한국소음진동공학회지 제 9 권 제 1 호, pp. 60~69, 1999.

〈논 문〉

방향 시계열에 의한 회전체 동특성 규명: (II) 성능 평가 및 응용

Directional ARMAX Model-Based Approach for Rotordynamics Identification, Part 2: Performance Evaluations and Applications

박 종 포* · 이 종 원**

Jong-Po Park and Chong-Won Lee

(1998년 8월 3일 접수 ; 1998년 9월 11일 심사완료)

Key Words : Directional ARMAX (방향 시계열), Directional Frequency Response Function (방향 주파수응답함수), Degree of Anisotropy (비등방도), Modal Parameter Estimation (모드 매개변수 추정), Rotordynamics Identification (회전체 동특성 규명)

ABSTRACT

In the first paper of this research[1], a new time series method, directional ARMAX (dARMAX) model-based approach, was proposed for rotordynamics identification. The dARMAX processes complex-valued signals, utilizing the complex modal testing theory which enables the separation of the backward and forward modes in the two-sided frequency domain and makes effective modal parameter identification possible, to account for the dynamic characteristics inherent in rotating machinery. In this second part, an evaluation of its performance characteristics based on both simulated and experimental data is presented. Numerical simulations are carried out to show that the method, a complex time series method, successfully implements the complex modal testing in the time domain, and it is superior in nature to the conventional ARMAX and the frequency-domain methods in the estimation of the modal parameters for isotropic and weakly anisotropic rotor systems. Experiments are carried out to demonstrate the applicability and the effectiveness of the dARMAX model-based approach, following the proposed fitting strategy, for the rotordynamics identification.

1. 서 론

본 연구의 첫번째 논문[1]에서는 효과적인 회전체 동특성 규명을 위해 복소 모드 시험이론을 시간영역에서 구현하고 복소신호 처리를 근간으로 하는 새로운 방향 시계열 (dARMAX) 모델을 이용하는 방법을 제안하였다. 먼저 회전체의 동특성을 고려하기 위해 방향 주파수응답함수로 부터 등방 및 비등방 dARMAX 모델을 유도하였고, 기존 ARMAX 모델과의 상호 관계를 정립하였다. 기존 시계열 모델의 이산계수 추정법과 차수 결정법을 복소 신호를 다루기 위하여 확장하였고, 효과적인 계수 추정을

* 정회원, 한국중공업(주) 기술연구원

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

위하여 새롭게 정의된 비등방기여도를 이용한 체계적인 모델 피팅 절차를 제시하였다.

첫번째 논문[1]에 이어, 본 두 번째 논문에서는, 수치 모의시험과 실험실에서 제작된 회전체 실험 등을 통하여, 제안된 방법의 타당성, 실제 회전체의 적용성과 유용성을 검증하고, 기존의 ARMAX 모델에 의한 방법 및 주파수 영역의 방법과의 비교를 통해 개발된 방법이 회전체의 모드 매개변수 규명에 보다 효과적임을 보인다.

수치 모의시험에서는 2 자유도를 갖는 등방 및 비등방 회전체를 다루며, 실험에서는 실험실에서 제작된, 축 방향 토크를 받는 외팔보 형식 (overhung)의 디스크 및 축으로 구성된 등방 시스템과, 일정한 속도로 회전하는 비등방 유연 회전체계를 다룬다.

2. 수치 모의시험

이 절에서는 수치 모의시험을 통하여 회전체 동특성 규명에 있어서의 제안한 방향 시계열 방법의 타당성과 유효성을 검증한다. 모의시험에는 2 자유도를 갖는 등방 및 비등방 회전체계를 다루며, 제안한 방법과 기존의 방법 들에 의한 결과를 서로 비교하였다.

다음과 같이 무차원 운동 방정식을 갖는 단순 비등방 회전체를 고려하자[2~5].

$$\begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -\Omega_p \\ \Omega_p & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+\delta & 0 \\ 0 & 1-\delta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_y \\ f_z \end{Bmatrix} \qquad (1a)$$

이를 등가의 복소 신호로 표시하면 아래와 같다.

$$\begin{Bmatrix} \ddot{p} \\ \ddot{\bar{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c - j\Omega_p & 0 \\ 0 & c + j\Omega_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\bar{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \delta \\ \delta & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p \\ \bar{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} g \\ \bar{g} \end{Bmatrix} \qquad (1b)$$

여기서, ($\delta < 1$)는 비등방성의 정도를, Ω_p와 c는 자이로스코프 및 감쇠 효과를 각각 나타낸다. 수치 모의시험에서, 변위 출력신호는 랜덤신호를 가진력으로 주어질 때 식 (1)의 이산 모델로부터 구한다. 평균이 0이고 비상관 의사랜덤 가우스 프로세스 (zero-mean and uncorrelated pseudo-random Gaussian process)의 가진력 신호는 등분포-의사랜덤 신호 (uniformly distributed pseudo-random samples)의 박서-뮬러 (Box-Mueller) 변환을 통해서 구한다[6]. 잡음으로 오염된 시퀀스는 순수 출력 시퀀스에 잡음 시퀀스를 더해 구한다. 여기서 잡음 신호는 가진 시퀀스와 비상관인, 평균이 0이고 비상관 의사랜덤 가우스 프로세스(zero-mean and uncorrelated pseudo-random Gaussian process)이다. 잡음-신호비 (noise-to-signal (N/S) ratio)는 로 정의되고, 와 는 각각 잡음에 오염되지 않은 순수 출력 시퀀스와 잡음신호의 표준편차를 나타낸다. 시계열 모델의 입.출력 시퀀스에는 1024개의 데이터 포인트가 각각 사용되고, 해닝 윈도우(Hanning window)를 사용하는 1024 데이터 포인트의 FFT(Fast Fourier Transform)의 10번 평균화를 위해서는 10240개의 데이터포인트가 사용된다.

2.1 등방 회전체계

이론적인 방향 주파수응답함수가 Fig. 1과 같은 단순 등방 회전체계 ($\delta = 0$, $c = 0.1$, $\Omega_p = 0.2$)를 고려하자. Table 1은 잡음-신호비에 따른 방향 시계열에 의한 모드 매개변수의 추정치를 나타낸다. 잡음-신호비가 증가함에 따라 점차 높은 차수를 요하지만, 높은 잡음-신호비에도 좋은 정확도를 보인다. 잡음이 없는 이상적인 경우, 추정치 및 모델구조 dARMAX(2,1,0)는 이론치와 일치한다. 잡음-신호비가 5% 및 10%일 때 모두 판별식 AIC는 dARMAX(6,5,6)를, SBC는 dARMAX(4,3,4)를 적정 차수로 지시했다. Table 1의 오른쪽 컬럼은 잡음-신호비가 5%일 때 기존 ARMAX 모델로 추정한 모드 매개변수를 나타내고, 여기서 판별식 AIC는

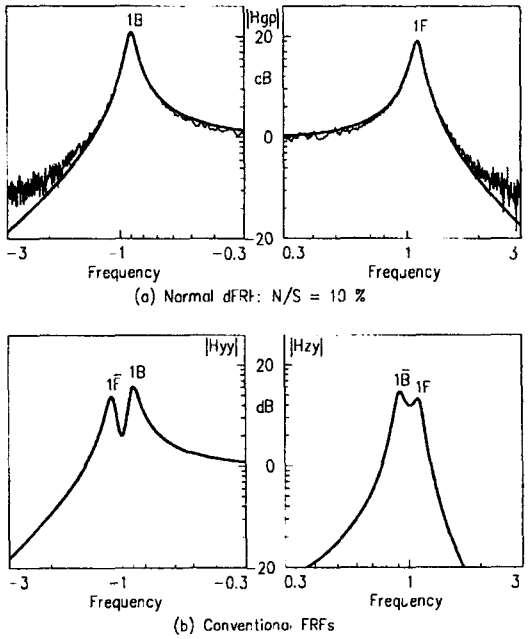


Fig. 1 FRFs of isotropic rotor : $\delta = 0$, $c = 0.1$, $\Omega_p = 0.2$
—— : True, - · - · - : dARMAX(4,3,4), ------ : FFT

Table 1 Estimated modal parameters of the isotropic rotor : $\delta=0$, $c=0.1$, $\Omega_p=0.2$, $T=1$

	Mode	True parameters	dARMAX			ARMAX		
			N/S = 0 %	N/S = 5 %	N/S = 10 %	N/S = 5 %		
Natural freq. /Log. dec.	1B	-0.9037/0.3133	-0.9037/0.3133	-0.9037/0.3120	-0.9049/0.3108	-0.9055/0.4625	-0.9049/0.3097	-0.9043/0.3151
	1F	1.1038/0.3133	1.1038/0.3133	1.1032/0.3146	1.1038/0.3177	1.1060/0.6258	1.1025/0.3194	1.1038/0.3134
Residues of $H_{gp}(j\omega)$	1B	0.0025+j0.4981	0.0025+j0.4981	0.0024+j0.4953	-0.0018+j0.4956	0.0792+j0.5453	-0.0025+j0.4932	0.0003+j0.4996
	1F	-0.0025-j0.4981	-0.0025-j0.4981	-0.0024-j0.4953	-0.0073-j0.5007	-0.1678-j0.4829	0.0005-j0.5003	-0.0063-j0.5003
Model order (p, q, r)			(2,1,0)	(2,1,2)	(4,3,4)	(4,3,4)	(6,5,6)	(10,9,10)

ARMAX(20,19,20)을, SBC는 ARMAX(12,11,12)를 적정 차수로 지시했다. 약한 모드 (1F 또는 $1\overline{F}$)는 모델차수 ARMAX(6,5,1)까지는 거의 존재 여부도 규명이 되지 않았고, 모델차수를 ARMAX (10,9,10)까지 올리기 전까지는 큰 오차를 동반한 추정치를 주었지만, 방향 시계열에서는 모델차수 dARMAX(2,1,2)에서도 정확한 추정치를 주었다. 그리고 기존 시계열로는 직접 방향 주파수응답함수의 레지듀 (residues)를 추정할 수 없지만, 참고문헌 (1~5)에 나타난 기존 및 방향 주파수응답함수의 관계식을 이용하여 구하였다.

Fig. 2는 잡음-신호비가 5%인 경우, dARX(2k,2k-1) 및 ARX(2k,2k-1) 모델로 $k=1,2,\cdots,12$까지 피팅했을 때 모델차수 판별식의 거동을 나타낸다. 여기서 dARX 모델이 ARX 모델보다 우수한 피팅 성능을 보임을 알 수 있는데, 예로서 저 차수의 dARX(2,1) 모델이 고차수의 ARX(6,5)모델보다도 나은 결과를 보임을 알 수 있다. 그리고 dARMAX(p,q,s) (ARMAX(p,q,s)) 모델과 dARX($p+s$, $q+s$) (ARX($p+s$, $q+s$)) 모델은 서로 비슷한 추정치를 보였다.

등방 회전체계의 모의시험에서는, 제안한 방법이 보다 낮은 적정 모델차수를 요구하고, 특히 감쇠와 레지듀의 추정치가 기존의 방법보다 정확함을 알 수 있다. 이것의 근본적인 이유는, 제안한 방법은 Fig. 1에서와 같이 이측(two-sided) 주파수영역에서 잘 분리된 전.후방 모드를 다루는 반면, 기존 방법은 일측(one-sided) 주파수영역에 공액 복소 모드 ($1\overline{F}$ 및 $1\overline{B}$)가 등장해 이들 인접한 모드(1B 및 $1\overline{F}$, $1\overline{B}$ 및 1F)를 다루기 때문이다[2~5]. 또한 자이로스코프

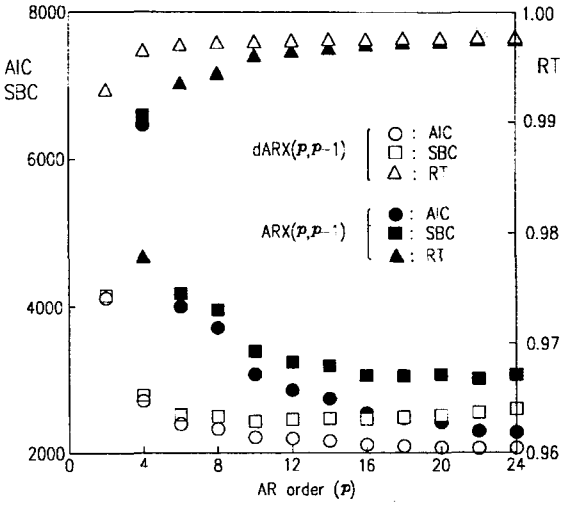


Fig. 2 Model order criteria for isotropic rotor : $\delta=0$, $c=0.1$, $\Omega_p=0.2$, $N/S=5\%$

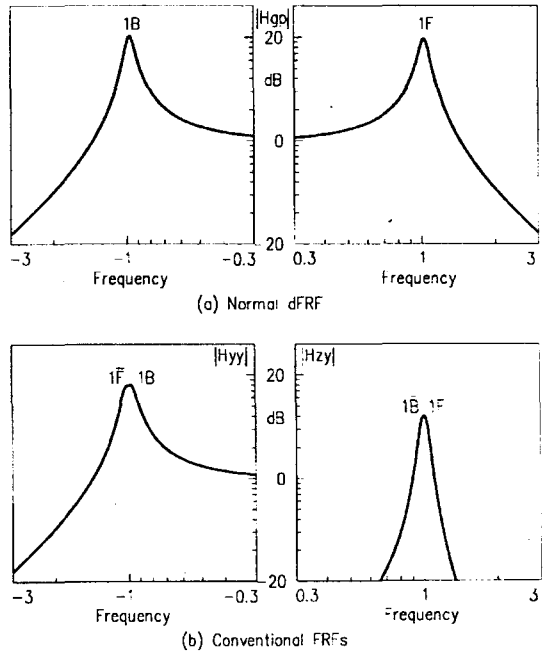


Fig. 3 FRFs of isotropic (weakly gyroscopic) rotor : $\delta=0$, $c=0.1$, $\Omega_p=0.05$

Table 2 Estimated modal parameters of the isotropic (weakly gyroscopic) rotor : $\delta=0,\ c=0.1,\ \Omega_p=0.05,\ T=1,\ N/S=5\%$

	Mode	True parameters	dARMAX (2,1,2)	ARMAX		
				(4,3,4)*	(6,5,6)	(10,9,10)
Natural freq. /Log. dec.	1B	-0.9739/0.3146	-0.9739/0.3161	-0.9945/0.3355	-0.9761/0.4775	-0.9751/0.3195
	1F	1.0241/0.3146	1.0235/0.3145	0.9945/0.3355	1.0087/0.3622	1.0235/0.3140
Residues of $H_{gp}(j\omega)$	1B	0.0006+j0.5005	0.0016+j0.5000	0.0334+j0.5196	0.3280+j0.4031	-0.0005+j0.5176
	1F	-0.0006-j0.5005	-0.0016-j0.5000	0.0379-j0.4955	0.0268-j0.7240	-0.0049-j0.5180

* : Two modes were not separately identified.

Table 3 Estimated modal parameters of the anisotropic rotor : $\delta=0.1,\ c=0.03,\ \Omega_p=0.2,\ T=1/0.7$

	Modes	True parameters	dARMAX(12,11,12)		ARMAX(12,11,12)
			N/S = 5 %	N/S = 10 %	N/S = 5 %
Natural freq. /Log. dec.	$1\overline{F}$	-1.1158/0.0917	-1.1158/0.0919	-1.1158/0.0924	-1.1158/0.0922
	1B	-0.8921/0.0961	-0.8915/0.0960	-0.8915/0.0962	-0.8915/0.0960
	$1\overline{B}$	0.8921/0.0961	0.8915/0.0960	0.8915/0.0962	0.8915/0.0960
	1F	1.1158/0.0917	1.1158/0.0919	1.1158/0.0924	1.1158/0.0922
Residues of $H_{gp}(j\omega)$	$1\overline{F}$	-0.0005+j0.0213	-0.0020+j0.0202	-0.0019+j0.0174	-0.0013+j0.0194
	1B	0.0013+j0.4781	0.0020+j0.4779	0.0038+j0.4793	0.0027+j0.4787
	$1\overline{B}$	-0.0008-j0.0326	-0.0007-j0.0303	-0.0014-j0.0272	-0.0012-j0.0303
	1F	0.0000-j0.4668	0.0029-j0.4677	0.0029-j0.4710	0.0010-j0.4685
Residues of $H_{gp}(j\omega)$	$1\overline{F}$	-0.0013+j0.0998	-0.0017+j0.0991	-0.0012+j0.1013	-0.0010+j0.1003
	1B	0.0013-j0.1249	0.0021-j0.1258	0.0036-j0.1269	0.0023-j0.1259
	$1\overline{B}$	0.0013+j0.1249	0.0035+j0.1241	0.0069+j0.1221	0.0042+j0.1233
	1F	-0.0013-j0.0998	-0.0014-j0.0975	-0.0027-j0.0963	-0.0019-j0.0983
ACF	1F	0.064	0063	0.060	N/A
	1B	0.044	0.043	0.044	
	System	0.053	0.054	0.053	

효과가 감소하면, Fig. 3과 같이 기존의 주파수응답함수에서는 근접한 두 모드의 간섭이 심해지는 반면, 반향 주파수 응답함수에서는 여전히 잘 분리됨을 알 수 있다. Table 2의 추정치는 위의 관측을 반증하고 있고, 여기서 판별식 AIC 와 SBC는 각각 ARMAX(16,15,16)와 ARMAX(8,7,8) 을 적정차수로 지시했다.

Fig. 1(a)는 잡음-신호비 10%에서, 정방향 주파수 응답함수 이론치와 dARMAX(4,3,4) 모델과 FFT에 의한 추정치를 비교하고 있다. 여기서 복소 시계열에 의한 추정치가 이론치와 구별할 수 없을 정도로 일치하고 있음을 알 수 있다.

2.2 비등방 회전체계

Table 3은 $\delta=0.1,\ c=0.03,\ \Omega_p=0.2$인 비등방 회전체계에서 복소 시계열에 의한 모드 매개변수의 추정치를 나타낸다. 모든 판별식은 잡음이 없는 경우 dARMAX(4,3,0) 모델을, 잡음이 있는 경우는 dARMAX(12,11,12) 모델을 각각 적정모델로 지시했다. 추정치는 10% 잡음-신호비 까지도 만족할만한 정확도를 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 적정치보다 낮은 차수에서는 감쇠를 초과추정하는 경향을 보였다. Table 3의 우측 컬럼은 잡음-신호비 5%인 경우 ARMAX(12,11,12) 모델의 적정차수로 피팅했을 때의 추정치를 나타내고 있다. 추정치의 정확도와 모델 차수에 관한한 두 모델은 비슷한 결과를 줌을 알 수 있다. 이는 두 방법 모두에게서 비교적 큰 비등방성에 의한 공액복소 모드 ($1\overline{F}$ 및 $1\overline{B}$)의 등장에 의한 인접 모드 (1B 및 $1\overline{F}$, $1\overline{B}$ 및 1F) 들 간의 간섭 영향 때문이다[2~5].

Table 4는 $\delta=0.025,\ c=0.1,\ \Omega_p=0.05$인 약한 비등방성을 가진 회전체의 경우 모드 매개변수의 추정치를 나타낸다. 이 경우 차수 판별식 AIC 와

Table 4 Estimated natural frequencies/logarithmic decrements of the weakly anisotropic rotor : $\delta=0.025$, $c=0.1$, $\Omega_p=0.05$, $T=1/0.7$ $N/S=10\%$

Model orders(p, q, r)	dARMAX		ARMAX	
	1B	1F	1B	1F
(4,3,4)	Unidentified	Unidentified	Unidentified	Unidentified
(8,7,8)	-0.9702/0.3787	1.0238/0.4196	-0.9748/0.3649	1.0300/0.4248
(12,11,12)	-0.9707/0.3282	1.0278/0.3303	-0.9712/0.3362	1.0270/0.3430
(16,15,16)	-0.9701/0.3189	1.0266/0.3243	-0.9721/0.3042	1.0259/0.3239
(2,1,2)*	-0.9727/0.3168	1.0235/0.3150		
True values	-0.9708/0.3164	1.0267/0.3127	-0.9708/0.3164	1.0267/0.3127

* : Estimated with Isotropic dARMAX(2,1,2) Model

SBC는 각각 dARMAX (16,15,16) (ARMAX (20,19,20)) 및 dARMAX(12,11,12) (ARMAX (16,15,16))을 적정 모델로 지시했다. 두 방법 모두 정확도가 떨어진 추정치를 주는데, 이는 비등방성도와 자이로스코프 효과가 감소함에 따라서 두 인접 모드 (1B 및 $1\overline{F}$, 또는 $1\overline{B}$ 및 1F)가 더욱 인접해 간섭이 심해지기 때문이다[2~5]. 이와 같은 시스템은 등방 시계열 모델로 잘 근사화될 수 있을 것으로 예상되는데, 실제 Table 4에서 보듯이 등방 시계열 dARMAX(2,1,2) 모델에 의한 추정치 중에 특히 지배 (dominant) 모드 (1B 및 1F)의 감쇠가 이론치와 거의 일치함을 알 수 있다.

축차(iterative) 추정 알고리즘은 고차 모델의 피팅시 수렴과 관련된 어려움을 겪기도 하는데, 이는 2 단계 최소 자승법[6] 또는 dARX($p+r$, $q+r$) 모델의 사용으로 극복할 수 있다.

종합적으로, 방향 시계열에 의한 방법은 시간영역에서 복소 모드 시험을 성공적으로 구현하고, 모드 매개변수 규명에 있어서 등방 회전체 및 약한 비등방 회전체의 경우 기존 시계열에 의한 방법보다 효과적임을 알 수 있다.

3. 실 험

회전체계의 동특성 규명에서 방향 시계열에 의한 방법이 효과적임을 보이기 위하여 실험실에서 만든 두 가지 회전체를 대상으로 실험을 수행하였다. 하나는 정지상태에서 축 방향 토크를 받는 외팔보 형태의 디스크 및 축으로 구성된 등방 시스템이고, 다른 하나는 일정 속도로 회전하는 비등방 유연 회전체계이다.

3.1 등방 회전체계

Fig. 4 는 축 방향 토크를 받는 회전체계의 1차 전.후방 모드 (1F 및 1B)와 관련된 고유 진동수와 감쇠를 보여주고 있다[7~9]. 여기서 H는 무차원 토크 매개변수, EI, R, L 및 Ω는 축의 강성, 반경,

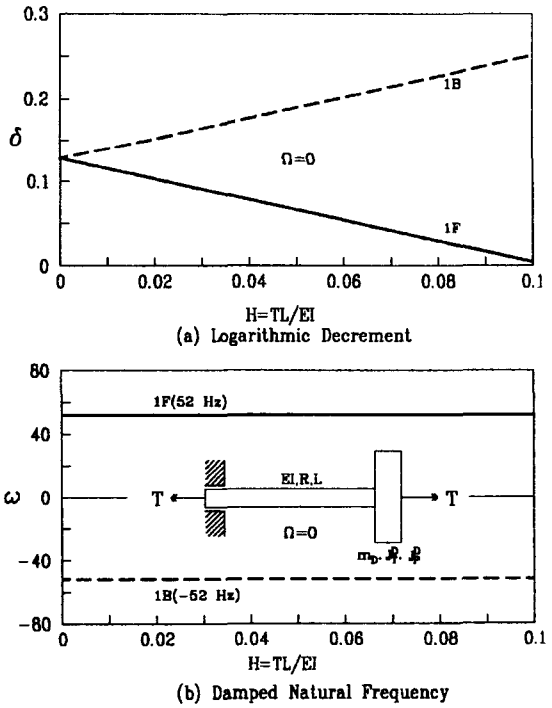
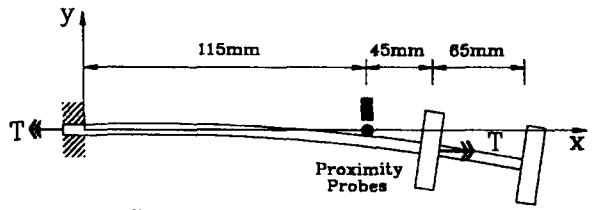


Fig. 4 Modal characteristics of overhung rotor subjected to axial torque ($E=2\times10^{11}$ N/m^2 : $L=0.254$ m : 2% critical damping; $m_D=32$ kg : $J_P^D=0.18$ kg-m^2; $J_T^D=0.09$ kg-m^2; $R=0.019$ m)



	mass (kg)	polar moment ($kg \cdot m^2$)	diametral moment ($kg \cdot m^2$)
Disk#1	0.895	0.0043	0.0022
Disk#2	1.26	0.0035	0.0018

Fig. 5 Specifications of tested overhung shaft-disk system

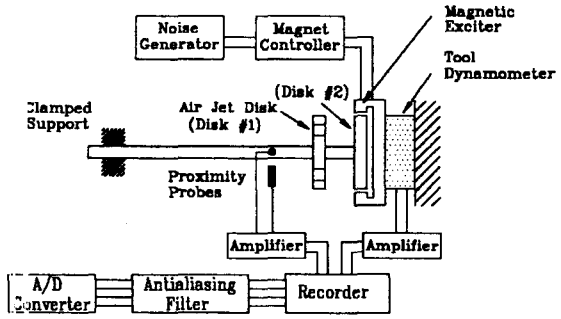


Fig. 6 Experimental set-up for overhung shaft-disk system subjected to axial torque

길이 및 회전 속도를 각각 나타낸다. 그리고 T, m_D, J_T^D 및 J_P^D는 디스크에 작용하는 토크, 디스크 질량, 디스크의 가로 및 극 관성 모멘트를 각각 나타낸다. 그림에서 양의 토크가 증가할수록 1차 후방 모드는 점차 안정화 되는 반면, 1차 전방 모드는 점차 불안정화 되고, 이 때 고유 진동수는 일정함을 알 수 있다. 본 실험에 사용되는 시험 장치의 치수와 디스크의 사양은 Fig. 5에서 볼 수 있다. 축이 회전할 때 순수 토크를 가하기란 불가능하지는 않지만 매우 어려우므로 본 실험은 정지상태에서 행해졌다. 그렇지만, 이 경우 비회전체계의 동특성은 회전수가 매우 높지 않은 회전계와 근본적으로 매우 흡사하다. 본 실험에 사용되는 축-디스크계의 1차 전.후방 고유진동수는 각각 $\omega_1^F = 19.65$ Hz 및 $\omega_1^B = -19.65$ Hz 인 것으로 계산 되었다[7,9].

(1) 실험 장치

Fig. 6은 축 방향 토크를 받는 디스크-축계의 복소 모드 시험을 위한 실험장치 구성도를 보여준다[7,9]. 시험 장치는 두 개의 강체 디스크로 구성되며, 하나는 축 방향 토크를 가하기 위한 압축공기 분류를 받는 디스크 (disk #1), 또 하나는 모드 시험을 위한 전자석 가진용 디스크 (disk #2) 이다. 그리고, 균일한 단면의 원형 탄성 축의 한 끝은 픽스츄어에 의해 단단하게 고정되어 있다. 전달 토크의 크기는 압축공기압력에 의해 조절된다. 복소 모드 시험을 위해 개발된 비접촉식의 전자석 가진기는 십자형 판넬에 4 개의 동일한 전자석과 가진력을 측정하기 위한 3차원 동력계 및 지지 구조물로 구성되어 있다. 실험동안 두 쌍의 전자석은 두 대의 잡음 발생기에서 나오는 0~100 Hz 주파수대역의 독립된 랜덤 잡음 신호에 의해 작동되어진다. 수직 (y-) 및 수평 (z-) 방향의 가진력은 동력계로, 축의 진동 결과치는 1번 디스크 근처에 위치한 한 쌍의 와전류 형식의 변위계로 각각 측정한다. 신호는 컷-오프 주파수 50 Hz의 앨리어싱 방지 필터를 거쳐 100 Hz로 A/D 변환되어 저장된다. 토크를 H=0.007 (T= 3.5 Nm) 까지 올리면서 (exp. #1), H=0 (T=0)까지 내리면서 (exp. #2) 두 번의 과정동안 실험을 수행하여 모드 매개변수의 변화를 조사하였다. 시계열 모델링에는 1024 데이터 포인트의 가진 및 진동 시퀀스가 각각 사용되고, 해닝 윈도우를 사용하는 1024 데이터 포인트의 FFT의 50% 겹침에 의한 30번 평균화를 위해서는 30000 데이터 포인트가 사용된다.

(2) 실험 결과

시스템의 비등방성도를 사전에 알아 보기 위해 본 연구의 첫 논문[1]의 식 (4)와 (5)에 의한 주파수영역 방법을 이용해 정.역방향 주파수응답함수를 추정하였는데, 시험장치가 등방성을 갖도록 설계.제작되어 역방향 주파수응답함수의 추정치는 정방향 주파수응답함수의 추정치와 비교해 거의 0에 가까웠다. 그래서, 등방 dARMAX 피팅 방법[1,7]을 선택해 피팅한 결과, 차수 판별식 AIC 및 SBC는 각각 dARMAX(10,9,10) 및 dARMAX(6,5,6)를 적정 모델로 지시했다. Fig. 8은 dARMAX(6,5,6) 모델에 의한 1 단계 앞선(one-step-ahead) 진동신호 예측치를 보여주는데, 실제치와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. Table 5 (a)는 Fig. 7에 보인 정방향 주파수응답함수 추정치의 주파수영역 복소 커브 피팅[10]에 의한 전.후방 모드의 감쇠 추정치 δ_1^B 및 δ_1^F와 등방 dARMAX에 의한 것을 나타낸다. 주파수영역에서 평균화의 평활 효과로 전자가 후자보다 다소

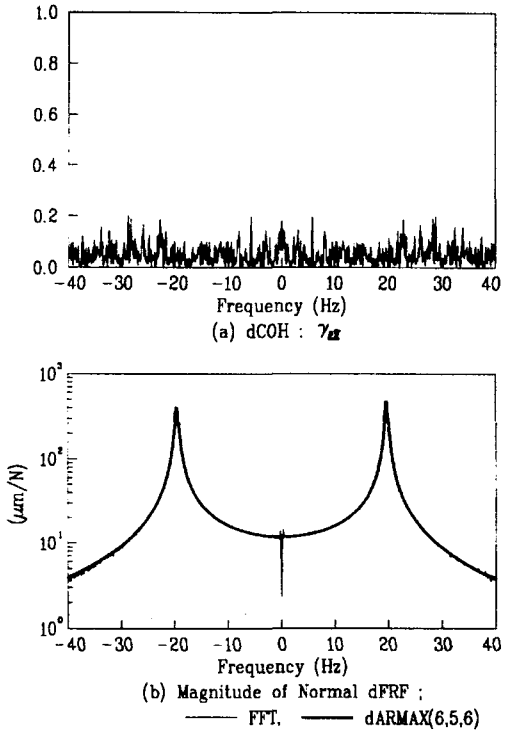


Fig. 7 dCOH and normal dFRFs : H=0.007, Exp. #2

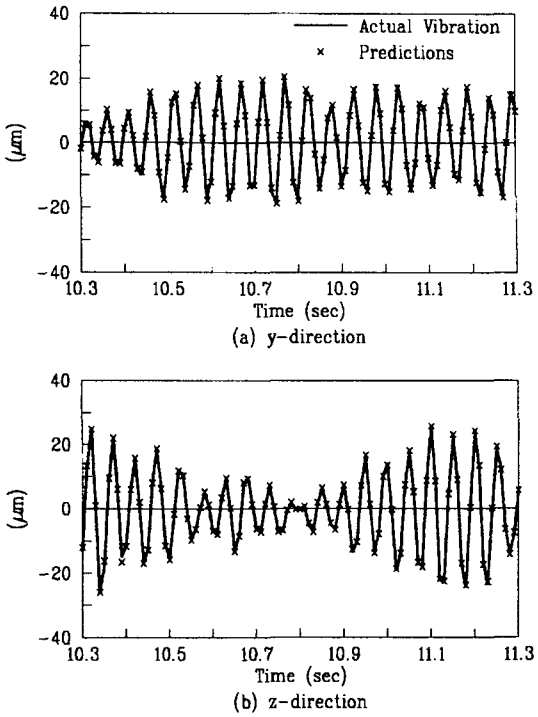


Fig. 8 Predictions of vibration signal at H=0.007

Table 5 Estimated logarithmic decrements (δ_1^B / δ_1^F) of the overhung rotor

(a)

H	Isotropic dARMAX(6,5,6)			Frequency domain method		
	Exp. #1	Exp. #2	Means	Exp. #1	Exp. #2	Means
0	0.093/0.093	0.095/0.093	0.094/0.093	0.100/0.098	0.096/0.095	0.098/0.097
0.006	0.090/0.083	0.091/0.080	0.091/0.082	0.098/0.089	0.097/0.091	0.098/0.090
0.007	0.092/0.083	0.093/0.077	0.093/0.080	0.101/0.090	0.100/0.092	0.101/0.091

(b)

H	Anisotropic dARMAX(8,7,8)			Conventional ARMAX(8,7,8)		
	Exp. #1	Exp. #2	Means	Exp. #1	Exp. #2	Means
0	0.093/0.093	0.096/0.096	0.095/0.095	0.093/0.093	0.099/0.099	0.096/0.096
0.006	0.084/0.084	0.082/0.082	0.083/0.083	0.085/0.085	0.086/0.086	0.086/0.086
0.007	0.086/0.086	0.084/0.084	0.085/0.085	0.088/0.088	0.087/0.087	0.088/0.088

큰 추정치를 준다. 두 방법 모두 토크의 증가에 따른 후방 및 전방 모드의 감쇠 증감 현상을 잘 규명하고있다. 고유진동수 추정치는 해석 결과와 같이

ω_1^B=-19.65 Hz 및 ω_1^F=19.65 Hz 였다.

Table 5(b)는 비등방 dARMAX 및 기존 ARMAX 모델에 의한 감쇠 추정치를 나타내고, 두 모델 모두에게 차수 판별식 SBC (AIC)는(8,7,8)((12,11,12))를 적정 차수로 지시했다. 두 방법 모두 전,후방 모드의 감쇠를 분리 규명하는데 실패했고, 차수를(12,11,12)까지 올려도 개선되지 않았다. 이것의 근본원인은 등방 시계열에 의한 방법은 이측 주파수 영역에 잘 분리된 전,후방 모드를 다루는 반면, 후자의 비등방 및 기존 시계열 방법은 주파수영역에서 전,후방 모드(1F 및 1B) 외에 공액 복소 모드 ($1\overline{F}$ 및 $1\overline{B}$)의 등장으로 기인한 서로 인접한 모드

(1B 및 $1\overline{F}$, $1\overline{B}$ 및 1F)를 다루기 때문이다[2~5]. 매우 높은 차수의 비등방 및 기존 시계열 모델을 이용하면 이와 같이 인접한 모드를 규명이 가능할 수도 있을 것이다.

3.2 비등방 회전체계

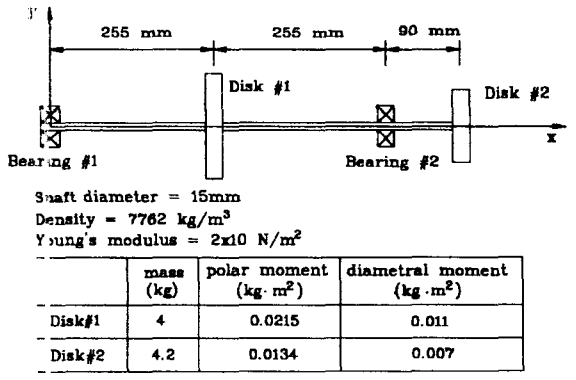
탄성 로터 및 베어링으로 구성된 유연 회전체계의 모드 해석에 제안한 방법을 적용하였다. 실험장치는 두 개의 강체 디스크, 자동 조심형 볼베어링으로 지지된 균일 단면의 탄성 축으로 구성된다. 실험장치의 디스크 데이터 및 치수를 Fig. 9는 보여주고 있다. 일정 회전수 660 rpm에서 시험 회전체의 유한요소 해석 결과 ω_1^B=-27.4, ω_1^F=28.9, ω_2^B=-62.9 및 ω_2^F=66.2 Hz의 1, 2차 후방 및 전방 고유진동수를 얻었다. 여기서, 베어링은 등방인 것으로 가정하였으므로 모드의 분리 현상은 디스크의 자이로스코프 효과에 기인한다[7,11].

(1) 실험 장치

실험 장치의 구성을 Fig. 10에 나타내었다. 가진기에서 두 쌍의 전자석은 두 대의 잡음 발생기에서 나오는 0~100 Hz 주파수대역의 독립된 랜덤 잡음 신호에 의해 작동되어 디스크를 비접촉식으로 수직 (y-) 및 수평 (z-) 방향으로 가진한다. 수직 (y-) 및 수평 (z-) 방향의 가진력은 동력계로, 축의 진동 결과치는 한 쌍의 와전류 형식 변위계로 각각 측정한다. 신호는 컷-오프 주파수 100 Hz의 앨리어싱 방지 필터를 거쳐 250 Hz로 A/D 변환되어 저장된다. 회전체는 d.c. 모터와 평벨트 및 유연 커플링을 통해 구동된다. 실험동안 회전체의 회전수를 660 rpm (11 Hz)으로 일정하게 유지시켰다.

(2) 실험 결과

Fig. 11은 주파수영역방법에 의한 방향 주파수응답함수의 추정치를 보여준다. 운전속도의 조화성분에 의해 심하게 오염된 것을 알 수 있다. 그리고 상당한 크기의 역방향 주파수응답함수의 존재 또는 상당한 크기의 후방 운전속도 조화성분의 존재로 보아, 고려할 만한 비등방도가 회전체계에 존재함을 알 수 있다[2~4]. 그래서, 본 시스템을 강한 비등방 회전체로 규정하고 모드 매개변수 규명을 위해 비등방 피팅 방법[1,7]을 채택하기로 했다. 시계열 피팅 전에 저주파 대역의 잡음신호는 10~100 Hz 대역의 밴드통과 필터링을 하여 제거하였다.



Shaft diameter = 15mm
Density = 7762 kg/m^3
Young's modulus = 2x10 N/m^2

	mass (kg)	polar moment (kg·m^2)	diametral moment (kg·m^2)
Disk#1	4	0.0215	0.011
Disk#2	4.2	0.0134	0.007

Fig. 9 Specifications of tested flexible rotor-bearing system

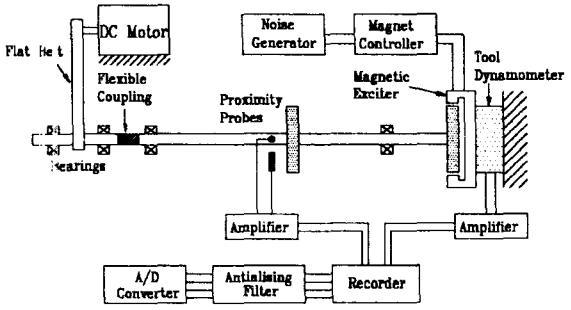


Fig. 10 Experimental set-up for flexible rotor-bearing system

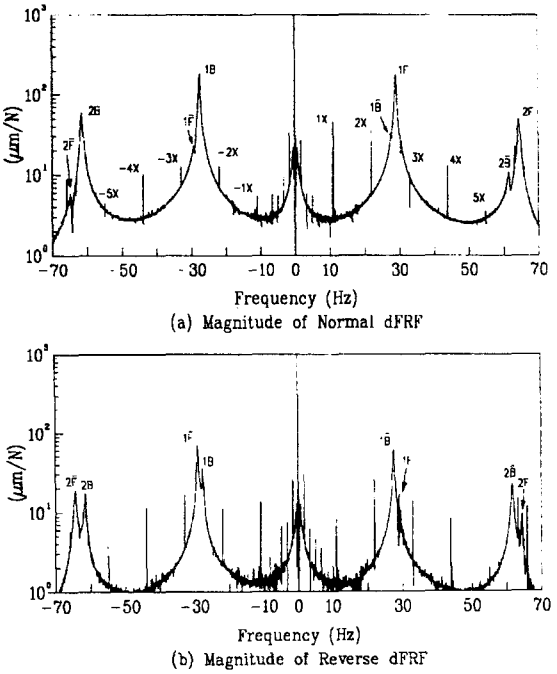


Fig. 11 dFRF estimates by frequency domain method

Table 6 Estimated natural frequencies(Hz) / logarithmic decrements of the flexible anisotropic rotor-bearing system

	Modes	Anisotropic dARMAX(40,39,40)	Conventional ARMAX(40,39,40)	Isotropic dARMAX(40,39,40)
Natural freq. /Log. dec. (ACF)	2B	-61.53/0.032 (0.125)	-61.54/0.030	-61.55/0.029
	1B	-27.51/0.054 (0.089)	-27.48/0.062	-27.48/0.074
	1F	29.00/0.041 (0.150)	29.04/0.049	29.07/0.044
	2F	64.39/0.033 (0.130)	64.40/0.032	64.39/0.033
	System	(0.127)		

Table 6은 dARMAX(40,39,40) 및 ARMAX(40,39,40)에 의한 추정치를 나타내고, 고유진동수 계산치와 추정치가 잘 일치함을 알 수 있다. 두 모델의 차수는 판별식 AIC 및 SBC에 의해 적정 차수로 결정되었다. 이와 같이 높은 차수가 요구되는 것은 Fig. 11에서와 같이 8 개의 모드와 회전수의 조화성분과 측정 잡음 등에 기인한다. 실제 축차(iterative) 추정 알고리즘은 고차 모델의 피팅시 수렴과 관련된 어려움을 겪기도 하는데, 이는 2 단계 최소 자승법[6]의 사용으로 극복할 수 있다. Table 6에 주어진 ACF 추정치로 부터 예측처럼 회전체계와 모든 모드에 상당한 비등방성이 있음을 알 수 있다. Fig. 12는 시계열에 의한 모드 매개변수 추정치에서 의사 모드를 배제하고 재 구성한 방향 주파수응답함수의 추정치를 보여준다. Table 6은 또한 등방 dARMAX(40,39,40) 모델의 추정치를 비교목적으로 나타내었고, 모델차수를 (20,19,20)까지 증가시키기 전까지는 복소 공액 모드를 인식하지 못했다. 그리고, Fig. 11과 Fig. 12에 보인 주정치를 비교해 보면, 8192 데이터 포인트 FFT와 50번 평균화를 위해 8192×50 데이터 포인트를 사용한 주파수영역 방법에 비해 4192 데이터 포인트를 사용한 시계열에 의한 방법의 장점을 알 수 있다.

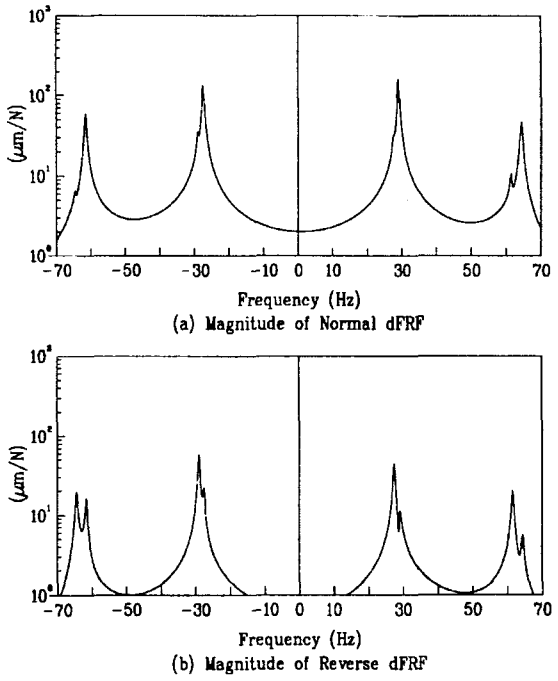


Fig. 12 Regenerated dFRFs by dARMAX(40,39,40)

4. 요약 및 결론

첫번째 논문[1]에 이어 본 두 번째 논문에서는, 수치 모의시험과 실험실에서 제작된 회전체 실험 등을 통하여, 제안된 방법의 타당성, 실제 회전체의 적용성과 유용성을 검증하였다. 2 자유도를 갖는 등방 및 비등방 회전체계의 수치 모의시험에서는 제안한 방향 시계열에 의한 방법이 시간영역에서 복소 모드 시험을 효과적으로 구현함을 보임으로써 방향 시계열 모델링 및 해석의 타당성을 검증하였고, 등방 회전체계 및 약한 비등방 회전체계의 모드 매개변수 규명에 등방 방향 시계열 모델에 의한 방법이 비등방 방향 시계열 및 기존 시계열 방법보다 효과적임을 보였다. 축 방향 토크를 받는 외팔보 형식(overhung)의 디스크 및 축으로 구성된 등방 시스템의 실험 결과에서는 등방 시계열에 의한 방법이 특히 전,후방 모드의 정확한 감쇠 규명에 다른 방법보다 효과적임을 보였다. 일정한 속도로 회전하는 비교적 큰 비등방성을 가진 탄성 회전체계의 실험에서는 비등방 방향 시계열 및 기존 시계열은 서로 유사한 결과를 제공함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Park, J. P. and Lee, C. W., 1998, "Directional ARMAX Model-Based Approach for Rotordynamics Identification, Part 1:

Modeling and Analysis," Journal of KSNVE, Vol. 8, No. 6, pp. 1103~1112.

(2) Park, J. P., 1995, "Complex Time Series Analysis for Rotor Dynamics Identification and Fault Diagnosis," Ph.D. Thesis, KAIST, Korea.

(3) Lee, C. W., 1993, Vibration Analysis of Rotors, Kluwer Academic Publishers.

(4) Lee, C. W., 1991, "A Complex Modal Testing Theory for Rotating Machinery, Mechanical Systems and Signal Processing," Vol. 5(2), pp. 119~137.

(5) Lee, C. W., Park, J. P. and Kim, K. J., 1997, "Complex Time Series Modeling and Analysis for Rotor Dynamics Identification," Trans. ASME J. of Vibration and Acoustics, Vol. 119, pp. 512~522.

(6) Gersch, W., Brotherton, T. and Braun, S., 1980, "Parametric Time Domain Analysis of the Multiple Input/Scalar Output Problem: the Source Identification Problem," J. of Sound and Vibration, Vol. 69(3), pp. 441~460.

(7) Lee, C. W., Park, J. P., Yun, J. S. and Joh, C. Y., 1997, "Complex Time Series Analysis for Rotor Dynamics Identification: Applications," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11(6), pp. 827~842.

(8) Lee, C. W. and Yun, J. S., 1996, "Dynamic Analysis of Flexible Rotors Subjected to Torque and Force," J. of Sound and Vibration, Vol. 192, pp. 439~452.

(9) Lee, C. W. and Yun, J. S., 1993, "Modal Parameter Identification of a Nonconservative Shaft-Disk System Using Directional Frequency Response Function," Proc. of the 14th Biennial ASME Conf. on Mechanical Vibration and Noise, pp. 1533~1538.

(10) Lee, C. W. and Joh, Y. D., 1993, "Theory of Excitation Methods and Estimation of Frequency Response Functions in Complex Modal Testing of Rotating Machinery," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 7, pp. 57~74.

(11) Lee, C. W. and Joh, C. Y., 1996, "Use of dFRFs for Diagnosis of Asymmetric/ Anisotropic Properties in Rotor-Bearing System," Trans. ASME J. of Vibration and Acoustics, Vol. 118, pp. 64~69.