

## 광 센서를 이용한 교육용 시스템 개발과 제어

° 박성욱, 이득기, 서영택  
구미대학 전기과

### Development of Education System Using Photo sensor and Control

°Seong-Wook Park, Deuk-Kee Lee, Young-Taek Seo  
Kumi College

**Abstract-** Thomson's jumping ring was first exhibited by Elihu Thomson in 1887 and modified to include the floating variation by John A. Fleming in 1890. This vivid demonstration of electromagnetic induction is still used in physics classrooms to illustrate Faraday's and Lenz's laws and is the basis for linear actuators for servo-mechanical purpose as well as induction heating and rail guns. The jumping ring apparatus of the type described in this study is used to demonstrate and educate the effects of electromagnetic induction. To verify control algorithm, a sensor system and a data control/measurement system is required. The sensor system consist of photo-interrupted and encode circuit which is designed to take voltage according to the position of ring.

#### 1. 서 론

점핑링 시스템은 성층된 규소철심 봉 밀면에 코일을 감고, 봉 위에 알루미늄 링을 놓은 상태에서 교류 전압을 인가하면 링과 코일 사이의 상호유도 작용에 의해 추력이 작용하여 링이 부상하는 시스템이다[1]. 점핑링은 인가전압과 링의 중력에 의해 링의 높이를 부상시킬 수 있는 제어 시스템으로 최대 전압인가 범위내에서 링의 위치를 실시간으로 제어하고자 한다. 링에 작용하는 추력은 점핑링에 인가한 교류 전류와 부상된 링의 높이 따른 인덕턴스의 값에 의존하므로 비선형성을 가지고 있다[2,3]. 점핑링 시스템의 교육적 효과에 대한 중요성을 인식하여 시스템을 제작하고 센서를 이용하여 현재의 링의 위치 정보를 받아 실시간 제어 할 수 있는 시스템을 연구 개발하고자 한다.

따라서 유한 해석법으로 자계를 해석하여 교육용 시스템을 제작하고 센서를 이용하여 부상된 링의 위치를 검출하는 실험장치의 개발은 필수적이라 하겠다. 이러한 연구는 기존의 실험장치의 특성향상과 아울러 실시간 공정과정의 처리가 가능하므로 응용분야가 매우 크다고 할 수 있다.

#### 2. 점핑링 시스템의 설계와 신호처리

점핑링 시스템은 알루미늄 재질의 링과 자계를 발생시키기 위한 코일로 구성되어 있다. 단상 교류전원을 코일 단에 인가하면, 규소강판(core)으로 구성된 막대모양의 봉에 놓여있는 알루미늄 링이 부상한다[4]. 인가되는 전원의 전압에 따라 알루미늄 링은 적당한 위치에서 미소 진동하면서 정지한다. 인가되는 전원 전압의 제어는 전력 전자 소자의 교류위상에 의해 링을 제어하고자 하는 위치에 위치시킨다. 코일에 인가된 교류의 자속 밀도에 의해 알루미늄 링에 와전류가 발생하며, 플레밍의 왼손 법칙에 의해 위쪽으로 추력이 작용하여 링이 부상하게 된다[5,6]. 제작하고자 하는 점핑링 시스템의 구성을 그림 1에 나타내었다.

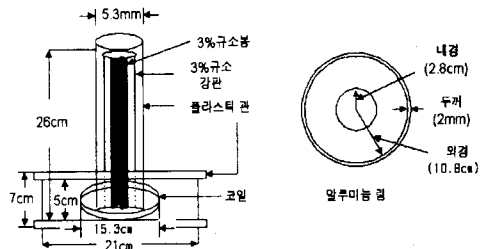


그림 1. 점핑링 시스템의 구성  
Fig.1 Configuration of jumping ring system

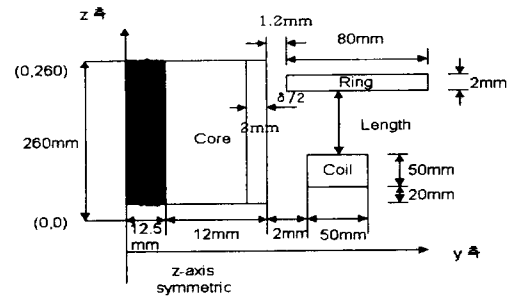


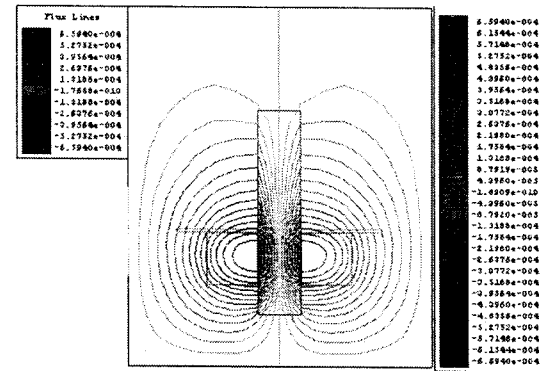
그림 2. 점핑링 시스템의 설계  
Fig. 2. Design of jumping ring system

표-1. 유한 요소법을 사용한 점핑링 시스템 해석  
Table-1. computer simulation with ring's position

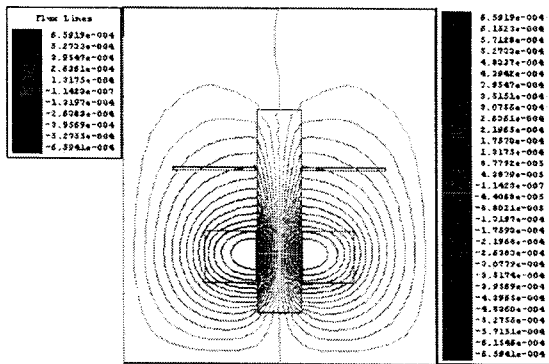
입력		출력			
재료	코어: 30% Si $\rho = 47 \times 10^{-5}$ 링: Al $\rho = 2.75 \times 10^{-5}$ 코일: Cu $\rho = 1.73 \times 10^{-5}$	링 위치 F, Ie, L	190 [mm]	100 [mm]	2 [mm]
표면 깊이	$\delta = 4\text{mm}$	추력	0.09 [N]	0.58 [N]	3 [N]
전류 밀도	$J = \phi 1.2 \times 1400\text{turn} \times$ $1.57\text{A}/2500\text{mm}^2$ $= 0.8972[\text{A}/\text{mm}^2]$	링유도 전류	214 [A]	517 [A]	1049 [A]
주파 수	60Hz				
링 무게	92[g]	인덕턴스	0.41 [H]	0.38 [H]	0.27 [H]

표 1은 점핑링 시스템의 제작과정을 유한 요소법을 사용하여 해석한 것이다.  $\delta$ 는 코어와 플라스틱(PVC)

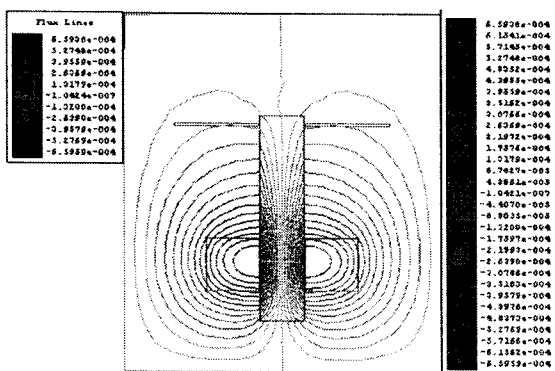
관 사이의 공간간격이고, 링의 위치에 따른 추력(z축으로 작용하는 힘)을 나타낸다. 표 2는 설계시의 전기적 손실과 용량을 계산한 것으로 단위는 실효치로 계산하였다. 링의 부상에 대한 정량적인 해석을 하기 위해 코일과 코어에 발생하는 자계의 공간적 변화를 알아야 한다. 코어 주위의 전계는 수직성분과 수평성분으로 분해되고 DC 전원에 코일을 연결하고 서치코일과 검류계를 사용하면 초기의 자계성분의 변화를 알 수 있다. 코어 바깥 수직성분의 자계는 높이가 높을수록 감소하고 낮을수록 증가한다[7].



(a) 링이 중간에 있는 경우, 2[mm]



(b) 링이 중간에 있는 경우, 100[mm]



(c) 링이 위에 있는 경우, 190[mm]

그림 3. 링의 위치에 따른 자속분포

Fig. 3. Flux distribution depending on ring position

### 3. 점핑링 시스템의 동작

제작된 점핑링의 사양은 지름 21cm, 안지름 5.6cm, 두께 2mm, 무게 92g의 알루미늄 재질의 원판 모양을 사용하였다. 코일단의 사양은 저항률 2.86Ω, 인덕턴스

0.13H(60Hz), 임피던스 49Ω(60Hz), 인가 전압 AC 220V, 안지름 15.3cm, 바깥지름 22cm, 높이 5cm의 원형 모양의 코일을 제작하였다. 코어의 사양은 원형 막대 모양의 지름 2.5cm, 높이 25cm의 3% 규소붕과 그 둘레로 바깥지름 5mm 규소강판을 적층하여 사용하였다. 링의 위치를 감지하기 위해서 광 센서를 사용하였다. 광 센서는 투과 광 방식의 포토 인터럽터(Model: P801A)를 20개 사용하였다. 포토 인터럽터를 일렬로 배열시킨 다음(높이 12cm), 점핑링의 끝부분에 광을 차단할 수 있도록 설계하여 광이 차단되는 지점의 포토 인터럽터의 전압을 측정하였다. 포토 인터럽터의 광원으로는 외부의 외관광 영향을 줄이기 위하여 적외광 LED와 수광부로는 포토 트랜지스터가 내장된 것을 사용하였다. 각각에 대한 광 센서의 출력을 인코더 회로에 입력시켜 높이에 따른 출력 전압값을 단계적으로 출력할 수 있도록 설계하였다. 이 출력 전압값은 A/D 변환기를 거쳐 디지털 값으로 변환되어 PC에 입력된다. 그림 4는 광 센서의 인터페이스 회로와 제어보드를 나타낸다.

광 센서의 출력 전압값인 점핑링의 위치 정보를 PC에서 분석하기 위하여 아날로그 전압값을 디지털 정보로 변환시켰다. 데이터 인식 시스템을 구성하기 위하여 회로를 구성하고 제작하였다. 제작에 사용된 A/D 변환기는 12비트, 8CH 입력, 변환시간 10μs, 비교측차형 A/D 변환기(Model: MAX180ACPL)를 사용하였고, 데이터 입력을 위하여 PPI 8255 IC를 인터페이스 소자로 이용하였다. 변환된 디지털 정보는 PC의 확장 슬롯을 통하여 입력받았다. 그리고, 하드웨어 시스템을 제어하기 위한 프로그램을 C-프로그램으로 작성하였다. 감지된 정보와 동적 신경망 제어기의 추적 상태를 화면에 그래프로 표시하기 위한 프로그램도 C-프로그램을 이용하여 작성하였다. 그림 5는 점핑링 시스템과 신호처리와 데이터 전송을 나타낸다.

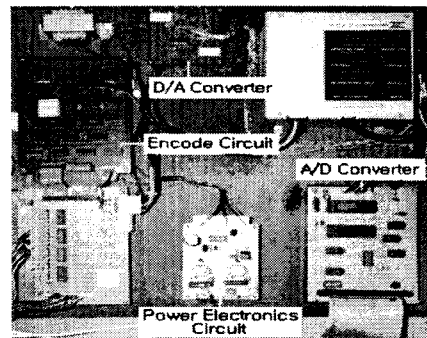


그림 4. 광 센서의 인터페이스 회로와 제어보드  
Fig. 4. Photo sensor interface and control board

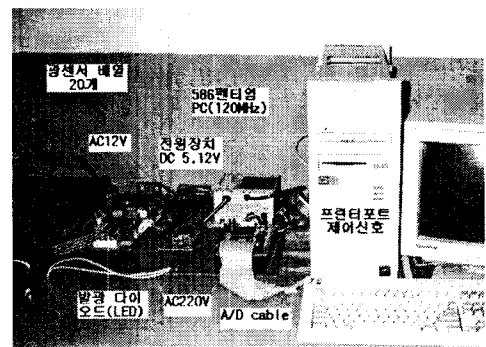


그림 5. 점핑링 시스템을 제어하는 구조  
Fig. 5 Interface circuit and jumping ring system

#### 4. 점핑링 시스템의 제어

점핑링 시스템을 사용하여 링을 부상시키기 위하여 싸이리스터 SCR을 사용한 위상 제어 방식을 사용하였다. 전산기(PC586)에서는 원하는 링 높이를 turbo-C 제어 프로그램에 의해 제어기의 동작신호를 전산기의 프린터 포트를 통하여 출력한다. 출력된 디지털 정보는 D/A 변환기(DAC0800)를 거쳐 0~5[V]인내의 아날로그 전압값으로 변환된다. 이 전압값을 위상제어 IC(TCA785)의 제어입력인 11번 단자에 입력되고 출력단자 14번 단자의 램프출력과 비교하여 SCR(5610L)의 게이트 신호를 주어 점핑링 시스템에 인가하고자 하는 전압의 위상을 제어한다. 제어기의 동작신호는 SCR의 점호각을 이용하여 점핑링에 인가되는 AC 220V 전압의 위상을 제어시켜 링의 높이를 제어하게 된다. 그리고 링의 위치 정보는 다시 광 센서를 통하여 감지된다. 링 높이를 제어하기 위해서 turbo-C 프로그램에서 제어기의 동작신호에 대한 링의 높이에 관한 정보를 관측하여 이를 수식하여야 한다. AC전원을 공급하면 점핑링 시스템에 유도되는 추력은 시스템에 흐르는 전류와 부상된 링에 대한 코일에 인덕턴스 변화로 표현된다.

$$F = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{dz} \quad (1)$$

본 연구에서 C프로그램을 사용하여 컴퓨터 프린터 포트로부터 D/A 신호를 단계적으로 발생시키고 이때, 링의 높이를 A/D 변환기로 측정하여 이 실선 데이터를 입출력으로 하여 시스템을 모형화하였다. 시스템을 모형화하기 위해 시스템의 구조를 정하고 그 구조에 관계된 변수를 결정해야 한다. 시스템의 구조를 식(1)에 기초로 하여 전류의 크기를 교류전압의 위상을 제어전압으로 하였고 높이에 대한 인덕턴스의 변화를 링 높이의 변화로 표현하였다. 링의 초기높이( $b$ )와 비례상수( $a$ )를 변수로 하여 시스템을 식(2)와 같이 모형화 하였다.

$$y_{k+1} = a u_k^2 \times [b + (y_k - y_{k-1})] \quad (2)$$

여기서  $u_k$ 는 SCR을 구동하기 위한 turbo-C 제어 프로그램에서 원하는 높이만큼 링을 부상하기 위해 발생한 전압크기와 TCA 785의 램프 출력과의 차이에 해당한다. 그림 10은 링의 높이를 조절하기 위해 컴퓨터에서 발생된 제어신호와 위상제어 IC(TCA785)의 출력을 나타낸 것이다. 위상제어 IC 소자의 출력신호는 0~5[V]의 램프신호로 이 신호는 컴퓨터의 프린터 포트의 주소(0x378)에 8 bit 출력을 시스템 모형화 과정을 그림 6에 도시하였다. 그림에서 ①에 정현파 입력을 나타내었다.

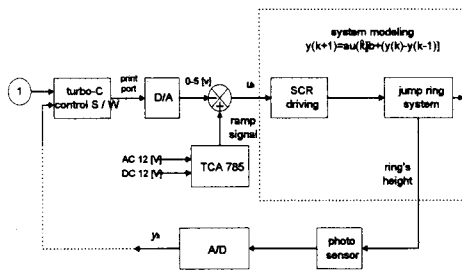


그림 6. 점핑링 시스템 모형화 블록선도

Fig. 6. Block diagram for modeling of jumping ring system

800개의 입출력 데이터를 가지고 오프라인으로 식(2)에 적용하여 비선형 회귀방정식의 계수  $a=0.419$ ,  $b=1.445$ 를 구하였다. 여기서  $u_k$ 는 컴퓨터에서 발생하는 D/A 신호이고  $y_{k+1}$ 는 D/A 신호에 의해 발생된 링의 높이이다. 식(2)는 추력에 의해 부상된 높이 신호로 인가한 제어전압과 링의 변화량을 관측하여 점핑링 시스

템을 모형화하였다. 실선 데이터를 기준모형의 입·출력을 이용하여 점핑링 시스템을 수식으로 모형화하면 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$y_{k+1} = 0.419 u_k^2 \times [1.445 + (y_k - y_{k-1})] \quad (3)$$

모형화 수식을 사용하여 원하는 높이로 링을 부상시키기 위해서 실시간 제어 입력 즉, 전산기내의 제어 프로그램의 출력  $u_k$ 을 구할 수 있다. 원하는 링의 높이를 기준 모형에 따라 변화시키면서 점핑링 시스템이 기준모형을 따라 링의 높이를 추종하도록 제어하는 구조는 그림 7에 나타내었다.

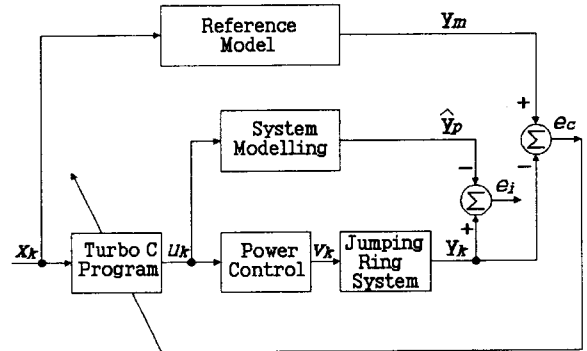


그림 7. 점핑링 시스템을 제어하는 구조

Fig. 7. Control scheme of a jumping ring system

#### 5. 결 론

본 연구에서는 시스템을 이용한 제어 성능을 교육할 수 있는 점핑링 시스템을 직접 제작하였다. 학생들에게 신호흐름을 보여주기 위해 광센서를 사용하여 링의 높이를 LED에 표시하였고 이를 IC 소자를 사용하여 코드화하여 교육용 시스템을 구성하였다. 광센서의 신호를 A/D 변환하여 컴퓨터 프로그램으로 현재의 링의 판단하여 원하는 높이 신호와 비교하여 turbo-C 제어 프로그램에 의해 조절신호(+5[V]이내)를 발생한다. 이 조절신호는 위상제어 소자 TCA 785의 출력과 비교하여 조작신호인 SCR 점호각을 제어하므로 점핑링 시스템에 교류전압을 인가하여 링을 원하는 높이로 유지하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] E. R. Laithwaite, "Electromagnetic levitation theory", *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 112, no. 12, pp. 2361-2375, Dec. 1965.
- [2] J.C. West and B.V. Jayawant, "A New Oscillating Motor," IEE Paper No. 39405, pp.292-300, 1962.
- [3] 山田一, "리니어 모터와 응용기술," 實數出版, pp. 84-85, 1972.
- [4] Paul J.H Tjossem and Victor Cornejo, "Measurement and mechanism of Thomson's jumping ring," *Am.J. Phys.* 68(3), pp 238-244, March 2000.
- [5] Noel Barry and Richard Casey, "Elihu Thomson's Jumping Ring in a Levitated Closed-Loop Control Experiment," *IEEE Trans. on Education* Vol. 42. no. 1, pp. 72-80, February 1999.
- [6] Park, Seong-wook and Seo, Bo-Hyeok, "Identification and control of jumping ring system using dynamic neural networks," 2nd Asian Control Conf., Vol. III. pp. 823-826, July, 1997.
- [7] D.J. Sumner and A.K. Thakkrar, "Experiments with a 'jumping ring' Apparatus," *Phys.*, Ed. 7(4), pp. 238-242., 1972.