

# 엔드밀 가공시 chatter 모델링과 진단에 관한 연구

김영국\*, 윤문철\*\*, 하만경\*\*, 심성보\*\*

## A Study on the Modeling and Diagnostics on Chatter in Endmilling Operation

Young-Kook Kim\*, Moon-Chul Yoon\*\*, Man-Kyeong Ha\*\*, Seong-Bo Sim\*\*

### ABSTRACT

In this study, the static and dynamic characteristics of endmilling process were modelled and the analytic realization of chatter mechanism was discussed. In this regard, We have discussed on the comparative assessment of recursive time series modeling algorithms that can represent the machining process and detect the abnormal machining behaviors in precision endmilling operation. In this study, simulation and experimental works were performed to show the malfunctional behaviors. For this purpose, new recursive algorithm(RLSM) was adopted for the on-line system identification and monitoring of a machining process, we can apply these new algorithms in real process for detection of abnormal chatter. Also, The stability lobe of chatter was analysed by varying parameter of cutting dynamics in regenerative chatter mechanics.

**Key Words** : ARMA(자동회귀이동평균), RLSM(순환최소자승법), Diagnostics(진단), Vibration Mode (진동모우드), Regenerative Chatter(재생채터)

### 1. 서론

엔드밀 가공은 복잡한 모형이나 가공하기 어려운 표면을 가공하는데 효과적이며 비행기의 동체나 금형 캐비티 제작에 폭넓게 쓰이고 있으며, 고능률과 고정밀도의 부품 생산시 그 이용범위가 날로 증가하고 있다. 그러나, 공구형상 때문에 강성이 약하고 일반적인 가공오차가 크며, chatter가 발생하기 쉽다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 가공 메커니즘을 해석하고 가공중의 절삭력과 chatter 발생의 유무 혹은, 가공부품의 가공오차를 사전에 추정하는 것이 중요하다. 그러므로, 적절한 chatter 모델이 제안되어야 고정밀도 가공 시뮬레이션을 실현할 수가 있다. 또한, 절삭가공과정에서 발생하는 여러 가지 이상상태를 검출 및 분석하는

데에 있어서 절삭력은 여러 가지 절삭현상들을 가장 폭넓게 내포하고 있으므로 공구의 마멸 및 파손 검출에 필수적인 연구대상이 되어왔다. 엔드밀링에 대한 연구에 많은 논문이 있으나 주요한 것을 정리하면 우선, B. K. Fussel과 K. Srinivasan<sup>1)</sup>은 축방향과 반경방향의 절삭깊이 및 이송 등의 절삭조건들을 변화시켜서 여러 경우들에 대해 유용한 모델의 타당성을 실험적으로 고찰하였다. S. C. Lin과 R. J. Yang<sup>2)</sup>은 날당 이송, 절삭속도, 절삭깊이, 플랭크 마멸량 등을 고려한 절삭저항과의 관계를 제시하였다. 본 논문에서는 엔드밀의 chatter에 대한 연구로 기존연구와 달리 실험적 모델링 기법인 자동회귀이동평균(ARMA : Auto Regressive Moving Average) 모델에 의한 ARMA 스펙트럼 분석으로 chatter주파수를 감지하고 절삭조건에 따른 특성을 분석하고 엔드밀 주축의 회전속도에서 채

\*) 2001년 3월 6일 접수

\* 부경대학교 기계공학부 대학원

\*\* 부경대학교 기계공학부

터발생의 안정 및 불안정 영역을 구하여 채터를 피할 수 있는 절삭조건 선택법과 공작기계의 설계 데이터와의 관계를 분석 채터를 피할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 관련이론

### 2.1 RLSM 모델링 및 스펙트럼 분석

가공시스템의 데이터의 수학적 모델링과 실시간으로 실험적인 데이터를 수집하여 시계열 모델링을 하여 이 모델의 모델링 변수의 거동으로 그 가공시스템의 특성을 판단하고, 가공상태를 진단하는 것이 필요하다. 본 논문에서 사용한 모델링기법으로는 ARMA 모델링기법 중 RLSM(Recursive Least Square Method) 모델링을 이용하였고, 이 절삭시스템의 가공현상을 on-line 감지를 위한 진단 시스템을 구성하였다. 이 방법으로 가공상태의 특성 및 이상현상을 확인할 수 있도록 하였다. 이때 시계열 모델링을 위해 공구동력계의 절삭력 신호를 사용하였다. 또한, RLSM 알고리즘을 이용하여 ARMA 스펙트럼 분석을 함으로써 이상상태를 감지하였다. RLSM 알고리즘은 선삭, 보링, 드릴링, 연삭, 특수가공 등 제거가공 분야에서도 적용가능하고, 본 논문에서 사용된 절삭력 신호 이외에 다른 신호를 이용하여도 시스템의 온라인분석이 가능하다. 일반적으로 밀링가공 시스템은 다음과 같은 이산형태의 ARMA 시계열 모델로 나타낼 수 있고, 자동회기, 이동평균 차수를 각각 n, m 이라고 하면, ARMA(n, m) 모델은 다음과 같다.<sup>3)</sup>

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}) x(t) = (1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}) a(t) \quad (1)$$

여기서,  $a_i, i=1, 2, \dots, n$  : 자동회기변수

$b_i, i=1, 2, \dots, m$  : 이동평균변수

$z^{-1}x(t) = x(t-1), z^{-1}$  : 지연연산자

$a(t)$  : 백색잡음,  $E[a(t)] = 0$

$E[a(t)a(t-u)] = \sigma_a^2 \delta_{tu}$   $\delta_{tu}$  : Kronecker  $\Delta$  함수

ARMA 모델링법 중에서 스펙트럼을 분석하기 위한 방법에는 on-line 방법과 off-line 방법이 있는데 on-line 감지를 위한 스펙트럼 분석법으로 RLSM(순환최소자승법)을 사용하였다. 간단히 정

리하면, 시계열 신호 데이터  $x(t)$ 는 차수(n, m)의 ARMA 모델로 모델링할 수 있고, 일반적인 순환최소자승법의 형태인 RLSM 알고리즘은 다음과 같이 정의된다.<sup>3)</sup>

$$\varphi(t) = [-x(t-1), \dots, -x(t-n), e(t-1), \dots, e(t-m)]' \quad (2)$$

$$e = x(t) - \varphi'(t)\theta(t-1) \quad (3)$$

$$R(t) = (I - \frac{R(t-1)\varphi(t)\varphi'(t)}{\lambda(t) + \varphi'(t)R(t-1)\varphi(t-1)}) \frac{R(t-1)}{\lambda(t)} \quad (4)$$

$$K(t) = \frac{R(t-1)\varphi(t)}{\lambda(t) + \varphi'(t)R(t-1)\varphi(t-1)} \quad (5)$$

$$\theta(t) = \theta(t-1) + K(t)e(t) \quad (6)$$

$$e(t) = x(t) - \varphi'(t)\theta(t) \quad (7)$$

단,  $\lambda(t+1) = \lambda\lambda(t) + (1-\lambda)$  ( $\lambda = 0.99, \lambda(0) = 0.95$ )

여기서, 파라메타  $\lambda(t)$ 는 망각지수이고, 일반적으로 그 크기를 1에 가깝게 한다. 알고리즘의 초기 조건은 상수  $a$ 가 상당히 큰 임의의 수치이고, R 매트릭스는 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$R(0) = aI, \theta(0) = 0, \varphi(0) = 0$$

ARMA 모델링 상수를 RLSM 방법에 의해 구한 후 모델의 전달함수 식에 의하여 스펙트럼을 얻을 수 있다. 스펙트럼을 Direct form 형태로 표현하면 다음과 같다.<sup>3)</sup>

$$H(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (8)$$

식에서  $z = e^{j\omega T}$ 를 대입하여 파워스펙트럼과 위상 스펙트럼을 구할 수 있다.

### 2.2 채터 해석

Fig. 1에서 밀링커터 1개의 날이 면을 깎고, 새로운 날이 와서 깎을 때는 공구와 공작물 사이에 진동에 의해서 동적인 칩두께의 성분으로 표현될 수 있고, x, y축의 2축의 모우드 중 x축은 다시 깎여 버리므로 공작물의 표면에는 영향을 주지 않는다고 할 수 있다. 따라서, y축만의 1자유도의 2차 시스템의 모델로 단순화시켜도 된다. 따라서, 이

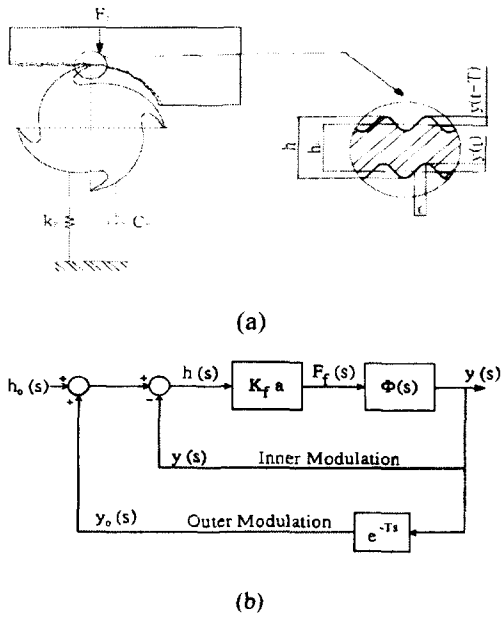


Fig. 1 Wave generation(a) and block diagram of chatter dynamics(b)

경우의 공작물과 공구사이의 절삭동력학은 동적인 절삭력의 변화가 가해지는 2차 시스템으로 표현할 수 있다. 엔드밀의 회전이 시작할 때 현재의 절삭날이 가공되는 절삭깊이를  $y(t)$ , 이전 날은  $T$  시간 이전에 절삭하였다라고 그때의 절삭깊이를  $y(t-T)$  라 하면, 이 모델의 동적 칩두께(dynamic chip thickness)는 엔드밀 가공의 경우 다음의 식으로 표현된다.

$$h(t) = h_0 - [y(t) - y(t-T)] \quad (9)$$

채터 진동의 안정성에 대해서 Tobias, Tlusty 그리고, Merrit 의 선형 동력학 모델에 의해서 분석되어지고 있다. 엔드밀의 날과 공작물에서의 절삭동력학은 다음과 같은 2차 방정식으로 표현된다.

$$m_y y(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) = F(t) = K_f a h(t) = K_f a [h_0 + y(t-T) - y(t)] \quad (10)$$

여기서, 만약 연속되어 가공되는 두 절삭날의 상대위치가  $y(t) - y(t-T) > h_0$  이 되면, 동적인 칩두께와 절삭력은 음이 아니고, 0 이 된다고 할 수 있

다. 식(9)를 라플라스 변환하여 정리하면,

$$h(s) = h_0 - y(s) + e^{-sT} y(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1)y(s) \quad (11)$$

이고, 엔드밀 절삭력모델의 전달함수는 다음과 같다.

$$\Phi(s) = \frac{y(s)}{F_f(s)} = \frac{\omega_n^2}{k_y (s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (12)$$

$y(s)$ 를  $h(s)$ 로 대입하여 정리하면 전달함수는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{h(s)}{h_0(s)} = \frac{1}{1 + (1 - e^{-sT}) K_f a \Phi(s)} \quad (13)$$

이 전달함수의 특성방정식에 의해 안정성을 판별할 수 있고, 즉,

$$1 + (1 - e^{-sT}) K_f a \Phi(s) = 0 \quad (14)$$

에서 임계경계영역을 구하기 위한 특성방정식은 다시 다음과 같이 된다.

$$1 + (1 - e^{-j\omega_c T}) K_f a_{lim} \Phi(j\omega_c) = 0 \quad (15)$$

여기서,  $a_{lim}$  은 채터 진동에서 안정 경계영역의 축 방향의 절삭깊이이고, 이 조건의 특성방정식은 다음과 같다. 단, 전달함수  $\Phi(j\omega_c) = G + jH$  이다.

$$\{1 + K_f a_{lim} [G(1 - \cos \omega_c T) - H \sin \omega_c T] + j \{K_f a_{lim} [G \sin \omega_c T + H(1 - \cos \omega_c T)]\} = 0 \quad (16)$$

이 조건을 만족하기 위해서는 실수부와 허수부가 각각 0 이어야 한다. 우선 허수부가 0 이어야 하는 조건을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$G \sin \omega_c T + H(1 - \cos \omega_c T) = 0 \quad (17)$$

$$\tan \psi = \frac{H(\omega_c)}{G(\omega_c)} = \frac{\sin \omega_c T}{\cos \omega_c T - 1}$$

또한, 전달함수의 위상차  $\psi$ 는 식(17)로 주어진다.  $T$  시간 이전에 지나간 공구날과 현재날과의 위상차는 주축의 회전속도 ( $n$  [rev/s])와 채터 주파

수 ( $\omega_c$ )와의 사이에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_c [Hz] \cdot T [s] = \frac{f_c}{n} = k + \frac{\epsilon}{2\pi} \quad (18)$$

여기서,  $k$  는 각각의 안정영역의 경계를 나타내는 채터 로브를 나타내는 정수이고,  $\epsilon/2\pi$ 는 완성되지 못한 웨이브 위상차를 나타내는 부분이다. 각도  $\epsilon$ 는 내·외부형상의 위상차로 표현된다. 만일  $\epsilon/2\pi$ 가 정수이면, 이전 날과 현재 날에 의해 생성되는 칩 표면의 내·외부 웨이브의 위상차는 0 또는  $2\pi$ 의 배수가 된다. 이 경우, 내부  $y(t)$ 와 외부  $y(t-T)$ 웨이브는 서로 평행하다. 내·외부 웨이브의 위상차는  $\epsilon = 3\pi + 2\psi$  이다. 날당 절삭주기 ( $T[s]$ )와 회전속도 ( $n[rev/min]$ )의 상관관계는 날수가  $Z$  라 하면 다음과 같다.

$$T = \frac{2k\pi + \epsilon}{2\pi f_c} \rightarrow n = \frac{60}{ZT} \quad (19)$$

또한, 특성방정식의 실수부를 0 으로 하여 경계조건을 구하면 경계영역을 나타내는 축방향 절삭깊이 식  $a_{lim}$ 은 다음과 같다. <sup>4)</sup>

$$a_{lim} = \frac{-1}{K_f G [(1 - \cos \omega_c T) - (H/G) \sin \omega_c T]} \quad (20)$$

### 3. 실험 및 실험방법

실험에 사용된 엔드밀은 직경이 12 mm인 태화사의 4날 고속도강이고 overhang 은 30 mm로 하였고 공작물재료는 기계구조용강 SM45C를 사용하였다. 절삭실험에서 사용한 밀링머신은 Fig. 4 와 같고 최대회전수가 1400 rpm까지 가능한 대우중공업의 만능밀링 머신을 사용하였고, 절삭력을 측정하기 위해 사용된 공구동력계는 Kistler ( 4 - Component Dynamometer : Model Type 9272 ) 사의 공구동력계를 사용하였다. 절삭동력 신호를 증폭하기 위해서 Charge Amp.를 사용하여 Cassette Data Recorder ( TEAC MR-10 )에 저장하였고, 이 절삭력 신호를 A/D 변환기를 통하여 PC에 데이터를 저장하여 시계열 모델링하는데 사용하였으며, 또한, Cassette Data Recorder 에서 Oscilloscope (HUNG CHANG 5504 40MHZ)를 통하여 신호를 보면서 적당한 실험데이터를 처리할 수 있도록 절삭실험장치를 구성하였다. Fig. 2. 3. 4 는 실험을

하기 위하여 사용된 장비를 보여주고 있다.

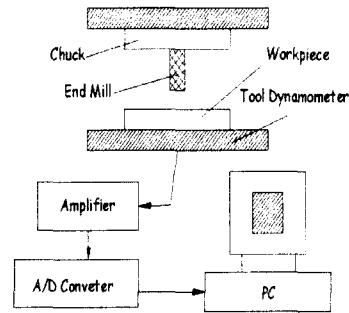


Fig. 2 Layout of cutting experiment

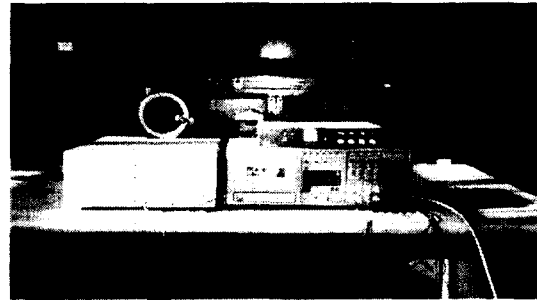


Fig. 3 Setting of equipment, charge amp., cassette data recorder, oscilloscope



Fig. 4 Setting of experimental equipment

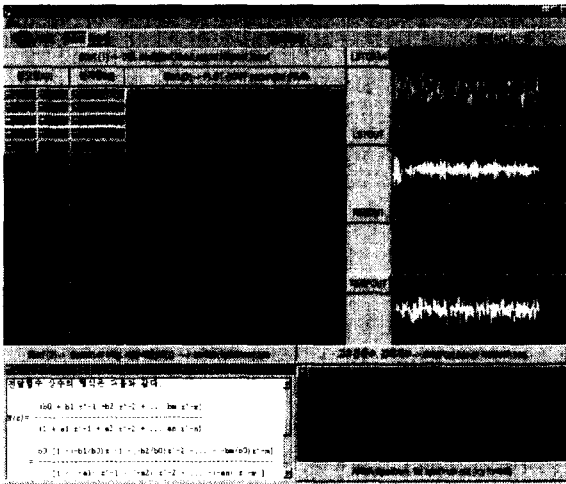


Fig. 5 Configuration of main screen and menu for the data analysis

Fig. 5는 컴퓨터에서 절삭력신호를 받아 처리한 프로그램의 메뉴를 보여주고 있다. 공구동력계(Kistler type 9272)에서 나오는 절삭력 신호를 A/D변환기(Data Translation : DT3001)로 보내어 PC에서 신호를 분석한 것인데, 원래의 데이터를 본 논문의 알고리즘으로 분석하여 파라메타거동과 스펙트럼을 처리할 수 있도록 DTVEE 소프트웨어로 전과정을 on-line 처리할 수 있도록 하였다. DTVEE 소프트웨어의 내부 구성법을 사용하면 전체의 데이터 입출력 및 처리가 쉽게 분석할 수 있다.

#### 4. 해석결과 및 고찰

##### 4.1 절삭력 신호 분석

본 연구에서는 RLSM 알고리즘으로 스펙트럼을 구하기 위해 엔드밀 밀링가공시 절삭력 신호데이터를 사용하였다. 본 논문에서는 데이터 수를 1 kHz의 샘플링 주파수로 하여 1024개의 데이터를 수집하여 이 데이터를 가공하여 RLSM 순환 ARMA 스펙트럼을 구하여 비교 분석하였다.

Fig. 6 (a)는 공구동력계의 고주파 주파수 성분의 크기가 뚜렷한 신호를 보여준 것으로서 실험의 조건이 회전수가 520 rpm, 절삭폭이 1.0 mm의 경

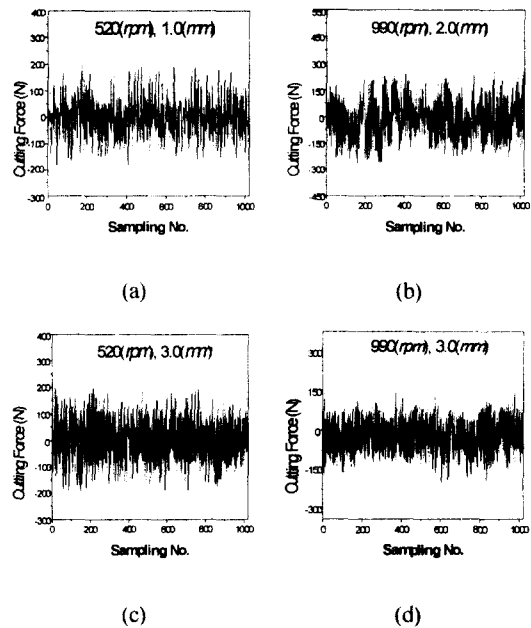


Fig. 6 Cutting force signal for experiment

우로 채터가 거의 발생하지 않는 신호이고, (d)는 조건이 회전수가 990 rpm, 절삭폭이 3.0 mm의 경우로서 채터가 발생된 신호를 나타내고 있다. 또 (b)는 회전수가 990 rpm, 절삭폭이 2.0 mm 이고, (c)의 경우는 회전수가 520 rpm, 절삭폭이 3.0 mm 인 경우로서 절삭깊이가 크므로 인해 상대적으로 채터가 시작되려는 상태의 신호가 발생하고 있는 것으로 볼 수 있다. 그림에서 급격한 신호의 변화 정도는 절삭깊이가 큰 경우 뚜렷하게 보이는데, 이것은 과도한 절삭에서는 불규칙한 동적인 신호의 특성이 많이 나타남을 파형에서 알 수 있다. 일반적으로 공구파괴시 절삭력신호는 갑자기 변하는 변곡특성을 많이 갖게되며, 이러한 성질은 공구파괴탐지시 자주 나타나고 ARMA 모델링에서는 잔차의 변수에서 그 변화특성이 뚜렷하게 나타낸다. 본 논문에서는 채터특성을 많이 갖고 있는 절삭력신호를 처리한 결과 그 잔차의 거동이 별로 나타나지 않았고, 따라서 채터를 분석하는데에는 잔차(residual) 변수는 바람직하지 못함을 알 수 있다.<sup>3)</sup>

##### 4.2 채터 스펙트럼 분석 비교

마찬가지로 앞의 실험 데이터 신호를 주파수 영역해석으로 ARMA 스펙트럼으로 가공상태를 분석하였다. 이 때의 RLSM 방법에 의한 ARMA 모델링 차수는 (10, 5)로 하였다. 본 논문에서 절삭속도가 커질수록 고주파성분의 채터주파수가 나타나는 경향을 볼 수가 있었다. 따라서, 절삭회전수가 높아지면 고주파의 채터는 사라지는 경향을 나타냈다.

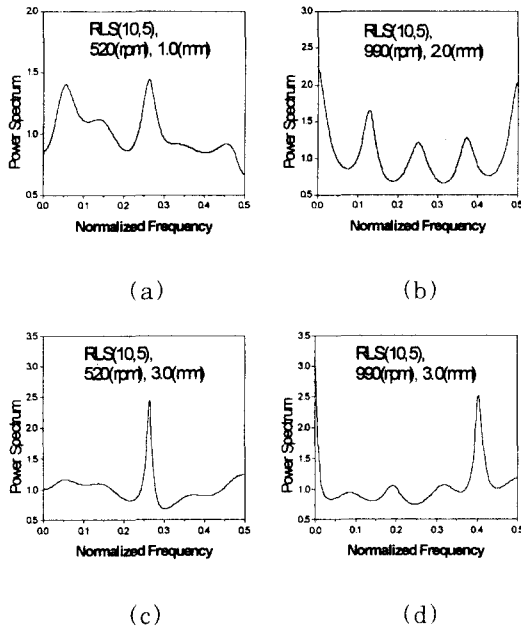


Fig. 7 Power spectrum by RLSM analysis

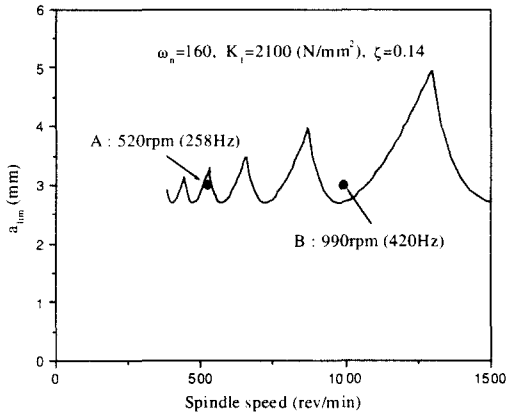
Fig. 7에서 (a)는 회전수가 520 rpm, 절삭폭이 1.0 mm인 경우의 신호를 처리한 RLSM 스펙트럼을 보여주고 있다. 알고리즘을 분석한 결과로 0.064 (64Hz)와 0.258 (258Hz)정도에서 뚜렷한 파워스펙트럼이 나타났고, 그외의 모우드는 잡음에 의한 모우드로서 필터링 해주는 효과가 있었다. 또한, 표현된 고유모우드는 공구 날에 의한 공구 날 회전주파수의 모우드임을 알 수 있었다. RLSM에서는 모델의 차수를 높이면 감지가 가능하였으나, 모우드의 이동현상이 약간 나타났다. (d)는 회전수가 990 rpm, 절삭폭이 3.0 mm의 경우로 채터의 신호가 고주파인 0.42 (420Hz)정도에서 유난히 뚜렷하게 나타났다. 따라서, 이는 고주파 채터임을 알 수 있다. (b)는 회전수가 990 rpm, 절삭폭이

2.0 mm 인 경우로서 고유모우드는 0.129 (129Hz), 0.258 (258Hz), 0.37 (370Hz)에서 나타났다. 이 주파수는 공구날의 회전으로 인한 절삭날 주파수로 생각이 된다. 또, (c)는 회전수가 520 rpm, 절삭폭이 3.0 mm로 가공할 때의 신호를 처리하여 스펙트럼을 얻은 경우로 분석한 결과의 고유모우드는 0.258 (258Hz)에서 크게 뾰를 알 수가 있었는데, 이것은 절삭날이 가공할 때 생기는 동적인 힘에 의해 발생된 신호이고, 이물림주파수(tooth passing frequency)의 강도가 크게 나타났다. 이 모든 스펙트럼을 절삭속도, 절삭깊이로 함께 관찰한 바, 절삭속도와 절삭깊이가 증가할수록 저주파 채터주파수의 발생이 적어졌고, 특히 990 rpm일 때 다른 주파수에 의해 채터주파수가 고주파로 갈수록 사라지는 경향을 보였다. 또한, 절삭속도가 520 rpm에서 990 rpm으로 증가할수록 중앙 부근의 주파수가 사라지는 것을 알 수가 있으며, 절삭깊이가 증가할수록 고주파의 채터주파수가 발생됨을 알 수 있었다. 이는 Chiou<sup>5)</sup>의 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 모든 처리에서 데이터의 수를 줄여도 스펙트럼의 변화없이 원하는 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 따라서, RLSM 순환 ARMA 알고리즘은 데이터의 수가 적어도 모델링이 가능하며, 데이터 수가 적은 경우에도 스펙트럼의 분석능력이 우수함을 알 수 있다.<sup>11)</sup> 또한, 시계열 중간에 시스템 변수를 계산할 수 있는 장점이 있다.

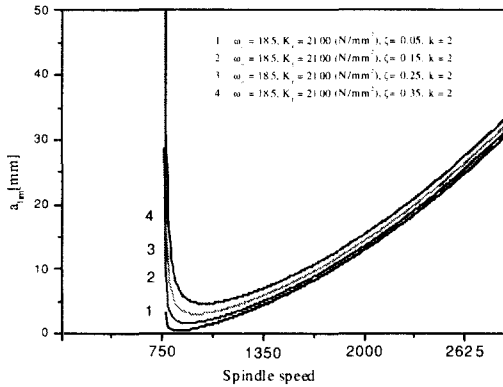
### 4.3 채터의 안정성 해석

Fig. 8 (a)는 식(20)에 의해 절삭동력학의  $\omega_n$ 을 160Hz,  $\zeta$ 를 0.14,  $K_f$ 는 2100 N/mm<sup>2</sup>로 하여 안정성을 나타내는 채터로브영역을 구한 결과로, 양의정수  $k$ 가 0~6 일 때의 절대적인 안정영역을 구한 것이다. 경계영역의 아래영역은 안정영역을 나타내고, 위 영역은 불안정영역을 나타낸다. 채터주파수는 불안정영역에 해당되는 회전수에서 나타나게 되며, 이를 Hz로 환산하면 채터주파수가 된다. 따라서, 채터주파수는 저주파 및 고주파의 채터가 모두 있을 수 있고, 그때의 절삭동력학의 고유진동수, 감쇠계수, 비절삭저항에 따라 그 발생 범위가 변동된다. 비절삭상수  $K_f$ 를 증가시키면 임계절삭폭의 경계영역이 줄어들어 그 속도에서 조금만 절삭깊이를 더 주어도 채터가 일어날 가능성은 더욱 많아진다. 예를 들면, 알루미늄 합금강의 경우

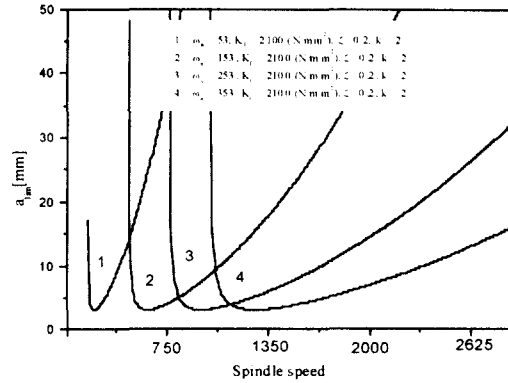
는  $K_f = 500 \sim 800 \text{ N/mm}^2$  이고, 사용한 강 의 경우 는 일반적으로  $1500 \sim 2500 \text{ N/mm}^2$  정도이나 본 연구에서는  $K_f = 2100 \text{ N/mm}^2$  이다. 여기서, 강 의 경우가 크므로 알루미늄 합금강을 가공하는 경우 전체적인 임계절삭폭 경계영역이 위로 이동하여 안정영역이 증가하며, 따라서 절삭깊이를 증가시켜야만 채터가 일어나게 된다. A점은 Fig. 7의 (c)의 절삭조건으로 가공한 경우로서 환산 회전수가 520 rpm 인 경우이고 채터가 없고 이물림주파수가 강하게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한, 0.258 (258Hz)정도의 모우드는 채터모우드가 아니



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Stability lobe for variable factor of cutting dynamics

고 날이 지나가는 이물림 모우드로 분석이 되었다. Fig. 7 (d)의 고유모우드 0.42 (420Hz)는 채터주파수인 경우로서 그 영역이 Fig. 8 (a)의 채터로브에서 B점에 위치한 조건이 되며, 채터안정로브 그림에서 불안정영역에 존재하게 되고 채터가 나타났음을 확인 할 수가 있었다.

Fig. 8 (b)는 절삭동력학 모델의 고유진동수가 185Hz, 비절삭저항이  $2100 \text{ N/mm}^2$ 인 경우 감쇠계수에 따른 안정성 로브의 변화를 보여주고 있다. 감쇠계수를 증가시킬수록 안정경계영역이 위로 움직이며 안정영역이 넓어짐을 알 수가 있으며, 또한 전체적으로 우측으로 이동되어진다는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 감쇠계수를 증가시킬수록 안정경계영역이 위로 움직이며 안정영역이 넓어짐을 알 수 있다.

Fig. 8 (c)는 감쇠계수가 0.2, 비절삭저항이  $2100 \text{ N/mm}^2$ 인 경우 모델의 고유진동수의 변화를 증가 시킴에 따라 안정성 로브의 변화를 보여주고 있다. 고유진동수를 증가시킬수록 같은 양의정수  $k = 2$ 인 두 번째 로브인 경우 안정경계영역이 오른쪽으로 움직이며 안정영역이 좁아짐을 알 수가 있다. 따라서, 이것을 기초로 공작기계를 설계하고 절삭동력학의 조건을 선정될 수 있도록 공구, 공작물, 공작기계를 선택하여 가공하면 가공하는 주축회전수에서 각각의 공작물인 경우 채터가 일어나는 임계절삭깊이를 알 수 있고, 따라서 이 깊이를 고려하여 절삭조건을 택하면 채터를 피하여 가

공할 수가 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 결과를 얻을 수가 있었다.

(1) 절삭깊이가 커지고 절삭속도가 높아질수록 저주파 chatter 주파수 발생이 적어지고 고주파의 chatter만 발생된다. 즉, 990 rpm 일 때 다른 chatter 주파수가 고주파 영역에서만 나타났다. 또한 절삭깊이가 증가할수록 chatter 주파수의 파워가 증가하는 경향을 나타냈다.

(2) on-line 알고리즘 RLSM 으로 절삭력의 동적 성분을 분석할 수 있었다. 또한, 데이터 수가 적어도 RLSM 알고리즘에서는 정확하게 파워스펙트럼을 얻을 수 있었다.

(3) chatter의 안정, 불안정영역을 경계영역 해석을 통하여 회전수와 임계절삭폭 간의 안정 및 불안정영역을 구분하여 관별, 분석할 수 있었다. chatter 동력학 시스템의 감쇠계수와 비절삭상수가 증가할수록 안정영역이 넓어졌고, 또한 고유진동수가 증가할수록 각 로브가 오른쪽으로 이동하는 경향을 보였다. 따라서, 이런 결과는 chatter를 피하면서 공작기계와 관련된 공구제작 및 설계에 중요한 자료로 사용할 수 있다.

### 참고문헌

1. B. K. Fussell, K. Srinivasan, "An Investigation of the End Milling Process under Varying Machining Conditions," *Trans of ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 149-157, 1989.
2. S. C. Lin, R. J. Yang, "Force-based Model for Tool Wear Monitoring in Face Milling," *Int. J. Mach. Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 9, pp. 1201-1211, 1995.
3. M. C. Yoon, H. D. Cho, S. K. Kim, "A Study on Diagnostics of Machining System with ARMA Modeling and Spectrum Analysis," *KSMTE*, Vol. 8, No. 3, pp. 42-51, 1999.
4. Yusuf Altintas, "*Manufacturing Automation*,"

Cambridge Univ., pp. 33-46, 2000.

5. R. Y. S. Chiou and S. Y. Liang, "Chatter Frequency in Turning Considering Tool Compliance and Wearland," *Trans of ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 121, pp. 307-311, 1999.
6. 이상민, 이영수, 주종남, "평판의 정면밀링 가공에서 발생하는 chatter," 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1999.
7. 권원태, "마모된 공구 절삭으로 인한 chatter 발생시의 절삭력 예측," 정밀공학회지, Vol. 13, No. 3, pp. 141-149, 1996.
8. 이상석, 김희술, 이영문, "정면밀링공정에서 공구상태 변화를 고려한 절삭력예측 모델의 개발," 정밀공학회지, Vol. 12, No. 11, pp. 63-73, 1995.
9. 정의식, 고준빈, 김기수, "신경회로망을 이용한 엔드밀 공정에서의 chatter감지," 정밀공학회지, Vol. 12, No. 10, pp. 149-156, 1995.
10. 이종길, "절삭공구의 chatter진동과 음향방출과의 실험적 연구," 정밀공학회지, Vol. 12, No. 1, pp. 112-122, 1995.
11. 김영국, 윤문철, 하만경, 심성보 "chatter모델링과 진단법에 관한 연구," 정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 971-974, 2001.
12. 김영국, "엔드밀 가공시 On-line 절삭력 모델링과 이상진단 분석," 부경대학교 석사학위논문, 2000. 2.