

# 베어링리스 리니어 모터에서의 편측식 전자기 베어링을 이용한 이동자의 롤 운동 제어

## Roll Motion Control of a Mover in Bearingless Linear Motor by Using One-sided Active Magnetic Bearings

김 우 연\*. 이 종 민\*. 김 승 종†

Woo-Yeon Kim, Jong Min Lee and Seung-Jong Kim

(2009년 8월 4일 접수 ; 2009년 10월 16일 심사완료)

**Key Words** : Bearingless Linear Motor(베어링리스 리니어 모터), Active Magnetic Bearing(능동자기베어링), Magnetic Levitation(자기부상), Roll Motion(롤 운동)

### ABSTRACT

A bearingless linear motor(BLLM) which consists of two stators and a common mover is able to levitate and move its mover without any linear bearing or even additive windings. In the previous study, BLLM was actively controlled on the translation and pitch motion, while the roll motion is passively stable. In order to control the roll motion, this paper suggests adding active magnetic bearings(AMBs) at bottom of the mover in BLLM. The AMBs control the roll motion and also partially supports the weight of the mover. In this paper, magnetic forces generated by the AMBs are estimated by using an FEM model. Based on the analysis results, the bias current of the AMBs is determined and a PD controller is designed. Through an experimental levitation test, it was verified that roll motion is well controlled by AMB during levitation.

### 1. 서 론

회전형 베어링리스 모터는 부상과 회전이 동시에 가능하여 비접촉, 무운할, 무마찰 등의 장점을 지니고 있다. 베어링리스 리니어 모터(bearingless linear motor; BLLM)는 이러한 회전형 베어링리스 모터<sup>(1,2)</sup>의 개념을 리니어 모터에 적용한 것이다. 그러므로 BLLM은 베어링 또는 추가 권선 없이 상·하 대칭을 이루는 이동자와 고정자 사이 흡인력을 제어하여 이동자의 이동 및 부상이 가능한 모터이다. 따라서 자기부상 방식에 의한 비접촉, 무운할, 무마찰 등의 장점과 더불어 소형화, 경량화가 가능하고 전

력 소모량, 효율 및 제작비 문제 등을 개선할 수 있는 장점이 있다.

BLLM은 구동 코어가 진행방향으로 두 부분으로 나뉘어 제어함으로써 이동자의 부상 및 이동뿐만 아니라 피치 운동(pitch motion)을 제어할 수 있으며, 진행방향 기준으로 횡측 병진운동과 요 운동(yaw motion)도 비록 강성과 감쇠가 작기는 하지만 안정된 부상제어를 전제로 수동적으로(passively) 안정하다. 그러나 이동자의 롤 운동(roll motion)은 수동적으로 안정하기 위해서 이동자 무게 중심이 충분히 아래쪽에 위치하거나 영구자석의 폭에 비해 이동자의 상하 코어간 거리를 크게 해주어야 한다<sup>(3)</sup>. 그러나 이러한 방법들은 이동자의 크기와 무게를 증가시키므로 바람직하지 않다.

이 논문에서는 이러한 롤 운동을 안정화하기 위하여 소형의 능동자기베어링(active magnetic bearing,

† 교신저자; 정회원, 한국과학기술연구원  
E-mail : sjongkim@kist.re.kr  
Tel : (02)958-5610, Fax : (02)958-5659  
\* 한국과학기술연구원

AMB)을 기존 BLLM의 이동자 양쪽에 편측으로 장착하는 방법을 제안한다. 편측식 AMB의 사용은 이동자 무게 증가를 최소화하기 위함이며, 롤 운동을 제어할 뿐만 아니라 BLLM의 이동자의 무게를 BLLM과 분담하여 지지하는 역할을 할 수 있다. BLLM이 아닌 기존의 자기부상 방식 리니어 모터<sup>(4)</sup>는 별도의 리니어 자기 베어링으로 이동자의 부상 상태를 유지하므로 모터 영구자석에 의한 불안정한 강성을 극복할 수 있는 베어링 강성을 얻기 위한 전력 소모량이 크며 모터 자체 크기와 무게 또한 증가하는 단점이 있다. 그러나 이 논문에서는 AMB를 추가하여도 BLLM의 보조적인 용도이므로 전력 소모량이 크지 않도록 소형으로 설계하였다.

우선 안정된 부상을 위한 제어를 설계하기 위해 AMB가 포함된 BLLM을 모델링하였다. 제어기 설계에 요구되는 강성계수는 FEM 해석 및 이론 해석 모델을 통해 도출하였다. 이를 바탕으로 롤 모션을 제어할 제어기를 설계하고, DSP를 이용한 실험 장치를 구성하여 AMB에 의해 실제 BLLM의 롤 모션이 제어됨을 실험적으로 확인하였다.

## 2. 구조 및 원리

### 2.1 BLLM의 구조 및 원리

BLLM은 다양한 구조로 구현 가능하지만 Fig. 1에서 보는 것과 같이 이 논문에서 제안하는 BLLM은 양측식 리니어 모터의 구조와 유사한 형태를 가진다. 영구 자석의 극이 교번되면서 배열되어 있는 영구자석 플레이트(plate)가 상하 대칭으로 설치된 고정자가 가운데 위치하고, 3개의 권선이 감긴 하나의 코어가 상하좌우 대칭을 이루며 고정자와 일정한 공극을 유지하고 있는 구조이다. 그러나 양측식 리니어 모터는 단순히 추력을 2배로 키우고, 고정자와 이동자 사이에 작용하는 인력을 상쇄시켜 리니어 베어링에 작용하는 마찰 또는 하중을 최소화하는 것이 주목적이므로 상하 코일에 인가되는 구동 전류는 동일하게 공급한다. 반면에 영구자석 형 BLLM은 추력을 발생시키기 위해 상하 코일에 흐르는 3상 전류의 위상은 양측식 리니어 모터와 동일하게 주어지지만, 부상을 위해 상하 전류의 진폭을 제어하여 이동자를 부상시킨다는 점에서 차이가 있다. BLLM의 기본적인 부상원리는 AMB의 부상

원리와 같다. 위상 변화가 없고, 즉, 이동자가 정지 상태에 있고, 상하 공극이 같을 때, 상하 권선에 공급되는 동일한 진폭을 갖는 전류는 AMB에 있어서 바이어스 전류(bias current)와 같은 개념으로 간주될 수 있다. 각 코어의 3개의 권선에는 3상 전류가 독립적으로 인가될 수 있도록 구성하고, 일정 진폭을 갖는 3상 전류를 상하 코일에 인가한 상태에서 변위 센서에서 측정된 공극 변화에 따라 상전류의 진폭을 증가, 감소시켜 일정한 공극을 유지하도록 한다. 이를 위하여 4개의 변위센서가 Fig. 1에서와 같이 이동자 아래 모서리마다 총 4개가 조립되어 있어서, 이동자의 부상 방향(Z방향) 변위와 요잉 각

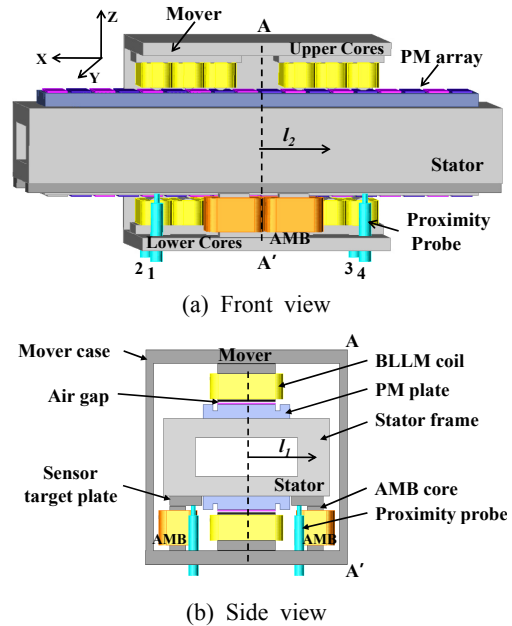


Fig. 1 Structure of the BLLM with AMBs

Table 1 Specifications of BLLM<sup>(3)</sup>

Parameters	Values
PM size (L×W×t)	36×10×1 (mm <sup>3</sup> )
Core face area	36×6 (mm <sup>2</sup> )
PM residual flux density, Br	0.6 (T)
Pole pitch	12 (mm)
No. of coil turns	200 (turns/phase)
Nominal air gap	0.6 (mm)
Nominal current amplitude	2 (A)
Weight of mover	3.2 (kg)

도 및 롤링 각도를 측정할 수 있다. 한편 BLLM에서 상하 마주보는 한 쌍의 코어가 1자유도 거동을 제어할 수 있으므로, 이동 방향(Fig. 1의 X축) 기준으로 앞뒤에 배치된 두 쌍의 코어의 전류를 독립적으로 제어함으로써 상하 방향의 병진운동(Z축)과 피치운동(Y축 중심 회전운동) 등 2자유도에 대해 제어가 가능하다. 여기서, 피치 운동 제어 효과를 높이기 위하여, 앞뒤의 코어 사이에 두 폴 피치(pole pitch)의 거리를 두었다. 1 폴 피치란 한 영구자석 중심에서 이웃하는 영구자석 중심까지의 거리이다. X축 방향으로의 이동 원리는 기존 리니어 모터와 유사한 방법으로 각 코어의 3개 코일에 흐르는 3상 전류의 위상을 변화시켜 이동하게 된다<sup>3)</sup>. BLLM의 사양은 Table 1에 제시하였다.

### 2.2 AMB의 구조

일반적으로 AMB는 두 개의 코어가 서로 마주보고 대칭을 이루는 구조로 구성되지만, 이 논문에서 추가된 AMB는 Fig. 1에서와 같이 X-Z평면에 대칭으로 이동자 옆면 중앙에 설치되어 있다. 롤 운동이 발생 시 양쪽 AMB의 전류를 제어함으로써 복원 가능한 토크를 발생시켜 이동자가 수평을 유지하게 된다. 여기서 이동자 상하 양측에 AMB를 장착하지 않고, 아래에만 편측으로 장착함으로써 이

동자의 무게 중심을 낮추면서 무게와 전력증폭기의 채널 증가를 최소화할 수 있도록 하였다.

AMB의 설계 변수들은 이동자의 롤 방향 관성모멘트와 필요한 강성 등을 기초로 선정되어야 하지만, 이 논문에서는 AMB가 장착될 공간을 우선적으로 고려하고 롤 모션 제어가 가능한 최소한의 전자기력을 계산하여 선정하였다. 먼저, AMB의 정상상태 공극  $g_0$ 는 BLLM측 비상 스톱퍼(stopper) 간극이 0.3 mm임을 감안하여 0.5 mm로 결정하였고, 코어의 단면적  $A$ 는 BLLM 이동자의 측면 공간을 고려하여 Table 2와 같이 결정하였다. BLLM의 상하 코어에 진폭 2A의 상전류가 인가되고 이동자를 롤 방향으로 기울어져 스톱퍼와 닿아 있는 조건에서 FEM 해석 결과, 상하 전자석과 영구자석에 의해 발생하는 토크는 0.032 Nm였으므로, 이 불안정한 상태를 극복하기 위해서 공극이 큰 쪽의 AMB에는 최소 0.711 N 이상의 힘이 필요하다(공극이 작은 쪽 AMB에는 0 N). 그러면, 식 (1)로부터, 최소한 요구되는 바이어스 전류를 구할 수 있다.

$$F_{AMB\#1} = \frac{\mu_0 AN^2}{4g_{\max}^2} (I + i_{\max})^2 \quad (1)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 공기 중의 투자율(permeability,  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m),  $N$ 은 코일 권선 수이고,  $I$ 와  $i_{\max}$ 는 각 AMB에 인가되는 바이어스 전류와 최대 제어전류이다. 보통  $i_{\max}$ 는  $I$ 와 동일하게 설정한다. AMB의 최대 공극  $g_{\max}$ 는 스톱퍼와 AMB의 상대 위치를 감안하면 대략  $g_0$ 의 2배이다. 그러므로 최소 바이어스 전류는 약 0.28 A로 얻어진다. 이 논문에서는 AMB의 바이어스 전류를 최소 요구값의 약 2배인 0.6A로 설정하였다. 실제 제작된 AMB의 형상은 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

Table 2 Specifications of AMB

Parameters	Values
Nominal air gap, $g_0$	0.5 (mm)
Coil turns, $N$	110 (turns/core)
Pole face area, $A$	15×10 (mm <sup>2</sup> )
Height of AMB	29.6 (mm)
Mass	0.173 (kg)
Distance btw two AMBs	90 (mm)

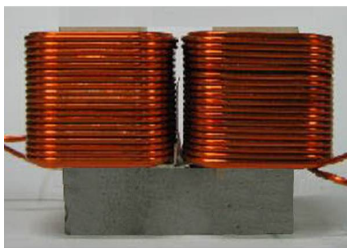


Fig. 2 Prototype of AMB

### 3. System의 전자기력 특성

이 논문의 BLLM에 있어서 부상제어기 설계에 필요한 전류강성계수, 위치강성계수 등을 추정하기 위한 모델링 작업은 참고문헌 (3)에서 소개한 바와 같다. Fig. 3은 FEM 해석으로 구한 그 결과로서, Fig. 3(a)는 BLLM의 공극을 정상상태 공극(0.6 mm)으로 일정하게 유지한 채, 상하 코어의 상전류 진폭을 2A를 기준으로 0.4A씩 한쪽은 증가시키고

다른 한쪽은 감소시키면서 전자기력의 변화를 도시킨 것이다. 이를 선형화한 직선의 기울기가 BLLM의 전류강성계수  $K_L$ 이고, 그 값은 33.55 N/A이다. Fig. 3(b)는 BLLM에 음강성(negative stiffness)으로 작용하는 전자석과 영구자석에 의한 위치강성계수를 나타낸 그림이다. 상하 전자석 코어의 상전류 진폭이 2A일 때 이동자의 수직변위에 따른 전자기력 변화를 도시킨 것으로서 변위가 0.6 mm일 때가 상하 공극이 동일해지는 경우이다. 해석 결과로부터 위치강성계수  $K_z$ 는  $2.2 \times 10^5$  N/m로 계산되었다.

한편, 추가된 AMB의 위치강성계수와 전류강성계수를 FEM으로 해석한 결과는 Fig. 4에 나타낸 바와 같다. Fig. 4(a)는 공극이 0.5 mm로 고정된 상태에서 AMB의 전류 변화에 따른 발생 전자기력의 변화인데, 편축 AMB인 이유로 전자기력이 전류의 제곱에 비례하는 이론식과 유사한 비선형성을 보여준다.

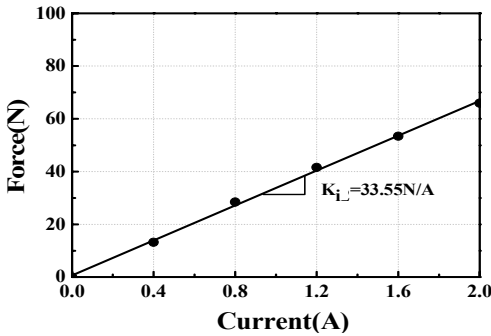
이런 경우의 전류강성계수는 바이어스 전류의 결

정에 따라 크게 달라질 수 있다. 바이어스 전류가 0.6A이므로, 그림에서 그 근처의 작은 전류 변화에 대한 전류강성계수,  $K_{L,AMB}$ 는 10.4 N/A로 얻어진다. Fig. 4(b)는 AMB에 바이어스 전류 0.6A를 인가한 후, 공극을 0.1 mm씩 증가시키며 전자기력의 변화를 도시킨 것이다. 정상상태 공극 0.5 mm를 기준으로 미소 공극 변화에 대한 하나의 AMB의 위치강성계수  $K_{z,AMB}$ 는 14,350 N/m로 계산되었다.

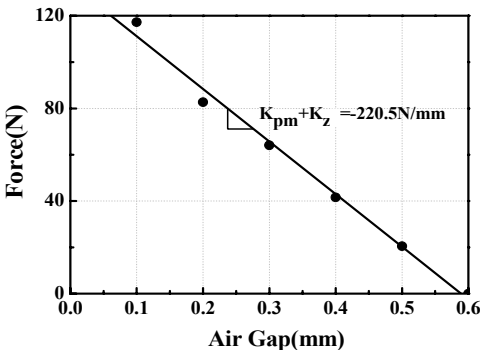
앞에서 언급하였듯이 AMB를 추가 장착한 것을 물 모션을 제어하려는 목적 외에도 이동자의 자중을 BLLM과 분담시키기 위해서이다. 공극이 일정할 때, 한 쌍의 AMB가 만드는 부상력과 토크 식은 식 (2)와 식 (3)과 같이 각각 표현될 수 있다.

$$F_{AMB} = \frac{\mu_0 AN^2}{4g^2} \{ (I + i_{AMB})^2 + (I - i_{AMB})^2 \} \quad (2)$$

$$= \frac{\mu_0 AN^2}{2g^2} (I^2 + i_{AMB}^2)$$

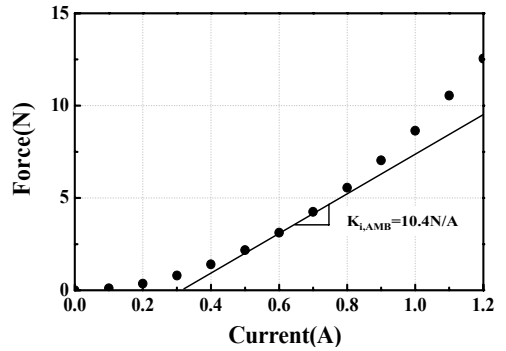


(a)

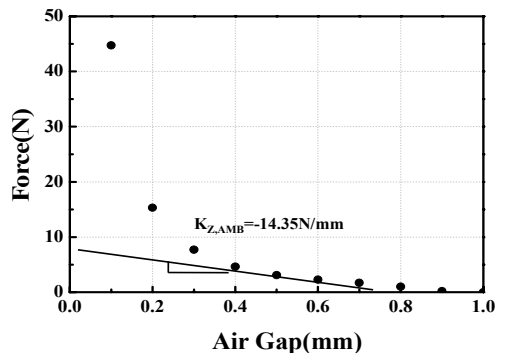


(b)

Fig. 3 Current and position stiffnesses of BLLM: (a) when air gap = 0.6 mm, and (b) current amplitude = 2A, respectively



(a)



(b)

Fig. 4 Current and position stiffnesses of an AMB: (a) when air gap = 0.5 mm, and (b) bias current = 0.6A, respectively

$$T_{AMB} = \frac{\mu_0 AN^2 l_1}{4g^2} \{ (I + i_{AMB})^2 - (I - i_{AMB})^2 \} \tag{3}$$

$$= \frac{\mu_0 AN^2 l_1 I}{g^2} i_{AMB}$$

여기서  $i_{AMB}$ 는 각 AMB에 인가되는 제어전류이고,  $l_1$ 은 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 양쪽 AMB 중심 사이 거리의 1/2이다. Fig. 5는 식(2)에 의해 계산된 AMB의 제어전류 변화에 따른 부상력 변화를 FEM 해석 결과와 비교하고 있다. 그림으로부터 AMB들은 이동자의 자중을 6.57 N만큼 감당하고 있고, 롤 모션 제어전류가 약 0.2A 이내인 경우에는 그 크기가 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 게다가 식(2)는 공극이 일정한 경우이지만, 실제 시스템에서는 공극이 큰 쪽의 AMB에 제어전류가 증가하므로, 롤 모션 제어전류에 의한 AMB의 부상력 변화는 더욱

감소하게 된다. 이는, AMB의 롤 모션 제어기 BLLM의 부상제어에 거의 영향을 끼치지 않음을 의미한다.

Fig. 6은 롤 모션 제어를 위해 AMB에서 발생하는 토크를 알아보기 위해, 식(3)에 의한 이론식 결과와 FEM 해석에 의한 결과를 도시한 것이다. BLLM이 기울어지지 않은 정상상태에서, 양쪽 AMB에 제어전류가 가감되었을 때, 즉, 양쪽 AMB의 바이어스 전류 0.6A에서 한쪽은 0.1A씩 감소, 다른 쪽은 0.1A씩 증가할 때의 토크 변화를 해석한 결과이다. 식(3)에서 예측한대로 FEM 결과도 매우 선형적으로 나타났으며, 롤 모션 제어를 위해 필요한 최소 요구 토크 (0.032 Nm)는 무난히 얻어질 수 있음을 확인하였다. 다만, 이 경우도 공극이 일정할 때이므로, 공극이 커진 쪽에 제어전류가 가해지는 실제 시스템에서는 발생하는 제어 토크가 Fig. 6에 비해 감소할 것이고, 그 감소량은 AMB 제어기 이득에 의해 결정될 것이다.

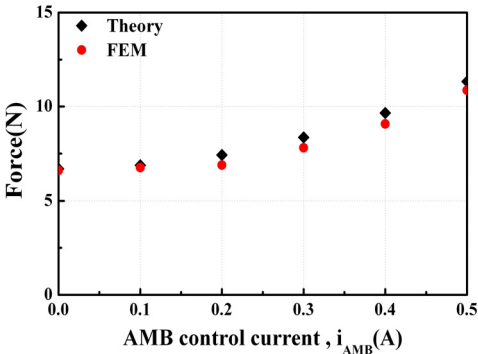


Fig. 5 Variation of levitation force generated by AMBs according to the roll-motion control current

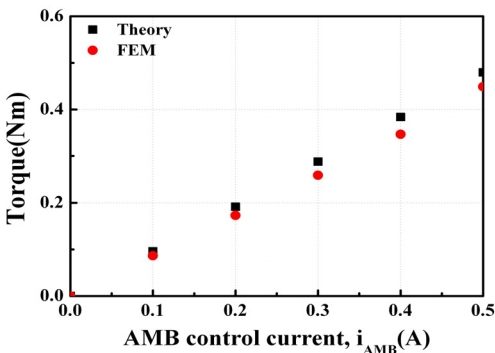


Fig. 6 Torque generated by AMBs according to the roll-motion control current

#### 4. 운동방정식 및 제어기 설계

AMB가 장착된 BLLM 시스템에서, 능동 제어가 이루어지는 Z방향 병진 운동과 X, Y축 중심의 회전 운동(각각 롤, 피치 모션)에 대한 운동방정식은 외력이 없는 경우에 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$m \ddot{z} = F_{+x,BLLM} + F_{-x,BLLM} + F_{+y,AMB} + F_{-y,AMB} - mg$$

$$I_y \ddot{\theta}_y = -l_2 F_{+x,BLLM} + l_2 F_{-x,BLLM}$$

$$I_x \ddot{\theta}_x = l_1 F_{+y,AMB} - l_1 F_{-y,AMB} + l_1^2 K_{\theta_x, BLLM} \theta_x \tag{4}$$

여기서  $z$ 는 Z축 방향으로의 이동자 무게중심의 변위이고,  $\theta_x$ 와  $\theta_y$ 는 각각 X, Y축 중심으로의 회전각이며,  $l_2$ 는 이동자 중심에서 BLLM의 두 코어 그룹 중앙까지 거리이다.  $F_{+x,BLLM}$ ,  $F_{-x,BLLM}$ 은 BLLM에서 X축의 +방향과 -방향에 위치하는 두 코어 그룹에서 발생하는 전자기력,  $F_{+y,AMB}$ ,  $F_{-y,AMB}$ 는 +Y쪽과 -Y쪽에 장착된 AMB들에서 발생하는 전자기력들을 각각 의미한다. 그리고,  $K_{\theta_x, BLLM}$ 은 BLLM의 바이어스 전류와 영구자석에 의해 발생하는,  $\theta_x$  방향으로의 각위치 강성계수(angular position stiffness)이다. AMB에 의한  $\theta_y$  방향으로의 각위치 강성계수는 매우 작으므로 무시하였다. 식(4)의 각 전자기력들은 식(5)와 같

이 선형화하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{+x,BLLM} &= F_{0,BLLM} + K_i i_{+x} + K_z(z - l_2 \theta_y) \\ F_{-x,BLLM} &= F_{0,BLLM} + K_i i_{-x} + K_z(z + l_2 \theta_y) \\ F_{+y,AMB} &= F_{0,AMB} + K_{i,AMB} i_{+y} + K_{z,AMB}(z + l_1 \theta_x) \\ F_{-y,AMB} &= F_{0,AMB} + K_{i,AMB} i_{-y} + K_{z,AMB}(z - l_1 \theta_x) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $i_{+x}$ ,  $i_{-x}$ 는 각각 BLLM의 코어 그룹에 인가되는 제어전류들이고,  $i_{+y}$ ,  $i_{-y}$ 는 롤 모션 제어를 위해 양쪽 AMB에 인가되는 제어전류로서 항상  $i_{+y} = -i_{-y}$ 의 관계를 만족한다.  $F_{0,BLLM}$  및  $F_{0,AMB}$ 는 BLLM과 AMB에서의 각각의 바이어스 전류에 의한 정적인 힘들이다. 이들의 합은 이동자의 자중과 상쇄되도록 설계된다.

$$2F_{0,BLLM} + 2F_{0,AMB} = mg \quad (6)$$

따라서 식 (4)~(6)으로 부터 얻어진 선형화된 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m\ddot{z} - 2(K_z + K_{z,AMB})z &= K_i(i_{+x} + i_{-x}) \\ I_y \ddot{\theta}_y - 2l_2^2 K_z \theta_y &= -l_2 K_i(i_{+x} - i_{-x}) \\ I_x \ddot{\theta}_x - l_1^2 (2K_{z,AMB} + K_{\theta_x,BLLM})\theta_x &= 2l_1 K_{i,AMB} i_{AMB} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 부상제어와 피치 모션제어는 BLLM의 제어전류로써, 롤 모션제어는 AMB의 제어전류로써 독립적으로 수행 가능함을 알 수 있다. BLLM의 제어기는 AMB가 추가되기 전에 비해서  $K_{z,AMB}$ 만큼  $z$ 방향 위치강성계수가 증가하는 효과만 고려하면 되고, AMB 제어기도  $K_{\theta_x,BLLM}$ 을 고려하여 별도로 설계되면 된다. 이 두 위치강성계수들은 FEM 해석을 통해서 추정 가능한 값들이다. 식 (7)의 각 운동방정식을 독립적으로 제어하기 위한 PD 제어기 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{+x} + i_{-x} &= -2K_p z - 2K_D \dot{z} \\ i_{+x} - i_{-x} &= +2l_2 K_{p\theta} \theta_y + 2l_2 K_{D\theta} \dot{\theta}_y \\ i_{AMB} &= -l_1 K_{p,AMB} \theta_x - l_1 K_{D,AMB} \dot{\theta}_x \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, 잘 알려진 대로 부상 제어기와 피치 모션 제어기의 비례미분 이득들을 서로 동일하게 설정하면, 즉,  $K_p = K_{p\theta}$ ,  $K_D = K_{D\theta}$ 이면, 식 (8)은 BLLM의 두 코어 그룹에서 각각의 중심부 변위에 따라 개별

적으로 부상 제어를 수행하는 분산 제어기(decentralized controller) 형태로 나타난다.

$$\begin{aligned} i_{+x} &= -K_p(z - l_2 \theta_y) - K_D(\dot{z} - l_2 \dot{\theta}_y) \\ i_{-x} &= -K_p(z + l_2 \theta_y) - K_D(\dot{z} + l_2 \dot{\theta}_y) \\ i_{AMB} &= -l_1 K_{p,AMB} \theta_x - l_1 K_{D,AMB} \dot{\theta}_x \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)를 식 (7)에 대입하면 식 (10)과 같이 제어기를 포함한 폐회로 운동방정식을 얻을 수 있다. 변위 센서와 전력 증폭기의 이득은 상수라고 가정하여 제어 이득에 포함시켰다.

$$\begin{aligned} m\ddot{z} + 2K_D K_i \dot{z} + 2(K_p K_i - K_z - K_{z,AMB})z &= 0 \\ I_y \ddot{\theta}_y + 2l_2^2 K_D K_i \dot{\theta}_y + 2l_2^2 (K_p K_i - K_z)\theta_y &= 0 \\ I_x \ddot{\theta}_x + 2l_1^2 K_{D,AMB} K_{i,AMB} \dot{\theta}_x \\ + l_1^2 (2K_{p,AMB} K_{i,AMB} - 2K_{z,AMB} - K_{\theta_x,BLLM})\theta_x &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)의 운동방정식들을 안정화시키고 최적의 제어성능을 내도록 제어 이득들을 선정하는 방법으로서, 이 논문에서는 최대 변위일 때 바이어스 전류의 약 70% 수준의 제어전류가 인가되도록 비례제어 이득을 정하고 그 비례제어 이득에 대해서 임계감쇠를 얻을 수 있도록 미분제어 이득을 선정하였다. 변위 센서 이득(3.45 V/mm)과 전력증폭기 이득(1 A/V)을 포함하지 않은, 순수한 비례미분 제어 이득은 다음과 같이 결정되었다.

$$\begin{aligned} \text{BLLM} : K_p &= 2.6, \quad K_D = 0.008 \\ \text{AMB} : K_{p,AMB} &= 3.5, \quad K_{D,AMB} = 0.015 \end{aligned}$$

## 5. 실험

Fig. 7은 AMB이 장착된 BLLM 제어 시스템의 개념적 흐름도이다. 이동자 아래쪽의 네 귀퉁이에 부착된 4개의 변위센서(proximity probe)의 신호는 변위 센서 앰프를 통과 후 A/D 변환한다. 4개 센서 신호로부터 부상 제어를 위한 이동자의  $z$ 방향 변위와 롤 회전 및 피치 회전 각도들을 추출한 후, 각각의 기준치와의 오차들이 BLLM과 AMB의 비례 미분 제어기에 입력된다. 각 제어기에서는 각 오차 값들의 변화 속도를 구한 후, 필터를 거쳐 식 (9)를

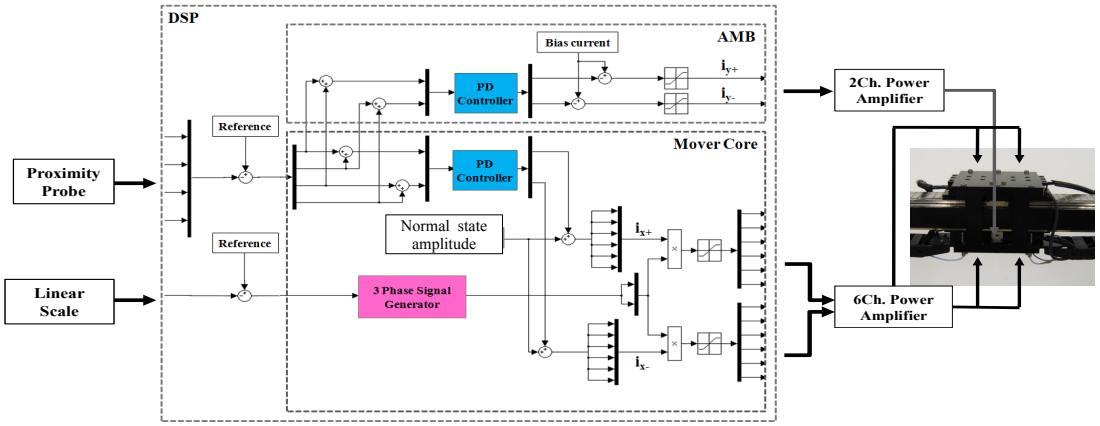


Fig. 7 Schematic diagram of BLLM control system with AMBs

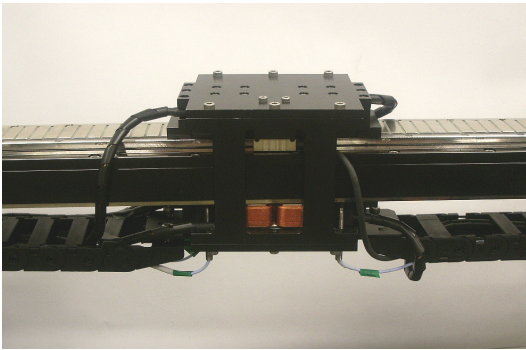


Fig. 8 Prototype of BLLM

가지의 전류 진폭들이 얻어진다. 한편, 리니어 스케일(linear scale)로 측정된 X방향 현재 위치와 이동하고자 하는 위치 및 속도에 따라 실시간으로 U, V, W-상 전류에 필요한 위상을 계산하고, 이들과 위의 4가지 진폭들을 이용하여 총 12채널의 BLLM 구동용 전류가 전력 증폭기를 통해 인가된다.

Fig. 8은 AMB가 장착되어 있는 BLLM의 이동자 모습이다. 이 논문에서 실험을 위해 사용된 제어기는 dSPACE사의 DS1103 PPC이고, 그 외 BLLM과 AMB를 구동하기 위한 각 전력증폭기 및 시스템 사양은 Table 3에 정리하였다.

Fig. 9는 이 논문에서 추가한 AMB의 롤 모션 제어 성능을 실험적으로 확인한 결과를 보여준다. Fig. 9(a)는 AMB를 작동시키지 않고, BLLM의 부상 제어와 피치 모션 제어만을 수행한 결과이다. 이동자가 비상 스톱퍼로 지지되어 고정자로부터 0.3 mm 떨어진 상태에서 제어를 시작하면, 이동자 네 모터에 장착된 센서들 중 2개는 최대값을, 다른 2개는 최소값을 보인다. 불안정한 상태이지만 BLLM 제어에는 1, 2번 센서 신호의 평균값과 3, 4번 신호의 평균값이 이용되는데, 이들은 거의 0.8~0.9 mm 사이에 수렴하고 있으므로, BLLM의 제어는 정상적으로 수행 중임을 알 수 있다. 다만 수동적으로 안정성을 확보하지 못한 롤 모션에 의해 기울어진 것이다. 1, 3번 센서와 2, 4번 센서가 X축을 기준으로 서로 반대편에 있으므로 Fig. 9(a)에서도 이를 확인할 수 있다. 이와 같이 기울어진 상태에서 AMB의 제어를 시작한 경우의 시간응답을 Fig. 9(b)에 도시하였다. 약

Table 3 Specifications of BLLM control system

Parameters		Specification
Amplifier	2 Ch.	Max. 2.8 A / 27 V
	12 Ch.	Max. 4 A / 30 V
Sensor	Proximity probe	Resolution : 0.038 mm
	Linear scale	Resolution : 40 μm
Controller	dSPACE	AD Ch.20 / DACH.8
		Max. input voltage : 10 V

기본으로 하여 제어 전압을 계산한다. 그 중 AMB용 롤 모션 제어기 출력 신호는 바이어스 전류(0.6 A)에 해당하는 전압 값에 가감되어 D/A 변환기(2 ch.)와 전력 증폭기(2 ch.)를 통해서 양쪽 AMB 코어에 제어 전류로서 인가된다. 그리고, BLLM의 두 코어 그룹을 위한 제어기 출력 신호들은 각각 정상 상태의 상 전류 진폭(2A)에 해당하는 전압에 가감되어, 각각의 코어 그룹에서 마주보는 3개의 코어에 인가될, 총 4

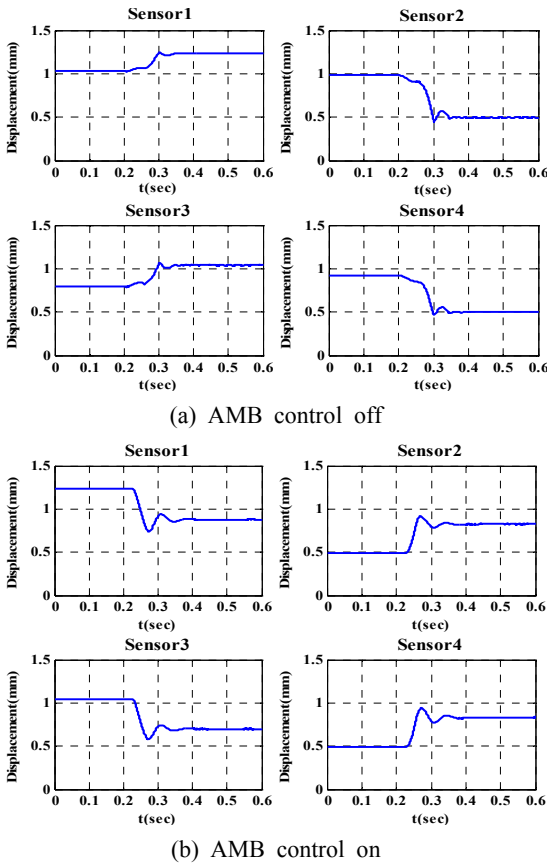


Fig. 9 Experimental results of roll motion control

0.2초 이내에 이동자가 수평을 이루며 안정된 부상을 하는 것을 확인할 수 있다. 제어되고 있는 롤 모션의 고유진동수는 약 14 Hz이고, 참고로, BLLM의 Z방향 병진운동과 피칭 모션의 고유진동수는 이동자의 위치에 따라 주기적으로 변하지만 대략 26~28 Hz와 19~22 Hz이었다. 그림에서 1번과 3번 센서의 오프셋이 약간 차이가 나지만, 이는 센서 장착 시 측정 대상까지의 거리가 약간 상이하기 때문이고, 제어기 내에서 동일하게 보정하여 사용하였다.

## 6. 결 론

상·하 영구자석 플레이트 1쌍과 코어 2쌍으로 이루어진 간소한 BLLM 구조에서 롤 모션을 제어하기 위해 AMB를 이동자의 밑면에 1쌍 추가 하였다. 여기서 AMB는 롤 모션을 제어하는 기능과 동시에 이동자의 무게를 BLLM의 코어와 분담하여 지지하는

역할을 한다. 일반 AMB가 상·하 쌍으로 존재하는 것과 달리 이동자 아래에만 존재하므로 AMB의 바이어스 전류는 무게를 일부분 지지하게 되므로 적정한 바이어스 전류의 설정이 필요하다. AMB의 인가 전류에 대한 부상 힘과 두 AMB의 제어 전류 차이에 따른 토크를 FEM해석 및 계산한 결과로 AMB 바이어스 전류가 적정함을 검토하고, 제어 전류에 의해 부상과 롤 모션제어가 각각 독립적으로 제어 가능함을 보였다. FEM을 통해 전류 강성계수와 위치 강성계수를 해석한 결과로 BLLM과 AMB가 독립적으로 제어되는 간단한 비례 미분 제어기를 설계하였고, 부상 실험을 통해 AMB에 의해 이동자가 수평을 유지하며 안정된 부상이 가능함을 확인하였다. 이로써 기존의 BLLM에 이동자 하부에 한 쌍의 AMB만을 추가하여 능동적으로 롤 모션을 제어함으로써 더욱 안정적인 부상이 가능하다는 것을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) Kim, S. J. and Okada, Y., 2001, "An Axial-type Self-bearing Motor for Small Vertical Axial-flow Pump," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 223~232.
- (2) Kim, S. J., Masuzawa, T. and Okada, Y., 2001, "Shaftless Disk-type Self-bearing Motor for Artificial Heart," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 559~564.
- (3) Kim, W.-Y., Kim, S.-J., Lee, J. M. and Chung, S.-C., 2008, "A PM-type Linear Motor Capable of Self Magnetic Levitation," Transactions of the KSME(A), Vol. 32, No. 10, pp. 850~855.
- (4) Ingolf, G., Richard, Z. and Gerhard, H., 1999, "Design of a State Control for a Solid-coupled Magnetic Levitation Transport System," IEEE International Conference on Control Application, pp. 658~661.
- (5) Kim, S. J. and Okada, Y., 2001, "An Axial-type Self-bearing Motor for Small Vertical Axial-flow Pump," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 223~232.