 비교함으로써 채터진동 발생점을 실시간 검출할 수 있다.

또한, 절삭속도가 증가함에 따라 채터진동이 더 늦게 발생하고 채터진동 발생점은 공구동력계에 의해 검출된 시간과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4.3 AE 센서에 의한 실시간 검출 결과

AE 센서에서 나오는 신호를 증폭기로 보내어 대역통과필터를 통과시킨 후 RMS 변환기로 보내어 A/D 변환기로 변환하여 이 때에 검출된 RMS 값의 변화량을

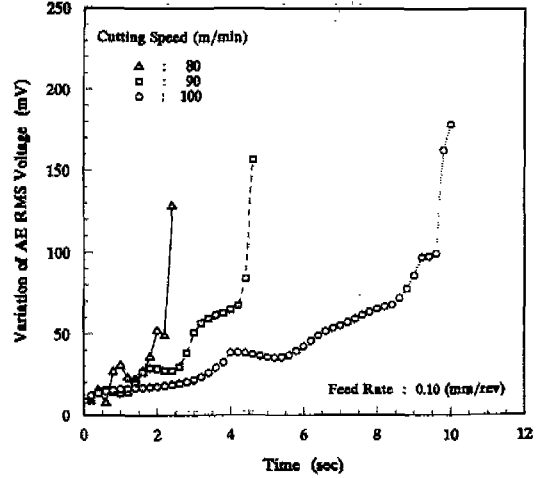


Fig. 10 Variation of AE RMS Voltage measured by AE Sensor

Fig. 10에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 주어진 절삭속도의 범위 내에서 안정영역의 평균변화량은 37.7~41.6(mV)임을 알 수 있고, 이 평균변화량의 3.4~3.9배인 128.2~162.8(mV)일 때의 시점이 채터진동 발생점임을 알 수 있다.

따라서, 안정영역에서의 평균변화량의 3배 정도를 기준값으로 선정하여 매 샘플링 시간마다 검출되는 RMS 전압의 변화량과 비교함으로써 채터진동 발생점을 실시간 검출할 수 있다. 또한, 절삭속도의 증가에 따라 채터진동이 더 늦게 발생하고, 채터진동의 발생점도 공구동력계와 가속도 센서에 의해 검출된 시간과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4.4 절삭조건에 의한 채터진동의 특성

절삭조건에 의한 채터진동의 특성을 알아보기 위해 채터진동이 발생할 때의 절삭폭을 한계절삭폭으로 정의하고, 절삭속도, 이송량의 변화에 따라 실험을 행한 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 절삭속도와 이송량이 증가함에 따라 채터진동 발생점의 한계절삭폭이 증가함을 알 수 있다.

이상과 같은 실시간 검출 결과로부터 각 센서에 의한 채터진동 발생점의 실시간 검출이 가능함을 알 수 있고, 이를 바탕으로 안정영역에서의 평균변화량의 3배

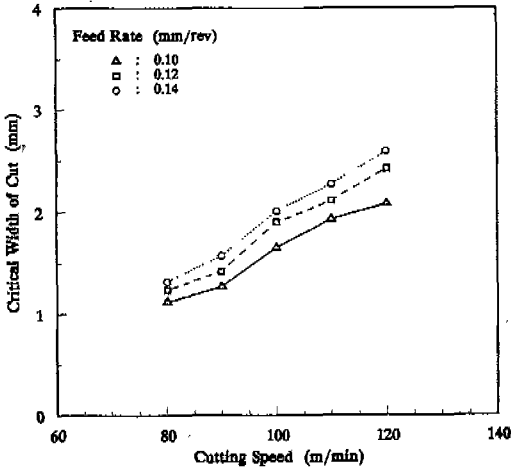


Fig. 11 Critical Width of Cut versus Cutting Condition

정도를 채터진동 발생 유무의 판별을 위한 기준값으로 선정하여 채터진동 발생점의 인프로세스 감시에 이용할 수 있을 것이다.

5. 결론

복합계측 시스템을 이용한 채터진동의 실시간 검출에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다중센서(절삭력, 가속도, AE)를 이용하여 채터진동 발생점의 실시간 검출이 가능하고 이를 이용하여 인프로세스 감시에 응용할 수 있다.
 - (2) 안정영역에서의 평균변화량의 3배정도를 기준값으로 선정하여 실시간 검출 알고리즘을 통해 채터진동 발생을 인프로세스 감시할 수 있다.
 - (3) 각 신호의 평균변화량과 한계절삭폭은 절삭속도와 이송량의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다.
- 이상과 같은 연구결과를 생산자동화 시스템에 이용하기 위해서는 센서융합에 의한 패턴인식 기법 등을 통하여 채터진동 발생점의 인프로세스 감시 시스템을 구축하여야 할 것이다.

참고문헌

1. G.Boothroyd., "Fundamentals of Metal Maching and Machine Tools", Mc Graw-Hill, Washington, D.C, 1975.

2. D.W.Wu and C.R.Liu, "An Analytical Model of Cutting Dynamics Part 1,2", Trans of ASME, J.Eng.Ind., Vol.107, pp.107~118, 1985.
3. M. Rahman, "In-Process Detection of Chatter Threshold", Trans. of the ASME, Vol.110, pp.44~50, 1988
4. H. Nakazawa, Y. Miyoshi, K. Shigemura, "Peak Interval Method for Detection On-sets of Chatter Vibration", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg, Vol.18, NO.3, pp.243~248, 1984
5. T. Moriwaki, K. Iwata, "In-Process Analysis of Machine Tool Structure Dynamics and Prediction of Machining Chatter", Trans. of the ASME, pp.301~305, 1976
6. G. Chryssolouris and M. Domroese, "An Experimental Study of Strategies for Integrating Sensor Information in Machining", Annals of the CIRP, Vol.38, No.1, pp.425~428, 1989
7. Jeong-Suk Kim and Byung-Ho Lee, "An Analytical Model of Dynamic Cutting Forces in Chatter Vibration", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.31, No.3, pp.371~381, 1991
8. Jae Woong Youn, Min Yang Yang and Hwa Young Park, "Detection of Cutting Tool Fracture by Dual Signal Measurement", Int. J. Mach. tools Manufact. Vol.34, No.4, pp.507~525, 1994
9. 一の瀬昇, 小林哲二, 高田敬輔, "センサと信號處理システム", 日本機械學會 編 朝倉書店, 1985
10. K. Iwata, T. Moriwaki, "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear", Annals of CIRP, Vol.25/1, 1977