한국자동차공학회논문집 제 2 권 제 5 호, pp. 23~29, 1994.

〈논 문〉 SAE NO. 943751

퍼지 논리를 이용한 공회전 속도 제어에 관한 연구

A Study on Idle Speed Control Using Fuzzy Logic

고 동 완,* 이 용 노,** 이 진 구**
D. W. Ko, Y. N. Lee, J. K. Lee

ABSTRACT

The design procedure for fuzzy logic controller depends on the expert's knowledge or trial and error. Moreover, it is very difficult to guarantee the stability and robustness of the system due to the linguistic expression of fuzzy control. However, fuzzy logic control has succeeded in many control problems that the conventional control theory has difficulties to deal with. As a result, this control theory is applied to the engine control system which a mathematical model is difficult. In this study, the fuzzy logic is applied to obtain the gain of PI control at idle speed control system, and a simple engine model is developed in order to perform simulation. Experimental results show that the response to reach the target engine speed at idle speed control system is improved by adopting the gain obtained with fuzzy logic.

주요기술용어 : Fuzzy Logic(퍼지 논리), Fuzzy Set(퍼지 집합), Idle Speed(공회전), Membership Function (소속 함수), Target Engine Speed(목표 엔진 회전수)

1. 서 론

최근에 퍼지 이론을 바탕으로 하여 인간이 사용하는 언어적인 표현을 이용한 제어가 여러 부분에서 시도 되고 있다. 이러한 퍼지 논리를 이용한 퍼지 제어 이론은 현재까지 체계적으로 제어기를 설계하는 방법이 정립 되어 있지 않아, 제어기 설계의 상당히 많은 부분을 전문가의 지식이나 여러번의 시행 오차에 근거하게 된다. 또한 퍼지 제어 이론은 그 언어적인 표현으로 인해서 제어기와 제어 대상의 안정성이나 강인성등을 수학적으로 입증하기에는 어려움이 있다. 하지만 퍼지 제어 방식은 기존의 제어 이론으로 해결하기 어렵고 복잡 하거나 또는 제어 대상의 모델이 정확하게 알려지지 않은 경우에도 성공적인 결과를 얻고 있음이 많이 보고[1-4]되고 있어 수학적 모델이 어려운 내연 기관의 연비 개선, 출력 증대, 배기 가스 저감 및 운전성 향상을 위해 퍼지 제어를 응용하고 있다.

본 연구에서는 내연 기관의 공회전 상태에서

* 정회원, 현대자동차 연구 3팀
** 현대자동차 연구 3팀

제동 토오크, 엔진 자체 진동및 저회전 저토오크 영역에서의 연소 불안정에 의해 야기 되는 엔진 회전 유동을 줄이기 위해 엔진 회전수를 제어함으로써 연소 안정및 연비 개선 효과를 가져온다. 이러한 공회전 속도 제어용 비례 적분 제어 앨고리즘에 있어서 비례및 적분 이득을 퍼지 논리를 사용하여 구하였다. 그리고, 비선형 엔진 모델로부터 구해진 단순 선형 엔진 모델에 근거한 시뮬레이션및 실차 실험을 통해서 퍼지논리로 부터 구한 이득을 적용함으로써 공회전 상태에서 엔진 회전수가 목표 회전수에 도달하는 응답 특성을 고찰 하고자 한다.

2. 공회전 속도 제어 시스템과 엔진 모델

2.1 공회전 속도 제어 시스템

그림 1에 나타나 있듯이 제어기 입력은 쓰로틀 개도와 엔진 회전수 오차이고 출력은 듀티 싸이클(Duty Cycle)이다.

아이들 스피드 액츄에이터(Idle speed actuator)의 제어 주파수는 100[Hz]이며, 이를 구동 시키기 위한 듀티 싸이클은 제어기내에서 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$D[k]=Db[k]+Do[k]+Dc[k] \tag{1}$$

$$Dc[k]=Pr[k]+Ir[k] \tag{2}$$

여기서, D : 아이들 스피드 액츄에이터의 듀티 싸이클

Db : 냉각수 온도의 함수로 나타나는 기본 듀티 싸이클

Do : 개회로 제어시 보정 듀티 싸이클

Dc : 귀환 제어시 보정 듀티 싸이클

Pr : 회전수 오차에 따른 비례 보정

Ir : 회전수 오차에 따른 적분 보정

k =n*T, T : 10[msec], n : 자연수

그리고, 공회전 속도 제어시 사용하는 엔진 회전수 분해능은 10[rpm]이며, 식 (2)의 귀환 제어시 보정 듀티 싸이클은 엔진 회전수 오차에 따라 결정되는데, 엔진 회전수 오차 계산식은 다음과 같다.

$$Re[k]=Rt[k]-Ra[k] \tag{3}$$

여기서, Re : 엔진 회전수 오차

Rt : 공회전 상태에서의 목표 엔진 회전수

Ra : 실 엔진 회전수

k =n*T, T : TDC, n : 자연수

식(3)에서 Re>0이면 Dc는 듀티 싸이클을 감소시키는 방향, Re<0이면 Dc는 듀티싸이클을 증가시키는 방향으로 계산 된다.

2.2 엔진 모델

시뮬레이션을 실시하기 위한 수학적 엔진 모델은 그림 2에서와 같이 흡기계, 연소계 및 회전 동력계로[4-9] 나누어 지는데, 각 단계의 비선형 특성을 해석 하기 위해 공회전 상태에서의 임계점을 중심으로 선형화하여 단일 입출력(Single Input Single Output)으로 처리하였다.

2.2.1 흡기계

흡기계는 쓰로틀 밸브를 통과한 흡입 공기량 Qa를 입력으로 하고 연소계의 실린더에 유입되는 공기량 Qe를 출력하는 모델이며, 출력 Qe는 쓰

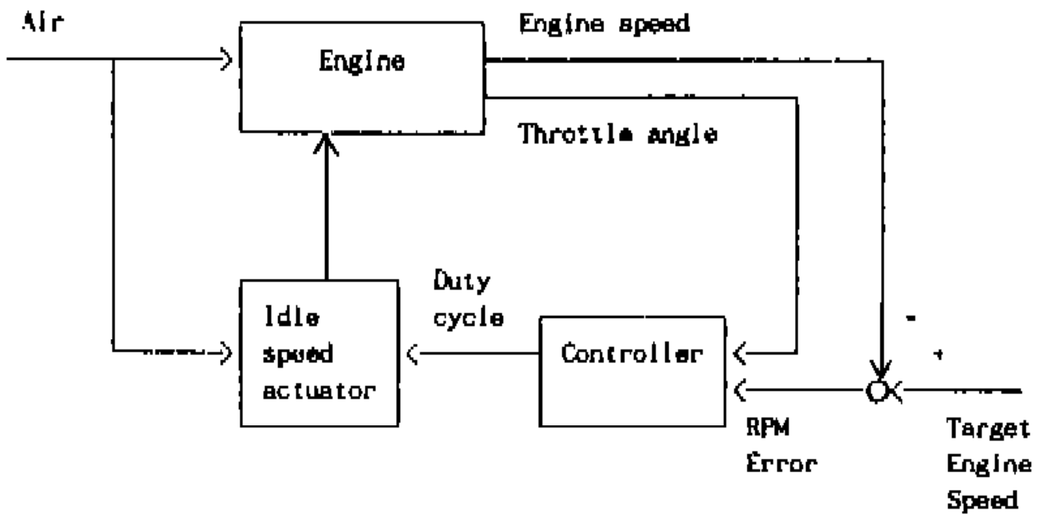


Fig.1 Block diagram of idle speed control system

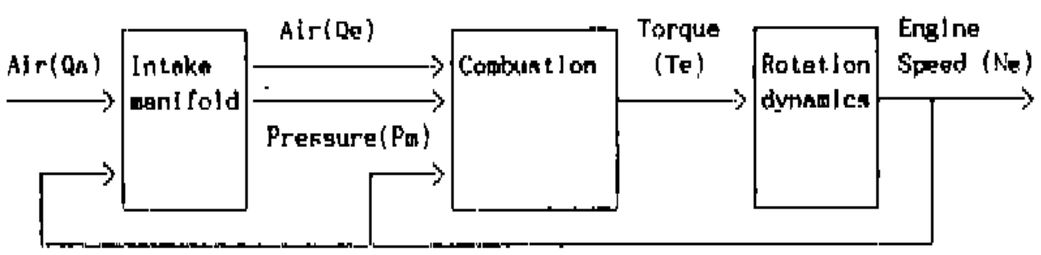


Fig.2 Simple engine model

로틀 밸브를 통과한 흡입 공기량 Qa에 1차 지연 요소가 고려된 다음 식으로 표현된다.

$$Qe=Qa/(\tau s+1)+Qn\times Ne+Q_1 \quad (4)$$

여기서 시정수 τ는 흡기관내 압력인 Pm의 함수이고, 공기량 Qn은 엔진회전수 Ne의 함수로 엔진의 흡입 공기량을 나타내는 실험식[10]으로 부터 구하고 Q_1은 임계점에서의 보정 상수이다.

2.2.2 연소계

연소계는 흡기관내 압력 Pm과 엔진 회전수 Ne를 입력으로 하고 엔진의 평균 유효 토오크 Te를 출력하는 모델로 다음 식으로 표현된다.

$$Te=Vd(Pmi-Pf)/2 \quad (5)$$

여기서, Vd : 실린더 체적[m^3]
Pmi : 도시 평균 유효압[N/m^2]
Pf : 마찰 평균 압력[N/m^2]

2.2.3 회전 동력계

회전 동력계는 연소계 출력인 토오크 Te에 따른 엔진의 회전 운동을 결정하는 선형 모델로 다음과 같은 미분 방정식으로 표현된다.

$$Te=I\times\frac{d^2\theta}{dt^2}+C\times\frac{d\theta}{dt}+T_L \quad (6)$$

$$Ne=\frac{60}{2\pi}\times\frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

여기서, I : 관성 질량[kg · m^2]
θ : 회전 각도[rad]
C : 점성 마찰 계수[kg · m/sec]
T_L : 마찰력[N · m]

식(6)과 (7)에서 구해진 엔진 회전수 Ne는 흡기계및 연소계의 계산에서 사용된다.

3. 퍼지 제어 알고리즘

퍼지 제어에 있어서 입출력 값들은 퍼지 집합으로 정의되며 임의의 퍼지 집합 A는 소속 함수에 의해 특성 지워진다. 퍼지 집합 개념은 각 대상이 어떤 집합에 "속한다, 안속한다"라는 이원론적인 논리로 부터 각 대상을 그 모임에 "속하는 정도로"로 이해함으로써 일반화된것으로 불확실성의 처리에 대해 수학적 접근을 가능하게 한다. 이러한 퍼지 논리에 대해 좀더 명확히 표현하기 위한 일반식들은 다음과 같다.

제어 규칙중 i번째 관계를 Ri, Ri에 있어서 언어 변수들, 즉 제어기 출력 U와 오차 E에 대한 언어 변수 값을 Ui와 Ei라 하면 Ri는 언어 변수들의 카테션곱(CARTESIAN PRODUCT)으로 구해지는데 이의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$Ri=Ei\times Ui \quad (8)$$

또한, R을 Ri들의 합집합이라 하면 k번째 샘플링 순간에서 추론 결과는 Zadeh의 합성 규칙으로 부터 다음과 같이 표현된다.

$$U(k)=\{E(k)\}\cdot R \quad (9)$$

추론이 완료 될때 마다 이원론적인 제어 입력이 필요함으로 비퍼지화를 수행하여야 한다. 따라서, 이러한 비퍼지화를 구현하는 방법으로 최대값 방법, 최대평균법및 무게 중심법이 있으나, 본 연구에서는 다음 식으로 표현되는 무게 중심법을 이용했다.

$$u(k)=\sum_j \mu_{(uj)}\times uj/\sum_j \mu_{(uj)} \quad (10)$$

이상과 같은 퍼지 논리를 공회전 속도 제어 시스템에 있어서 비례적분 제어 알고리즘의 비

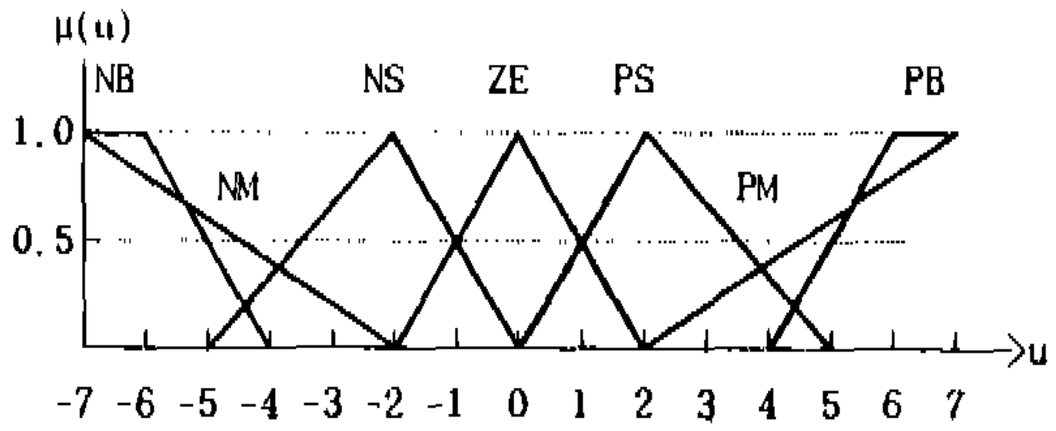


Fig.3 Membership function

례및 적분 이득을 결정 하는데 응용한 것을 기술하면 다음과 같다.

소속 함수는 그림 3에서와 같은 삼각형꼴로 전건부 변수인 회전수 오차와 후건부 변수인 이득에 대해 동일하게 적용하고, 정규화 등급을 회전수 오차에 따라 구분 하였으며, 이는 제어기내 공회전 속도 제어시 사용되는 분해능이 10[rpm]이므로 비례 이득 계산시는 20[rpm]간격,적분 이득 계산시에는 10[rpm] 간격으로 처리 하였다.

제어 규칙은 표 1에서 처럼 전건부 변수로 회전수 오차, 후건부 변수로 이득을 취하고, 퍼지 집합및 정량화 등급은 표 2를 적용 했다. 그리고, 실시간 영역에서 퍼지 출력의 계산은 시간 소모가 많기 때문에 입력값의 가능한 모든 경우에 대해 우선적으로 출력을 계산함으로써 형성된 룩 업 테이블(Look-Up Table)을 채택했다.

Table 1 Control rules

Input	RPM ERROR	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Output	GAIN	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB

Table 2 Quantization levels and fuzzy set

(a) P−gain

RPM error range	Level number	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
−140≤ Re<−120	−7	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
−120≤ Re<−100	−6	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
−100≤ Re<− 80	−5	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
− 80≤ Re<− 60	−4	0.0	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
− 60≤ Re<− 40	−3	0.0	0.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
− 40≤ Re<− 20	−2	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
− 20≤ Re<− 0	−1	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0
Re=0	0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
0≤ Re< 20	1	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0
20≤ Re< 40	2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
40≤ Re< 60	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	0.0
60≤ Re< 80	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0
80≤ Re< 100	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.3
100≤ Re< 120	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.0
120≤ Re< 140	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0

4. 시뮬레이션 및 실험 결과 고찰

본 논문에서 제시된 퍼지 논리로 부터 구한 비례및 적분 이득 평가를 위해 2.2 절에 제시된 단순 선형 엔진 모델 기준 CACSD(Computer Aided Control System Design) 관련 소프트 웨어인 MATRIXx 환경하에서 시뮬레이션을 실시하였고, 1500CC, 4기통 엔진으로 엔진 제어기를 장착한 차량에서 실차 실험을 하였으며, 각각의 실험에 있어서 목표 엔진 회전수는 800[rpm]으로 설정하였다.

4.1 시뮬레이션 결과 및 고찰

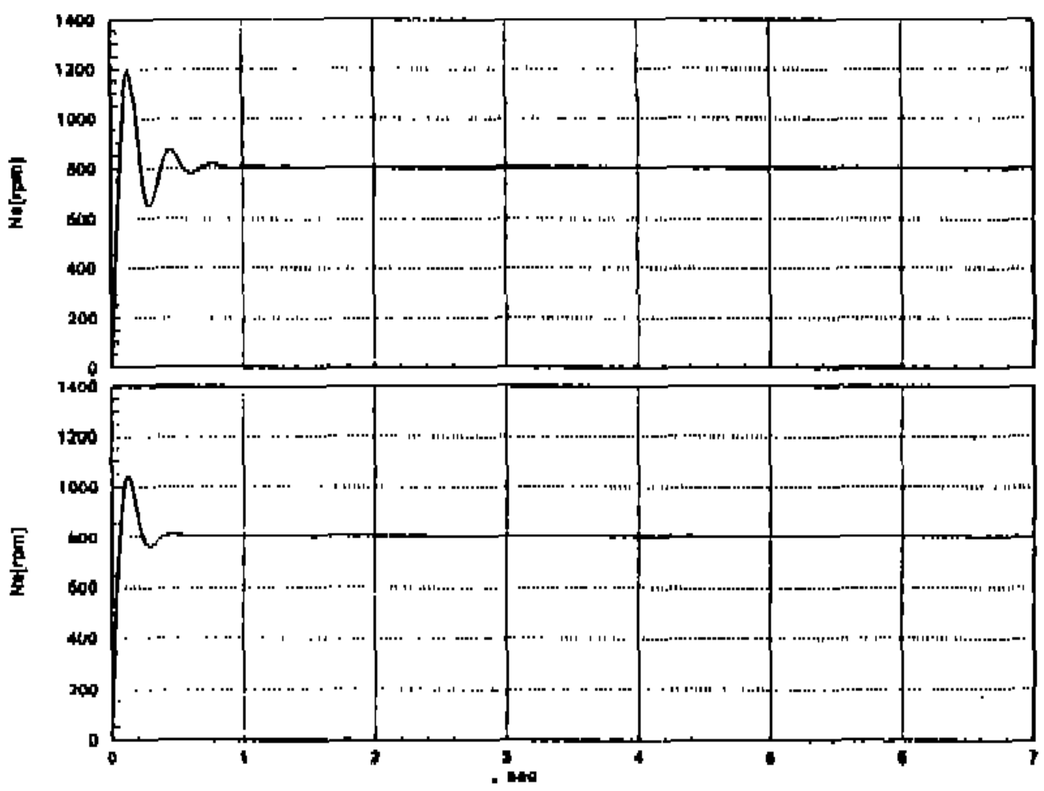
그림 4는 시동후 공회전 상태 진입시 까지의 제어 응답성을 나타낸것으로 퍼지 논리로 부터 구한 이득 적용시 목표 엔진 회전수에 도달하기까지의 안정화 시간이 50% 정도 개선 되었으며,

(b) I-gain

RPM error range	Level number	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$-70 \leq Re < -60$	−7	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$-60 \leq Re < -50$	−6	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$-50 \leq Re < -40$	−5	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$-40 \leq Re < -30$	−4	0.0	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
$-30 \leq Re < -20$	−3	0.0	0.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
$-20 \leq Re < -10$	−2	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$-10 \leq Re < 0$	−1	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0
$Re = 0$	0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
$0 \leq Re < 10$	1	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0
$10 \leq Re < 20$	2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
$20 \leq Re < 30$	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	0.0
$30 \leq Re < 40$	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0
$40 \leq Re < 50$	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.3
$50 \leq Re < 60$	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.0
$60 \leq Re < 70$	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0

그림 5는 공회전 상태에서 전기 부하 인가시 제어 응답성을 나타낸것으로 퍼지 논리로 부터 구한 이득 적용시 안정화시간이 40% 정도 개선 되었고, 그림 6은 정속 상태에서 급감속후 공회전 상태로 진입시까지의 제어 응답성을 나타낸것으로 퍼지 논리로 부터 구한 이득 적용시 50% 정도 개선 되었다. 그리고, 상기의 서로 상이한 세가지 실험 조건하에서 오버슈터는 퍼지 논리로 부터 구한 이득 적용시 평균적으로 40% 정도 감소 되었음을 알수 있다.

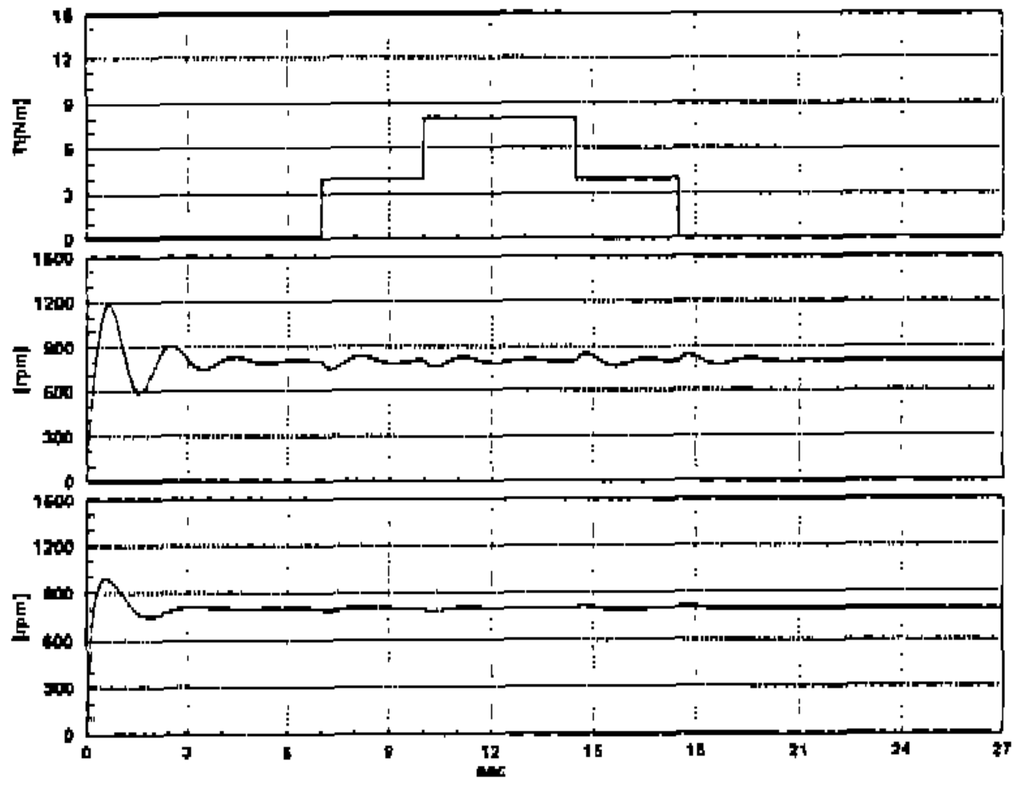
(a) Normal gain



(b) Fuzzy gain

Fig.4 The control response after cranking

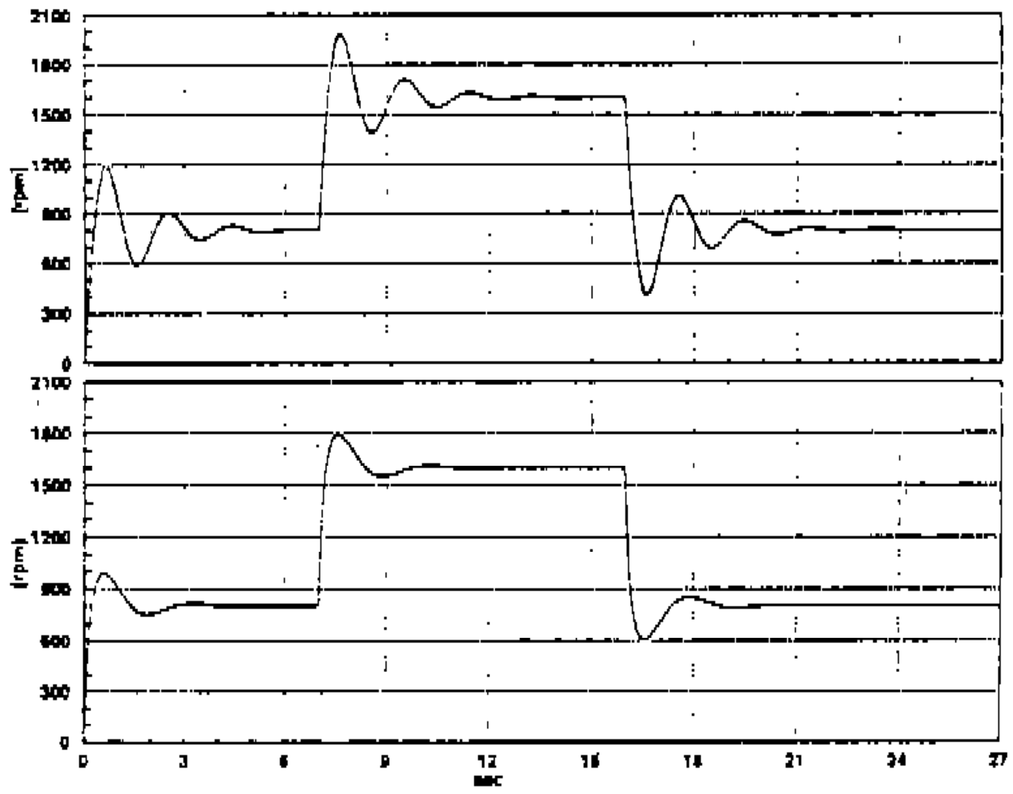
(a) Normal gain



(b) Fuzzy gain

Fig.5 The control response to electric load

(a) Normal gain



(b) Fuzzy gain

Fig.6 The control response after the sudden deceleration

Fig.7 Schematic diagram of vehicle test

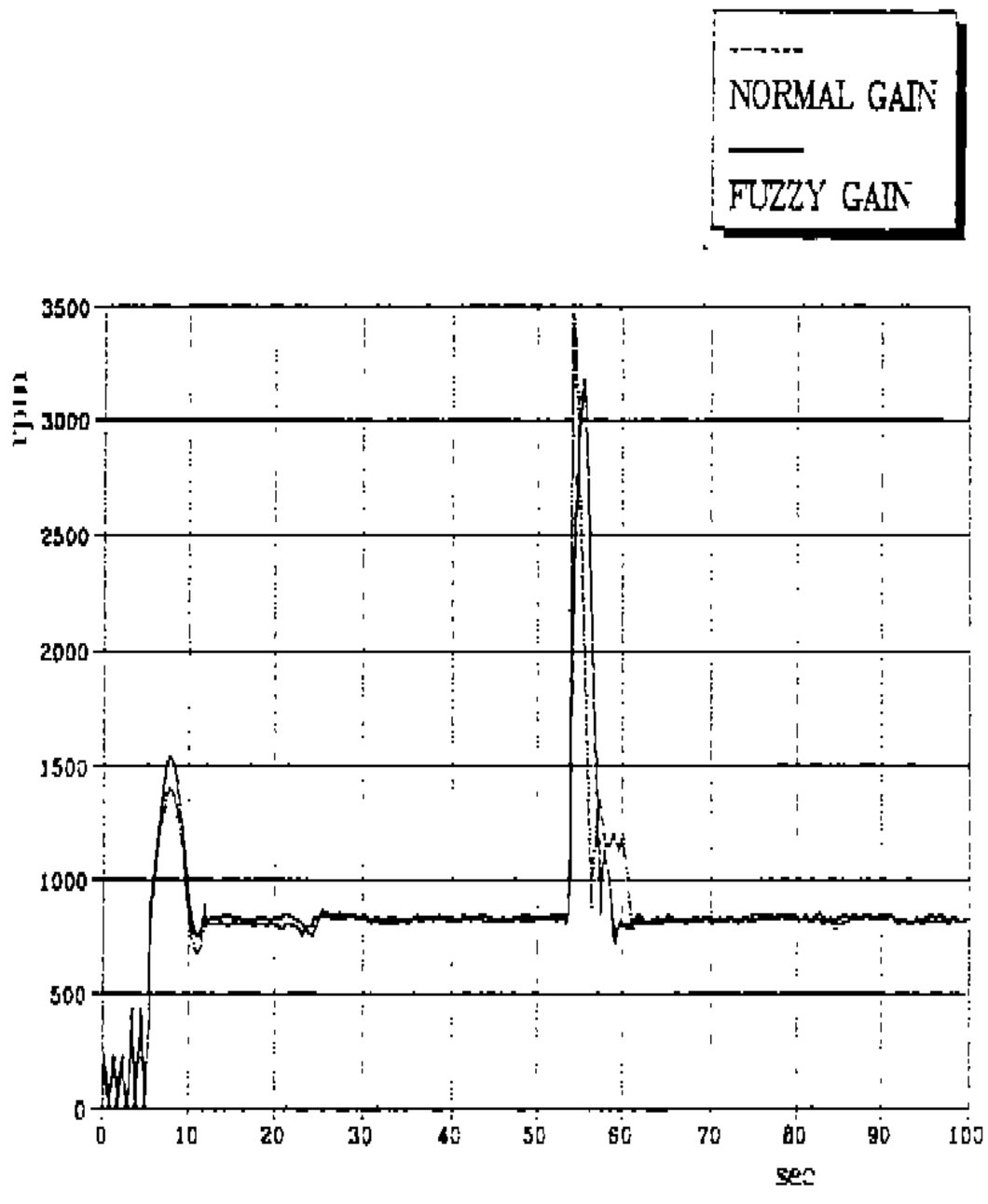


Fig.8 The Control response at vehicle test

4.2 실차 실험 결과 및 고찰

4.2.1 실험 장치 구성

그림 7은 실차 실험 관련 개략적인 구성도이다.

엔진 제어기는 8비트 마이크로 컴퓨터를 내장하고 있으며, 연료 분사량, 점화시기 및 공회전 속도등을 제어 할수 있는 차량 전용 제어기이다.

그리고, 엔진 제어기의 데이터를 실시간으로 수집하기 위해 PC에서 운용되는 엔진 제어기 개발 전용 소프트 웨어를 개발하였고, 이의 기능으로는 ROM 에뮬레이션, RAM 데이터 표시, 저장 및 수정등이 있으며, 데이터 처리 주기는 10[msec]마다 최대 8채널까지 처리 가능하다.

4.2.2 실험 결과 및 고찰

그림 8은 실차 상태에서 시동후 공회전 상태로 진입 시키고, 이러한 공회전 상태에서 순간적으로 급가속, 즉 쓰로틀 개도를 80% 이상 상태로 변환시킨후 다시금 공회전 상태로 진입 시켰을때 얻어진 데이터를 그래프로 처리한 것으로 퍼지 논리로 부터 구한 이득 적용시 목표 엔진 회전수에 도달하기까지의 안정화 시간이 30%정도 개선 되었음을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 엔진의 공회전 속도 제어 시스템에 적용하고 있는 비례 적분 제어 앨고리즘에 있어서 비례및 적분 이득을 결정하기 위해 퍼지 논리를 도입하였다. 그리고, 이러한 퍼지논리로 부터 구해진 이득을 평가하기 위해 단순 선형 엔진 모델에 근거한 시뮬레이션및 실차 실험을 하였으며, 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 엔진의 공회전 속도 제어용 비례 적분 제어 앨고리즘 개발시 퍼지 논리와 시뮬레이션을 실시함으로써 비례및 적분 이득의 신뢰도를 향상 시킬수 있었다.
2) 퍼지 논리로 부터 구한 비례및 적분 이득 적용시 공회전 상태의 목표엔진 회전수에 도달하는 응답 특성이 개선 되었다.

참 고 문 헌

1. 박민용, "퍼지 이론의 산업적 응용", 대한 전기 학회지, 제39권 12호, pp.33-40, 1990.12.
2. 강훈 "Fuzzy Set 이론과 그 응용에 있어 미국에서의 활동과 연구", 대한 전기 학회지, 제39권 12호, pp.41-56, 1990.12.
3. 이광형, 오길록, 퍼지 이론및 응용, 2권, 홍릉과학 출판사, 1991.
4. T. Yamamoto, H.Kinjo and S.Tamaki, "Fuzzy Control Simulation of Air/Fuel Ratio of Gasoline Engine", JSME, Vol.57, No.542, pp.140-143, 1991.
5. T. Takhashi, T. Ueno, A. Yamamoto and H. Sanbuichi, "A Simple Engine Model for Idle Speed Control", SAE Paper 850291, 1985.
6. W.W. Yuen and H. Servati, "A Mathematical Engine Model Including the Effect of Engine Emissions", SAE Paper 840036, 1984.
7. Y. Chin and F.E. Coats, "Engine Dynamics : Time Based Versus Crank Angle Based", SAE Paper 860412, 1986.
8. M. Nasu, A. Ohata and T. Meguro, "Idle Speed Control by Nonlinear Feedback" JSAE Review Vol.13, No.2, pp.54-59, 1992.
9. H. Ando and M. Motomochl, "Contribution of Fuel Transport Lag and Statistical Perturbation in Combustion to Oscillation of SI Engine Speed at Idle", SAE Paper 870545, 1987.
10. Y. Nishimura and K. Ishii, "Engine Idle Stability Analysis and Control", SAE Paper 860415, 1987.
11. 栗野誠一, 內燃 機關 工學, 山海堂, 1958, pp.73-155.
12. M. Abate and V. Nunzio, "Idle Speed Control Using Optimal Regulation", SAE Paper 905008, 1990.