

Time-series 방법으로 모델링한 절삭역학에 의한  
공구마모감시방법

권 원 태

Tool Wear Monitoring Scheme by Modeling of the Cutting Dynamics  
by Time-series Method

Won-Tae Kwon

ABSTRACT

In this work, the imaginary part of the inner modulation transfer function of the cutting dynamics is introduced for tool wear monitoring. Time-series method is utilized to construct the general three dimensional cutting dynamics whose imaginary part of the inner modulation transfer function shows the proportionality to tool wear at the natural frequency of the machine tool dynamics. This model is reduced to single-input single-output model without altering the proportionality characteristics to tool wear and implemented to the dual computer system in which one computer performs measurement while the other calculates the imaginary part of the inner modulation transfer function of the cutting dynamics by the batch least square method. The values of the imaginary part at the natural frequency of the machine tool structure in the cutting direction are compared to the one calculated during machining with a brand new tool to decide the current status of the tool. The experiments shows the relevance of the proposed concept.

**Key Words** : 절삭역학(cutting dynamics), 전달함수(transfer function), inner modulation, outer modulation, ARMA모델, 감쇠효과(damping effect)

기호설명

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| $F_{xt}$ : 트러스트(thrust) 방향 절삭력   | $Z_i$ : 접선방향 inner modulation             |
| $F_{yt}$ : 이송방향 절삭력              | $X_o$ : 트러스트 방향 outer modulation          |
| $F_{zt}$ : 접선방향 절삭력              | $Y_o$ : 이송방향 outer modulation             |
| $b$ : 절삭폭                        | $Z_o$ : 접선방향 outer modulation             |
| $X_i$ : 트러스트 방향 inner modulation | $K_{iyy}$ : 이송방향 inner modulation의 동 절삭계수 |
| $Y_i$ : 이송방향 inner modulation    | $K_{oyy}$ : 이송방향 inner modulation의 동 절삭계수 |

\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 연수연구원 (정회원)

$K_{izy}$  : 접선방향 inner modulation의 동 절삭계수  
 $K_{ozy}$  : 접선방향 inner modulation의 동 절삭계수  
 $a_{xt}$  : 트러스트 방향외란  
 $a_{yt}$  : 이송 방향외란  
 $a_{zt}$  : 접선 방향외란  
 $\eta_{pt}$  : 외란

$H_p$  : 공구 조립부와 outer modulation이 섞인  
 소음역학(noise dynamics)  
 $S_i$  : 소음입력  
 $W_n$  : 공구조립부의 고유 진동수  
 $T$  : 샘플링 시간(Sampling time)

## 1. 서 론

공구마모를 측정하는 방법은 크게 물리적인 변수를 직접측정하는 직접적인 방법과, 힘, 토크, 진동 같은 매개변수를 절삭공구의 물리적 변수에 연관시켜 절삭공구의 상태를 알아내는 간접적인 방법으로 나누어져 있는데, 간접적인 방법이 칩, 윤활유등에 영향을 덜 받으므로 직접적인 방법보다 선호된다. 간접적인 방법에서 가장 중요한 문제는 어떤 절삭조건에서도 마모량에 비례하는 마모지표를 찾아내는 일이다. 비록 몇가지 마모지표가 발견되긴 했지만<sup>(1,2)</sup>, 아직도 절삭공구의 수명을 정확히 예견하는 문제는 풀리지 않았는데 그이유는 공구 마모와 매개변수간의 연관관계를 규명하는 믿을만한 관계식과 on-line으로 사용될 수 있는 신호 해석 처리방법의 부족에 있다.

이 논문에서는 절삭역학의 전달함수의 inner modulation의 허수부분이 새로운 공구마모지표로 소개되었다. 공구마모가 커짐에 따라 공구와 공작물 사이의 접촉면적이 커지는데, 이로 인해 전체 시스템에 부가적인 감쇠효과가 더해지게 된다. 이 늘어난 감쇠효과는 감쇠비의 증가로 나타나고 이 감쇠비의 증가를 측정함으로써 공구 마모량을 예측할 수 있게 된다. 이 방법에 내재하는 문제는 공구 마모량과 감쇠비 증가의 관계가 비선형 이라는 것에 있다<sup>(1,3,4)</sup>. 두 관계가 비선형적으로 나타남으로써 감쇠비의 크기만으로는 공구마모량이 어느 정도인지 정확히 알아내기가 불가능하게 된다.

반면에, 동 절삭계수의 허수부 또한 공구와 공작물 사이의 감쇠비를 반영하는데, 이 계수는 공구의 플랭크 마모량에 거의 선형적으로 비례한다고 알려져 있다<sup>(5)</sup>. 이렇게 잘 알려진 사실에도 불구하고, 이 방법은 기술적인 문제로 실제 플랭크 마모량측정에 이용되지 못하고 있었는데 그것은 이동절삭계수를 알아내기 위해서는 각 주파수마다 2번의 실험이 필요하기 때문이다. 이것에

대한 자세한 설명은 단원2에 주어져 있다. ARMA (Auto Regressive Moving Average) 모델링으로 모든 주파수에서 전달함수를 밝혀내기 위해서는 단 한번의 실험만이 필요하므로 위에 거론된 문제들이 극복되어질 수 있다.

결론적으로, ARMA방법으로 절삭역학의 전달함수의 허수부를 분리해 냄으로써, 감쇠비를 공구마모 감시에 사용함으로써 발생하는 감쇠비와 공구 마모량의 비선형 문제와, 동절삭계수를 공구 감시에 사용할때 발생하는 기술적인 어려움을 동시에 해결할 수 있다.

## 2. 역사적인 배경

절삭력은 inner modulation과 outer modulation과 정의 함으로써 다음과 같이 구해질 수 있다<sup>(5)</sup>.

$$F_{yt} = b (-K_{iyy} Y_i + K_{ooy} Y_o) \quad (1)$$

$$F_{zt} = b (-K_{izy} Y_i + K_{ozy} Y_o) \quad (2)$$

동절삭력계수의 inner modulation 계수의 허수부분 ( $\text{Im}(K_{iyy}), \text{Im}(K_{izy})$ )이 감쇠(damping)에 비례한다는 것은 일반적으로 잘 알려진 사실이다<sup>(5)</sup>. 그리고 공구가 마모될때 공구와 공작물간의 접촉면적이 증가되고 그로 인해 감쇠효과도 증가하게 된다. 결과적으로 공구마모의 증가는 동절삭력계수의 inner modulation 계수의 허수부분의 증가로 나타나게 된다. 그러므로 절삭폭이 주어지고, 절삭력과 공구의 위치( $F_{yt}, F_{zt}, Y_i$  and  $Y_o$ )가 측정 되면 식(1)과 (2)에서 계수  $K_{iyy}, K_{ooy}, K_{izy}, K_{ozy}$ 가 계산되어지고 그 계수의 변화를 감시함으로써 공구마모를 감시할 수 있다.

이러한 사실들이 잘 알려져있음에도 불구하고, 다음과 같은 기술적 문제로 이 계수는 공구 마모감시에 최근까지 이용되지 못하고 있었다. 어느 한 진동수의 동절삭

력계수를 계산하기 위해서는, 그 진동수를 가지는 정현파와 진동으로 공구를 흔들어 주면서 inner modulation (Yi)와 outer modulation (Yo) 및 두 modulation간의 위상차를 측정하는 2번의 실험이 필요하게 된다. 그런데 이 실험에서 두 modulation간의 위상차를 정확히 조절해야 하기 때문에 이방법의 실험은 매우 어려울 뿐 아니라 실제 공구마모 감시에 사용되기란 불가능 하다(6). 이러한 기술적인 어려움을 극복하고 inner modulation의 허수부가 공구마모에 비례함을 공구 마모 감시에 이용한 Wear Index(WI)가 Rao에 의해 소개되었다(2). 이 Wear Index(WI)는 공구홀더의 이송 방향의 첫번째 고유진동주기에서 진폭의 크기에 대한 절삭력의 크기에 대한 절삭력의 크기의 비로 정의된다(WI=절삭력 크기/진폭의 크기). 그러나 이 WI는 inner modulation의 실수부분이 허수부분에 비해 무시할 수 있을 정도로 작을 때는 잘들어 맞지만 그렇지 않을 때는 잘못된 결과로 나타날 수 있다(7). 이렇게 절삭조건에 따라 틀린 결과가 나타날 수 있음에도 불구하고 WI가 이용된 것은 K<sub>iy</sub>의 허수부분이 마모와 비례하는 성질을 이용할 수 있는 다른 적당한 방법이 개발되지 못한 때문이다. 이러한 어려움을 극복하기 위해, ARMA모델링으로 절삭역학의 전달함수를 구해낸 이후 그로부터 공구마모에 민감한 매개변수를 분리하는 방법이 이 논문에서 소개되었다.

### 3. 이산 동 절삭과정 모델

일반적인 동절삭 과정은 동절삭력과 공구-공작물 사이의 상대위차로 나타내어 지는데, 예측하기 어려운 외란이 항상 절삭과정에 주어진다. 이 이산전달함수는 다음과 같이 나타낸다(9).

$$F_t = \underline{K}_i(z)I_t + \underline{K}_o(z)O_t + \underline{K}_a(z)A_t \quad (3)$$

이때

$$F_t = [F_{xt}, F_{yt}, F_{zt}]^T \quad (4)$$

$$I_t = [X_{it}, Y_{it}, Z_{it}]^T \quad (5)$$

$$O_t = [X_{ot}, Y_{ot}, Z_{ot}]^T \quad (6)$$

$$A_t = [a_{xt}, a_{yt}, a_{zt}]^T \quad (7)$$

점침요소는 K<sub>o</sub>(z)에 포함되어 있다고 가정 한다. 매트

릭스 K<sub>i</sub>(z), K<sub>o</sub>(z) 그리고 K<sub>a</sub>(z)는 그리고 소음전달 함수를 각각 나타내는데 다음과 같이 정의 된다.

$$\underline{K}_p(z) = \begin{bmatrix} \underline{K}_{pxx}(z) & \underline{K}_{pxy}(z) & \underline{K}_{pxz}(z) \\ \underline{K}_{pyx}(z) & \underline{K}_{pyy}(z) & \underline{K}_{pyz}(z) \\ \underline{K}_{pzx}(z) & \underline{K}_{pzy}(z) & \underline{K}_{pzz}(z) \end{bmatrix}_{p=i,a,o} \quad (8)$$

여기서 K<sub>p<sub>m</sub>n</sub>(z) (p=i, o, a and m, n=x, y, z)는 z에 대한 유리다항식이다. K<sub>p<sub>m</sub>n</sub>(z)의 물리적인 의미는 다음과 같다.

K<sub>p<sub>m</sub>n</sub>(z) : m=n이면 m방향절삭력과 n방향 modulation의 직접전달 함수  
 m≠n이면 m방향 절삭력과 n방향 modulation의 크로스전달 함수이다.

식(3)으로 절삭역학을 일반적인 3차원 식으로 표시하였는데 이 모델은 절삭중에 일어나는 물리적인 현상을 고려함으로써 2개의 입력과 3개의 출력을 갖는 모델로 줄어들 수 있다. 먼저 고려 되어야 할 것은 공구의 움직임과 칩의 형성과의 관계이다. 접선방향의 움직임은 칩의 두께변화에 대하여 수직방향이므로 움직임은 칩두께 변화에는 별 영향을 미치지 못한다. 그러므로 칩두께 변화에 비례하는 동절삭력의 변화는 접선방향의 움직임에 별로 영향을 받지 않는다. 결과적으로, 접선방향으로의 공구의 움직임과 동 절삭력의 관계를 표시하는 전달함수 K<sub>ixz</sub>(z), K<sub>oxz</sub>(z), K<sub>iyz</sub>(z), K<sub>oyz</sub>(z), K<sub>izz</sub>(z) 그리고 K<sub>ozz</sub>(z)는 영으로 가정해도 무관하다. 두번째 고려되어야 할 사항은 트러스트 방향의 움직임이다. 트러스트 방향의 강성은 공구 홀더의 길이방향 강성이기 때문에 나머지 두방향에 비하여 매우 높고, 결과적으로 그 위치 변화는 상대적으로 매우 작다. 그러므로 위치 변화에 대하여 일어나는 동절삭력 또한 매우 작다. 더우기 이 논문에서의 실험은 2차원 절삭이므로 트러스트 방향의 효과를 무시하게 되면 동 절삭과정은 두개의 입력과 한개의 출력을 갖는 다음과 같은 모델로 표시되게 된다(9,10).

$$F_{pt} = K_{ipy}(z) Y_{it} + K_{opy}(z) Y_{ot} + \eta_{px} : p=x,y,z \quad (9)$$

비록 이 모델이 공구마모 감시를 위한 방법론은 제시해 주지만 이 모델을 좀더 간략한 모델인 SISO모델(single input single output model)로 만들려는 노력이 시도되었는데 그 이유는 다음과 같다. 우선 식

(9)의 전달함수  $K_{ipy}(z)$ 와  $K_{opy}(z)$ 의 매개함수는 최소 오차자승법으로 구해지는데 이과정에서 사용되는 역행렬은 시간이 많이 소요되는 계산법이다. 그리고 매트릭스 역행렬 계산에 소요되는 시간은 매트릭스 크기에 지수적으로 비례한다. 그래서 모델을 두개의 입력과 한개의 출력을 갖는 모델에서 한개의 입력과 한개의 출력을 갖는 모델로 바꾸면 계산시간 또한 지수적으로 줄어든다. 이렇게 3차원 일반식에서 SISO모델로 모델을 줄일수 있는 논리적인 배경은 다음과 같다.

두개의 modulation 전달함수 중에서 inner modulation 전달함수만이 공구마모에 영향을 받는다. 즉 같은 절삭 조건에서 공구마모가 진행되면 오직 전달함수의 inner modulation의 허수부만이 증가하고 다른 부분은 거의 변화가 없다. 게다가 식(1)과 (2)의 물리적 의미를 잘살펴 보면,  $Y_0$ 의 계수  $K_{oyy}$ 와  $K_{ozy}$ 는 절삭력에 대한 칩 두께 변화의 효과를 나타낸다. 하지만 동 절삭력은 칩두께 변화에 비례하는 것이 아니라 전단면 길이의 변화에 비례한다는 것을 고려해 볼때<sup>(2)</sup>, 식(1), (2)의 계수  $K_{oyy}$ 와  $K_{ozy}$ 는 outer modulation의 동절삭력에 대한 효과를 제대로 반영하였다고 보기 어렵다<sup>(10)</sup>. 이런점을 고려하여 한개의 입력과 한개의 출력을 갖는 SISO모델이 고안되었다<sup>(10)</sup>.

식(9)로 나타내어진 2개의 입력과 1개의 출력을 갖는 모델이 outer modulation을 구하기 위해 inner modulation을 1바퀴 위상 이동을 해야하는 반면, 1개의 입력과 1개의 출력을 갖는 SISO모델은 outer modulation을 출력소음의 일부분으로 생각한다. 그래서 outer modulation 절삭역학은 출력소음에서 추출될 수 있으며, inner modulation 절삭역학은 그전처럼 입력으로 공구의 이송방향 위치변환, 출력으로 각 방향의 동 절삭력들을 사용하여 구해낼수 있다. 이렇게 수정된 SISO 모델은 절삭역학과정을 다음과 같이 나타낸다.

$$F_{pt} = K_{ipy}(z) Y_{it} + K_{opy}(z) H_p \zeta_t ; \quad (10)$$

$p = x, y, z$

전달함수에 사용되는 매개변수를 쉽게 구하기 위해 식(10)으로 나타내진 모델을 다른 형태로 나타내는 것이 편리하다. 입력인 modulation들과 출력인 절삭력을 한 매트릭스 안에 넣고 서로 연계 관계가 없는 소음을 소개함으로써, MARMAV (Modified Autoregressive Moving Average Vector) 모델이 다음과 같이 제안되

었다<sup>(11)</sup>.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11}(z) & \Phi_{12}(z) & \Phi_{13}(z) \\ \Phi_{21}(z) & \Phi_{22}(z) & \Phi_{23}(z) \\ \Phi_{31}(z) & \Phi_{32}(z) & \Phi_{33}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{it} \\ Y_{ot} \\ F_{yt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Theta_{11}(z) & 0 & 0 \\ 0 & \Theta_{22}(z) & 0 \\ 0 & 0 & \Theta_{33}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1t} \\ a_{2t} \\ a_{3t} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(10)과 (11)을 비교함으로써  $K_{ipy}(z)$ ,  $K_{opy}(z)$ ,  $\Phi(z)$ ,  $\theta(z)$ 의 관계가 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$K_{ipy}(z) = -\frac{\Phi_{nl}(z)}{\Phi_{nn}(z)} \quad (12)$$

$$K_{opy}(z) H_p = -\frac{\Theta_{nn}(z)}{\Phi_{nn}(z)} \quad (13)$$

여기서  $n=2, 3$  일때 각각  $p=x, y, z$ 이다.

위의 식에서  $\Phi_{ij}$  와  $\Theta_{ij}$ 는 MARMAV모델의 매개변수로서 최소오차자승법으로 구해진다<sup>(11)</sup>.

결과적으로 매개변수  $\Phi_{ij}$  와  $\Theta_{ij}$ 를 구해냄으로서 식(12), (13)에 의해  $K_{ipy}(z)$ ,  $K_{opy}(z)$ 가 얻어지고 또한 inner modulation의 전달함수도 얻어질 수 있게 된다.

#### 4. 공구 마모 감시 계획

공구 마모를 on-line으로 감시하기 위하여, 이동 동 절삭력과 그에 상응하는 공구와 공작물간의 상대위치가 측정되었다. 데이터 값들이 연속적으로 샘플링되어 저장되었고 이 저장된 데이터들이 식(12)와 (13)으로 표현된 SISO모델 계산에 쓰이는 다항식  $\Phi_{nl}(z)$ ,  $\Phi_{nn}(z)$  그리고  $\theta_{nn}(z)$ 들의 매개변수를 계산하는데 쓰인다. 계산 방법으로는 최소오차자승법을 사용, (11)에서 제안된 MARMAV 모델의 매개변수를 계산해 내었다. 이 논문에서는 배치평가절차가 사용되었는데 이방법은 어느 일정한 양의 데이터를 받아 들인후 매개변수를 계산하는 방법이다. 매개변수를 계산하는 동안에는 데이터가 받아들여 지지 못하기 때문에 공구의 상태를 알수가 없다. 하지만 공구마모가 매개변수 계산시간에 비해 매우 천천히 진행되므로 짧은 시간동안 데이터를 무시하는 것은 받아들여질 수 있다. 만일 공구마모가 매우 빠른 속도

로 진행 될 때는 새로운 데이터 쌍이 받아들여질 때마다 매개변수를 계산하는 순환 평가 계산법이 이용 될수 있는데 이 계산법은 다음 새로운 데이터 쌍이 받아들여지기 전에 모든 계산이 끝나야 하므로 매우 빠른 컴퓨터가 필요하다.

매개변수들  $\phi_{nl}(z)$ ,  $\phi_{nn}(z)$  그리고  $\theta_{nn}(z)$ 가 결정되면 식(12)에 의해 inner modulation 전달함수  $K_{ipy}(z)$ 가 결정된다. 계산된 inner modulation 전달함수  $K_{ipy}(z)$ 가 주기에 대한 함수이므로 고유진동 주기에서의 허수부의 크기는  $z=e^{j\omega_n T}$ 를 함수  $K_{ipy}(z)$ 에 대입하여 계산함으로써 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$K_{ipy}(e^{j\omega_n T}) = \text{Re}(K_{ipy}(e^{j\omega_n T})) + j \text{Im}(K_{ipy}(e^{j\omega_n T}))$$

$K_{ipy}(z)$ 의 허수부의 크기가 고유 진동주기에서 공구마모에 비례하기 때문에<sup>(5)</sup>, 공구마모는 우선 공구가 새것일 때  $\text{Im}(K_{ipy}(z))$ 을 계산하고 그 값을 기준값으로 저장한 이후 계속해서 공구가 마모되어 나갈때  $\text{Im}(K_{ipy}(z))$ 을 계산하여 기준값과 비교한다. 현재 계산된  $\text{Im}(K_{ipy}(z))$ 의 값과 기준값과 차이가 어느 정도 이상되면 그것은 공구마모가 허용치 이상이 되었다는 신호이므로 공구는 바뀌어져야 한다. 이 방법의 순서도는 Fig. 1에 주어져 있다.

### 5. 실험장치

공구마모감시를 위한 실험장치가 Fig. 2에 보여져 있다. 이실험에서 이송방향으로 스프링상수가 작고 다른 두방향으로 큰스프링 상수를 갖도록 특별히 고안된 시험 기구가 사용되었다. 이시험 기구는 컴퓨터로 조절되는 전자식 동적 가진기에 연결되어 이송방향의 신호를 증폭시킬 목적으로 사용되었다. 공구와 공작물사이의 상대 위치는 가속도계를 이용 가속도를 측정후 이를 두 번 적분하여 구하여 졌다. 여기서 공작물의 진동은 공구의 진동에 비교하여 매우 적은것으로 가장 무시되었다. 절삭력은 압전식공구동력계를 이용하여 측정되었다. 위치나 절삭력은 주축에 달린 엔코더에 의해 샘플링되었다. 이 실험에서 한 회전당 1024개의 신호가 발생되었는데 이 신호는 분리 회로에 의해 회전당 256개의 신호로 줄어 들었다. 이 실험을 위해 2개의 모토롤라 68000 컴퓨터가 이용되었다. 첫번째 컴퓨터인

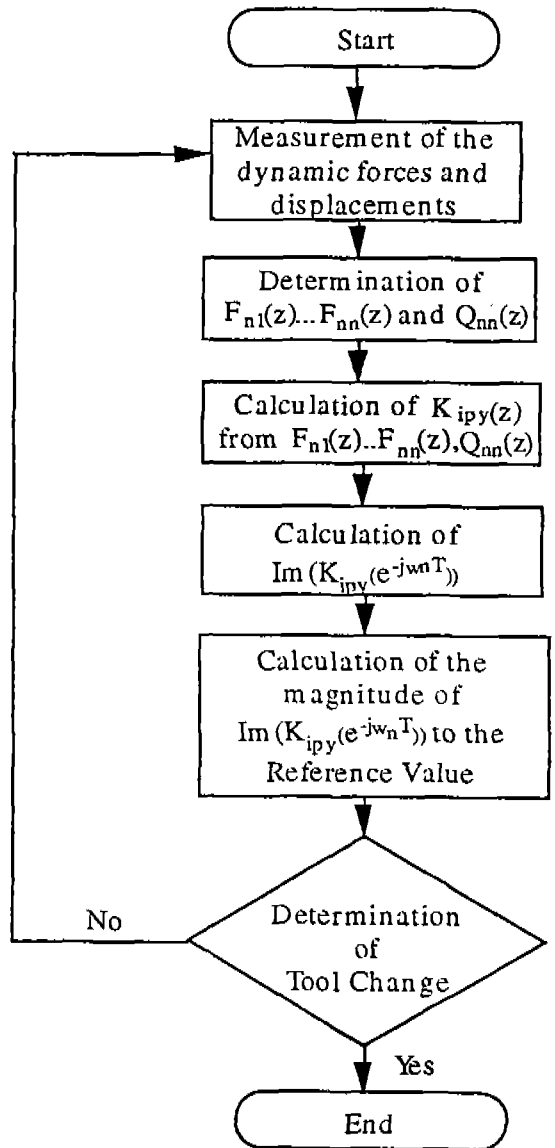


Fig. 1 Tool Wear Monitoring Scheme

MVME110은 전자식 동적 가진기를 작동시키는 불규칙 신호를 발생하는 동시에 절삭력과 공구와 공작물의 상대 위치를 받아들여 저장하는 저장기로 이용되었다. 데이터들은 3mm 두께, 50mm의 외경을 갖는 1008 강철관을 여러가지 절삭속도와 이송속도 하에 가공하면서 얻어졌다. 0도의 경사각과 11도의 여유각을 갖는 KC810터탄 늪 나이트라이드 공구가 실험에 이용되었다. 개발된 시스템의 효율성을 조사하기 위해 2개의 다른 종류의 실

험이 실행되었다. 우선 공구 조립부의 동적 특성을 밝혀 내기 위해 임펄스 응답(impulse response) 실험이 행하여 졌다. 이 실험으로 공구조립부의 고유진동수를 밝혀 낼 수 있다. 다음은 절삭상태 하에서 실험으로 전체 신호증폭을 위해 전자식 동적 가진기로 화이트 노이즈를 전체 시스템에 부과한 상태에서 실험을 행하였다. 이 실험은 제안된 방법의 실행가능성을 조사하기 위해 실시되었다. 세번째 실험에서는 신호증폭을 위한 백색소음의 부과 없이 실제 절삭조건하에서의 공구 마모 탐지 능력을 검사하기 위해 실시되었다.

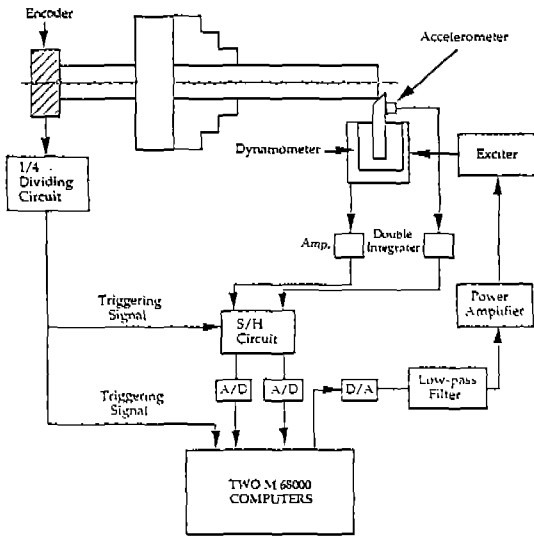


Fig. 2 Experimental Set-up

### 6. 실험과 결과

앞에서 소개된 동절삭역학의 계수의 inner modulation의 허수부가 공구마모에 비례한다는 사실은 오직 공구조립부의 고유진동주기에서만 존재하므로(2), 공구조립부의 고유진동주기를 찾는 것이 급선무이다. 공구는 안정절삭중에도 공구의 경사면에 불규칙한 절삭력 때문에 공구조립부는 고유진동 주기로 항상 떨고 있게 된다. 공구조립부에서 3가지 주요 모드들의 떨림이 존재하는데 그것은 이송방향, 접선방향 그리고 뒤틀림 방향의 떨림이다(8). 이송방향의 떨림이 가장 자유롭고 또한 계속되는 이송으로 그 방향 절삭력이 충분히 주어지므로 이송방향의 떨림이 가장 크게 나타난다. 두번째 모드는 접선방향으로 나타난다. 깎여지는 칩의 탄성에 의한

압력 때문에, 공구절삭날은 접선방향으로는 비교적 진동이 적다. 세번째 모우는 뒤틀림 방향으로 보통 너무 약해서 이 신호로 마모를 감지하기는 불가능하다(8). 절삭역학의 특성을 나타내기 위해서는 단지 이송방향 절삭력과 공구의 위치만이 이용되는데 그이유는 접선방향의 공구의 위치변화는 칩의 두께변화와 무관하고, 칩의 두께변화만이 이동방향 절삭력의 변화를 가져오기 때문이다. 전체 시스템을 좀더 간략하게 하기 위하여 특별제작된 시험기구가 실험에 사용 되었는데, 이 시험기구는 이송방향의 강성을 줄여 그 방향의 공구의치변화를 크게 하고 다른 방향의 위치변화를 무시하게 만든다. 이송방향으로 스프링 상수를 작게한 이유는 그 방향으로 가진기를 이용하여 화이트 노이즈를 주어 절삭력과 위치를

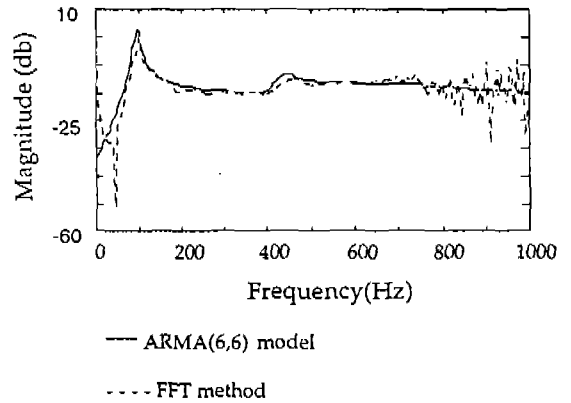


Fig. 3 Transfer Function of the Test-Rig in Feed Direction

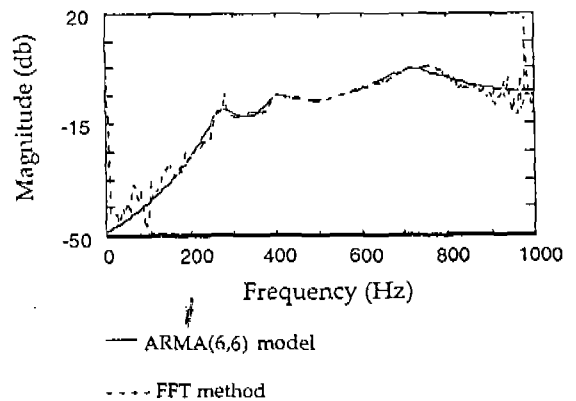


Fig. 4 Transfer Function of the Test-Rig in Cutting Direction

확대함으로써 작은 변화도 놓치지 않고 감시하기 위해서이다. 시험기구를 선반에 설치함으로써 공구조립부 역학이 간단해지고 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)와 ARMA 방법으로 해석하여 얻는다. FFT와 ARMA 방법으로 얻어진 전달함수가 Fig. 3과 4에 비교 분석되어 있다. Fig. 3과 4에서 볼 수 있듯이 두 방법으로 얻어진 전달함수는 예상대로 서로 매우 비슷한 형태를 보여주었다. ARMA방법으로 밝혀진 이송방향과 절삭방향(또는 절삭방향)의 가장 지배적인 고유진동주기는 94.9Hz와 271.8Hz이고 이것은 Fig. 3, 4에 잘 부합한다.

· 절삭상태하에서 공구마모 감시실험을 위해서 한번도 사용되지 않은 새 공구가 선반에 설치되어 그 공구가 파괴되거나 완전히 닳아 질때까지(기준값 0.5mm 플랭크 마모) 절삭이 시행되었다. 512개의 데이터값들이 A/D컨버터를 통해 MVME110 컴퓨터에 수집된 이후 MVME133 컴퓨터로 보내져서 매개변수들이 계산되었다. 이 매개변수들은 절삭역학의 절단함수를 계산하는데 이용된다. 이 전달함수를 이용하여 현재의 공구의 마모상태가 곧바로 밝혀질 수 있으나 에러를 줄이기 위하여 50번의 계산을 수행한뒤 그 평균값을 이용 현재의 공구마모상태를 밝혀 내었다. 평균값을 구하기 위한 절차는 다음과 같다.

- 1) 매개 변수 계산을 50번 반복한 이후 50개의 매개 변수군을 저장한다.
- 2) 첫번째 매개변수군에서 전달함수를 구한뒤 이송방향과 절삭방향의 고유진동수에서 허수부의 값을 계산한다.
- 3) 2번째의 단계를 50개의 매개변수군에 대하여 실시한다.
- 4) 2, 3번째 단계에서 얻어진 50개의 값의 평균값을 구한다.

이 절차는 on-line으로 수행되었는데 매개변수 1군을 계산하는데 6.4초 걸리고 50개군을 계산하는데 5분 20초가 소요된다. 평균값을 계산하고 그 결과를 터미널에 보여주는데 2초가 더 걸린다.

첫째 실험은 공작물을 0.0127mm/rev.의 이송속도 3mm절삭폭, 300RPM의 절삭속도로 가공하면서 행하여졌다. 그 결과는 Fig. 5에 보여졌다. 이송방향과 절삭방향에서의 고유진동수에서의 전달함수의 허수부의 크기가 그림에 보여졌는데 그림에서 알 수 있듯이 절삭방향 고유진동수에서의 값이 공구마모에 비례한다.

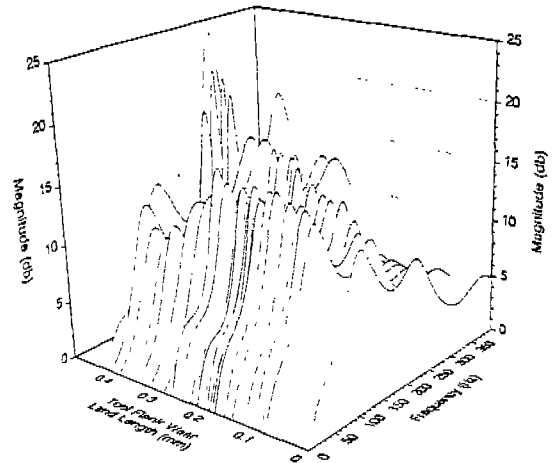


Fig. 5 Imaginary Part of the Inner Modulation of the Transfer Function under the Cutting Condition of 0.0127mm Feed Rate, 300rpm, 3mm Cutting Width

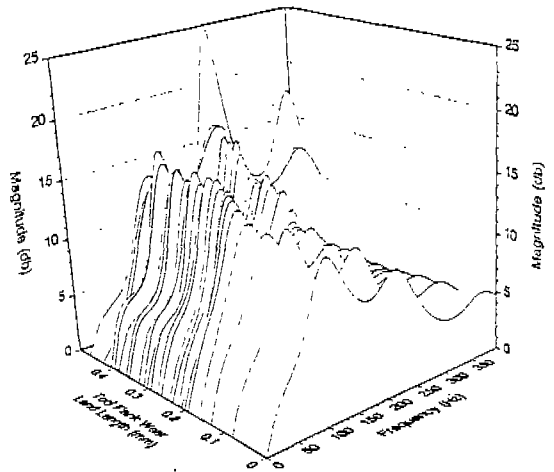


Fig. 6 Imaginary Part of the Inner Modulation of the Transfer Function under the Cutting Conditions of 0.0254mm Feed Rate, 300rpm, 3mm Cutting Width

다음 실험에서는 다른 절삭조건을 그대로 인체 이송 속도만 0.0254mm/rev으로 증가되었다. 또 다시 이송방향과 절삭방향의 고유진동수에서의 절삭함수의 허수부의 크기가 조사되었는데 Fig. 6에서 보여지듯이 이 값들이 커져감이 보여졌다. 이번에는 절삭속도의 영향을

조사하기위해 다른 절삭조건은 그대로 두고 절삭속도만 300rpm에서 400rpm으로 증가하였다. 이 조건 아래에서는 공구의 플랭크마모가 0.12mm가 된 이후 공구가 파괴되었다. 공구가 파괴되기 직전까지의 전달함수의 허수부의 값이 Fig. 7에 주어졌다. 이전 실험에서와 마찬가지로 절삭방향에서의 허수부의 크기가 공구마모에 비례하여 커졌다.

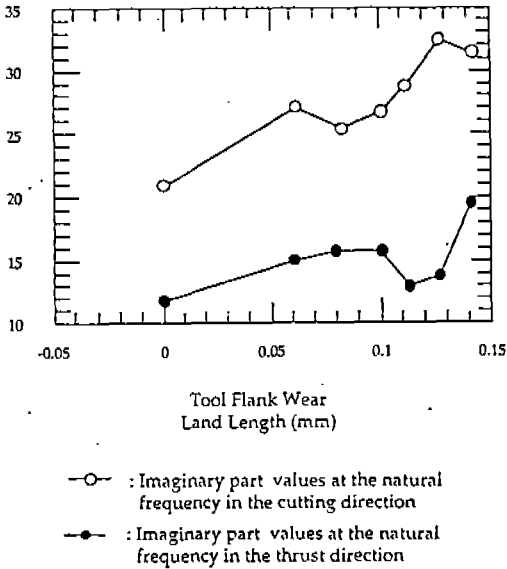


Fig. 7 Imaginary Part of the Inner Modulation of the Transfer Function under the Cutting Conditions of 0.0254mm Feed Rate, 400rpm, 3mm Cutting Width

여기서, 이제까지 얻어진 결과의 신뢰성이 검토되었다. 한 값을 구하기 위해 50개 값들의 평균값이 취해졌는데 이 값들의 평균값과 표준편차는 다음의 식으로 구해질 수 있다.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} X(i) \tag{15}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} [X(i) - \bar{X}]^2} \tag{16}$$

여기서 X는 평균값, N은 데이터갯수, 그리고 s는 표준편차이다. Fig. 8에서 평균값과 표준편차가 보여졌는데 이때의 절삭조건은 이송속도가 0.0127mm/rev., 속

도가 300rpm, 그리고 3mm의 절삭폭이다. 이 그림에서 알수 있듯이 평균값은 공구마모가 증가함에 따라 같이 커지고,  $X \pm \sigma$ 로 나타내지는 폭은 별로 넓지 않아 값들이 어느 일정한 범위내에 있음을 알수 있다. 그러므로 이 평균값은 50개의 값들의 대표값으로 받아들여질 수 있다. 제안된 모델이 과도한 절삭조건에서조차 작동하는가를 검사하기위해 0.05588mm/rev. 이송속도, 3mm 절삭폭 그리고 300rpm에 실험이 행하여 졌다.

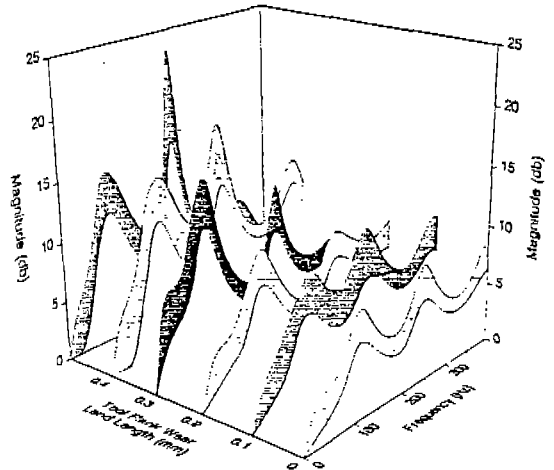


Fig. 8 Deviation of the Imaginary Part of the Transfer Function under the Cutting Condition of 0.0127mm/sec. Feed Rate, 300rpm, 3mm Cutting Width

Fig. 9에서 보여졌듯이 이런 조건에서도 절삭방향 고유진동수에서 전달함수의 허수부가 공구마모에 비례함이 보여졌다. 이전까지의 실험에서는 가진기가 화이트 노이즈를 공구조립계에 부과하면서 행하여졌는데 그 목적은 실험중 발생되는 신호를 증폭하기 위해서였다. 이 방법이 실제 절삭에는 사용될 수 없지만 제안된 방법의 적합성을 조사하는 데는 유용하다. 실제 절삭조건에서 주어진 방법의 제대로 작동하는 가를 알아보기 위하여 가진기를 없애고 이송속도 0.0127mm/rev, 절삭속도 300rpm으로 실험을 다시 행하였다.

전과 동일하게 50개의 매개변수군이 제안된 이후 이 값들로 구해진 전달함수의 평균값들이 Fig. 10에 보여져 있다. 비록 가진기가 사용되지 않았지만 전달함수의 허수부분이 공구마모에 비례하여 증가하는 경향은 변하지 않았다.



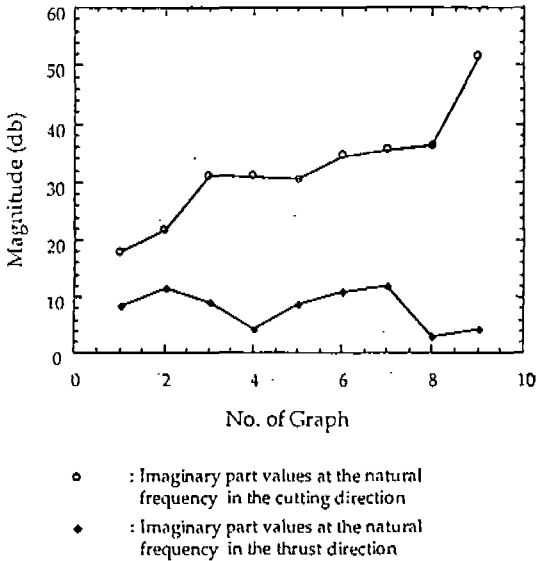


Fig.9 Imaginary Part of the Inner Modulation of the Transfer Function at the Natural Frequencies under Cutting Condition of 0.0058mm Feed Rate, 400rpm, 3mm Cutting Width

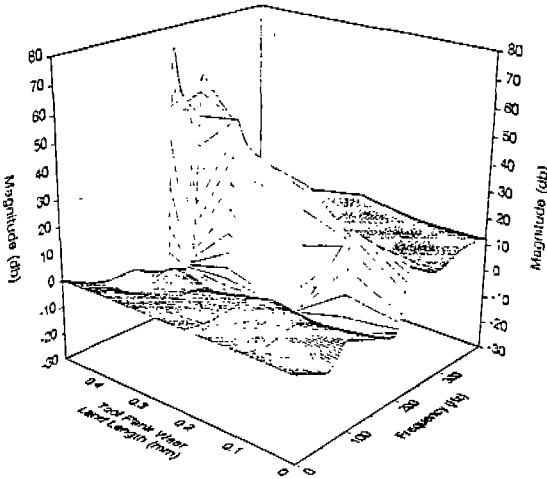


Fig.10 Imaginary Part of the Inner Modulation of the Transfer Function (0.0254mm Feed Rate, 300rpm, 3mm Cutting Width, with a Naturally Worn Tool, without Shaker)

### 7. 결 론

- 1) 동절삭계수의 허수부분이 공구마모에 비례하다는 알려진 사실을 이용하기 위해 Time series방법이 사용되었다.
- 2) 일반적인 3차원절삭모델을 먼저 소개한 이후 계산시간을 줄일 목적으로 이 모델을 SISO모델로 축소시켜 ON-line으로 공구마모 감시에 사용하였다.
- 3) 모델을 축소시켜도 동절삭계수의 허수부분이 공구마모와 비례하는 성질이 변하지 않음을 이론적으로 증명하였다.
- 4) SISO모델이 두개의 컴퓨터를 이용하는 시스템이 적용되어 화이트 노이즈를 가진기로 부과시켰을 때의 실험이 행하여졌는데 두 실험에서 다 잘 작동됨이 보여졌다.
- 5) 아주 심한 절삭조건하에서도 주어진 방법의 잘 작동됨이 보여졌다.

### 참고문헌

1. Bandyopadhyay, P., Evers, M. G., Ren, H. and Wu S.M. "A feasibility Study of On-line Drill Wear Monitoring by DDS Methodology", Inter. Jour. of MTRD, Vol. 26, No. 3, pp.245~257, 1986
2. Rao, S.B "Tool Wear Monitoring through the Dynamic of Stable Turning", Trans. of ASME, Jour. of Eng. for Ind., Vol. 108, pp.183~190, Aug. 1986
3. Pandit, S. M. "A Data Dependent Systems Approach to Stochastic Tool Life and Reliability", Trans. of ASME, Jour. of Eng. for Ind., Vol. 100. pp.318~322, 1978
4. Pandit, S. M. and Kashou, S. "A Data Dependent Systems Strategy of on-line Tool Wear Sensing", Trans. of ASME, Jour. of Eng. for Ind., Vol. 104, pp.217~223, Aug. 1982
5. Tlusty, J. "Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics", Annals of CIRP, Vol. 27/2, pp.583~589, 1978
6. Tlusty, J. and Goel, B. S. "Measurement

- of the Dynamic Cutting Force Coefficients", Proceedings 2nd NAMRC, pp.649~664, 1974
7. Kwon, Won-Tae "Tool Wear Analysis and Monitoring", Northwestern University 박사 학위 논문, 1992
  8. Pandit, S. M., Suzuki, H., and Khang, C. H. "Application of Data Dependent Systems to Diagnostic Vibration Analysis" Trans. of ASME, Jour. of Mech. Des., Vol. 102, pp.233~241, 1980
  9. Tang, x. G., Eman, K. F. and Wu., S. M. "Analysis of Three Dimensional Cutting Process Dynamics", Trans. of ASME, Jour. of Eng. for Ind., Vol. 107, No. 4, pp.336~342, 1985
  10. Ahn, T. Y. "Dynamic Cutting Process Identification by Dynamic Data System(DDS) Models", Ph. D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1983
  11. Pandit, S. M. "Time Series and System Analysis with Application", Wiley, 1983