

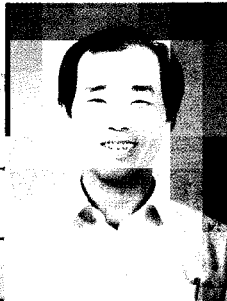
자기부상열차의 자동운전기술 개발



성 호 경

(KIMM 자기부상열차 사업단)

- '77 - '81 인하공과대학 전기공학(학사)
- '81 - '83 인하대학원 전기공학(석사)
- '85 - '94 현대정공연구소 선임연구원
- '94 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



변 증 남

(KAIST 전기 및 전자공학과 교수)

- '62 - '69 서울대학교 전자공학과(학사)
- '70 - '72 미국 IOWA 전기공학과(석사)
- '72 - '75 미국 IOWA 전기공학과(박사)
- '77 - 현재 한국과학기술원 교수

1. 서 론

국내에서는 부산 지하철 노선 및 서울의 5~8호선 지하철에 자동운전을 계획하고 있으나, 이를 위한 software 및 hardware는 외국에서 수입하고 있는 실정이며, 국내의 기술개발은 아직 초기단계에 있다.

국외에서는, 도시간 교통시스템인 경전철 및 고속전기철도시스템에 자동운전시스템이 적용되고 있으며, 실제 적용하여 성능개선을 하고 있다. 그리고 경전철 구간의 대부분을 자동운전하고 있으며 현재 상용화하여 그 성능을 입증하고 있다.

지금까지의 자동운전은 주로 안전성, 신뢰성 등을 고려한 시스템의 개발이 목적이였다. 또한 실제 적용시 문제가 없음이 확인되었고 현재 사용중(사용 및 적용사례를 명기하면 프랑스 VAL system, 미국 오하이오 공항의 셔틀버스 및 영국 버밍햄의 people mover 등)에 있다. 그러나 차량시스템은 다수입력 및 다수출력(MIMO : Multi Input Multi Output)으로 차량의 고효율 및 차량의 승차감 향상을 위한 운전은 ①고전제어방식인 PID제어로는 불가능하므로 지능제어를 적용할 수밖에 없다. 현재 일본에서는 열차의 자동운전이 가능한 지능제어기를 개발하여 샌다이 전철구간에서 실험중에 있고, 실험결과 전력소비 절감 및 승차감의 향상을 입증하고 있다.

Fleet간 2분 이내의 headway가 필요한 도시형 자기부상열차는 정확한 pattern운전이 필요하다. 이러한 pattern운전이 가능하기 위해서는 열

차의 정확한 위치 및 속도 검지가 필요하며 pattern 운행에 필요한 LIM/inverter의 구동에 있어 요구되는 pattern 주행은 기존의 바퀴식 철도에 사용되는 열차자동운전(ATO : Automatic Train Operation)과는 다른 위치 및 속도검지 방법으로, 정밀한 속도패턴(speed pattern)을 요구하고 있으며, 또한 비접촉식으로 바퀴식과는 상이하다.

본 연구는 주어진 속도패턴에 의한 2차량의 자동운전을 목표로 하고 있으며 1차적으로 PID 제어(비례·적분 및 미분제어)를 회전시험기에서 구현한다. 이 PID제어에서 얻어진 결과를 이용하여 지능제어를 회전시험기에 적용하였다. 따라서 자기부상열차에 적용할 자동운전기법(PID 및 지능제어)들을 회전시험기(rotary test bed)에서 실험하고, 관련된 하드웨어 및 소프트웨어 기술 및 시험결과를 소개하고자 한다.

이러한 내용은 자기부상열차의 자동운전기술에 기초기술이 되고 기타 관련된 분야에 도움이 되었으면 한다.

2. 자기부상열차 자동운전 시스템

2.1 자동운전 시스템 구성

자동운전 시스템은 그림 1)과 같이 크게 제어부, 모니터링부, 그리고 대상 플랜트로 구성된다. 이 장에서는 전체 시스템 중에서 제어부와 모니터링부를 구성하고 있는 시스템들에 대해서 살펴보도록 하겠다.

제어부는 적절한 운전패턴을 선택하고, 대상 플랜트로부터 각종 센서신호들을 입력받아 미리 설계된 제어알고리즘에 맞는 제어입력을 다시 대상 플랜트로 출력하는 역할을 한다. 이러한 기능을 수행하기 위해서 사용되고 있는 시스템은 VME bus를 기반으로 하는 MC68040-based vmebus single board computer(이하 CPU40 보드)이다. 이 시스템은 실시간 제어를 위한 real-time OS인 Vxworks 를 기반으로 하여 본 프로젝트의 목표인 자동운전제어에 적합한 성능을 보여주었다.

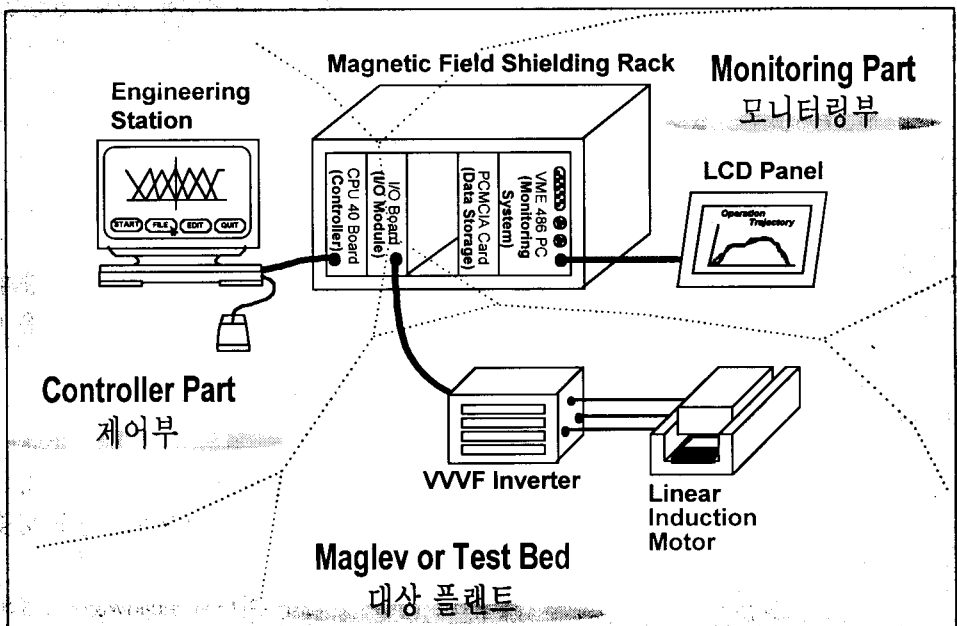


그림 1. 전체 시스템의 구조

또한 제어부에는 제어알고리즘의 개발을 돕기 위한 엔지니어링스테이션이 연결된다. 이 엔지니어링스테이션은 사용중인 제어알고리즘에 개선이 요구되는 경우에 사용자가 손쉽게 디버깅할 수 있도록 도와주는 역할을 한다.

실제로 본 프로젝트에서 다룰 자기부상열차와 같이 불확실성이 곳곳에 분포해있는 시스템의 경우에 가장 적절하게 응용될 수 있는 제어 기법 중 하나인 퍼지논리제어기법을 응용한 제어기 설계에 필요한 각종 파라미터들은 숙련된 전문 운전자나 각종 운전 데이터를 통해서 세밀하게 조정되는 값들이므로 이러한 값들을 쉽게 수정할 수 있는 시스템이 제어기와 연결될 필요성이 요구되었다.

모니터링부는 제어기로부터 대상 플랜트와 현재의 제어 상태에 대한 각종 데이터를 입력받아 이를 사용자에게 적절한 형태로 알려주는 일을

담당하게 된다. 모니터링부에 사용되는 시스템은 MS-DOS를 기반으로 하는 80486-based PC/AT compatible vmebus single board computer (이하 VME PC)이 이용되고 있다. 또한 디스플레이와 유저인터페이스는 터치-스크린 LCD모니터(touch-screen LCD monitor)를 사용하는 GUI(Graphic User Interface)를 채용하여 기존의 방식보다 더 손쉽게 정보를 주고 받을 수 있도록 하였다.

또한 모니터링부는 모니터링을 관장하는 프로그램과 OS, 그리고 과거의 운전 데이터들을 저장해야 하는데 이러한 역할은 VME PC에 연결된 PCMCIA 메모리 모듈이 담당한다. 자기부상열차의 특성상 마그네틱소스를 이용한 하드웨어는 이용할 수 없기 때문에 기존의 하드디스크의 사용이 불가능하고, 따라서 그 대안으로 신뢰성이 높은 PCMCIA 메모리 모듈을 사용하게 되었

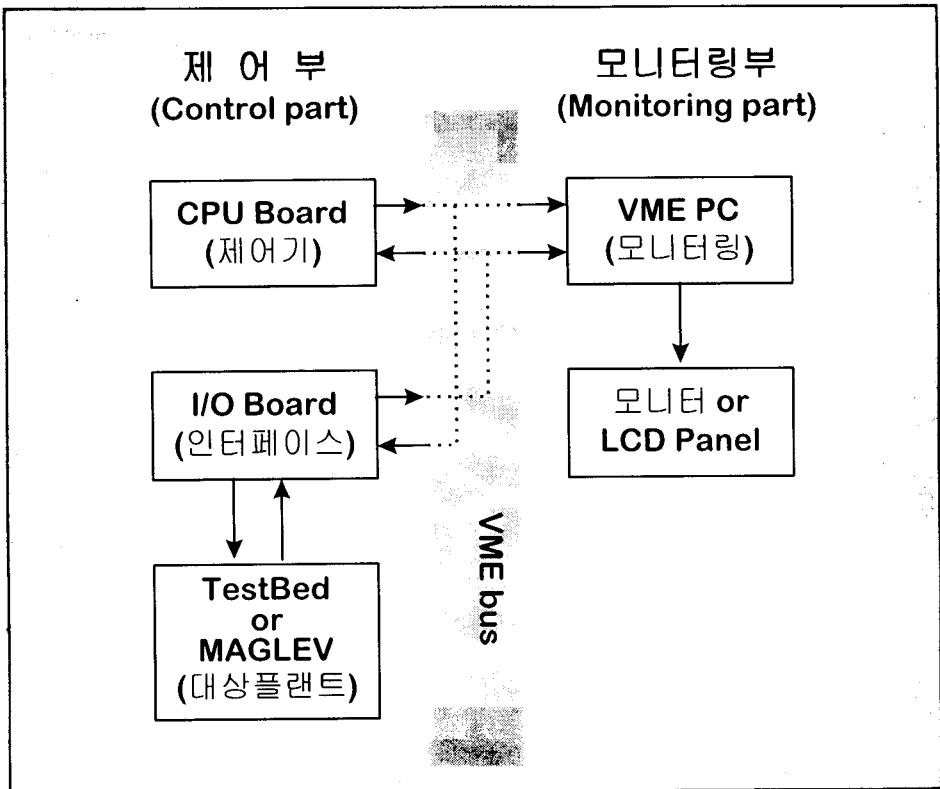


그림 2. 자동운전 시스템의 블록 다이어그램

다.

제어부와 모니터링부 사이의 통신은 VME bus를 이용하고, 제어부와 대상 플랜트 간의 통신은 VME bus를 기반으로 하는 아날로그/디지털 I/O보드들을 사용한다.

그림 2)는 전체 시스템에서 신호의 흐름을 설명하는 블럭 다이어그램이다.

2.2 대상 시스템 : Rotary Test Bed System

도시형 자기부상열차의 각 부분 중에서 본 프로젝트에서 대상으로 삼고 있는 부분은 열차의 추진과 관련된 것들이다. 열차의 추진을 위해서는 자기부상열차 차체와 선형유도전동기, 그리고 선형유도전동기를 구동하는 인버터 등이 필요하고, 따라서 이들에 대한 연구 및 조사가 필요하다. 이번 장에서는 이들 제어대상 시스템들에 대해 살펴보겠다.

실제의 자기부상열차 시스템을 이용한 연구가 이루어지기 위해서는 부상제어를 비롯한 각종 선형연구가 완벽하게 이루어져야 하고, 또한 실험을 행하는데 있어서의 위험이나 비용과 관련

된 많은 문제를 해결해야 한다. 이러한 문제들 때문에 이번 프로젝트에서는 자기부상열차를 직접 이용하기 전에 이를 충분히 모사한 실험용 모델을 이용하여 각종 기반기술을 확보하고자 한다. 즉, 각종 선형연구가 필수적이지 않고 또한 내부에 여러 위험 요소들이 존재하지 않으면서도 실제 자기부상열차의 추진 부분을 적절히 모사한 시스템을 이용해 관련 기술을 충분히 연구하고, 추후에 그 기술을 직접 실제의 열차 시스템에 접목시켜야 한다는 것이다.

이러한 목적을 가지고 실제 열차 시스템을 모사하기 위해 설계, 제작된 것이 rotary test bed이다. 또한 rotary test bed와 열차 추진에 필요한 부분 - 인버터, 선형 유도 전동기 - 을 모두 묶어서 rotary test bed 시스템이라고 한다.

2.2.1 Rotary Test Bed

rotary test bed란, 앞서 설명했듯이 자기부상 열차의 추진 관련 부분의 동특성을 모사하기 위해 만들어진 모델을 말한다. 전체적인 구조는 그림 3)과 같다.

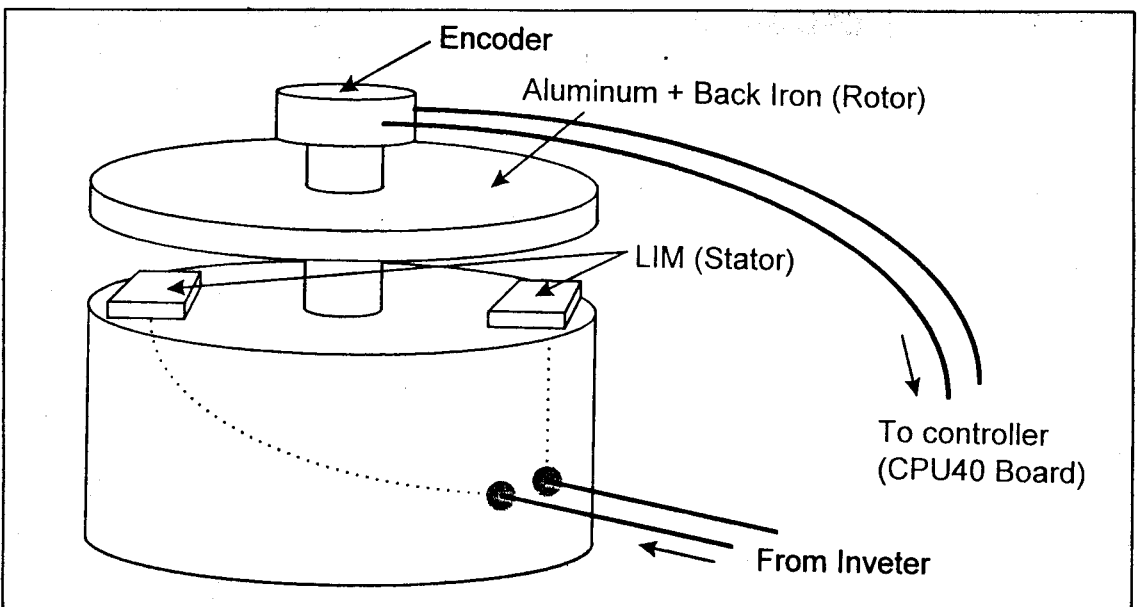


그림 3. Rotary Test Bed의 구조

이 그림을 통해서 짐작할 수 있듯이 이 시스템은 하단 고정판의 선형유도전동기에서 유도되는 힘에 의해서 상단 원판이 회전하게 된다. 이를 실제 자기부상열차의 구조와 비교해보면, 상단 원판은 레일, 하단 고정판은 자기부상열차체에 해당된다.

이 시스템은 선형유도전동기를 이용하여 상단 원판의 운동을 유도한다는 점이 자기부상열차의 추진 원리와 동일하다. 하지만, 선형유도 전동기의 고정자와 회전자 즉 상단 원판과 하단 고정판 사이의 간격이 언제나 일정하다는 점, 그리고 시스템의 운동 형태가 회전운동이라는 점에서 실제의 자기부상열차 시스템과 다소 차이를 보이고 있다.

그러나 첫번째 차이점은 실제 자기부상열차에서 부상 간격이 기준값을 중심으로 작은 진폭내의 오차만을 보이고 있다고 가정하면 어느 범위 내에서 무시할 수 있는 사항이고, 두번째 차이점은 단지 회전운동과 직선운동의 차이일 뿐이므로 간단한 변수변환으로 해결이 가능하다.

그렇다면 rotary test bed가 실제의 자기부상

열차 시스템을 충분히 모사하고 있다고 생각하고, rotary test bed의 동특성을 구해보자.

rotary test bed, 선형 유도전동기에 의한 각종 물리량과 해석을 간단히 하기 위한 몇 가지 가정은 그림 4)과 같다고 하자. 여기에 간단한 뉴턴의 물리 법칙을 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\text{where } J_L = \frac{1}{2} MR^2 \quad F_L: \text{마찰력}$$

2.2.2 인버터(Inverter)

인버터는 제어기로부터 제어 명령에 해당되는 직류 전압을 입력받아 그에 해당되는 진폭과 주파수를 갖는 3상 교류 신호를 출력하는 신호 변환기라고 생각할 수 있다. 물론 인버터는 직류 전력을 교류 전력으로 바꾸어주는 전력 변환기의 역할을 하지만, 여기에서는 인버터의 전력 변환 특성을 직류 전압의 제어 명령으로 바꾸어 줄 수 있는 제어기가 부착된 상용화된 인버터를 설명하고자 한다.

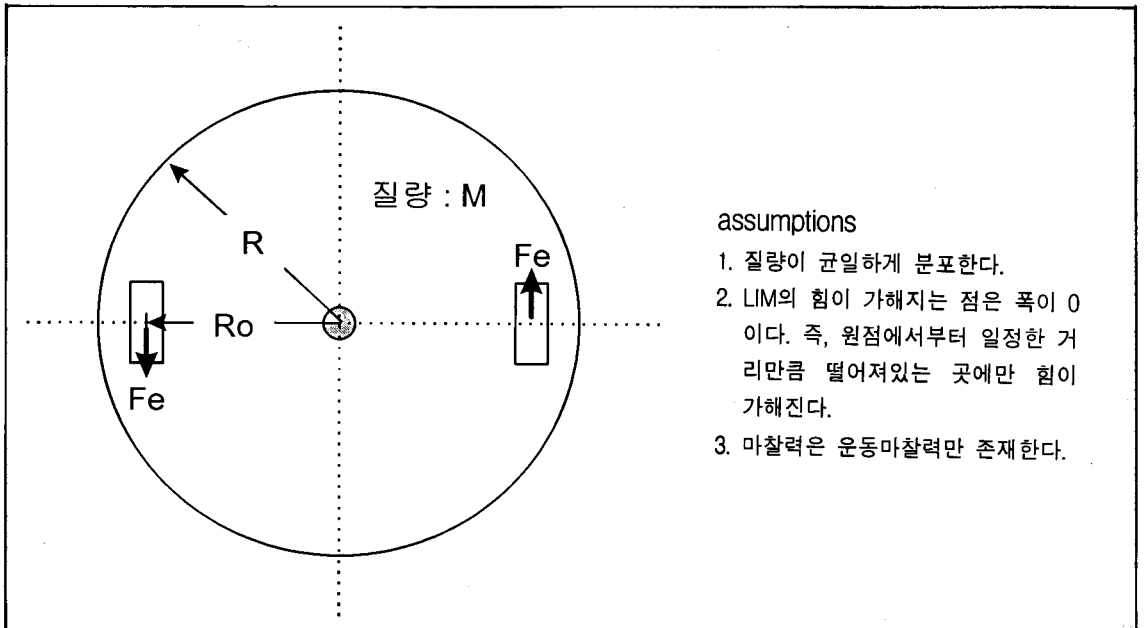


그림 4. 각종 물리량과 몇 가지 가정

이 인버터는 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) 타입의 인버터로 입력 직류전압과 출력 신호의 진폭, 입력 직류전압과 출력 신호의 주파수가 각각 비례관계에 있다. 여기서 비례상수 또한 하드웨어적으로 변경이 가능하다.

단순한 신호 변환기의 관점에서 볼 때, 이 시스템은 간단하게 static amplifier로 모델링 한다.

2.2.3 선형 유도 전동기 (Linear Induction Motor)

전동기는 전기에너지를 운동에너지로 변환한다. 여기서 사용될 전동기는 선형유도전동기로서 다음과 같은 특징을 갖는다. 선형유도전동기에서는 에너지가 고정자에만 공급되고 회전자 전류는 변압기의 원리로 고정자로부터 유도된다. 또한 일반적인 유도전동기의 원형 구조를 선형 구조로 변형시킨 형태를 띄고 있다.

이러한 특징에 따라서 선형유도전동기의 동특성은 일반적인 유도전동기의 것과 매우 유사하며, 단지 원운동이 직선운동으로 바뀐 형태가 된다.

그 결과 선형유도전동기의 모델은 아래와 같다.

- where x_1, \dots, x_4 : 상태 변수 (플럭스)
- u_1, u_2 : 3상 신호를 dq변환한 신호
- K_1, \dots, K_4 : 시스템의 물리적인 특성에 의해 결정되는 변수
- ω_b : base frequency (=60Hz)

또한 이러한 선형유도전동기에 의해 생성되는 토크는 다음과 같이 주어진다.

$$T_e = \frac{K}{\omega_b} (x_1 x_4 - x_2 x_3)$$

이와 같은 고찰의 결과 rotary test bed 시스템은 5차 비선형 시스템으로 모델링 될 수 있다.

2.3 자동 운전 제어

2.3.1 제어기의 동작

CPU40 보드를 중심으로 하는 제어부의 전체 동작 과정은 다음의 그림 5)에 표현된 흐름도와 같다.

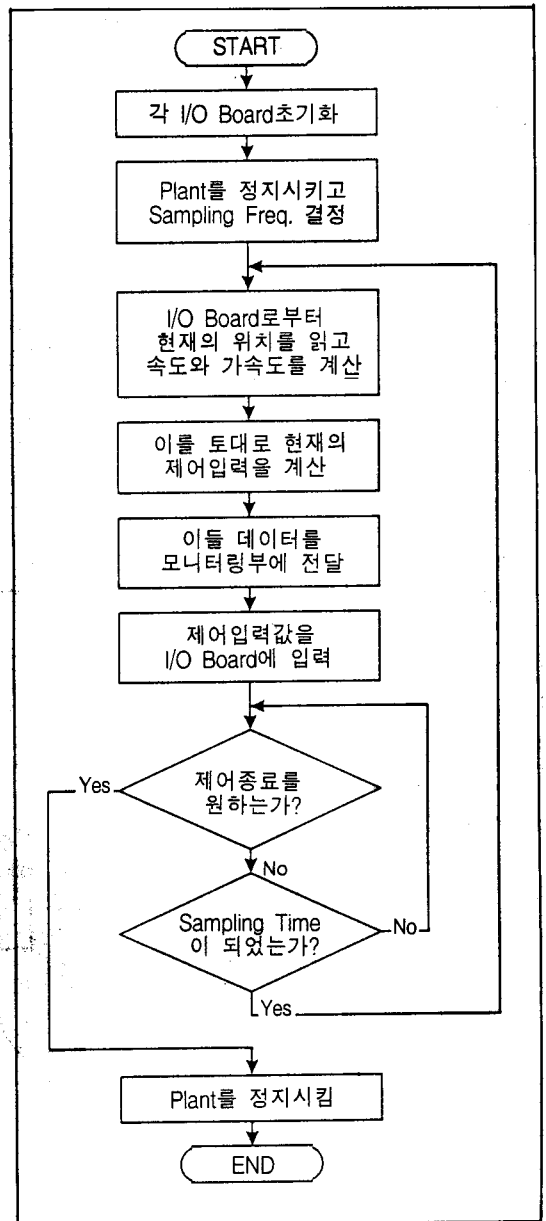


그림 5. 제어기의 동작 과정

이 그림에서 제어 입력을 계산하는 부분에는 여러 가지 제어기법들이 적용될 수 있다. 다음 장에서는 이들 제어기법 중에서 자기부상열차와 같이 복잡하고 불확실성이 많은 시스템의 경우에 적절히 적용되는 것으로 알려져 있는 지능 제어기법의 하나인 퍼지제어기법을 살펴보고자 하겠다.

2.3.2 PID 제어

PID제어기법은 고전제어방식의 대표적인 기법으로 시스템의 출력을 동적으로 피드백하는 방법이다. 본 시스템은 그 특성상 D 제어가 필요치 않기 때문에 PI제어를 이용하였다.

여기에서는 PID제어 기법에 대한 자세한 설명은 생략하기로 하겠다.

2.3.3 지능제어 (퍼지제어)

2.3.3.1 개요

기존의 사람만이 할 수 있는 제어행위를 자동화하는 것은 고전제어이론(PID, optimal control, adaptive control 등)으로는 거의 불가능하고, 지능제어로 일컬어지는 고급 제어이론을 사용하게 되는데 그 중에서도 퍼지 논리에 근간을 두고 있는 퍼지제어이론은 이러한 인간의 제어행위를 모사하는 자동제어시스템을 만드는 툴(tool)로 잘 알려져 있다.

퍼지이론(Fuzzy Theory)이란 불분명한 수량적 정보를 다루는 수학적 기법의 일종으로서, 인간의 주관적 사고나 판단의 애매모호성을 다루기 위하여 미국의 L. Zadeh 교수에 의해서 1965년에 제안된 이론이다. (온도가) 뜨거운 물, (무게가) 무거운 돌, (속력이) 빠른 차와 같은 일상 용어에서 보듯이 뜨겁다, 무겁다, 빠르다라는 정보는 기존의 수학적 표현으로는 정확하게 표현하기가 어렵거나 매우 어색하다. 퍼지이론

을 이용하면 이러한 정보를 효과적으로 기술하고 연산하는 방법을 정립하고 체계화할 수 있으며, 그 결과 인간처럼, 불분명한 정보를 이용하여 유용한 조사 결론에 도달하는 것도 모방할 수 있다.

퍼지이론은 원래 퍼지집합론(fuzzy set theory)에 기본을 두고 퍼지수(fuzzy number), 퍼지관계(relation) 및 퍼지논리(logic)와 근사추론(approximate reasoning) 등의 개념으로 확장하여 전개되면서 소위 확률적 가변성보다는 정보 존재 가능성(possibility)에 초도를 중시하여 발전되고 있다.

주파수응답을 이용하는 고전적 제어기 설계 방법이나 상태변수공간에서의 시스템 기술을 근거로 하는 현대 제어방법에서는 플랜트의 수학적 모델링이 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 매우 복잡한 프로세스는 수학적 모델을 쉽게 만들 수 없으며, 만들었다 하더라도 적절한 제어기를 설계하기가 쉽지않다. 즉 종래의 크리프(crisp)한 제어시스템 설계에서는 설계자가 제어 목표를 설정하고 이를 만족하도록 제어 대상(plant)에 대한 모델링 및 선형화 작업, 목적에 맞는 제어기 구조, 제어 정수 등을 결정하여 설계한다. 또한 제어기는 처음부터 정해진 평가 함수에 의해 목표치와 상태량과의 편차를 평가하면서 목표치에 정확히 추종될 수 있도록 제어 명령을 결정한다.

최적 응답, 최소 오차를 갖기 위한 제어기 정수의 결정 등은 지금까지 개발된 제어기의 설계 및 시뮬레이션 패키지(package)를 이용해 손쉽게 수행할 수 있으나 결과가 본래의 제어 목적에 어느정도 만족되는지에 대한 평가는 쉽게 할 수 없는 실정이다. 또한 선형 시스템을 모델링했을 경우도 선형화 작업, 모델링 오차 등이 발생하고 또 모델링에 의해 얻어진 시스템 일지라도 복잡한 상태변수 및 변수 상호간의 관계를 손쉽게 온-라인(on-line)으로 계산할 수 있는 컴퓨터 용량의 한계 및 속도, 가격 등에 의해 실

용성에는 상당한 어려움이 뒤따르고 있다. 더욱 시스템을 제어할 때 선형화된 모델일지라도 외란 및 기타 여건으로 인하여 순간적으로 비선형으로 변하고 특히 그 구조 자체가 비선형 특성이거나 시스템을 모델링하기 어려운 불명확한 대상, 또는 제어 변수가 대단히 많은 선형 시변 시스템과 같은 대상의 제어는 대단히 곤란하다. 물론 상황에 따라 제어정수를 교체 한다던가 관측자(observer)에 의해 알 수 없는 상태 변수를 추정하는 방법이 있지만 이의 응용에는 상당한 어려움이 따르게 된다. 더욱 열차의 운전 제어, 비행기의 이착륙 제어와 같이 운전자의 노하우(know-how) 및 경험에 의한 제어가 많은 경우에는 사람-기계(man-machine) 인터페이스(interface), 상호간의 시스템 모델링 및 제어는 사실상 불가능하다고 볼 수 있다.

한편 1970년대 초부터 학습제어, 적응제어 또는 지능제어라는 이름으로 여러 가지 개념이 제안되고 그 응용성이 시험되고 있으며, 특히 지능제어의 기법에 많은 관심이 모아지고 있다. 지능제어(intelligent control)의 개념은 시간이 흐름에 따라 여러 가지로 변해 왔는데, 최근에는 지능 시스템의 2가지 필수 요건으로 1) 불확실성의 취급 기능, 2) 학습기능을 꼽고 있다. 잘 알려진 바와 같이 퍼지논리 관련 시스템은 애매하고 불확실한 정보를 잘 처리할 수 있으며, 인공신경회로망은 학습기능을 가지고 있다. 즉, 퍼지이론을 이용하여 불확실성을 취급하는 지능제어시스템을 구성할 수 있음을 알 수 있으며, 더 나아가서 두 요건을 모두 갖춘 제어시스템의 구성도 기대할 수 있다.

역사적으로 보면 퍼지집합이론을 제안한 미국의 Zadeh 교수가 1973년 이 이론이 자동제어에 응용될 수 있다는 의견을 피력하였으며, 1974년 영국의 Mamdani 교수에 의해 스팀엔진 제어에 처음으로 응용되어 실용성에의 가능성을 보여주면서 연구에 박차를 가하게 하는 동기가 되었다.

알려진 바와 같이 스팀엔진의 시스템 동특성은 대단히 큰 비선형성을 가지며 시스템의 모델 또한 어려우며 모델링하여 얻은 파라미터도 시스템의 출력에 따라 변하게 되어 기존의 제어 이론으로는 정확한 제어기 설계 및 자동화 응용에 문제점이 있던 것으로 지적되어 왔다. 이에 대해 퍼지제어는 선형특성인 시스템은 물론 비선형특성, 또는 시스템의 정확한 동특성의 기술이 어려운 시스템에 대해서도 대단히 유용한 것으로 전해지고 있다.

1977년에 Ostergaard는 열교환기와 시멘트 용융로(kiln)의 퍼지제어에 대한 연구 결과를 발표하였고, 이 결과를 발전시켜 1980년에는 덴마크의 스미스사에서 시멘트 공장의 용융로를 자동화한 퍼지제어시스템을 상용화하였다. 이후 응용 분야의 흐름은 일본으로 이어져 퍼지이론 응용의 붐물이 터지기 시작하였다.

1980년대 들어서는 퍼지 이론의 응용 분야가 제어에 국한되지 않고 공학계(엔지니어링 설계, 지능제어, 신호처리, 패턴인식, 이상진단), 사회계(의사결정, 의료, 행동과학, 경제, 사회모델), 자연계(기상, 지도, 생태계, 물리 화학적 현상규명) 등 다방면에 걸쳐 유용하게 응용될 수 있다는 것이 입증되어 활발히 연구 중에 있다. 현대 제어이론이 제안된 후 이론적인 연구는 많은 사람들에 의해 수행되어 확립되어 왔으나 그 실용적인 면에 대해서는 시스템 모델링, 시스템의 온라인 계산에 필요한 컴퓨터 용량 및 속도에 대한 제한, 경제성 등으로 인해 지극히 미약한 상태에 있는 것은 부인할 수 없다.

이에 반해 퍼지제어는 실제 플랜트의 적용에 의해 유용성이 입증된 후 언어적 알고리즘(linguistic algorithm)의 도출을 제외하고는 실용화가 대단히 간편하여 학문적 이론보다는 오히려 실용화가 앞서있는 실정이다. 이와 같은 여러 가지의 장점과 유용성 때문에 유럽, 일본 등에서는 이의 관련 연구를 위해 연구소의 설립, 국가적 차원에서의 연구 프로젝트 설정 등

본격적으로 전 분야에 이의 응용 및 관련 연구를 연구해 오고 있다.

일본의 경우 대표적인 예로서 1983년 정수 처리장에 퍼지제어 이론이 응용되었고 1987년에는 센다이시의 지하철 제어에 적용되어 에너지 절감과 승차감 향상을 이룬 것이다. 최근엔 가전제품에의 응용이 본격화되어 퍼지 세탁기가 히트하면서 에어컨, 청소기 등 전 가전제품으로 응용이 확대되고 있는 중이다.

2.3.3.2 퍼지 제어

퍼지제어기는 일반적으로 그림 6)에서와 같이 퍼지화기(fuzzifier), 퍼지추론기(fuzzy reasoning engine), 비퍼지화기(defuzzifier), 퍼지 지식 베이스(fuzzy knowledge base)의 4부분으로 구성된다.

퍼지화기는 입력 변수들의 값을 측정하여 애매하지 않은(crisp) 입력값을 퍼지추론을 행할 수 있는 퍼지집합으로 변환시키는 역할을 한다. 이러한 변환에서는 소속함수의 모양과 퍼지 집합의 중심값을 정해 주어야 한다. 퍼지화 방법에는 소속함수의 모양에 따라서 싱글톤(singleton) 방법과 이등변 삼각형(isosceles triangle) 방법 등이 있다. 퍼지추론방법에는 직접법, 간접

법, 하이브리드 방법과 같이 크게 3가지의 부류가 있으며 직접법은 그림 7)과 같이 Mamdani의 max-min 법, Larsen의 max-product 법, Mizumoto의 sumproduct법이 있다. 비퍼지화기는 퍼지 추론에 의한 애매한 결과를 애매하지 않은 하나의 수치로 변환하는 역할을 하며 추론 결과의 해석이라고 말할 수 있다. 추론의 결과는 제어 정도의 가능성 분포(possibility distribution)를 나타내는 퍼지 집합이며 이로부터 가장 좋은 가능성 분포를 갖는 애매하지 않은 제어값을 만들어 내어야 한다. 이 비퍼지화 방법에는 최대값방법(maximum criterion method), 최대평균방법(mean of maximum method), 그리고 면적중심법(center of gravity) 등이 있다. 퍼지지식 베이스는 퍼지제어기의 if-then 형식의 언어적인 제어규칙을 저장하는 부분이다. 이 퍼지제어규칙은 다음과 같은 형식의 퍼지 조건문들로 이루어진다. 즉, IF [특정 조건들이 만족된다면] THEN [특정 결과들이 유추될 것이다].

팔호속의 조건들을 각각 조건부(antecedent)와 결론부(consequent)라고 하며 정성적인 언어로 표현된다. 조건부와 결론부에는 각각 복수개의 퍼지 변수들이 도입될 수 있으며, 전체 제어규칙은 여러개의 복수 입출력 퍼지 조건문들로 구성되는 것이 일반적이다. 이러한 제어 규칙들

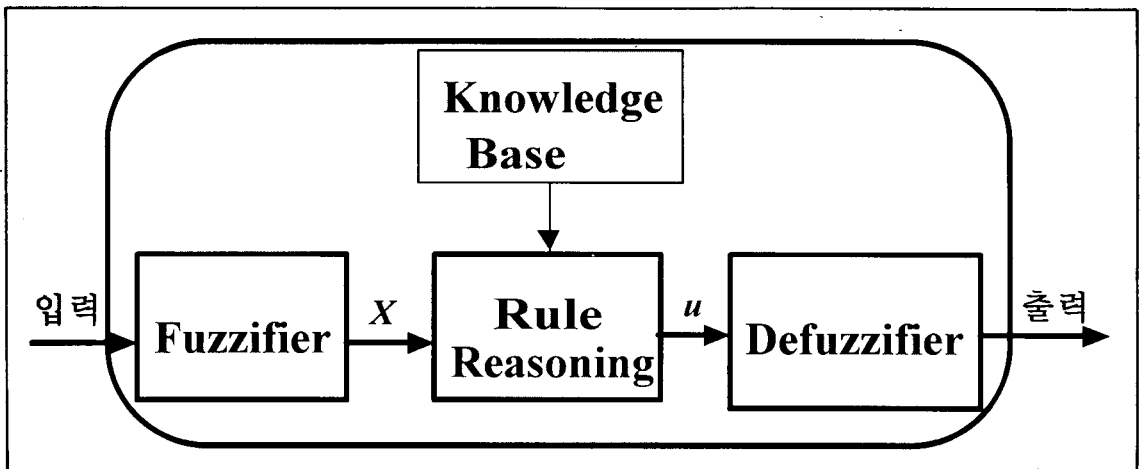


그림 6. 퍼지 제어기의 구성

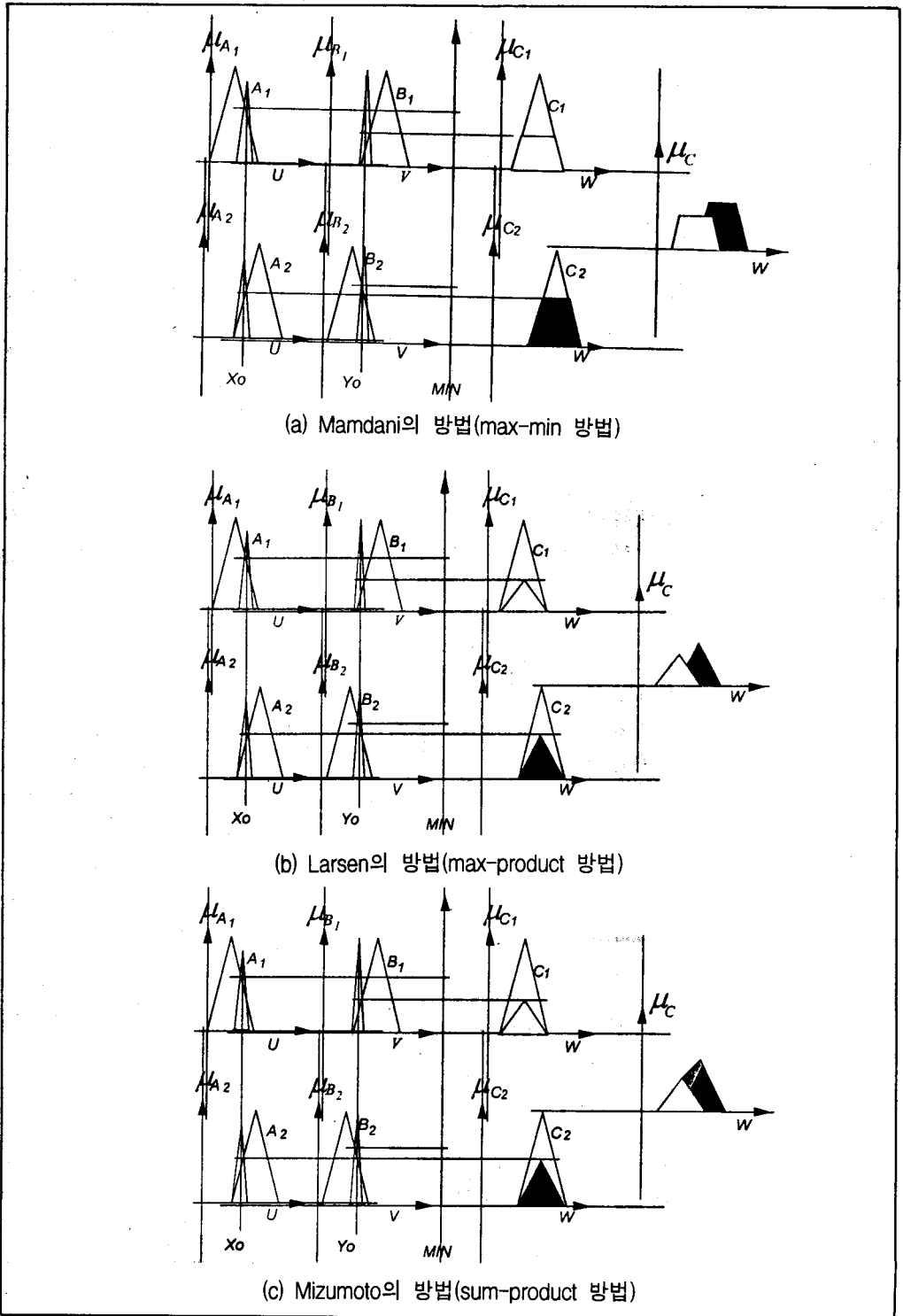


그림 7. 직접 추론 방법

은 전문가의 경험과 지식 또는 숙련된 조작자의 기능에서 추출하는 방법, 제어대상 플랜트의 퍼지 모델에서 추출하는 방법, 제어기의 학습능력을 부가하여 추출하는 방법을 통해서 추출할 수 있다. 퍼지제어기를 구현하는 방법은 크게 범용 컴퓨터에서 소프트웨어적으로 처리하는 방법과 추론 전용의 퍼지하드웨어를 이용하는 방법이 있다.

3. 모니터링 시스템

3.1 개요

일반적인 모니터링 시스템의 목적은 플랜트의 동작 상태, controller의 운전 상태 등을 모니터를 통하여 사용자(user)가 쉽게 파악할 수 있도록 하는 데 있다. 이러한 모니터링 시스템은 시스템이 대규모이거나 복잡하여 효율적으로 플랜트의 동작 상태와 controller의 운전 상태를 파

악하기가 쉽지않은. 발전소, 공장의 생산 시스템, 철도 운전 등에 많이 적용되고 있다. 특히 이러한 시스템의 자동화에는 모니터링 시스템이 필수적인 요소라고 할 수 있다. 본 장에서는 자기부상열차의 자동운전을 위한 효율적인 모니터링 시스템을 기술하고자 한다.

3.2 모니터링 시스템의 구성

그림 8)은 모니터링 시스템의 하드웨어 구성을 block diagram으로 표시한 것이다.

3.2.1 하드웨어 구성

모니터링 시스템은 VME-PC를 메인 보드로 하며, VME-bus를 이용한 controller board (MOTOROLA 68040 board)와 통신을 통하여 자기부상열차의 운전상태와 제어상태를 입력 받아 이를 TFT LCD touch screen을 통하여 사용자에게 모니터링 한다. 그리고, 모니터링한 데이

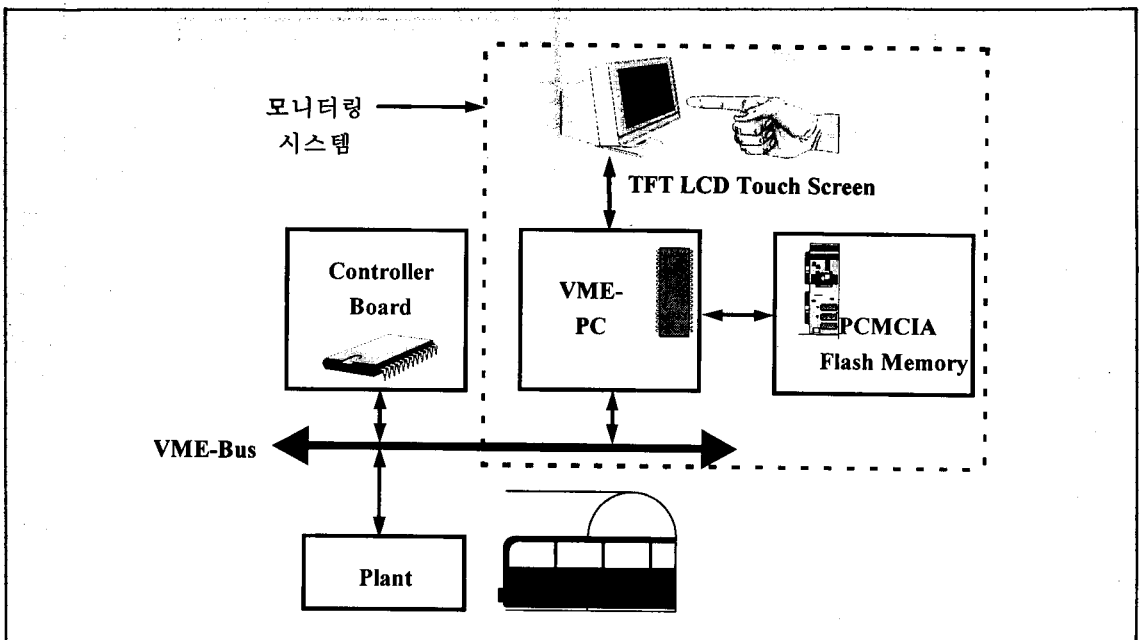


그림 8. 모니터링 시스템의 하드웨어 구성

터를 PCMCIA flash memory에 저장한다. VME-PC를 사용함으로써 DOS 환경에서 모니터링시스템을 프로그램하기 쉽고 저가로 모니터링시스템을 구성할 수 있다. TFT LCD touch screen은 전자기간섭이 심한 환경을 감안하여 안정적인 모니터링 화면을 사용자에게 제공할 수 있으며 touch screen의 기능은 사용자와 모니터링 시스템과의 사용자 인터페이스의 기능을 간편하게 한다. PCMCIA flash memory도 역시 전자기 간섭이 심한 환경에서 일반적인 하드디스크를 대신하여 안정적인 저장수단을 제공한다. 따라서 모니터링 시스템이 모니터링을 통하여 입력받은 정보를 저장하여 사용자가 필요할 때 다시 이를 볼 수 있도록 한다.

3.2.2 모니터링 시스템의 소프트웨어적 구성

모니터링 시스템은 MS-DOS 6.2상에서 C-language의 그래픽 라이브러리를 이용하여 구현된다. MS-DOS는 PC상의 다른 operating system에 비하여 메모리의 사용량이 적으므로 메모리가 한정되어 있는 주어진 환경에서는 DOS를 이용하여 모니터링 시스템을 구현한다.

그림 9)는 모니터링 시스템의 소프트웨어 구성을 block diagram을 이용하여 표시한 것이다. 기본적인 block으로 train schematic diagram, data display, rail diagram, operation control, data base로 구성되며 이들은 메인 메뉴를 통하여 각 부분으로 들어갈 수 있다. 각 부분의 역할은 다음 절에서 자세히 언급하였다.

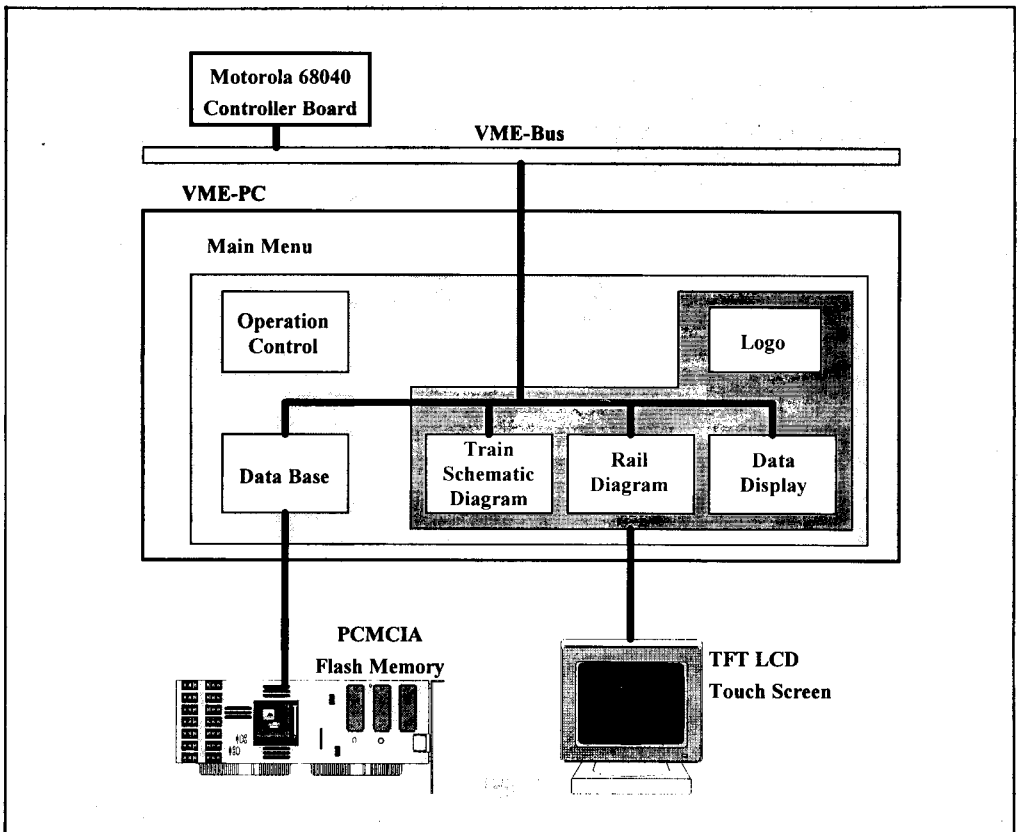


그림 9. 모니터링 시스템의 소프트웨어적인 기능

3.3 모니터링 시스템의 기능

모니터링 시스템의 소프트웨어적인 구성은 다음과 같다.

- 메인 메뉴
 - logo
 - train schematic diagram
 - rail diagram(선로)
 - data display text
 - 운전 중 trend graph
 - historical trend graph
 - operation control 운전 모드 선택 (수동/자동)
 - 제어 시작/끝
 - 모니터링 끝
 - data base

를 파악할 수 있다. 표시되는 출력값은 대차의 기준속도, 실제속도, 이동거리, linear induction motor의 공급 전류 등이다. 그림 10)은 이러한 train schematic diagram의 구성 예상도이다.

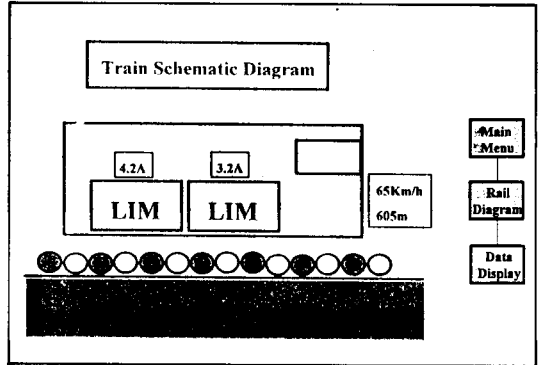


그림 10. Train Schematic Diagram

3.3.1 Train Schematic Diagram

자기부상열차의 각 부분의 그림을 통하여 각 부위의 상태와 해당하는 controller의 운전 상태

3.3.2 Rail Diagram

자기부상열차의 실제 rail상의 위치와 기준 위치를 디스플레이 함으로써 전체 운전상황을 보여준다. 그림 11)는 rail diagram의 구성 예상도이다.

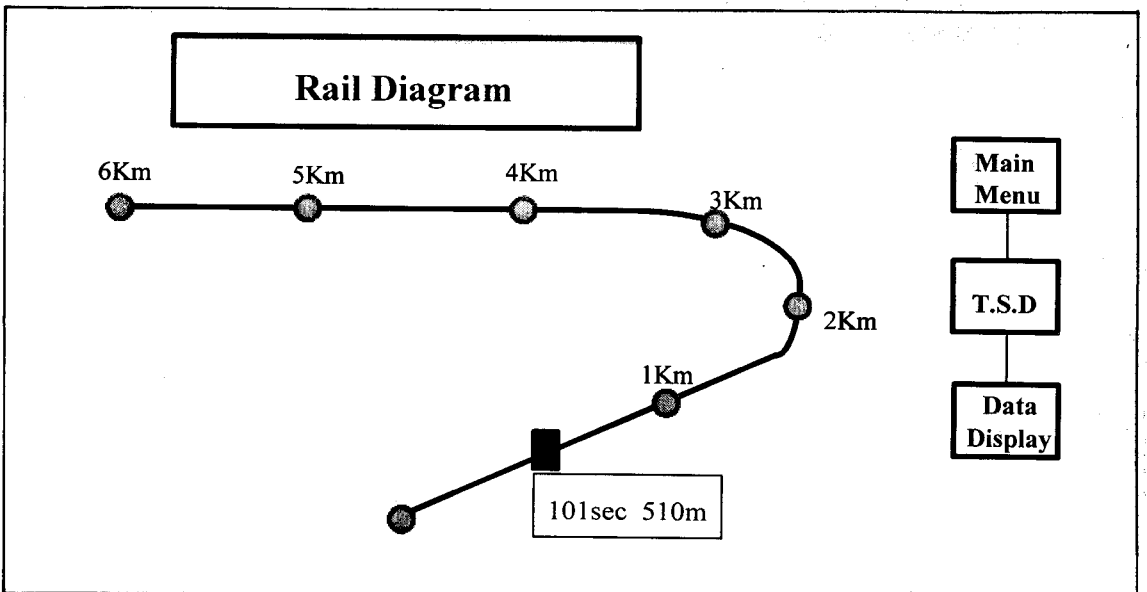


그림 11. Rail Diagram

3.3.3 Data Display

Data display는 motorola 68040 controller board와 통신을 통하여 입력받은 데이터를 표시한다. 입력되는 데이터는 시간, 기준 속도, 실제 속도, 이동 거리, LIM의 입력 전류 등이다. 표시 방법에는 운전 제어를 행하는 도중 데이터를 text의 형태로 표시하는 방법, 운전제어 도중 데이터를 trend graph로 표시하는 방법, 이전에 data base에 저장된 데이터를 trend graph로 표시하는 방법(historical trend)이 있다. text표시는 각 데이터를 숫자로 표시하는 방법이다. trend graph는 이차원 그래프로 x축 상에는 시간이나 이동거리를 변수로 하고 y축은 실제 속도, LIM의 입력 전류 등을 표시한다. historical trend graph는 data base와 연결되어 과거에 저장된 파일에 접근하여 이를 바탕으로 trend graph를 표시한다. trend graph는 또한 스케일, 스크롤 기능과 구간 선택 기능이 있다. 스케일 기능은 x축과 y축의 비율을 조절하여 사용자가 보기에 편한 비율을 조절할 수 있는 기능을 말한다. 스크롤 기능은 자동운전제어 중 trend graph 표시시 유용한 기능으로 x축의 일정 구간을 지나면 그래프가 밀려 움직이는 기능을 말한다. 구간 선택 기능은 historical trend graph에서 사용되는 기능으로 touch screen에의 사용

자의 touch에 의하여 graph의 x축과 y축의 구간을 선택하여 이 부분을 확대하여 볼 수 있는 기능이다. 이는 보다 자세한 영역의 표시를 가능하게 한다. 그림 12)는 trend graph의 한 예이다.

3.3.4 Operation Control

실제 자기부상열차를 제어할 때 필요한 운전 모드를 설정하고 자동 운전 제어의 시작과 끝을 결정한다. 또한 모니터링 시스템의 시작과 끝을 선택한다. 실제 자기부상열차의 자동 운전 제어는 운전 모드를 선택하지 않은 상태에서는 시작되지 않는다. 만약 이를 어기면 여러 신호가 나온다.

3.3.5 Logo

모니터링 시스템을 기동 시키면 먼저 logo화면이 표시되고 2초 후 메인 메뉴가 시작된다.

3.3.6 Data Base

자동 운전 제어 후 이에 대한 데이터를 저장하여 이후에 사용자가 필요한 경우 이를 다시 표시하기 위하여 PCMCIA flash memory에 저장한다.

3.4 실제 구현

전체 모니터링 시스템에 대한 구현은 현재 진행 중이며 전 단계인 로터리 test bed에서의 모니터링을 위하여 초기 버전을 구현하였다. 초기 버전은 위의 모니터링 시스템과는 달리 실험에 적합하게 순차적인 구조를 가지고 있다. 그림 13)은 이의 흐름도이다. 그림 14)부터 17)은 실제 구현한 화면들이다.

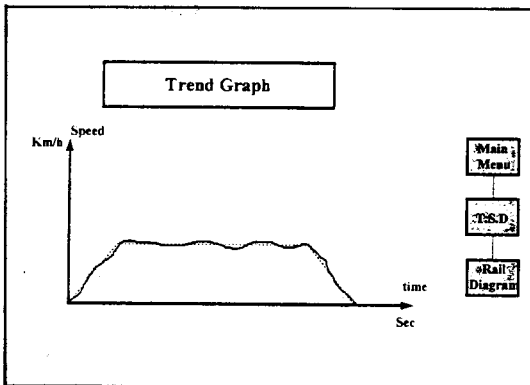


그림 12. Trend Graph

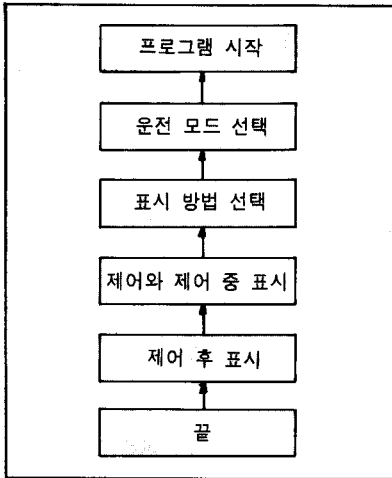


그림 13. 초기 버전 흐름도

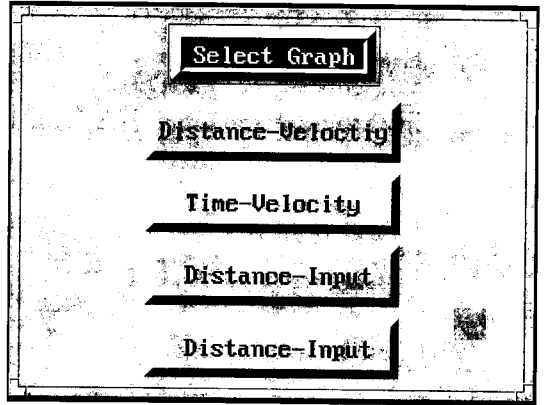


그림 16. Select Graph

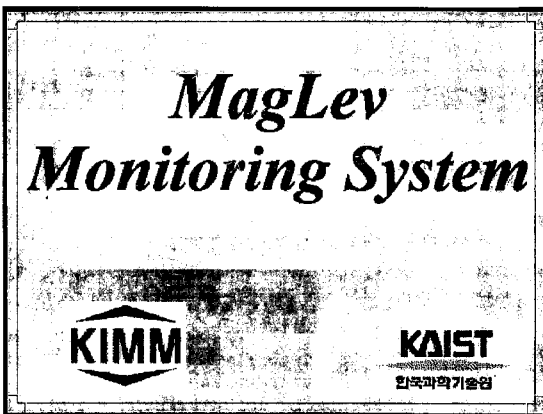


그림 14. Logo 화면

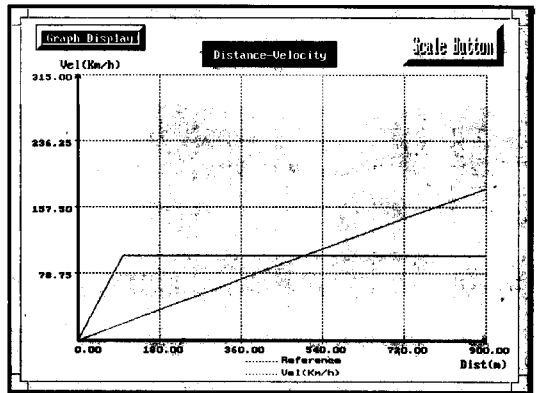


그림 17. Trend Graph

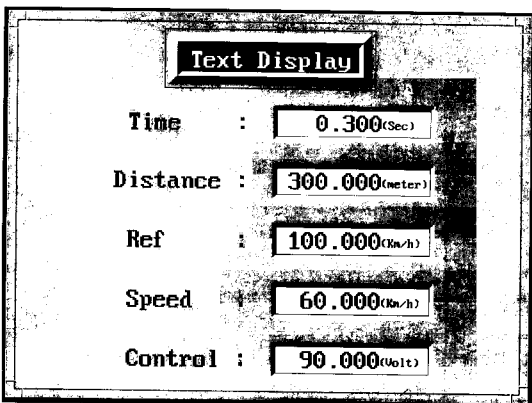


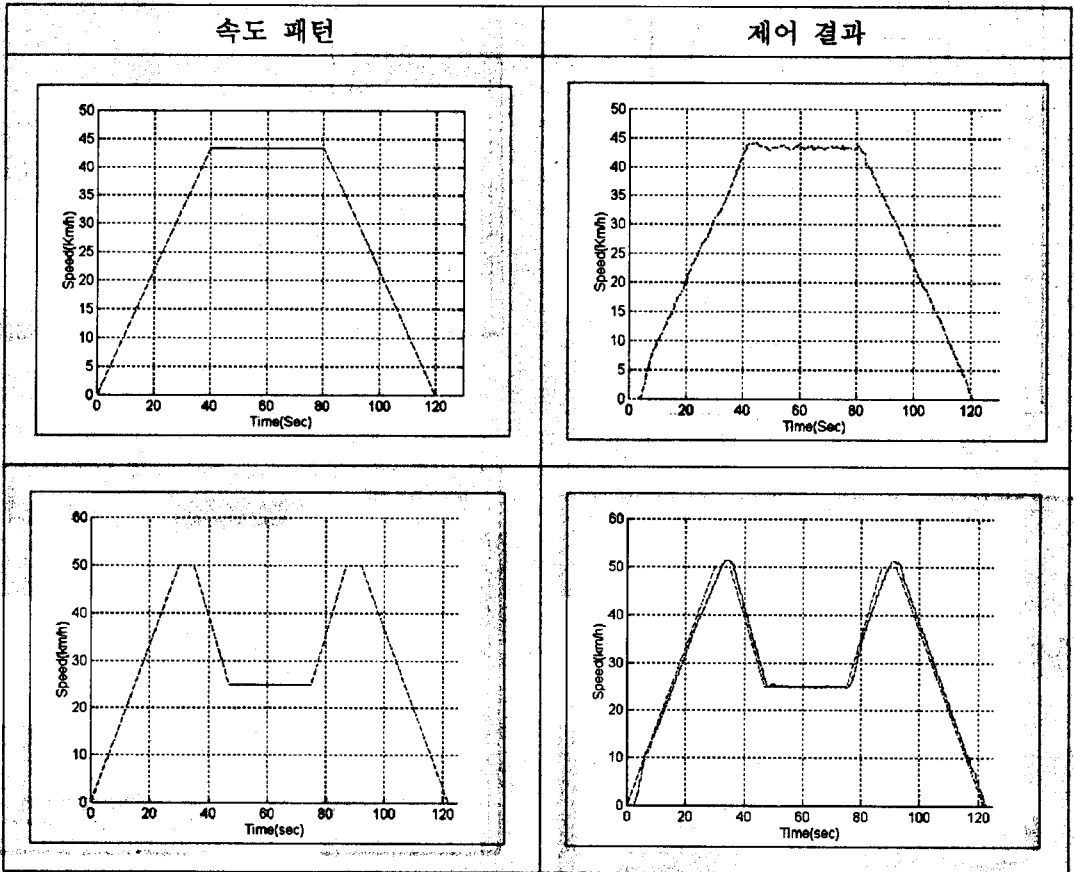
그림 15. Text Display

4. 실험 결과

4.1 PID 제어

PI제어기의 제어 능력을 평가하기 위해서 rotary test bed 시스템의 세부 시스템 특성에 맞는 가속도 범위 내에서 각종 프로파일에 대한 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 속도프로파일과 그에 해당되는 출력속도파형은 표 1)과 같다.

표 1. 속도 패턴과 PID 제어결과



먼저 실제의 자기부상열차의 운전과 rotary test bed의 운전 사이의 중요한 차이점을 살펴 보자. 실제 자기부상열차에서는 고려되어야 할 다음과 같은 사항들이 무시되었다.

- (1) 차량 무게의 변화
- (2) 내부적으로 생성되는 차량의 진동 및 무게 중심의 변화 (탑승한 승객 등에 의함)
- (3) 외부적으로 생성되는 진동 (바람 등의 기 후 조건에 의함)
- (4) 레일의 곡률 반지름
- (5) 열차와 레일 사이 거리의 변화
- (6) TEST BED의 운전 시에는 두 개의 인버터 중에서 하나는 가속용으로, 다른 하나

는 감속용으로 사용하였다.

상기 기술한 사항을 생략하고 실험한 결과를 분석해보면 다음과 같다.

- (1) Rotary test bed 를 제어하는 경우 delay 나 overshoot없이 정확하게 주어진 속도 profile을 추종한다.
- (2) TEST BED 실제 속도 그래프에서 볼 수 있는 노이즈는 실제 속도에 의한 것이 아니라 encoder의 낮은 해상도와 짧은 샘플링 주기에 의해서 나타나는 것이다.
- (3) 앞에서 설명한 여러 가지 사항들을 무시하면, 자기부상열차 또한 기존의 PI방식으로

도 충분히 제어가 될 것으로 생각된다.
 (4) 그러나, 현재의 제어 변수들이 단지 현재의 주어진 조건에서만 제대로 동작할 수 있도록 정해진 값들이라는 점과 실제 자기부상열차 운전시에는 위에서 설명한 각종 차이점이 중요한 문제로 떠오르기 때문에 이와 같은 PI 방식으로는 원하는 제어를 할 수 없을 것으로 생각된다.

4.2 퍼지제어

퍼지제어는 앞서 설명한 바와 같이 자기부상열차와 같은 불확실성이 많은 대규모 플랜트를 제어하는 데에 잘 적용되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 자기부상열차를 모사한 rotary test bed 시스템에 퍼지제어 기법을 적용하고, 1절의 PID 고전제어기법과의 차이점을 기술하고자 한다. 여기서 설계할 퍼지제어기는 앞 절의 PI 제어기의 제어 개념에 근간을 두고 있는 PI-type 퍼지제어기로 설계했다. PI-type 제어기는 일반적으로 실제 속도와 기준값 사이의 차이와 그

err Lerr	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZO
NS	NB	NB	NS	ZO	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NS	ZO	PS	PB	PB
PB	ZO	PS	PB	PB	PB

그림 19. 퍼지 규칙

미분치를 이용하여 제어입력의 변화량을 구하는 방법을 취한다. 그러나, 여기에서는 인코더에 의해서 읽는 실제 속도의 값이 quantized되어 있고 따라서 그 값을 미분하면 실제의 가속도와 엄청난 차이를 보이게 되므로 미분량을 가능하면 줄여주는 것이 좋다고 판단되었다. 그 결과, 본 연구에서는 실제 속도-기준값 간의 차이와

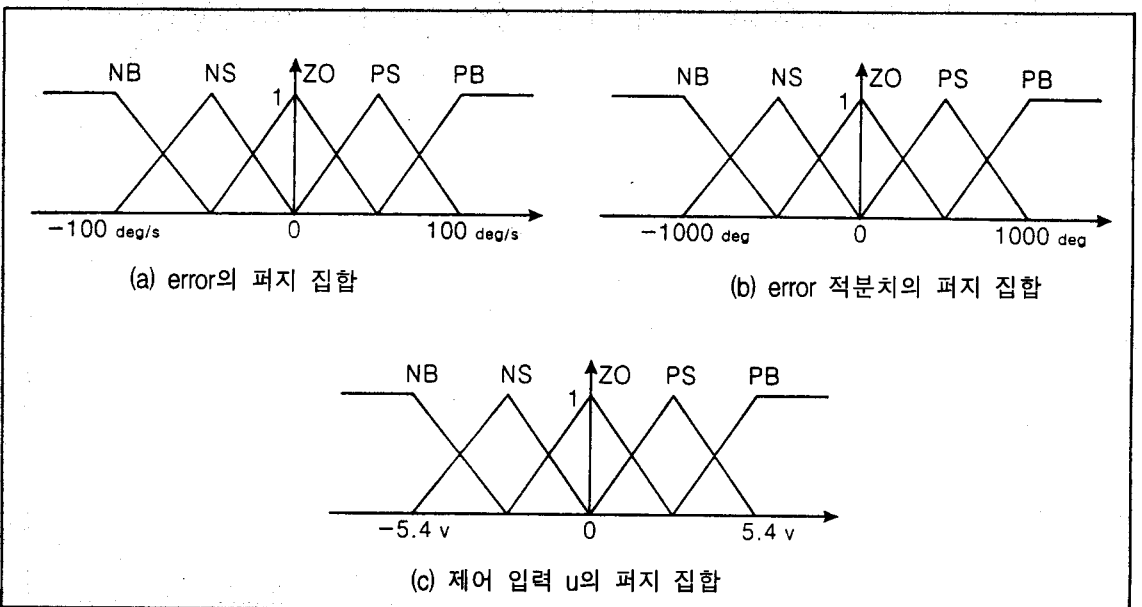


그림 18. 각종 퍼지 집합

그 적분치를 이용하여 제어 입력을 구하는 방법으로 설계하였다.

퍼지제어를 위해서는 먼저 사용될 각 변수들에 대한 퍼지 집합을 정의해야 한다. 그림 18)은 그러한 퍼지 집합들이다. 그리고 사용한 퍼지 규칙은 그림 19)와 같다.

4.3.1 결과

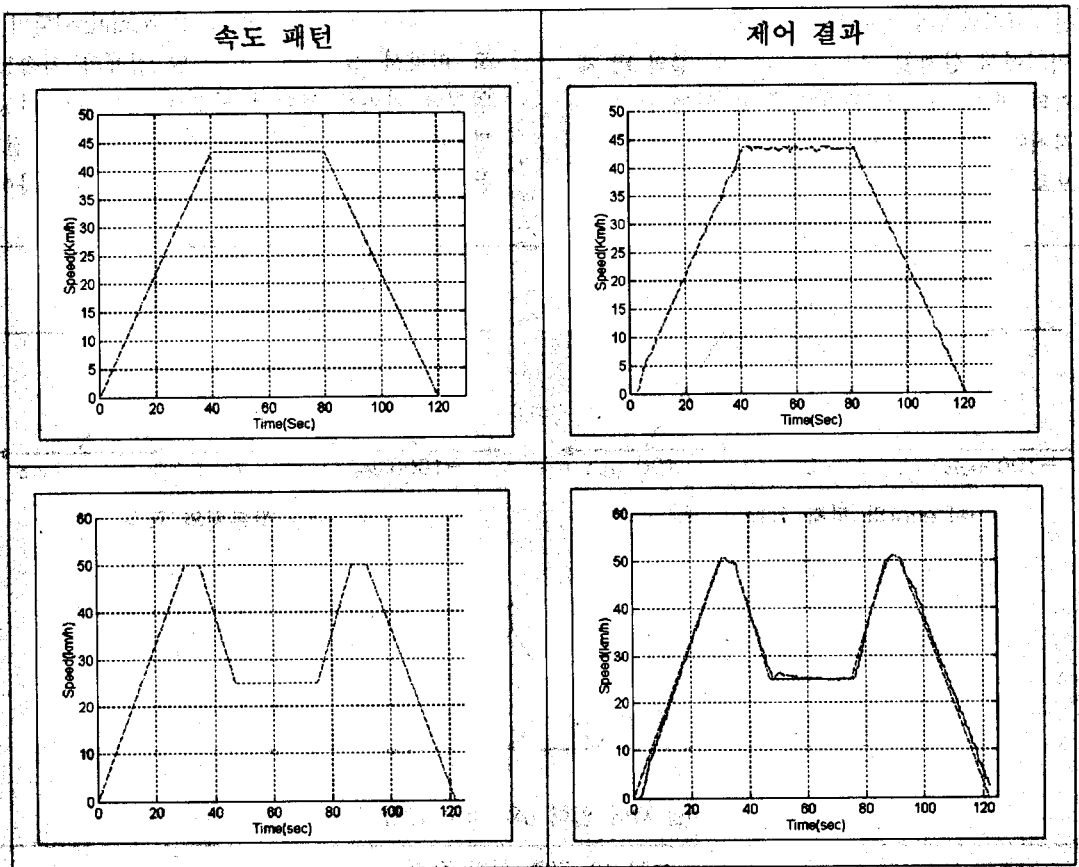
퍼지제어기의 제어능력을 평가하기 위해서 PI 제어기에서 사용되었던 것과 비슷한 속도프로파일에 대한 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 속도프로파일과 그에 해당되는 출력속도 파형은

표 2)와 같다. PI제어와 비슷한 뛰어난 추종능력을 보인다.

4.3.2 PI 제어와의 비교

여기에서는 퍼지제어기와 PI제어기에 대해서 이들이 가지는 플랜트의 변화에 대한 강인성(robustness)에 어떤 차이가 있는지를 비교해보도록 하겠다. 이 비교를 위해서 각각 위에서 사용했던 제어기 내부의 변수들은 그대로 두고 rotary test bed 상단 원판의 무게를 1.5배 증가시켜보았다. 이는 자기부상열차 시스템에서 승객 수가 증가함에 따라 열차의 무게가 증가되는

표 2. 속도 패턴과 퍼지 제어결과



현상을 모사해 본 것이다. 그 상태에서의 제어 결과는 표 3)과 같다.

이 표에서 알 수 있듯이 퍼지제어기, PI제어기 모두 등속 구간에서 기준치와 비슷한 정도의 속도 차이를 두고 운전하게 된다. 이는 제어능력의 한계때문이라기 보다는 인버터의 성능을 고려하여 인버터로의 DC 입력값에 대한 상한선

과 하한선을 정해준 때문이다. 두 제어 결과에서의 중요한 차이는 등속 구간 후의 감속 구간에서 나타나는데, PI제어기의 경우 감속시 추종능력이 현저히 떨어지는 반면 퍼지제어기의 경우에는 그러한 현상을 발견할 수 없었다.

이는 퍼지제어기가 PI제어기에 대해서 가지는 우수한 특성이다

표 3. Rotary test bed 상단원판의 중량을 1.5배 증가시킨 경우의 제어 결과

