

# 음향주파수 분석에 의한 엔드밀의 마모상태 추정에 관한 연구

## A study on the Wear Estimation of End Mill Using Sound Frequency Analysis

조택동\*, 이창희\*\*, 손장영\*\*\*  
(Taik Dong Cho\*, Chang hee Lee\*\*, Jang Young Sohn\*\*\*)

\*충남대학교 기계설계공학과, \*\*대전기능대학 메카트로닉스과,  
\*\*\*충남대학교 대학원 시스템제어실협실

Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University

### Abstract

The wear process of end mill is a so complicated process that a more reliable technique is required for the monitoring and controlling the tool life and its performance. This research presents a new tool wear monitoring method based on the sound signal generated on the machining. The experiment carried out continuous-side-milling for 4 cases using the high-speed steel slot drill under wet condition. The sound pressure was measured at 0.5m from the cutting zone by a dynamic microphone, and was analyzed at frequency domain. The tooth passing frequency appears as a harmonics form, and end mill wear is related with the first harmonic. It can be concluded from the result that the tool wear is correlate with the intensity of the measured sound at tooth passing frequency estimation of end mill wear using sound is possible through frequency analysis at tooth passing frequency under the given circumstances.

### 1. 서론

절삭 가공 중 필연적으로 발생하는 공구 마모의 감지는 공장자동화 및 무인화를 실현하기 위해서 선결되어야 할 핵심 문제임에도 불구하고 아직도 사실상 온라인 감시가 어려운 실정이다. 이는 절삭 가공 중에 공구상태가 여러 가지 절삭 조건들에 따라 다양하면서도 불규칙적인 반응을 보일 뿐만 아니라 칩 및 절삭유 등 여러 가지 요인으로 인해서 센서의 장착과 그 적용이 어려운 환경에서 대부분의 작업이 이루어지기 때문이다<sup>(1)</sup>.

소리는 진동과 밀접한 관련이 있다. 왜냐하면 소리가 발생하는 원인에는 여러 가지가 있으나, 결과적으로 매질(공기)의 진동에 의하여 소리가 발생하는 것이기 때문이다<sup>(2)</sup>.

본 연구의 목적은 머시닝센터를 이용한 엔드밀링 절삭가공 중에 발생하는 음향신호를 퍼스널 컴퓨터에 장착되어 있는 사운드 카드를 통해서 받아들여, 그 주파

수 분석을 함으로써, 엔드밀의 마모 상태를 추정하는 것이다.

### 2. 엔드밀의 마모

#### 2.1 엔드밀의 마모에 영향을 미치는 인자들

엔드밀은 단면과 원주 방향에 절인이 있으며, 측면, 평면, 홈 절삭에 사용되는 공구이다<sup>(3)</sup>. 공구방향 절삭 깊이와 반경방향 절삭 깊이의 비로 측면과 평면 절삭으로 구분이 되고, 공작물의 이송 방향에 따라 상향식과 하향식 절삭으로 나눌 수 있다. 또한 절삭유의 사용 유무에 따라서 건식과 습식 절삭으로 나눌 수 있다. 엔드밀의 마모에 영향을 미치는 인자들은 일반적으로 절삭 조건(절삭속도, 이송률, 절삭 깊이 등), 공작물의 재질(경도, 물성치 등), 공구(재질, helix angle 등)와 작업 방법 등의 복합적인 영향을 받는다<sup>(4)</sup>.

#### 2.2 마모 기준

ISO규정<sup>(5)</sup>에서 flank 마모는 날 끝부분에서 수직거리를 마모량으로 표시한다. 본 실험에서는 공구를 재연삭하거나 교체해야하는 마모의 기준으로 엔드밀 제조회사 기준으로 일반 절삭 가공을 할 경우인 flank 마모(VB1)가 0.2-0.4mm가 될 때를 기준으로 하였다. 그러나 사실상 flank 마모의 형상을 공구 현미경으로 측정할 때에 VB1, VB2, VB3으로 나누어 규정하기는 쉬운 일이 아니며, 마모량은 길이 방향으로 높이에 따라서 불규칙하게 나타나게 된다. 그래서 ISO규정집에는 일정 구간별로 측정을 하여 그 평균값으로 flank 마모량을 정의하고 있다. 따라서 날을 Fig. 1과 같이 밀 날부터 3mm 간격으로 마모량을 측정하였으며, 측정된 값의 두 날의 평균으로 마모 기준을 삼았다. 엔드밀 형상은 날이 helix 각을 갖는 비틀림 날로 되어 있다. 본 논문에 사용된 엔드밀은 모두 helix 각이 30°이다. 따라서 공구 현미경으로 측정하는 거리는 ISO규정 flank wear와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$VB1=VB1' \times \cos 30^\circ$$

여기서, VB1 : ISO rule of flank wear

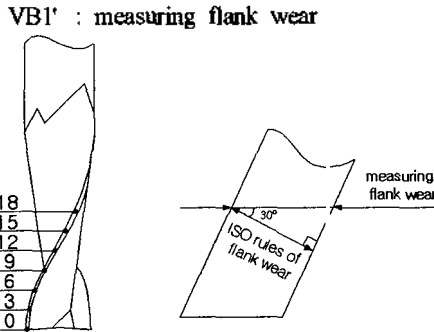


Fig. 1 Measuring flank wear

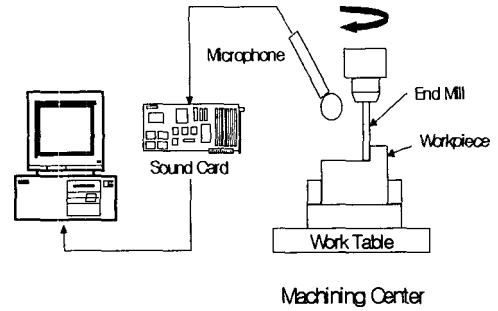


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

### 3. 관련이론

#### 3.1 마모와 절삭음의 관계

공구가 피삭재를 절삭할 때, 지배적인 가진 진동수는 tooth passing 주파수가 된다. 가진 진동수(tooth passing frequency)  $f_t$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f_t = V_s \times n \quad (\text{Hz})$$

여기서,  $V_s$  = spindle rotating speed (rev/s)

$n$  = number of teeth on cutting tool

절삭 시 공구는 절삭력에 의해서 deflection이 발생하게 된다. 강제 진동 하에서의 공구의 deflection은 힘과 같은 주파수로 변하며, 그 절삭력은 고조파(harmonic)로 나타나고, 이 절삭력에 의해서 deflection이 발생한다. deflection의 결정적인 요인은 스피들 스피드와 시스템 응답 주파수가 되고, 날 당 진동수가 정수 배로 늘어나는 영역에 걸쳐서 절삭력의 주기적인 변화가 발생한다<sup>(7)</sup>. 마모가 진행되면 절삭력은 점점 커질 것이고, 이 절삭력의 변화는 절삭음에 반영된다. 따라서 절삭력이 커짐에 따라 deflection이 커지고, 이 deflection 크기의 변화는 음향 신호의 주파수의 크기에 반영될 것이다. 그러므로 tooth passing 주파수 영역의 크기값의 변화로 flank 마모량을 추정 할 수 있다.

#### 3.2 주파수 대역 분석

절삭음의 주파수 특성을 알아보고, 마모와 관련이 있는 주파수 대역을 찾기 위해, 주파수 분석을 하기 위해 가장 많이 쓰이는 신호처리기법인 FFT를 사용하였다. 본 실험에서는 일정구간별로 10초구간의 절삭음을 잘라내어 FFT 처리를 하였다.

### 4. 실험

#### 4.1 실험 장치

실험장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 절삭 가공을 하는 부분과 음향을 획득하는 부분으로 되어 있다.

Table 1 Component of experimental setup

Machine	CNC machining center(TNV-40A)
End mill	SKH51, $\phi 12$ 2 flute standard
Microphone	Dynamics type
Sound card	Sound blaster(creative)
Cutting oil	Water-soluble cutting oil
Tool microscope	Mitutoyo 529-601
Workpiece	KS-SM490(20(L) $\times$ 18(W) $\times$ 40(H))
	KS-D3752 (20(L) $\times$ 18(W) $\times$ 40(H))

음향의 획득은 다이내믹형 마이크로폰을 이용하였고, 데이터는 샘플링 주파수 44.1kHz, 16bit로 사운드카드를 통해서 컴퓨터에 저장할 수 있도록 구성하였다. 마이크는 음원으로 부터의 거리와 방향에 따라서 영향을 많이 받으므로 음원으로 부터 50cm 거리에 고정하여 사용하였다. 실험장치 주요구성과 제원은 Table 1과 같다.

#### 4.2 실험 방법

실험은 수용성 절삭유를 사용한 습식, 측면 절삭을 수행하였다. 처음단계로는 flank 마모의 진행 과정을 알아보기 위해서 공구 마모의 측정은 연강 절삭의 경우 매 절삭길이 2400mm마다, 그리고 합금공구강재의 경우는 매 절삭길이 600mm마다  $10^{-3}$ mm까지 측정이 가능한 공구 현미경을 사용하여 앞에서 정의한 마모 기준에 따라 측정하여 연속절삭을 얼마나 하여야 하는지 결정하였다. 이 마모 특성을 알기 위해서 본 실험에서는 엔드밀 제조회사의 권장 절삭 조건을 준수하여 실험하였다. 위의 실험을 통해서 얼마 절삭 후에 마모가 된다는 것을 알고 충분히 마모가 될 때까지 연속으로 실험하면서 마이크로폰과 사운드 카드를 이용해 44.1kHz, 16bit로 음향을 컴퓨터에 저장하고, 그 음향을 FFT 처리하였다. FFT수행은 연강의 경우 2000mm마다, 합금공구강의 경우는 400mm마다 10초씩 잘라서 수행하였다. 실험 조건은 Table 2와 같다.

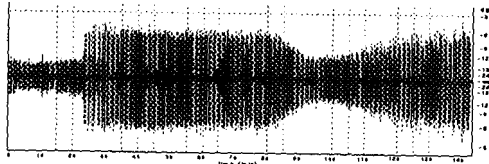
Table 2에서 보는 바와 같이 실험할 때 입력한 tooth passing 주파수( $f_t$ )와 실제 tooth passing 주파수( $f_{at}$ )는 기계 특성 등에 의하여 차이가 있다.

Table 2 Experimental cutting condition

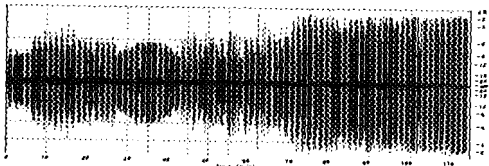
Workpiece	KS-SM490			KS-D
	1	2	3	4
Condition	1	2	3	4
Diameter of end mill(mm)	12	12	16	12
$V_s$ (rps)	19.67	25	15.83	10
$f$ (mm/min)	202	214	180	72
Programed $f_s$ (Hz)	39.3	50	31.7	20
Actual $f_{st}$ (Hz)	35.2	44.8	28.5	18
$a_e$ (mm)	18	18	18	18
$a_r$ (mm)	1.2	1.2	1.6	1.2

### 5. 결과 및 고찰

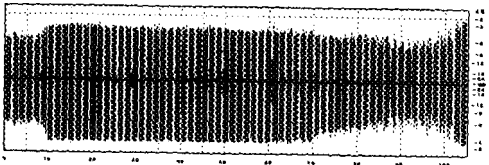
Fig. 3은 마모시까지의 연속으로 절삭한 전체 절삭음을 나타낸 것이다. 조건 4에서는 음압이 절삭이 진행됨에 따라 꾸준히 음압이 상승하지만 조건 1, 2, 3에서는 그 음압의 변화가 불규칙적이어서 선삭이나 AE 신호에서 유용한 RMS값이나 시계열 분석을 통해서 는 공구의 마모상태를 추정하는 것이 불가능하다.



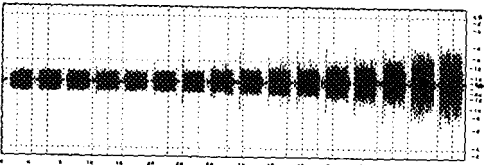
(a) condition 1



(b) condition 2

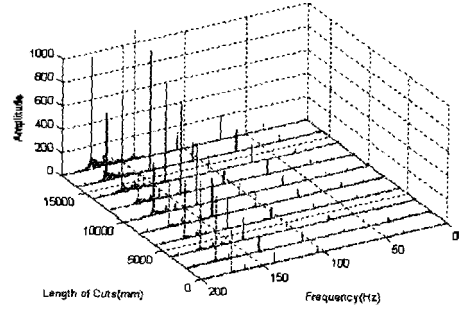


(c) condition 3

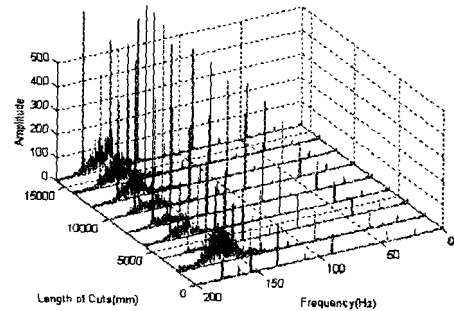


(d) condition 4

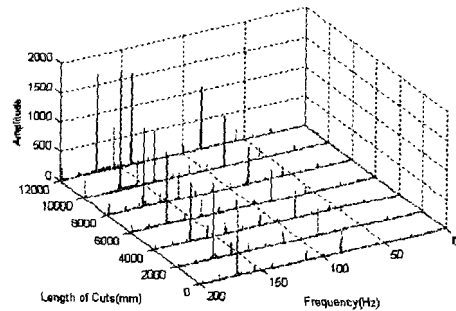
Fig. 3 Whole sound wave of end milling



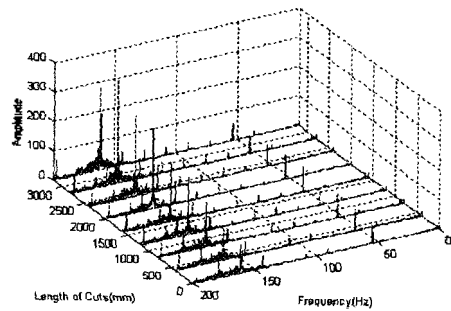
(a) condition 1



(b) condition 2



(c) condition 3

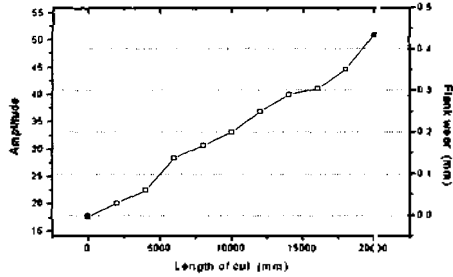


(d) condition 4

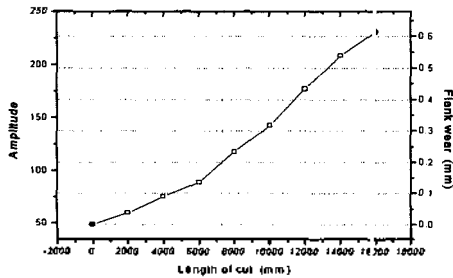
Fig. 4 Sound spectrum according to increasing length of cut between 0Hz and 200Hz

Fig. 4는 각각의 조건에 대해서 연강의 경우는 2000mm마다 합금공구강재의 경우는 400mm마다 10초

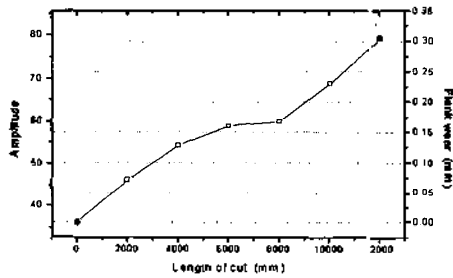
구간을 FFT 처리한 결과에서 tooth passing 주파수가 나타나는 저주파 0-200Hz 구간의 결과이다. 4가지 조건 모두 음압과 관계없이 tooth passing 주파수가 절삭이 진행됨에 따라 꾸준히 증가하는 고조파형태로 나타남을 확인 할 수 있다.



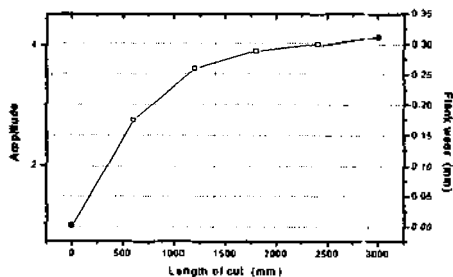
(a) condition 1(35.2Hz)



(b) condition 2(44.8Hz)



(c) condition 3(28.5Hz)



(d) condition 4(18Hz)

Fig. 5 Amplitude of the 1st harmonic and flank wear

Fig. 5는 고조파로 나타나는 tooth passing 주파수의 첫 번째 주파수 성분 크기와 연속 절삭 후 실제 측정

된 마모량과 비교하기 위해 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 보면 측정된 flank 마모가 0.3mm가 되는 부분을 검출 할 수 있다. 또한 조건 4의 경우 피삭재가 경도가 크기 때문에 초기에 마모가 많이 일어남을 알 수 있으며, tooth passing 주파수에서의 크기 변화는 마모의 진행 과정을 그대로 반영하고 있다.

## 6. 결론

1) 엔드밀링에서 음향신호를 이용하여 공구마모의 상태를 추정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였으며, 실험을 통하여 그 유용성을 입증하였다.

2) CNC 머시닝 센터의 스핀들 속도가 프로그램 값과 실제 스핀들 속도가 일치하지 않고, 프로그램 값보다 작은 것이 음향 신호와 가진 주파수 분석에 의해 확인되었다.

3) 모든 실험에서 tooth passing 주파수가 고조파 형태로 나타나고, 고조파의 기본주파수가 되는 첫 번째 고조파 성분의 크기가 flank 마모 값에 따라 크기가 변화하므로 tooth passing 주파수의 크기 변화를 통해서 마모 상태를 추정 할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) David A. Dornfeld, "In process recognition of cutting states", JSME, Series C, Vol. 37, No.4, pp. 638-650, 1997.
- (2) 차일환, "음향공학개론", 한신문화사, 1980.
- (3) S. Ema, R. Davies, "Cutting performance of end mills with different helix angles", Int. J. Mach. Tool Manuf. 29, pp. 217-227, 1989.
- (4) A. Sarhan, R. Sayed, AA. Nassr, R. M. El-Zahry, "Interrelationships between cutting force variation and tool wear in end-milling", J. Material Processing Technology 44, pp. 207-214, 2001.
- (5) ISO 8688-2, "Tool life testing in milling - Part 2: End milling", 1989.
- (6) Tony Schmitz, John Ziegert, "Examination of surface location error due to phasing of cutter vibrations", Precision Engineering 23, pp. 51-62, 1999.