

Development of an Educational System and Real Time Nonlinear Control (Ⅰ)

朴 省 昱*
(Seong-Wook Park)

Abstract - The purpose of this paper is to design and manufacture an educational system in order to demonstrate the causes and effects of electromagnetic induction. The educational system described in this study is a "jumping ring apparatus". This system demonstrates the principle of electromagnetic induction, a force from AC sources, Lenz's law of repulsion and transformer. The educational system is composed of a jumping ring apparatus, a sensor array, encoder, A/D converter, D/A converter and nonlinear controller. The educational system is controlled by 586 PC using Turbo C program. The sensor array is composed of 20 optical sensors. The nonlinear controller consists of nonlinear control algorithm and control board included SCR, FET and phase controller. The A/D converter is used to show the height of ring position to analog for an education purpose. The control signal calculated from the nonlinear control algorithm send control board through 8 bit D/A converter. Experiment results are given to verify that proposed nonlinear controller is useful in on line control of the educational system.

Key Words : Jumping Ring Apparatus, Modelling, Fuzzy Control, Dynamic Neural Unit, Real Time Control

1. 서 론

점핑링 실험장치(jumping ring apparatus)는 1887년 Thomson에 의해 처음으로 제작된 이래 1890년에 Fleming에 의해 보완되었다. 패러데이 법칙과 렌츠의 원리를 이용한 점핑링 실험장치는 전자석의 유도 법칙의 기본 개념은 물론 자계의 형성에 의한 링의 부상을 직접 관찰할 수 있어 교육효과를 높일 수 있는 장치이다[1]. 이 장치는 1960년대에 영국의 한 대학 학술제 작품으로 전시되었는데 단순히 인가전압에 따라 링의 높이가 변화하는 것으로 흥미를 유발하였고 이 원리를 전자유도 법칙과 렌츠의 법칙으로 설명하였다[2]. 그러나 이 링은 시간에 따른 온도와 자속의 변화로 인해 요동하고 일정한 높이를 유지 못하는 문제점이 발생되었다. 센서를 이용하여 부상된 높이를 감지하는 폐회로 시스템을 구성하여 링의 높이를 제어할 수 있는 점핑링 실험장치가 필요함에 따라 본 연구에서는 자계 해석용 프로그램을 사용하여 점핑링 시스템을 해석하고 유한 요소법으로 시뮬레이션하여 제작에 필요한 데이터를 얻고 교육용 실험장치로 개발하고자 한다.

본 논문에서는 점핑링 실험장치를 설계 제작하여 전자석 유도 법칙에 의해 발생한 전자기력을 분석하고 전자력에 의

해 부상한 링의 높이를 실시간으로 관측할 수 있는 센서 배열과 링의 높이 신호인 디지털 신호를 아날로그로 볼 수 있도록 신호처리 회로를 구성하였다. 자속밀도의 변화에 따른 전자기력의 힘의 크기를 모형화하여 링의 높이에 따른 힘의 관계를 해석한 후, 비선형 제어 프로그램에 의해 원하는 링에 높이에 맞는 제어 신호를 발생하도록 하였다. 발생한 제어신호는 제어보드에 입력으로 가해져 위상제어 신호를 발생시킴으로서 교류전압 파형을 실시간 제어하여 링을 원하는 위치에 부상하도록 하였다.

2. 점핑링 실험장치의 설계

그림 1은 점핑링 실험장치의 구성도로서 이 점핑링 실험장치는 자계를 발생시키기 위한 코일과 이 자계의 영향으로 추력을 일으켜 점핑시키기 위한 원형 모양의 알루미늄 재질인 링으로 구성되어 있다. 원활한 점핑을 위하여 축 부분과 링의 안쪽 면에는 간격 2[mm]을 두었다. 길이 27[cm]의 적층봉상 철심 밑부분에 코일을 1400회 감아 5×5[cm²] 원단면이 되게 하였고 이 코일에 AC 220[V]의 전원이 인가된다. 봉상 철심봉을 자유롭게 움직일 수 있도록 외경 10.8[cm], 안지름 8[cm], 두께 1.2[mm]의 알루미늄 링을 삽입하면 링은 인가전압에 따라 소정의 높이까지 부상시킬 수 있다. 그림 2는 자계 해석 프로그램을 사용하여 코일과 코아에 발생하는 자계의 공간적 분포도이다. 그림 2에서 자력선이 코아 밑면과 링사이에 폐회로를 구성하고 있고 코아 위쪽으로는 자력선이 공간으로 퍼져나가는 것을 알 수 있다[3].

* 正 會 員 : 龜尾1大學 컴퓨터응용전기전공 副教授 · 工博
接受日字 : 2002年 10月 24日
最終完了 : 2002年 11月 12日

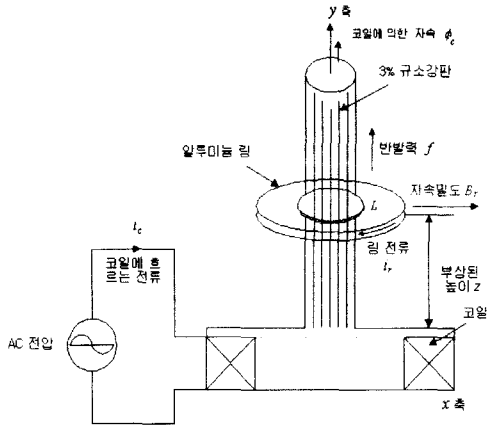


그림 1 제작된 점핑링 실험장치
Fig. 1 Constructed jumping ring apparatus

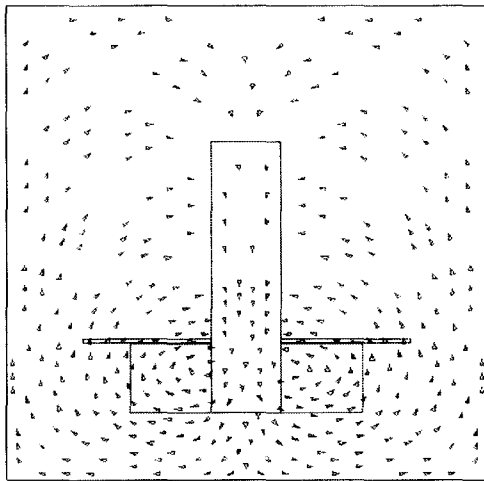


그림 2 코일과 코어 주변에 발생한 자력선의 분포
Fig. 2 Distribution of field lines around the coil and core

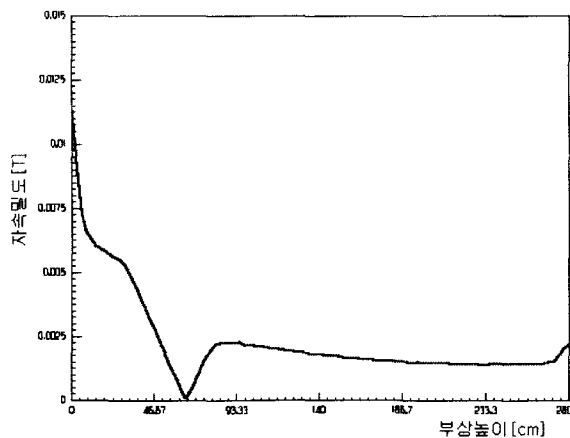
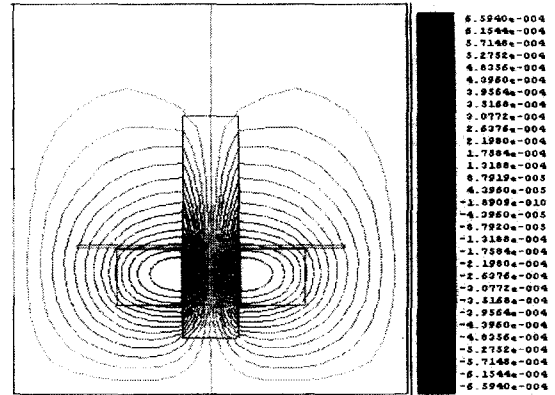
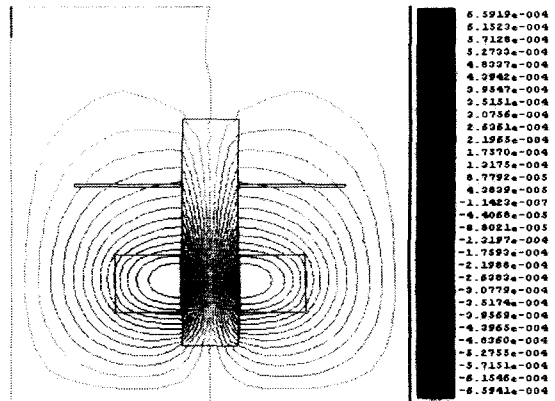


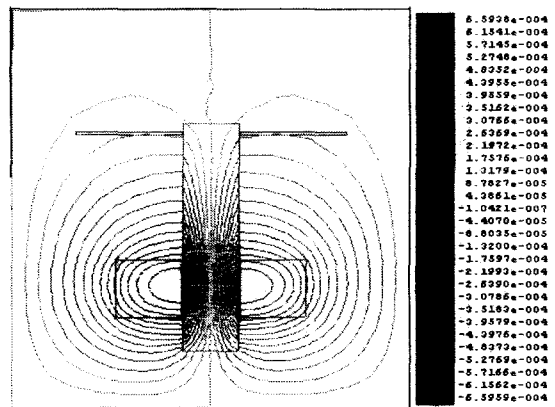
그림 3 링이 아래쪽에 있을 경우에 자속 분포
Fig. 3 Flux distribution at lower position of the ring



(a) 링이 아래쪽에 있는 경우, 2[mm]



(b) 링이 중간에 있는 경우, 100[mm]



(c) 링이 위에 있는 경우, 190[mm]

그림 3은 링의 위치에 따른 자속밀도의 크기를 Maxwell 2D 프로그램으로 해석한 것으로 코어 바깥 수직성분의 자계는 높이가 높을수록 감소하고 낮을수록 증가함을 곡선을 보고 알 수 있었다. 링이 아래쪽에 위치할 때의 자속밀도는 0.01 - 0.005[T]이고 중간아래쪽에서는 값이 0으로 떨어졌다가 중간부분에서 다시 0.002[T]에서 천천히 떨어짐을 알 수 있었다. 그림4는 유한 요소법을 사용하여 링이 아래, 중앙, 위에 있을 경우에 대해 자계 분포를 Maxwell 프로그램 사용하여 해석한 것이다.

그림 4 링의 위치에 따른 자속분포 (Maxwell 2D 시뮬레이터)
Fig. 4 Flux distribution depending on ring position

표 1은 유한 요소법 소프트웨어를 사용하여 입력변수를 적용하여 해석한 결과이다.

표 1 유한 요소법을 사용하여 부상된 링의 높이에 대한 추력, 전류, 인덕턴스

Table 1 Current, force and inductance using ANSYS simulator

입력	재료	코아: 30% Si $\rho=47 \times 10^{-5} [\Omega \cdot \text{mm}]$ 링: Al $\rho=2.75 \times 10^{-5} [\Omega \cdot \text{mm}]$ 코일: Cu $\rho=1.73 \times 10^{-3} [\Omega \cdot \text{mm}]$		
	이격거리	$\delta = 2\text{mm}$		
	전류밀도	$J = 1.2 \times 1400 \text{turn} \times 1.57 \text{A} / 2500 \text{mm}^2 = 0.8972 [\text{A}/\text{mm}^2]$		
	주파수	60Hz		
	링 무게	92[g]		
출력	링 높이	19[cm]	10[cm]	0.2[cm]
	추력	0.09[N]	0.58[N]	3[N]
	링 전류	214[A]	517[A]	1049[A]
	인덕턴스	0.41[H]	0.38[H]	0.27[H]

표 2에서 δ 는 코아와 안쪽 링사이의 이격거리이고, f 는 위쪽으로 작용하는 전자력으로 이 힘에 의해 링이 점핑한다. 코아내의 수직축 성분의 자계변화는 코아에 작은 2차 코일을 사용함으로써 구할 수 있다. 주 코일에 AC전원을 공급하면 2차 코일인 링에 전압이 유기된다. 동일하게 작은 코일을 코아에 수평으로 부착하면 수평성분의 자계가 구해진다. 수평성분과 수직성분의 자계는 부상높이에 선형적으로 근사화 할 수 있다. 2차 코일을 고정된 위치에 두고 자계에 의한 수직성분과 수직성분에 인가한 AC전압과의 관계를 살펴보면, 전압이 상승함에 따라 수평성분에서 포화가 일어난다. 표 2는 설계시의 전기특성과 열적 특성을 계산한 것으로 전압 전류의 단위는 실효치로 표기하였다. 여기서 f_y 와 f_x 는 링의 수직축과 수평축에 작용하는 힘이 0.65[N]일 때 계산된 열적특성을 보여준다.

패러데이와 렌츠의 법칙에 의해 링에 유도된 역기전력은 $-\frac{d\phi}{dt}$ 이다. 링을 통과하는 자속 ϕ 를 sin파라하면 링에 유

표 2 점핑링 실험장치의 특성

Table 2 Characteristics of jumping ring experiment

전기특성	전력손실	30[W]
	저항	12[Ω]
	임피던스	143[Ω], L=0.38[H]
	입력전압	1.57A \times 143 Ω =225[V]
	역율	$\cos\theta=30\text{W}/144=0.21$
	용량	30W/cos θ =143[VA]
열적특성	주변온도	50. C
	표면온도	68. C
	내부온도	74. C

도된 전류의 파형은 $-\sin$ 파가 되고 자속의 시간변화율은 \cos 파가 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. 그러나 유도전압과 전류는 90°위상차를 가지므로 링은 항상 반발력에 의해 부상되고 링은 순수한 인덕턴스와 같은 작용을 하게 된다[4].

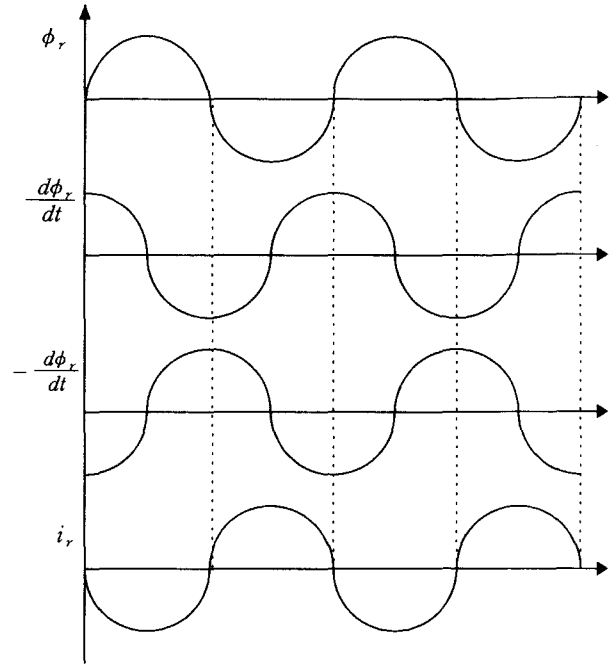


그림 5 링을 통과하는 자속과 자속의 시간 변화율 및 링에 유도된 전류

Fig. 5 Variation with time of flux through the ring, rate of change of flux and induced current in the ring

코일단의 사양은 저항률 2.86[Ω], 인덕턴스 0.13[H](60Hz), 임피던스 49[Ω](60Hz), 인가 전압 AC 220[V], 지름 22[cm], 높이 5[cm]의 원형 모양의 코일을 제작하였다. 원형 막대 모양의 코어단의 사양은 지름 5[cm], 높이 27[cm]의 3[%] 규소 강판을 적층하여 사용하였다. 작동 원리는 코일에 인가된 교류의 자속 밀도 B_r 에 의해 알루미늄 점핑링에 와전류(i_r)가 발생하며, 플레밍의 왼손법칙에 의해 위쪽(y축)으로 추력(f)이 작용하여 링이 부상하게 된다[5]. 그림 6은 제작된 점핑링 시스템을 나타낸 것이다[6]. 추력을 주기 위한 코일 부분과 추력을 받아 상승되어 있는 점핑링 및 점핑링의 위치를 감지하기 위한 광센서 열을 나타내고 있다.

3. 교육용 시스템의 제어

링을 부상시키기 위하여 싸이리스터 SCR을 사용한 위상 제어 방식을 사용하였다. 컴퓨터에서는 원하는 링 높이를 turbo-C 제어 프로그램에 의해 제어기를 통해 출력한다.

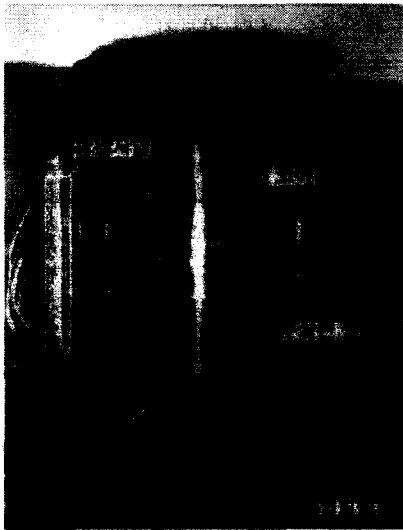


그림 6 제작된 점핑링 실험장치
Fig. 6 Manufactured the jumping ring experimental apparatus

출력된 디지털 정보는 D/A 변환기를 거쳐 0-5[V]이내의 아날로그 전압값으로 변환된다. 그림 7은 광센서 신호를 디지털 전압으로 변환하는 엔코드 회로와 신호처리 회로 및 점핑링에 교류전압을 인가하는 회로이다. 전압의 크기를 아날로



그림 7 엔코드 회로와 신호처리 회로
Fig. 7 Encode circuit and signal processing circuit

그 변환하는 D/A변환기, 이 전압을 컴퓨터로 전송하기 위해 A/D변환하는 과정과 제어 알고리즘으로 구한 제어신호를 D/A변환하여 제어보드의 입력으로 신호를 전송하는 것을 신호처리 회로라 한다. 제어 신호는 전압값으로 위상제어소자 출력과 비교하여 그 차이에 해당하는 고속 PWM 파형을 생성한다. 이 파형은 SCR의 게이트 신호를 주어 교육용 시스템에 인가하고자 하는 전압의 위상을 제어한다. 게이트 신호에 따라 SCR의 점호각을 조정되므로 점핑링에 인가되는 AC 220[V] 전압의 위상을 제어시켜 링의 높이를 제어하게 된다. 그리고 링의 위치 정보는 다시 광센서를 통하여 감지된다. 그림 8은 이러한 과정의 구조를 나타낸 것이다. 제어기는 비선형 제어 알고리즘을 사용하여 제어신호를 발생한다. 그림 9는 점핑링 실험장치, 엔코드, 신호처리 회로, 제어보드와 제어 프로그램에 의해 온 라인으로 수행하는 실험장치와 관측장비이다. 220V/220V 트랜스는 교육용 시스템

에 교류전원 전압을 인가하기 위해서 사용되었고 1차측과 2차측을 절연 분리하여 실험장치를 보호하였다. 센서의 배열이 8단계이고 링에 최저점에 위치하면 링의 한쪽 끝에 부착된 2[mm] 포인터가 첫 번째 센서의 광을 차단하게 되어있어 사실상 7단계까지 링의 위치가 감지된다.

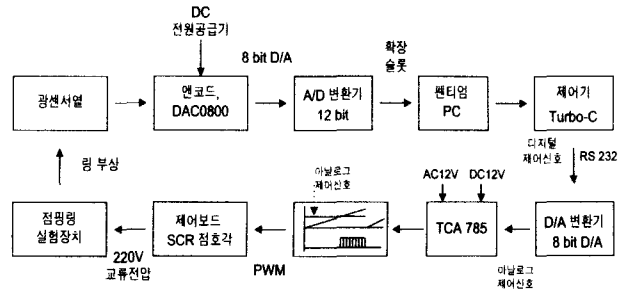


그림 8 점핑링 시스템의 온라인 제어 구조
Fig. 8 Block diagram for on line control of jumping ring system

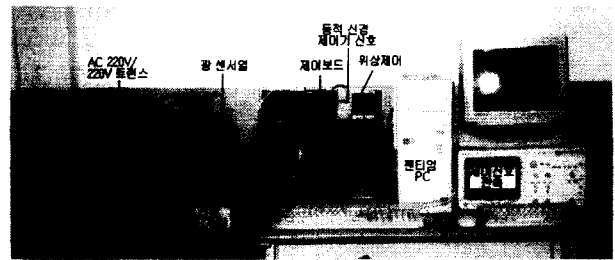


그림 9 교육용 실험장치와 관측장비
Fig. 9 An educational system and measurement instrument

본 연구에서는 제어기를 모형화에 의한 제어, 퍼지 제어기에 의한 제어, 동적 신경 제어기에 의한 제어로 점핑링의 위치를 실시간 제어하여 결과를 비교하였다.

3.1 시스템 모형화에 의한 제어

링 높이를 제어하기 위해서 교육용 시스템의 입력과 출력 정보를 이용하여 시스템을 수식으로 나타내어야 한다. 제어기의 디지털 신호와 부상된 링의 높이를 입력, 출력으로 하여 시스템을 모형화 할 수 있다. 코일과 링을 상호 유도 결합된 등가회로이므로 코일에 의해 생긴 자속(ψ_c)은 일부 누설자속(ψ_{1l})을 제외하면 링으로 통과한다. 이 자속은 코일에 흐르는 전류에 의해 링에 쇄교된 자속으로 $\lambda_r = Mi_c$ 의 크기를 가지고 있다. 코일에 의해 발생한 자속중에 링의 높이에 영향을 주는 자속은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial \psi_c}{\partial t} = \frac{\partial(\psi_{1l} + \psi_{1r})}{\partial z} = \frac{\partial \psi_{1r}}{\partial z} = \frac{\partial Mi_c}{\partial z} \quad (1)$$

자속밀도는 링의 높이에 따라 자속이 변화하므로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

점핑링 실험장치의 반발력에 의한 링이 부상하는 힘은 플레밍의 왼손의 법칙에 의해 식 (3)과 같다.

$$f = B_r i_r l \quad (3)$$

위쪽으로 작용하는 힘은 식 (4)과 같다.

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

식 (4)로부터 전류의 크기는 측정 가능한 제어전압으로 생각하고 상호인덕턴스를 링 높이 변화로 나타내면 식(5)와 같이 모형화 할 수 있다[8].

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

여기서, $u(k)$ 는 링의 높이를 제어하는 신호이고 $y(k)$ 와 $y(k-1)$ 는 현재와 과거의 링의 높이이다. 링의 초기높이 (b)와 비례상수 (a)를 변수로 하여 교육용 실험장치를 모형화하였다. 제어 프로그램에 의해 링의 높이를 단계적으로 변화하도록 디지털 제어신호를 발생하면 신호가 0-5[V]의 디지털 신호로 전송되고 D/A변환기를 통해 아날로그 제어신호로 변환된다. 아날로그 신호는 위상제어소자의 출력인 램프신호와 비교기를 통해 PWM 파형의 SCR 구동신호가 발생하여 점핑링 실험장치에 AC전압이 인가된다. 위상제어소자의 출력신호는 0-5[V]의 램프신호로 아날로그 제어신호와 비교하여 제어신호보다 큰 구간의 영역에서 SCR 구동펄스가 발생한다. 제어신호는 링의 높이를 일정하게 유지하기 위해 인가한 신호이며 교육용 시스템에 대한 모형화 계수를 구하기 위해서는 링의 높이를 변화시킬 수 있는 제어신호를 인가해야 하므로 그림 10과 같은 정현파 제어신호를 인가하여 그 때의 링의 실제 높이를 센서를 통해 높이 신호를 측정하였다. 그림 10과 같이 컴퓨터 프로그램으로 0-2[V]의 D/A 제어신호가 제어보드에 인가하면 교육용 시스템은 0-4[cm]로 부상된다. 컴퓨터 제어신호를 입력으로 링의 높이를 출력으로 해서 800개의 입출력 데이터를 가지고 식(5)에 적용하여 비선형 회귀방정식의 계수 $a=0.419$, $b=1.445$ 를 구하였다.

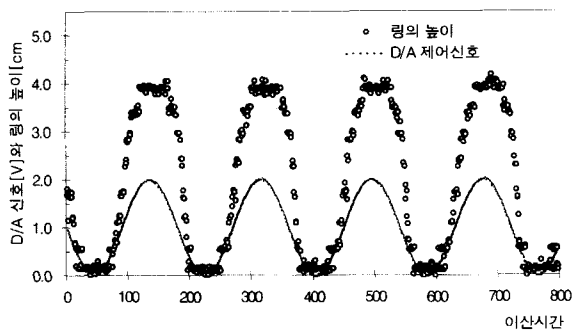


그림 10 컴퓨터 제어신호와 링의 높이
Fig. 10 Digital control signal from computer and height of ring

시스템을 모형화하는 과정에서 제어신호를 일정하게 변화시켜 실제로 제어하는 경우 반드시 모형화 오차가 수반된다. 그림 11는 제어입력 신호를 두 배로 하여 부상된 높이와 제어신호를 비교하였다. 그림 11로부터 입력에 대한 출력이 시간 지연을 가지고 있어 정확하게 원하는 파형을 추종할 수 없다. 비선형 회귀 방정식으로부터 얻은 수식은 어느 정도 교육용 시스템을 모형화하여 원하는 출력을 내기 위한 제어입력을 구했지만 보다 정밀한 제어를 하기 위해서는 비선형 제어기를 설계해야 한다.

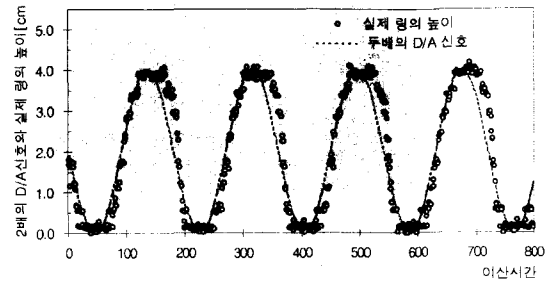


그림 11 2배의 컴퓨터 제어신호와 링의 높이
Fig. 11 Digital control signal multiplied by two and height of ring

3.2 퍼지 제어기에 의한 비선형 제어기 설계

퍼지 제어 시스템은 그림 12와 같이 네 개의 기본 요소 즉, 퍼지화, 퍼지 제어규칙, 퍼지 추론 기구 및 비퍼지화로 구성된다[7]. 퍼지 제어기에서 퍼지 시스템의 동작은 전문가의 경험에 근거한 언어로 표현한 규칙으로 특징지을 수 있으며, 퍼지화는 수치적 데이터를 인간의 모호한 언어적 표현으로 바꾸는데 이용된다.

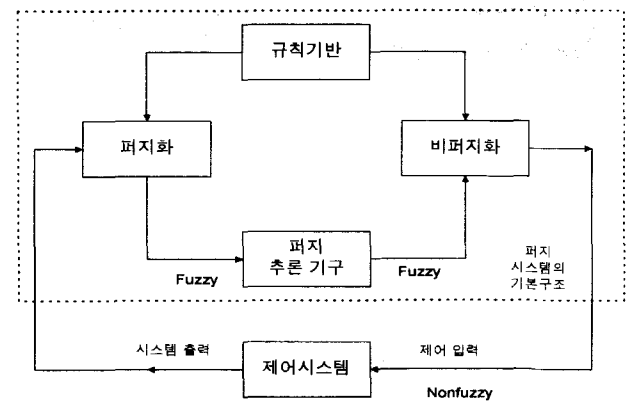


그림 12 퍼지 제어 시스템의 구조
Fig. 12 Architecture of a fuzzy logic control system

퍼지 제어규칙에서의 전건부는 퍼지 조건문이고 후건부 제어하에서 시스템의 제어동작이다. 퍼지 제어기의 추론 규칙은 다음과 같다.

$$R_1 : \text{if } e = PB \text{ and } \Delta e = ZE \text{ then } \Delta U = PB$$

R_2 : if $e = ZE$ and $\Delta e = NB$ then $\Delta U = NB$
 \vdots
 R_k : if $e = ZE$ and $\Delta e = PB$ then $\Delta U = PB$

퍼지 추론에서 나온 결과를 제어 입력으로 변환하는 비퍼지화 방법으로 보편적인 무게중심법(center of gravity)을 사용한다. 퍼지 제어를 실제로 적용할 때 문제가 되는 것은 제어기의 설계, 즉 퍼지 제어 규칙을 어떻게 만드는가 하는 것이다. 기존의 제어이론과 달리 퍼지 제어에는 제어 규칙을 구성하는 방법이 확립되지 않기 때문에 초기에 제어규칙을 시스템의 식별과 성능평가에 따라 계속 수정해 나가야 한다. 본 연구에서는 양자화 레벨 $E(k)$, $\Delta E(k)$ 를 오차 $e(k)$ 와 오차 변화량 $\Delta e(k)$ 그리고 입력 이득요소 K_1, K_2 의 함수로 각각 사상되며, 식으로 표현하면 다음과 같이 표현된다.

$$E(k) = \text{Quantize}[K_1, e(k)] \quad (6)$$

$$\Delta E(k) = \text{Quantize}[K_2, \Delta e(k)] \quad (7)$$

$E(k)$ 와 $\Delta E(k)$ 는 규칙기반과 소속함수에 추론과 비퍼지화 과정을 거쳐 DU 가 구해지고 본 연구에서는 식 (8)과 같이 무게중심법을 사용하여 비퍼지화하였다.

$$DU = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_j DU_j}{\sum_{j=1}^m \mu_j} \quad (8)$$

여기서, m 은 양자화 레벨의 갯수이고 DU_j 는 후건부 소속함수가 최대값을 가지도록 하는 출력공간의 위치이다. 분모의 합산된 퍼지 추론 소속함수는 비퍼지화 구조를 정규화한다. 제어신호는 이득 K_3 을 곱해서 얻어지고 시스템 제어신호 $u(k)$ 는 식 (10)과 같다.

$$du(k) = DU \times K_3 \quad (9)$$

$$u(k) = u(k-1) + du(k) \quad (10)$$

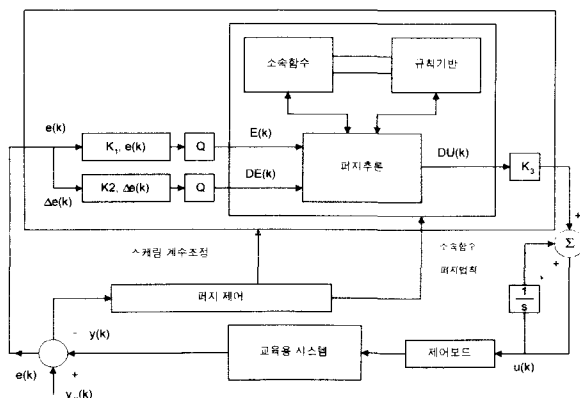


그림 13 퍼지 제어기에 의한 교육 시스템 제어
 Fig. 13 Control of educational system using fuzzy controller

그림 13은 교육용 시스템을 퍼지 제어기로 제어하는 구조이다. 입력신호에 대한 기준 출력신호는 0-4[cm]사이의 sin 파형으로 부상된 높이를 나타낸다. 부상된 높이 신호가 sin

파형으로 증가하고 감소하도록 입력신호 sin 파형을 통신포트로 공급하였고 이 입력신호를 이용하여 정현파의 중심이 2[cm]에 위치하도록 기준 출력신호를 발생하였다. 그림 14는 퍼지 제어기를 사용하여 기준 높이 신호를 추종한 결과와 그때의 제어 입력을 나타낸다. 링이 올라갈 때와 내려갈 때 기준 높이 신호에 따라 어느 정도 오차 없이 추종하지만 링이 가장 높은 위치에서 약간의 오차가 있음을 보여준다. 즉, 제어신호가 처음에 증가하다가 0.9 - 2.3[V]사이의 정현파 신호로 제어됨을 그림 15로부터 알 수 있었다.

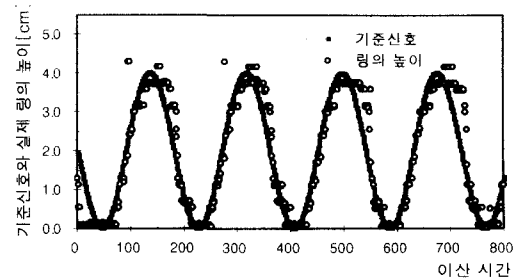


그림 14 퍼지 제어기를 사용한 기준 신호 제어
 Fig. 14 Control of a reference signal using a fuzzy control

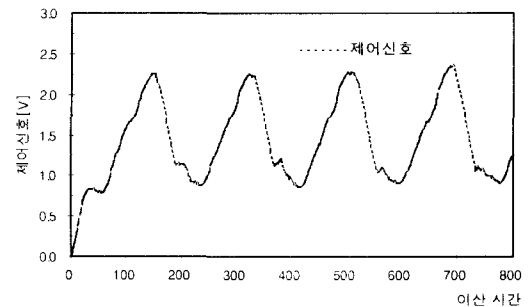


그림 15 퍼지 제어기의 제어신호
 Fig. 15 Control signal from fuzzy controller

시스템 제어를 위해 사용한 규칙은 모두 13개로 표 3과 같고 제어규칙내의 제어 변수에 대한 소속함수는 그림 16과 같다. NB=100, NM=-200/3, NS=-100/3, ...PB=100이며 각각의 삼각함수의 폭은 -100에서 100까지의 수로 표현되며 여기에 스케일링(2)하여 탐색하였다. 오차와 오차의 변화율에 스케일 계수 100을 곱하여 -100에서 100까지의 범위를 가진다. 퍼지 제어기의 변수로 $K_1=0.5$, $K_2=1.264$ 및 $K_3=1.181$ 가 사용되었고 퍼지규칙에서 출력은 $y=1.235y_1-0.4y_2+0.165u$ 식을 사용하였다. 퍼지 제어기의 목적함수는 수식으로 정규화 되지 않은 비선형 동적 특성을 가진다. 목적함수의 도함수를 구하기 어렵기 때문에 기존의 최적화 기법을 적용하기 곤란하므로 시행 착오법을 사용하였다.

3.3 신경 제어기에 의한 비선형 제어기 설계

제약한 동적 신경 모형은 기존의 시냅스 기능과 소마기능에 동적 인자 프로세스를 부가시켜 신경의 내부 동력학을

반영한 모형이다. 생물학적 관점과 같은 기능이 되도록 역치(θ)를 비선형 함수의 변수에 포함시켜 동적 인자 프로세스(v₁(k))가 역치보다 큰 경우에 비선형 변환된다. 시냅스, 동적 인자 프로세스 그리고 소마이득으로 구성된 제안된 동적 신경 모형을 그림 17과 같다. 이 구조는 2차 동적 요소를 포함하므로 식(11-12)과 같이 상태 방정식으로 표현된다.

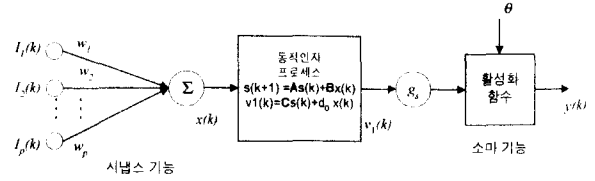


그림 17 제안한 동적 신경 모형
Fig. 17 Proposed dynamic neural unit

표 3 제어규칙에 사용한 오차와 오차 변화율에 대한 언어변수

Table 3 Linguistic variables for error and change of error in control rule

	E							
DE								
NB				NS				
NM				NS				
NS				NS				
ZE	NS	NS	NS	ZE	PS	PS	PS	
PS				PS				
PM				PS				
PB				PS				

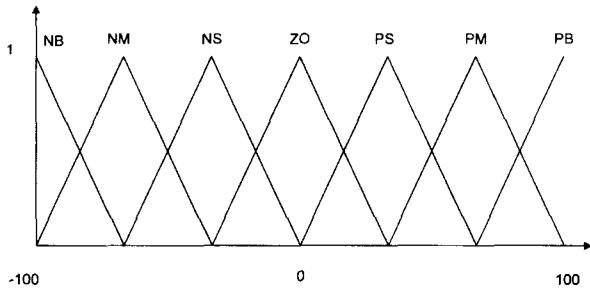


그림 16 삼각형의 퍼지 변수
Fig. 16 Fuzzy variables of triangle type

$$\begin{bmatrix} s_1(k+1) \\ s_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_1 & -g_2 \\ g_2 & -g_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_3 \\ g_4 \end{bmatrix} x(k) \quad (11)$$

$$v_1(k) = [cg_4 \ g_3] \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \end{bmatrix} + d_0 x(k) \quad (12)$$

$$y(k) = \Psi(g \cdot v_1(k) - \theta) \quad (13)$$

여기서, $x(k) = \sum_{i=1}^p w_i I_i(k)$ 은 외부 동적 신경으로부터의 입력, $v_1(k) \in R^1$ 은 동적 신경의 내부 포텐셜로 입력신호의 총 합이다. $y(k)$ 는 동적 신경의 출력을 나타낸다. 시간 연산자를 사용하면 입력신호와 동적 인자 프로세스간의 전달함수를 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{v_1(k)}{x(k)} = \frac{d_0 + K_4 q^{-1} + K_5 q^{-2}}{1 + 2g_1 q^{-1} + (g_1^2 + g_2^2) q^{-2}} \quad (14)$$

여 기 서 , $K_4 = 2(g_3 g_4 + d_0 g_1)$, $K_5 = 2g_1 g_3 g_4 + g_2(g_3^2 - g_4^2) + d_0(g_1^2 + g_2^2)$ 이다. 본 논문에서는 기존의 동적 신경 모형에 내부 동적 인자 프로세스의 구조를 입력변화에 대한 출력의 변화를 최소화 하는 구조와 안정하게 학습계수를 갱신하기 위해 식(14)와 같은 구조를 제안하였다[8]. 활성화 함수는 양과 음의 값을 가진 tanh 함수를 사용하였고 함수의 기울기가 전체 학습에 영향을 주므로 학습계수에 포함시켜 학습과 적응법칙에 따라 갱신하였다. 학습할 인자를 모아 벡터 $\Omega(\theta, g_1, d_0, g_3, g_4, g_2, g_1, g_1)$ 로 표시하여 오차함수의 비용을 최소화시키는 급강하 법칙을 적용하면 학습계수는 아래와 같이 학습된다.

$$J = \frac{1}{2} E[(y_d(k) - y_k(k))^2 + (y_k(k) - \hat{f}_k(k))^2] \quad (15)$$

$$\Omega(k+1) = \Omega(k) + \text{dia}[\mu] E \left[(e_i + e_c) \frac{\partial y_k(k)}{\partial \Omega(k)} \right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial y_k(k)}{\partial \Omega(k)} = \frac{\partial y_k(k)}{\partial v(k)} g_5 \frac{\partial v_1(k)}{\partial \Omega(k)} = g_5 \Phi' \frac{\partial v_1(k)}{\partial \Omega(k)} \quad (17)$$

체인법칙을 적용하고 학습계수 벡터에 대한 변화분을 고려하면 학습계수의 변화분은 식 (17)과 같이 되고 시간 연산자와 활성화 함수의 미분을 사용하면 각 계수에 대한 변수 민감도($S_\theta(k), S_{g_1}(k), S_{d_0}(k), S_{g_3}(k), S_{g_4}(k)$)를 구할 수 있다. 그림 18은 제안한 동적 신경 제어를 사용하여 모형화 오차를 보상하고 외란의 영향을 보상할 수 있는 제어구조이다.

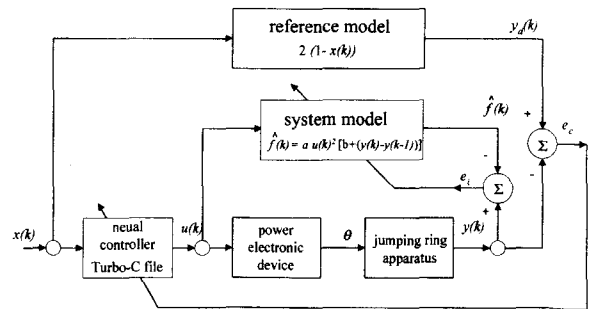


그림 18 교육용 시스템 온라인 제어
Fig. 18 Control scheme of an education ring system on line

본 논문에서 사용된 입력신호와 기준 출력신호는 아래와 같다.

$$x(k) = \sin\left(\frac{\pi}{90} k\right) \quad (18)$$

$$y_d(k) = 2(1 - \sin(\frac{\pi}{90}k)) \quad (19)$$

그림 19는 동적 신경기와 모형화 수식을 사용하여 기준 출력신호를 추종한 결과이고 그림 20은 동적 신경 제어기의 출력이다.

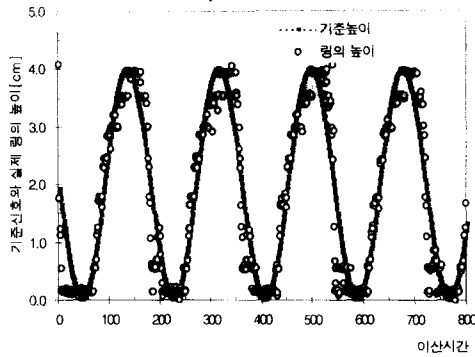


그림 19 기준 출력 신호와 링의 높이
Fig. 19 Reference signal and height of ring

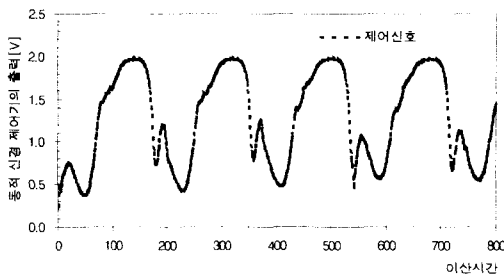


그림 20 동적 신경 제어기의 제어신호
Fig. 20 Control signal from dynamic neural controller

그림 20으로부터 제어신호가 0.7~1.4[V]사이에서는 링이 빠르게 부상되고, 링의 무게에 때문에 1.6~0.8[V]사이에 빠르게 하강하여 교육용 시스템을 제어하는데 어려움이 있었다. 이 원인은 자속밀도의 변화에 의해 전자기력이 발생하여 링을 부상하는데 단지 링의 높이 신호의 변화와 제어 전압만으로 교육용 시스템을 제어하였기에 생긴 결과이다. 그림 11, 그림 14, 및 그림 19로부터 기준 출력신호는 같지만 부상된 링의 위치는 동작 신경 제어기를 사용한 경우가 모형화와 퍼지 제어기에서 얻은 결과보다 시간지연 없이 기준 파형을 잘 추종함을 알 수 있었다. 그림 21은 온라인 제어 구조에서 모형화 오차와 기준파형 제어 오차 동일한 비중으로 학습하여 구한 동적 신경기의 제어신호이다. 링에 작용하는 자속밀도의 영향에 따라 정현파가 아닌 비선형 파형으로 제어신호가 발생함을 그림 22로부터 알 수 있었다. 표 4는 본 연구에서 사용한 동적 신경제어기의 변수와 초기치이다. 제어된 과정을 컴퓨터 화면에 나타내도록 프로그램 하였고 그 결과를 그림 23에 나타내었다.

4. 실험결과와 검토

정현파 신호를 기준 높이로 하여 모형화 기법과 제어 알

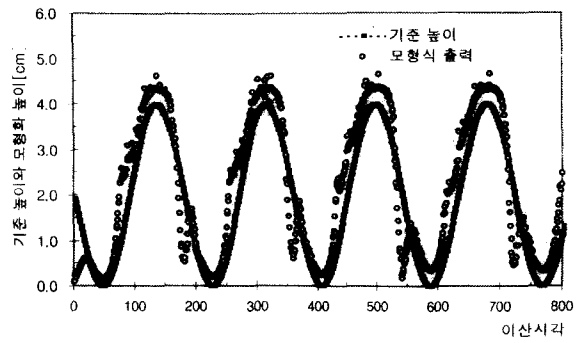


그림 21 기준 출력과 모형화 출력
Fig. 21 Reference output and modelling output

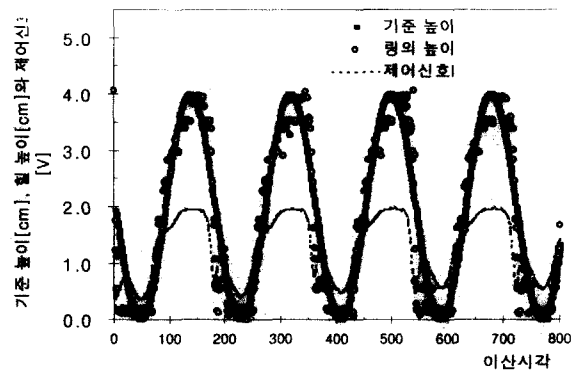


그림 22 정현파 기준 출력신호, 링의 실제 높이와 제어신호
Fig. 22 Sine wave reference, height of ring and control signal

표 4 실험에 사용한 변수와 초기치

Table 4 Parameters and initial value used in experiment

변수와 초기치	신경 모형	제안한 동적 신경기 모형
학습계수		$g_1 = 0.1, g_2 = \sqrt{0.2 - 0.01^2}, g_3 = 0.03$ $g_4 = \frac{0.01 - 0.2g_1}{g_3}, \theta = 0.1$
학습율		$g_s = 1.0, \eta_g = 0.8, \eta_\theta = 0.1$

고리들에 의한 비선형 제어기를 사용하여 얻은 결과를 분석하면 다음과 같다. 모형화 기법인 경우 모형화 오차를 수반하므로 입력과 출력신호로부터 시스템을 잘 근사화하는 수식을 얻어지만 실험시 생기는 외란과 링의 자속밀도의 공간 변화에 의한 영향을 고려하지 못하였다. 모형수식에서 얻은 변수 a, b의 값은 실험시에 계수의 값이 a=0.1824, b=3.082로 변화됨을 확인 할 수 있었다. 퍼지 제어기를 이용하는 경우에는 전문가의 경험과 지식을 기초하여 좋은 결과를 얻을 수 있다. 하지만 제어규칙이 많이 사용되므로 계산시간이 오래 걸리고 실시간 연산하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 13개의 제어규칙을 사용하여 오차와 오차변화율을 얻어변수에 적용하여 실험한 결과, 퍼지 제어기가 모형화 기법

보다 좋은 결과를 얻었다. 하지만 동적 신경기를 사용한 경우에 원하는 기준 높이를 잘 추종함을 알 수 있었다. 동적 신경기에서 제어신호로부터 시스템의 특성을 잘 분석할 수 있었다. 광센서를 사용하여 링의 높이를 측정하다보니 센서 자체에 6[mm]의 허용오차를 가지고 있고 불연속 위치를 검출하는 단점도 있어 앞으로 광센서의 높이를 줄이고 센서의 위치를 2개 내지 3개를 사용하여 평균하여 링의 위치를 검출해야 더 정확한 높이 제어가 가능하다. 링의 위치가 1.5[cm]에서 1[cm]로 내려올 때, 링의 무게와 전자기력에 의한 부상력에 의해 0.5[cm]로 내려갔다가 다시 올라오는 것을 알 수 있다. 교육용 시스템으로 개발하기 위해 제어 동작과정과 링의 위치와 기준 높이를 화면에 나타낼 수 있는 프로그램 기법과 터치패드 화면을 통한 실시간 제어과정이 앞으로 개발하여야 한다.



그림 23 제어과정을 화면에 실시간으로 처리
Fig. 23 Real time control process with screen

5. 결 론

본 논문에서는 교육용 시스템을 위한 요소법으로 교육용 실험장치를 직접 설계하여 링의 위치에 따른 자속의 세기와 자속밀도 그리고 링에 작용하는 힘을 구하였다. 실험장치를 교육용으로 제작하고자 광센서와 위치 검출 회로와 A/D변환기를 제작하여 직접 링의 높이를 아날로그로 확인 할 수 있도록 교육용 시스템을 구성하였다. 제작된 시스템의 링 높이를 제어를 위해 모형화 기법, 퍼지 제어기 그리고 동적 신경 제어를 설계하여 온라인 제어하였다. 교육용 시스템의 제작과 비선형 제어기를 사용하여 시스템에 적용하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 유한 요소법을 통해 해석하고 설계한 실험장치가 교육용으로 그리고 제어기 검증용으로 활용할 수 있었다. 둘째, 링의 위치 검출 과정을 통해 학생에게 실물교수 할 수 있는 교육용 시스템을 개발하였다. 셋째, 교육용 시스템을 폐회로로 구성하여 실시간으로 얻은 입출력 정보를 가지고 교육용 시스템을 모형화하여 모형화 수식으로 링의 높이를 제어하였다. 넷째, 퍼지 제어기와 동적 신경 제어를 설계하여 시스템을 제어하여 제어기의 성능을 비교하였다.

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] Paul J.H Tjossem and Victor Cornejo, "Measurement and mechanism of Tomson's jumping ring," Am.J, Phys. 68(3), pp 238-244, March 2000.
- [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, February 1999.
- [4] D.J. Sumner and A.K. Thakkrar, "Experiments with a 'jumping ring' Apparatus," Phys., Ed. 7 (4), pp. 238-242., 1972.
- [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 network," 2nd Asian Control Conf., Vol.III, pp.823-826, 1997.
- [7] 류동완외3인, "유전 알고리즘을 이용한 자동 동조 퍼지 제어기의 하이브리드 최적화 기법", 48권, 1호, pp. 36-43, 1999.
- [8] 박성욱외 2인, "동적 신경망의 층의 분열과 합성에 의한 비선형 시스템 제어," 대한전기학회 논문지, 48권, 4호, pp.419-427, 1999.

저 자 소 개



박 성 욱 (朴 省 昱)

1964년 11월 16일생. 1987년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 구미1대학 컴퓨터 응용 전기전공 부교수

Tel : 054-440-1203

Fax : 054-440-1209

E-mail : swpark@kumi.ac.kr