

## 고속가공시 다중센서를 이용한 가공상태 감시 기술

### Monitoring technique of machining condition using multisensor in high-speed machining

김전하\* (부산대 원), 강명창, 김정석(부산대 ERC/NSDM), 나승표, 김기태(화천기공(주))

Jeon Ha Kim(Grauated School, Pusan Nat'l Univ.)

Myeong-Chang Kang, Jeong-Suk Kim(Pusan Nat'l Univ. ERC/NSDM)

Seung-Pyo Na, Gi-Tae Kim(Hwacheon Machinery Co.)

#### Abstract

The high hardened materials that are remarkable in aspects of durability have been used for die and mold industry. As the high hardened materials are hard to machine, the high-speed machining is essential to manufacture these materials. Currently, in the general turning and milling, experiments to the tool wear monitoring have studied, but those have not applied in high-speed machining. In this study, the cutting mechanism was analysed by the cutting force according to cutting conditions, and the parameters to monitor the tool wear were selected from the tendency of the cutting force and acceleration according to cutting length in the high-speed machining of the high hardened materials(STD11).

Key Words : High hardened materials(고경도재),  
High-speed machining(고속가공),  
Cutting force(절삭력), Acceleration(가속도),  
Tool wear(공구마멸), Monitoring(감시),

#### 1. 서 론

현재 부품, 소재산업의 발달로 금형산업은 보다 많은 역할이 강조되고 있다. 완제품의 성능과 수명을 향상시키기 위해서는 개개 부품의 정밀도와 내마모성이 뛰어나야하므로 정밀하고, 강성이 뛰어난 금형이 필수적이다. 특히, 기계, 전자·전기, 항공 등 기간산업에서부터 최첨단 산업에 이르기까지 금형의 수요가 증대되고 있는 실정이다.

이러한 추세에 맞추어 부품 정밀도와 생산성 향상, 금형수명 향상, 금형가공시간 단축을 통해 비용절감과 고객만족을 창출할 수 있을 것이다. 기존의 가공으로는 금형의 연마와 같은 후처리 공정이 필요하고, 고경도재의 가공이 어려웠으나, 상용화된 고속가공기의 출현으로 이러한 문제를 해결하기 위한 연구가 진행중이며, 부분적으로 적용되고 있다.

본 연구에서는 고속가공기에서 합금강 중 금형재료로 많이 사용되는 STD11(냉간 금형재)을 열처리한 고경도재(Hrc 62)를 고강성인 4날 초경합금 엔드밀로 가공하였고, 초기 표면상태를 파악함으로써 피삭재의 가공 불안정영역을 설정하였다. 다양한 가공조건들을 선형적으로 변화시키면서 가공시 절삭력의 변화를 관찰하였으며, 공구마멸 실험을 통해 절삭력, 가속도 신호를 획득함으로써 피삭재의 표면정밀도를 고려한 공구의 상태를 감시하여 조건별 공구수명을 정하고, 감시에 유효한 신호와 파라메타를 선정하였다. 이를 통해 궁극적으로는 실시간 신호획득으로 공구마멸 감시와 적절한 교체시기를 정함으로써 가공상태 감시기술 개발을 목적으로 하였다.<sup>(1~3)</sup>

#### 2. 실험장치 및 가공영역 선정

##### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 고속머시닝센터(Makino V55)는 최대 20,000rpm급이며, 최소 이송분해능은 2 $\mu$ m이고, 최대 이송속도는 50m/min이다. 절삭력은 자체 개발한 3축 공구동력계를 이용하였고, 절삭력과 가속도신호 모두 3kHz의 저역필터링

(Lowpass filtering)하였으며, 데이터 획득은 디지털 오실로스코프를 사용하였다. 실험장치의 개략도와 장비의 사양을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

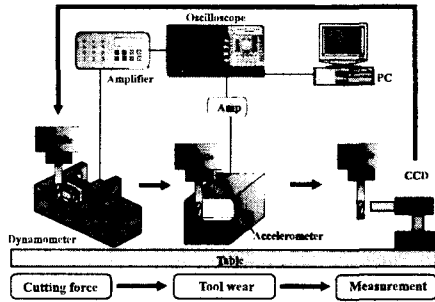


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Instruments and specifications

Instrument	Specification
Machining Center	Max 20,000rpm
Accelerometer	B&K Response Freq.: ~15kHz
Dynamometer	3 axis, Frequency range:5~10kHz
Oscilloscope	4Ch, Max Sampling : 400MHz
CCD camera	PULNIX (×200)

Fig. 2에는 본 실험에 사용된 동일 재종의 공구마멸 시편과 절삭력 측정시편, Table 2에는 공구와 시편의 사양을 나타내었다.

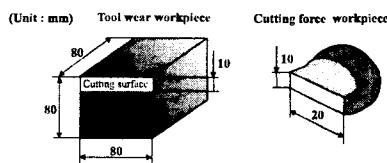


Fig. 2 Types of workpiece

Table 2 Workpiece and tool

Workpiece	STD11 (Hrc 62)
Tool	Korea OSG(4 edge flat endmill)

## 2.2 실험방법

금형강(STD11)은 금형용으로 많이 사용되고, 경도가 높은 반면 끈기가 있기 때문에 절삭날에 용착이 되어 절삭날 마멸 등 트러블(Trouble)이 많은 강종의 하나이다. 이 정도의 고경도 재료를 가공하기 위해서는 코팅된 초경합금공구가

가 최선이고, 진동으로 인한 영향을 줄이기 위하여 4날 플랫엔드밀을 사용하였으며, 굽힘모멘트에 의한 공구휨을 방지하기 위하여 공구인선부위(30mm)만 공구홀더에서 나오도록 고정하였다.

먼저, 피삭재의 공구에 대한 피삭성 실험을 통해 가공 불안정영역을 선정하여, 절삭속도별 적정 가공조건을 선정하였다. 가공조건별 절삭력 실험에서는 동일한 칩제거량이 되는 절입과 이송을 설정하여 이때의 절삭력을 관찰하였고, 다음으로, 절입, 날당이송, 주축회전수 세가지 조건들을 변화시키면서 절삭력의 변화를 관찰하고, 그 원인에 대해 분석하였다. 마지막으로 공구마멸 실험은 Fig. 1과 같이 절삭력 → 공구마멸(가공) : 가속도 → 공구마멸 측정 → 절삭력의 순서로 반복하면서 공구수명이 다한 후, 얻어진 절삭력, 가속도, 공구마멸, 공구마멸 형상 데이터들을 분석하여 감시 파라메타를 선정하고, 공구마멸 메커니즘을 파악하였다.

고속가공기 테이블 상에서 직접 공구마멸을 측정함으로써 공구의 탈착에 따른 오차를 줄일 수 있었으며, 측정시에는 조명이 중요하며, 헬릭스(Helix)각 때문에 회전을 하면 기준이 되는 외주 여유면(Flank face) 경계선이 변하면서 측정오차가 발생하는 데 이는 PC화면상에 기준이 되는 선을 부착하여 측정오차를 없앨 수 있었다. 플랫엔드밀에 의한 측면가공이 목적이므로 날의 코너(Corner)부위 마멸은 무시하였다. Fig. 3에는 공구 형상과 여유면 공구마멸 측정부위를 나타내었다.

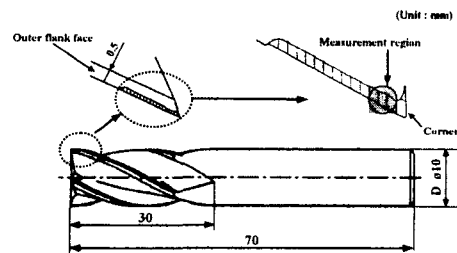


Fig. 3 Tool shape and tool wear measurement

## 2.3 가공영역 선정

본 실험에 사용한 공작물인 고경도재가 안정되게 가공이 되는 영역을 설정하기 위하여 초기 절삭속도 8,000rpm, 절입 0.1mm, 날당이송 0.1mm로 가공을 하였으나, 과도한 열과 함께 표면에 탄

흔적이 발생하여, 절삭속도별로 적정 가공조건을 선정하기 위하여 절입과 날당이송을 0.01mm씩 줄이면서 가공의 불안정영역을 실험을 통해 정하였다. 실험에 의하면 절입깊이와 이송의 증가에 따라 칩핑(Chipping)에 의한 불안정영역은 증가하게 되는 데, 회전속도에 따른 불안정영역은 Fig. 4에 보이는 바와 같다. 즉, 회전속도 증가에 따라 가공할 수 있는 안정영역이 감소하게 된다.

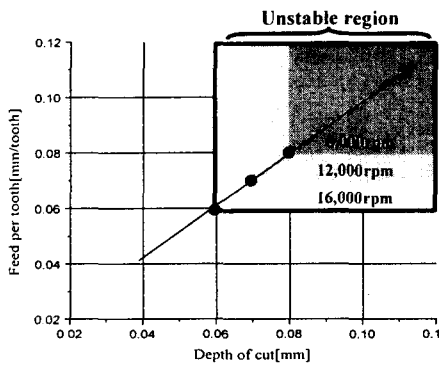


Fig. 4 Selection of unstable region

### 3. 분석 및 고찰

#### 3.1 가공조건별 절삭력 특성

조건별 절삭력 실험을 통해서 가공조건이 변함에 따라 절삭력의 경향을 분석함으로써 단속 절삭에서의 절삭메커니즘과 현상을 규명하고자 하였다. 축방향 절입은 모든 실험에서 10mm로 하였기 때문에 본 논문에서 언급하는 절입은 반경방향 절입이고, 이송은 날당이송을 의미한다. 에어(Air)를 뿜어 부분냉각과 칩배출을 용이하게 하였다. 절삭력신호는 20kHz로 샘플링하고, 0.5초 동안 신호를 획득하여, 10회전의 신호를 추출하여 분석하였다. 비절삭구간의 데이터를 제외한 신호만을 평균하기 위하여 설정값은 12N으로 하여 그 이상의 데이터만 이용하였으며 조건마다 시편의 2/3위치에서 신호가 획득되도록 시간지연을 두고 트리거링(Triggering)하였다. 조건별 절삭력실험에서 공구마멸이 절삭력에 미치는 정도를 파악하기 위하여 10,000rpm, 절입 0.05mm, 이송 0.05mm로 절삭력 시편에 대해 8패스(Pass) 가공한 결과 반경방향 절삭력은 8N, 이송방향 절삭력은 0.8N정도의 증가를 보였다. 따라서, 조건별

절삭력 경향을 파악하는 데 공구마멸이 절삭력에 미치는 영향은 무시할 수 있는 정도이다. 각 조건별 실험에 사용된 가공조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Cutting conditions for cutting force measurement

Experiment	$F_t$ (mm)	$D_a$ (mm)	$D_r$ (mm)	$S_s$ (rpm)
$F_t + D_r = 0.1$ mm	0.02~0.08 Step 0.01	10	0.02~0.08 Step 0.01	10,000
$F_t$ variation	0.02~0.08 Step 0.01	10	0.05	10,000
$D_r$ variation	0.05	10	0.02~0.08 Step 0.01	10,000
$S_s$ variation	0.05	10	0.05	4,000~18,000 Step 2,000

$F_t$  : Feed per tooth,  $D_r$  : Radial depth  
 $D_a$  : Axial depth,  $S_s$  : Spindle speed

이송을 증가시키고 절입은 감소시키면서 절입과 이송의 합을 0.1mm로 유지하게 하여 실험을 수행한 결과 Fig. 5와 같은 경향을 나타내었다.

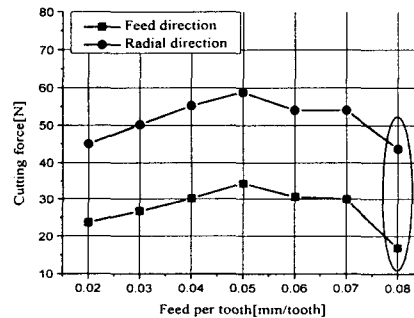


Fig. 5 Cutting force variation

절입과 이송이 동일한 지점을 정점으로 증가하다 감소하는 경향을 나타내며, 가공효율면에서는 절입과 이송이 동일한 조건이 가장 유리하지만, 절삭력이 가장 크게 작용함을 알 수 있다. 그리고, 이론적으로 동일한 체적에 대한 가공시간이 동일해야 하지만, 이송이 빠르고, 절입이 적을 때 절삭력이 낮은 현상으로부터 이송은 빠르고, 절입은 적어야 한다는 정삭개념의 고속가공 취지에 잘 부합됨을 알 수 있다.

절입은 고정시키고, 이송을 변경시켰을 경우에는 Fig. 6와 같이 이송방향과 반경방향의 절삭력이 모두 증가하며, 이는 이송이 증가함에 따라 칩제거량에 비례하여 비절삭저항이 커지고, 주축 이송계의 진동이 커지기 때문으로 생각된다.

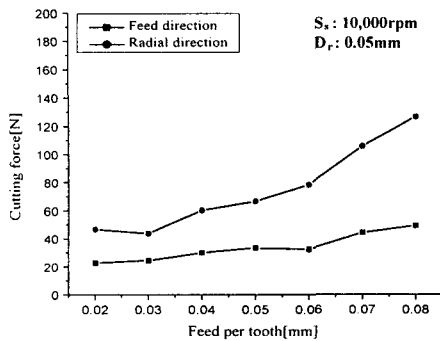


Fig. 6 Characteristics of cutting forces according to feed per tooth

Fig. 7과 같이 이송을 고정시키고, 절입을 변화시킨 경우도 절입을 고정시켰을 때와 유사한 경향을 보이며, 그 원인도 절입이 증가함에 따라 비절삭저항과 공구처짐이 커지기 때문이다.

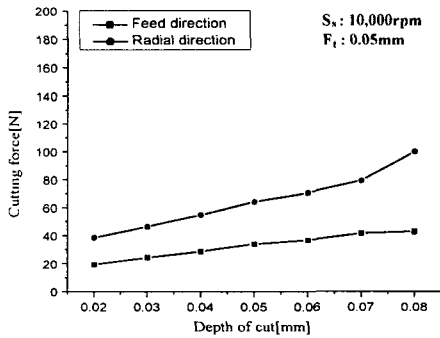


Fig. 7 Characteristics of cutting forces according to depth of cut

절입과 이송을 고정시키고, 주축회전수를 증가시키면서 고속에서도 안정된 고주파 절삭력 획득이 가능하다는 것을 Fig. 8에 나타내었다. 고속 가공의 현상을 규명하기 위해서는 고주파 날당신호의 획득이 반드시 필요하다.

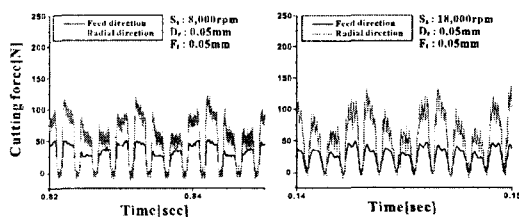


Fig. 8 Cutting force waveform

주축회전수가 증가함에 따라 Fig. 9와 같이 절삭력이 거의 일정함을 알 수 있었다. 이론적으로 볼 때 회전수에 관계없이 절입과 이송이 일정하면, 가공시간만 달라질 뿐 비절삭저항은 일정하므로, 실험이 잘 일치하고 있다. 이는 다른 절입과 이송 변경시에 발생하는 주축 이송계와 절입에 따른 비절삭저항의 증가가 일어나지 않기 때문으로 생각된다.

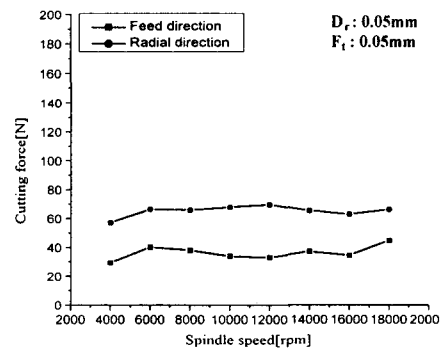


Fig. 9 Characteristics of cutting forces according to spindle speed

### 3.2 공구마멸 실험 및 다중신호 분석

#### 3.2.1 공구마멸 패턴

초기의 이송, 절입, 주축회전수 변동에 따른 절삭메커니즘을 파악하였고, 가공중 절삭메커니즘 파악과 공구마멸 감시를 위하여 주축회전수와 이송변화에 따른 공구마멸 패턴을 분석하고, 마멸진전에 따른 절삭력, 가속도 신호를 분석하였다. 경도가 큰 재료이므로 절입과 이송의 적은 변화에도 공구와 공작물에 변화가 상당히 크고, 절입에 따른 경향이 더 클 것으로 예상되어, 절입은 고정시키고, 이송을 0.01mm씩 3단계와 주축회전수를 3단계로 나누어 실험하였다. 공구마멸 실험에 사용된 가공조건은 Table 4와 같다.

Table 4 Cutting conditions for wear test

Experiment	$S_s$ (rpm)	$D_r$ (mm)	$F_t$ (mm)
$S_s$ variation	8,000	0.06	0.05
	12,000		
	16,000		
$F_t$ variation	12,000	0.06	0.04
			0.05
			0.06

Fig. 10에는 절삭거리에 따른 주축회전수별 특성, 그리고, Fig. 11에는 절삭거리에 따른 이송별 공구마멸의 경향을 나타내었다.

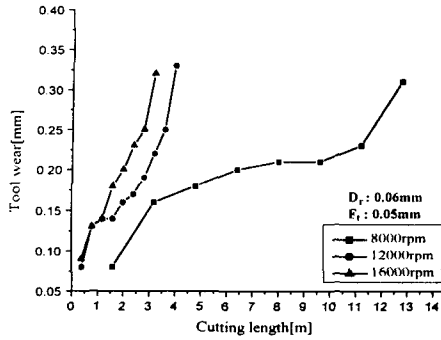


Fig. 10 Tool wear according to spindle speed

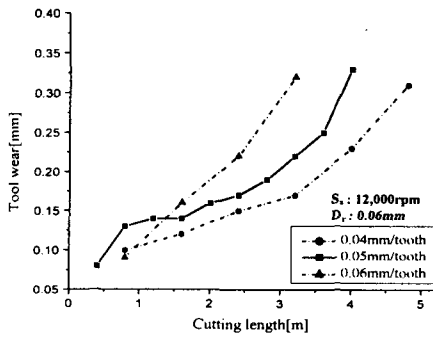


Fig. 11 Tool wear according to feed

회전수 8,000rpm이 2배인 16,000rpm에 비해 5배정도 공구수명이 길고, 고속일수록 공구수명이 짧아짐을 알 수 있다. 마멸은 증가→안정→급격한 증가의 패턴을 보인다. 이송이 0.01mm씩 증가함에 따라 공구수명도 비례적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서, 공구수명이 고속일수록 절입과 이송을 낮추어서 가공효율은 뛰어나면서 8,000rpm에 상응하는 공구수명이 존재하는 조건의 선정이 필요하고, 존재함을 알 수 있다.

### 3.2.2 공구마멸 형상

절삭속도별 절삭거리에 따른 공구마멸의 형상을 Fig. 12에 나타내었다. 각 주축회전수별로 초기→중기→말기(공구수명)까지 3단계의 마멸형상만 나타내었으며, 초기 안정적이다가 용착과 함께 칩핑이 발생했으며, 공구마멸이 0.2mm 이상이

되면 급격하게 마멸이 진전됨을 알 수 있었다.

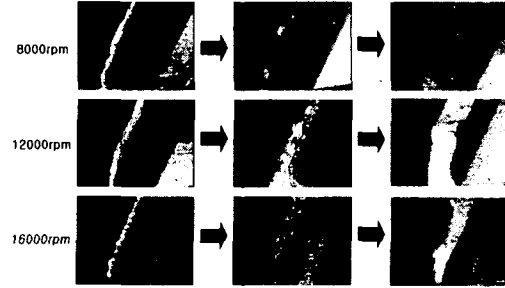


Fig. 12 Progress of tool wear

### 3.2.3 공구마멸과 절삭력

절삭력 데이터 획득은 조건별 실험에서의 동일하지만, 마멸의 진전에 따른 경향을 보다 크게 하기 위하여 설정값을 추출데이터의 절대평균으로 변동시키면서 절삭력을 구하였다. 공구마멸의 진전과 함께 주축회전수 변화에 따른 경향을 Fig. 13, 이송변화에 따른 이송과 반경방향 절삭력 경향을 Fig. 14에 나타내었다.

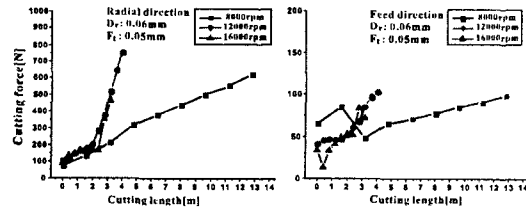


Fig. 13 Cutting forces according to cutting length( $S_s$  variation)

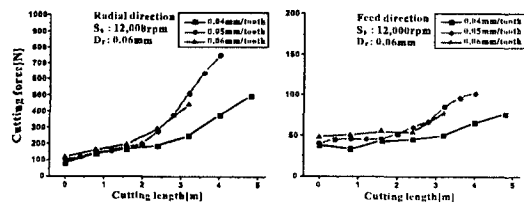


Fig. 14 Cutting forces according to cutting length( $F_t$  variation)

결과와 같이, 이송방향의 절삭력은 변화가 거의 미미하지만, 반경방향의 절삭력 경향은 보다 뚜렷함을 알 수 있다. 이는 공구가 이송하는

방향으로 계속적으로 치진 상태로 진행하므로 이송방향 절삭력은 구속된 상태에서 칩핑의 영향에 의해 증가하는 가운데 변동이 있지만, 반경방향 절삭력은 공구마멸이 진행함에 따라 인선이 무디어짐에 따라 마찰에 의한 힘이 더 크게 발생하고, 공구강성의 약화로 인한 진동이 반경방향으로 발생하기 때문에 증가하는 경향이 뚜렷하다. 따라서, 공구마멸 감시에는 반경방향 절삭력이 유효함을 알 수 있다.

### 3.2.4 공구마멸과 가속도

주축 하우징의 Y축방향으로 발생하는 가속도 신호의 원신호와 푸리에변환(FFT)에 의해 회전주파수와 날당주파수의 추출방법을 Fig. 15에 나타내었다.

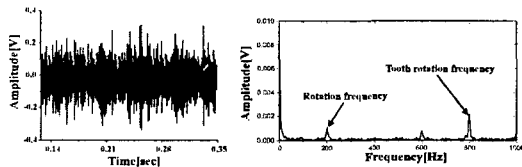


Fig. 15 Transformation of accelerometer signal

공구마멸의 진전에 따른 가속도 원신호의 절대값의 평균은 Fig. 16, 날당 회전주파수의 진폭을 Fig. 17에 나타내었다.

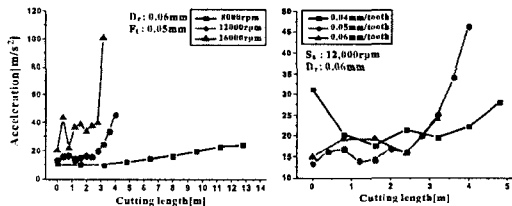


Fig. 16 Acceleration according to cutting length

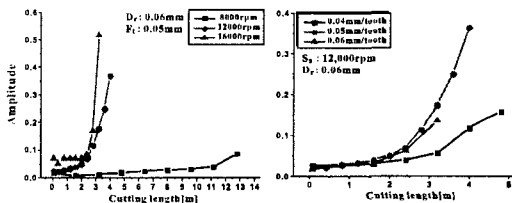


Fig. 17 Acceleration in tooth rotation frequency according to cutting length

가속도 원신호의 절대평균 경향은 기계의 노화과정과 유사하며, 이는 공구마멸이 주축의 진동에 영향을 미치며, 무부하시 경향은 보다 시간이 걸리겠지만, 공구마멸에 의한 부하의 증가로 진동이 급격하게 증가하고 있다. 날당 회전주파수는 주축회전수와 이송의 증가에 따라 초기에는 안정적이다가 급격하게 증가하고 있다. 따라서, 날당 회전주파수에서의 진폭이 공구마멸 감시에 보다 유효하다.

### 4. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 특정 공구와 공작물 사이에는 가공 안정영역이 존재하며, 고속가공성 평가에 유용한 자료로 활용할 수 있다.
- 2) 절입, 이송, 주축회전수별 절삭력 경향으로부터 초기 절삭메커니즘의 분석이 가능하다.
- 3) 고속가공시의 공구마멸을 감시하기 위해 유효한 파라메타로서는 반경방향 절삭력과 가속도 신호의 날당 주파수의 진폭값임을 파악하였다.

### 후 기

본 연구는 2000년도 산업자원부의 중기거점과제의 일환으로 화천기공(주) 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1]. K. F. Martin, "A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools", MTM, Vol. 34, No. 4, pp. 527-551, 1994
- [2]. Di Yan, T. I. El-wardany, M. A. Elbestawi, "A multi-sensor strategy for tool failure detection in milling", MTM, Vol. 35, No. 3, pp. 383-398, 1995
- [3]. John T. Roth, Sudhakar M. Pandit, "Early prediction of impending endmilling tool failure using acceleration signals", Transactions of NAMRI/SME, Vol. 26, pp. 243-248, 1998