

Position Control of the Arago Disk using Fuzzy Techniques

文相翼* · 崔君鎬** · 朴基憲***
 (Sang-Yik Moon · Goon-Ho Choi · Ki-Heon Park)

Abstract - In this paper, a fuzzy logic controller is designed for position control of an Arago disk. The Arago disk system is an experimental set to exploit Arago's disk phenomenon which is the operation principle of induction motors. Since the Arago disk system operates in stable, marginally stable, and unstable regions, it is suitable as a test system to evaluate efficiency of various control system design methods. It is shown that the fuzzy logic controller shows good responses for multi-operating points of Arago disk system, while the controllers using linearized models are able to control the system on only one operating point.

Key Words : Fuzzy controller, Arago disk system, Position control

1. 서 론

주파수 응답을 이용하는 고전적 제어기 설계 방법이나 상태 공간의 시스템 방정식을 기반으로 하는 현대 제어 방법에서는 제어 대상인 플랜트의 수학적 모델이 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 매우 복잡한 프로세스는 수학적 모델로 쉽게 표현될 수 없고, 모델을 만들었다고 하더라도, 그 결과로 얻어진 비선형 시변 체계와 같은 모델에 대하여는 적절한 제어기를 설계하기가 쉽지 않다. 퍼지 제어는 모호한 정보를 토대로 적응성이 높은 조작 방법을 유연하게 수행하는 인간의 능력을 언어적으로 모델화할 수 있는 특징이 있으며, 운전자의 조작 경험과 제어 대상물에 대한 축적된 경험 지식을 IF - THEN 형식으로 제어 규칙을 표현하여 사용할 수 있기 때문에 지능 제어를 수행할 수 있다. 그러므로 퍼지 논리 제어기는 전문가의 지식을 기반으로 구성된 언어적 제어 기술을 자동 제어 기술로 변환할 수 있는 알고리즘을 내포하고 있어 고전적인 제어 알고리즘보다 더 우수한 제어 결과를 얻는 경우가 보고 되고 있다. 특히 모델의 불확실성 (uncertainty)이 존재할 때 이에 대한 영향을 최소화시키려는 강인제어의 경우 퍼지 제어가 매우 유용한 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 퍼지 기법을 이용하여 아라고 원판 시스템의 강인 제어기를 설계하였다. 많은 퍼지 강인 제어기의 경우 불확실성이 존재하는 한 개의 동작점에 대하여 설계하거나

혹은 안정도 성격이 비슷한 여러 동작점에 대하여 설계가 되었다. 본 논문의 실험에서는 안정도 성격이 다른 두 동작점에 대해서도 한 개의 퍼지 제어기를 사용하여 제어 가능함을 보였다. 아라고 원판 시스템[1,2]은 회전 자계에 의한 토크 생성의 원리를 이용한 시스템인데, 직류 전동기의 회전 속도를 제어하여 회전 자계에 의해 생성되는 힘과 회전 막대의 추에 작용하는 중력이 균형을 이루게 하여 일정한 각도에서 막대의 자세를 유지시키게 된다. 토크 생성을 위한 회전 자계는, 영구자석을 한 원판에 고정시키고 이 영구 자석의 자계에 영향을 받는 다른 원판을 회전시킴으로써 발생시킨다. 기존의 제어기 설계기법은 선형화된 시스템의 모델을 기반으로 하여 제어기를 설계하였기 때문에 제어기 설계가 이루어지는 특정한 구동점에서만 그 제어기의 성능을 발휘할 수 있다. 따라서 아라고 원판 시스템과 같이 안정, 임계안정, 불안정 영역이 명확하게 나뉘어지는 시스템에서는 각각 안정, 임계안정, 불안정 영역에 따라 각기 다른 제어기를 필요로 하였다 [1]. 하지만 퍼지 제어기의 경우 제어기 설계시 시스템의 모델을 필요로 하지 않으므로 하나의 제어기로서 전체 시스템을 제어할 수 있다. 본 논문에서는 퍼지 제어기를 이용하여 아라고 원판 시스템의 제어를 수행하여 얻은 결과와 LQ 제어기를 이용한 결과를 비교, 분석함으로써 퍼지 제어이론의 유용성을 검증하였다.

2. 아라고 원판시스템

2.1 아라고 원판시스템의 개요

이 장에서는 먼저 아라고 원판 시스템이 어떠한 원리에 의해 동작되는지를 알아보고, 제어 대상으로 선정된 아라고 원판 시스템의 전체 구성에 대해 살펴본 후 제어기 설계를 위한 전체 시스템의 운동방정식을 유도하기로 한다. 운동 방정

* 準 會 員 : (株)現代精工 研究員
 ** 正 會 員 : (株)韓美 技術研究所 研究員
 *** 正 會 員 : 成均館大 電氣電子 및 컴퓨터工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 1999年 11月 6日
 最終完了 : 2000年 5月 31日

식의 유도는 문헌[1]을 참고하였으며 여기서는 결과만 인용하기로 한다.

먼저 회전 자속의 변화와 원판 사이에 작용하는 힘의 관계를 설명하기 위해 시스템이 어떻게 구동되는지 살펴보도록 하자. 그림 1에서 원판이 회전했다는 것은 원판의 회전 방향과 반대 방향으로 자석이 회전했다는 것과 같다는 것을 알 수 있다. 따라서 Lenz의 법칙과 오른 나사의 법칙에 의해 그림 1과 같은 유도 전류가 원판에 유기됨을 알 수 있다. 이 과정을 조금 더 자세히 살펴보면 그림 2와 같다.

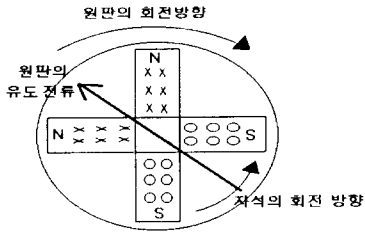


그림 1 아라고 원판 현상의 개요도
Fig. 1 Phenomenon of arago disk

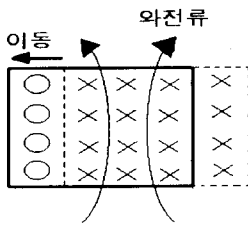


그림 2 자석이 이동한 경우
Fig. 2 Force of moving magnets

그림 2에서처럼 자석이 좌측에서 우측으로 이동하면 Lenz의 법칙에 의해 자석의 좌측에는 새로운 자속을 막으려는 방향(O), 우측에는 없어지는 자속을 유지하려는 방향(X)으로 자속이 발생한다. 이러한 상태에 오른 나사의 법칙을 이용하면 그림 2에서 보는 것과 같은 전류가 유도되고 끝으로 플레밍의 왼손 법칙을 이용하면 원판의 이동으로 인해 영향을 받는 부분이 받는 힘은 자석의 이동방향과 같은 방향의 힘을 받음을 알 수 있다.

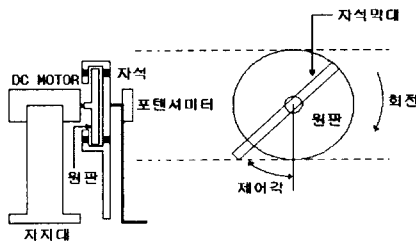


그림 3 전체 시스템
Fig. 3 Arago disk system

그림 3은 실제 제작되어 있는 아라고 원판 시스템을 간략하게 나타낸 것이다.

이 시스템은 직류 전동기를 이용하여 원판을 회전시킴으로써 이에 따른 자속의 변화를 일으키는데 이 자속의 변화는 자석 막대에 일정 정도의 힘을 가하게 되고, 이 힘으로부터 생기는 자석 막대의 회전 토크를 추의 무게로 지지시켜 일정 각을 유지하도록 하게 한다. 제어 각은 포텐쇼미터에 의해 측정되며 이 측정된 값을 통해 효과적으로 시스템을 제어할 수 있는 제어기를 설계함으로써 최종적으로 전체 제어 시스템을 완성하게 된다. 그림 3의 전체 시스템을 블록 선도로 표시하면 그림 4와 같다.

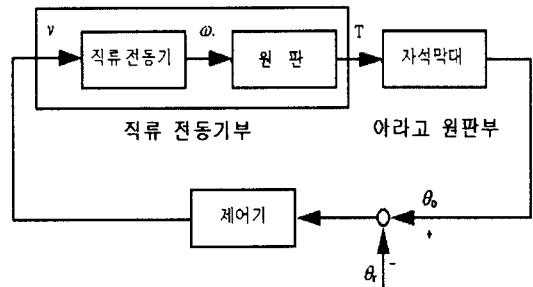


그림 4 전체 블록 선도
Fig. 4 Block diagram of the system

- V : 전압 T : 자석 막대에 가해진 토크
- θ_0 : 자석 막대의 회전각 ω : 원판의 회전 각속도
- θ_r : 자석 막대의 기준각

본 논문의 제어 시스템의 목적은 외란에 대하여 아라고 원판 시스템의 막대의 각도 θ_0 가 기준 입력으로 지정한 각도 θ_r 로 유지될 수 있도록 하는 것이다.

아라고 원판을 분석해 보면 자석 막대의 각도에 따라 시스템이 안정, 임계 안정, 불안정한 영역에서 동작된다[1]. 즉 자석 막대의 각도가 90도 미만일 경우에는 모든 극점이 S평면의 왼쪽에 위치하는 안정한 시스템이지만 추의 각도가 90도일 경우는 원점에, 90도를 초과할 경우에는 S평면의 오른쪽에 극점이 위치하는 불안정한 시스템이 된다.

2.2 아라고 원판 시스템의 모델링

퍼지 제어기의 설계에는 대상 시스템의 수학적 모델링은 필요하지 않다. 그러나, 이 절에서는 아라고 원판 시스템의 동적 특성을 이해하는데 도움이 되는 내용으로서 시스템의 모델링을 제시한다. 실제로 퍼지 제어 결과와 비교하려는 LQ 제어기의 설계는 이러한 모델링을 이용하여 얻어졌다[1].

전체 시스템은 직류 전동기를 포함한 원판의 회전 부분(직류 전동기부 모델)과 이 원판의 회전에 의한 자속의 변화로 생기는 힘에 의해 나타나는 각도의 변화 부분(아라고 원판부 모델)으로 크게 나눌 수 있고 전체 시스템의 모델링은 이들 두 부분을 각각 따로 모델링한 후 최종적으로 이들 두 부분을 결합함으로써 구할 수 있다. 직류 전동기에 대한 가장 일

반적인 모델은 그림 5와 같은 형태로 제시되며 이로부터 다음과 같은 직류 전동기의 토크 방정식과 전기 방정식을 각각 유도해 낼 수 있다.

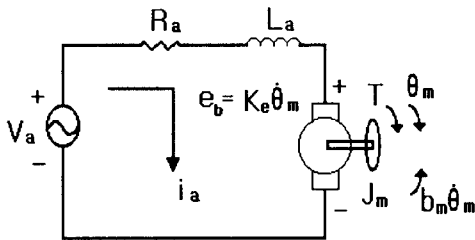


그림 5 직류 전동기 모델
Fig. 5 DC motor model

따라서 아라고 원판부의 막대의 회전 운동 방정식은 이 토크들과 뉴턴의 운동법칙에 의하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다(K_T 는 모터의 토크 상수이다).

$$J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = K_T \cdot i_a \quad (1)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_a - K_e \dot{\theta}_m \quad (2)$$

그림 6은 아라고 원판부의 개략적인 형태를 나타내고 있다. 원판의 회전에 따라 막대가 받는 힘을 F 라하고 공급되는 토크를 T_1 , 중력에 의해 추가 낙하하며 생기게되는 토크를 T_2 라고 할 때 아라고 원판부 막대의 회전 운동은 이 토크들과 관성 모멘트, 마찰력의 관계식으로 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서 J_a 는 막대의 관성질량이다.

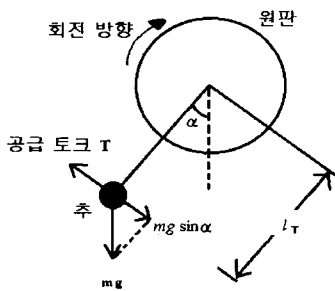


그림 6 아라고 원판의 힘의 평형
Fig. 6 Force relation in Arago disk

$$T_1 = l_T \cdot F \quad (3)$$

$$T_2 = mgl_T \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

$$T_1 - T_2 = J_a \ddot{\alpha} + b_a \dot{\alpha} \quad (5)$$

앞의 개요에서 설명한 바와 같이 원판과 자석막대의 상대

속도로 인해 유기되는 와전류의 크기가 원판과 자석막대 사이의 힘의 크기를 결정하게 된다. 때문에 본 논문에서는 원판이 고정되어 있고, 자석 막대가 원판의 회전에 의해 따라서 회전한다고 생각하고 이 힘의 크기를 구하기로 한다. F 는 원판의 회전에 의해 생기는 힘이므로, 힘과 원판의 회전 각속도와의 관계식을 유도할 수 있는데 여기서는 [1]의 유도 결과를 이용하여 다음 (6)식을 사용하겠다. 이 관계식에서 원판의 회전에 의해 생성되는 힘은 서로 비례가 있음을 알 수 있다.

$$F = K \cdot \omega \quad (6)$$

식 (6)을 유도하는 과정에서는 자석이 원판과 붙어 있고 마찰력이 없는 이상적인 조건에서 방정식을 유도하였다. 하지만 실제 제작되어 있는 시스템은 원판과 자석 사이에 일정 공극이 존재한다. 따라서 식 (6)에서 K 변수 값은 실제와 약간의 차이가 있다.

식(1)~(5)로부터 상태 방정식을 구하기 위해, $x_1 = \alpha$, $x_2 = \dot{\alpha}$, $x_3 = \dot{\theta}_m = \omega$, $x_4 = i_a$, $u = V_a$ 와 같이 설정하고, 이 설정된 상태들에 대한 전체 시스템의 상태 방정식을 구하면,

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (7.a)$$

$$\dot{x}_2 = k_1 \sin x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \quad (7.b)$$

$$\dot{x}_3 = k_4 x_3 + k_5 x_4 \quad (7.c)$$

$$\dot{x}_4 = k_6 x_3 + k_7 x_4 + k_8 u \quad (7.d)$$

여기서

$$k_1 = -\frac{Mgl_T}{J_a} \quad k_2 = -\frac{b_a}{J_a} \quad k_3 = \frac{Kl_T}{J_a}$$

$$k_4 = -\frac{b_m}{J_m} \quad k_5 = \frac{K_T}{J_m} \quad k_6 = -\frac{K_e}{L_a}$$

$$k_7 = -\frac{R_a}{L_a} \quad k_8 = \frac{1}{L_a}$$

와 같은 비선형 상태방정식으로 나타난다. 위의 시스템은 α 의 값에 따라 안정, 임계안정, 불안정 특성을 나타내는데 [1] 이러한 특징은 아라고 원판 시스템의 제어 특성을 이해하는데 매우 중요한 사항이다.

3장 제어기 설계

3.1 퍼지 제어기 설계

퍼지 제어는 퍼지 논리에 기초를 두고 있다. 퍼지 논리는 기존 논리 체계보다 인간의 사고나 자연어의 특성과 많은 유사성을 가지고 있어서, 실세계의 근사적이고 불확실한 현상을 기술하는데 효과적으로 이용될 수가 있다. 이러한 관점에서 퍼지 제어를 퍼지 논리 제어기(Fuzzy Logic Controller :

FLC)라고도 부른다. 퍼지 제어기의 핵심적인 부분은 일련의 언어적 형식의 제어 규칙이며 여기에는 퍼지 연산 관계가 포함되어 있고, 퍼지 합성 규칙에 의해서 제어 입력이 형성된다. 결국 FLC는 전문가의 제어지식을 언어적 형태로 기술한 제어규칙을 자동제어기가 동작하도록 역할을 바꾸어 주는 기능을 하는 것이다[3,11]. 처음에 퍼지 제어기는 어떤 애매한 오차 입력 값이 들어오면 정량적인 값으로 바꾸어야 하며, 다음에 여러 절차를 걸쳐 프로세서를 제어할 수 있는 제어 값을 결정한다. 그 기본 구조는 그림 7에 보이며 그 구성 요소들은 1)퍼지화부, 2)의사 결정부, 3)지식기반부, 4)비퍼지화부, 5)프로세서(제어대상)부로 이루어져 있다[5~10].

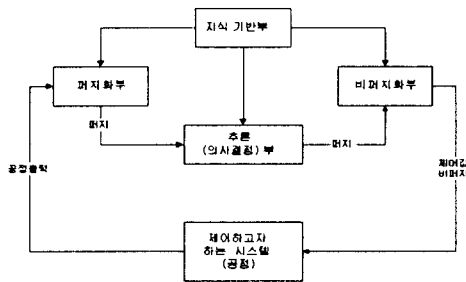


그림 7 퍼지 논리 제어기의 기본 구성도
Fig. 7 Basic structure of fuzzy controllers

본 논문에서는 임계 안정 영역인 90° 와 불안정한 영역인 120° 에서 막대의 각도를 제어함으로써 제어기의 성능을 평가해 보고자 한다. 또한 기존의 논문에서 많이 사용해왔던 Look-up table 을 사용하지 않고 MATLAB에서 구현한 퍼지 제어기를 TMS320C3x을 이용하여 퍼지 물을 직접 제어기에 적용시켰다.

3.1.1 퍼지화(fuzzifier)

제어기의 입력 변수는 오차 (e)와 오차의 변화량(ce)으로 선정하고, 출력 변수는 제어기 출력 전압(cu)로 선정하였으며 아래와 같이 정의한다.

$$e(k) = r(k) - y(k) \tag{8}$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \tag{9}$$

여기서 r(k) 와 y(k) 는 각각 k번째 샘플링 시간의 기준 입력(원하는 각도)와 시스템의 출력(막대의 각도)이다. 먼저 오차(e)와 오차의 변화량(ce)을 제어 입력으로 받아 들여서 입력값의 범위를 그에 해당하는 전체 공간으로 크기 변환(Scaling Mapping)한다. 멤버십 함수는 제어 규칙 및 퍼지 데이터 처리에 이용되며, 설계자의 경험과 지식에 의해서 주관적으로 정의된다. 입출력 변수 e, ce, cu에 대한 멤버십 함수 (membership function)은 다음과 같이 7개의 멤버십 함수로 정의했다.

- nb : Negative Big
- nm : Negative Medium
- ns : Negative Small
- zo : Zero
- ps : Positive

Small pm :Positive Medium pb : Positive Big

여기서는 연속형 퍼지 변수중 계산에 용이한 삼각형 퍼지 변수를 이용하였다. 본 논문에서는 추가 일정한 각도를 유지하도록 하는 것이 목적이므로 설정치 근처에서의 원활하고 정밀한 제어를 위해서 다음과 같이 소속함수를 설정하였다. 그림 8에서 언어변수로 표현되는 멤버십 함수의 중첩 부분이 퍼지 집합의 모호한 정도를 나타내며, 추론 과정에서 입력에 대해 적용되는 규칙의 수를 결정하기 때문에 멤버십 함수는 퍼지 제어기의 설계에 있어서 매우 중요한 요소가 된다.

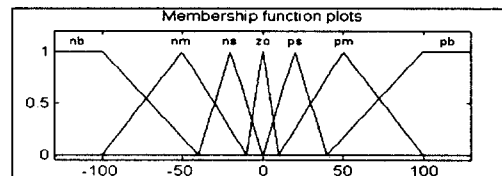


그림 8a 오차(e)의 소속함수
Fig. 8a Membership function of the error

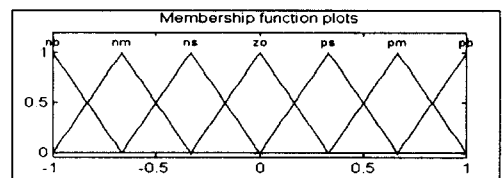


그림 8b 오차의 변화량(ce)의 소속함수
Fig. 8b Membership function of ce

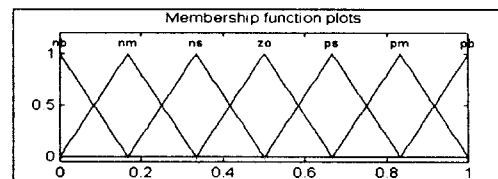


그림 8c 출력(cu)의 소속함수
Fig. 8c Membership function of cu

3.1.2 퍼지 제어 규칙

퍼지 제어 규칙을 작성하는 방법은 여러 가지가 있는데 그 중에서 제어 전문가의 지식을 활용하여 제어 규칙을 작성하는 방법을 이용하였다. 퍼지 제어기를 구현하기 위한 퍼지 제어 규칙은 전건부와 후건부 형식 (if - then 형식)을 사용해서 아래와 같이 표현된다.

if e is A_i and ce is A_j then cu is B_k

A_i : 기준 입력과 자석막대의 각도의 차이 (fuzzy 입력 변수)

A_j : 시간에 대한 오차의 변화량 (fuzzy 입력 변수)

B_k : 모터의 입력 전압 (fuzzy 출력 변수)

MacVier-Whelan[11]은 아래의 세 Mata-Rule 을 이용하여

제어 규칙을 설계하였다.

- (1) 만일 e 와 ce 가 0이면, 현재의 제어 설정을 유지한다.
- (2) 만일 e 가 만족할 정도로 0에 접근하고 있는 상황 이라면 현재의 제어 설정을 유지한다.
- (3) 만일 e 가 자동조절(self - correcting)되지 않는다면, cu 는 0이 아니고, e 와 ce 의 부호와의 크기에 의존 한다.

본 논문에서 설계한 제어 규칙은 MacVier-Whelan의 제어 규칙을 변형하여 설계하였으며, 제어 입력 변수는 2개 (e , ce) 이고 각각의 변수에 대하여 7개의 언어변수를 정의하였으므로 가능한 규칙의 조합은 49개이다. 하지만 연산량이 많은 퍼지 시스템에서 시스템 제어를 원활히 수행하기 위한 최소한의 샘플링 시간을 확보하기 위해 퍼지룰을 최소화해야 할 필요가 있었으므로 가장 필요한 규칙만을 사용하였다. 이를 위하여 먼저 앞에서 구한 아라고 원판의 수학적 모델링에 근거하여 입력변수 e 와 ce 의 변화에 따른 출력변수 cu 의 변화를 MATLAB/simulink 를 통해 시뮬레이션을 해봄으로써 원하는 응답을 얻을 수 있는 가장 적은 수의 룰을 구할 수 있었다.

본 논문에서는 이러한 과정을 통하여 구한 제어기를 MATLAB과 DSP TMS320C3X의 인터페이스 프로그램인 Dspace사의 RTI 3.0이라는 프로그램을 이용하여 직접 실제 시스템에 적용시킬 수 있었다.

표 1 퍼지 제어규칙

Table 1 Fuzzy control logic

$\begin{matrix} de \\ e \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB							
NM							
NS				NS			
ZO			NS	ZO	PS		
PS			NS	PS			
PM			ZO				
PB		PS		PS			

사용된 퍼지 제어 규칙은 표 1에 나타내었으며, 세로축은 오차(e)로 가로축은 오차의 변화량(ce)으로 설정하였다. 최소한의 제어 규칙을 이용하여 원하는 출력을 얻기 위하여 비선형 퍼지 변수를 이용하였으므로 제어 규칙은 모든 영역이 아닌 0 근처에 집중적으로 사용함으로써 더욱 효과적인 결과를 얻을 수 있었다.

3.1.3 퍼지 추론 및 비퍼지화 과정

퍼지 추론 과정은 퍼지룰을 이용하여 퍼지 입력에 대한 퍼지 출력을 추론해 내는 장치이며, 퍼지 추론 방법으로는 제어 시스템과 관련하여 많이 이용되고 있는 맘다니의 Min-Max 직접법(Direct Method)[6]에 의하여 추론을 수행하였다. 맘다니 Min-Max 직접법(Direct Method)은 제어 규칙의 전건부, 후건부를 모두 언어로 대응시킬 수 있는 것이고, 정성적으로 알기 쉽다는 장점이 있다. 추론의 프로세스도 그 래픽으로 표현할 수 있기 때문에 퍼지 제어기가 지금 무엇을

하고 있는가를 쉽게 이해할 수 있다. 하지만 제어 규칙의 수가 너무 많게 된다는 단점이 있다. 비퍼지화 과정은 퍼지한 제어 출력값을 크리쉬(crisp)한 제어 출력값으로 변환하는 과정으로서 가장 널리 사용되고 있는 무게 중심법을 이용하였다. 그리고 이렇게 구해진 제어 출력값의 범위를 그에 해당하는 전체 집합(Universe of Discourse)으로 변환(Scaling Mapping)시켜 주기 위해 일정한 값을 곱해 주었다. 이 값은 시행 착오의 방법을 이용하여 오차와 오차의 변화량이 퍼지 변수 0의 값을 가지면 출력 변수는 제어 규칙에 의해 퍼지 변수 0의 값을 갖도록 선정한 값이다. 이 때 퍼지 제어기는 출력 값으로서 0.5의 값을 취하게 되고 이 값에 위에서 설정한 값을 곱해줌으로써 추가로 원하는 설정치를 유지할 수 있도록 해 줄 수 있다.

4. 아라고 원판 시스템의 실험장치 구성

본 논문에서는 자석 막대의 각도를 일정하게 유지시키는 것을 제어 목적으로 한다. 이를 위해 포텐쇼미터를 이용하여 자석 막대의 각도를 측정하며 이 값을 퍼지 제어기의 입력 값으로 제공하여 원하는 각도를 유지할 수 있는 제어 입력값(모터 구동회로의 입력 전압)을 구한다. 아라고 원판 제어 시스템은 그림 9과 같이 구성되어 있다. 시스템은 전체적으로 아크릴로 제작되어 있으며 직류 전동기와 직축으로 알루미늄 원판을 연결하여 회전할 수 있도록 하였고, 4개의 자석과 추가 부착된 막대는 자유롭게 회전할 수 있도록 하였다.

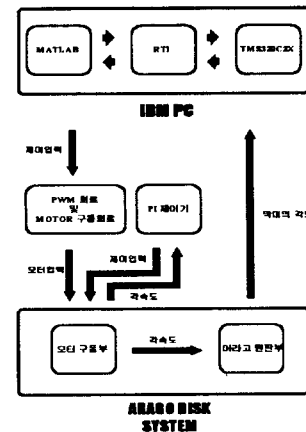


그림 9 아라고 원판 시스템의 전체 시스템 구성도

Fig. 9 Structure of the Arago disk experimental system

본 논문에서는 RTI30이라는 프로그램을 사용하여 직접 DSP와 외부회로를 연결해 주었으므로 별도의 A/D, D/A 컨버터와 인터페이스 장치를 필요로 하지 않는다.

4.1 직류 전동기 및 센서부

아라고 원판 시스템은 원판의 회전 각속도와 밀접한 관

계가 있으므로 직류 전동기가 정속 회전을 할 수 있도록 제어를 하여야 한다. 따라서 직류 전동기부에 비례-적분 제어기를 포함한 내부 루프를 첨가하여 이를 단일 플랜트로 처리하였다. 비례-적분 제어기의 이득 K_P , K_I 는 여러 번의 시뮬레이션을 통하여 가장 적절한 값을 선택하였다. 본 논문에서는 전체 시스템을 제어하기 위해 타코미터와 포텐쇼미터 2개의 센서를 사용하였다. 막대의 회전축에 장착된 포텐쇼미터는 $350/5[\text{deg/volt}]$ 의 이득 값을 가지고 각도를 전압으로 바꾸어 주는 역할을 하고 있으며 모터에 장착되어 있는 타코미터는 $7/1000[\text{V/rpm}]$ 의 이득 값을 가지고 모터의 각속도를 측정하여 이 값을 모터의 정속도 유지를 위한 PI 제어기의 입력으로 제공하고 있다.

4.2 PWM파 발생회로 및 제어기부

2개의 OP-AMP 가 내장된 TL082를 이용한 삼각파 발진 회로와 OP-AMP로 구성된 비교 회로로 구성되어 있다. DSP에서 발생한 제어 입력 신호를 기준 삼각파와 비교하여 PWM 파형을 발생시킨다. 이 PWM 파형을 IRF620의 게이트 입력으로 사용하여 전동기에 공급되는 전압 값을 조절한다. 펜티엄 컴퓨터를 이용하여 입력된 막대의 각도 값은 소프트웨어적으로 연산 처리하여 제어 신호를 출력한다. MATLAB simulink 와 fuzzy toolbox를 이용하여 퍼지 제어기를 설계하였으며 RTI 3.0 프로그램을 이용하여 설계된 프로그램을 C 언어와 어셈블리어로 변환하여 DSP를 구동 시킴으로서 원하는 제어 출력값을 구하였다. DSP 내부에 A/D, D/A 컨버터가 내장되어 있으므로 별도의 과정 없이 유도된 제어 출력값은 DSP 에서 모터 구동 회로의 입력부로 전달된다. DSP 는 Texas Instrument사의 TMS320C3X를 사용하였다. 실험 결과는 200MHz 디지털 오실로스코프로 막대에 직측으로 연결되어 있는 포텐쇼미터의 전압값과 타코미터의 전압값을 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

앞 절에서 행해진 모델링 결과를 이용하여 시뮬레이션 과정을 거친 후 본 절에서는 실제로 제작된 아라고 원판 시스템에 각각 LQ제어기와 퍼지 제어기를 적용시켜 보았다. 그림10-15에서 X 축은 시간을 Y 축은 각도를 나타내며 위에 나타난 그래프는 포텐쇼미터를 통하여 측정된 막대의 각도를 나타낸다. 시뮬레이션의 경우 외란을 가할 경우 스텝입력을 가했지만 실제 실험에 있어서는 자석 막대를 손으로 치는 것으로 외란을 대신하였다.

그림 10과 12는 LQ 제어기를 이용한 실험 결과인데 막대의 초기 각도가 각기 90° 와 120° 인 경우 순간적인 외란에 대한 막대의 각도 변화를 나타낸다. 그림 11과 13은 같은 내용의 실험을 퍼지 제어기를 이용하여 수행한 결과이다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 외란을 가한 경우 LQ 제어기의 경우 정상상태에 들어가기까지 심한 오버슈트가 있는 반면에 퍼지 제어기는 오버 슈트가 발생하지 않으며 LQ 제어기보다 빠른 시간내에 정상상태로 들어가는 것을 볼 수 있다.

그림 14와 그림 15는 퍼지 제어기를 이용하여 기준 값을 각각 90° 에서 120° 로, 120° 에서 90° 로 변화했을 경우의

그래프이다. 실험 결과에서 90° 에서 120° 로 이동하는 경우가 시간이 더 많이 걸리는 것은 자석 막대에 작용하는 중력으로 인해 발생한 것으로 여겨진다. 이 실험에서 가장 주목할 내용은 LQ 제어기는 각 동작점마다 그 동작점에 맞추어 설계한 제어기가 사용되었으나 퍼지 제어기의 경우는 한 개의 제어기로 두 동작점을 모두 제어하였다는 사실이다. 또한 퍼지 룰을 적절히 설계해 줌으로써 LQ제어기 보다 빠르고 강인한 응답을 얻을 수 있었다. 하지만 퍼지 제어기는 LQ 제어기와 달리 일정한 정상상태 오차를 가지고 있는 것을 볼 수 있으며 이러한 문제는 앞으로의 연구에서 해결되어야 할 내용이다.

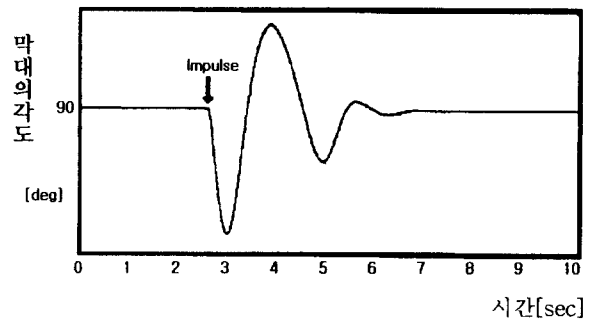


그림 10 아라고 원판(90°)의 외란에 대한 출력 (LQ제어기)
Fig. 10 Response of Arago disk(90°) to a disturbance (LQ controller)

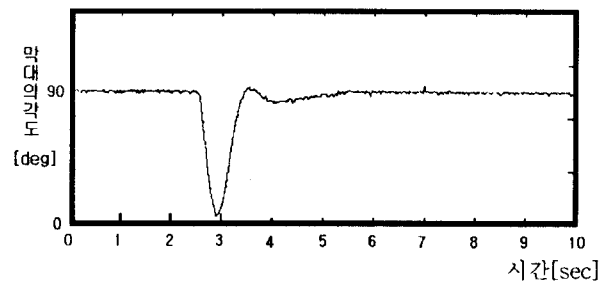


그림 11 아라고 원판 (90°)의 외란에 대한 출력 (퍼지 제어기)
Fig. 11 Response of Arago disk(90°) to a disturbance (Fuzzy controller)

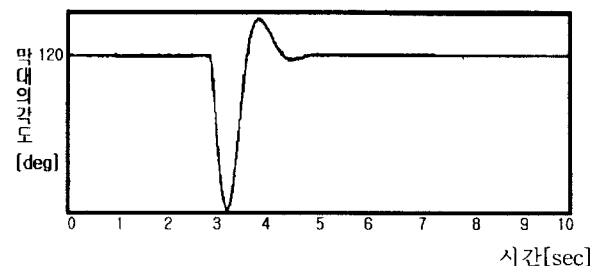


그림 12 아라고 원판(120°)의 외란에 대한 출력 (LQ제어기)
Fig. 12 Response of Arago disk(120°) to a disturbance (LQ controller)

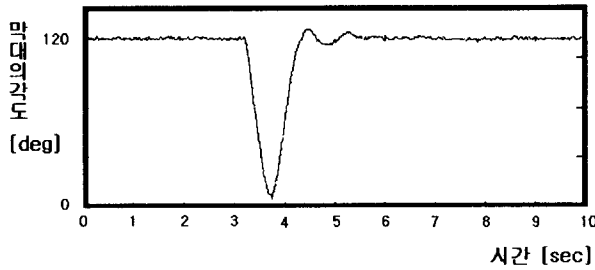


그림 13 아라고 원판(120°)의 외란에 대한 출력 (퍼지 제어기)

Fig. 13 Response of Arago disk(120°) to a disturbance(Fuzzy controller)

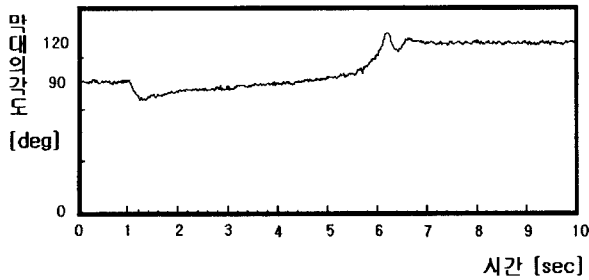


그림 14 기준 값을 90°에서 120°로 변화할 경우의 출력(퍼지 제어기)

Fig. 14 Response of the reference input (from 90° to 120°, Fuzzy controller)

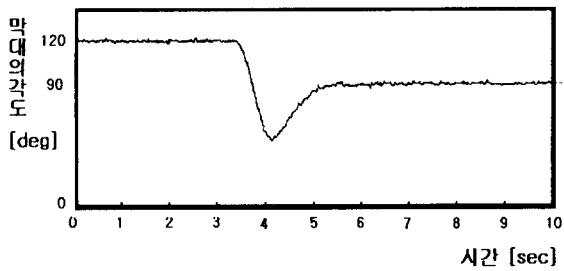


그림 15 기준 값을 120°에서 90°로 변화할 경우의 출력(퍼지 제어기)

Fig. 15 Response of the reference input(from 120° to 90°, Fuzzy controller)

6. 결 론

본 논문에서는 아라고 원판 시스템을 제어대상으로 하여 퍼지 제어기와 LQ 제어기를 설계하고 비교함으로써 퍼지 제

어기의 성능을 확인해보았다. LQ 제어기의 경우 선형화된 시스템의 수학적 모델을 토대로 제어기를 설계하였기 때문에 하나의 동작점에 대해서만 제어할 수 있었지만 퍼지 제어기는 시스템의 모델링을 필요로 하지 않으므로 다중 동작점에 대해서도 제어가 가능하며 적절한 퍼지 룰을 작성해 줌으로써 각 동작점에 대해서 보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

아라고 원판 시스템은 안정영역과 불안정 영역 그리고 임계안정영역을 모두 포함하고 있으므로 각 영역에 따른 제어기의 성능을 평가하기 용이하다. 또한 다른 제어 실험 시스템과 달리 손쉽게 성격이 다른 여러 개의 동작점을 취할 수 있으므로 퍼지 제어기와 같이 동시에 여러 개의 동작점에서의 제어 가능한 제어기의 성능을 평가하고자 할 때 편리한 시스템으로 생각되며 앞으로 제어기의 성능을 평가해 볼 수 있는 표준 시스템으로서의 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 최군호, "아라고 원판 시스템의 자세 제어에 관한 연구," 성균관대학교 공학 석사 논문, 1994.
- [2] 문상익, "퍼지 제어 기법을 이용한 아라고 원판 시스템의 위치 제어에 관한 연구," 성균관대학교 공학 석사 논문, 1998.
- [3] A. Jones, A. Kaufmann, and H. J. Zimmermann, Fuzzy sets theory and applications, Boston D. Resiel Publishing Company, 1996.
- [4] W. J. M Kickert and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," Int. J. Man - Machine Studies, Vol. 7, pp.1 - 13, 1974.
- [5] M. Jamshidi, Fuzzy Logic And Control : Software and Hardware Application, Prentice Hall, pp.112 - 148 and pp.232 - 261, 1993.
- [6] T. M. Procyk and E. H. Mamdani, "A linguistic self - organizing process controller," Automatica, Vol. 15, pp.15 - 30, 1979.
- [7] F. V. D. Rhee, "Knowledge based fuzzy control of systems," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.35, No.2, pp.148 - 155, Feb. 1990.
- [8] M. K. Ciliz and C. Isil, "Fuzzy rule - based motion controller for an autonomous mobile robot," Robotica, Vol. 7, pp.37 - 432, 1989.
- [9] R. M. Tong, "Some properties of fuzzy feedback system," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC - 10, No. 6, pp.327 - 330, 1980.
- [10]菅野道夫, 퍼지 제어 시스템, 대영사, 1990.
- [11] 변중남, 퍼지 논리 제어, pp.118 - 121, 홍릉과학출판사, 1997.

저 자 소 개



문 상 익 (文相翼)

1972년 4월 15일 생. 1997년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학과 졸업(석사). 현재 현대정공 기술연구소 전기전자 연구부 연구원

Tel : 0331-288-3676

E-mail : simun@sorak.skku.ac.kr



박 기 헌 (朴基憲)

1955년 7월 5일 생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년~1983년 해군사관학교 전기공학과 전임강사. 1987년 미국 Polytechnic University 졸업(공학박). 1988년~1990년

한국전자통신 연구소 선임연구원. 현재 성균관대 전기·전자·컴퓨터공학부 교수

Tel : 0331-290-7116

E-mail : khpark@yurim.skku.ac.kr



최 군 호 (崔君鎬)

1969년 12월 28일 생. 1993년 성균관대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 (주)한미 기술연구소 연구원

Tel : 032-580-1681

E-mail : goonho@hanminet.co.kr