

음향주파수 분석에 의한 엔드밀의 마모상태 추정에 관한 연구

이 창 희[†] · 조 택 동^{*}

(2002년 7월 4일 접수, 2003년 6월 30일 심사완료)

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

Chang-Hee Lee and Taik-Dong Cho

Key Words: End Mill(엔드밀), Cutting Sound(절삭음), Flank Wear(여유면마모), FFT(고속푸리에 변환), Harmonic(하모닉), Tooth Passing Frequency(가진주파수)

Abstract

The wear process of end mill is 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 end mill 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. As the cutter impacts the workpiece surface, a situation of forced vibration arises in which the dominant forcing frequency is equal to the tooth passing frequency of the cutter. The tooth passing frequency appears as a harmonics form, and end mill flank wear is related with the first harmonic. It is possible to detect end mill flank wear. This paper proposed the new method of the end mill wear detection.

1. 서 론

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 보일뿐만 아니라 칩 및 절삭유 등 여러 가지 요

인으로 인해서 센서의 장착과 그 적용이 어려운 환경에서 대부분의 절삭 작업이 이루어지기 때문이다. 지금까지의 공구 마모를 감지하는 방법으로는 크게 다음과 같이 두 가지로 나눌 수 있다. 그 하나는 광학센서, 전기저항센서, 공기압 센서 등을 이용하여 직접 마모상태를 검사하는 직접적인 방법과 마모와 관련이 있을 것으로 기대되는 변수들 예를 들어 절삭력, 온도, 진동, 음향방출 등의 변화들을 센서로 감지하여 신호처리나 해석을 통하여 예측하는 간접적인 방법이 있다. 이중 직접적인 측정 방법은 마모량을 직접 측정할 수 있기 때문에 신뢰성이 높지만, 장치의 복잡성과 경제적인 문제로 실용화하기가 사실상 어려운 실정이다. 반면에 간접적인 방법은 시스템의 구성도 쉬울 뿐만 아니라 경제적이고, 또한 최근 들어서는 컴퓨터의 발달로 데이터처리 속도가 빨

[†] 책임저자, 회원, 구미기능대학 자동화시스템과
E-mail : l7469@kopo.or.kr
TEL : (054)468-5272 FAX : (054)461-5244
^{*} 충남대학교 기계설계공학과

라지고, 여러 가지 신호처리 알고리즘이 발전하여 이 방법을 통한 실용화가 용이해짐에 따라 연구가 활발히 진행중이다. 하지만 아직까지 직접적인 방법에 비해 신뢰성이 많이 떨어지기 때문에 실제 작업 환경에 적용하기에는 많은 제약이 존재한다.

공구 마모를 감지하는 간접적인 방법에 대한 연구는 다양한 변수들을 이용하고 있으며, 특수한 센서들을 이용하여 측정한다. 그동안 주로 연구되었고, 계속 연구가 진행되고 있는 대표적인 방법으로는 음향방출(Acoustic Emission)신호, 공구 온도, 정적 및 동적 절삭력, 가속도계를 이용한 진동 해석이었다. 그 외의 방법으로는 초음파, CCD 카메라, 공작물의 표면 상태, 공작물의 치수, stress/strain 분석, 그리고 스피들 모터의 전류 변화 등을 이용한 방법들이 있다.

전통적인 생산시스템에서는 경험을 가진 작업자에 의해 절삭 공정이 감시되어지며, 만약 이상이 발생했을 때에는 그 상태에 따른 적절한 조치를 즉시 취할 수 있었다. 특히 절삭 가공 중 이상음이 발생되면 숙련된 작업자는 작업을 중지하고 공구의 이상유무를 확인하고 공구를 교환하는 등 적절한 조치를 취하였다. 그러나 급속도로 연구가 진행되는 무인생산 시스템에서는 이러한 작업자의 역할이 컴퓨터에 의한 자동적인 감시 및 제어 시스템으로 대체되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 머시닝센터를 이용한 엔드밀링 절삭가공 중에 발생하는 음향신호를 퍼스널 컴퓨터에 장착되어 있는 사운드 카드를 통해서 받아들여, 그 주파수 분석을 함으로써, 엔드밀의 마모 상태를 추정하는 것에 관하여 연구한 것으로 절삭음(음향신호)을 이용하여 공구 마모를 검출하는 연구는 국내외적으로 아주 미미한 상태이다. 특히 절삭음(음향신호)은 기존의 방법에 비하여 복잡한 시스템을 구현하지 않고 데이터의 취득이 용이 할뿐 아니라 절삭과정 전체의 데이터를 취득하여 저장하기가 쉬운 장점이 있다.

2. 관련이론

2.1 마모와 절삭음의 관계

소리(음, sound)는 진동하는 물체로부터 주위에 있는 물체로 보내어진 밀도변화가 있는 파동이며 발생원에 따라 고체음과 기류 음이 있다. 고체음

은 물체의 진동에 의한 소리를 말하며 기류음은 공기의 흐름에 의한 소리를 말한다. 일반적으로 진동은 자유진동과 강제진동으로 구분한다. 자유진동(free vibration)은 외력이 없는 경우에 계의 자체에 내재하는 힘에 의하여 발생한다. 자유진동인 경우에는 계는 하나 또는 그이상의 고유진동수(natural frequency)를 가지고 진동하며, 이 고유진동수는 질량과 강성의 분포에 의하여 결정되는 계의 고유한 특성이다. 외력이 작용하여 발생하는 진동은 강제진동(forced vibration)이라고 하며, 외력이 주기적인 경우에는 계가 가진력(exciting force)과 동일한 진동수를 가지고 진동하게 된다. 본 논문에서 엔드밀 날 하나의 진동수를 가진주파수(end mill tooth passing frequency)라고 정의한다. 이 가진주파수가 정수 배로 늘어가는 영역에 걸쳐서 가진주파수의 크기는 주기적인 변화를 일으키게 되는데 이를 하모닉(harmonic)이라 한다. 가진진동수 f_i 는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_i = V_s \times N(\text{Hz}) \quad (1)$$

여기서, V_s = spindle speed in rev/s

N = number of teeth on cutting tool

마모가 진행되면 절삭력은 점점 커지게 되고, 이 절삭력의 변화는 절삭음에 반영된다.

2.2 고속푸리에 변환

어떤 신호의 주파수 특성을 알아보기 위하여 일반적으로 쓰이는 신호해석 방법으로는 고속푸리에 변환(FFT : Fast Fourier Transform)을 사용한다. 푸리에 변환(Fourier Transform)은 어떤 주기적인 시간 함수 $x(t)$ 도 주파수 0부터 시작하여 기본주파수의 정수배에 해당하는 주파수로 이루어진 sin과 cos함수의 무한 합과 같다는 Fourier Series 개념에서부터 출발한다. 시간 영역에서 관측된 유한개의 시간영역 데이터로 구성되는 디지털 신호를 주파수 영역으로 변환하기 위한 방법 중에 하나가 DFT(Digital Fourier Transform)이다. N 개의 이산시간 신호 $x_n(n=0, 1, 2, \dots)$ 이 주어졌을 때 DFT변환 식은 식 (2)와 같다.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-j \frac{2\pi nk}{N}) \quad (2)$$

여기서, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ 그러나 DFT 계산에서는 이어서시계 N^2 회의 복소수 승산과 $N(N-1)$ 회의 복소수 가산이 필요하게 된다. 따라서 계산 양이 많아지고 계산시간이 오래 걸리는 문제점을 야기하게 된다. 이 문제를 N 을 몇 개의 정수 곱으로 나타내어 소규모의 DFT로 축차 분해하면 승산 및 가산의 계산 양을 대폭 감소시킬 수 있다. 고속푸리에 변환의 기본 개념은 주기성과 대칭성을 최대한 이용하여 DFT의 계산 양을 감소시키는 것이다.

2.3 엔드밀의 마모와 마모기준

엔드밀은 단면과 원주 방향에 절인이 있으며, 측면, 평면, 홈 절삭에 사용되는 공구이다. 공구 방향 절삭 깊이와 반경방향 절삭 깊이의 비로 측면과 평면 절삭으로 구분이 되고, 공작물의 이송 방향에 따라 상향절삭과 하향절삭으로 나눌 수 있다. 또한 절삭유 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 밀링 방법 등의 복합적인 영향을 받는다.

ISO에서는 플랭크 마모(flank wear:VB)를 마모되는 현상에 따라 균일한 플랭크 마모(VB1, uniform flank wear), 균일하지 않은 플랭크 마모(VB2, non-uniform flank wear), 국부 플랭크 마모(VB3, localized flank wear)로 구분하고 있으며 공구를 재 연삭 하거나 교체해야하는 공구수명(tool life)을 VB1은 평균 0.3mm, VB3는 최대 0.5mm를 기준으로 추천하고 있다. 공구 제조회사에서는 VB1값을 공구직경과 절삭구분(범용, 정밀, 황삭)에 따라 0.1~0.6mm로 하고 있으며 본 실험에서는 공구제조회사가 추천하는 범용 절삭 가공을 할 경우를 기준으로 하여 플랭크 마모(VB1)가 0.2mm가 될 때를 기준으로 하였다. 마모측정은 Fig. 1과 같이 밀 날부터 3mm 간격으로 마모량을 측정하였으며, 측정된 값의 두 날의 평균으로 마모 기준을 삼았다. ISO규정⁽¹⁰⁾에서 플랭크 마모

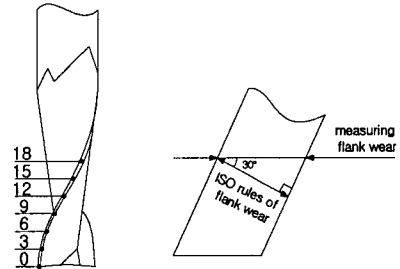


Fig. 1 Measuring flank wear

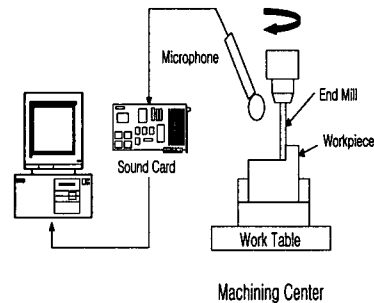


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

$$VB1 = VB1' \times \cos 30^\circ \quad (3)$$

여기서, VB1 : ISO rule of flank wear
 VB1' : measuring flank wear

는 날 부분(edge)에서 수직거리를 마모량으로 표시한다. 엔드밀 형상은 날이 대부분 helix 각을 갖는 비틀림 날로 되어 있다. 본 연구에 사용된 엔드밀은 모두 helix 각이 30°이다. 따라서 공구 현미경으로 측정된 값은 ISO에서 규정하는 플랭크 마모와는 식 (3)과 같은 관계를 갖게 되므로 측정된 플랭크 마모 폭이(VB1') 0.23mm가 됐을 때를 공구 수명으로 하였다.

3. 실험

3.1 실험장치

실험장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 절삭 가공을 하는 부분과 음향을 획득하는 부분으로 되었으며, 음향의 획득은 다이내믹형 마이크로폰을

Table 1 Component of experimental setup

Machine	CNC machining center (TNV-40A)
End mill	SKH51, ϕ 12 2 flute standard
Microphone	Dynamics type
Sound card	Sound blaster(creative)
Cutting oil	Water-soluble cutting oil
Tool microscope	Mitutoyo 529-601
Workpiece	SM49(20(L)×18(W)×40(H))
	STS (20(L)×18(W)×40(H))

이용하였고, 데이터는 샘플링 주파수 44.1kHz, 16 bit로 사운드카드를 통해서 컴퓨터에 저장할 수 있도록 구성하였다. 마이크는 음원으로부터의 거리와 방향에 따라서 영향을 많이 받으므로 음원으로부터 50cm 거리에 고정하여 사용하였다. 실험장치의 주요구성과 제원은 Table 1과 같다.

3.2 실험방법

실험은 수용성 절삭유를 사용한 습식, 플랭크 마모가 잘 일어나는 상황, 측면 절삭을 수행하였다. 처음단계로는 플랭크 마모의 진행현상과 공구수명(tool life, 엔드밀 재연삭 시기)을 파악하기 위하여 기계구조용탄소강(KSD3752, SM49)은 3200mm마다, 합금공구강(KSD3753, STS)의 경우는 매 절삭길이 600mm마다 렌드의 마모를 측정하였다. 측정에 사용된 공구 현미경은 MITUTOYO TF510이며, Table 2는 절삭 가공길이와 엔드밀의 렌드부의 마모관계를 2개의 엔드밀을 실험하여 평균값으로 나타낸 것이다. 마모량 측정값이 0.23mm일 때 Table 2를 그래프에 의한 보간법으로 계산하면 ϕ 12엔드밀로 기계구조용탄소강을 가공할 때는 18000mm, 합금공구강을 가공할 때는 800mm, ϕ 16 엔드밀로 기계구조용탄소강을 가공할 때는 10000mm를 절삭 할 때가 공구 수명으로 판정 할 수가 있었다. 본 실험은 엔드밀 제조회사의 권장 절삭 조건으로 실험하였으며 절삭 조건은 Table 3과 같다. 다음에는 공구 수명 이상까지 마모 될 때까지 연속으로 절삭하면서 마이크로폰과 사운드 카드를 이용하여 절삭 할 때 발생한 음향 전체를 컴퓨터에 저장하고, 기계구조용탄소강은

Table 2 Worn values according to cut of length

material	tool dia.	length of cut(m)							
		0.6	1.2	1.8	2.4	3.2	4.8	6.4	9.6
SM 49	12					0.052		0.084	0.119
	16					0.088		0.131	0.209
STS	12	0.213	0.258	0.299	0.33				

material	tool dia.	length of cut(mm)						
		12.8	14.4	16	17	19.2	20.8	24
SM 49	12	0.149		0.203		0.27	0.313	
	16	0.298		0.538				
STS	12							

Table 3 Experimental cutting condition

Workpiece	SM49			STS
	1	2	3	4
Condition				
Diameter of end mill(mm)	12	12	16	12
Vs(rps)	19.67	25	15.83	10
f(mm/min)	202	214	180	72
Programed f_t (Hz)	39.3	50	31.7	20
Actual f_{at} (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

2000mm마다, 합금공구강의 경우는 400mm마다 10초씩의 음을 발체하여 그 음향을 고속푸리에 변환하였다. Table 3을 보면 실험할 때 입력한 tooth passing 주파수(f_t)와 실제 tooth passing 주파수(f_{at})가 다르게 나타남을 알 수 있다. RPM 측정기(SUGAWARA STROBOSCOPE TYPE DS-2)를 활용하여 측정을 하여 본 결과 프로그램한 지령 속도와 실제 스피들 속도가 차이가 남을 확인 할 수 있었으며 부하를 변동(절삭시와 비절삭시의 변화) 하면서도 측정을 하여 보았으나 부하에는 영향을 받지 않음을 확인 할 수 있었다. 또한 타 제조회사의 머시닝센터도 확인을 하여 보았으나 같은 오차 값은 아니지만 차이가 남을 확인 할 수 있었다. 이는 공작기계의 특성(노후화등 포함)에 따라 정확한 지령 값이 출력되지 않는 것으로 생각 된다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 엔드밀이 마모될 때까지 연속적으로 절삭한 전체 절삭음들 중에서 몇 개를 나타낸 것이다. 이 그림에서 조건(condition)1, 2, 3, 4는 Table 3의 절삭조건으로 절삭한 것을 의미한다. 가로축은 절삭시간(절삭길이)을 세로축은 음압(dB)을 나타내고 있으며 음압이 나타나지 않는 부분은 절삭을 하지 않고 공구가 이동하는 시간이다. (a)그림에서 보면 공구경 방향 절삭 깊이를 1.2mm로 하여 100회 절삭한 것을 나타내며 1회의 절삭길이는 200mm 이므로 20000mm를 절삭한 것이다. 3200mm(16회) 가공할 때까지는 음압 상승이 별로 없다가 17번째 절삭부터는 갑자기 음압이 상승하여 졌으며 절삭음 전체를 보면 규칙성을 찾기가 어렵다. (d)그림(조건 4)에서는 음압이 절삭이 진행됨에 따라 꾸준히 상승하지만 (a)(b)(c)그림에서는 그 음압의 변화가 불규칙적 이어서 시계열 분

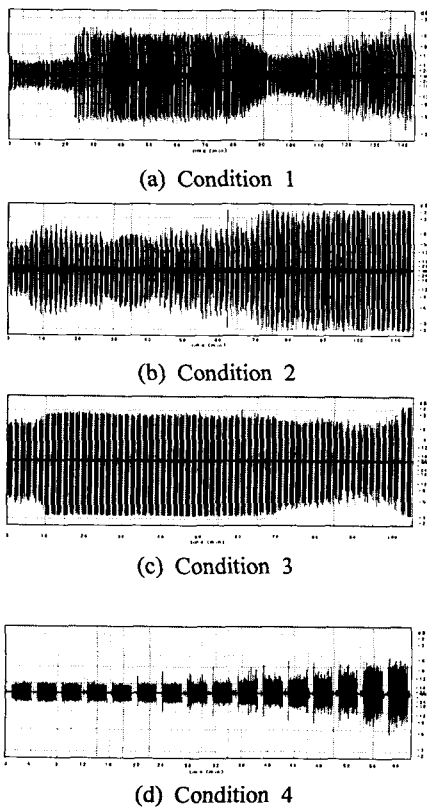


Fig. 3 Whole cutting sound wave of end milling

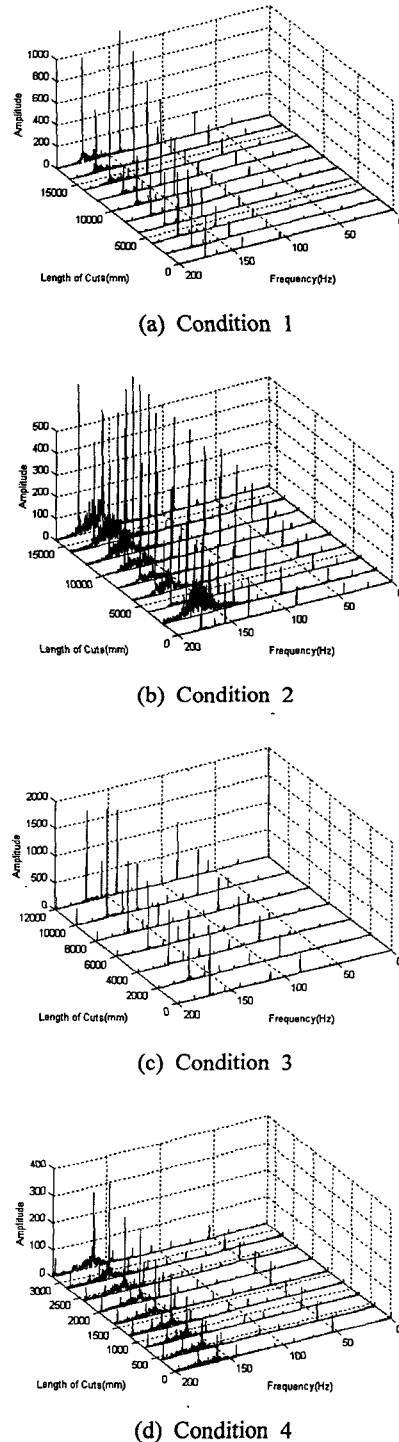


Fig. 4 Sound spectrum according to increasing length of cut between 0Hz and 200Hz

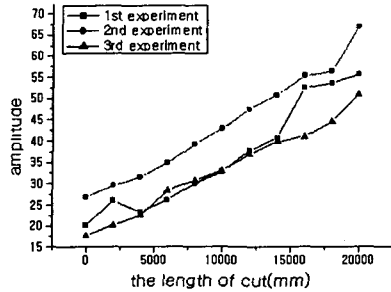
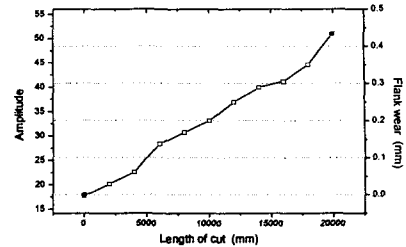


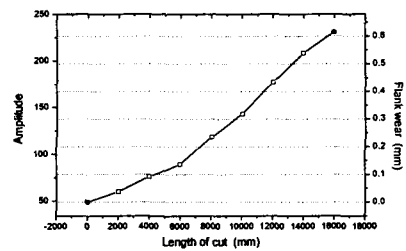
Fig. 5 The 1st harmonic amplitude

석을 통해서 공구의 마모상태를 추정하는 것이 어려움을 알 수 있다. Fig. 4는 절삭음의 주파수 특성과 마모와 관련이 있는 주파수 대역을 찾기 위하여 Fig. 3에 나타난 전체 음 중에서 일정구간별로 10초간의 절삭음을 FFT 처리를 하여 나타낸 그림이다. 각각의 조건에 대해서 기계구조용탄소강의 경우는 2000mm마다 합금공구강재의 경우는 400mm마다 FFT 처리한 결과 중에서 가진 주파수가 나타나는 저주파 0-200Hz 구간의 결과이다. 4가지 조건 모두 음압과 관계없이 가진 주파수가 절삭이 진행됨에 따라 꾸준히 증가하는 고조파형태로 나타남을 확인 할 수 있었다. 이를 좀 더 명확히 확인하기 위하여 가진주파수의 하모닉(harmonic) 성분을 분석하여 보았다. 각각 3회의 실험으로 첫 번째 하모닉 성분에서부터 4번째 하모닉 성분 까지를 분석하여 본 결과 가진주파수의 첫 번째 주파수의 크기가 가장 선형적으로 상승하는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 5는 절삭길이에 대한 첫 번째 하모닉성분을 나타낸 것이다.

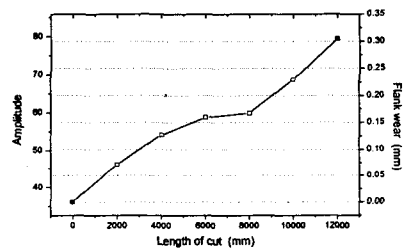
Fig. 6은 고조파로 나타나는 가진 주파수의 첫 번째 주파수 성분 크기와 플랭크마모 값을 실험값에 의하여 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 보면 가진주파수의 크기증가와 더불어 플랭크 마모 값이 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 이는 절삭길이에 따라 엔드밀의 여유면 마모(flank wear)값이 커지며 이에 따라 절삭력이 증가되므로 절삭력에 의하여 엔드밀에 휨(deflection)이 발생하며 그 휨은 가진진동 형태로 나타내게 된다. 그 휨이 커짐에 따라 가진 주파수의 크기가 증가하게 되는 것으로 생각된다. 또한 조건 4의 경우 피삭재가 경도가 크기 때문에 초기에 마모



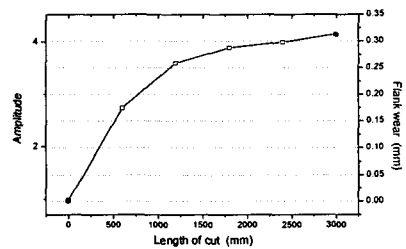
(a) condition 1(35.2Hz)



(b) condition 2(44.8Hz)



(c) condition 3(28.5Hz)



(d) condition 4(18Hz)

Fig. 6 Amplitude of the 1st harmonic and flank wear

가 많이 일어남을 알 수 있으며, 가진주파수의 크기 변화는 마모의 진행 과정을 그대로 반영하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 6에 의하여

가진주파수의 크기를 알면 플랭크마모 값을 추정하는 것이 가능하게 됨을 알 수 있다. 실험값들의 정확도를 확인하기 위하여 Fig. 6에 표시된 그래프에서 새 엔드밀의 가진주파수의 크기 값과 엔드밀 교환시기로 판정하는 여유면 마모 값이 0.23mm가 됐을 때의 가진주파수의 크기 값을 구하여 그 변화 값을 계산하였다. 그 결과 절삭조건 1에서는 14.18, 절삭조건 2에서는 74.4, 절삭조건 3에서는 33.2, 절삭조건 4에서는 2.3만큼 초기 값보다 증가되었다. Matlab에서 실시간으로 절삭음을 받아들여 FFT처리를 한 다음 가진 주파수의 크기가 검출되도록 하였으며 각각의 절삭조건에서 변화 값 만큼에 도달하면 엔드밀의 교환 시기가 된 것으로 하여 프로그램이 중단되도록 하였다. 프로그램이 중단되면 공작물 절삭을 중지하고 그때의 엔드밀의 여유면 마모를 Fig. 1과 같이 측정하였다. 측정된 값과 공구 수명의 기준이 되는 VB1'가 0.23mm에서 얼마나 오차가 나는지를 실험하였다. 각각 3개의 엔드밀로 실험을 한 결과 평균 2.4~5.65%의 오차 백분율을 얻을 수 있었다. 이것은 엔드밀 마모가 빠른 시간에 급격히 마모되지 않을 뿐더러 마모를 측정하는데 따른 오차 등을 고려하여 볼 때 만족할 만한 검출 결과로 생각된다. Table 4는 그 결과 값들을 나타낸 것이다. 절삭음은 주위환경에 민감하므로 이와 관련한 현장에서의 잡음(noise)에 대한 검증실험을 실시하였다. 인근 공단 내에서 머시닝센터(MTC)를 비교적 많이 보유하고 있는 D산업을 선정하였다. 이 회사는 한 단위 공장 내에 여러 대의 머시닝센터(MTC 12대, 타종의 공작기계 6대)가 설치되어 작업을 하고 있었으며 귀에 거슬릴 정도로 시끄러움을 느낄 수 있었다. 먼저 공장내의 소음을 조사하였으며 Table 5는 그 측정값과 측정 환경을 나타내고 있다(작업환경 측정 자료에 의함). 이 표에서 알 수 있는바와 같이 소음이 84.4 dB 인 것을 알 수 있다. 이는 작업 환경 기준(90 dB)에는 미달이지만 비교적 소음이 많은 환경이다. 실험장비는 KIA KH50G (High Grade Expandable Machining Cell)이며 생산작업을 하는 상태 그대로를 실험하였다. 가공재료는 구상흑연 주철품(KSD 4302, DC : Ductile Casting)을 Ø 16 초경드릴을 사용하여 주축회전 1100rpm, 이송속도 180 mm/min으로 120mm깊이로 구멍을 뚫는 공정이다. 식 (1)에 의하면 가진 주파수가 약

36.7 Hz임을 알 수 있다. 이 주파수 대역에 세팅하고 가진주파수의 크기를 관찰하여 보았다. 관찰하여 본 결과 주위의 소음은 물론 절삭 가공할 때에 장비의 여러 소음(공작물 이송 및 장·탈착, 절삭유와 관련된 음, 기계음 등)에는 전혀 무관하게 가진 주파수의 크기만을 출력되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 컴퓨터 모니터 상에 출력된 값을 나타낸 것이다. 절삭음을 고속푸리에변환(FFT)하여 가진 주파수 대역만을 이용하게 되므로 주위의 잡음(noise)에는 관계없이 현장에서도 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 4 The result of the experiments

condition	FFT amp.			results(VB1'=0.23mm)				
	new tool (A)	worn tool (B)	B-A	1st	2nd	3rd	aver.	error (%)
I	17.5	33.2	14.18	0.242	0.236	0.241	0.24	4.2
II	50.1	124.5	74.4	0.242	0.237	0.228	0.236	2.4
III	36.2	69.4	33.2	0.243	0.245	0.238	0.242	5.22
IV	0.95	3.25	2.3	0.238	0.242	0.249	0.243	5.65

Table 5 The measuring result of the noise

temperature (°C)	humidity (%)	noise (dB)	number of experiment	reference (dB)	tool type
19	55	84.4	6	90	RION NL-02

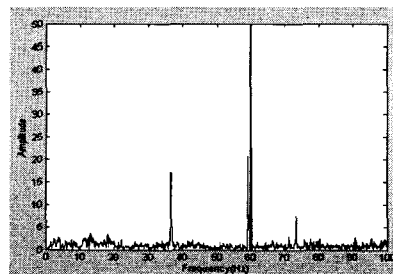


Fig. 7 Out put results on the monitor

5. 결 론

본 연구에서는 머시닝센터에서 SKH51의 $\varnothing 12$, $\varnothing 16$ 엔드밀로 기계구조용 탄소강(SM49)과 합금공구강재(STS)를 절삭 시 발생하는 음향신호를 분석(FFT)하여 엔드밀의 여유면마모(Flank Wear)를 추정하는 새로운 방법을 제시한 것으로 가진주파수의 하모닉 성분 중 첫 번째 주파수 크기가 엔드밀 여유면 마모와 더불어 상승하는 현상을 확인 할 수 있었으며 이를 이용하여 엔드밀의 여유면 마모를 추정 할 수가 있었다.

참고문헌

- (1) David A. Dornfeld, 1997, "In Process Recognition of Cutting States," *JSME, Series C*, Vol. 37, No.4, pp. 638~650.
- (2) Mang, M. J., Jeong, J. K., 1995, "A Study on the End Mill Wear Detection Using AE Signal," 1995, *KSME 1995 Spring Conference(I)*, pp. 394~399.
- (3) Lin, J., 1995, "Inverse Estimation of the Tool-Work Interface Temperature in End Milling," *Int. J. Machine Tools & Manuf.* 35(5), pp. 751~760.
- (4) Sarhan, A., Sayed, R., Nassr, AA., El-Zahry R. M., 2001, "Interrelationships Between Cutting Force Variation and Tool Wear in End-Milling," *J. Material Processing Technology* 44, pp. 207~214.
- (5) Dimla E., Dimla Snr, 2000, "Sensor Signals for Tool-Wear Monitoring in Metal Cutting Operationsa Review of Methods," *Int. J. Machine Tools & Manuf.* 40, pp. 1073~1098.
- (6) Cha, I. H., 1980, "An Instruction of Acoustics," Han Sin Publishing co.
- (7) Tony Schmitz, John Ziegert, 1999, "Examination of Surface Location Error Due to Phasing of Cutter Vibrations," *Precision Engineering* 23, pp. 51~62.
- (8) Ema, S., Davies, R., 1989, "Cutting Performance of End Mills with Different Helix Angles," *Int. J. Mach. Tool Manuf.* 29, pp. 217~227.
- (9) Sarhan, A., Sayed, R., Nassr, AA., El-Zahry, R. M., 2001, "Interrelationships Between Cutting Force Variation and Tool Wear in End-Milling," *J. Material Processing Technology* 44, pp. 207~214.
- (10) ISO 8688-2,1989, "Tool Life Testing in Milling - Pat2 : End Milling."