論文 한국정밀공학회지 제 12 권 제 2 호 1995. 2
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 12. No 2. February. 1995.

복합 압전필름형 가속도계를 이용한 초정밀 선반 공구동력계의 개발에 관한 연구

김 정 두*, 김 동 식**

A Development of Combined-Type Tool Dynamometer for Ultraprecision Lathe with Piezo-Film Accelerometer

Jeong-Du Kim* and Dong-Sik Kim**

ABSTRACT

The cutting force is the most important variable to understand the mechanics of ultra-precision machining. Most dynamometers, however, monitor the static cutting force only. But it is necessary to measure the dynamic cutting force to clarify the machinability of the material, the formation of the chip, chatter and the wear of the tool.

In this research, measurement of the dynamic cutting force in order to clarify the machinability of the material, the formation of the chip, chatter and the wear of the tool has been conducted. A combined-type dynamometer which could measure the static cutting force and the dynamic cutting force by use of strain gauges and a piezo-film accelerometer has been developed. An analysis of the dynamometer also has been carried out.

Key word : Ultraprecision Machining(초정밀 가공), Static Cutting Force(정적절삭력), Dynamic Cutting Force(동적절삭력), Combined-Type Dynamometer(복합형 공구동력계), Piezo-Film Accelerometer(피에조필름형 가속도계)

기호설명

α : 각변위량[degree]
a : 튜브 윗면에서의 거리[㎜]
b : 튜브 폭[㎜]
d : 튜브 구멍의 직경[㎜]
δ : 미소변위량[㎜]
E : 탄성계수[N/㎟]
$F(t)$: 전체주절삭력[N]
$F_{dynamic}$: 동적절삭력[N]
F_{static} : 정적절삭력[N]
h : 홈의 길이[㎜]

* 한국과학기술원 정밀공학과, 정회원
** 한국과학기술원 정밀공학과 대학원

I : 관성모멘트[kg/㎟]
k_e : 유효강성[N/㎜]
L : 빔의 길이[㎜]
m_e : 유효질량[kg]
m_t : 집중질량[kg]
x : 전체변위[㎜]
x_{ave} : 평균변위[㎜]
x_d : 변위편차[㎜]

1. 서 론

컴퓨터 자기 디스크의 경면가공과 같은 고부가가치의 정밀 부품은 최근 단결정 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 선반에서 가공이 되고 있다. 이러한 초정밀 선반은 에어베어링을 사용하므로 높은 운동정밀도를 가지고 있고, 다이아몬드 공구 역시 우수한 성능의 것이 개발되고 있다.

일반적으로 알루미늄이나 동같은 연한 금속의 초정밀 선반에서의 정밀 가공시에는 절삭깊이는 수㎛에서 수십 ㎛ 사이이며 절삭력 역시 범용 절삭에 비해 매우 적게 나타나며, 계속적인 기술의 발전과 더불어 요구되는 부품의 가공정도와 가공능률이 급속하게 향상되고 있으므로 보다 정밀한 절삭력 측정법의 개발이 요구되고 있다.

절삭력을 측정하는 목적은 가공 역학의 핵심을 이루는 절삭 현상의 이해 즉, 절삭기구의 해명을 위한 것으로, 절삭력에 미치는 여러 절삭조건의 영향, 재료의 피삭성, 칩의 형성과정, 채터 등과 같은 진동기구, 공구마모의 검출을 위한 것이다. 그러나, 지금까지의 절삭력의 측정법은 대부분 정적 절삭력만 그 대상이 되어 왔으며, 지금까지는 대부분이 측정목적을 만족할 수 있었으나, 가공의 고정도화라는 요구에 대응하기 위해서는 동적 절삭력 성분에도 관심을 기울여야 한다.

정적절삭력 측정의 경우는 대부분 절삭력에 의해 탄성변형을 일으키는 변환기 부분에 스트레인 게이지 같은 센서를 장착하여 절삭력을 구하였다. 이때 감도와 강성의 문제가 중요하게 대두되며 평행보의 원리를 이용[1]하거나 원형구멍을 변환기 부분에 설계[2]하여 감도를 높이기도 한다. 그리고, 압전소자와 평행보 스프링의 원리를 이용[3-5]하여 정밀한 절삭력의 측정에 응용한 예도 있다.

이에 본 연구에서는 초정밀 선반 가공에서의 미소 절삭력의 동적 성분과 정적 성분을 동시에 측정할 수 있는 복합형 공구동력계를 설계, 제작하고 그 성능을 점검하였다. 정적성분은 스트레인 게이지로 측정을 하였고 동적절삭력은 압전필름소자를 이용하였으며 동력계의 구조를 모델링하고 해석함으로 정적절삭력 성분과 동적절삭력 성분을 합한 전체절삭력을 구하였다.

2. 공구동력계의 설계

2.1 정적성분의 측정

공구동력계의 재질은 탄성이 좋고 고유진동수가 높은 알루미늄으로 하였으며 직경 d의 원형구멍(circular hole)과 홈(solt)이 있어서 절삭력에 의해 굽힘모멘트(bending moment)가 생기며 이 때 홈의 자유끝단 BC가 서로 접근하게 된다.

홈과 원형구멍의 크기는 탄성이론에 의해 쉽게 구해지지 않으며 차원해석(dimensional analysis)과 실험을 통하여 구할 수 있다.[6]

Fig. 1과 같은 모양의 동력계의 설계에서 각 변위량 a는 다음과 같은 지수함수로 표현이 된다.

$$\alpha\frac{Ea^2b}{M}=17\left(\frac{d}{a}\right)^{0.395} \quad (1)$$

여기서 미소각 변위량 $a=\delta/h$이므로 끝단의 미소변위량 δ는 다음과 같다.

$$\delta=\frac{Mh}{Ea^2b}17\left(\frac{d}{a}\right)^{0.395} \quad (2)$$

Fig. 1과 같은 공구동력계의 구조를 이용하여 Fig. 2와 같은 공구동력계를 설계 제작하였다. 정적절삭력의

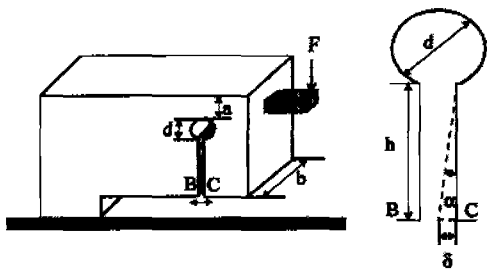
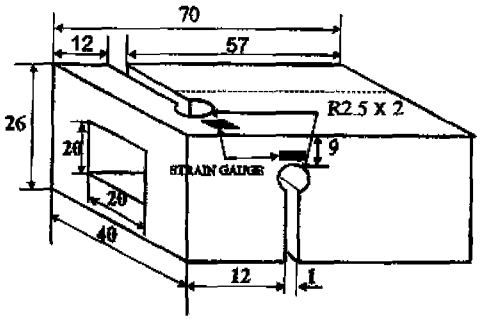
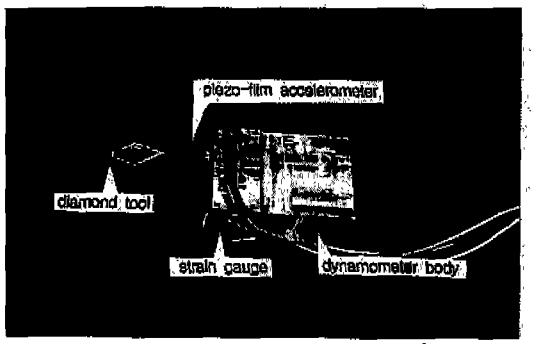


Fig. 1 Schematic diagram of transducer tube type dynamometer



(a)schematic diagram of dynamometer



(b)photograph of dynamometer

Fig. 2 A combined-type tool dynamometer

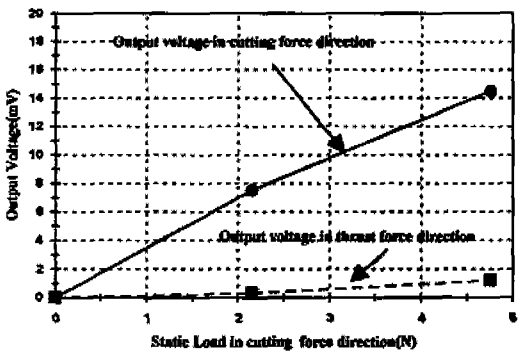


Fig. 3 Calibration result of static cutting force of the combined type tool dynamometer with a load in cutting force direction

측정은 스트레인 게이지와 스트레인 증폭기를 이용하였는데 실제 스트레인 게이지가 노이즈에 심한 영향을 받아서 스트레인 증폭기의 차단주파수 100Hz를 사용하여 실험하였으며 A/D 컨버터를 통하여 PC에서 받아들인 데이터는 소프트웨어적으로 필터링을 하였다. Fig. 3은 정적 보정을 한 결과로 10번의 테스트를 한 후 평균을 하였다. 여기서 주절삭력 방향으로의 정적하중을 주었을 때 주절삭력 방향과 배분력 방향의 출력 전압을 나타내었다. 이 때의 출력전압은 정적하중과 근사적으로 비례하며 보정을 통하여 선삭실험시의 정적절삭력을 구할 수 있다. 반도체형 스트레인 게이지와 같은 정밀할 스트레인 게이지의 이용과 정밀한 보정실험을 통하여 정적절삭력의 측정 성능의 개선은 가능하다.

2.2. 동적성분의 측정

일반적으로 절삭력은 평균값과 그에 중첩된 진폭이 작은 높은 주파수의 변동분으로 되어 있다. 그래서 이 평균값은 절삭력의 정적성분이라고 하고 그에 중첩된 변동분을 동적성분이라고 한다. 현재까지의 대부분의 절삭력의 측정은 정적성분을 대상으로 하고 있는데 최근에 가공의 고정도화라는 요구에 부응하기 위해서 절삭력의 동적성분에도 주의를 기울이게 되었다. 지금까지의 연구에 의하면 절삭력의 동적 성분에는 절삭 현상의 수많은 유용한 정보가 포함되어 있지만 아직 동적성분의 발생기구는 명백하지 않다. 전단형 칩과 균열형 칩의 생성, 공구계의 진동등이 주원인으로 생각되어 지고 있는데 그 주파수는 약 0.5~600kHz에 걸쳐 있다. 이에 본 연구에서는 높은 주파수 응답특성을 지닌 압전 필름형 가속도계를 이용하여 절삭력의 동적성분을 관찰하였다.

다이아몬드 공구가 장착된 생크 부분을 강체로 가정하고 생크가 부착된 변환기 부분을 탄성체로 가정을 하면 Fig. 4와 같이 집중질량이 홀더에 부착된 것으로 모델링이 가능하다.

Morse[7]에 의하면 이 시스템의 유효질량(effective mass) m_e와 유효강성(effective stiffness) k_e는 각각 다음과 같다.

$$K_e = \frac{3EI}{L^3},\quad m_e = m_t + \frac{33}{140}m_h \tag{3}$$

외부 절삭력에 의한 이 시스템의 자유물체도는 Fig. 4와 같으며 여기서 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$m_e\ddot{x}_d + k_e x_d(t) = F(t) \tag{4}$$

앞에서 언급했듯이 변위 x는 정적인 성분과 동적인

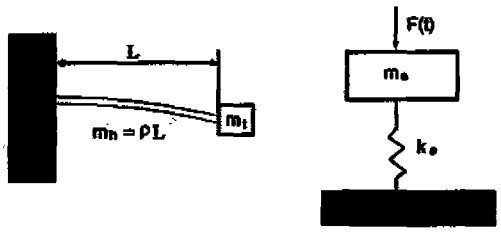


Fig. 4 Free body diagram of the developed combined type tool dynamometer

성분의 합이므로 $x = x_d + x_{ave}$라고 가정하면 위식은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$m_e\ddot{x}_d + k_e x_d + k_e x_{ave} = F(t) = F_{dynamic} + F_{static} \quad (5)$$

여기서 $F_{static} = k_e x_{ave}$라고 하면

$$m_e\ddot{x}_d + k_e x_d = F_{dynamic} \quad (6)$$

한편 (2)식의 δ와 x는 동일하므로 동적 절삭력 $F_{dynamic}$은 다음 식과 같다.

$$F_{dynamic} = \frac{m_e\ddot{x}}{1 - k_e \frac{rh}{Ea^2b} 17(\frac{d}{a})^{0.395}} \quad (7)$$

즉 생크의 끝단부분에 설치가 용이하고 경제적인 압전필름형 가속도계를 설치하여 가속도를 측정하면 설계된 공구동력계의 형상으로부터 동적절삭력의 측정이 가능하다.

2.3 총절삭력의 측정

총절삭력은 정적절삭력과 동적절삭력이 합으로 나타난다. 기존의 스트레인 게이지는 정적인 변형을 잘 감지해 내지만 응답속도가 느려 동적 절삭력을 측정하는 데는 한계가 있었다. 그래서, Fig. 5와 같이 스트레인 게이지와 동적응답 특성이 뛰어나며 경제적인 압전필름형 가속도계를 동시에 이용하여 정적절삭력과 동적절삭력을 측정하여 실제의 총절삭력을 측정할 수 있도록 시스템을 꾸몄다. 정적절삭력은 스트레인게이지로 동적절삭력은 압전필름형 가속도계를 이용하여 구한 후 아래식으로 전체 절삭력을 구할 수가 있다.

$$F(t) = F_{static} + F_{dynamic} \quad (8)$$

3. 검증실험결과 및 고찰

Table 1에 실험장치구성과 절삭조건을 나타내었다. Fig. 6은 앞서 설명한 알고리즘을 이용하여 실제로 측정한 절삭력을 신호처리하는 과정을 나타내고 있다. 먼저 스트레인 게이지로 정적절삭력을 측정할 시에 60Hz

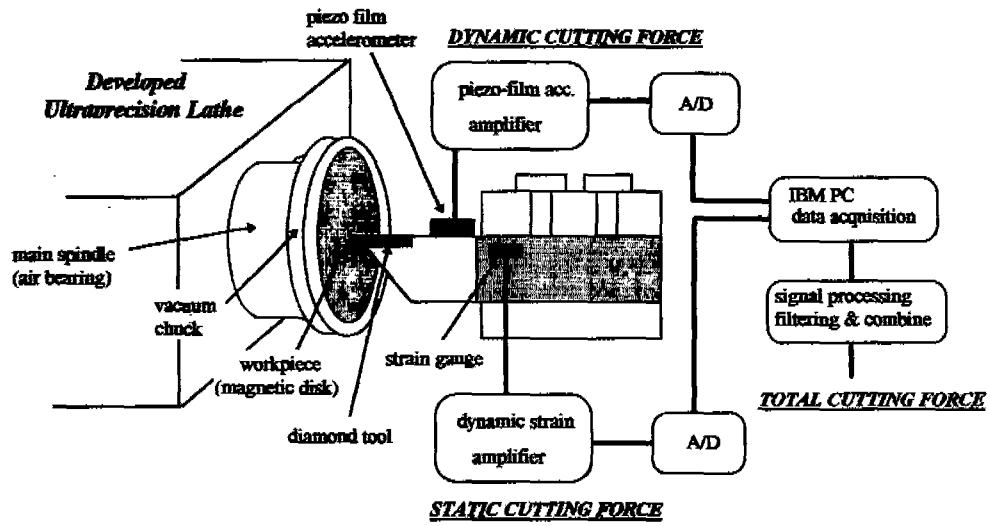


Fig. 5 Schematic Diagram of Experiment

Table 1 Experimental equipments and cutting conditions

Machine	Ultra-precision Lathe
Cutting Tool	Single Crystal Diamond Tool (Straight Type)
Workpiece	Al-alloy(magnetic disc)
Tool dynamometer	1) Developed combined-type dynamometer - strain gauge, bridge circuit, strain amplifier - piezo film accelerometer ACH(Penwalt Co. Ltd.), accelerometer amplifier 2) Kistler Dynamometer - 9257B+9403, charge amplifier 5011
Depth of cut	0.005~0.03(mm)
Feed rate	0.01~0.05(mm/rev)
Cutting speed	160, 320, 480, 570(mm/min)
Data acquisition system	- A/D converter ; PCL812PG(max.16channel, max.30kHz) - PC 486 system

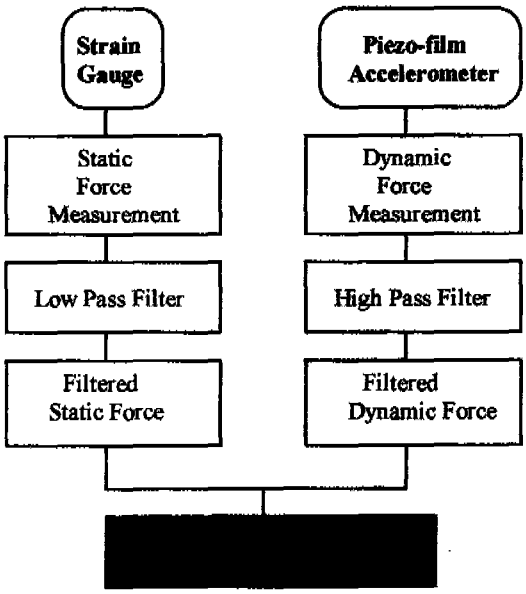


Fig. 6 Procedure of the signal processing

전기장에 의한 노이즈에 스트레인 게이지가 대단히 민감하게 반응하여 절삭력 측정의 정도를 떨어뜨리는 원인이 될 수가 있으며 본 연구에서는 고주파수의 성분을 따로 측정하므로 측정할 정적 절삭력 신호를 로패스필터로 통과시켜 60Hz의 전기장 노이즈를 쉽게 제거할 수 있다. 정적성분의 신호처리에서 저주파통과필터의 차단주파수는 스트레인 증폭기의 다이얼을 선택하여 먼저 100Hz를 사용하였고, 그 후 소프트웨어적으로 다시 50Hz이하의 신호만을 통과하게 하였다. 그리고 동적절삭력의 경우에 있어서 압전필름 가속도계는 이러한 전기장 노이즈의 영향을 받긴 하지만 고려할 정도의 영향은 미치지 않았으며 따라서 정적절삭력의 경우와는 반대로 50Hz이상의 고주파통과필터를 사용하였다. 이와 같이 절삭력을 동적 성분과 정적 성분으로 따로 분리하므로 신호처리하는 과정이 대단히 쉽고 편리해졌다. 즉 정적절삭력 신호는 저주파수통과필터를, 동적절삭력 신호는 고주파수통과필터를 사용하여 노이즈를 제거한 후에 전체 절삭력을 구하므로 보다 정밀한 절삭력 신호를 얻는 것이 가능하게 된다.

Fig. 7은 초정밀 선반에서 본 연구에서 개발된 압전필름 가속도계를 이용한 복합형 공구동력계와 정밀도가 우수한 압전소자형 공구동력계(Kistler 9257B)를 비교 실험한 것이다. 본 연구의 복합형 공구동력계에서 동적절삭력은 압전필름형 가속도계로 측정을 하므로 주절삭방향의 동적절삭력의 평균값을 비교 고찰하였다. 절삭속도가 증가하면 안정적인 절삭이 이루어져 동적절삭력의 평균값은 감소하며 본 연구의 복합형 공구동력계와 키슬러 공구동력계의 동적절삭력 평균값이 잘 일치함을

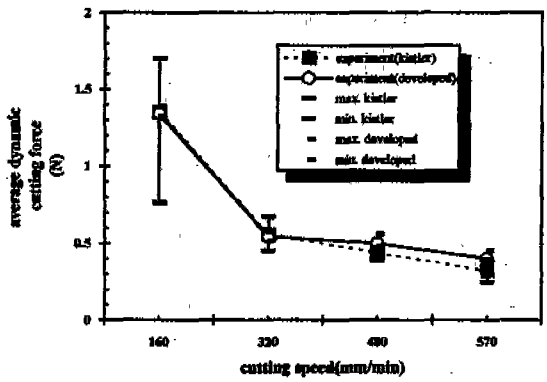


Fig. 7 Comparison average dynamic cutting force of combined-type tool dynamometer with Kistler tool dynamometer 9257B in terms of cutting speed

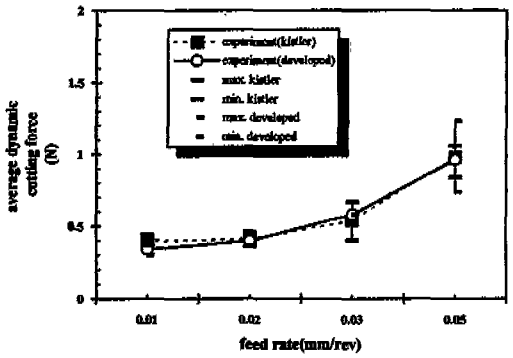


Fig. 8 Comparison average dynamic cutting force of combined-type tool dynamometer with Kistler tool dynamometer 9257B in terms of feed rate

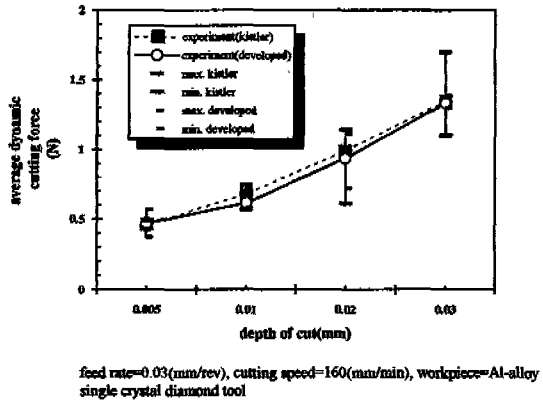


Fig. 9 Comparison average dynamic cutting force of combined-type tool dynamometer with Kistler tool dynamometer 9257B in terms of depth of cut

확인할 수 있다. 절삭깊이가 0.03㎜이며 절삭력의 크기가 매우 작아서 실제 가공중에 칩의 제거가 원활하지 못하여 칩이 공구 끝단에 조금만 쌓여도 동적 절삭력의 변화는 심하게 나타난다. 모든 검증실험은 같은 절삭조건에서 5회의 실험을 하여 평균을 구하였으며 그림에는 최대값과 최소값도 표시하였다.

Fig. 8은 이송의 증가에 따른 동적절삭력의 평균값을 비교한 것으로 이송속도가 증가할수록 절삭량의 증가로 인하여 동적절삭력이 증가하는 것을 알 수 있고 Fig. 9는 절삭깊이의 증가에 따른 결과로 역시 절삭량의 증가로 인하여 절삭력이 증가하며 두 공구동력계의 실험결과가 경향이 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 본 연구에서 개발된 복합형 공구동력계를 이용하여 절삭깊이의 증가에 따라 측정한 동적절삭력을 시간영역과 주파수 영역에서 나타낸 것이며 동일한 실험조건에서 Fig. 11은 키슬러 공구동력계의 실험결과를 나타낸 것이다. 이미 그 평균값은 경향과 값이 일치함을 앞에서 고찰하였다. 충격 실험결과 본 연구의 공구동력계의 고유진동수는 2.35kHz였으며 키슬러 공구동력계의 주절삭력 방향의 고유진동수는 카탈로그 및 충격실험결과 3.5kHz였다. 동적절삭력의 주파수 분석결과 주절삭력 방향의 동적절삭력은 측정시스템의 고유진동수에서 나타나며 그 크기는 동적절삭력의 진폭과 관계가 있으므로 그림에서 보듯이 절삭깊이가 증가할수록 주파수 영역에서도 그 값이 증가한다. 여기서 알 수 있듯이 공구홀더 시스템의 고유진동수와 같은 기계적 특성이 미소 동적절삭력에 지배적인 영향을 미치므로 초정밀가공에서는 그 중요성이 매우 큰 것으로 사료된다.

Fig. 12는 총절삭력을 구한 결과를 비교한 것으로 복합형 공구동력계의 정적절삭력은 거의 DC 성분만 나타났으며 동일한 실험조건에서 키슬러 공구동력계의 총절삭력 역시 저주파수 성분은 거의 DC에서만 나타남을 확인할 수 있다. 일반적인 절삭에서는 이송테이블, 주축스핀들과 같은 시스템 오차와 증절삭깊이, 낮은 절삭속도 등의 절삭조건으로 인하여 저주파수 성분의 절삭력이 나타나지만 절삭속도가 크며 절삭깊이와 이송속도가 작고 주축스핀들의 회전정밀도와 이송테이블의 이송정밀도가 아주 뛰어난 초정밀 가공에서의 절삭력은 저주파수 부근에서는 거의 DC 성분만 나타남을 본 연구의 실험을 통해서 확인할 수 있었다.

4. 결 론

초정밀 선반 가공에서의 미소 절삭력의 동적 성분과 정적 성분을 동시에 측정할 수 있는 복합형 공구동력계를 설계, 제작하고 그 성능을 점검하였다.

(1) 정적절삭력 성분은 원형구멍의 평행보와 이에 부착된 스트레인 게이지로 측정을 하였다.

(2) 동적절삭력은 동적응답 특성이 매우 뛰어나며 경제적인 압전필름형 가속도계를 이용하였으며 동력계의 구조를 모델링함으로 동적절삭력을 구하였다.

(3) 정적절삭력과 동적절삭력을 각각 구하여 별도의

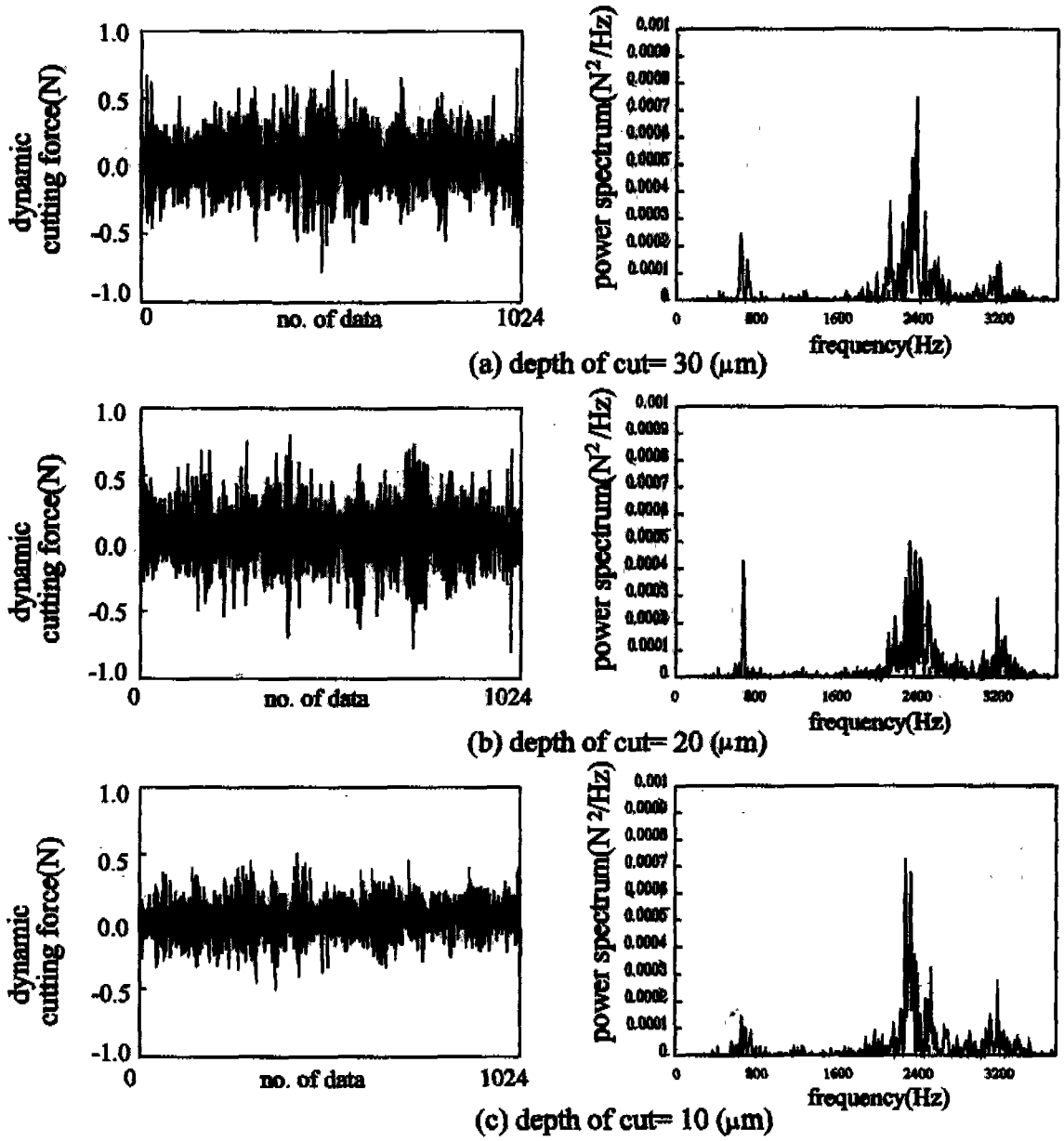


Fig. 10 Dynamic cutting force in time domain and frequency domain of the combined-type tool dynamometer in terms of depth of cut

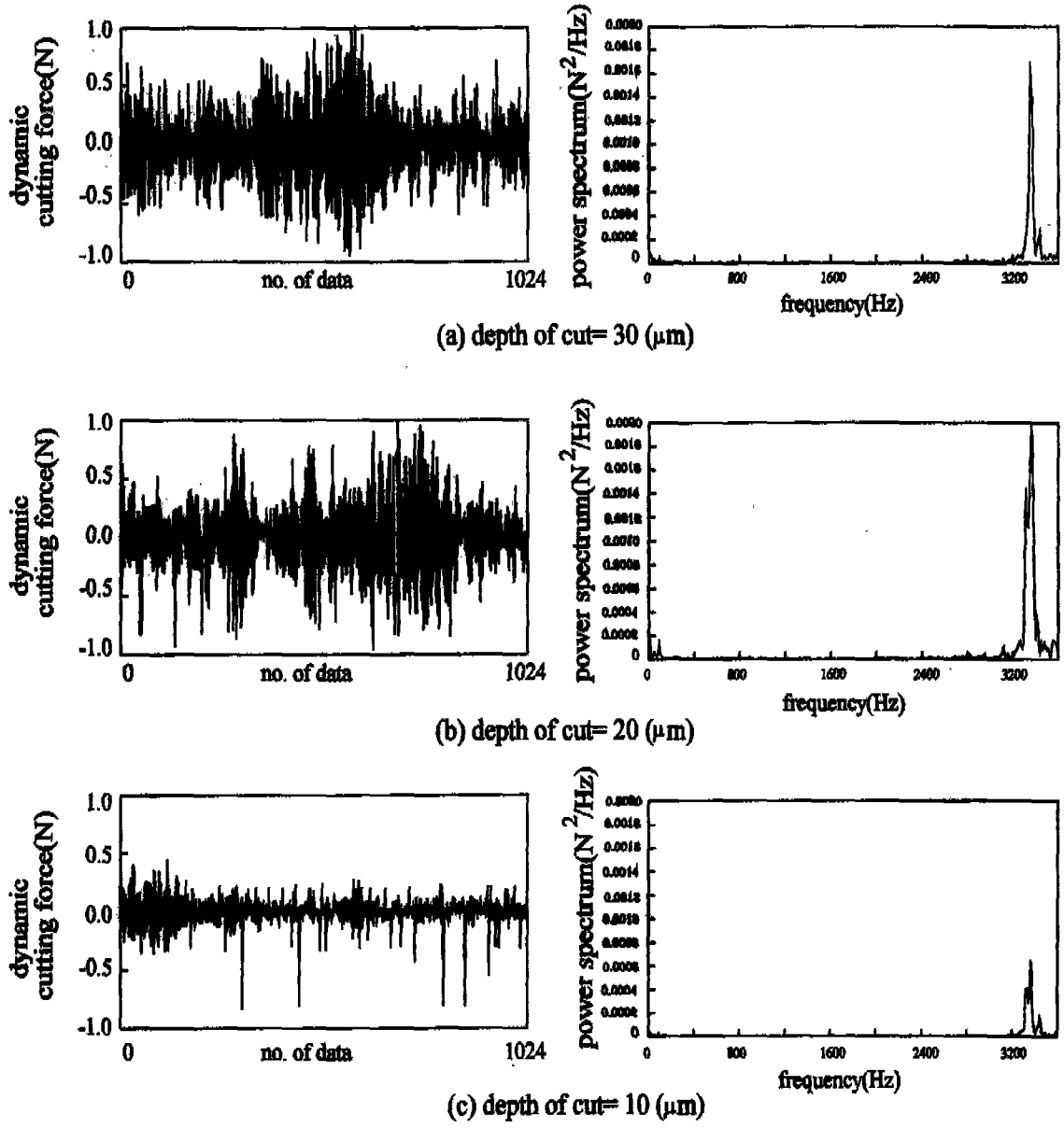


Fig. 11 Dynamic cutting force in time domain and frequency domain of the KISTLER tool dynamometer(9257B) in terms of depth of cut

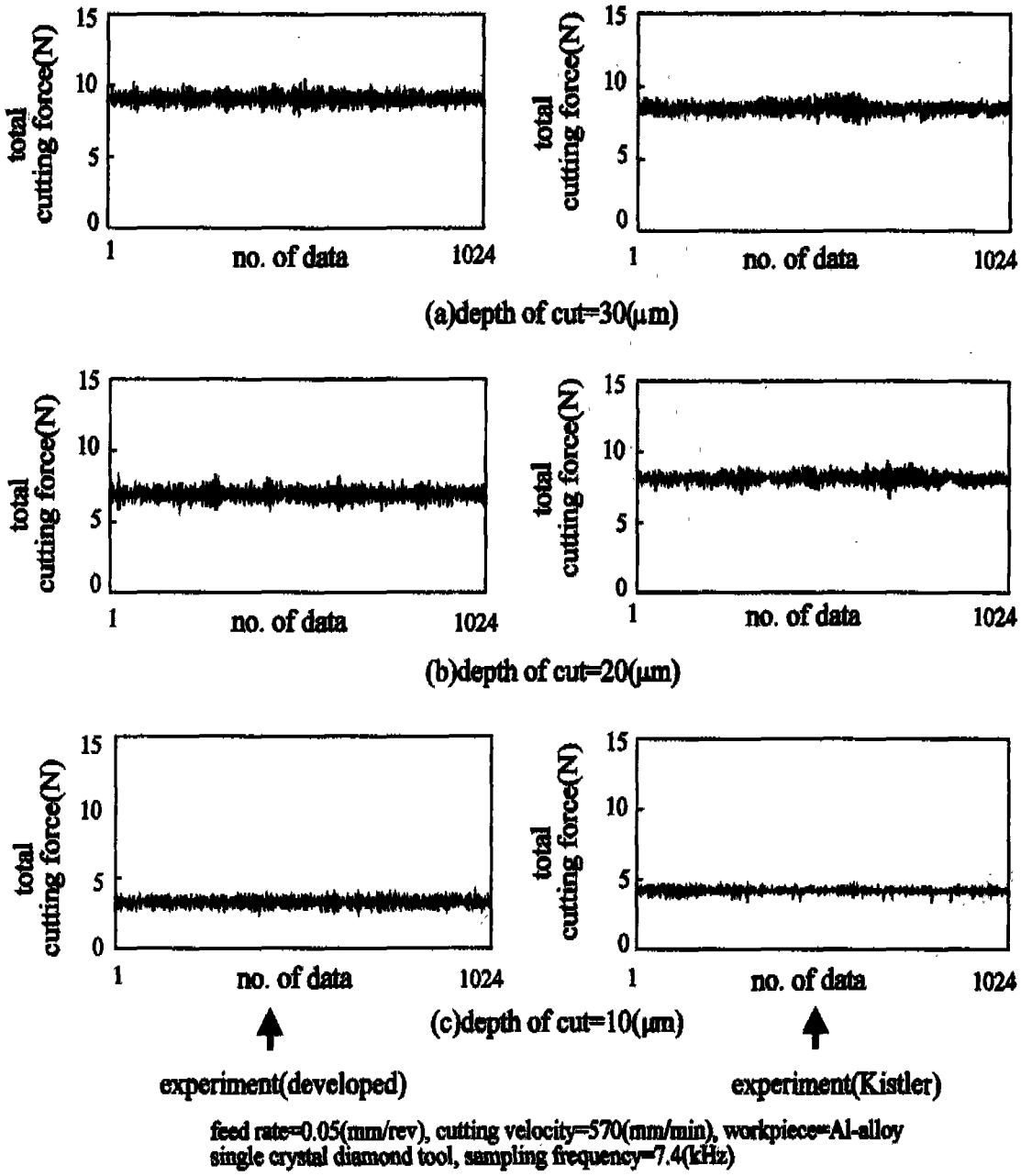


Fig. 12 Total cutting force of the combined-type tool dynamometer and Kistler tool dynamometer(9257B) in terms of depth of cut

신호처리를 수행하므로 노이즈의 제거가 훨씬 용이하고 측정정밀도를 향상시킬 수 있게 되었다.

(4) 정적절삭력과 동적절삭력을 동시에 측정하여 측정한 후 동기시킴으로 총절삭력 신호를 구할 수가 있으며 개발된 복합형 공구동력계를 실험을 통하여 검증하였다.

참고문헌

1. Tani Y., Hatamura Y. and Nagao T., 1983, "Development of Small Three-component Dynamometer for Cutting Force Measurement", Bulletin of the JSME, Vol. 26, No214, April, pp. 650-658
2. Oraby S.E. and Hayhurst D.R., 1990, "High-Capacity Compact Three-component Cutting Force Dynamometer", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, No4, pp. 549-559
3. Hara Y., Motonish S., Yoshida K. and Ikawa N., 1990, "A New Micro-Cutting Device with High Stiffness and Resolution", Annals of the CIRP Vol. 39, pp. 375-378
4. Tsuda N., Kato T. and Sawabe M., 1982, "One Piece Compound Parallel Spring with Reduction Flexure Levers", J. Japan Soc. of Precision Eng. Vol. 48, No. 6, pp. 48-53
5. Paros J.M an Weisbord, 1965, "How to Design Flexure Hinges", Machine Design, Nov., pp. 151-156
6. Shaw M.C., 1984, Metal Cutting Principles, Clarendon Press. Oxford
7. Tse F.S. Morse I.E. and Hinkle R.T., 1978, Mechanical Vibrations, Allyn and Bacon Inc.