

# 列車自動運轉 시스템에의 퍼지制御 응용

姜 永 探

前 仁川大學校 教授

## ❖ 머리말

퍼지理論의 실용화가 이미 시작되었다. 산업용 프로세서의 제어, 엑스퍼트시스템, 패턴인식, 가전제품, 세멘트킬렌의 제어, 연속 주조시스템에서 주형레벨제어, 교통신호 등의 최적주기제어 및 경제예측모델 등에 퍼지이론이 응용되고 있다.

본고에서는 퍼지제어의 응용예로서 열차자동운전시스템의 기능, 예측적 퍼지제어 및 운전평가 등을 기술하고자 한다.

## 1. 인간의 주관적 정량화

인간은 기계와 달라서 사고나 행동에 曖昧性이 따르며 어떠한 형태로든지 인간에 관계된 시스템을 취급하는 경우 인간이 갖는 애매성을 무시할 수 없다.

퍼지집합은 이와 같이 애매모호성(Fuzziness)을 수학적으로 취급하기 위하여 종래의 0, 1로부터 부분집합론의 확장으로서 제안된 것이다.

여기서 통상의 집합(부울집합)과 퍼지집합이

다른 점을 水溫의 측정치(전체를  $V(0^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C})$ 로 한다.)를 예로서 간단히 소개한다.

먼저 「물의 온도가 높다( $H$ )」라고 하는 통상의 집합을 생각하면 물의 온도측정치  $x$ 는  $H$ 에 속하는가 안하는가를 그림 1(a)와 같이 0 또는 1의 값으로 명확히 표시된다.

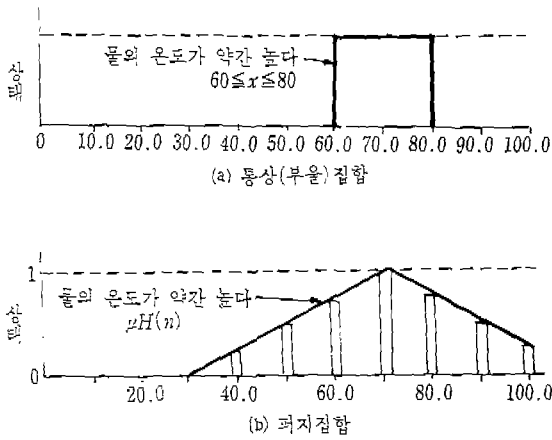
이에 대해서 「물의 온도가 약간 높다( $H$ )」라고 하는 퍼지집합은 각각 물의 온도값을 0에서 1사이의 상태에 대응시키는 함수  $\mu H(x)$ (멤버쉽함수라고 한다)로서 정의된다.  $\mu H(x)$ 의 값이 1에 가까우면 가까울수록, 물의 온도가 약간 높은 쪽이 크게 된다(그림 1(b)).

여기서 물의 온도측정치를  $10^{\circ}\text{C}$ 마다 체크하면 측정치의 전체  $V$ 는 11개( $0^{\circ}\text{C}, 10^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C}, \dots, 100^{\circ}\text{C}$ )의 有限集合이 된다.

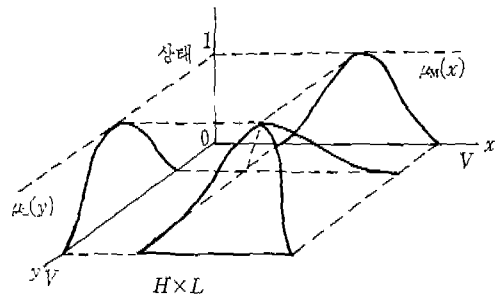
이 경우 물의 온도가 약간 높은( $H$ ) 퍼지집합은

$$H = 0.0/0 + 0.0/10 + 0.0/20 + 0.0/30 + 0.2/40 + 0.5/50 + 0.8/60 + 1.0/70 + 0.8/80 + 0.5/90 + 0.2/100 \dots \dots \dots (1)$$

와 같이 각 요소에 대하여 정도/요소값의 합으로 나타내는데 간단히



<그림 1> 통상(부울)집합과 퍼지집합



<그림 2> 퍼지관계(H×L)

로서 표시된다. (7)식에서 나타내는 퍼지관계는 그림 2의 피라미드로서 나타낼 수 있다.

$$H = \sum_{i=1}^n \mu H(x_i) / x \dots\dots\dots(2)$$

로 표시된다.

다시 물의 온도추정치를 연속적으로 추정할 수 있을 때 H는 다음식으로 쓸 수 있다.

$$H = \int_v \mu H(x) / x \dots\dots\dots(3)$$

퍼지집합의 합, 곱, 補는

① 합 : 「물의 온도가 中位(M) 또는 약간 높다(H)」  
 $M \cap H = \mu M(x) \vee \mu H(x) / x \dots\dots\dots(4)$

② 곱 : 「물의 온도가 中位(M), 항층 더 높다(H)」  
 $M \cap H = \mu M(x) \wedge \mu H(x) / x \dots\dots\dots(5)$

③ 補 : 「물의 온도가 높지 않다(H)」  
 $H^c = (1 - \mu H(x)) / x \dots\dots\dots(6)$

이 된다.

물의 온도를 나타내는 집합  $V = \{x\}$ 와 다른 집합  $U = \{y\}$ (예를 들면 압력 등)의 경우를 합하고 예를 들면 「물의 온도가 약간 높으며(H) 더욱이 압력이 약간 낮은(L):  $x$  is H and  $y$  is L」이라는 것을 특히 퍼지관계라고 부르며 H와 L의 直積

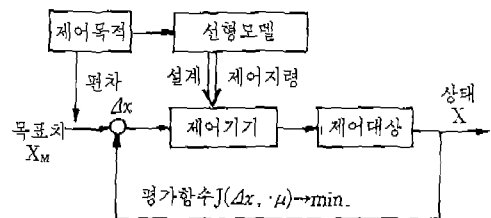
$$HxL = \int_{x \times y} \mu H(x) \wedge \mu L(y) / (x, y) \dots\dots\dots(7)$$

## 2. 종래 제어방식과 퍼지제어

### 2.1 종래 제어방식과 한계성

종래 계산기제어에 있어서 제어시스템 설계를 보면 설계자가 대상의 제어목적을 만족하도록 대상의 선형모델, 목표치 및 제어기의 구조와 제어정수를 설계한다.

또한 제어기는 미리 정해진 評價函數에 의해서 목표치와 상태량  $x$ 와의 편차를 평가하면서 목표치에 될 수 있는 한 정확히 추종할 수 있는 제어지령을 결정한다(그림 3 참조). 제어기의 제어정수를 결정하기 위한 경우의 응답으로 되어 있는 지 또는 오차평균합을 최소로 하도록 하는 제어



특징 : 비선형 특성을 선형근사 評價함수에 의한 평가의 일원화

<그림 3> 종래의 계산기 제어방식

정수는 완비된 CAD시스템에 의해서 용이하게 결정할 수 있다.

그러나 제어결과가 본래의 제어목적에 만족하고 있는가 어떤가는 별개 문제로서 설계자의 고민은 여기에 있는 것이다.

## 2.2 퍼지이론의 제어에의 응용

숙련자에 의한 제어(운전)를 생각하면 숙련자는 대상시스템에 대한 과거의 경험에서 대상시스템의 특성을 정성적으로 파악하고 노하우를 축적하면서 본래의 제어목적에 만족하는 질이 좋은 제어를 행한다.

따라서 인간의 제어에 관한 知的活動은 만약 현재의 상태라면 과거의 경험으로 보아 제어지령을 보내도 좋겠다고 하는 多次元狀態評價와 만약 현재의 상태로서 제어지령을 보낸다면 과거의 경험에서 본래의 제어목적에 만족한 제어가 된다는 2개의 사고과정으로 나눌 수가 있다.

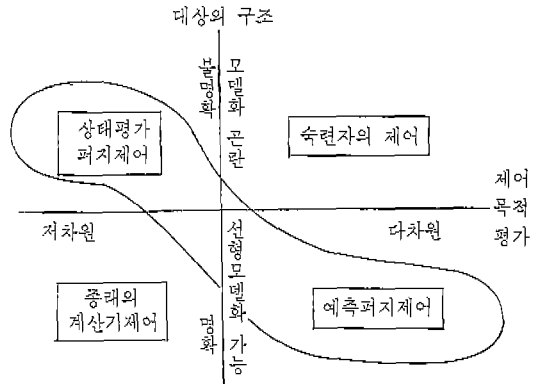
### 2.2.1 퍼지제어의 위치설정

숙련자의 제어에 관한 知的活動을 퍼지집합론으로 정량화하고 計算機化하도록 하는 것이 퍼지 제어이다.

이것은 인간의 사고과정에 대응해서 상태평가의 퍼지제어와 예측(목적평가)퍼지제어의 2가지로 제안되었고 그림 4와 같이 대상의 구조와 제어목적의 평가를 主軸으로 분류하였다.

상태평가 퍼지제어는 대상시스템의 구조가 불명확하고 모델화가 곤란한 대상에 대해서 제어목적의 평가를 잠재화시킨 제어규칙에 따라 제어한다.

또한 예측퍼지제어는 현재와 장래의 제어 목적을 예측하고 이것을 다차원적으로 평가하면서 제어를 하는데 제어목적의 예측자체는 부분적인 線形모델을 사용한다. 그러나 이 2가지의 퍼지제어는 상반되는 것이 아니고 적용대상에 따라서 잘

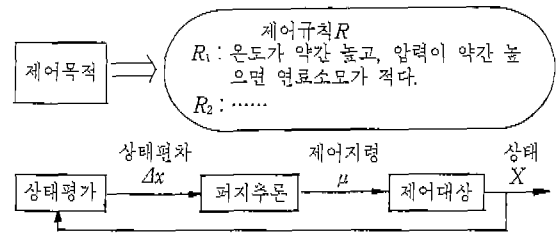


<그림 4> 퍼지제어의 위치설정

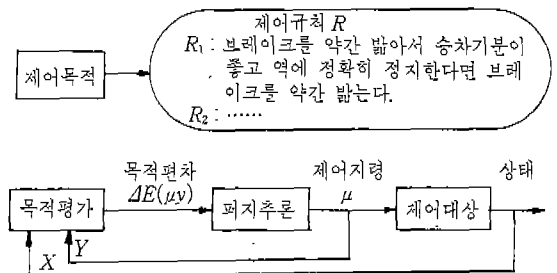
조합함으로써 보다 숙련자의 제어에 가깝게 할 수 있다.

### 2.2.2 상태평가 퍼지제어

인간에 의한 제어를 과거의 조작경험을 기초로 하여 종합적인 상황판단으로 알고리즘화하는 것



(a) 상태평가 퍼지제어



(b) 예측(목적평가) 퍼지제어

<그림 5> 퍼지제어방식

이 다차원평가 퍼지제어이다.

온도의 압력에 의해서 연료를 제어하는 일례를 들어서 설명하던 그림 5(a)와 같이 「온도가 높고 압력이 높으면 연료를 크게 절감할 수 있다」라고 하는 제어규칙에 의하여 제어지령을 결정하도록 定式化되어 있다.

일반적으로 쓰면

$$\text{If}(x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \\ \text{then } \Delta\mu \text{ is } C_i(i=1, n) \dots\dots\dots(8)$$

이 된다.

여기서  $\Delta\mu$ 는 조작량의 변화분을 나타내며  $A_i, B_i, C_i$  등은  $x, y, \Delta\mu$ 를 취하는 「높다」 「중간 위치」라고 하는 퍼지집합으로 정의되는 값이다.

퍼지제어기는  $x, y$ 의 관측치,  $x \text{ is } x', y \text{ is } y'$ 로 주어졌을 때  $n$ 개의 제어규칙의 전제조건부(If部)의 퍼지집합을 평가하고 이 전제조건부를 만족하는 상태에서  $\Delta\mu$ 의 값을 결정한다.

### 2.2.3 예측(목적평가)퍼지제어

인간의 제어활동을 제어목적에 기초를 두고 代替案을 선택함으로써 알고리즘화하는 것이 예측 퍼지제어방식이다(그림 6 참조).

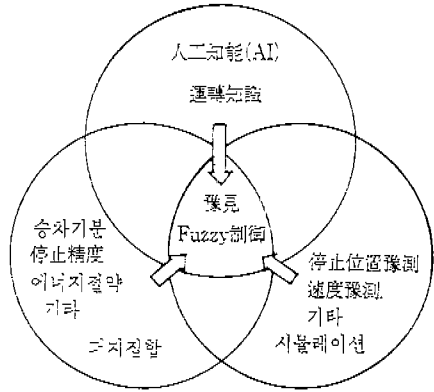
열차운전의 경우를 예로 들면 「과거의 경험에서 브레이크를 약간 밟아서 승차기분도 좋고 그리고 도착역에 정확히 정지하는 상황이라면 브레이크를 약간 밟는다」라고 하는 제어규칙에 의해서 제어지령을 결정한다(그림 5(b)). 한편 예측기능은 시뮬레이션으로 실현할 수 있으며 그 특징으로는

첫째, 제어지식을 If~then법칙과 법칙중에 포함될 애덕도호성을 函數化로서 표현하는 멤버쉽 함수로 기술할 수 있으며

둘째, 선택하는 조작량에 대하여 먼저의 상태가 어떻게 되었는가를 시뮬레이터로 예측하며

셋째, 여러개의 선택가지(枝)중에서 가장 좋은 조작량을 신속하게 산출하는 것이다.

이러한 제어방식은 열차자동운전시스템의 적용



<그림 6> 예측퍼지제어의 개념

이의이 戰術베이스의 의사결정지원을 實時間으로 구하는 정보처리분야와 가전제품이나 자동차 등의 量産品등에도 적용되고 있다.

#### (가) 제어규칙의 정식화

제어규칙을 일반적으로 정식화하면

$$R_1 : \text{If}(\mu \text{ is } C_i \rightarrow x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \\ \text{then } \mu \text{ is } C_i (i=1, n) \dots\dots\dots(9)$$

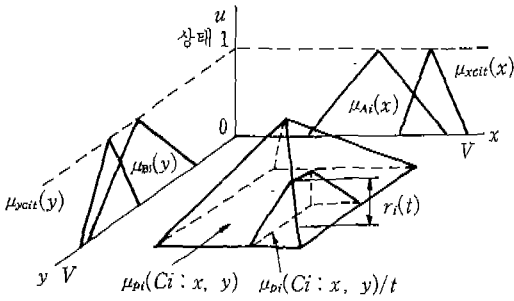
가 된다.

(8)식에서 다차원평가 퍼지제어와 크게 다른 점은  $x, y$ 의 값이 현재의 시점에서 제어지령을  $C_i$ 로 한 경우의 제어목적에 대한 예측평가지표라는 것이다. 물론 評價指標가 出力되도록 하는 제어지령  $C_i$ 에 의존하지 않는 경우도 있다.

(9)식을 일반적인 제어규칙으로 다시 고쳐 쓰면 「이 시점에서 제어지령  $\mu$ 를  $C_i$ 로 한 경우 평가지표  $x$ 는  $A_i$ (양호)가 되며 평가지표  $y$ 가  $B_i$ (대우양호)가 된다면 제어지령  $R_i$ 를 선택해서 제어지령으로서  $C_i$ 를 출력한다」로 표현할 수 있다.

제어규칙  $R_i$ 의 조건부(If부)에 있어서 멤버쉽(Membership)함수를  $\mu_{pi}(C_i : x, y)$ 로 놓으면 퍼지집합은

$$P_i = \int \mu_{pi}(C_i : x, y) / (x, y) \\ = A_i \times B_i : \mu = C_i \dots\dots\dots(10)$$



<그림 7> 예측퍼지제어의 제어평가 예

으로 표시되고 그림 7에서  $A_i, B_i$ 의 멤버쉽함수  $\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)$ 의 직積인 큰 피라미드모양이 된다.

#### (나) 제어지령 결정방법

제어를 행하는 시각을  $t$ 로 하고 제어  $R_i$ 에 대하여 생각한다. 시각  $t$ 에 있어서 제어지령  $\mu$  is  $C_i$ 을 실행한 경우에 퍼지지합  $x$ 와  $y$ 의 값이 어떻게 되는가를 대상시스템의 부분적 지식(애매모호한 모델)에 의하여 예측하고 그 결과  $x(C_i: t), y(C_i: t)$ 를 구한다.

한편 시각  $t$ 에서의 제어규칙의 조건부  $P_i|t$ 는

$$P_i|t = A_i \cap x(C_i: t) \times B_i \cap y(C_i: t) \quad (11)$$

이 되며 값  $r_i(t)$ 는

$$r_i(t) = \mu_{P_i}(C_i: x, y)|t \quad (12)$$

에 의해서 구할 수 있다.

또한 시각  $t$ 에 있어서 각각의 제어규칙  $R_i$ 의 평가치  $r_i(t)$ 에서 제어지령  $\mu = C_i$ 의 만족도를 구할 수 있다.

예측 퍼지제어에 의한 제어기에서는 예를 들면 현재시각  $t$ 에서 가장 정확한 제어지령  $C_i$ 를 출력한다.

### 3. 지하철의 자동운전과 자동화 상황

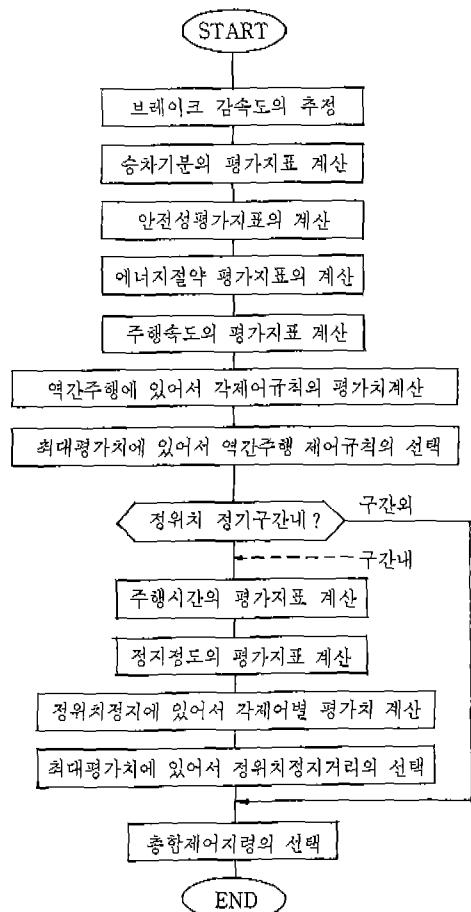
열차의 운전은 출발신호에 의해서 열차를 출발

시키고 역과 역사이에서는 제한속도를 초과하지 않도록 열차의 속도를 제어한 후 다음역의 정지 목표에 열차를 정지시키는 제어이다.

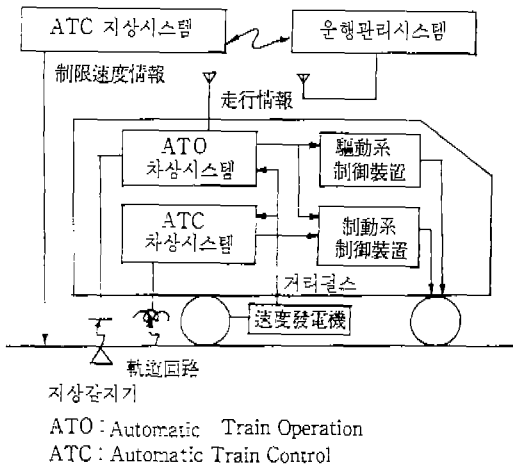
이 경우 열차운전의 평가지표는 승객의 안전성 확보, 승차기분의 유지, 제한속도의 엄수, 역에서의 정확한 정지, 역과 역사이의 주행시간 및 소비 전력량 등이며 이들의 상황에 따라 전체적, 국소적으로 복잡하게 구성되어 있다(그림 8).

자동열차운전장치(Automatic Train Operation Device: ATO로 略記)란 마이크로컴퓨터에 의하여 운전사 대신 열차를 제어하는 장치를 말한다.

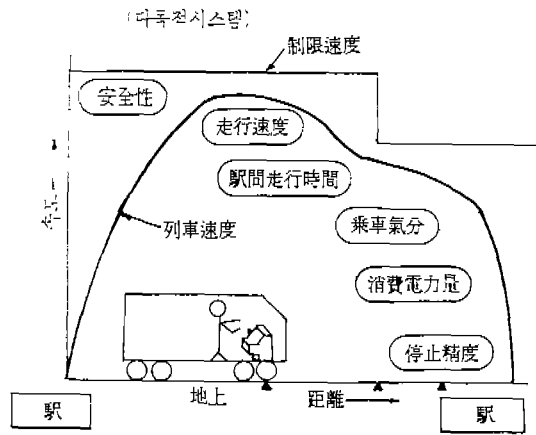
이 장치는 열차를 최소한도로 안전을 확보하는



<그림 8> 열차자동운전장치 처리의 흐름도



<그림 9> 열차자동운전시스템의 구성



<그림 10> 열차자동운전시스템의 목적

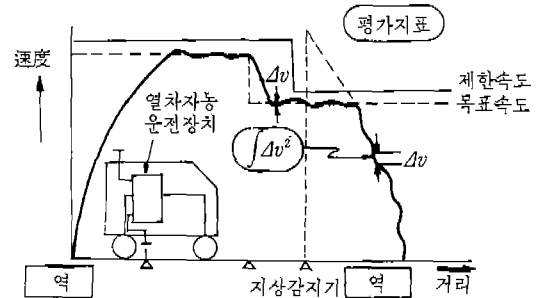
ATC(Automatic Train Control)가 작동하지 않는 영역에서 열차를 제어한다.

자동열차운전장치는 속도발전기에 의한 일정한分解能의 거리펄스, 차량위의 ATC장치로부터의 제한속도신호, 특정 정보를 갖는 地上機器를 통과할 때의 지상검출신호, 운행관리시스템으로부터 주행정보를 입력해서 구동계와 제어계에 제어신호를 출력한다.

한편 열차의 자동운전시스템은 차량위에서 발생된 목표속도 패턴으로 PID(비례+적분+미분) 제어로서 열차속도를 추종하는 방식으로 일본의 仙台市の 지하철에 이미 사용되었다.

그림 9와 같은 방식에서는 ① 제한속도에서 일정한 속도만큼 낮은 속도를 목표속도로 하고 이것에 추종시키는 역간 주행제어와 ② 역의 일정 거리에 설치된 지상감지기를 이용하여 정위치에 정지하도록 목표속도패턴을 발생시켜서 이것에 열차속도를 추종시키는 정위치정지제어의 2가지를 통합함으로써 제어지령을 내리고 있다(그림 10, 11참조).

그러나 ATO제어계의 문제점은 사람을 수송하는 장치를 제어하기 때문에 제어성능의 良否를 불분하고 評價項目은 목표속도패턴의 추종에만

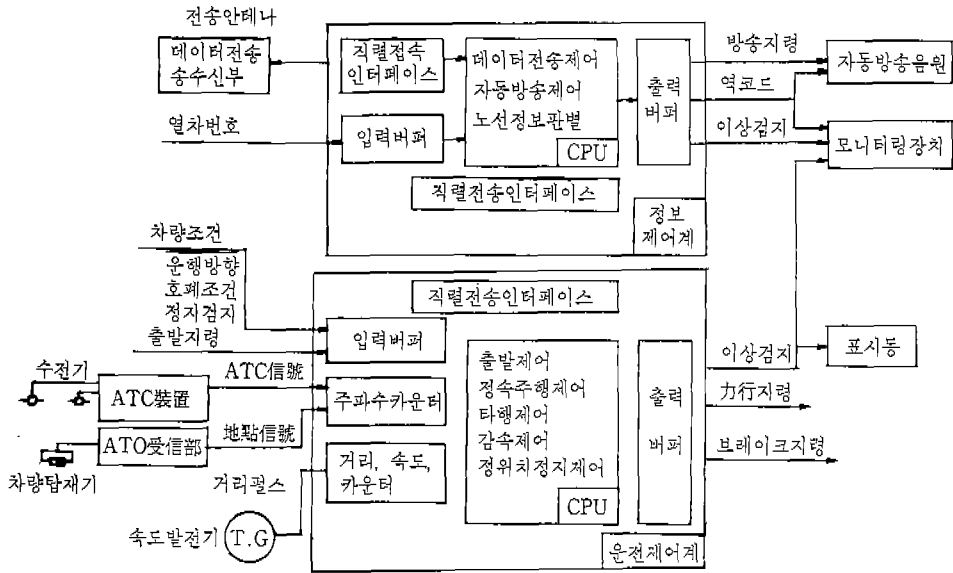


<그림 11> PID제어에 의한 열차자동운전방식의 개요

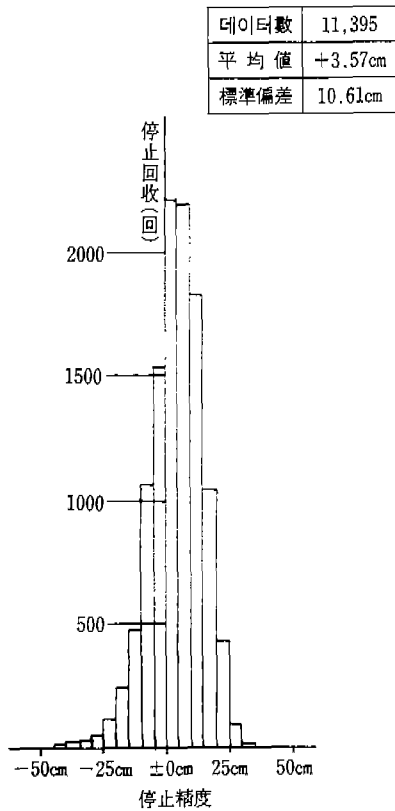
있는 것이 아니고 안전성, 승차기분, 정확한 위치에서의 정지, 定時性 및 에너지 절약에 있는 것이며 또한 승객의 多少, 브레이크성능을 위시한 열차성능, 선로기울기 등의 변동폭이나 편차의 크기 및 열차를 動的系로서 정확히 모델화하는데는 한계가 있다는 것이다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 것이 Fuzzy-ATO(Automatic Train Operation) 즉 열차자동운전시스템인 것이다.

한편 1987년 日本仙台市 交通局에서 실현한 예측피지제어방식과 종래의 PID제어방식을 시뮬레이션으로 비교한 결과에 의하면 정지오차의 표준



<그림 13> ATO 기능 구성도



편차는 1/3, 노치변화횟수는 1/3, 그리고 10%의 에너지절약을 가져 왔으며 19개 차량편성의 열차 시험주행에서 정지정도오차의 평균치는 +3.6cm, 표준편차는 10.6cm의 결과를 얻었다고 하며 그림 12는 정지 정도의 실측치를, 그림 13은 ATO기능 구성도를 나타낸다. 지금까지 퍼지제어란 어떠한 것인가를 개괄적으로 살펴보고 아울러 열차자동 운전의 적용예를 간단히 소개하였다. 퍼지이론은 제어문제에서 정보처리문제에 이르기까지 그리고 인간과의 관계가 강한 인간-기계시스템으로 전개될 것이다.

또한 자동차나 가전제품에의 적용이 활발해지고 있으며 고속추론의 욕구가 점차 높아질 것이다.

이 외에 퍼지칩이나 퍼지ASIC(Application Specific IC)에 대한 대량적용의 시대가 예상되며 뉴로(Neuro)등의 기술로서 계산기가 플랜트 프로세스의 상태를 자동적으로 판단해서 상태의 위험도 상황을 설명한다든지 제어규칙의 자동학습이나 갱신 등을 행하는 학습기능을 갖는 지능형 제어로 발전할 것이다.