

# 고속가공에서 가공성 평가를 위한 3축 공구동력계 개발

강명창\*, 김정석\*\*, 이득우\*\*, 이기용\*\*\*, 김정훈\*\*\*

## Development of 3-Component Tool Dynamometer for Evaluation of Machinability in High Speed Machining

Myeong-Chang Kang\*, Jeong-Suk Kim\*\*, Deuk-Woo Lee\*\*, Ki-Yong Lee\*\*\*, Jeong-Hun Kim\*\*\*

### ABSTRACT

Recently high speed machining is being studied actively to reduce machining time and to improve machining precision. To perform efficient high speed machining, evaluation of high speed machinability must be studied preferentially and it can be identified by investigation of cutting force. To measure cutting forces in high speed machining, dynamometer which has high natural frequency was newly designed using 3-axes piezo force sensor. For newly designed dynamometer, calibration is conducted with sensitivity of force sensor modulated and proper preload and interference force are investigated experimently. Also, cutting force signals of newly designed dynamometer are compared with those of conventional one in high speed cutting experiment and its superiority is confirmed. Then using newly designed dynamometer, high speed machinability is evaluated about cutting force and tool wear in various cutting conditions.

**Key Words** : High Speed Machining(고속가공), Cutting Force(절삭력), End-Mill(엔드밀), Pre-Load (예압), Natural Frequency(고유진동수), Newly-Designed Dynamometer(개발 공구동력계), Machinability(가공성), Interference Force(간섭력)

### 1. 서론

최근 공작기계 강성 및 성능의 향상, 고속절삭용 공구의 발전, 금형 산업의 생산성과 정밀도 향상의 요구로 머시닝센터를 중심으로 고속가공에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재의 고속가공은 알루미늄 합금 등의 소재를 가공시 주축회전수가 100,000rpm 이상의 절삭속도에서 가공이 행해지고 있고, 금형강 등 고경도재에의 적용은 최근에 이루어

어지고 있으나, 연구의 초기단계라 고속단속절삭을 대상으로 한 절삭현상의 메커니즘이 아직 명확히 규명되지 않았다. 이러한 문제점에도 불구하고 고속가공은 고능률, 고정도의 가공을 실현한다는 측면에서 그 효용가치가 매우 높으며 현재 가장 연구가 활발히 진행되고 있는 가공기술 중의 하나이다.<sup>(1~3)</sup>

고속가공을 원활히 수행하기 위해서는 고속가공의 평가기술이 우선적으로 확립되어야 하는데,

\* 부산대 기계공학부

\*\* 부산대 기계공학부/정밀정형 및 금형가공 연구센터

\*\*\* 부산대 대학원

이를 위해 가공현상을 반영하는 센서 계측기술이 요구된다. 그 방안으로는 신호대 잡음비(S/N ratio)가 상대적으로 높은 공구동력계를 통한 절삭력 측정기법이 가장 적합하다.<sup>(4~5)</sup> 그러나, 고속가공시에 주축회전수가 아주 높아지게 되면 올바른 절삭력 신호의 측정을 위해 측정계의 고유진동수가 높아야 할 필요가 있고, 이에 따라 고속가공시의 공진에 의한 진동성분을 제거하고 고응답에서 절삭력의 동적성분이 측정가능한 시스템이 필요하다.<sup>(6~7)</sup> 이러한 측정계로부터 선삭에서의 연속절삭에 의한 정적 성분과는 달리 엔드밀 가공과 같은 단속절삭시의 동적성분은 가공상태에 관한 여러 정보를 내포하고 있을 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 고속가공시 절삭력의 측정을 위해 고주파수 응답 특성을 가진 압전형 힘센서를 이용하여 공구동력계를 새로이 설계, 제작하여 보정을 수행하여 선형성, 재현성을 검토하였다. 또한 기존의 공구동력계와 비교, 평가한 후 이를 통해 금형강의 고속가공시 회전수 및 날당 이송량의 증가에 따른 절삭력 특성을 파악하여 가공성 평가에 이용하고자 한다.

## 2. 고속가공용 공구동력계의 구성

절삭력 측정장치를 구성하기 위해서는 공구동력계가 갖추어야 할 조건이 있는데 이를 열거하면 공구동력계와 절삭력의 출력이 직선관계 및 재현성을 갖출 것, 강성이 크고 고유진동수가 높을 것(측정 대상 최대주파수의 4~5배), 감도가 클 것, 절삭력의 각 분력을 동시에 측정할 때 각 분력의 상호 간섭이 가능한 작을 것, 구조가 간단하고 제작이 용이할 것 등이 있다<sup>(8)</sup>.

고속가공시 높은 주축회전수로 인해 발생하는 절삭력 신호는 매우 고주파가 된다. 예를 들어, 주축회전수가 15,000rpm이고 엔드밀의 날수가 4개인 경우 절삭주파수는  $(15,000/60) \times 4 = 1\text{kHz}$ 이다. 이때 절삭력을 측정하기 위해서는 측정장치의 주파수 특성이 최소한 1kHz에서 안정적이어야 한다. 또한, 절삭력의 동적성분을 측정하기 위해서는 절삭주파수의 3~4배 이상의 주파수 영역에서 안정된 특성을 가지고 있어야 한다.

기존의 동력계의 경우 고유주파수의 1/3까지를 컷-오프 주파수(Cut-off Frequency)로 규정하고 이 이상의 주파수 영역에서는 가진진폭의 10%이상의

오차가 발생됨을 명시하고 있다.<sup>(9)</sup> 따라서 고속절삭시에 신뢰성 있는 절삭력의 신호를 획득하기 위해 원하는 주파수 영역에서 안정된 응답특성을 가지도록 고유진동수가 충분히 높은 공구동력계의 개발이 필요하다.

개발 공구동력계의 개략도는 Fig. 1에 보이고 있다. 공구동력계는 공작물(STD11), 힘센서(Kistler사, 9251A), 베이스(SS400), 예압 볼트 등으로 구성하였다.

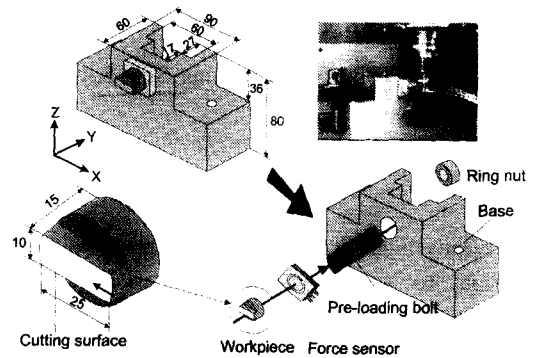


Fig. 1 Schematic diagram of newly-designed dynamometer

기존의 공구동력계에서는 공작물을 부재(Platform)에 설치하므로 진동계의 질량이 증대되어 동력계의 고유진동수가 낮아진다. 이를 보완하기 위해 개발 공구동력계에서는 공작물을 센서에 직접 장착하고, 1자유도진동계의 모델로부터 질량을 최소화시키고 동력계의 고유진동수를 향상하는 방안을 강구하였다. 그리고 강성을 높이기 위해 시편과 센서의 체결력에 따른 예압의 영향을 고려하였으며, 이에 따라 공작물을 센서에 장착할 때 예압을 가하기 쉽도록 베이스 뒤쪽 부분을 개방하였다. 또한, 공작물과 센서가 접촉되는 부분을 연삭가공함으로써 정밀한 표면(Ra 0.15 $\mu\text{m}$ )상태로 유지하여 두 접촉면이 밀착하여 힘의 전달이 용이하도록 구성하였다.

## 3. 개발 공구동력계의 성능평가

### 3.1 고유진동수 특성

기존 및 개발 공구동력계의 응답특성을 결정하는 고유주파수 특성을 알아보기 위하여 실험장치를

구성하였다. 강구를 사용하여 단진자를 제작하고, 이 진자로 충격(Impact)을 가했으며 진자의 길이는 200mm이다. 동력계로부터 발생하는 충격응답은 FFT 분석기(B&K 2034)를 통해 실험하였다. 기존의 동력계는 범용밀링이나 선반의 실험에서 사용되고 있는 9257B Model (Kistler)을 사용하였고, 시편의 무게에 의한 영향을 제거하기 위해 공구동력계에 장착할 수 있는 크기의 최소시편인 72g으로 제작하였다.

Table 1에 측정결과를 나타낸 바와 같이 개발 동력계의 고유진동수는 X축 방향(Feed) 9.12kHz, Y축 방향(Radial) 15.6kHz, Z축 방향(Axial) 9.2kHz이다. 4날 플랫엔드밀로 20,000rpm가공시 절삭주파수는 1.3kHz( $20,000 \times 4/60 = 1.333\text{kHz}$ )이므로 공구동력계는 4.3~10.9배의 고유주파수를 갖게 되어 높은 주축회전수에서 고응답의 절삭력 신호의 획득이 가능하다.

Table 1 Natural frequency of conventional and newly-designed dynamometer

Axis	Convention	New-design
Feed	1.74 kHz	9.12 kHz
Radial	1.42 kHz	15.6 kHz
Axial	2.11 kHz	9.2 kHz

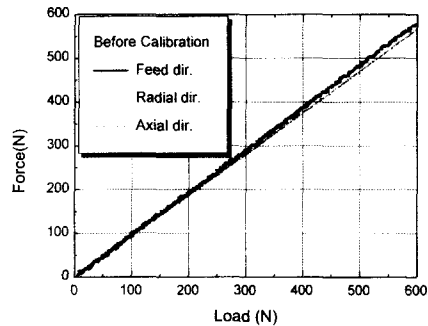
충격 하중하에서 기존 공구동력계의 고유진동수를 측정된 결과는 X축이 1.74kHz, Y축이 1.42kHz, Z축이 2.11kHz이었다. 따라서, 절삭주파수가 1kHz가 되는 가공시에는 공진 현상에 의해 절삭력 신호를 신뢰할 수 없게 되리라고 예상할 수 있다. 참고적으로 9257B Model에 시편의 무게에 의한 영향을 알아보기 위하여 무게 250g의 공작물을 장착하여 주파수를 측정된 결과는 X축 976Hz, Y축 928Hz, Z축 1.13kHz였다. 질량에 의해 고유주파수가 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 개발 동력계의 보정

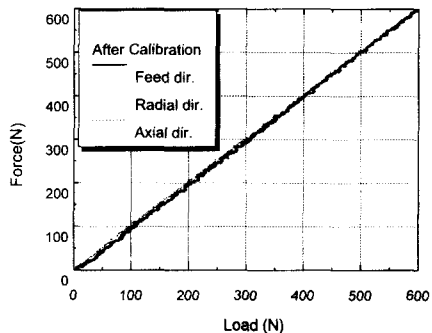
개발 동력계의 보정을 위해 이미 보정되어 있는 기존 동력계(Kistler, 9257B)를 사용하여 가압력을 측정하고 이 때 개발된 동력계로부터의 신호를 측정하여 가압력과 출력되는 신호가 선형성을 보이도록 전하 증폭기의 민감도(Sensitivity)를 조정하였다.

동력계를 보정하기 위해 고속머시닝센터의 테이블 위에 기존 동력계를 장착하고, 그 위에 개발 동력계를 체결하였다. 주축에 환봉(Loading Bar)을 장착하고 공작기계의 이송, 반경, 축방향으로 일정한 이송을 주어 가압함으로써 가압력이 선형적으로 증가하도록 실험장치를 구성하였다.

Fig. 2에 개발 동력계의 보정 결과를 나타내었다. Fig. 2(a)와 같이 힘센서의 민감도를 제작사(Kistler사)에서 제시한 값인 X축 방향 -8.05 pC/N, Y축 방향 -3.88 pC/N, Z축 방향 -8.08 pC/N로 지정하고 실험한 결과, 가압력의 4~5%정도 낮은 출력을 보였다. 출력 오차를 보정하기 위해 민감도를 조정하여 Fig. 2(b)와 같이 가압력과 동력계의 출력이 일치하도록 보정을 행하였고 이때 조정된 민감도는 Table 2와 같다. Fig. 2의 실험 결과는 가압력을 연속적으로 증가시키며 동력계의 출력신호를 획득하였으므로 개발된 동력계의 선형성이 양호함을 알 수 있다. 또한 개발된 동력계의 재현성을 확인하기 위해 4회 반복 실험한 결과 매 회 Fig. 2(b)와 같이 가압력과 출력값이 선형성을 가짐을 알 수 있었다.



(a) Before calibration



(b) After calibration

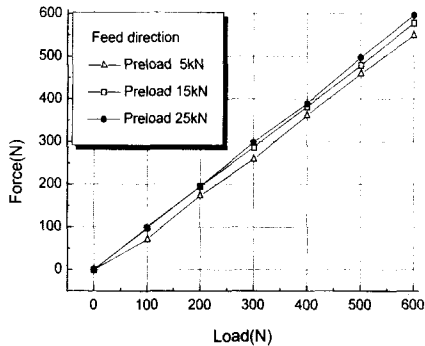
Fig. 2 Calibration results of newly-designed dynamometer

Table 2 Sensitivity calibration of newly-designed dynamometer

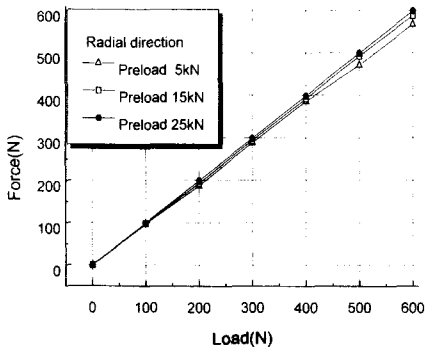
Axis	Before calibration	After calibration
Feed	-8.05 pC/N	-7.68 pC/N
Radial	-3.88 pC/N	-3.68 pC/N
Axial	-8.08 pC/N	-8.01 pC/N

### 3.3 예압에 따른 동력계 출력 특성 및 간섭력

개발 동력계는 시편과 센서의 체결력이 센서에 대한 예압(Pre-load)으로 작용하며 시편을 교환시 일정한 체결력을 유지하는 것이 중요하므로 체결시 예압을 가할 수 있는 토오르크 렌치(Torque Wrench)를 이용하여 예압을 부과하였다. Fig. 3에 예압의 변화에 따른 동력계의 출력을 나타내었는데 사용한 센서의 경우 제작사에서 추천한 표준고정예압(Standard mounting with Preload)이 25kN이고, 실험결과도 예압이 25kN일 때 입력과 출력이 가장 양호한 선형성을 유지하므로 예압을 25kN으로 선정하였다.



(a) Feed direction



(b) Radial direction

Fig. 3 Output of newly-designed dynamometer according to variation of preload

또한, 공구동력계를 사용하여 2분력 이상을 측정할 경우 측정하고자 하는 특정분력에 다른 분력의 모멘트에 의한 힘이 추가되는 현상이 발생하며 이러한 간섭력(Interference Force)은 동력계의 성능을 좌우하는 중요한 인자이다. 개발된 동력계의 간섭력 특성은 0~600N 범위에서 이송, 반경, 축방향으로 일정한 이송을 주어 가압함으로써 각각 다른 방향들의 힘을 측정을 통해 파악한 결과 Fig. 4과 같이 각 분력의 간섭력이 약 1~4%정도로 양호함을 알 수 있다.

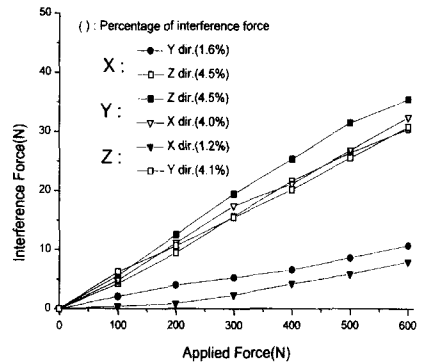


Fig. 4 Interference force according to each applied force of newly-designed dynamometer

### 3.4 기존 공구동력계와의 절삭력 파형 비교

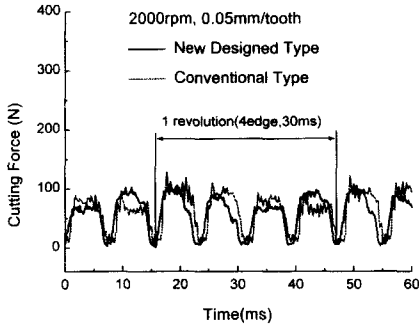
개발된 공구동력계의 성능특성을 평가한 결과 고속가공의 단속절삭에 적용할 수 있다는 것을 확인하였고 실제 고속가공에서 기존의 공구동력계와 개발된 공구 동력계의 절삭력 신호를 측정하여 비교, 평가하였다.

실험조건은 Table 3에서 나타내었고 건식상태에서 측면, 하향절삭을 행하였다.

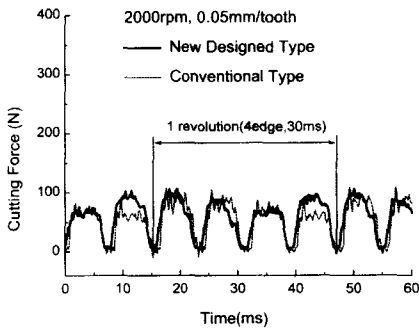
Table 3 Experimental conditions

Tool	Tungsten cabide End mill, ø =10mm, z=4edges
Workpiece	Die material (STD11)
Spindle revolution	2,000~20,000rpm
Feed per tooth	0.05mm/tooth
Axial depth	10mm
Radial depth	0.1mm
Sampling number	100EA/tooth

주축회전수 2,000rpm에서 기존 동력계와 개발 동력계로부터 측정된 절삭력 파형을 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 2,000rpm일 경우 절삭력 신호의 1회전 주기는 30ms( $=1,000\text{ms} \times 60\text{s}/2,000\text{rpm}$ )로 두 동력계 모두 낱당 절삭력 파형의 측정이 가능하며 절삭력의 동적 성분도 잘 나타나 있다.



(a) Feed cutting force

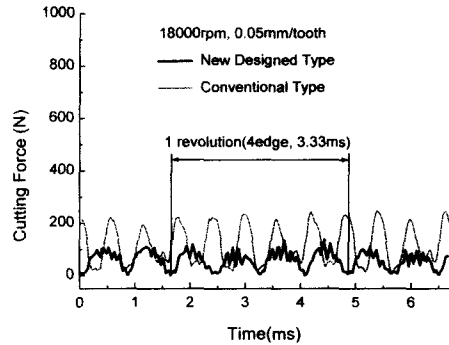


(b) Radial cutting force

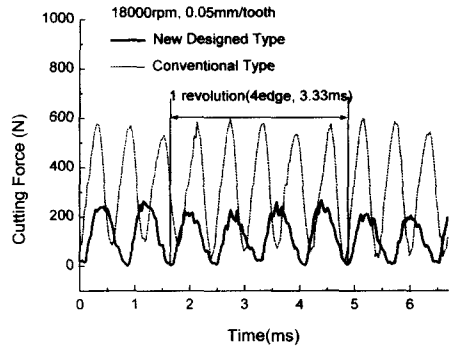
Fig. 5 Comparison of cutting force signals in 2000rpm

Fig. 6은 주축회전수 18,000rpm에서 기존 동력계와 개발 동력계로부터 측정된 절삭력 파형을 비교한 결과이다. 18,000rpm일 경우 절삭력 신호의 1회전 주기는 3.33ms( $=1,000\text{ms} \times 60\text{s}/18,000\text{rpm}$ )로, 절삭주파수가 1.2kHz일 때 올바른 신호이지만 기존 동력계의 경우 절삭력의 주파수가 1.6kHz로서 절삭주파수와는 전혀 다른 파형을 보이고 있으며 그 진폭도 개발된 동력계에 비해 매우 크다. 이는 기존 동력계의 주파수 특성이 1.6kHz에서 매우 불안정하여 절삭주파수 이상의 고주파수 신호(노이즈 또는 공작기계 특성에 의해 발생하는 신호 등)가 공진되어 나타난 것이라고 판단되며 Table 1의 기존동력계 고유진동수가 1.6kHz(X축 : 1.7kHz) 부근이라는

것으로부터 그 근거를 찾을 수 있다. 이로부터 기존 동력계로는 고주파 절삭력을 획득할 수 없고, 개발된 동력계를 사용하여 정확한 절삭력의 측정이 가능함을 알 수 있다.



(a) Feed cutting force



(b) Radial cutting force

Fig. 6 Comparison of cutting force signals in 18000rpm

#### 4. 공구동력계를 이용한 가공성 평가

##### 4.1 실험 방법 및 내용

주축회전수와 낱당이송량의 변화에 따른 절삭력과 공구마멸을 측정하기 위하여 Fig. 7과 같이 실험장치를 구성하였다.

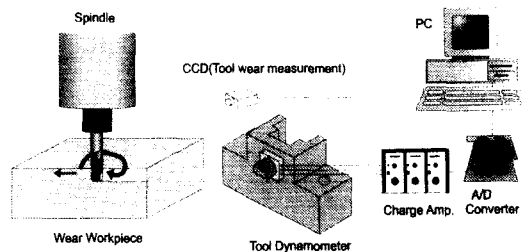


Fig. 7 Experimental set-up

주축회전수 및 날당 이송량에 따른 절삭력 특성을 평가하기 위한 절삭조건은 Table 4와 같다.

Table 4 Cutting conditions

	Spindle revolution (rpm)	Feed per tooth (mm/tooth)	Axial depth (mm)	Radial depth (mm)
Variation of spindle rev.	2,000~20,000 (step 2,000)	0.05	10	0.1
Variation of feed per tooth	10,000 14,000	0.01~0.11	"	"
Tool wear test	10,000 14,000	0.05	"	"

그리고 공구마멸의 진전에 따른 절삭력을 알아보기 위한 실험장치의 구성은 공구마멸용 시편 (100×100×70mm)과 개발된 동력계를 각각 고속가공기 테이블 위에 장착하고, 마멸용 시편을 일정거리 가공후 개발된 동력계를 이용해 절삭력을 측정하였다. 공구마멸은 CCD카메라를 이용하여 공구의 착탈없이, 절삭조건별로 5회(1pass=100mm)와 10회 측면가공 후 공구마멸을 측정하였다.

4.2 실험 결과 및 고찰

절삭력 신호로부터 가공성을 평가하기 위한 파라미터 선정방법은 Fig. 8에 나타내었다. 각 회전주기에 대하여 거의 일정한 절삭력 파형을 가지므로, 2회전주기(8날의 신호)에 대하여 최대값(Max.)과 런아웃(Run-out)을 고려한 각 최대값을 평균한 평균값(Avg.)으로 분석하였다.

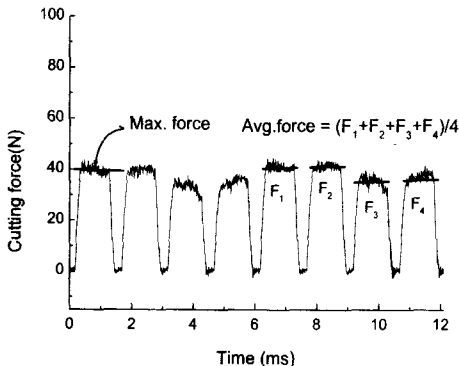


Fig. 8 Definition of average and maximum value for analysis of cutting force signal

이송, 축방향의 절삭력은 절삭속도의 증가에 따라 일정하지만 반경방향의 절삭력은 서서히 증가하는데 이로부터 고속가공에서는 절삭속도의 증가에 따라 법선 방향의 비절삭저항이 증가함을 알 수 있다. 이러한 반경방향 절삭력의 증가는 공구변형을 증대시켜 가공면에 직접적인 영향을 미치므로 고속가공용 공구의 설계나 절삭조건 선정시 중요한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

절삭조건에 따른 절삭력의 영향에 있어서 주축회전수의 증가에 따른 절삭력 경향은 Fig. 9에서 나타내었다.

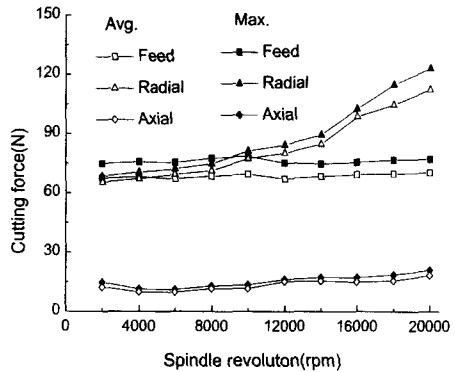


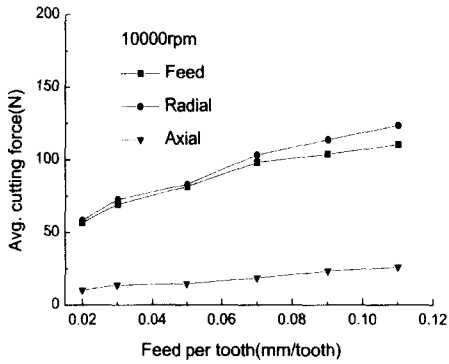
Fig. 9 Characteristics of cutting forces according to spindle revolution

날당 이송량의 증가에 따른 절삭력 변화는 최대값과 평균값이 같은 경향을 보이고 런아웃을 고려한 값인 평균값을 사용하여 Fig. 10에 나타내었다. 주축회전수를 10,000rpm과 14,000rpm으로 일정하게 한 상태에서 날당이송량의 증가에 따른 절삭력 변화를 측정한 결과이다. 날당 이송량이 증가함에 따라 3방향의 절삭력은 모두 증가하는 경향을 보이는데 이는 날당이송량이 증가할수록 날의 절삭량이 증가하기 때문이고 축방향의 절삭력은 측면가공시 엔드밀의 헬릭스각에 의해 미소하게 발생함을 알 수 있다.

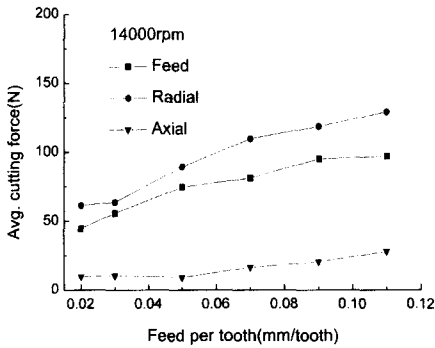
그리고 마멸의 진전에 따른 반경방향의 절삭력의 파형의 변화는 Fig. 11에 나타내었다. 공구마멸이 0.3mm일 때 가공초기에 비해 절삭력의 크기가 6배 정도로 증가했다. 또한, 절삭력 신호의 동적성분의 크기도 증가하는데 이는 마멸로 인해 채터가 발생했기 때문이다.

절삭거리에 따른 공구마멸의 진전과 마멸에 따른 절삭력 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 14,000rpm

일 경우 10,000rpm에 비해 마멸의 진전속도가 3배 정도 빠르며 고속으로 갈수록 공구수명은 매우 짧아질 것으로 예상된다. 마멸이 진전됨에 따라 절삭력은 증가하는 경향을 보이며 특히 마멸이 0.2mm가 넘으면서 절삭력은 급격히 증가하였다. 이러한 절삭력 경향은 공구마멸의 감시에 유용하게 사용될 수 있다.



(a) Variation of feed per tooth in 10,000rpm



(b) Variation of feed per tooth in 14,000rpm

Fig. 10 Characteristics of cutting forces according to feed per tooth

앞으로 이러한 고속가공용 절삭력 측정시스템을 이용하여 고속가공시 공구마멸, 표면거칠기과의 상관관계를 파악하고 센서와 케이블 부분의 실링(Sealing)을 통해 습식절삭시에도 적용하고자 한다. 또한 상대적으로 고가인 고속가공용 공구에 대하여 고속가공시 발생하는 칩핑, 마멸, 파손, 채터진동 등과 같은 이상상태를 절삭력 신호를 이용하여 온라인 공구 이상상태 감시시스템을 구축하고자 한다.

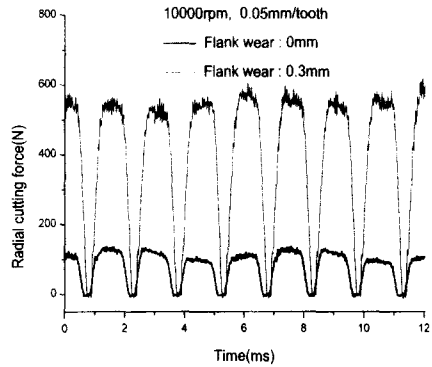
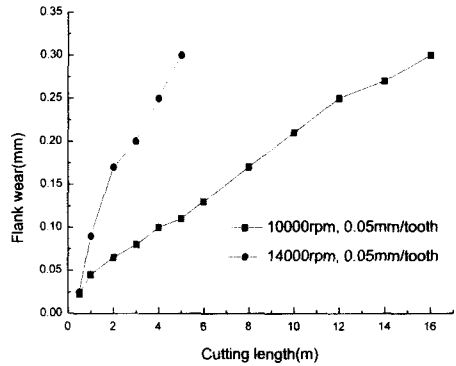
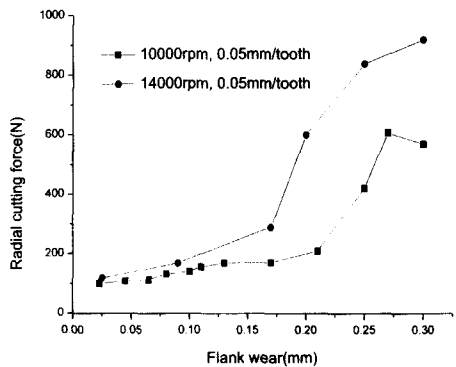


Fig. 11 Cutting force signals according to tool wear



(a) Flank wear according to cutting length



(b) Radial cutting forces according to flank wear

Fig. 12 Progress of tool wear and cutting forces

## 5. 결론

고속가공에서 가공성 평가를 위하여 압전형 힘 센서를 이용한 3축 고속가공용 절삭력 측정 시스템의 개발을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

고속가공시 고주파 절삭력의 신호를 획득할 수 있는 3축 공구동력계를 설계, 제작하였으며 민감도의 적절한 조정을 통한 보정을 행하여 입력값에 대한 출력값의 선형성을 확인하고, 예압의 영향을 고려하여 그 특성을 평가한 후 충분한 재현성을 입증하였다. 개발 동력계를 사용하여 절삭력을 측정할 결과 기존의 동력계로 측정할 수 없었던 고주파 절삭력의 신호 획득이 가능함을 확인하였다. 또한 고속가공시 주축회전수 및 날당 이송량의 증가에 따라 절삭력이 증가함을 알 수 있었고, 공구마멸의 진전에 따라 반경방향의 절삭력은 증가하는 경향을 보인다.

## 후기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기공학 : ME97 - E - 12)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. T. Moriwaki, "High Speed Machining," CIRP, Vol.41, 1992.
2. H. Schut, "High Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology," CIRP, Vol.44, 1995.
3. T. Ikeda, "고속·高精度切削をために 工作機械と狙加工技術," 形技術 세미나, 1995.
4. K. Okuni, "超高速切削加工を可能にする工具材種," 形技術 세미나, 1992.
5. T. Ikeda, "고속切削의 現狀技術動向," 形技術 세미나, 1992.
6. 有本, "工具から見た高速切削の現狀と課題," JSPE, 第 210회講習會, 1994.
7. T.von Karman, P.Duwez, "The Propagation of Plastic Deformation in Solids, J. Appl. Phys.," Vol.21, No.10, 1950.
8. 中島利勝, "機械加工學," コロナ社, pp.25, 1983.
9. Ulrich Schweizer, "Optimizing metal cutting with

multicomponent force measuring systems," pp. 49, Kistler report, 1996.