

채터로브 계산을 위한 고유모우드 분석법

윤문철*, 조현덕**, 이응숙***

Natural Mode Analysis for Chatter Lobe Estimation

Moon-Chul Yoon*, Hyun-Deog Cho**, Eung-Soog Lee***

ABSTRACT

For the estimation of chatter lobe boundary it is very important to calculate the natural mode of cutting process. There are many time series algorithms for getting the natural mode of structural endmilling dynamics considering the cutting process. In this study, we have compared several time series methods such as AR algorithm, ARX, ARMAX, ARMA, Box Jenkins, Output Error, Recursive ARX, Recursive ARMAX considering the sampling frequency. As a result, the ARX, ARMAX and IV4 are more desirable algorithms for the calculation of modal parameters such as natural frequency and damping ratio in endmilling operation. Also these algorithms may be adopted for the natural mode estimation of endmilling operation for chatter lobe prediction.

Key Words : Auto Regressive Moving Average(자동회귀 이동평균), Chatter(채터), Cutting Dynamics(절삭 동역학), Impact Hammer Test(충격햄머실험), Natural Mode(고유모우드), Nyquist Frequency(나이퀴스트 주파수 $f_q/2$), Time Series Modelling(시계열 모델링)

1. 서 론

엔드밀가공의 절삭역학을 고려하여 공작기계의 구조역학을 정의하고 이 공구의 공작물 사이의 입력과 출력을 고려하여 전체 절삭 동역학을 나타내고 이 시스템의 고유모우드를 구하는 것은 절삭 역학을 연구하고 또 이를 기초로 공작기계 진동을 연구하는데 매우 중요하다 또한 이 고유모우드의

진동수를 구할 수 있어야 다른 구조해석이나 채터와 같은 되먹임 절삭역학 가공시스템의 구성과 그 채터의 안정 영역해석과 그 시스템의 특성을 분석할 수 있다.^[8] 따라서 본 연구에서는 고유모우드를 얻기위해서 기존에 가장 많이 쓰이고 있는 고속 푸리에변환(fast fourier transform)과 다른 여러 시계열(time series) 알고리즘을 비교하여 각각의 알고리즘 장단점과 엔드밀 가공시 그 적용 가능성을 보이고자 하였다 시계열 알고리즘으로 여러 가지가 있으며 그 중 AR(ar, burg, least square, yule walker, geometric lattice, instruments variable algorithm, ARX(arx, iv4), ARMAX, ARMA, Box

* 부경대학교 기계공학부
** 경일대학교 기계공학부
*** 한국기계연구원 정밀가공그룹

Jenkins, Output Error, recursive arx, recursive armax 등이 알려져 있다^[1-3] 또한 샘플링 주파수를 고려한 이들 알고리즘의 계산 결과를 서로 비교하여 각 경우의 장점과 단점등을 알아보고 각 알고리즘의 고유모우드 계산 가능정도 및 그 특성을 알아보고자 한다 본 연구에서는 각 알고리즘의 모델링 특성을 알아보기 위하여 다음과 같은 실험데이터를 이용하였고 그 결과를 서로 비교 분석하였다. 시스템을 모델링하기 위하여 출력/입력 신호를 가속도/공구동력계 신호를 선택하여 분석하였다 그리고 이 고유모우드 분석결과는 향후 채터로브의 영역 계산시 경계영역 위치가 결정되는 것을 서로 비교 분석할 수 있다^[8]

2. 이 론

2.1 ARMA(n,m) 모델

ARMA 모델은 자동회귀이동평균 (Auto Regressive Moving Average) 으로 모델링할 수 있다^[1-3]

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

여기서 $a_i, i=1, 2, 3, \dots, n$ 이고 자동회귀변수, 또한 $b_i, i=1, 2, 3, \dots, m$ 는 이동 평균 변수이다

z^{-1} · backshift operator,

$e(t)$ · 백색잡음, $E[e(t)] = 0$

$E[e(t) e(t-u)] = a^2 u$, u Kronecker Δ 함수

2.2 AR(n) 모델

AR 모델은 자동회귀변수 부분으로만 모델링 된다^[1-3]

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}) y(t) = e(t) \quad (2)$$

여기에는 burg, least square, yule walker, geometric lattice, 기구변수 ar(ivar) 알고리즘등이 있다^[1-6]

2.3 ARMAX(n,m,l,nk) 모델

ARMAX 모델은 다음과 같이 정의되며 $A(z)$ 은 자동회귀 변수부이고 $B(z)$, $C(z)$ 은 각각 이동평균 모델링 변수부가 된다^[2-3]

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}) y(t) = (b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}) u(t - nk) + (1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_l z^{-l}) e(t) \quad (3)$$

2.4 ARX(n,m,nk) 모델

ARMAX 모델에서 잡음항의 이동평균 변수부 $C(z)$ 가 1인 즉 이전 시간의 잡음과 현시간의 잡음 사이에 상관관계가 없다고 가정하는 경우의 모델로서 다음과 같이 모델링 할 수 있다^[2-3]

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}) y(t) = (b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}) u(t - nk) + e(t) \quad (4)$$

2.5 Box Jenkin(n,m,l,k,nk) 모델

ARMAX 모델의 자동회귀 이동평균상수 $A(z)=1$ 이 되도록 모델링하는 것으로 다음과 같이 모델링을 할 수 있고 이를 Box Jenkins 모델이라 한다^[2-3]

$$y(t) = \frac{(b_1 + b_2 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m})}{(1 + f_1 z^{-1} + \dots + f_l z^{-l})} u(t - nk) + \frac{(1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_l z^{-l})}{(1 + d_1 z^{-1} + \dots + d_k z^{-k})} e(t) \quad (5)$$

2.6 Output Error(n,l,nk) 모델

Output Error 모델은 다음과 같이 모델링 할 수 있다^[2-3]

$$y(t) = \frac{(b_1 + b_2 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n})}{(1 + f_1 z^{-1} + \dots + f_l z^{-l})} u(t - nk) + e(t) \quad (6)$$

각 모델의 경우 전달함수의 분모항에서 고유진동수와 감쇠계수를 계산할 수 있고 인수분해항의 짝 $(1 - \lambda_i \cdot z^{-1})(1 - \lambda_i^* \cdot z^{-1})$ 로 부터 각각의 고유 모우드를 구할 수 있다 데이터 샘플링주기를 T_s 라 하면

$s = \sigma \pm j\omega = -\xi\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1-\xi^2} = \ln(\lambda, \lambda^*) / T_s = \ln(z) / T_s$
 에서 고유진동수의 감쇠계수는 각각 다음과 같다 [9]

$$\omega_d = \text{abs}(\text{Im}(\lambda)) / T_s \tag{7}$$

$$\xi = -\cos(\text{angle}(\ln(\lambda))) \tag{8}$$

3. 실제데이터의 적용

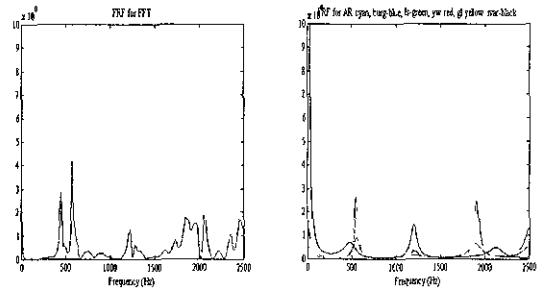
3.1 가속도계/충격해머 실험 FRF

주파수응답함수 (FRF Frequency Response Function) 즉 전달함수(출력/입력)의 데이터로서 가속도계/충격해머 실험 데이터를 처리하였다.

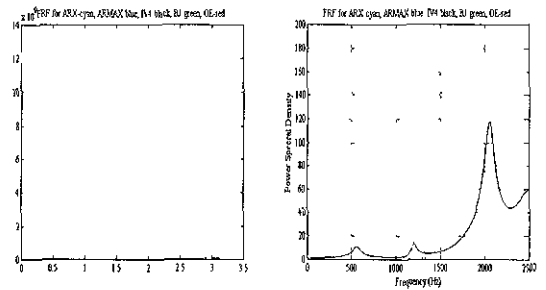
Fig 1과 Table 1은 샘플링주파수는 5000 Hz 로 하여 0~2500 Hz 범위의 고유주파수를 구한 것으로서 비교적 정확히 분석할 수 있음을 보여 주고 있다. 그러나 이 경우 시간 영역에서의 임펄스 신호는 충분히 나타내지 못했으나 스펙트럼은 분석은 가능하였고 시스템의 특성을 분석할 수 있었다 시계열 모델링으로 고유모우드를 구할 때에는 분석하려고 하는 주파수 범위를 고려하여 적절한 샘플링주파수를 선택하여야 정확한 고유모우드를 구할 수 있었다

각 알고리즘마다 고유모우드 계산값에 차이가 있음을 알 수 있다 그러나 전체적인 경향은 비교적 비슷하였고 이 차이는 차수를 적정히 선택함으로써 줄일 수는 있었으나 수월하지는 못했다 이는 모델링 전달함수의 자동화귀 이동평균부의 계산된 상수의 차이에서 생기는 결과라고 할 수 있고 또 각 알고리즘 마다 조금씩 상수계산의 차이에 의한 분포의 특성 방정식의 차이에 의하여 고유 모우드 계산치가 달리 계산되어 조금씩 이동하고 있음을 보여주고 있다. 샘플링주파수를 25000 Hz 이상으로 하면 본 실험 데이터의 고유진동수의 범위가 0 ~ 1200 Hz 의 낮은 범위이기 때문에 나이퀴스트 주파수가 높아져 전체적인 주파수 분해능이 떨어지고 원하는 고유진동수를 탐지하기가 곤란하게된다. 따라서 샘플링주파수는 그다지 크지 않게 선정하는 것이 중요함을 알 수 있다 샘플링주파수를 낮

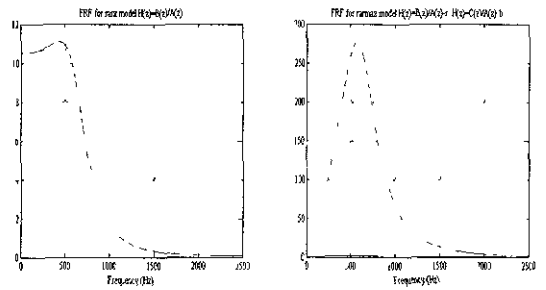
춰서 약 5000Hz 정도에서 하여도 실제 모우드는 충분히 감지할 수 있고 샘플링주파수를 높이면 계산하고 분석하는데 소요되는 시간이 길어지며 실제 모우드를 구하는 것이 곤란하게 될수 있으므로 적절한 샘플링 주파수를 선정하여 샘플링하는 것이 필요하다



(a) FRF for FFT (b) FRF for AR algorithms



(c) FRF for other algorithms in normalized frequency (d) FRF for other algorithms ((c) is magnified)



(e) FRF for rarx algorithm (f) FRF for larmax algorithm

Fig. 1 Power Spectrum for each methods (a-f)

Table 1 Natural mode of structural dynamics

	1st	2nd	3rd	4th	5th
ar(ω _i) (%)	5.3617391e+002 3.4378689e-002	1.1971344e+003 5.5848027e-002	1.9248368e+003 1.6478763e-002		
burg	5.5286873e+002 3.3994177e-002	1.2140814e+003 6.2746282e-002	1.9088100e+003 2.7552828e-002		
ls	5.2972974e+002 9.0083952e-002	1.1963021e+003 6.2663993e-002	1.9473690e+003 1.1828638e-001		
yw	5.5495699e+002 6.0593751e-002	1.2092983e+003 1.2953545e-001	1.8977964e+003 6.8377535e-002	1.7736031e+003 4.5014260e-001	
gl	5.5070053e+002 3.0100684e-002	1.2148282e+003 5.6569984e-002	1.9121992e+003 2.4355830e-002	1.7736031e+003 4.5014260e-001	
ivar	4.9147926e+002 1.2164698e-001	1.1981895e+003 4.2452551e-002	2.1355418e+003 7.2070967e-002	1.8078015e+003 2.4311292e-001	
arx	5.3575944e+002 4.4241388e-002	1.1973181e+003 7.9502739e-002	1.9327895e+003 9.0351934e-002	1.8245005e+003 5.8455895e-001	
armax	1.9792561e+003 1.1544617e-001	5.1048995e+002 5.7283195e-002	1.2435657e+003 3.8367154e-002	1.0247127e+003 3.4731888e-001	
iv4	5.6075439e+002 6.4704804e-002	1.1971848e+003 2.5695726e-002	2.0528913e+003 4.5152887e-002	1.8195641e+003 1.7867282e-001	
b1(c/d)	5.4610182e+002 6.1545264e-002	1.2373347e+003 5.9670742e-002	2.0276169e+003 8.1688273e-002	1.0040063e+003 6.2406816e-001	
b3(b/f)	5.5815957e+002 1.6086031e-001	1.1900335e+003 3.7050259e-003	1.8707502e+003 8.0266477e-002	2.3948874e+003 6.4016843e-002	
oa	4.8063664e+002 1.4433280e-001	1.2004411e+003 3.1343088e-002	1.8833027e+003 7.6478752e-002	2.3484432e+003 6.3467112e-003	
rax	8.3860471e+002 7.5941489e-002	1.5572194e+003 1.5021026e-001	1.8833027e+003 7.6478752e-002	2.3484432e+003 6.3467112e-003	
ramax	8.3482834e+002 1.5028969e-001	1.5773515e+003 1.6761302e-001	1.8833027e+003 7.6478752e-002	2.3484432e+003 6.3467112e-003	

3.2 가속도계/공구동력계 실험 FRF

Fig 2는 Ø15 mm이고 4개의 날을 가진 엔드밀로 홈가공을 할 때 공구동력계(a)와 가속도계(b) 신호를 측정된 데이터를 나타낸 것이다. 이때의 엔드밀 주축의 회전속도는 1500 rpm, 축방향깊이는 5 mm, 이송은 750 mm/min으로 하였고 분석결과는 충격햄머실험의 고유모우드 결과와 같이 실제 고유모우드는 FFT로 분석할 때 약 470과 600 Hz부근에서 존재하였다 Fig 3은 엔드밀 가공시 공구동력계/가속도계 신호를 얻은 데이터를 각각 입력 및 출력

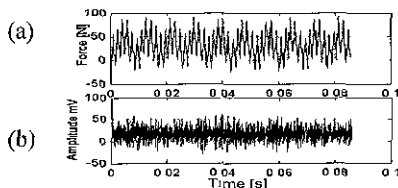


Fig. 2 Experimental force and accelerometer signal

데이터로 하여 주파수응답을 구한 것이다 전달함수 $H(z) = A_c(z)/F_{dyn}(z)$ 의 스펙트럼으로 샘플링주파수는 2000 Hz로 하였고 절삭 및 구조역학을 고려한 전달함수의 고유모우드를 보여 주고 있다. 충격햄머실험에 의한 경우와 마찬가지로 모델링 이론식(7)-(8)을 이용하여 고유진동수 및 감쇠계수의 계산을 할 수 있었고 계산 결과는 비교적 잘 일치하고 있다. 주파수영역의 스펙트럼에서는 약한 모우드가 스무싱되어 1개의 모우드가 나타났으나 이론식에 의해서는 스펙트럼에서는 볼 수 없는 모우드도 모두 계산할 수가 있었다. 그리고 계산 수치도 비교적 적절하였으나 rax, ramax 등 순환 알고리즘은 고유모우드 계산수치가 상당한 이동(shift)을 나타내고 있다 그리고 이들 순환 스펙트럼은 스무싱 효과가 커서 표현하기가 곤란함을 알 수 있다 따라서 스펙트럼 분석에는 그다지 다른 알고리즘에 비해 바람직하지 않음을 알 수 있다. 또한 모델링할 때 샘플링주파수를 낮추어 저주파수 영역의 분해능을 높였을 때에는 두 개의 모우드가 분석됨을 알 수 있다

샘플링 주파수를 너무 크게 한 경우 충격시험과 같이 감지하려는 공작기계의 구조역학 고유진동수의 범위가 0~1200 Hz의 낮은 범위이기 때문에 나이퀴스트 주파수가 높아져 분해능이 떨어지고 원하는 고유진동수를 탐지하기가 곤란하다 따라서 시계열 모델링에서는 샘플링 주파수는 너무 크지 않게 2000 Hz로 하여도 절삭역학을 고려한 전달함수 해석에서도 고유모우드를 비교적 정확하게 분리 감지할 수 있었다 주파수영역의 스펙트럼에서는 약한 모우드도 잘 분리되고 있으며 이론식에 의해서 모두 계산할 수가 있었다 그러나 FFT의 스펙트럼 분석에 의하면 샘플링 주파수를 낮추면 분해능이 떨어져 고유모우드 감지하기가 곤란하게 됨을 알 수 있다 즉 FFT에서는 스펙트럼 분석에 있어 샘플링 주파수를 높게하여 데이터를 얻었을 때 보다 스펙트럼 분해능이 떨어져 모우드를 감지하기가 곤란하며 따라서 샘플링 주파수를 낮출수록 고유치 분석은 쉽지 않음을 알 수 있다 이런 현상은 상대적으로 데이터의 수가 작아지면 FFT에서는 고유 모우드 분석이 곤란하다는 의미가 된

다 Table 2는 Fig. 3의 경우로 2000 Hz의 샘플링 주파수로 인해 0 ~ 1000 Hz 범위의 고유모우드 분석을 한 것이다 비교적 모든 알고리즘이 잘 분석되고 있음을 알 수 있다 이때 마찬가지로 실험 모델링 차수로는 자동회귀 이동평균 부의 상수 차수는 각각(10,3)으로 하여 분석하였다

Table 2 Natural mode of cutting dynamics

	1st	2nd	3rd	4th	5th
ax (a)	2.8046498e+002	8.9801966e+002	6.1909418e+002	5.0351297e+002	
ax (b)	1.3798574e-001	1.1272540e-001	9.9336752e-002	2.7934171e-001	
burg	2.8072272e+002	6.9559909e+002	6.1951553e+002	5.0703165e+002	
	1.3397339e-001	1.1336032e-001	9.7001972e-002	2.8486687e-001	
ls	2.8073510e+002	8.9657807e+002	6.1814192e+002	5.0567556e+002	
	1.4441778e-001	1.0832206e-001	9.8836287e-002	2.7989951e-001	
yw	2.6296337e+002	8.9568149e+002	6.1970958e+002	5.2411474e+002	
	1.4748409e-001	1.1493127e-001	1.1056798e-001	2.8942564e-001	
gl	2.8073267e+002	8.9600504e+002	6.1951828e+002	5.0703459e+002	
	1.3384402e-001	1.1337181e-001	9.6986257e-002	2.8486672e-001	
rvar	8.3207628e+002	6.1219762e+002	2.8316786e+002	3.5512790e+002	
	3.0407962e-001	1.9393469e-001	2.5940489e-002	8.1214887e-002	
arx	8.9904017e+002	6.3212242e+002	2.7763453e+002	4.6061170e+002	
	8.3619450e-002	7.0821329e-002	1.6346990e-001	2.5758121e-001	
arimax	2.9292011e+002	4.3275066e+002	6.1761229e+002	9.5479060e+002	
	1.1311945e-001	4.6553468e-002	7.5765450e-002	1.3941328e-001	
iv4	5.8082322e+002	9.0637634e+002	2.5596680e+002	4.5221593e+002	
	2.6150338e-001	1.6225629e-002	1.7410530e-003	5.0685203e-002	
tile(rl)	2.8314758e+002	6.2777579e+002	7.9076803e+002	5.4764239e+002	
	1.1605418e-001	5.6963955e-002	9.9435217e-002	3.6393007e-001	
rl(rll)	8.8260030e+002	7.0624556e+002	4.3062803e+002	1.2135557e+002	2.8965801e+002
	9.8813369e-003	5.3386788e-003	3.7443144e-002	9.9824960e-003	2.5726273e-001
oo	5.6371790e+001	4.2057702e+002	9.1889443e+002	6.6697031e+002	7.2775140e+002
	8.8624006e-002	9.1785345e-003	7.1884229e-003	7.7445028e-003	2.2196170e-001
rax	6.5316988e+002	3.5047675e+002	9.1890443e+002	6.6697031e+002	7.2775140e+002
	1.0976663e-001	2.128901e-001	7.1894229e-003	7.7445028e-003	2.2196170e-001
rarmax	4.7144256e+002	7.0537816e+002	9.1889443e+002	6.6697031e+002	7.2775140e+002
	2.4839496e-001	1.3504802e-001	7.1894229e-003	7.7445028e-003	2.2196170e-001

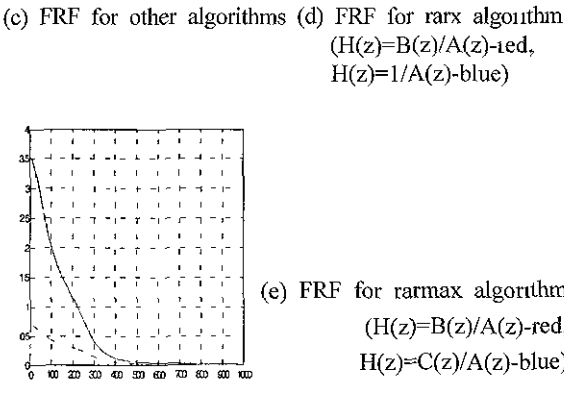
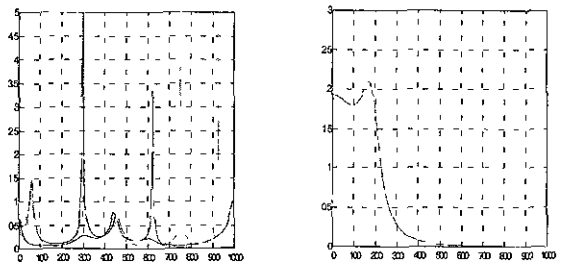
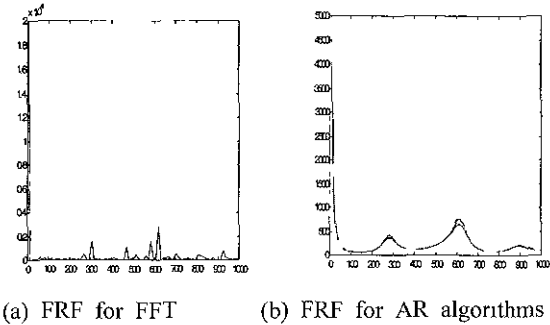


Fig. 3 Power Spectrum for each methods for sampling frequency 2000Hz with accelerometer/force test

3.3 각 알고리즘의 상대 비교

Fig 3에서 모델링 할 때 각 실험에서 시계열 모델링의 결과 각 경우의 모델링의 방법에 따라 약간 다른 결과를 얻을 수 있었다 샘플링 주파수의 반값인 나이퀴스트 주파수 $f_s/2$ 이상의 영역에서 고유모우드 특성은 분석할 수 가 없고 만약 샘플링 주파수를 25kHz 로 하면 분석은 12.5kHz 까지 가능하다 앞에서 너무 큰 샘플링 데이터를 선정하면 실제 공작기계의 고유진동수의 영역인 0 ~ 1200 Hz의 고유진동수는 분석하기 곤란 함을 보여주고 있다 또한 나이퀴스트 주파수 $f_s/2$ 의 선택은 시스템의 로우패스 필터의 역할을 하고 있으며 데이터 에일리어징(aliasing) 효과를 없애기 위하여 샘플링 주파수를 높이면 오히려 고유모우드를 분석하기 곤란함을 알 수 있다 일반적으로 원하는 분석 주파수 범위의 10배 정도로 하여 에일리어징 효과를 없앨 수 있으나 시계열 모델링에서는 그렇게 높게 샘플링을 하지 않고도 원하는 모우드를 선택할 수 있음을 알 수 있고 원하는 범위를 선정하여 샘플링 주파수를 선정하는 것이 중요하다 샘플링 주파수를 지나치게 높이면 분석시스템에 잡음의 특성이 커지고 원하는 주파수의 영역을 분석하는 것

이 곤란하다 또 계산하는데 많은 시간이 걸리고 데이터의 크기가 커져 처리속도도 느려진다 시계열 모델링의 차수를 잘못 선택하면 원하는 모우드의 이동현상을 볼 수가 있고 또한 모델링 방법에 따라도 차이가 있음을 이론적인 계산으로도 확인할 수 있었다. 전달함수의 특성에서 스펙트럼 분석의 스무싱 효과에 의해 1개 혹은 2개의 고유모우드를 얻을 수 있었다. 그러나 전달함수의 분모항을 0으로 놓은 특성방정식의 근에서는 정확하게 2개의 고유진동수를 분석할 수 있었으나 그 위치는 알고리즘에 따라 약간씩 모우드의 이동 현상이 나타났다. 또한 차수를 높여 모델링 한 결과 모델링 하는데 많은 시간이 걸렸다 AR 차수가 10 로 모델링하여 샘플링 주파수를 높이면 5개의 모우드를 얻을 수 있고 모우드가 약한 모우드인 경우는 이웃 모우드의 영향에 의하여 스무싱 되어 나타나지 않기도 하였다. 위 결과를 종합적으로 분석한 결과 데이터의 수기 작고 에너지밀도가 낮은 데이터의 고유모우드 해석에는 ARX, ARMAX 와 그 외의 tv4 파라메트릭 모델링법이 그중 다른 방법에 비해 원하는 모우드를 비교적 분석하기가 쉬운 알고리즘으로 판명되었다. 충격햄머에 의한 신호의 분석에는 최소한 샘플링 주파수가 20 kHz 이상 정도는 되어야 임펄스 신호의 에일리어징 효과 없이 잘 표현할 수 있었다 그러나 공구동력계 입력신호는 그보다 낮은 약 2000 Hz 정도로도 충분히 고유모우드를 나타낼 수 있었다 즉 전달함수는 출력신호의 주파수 영역의 푸리에 변형 값을 입력으로 나누게 되는데 입력의 푸리에 변환 값은 같은 평편한 값이므로 전달함수의 값은 샘플링 주파수에 별 영향을 주지 못하게 된다 따라서 이 경우 고유진동수나 감쇠계수와 같은 고유모우드를 얻기 위해서 시계열 파라메트릭 모델이 적절한 방법인 것을 알 수 있고 샘플링 주파수 선택도 분석하려는 영역을 고려하여 에일리어징 효과를 없애기 위하여 될 수 있는 데로 높은 샘플링 주파수를 선정하지 않고 그다지 크지 않게 샘플링하여 고유 모우드를 얻을 수가 있다 그러나 에일리어징 효과가 없도록 적절한 최소의 샘플링 주파수를 선정하는 것이 매우 필요하다 출력/입력신호를 가속도계/절삭력 신

호로 할 경우 샘플링 주파수는 약 2000 Hz 로 하면 충분하였고 출력/입력을 가속도계/충격햄머 신호로 할 경우 충격햄머신호의 에일리어징 효과 때문에 높여야 하나 실제 고유모우드의 특성은 가속도계 신호만을 푸리에 변형을 하여 고유모우드를 얻을 수가 있었다 결론적으로 샘플링 주파수는 에일리어징 효과와 우리가 분석하려는 나이퀴스트 주파수 범위 ($0 \sim f_q/2$)를 고려하여 결정하여야 한다

4. 결 론

- 1 본 연구에서 모델에 따라 고유모우드 위치가 변함을 알 수가 있었고 각 모델링으로 고유모우드를 분석하는데는 그 중 기구변수법 (instrument variable method), ARX 와 ARMAX 모델링법이 그 중 다른 방법에 비해 정확히 분석하는 것을 알 수 있었다
- 2 위 모델링법으로 약 400-700 Hz 부근에 존재하는 실제 고유모우드를 찾고 계산할 수가 있었다 특히 시계열 모델링에서는 FFT와 달리 샘플링 주파수는 2000 Hz 정도에서도 충분히 구할 수 있는 특징이 있다
- 3 FRF 스펙트럼 그래픽 분석보다는 고유 모우드식에 의한 계산으로 더 정확하게 고유모우드도 검출할 수 있었다
- 4 고유모우드 분석에서 충격햄머 실험에서 전달함수를 가속도/충격햄머 신호로 하여 전달함수를 구한 결과보다 가속도/공구동력 신호를 전달함수로 한 결과가 더 잘 일치한다 시계열 모델링에서는 후자의 경우가 더 적합한 실험방법이며 이 결과는 채터의 안정영역을 나타내는 로브 경계를 계산하는데 필요한 고유모우드로 유용하게 사용할 수 있다

후 기

본 연구는 부경대학교 연구년 연구비 지원에 의하여 수행되었습

참고문헌

1. S M Pandit and S. M. Wu, "Time Series and System Analysis with Applications", John Wiley and Sons, 1993
2. L Ljung, System Identification - Theory for the User, Prentice Hall, 1999
3. L Ljung, T Glad, Modelling of Dynamic Systems, Prentice Hall, 1999
4. T Soderstrom and P Stoica, "Instrumental Variable Methods for System Identification", Berlin Springer Verlag, 1993
5. S M Kay, "Modern Spectral Estimation Theory and Application", Prentice Hall, 1990
6. P Young, "Recursive Estimation and Time Series Analysis", Springer Verlag, 1993
7. M C. Yoon, H. D Cho, S. K Kim, "A Study on Diagnostics of Machining Syatem with ARMA Modelling and Spectrum Analysis", Journal of KSMTE, Vol 8, No 3, pp 42-51, 1999
8. Y, K. Kim, M C Yoon, M K Ha, S B Sim, "A Study on the Modelling and Diagnostics on Chatter in Endmilling Operation", Journal of KSPE, Vol 18, No 10, pp 101-108, 2001
9. Matlab Manual, Mathwork inc, 1999