

논문 2002-11-6-07

광센서를 이용한 점핑링의 위치검출과 교육용 시스템 제작

박 성욱*

Detection of Levitated Ring using Photo Sensor and Construct of an Education System

Seong-Wook Park*

요 약

교류 220V에 의해 동작하는 점핑링 장치를 제작하고 광센서를 사용하여 링의 높이정보를 받아 부상한 링의 높이를 실시간으로 검출하고 교육적 효과를 높이기 위해 디지털 높이정보를 아날로그 변환하여 쉽게 높이를 알 수 있도록 하였다. 교육용 시스템을 직접 제작하여 시스템을 모형화하여 제어신호를 구하고 제어 프로그램에 의해 원하는 높이로 링을 부상할 수 있도록 하였다. 본 논문은 광센서를 사용하여 링의 위치를 실시간으로 검출하였고 광센서의 배열과 높이 정보를 발광다이오드 5개로 디지털 값을 보여주었고, D/A변환하여 교육용 시스템을 제작하여 A/D 변환기를 통해 데이터 신호처리하였다. 교육용 시스템은 모형화하여 원하는 링의 높이를 실시간으로 제어 할 수 있게 하였다.

Abstract

The jumping ring apparatus described in this study is used to demonstrate and educate the effects of electromagnetic induction. Placing an aluminum ring over the core and switching on AC source causes the ring to jump in the air due to induced currents in the ring producing a magnetic field opposed to that produced in the core. This force is a function of flux density, ac current of ring and levitated height of the ring. Using photo sensor arrays, detect the ring position and represent the position of the ring to analog voltage for an education performance. This paper presents modelling of the jumping ring system and shows how does control signal generate in order to follow desired position.

1. 서 론

점핑링 장치는 코일에 전압을 인가하면 링과 코일 사이의 상호 유도작용에 의한 생긴 전자력으로 링을 점핑시키는 장치로 영국에서 처음으로 제작되었다⁽¹⁾. 점핑링과 코일은 상호유도 결합회로로 코일에 생긴 자속이 점핑링에 유도된다. 이때 코일에 인가되는 전압에 따라 시간이 경과하면 코일의 자속이 포화되어 공간자속의 크기가 변화하여 링의 자속도 변화하게 되어 링이 아래로 떨어지게 된다. 알루미늄 링에 생긴 유기전압

으로 인해 열이 발생되어 링이 요동하며 인가전압에 대한 링의 높이가 일정치 않게 된다. 따라서 보다 안정된 실험장치를 만들기 위해서 센서를 이용하여 부상된 높이를 감지하여 높이를 제어할 수 있는 폐회로 시스템을 구성할 필요가 있다. 점핑링 장치와 유사한 실험장치로 바닥면에 있는 강철 구를 순간적으로 일정 높이까지 부상시킬 수 있는 자기부상 장치에 대한 연구가 시도되었고⁽²⁾, 코아에 코일을 감아서 링을 부상시키는 장치도 개발되었다. 1999년 Barry에 의해서 발표된 점핑링 장치는 띄우는 높이보다 시스템의 모형과 해석에 중점을 두어 전달함수로 시스템을 해석하는 연구였다⁽³⁾. 본 연구에서는 유한 해석법으로 자계를 해석하여 부상 높이가 10cm 가 되도록 점핑링 장치를 설계 제작하였고, 파워소자를 사용하여 코일에 인가되는 교류전압의 크기

* 구미1대학 컴퓨터 응용 전기전공 (Major in Electricity Applied Computer, Kumi College)

<접수일자 : 2002년 10월 18일>

를 제어하여 부상높이를 제어하도록 시스템을 구성하였다. 또 광센서를 이용하여 부상된 링의 위치를 감지하여 실시간 위치 제어가 가능하도록 제어기를 구성하였으며, 교육용 시스템으로 활용하기 위해 광센서의 높이 감지과정과 부상 높이를 LED를 사용한 디지털 값으로 나타내었으며, 이 디지털 값에 대한 아날로그 변환과 신호처리를 위해 A/D변환를 사용하여, 동작상태를 직접 눈으로 확인할 수 있게 하였다.

2. 점핑링 장치의 제작

점핑링 장치는 알루미늄 재질의 링과 자계를 발생시키기 위한 코일로 구성되어 있다^[4-6]. 코일에 전류가 흐르면 주변에 자력선이 생기고 이 자력선의 크기를 자속으로 나타낼 수 있고 단위 면적당 자속을 자속밀도라 하면, 이 자속밀도에 의해 링에 와전류가 발생하며, 플레밍의 왼손법칙에 의해 위쪽으로 전자력이 작용하여 링이 부상하게 된다. 제작하고자 하는 점핑링 장치의 구성을 그림 1에 나타내었다.

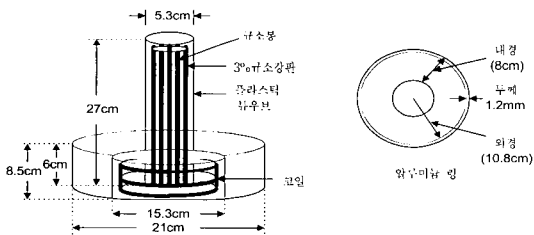


그림 1. 점핑링 장치의 구성.

Fig. 1. Configuration of jumping ring apparatus.

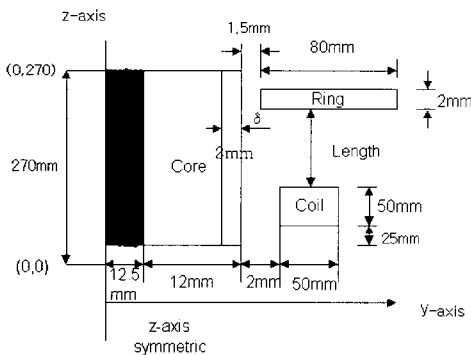
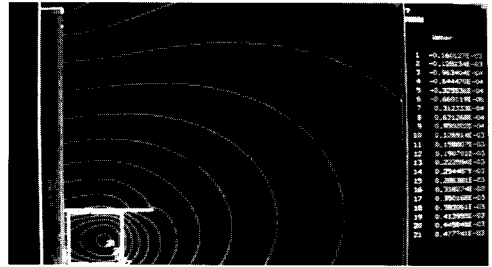
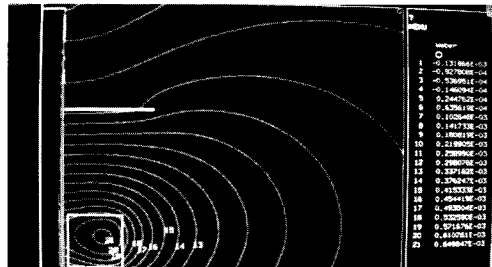


그림 2. 점핑링 장치의 설계.

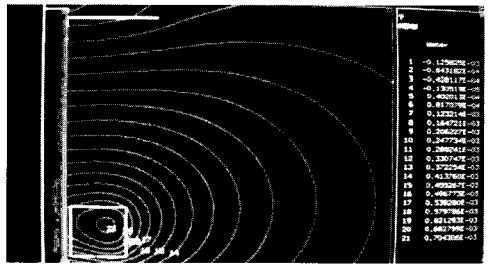
Fig. 2. Design of jumping ring apparatus.



(a) lower height of ring



(b) center height of ring



(c) upper height of ring

그림 3. 링의 위치에 따른 자속분포.

Fig. 3. Flux distribution depending on ring position.

코일단은 1.2mm 코일을 1400회 감아 바깥지름 22cm, 높이 5cm, 폭 5cm의 원형 모양을 가지고 있고 인가전압 220V, 60Hz에 저항률 2.86Ω, 인덕턴스 0.13H, 임피던스 49Ω을 가지도록 제작하였다. 제작된 링은 무게 92g의 알루미늄 원판 모양을 가지고 있다. δ는 코아와 플라스틱(PVC)관 사이의 공간간격이다. 패러데이와 렌츠의 법칙에 의해 링에 유도된 역기전력은 $- \frac{d\psi}{dt}$ 이다. 링을 통과하는 자속 ψ 를 sin파라하면 링에 유도된 전류의 파형은 -sin파가 되고 자속의 시간변화율은 cos파가 되고 역기전력은 -cos 파형이 된다. 만일 링에 유도된 전압과 전류가

동상이면 링에 작용하는 전자력은 링과 코일의 자계에 의해 반 사이클동안 반발하고 다른 반 사이클동안은 흡인하는 힘을 가진다. 하지만 유도 전압과 전류는 90° 위상차를 가지므로 링은 항상 반발력에 의해 부상되고 링은 순수한 인덕턴스와 같은 작용을 하게 된다^[4]. 그림 3은 위크스테이션을 사용하여 링이 아래, 중앙, 위에 있을 경우에 대해 자계분포를 유한 요소법으로 해석한 것이다. 그림 3(a)는 링이 아래쪽에 있는 경우로 링에 작용하는 자속은 자력선의 분포선 17번에 해당하며 이때의 자속의 세기는 $0.350168 \times 10^{-3}[\text{wb}]$ 정도이고 (b)인 경우에는 링이 중앙에 위치한 경우로 $0.14173 \times 10^{-3}[\text{wb}]$ 이다. (c)인 경우에는 링이 위에 있는 경우로 자속의 세기는 자력선의 분포선이 6번에 해당하며 이때의 자속의 세기는 $0.817079 \times 10^{-4}[\text{wb}]$ 정도이다. 링의 높이가 높을 수록 링의 자계의 세기는 작아짐을 알 수 있다. 즉 링이 낮은 위치에 있으면 링을 부상시키는데 보다 힘이 요구됨을 알 수 있다.

3. 광센서의 제작과 링의 높이 감지

링의 위치를 감지하고 감지된 위치를 전기신호로 변환하여 신호처리하기 위해 광센서를 이용한다. 광센서로 투과광 방식의 포토 인터럽터를 사용하였고 광원으로는 외부의 외관광 영향을 줄이기 위하여 적외광 LED와 수광부로는 포토 트랜지스터가 내장된 것을 사용하였다. 그림 4에서 VCC는 5[V]의 전압이 인가된다. R1은 광 다이오드의 전류를 제한하기 위해 사용되었으며, 값이 $330[\Omega]$ 이므로 약 $15[\text{mA}]$ 의 전류가 흐른다. 광 다이오드는 도통으로 발광하고 수광부는 이 신호를 받아 수광부의 이미터-컬렉터 양단을 통하여 전류가 흘러 Vout은 양의 전압 5V를 갖게된다. 만일 발광부와 수광부 사이에 다른 무엇인가가 들어와서 수광부에서 빛을 받지 못한다면 이미터-컬렉터 쌍은 전류를 흘려주지 못하게 되고 따라서 open 상태가 된다. 그렇게 되면 Vout의 출력전압은 0V가 된다.

본 연구에서는 포토 인터럽트를 일렬로 배열시킨 다음(높이 12cm), 링의 끝부분에 광을 차단할 수 있도록 설계하여 광이 차단되는 지점의 포토 인터럽터의 전압을 측정하였다. 20개의 광센서가 배열되어 링의 위치를 측정하고 광센서의 출력을 PL0 - PL19라 하면 초기에 링의 높이가 가장 낮은 위치에 있기에 PL1-PL19은

High가 된다. 링이 상승하면 PL1부터 차례대로 Low가 된다.

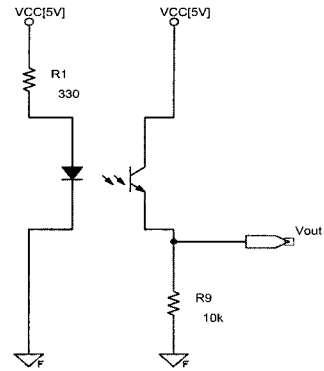


그림 4. TL830 광센서.
Fig. 4. Photo sensor TLP830.

입력이 8가 출력이 3개인 엔코드(74148)가 광센서의 출력신호(PL0-PL19)와 연결되어 있다. 광센서의 출력이 20개이므로 이를 3개의 74148의 8개의 입력핀에 연결되어 있다. 74148은 8-t0-3 active low encoder로 입력중에 어떠한 한 개의 입력이 Low로 변하게 되면 그 값을 출력단자 A0,A1,A2에 값으로 변환하여 주고 이 값은 2진수가 된다. 그리고 출력된 값이 유효하다는 의미로 GS(14pin)이 LOW의 출력을 갖게 된다. 본 연구에서는 교육용 시스템을 제작하기 위해 4번째 74148를 사용하지 않고 3개의 엔코드의 출력인 A0,A1,A2를 6개의 OR gate를 사용하여 각 A0출력을 묶어서 D0로 A1을 D1으로 A2를 D2 단자로 출력하였다. 각 엔코드의 3개의 GS를 2진수로 나타내어 D3,D4로 출력하여 20개의 센서신호를 5개의 2진 디지털로 표시하여 D/A 변환기의 입력으로 사용하였다. 디지털 값을 이용하지 않는 이유는 높이신호를 전압으로 환산하는 계산과정을 과정을 피하고 D/A 변환기의 출력을 단자를 사용하여 아날로그 전압을 확인하는 교육목적을 달성하기 위함이다. 또한 감지된 링의 높이를 발광 다이오드 5개로 20단계의 감지신호를 디지털로 보여주었다.

4. 감지된 신호의 아날로그 변환과 신호처리 회로제작

광센서의 출력을 엔코더 회로에 입력시켜 높이에 따른 출력 전압값을 단계적으로 디지털로

출력할 수 있도록 설계하였다. 이 신호를 바로 컴퓨터에서 처리할 수 있지만 학생에게 교육시킬 수 있는 실험장비를 제작하고자 이 신호를 D/A 변환기를 통해 아날로그로 변환시켰다. 아날로그 전압은 쉽게 측정할 수 있고 바로 그 값을 계측 장비로 읽을 수 있는 장점을 가지고 있다. D/A 변환기는 전류형으로 부하 따라 전류값이 변동하므로 전압으로 연산하기 OP 앰프를 사용하였다. 연산하는 과정을 표 1에 도시하였다. 광센서의 출력 전압값인 링의 위치정보를 컴퓨터에서 분석하기 위하여 12bit A/D 변환기를 사용하여 아날로그 전압값을 디지털 정보로 변환시켰다. 그림 5는 제작된 광 센서의 신호처리 회로, 엔코드, D/A변환기, A/D변환기를 나타낸다. A/D 변환기는 12비트, 8CH 입력, 변환시간 10 μ s, 비교축차형 A/D 변환기를 사용하였고, 데이터 입력을 위하여 PPI 8255 IC를 인터페이스 소자로 이용하였다.

표 1. 링이 높이에 대한 감지신호.
Table 1. Detect signal to ring's height.

photo sensor	74148 A ₂ A ₁ A ₀	D/A converter					
		DA7-DA5	DA4	DA3	DA2	DA1	DA0
3	LHH	L	H	L	L	H	H
2	LHL	L	H	L	L	H	L
1	LLH	L	H	L	L	L	H
0	LLL	L	H	L	L	L	L
7	HHH	L	L	H	H	H	H
6	HHL	L	L	H	H	H	L
5	HLH	L	L	H	H	L	H
4	HLL	L	L	H	H	L	L
3	LHH	L	L	H	L	H	H
2	LHL	L	L	H	L	H	L
1	LLH	L	L	H	L	L	H
0	LLL	L	L	H	L	L	L
7	HHH	L	L	L	H	H	H
6	HHL	L	L	L	H	H	L
5	HLH	L	L	L	H	L	H
4	HLL	L	L	L	H	L	L
3	LHH	L	L	L	L	H	H
2	LHL	L	L	L	L	H	L
1	LLH	L	L	L	L	L	H
0	LLL	L	L	L	L	L	L

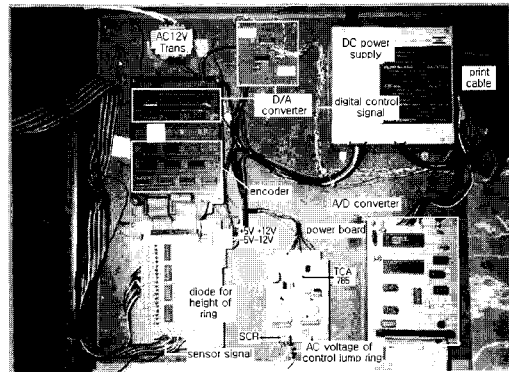


그림 5. 엔코드 회로와 신호처리 회로.
Fig. 5. Encode circuit and signal processing circuit.

5. 교육용 시스템 제어

그림 6과 같이 점핑링 장치를 제작하여 광센서와 엔코드와 신호처리 회로를 통해 교육용 시스템을 개발하였다. 링을 부상시키기 위하여 싸이리스터를 사용한 위상 제어방식을 사용하였다.

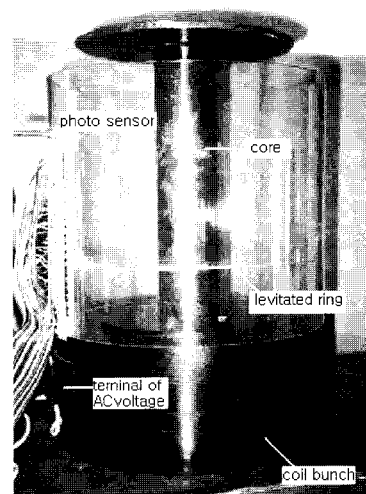


그림 6. 점핑링 실험장치.
Fig. 6. Experimental apparatus of jumping ring.

컴퓨터에서는 원하는 링 높이를 C 제어 프로그램에 의해 계산한 후 프린터 포트를 통하여 제어기에 인가한다. 출력된 디지털 정보는 D/A 변환기(DAC0800)를 거쳐 0~5(V)이내의 아날로그 전압값으로 변환된다. 이 전압을 위상제어 IC(TCA765)의 제어 입력인 11번 단자에 입력

되고 출력단자 14번 단자의 램프출력과 비교하여 그 차이에 해당하는 고속 PWM 파형을 생성한다. 이 파형을 SCR의 게이트 신호에 인가하여 점핑링 실험장치의 코일에 흐르는 전류를 제어한다. 즉 게이트 신호에 따라 SCR의 점호각을 조정되므로 점핑링에 인가되는 AC 220V 전압의 크기를 제어시켜 링의 높이를 제어하게 된다. 그리고 링의 위치 정보는 다시 광센서를 통하여 감지된다. 이 위치정보는 A/D 변환기를 사용하여 링의 현재 높이를 컴퓨터에 전송하고 컴퓨터는 높이 신호를 받아 원하는 높이와 비교하여 제어기를 구성하여 RS232 통신 포트로 8bit 디지털 신호를 보낸다. 링 높이를 제어하기 위해서 C 프로그램에서 제어기의 동작신호에 대한 링의 높이에 관한 정보를 관측하여 이를 수식하여야 한다. 즉 제어기의 디지털 신호와 부상된 링 높이를 입력, 출력으로 하여 시스템의 입출력 관계를 수식으로 표현하고자 한다. 링을 부상하는 시키는 힘은 플레밍의 왼손의 법칙에 의해 표현된다⁽³⁾⁽⁵⁾.

$$f = B_r i_r l \quad (1)$$

여기서 B_r 은 링에 작용하는 자속밀도이고, i_r 은 링에 흐르는 전류이며 l 은 링의 길이를 나타낸다. 자속밀도는 링의 높이에 따라 자속이 변화하므로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_r = \frac{1}{l} \frac{\partial \psi_c}{\partial z} \quad (2)$$

코일에 의해 생긴 자속 (ψ_c)은 일부 누설자속 (ψ_r)을 제외하면 링으로 지나간다. 이 자속은 코일에 흐르는 전류에 의해 링에 쇄교된 자속으로 $\lambda_r = M i_c$ 의 크기를 자지고 있다.

$$\frac{\partial \psi_c}{\partial t} = \frac{\partial M i_c}{\partial z} \quad (3)$$

결과를 식(1)에 적용하면 위쪽으로 작용하는 힘은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$f = \frac{\partial \psi_c}{\partial z} i_r = i_c i_r \frac{\partial M}{\partial z} \quad (4)$$

코일에 흐르는 전류와 링에 흐르는 전류 그리고 부상 높이에 따른 상호 인덕턴스의 변화로 표현되므로 다음과 같이 모형화한다.

$$\hat{f} = a u(k)^2 \times [b + (y(k) - y(k-1))] \quad (5)$$

여기서 $u(k)$ 는 컴퓨터내의 C 제어 프로그램에서 출력되는 디지털 제어신호이고 $y(k)$ 는 링의 높이를 나타내고, a 는 비례상수 그리고 b 는 링의 초기높이이다. 링의 무게 (m)에 작용하는 중력

은 mg 이고, 이 중력과 식 (5)의 \hat{f} 가 같아지는 높이에서 링이 위치하게 된다. 그림 7과 같은 정현파 제어신호를 인가하여 링의 실제 높이를 센서를 통해 높이 신호를 측정하였다⁽⁶⁾.

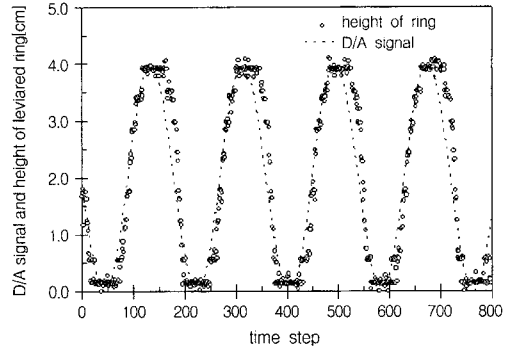


그림 7. 컴퓨터 제어신호와 링의 높이.
Fig. 7. Digital control signal from computer and height of ring.

컴퓨터 제어신호를 입력으로 링의 높이를 출력으로 해서 800개의 입출력 데이터를 가지고 오프라인으로 식(5)에 적용하여 모형식의 계수 $a=0.419$, $b=1.445$ 를 구하였다. 부상된 높이 신호가 sin파형으로 증가하고 감소하도록 입력 신호의 sin 파형을 통신포트로 공급하여 정현파의 중심이 2cm에 위치하도록 제어신호를 발생하였다. SCR를 사용하여 1주기에 한번 점호각이 터-온 되게 하였다. 센서를 통해 얻은 링의 위치가 8단계이므로 실제 출력을 연속적으로 추정하지 못하였으며, A/D 컨버터로 데이터를 변환하는데 입력측의 노이즈가 포함되어 있음을 알 수 있었다. 포토 인터럽터의 높이가 6mm라 센서를 통과하는 감지부분은 높이 4.5mm 폭 1.5mm의 알루미늄을 링에 부착시켜 링이 올라갈 때 센서가 링을 잘 감지하도록 하여 링의 감지부분이 센서를 통과하면서 높이 데이터를 가지도록 하여 두개의 센서이동시 발생하는 불연속 구간을 줄였다. 정지된 높이에 따라 링이 진동하는 범위가 달라진다. 점핑링 시스템은 비선형 시스템으로 링의 높이가 선형적으로 올라가지 않고 특정 위치에서 갑자기 부상하게 된다. 자속밀도 세기가 큰 부분, 즉 낮은 높이에 링을 위치할 경우에 진동이 2-4mm 정도 생긴다.

6. 결 론

본 논문에서는 전자유도 법칙을 직접 설명해

줄 수 있는 점핑링 장치를 직접 제작하여 링의 위치를 검출하고 실시간 제어하였다. 광센서를 사용하여 링의 높이를 발광 다이오드로 나타내었고 센서신호를 전기신호로 변환하는 과정을 설명하였다. 교육적 목적을 달성하기 위해 감지된 디지털 신호를 발광 다이오드로 5개로 디지털값의 변화를 눈으로 볼 수 있도록 하였으며 다시 아날로그로 변환하여 눈으로 높이 신호를 확인하도록 시스템을 제작하였다. A/D 변환기를 사용하여 컴퓨터에서 링의 위치를 검출하고 링의 높이에 따른 인가전압의 관계식을 유도하여 실시간으로 링의 높이를 제어할 수 있게 하였다. 시스템 모형은 비선형 특성을 가지므로 기준신호에 대한 실제 출력신호를 가지고 모형화하였는데, 컴퓨터에서 계산된 제어신호는 위상제어 소자 TCA 785의 출력과 비교하여 SCR 점호각을 제어하여 점핑링 시스템에 교류전압을 인가하여 링을 원하는 높이로 유지하였다. 제작된 실험장치는 전자유도 법칙을 실험적으로 증명할 수 있는 교육적 목적을 만족함을 확인할 수 있었다.

이 논문은 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30200-020-1)지원으로 수행된 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] E. R. Laithwaite, "Electromagnetic levitation theory", *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 112, no. 12, pp. 2361~2375, Dec. 1965.
- [2] B. Shahian and M. Hassul, 'Control system design using matlab', pp. 455~464, Prentice-Hall, Inc, 1993.
- [3] 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, 1999.
- [4] Paul J. H Tjossem and Victor Cornejo, "Measurement and mechanism of Tomson's jumping ring," *Am.J. Phys.* 68(3), pp. 238~244, 2000.
- [5] 山田一, '리니어 모터와 응용기술', 實數出版, pp. 84~85, 1972.
- [6] Park, S.W. and Seo, B.H, "Identification and control of jumping ring system using dynamic neural networks", *2nd Asian Control Conf.*, Vol. III, pp. 823~826, July, 1997.

著 者 紹 介



박 성 욱

1964년 11월 16일생
 1987년 경북대학교 전기공학과
 졸업(공학사)
 1989년 경북대학교 전기공학과
 대학원 졸업(공학석사)
 1996년 경북대학교 전기공학과

대학원 졸업(공학박사)

1991년~1992년 국방과학연구소 근무

1992년~현재 구미1대학 컴퓨터 응용전기 전공
 부교수

주관심 분야 : 신경망, 실시간 제어, 신호처리