

# 하이브리드 축 방향 자기 베어링에서의 시간 지연을 보상하기 위한 제어기

## A controller for the compensation of the time-delay in the hybrid thrust active magnetic bearing

\*#이종민<sup>1</sup>, 김우연<sup>1</sup>, 강민수<sup>1</sup>, 김승중<sup>1</sup>

\*#J. M. Lee(ljm2293@kist.re.kr)<sup>1</sup>, W. Y. Kim<sup>1</sup>, M. S. Kang<sup>1</sup>, S. J. Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술연구원 바이오닉스연구단

Key words : Hybrid Thrust Active Magnetic Bearing, Time Delay, Lead-Lag Compensator

### 1. 서론

플라이휠 에너지 저장 장치(flywheel energy storage system)는 진공 상태에서 고속 회전하는 플라이휠을 마찰 없이 능동적으로 지지하기 위해 자기 베어링을 사용한다. Fig. 1은 플라이휠 에너지 저장 장치의 단면을 보여 준다. 여기서 축 방향 자기 베어링은 영구 자석의 바이어스 자속(실선)에 의해 발생하는 전자기력으로 플라이휠의 무게를 지탱할 뿐 만 아니라 회전체의 축 방향 변위에 따라 바이어스 자속과 코일에 인가되는 전류를 변화시켜 발생하는 자속(점선)이 더해져 회전체의 변위를 제어하도록 설계 되었다.<sup>1</sup>

본 논문은 원판 형 코어(core)를 갖는 축 방향 자기베어링은 일반적으로 손실을 줄이기 위해 규소 강판을 적층한 형태로 제작이 불가능하므로 저탄소강으로 제작된 축 방향 자기베어링에서 발생하는 시간지연 현상을 보상하기 위한 제어기를 제안한다.

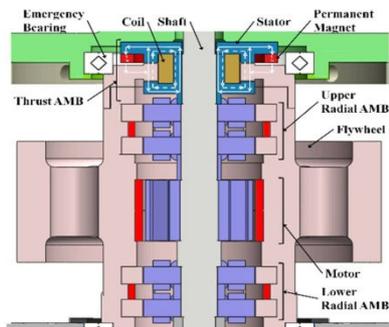


Fig. 1 Cross sectional view of flywheel energy storage system

### 2. 시간 지연 현상

비례-미분 제어기의 비례 이득(P gain)이 4.2 일 때, 미분 이득(D gain)의 변화에 따른 근 궤적을 통해 감쇠비(damping ratio)가 0.7 인 안정적인 미분 이득이 0.025 이고, 0.036 에서 감쇠비가 1 로 계산되었다. 이를 바탕으로 부상 실험한 결과 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 미분 이득이 0.036 일 때 부상이 가능하고, 약 3 초 후에 안정화되었다. 이와 같이 실제 감쇠 효과가 작게 나타나는 현상은 축 방향 자기 베어링의 재질의 특성에 의한 손실로 시간지연의 원인에 기인한 것으로 판단된다. 시스템의 제어 응답 속도, 감쇠를 증가 시키기 위해 비례-미분 제어기의 미분 이득을 크게 하여 부상 실험한 결과 Fig. 3(a)에서 정착시간(settling time)이 약 0.8 sec 로 감소되나 여전히 감쇠가 부족하고, Fig. 3(b) 에서 고주파 신호의 증폭으로 안정 상태(steady state)에서 제어 전류가 약 0.6 A 가 인가됨을 볼 수 있다. 여기서 미분 이득을 더 증가 시키는 것은 고주파 신호의 증폭으로 고속회전

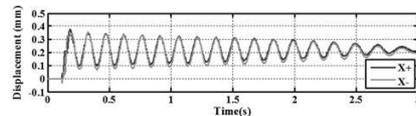
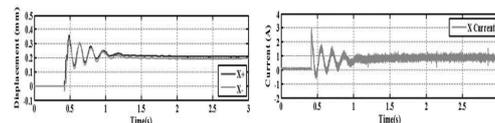


Fig. 2 Levitation test ( $K_p = 4.2, K_d = 0.036$ )



(a) displacement (b) control current  
Fig. 3 Levitation test ( $K_p = 4.2, K_d = 0.042$ )

시 불안정을 초래할 수 있으므로 이를 보상할 제어기가 요구된다.

### 3. 시간 지연 근사 모델

Fig. 4 에 나타낸 시스템 블록 다이어그램에서와 같이 일반적으로 자기 베어링의 전달함수는 위상 지연이 발생하지 않으나 축 방향 자기베어링의 제어 전류에 대한 변위의 주파수 응답에서 주파수 변화에 따른 위상이 지연됨을 확인하였다. 위상 지연은 파데 어림수(Pade approximant)를 이용하여 크기가 1 이고, 일정한 시간 지연을 갖는 1 차 전달함수로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$G_d(s) = \frac{1 - \tau s / 2}{1 + \tau s / 2} = \frac{-s - 270}{s - 270} \quad (1)$$

여기서  $\tau$  는 시간 상수이다. 식(1)의 보데 선도(bode plot)와 실험적으로 구한 주파수 응답을 Fig. 5(a)에 비교, 도시하였다.

### 4. 시간 지연 보상기 설계

실험을 통해 구한 축 방향 자기 베어링의 고유 진동수는 약 7.5 Hz 이다. 따라서 시간 지연을 보상하기 위해 저 주파수 영역(4 ~ 12 Hz)에서 앞섬 보상기(lead compensator)에 의해 위상이 앞서고, 또한 고 주파수 영역에서의 200 Hz 이상의 신호 증폭을 억제하도록 뒤짐 보상기(lag compensator)를 설계하였다. 각 보상기의 전달함수는 식(2)와 같고, 설계된 보상기의 주파수 응답은 Fig. 5(b)에 나타내었다.

$$G_{lead}(s) = \frac{0.03537s + 1}{0.01326s + 1}, \quad G_{lag}(s) = \frac{1}{0.0007958s + 1} \quad (2)$$

### 5. 실험

앞서 근사화한 시간지연 모델과 보상기를 Fig. 4 에 추가한 제어 시스템의 시뮬레이션을 통해  $K_p$  가 4.2,  $K_d$  가 0.02 인 제어 이득을 구하고, 시작품을 이용하여 기존 비례-미분 제어기에 제안된 보상기를 추가하여 부상실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 6(a)에서 감쇠효과가 증

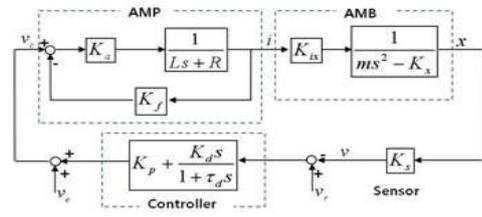
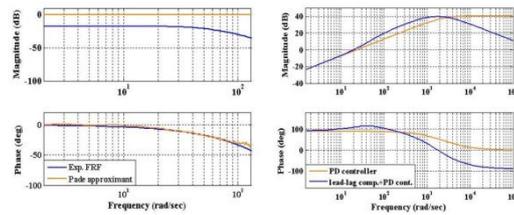
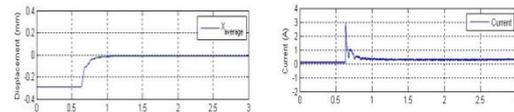


Fig. 4 System block diagram



(a) delay model (b) compensator  
Fig. 5 Bode plot



(a) displacement (b) control current  
Fig. 6 Levitation test ( $K_p = 4.2, K_d = 0.025$ )

가하는 것을 알 수 있고, Fig. 6(b)에서 고주파 신호의 증폭도 줄어들어 드는 것을 확인할 수 있다.

### 6. 결론

본 논문은 축 방향 자기베어링의 재료 특성에 기인한 시간 지연 현상을 보상할 수 있는 제어기를 제안하고, 전류의 증가 없이도 기존 비례-미분 제어기에 앞섬-뒤짐 보상기를 추가하여 시간 지연이 보상됨을 실험적으로 보였다.

### 후기

본 연구는 전력산업연구개발사업의 일환으로 전력연구원의 지원을 받아 수행하였기에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 김우연, 이종민, 배용재, 김승중, "플라이휠 에너지 저장장치를 위한 저 전력소모 하이브리드 마그네틱 베어링의 설계," 한국 소음진동공학회논문집, 20, 717-726, 2010.