신호 압축법을 이용한 능동형 자기 베어링 시스템의 동특성 규명에 관한 연구

(A Study on the Identification of Dynamic System with AMB using Signal Compression Method)

*김지언[1], #이민철[2], 고석조[3], 이기창[4], 강요환[1]
*C. Y. Kim[1](chiykim@pnu.edu), #M. C. Lee[2] (mclee@pusan.ac.kr), S. J. Go[3] (sjgo@dit.ac.kr),
K. C. Lee[4] (leekc@keri.re.kr), Y. H. Kang[1] (yo2525@nate.com)
[1]부산대학교 대학원, [2]부산대학교 기계공학과, [3]동의과학대학 컴퓨터응용기계계열, [4]한국전기연구원

Key words : Active Magnetic Bearing(AMB), Signal Compression Method

1. 서론

자기 베어링은 흡인력, 반발력을 이용하여 회전체를 공기 중에 부상함으로써 마찰을 없애고 고속 회전을 가능하게 하며, 회전축을 정위치에 지지하는 방식의 베어링이다. 기존의 구름베어링과 비교하여 물리적 접촉면을 가지고 있지 않기 때문에 속도가 빠르고, 마모와 소음이 없으며, 수명이 길다는 장점을 가지고 있다. 하지만 자기 베어링의 자기력은 거리의 제곱에 반비례하고, 제어전류의 제곱에 비례하여 평형점에서만 위치를 지탱하고 지점을 벗어나면 평형점에서 멀어지는 시스템적인 불안정성을 가진 계이다. 따라서 제어기를 통해 시스템 안정성 및 구동성을 보장해 주어야 한다. 그리고 시스템을 제어하고자 하는 경우, 제어 대상인 시스템의 수학적 모델을 토대로 제어기를 설계하며 이때 모델링 과정에서 시스템 특성항들의 규명은 필수적이다. 일반적으로 단일 입출력을 가지는 어떠한 선형시스템은 최소자승법이나 적응디지털필터 등을 이용하여 미지파라미터를 추정할 수 있다. 그러나 자기 베어링과 같이 비선형 성분이 포함된 시스템에 대해 최소자승법 등을 적용하게 된다면 추정한 파라미터의 오차가 커서 미지파라미터의 추정값으로 사용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 임펄스 입력을 주파수 영역에서 위상을 신장 필터를 통해 확장하고 확장된 신호를 시스템에 입력한후 시스템의 응답된 결과 데이터를 다시 수축시켜 임펄스 응답인 즉 시스템의 전달 함수를 유추하여 시스템의 파라미터를 규명하는 신호압축법을 이용하여 자기 베어링의 특성을 규명하고자 한다[1]. 이러한 신호압축법은 자기베어링과 같이 비선형 성분이 강한 시스템에서도 선형성분의 등가적인 임펄스 응답만을 얻을 수 있으며 선형성분의 미지파라미터를 추정할 수 있는 장점이 있다. 선행 연구에서는 로봇의 구동모터와 유압시뮬레이터 시스템등에 적용하여 파라미터 추종성의 우수성을 입증한바 있으며[2][3], 자기 시스템에 적용한 연구도 수행되었었다[4].

본 연구에서는 능동형 자기 베어링 시스템을 신호 압축법을 이용해 자기 베어링의 모델 특성값을 규명하려 한다. 본 논문 2장에서는 시스템 규명을 위해 적용하는 신호압축법을 기술하고, 3장에서는 자기 베어링의 미지 파라미터를 신호 압축법으로 추출하는 실험과 결과를 제시하며 4장에서는 연구의 분석 과 결론을 제시한다.

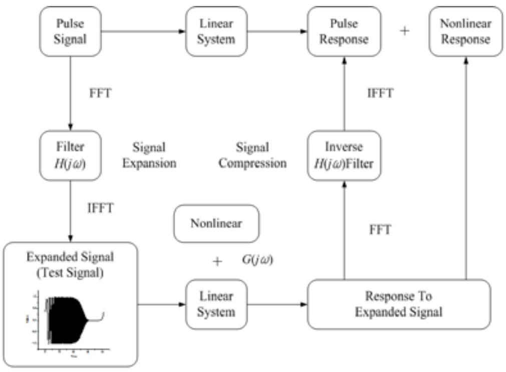


Fig. 1 Principle of the signal compression method

2. 신호 압축법

Fig. 1은 신호 압축법의 처리 과정을 순차적으로 도식화 한 것이다. 일반적으로 시스템의 전달 함수는 임펄스 입력이 들어갔을 때 나타나는 응답이 되지만 물리적으로 구현이 힘들고 비선형 성도 또한 포함되어 있기 때문에 실효성이 없다. 그래서 임펄스 신호를 주파수역에서 신호를 변형하는 방법으로 접근을 한 것이 신호 압축법이다. 우선 임펄스 신호의 주파수 역은 넓은 주파수 대역에 균일한 스펙트럼이 나타나고 위상은 0으로 일정하다. 신호 압축법은 위상의 지연을 신장 필터로 임의 가공을 하여 위상 지연된 임펄스 신호를 생성한다. 식 (1)은 임펄스 신호의 스펙트럼을 나타내는 식으로 관심 주파수 영역까지 균일한 크기를 가지는 스펙트럼을 신호이다.

$$\begin{aligned} &P(n) = 60\exp\left[-\left(\frac{n}{a}\right)^{12}\right], 0 \le n \le N/2-1 \\ &P(n) = 0, n = N/2 \\ &P(n) = P(N-n),\ N/2+1 \le n \le N-1 \end{aligned} \tag{1}$$

임펄스 입력 신호에는 0인 위상과 식 (1)과 같은 스펙트 성분만 있으므로 식 (2)와 같이 주파수의 제곱근만큼의 위상 지연이 되는 신장 필터를 구성한다.

$$H(jn) = \exp\left[-\left(\frac{12n^2}{b}\right)j\right] \tag{2}$$

따라서 주파수역에서 위상이 지연된 새로운 입력신호를 생성하면 식 (3)과 같으며 본 신호를 시간역으로 역푸리에 변환을 하면 fig.2 와 같은 입력 신호 파형이 생성된다.

$$\begin{aligned} &X(n)+jY(n) = P(n)H(jn), 0 \le n \le N/2-1 \\ &X(n)+jY(n) = X(N-n)+jY(N-n), \\ &N/2+1 \le n \le N-1 \\ &X(n)+jY(n) = 0, n = N/2 \end{aligned} \tag{3}$$

Fig.2의 시간역 데이터를 시스템에 입력하여 나온 결과를 푸리에변환을 하고 앞서 위상 신장이 되었던 것을 식 (3)의 음의 부호를 양의 부호로 바꾸어 곱해주면 압축 필터가 되어 시스템 응답의 선형영역의 응답은 임펄스 신호에 대한 시스템의 임펄스 특성 즉 시스템 전달함수가 되어 출력이 된다.

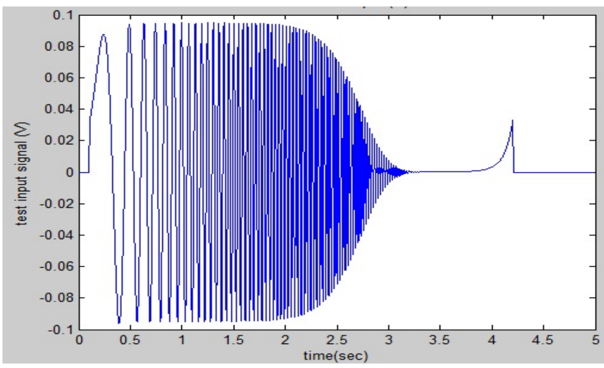


Fig. 2 The test signal (a=170, b=1000)

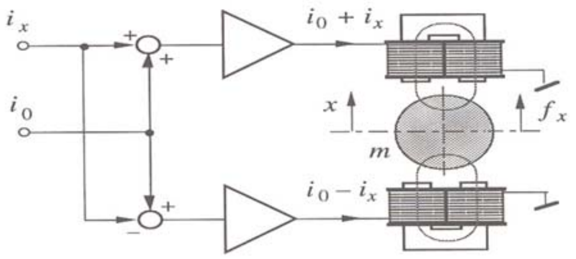
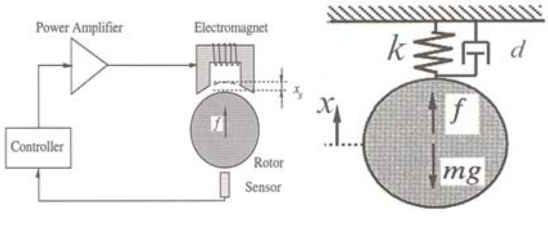


Fig. 3 1-DOF basic architecture of AMB



(a) 1-DOF Control (b) Spring Damper

Fig. 4 1 Equivalent Diagrom of 1-DOF AMB

신호 압축법을 이용하면 선형요소의 경우 교환법칙이 성립되므로 압축과정에서 신장필터와 압축필터의 상쇄가 이루어져 선형요소의 임펄스 응답이 구해진다. 그러나 비선형요소의 경우 교환법칙은 성립되지 않으므로 압축과정에 의해 시간영역으로 바꾸어도 비선형성요소는 선형요소의 임펄스 응답과는 다른 영역에서 나타나거나, 전 시간 영역에 걸쳐서 나타나게 된다. 이런 성질을 이용하면, 시스템에 비선형성분이 포함되어 있어도 선형 성분의 응답을 분리할 수 있어 선형요소만의 등가적인 임펄스 응답을 구할 수 있다.

3. 자기 베어링의 파라미터 추정

일반적인 자기 베어링은 로터 양 방향에 각각 독립적 2자유도와 수평축 1 자유도 해서 5개의 제어 입력을 가지는 시스템을 구성한다.[5] 하지만 각 축에 대해선 1차적으로 일 자유도 평형점 제어가 기본이 되며 Fig. 3과 같은 기본 동역학 모델 시스템으로 볼 수 있다. 그림에서 위 및 아래 전자석이 당기는 힘의 차이 힘인 합력은 f_x 는 식(4)와 같으며 이때 K_m은 식 (5)로 표현되는 전자석 상수이다.

$$f_x = f_+ - f_- = K_m\left\{\frac{(i_o+i_x)^2}{(s_o-x)^2} - \frac{(i_o-i_x)^2}{(s_o+x)^2}\right\} \tag{4}$$

$$K_m = \frac{1}{4}\mu_0 N^2 A \tag{5}$$

여기에서 변위는 x로 주어지고 입력 제어 전류는 i_x, 진공에서의 투자율은 μ_o, 코일 턴수는 N, 액추에이터의 작용면의 넓이는 A, 자기 부상시의 통상의 틈새는 s_o, 바이어스 전류는 i_o , $x \ll s_o$라고 가정하고, 선형화 하면 식 (6)과 같은 선형화 수식을 유도할 수 있다.

$$f_x \fallingdotseq \frac{4K_m i_o}{s_o^2} i_x + \frac{4K_m i_o^2}{s_o^3} x = k_i i_x + k_s x \tag{6}$$

여기서 k_i는 전류강성 및 k_s는 위치강성으로 시스템 제작시 결정되는 상수가 되며 또한 시스템 선형 모델링의 동특성 인자가 된다. Fig. 4와 같이 로터를 스프링 뎀퍼 2차 시스템으로 선형화 시키면 로터의 무게를 m이라고 할 때, 자기베어링지지 로터의 운동방정식은 식 (7)과 같다.

$$m\ddot{x} - k_s x = k_i i_c \tag{7}$$

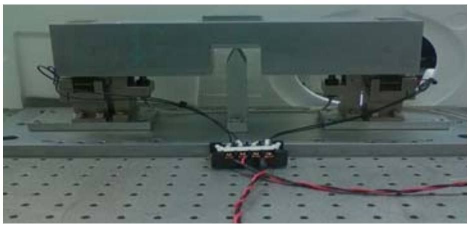


Fig 5. Test Seesaw Magnetic System

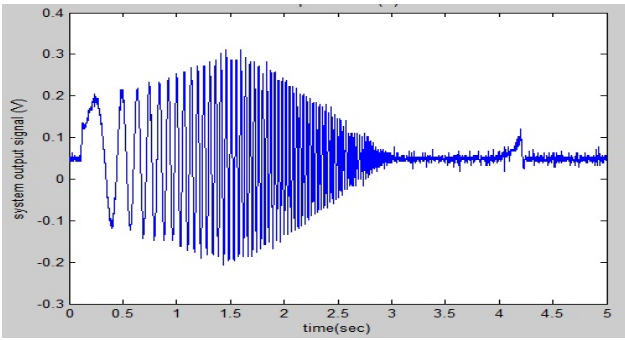


Fig 6. The output signal

따라서 본 논문에서는 두 강성 인자를 신호 압축법으로 규명하여 본다. Fig 5는 본 실험을 수행한 실험 시스템 사진이며, Fig. 6은 입력 신호에 대한 시스템 출력이다. 등가적인 임펄스 응답의 보드(bode)선도와 측정하고자 하는 시스템과 같은 차수를 가진 모델의 전달함수에 대한 보드선도의 상호상관계수를 구해 계수 값이 최대가 될 때의 파라미터 값을 선정해본 결과 아래와 같았다.

$$k_p = 0.45\,,\, w_p = 325 \tag{8}$$

4. 결론

본 연구에서는 비선형 성분과 선형 성분이 공존하는 능동형 자기 베어링 시스템에서 선형 시스템에 대한 시스템 특성을 신호 압축법을 적용하여 규명하여 보았다.

후기

본 연구는 (부산대학교 특수환경 Navigation/ Localization로봇기술연구센터를 통한) 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇전문인력양성사업의 지원으로 수행되었음..

참고문헌

1. Sinha, N. K.,"Microprocessor-based control systems", D. Reidel Pub. Co. 1986.
2. 진상영, 이민철, 손권, 이만형, 이장명, 안두성, 한성현, “신호압축법과 상관계수를 이용한 비선형시스템의 동특성 규명에 관한 연구”, 대한기계학회 춘추학술대회, 제1권, 제 1호, 519-523, 1993.
3. 박민규, 이민철, 고석조, 한명철, “신호압축법을 이용한 유압 시뮬레이터 구동기의 동특성 규명”, 한국정밀공학회 학술대회 논문집, 162-163, 1999
4. 김찬조, 조겸래, "자기부상시스템의 전자석 구동기 해석", 한국 정밀공학회지,제 17권, 제 11호, 75-80,2000.
5. Gerhard. S., Eric. H., “ Magnetic Bearings; Theory, design, and Application to Rotating Machinery”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
6. M. C. Lee, Aoshima, N., "Identification and its evaluation of the system with a nonliner element by signal compression method", Trans. of SICE, Vol.25, No. 7, pp. 729-736, 1989.