

# 채터모델링과 진단법에 관한 연구

김영국(부경대원), 윤문철, 하만경, 심성보(부경대)

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

Young-Kook Kim, Moon-Chul Yoon, Man-Kyoung Ha, Sung-Bo Sim

### ABSTRACT

In this study, the static and dynamic characteristics of endmilling process was 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 work were performed to show the malfunctional behaviors. For this purpose, new recursive (RLSM) were 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(파형도), 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, 공구형상에 기인한 저항성, 저마멸성이기에 일관적인 가공오차가 크며, 채터가 발생하기 쉽다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 가공 메커니즘을 해석하고 가공중의 절삭력과 채터 발생의 유무 혹은, 가공부품의 가공오차를 사전에 추정하는 것이 중요하다. 그러므로, 여러 종류의 모델을 제안할 수도 있으며, 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.<sup>1), 2)</sup> 본 논문에서는 엔드밀의 채터에 대한 연구로 기존연구와 달리 실험적 모델링 기법인 자동회귀이동평균(ARMA : Auto Regressive Moving

Average) 모델에 의한 ARMA 스펙트럼 분석으로 채터주파수를 감지하고 절삭조건에 따른 특성을 분석하고 엔드밀 주축의 회전속도에서 채터발생의 안정 및 불안정 영역을 구하여 채터를 피할 수 있는 절삭조건 선택법과 동작기계의 설계 데이터와의 관계를 분석하여 채터를 피할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

### 2. 관련이론

#### 2.1 RLSM 모델링 및 스펙트럼 분석

본 논문에서 사용한 모델링기법으로는 ARMA 모델링기법 중 RLSM(Recursive Least Square Method) 모델링을 이용하였고, 이 시스템의 가공현상을 on-line 감지를 위한 진단시스템을 구성하였다. ARMA 모델은 공학현상 예측에 사용되는 통계학적인 방법 중하나이다. 따라서, 일반적으로 밀링가공 시스템은 다음과 같은 이산형태의 ARMA 시계열 모델로 나타낼 수 있고, 자동회기, 이동평균 차수를 각각  $m, n$ 이라고 하면, ARMA

(n, m) 모델은 다음과 같다.<sup>3)</sup>

$$(1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}+\dots+a_nz^{-n})x(t) = (1+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}+\dots+b_mz^{-m})a(t) \quad (1)$$

여기서,  $a_n, i=1, 2, \dots, n$  : 자동회기변수  
 $b_m, i=1, 2, \dots, m$  : 이동평균변수  
 $z^{-1}x(t)=x(t-1), z^{-1}$  : 지연연산자  
 $a(t)$  : 백색잡음,  $E[a(t)]=0$

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

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>

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

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

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

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

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

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

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

여기서, 파라메타  $\lambda(t)$ 는 망각지수이고, 일반적으로 그 크기를 1에 가깝게 한다. ARMA 모델링 상수를 RLSM 방법에 의해 구한 후 다음 식에 의하여 스펙트럼을 얻을 수 있다. 스펙트럼을 Direct form 형태로 표현하였다.<sup>3)</sup>

$$H(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}} \quad (8)$$

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

## 2.2 체터 해석

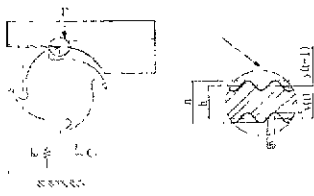


Fig. 1 Wave generation of chatter dynamics

Fig. 1에서 이 모델의 동적 칩두께(dynamic chip

thickness)는 엔드밀 가공의 경우 다음의 식으로 표현된다.<sup>4)</sup>

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

여기서, 식 (9)를 라플라스 변환하여 정리하면,

$$h(s) = h_0 - y(s) + e^{-sT}y(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1)y(s) \quad (10)$$

절삭동력학의 2차 방정식을 이용해 라플라스 변화하여 정리한 결과로 가공모델의 전달함수는,

$$m_p y(t) + c_p y(t) + k_p y(t) = F_f(t) = K_f a h(t) \\ = K_f a [h_0 + y(t-T) - y(t)] \quad (11)$$

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

$y(s)$ 를  $h(s)$ 로 대입하여 정리하면,

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

이고, 이 전달함수의 특성방정식에 의해 안정성을 판별할 수 있다 이 조건의 특성방정식은 다음과 같다. 단, 전달함수  $\Phi(j\omega) = G + jH$  이다.

$$\{1 + K_f a_{lm} [G(1 - \cos \omega_c T) - H \sin \omega_c T] \\ + j[K_f a_{lm} [G \sin \omega_c T + H(1 - \cos \omega_c T)]] = 0 \quad (14)$$

이 조건을 만족하기 위해서는 실수부와 허수부가 각각 0 이어야 한다. 날당 절삭주기와 회전속도의 상관관계는 날수가 Z라 하면 다음과 같다.

$$T = \frac{2k\pi + \epsilon}{2\pi f_c} \rightarrow n = \frac{60}{ZT} \quad (15)$$

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

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

## 3. 실험 및 실험방법

실험에 사용된 엔드밀은 직경이 12 mm인 테화사의 4F HSS이다. 공작물재료는 SM45C를 사용하였다. 절삭실험에 사용된 밀링머신은 대우중공업의 만능밀링 머신을 사용하였고, 절삭력 측정 공구동력계는 Kistler(4-Component Dynamometer : Model Type 9272)사의 동력계를 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 사용한다.

#### 4. 해석결과 및 고찰

##### 4.1 채터 스펙트럼 분석 비교

본 연구에서는 데이터 수를 1 kHz의 샘플링 주파수로 하여 1024개의 데이터를 수집하여 이 데이터를 가공하여 RLSM 순환 ARMA 스펙트럼을 구하여 비교 분석하였다. 이 때의 RLSM 방법에 의한 ARMA 모델링 차수는 (10,5)로 하였다.

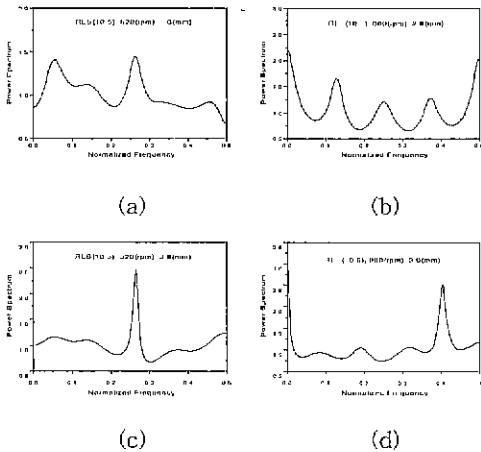


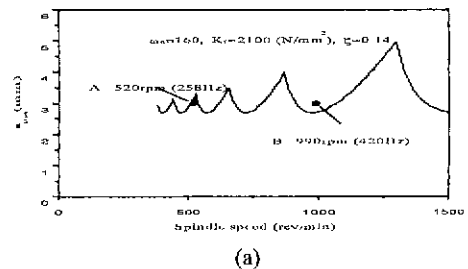
Fig. 2 Power spectrum by RLSM analysis

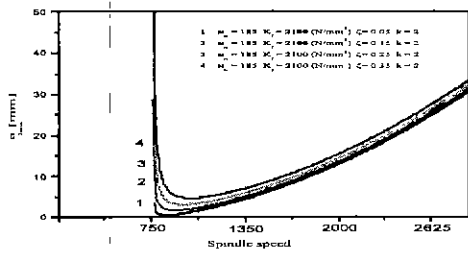
Fig. 2에서 (a)는 회전수가 520rpm, 절삭폭이 1.0 mm인 경우의 신호를 처리한 RLSM 스펙트럼을 보여주고 있다. 알고리즘을 분석한 결과로 64Hz와 258Hz 정도에서 뚜렷한 파워스펙트럼이 나타났고, 그외의 모우드는 잡음에 의한 모우드로서 필터링 해주는 효과가 있었다. 또한, 표현된 고유 모우드는 공구 날에 의한 공구날 회전주파수의 모우드임을 알 수 있었다. RLSM에서는 모델의 차수를 높이면 감지가 가능하였으나, 모우드의 이동 현상이 약간 나타났다. (d)는 회전수가 990rpm, 절삭폭이 3.0mm의 경우로 채터의 신호가 고주파인 420Hz 정도에서 유난히 뚜렷하게 나타났다. 따라서, 이는 고주파 채터임을 알 수 있다. (b)는 회전수가 990rpm, 절삭폭이 2.0mm 인 경우로서 고유 모우드는 129Hz, 258Hz, 370Hz에서 나타났다. 이 주파수는 공구날의 회전에 의한 절삭날 주파수로

생각이 된다. 또, (c)는 회전수가 520rpm, 절삭폭이 3.0mm로 가공할 때의 신호를 처리하여 스펙트럼을 얻은 경우로 고유모우드는 258Hz에서 크게 힘을 알 수가 있었는데, 이것은 절삭날이 가공할 때 생기는 동적인 힘에 의해 발생된 신호이고, 툴패스(tool pass) 주파수의 강도가 크게 나타났다. 이 모든 스펙트럼을 절삭속도, 절삭깊이로 함께 관찰한 바, 절삭속도와 절삭깊이가 증가할수록 저주파 채터주파수의 발생이 적어졌고, 특히 990rpm일 때 다른 주파수에 의해 채터주파수가 고주파로 갈수록 사라지는 경향을 보였다. 또한, 절삭속도가 520rpm에서 990rpm으로 증가할수록 중앙 부근의 주파수가 사라지는 것을 알 수가 있었다. 이는 Chiu<sup>5)</sup>의 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그리고, RLSM 순환 ARMA 알고리즘은 데이터의 수가 적어도 모델링이 가능하여 스펙트럼의 분석 능력이 우수함을 알 수 있었다.<sup>6)</sup> 또한, 시계열 중간에 시스템 변수를 계산할 수 있는 장점이 있다.

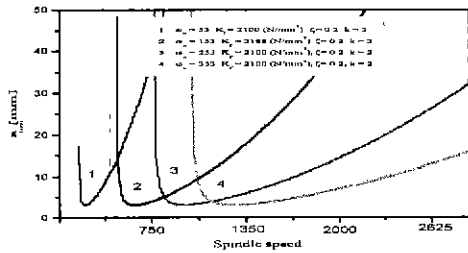
##### 4.3. 채터의 안정성 해석

Fig. 3(a)는 식(16)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 결과이다. 경계영역의 아래영역은 안정영역을 나타내고, 위 영역은 불안정영역을 나타낸다. 채터주파수는 불안정영역에 해당되는 회전수에서 나타나게 되며, 이를 Hz로 환산하면 채터주파수가 된다. Fig. 3(a)에서 A점은 Fig. 2의 (c)의 절삭조건으로 가공한 경우로서 채터가 없고 툴패스 주파수가 강하게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한, 258Hz 정도의 모우드는 채터모우드가 아니고 날이 지나가는 툴패스 모우드로 분석이 되었다. Fig. 2(d)의 고유모우드 420Hz는 채터주파수인 경우로서 그 영역이 Fig. 3(a)의 채터로브에서 B점에 위치한 조건이 되며, 채터안정성로브 그림에서 불안정영역에 존재하게 되고 채터가 나타났음을 확인 할 수가 있었다.





(b)



(c)

Fig 3 Stability lobe for variable factor of cutting dynamics

Fig. 3(b)는 절삭동역학 모델의 고유진동수가 185Hz, 비절삭저항이 2100 N/mm<sup>2</sup>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. 3(c)는 감쇠계수가 0.2, 비절삭저항이 2100 N/mm<sup>2</sup>인 경우 모델의 고유진동수의 변화를 증가시킬 때, 안정성 로브의 변화를 보여주고 있다. 고유진동수를 증가시킬수록 안정경계영역이 오른쪽으로 움직이며 안정영역이 좁아짐을 알 수가 있다. 따라서, 이것을 기초로 공작기계를 설계하고 절삭동역학의 조건을 선정될 수 있도록 공구, 공작물, 공작기계를 선택하여 가공하면 가공하는 주축회전수에서 각각의 공작물인 경우 chatter가 일어나는 임계절삭깊이를 알 수 있고, 따라서 이 깊이를 고려하여 절삭조건을 택하면 chatter를 피하여 가공할 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 파위가 증가하는 경향을 나타냈다.

(2) on-line 알고리즘 RLSM으로 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 판별, 분석할 수 있었다. chatter 동역학 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.

## 참고 문헌

1. B. K. Fussell, K. Srinivasan, "An Investigation of the End Milling Process Under Varying Machining Conditions," Trans of ASME, J of Engr. Ind., 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 Manufact, 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 Uni., pp. 33-46, 2000
5. R. Y. S. Chiou and S Y. Liang, "Chatter Frequency in Turning Considering Tool Compliance and Wearland", ASME, Vol. 121, pp. 307-311, 1999
6. 김영국, "엔드밀 가공시 On-line 절삭력 모델링과 이상진단 분석", 부경대학교 석사학위논문, 2001.