# 합금공구강재의 절삭음 음향주파수 분석에 의한 엔드밀 마모 검출에 관한 연구

# A Study on the End Mill Wear Detection by the Analysis of Acoustic Frequency for the Cutting Sound(KSD3753)

이 창 희*, 김 낙 철**

Chang-Hee Lee*, Nag-Cheol Kim**

## 요 약

FMS, FMC, FA, IMS의 구축에 있어서 최하위 단위인 공작기계의 자동화가 중요하다. 이를 위해서는 공작기계의 공구 감시기능(tool monitoring system)이 수행되어야 한다. 본 논문은 공구 감시기능의 자동화를 위해 종전의 공구마모 검출방법과는 달리 엔드밀의 마모상태에 따라 발생하는 절삭음의 음향주파수 분석을 통해 마모정도를 검출하는 방법을 제안하였다. 즉, 머시닝센터에서 공구마모가 잘되는 합금공구강재를 사용하고 이때 발생하게 되는 절삭음(cutting sound)을 음향 분석하여 공구 마모와 관련이 있는 가진 주파수(tooth passing frequency)를 찾아내고 또한 이 주파수의 크기 값과 공구마모(flank wear) 변화를 연구하여 엔드밀의 마모 상태를 추정하였다. 이를 위해 본 연구에서는 실험 장비를 구성하고 절삭속도, 엔드밀마모, 공구직경을 절삭조건으로 하여 측정된 절삭음을 FFT처리 하였다. 또한 측정된 값을 회귀분석으로 모델링한 결과 엔드밀 마모 검출오차범위가 5.8%이내로 나타나 음향주파수 분석에 의한 엔드밀 마모검출 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

## ABSTRACT

The wear process of end mill is a so complicated process that a more reliable technique is required for the monitoring and controling 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 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. 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.

***Key words*** : Tool Monitoring System, Multiple Linear Regression, Tooth Passing Frequency, Flank Wear

## I. 서 론

공구 감시기술은 절삭가공 공작기계에서 공구가 파손되거나 마멸되었을 때 이를 신속하게 검출하고 정량적, 정성적으로 측정하여 이에 관한 정보를 상위의 시스템에 전달하는 기술이다. 절삭 가공 중 필연적으로 발생하는 공구 마모의 감지는 공장자동화 및 무인화를 실현하기 위해서 선결되어야 할 핵심 문제이지만 아직도 완전한 절삭공구의 온라인 자동감시가 어려운 실정이다. 이는 절

*구미기능대학 자동화시스템과 **구미기능대학 전자과
접수 일자 : 2004. 8. 31 수정 완료 : 2004. 10. 20
논문 번호 : 2004-2-12

삭 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(1)(2). 종전의 공구마모 검출방법들은 복잡한 시스템을 구축해야 하므로 고비용은 물론 생산 작업을 수행하는 데에도 지장을 초래하며 전체의 데이터를 취득하기도 어려운 실정이었다. 공구마모 감지를 위한 음향방출(AE) 관련 해외 연구의 경우, 1969년에 E. J. Weller 등은 절삭 가공시 발생하는 음향방출(AE)과 음향을 통해서 공구 마모를 검출할 수 있을 것이라는 가능성을 제시하였다. 또한 가청 주파수의 음향을 이용한 연구는 1990년대에 들어와서 시작되었다. 2001년에 J. Kopac 등은 선삭작업에서 콘덴서 마이크로폰을 이용하여 작업지역과 0.5m 떨어진 거리에서 음압신호를 받아 0~20kHz 사이에서 주파수 분석을 수행하였다. 또한 2001년에 A. Sarhan 등은 엔드 밀링에서 마모량을 검출할 수 있는 방법을 제안하였다.

국내의 경우 엔드밀(end mill)의 마모상태를 절삭음의 음향분석을 이용하여 검출하는 연구는 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 머시닝 센터(machining center)에서 엔드밀 작업 중 공구 마모 상태를 자동 감지하기 위해 절삭음의 음향 주파수를 분석하였다. 머시닝 센터에서 엔드밀 작업을 하게 되면 절삭음의 음향신호가 발생하게 되는데 이 절삭음은 공구 마모상태에 따라 달라지게 된다. 이렇게 변해가는 절삭음을 분석하여 공구 마모를 검출하는 방법에 관하여 연구하였다. 특히 절삭음의 음향주파수 분석은 복잡한 시스템을 구현하지 않고도 데이터의 취득이 용이할 뿐 아니라 절삭 과정 전체의 데이터를 취득하여 저장하기가 쉬운 장점이 있다. 또한 음(소리)은 주위환경에 민감하므로 이에 대한 염려가 있으나 절삭음을 분석(FFT처리)하여 가진 주파수 대역의 크기 변화를 정보로 이용하므로 주위의 기계음(noise)에 대한 영향은 완전히 배제 할 수가 있다. 즉, 가진 주파수는 스핀들 회전수(1초당)×절삭공구의 날수가 되므로 기계음 대역의 주파수와 다르므로 주변에 기계음이 발생되더라도 관계없이 변화량을 읽을 수가 있다.

따라서 본 논문은 절삭 가공 중에 발생하는 음향신호를 주파수 분석을 통해서 마모와 관련이 있는 주파수 성분을 찾아 마모상태를 추정하는 것이다. 이러한 연구결과로부터 음향신호를 이용하여 공구마모를 검출할 새로운 방법을 제안하고 기존의 연구되어온 방법들과 비교 검토하여 그 유용성을 검토하고자 한다. 본 논문의 내용은 다음과 같다. 공구마모가 잘되는 합성공구강재(KSD3753)를 통해 공구마모와 음향신호에 관한 실험을 실시하였으며 주파수대역별로 RMS값을 분석하고 FFT처리한 후 공구마모와 관련이 있는 주파수를 찾아내어 이것의 크기 변화를 이용하여 엔드밀의 마모를 실시간으로 검출하는 것에 관하여 연구하였다. 또한 몇 가지의 절삭 조건 변화에서도 마모값을 검출 할 수 있도록 하기 위하여 다중회귀분석을 모델링하였다. 이때 절삭속도, 엔드밀 직경, 엔드밀의 여유면 마모, 주파수 크기를 변수로 하였으며 실험값과 비교하였다.

## II. 이 론

### 2.1 고속 퓨리에 변환(Fast Fourier Transform : FFT)

어떤 신호의 주파수 특성을 알아보기 위하여 일반적으로 쓰이는 신호해석 방법으로는 FFT를 사용한다. Fourier Transform은 어떤 주기적인 시간 함수 $x(t)$도 주파수 0부터 시작하여 기본주파수의 정수배에 해당하는 주파수로 이루어진 sin과 cos함수의 무한 합과 같다는 Fourier Series개념에서부터 출발한다.

시간 영역에서 관측된 유한개의 시간영역 데이터로 구성되는 디지털 신호를 주파수 영역으로 변환하기 위한 방법 중에 하나가 DFT이다.

$N$개의 이산시간 신호 $x_n(n=0,1,2,\cdots,)$이 주어졌을 때 DFT변환 식은 식 (1)과 같다.

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

여기서, $k=0,1,2,\cdots,N-1$

그러나, DFT 계산에서는 $N^2$회의 복소수 승산과 $N(N-1)$회의 복소수 가산이 필요하게 된다. 따라서 계산 양이 많아지고 계산시간이 오래 걸리는 문제점을 야기하게 된다. 이 문제는 $N$을 몇 개의 정수 곱으로 나타내어 소규모의 DFT로 축차 분해하면 승산 및 가산의 계산 양을 대폭 감소시킬 수 있다. FFT의 기본 개념은 주기성과 대칭성을 최대한 이용하여 DFT의 계산 양을 감소시키는 것이다.(3)

### 2.2 최소제곱 회귀 분석(Least-Square Regression)

데이터와 함수 사이의 잔차에 대한 제곱합을 최소화시키는 함수로 적합하도록 한 이러한 방법들을 최소제곱회귀분석(least-squares regression)이라고 한다. 선형최소제곱회귀분석은 종속변수와 독립변수들이 선형 형태로 서로 관련되어 있는 경우에 주로 사용된다. 종속변수와 독립변수들 사이에 곡선 관계가 나타나는 경우에는 몇 가지의 선택이 가능하다. 어떤 경우 변환을 이용해서 이 관계를 선형화 할 수도 있다. 이 경우 최적 직선을 결정하기 위해서는 변형된 변수에 대해서 선형회귀분석을 적용할 수 있다. 반면에 다항식회귀분석은 자료에 곡선을 곧바로 적합 시킬 수 있다. 다중선형회귀분석(multiple linear regression)은 종속변수가 두 개 또는 그 이상의 독립변수에 대한 선형함수일 때 이용된다. 다중종속변수

가 곡선관계인 경우 로그변환을 이용해서 선형화 한 후 이러한 다중선형회귀분석을 적용할 수도 있다. 다중선형 회귀분석의 일반식은 식(2)와 같이 나타낸다.

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_m x_m + e \quad (2)$$

각 미지수들에 관하여 편미분을 취하여 잔차의 제곱합이 최소가 될 때의 계수들은 이러한 편미분들이 0으로 될 때의 값으로 결정되며, 이러한 결과는 4중 선형 회귀분석의 경우 다음의 식(3)의 행렬식으로 표현될 수가 있다.(3)

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \sum x_{3i} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{1i}x_{3i} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 & \sum x_{2i}x_{3i} \\ \sum x_{3i} & \sum x_{1i}x_{3i} & \sum x_{2i}x_{3i} & \sum x_{3i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \\ \sum x_{3i}y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

## III. 실 험

### 3.1 실험장비 및 절삭조건

본 실험에 사용된 절삭가공 실험장비는 Table 1과 같으며 머시닝센터에서Ø10,Ø12,Ø16엔드밀 (SKH 51, 2flute, standard, YG-1(주))을 사용하였고 피삭재는 공구 마모가 잘되는 합금공구강(KSD3753, STS : steel tool special)을 사용하였다. 시험재료의 크기는 200(L)×180(W)×40(H)로 하였으며 절삭유는 수용성을 사용하여 상향절삭을 하였다. 절삭 조건은 Table 2와 같이 일정하게 하였으며 반복적인 작업이 되도록 NC 프로그램하여 절삭 가공을 하였다.

표 1. 실험장비
Table 1. Experimental equipments

| equipment. | size and manufacturing company |
|---|---|
| Machining center | TNV 40 SEIL HEAVY IND. |
| Tool wear measure system | Hanra Micro Measure System 및 Mitutoyo TF510 |
| End mill | Ø10,Ø12,Ø16 SKH51, 2Flute, Standard, YG-1 |
| Collect chuck | Nikken BT40-032-90 |
| Microphone | Dynamics type |
| Sound card | Sound blaster(creative) |
| Cutting oil | Water-soluble cutting oil |
| Workpiece | STS(200(L)×180(W)×40(H)) |

표 2. 절삭조건
Table 2. Cutting condition

| Material | Tool diameter | da | dr | feed [mm/min] | rpm (programmed) | stick a end mill on a collect spring |
|---|---|---|---|---|---|---|
| STS | Ø10 | 15 | 1 | 75 | 750 | 35 |
| | Ø12 | 18 | 1.2 | 72 | 600 | 40 |
| | Ø16 | 18 | 1.6 | 72 | 475 | 50 |

### 3.2 공구 마모와 절삭음

#### 3.2.1 절삭음 분석

소리(음,sound)는 진동하는 물체로부터 주위에 있는 물체로 보내어진 밀도변화가 있는 파동이며 발생원에 따라 고체음과 기류음이 있다. 고체음은 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 고유 진동수(natural frequency)를 가지고 진동하며, 이 고유 진동수는 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.(4) 본 논문에서 엔드밀 날 하나의 진동수를 가진 주파수(end mill tooth passing frequency)라고 정의한다. 이 가진 주파수가 정수 배로 늘어나는 영역에 걸쳐서 가진 주파수의 크기는 주기적인 변화를 일으키게 되는데 이를 하모닉(harmonic) 이라 한다. 가진 진동수 $f_t$는 아래와 같은 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$f_t = Vs \times n \quad \text{(Hz)} \quad (4)$$

여기서, $Vs$= spindle speed in rev/s
$n$= number of teeth on cutting tool

마모가 진행되면 절삭력은 점점 커지게 되고, 이 절삭력의 변화는 절삭음에 반영된다. 따라서 절삭력이 커짐에 따라 변형이 커지고, 이 변형 크기의 변화는 음향 신호의 주파수의 크기에 반영되게 된다. 그러므로 가진 주파수 영역의 크기 값의 변화로 플랭크 마모량을 추정 할 수 있게 된다. 음향 신호의 획득은 다이나믹형 마이크로폰을 이용하였고, 데이터는 샘플링 주파수 44.1kHz, 16bit로 사운드카드를 통해서 컴퓨터에 저장할 수 있도록 구성하였다. 마이크는 음원으로부터 50㎝ 거리에 고정하여 사용하였다. Fig.1은 실험장치의 주요구성을 나타낸다.

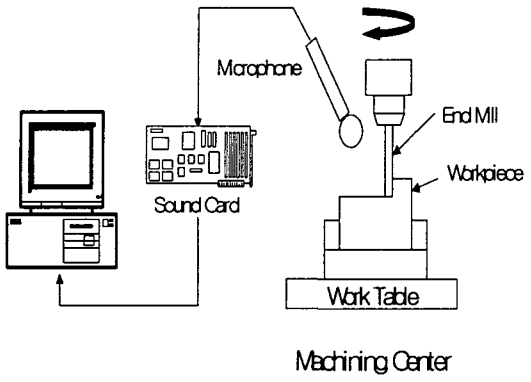



그림 1. 실험장치의 구성
Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

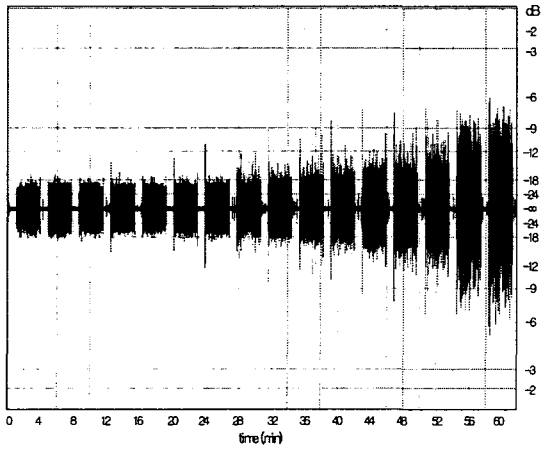



그림 2. 엔드밀작업 전체의 음
Fig. 2. Whole sound wave of end milling

Fig. 2는 ∅12 엔드밀로 공구가 마모될 때까지 연속적으로 절삭한 전체 절삭음들 중에서 한 개를 나타낸 것이다. 가로축은 절삭시간(절삭 길이)을, 세로축은 음압(dB)을 나타내고 있으며 음압이 나타나지 않는 부분은 절삭을 하지 않고 공구가 이동하는 시간이다.

### 3.2.2 가진 주파수(tooth passing frequency)분석

절삭음의 주파수 특성과 마모와 관련이 있는 주파수 대역을 찾기 위한 주파수 분석으로 가장 많이 쓰이는 신호처리기법인 FFT를 사용하였다.

Fig. 3은 Fig. 2의 전체 절삭음 중에서 절삭400mm 간격마다 10초 구간을 발췌하여 FFT 처리한 결과로서 가진 주파수가 나타나는 저주파 0-200Hz 구간의 결과이다. 이 결과에서 보면 가진 주파수가 절삭이 진행됨에 따라 꾸준히 증가하는 형태로 나타남을 확인 할 수 있다. 이를 좀 더 명확히 확인하기 위해 가진 주파수의 정수배의 크기(harmonic 성분)의 주파수 값들을 절삭 길이에 따라 분석한 결과 가진 주파수의 첫 번째 주파수의 크기가 가장 선형적으로 상승하는 것을 확인 할 수 있었다. (5)

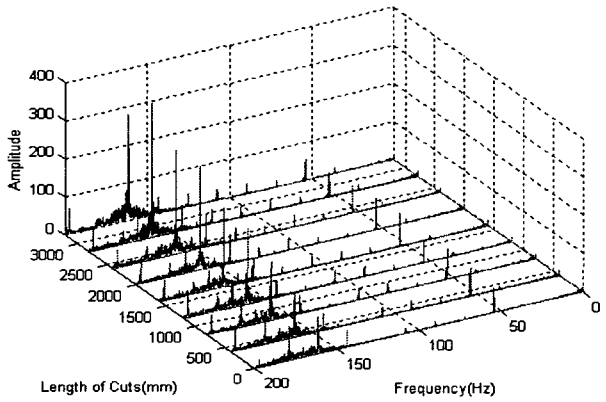



그림 3. 절삭 길이 증가에 따른 절삭음 스펙트럼 (0Hz ~ 200Hz)
Fig. 3. Sound spectrum according to increasing length of cut between 0Hz and 200Hz

Fig. 4는 고조파로 나타나는 가진 주파수의 첫 번째 주파수 성분 크기와 마모량을 비교하기 위해 나타낸 그래프이다. 이 그래프들에서 알 수 있듯이 절삭 길이에 따라서 엔드밀 가진 주파수가 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 절삭 길이에 따라 엔드밀의 여유면 마모(flank wear)값이 커지며 이에 따라 절삭력이 증가되므로 절삭력에 의하여 엔드밀에 휨(deflection)이 발생하며 그 휨은 가진 진동 형태로 나타내게 된다. 그 휨이 커짐에 따라 가진 주파수의 크기가 증가하게 되는 것을 알 수가 있다. (6~9)

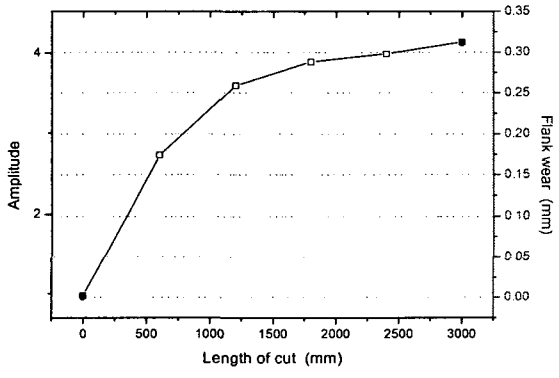



그림 4. 첫 번째 하모닉 성분의 크기와 여유면 마모
Fig. 4. Amplitude of the 1st harmonic and flank wear.

### 3.3 회귀분석에 의한 모델링

다중 선형회귀분석(multiple linear regression)은 종속변수가 두 개 또는 그 이상의 독립변수에 대한 선형함수일 때 이용된다.

본 실험에서는 절삭가공에 영향을 가장 많이 미치는 절삭 속도, 엔드밀 마모, 공구 직경을 변수로 하였으며, 가진 주파수(tooth passing frequency)의 크기를 Y축으로 하고 종속변수로는 각각 여유면 마모값을 (X1), 가진 주파수를(X2), 엔드밀 직경을(X3)로 하였다.

Table 3은 실험값을 나타내고 있으며 이를 이용하여 식(3) 에 적용하면 아래와 같은 식(5)의 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 9 & 1.238 & 164.5 & 114 \\ 1.238 & 0.265052 & 22.9195 & 15.508 \\ 164.5 & 22.9195 & 3107.125 & 2011 \\ 114 & 15.508 & 2011 & 1500 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 86.63 \\ 12.99042 \\ 1569.4075 \\ 1104.96 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이 행렬식을 LU분해법으로 풀면 아래와 같이 미지계수들을 구할 수 있게 되며

$$a_0 = 33.3893$$

$$a_1 = 12.21347$$

$$a_2 = -0.7965661$$

$$a_3 = -0.8592882 \quad (6)$$

일반식으로 표시하면 식(7)과 같이 된다

$$y=33.3893+12.21347*X1-0.7965661*X2-0.8592822*X3 \quad (7)$$

표 3. 다중회귀분석을 위한 실험 값(합금공구강)

Table 3. The experimental data for multiple linear regression(STS)

| | amp.(y) | worm values (x1) | rps (x2) | tool dia.(x3) | $x1^2$ | $x2^2$ | $x3^2$ | x1x2 | x1x3 | x2x3 | yx1 | yx2 | yx3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 7.39 | 0 | 22.5 | 10 | 0 | 506.25 | 100 | 0 | 0 | 225 | 0 | 166.275 | 73.9 |
| | 8.31 | 0 | 18 | 12 | 0 | 321 | 144 | 0 | 0 | 216 | 0 | 149.58 | 99.72 |
| | 8.76 | 0 | 14.25 | 16 | 0 | 203.0625 | 256 | 0 | 0 | 228 | 0 | 124.83 | 140.16 |
| | 8.51 | 0.2 | 22.5 | 10 | 0.04 | 506.25 | 100 | 4.5 | 2 | 225 | 1.702 | 191.475 | 85.1 |
| | 10.28 | 0.111 | 18 | 12 | 0.020736 | 324 | 144 | 2.592 | 1.728 | 216 | 1.14032 | 185.04 | 123.36 |
| | 9.17 | 0.17 | 14.25 | 16 | 0.0289 | 203.0625 | 256 | 2.4225 | 2.72 | 228 | 1.5589 | 130.6725 | 146.72 |
| | 10.2 | 0.251 | 22.5 | 10 | 0.063016 | 506.25 | 100 | 5.715 | 2.51 | 225 | 2.5908 | 229.5 | 102 |
| | 12.51 | 0.25 | 18 | 12 | 0.0625 | 324 | 144 | 4.5 | 3 | 216 | 3.135 | 225.72 | 150.48 |
| | 11.17 | 0.22 | 14.5 | 16 | 0.0484 | 210.25 | 256 | 3.19 | 3.52 | 232 | 2.5234 | 166.315 | 183.52 |
| Σ | 86.63 | 1.238 | 164.5 | 114 | 0.265052 | 3107.125 | 1500 | 22.920 | 15.508 | 2011 | 12.9904 | 1569.408 | 1104.96 |

## IV. 결과 분석

Table 4는 식 (7)에 의하여 계산된 값과 실험에 의하여 나타난 값을 비교하여 나타낸 것이며 Fig. 5는 그 차이를 나타낸 것이다.

표 4. 실험결과 값과 다중회귀분석 모델식과의 비교

Table 4. Comparison of the results of the experiment and multiregression modeling equation(STS)

| tool dia. | MR initial values | ex. initial values | differ.(A) | VB1` | model cal.(B) | ex. values (C) | compensation values (D=C+A) | experiment | | compensation | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | error (B-C) | % | error (B-D) | % |
| Ø10 | 7.39 | 7.297 | +0.093 | 0.1988 | 9.3017 | 8.5062 | 8.5992 | 0.7955 | 8.6 | 0.7025 | 7.6 |
| Ø10 | 7.39 | 7.4431 | -0.0531 | 0.2546 | 9.9832 | 10.2031 | 10.15 | -0.2199 | 2.2 | -0.1668 | 1.7 |
| Ø12 | 8.31 | 8.0509 | +0.2591 | 0.1444 | 10.5033 | 10.2762 | 10.5353 | 0.2271 | 2.2 | -0.32 | 3 |
| Ø12 | 8.31 | 8.4921 | -0.1821 | 0.160 | 10.6938 | 10.5568 | 10.3747 | 0.137 | 1.3 | 0.3191 | 2.98 |
| Ø12 | 8.31 | 7.9289 | +0.3811 | 0.2497 | 11.7894 | 12.536 | 12.9171 | -0.7466 | 6.3 | -1.1277 | 9.57 |
| Ø16 | 8.76 | 8.715 | +0.045 | 0.1697 | 10.3622 | 9.1734 | 9.2184 | 1.1888 | 11.47 | 1.1438 | 11 |
| Ø16 | 8.76 | 8.6341 | +0.1259 | 0.1809 | 10.4990 | 9.999 | 10.1249 | 0.5 | 4.8 | 0.3741 | 3.6 |
| Ø16 | 8.76 | 8.9227 | -0.1627 | 0.2234 | 11.0181 | 11.473 | 11.3103 | -0.4549 | 4.1 | -0.2922 | 2.7 |
| Σ | 57.23 | 56.5611 | 0.6689 | 1.3581 | 73.1326 | 71.2507 | 83.2299 | 4.2698 | 5.8 | 4.4462 | 6.08 |

Table 4에서 공구(엔드밀)의 직경은 3종류(Φ10, Φ12, Φ16)를 사용하였으며 식(7)의 회귀분석 모델링에 의하여 계산한 가진 주파수의 크기값(B)과 실제 실험에서 얻은 값(C)과의 차이를 나타내면 전체평균오차 백분율이 5.8% 임을 알 수 있다. 이는 기존의 다른 방법에 의하여 얻은 결과에 비교하여 보아도 만족할만한 수치라고 생각되어지며 엔드밀의 마모는 순간적으로 짧은 시간에 일어나는 것이 아니기 때문에 이 정도의 오차는 공구의 마모량을 검출하는데 큰 문제가 없을 것이다. 또한 Table 4에서 보면 회귀분석모델에 적용한 초기 실험값과 실험에 의하여 얻은 초기값의 차이가 나타나는데 이를 보상한 후에 오차를 계산하여 보았으나 오히려 오차값이 커지는 현상을 알 수가 있었다. 따라서 초기값 차이에 대한 보상을 하지 않아도 됨을 알 수 있다.

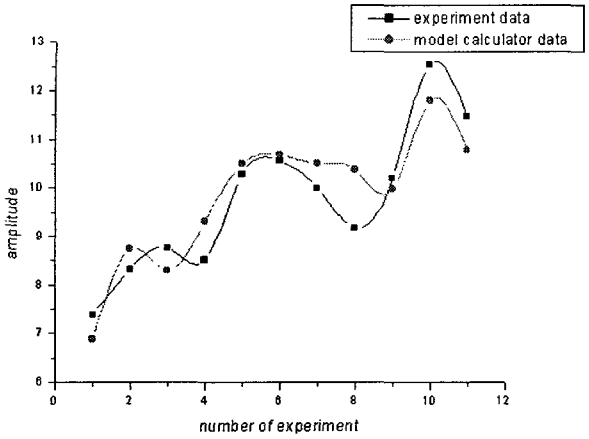



그림 5. 오차비교 그래프

Fig. 5.Compare the modeling formula with experiment data.(STS)

## V. 결 론

절삭가공 공작기계에 대한 자동화가 이루어지기 위해서는 절삭공구가 손상되었을 때 상위의 시스템에 전달하는 기술인 공구 감시기술(tool monitoring technique)은 매우 중요한 역할을 담당하게 된다. 본 논문에서는 이러한 공구의 마모상태를 자동 검출하기 위해 합금공구강재를 사용하여 머시닝센터에서 엔드밀 작업을 수행하는 동안에 절삭음이 발생하는 음향주파수 정보를 이용한 새로운 방법으로 공구 마모를 검출할 수 있는 다음의 결론을 얻었다.

1. 엔드밀 작업시 발생하는 절삭음은 공구마모와 더불어 가진 주파수 (tooth passing frequency)의 크기가 증가하는 현상을 알 수 있었다.

2. 절삭속도, 공구의 직경, 공구 마모값( $VB_1'$ ), 가진 주파수의 크기를 변수로 하는 다중회귀분석에 의하여 합금공공구강(STS)을 절삭할 때 평균오차백분율 5.8%로 검출할 수가 있어 절삭음의 음향주파수 분석에 의한 엔드밀 마모검출 방법의 유효성을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

[1] P. W. Prickett, C. Johns, "엔드밀 공구 감시를 위한 방법", International journal of machine tools & manufacture, pp105-122, 1999.

[2] 윤재봉, "선삭가공의 지능화를 위한 감지 시스템에 관한연구", 한국 과학기술원 박사학위 논문, 1994.

[3] 김철외3인,"공학도를 위한 수치 해석",Mc Graw Hill, pp247-600, 2001.

[4] 이장무외 4인,"MATLAB을 이용한 기계진동 이론과 응용", 사이백미디어, pp1~9, 2001.

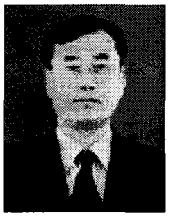
[5] 조택동 ,이창희, 손장영,"음향주파수 분석에 의한 엔드밀의 마모상채 특정에 관한 연구",2002년도 한국음향학회 하계학술발표대회 제 2권 제1호 pp209~212, 2002

[6] 森 和男, "エンドミルの損耗をインプロセスで診斷ツールエンジニア", 37(10), pp105-109, 1996.

[7] Mannam. M.A, Kassin A.A, Ma Jing. "Application of image and sound analysis technique to monitor the condition of cutting tools", Pattern recont. Left (Netherlands) vol.21.no.11 p969-79, 2000.

[8] 番匠谷薫, "穴あけ工具の磨耗と切削音の關係,"목공기계(JPN) 166, p11-14, 1995.

[9] 백대균, "밀링공구의 마모 감시에 관한 연구", 한국공작기계학회지 제 7 권 제 1 호,1998. 2.



**이 창 희**(Chang-Hee Lee)
2003년 2월 충남대 기계설계공학과(공학박사)
1995년 2월 ~ 2004년 현재 구미기능대학 자동화시스템과 부교수
1997년 12월 기계제작기술사
주관심분야 : 음향신호처리, 메카트로닉스, 자동화시스템

**김 낙 철**(Nag-Cheol Kim)
2002년 2월 영남대 전자공학과(공학박사)
1987년 2월 ~ 1996년 2월 한국전기연구소 선임연구원
1996년 2월 ~ 2004년 현재 구미기능대학 전자과 부교수
주관심분야 : 음성신호처리, EMI/EMC