

이 논문은 1988년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제
학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

복합기능형 절삭상태인식용
In-Process Sensor에 관한 연구

정 의식*¹, 김 영대*², 남궁 석*³

**A Study on In-Process Sensor for Recognizing
Cutting Conditions**

Eui-Sik CHUNG*¹, Y. D. Kim*², Suk NAMGUNG*³

ABSTRACT

In-process recognition of the cutting states is one of the very important technologies to increase the reliability of modern machining process. In this study, practical methods which use the dynamic component of the cutting force are proposed to recognize cutting states (i. e. chip formation, tool wear, surface roughness) in turning process. The signal processing method developed in this study is efficient to measure the maximum amplitude of the dynamic component of cutting force which is closely related to the chip breaking (cut-off frequency : 80-500 Hz) and the approximately natural frequency of cutting tool (5,000-8,000 Hz). It can be clarified that the monitoring of the maximum amplitude in the dynamic component of the cutting force enables the state of chip formation which chips can be easily handled and the inferiority state of the machined surface to be recognized. The microcomputer in-process tool wear monitoring system introduced in this paper can detect the determination of the time to change cutting tool.

* 1 대전공업대학 기계설계학과

* 2 대전기계창

* 3 충남대학교 공과대학 기계공학과

1. 서언

최근, FMS, 특히 기계가공용 FMS가 생산시스템의 주류로 됨에 따라, 무인운전이라는 가동조건이 보편화되고 있다. 이와같은 조건하에서, 생산시스템을 안전하고 효율적으로 가동시키기 위해서는, 시스템을 구성하는 공작기계 및 가공시스템 전체의 In-Process 상태인식, 특히 가공상태의 자동인식이 중요한문제로 되고있다⁽¹⁾.

이와같은 절삭가공상태의 인식에 관하여는, 종래부터 절삭저항이나 공구마멸의 측정을 목적으로한 절삭동력계, AE센서 등이 개발되고 있으나⁽²⁻³⁾, 그들의 대부분은 각 센서가 각각 단일의 현상을 측정대상으로 한 것이며, 하나의 센서에서 얻어진 출력신호를 최대한으로 이용하여 생산시스템에서 총합적으로 가공상태를 인식을하려는 시도, 즉 가능한 많은 상태량을 검출한다는 관점에서 검토를 행한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 특히 다기능복합형센서의 확립이라는 관점에서, 본연구에서는, 선삭가공에 있어서, 각 절삭상태량과 절삭저항의 동적성분과의 상관관계를 검토하였다. 이 절삭저항의 동적성분에는 여러 유용한 정보가 포함되어 있다는 점에 착안하여, 이를 이용한 절삭상태를 인식하려는 시도가 이미 일부 행하여 졌으나⁽⁴⁾, 여기에서는, 절삭중에 생성되는 칩형상의 변화, 공구마멸진행의 상황 및 공작물 표면거칠기상태의 변화를 검토하였다. 구체적으로는, 이들 각 상태량의 변화와 가장 밀접한 관계가 있다고 판단되는 주파수 영역을 이용하여, 얻어진 절삭저항의 동적성분을 주파수분석하고, 동적성분의 평균최대진폭과 각 상태량과의 상관관계를 검토하였다. 그리고, 그 결과로부터, 총합적 절삭상태의 In-Process 인식에 동적성분의 이용가능성 및 복합기능형 센서의 구축 가능성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1 은 본실험에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 실험에서는, 직경 61mm, 길이 180mm의 봉재(SM45C)를 피삭재로 하고, 이를 Chucking 길이 35

mm로 3-Jaw Scroll Chuck에 일정한 힘으로 고정하였다. 또한, 공구는 매실험마다 새로운 Tip으로 교환하였다. 그리고, 피삭재 Chucking시의 편심을 제거하기 위하여, 절삭깊이 0.5mm로 전가공을 하였다.

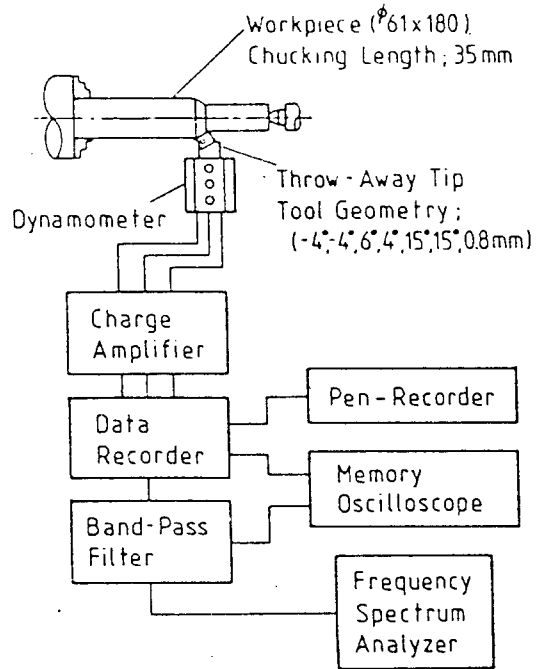
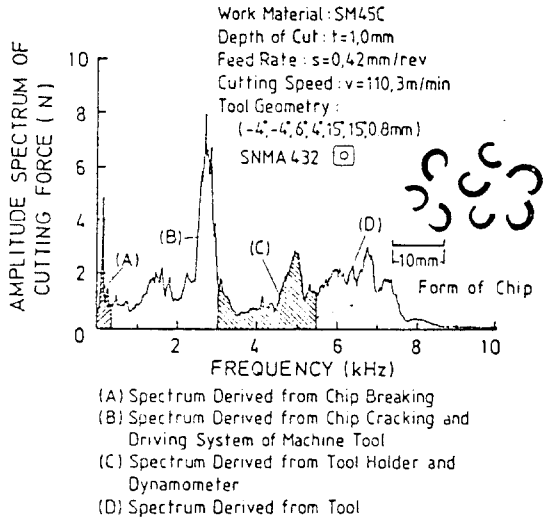


Fig.1 Schematic view of experimental set-up

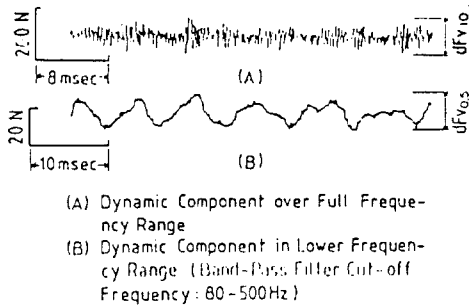
절삭저항은 선반의 공구대 대신에 고정설치한 압전형공구동력계에서 측정하고, 얻어진 신호는 Fig.1에 나타낸 바와같이, 일단 Data Recorder에 수록하였다. 그다음, 신호를 재생하고, 분석하여, 절삭저항의 정적 및 동적성분, 그리고 동적성분의 주파수를 검토하였다.

3. 동적성분의 주파수특성

Fig. 2 (a), (b)는 공구의 돌출길이 L=35mm로 하고, 칩이 비교적 안정하게 파단상태로 생성되는 경우, 얻어진 주분력방향에 대한 동적성분의 출력파형과, 이를 주파수분석한 결과의 일례이다.



(a) Amplitude Spectrum of Cutting Force and Chip Form



(b) Dynamic Component of Cutting Forces

Fig. 2 Example of measured frequency and dynamic components of cutting force

그림에서 볼 수 있는 바와같이(Fig. (a)), 주파수 대역 0-10 kHz에 걸쳐, (A), (B), (C), (D)의 각 영역에서 극대치가 일어나고 있다. 이와같은, 극대치의 발생원인을 조사하기 위하여, 공구 및 동력계의 각부에 가속도계를 설치하고, 절삭중에 진동상태를 관찰하였다. 그리고 공구에 충격하중을 가하여 그때의 고유진동수를 측정하였다. 그결과, (C), (D)는 공구지지부 및 절삭동력계, 그리고 공구의 주분력방향의 고유진동수에 대응하는 주파수성분임이 확인되었다. 그러나, 이와같은 특성만으로는 설명할 수 없

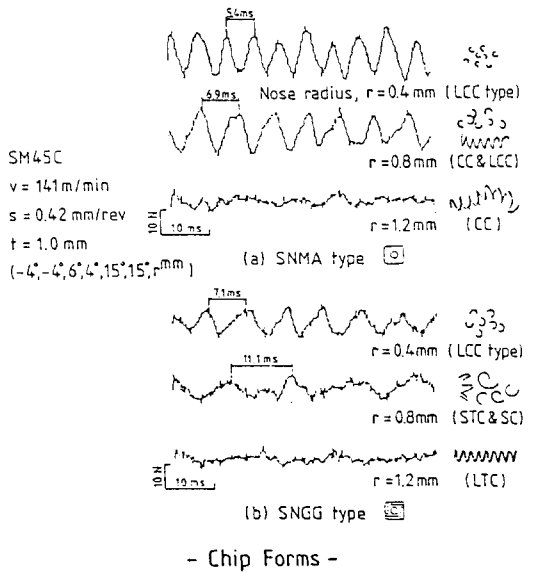
는 주파수성분, 즉 (A), (B)는 절삭조건이나 공구의 형상, 특히 생성되는 칩의 형태에 따라 크게 변화하는 경향이 있다. 이점에 관하여 여러 절삭조건하에서 상세히 조사한 결과, 이들은 칩의 파단주기 및 자유표면에 생성되는 균열주기에 대응하는 주파수성분임이 확인되었다⁽⁵⁾.

이상과 같이, 절삭저항의 동적성분에는 공작기계를 구성하는 각계(공작기계-공구-공작물계)의 고유진동수와 절삭과정에서 발생하는 칩생성기구동, 서로 독립되어 있는 것으로 생각되는 주파수성분으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그리고, 얻어진 출력신호(Fig. (b)의 (A))는, 이들이 합성된 Random한 성질을 갖는 중첩파로, 그 최대진폭은 각 주파수성분에 대응하는 진폭들의 대수화로 나타나고 있음을 의미한다⁽⁶⁾. 즉, 절삭저항의 동적성분에 포함되어 있는 각종 영향인자를 주파수 분석결과에 의해 각성분의 영역을 결정하고, 측정된 동적성분(10 kHz 까지)을 그에 대응하는 차단주파수를 갖는 Band-Pass Filter에 통과시킨 다음, 얻어진 각출력파형의 최대진폭(예를들면, Fig. (b)의 (B))을 하나의 영향인자로 간주할 수 있다. 따라서, 이와같은 방법으로 신호처리를 행하는 것에 의해, 절삭저항의 동적성분을 여러종류의 절삭상태를 인식하기 위한 목적에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

4. Chip형태의 판별

여기에서는, 절삭저항의 동적성분 가운데, 칩파단에 관계하는 주파수영역(80-500Hz)의 성분을 추출하여, 이 얻어진 신호 $dFv_{0.5}$ 의 평균 최대진폭을 이용하여 칩의 생성, 배출상태의 In-Process 인식 가능성을 검토하였다.

그 결과, 다음과 같은 유용한 결론을 얻었다⁽⁴⁾. 즉, Fig. 3에서 볼 수 있는 바와같이, 본 연구에서 채용한, 적당한 신호처리를 실시한 절삭저항의 동적성분 $dFv_{0.5}$ 는 칩의 파단상태를 정확히 반영하고, 그파형은 주기성을 가지고 있다. 따라서, 이파형의 진폭과 주기에 대하여 상세히 검토하면, 칩형태의 세밀한 분류 및 자동인식이 가능할 것으로 생각된다.



Code	Full Spell		
RC	ribbon chip	LTC	long tubular chip
TC	tangled chip	STC	short tubular chip
CC	corkscrew chip	SC	spiral chip
HC	helical chip	LCC	long comma chip
		SCC	short comma chip

Fig. 3 Dynamic components of cutting force and forms of chip varied with nose radius of tip (SNMA and SNGG types)

한편, Fig. 4는 일련의 절삭실험에서 얻어진 칩을 서독 INFOS의 방법⁽⁷⁾에 의해 분류하여, 칩형태와 동적성분과의 관련성을 조사한 결과이다.

그림에서 알 수 있는 바와같이, 칩형태와 동적성분의 변화에는 강한 상호의존성을 나타내고 있다. 즉, 동적성분 $dF_{v0.5}$ 는 연속형보다 파단형칩의 경우가 크고, 그 변동폭도 크다. 또한, 칩은 SNGG형 tip에서만 생성되나, Long Tubular (LTC형)의 칩이 생성되는 경우에 동적성분은 칩처리성이 불량한 다른 연속형칩과 거의같은 값으로 되고 있다.

이상과 같이, 칩형태는, 절삭조건 및 공구의 형상, 그리고 동일절삭조건에서도 시시각각으로 변화하나, 칩처리성의 관점에서 생각하면, 어느 주파수영역의

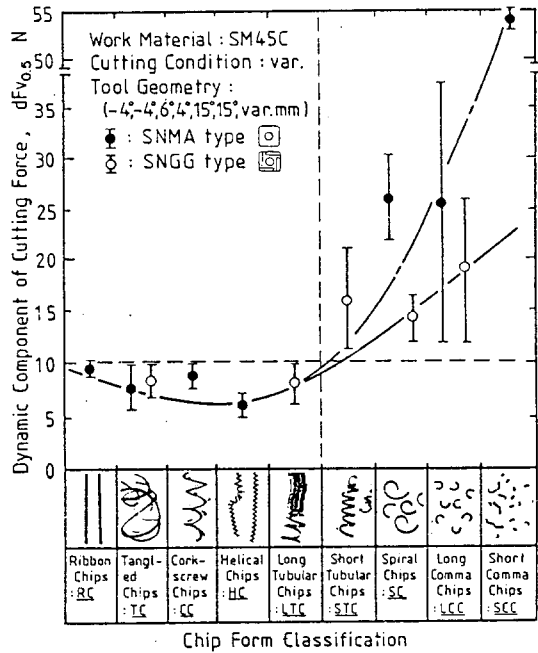


Fig. 4 Relationships between the chip form and the dynamic component of cutting force

절삭저항의 동적성분에 의해 적어도 파단형으로 칩 처리성이 양호한 칩형태를 다른 칩생성, 배출상태와 구별하여 인식할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 동적성분의 최대진폭을 감시하는 것에 의해 처리성이 양호한 파단형칩의 In-Process인식이 가능하다고 말할 수 있다. 이점을 확인하기 위하여, 경사면마멸의 진행에 따른 칩 배출상태와 동적성분의 변화에 대하여 검토를 행하였다. 이 실험에서는, K10 종의 Tip을 사용하고, 공구에는 경사면 및 여유면마멸이 동시에 존재하고 있으나, 여기에서는 칩배출상태의 변화와 밀접한 관계가 있는 경사면마멸만을 고려하였다. 그리고, 동일값의 마멸량에 대하여 연속형과 파단형칩을 얻도록 절삭조건을 변화시켜 절삭실험을 행하였다.

Fig. 5는, 그 실험결과로서, 절삭의 진행에 따라 경사면마멸은 거의 일정하게 증대하며, 절삭저항의 동적성분 $dF_{v0.5}$ 도 증대하고 있다. 그러나, 동일 경사면 마멸상태에서 절삭조건을 변화하여, 생성되는 칩형태를 연속형에서 파단형으로 변화시키면, 동

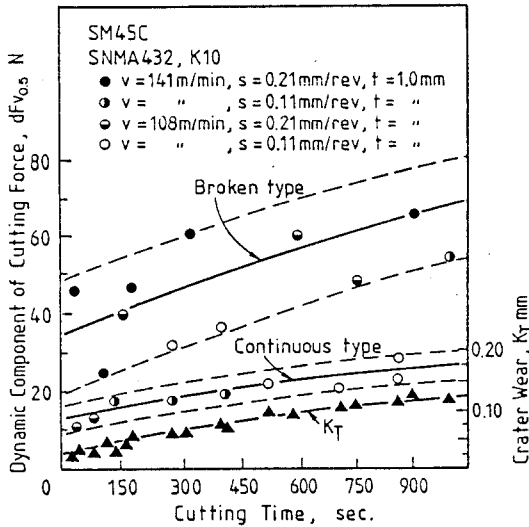


Fig. 5 Variation of dynamic component of cutting force, crater wear and form of chip with cutting time

적성분 $dF_{v0.5}$ 는 약 3배 정도 크게되어, 명백한 차이를 나타내고 있다. 즉, 실제적인 절삭상태에서도, 적당한 경계값(threshold)을 설정하여 절삭저항의 동적성분 $dF_{v0.5}$ 를 감시하면, 생성되는 칩형태가 처리성이 양호한 파단형인가 아닌가를 충분한 신뢰성과 함께 In-Process로 인식할 수 있다.

5. 공구마멸의 검출

Fig. 6은 공구의 마멸진행에 따른 동적성분의 주파수성분(0-10kHz까지) 변화를 조사한 결과로서, 이 높음 RMS 값 12회를 평균한 것이다. 그림에서 볼수있는 바와같이, 공구의 마멸발생시 절삭저항의 동적성분은 크게 칩생성등을 포함하는 각종 절삭현상과 공구의 고유진동수(약 6kHz)를 포함하는 공구계에 관련된 주파수성분으로 구성되어 있음을 알 수 있으며, 이들 각영역에서 동적성분의 극대치가 일어나고 있다. 이경우, 특히 공구의 고유진동수 6kHz 부근의 동적성분의 진폭(스펙트럼의 peak 값)은 여유면 마멸폭 V_B 의 마멸정도에 따라 크게 변화하고 있다. 따라서, 여기에서는 이 주파수영역(5-8kHz)의 성

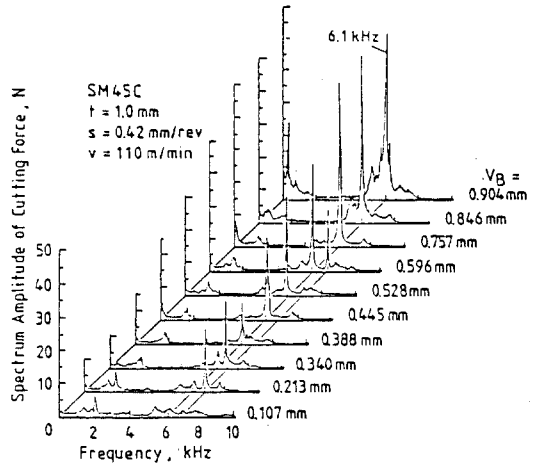


Fig. 6 Spectrum amplitude of dynamic component of cutting force

분을 추출하여, 얻어진 신호 dF_{v5-8} 의 평균에너지값 $E_a^{(8)}$ 를 산출하여, 공구마멸상태의 In-process 인식의 가능성을 검토하였다.

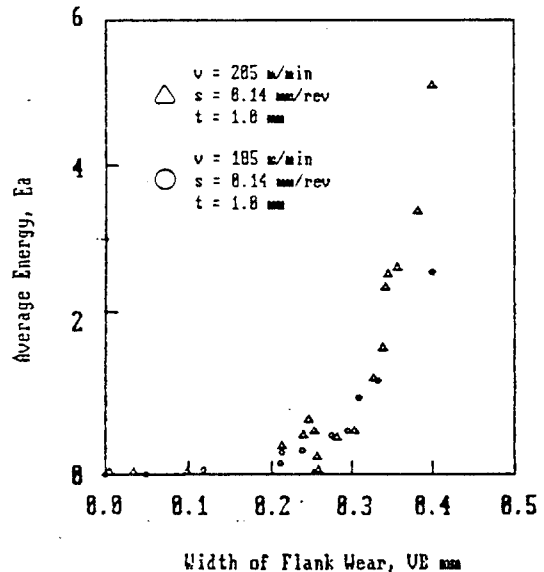


Fig. 7 Variation of average energy E_a versus progress of flank wear V_B

Fig. 7은, 여유면마멸폭 V_B 와 평균에너지값 E_a 와의 대응관계를 나타낸 것으로서, E_a 값은, 절삭조

건에 관계없이, V_B , 약 0.3mm 이하의 범위에서는 거의 일정하게 V_B 의 마멸진행과 함께 비례적으로 증가하다가, 그 이상으로 되면 급격히 증대하고 있다. 이와같은 결과는, 절삭저항의 동적성분 가운데 공구의 고유진동수 부근의 주파수성분을 감시하는 것의 의해 여유면마멸 V_B 의 검출이 가능함을 시사하고 있으며, 이는 공구의 교환지시나 수명판정을 하는데 있어서 유용하게 이용되어 질 수 있을 것으로 생각된다.

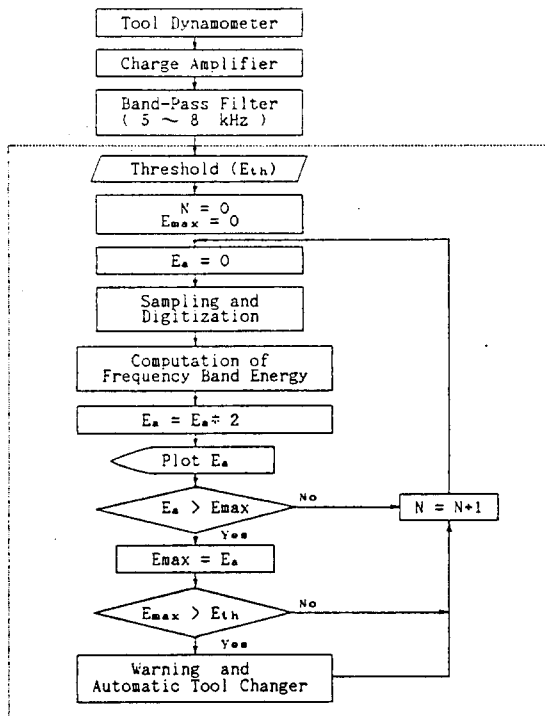
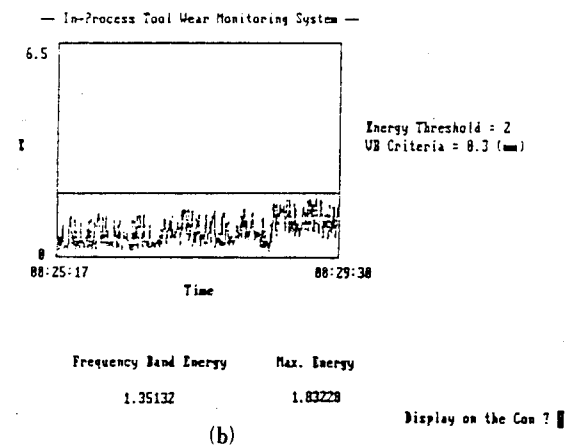
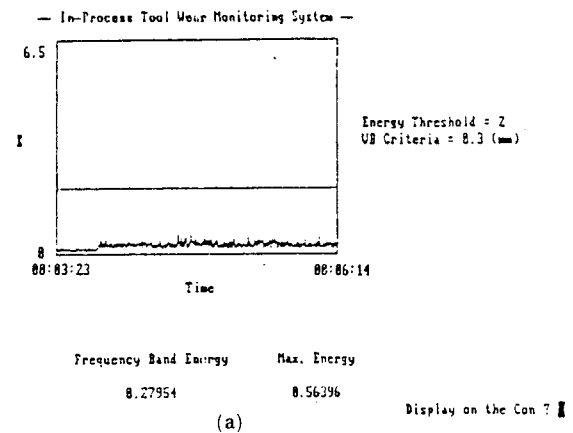


Fig. 8 Block diagram of in-process tool wear monitoring system procedure

따라서, Fig. 8에 나타낸 바와같은 On-Line 감시시스템을 구성하여, 그 가능성 여부를 조사하였다. 이 장치는 공구의 수명한계 판정 및 교환지시를 할 목적으로 한것으로, 압전형 공구 동력계에서 검출된 신호를 Charge Amplifier에서 증폭하여, 차단주파수 5-8kHz로 Band-Pass Filter를 설정하여 출력된 신호를 샘플링을 20kHz로 A/D 변환하고, 평균에너지 값 E_a 를 산출하여, 그 값을 2배

로 증폭한 다음, 미리 설정한 경계값 E_{th} 와 비교토록 하였다. 이러한 연산과정을 계속 반복수행하는 동안 E_a 의 최대값 E_{max} 가 E_{th} 보다 크게되면 CRT 상에는 경고음의 발생과 동시에 경고 메시지가 나타나도록 하였다. 또한, 수명판정을 위한 E_{th} 의 값은 작업자가 임의로 설정하여 입력이 가능토록 하였다. 본 연구에서는, 공구의 수명한계를 ISO 에서 규정하는 $V_B = 0.3\text{mm}$ 로 하였으며, 이는 $E_{th} = 2$ 에 해당된다.

Fig. 9는 Fig. 8의 감시장치를 이용하여 절삭실험을 하였을때 얻어진 결과로서, 절삭개시 후 약 40분이 경과하였을 때, 경고음과 함께 그 메시지가 CRT 상에 나타나고 있다. (Fig. 9 (c)) 또한, 이때의 V_B



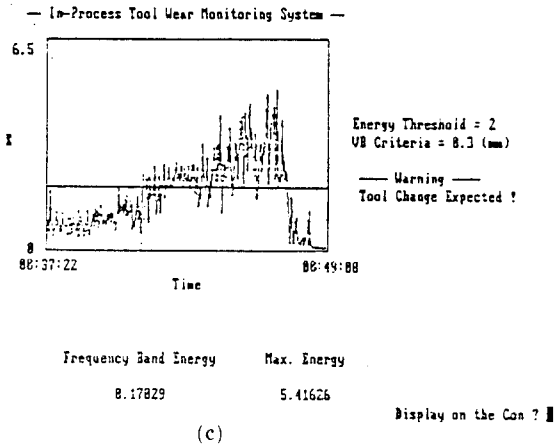


Fig. 9 Variation of frequency band energy level with cutting time ($v=185$ m/min, $s=0.14$ mm/rev, $t=1.0$ mm)

값을 측정 한 결과, 공구의 수명한계를 이미 초과한 약 0.4mm에 달하였음을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안한 감시장치는 공구의 교환시기 및 수명판정을 하는데 있어서, 충분한 신뢰성과 함께 실용화에의 적용이 가능할 것으로 생각된다.

6. 표면거칠기 상태의 인식

Fig. 10은 절삭속도를 변화시켰을때, 표면거칠기 및 절삭저항의 동적성분의 거동을 나타낸 대표적인 일례이다. 그림에서, $dFv_{4.0}$ 은 절삭중에 발생하는 절삭소음(주파수영역: 80-4,000Hz)에 관련된 동적성분의 평균최대 진폭을 나타내며, $dFv_{0.5}$ 및 $dFv_{2.5}$ 는, 각각 표면 거칠기의 생성과 관련이 깊다고 판단되는, 칩의 파단주파수(80-500Hz) 및 공작기계-공구-공작물계의 주파수특성 (80-2,500) Hz과 관련되는 주파수 영역의 동적성분을 나타낸다.

그림에서 볼 수 있는 바와같이, 표면거칠기는 절삭속도에 대하여 일반적으로 알려져있는 특성을 나타내고 있다. 즉, 구성인선이 발생하는 저속의 영역에서 표면거칠기는 크게되나, 속도의증가에 따라 작게되며, 일정한 값으로 된다. 또한, 동적성분도 $dFv_{2.5}$ 의 경우에는, 거의 동일한 경향을 나타내고 있

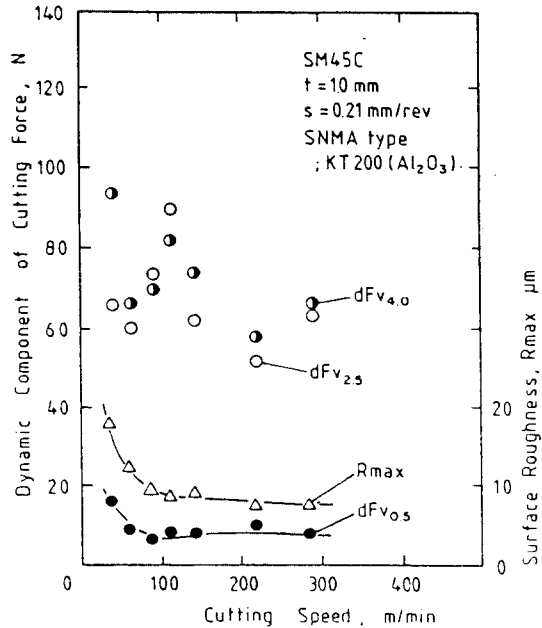


Fig. 10 Effects of cutting speed on surface roughness and dynamic component of cutting force

나, 그밖의 경우, 즉 $dFv_{2.5}$ 및 $dFv_{4.0}$ 에서는 변화의 정도가 크며, 표면거칠기와의 사이에는 명백한 관계가 나타나질 않고 있다. 이와같이, 절삭저항의 동적성분은 표면거칠기의 상태가 열화하는 절삭조건에서 크게 증대한다. 또한, 표면거칠기의 상태를 파악하기 위해서는, Fig. 10에서도 볼 수 있는 바와같이, 동적성분 $dFv_{0.5}$ 가 표면거칠기 R_{max} 의 변화상태를 충실히 반영하고 있다고 할 수 있다. 즉, 어느 절삭조건의 범위에서는, 어느주파수 영역의 동적성분은, 표면거칠기를 검출하는데 유용할 것으로 생각된다. 따라서, 이 점을 표면거칠기의 주파수분석을 행하는 것에 의해 간단히 확인하였다.

Fig. 11(a), (b)는, 표면거칠기를 공구의 이송방향으로 측정하였을때 얻어진 신호와, 그를 주파수분석한 결과의 일례이다. 이들 그림에서 볼 수 있는 바와같이, 동일 절삭속도 및 절삭깊이에서는, 이송량이 큰 경우, 그리고, 동일 절삭깊이 및 이송량에서는, 저속인 경우에 표면거칠기의 진폭은 크게 증대하

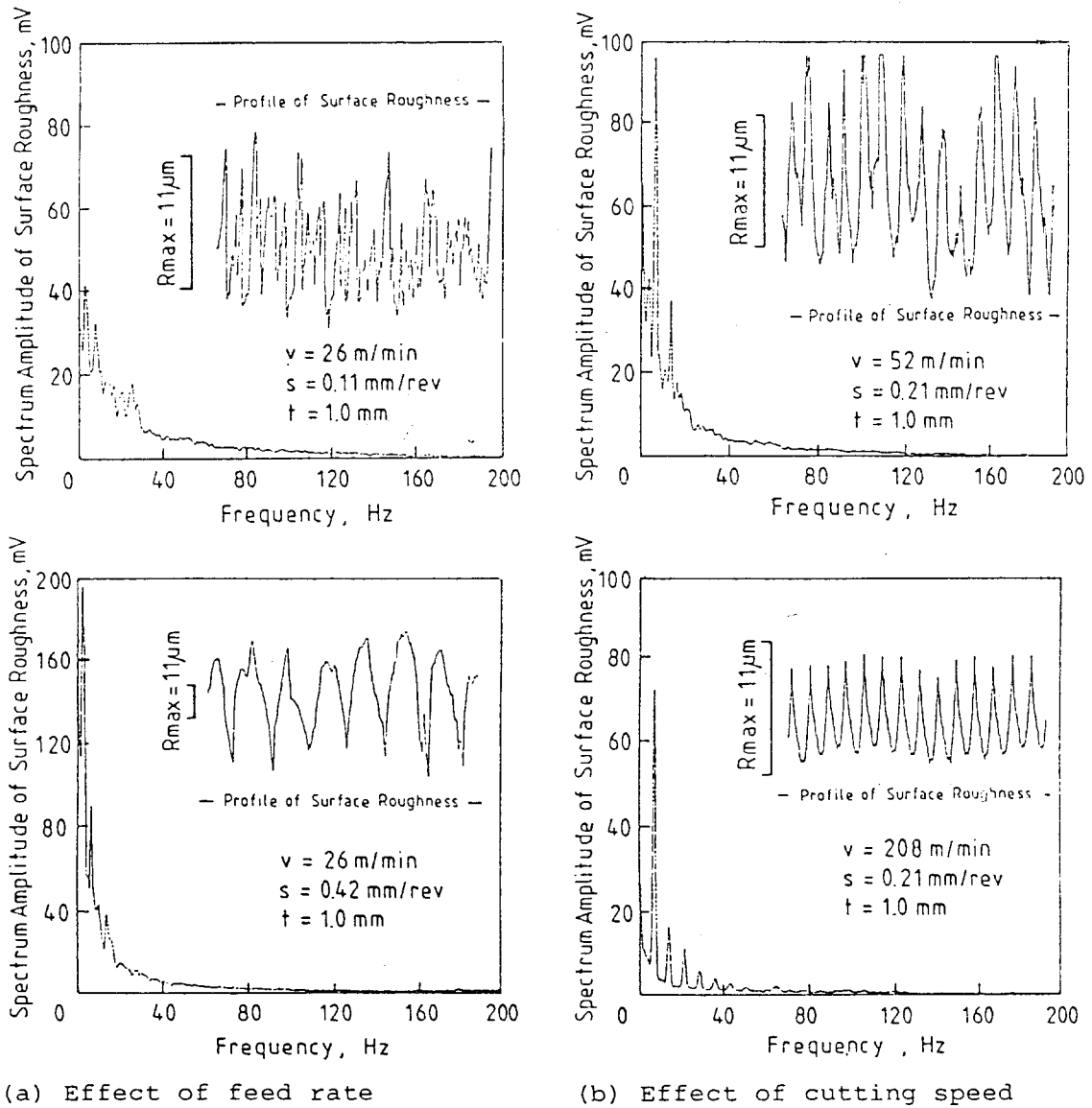


Fig. 11 Amplitude spectrum of the surface roughness

고, 동시에 스펙트럼의 진폭과 면적도 증대하고 있다. 또한, 이들 스펙트럼에서, 40Hz 이내의 주파수범위에서 극대치가 발생하고 있다. 한편, 표면거칠기의 주파수성분에 변화가 나타나고 있는 주파수영역(40Hz 이하)에 대한 절삭저항의 동적성분의 거동을

조사하였으나, 동적성분과 표면거칠기의 변화 사이에는 별다른 특징적인 거동이 확인되질 않았다. 그러나 이상의 결과⁽⁵⁾를 살펴보면, 표면거칠기의 주파수성분은, 칩의 파단주파수보다 낮은 주파수대역에서 변화하고, 이는 동적성분 $dF_{v, s}$ 의 주파수범위 내에

존재하고 있다. 따라서, 80-500Hz의 주파수영역에 대응하는 동적성분 $dF_{v_{0.5}}$ 에 의해 표면거칠기의 변화상태를 검토하는 것이 바람직하다고 할 수가 있다. 따라서, 이하에서는, 특히 표면거칠기가 양호 혹은 불량으로 되는 절삭조건을 이용하여 절삭저항의 동적성분 $dF_{v_{0.5}}$ 에 의한 표면거칠기 R_{max} 의 검출 가능성을 검토하였다.

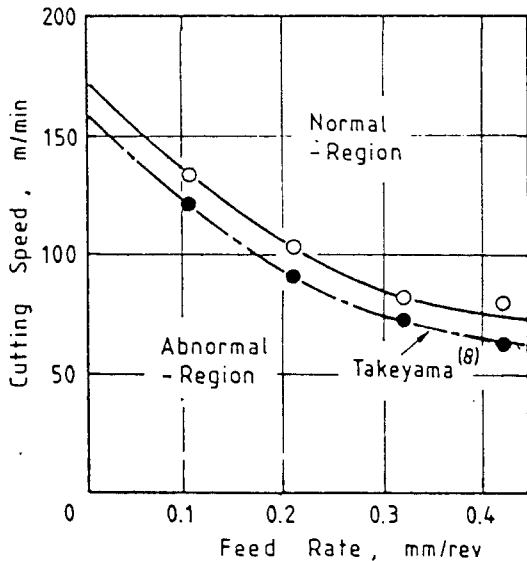


Fig. 12 Regions of normal and abnormal cutting conditions from surface quality point of view

Fig. 12는, 여러 이송량에 대하여, 표면거칠기가 어느값 이상의 절삭속도에서 일정값으로 되는, 소위, 임계절삭속도를 나타낸 것으로, 이는, 竹山⁽⁹⁾의 결과와 잘 일치하고 있다. 따라서 이 임계절삭속도에 의해 판별되는 표면거칠기의 양부를 관점으로 하여 절삭저항의 동적성분 $dF_{v_{0.5}}$ 의 평균최대진폭과 절삭속도와의 관계를 정리해 보면, Fig. 13에 나타낸 것과 같이 된다. 즉, 표면거칠기가 악화하는 비정상적 절삭조건에서는, 동적성분 $dF_{v_{0.5}}$ 는 급격히 증대하고, 그 값은 정상인 절삭조건 경우보다 약 3배 정도 크게 되고 있다. 이러한 사실은, 적당한 경계값을 $dF_{v_{0.5}}$ 에 설정하면, 적어도 표면거칠기의 양부를

$dF_{v_{0.5}}$ 의 값에 의해 구별할 수 있음을 시사하고 있다.

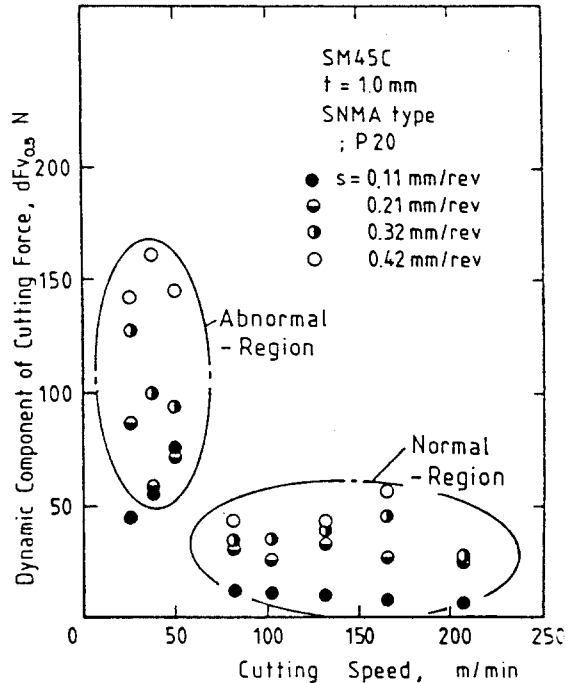


Fig. 13 Relations between cutting speed and dynamic component of cutting force

다음에, Fig. 14와 15는, 동적성분 $dF_{v_{0.5}}$ 와 표면거칠기 R_{max} 및 ΔR_{max} 와의 대응관계로서 나타낸 것이다. 여기서 ΔR_{max} 는 표면거칠기의 최대값 R_{max} 와 이론값 R_{maxth} 와의 차이로서, 정상 절삭조건(타원내의 점)에서는 약 $5\mu m$ 이하의 범위에서 존재하고 있다. 이들의 그림에서 알 수 있는 바와같이, 어느 이송량에 대해서도, 동적성분 $dF_{v_{0.5}}$ 가 크게됨에 따라, 표면거칠기 R_{max} 및 ΔR_{max} 의 값은 지수함수적으로 증대하며, 또한, 그 증가율은 이송량이 작게 됨에 따라 크게된다. 이와같은, $dF_{v_{0.5}}$ 및 ΔR_{max} 의 증가현상은, 칩의 파단이 표면거칠기의 생성에 지배적인 요인으로서 작용하고 있는 것을 의미하고 있다. 이상과 같이, 동적성분 $dF_{v_{0.5}}$ 는 칩의 파단에 의한 표면거칠기의 열화현상을 잘 반영하고

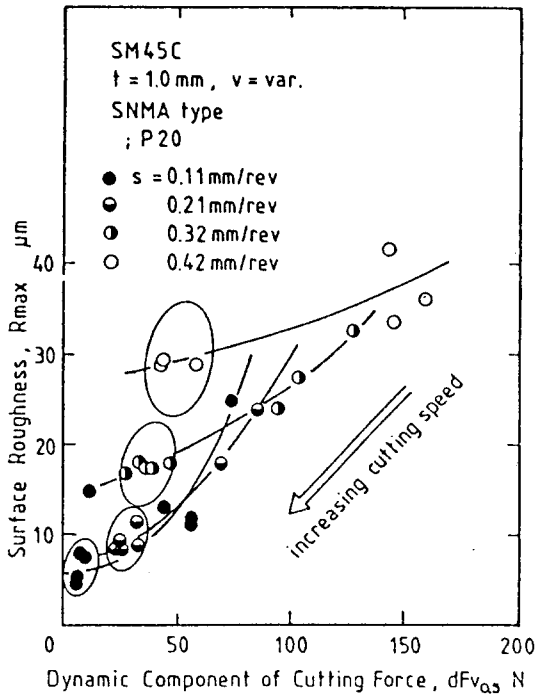


Fig. 14 Relations between dynamic component of cutting force and surface roughness

있는 것으로 생각되며, 따라서, 동적성분 $dFv_{0.5}$ 의 급증현상을 이용하면, 표면거칠기악화의 In-Process 인식이 가능하며, 이 경우, ΔR_{max} 의 폭이 R_{max} 보다 좋은 상관을 $dFv_{0.5}$ 에 대하여 나타내는 것으로 생각된다.

7. 결론

본 연구에서는, 선삭가공에 있어서 절삭저항의 동적성분에 의한, 종합적 절삭상태의 인식, 특히, 다기능복합형 센서의 확립이라는 관점에서, 칩의 형태, 공구마멸, 표면거칠기의 In-Process 인식의 가능성을 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 채용한, 적당한 신호처리를 행한 절삭저항의 동적성분 $dFv_{0.5}$ 및 dFv_{s-8} 은 칩의 파단 상황, 표면거칠기의 열화현상 및 공구의 마멸상태를 정확히 반영하고 있으며, 이들 동적성분의 급증현상

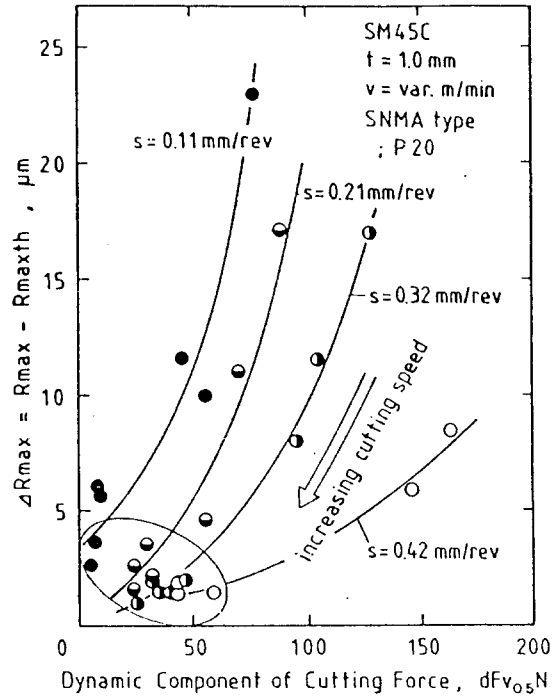


Fig. 15 Relation of dynamic component of cutting force to deterioration of surface roughness

을 이용하는 것에 의해, 칩형태의 판별, 공구의 수명 판정 및 교환지시, 그리고 표면거칠기의 열화를 In-Process로 인식할 수 있다.

(2) 이상과 같이, 절삭저항의 동적성분이 각 절삭현상에 대하여 민감하게 작용하고 있는 것은, 절삭상태를 종합적으로 인식하는데 있어서, 동적성분이 다목적적으로 이용될 수 있음을 의미하며, 이로부터 복합기능형 In-Process 센서의 구축이 가능할 것으로 생각된다. 이 경우, 특히 신호처리 방법은 앞으로의 해결 과제라 할 수 있다.

參 考 文 獻

(1) J. W. Powell, et al., "Sensing and

- Automation for Turning Tools", 13th NAMRC, p. 23, 1985.
- (2) 稲崎一郎, "アコースティック・エミッションによる切削プロセスの監視" 日本機械學會論文集會論文集(C編), 51, 466, p. 1163, 昭60-6.
- (3) K. Langhammer, "Schnittkräfte als kenngrößen zur verschleißbestimmung an Hartmetall-Drehwerkzeugen und als Zerspanbrakeitskriterium von Stahl", Sonderdruck aus VFI Der Versuchs und Forschungsingenieur, Nr. 4 and 5, p. 8, 1973.
- (4) 鄭儀植, 南宮 垆, 伊東誼, "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, 1980-10.
- (5) 鄭儀植, "切削抵抗을 이용한 In-Process 切削狀態認識에 관한 研究" 충남대 박사학위논문, 1989-8.
- (6) S. H. Crandall, W. D. Mark, "Random Vibration in Mechanical Systems" Academic Press, p. 57, 1963.
- (7) W. König, et al., "Present Knowledge of Chip Control", Annals of the CIRP, vol. 28, 2, p. 441, 1979.
- (8) C. Y. Jiang, et al., "In-Process Monitoring of Tool Wear Stage by the Frequency Band-Energy Method", Annals of the CIRP, vol. 36, 1, p. 45, 1987.
- (9) 竹山 秀彦, 外2名, "旋削仕上面あうさに關する 研究", 精密機械, 31, 3, p. 250, 1965.