

## 자기부상시스템의 전자석 구동기 해석

김찬조\*, 조겸래\*\*

### Electromagnet Actuator Analysis of Magnetic Levitation System

Chan Jo Kim\*, Kyeum Rae Cho\*\*

#### ABSTRACT

Recently, there are a great many research for magnetic levitation system. In case electromagnet is operated as the actuator of control system, first of all, we must analysis about an electromagnet. Important parameters of this system are inductance(L) and resistance(R) which are induced from the coil of electromagnet. And attractive force equation is also important. If the load of this system is large, phase delay is caused by self-inductance effect. Because this delay effect cause stability of whole magnetic levitation system to grow worse, a measures to diminish time constant must have been taken. And the linearized attractive force equation which is used at small range of the operating point is compensated to use at larger range, thus the experiment of magnetic levitation system will get a better result.

**Key Words** : Magnetic levitation system (자기부상시스템), Electromagnet (전자석), Signal compression method (신호압축법), Self-inductance effect (자기유도현상)

#### 기호설명

F = Attractive force of electromagnet[Kgf]  
I = Current flowing at the coil[A]  
d = Distance between electromagnet and the core[mm]  
L = Inductance of coil[H]  
R = Resistance of coil[ $\Omega$ ]

#### 1. 서론

최근 전자석을 구동기로 하는 많은 시스템이 연

구 수행 중에 있다. 특히 자기부상시스템은 물리적인 접촉면없이 최소의 마찰력으로 기구를 지지할 수 있다는 장점 때문에 정밀한 위치제어장치, 고속 및 내구성이 요구되는 베어링, 접촉면에 의한 열구 파손 방지를 위한 인공심장 구동부 의료기기 등에 사용된다. 따라서 이러한 시스템을 설계하는데 있어서 우선시 되는 부분이 전자석에 대한 해석이 될 것이다. 소형의 전자석을 이용하거나 초전도코일 등에 의한 구동기일지라도 안정적이고 정확한 결과를 얻기 위해서는 고려해야될 사항이 있다. 특히 설계된 전자석의 코일에 의한 인덕턴스(L), 저항(R) 등의 중요한 파라메타와 전자석 흡인력관계식이 중

\* 부산대학교 항공우주공학과 대학원  
\*\* 부산대학교 항공우주공학과, 기계기술연구소

요한 결정요소이다. 그리고 전자석이 제어시스템의 구동기로 작동할 경우 구동할 부하가 큰 인덕턴스(L)를 가지므로 부하의 자기유도현상에 의한 시정수가 크게 나타나서 입력전압에 대한 부하에 흐르는 전류사이클에 위상지연이 발생한다. 이러한 지연 효과는 전체 자기부상시스템의 안정도를 해치게 되므로 시정수를 줄일 수 있는 대책이 마련되어야 한다. 그리고 시스템의 동작점에서 선형화된 흡인력식은 실제 시스템에서 사용되기에는 좁은 범위에서만 사용가능하기 때문에 선형화된 흡인력식이 넓은 범위에서 사용될 수 있도록 하는 대책이 세워진다면 실험에 있어서 안정적인 결과를 초래할 것이다.

따라서 본 연구에서는 전자석 실험을 위한 간단한 실험장치를 만들고 전자석 코일의 파라미터를 신호압축법에 의해서 구하고 이격거리에 따른 전류와 흡인력을 로드셀 및 기타 측정 장비로 실험을 하여 구한다. 그리고 전압-전류 지연보상기를 설계한다.

## 2. 신호압축법에 의한 시스템 ID

[Fig. 1]은 전자석 실험을 위한 간단한 실험장치이다. 이 실험 장치는 자기부상시스템에 사용될 구동기와 동일한 형태를 하고 있다<sup>[1]</sup>. 사용된 코일은 지름이 0.7mm이고, 권선수는 780회이다. 또한 강자성체 코어(ferromagnetic core)는 연철(SS41)이고 지름 20mm, 길이 60mm이다.

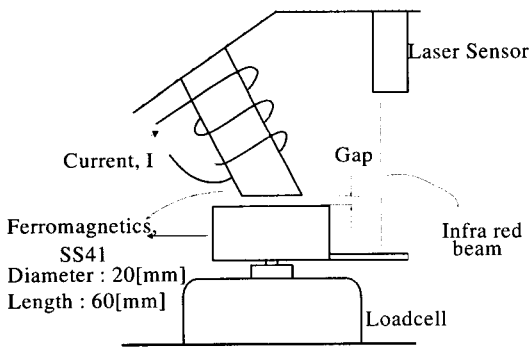


Fig. 1 Electromagnetic experiment system

흡인력을 측정하기 위해 로드셀(loadcell)을 사용하였으며, 정밀한 이격거리 측정을 위한 고분해능 레이저변위센서를 사용하였다. 데이터 획득 및

분석 틀은 PCI-MIO16E-1의 데이터 수집보드와 LabWindows/CVI의 데이터 수집 및 분석 프로그램을 사용한다. 코일내의 저항(R)은 디지털 멀티미터로 측정(R=2.759Ω)할 수 있고, 유도성분(L)의 측정 방법은 Current-Voltage method, Bridge Method, Differential Method, Resonance Method 등이 있다<sup>[2]</sup>. 여기서는 N. Aoshima가 제안한 신호압축법(Signal Compression Method)에 의해 시스템 ID를 통해서 인덕턴스(L)를 구한다<sup>[3]</sup>. 신호압축법의 원리는 [Fig. 2]로 나타낼 수 있다. 확장된 테스트 신호는 수치적인 위상 변환 필터  $H(w)$ 에 의해 임펄스신호로 압축될 수 있다. 만약 확장된 테스트 신호가 시스템에 입력신호로서 사용된다면 시스템의 임펄스 응답은 시스템의 출력신호에 위상 역변환 필터  $h(-w)$ 를 적용함으로써 구할 수 있다.

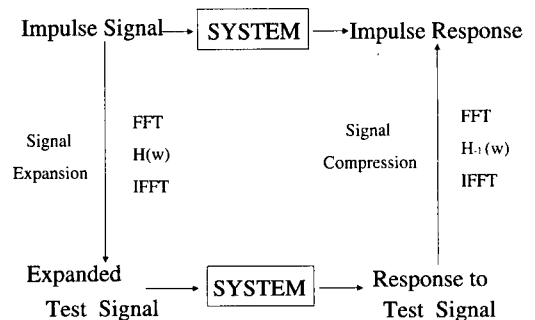


Fig. 2 Principal of the signal compression method

컴퓨터에 의해 발생하는 확장된 테스트 신호의 계산 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X(n) &= \exp\left\{-\left(\frac{n-225}{200}\right)^{12}\right\} \cos\left(\frac{12n^2}{2500}\right), & 1 \leq n \leq 512 \\
 X(n) &= X(1026-n), & 514 \leq n \leq 1024 \\
 X(0) &= 0, & n = 513 \\
 Y(n) &= \exp\left\{-\left(\frac{n-225}{200}\right)^{12}\right\} \sin\left(\frac{12n^2}{2500}\right), & 1 \leq n \leq 512 \\
 Y(n) &= -Y(1026-n), & 514 \leq n \leq 1024 \\
 Y(0) &= 0, & n = 513
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서  $X(n)$ ,  $Y(n)$ 은 각각 실수부와 허수부를 나타낸다. 또한 위상변환을 위한 필터 식은 식(2)와 같다.

$$H(w) = \exp\left(j \frac{12n^2}{2500}\right)
 \tag{2}$$

이를 바탕으로 컴퓨터에 의해 발생된 테스트신

호는 [Fig. 3]에 있고, [Fig. 4]는 테스트신호를 위상 변환필터에 의해 생성된 압축된 신호이다. 고주파 영역의 잡음을 필터링하여 시스템 ID를 보드선도에서 근사적으로 구할 수 있다. [Fig. 5]는 이를 보여준다. 여기서  $L=0.043[H]$ 로 최적으로 구할 수 있다.

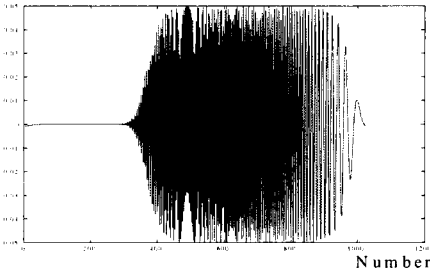


Fig. 3 A computer generated test signal

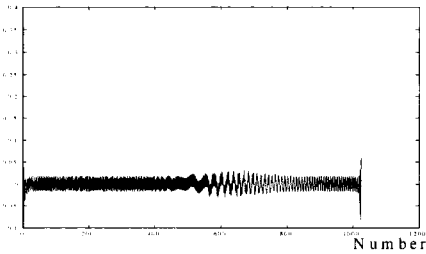


Fig. 4 A compressed signal of Fig. 3

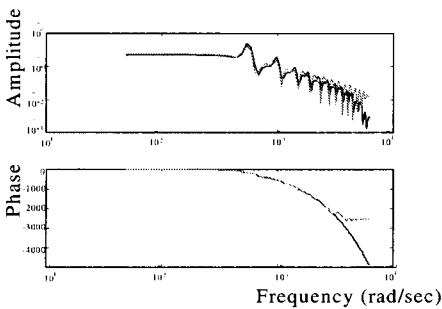


Fig. 5 Comparison between experimental result and computing result

### 3. 전자석 흡인력 실험

전자석의 자기력은 일반적으로 권선수 및 유효 단면적에 비례하고 코일에 흐르는 전류의 제곱에

비례하며 강자성체(ferromagnetic)와의 이격거리의 제곱에 반비례한다고 알려져 있다<sup>[4]</sup>. 그러나 이러한 관계는 자성체 및 단면의 형상, 평균 이격거리, 자속누설에 의한 영향 등 여러 요인 때문에 일반적으로 잘 일치하지 않는다. 또한 본 연구에서와 같이 위치에 따라 다른 곡률을 가지는 원형곡면을 가지는 자성체의 경우에 대해 이론적으로 자기력 식을 유도하기가 더욱 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 주어진 조건에 대하여 전자석의 자기력에 관한 실험을 하였으며, 이를 통하여 만족할 만한 실험적인 식을 구한다.

실험은 일정한 이격거리를 먼저 설정하고, 전자석에 가하는 전류를 변화시키면서 하중을 측정하는 방법을 사용하였다.

각 측정값은 1[KHz]의 속도로 2000개의 샘플을 구하여 평균을 취하였으며, [Fig. 6]에 측정된 포인트들이 점으로 표시되어 있고, 격자로 구성된 곡면은 실험데이터들을 최소자승의 관점에서 곡면에 포함하도록 여러 번 반복해서 수정한 결과이다. 이 곡면을 나타내는 식이 흡인력 실험에서 얻고자 하는 실험식이며, 다음과 같다.

$$F = k \frac{I^n}{d^m} = 0.27 \frac{I^{1.97}}{d^{1.10}} \quad (3)$$

위 식은 일반적으로 알려진 공식과 많이 다른 것을 볼 수 있는데 이는 동작점으로 설정한 이격거리가 비교적 멀고, 자성체가 전자석과 마주하는 면이 곡면이기 때문이다.

[Fig. 7]은 주어진 전류와 이격거리에 관하여, 실험한 흡인력과 실험식에서 계산되어진 흡인력의 차이를 계산한 다음, 이 값으로 최소곡률법에 의해 보간한 격자를 생성하여 나타낸 오차등고선도이다.

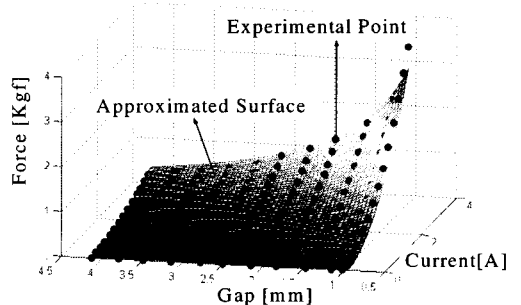


Fig. 6 Attractive force

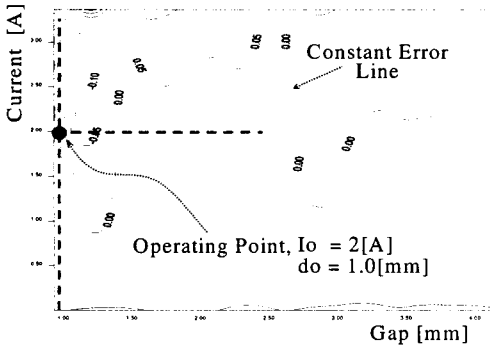


Fig. 7 Force error between experimental & approximated data

#### 4. 구동기 선형화 방안

전자석의 자기력은 식(3)에서와 같이 비선형적인 특징을 가진다. 흡인력식은 시스템 모델링 단계에서 상태방정식을 이끌어내기 위하여 선형화하는데, 실제로 전력증폭기와 전자석이 결합된 구동기는 비선형 동작을 하므로 바이어스전류  $I_0 = 2[A]$  및 평균이격거리  $d_0 = 1[mm]$ 의 동작점으로부터 자성체의 동작이 많이 벗어나는 경우 시스템의 비선형성에 의해 불안정하게 될 것이다. 따라서 구동기의 비선형을 보상할 수 있는 방법이 필요하다. 식(3)에서  $I = I_0 + i$ ,  $d = d_0 + r$ 로 나타낼 수 있으며,  $I_0$ ,  $d_0$ 는 동작점에서 바이어스 전류 및 이격거리라 하고 이점에서 선형화한 자기력식은 식(4)와 같다.

$$F_l(i, r) = F_0 + 1.97 \times 0.27 \frac{I_0^{0.97}}{d_0^{1.10}} i - 1.10 \times 0.27 \frac{I_0^{1.97}}{d_0^{2.10}} r \quad (4)$$

또한 비선형 구동기를 선형화함으로써 생기는 힘의 오차는 식(5)와 같다.

$$f(i, r) = 0.27 \frac{I^{1.97}}{d^{1.10}} - \left[ F_0 + 1.97 \times 0.27 \frac{I_0^{0.97}}{d_0^{1.10}} i - 1.10 \times 0.27 \frac{I_0^{1.97}}{d_0^{2.10}} r \right] \quad (5)$$

식(5)를 그래프로 나타내면 [Fig. 8]과 같다. 이 그래프를 보면 동작점 부근에서는 오차가 없으나

많이 벗어날수록, 특히 이격거리가 가까워지고 전류가 증가하는 방향에서 매우 큰 오차가 난다는 것을 알 수 있다. 자기부상시스템은 대체로 큰 동작 범위에서 제어가 작동해야 하므로 비선형성에 의한 영향을 무시할 수 없다. 따라서 다음과 같은 알고리즘으로 이를 보상한다.

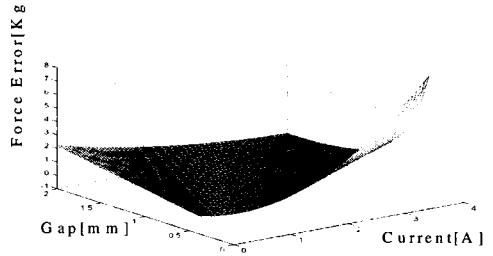


Fig. 8 Force error of nonlinear actuator

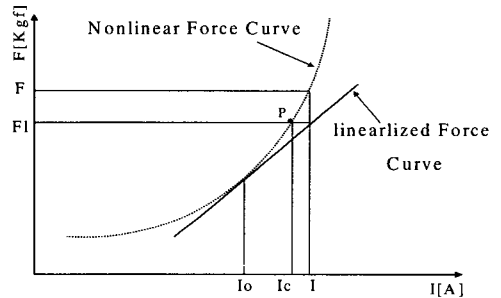


Fig. 9 Nonlinear compensation

[Fig. 9]에서 점선으로 표시된 부분은 주어진 임의의 이격거리에서 전류에 대한 비선형 자기력을 나타낸다. 제어기 동작중 임의의 주기에서 전류  $I$ 가 결정되면 이때 얻어지는 실제 힘은  $F$ 이다. 그러나 시뮬레이션에서 쓰인 선형화된 자기력식은  $F_l$ 이 나올 것으로 예상하므로, 주어진 동작주기, 전류 및 이격거리 조건에서 점선을 따라  $F_l$ 을 결과로 하는  $I_c$ 를  $I$ 대신 제어출력전류로 인가하면 선형화된 직선을 따라 제어전류에 대한 힘이 얻어지는 것처럼 된다.

$$I_c = \left( \frac{F_l \cdot d^{1.10}}{0.27} \right)^{1/1.97} \quad (6)$$

[Fig. 10]은 보상된 자기력과 비선형 자기력사이의 오차를 보여준다. 비보상된 자기력 곡면에서의 오차와 비교하면 넓은 범위에서 식(4)의 선형화한 힘을 실제 구동기에서 얻을 수 있다는 것을 알 수

있다. [Fig. 11]은 제어법칙에서 계산되는 전류  $I$  와 위의 알고리즘에 의해 보상된, 실제 전력증폭기에 인가될 전류  $I_c$ 의 관계를 나타낸다. 결국 이  $I, I_c$ 의 비선형관계가 비선형 자기력을 선형화하도록 하는데, 실제로 적정한 범위이내에서 변환이 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다.

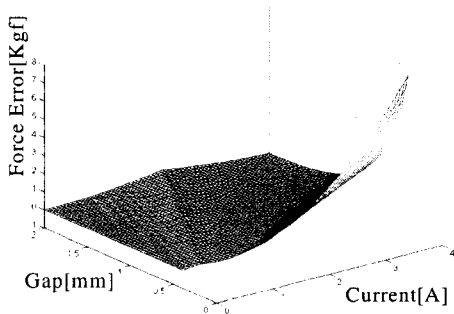


Fig. 10 Compensated force error curve

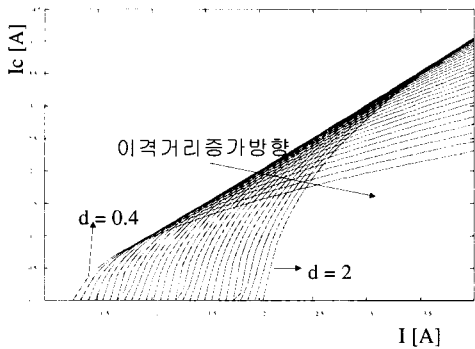


Fig. 11 Relation between control current and compensated current

5. 전압-전류 전달지연보상기 설계

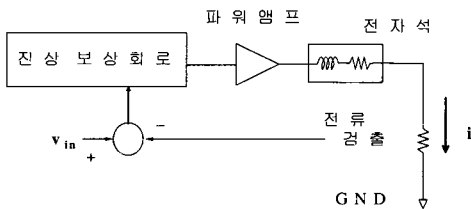


Fig. 12 Voltage-current delay compensation

전자석을 구동기로 하는 시스템의 간략한 블록도가 [Fig. 12]이고 이는 전압이득을 조정하기 위한 전압피드백과 유도성부하의 위상지연을 보상하기 위한 전류피드백 및 진상보상기를 포함한다.

개루프에서 파워앰프에 인가되는 제어 입력  $v_{in}$ 에 대한 코일에 흐르는 전류관계식은 식(7)이다.

$$L \frac{di}{dt} + Ri = (v_{in})A$$

$$\frac{I(s)}{V_{in}} = \frac{A}{Ls + R}, \quad A: \text{Amp Gain} \quad (7)$$

식(7)은 전형적인 1차 지연 전달함수이다. 따라서 제어기 설계 목적은 지연시간을 감소시키는 것이며, 피드백 된 계통에서 전력증폭기의 입력이 적절한 수준을 넘지 않도록 설계되어야 한다

$$K(s) = \frac{aTs + 1}{Ts + 1} \quad (8)$$

제어기 식(8)은 주파수 역에서 보드 선도를 이용하여 설계하였으며, 설계된 수치는  $a=2.0, T=0.01, A=1.54$  이다<sup>[5]</sup>.

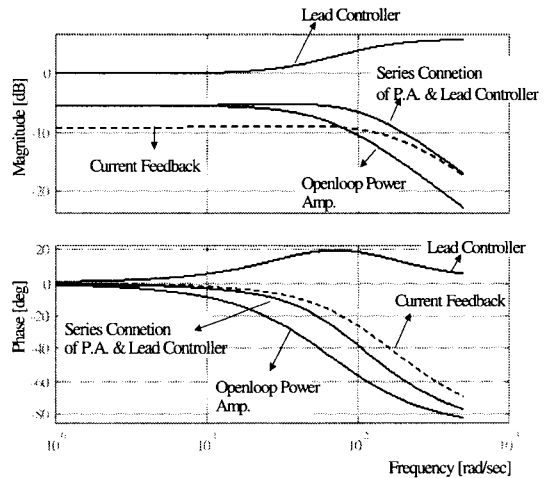


Fig. 13 Lead compensator design using frequency domain

제어기 설계는 [Fig. 13]에서와 같이 대역폭을 넓히고 진상보상기에 의해 대체로 넓은 주파수역까지 위상의 변화가 없도록 설계하였다. 이는 시간역에서 빠른 상승시간 및 지연시간 개선의 효과를 기대하기 위한 것이며, 통과대역에서 신호의 왜곡이 없도록 위상선도를 변화시킨다. 식(9)는 보상된 계통의 전달함수를 나타낸다.

$$G(s) = \frac{i_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{0.0308s + 1.54}{0.00043s^2 + 0.1024s + 4.399} \quad (9)$$

[Fig. 14]는 1[V]의 계단입력에 대한 시간응답을 비교한 것이며, 전달지연시간은 계단응답이 최종값의 50%에 도달하는 시간을 기준으로 하여 비보상계통이 0.0104[sec]이고 보상계통은 0.00337[sec]이다. 보상된 계통의 이득 및 위상여유는 무한대이고 극점은  $-1.819e02$ ,  $-0.563e02$  이며 영점은  $-50$ 이다.

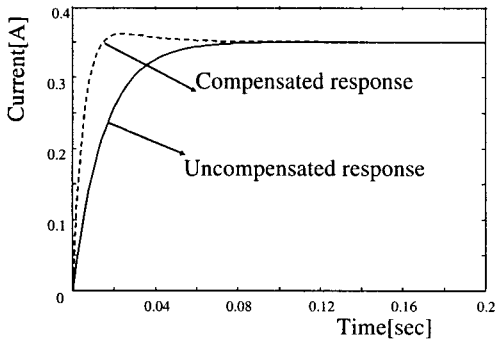


Fig. 14 Time response comparison

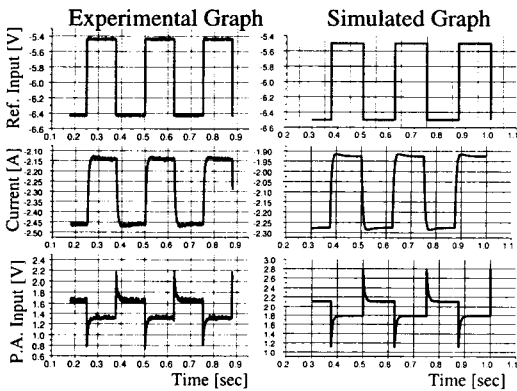


Fig. 15 Comparison between simulation and experiment result

그리고 6[V]의 바이어스 전압이 인가된 상태에서 0.5[Vpp], 4[Hz]의 구형파를 중첩하여 이때 흐르는 전류 및 전력증폭기 입력을 시뮬레이션 하였으며, 또한 직접 제작된 보상기의 전력증폭기와 비교하였다. [Fig. 15]는 이 그래프를 나타내며 시뮬레이션과 실험결과가 만족할 만한 수준으로 일치함을

알 수 있다. 이 그림에서 실험오차는 부정확한 저항소자 및 커패시턴스를 사용하였기 때문인 것으로 생각된다.

## 6. 결론

자기부상시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 시스템의 구동기인 전자석에 대한 분명한 이해와 실험적인 결과가 필요하고 실험 결과로부터 성능향상을 위한 설계가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 전자석의 시스템 ID를 신호압축법을 사용한 실험을 바탕으로 인덕턴스(L)를 구하였다. 그리고 기존의 전자석 흡인력 관계식을 사용하기보다는 주어진 시스템에 맞는 관계식을 얻기 위해 실험을 통해서 전류와 거리에 대한 정확한 관계식을 얻을 수 있었다. 또한 실제 구동기의 작동이 동작점 밖에서도 이루어진다. 이때 일어나는 비선형 구동기의 문제점을 보상함으로써 실제 실험에서 유용하게 사용됨을 예측할 수 있다. 마지막으로 자기부상시스템의 안정성을 위하여 설계한 전압-전류 지연 보상기를 실제 실험에 사용함으로써 시간지연의 오차를 줄여 좋은 시스템특성을 기대할 수 있다.

## 후기

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야에서 지원 받아 수행된 논문임

## 참고문헌

1. 김영덕, 자기부상을 이용한 관성센서 개발, 부산대학교 대학원 항공우주공학과 공학석사 학위논문, 2000.
2. John G. Webster, The measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC press, pp. 50-1~50-13, 1999.
3. Toshitaka UMEMOTO "Identification of the Closed Loop Systems Using the Signal Compression Method," Proceedings of the 13th, KACC, pp. 318~322, 1998.
4. 中村弘, 손영수 譯, 자석의 ABC, Blue backs 한국어판, 1994.
5. 김종식, 선형제어시스템 공학, 청문각