

# 고속가공을 위한 정면밀링커터 바디시스템 개발

장성민<sup>#</sup>, 맹민재<sup>\*</sup>, 조명우<sup>\*\*</sup>

## Development of Face Milling Cutter Body System for High Speed Machining

Sung-Min Jang<sup>#</sup>, Min-Jae Maeng<sup>\*</sup> and Myeong-Woo Cho<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

In modern manufacturing industries such as the airplane and automobile, aluminum alloys which are remarkable in durability have been utilized effectively. High-speed machining technology for surface roughness quality of workpiece has been applied in these fields. Higher cutting speed and feedrates lead to a reduction of machining time and increase of surface quality. Furthermore, the reduction of time required for polishing or lapping of machined surfaces improves the production rate. Traditional milling process for high speed cutting can be machined with end mill tool. However, such processes are generally cost-expensive and have low material removal rate. Thus, in this paper, face milling cutter which gives high MRR has developed face milling cutter body for the high speed machining of light alloy to overcome the problems. Also vibration experiment to detect natural frequency in free state and frequency characteristics during machining are performed to escape resonance.

**Key Words** : High speed machining(고속가공), Surface quality(표면품질), Milling process (밀링공정), Face milling Cutter body(정면밀링커터바디), Natural frequency(고유주파수), Resonance(공진)

### 1. 서론

절삭가공 분야에서 최근 가장 대두되어지고 있는 것이 바로 고속가공기술(high speed machining technology)이다. 고속가공은 고속 머시닝센터의 급속한 개발과 보급으로 인하여 국내에서도 그 수요가 빠른 속도로 증가되고 있는 추세이다. 금속재료는 절삭가공후 표면품위를 높이기 위해 후가공으로 연삭공정을 적용한다. 고속가공은 이러한 연

삭공정을 생략할 수 있을 정도로 표면품위를 높여 제품의 품질을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 제품 생산에 소요되는 공정시간을 줄일 수 있다. 따라서 생산 원가에도 지대한 영향을 미치는 것이 바로 고속가공 공정이다. 이와 같이 고속가공은 제품의 품질향상에 기여할 뿐만 아니라 공정관리 시스템에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 고속가공을 위해 요구되는 것과 중요하게 분석되는 데이터들이 있으며, 이것을 Fig. 1 에 나타내었다.

접수일: 2004 년 1 월 27 일; 게재승인일: 2004 년 9 월 9 일

<sup>#</sup> 교신저자, 932 부설연구소

Email: [twkjsm@hanmail.net](mailto:twkjsm@hanmail.net) Tel. (032)860-7306

<sup>\*</sup> 동서울대학 기계공학부

<sup>\*\*</sup> 인하대학교 기계공학과

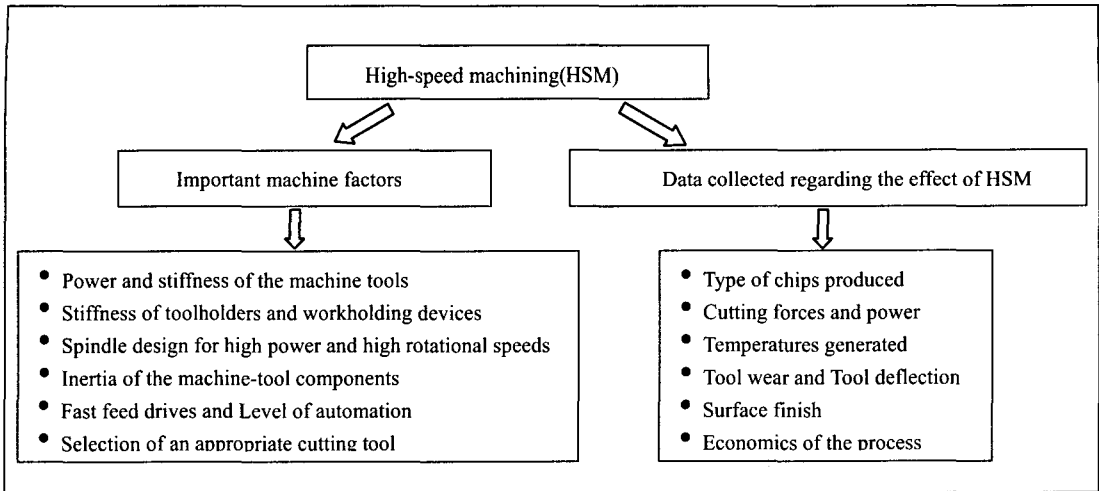


Fig. 1 Schematic diagram of the high speed machining advantages

최근까지 고속가공은 항공기 산업에 사용되는 복잡한 부품을 제조하기 위한 알루미늄 합금의 가공에 이용되어 왔다. 이러한 기술은 절삭공구, 주축대 그리고 콘트롤러의 급속한 발전으로 인해 성공적으로 적용되었다. 최근 들어 절삭공구의 발전에 따라 고속가공은 자동차와 전자제품 등의 넓은 범위의 제품에 사용되는 다이 및 몰드뿐만 아니라 플라스틱 몰드 부분을 제조하기 위한 경합금강을 가공하는 데에도 적용되고 있다.

명확하게 정의되어 있지 않지만, 일반적으로 고속가공이라 함은 rpm 을 높여서 절삭속도를 빠르게 하는 방법으로 설명되고 있으나 상대적인 개념이다. 또한 고속가공의 정의는 가공되어지는 공작물 재료의 형태에 의존된다. 예를 들어, 500m/min 의 절삭속도는 합금강을 절삭하기 위한 고속가공으로 고려되는 반면에 알루미늄 절삭에서는 일반적인 가공으로 고려된다<sup>1</sup>. Choi<sup>2</sup> 등은 CBN 공구를 사용하여 1,800m/min 의 고속정면밀링시 공구마멸에 관한 연구를 수행하였다. Liu<sup>3</sup> 등은 다양한 종류의 공구재질에 대하여 주철과 탄소강을 대상으로 1,100m/min 의 고속밀링에서 공구마멸 메커니즘을 분석하였다. 알루미늄을 대상으로 한 분석에서는 Rao<sup>4</sup> 등이 1,067-1,676m/min 의 절삭속도범위에서 고속 정면밀링실험을 하였다. 고속가공의 일반적인 장점은 칩처리의 우수성, 약 80% 이상의 가공열이 칩을 통해 방출되기 때문에 절삭온도의 저하와 공구수명증대, 높은 생산성에 따른 가공능력

향상과 제품납기의 단축실현, 표면품질 및 표면거칠기 향상과 무연마 정밀금형제작, 절삭저항의 저하를 통한 림구조의 고정도가공, 비철금속의 고속가공은 물론 고경도 금형강 등의 난삭재 가공의 우수성 등이다. 그러나 고속가공은 수직축 공구용 다이내믹 밸런싱 머신을 이용한 검증이 필요하며, 고속회전시 원심력 및 발열로 인한 진동과 소음을 유발시켜 주축의 강성저하와 공작기계 수명감소와 같은 심각한 문제가 발생되기도 한다.

고속가공에 사용되는 밀링공구는 대부분 엔드밀이 사용된다. 엔드밀 공구는 직경이 작아 런아웃에 의한 진동이 적게 걸리나 재료 제거량이 작은 단점이 있어 제품의 생산에 소요되는 시간이 많은 단점을 안고 있다. 이를 극복하고 정면밀링 커터로 고속가공을 실현하기 위해서는 기존의 밀링커터로는 사용할 수 없으므로 밀링커터를 대체할 수 있는 커터바디를 개발해야 한다. 기존의 커터바디무게는 직경 Ø100mm 인 경우 약 2.1kg 으로 10,000rpm 회전시 원심력 및 발열의 발생으로 주축의 진동과 소음을 유발시켜 주축의 강성이 저하되므로 공작기계의 수명단축 등의 심각한 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 고안한 것이 커터바디를 초듀랄루민으로 제작하는 것이다. 초듀랄루민은 가볍고 내식성이 양호할 뿐만 아니라 석출물에 의한 시효경화로 인하여 고강도의 성질을 가지고 있으며 초고속으로 가공하여도 회전관성을 최소화 할 수 있다. 합금

강제열인 커터바디는 비중이 커서 중량이 무겁지만, 개발된 초듀랄루민 커터바디는 직경 Ø80mm 인 경우 600g 정도의 무게와 열전도율이 극히 높기 때문에 열변위를 최소화시킬 수 있다. 현재 미국 마스터밀(MasterMill Co.)사에서 연구 중에 있으나 국내에서는 초고속 가공에 대한 인지도가 낮아 저속가공에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 카트리지 설계 및 커터바디를 초듀랄루민으로 대체함으로써, 1 차적으로 알루미늄 및 경합금 가공을 위한 기반기술로 산업현장에 적용, 추가적인 장비의 설비투자 없이 기존의 CNC 머시닝센터 동작기계를 활용하여 보다 용이하고 경제적으로 연마 없는 평면가공을 실현하고자 하는데 있다. 또한 커터바디의 실용화에 앞서 커터바디의 고유진동수를 평가하여 상품화에 신뢰성을 부여하였다. 결과적으로 본 논문에서 고속가공이 가능한 정면밀링커터 바디의 개발 및 이것을 이용하여 평면가공에 대한 정밀가공기술을 개발함으로써 수입대체 효과를 얻을 뿐만 아니라 국산 절삭공구의 경쟁력과 생산성 향상에 기여하고자 한다.

## 2. 정면밀링커터바디

### 2.1 커터바디제작

CNC 머시닝센터에서 고속가공기술은 빠른 시간에 많은 양의 재료제거량을 얻기 위한 목적과 연삭 등의 지립자를 이용한 가공공정을 생략할 수 있을 만큼의 우수한 표면조도를 얻기 위함이 기본적인 목적이다. 그러나 현재 국내 공구제작업체에서 고속가공을 위한 공구생산기술은 일본, 스웨덴 등의 선진국에 상당히 뒤떨어져 있는 실정이며 그 성능 또한 현장의 엔지니어들에게 신뢰를 주지 못하여 많은 양의 공구를 수입에 의존하고 있다. 따라서 고속가공 전용 공구의 개발을 위한 국내 기술개발이 절실하게 요구되고 있는 실정이다. 현재 국내에서 고속가공을 적용하고 있는 업체의 상당수는 금형을 제작하고 있는 회사로서 대부분 두 날 엔드밀 공구를 사용하고 있다. 엔드밀 공구는 정면밀링커터에 비교하여 상대적으로 그 직경이 작고 높은 MRR(Material Removal Rate)을 얻기 위한 능률이 떨어질 수밖에 없다. 또한 지름에 대한 공구길이의 비가 커서 고속회전으로 인한 진동과 공구변위로 인하여 공구의 파손 및 정밀가공의 어려

움에 직면하곤 한다. 따라서 더 많은 MRR 을 얻기 위해 그리고 공구의 재료 제거능력을 크게 하기 위해 엔드밀 공구가 아닌 정면 밀링커터의 사용이 필요하다. 공구제조업체에서 정면밀링커터의 바디생산에 사용되는 재료로 합금강을 사용하여 디자인하고 생산한다. 또한 충격시에 커터바디의 보호를 위한 내마모성 향상을 위해 표면경도를 높여 사용되고 있다. 그러나 이러한 커터바디는 공구가 갖고 있는 자중과 밸런싱 능력이 떨어져 고속으로 회전하는데 한계가 있으며 무리하게 회전수를 높이면 동작기계 스피들의 변형과 고장의 원인을 일으키거나 과부하로 인하여 가동이 정지될 수 있다. 따라서 CNC 머시닝센터에서 고속회전이 가능한 정면밀링커터 바디의 제작을 위해서는 커터바디의 무게를 감소시키고 밸런싱 능력을 향상시켜야 한다. 따라서 본 논문에서는 무게를 감소시키기 위해 커터 바디를 초듀랄루민(7075-T6)을 사용하여 제작하였다. 가공중에 외력에 대한 저항 능력과 내마모성을 갖도록 하며 내식성 산화피막을 생성시키기 위해 표면경화(H<sub>R</sub>C60)처리를 하였다. 개발된 커터바디의 기하학적 형상은 Table 1 에 나타내었고 커터바디의 제조공정은 Fig. 2 에 나타내었다.

Table 1 Tool geometry and cutting conditions

Cutting conditions	Parameters
Cutter diameter	Ø80mm
Axial rake angle	15°
Radial rake angle	-3°
Approach angle	45°

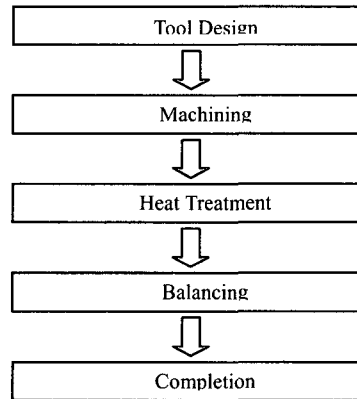


Fig. 2 Manufacturing process of cutter body

## 2.2 밸런싱이론

최근의 공작기계 주축은 가공 능률과 정밀도를 향상시키기 위해 점점 지능화, 고속화 되어가고 있다.

크기에서의 차이는 있겠으나 회전체는 비정상적인 성질을 포함하고 있으며 완전한 구조로 설계, 제작되었다고 하더라도 모든 회전체는 진동을 발생시키는 제어 불가능한 원인들을 가지고 있다. 이러한 원인들이 회전체가 회전하면서 진동을 발생시킨다. 또한 이와 같은 진동이 회전체가 갖고 있는 고유진동수와 일치하게 되면 공진을 유발시키게 된다.

기계의 주축, 펌프, 터보엔진 등 회전력에 의하여 동력을 전달하는 각종 회전기계의 개발 단계, 그리고 운전중에 발생하는 문제점 가운데 회전체의 진동문제가 빈번히 발생한다. 이러한 회전체의 진동원인은 다양하지만 대부분의 경우, 회전체의 불균형으로 인하여 발생한다. 불균형이란 회전체의 회전중심과 무게중심의 불일치를 지칭한다. 불균형은 재질의 불균일, 결함, 가공오차, 마모, 설계상의 불균일 형상 및 진동 모드의 변형 등 다양한 원인으로 부터 발생한다. 이러한 불균형을 수정 보완하여 허용 기준의 이하로 감소시키는 기술을 밸런싱이라 한다<sup>5-7</sup>.

최근 정밀가공의 발달로 공작기계 주축이나 터보 회전기계류는 점점 더 고속화 되고 있다. 고속 회전시 가장 고려해야 할 문제 중 하나는 회전체 시스템에 존재하는 불균형에 의한 진동이다. 불균형에 의한 진동크기는 회전체 속도의 제곱에 비례하므로 고속으로 회전할수록 그 중요성이 커지며 특히 위험속도를 통과할 때의 진동은 상당히 커질 가능성이 있어 회전체의 안정성에 영향을 끼치므로 고속 회전을 불가능하게 한다. 따라서 회전체에 존재하는 불균형을 제거하기 위해 밸런싱 작업을 필요로 한다<sup>8</sup>.

회전기계에서 질량불균형이 존재하는 회전체는 회전속도의 제곱에 비례하는 불균형을 발생시킨다. 이러한 불균형력에 의한 회전체의 진동은 베어링의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라, 공작기계의 주축, 터빈, 분자펌프, 원심분리기 등의 회전기계에서 진동 및 소음 발생의 원인이 된다. 따라서 대부분의 회전기계에 들어가는 회전체는 그의 용도 및 정격 회전속도에 따라 정해진 등급으로 밸런싱을 수행한 후 조립된다<sup>9</sup>.

저속 회전하는 일반적인 정면밀링커터의 경우에 밸런싱문제는 중요시 되지 않거나 또는 무시된다. 그러나 본 논문에서와 같이 고속으로 회전하는 정면밀링커터의 경우 회전수가 상승될수록 발생하는 진동문제는 공작기계 및 제품의 표면품위에 악영향을 끼치게 된다. 따라서 공진문제를 최소화하기 위해, 가진력을 제어하는 방법으로 밸런싱을 해결해야 한다. 회전체의 밸런싱은 사용용도에 따라 베어링의 하중감소, 긴 베어링 수명, 수용 가능한 진동 수준 결정 등 각각 다른 목적을 가진다. 또한 단순 진동계(simple vibrometer)를 사용하여 사용 진동수준은 쉽게 측정될 수 있으며 실험적 모드를 통하여 밸런싱에 대한 각각의 적용에 대하여 잔여 불균형에 대한 수용 가능한 값은 정의될 수 있다. ISO 1940 기준은 심한 불균형을 회피하고, 사용하지 않으며 과도한 작업은 회피하여 허용 가능한 잔여 불균형을 계산한다.

최대 작용속도에 의존하는 각각의 회전체 형태에 대하여 단위질량당 수용 가능한 총 잔여 불균형은 아래 식으로 계산되고 이 값은 동일질량 편심이다.

$$E = \frac{U}{M} \quad (1)$$

여기서 E 는 잔류 질량 불균형값인 질량편심거리( $\mu\text{m}$ ), U 는 언밸런싱( $\text{gr} \cdot \text{mm}$ ), M 은 회전체의 질량(kg)을 나타낸다. ISO 1940 기준에 따르면, 모든 회전하는 축차는 분류에 따라 일정 이상의 밸런싱을 요구하며 밸런싱 품질은 요구되는 밸런싱 정밀도를 정의하는 수로서 아래의 식으로 계산한다.

$$G = \frac{E \cdot \omega}{1000} \quad (2)$$

여기서 G 는 밸런싱 품질등급(mm/s), E 는 편심거리( $\mu\text{m}$ ),  $\omega$  는 각속도(rad/s)이다.

그러나 모든 회전체가 밸런싱으로 가진력에 의한 진동의 가능성을 완전히 사라지게 하는 것은 아니다. ISO 규정에 의하면 밸런싱이 된 후에도 회전체 품질등급에 따라 잔류 질량불균형이 허용된다. 예를 들어 밸런싱 품질 등급이 일반

공작기계류의 경우  $G6.3\text{mm/s}$  이고, 이때 회전속도가  $1,000\text{rpm}$  의 경우에 터보 압축기 회전체의 허용 잔류 질량불균형은 약  $60.16 \mu\text{m}$ 이 되며, 터빈 구동펌프는  $G2.5\text{mm/s}$  로서 적용 회전수가  $5,000\text{rpm}$  일 경우 약  $4.77 \mu\text{m}$ 의 잔류 질량 불균형값이 허용된다. 이러한 잔류 질량불균형에 의한 불균형력은, 정격 회전속도 이하에서 동작할 때는 크게 문제가 되지 않으나, 그 이상의 고속으로 회전하는 경우에는 심각한 회전체의 진동을 발생시켜 회전기계의 성능을 저하시키게 된다.

### 3. 실험 및 방법

#### 3.1 밸런싱실험

본 연구에서 밸런싱 테스트장비(CEMB-VTB15)를 사용하여 커터바디의 밸런싱을 2 단계에 걸쳐 평가하였다. 첫 번째 단계에서는 커터바디의 편심을 검출할 수 있는 회전수를 선정하였다. 실험에 의해 편심량을 측정된 결과 각각 회전체의  $106^\circ$ 에서  $0.04\text{gr}\cdot\text{mm}$ ,  $325^\circ$ 에서  $1.20\text{gr}\cdot\text{mm}$ 의 값이 측정되었다. 두 번째 단계에서는 커터바디의 최대 사용 회전수에 대하여 ISO 에서 기준으로 하는 도표를 사용하여 편심을 비교하였다. 비교조건으로는  $G 1.0\text{mm/s}$  에서 회전수  $15,000\text{rpm}$  을 기준으로 편심량  $E(\mu\text{m}) 0.63$  으로 계산된다. 본 논문에서 평가된 최대편심량  $1.20\text{gr}\cdot\text{mm}$  는 ISO 기준에 의하면  $1.35\text{gr}\cdot\text{mm}$  의 편심량보다 작다. 따라서 개발된 커터바디를 사용하여  $15,000\text{rpm}$  의 고속으로 가공하는 경우에 안전하다.

#### 3.2 진동실험

연구 개발된 밀링커터의 진동특성을 파악하기 위하여 커터바디의 x, y, z 방향 진동을 측정하여 바디시스템의 신뢰성을 검토하였다.

##### 3.2.1 실험장치

밀링커터바디의 진동시험은 고유진동수와 주축 회전수의 변화에 따른 진동특성을 파악하였다. Table 2 는 본 실험에 사용된 진동 실험장치이다.

고유진동수를 측정하기 위하여 커터바디를 자유단 상태에서 x, y, z 축의 진동 가속도센서를 설치하고 휴대용 펄스(portable pulse)를 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 3 은 연구 개발된 커터바디

의 고유진동수 측정을 위한 실험 사진이다.

Table 2 Experimental apparatus

Name	Specification
Impact hammer	B&K 230210
Piezo type accelerometer sensor	B&K 4507 Delta Tran Acc
Portable pulse	B&K 3560C

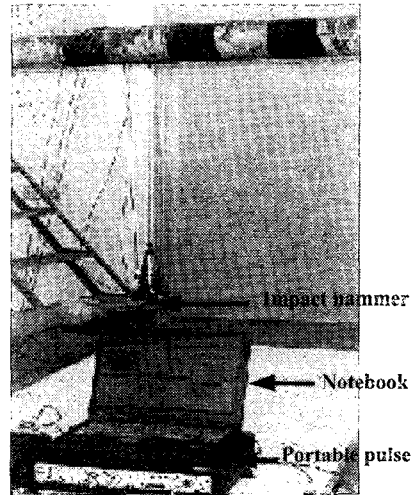


Fig. 3 Modal test

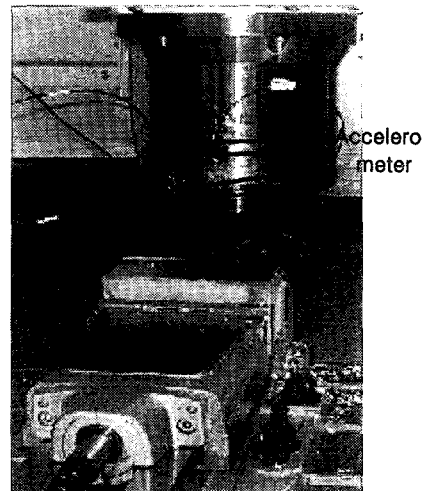


Fig. 4 Vibration test of milling cutter during machining

두 번째 경우에는 주축 회전중의 가공상태에서 진동특성을 파악하였다. 진동실험은 머시닝

센터 주축부에 정면밀링커터 바디를 고정한 후 3 개의 진동 가속도 센서를 주축의 x, y, z 축 바디부에 설치하여 rpm 의 변화에 따라 실시하였다. Fig. 4 는 연구 개발된 커터바디의 진동실험을 위한 가속도센서의 부착위치를 나타낸 사진이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

x, y, z 축 방향에서 진동 가속도 센서에 의해 검출된 샘플링시간(sampling time)을 0.000061sec 로 하여 가속도 응답을 측정하였고 주파수 영역에서 분석하였다. 주파수 응답은 데이터 개수를 1,024 개씩 3 개로 나누어 분석하고 hanning window 를 사용한 후 평균을 취하여 공진특성을 파악하였다. 시스템의 주파수 응답은 시스템의 충격(impulse)응답의 푸리에 변환(fourier transform)에 대응한다. 따라서 주파수 응답과 충격응답은 FFT 를 이용하여 푸리에 변환 또는 푸리에 역변환에 의하여 상관관계가 성립한다. 주축의 회전수 변화에 따른 가공실험에서 주파수 분석을 하였고 RMS 값으로 진폭변화를 분석하였다.

#### 4.1 진동특성

##### 4.1.1 자유단 상태

Fig. 5 는 커터바디의 주파수 영역에서 PSD(power spectrum density)를 나타내고 있다. 머시닝센터에 고정되지 않은 상태, 즉 자유 상태에서의 커터 바디의 고유진동수는 4.528kHz 와 이에 대한 배수 성분을 나타내고 있다.

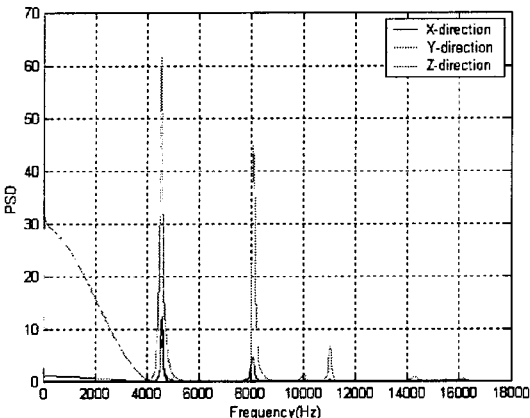


Fig. 5 The response of frequency at free state

##### 4.1.2 가공상태

Fig. 6, 7 과 Fig. 8, 9 그리고 Fig. 10, 11 은 절삭속도가 각각 628m/min, 1,257m/min, 1,885m/min 의 조건으로 CNC 머시닝센터에서의 가공중 x, y, z 축에 대한 진동 가속도를 측정하여 다중 버퍼를 이용, 데이터를 축적한 후 진동신호로써 각 방향에 대한 파워 스펙트럼 밀도와 진폭을 도시한 것이다. 진동가속도 영역에서 주파수를  $\omega$  라 하면 파워 스펙트럼 밀도 S 는 다음 식으로 표현된다<sup>10</sup>.

$$S = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau)e^{-i\omega\tau} \quad (3)$$

여기서  $R(\tau)$  는 시간영역에서 진동가속도 데이터이다.

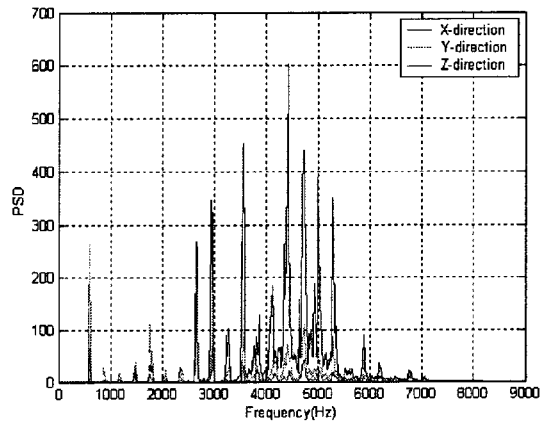


Fig. 6 The response of frequency at 628m/min

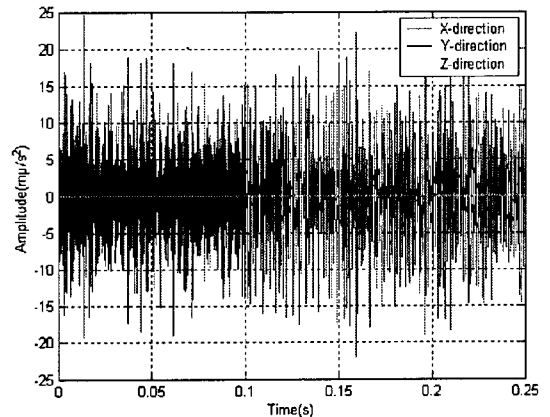


Fig. 7 The response of time at 628m/min

스펙트럼의 영향은 진동가속도 센서의 신호로서 진폭이 크게 나타났는데, 이것은 가공중에 불규칙한 스펙트럼이 복합적으로 작용하여 진폭과 주기가 다소 불규칙적으로 변화하여 복합적인 다수의 조화파의 영향이 작용한 것이다. 진동가속도계에 의한 진폭의 영향은 적용되는 절삭속도가 커질수록 축의 반경방향에서 더 크게 작용하였다. 따라서 실험을 통해서 결국 고속가공에서의 진동은 반경방향에서 문제가 될 수 있음을 알 수 있다. Fig. 7, 9, 11 에서 나타났듯 시간과형에서 진폭의 변화가 절삭속도 증가에 의해 다소 규칙적으로 변화하였는데 이것은 가공중에 영향을 받는 복합적인 현상과 공구의 반경방향으로 나타나는 런아웃의 오차에 영향을 받기 때문으로 판단되며, 결국 속

도의 증가는 런아웃에 크게 영향을 주는 것으로 판단된다<sup>11</sup>. 또한 회전성분에 따른 진동수가 존재하고 공진영역은 약 4.5kHz 부분에서 진폭이 커짐을 알 수 있었다. Fig. 6, 8, 10 은 공진영역으로 기술한 4.5kHz 와는 약간의 차이가 있는데, 이것은 절삭속도의 변화와 함께 변화하는 것으로 주축의 베어링에 의한 진동 등 다른 복합적인 성분의 영향일 것으로 사료된다.

Fig. 12 는 Fig. 7, 9, 11 의 증폭값을 rms 값으로 변환하여 나타낸 것이다. Fig. 12 에서 증폭의 크기는 z 방향으로 거의 영향을 주지 않고 있으며 공구의 반경방향에서 영향이 크게 나타났다. 따라서 x, y 방향 진동성분의 크기가 가공중에 심각한 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다.

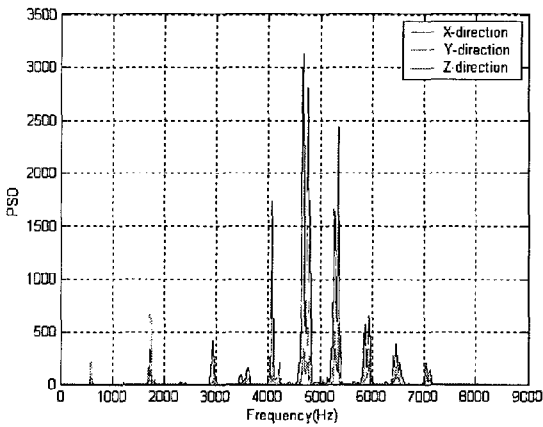


Fig. 8 The response of frequency at 1,257m/min

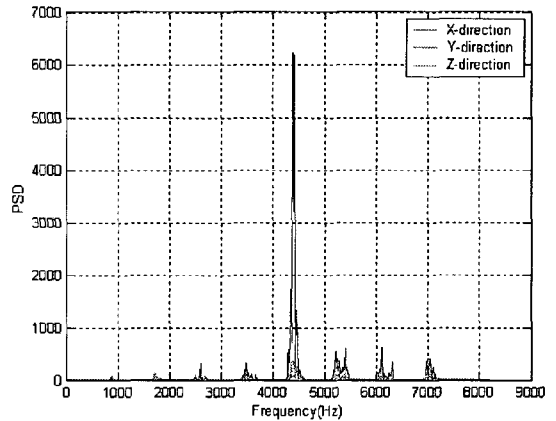


Fig. 10 The response of frequency at 1,885m/min

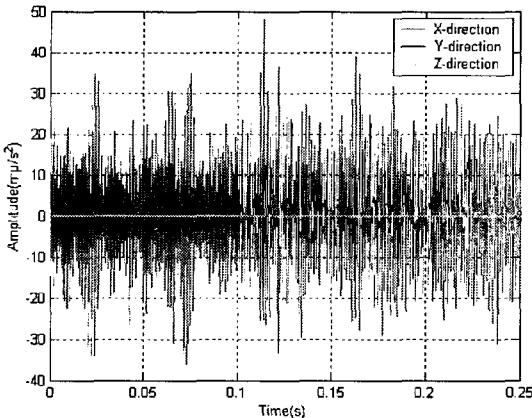


Fig. 9 The response of time at 1,257m/min

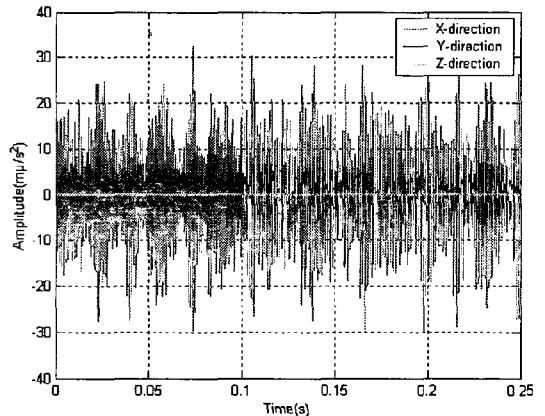


Fig. 11 The response of time at 1,885m/min

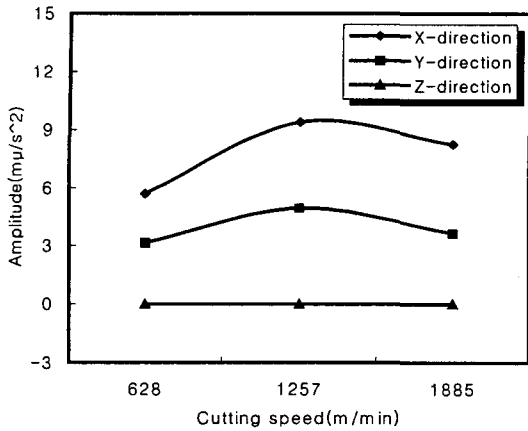


Fig. 12 The rms response of time at cutting speed(m/min)

### 5. 결론

산업현장에서 사용되는 정면밀링커터를 대체하여 고속가공을 수행할 수 있도록 하기 위해 우주항공용 재료로 사용되는 알루미늄합금 등, 경합금을 대상으로 한 고속가공용 정면밀링커터를 개발하였다. 가공중 가진에 의한 영향을 최소화시켜주기 위하여 밸런싱 테스트를 거쳤으며, ISO 규격에 의거하여 G 1.0mm/s 에서 회전수 15,000rpm 을 기준으로 했을 때 본 연구에서 평가된 최대 편심량 1.20gr·mm 는 ISO 기준에 적합하므로 개발된 정면밀링커터는 15,000rpm 의 고속회전으로 가공하는 경우 안전함을 보였다. 또한 개발된 밀링커터를 대상으로 자유단에서 고유주파수를 측정하였고 가공중의 공진영역을 파악하였다. 주축의 회전속도 증가에 따라 진폭의 크기는 x, y 반경방향에서 진동에 영향을 크게 주는 것으로 파악되었다.

### 참고문헌

1. Jung, S. Y., Lee, D. H., Kim, Y. C. and Jei, Y. G., "Experiment on Modal Balancing of a Flexible Rotor Supported on Fluid Film Bearings," KSNVE, Vol. 5, No. 2, pp. 235-246, 1995.
2. Choi, J. S., Goo, J. H. and Park, D. S., " Tool wear in high speed face milling using CNB tool," Proceedings of the KSMTE spring conference 2000, pp. 332-338.

3. Liu, Z. Q., A, X., Zhang, H., Wang, Z. T. and Wan, Y., "Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, pp. 222-226, 2002.
4. Rao, B. and Shin, Y. C., "Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters," International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Vol. 41, pp. 1763-1781, 2001.
5. Vance, J. M., "Rotordynamics of Turbomachinery," John Wiley & Sons, Inc., NewYork., 1988.
6. Darlow, M. S., "Balancing of High-Speed Machinery," Springer-Verlag New York Inc., NewYork., 1989.
7. Parkinson, A. G., "Balancing of Rotating Machinery," Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 205, pp. 53-66, 1991.
8. Kim, J. S., Park, H. K. and Lee, S. H., "A Study on the Active Balancing for High-Speed Rotors(I) : Development of the Active Balancing System," KSPE, Vol. 19, No. 4, pp. 140-146, 2002.
9. Song, S. H., Park, Y. J. and Chung, S. C., "On-line Balancing of a Ultra-high speed Rotor with Residual Unbalance," KSMTE, Vol. 7, No. 1, pp. 51-57, 1998.
10. An, S. O., Lee, E. S. and Noh, S. L., "A Study on the cutting characteristics of glass fiber reinforced plastics with respect to tool materials and geometries," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 68, pp. 60-67, 1997.
11. Park, H. B., Choi, K. H., Lee, D. W. and Kim, J. S., "A Study on the relationship of surface shape and tool runout in the ball-end milling," Proceedings of the KSMTE fall conference 1999, pp. 591-596.