

이 논문은 1990년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구 되었음.

선삭가공에 있어서 채터진동의 인프로세스 검출에 관한 연구(I)

구 연욱*, 정 의식**, 남궁 석***

A Study on In-Process Detection of Chatter Vibration in a Turning Process

Youn-Yoog Koo*, Eui-Sik Chung**, Suk Namgung***

Abstract

There have been many studies on chatter vibration in machining but there seems to be no regulations to decide the commencing point of chatter objectively. The development of an objective method which can estimate and detect chatter commencement is very much in need for automatic manufacturing systems, dynamic performance tests for machine tools, so on. In this study, therefore, the estimation and the in-process detection of chatter have been experimentally investigated for the turning process. As a result, the commencing point of chatter can be decided from the behavior of the maximum amplitude of the dynamic component of cutting force, where the maximum amplitude is suddenly increasing with the chatter commencement. Then the commencing point of chatter can be estimated practically by this method before the occurrence of excessive vibration. Also, it is possible to detect the occurrence of chatter vibration through the in-process measurement, by monitoring the maximum amplitude of the dynamic component of cutting force.

1. 서 언

기계가공에서 발생하는 채터진동에 대한 발생기구⁽¹⁾나 이론적인 해석방법⁽²⁾에 관하여는 그동안 많은 연구가 이루어졌으나, 그 발생점을 객관적으로 결정

하기 위한 엄밀한 규정은 아직 마련되어 있지 않은 실정이다. 따라서, 현재까지도 공작기계의 성능평가 방법의 하나인 내채터진동성능시험에서, 채터진동의 발생판정을 관능시험, 즉 인간의 귀나 눈에 의한 감각적인 판단방법에 의존하고 있는 형편이다. 특히, 생

* 정회원, 충남대학교대학원

** 정회원, 대전공업대학기계설계학과

*** 종신회원, 충남대학교기계공학과

산시스템의 자동화·무인화가 이루어지고 있는 최근의 기계가공분야에서는, 채터진동의 발생을 인프로세스(in-process)로 검출하고, 제어하는 실용적인 방법에 대한 연구, 개발의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

지금까지 채터진동발생의 검출에 관한 연구에서는, 그 검출수단으로, 절삭중에 절삭음을 검출하는 방법⁽³⁾, 공작물로 부터 반사되는 반사광 강도의 증감을 검출하는 광학적인 방법⁽⁴⁾, 공구의 이상진동 현상을 가속도센서와 미소변위센서를 이용하여 검출하는 방법⁽⁵⁾ 등이 주로 검토되어 왔다. 그러나, 이들 검출방법은 객관적인 판단기준이 결여되어 있으며, 특히 외란을 오인할 수 있다는 커다란 문제점이 있는 것으로 지적되고 있다⁽⁶⁾.

본 연구에서는, 선삭가공에서 채터진동의 검출 및 그 발생점 판정방법을 확립하기 위하여, 절삭저항의 동적성분에 착안하고 있다. 이 동적성분은, 이미 검토된 바와같이, 여러 유용한 정보를 포함한 신호로서, 다기능 복합형 센서를 실현하는 하나의 유효한 수단으로 생각된다. 따라서 이를 이용하여 절삭상태를 인식하는 연구가 일부 행하여 졌으나⁽⁷⁻⁸⁾, 여기에서는, 절삭조건 및 공작물의 강성을 변화시켰을 때, 채터진동의 발생에 따른 표면거칠기의 변화와 동적성분과의 관련성에 대하여 검토하였다. 구체적으로는, 채터진동의 발생 현상을 잘 반영하고 있는 것으로 판단되는 주파수영역을 이용하여, 얻어진 절삭저항의 동적성분을 주파수분석하고, 적당한 신호처리방법으로 검출된 동적성분의 평균최대진폭과, 절삭 후 측정된 표면거칠기와의 상관관계로부터, 채터진동의 인프로세스 검출 및 그 발생점 판정에 동적성분의 이용가능성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 이용한 실험장치의 개략도이다. 실험에서, 공작물은 선반의 주축에 설치된 척(3-jaw scroll chuck)에 외팔보 상태로 매 시편마다 일정한 체결력으로 고정하였으며, 공구는 P20 재

을 사용하고, 매 실험마다 새로운 Tip으로 교환하였다. 그리고, 피삭재 고정 설치시의 편심을 제거하기 위하여, 미리 절삭깊이 0.5mm로 전가공을 실시하였다. 절삭저항은 선반의 공구대에 대신에 고정 설치한 압전형 공구동력계에서 측정하고, 얻어진 신호는, Fig. 1에 나타낸 바와같이, 일단 Data Recorder에 수록한 후, 신호를 재생하여, 절삭저항의 동적성분을 주파수분석 하였다.

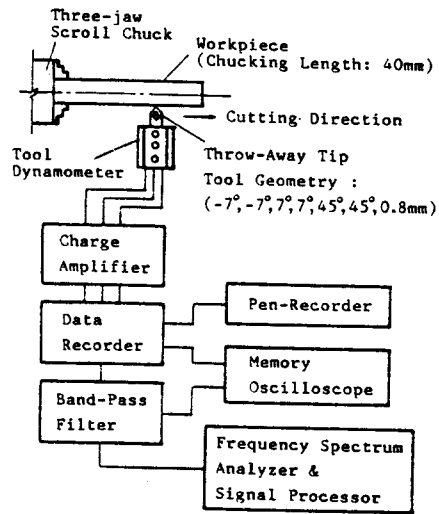


Fig. 1 Schematic view of experimental set-up

Table 1 Experimental conditions

Engine lathe	Misal 820T PR (1500x400 ^{mm} , 7.5kW)
Chuck	3-jaw scroll chuck (8")
Tool	Tip : SNMA432(P20) Shank type : PSDNN2525M12 Overhang length : 45mm
Chucking condition	Chucking torque : 1800kgf·cm Chucking length : 40mm
Work	Semi-hard carbon steel (SM45C) Diameter(D) : ϕ45, 50, 55, 60mm Effective length(L) : 260mm
Cutting condition	Cutting speed(v) : 56, 86, 192, 290m/min Feed rate(s) : 0.11, 0.22, 0.31, 0.425, 0.523mm/rev Depth of cut(t) : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0mm

또한, 채터진동의 거동과 그 발생점을 용이하게 관찰하기 위하여, 절삭은 칩 선단에서 자유단 쪽으로 역 이송방식을 택하였으며, Table 1에 나타난 절삭조건으로 절삭실험을 각각 행하였다. 그리고, 절삭실험 전 후에 매 시편 마다, 별도로 구성된 충격가진 실험장치를 이용하여 칩-공작물계의 고유진동수를 측정하였으며, 표면거칠기를 측정하여, 이를 채터진동의 발생점 판정을 위한 객관적인 수단으로 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 칩 - 공작물계의 고유진동과 채터진동의 주파수 특성

먼저, 채터진동의 주파수 특성변화를 조사하기 위하여, 채터발생 시, 절삭실험에서 측정된 절삭저항의 신호를 주파수분석 (0-1kHz까지) 하였다. Fig. 2는 그 결과로서, 그림에는 절삭 후 측정된 표면거칠기 R_{max} 의 측정결과도 함께 나타내었다.

그림에서 볼 수 있는 바와같이, 절삭개시 후 약8초 (공작물 돌출길이 160mm 지점) 가 지난 시점에서 부터 채터가 발생되기 시작하며, 이에 대응하여 절삭저항

의 특정주파수 약 232Hz 부근에서 동적성분의 진폭 (스펙트럼의 peak값) 이 절삭시간의 경과와 함께 급격히 증가하는 현상을 나타내고 있다. 또한, 이때 표면거칠기 R_{max} 의 측정결과도, 동적성분의 변화와 동일한 경향을 나타내며, 특히 채터발생 전 후의 공작물 표면품위의 변화상태를 잘 반영하고 있다고 할 수 있다. 그리고, 이와같은 채터발생 현상은 감각적인 판단기능에 의한 관찰 결과에서도 확인 할 수 있었다.

한편, 일반적으로 공작기계-칩-공작물계의 특성은 채터진동발생에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁽⁹⁾. 따라서, 이번에는 이들 각계 가운데, 칩-

공작물계의 특성이 채터진동 주파수에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위하여, 절삭실험을 행하기 이전에, 공작물 직경변화에 따른 칩-공작물계의 고유진동수를 충격가진시험에 의해 구하고, 그림 (Fig. 3) 중의 절삭조건으로 절삭실험을 행하여, 얻어진 채터진동수와의 관계를 비교 검토하였다.

Fig. 3은 그 결과로서, 충격가진시험을 통하여 측정된 칩-공작물계의 고유진동수는, 공작물 직경이 증대함에 따라 감소하며, 이는 공작물계의 강성 증대에 따른 고유진동수의 변화 현상을 잘 나타내고 있다.

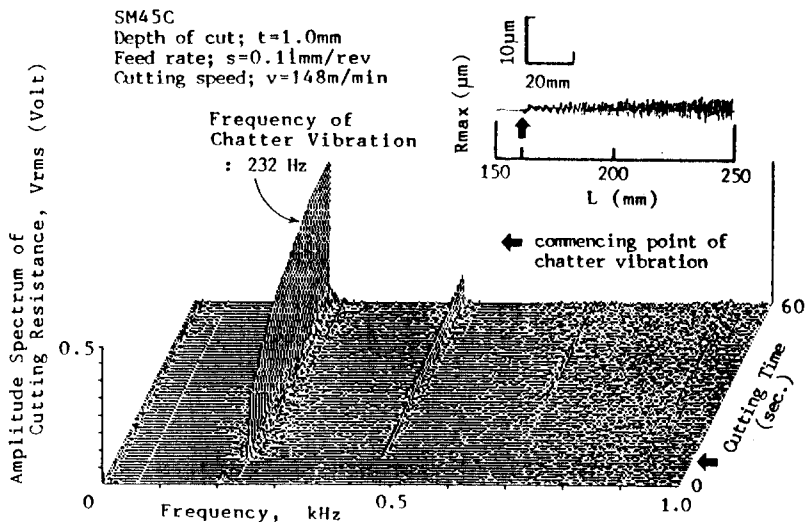


Fig. 2 Example of measured amplitude spectrum of cutting force and surface roughness

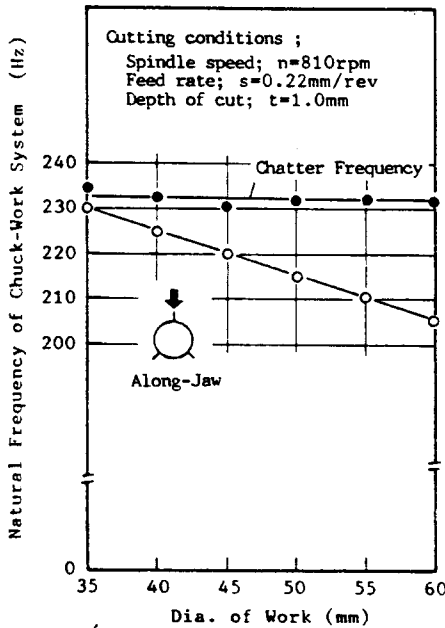


Fig. 3 Relation between natural frequency of chuck-work system and chatter frequency

그리고 이때 고유진동수는, 공작물 직경 35-60mm에 대하여 약205-230Hz의 값을 나타내고 있다. 이에 대하여, 절삭실험을 통하여 얻은 채터진동수는, 공작물

Table 2 Results of measured chatter frequencies in cutting test

Cutting conditions	Chatter frequencies	Remarks	
Cutting speed ; v(m/min)	56	215, 210, 177.5	t=1.0mm s=0.22mm/rev
	86	235, 225	
	97	235	
	148	232.5	
	192	227.5	
	290	same as above	
Feed rate ; s(mm/rev)	0.065	245, 235, 232.5, 220	v=148m/min t=1.0mm
	0.11	245, 232.5, 220	
	0.22	232.5	
	0.31	no chatter	
	0.425	232.5, 202, 172.5	
	0.523	same as above	
Depth of cut ; t(mm)	0.5	no chatter	s=0.22mm/rev v=148m/min
	0.75	232.5	
	1.0	same as above	
	1.25	same as above	
	1.5	242, 232.5, 202	
	1.75	230, 217.5, 202.5	
	2.0	same as above	

계의 강성변화에 관계없이, 약 232Hz로 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이와같은 사실은 매우 흥미있는 것으로서, 이러한 경향은 채터진동수의 변화에 공작물계의 강성보다는, 공작물 직경변화에 따른 절삭속도의 영향이 더욱 지배적인 요인으로 작용하고 있기 때문으로 생각된다. 한편, Table 2는 그밖의 여러 절삭조건에 대하여 채터진동수를 조사한 결과를 나타낸 것이다.

이상의 결과를 정리해 보면, 채터진동수는, 충격가진시험 결과와는 정확히 일치하지 않으나, 대체로 칩-공작물계의 고유진동에 커다란 영향을 받고 있는 것으로 생각된다. 또한, Fig. 2에서도 판단되는 바와같이, 칩-공작물계의 고유진동수에 대응하는 주파수 부근(200-250Hz)의 동적성분은, 채터발생에 대하여 매우 특징적인 거동을 나타내고 있으며, 채터발생의 전·후 상황을 명확히 반영하고 있다. 그리고, 이와같은 결과는, 절삭저항의 동적성분에 포함되어 있는 어느 특정의 주파수성분에 착안하면, 채터진동의 검출은 물론 그 발생점의 판정이 가능함을 시사해 주고 있다.

그러나, 이상에서 언급한 바와같은 주파수영역에서의 특정 주파수의 진폭을 직접관측하는 방법은, 주파수 분석하는데 시간을 필요로 하며, 특히, 실시간(real time)으로의 데이터 처리가 곤란하다는 것이 문제점으로 지적되고 있다⁽¹⁰⁾. 따라서, 본 연구에서는 절삭저항의 신호를 시간영역에서 다루고 있다. 즉, 이하에서는 여러 절삭조건에서 측정된 절삭저항의 신호를, 채터발생 진동수와 밀접한 관련이 있다고 판단되는 차단주파수 200-250Hz로 band-pass filter를 통과 시킨후, 출력된 파형의 평균최대진폭(동적성분 : dFr)을 실험결과의 분석자료로 이용하였다. 또한, 실험에서는, 절삭저항의 3분력을 동시에 측정 하였으나, 절삭중의 동적거동은 충격적으로 작용하는 절삭저항의 배분력성분과 밀접한 관련이 있으므로, 본 연구에서는 배분력을 대표어로 보고하였다.

3.2 채터진동의 발생에 따른 동적성분의 거동과 표면 거칠기의 변화

앞절에서 언급한 바와같이, 칩-공작물계의 고유진동에 대응하는 주파수영역 (200-250Hz) 의 동적성분 dF_r 은 채터진동의 검출 및 그 발생점을 판정하는데 있어서 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 따라서, 이점을 확인하기 위하여, 이하에서는, 여러 절삭조건에 대하여 절삭실험을 행하고, 채터발생에 따른 동적성분 dF_r 및 표면거칠기 R_{max} 값을 조사하여 그 결과를 비교 검토하였다.

Fig. 4 (a), (b)-Fig. 7 (a), (b)는 절삭조건 (절삭속도, 이송량, 절삭깊이) 및 공작물 직경을 변화시켰을 때, 공구의 돌출길이 증대에 따른 동적성분 dF_r 및 표면거칠기 R_{max} 의 측정결과이다. 그림에서 \downarrow 표는 채터진동의 발생점 위치를 나타낸다. 이들 각 그림에서 알 수 있는 바와같이, 절삭점 길이가 공작물 자유단 측으로 이동함에 따라 dF_r 및 R_{max} 는 증가하며, 채터진동의 발생에 따라 그 증가율은 급격히 증대하고 있다. 또한, 절삭깊이에 대한 dF_r 및 R_{max} 의 값이 거의 일정한 안정 영역과 수배 이상으로 급격히 증가하는 불안정 영역이 존재하며, 그 경계가 명확히

구별되고 있다. 또한, 채터가 발생하지 않는 안정 영역에서, dF_r 및 R_{max} 의 값은 대체로 이송량, 절삭깊이가 큰 절삭조건에 크며, 절삭속도 및 공작물 강성이 증대함에 따라 작아지는 경향을 나타내고 있으나, 그 변동폭은 채터발생 이후의 값에 비하여 무시할 수 있을 정도의 작은 값으로 되고 있다.

즉, 이들 절삭실험의 결과에서 알 수 있는 바와같이, 동적성분 dF_r 의 거동 변화는, Fig. 5 (c)에 나타난 채터진동의 영향만을 고려한 표면거칠기 ΔR_{max} 의 산출결과에서도 확인 할 수 있는 바와같이, 표면거칠기 R_{max} 의 변화와 정성적으로 매우 일치하고 있으며, 이들 각 절삭조건에서, 채터진동 발생에 따른 공작물의 표면품질 상태, 즉 표면거칠기 R_{max} 및 ΔR_{max} 의 변화를 비교적 명확히 반영하고 있다. 또한, 그 발생점의 위치(\downarrow 표)에 있어서도, 본 연구에서 채터진동의 발생점 위치 검출을 객관적으로 판정하기 위하여 채용한, 표면거칠기 R_{max} 의 측정결과와 매우 일치하고 있다. 따라서, 본 연구에서 절삭저항의 대표값으로 채용한, 동적성분 dF_r 은 채터진동의 검출

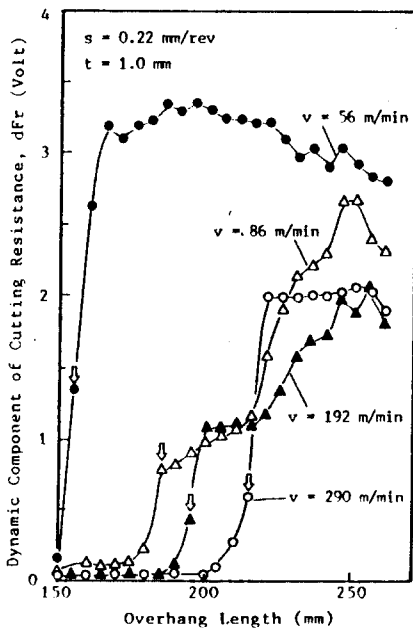


Fig. 4(a) Effects of overhang length and cutting speed on dynamic component of cutting resistance

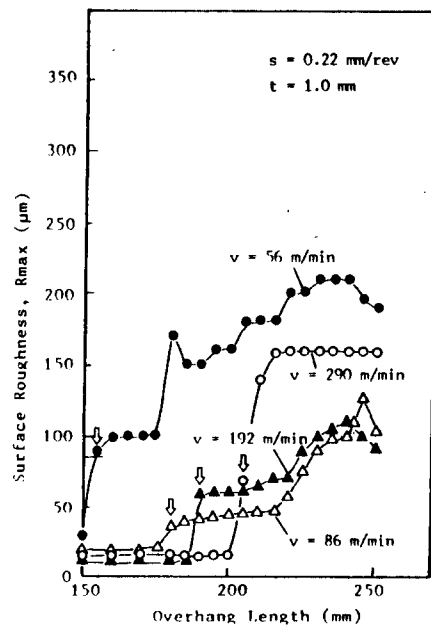


Fig. 4(b) Effects of overhang length and cutting speed on surface roughness

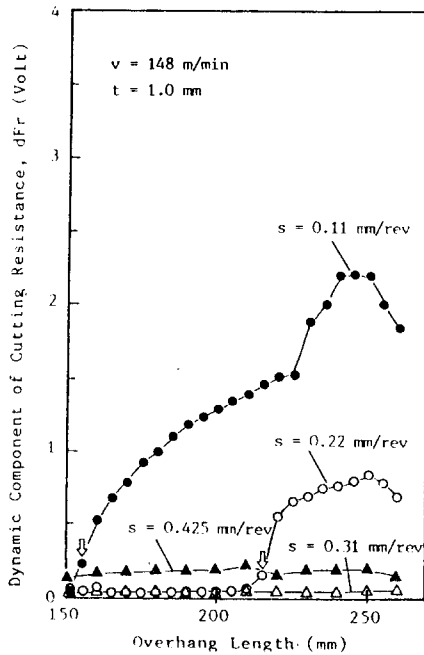


Fig. 5(a) Effects of overhang length and feed rate on dynamic component of cutting resistance

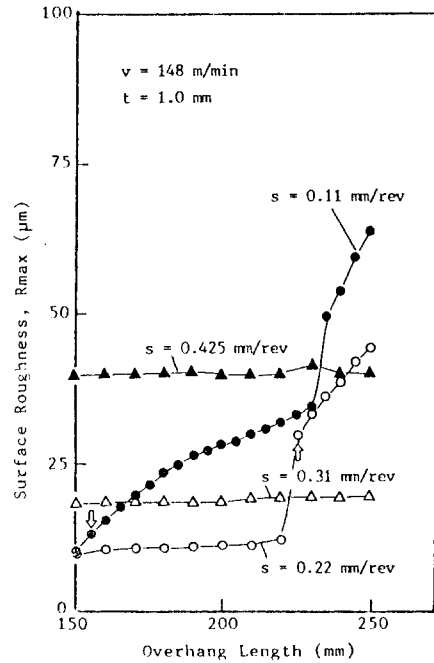


Fig. 5(b) Effects of overhang length and feed rate on surface roughness (R_{max})

및 그 발생점 판정에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 동적성분에 의한 채터진동의 검출 가능성

이상에서 기술한 바와같이, 절삭저항의 동적성분 dF_r 은 비교적 광범위한 절삭조건에서 발생하는 채터진동의 현상을 명확히 반영하고 있는 것으로 생각된다. 한편, 일반적으로, 채터현상은 가공물의 표면품질을 좌우하는 중요한 요인이 된다. 따라서, 진원도 오차에 의한 채터진동 발생점 판정의 타당성에 대하여 검토한 보고⁽¹¹⁾도 있으나, 여기에서는, 표면거칠기 R_{max} (혹은, ΔR_{max})와의 대응관계로부터, 동적성분 dF_r 에 의한 채터진동의 검출 가능성을 검토하였다.

여기서, 앞의 실험결과들을 채터진동 발생의 전·후 상황을 고려한 안정 및 불안정 영역으로 구별하여 정리하면 Fig. 8-11과 같이 된다. 이들 각 그림에서 알 수 있는 바와같이, 동적성분 dF_r 과 표면거칠기

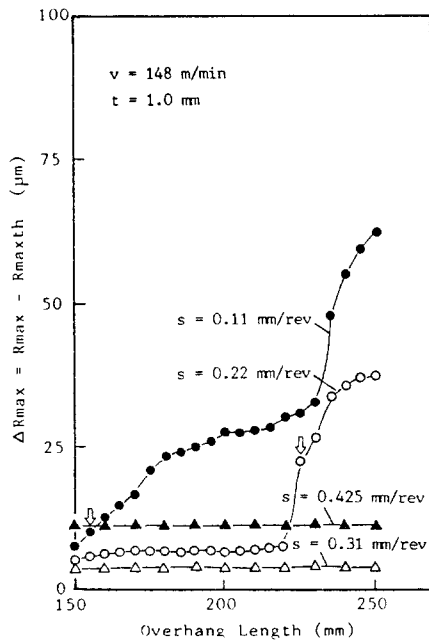


Fig. 5(c) Effects of overhang length and feed rate on surface roughness (ΔR_{max})

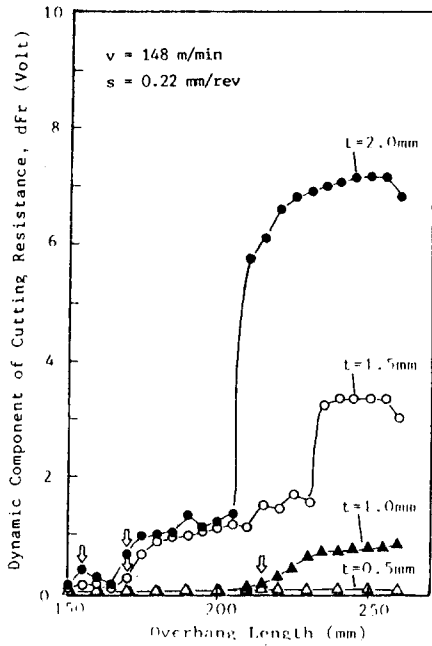


Fig. 6(a) Effects of overhang length and depth of cut on dynamic component of cutting resistance

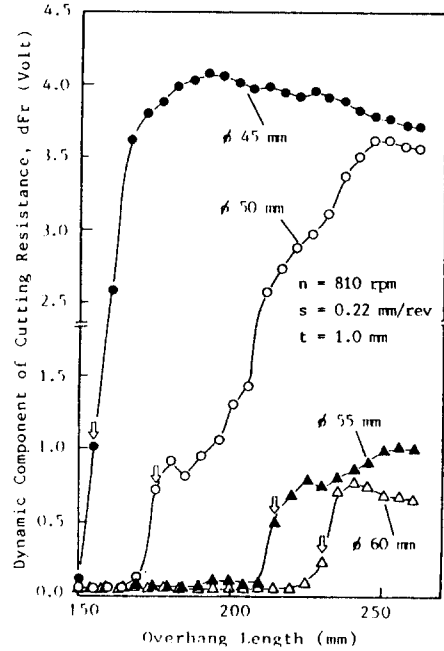


Fig. 7(a) Effects of overhang length and diameter of workpiece on dynamic component of cutting resistance

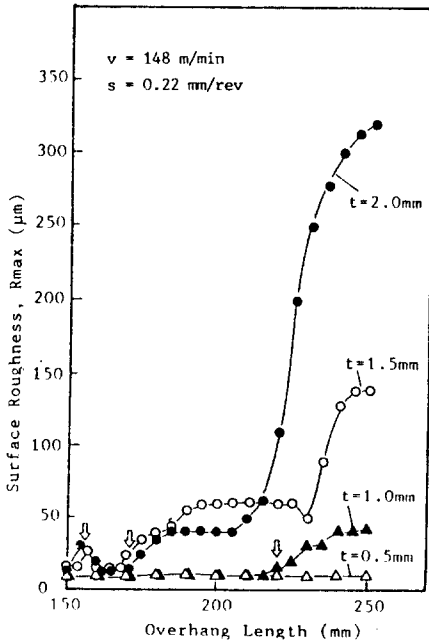


Fig. 6(b) Effects of overhang length and depth of cut on surface roughness

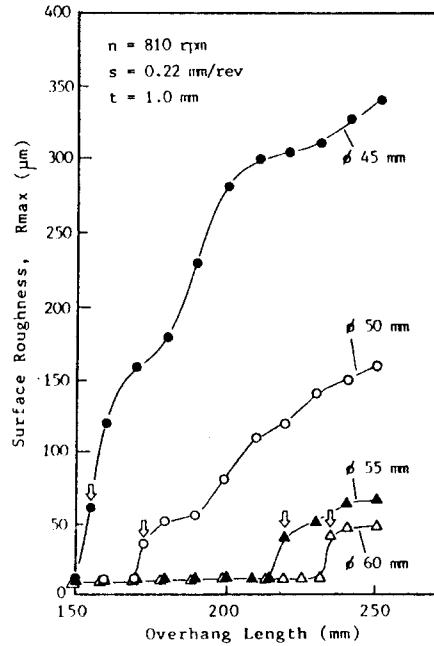


Fig. 7(b) Effects of overhang length and diameter of workpiece on surface roughness

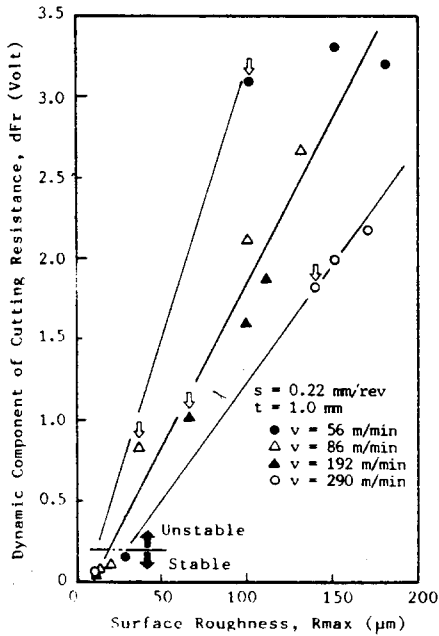


Fig. 8 Relations between R_{max} and dF_r in cutting speed

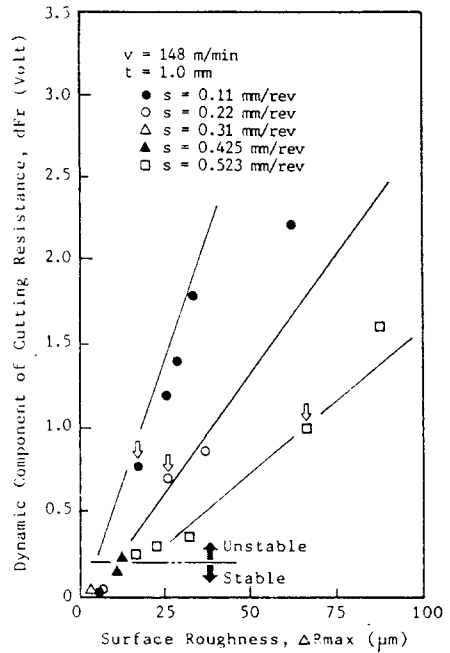


Fig. 9 Relations between ΔR_{max} and dF_r in feed rate

R_{max} 및 ΔR_{max} 와의 사이에는 비교적 좋은 상관관계를 나타내고 있다. 즉, 절삭조건에 따라 약간의 정도 차이는 있으나, chatter발생에 따른 표면거칠기 R_{max} 및 ΔR_{max} 의 증가에 대응하여, 동적성분 dF_r 은 거의 비례적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한, chatter가 발생하는 불안정 영역에서, 동적성분 dF_r 은 급격히 증가하며, 그 값은 안정영역에 비하여 약 수배 정도 크게되고 있다. 그리고, 이때 chatter발생 이전의 안정영역에서 동적성분 dF_r 의 값은, 어느 절삭조건에서도, 약 5kgf (1 Volt = 25kgf) 이하의 범위에 존재하고 있다. 이와같은 사실은, 적당한 경계값 (threshold)을 dF_r 에 설정하면, 적어도 chatter진동의 발생 여부를 dF_r 의 값에 의해 명확히 구별할 수 있음을 보여주고 있다. 동시에, dF_r 의 급증현상을 이용하면 chatter진동의 발생점을 용이하게 판정할 수 있을 것으로도 생각된다. 따라서, 동적성분 dF_r 을 감시함으로써 chatter진동의 인프로세스 검출 및 그 발생점의 판정을 객관적인 방법으로 행할 수 있을 것으로 판단된다.

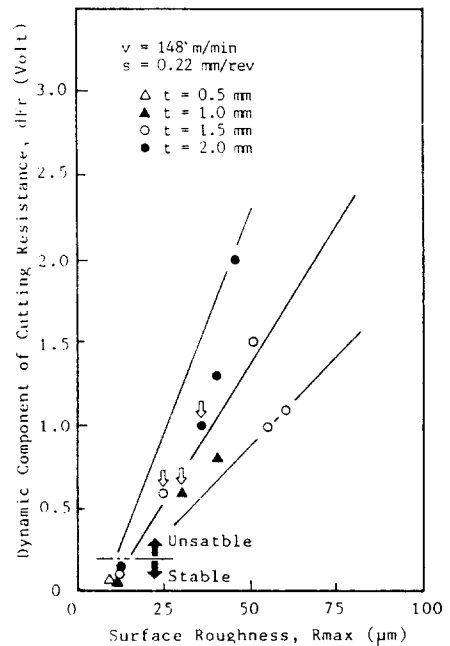


Fig. 10 Relations between R_{max} and dF_r in depth of cut

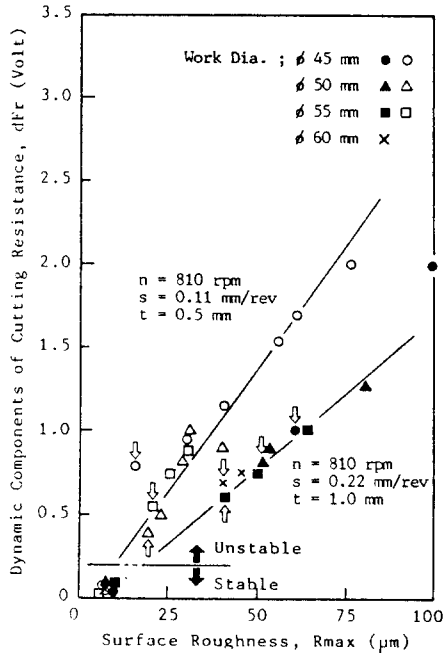


Fig. 11 Relations between Rmax and dFr in diameter of workpiece

4. 결론

본 연구에서는, 절삭저항의 동적성분 가운데 칩-공작물계의 고유진동수에 대응하는 주파수영역(200-250Hz)의 성분을 추출하여 얻은 신호, dFr의 평균최대진폭을 이용하여, chatter진동의 인프로세스 검출 및 그 발생점 판정의 가능성을 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 칩-공작물계의 고유진동수에 대응하는 주파수 영역의 동적성분은 chatter진동 검출에 유용한 정보로 이용할 수 있다.
- (2) 본 연구에서 적절한 신호처리를 실시하여 채용한, 절삭저항의 동적성분 dFr은 chatter진동 발생의 전·후 상황을 명확히 반영하고 있으며, 표면거칠기 Rmax 및 ΔRmax와의 사이에는 양호한 상관관계가 있다.
- (3) 동적성분 dFr의 평균최대진폭을 감시하면, 채

터진동의 인프로세스 검출은 물론 그 발생점 판정이 가능하다.

참고 문헌

1. Arnold, R. N., "The mechanism of tool vibration in the cutting of steel", Proc. Int. Mech. E., 152, p. 380, 1945
2. Tobias, S. A., "Machine tool vibration", John Wiley & Sons, Inc., 1965
3. 中澤 弘, 外2名, "びびり振動發生限界の檢出(第1報)", 精密機械, 45, 11, p. 1353, 1979
4. 酒井 保男, 外2名, "光學式びびり測定器の研究", 精密機械, 50, 9, 1984
5. 土井 雅博, 外2名, "旋削加工における自動振動の檢出とその制御に関する研究", 日本機械學會論文集(C編), 54, 505, p. 2065, 1990
6. 白石 昌武, "FMSのためのインプロセス基礎技術", 理工企劃, p. 134, 1986
7. 鄭 禧植, 南宮 珪, 伊東 諒, "切削抵抗の動的成分による切りくず形態のインプロセス認識", 日本機械學會論文集(C編), 55, 518, p. 2632, 1989
8. 정 의식, 김 영대, 남궁 석, "복합기능형 절삭상태인식용 In-Process Sensor에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 7, 2, 6, p. 47, 1990
9. 土井 雅博, 益者 正巳, 伊東 諒, "びびり振動に及ぼすチャシク-工作物系の減衰特性の影響", 日本機械學會論文集(C編), 50, 460, p. 2392, 1984
10. 桶口 峰夫, 外2名, "旋削加工におけるびびり振動の發生判定に関する研究", 日本機械學會論文集(C編), 52, 477, p. 1697, 1986
11. 土井 雅博, 外1名, "旋盤の動特性試験法の開發", 日本機械學會論文集(C編), 56, 529, p. 2521, 1990