

사용후 핵연료 원격 취급 장치의 퍼지 제어

*김기준 김호동 윤완기 이재설
한국 원자력 연구소 원격 장치 기술실

Remote Control of Spent Nuclear Fuel Handling Equipment with Fuzzy Logic

Ki Joon Kim, Ho Dong Kim, Wan Ki Yoon, Jae Sol Lee

Remote Technology Department

Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

Spent nuclear fuel is highly radioactive and requires remote operation due to radiation exposure. Motors which have been used in the highly radioactive environments are a DC type because of their easy implementation on control system. However there are some problems such as mechanical maintenance of brush and commutator, high cost, and heavy material control. AC servo motors are applied and tested on fuzzy and conventional control algorithms. Fuzzy logic controls of AC servo give adequate control accuracy and power for spent fuel handling in radioactive environments.

1. 서론

고 방사성 물질인 사용후 핵연료 취급 공정에서 작업의 성능을 높이고 작업자의 방사선 피폭을 가능한한 최소화 하기 위하여는 원격 기능의 효율적 조작 장치 및 제어 기술의 확보가 필수적이다.[1,2] 원격 취급을 요하는 방사성 환경에서의 기계적 구동을 위한 전동기로서 직류 전동기는 유지 및 보수 문제, 그리고 고가 장비라는 단점에도 불구하고 정밀 제어가 용이하다는 기술적 장점 때문에 널리 사용되어져 오고 있다. 직류 전동기에 의한 동력 제어는 속도가 입력 전압에 비례하고 토오크가 속도에

비례하기 때문에 광범위한 속도 제어가 가능할 뿐만 아니라 가속 및 감속이 용이하여 위치 제어가 쉬운 장점을 가지고 있지만 기계적 정류를 위한 브러쉬와 정류자의 사용으로 인하여 기계적 마모, 전기적 소음 및 브러쉬의 정기적인 보수등의 문제점을 안고 있다.[3]

Thyristor의 응용이 확대되기 시작한 1960년대 부터 전력 전자 기술은 현대 산업 뿐만이 아니라 원자력 산업에서도 매우 중요한 부분을 맡고 있다. 전동기 선택 문제에 있어서 과거에 비해 전력 변환 및 교류 전동기의 제어가 상대적으로 용이해 짐에 따라 중요한 선택 기준이었던 전원의 중요성은 감소되었다. 유도 전동기나 동기 전동기에 가변 주파수를 공급하는 주파수 변환기가 실용화됨에 따라 주파수 전동기가 갖고있던 제어의 제한점을 없앨 수 있게 되었으며, 입력 주파수를 쉽게 변환시킬수 있기 때문에 서보 전동기와 가변 주파수 구동 시스템이 강력한 경쟁자로 등장하게 되었다.[4,5] 본 연구에서는 현재 진행중인 사용후 핵연료 취급 시설에서 핵연료 밀집 저장 공정의 핵심 기술로 대두되어 있는 전동기 제어 계통 시스템을 분석하여 사용후 핵연료 원격 취급 장치에 쓰이는 직류 전동기의 유지, 보수 및 기계적 견고성에 대한 한계성 극복과 유도 전동기의 응답 시간 지연 특성을 향상시키기 위하여 AC 서보 전동기를 채택하여 벡터 제어 드라이브를 이용한 선형적 제어 특성을

유도하고자 하였다. 또한, 실험을 통한 검증을 수행하기 위하여 중량불 이송을 위한 실험 장치를 제작하였고 비례 제어 방법과 퍼지 제어 방법을 적용하여 그 제어 특성을 고찰하였다.

2. 사용후 핵연료 취급 시설에서의 전동기 제어 계통

사용후 핵연료는 핵물질 (U/Pu)을 포함하는 고방사성 물질로서 그것의 관리를 위한 시설 및 기술은 여러가지 전문적인 사항이 관련되어 있기 때문에 작업자의 방사선 피폭을 가능한한 최소화 시키고 요구되는 공정의 작업 성능을 높이므로써 작업 공정 장치의 신뢰도를 높이고 보수 및 유지 작업을 원활히 실행할 수 있는 원격 조작 장치 및 기술을 확보해야 한다.

사용후 핵연료 취급 절차는 그림 1 에서와 같이 사용후 핵연료 수송 용기의 수납으로부터 연료 집합체의 출하 및 저장등이 기본 공정이며 연료의 저장 또는 처분 효율을 높이기 위한 연료봉 밀집 포장물 및 잔존 폐기물의 포장물 반출에 이르기 까지의 제반 단계가 포함될 수 있다.

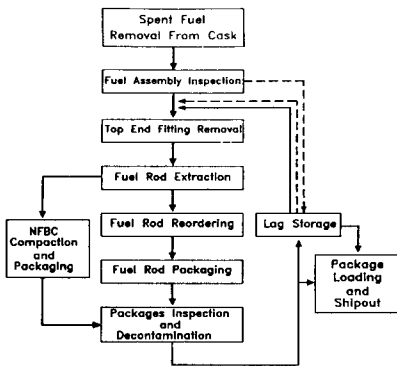


그림 1. 사용후 핵연료봉 밀집 저장 공정

취급 작업은 원칙적으로 집합체 하나씩을 기준으로 하여 순차적 작업 과정에 따라 실시된다. 그러나 필요에 따라 성능 작업 요소들간에 상호 방해가 되지않는 범위에서 병행 작업을 실시할 수도 있다. 핵연료봉 밀집을 위한 계통별 동력은 전 계통이 전동기로 되어 있으며, 사용별로 살펴보면 정밀 제어가 요구되는 계통에서는 주로 직류

전동기가 사용되어지고 있는데 분야별로는 집합체로 부터 연료봉을 추출할때에 이용되는 클램핑 테이블에서의 작업과 연료봉 인출 장치, 그리고 연료봉 압착 작업에서 주로 이용된다. 반면에 정밀성보다는 기계적 견고성과 전압 공급의 용이성을 필요로 하는 몇 가지 기계적 조작에는 3상 및 단상 유도 전동기가 사용되었다.[2]

3. 사용후 핵연료 취급 장치를 위한 제어기 설계

3.1 퍼지 이론

퍼지 이론의 응용화 사례는 현장 지식을 IF - Then production rule의 집합으로 기술하여 기억시켜 놓고 운용시에는 그것을 센서등에서의 관측 정보와 대조하여서 조작량을 결정하는 퍼지 추론(Fuzzy Inference) 방법을 사용하고 있다.

퍼지 로직 제어는 공정의 수학적 모델에 근거하지 않고 정성적 상호 관계에 의하므로 핵연료봉 밀집, 저장 계통과 같이 수학적 모델을 유도하기 힘든 공정에서도 적용이 가능하고 시설의 설계가 변경되어 제어 대상이 변화할때에도 다른 제어 기법보다 쉽게 알고리즘을 변화시킬수 있는 장점이 있다.

퍼지 로직 제어기를 구성하기 위한 제어 규칙은 계통 출력과 모델 출력간의 편차와 그 편차에 근거한 숙련자의 판단에 의존하며, 일반적으로 IF-Then, ELSE 구조의 퍼지 변수 알고리즘으로 표현된다.[6,7] 정량화된 멤버십 함수와 제어 규칙에 의한 추론 결과로 부터 하나의 조작치를 얻어내는 비퍼지화 방법은 멤버십 값이 최대가 되는 rule의 출력을 선택하는 방법과 각 출력값들을 해당 멤버십 함수값들에 대해 평균을 내는 방법이 많이 사용되고 있다. 일반적으로 멤버십 함수의 최대치를 평균내는 방법이 더욱 우수한 응답을 얻는 것으로 알려져 있으며, n 개의 rule에 대해서 다음과 같이 구해진다.

$$I = \frac{\sum_{k=1}^n (u_k \times U_k)}{\sum_{k=1}^n u_k} \quad (1)$$

여기서 U_k 는 계에서 각 rule의 출력 멤버십 값이고 u_k 는 각 rule에서 멤버십 값이 가장 큰 변수의 값이다.

고전적인 퍼지 이론은 퍼지 Level을 세분화 (r-Level) 함에 따라 입력 결정에 요구되는 퍼지 제어 규칙의 수가 r

x n (n: 퍼지 Logic에 투입된 변수의 수)으로 제어기의 구축 및 실시간 제어가 어렵다는 단점이 있다.[8]

본연구에서는 이와 같은 문제의 해결을 위해 미리 플랜트 변수들의 범위를 알고 있다는 가정하에서 퍼지 제어 규칙을 정량화하였으며, 제어 알고리즘에 필요한 메모리 크기를 감소시켜서 실시간으로 사용될 수 있는 제어기를 설계하였다. 멤버십 함수를 정량화 시키려면 퍼지 변수의 범위를 단계별로 나누고 그 값들을 정량화 시키는 Matrix Table을 만들어 제어 규칙에 적용시키게 되는데, 본연구에 사용된 퍼지 단계는 표 1 과 같이 7 개의 로직 언어로 구성되어있다.

PB(or PL) :	Positive Big (Positive Large)
PM :	Positive Medium
PS :	Positive Small
AZ(or ZE) :	Approximately Zero (Zero)
NS :	Negative Small
NM :	Negative Medium
NB(or NL) :	Negative Big (Negative Large)

표 1. 퍼지 로직 언어

3.2 퍼지 제어기 설계

중량물 이송시스템을 SISO 계로 설계하기 위해 E(Error)와 ΔE(Error Change)의 단순 규칙으로 제어기를 설계하였다. 기준점에서 중량물 이송의 원하는 거리와 현재의 거리의 차이를 E 로 하였으며, ΔE 는 현재의 Error 와 전단계 Error 의 차이값으로 다음과 같이 표현된다.

$$E = \text{Desired Dis.} - \text{Current Dis. (Set Point - Out Put)}$$

$$\Delta E = E_i - E_{i-1}$$

대부분의 퍼지 제어 알고리즘들은 한개의 계량 변수에 대해 한개나 그이상의 멤버십 함수값을 사용하여 계의 특성에 따라 여러개의 제어규칙을 정하고 조작량의 Look-Up 표를 여러개 만들어 전단계의 입력 변수의 변화와 출력 오차에 따라 제어하게끔 설계되어 있다.[8] 그러나 이와 같은 방법들은 조작량을 구하는데 시간이 많이 소모되며 계의 특성이 변할때마다 제어 알고리즘을 다시 설계해야 하는등의 단점이 있으므로 범용적으로 사용할 수 있는 제어 규칙을 만들고 그에따른 멤버십 함수를 일경화시켜서 어느 계에서도 사용할 수 있는 퍼지 추론이 필요하다.

E \ ΔE	Error Change (C)						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	PS	NS	NM	NB			
PM	PS	PS	NS	NM			
PS	PM	NS	ZO	NS			
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
NS				PS	ZO	NS	NM
NM				PM	PS	NS	NS
NB				PB	PM	PS	NS

표 2. 제어 규칙

E \ ΔE	Error Change (C)						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	PM	PS	PS	ZO			
PM	PM	PM	PS	ZO			
PS	PB	PM	PS	ZO			
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
NS				ZO	NS	NM	NB
NM				ZO	NS	NM	NM
NB				ZO	NS	NS	NM

표 3. 개량된 제어 규칙

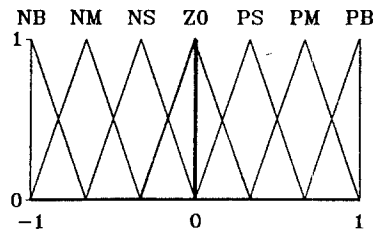


그림 2. 삼각형 퍼지 추론법

본연구에서는 범용적으로 쓰이고 있는 제어 규칙을 시스템의 물리적 성질을 고려하여 단순화 시키고 중량물이 상하 어느 방향으로 이송되던간에 이용될 수 있도록 규칙을 설계하였으며, 설계된 제어 규칙은 표 2 와 같다.

규칙의 추론은 변수의 값을 연속적으로 구할 수 있는 삼각형 퍼지 변수 추론법을 이용하였으며, 삼각형 기법에 의한 멤버십 함수와 퍼지 로직 변수와의 관계는 그림 2 와 같다. 제어 입력에 사용될 조작량을 구하는 비퍼지화 방법은 Max-Min 합성 중심 계산법을 이용하였으며, 실제 시스템에서 Open-Loop 실험 결과 표 3 과 같이 개량된 제어 규칙을 얻을 수 있었는데 이상과 같은 퍼지화 과정 부터

전동기에 이르는 제어 과정을 블럭 선도로 나타내면 그림 3 과 같다.[9]

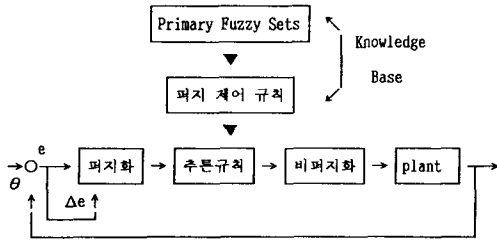


그림 3. 퍼지 제어 블럭 선도

규칙의 추론후 조작량의 실제값은 전동기의 특성을 고려하여 추론값의 -16 배 부터 +16 배 까지 변화도폭 설계하였으며, 또한 제어기의 성능을 높이기 위하여 시스템의 미세한 변화도 고려하여 각 멤버쉽 함수의 사이값은 Least Square 방법에 의해 계산되어질 수 있도록 제어기를 설계하였다.

3.3 실험 장치 제작

핵연료봉 밀집, 저장 공정에서 사용되는 연료 취급 장치의 기능은 주로 원하는 위치에 핵연료 집합체를 이송시키는 작업을 수행하는데, 이러한 위치 제어를 수행하기 위해서 사용후 핵연료 집합체에 해당하는 무게를 상하로 위치 제어 시키기 위한 중량물 이송 실험 장치를 고안하였다. 이때 수평 방향의 중량물의 위치 제어 보다 수직 방향의 위치 제어는 토오크가 급속히 늘어나기 때문에 실험에 대한 위험과 제어에 대한 어려움이 뒤따르게 된다. 따라서 이러한 특성의 제어를 위해서 일정한 높이에서 서보 전동기를 사용하여 수직상의 원하는 위치를 제어할 수 있게 하기 위한 실험을 수행하였다. 동력 전달 장치는 1.5 [KW] 의 AC 서보 전동기에 사진 1 과 같이 100:1 의 감쇄 기어와 Wire 틀 감아주는 드럼으로 구성되어 각 부분을 Coupling 으로 연결하였다. 그리고 중량물은 사진 2 에서와 같이 부하를 바꿔주며 실험을 하기 위하여 납벼들을 적재하여 사용할 중량물함을 제작하여 245.48 [Kg] 에서 448.88 [Kg] 까지 변화시켰다.

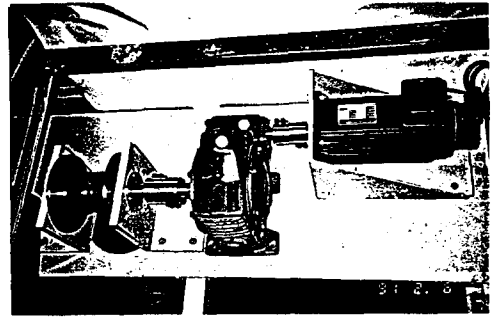


사진 1. 중량물 이송을 위한 동력 전달 장치



사진 2. 중량물 이송함

4. 중량물 이송 실험

본 연구의 전산기 보사에 사용된 전동기는 3 상 120 Watt, 4 극의 AC 서보 전동기로 각 상수의 값은

전기자 저항	0.38 [Ω]
기계적 시정수	4.1 [msec]
점성 계동 계수	0.79 [g.cm/rpm]
샘플링 주기	150 [msec]
정격 전류	10 [A]
정격 토오크	73 kg.cm
정격 출력	1.5 [KW]

이고, 2000 [rpm] 의 정격 회전수를 가지고 있다.

부하량을 변화시켜 가며 실험 조건을 바꿔 주기 위해 중량을 245.48 [kg] 에서 최대 448.88 [kg] 까지 부하를 변화 시켰고 데이터 입력 주기는 150 [msec] 로 하여 관측하였다. 비례 제어 기법은 이송 위치값에 대한 위치 보상 이득과 위치 보상을 위한 전압 보상의 이득값의 합으로서 계산이 되어지고 있는데, 그림 4 와 5는 상하 20

[cm]로 중량물을 이송하였을때 비례 제어기와 퍼지 제어기를 적용한 결과중 인버터 입력 전압과 이송된 위치값을 보여주고 있다. 여기서 퍼지 제어 기법은 비례 제어 기법에 비하여 위치 값에 대한 보상값을 충분히 보상시켜 주기 위하여 큰 전압값을 지속적으로 구동 시켜주고 있고, 따라서 위치 도달 시간이 향상되며 안정된 시간 범위내에서 구동됨을 알 수 있었다. 그러나 제어 규칙에 따라 입력 전압이 결정되는 퍼지 제어는, 규칙을 읽고 Max-Min 합성 중심 계산법으로 비퍼지화하는 과정과 미세한 변화를 계산하는 Least Square 방법에 따라 비례 제어기에 비하여 계산 과정이 약 100 [msec] 정도 지연되어 전압이 공급되지만 위치 도달 시간이나 안전한 운전면에서는 퍼지 제어기의 결과가 우월하게 나타났다. 더우기 비례 제어일 경우에는 원하는 위치 값이 커짐에 따라 목표값에 도달하면서 약간의 진동이 발생함을 알 수 있었고 위치 제어 오차는 퍼지 제어일 경우에는 2 % 내에서, 비례 제어일 경우에는 약 4 % 내에서 각각 나타났다.

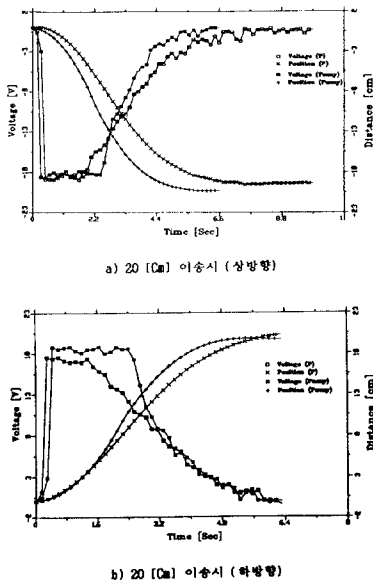


그림 4. 실험 결과 (M=245.48 [Kg] 일때)

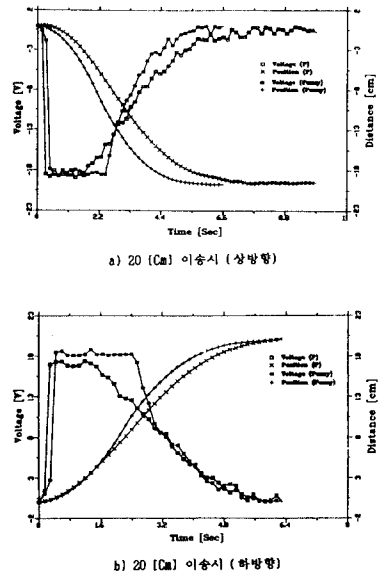


그림 5. 실험 결과 (M=448.88 [Kg] 일때)

5. 결론

본 연구에서는 차폐 시설안에서 공경 자동화를 위한 동력 매체로서 한계성이 드러나고 있는 직류 전동기 제어 계통을 개선하기 위하여 유지, 보수, 취급 용량, 신뢰성 등에서 장점을 가지고 있는 AC 서보 전동기를 채택하여 핵시설에의 적용을 위한 제어 계통의 개발로서 퍼지 제어를 적용하였다. 실험적 검증을 위한 준비로 벡터 제어 방식에 근거를 두고 있는 일정 슬립 주파수 제어 방식의 드라이버를 이용하여 Field-Orientation 방법으로 제어를 시도함으로써 비선형 특성을 보상시켰다. 이러한 특성을 사용후 핵연료 취급 장치에 이용될 중량물 이송 실험 장치를 제작하여 비례 제어기를 적용하여 본 결과 응답 특성의 개선과 위치 제어 오차를 줄일 수 있었다.

참고 문헌

1. KAERI II/PR-2/90, "사용후 핵연료 기술 개발 시설 개념 설계", (1990)
2. NUS Corp., "Fuel Rod Consolidation Project PHASE II Final Report Vol.1", DOE/ID/12651, (1987)
3. Bose, K.B., "Adjustable Speed AC Drives - A

- Technology Status Review", Procèeding of the IEEE Electrical Machine Conference, Vol. 70, No. 2, 116-135, (1982)
4. Pfaff, G., A. Weschta and A. Wick, "Design and Experimental Results of a Brushless AC Servo-Drive", Conf, Rec. Annual Meeting, IEEE Ind. APPL. Soc., 692-697, (1982)
 5. Vagati A. and F. Villata., "A.C. Servo System for Position Control", International Conf, on Electrical Machines Lausanne, 871-874, (1984)
 6. Pedrycz, W., "An Approach to the Analysis of Fuzzy Systems", Int. J. Control, Vol. 34, No. 3, 403-421, (1981)
 7. Mamdani, E.H. and S. Assilian, "A Fuzzy Logic Controller for a Dynamic Plant", Int. J. Man-Machine Stud., Vol. 7, 1-13, (1975)
 8. Li. Y.F. and C.C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Control System Magazine, 65-72, April, (1989)
 9. Lee, C.C.. "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller", IEEE, Vol. 20, No. 2, 419-435, (1990)