

자기부상시스템의 자기력 모델링 시스템 개발

Development of Magnetic Force Modeling Equipment for Magnetic Levitation Systems

양지혁, 김석윤, 이영삼*, 권오규
(Ji-Hyuk Yang¹, Seuk-Yun Kim¹, Young Sam Lee¹, and Oh-Kyu Kwon¹)

¹Inha University

Abstract: This paper proposes an equipment and an algorithm for modeling the magnetic force of electromagnets in magnetic levitation systems. We assume that the magnetic force model is represented in terms of a 2D lookup table. The 2D lookup table is constructed by applying noncausal filtering and interpolation to data measured by the proposed modeling equipment. The proposed modeling equipment is designed such that it can measure the magnetic force exerted on the levitation object while it changes the voltage applied to the electromagnet and position of the levitation object. The algorithm of making a 2D lookup table has two stages. The data measured by the proposed modeling equipment is smoothed by a noncausal filter and then the 2D lookup table is obtained by interpolating filtered data. The proposed modeling method has advantages of time-saving, model consistency, and chance of automation for mass production. We show the validity of proposed method through control experiments.

Keywords: maglev, magnetic levitation system, modeling equipment, interpolation algorithm, 2D lookup table

I. 서론

자기부상시스템(magnetic levitation system)은 자기력을 이용하여 물체를 부상시키는 장치로서 소음 및 기계적 마찰이 없다는 장점 때문에 고속 회전체의 자기 베어링, 자기부상 열차 등 다양한 산업분야에 응용되고 있다[1-4]. 또한 자기부상 시스템은 피드백 제어의 개념을 익히려는 학습자를 위한 교육용 시스템으로도 자주 활용된다[5,6]. 자기부상시스템은 비선형 시스템이고 불안정한 시스템이기 때문에 제어이론의 학습목적 뿐만 아니라 새로운 제어이론을 적용하여 성능 및 타당성을 평가하기에도 알맞은 시험표준(benchmark) 시스템이다. 이러한 특성 때문에 슬라이딩제어, 피드백 선형화, 백스텝핑 제어 등 다양한 모델기반 제어기법이 적용되었다[7-11].

현대제어기법은 대부분 대상시스템의 모델을 필요로 하는데, 이와 같은 모델기반 제어를 할 경우에는 모델의 정확성이 제어성능에 중요한 요인이다. 자기부상시스템은 전자석과 부상체로 구성되어있는데, 전자석과 부상체 사이에 작용하는 자기력 모델에 대한 정보를 정확히 알고 있어야 부상체의 무게와 위치가 변하더라도 견실한 제어성능을 가질 수 있다. 전자석과 부상체 사이에 작용하는 자기력은 전자석에 흐르는 전류와 전자석과 부상체 사이의 거리의 함수로 표현되는데, 부상체의 위치에 따른 자기력의 크기를 해석적으로 유도한 식은 매우 복잡하고 비선형적이다[8,12]. 해석적으로 유도한 수식은 전자석이 이상적으로 제작되었다고 가정하고 유

도한 식이다. 실제 전자석의 특성은 권선이 감긴상태, 부상체의 종류와 모양에 따라 다르고 복잡하여 해석적으로 유도한 비선형수식은 모델기반 제어를 설계하는데 적합하지 않다. 따라서 기존의 논문에서는 전자석이 부상체에 미치는 자기력이 전류(또는 전압)에 비례하거나 또는 제곱에 비례하고 거리에 관한 다항식에 반비례한다고 가정한 후에 제어하고자 하는 부상체를 가지고 평형점을 찾는 실험을 통하여 모델링을 수행 하였다. 전자석과 부상체 사이에 작용하는 자기력의 관계는 부상체가 강자성체일 경우와 영구자석일 경우 비례관계가 달라진다. 기존의 논문에서는 부상체가 강자성체일 경우 부상체에 미치는 자기력은 전자석의 흐르는 전류의 제곱에 비례한다고 가정하고[6,8,11,13,14] 부상체가 영구자석일 경우에는 자기력이 전자석에 흐르는 전류에 비례한다고 가정하고 전자석을 모델링 하였다[15]. 또는 모델식의 차수를 줄이기 위하여 자기력이 전류에 비례한다고 가정하지 않고 전압의 크기에 비례한다고 가정하는 경우도 있다[7]. 기존의 논문에서는 이러한 가정하에 부상체를 놓고 거리에 따른 평형점을 찾은 후에 모델식의 계수를 얻게 되는데, 이 모델식은 실험에 사용한 부상체의 질량 부근에서만 성립한다. 또한 이 모델링 방법들은 평형점들을 찾기 위해서 여러번 반복해야 하기 때문에 시간이 많이 걸리고 정확한 값을 찾기 어렵다.

본 논문에서는 자기력과 전압, 거리의 관계를 특정한 형태의 식으로 가정하지 않고 자기력의 모든 평형점들을 자동으로 구할 수 있는 모델링 시스템과 알고리즘을 제안한다. 전자석은 권선의 굵기, 감은수, 감은 형태와 부상체의 종류 따라 그 특성이 다르기 때문에 전자석을 이용한 정밀제어를 할 경우 각각의 전자석을 매번 실험을 통해 모델링을 반복해야 한다. 제안된 모델링 시스템을 이용하면 전자석을 자동으로 신속하게 모델링 할 수 있고, 전역적인 전자석 모델을 얻을

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 11. 17., 수정: 2011. 1. 31., 채택확정: 2011. 2. 19.
양지혁, 김석윤, 이영삼, 권오규: 인하대학교 전기공학부
(zerolzuck@hanmail.net/silentwind.kim@hanmail.net/lys@inha.ac.kr/okkwon@inha.ac.kr)

※ 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 331-2008-1-D00180).

※ 이 논문은 인하대학교의 지원에 의해 연구되었음.

수 있다. 또한 모델링 시스템으로 얻은 데이터로부터 모든 평형점을 반영한 2D lookup table 기반의 모델을 구현할 수 있다. 여기서 모든 평형점을 반영한다는 것은 부상체의 무게와 위치가 주어졌을 때 이를 부상시키기 위해 필요한 전압입력의 값을 알 수 있다는 뜻이다. 기존의 모델링 방법에 의한 모델은 2D lookup table의 무게에 해당하는 축을 고정하여 얻은 그래프로부터 근사화한 식으로 표현된다. 즉, 고정된 무게의 부상체와 전자석 사이에 작용하는 자기력에 대한 모델이며, 따라서 기존의 모델링 방법은 고정된 부상체의 질량으로부터 나온 모델이기 때문에 부상체의 질량 변동범위가 제한된다. 반면에 본 논문에서 제안한 모델링 기법에 의해 구성된 2D lookup table 기반의 모델은, 모델이 부상체의 질량정보를 포함하는 장점을 지니고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 본 논문에서 구성한 자기부상시스템과 모델링시스템을 소개하고, III 장에서는 모델링시스템으로 전자석 모델의 데이터 취득과정과 취득된 데이터를 이용하여 2D lookup table 모델로 모델링하는 과정을 설명한다. IV 장에서는 모델링 결과를 이용하여 슬라이딩 모드 제어를 설계하고 제어한 결과를 분석할 것이며, 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 자기부상시스템 및 모델링 시스템

본 논문에서 모델링한 자기부상시스템의 구조는 그림 1과 같다. 부상체는 그림 2와 같이 원기둥형 알루미늄 블럭에 강한 자석을 부착하여 구성하였다. 적외선 발광센서와 수광센서는 부상체의 위치를 측정하기 위하여 사용하였다. 5개의

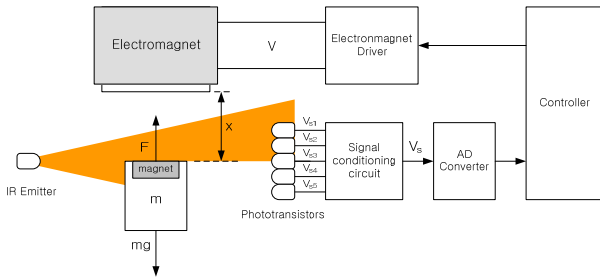


그림 1. 자기부상시스템의 구조. Fig. 1. Schematic diagram of a magnetic levitation system.

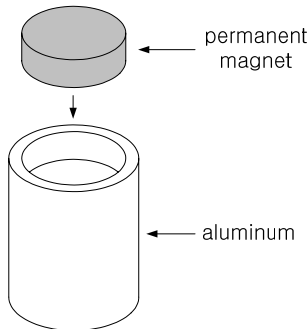


그림 2. 영구자석이 부착된 부상체. Fig. 2. Levitation object with a permanent magnet attached.

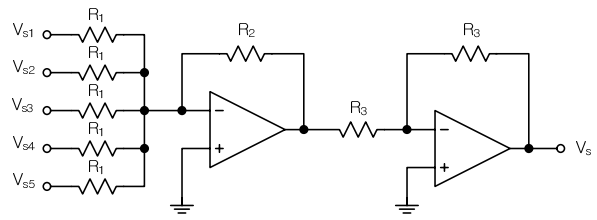


그림 3. 광센서 신호처리 회로. Fig. 3. Signal conditioning circuit for optical sensors.

수광센서를 연속적으로 붙임으로써 센서의 범위를 넓혔고, 수광센서들의 출력 신호를 그림 3과 같은 아날로그 합산 회로를 이용하여 전압출력 V_s 를 만들었다. 전압출력 V_s 는 12-bit AD 컨버터를 거쳐 마이크로프로세서로 전달되며 이 값으로부터 제어가 전자석에 인가할 제어입력 전압을 계산한다. 계산된 입력전압은 PWM 방식으로 구동되는 드라이버를 통해 전자석으로 전달된다.

자기부상시스템의 동역학식은 다음과 같다.

$$\ddot{x} = g - \frac{F}{m} \tag{1}$$

여기서 m 은 부상체의 질량이고, x 는 부상체와 전자석 사이의 거리이며, g 는 중력가속도이다. 그리고 F 는 전자석과 부상체 사이에 작용하는 자기력이다.

기존의 논문에서는 자기력이 전류(전압)에 비례 또는 제곱에 비례하고 거리에 관한 다항식에 반비례한다고 가정 한 후에 실험을 통하여 모델링을 하였다. 그것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F = \frac{V(\text{or } i \text{ or } i^2)}{a(x)} = \frac{V(\text{or } i \text{ or } i^2)}{a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n} \tag{2}$$

식 (2)와 같이 모델식을 세운 후에 질량 m 인 부상체에 대해 실험을 통해 다양한 거리에서의 평형점들을 찾으면 최소 제곱법으로 x 의 계수들을 구할 수 있다. 하지만 자기력을 식 (2)와 같이 고정한 후에 모델식을 구하면 특정 질량 m 부근에서만 유효한 모델이 된다. 즉 특정질량을 부상시킬 수 있는 거리와 전압관계를 유도한 식이다. 본 논문에서는 특정 질량을 부상시킬 수 있는 거리와 전압관계가 아닌 질량정보까지 포함한 모델을 얻기위해 모델링 시스템을 구성하였다.

Remark 1: 전자석과 부상체 사이에 작용하는 자기력의 관계는 부상체의 재질에 따라 달라진다. 부상체가 자석일 경우에는 i 에 비례, 강자성체일 경우에는 i^2 의 비례한다[6,8,11, 13,14,15]. 또한 전자석 코일에 의한 전압과 전류의 관계는 기계적 응답속도보다 빠르므로 단순히 대수적인 관계를 적용하여 i 대신 V 를 쓰기도 한다[7]. 본 논문에서는 자기력을 전압과 거리의 함수로 가정한다.

모델링 시스템은 로드셀 기구부와 제어부로 나뉘어 진다. 그림 4는 로드셀 기구부의 개념도와 사진이다. 로드셀 기구부를 파트별로 설명하면, 리드스크류(c)는 서보모터(a)의 회전운동을 직선운동을 변환시켜 마운트 테이블(d)을 움직인다. 리드스크류가 1회전하면 마운트 테이블은 4[mm] 이동한다. 로터리 엔코더(h)는 리드스크류의 끝부분에 장착되어 리드스

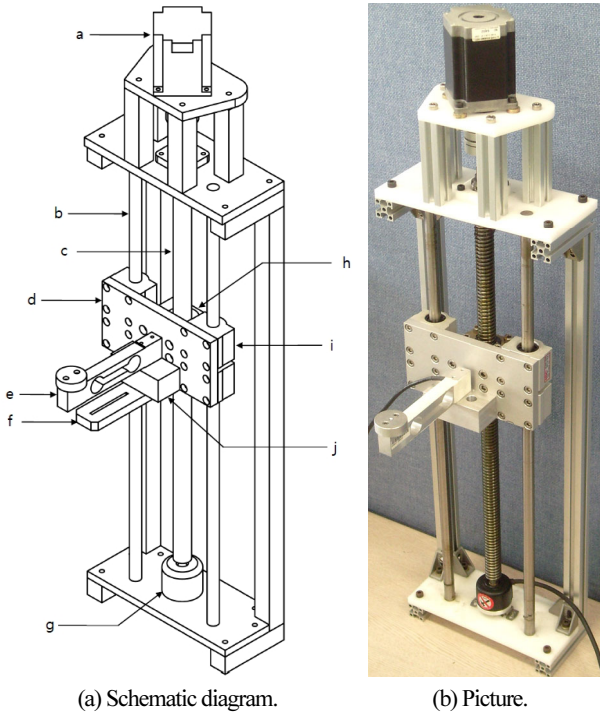


그림 4. 로드셀 기구부.
Fig. 4. A load cell equipment.

표 1. 기구부 부품별 설명.
Table 1. Meaning of part symbols.

기호	의미
a	서보모터
b	샤프트
c	리드 스크류
d	마운트 테이블
e	로드셀
f	나사 너트
g	리니어 부상
h	로터리 엔코더

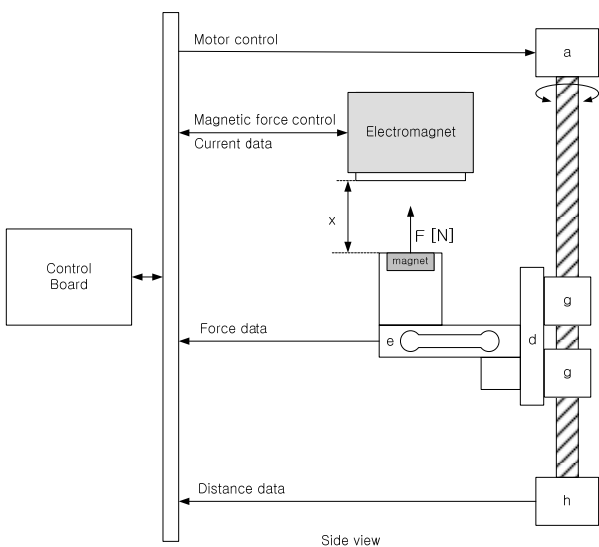


그림 5. 자기부상시스템의 자기력 모델링 개념도.
Fig. 5. Conceptual diagram for modeling system.

크류가 회전한 각도를 측정한다. 장착된 로터리 엔코더는 해상도는 4000[pulse/revolution]이기 때문에 마운트 테이블의 움직임을 1[μm]의 해상도를 가지고 측정할 수 있다. 로드셀(e)은 힘을 전기적 신호로 바꿔주는 장치로서 로드셀에 부상체를 부착시켜 전자석과 부상체간의 자기력을 측정한다. 본 논문에서 사용한 로드셀의 측정범위는 3[Kg]이다.

그림 5는 모델링 시스템을 이용한 자기부상시스템의 자기력을 모델링하는 개념도이다. 먼저 로드셀에 부상체를 고정시키고 전자석을 수직방향에 위치시킨 후, 제어부가 로드셀 기구부의 위치와 전자석에 걸리는 전압을 제어하면서 부상체의 위치와 자기력을 측정한다. 여기서 부상체의 재질, 크기, 모양에 따라 전자석 모델이 달라질 수 있지만, 모델을 얻는 과정은 동일하다. 즉 본 논문에서는 영구자석을 이용하여 실험결과를 예시했지만 강자성체에도 적용하여 전자석 모델을 얻을 수 있다.

III. 모델링 알고리즘

전자석 모델을 얻는 과정은 크게 데이터 취득 알고리즘과 데이터 가공 알고리즘으로 나누어 진다. 데이터 취득과 가공을 알고리즘을 통해 자동화하여 전자석이 주어졌을 경우 2D lookup table을 얻는데 소요되는 시간은 측정범위와 구간의 전압 변화량에 따라 다르지만 약 600초가량 소요된다. 이러한 과정을 수작업으로 한다면 데이터 취득을 고르게 할 수 없으며 데이터 취득후 데이터를 가공하는 과정에서는 더욱 많은 시간이 걸린다. 수작업으로 취득한 데이터를 필요한 부분만 잘라내고 필터링 하는 시간만 하여도 30분이상 걸리게 된다. 하지만 본 논문에서 제안한 데이터 취득 시스템과 데이터 알고리즘을 활용하게 되면 데이터 취득에서부터 모델을 얻기까지 10분 가량이 소요되며 고르고 안정적인 모델을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 전자석의 자기력을 전류가 아닌 전압의 함수로 가정하였다. 본 논문에서 제안하는 데이터 취득 알고리즘에서는 데이터 취득시 전압을 일정하게 주거나 완만한 기울기로 증가하기 때문에 전류와 전압의 관계는 인덕턴스 성분을 무시하고 단순한 비례관계로 나타낼 수 있다. 따라서 자기력을 전류의 함수로 본 모델은 전압기준 모델에 단순히 저항치를 추가적으로 고려함으로써 손쉽게 얻을 수 있다.

1. 데이터 취득 자동화 알고리즘

데이터 취득 자동화 알고리즘은 전자석을 모델링 하고 싶은 범위가 주어졌을 경우, 로드셀의 오프셋을 조정하고 부상체의 위치를 초기화 한 후에 데이터 취득을 하게 된다. 데이터 취득 알고리즘은 다음과 같다.

입력: 측정범위, 전압변화량
출력: 부상체 위치, 부상체에 가해지는 자기력

[Step 1] 로드셀 오프셋 조정

로드셀의 오프셋이 변하기 때문에 측정시 데이터의 오프셋을 조정하는 절차가 필요하다. 약 5초간의 데이터 평균값을 구해 오프셋을 조정한다.

[Step 2] 부상체 위치 초기화

부상체의 위치는 로드셀 기구부에 장착되어 있는 엔코더로부터 얻어진다. 하지만 엔코더는 부상체의 절대위치를 모

르기 때문에 자기부상시스템에 장착되어있는 센서로부터 절대위치를 인식할 수 있는 위치까지 부상체를 이동시킨 후에 엔코더 값을 조정한다.

[Step 3] 데이터 취득

2D lookup table을 구하기 위해서는 전압과 거리를 변화시키 가며 자기력의 변화를 측정해야 한다. 본 논문에서는 그림 6 과 같이 단계별로 전압을 고정한 후에 부상체의 위치를 이동 하며 자기력을 측정하며 데이터를 취득하였다. 데이터 취득 알고리즘은 아래와 같다

```

begin
    V = V_min
    Move the mount table to x_max
    for i=1 to (V_max - V_min) / ΔV
        j = 1
        if x == x_max
            while( x ≠ x_min )
                Move the mount table to x_min at constant speed
                position[i][j] = x // Save position data
                force[i][j] = F // Save force data
                j = j + 1
            end
        else if x == x_min
            while( x ≠ x_max )
                Move the mount table to x_max at constant speed
                position[i][j] = x // Save position data
                force[i][j] = F // Save force data
                j = j + 1
            end
        end
        V = V + ΔV
    end
end
    
```

여기서 V 는 전자석에 가하는 입력전압이고, x 와 F 는 모델링 시스템에 부착되어 있는 센서로부터 읽어오는 값으로 거리 값과 자기력을 의미한다. 부상체의 위치는 2차원 배열 $position$ 에 저장하고, 전자석과 부상체 사이에 작용하는 자기력은 $force$ 에 저장하는 알고리즘이다. 2차원 배열 $position$, $force$ 의 행은 전압단계를 의미하고 열은 시간순서를 의미한다.

그림 6은 $V_{min}=0[V]$, $V_{max}=24[V]$, $\Delta V=1 [V]$, $x_{min}=14[mm]$, $x_{max}=22[mm]$ 으로 설정하고 데이터를 취득한 결과이다. 약 40 초간 로드셀의 오프셋을 조정하고 부상체의 위치를 초기화 하였다. 데이터를 취득하는데 소요된 시간이 약 600초 임을 알 수 있다.

2. 2D lookup table 구성 알고리즘

2D lookup table 기반의 전자석 모델은 현재 부상체의 위치와 그 위치에서 필요한 자기력이 주어졌을 경우 전자석에 인가해야 되는 전압이 출력되는 구조이다. 이러한 2D lookup table을 구성하기 위해서는 특정 범위에서의 위치눈금과 자기력눈금을 설정하고, 위치눈금과 자기력눈금의 교차점에서의 전압값을 구해야 한다. 그림 7은 그림 6의 약 40~640초 구간

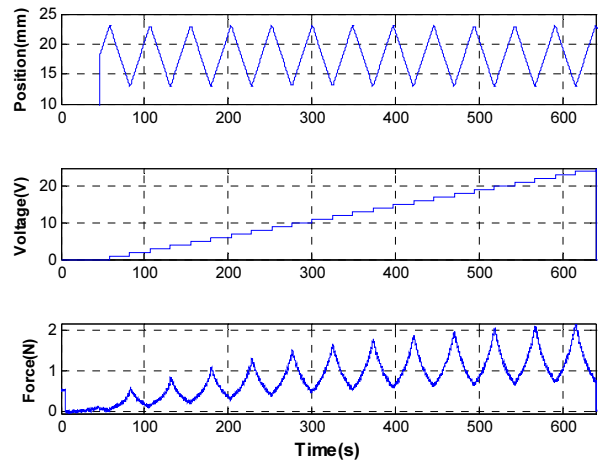


그림 6. 데이터 취득 결과.
Fig. 6. The data acquisition result.

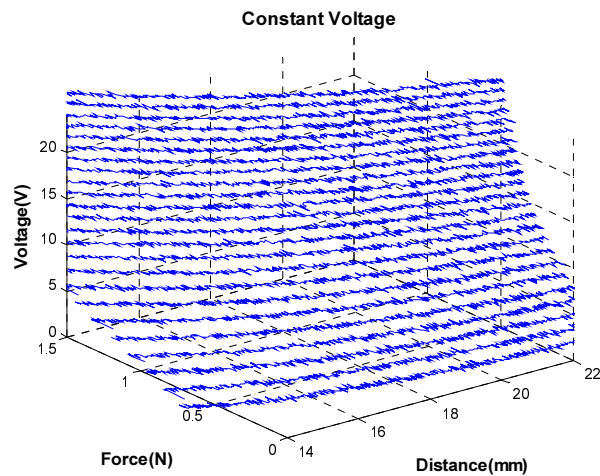


그림 7. 전압별 취득데이터.
Fig. 7. The sorted data.

의 전압, 자기력, 거리 데이터를 전압별로 나누어 3차원으로 나타낸 것이다. 그림 7의 데이터를 이용하여 2D lookup table을 구성하기 위해서는 데이터를 필터링하고 선형보간하여 가공하는 절차가 필요하다. 2D lookup table 구성 알고리즘을 개략적으로 설명하면 다음과 같다. 먼저 그림 7과 같이 잡음이 섞인 데이터를 필터링하여 그림 8과 같은 데이터를 얻는다. 그 다음 필터링 된 데이터를 이용하여 2번의 선형보간을 걸쳐 설정된 위치눈금과 자기력눈금의 교차점에서의 전압값을 구하면 2D lookup table을 구성할 수 있다.

그림 8과 같이 표현된 데이터를 2차원 평면에 등전압선을 이용하여 표현하면 그림 9와 같이 표현할 수 있다. 그림 9에서 정삼각형으로 표시된 점은 필터링된 데이터이다. 첫번째 선형보간은 거리눈금과 등전압선의 교차점을 구하는 것으로 써 근사값은 그림 9에서 별표로 표시되어있는 점이다. 이와 같은 자기력이 선형보간된 데이터로부터 그림 10과 같이 다시 거리눈금과 자기력눈금의 교차점에서의 전압값을 선형보간하여 구한다. 그림 10에서 별표는 첫번째 선형보간으로 얻은 거리눈금과 등전압선의 교차점에서의 자기력을 근사한 값이고, 원은 거리눈금과 자기력눈금의 교차점으로 별표에서

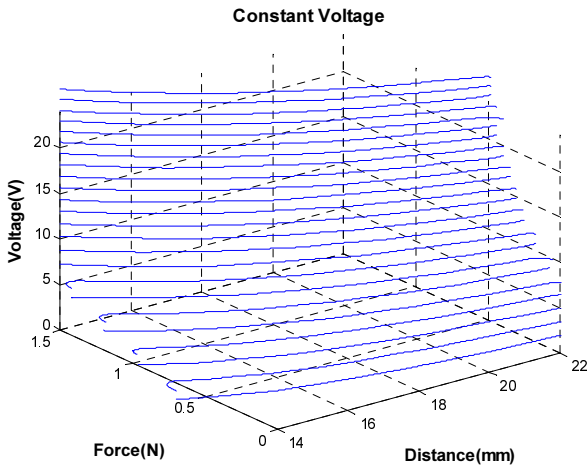


그림 8. 로드셀 데이터 필터링 결과.
Fig. 8. The filtered data.

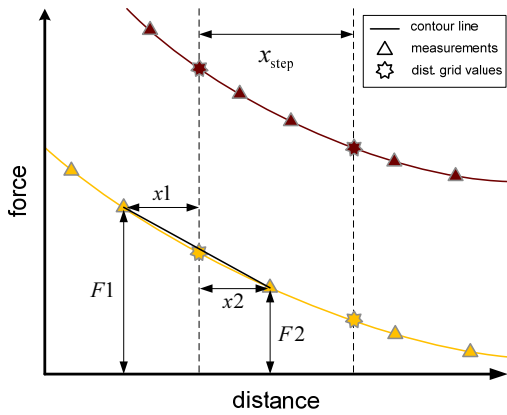


그림 9. 거리 눈금에 대한 자기력 선형보간.
Fig. 9. Linear interpolation for magnetic force.

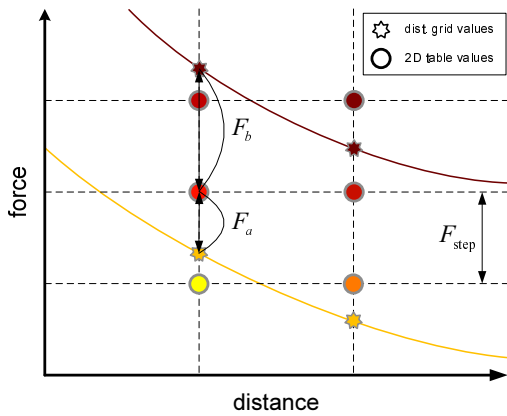


그림 10. 자기력 눈금에 대한 전압값 선형보간.
Fig. 10. Linear interpolation for voltage.

의 전압값을 다시 선형보간 함으로써 눈금의 교차점에서 전압값을 근사시킬 수 있다. 2D lookup table 구성 세부 알고리즘은 다음과 같다.

입력: 데이터 측정 변수, 측정 데이터, 2D lookup table 눈금
출력: 2D lookup table

[Step 1] 로드셀 데이터 필터링

그림 8은 그림 7의 데이터의 측정잡음을 제거한 결과이다. 로드셀을 이용하여 측정된 자기력 데이터는 비인과 필터(noncausal filter)를 이용하여 잡음을 제거하였다.

[Step 2] 자기력 선형보간

그림 7과 같은 데이터를 2D lookup table로 표현하기 위해서는 각 축에 대하여 선형보간하여 2D lookup table 눈금의 교차점에서의 전압값을 구해야 한다. 고정전압에서 거리를 변화시키며 데이터를 취득하였기 때문에 거리변화는 연속적으로 볼 수 있다. 따라서 거리 눈금에 대한 자기력은 선형보간으로 근사할 수 있다. 그림 9에서 거리눈금에 대한 자기력을 선형보간 한 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$distGridValues = \frac{x_2 F_1 + x_1 F_2}{x_1 + x_2}$$

[Step 3] 전압값 선형보간

전압값은 일정한 폭으로 증가시키며 데이터를 취득하였기 때문에 전압 변화에 대한 자기력의 변화는 불연속적이다. 하지만 부상체가 영구자석일 경우 전압과 자기력의 관계는 작은 변화량에서는 선형관계로 나타낼 수 있다. 따라서 Step 2.에서 얻은 거리눈금에 대한 자기력 선형보간 값에서 그림 10과 같이 자기력 눈금에 대한 전압값을 선형보간하면 2D lookup table을 얻을 수 있다. 측정범위 밖의 전압값은 V_{min} , V_{max} 로 채워준다. 그림 10에서 자기력 눈금에 대한 전압값을 선형보간 한 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$2DTableValues = \frac{F_b V_1 + F_a V_2}{F_a + F_b}$$

여기서 V_1 , V_2 는 각각 데이터를 취득할 때 가한 입력전압으로서, 선형보간하여 얻으려는 값에서 가장 가까운 두 입력전압값을 의미한다.

그림 11은 그림 8의 데이터를 이용하여 $F_{step} = 0.05[N]$, $x_{step} = 0.5[mm]$ 으로 설정하고 2D lookup table 구성 알고리즘 적용하여 table을 얻은 결과이다. 그림 11에서 24V 이상은 측정범위를 넘어갔기 때문에 평평하게 표현된 것이다. 측정범위를 넓

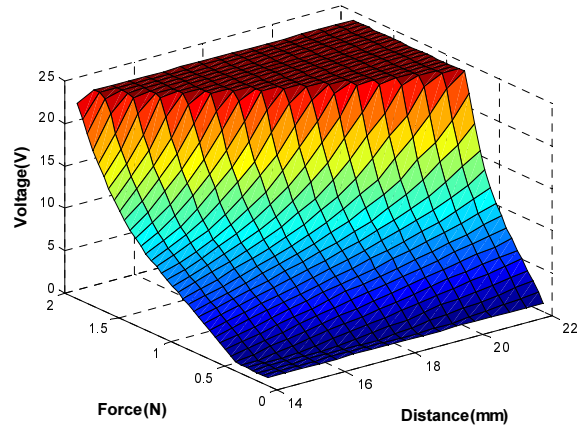


그림 11. 2D lookup table 결과.
Fig. 11. 2D lookup table.

하기 위해서는 24V 이상의 전원을 갖추고 제안된 알고리즘에서 V_{\max} 의 값을 변경해주면 된다.

IV. 제어 성능 비교

제안한 전자석 모델은 부상체의 위치와 부상체에 가하고자 하는 자기력의 크기가 주어졌을 경우 필요한 전자석의 전압 입력 값을 출력해준다. 따라서 제어기 설계과정에서는 전자석 모델을 제외하고 단순히 부상체의 동역학 모델로부터 제어기를 설계할 수 있다. 즉 식 (1)의 동역학 모델로부터 부상체 위치를 제어하기 위해 필요한 힘의 크기를 출력하는 모델 기반 제어기를 설계하면 된다. 본 논문에서는 2D lookup table 모델을 기반으로 한 제어기와 기존 모델로 설계한 제어기의 성능을 비교하기 위하여 슬라이딩 모드 제어기를 설계하여 적용해 보았다. 현재 부상체의 위치를 x 원하는 위치를 x_d 라고 하면 추정오차는 다음과 같다.

$$e(t) = x - x_d.$$

슬라이딩 평면(sliding surface)을 다음과 같이 선택하면,

$$S(t) = \dot{e}(t) + c_1 e(t) + c_2 \int_0^t e(\tau) d\tau.$$

여기서 c_1, c_2 는 설계변수이다. 슬라이딩 조건, 즉 $S(t)\dot{S}(t) = -\eta|S(t)| < 0$ 을 만족하는 자기력은 다음과 같다.

$$F = m_c [g - \ddot{x}_d + c_1 \dot{e} + c_2 e + \eta \text{sign}(S(t))], \quad (3)$$

여기서 η 는 설계 변수이고 m_c 는 제어기에 입력된 부상체의 질량이다. 식 (3)과 같은 자기력을 전자석에서 주기 위해서는 입력전압과 자기력을 표현하는 전자석 모델식이 필요하다. 기존의 전자석 모델에서는 특정 질량에서 모델링 계수를 찾았고 자기력, 전압, 거리와의 관계를 $F = V/a(x)$ 로 나타냈다. 따라서 기존 모델을 이용했을 때의 제어입력은 다음과 같다.

$$V = a(x)m_c [g - \ddot{x}_d + c_1 \dot{e} + c_2 e + \eta \text{sign}(S(t))]. \quad (4)$$

2D lookup table 기반의 전자석 모델은 $V = \Lambda(F, x)$ 로 표현되고 제어입력은 다음과 같다.

$$V = \Lambda(m_c [g - \ddot{x}_d + c_1 \dot{e} + c_2 e + \eta \text{sign}(S(t))], x). \quad (5)$$

식 (5)에서 전자석 모델은 모든 평형점을 반영하기 때문에 부상체의 질량이 바뀌면 m_c 의 값만 바꾸면 된다. 반면에 식 (4)는 특정질량을 이용하여 $a(x)$ 를 구했고 이 식이 고정되어 있기 때문에 m_c 값을 부상체의 질량에 맞춰서 바꿔주어도 기존의 전자석 모델에는 반영이 안되기 때문에 부상시킬 수 있는 질량범위가 제한된다. 식 (4), (5)는 제어입력에 채터링이 많이 발생한다. 제어입력의 채터링을 줄이기 위해서는 $\text{sat}(S(t))$ 를 다음과 같이 정의되는 $\text{sat}(S(t))$ 로 바꾸면 된다.

$$\text{sat}(S(t)/\phi) = \begin{cases} \text{sign}(S(t)), & \text{if } |S(t)| \geq \phi \\ S(t)/\phi, & \text{if } |S(t)| < \phi \end{cases} \quad (6)$$

기존 전자석모델을 이용하였을 때와 2D lookup table 기반의 모델을 이용하였을 때의 제어성능을 비교하기 위해서, 부상체의 질량이 90g일 경우 기존 모델의 전자석 모델링 계수를

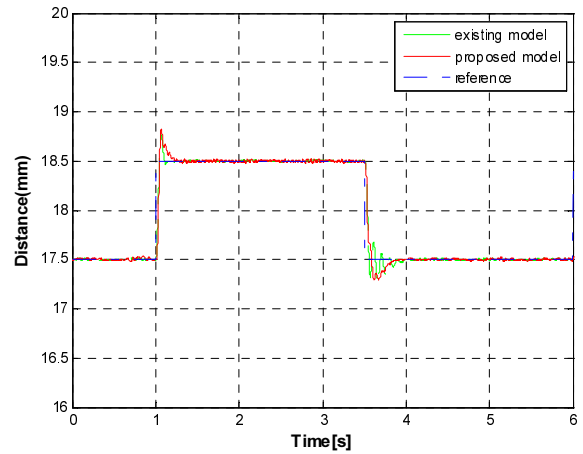


그림 12. 추종입력 출력비교 ($m_c=90$ [g]).

Fig. 12. Tracking response comparison ($m_c=90$ [g]).

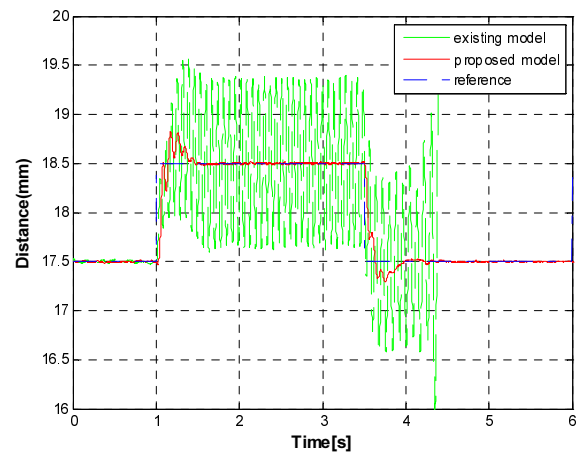


그림 13. 추종입력 출력비교 ($m_c=56$ [g]).

Fig. 13. Tracking response comparison ($m_c=56$ [g]).

찾은 결과 $a(x) = 635480x^2 - 17009x + 124.33$ 이었다. 그림 12와 그림 13은 각각 90g과 56g의 부상체를 슬라이딩 모드 제어기로 제어한 결과이다. 부상체의 질량정보는 제어기의 변수중 m_c 에 값을 넣었다. 부상체가 90g일 경우에는 두 제어기의 성능이 비슷하지만, 부상체의 질량이 56g일 경우에는 기존 제어기의 경우 발산하였다. 부상체의 질량정보를 m_c 에 값을 반영하였지만 기존제어기의 전자석 모델식 $F = V/a(x)$ 이 90g일 경우 구한 식이기 때문에 56g을 제어하지 못하였다.

하지만 제안된 모델을 이용했을 경우에는 제어성능에는 차이가 있지만 여전히 안정적으로 제어를 하는 결과를 볼 수 있다. 제안한 알고리즘으로 얻은 2D lookup table에는 56g에 대한 전자석 모델도 포함되었기 때문에 제어가 가능하다.

V. 결론

본 논문은 자기부상시스템의 모든 평형점들을 자동으로 측정할 수 있는 모델링 시스템과 알고리즘을 제안하였다. 모델링 시스템은 전자석으로부터의 거리에 따른 자기력뿐만 아니라 전자석에 인가된 전압에 따른 자기력의 관계를 자동으로 측정할 수 있도록 설계되었다. 또한 측정된 데이터에

제한한 2D lookup table 구성 알고리즘을 적용하여 거리, 전압, 자기력의 관계를 기술하는 2D lookup table을 구성하였다.

제안된 모델링 시스템과 알고리즘을 이용하면 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 모델링에 소요되는 시간을 단축할 수 있다. 데이터 취득은 물론 취득한 데이터를 가공하여 lookup table을 구성하는 과정이 모두 자동화되어 있기 때문에 시작 버튼 한번으로 데이터를 취득 가공하여 2D lookup table을 얻을 수 있다. 둘째, 균일한 데이터 취득과 일정한 모델을 얻을 수 있다. 데이터를 취득하기 전에 부상체의 위치를 초기화하고 일정한 속도로 움직이는 모터를 이용하여 부상체의 위치를 변화시키면서 데이터를 취득하기 때문에 일정간격으로 자기력과 위치값을 취득할 수 있다. 취득한 데이터로부터 2D lookup table도 알고리즘을 통해 얻기 때문에 일정한 모델을 얻을 수 있다. 셋째, 공정화가 가능하다. 전자석은 감은 횃수, 전선의 굵기, 감은 모양에 따라서 그 특성이 바뀐다. 전자석을 이용하여 정밀 제어를 한다면 정확한 전자석 모델이 필요 한데 같은 전선, 같은 모양으로 생산한 전자석일지라도 그 모델이 미세하게 다를 수 있다. 전자석을 대량으로 생산하고 정밀한 모델을 얻어야한다면 본 논문에서 제안한 모델링 시스템과 알고리즘이 자동화 공정에 응용될 수 있다.

또한 제안한 알고리즘으로부터 얻은 2D lookup table 기반의 전자석 모델을 검증하기 위하여 제어기를 설계하고 실험을 통해 성능을 확인하였다. 기존의 모델들은 부상체의 특정 질량에 종속된 모델인 반면 2D lookup table 기반의 모델은 부상체 질량정보를 포함한 모델이다. 따라서 다양한 질량의 부상체를 추가적인 모델링 과정 없이 제어할 수 있다. 제안된 방법을 통해 구성된 2D lookup table 기반의 모델을 이용한 제어기가 기존 모델을 이용한 제어기보다 부상시킬 수 있는 질량 범위가 넓다는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

참고문헌

- [1] B. Z. Kaplan and D. Redev, "Dynamic stabilization of tuned-circuit levitators," *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-12, pp. 556-559, Sep. 1976.
- [2] D. A. Limbert, H. H. Richardson, and D. N. Wormley, "Controlled characteristics of ferromagnetic vehicle suspension providing simultaneous lift and guidance," *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 101, pp. 217-222, Sep. 1979.
- [3] F. J. Lin, L. T. Teng, and P. H. Sheh, "Intelligent adaptive backstepping control system for magnetic levitation apparatus," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 5, pp. 2009-2018, May. 2007.
- [4] J. E. Pad, "State variable constraints on the performance of optimal maglev suspension controllers," *Proc. of IEEE Conf. Control Applications*, pp. 124-127, Aug. 1994.
- [5] P. S. Shiakolas and D. Piyabongkarn, "Development of a real-time digital control system with a hardware-in-the-loop magnetic levitation device for reinforcement of controls education," *IEEE Transactions on Education*, vol. 46, no. 1, pp. 79-87, Feb. 2003.
- [6] P. S. Shiakolas, S. R. V. Schenck, D. Piyabongkarn, and I.

Frangoskou, "Magnetic levitation hardware-in-the-loop and matlab-based experiment for reinforcement of neural network control concepts," *IEEE Trans. Edu.*, vol. 47, pp. 33-41, Feb. 2004.

- [7] D. Cho, Y. Kato, and D. Spilman, "Sliding mode and classical control magnetic levitations systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 13, pp. 42-48, Feb. 1993.
- [8] A. E. Hajjaji and M. Ouladsine, "Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 4, pp. 831-838, Aug. 2001.
- [9] Z. J. Yang, Y. Fukushima, S. Kanae, and K. Wada, "Robust nonlinear output-feedback control of a magnetic levitation system by k-filter approach," *IET Control Theory & Applications*, vol. 3, no. 7, pp. 852-864, July 2009.
- [10] Z. J. Yang, Y. Fukushima, S. Kanae, and K. Wada, "Adaptive robust output-feedback control of a magnetic levitation system by k-filter approach," *IEEE Trans. Industrial*, vol. 55, no. 1, pp. 390-399, Jan. 2008.
- [11] Z. J. Yang and M. Tateishi, "Adaptive robust nonlinear control of a magnetic levitation system," *Automatica*, vol. 37, pp. 1125-1131, May 2001.
- [12] J. H. Yang, T. S. Kim, S. Y. Shim, Y. S. Lee, and O. K. Kwon, "Actuator and sensor modeling for magnetic levitation system," *Proc. Int. Conf. Control, Automation and Systems ICCAS '07*, pp. 917-922, Oct. 2007.
- [13] M. Fujita and T. Namerikawa, "μ-synthesis of an electromagnetic suspension systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, no. 30, pp. 530-536, Mar. 1995.
- [14] D. L. Trumper, "Linearizing control of magnetic suspension systems," *IEEE Transactions on control Systems Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 427-438, July 1997.
- [15] J.S. Choi and Y. S. Baek, "A single dof magnetic levitation system using time delay control and reduced-order observer," *KSME International Journal*, vol. 16, no. 12, pp. 1643-1651, Dec. 2002.

양지혁

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제15권 제4호 참조.



김석윤

2009년 인하대학교 전기공학부 졸업.
2009년~현재 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 비선형 제어, 비행체 설계, SLAM.

이영삼

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제15권 제4호 참조.

권오규

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제15권 제7호 참조.