

〈論 文〉

## 연료분사식 자동차엔진의 퍼지가변구조 제어시스템

남세규\* · 유완석\*\*

(1992년 12월 15일 접수)

### Fuzzy Variable Structure Control System for Fuel Injected Automotive Engines

Sae-Kyu Nam and Wan-Suk Yoo

**Key Words :** Fuzzy Logic(퍼지논리), Variable Structure Control(가변구조제어), Enginge Control(엔진제어), O<sub>2</sub> Sensor(산소센서)

#### Abstract

An algorithm of fuzzy variable structure control is proposed to design a closed loop fuel-injection system for the emission control of automotive gasoline engines. Fuzzy control is combined with sliding control at the switching boundary layer to improve the chattering of the stoichiometric air to fuel ratio. Multi-staged fuzzy rules are introduced to improve the adaptiveness of control system for the various operating conditions of engines, and a simplified technique of fuzzy inference is also adopted to improve the computational efficiency based on nonfuzzy micro-processors. The proposed method provides an effective way of engine controller design due to its hybrid structure satisfying the requirements of robustness and stability. The great potential of the fuzzy variable structure control is shown through a hardware-testing with an Intel 80C186 processor for controller and a typical engine-only model on an AD-100 computer.

#### 1. 서 론

자동차엔진의 연료분사장치 설계에서 엔진성능 못지않게 중요한 목표로 간주되는 것이 저공해 자동차의 개발이다. 「더 맑고 더 푸르게」라는 환경보호 우선정책에 의하여, 가솔린엔진에는 배기가스의 유해물질을 정화하기 위하여 무연휘발유의 사용과 삼원촉매장치의 부착이 의무화되어 있다. 촉매장치는 이론공연비(stoichiometric air to fuel ratio : 14.64)에서 연소된 배기가스에 효과적인 촉매성능을 발휘한다. 따라서, 공기와 연료의 혼합비(공연비)를 이론공연비로 정확히 유지시킬 수 있는 제어시스템의 개발 요구는 점차 엄격해지는 배기가스 규제

와 더불어 점점중하고 있다. 이러한 제어시스템은 매 연을 줄인다는 부가적 기능만을 갖음에도 불구하고, 광범위한 영역에서 작동하는 가솔린엔진의 비선형적이고 주기적인 특성 때문에 설계가 용이하지 않다. 현재, 대부분의 연료분사 제어기들은 개루프 이득계획(open loop gain scheduling)을 이용하는 비례적분제어를 적용하고 있다. 그러나, 이 방법은 엔진조정을 위한 이득찾음표(lookup table)의 작성에 많은 시간과 경비가 소요되고, 선진국의 개발업체가 기술이전을 기피하는 'know-how'가 필요하다.<sup>(1)</sup> 또한, 선형화된 엔진모델의 정당성이 어느 한 작동점 부근에 제한되므로, LQG/LTR과 같은 강인 제어기법 역시 비례적분제어와 마찬가지로 문제에 봉착하게 된다. 한편, 슬라이딩제어의 적용은 엔진의 불확실성에 대하여 강인성을 보여 준 바 있었다.<sup>(2)</sup> 이는 비선형시스템에 직접 응용이 가능하

\*정회원, 국방과학연구소

\*\*정회원, 부산대학교 생산기계공학과

다는 슬라이딩제어 고유의 장점과 함께, 지르코니아계 산소센서의 급격한 비선형적인 출력특성이 슬라이딩모드 선정에 오히려 적합하게 작용하기 때문이다. 그리고 이 방법을 비선형 엔진모델에 적용하여 해석적으로 설계한 연료분사 제어시스템<sup>(3)</sup>의 유용성이 컴퓨터 시뮬레이션에서와 마찬가지로 엔진 장착실험<sup>(4)</sup>에서도 입증되었다. 그러나 온-온프(on-off) 형식으로 이상화된 센서출력에서 기인하는 제어불연속은 이론공연비의 채터링(chattering)을 유발하고, 더욱이 연소과정에서 발생하는 공연비의 측정지연은 채터크기를 증폭시킨다. 증폭된 채터링은 촉매장치의 성능을 약화시키므로, 채터링 감소방안이 필요하다. 슬로친<sup>(5)</sup>이 제안한 선형적인 평탄화(linear smoothing)기법은 산소센서의 비선형성으로 인하여 공연비제어에는 효과적이지 못하다. 이러한 수학적 제어기법의 한계를 극복하기 위하여 지능제어의 적용이 시도되고 있다. 신경회로망을 이용하여 고가의 광역산소센서(wide range oxygen sensor)를 학습한 공연비추정기<sup>(6)</sup>는 만족스러운 추정결과에도 불구하고, 다양한 동적 특성의 고려가 부족하여서 제어시스템의 안정성보장이 곤란한 점이 있었다. 한편 퍼지제어가 가솔린엔진의 비선형 센서에 유효함이 공연비제어의 시뮬레이션을 통하여 밝혀졌다.<sup>(7)</sup> 그러나 이 연구는 과도상태의 엔진 성능 개선에 치중함으로써 정상상태에서 정밀한 성능의 공연비제어는 간과된 면이 많을 뿐만 아니라, 퍼지시스템의 설계방안이나 실제 구현방법에 대한 아무런 언급도 없었다. 산소센서의 히스테리시스가 있는 경우 공연비에 미치는 영향을 보상하기 위하여, 퍼지제어의 적용<sup>(8)</sup>이 시도되었다. 그러나, 일반적인 현상은 아니고 과도 운전모드에 대한 고려가 전혀 없었다.

따라서, 본 연구에서는 산소센서의 출력응답이 다소 불확실하더라도 정성적 센서특성을 반영하여서 깔끔히 대처할 수 있는 퍼지제어를 엔진의 비선형 특성에 강인한 슬라이딩제어와 스위칭 경계역에서 합성한 퍼지가변구조 제어를 도입한다. 본 논문의 핵심은 운전모드 변화에 적응성있게 대처 가능한 퍼지 다단계 구조를 제안한 것이다. 그리고, 이를 비퍼지침에서 고속추론하는 방법에 대하여 논

## 2. 엔진모델

엔진모델의 작성과 응용은 여러 연구에서 수행되

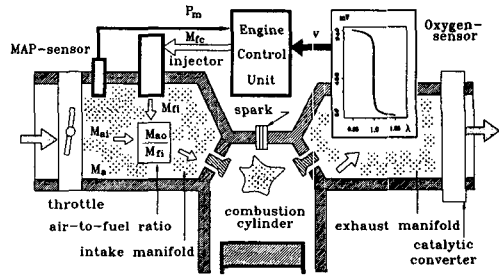


Fig. 1 Schematic of fuel-injection system

어 왔다. 본 연구에서는 엔진의 동적모델을 공연비 루프(A/F loop)의 관점에서 Fig. 1에 표시된 흡기계, 출력계 및 연료계로 구성한다. 이 모델은 공연비제어에 영향을 주는 동적현상인 흡기과정의 비선형성을 비롯하여, 연료분사방법에 따른 토크 생성과정의 주기성지연(cyclic delay)과 엔진에서 산소센서까지 배기가스가 이동하는데 필요한 시간지연을 포함하고 있는 비선형시변시스템(nonlinear time variant system)이다.

흡기계의 상태를 나타내는 공기질량  $M_a$ 는 질량 보존법칙과 실험식에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{M}_a = \dot{M}_{ai}(\alpha, P_m, P_a) - \dot{M}_{ao}(\eta(W_e, P_a), W_e, M_a) \quad (1)$$

여기서 흡기계에 들어오는 흡입공기유량  $\dot{M}_{ai}$ 는 스로틀(throttle) 특성과 맥(chock) 유동현상을 나타내는 실험식으로부터 결정된다. 즉, 스로틀밸브 각도  $\alpha$ 와 함께 MAP(manifold absolute pressure) 센서에서 계측된 흡기부압  $P_m$ 과 대기압  $P_a$ 를 이용하여 간접적으로 측정된다. 그리고, 흡기계를 빠져나가는 배출공기유량  $\dot{M}_{ao}$ 는 엔진각속도  $W_e$ 와 실험에서 정해지는 체적효율함수  $\eta(W_e, P_m)$ 에 의하여 표현된다. 시뮬레이션을 위한 공기질량  $M_a$ 와 흡기부압  $P_m$ 과의 관계는 단열압축유동의 가정하에서 이상기체법칙에 따른다.

$$P_m = \frac{R_m \cdot T_m}{V_m} M_a \quad (2)$$

여기서,  $R_m$ 은 공기의 기체상수,  $T_m$ 은 흡기계 온도,  $V_m$ 은 흡기계 체적을 뜻한다.

출력계의 상태변수는 연소과정에서 발생한 토크가 기계부하계에서 변환된 엔진각속도이다. 지시토크(indicated torque)  $Q_i$ 와 마찰력  $Q_f$ 를 갖는 엔진

의 회전동력학은 연속시간 영역에서 곡선맞춤(curve fitting) 공연비 영향함수와 배출공기유량 그리고 엔진각속도에 의하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$W_e(t) = \frac{1}{I_e} \int_{t_0}^{t_1} [Q_i \{A/F(t-t_i), \dot{M}_{ao}(t-t_i), W_e(t-t_i)\} - Q_f] dt + W_{e0} \quad (3)$$

여기서  $I_e$ 는 엔진의 유효 회전관성량이고,  $W_{e0}$ 는 엔진각속도의 초기치이다. 또한, 공기흡입에서 토 크생성까지의 지연시간  $t_i$ 는 다음과 같다.

$$t_i = \frac{k_1}{W_e} \quad (4)$$

연료계의 상태는 뒤집(lag)과 시간지연(timedelay)을 결합한 1차 지연 필터형태의 연료분사량 동특성으로부터 알 수 있다.

$$C_f \cdot \dot{M}_{fi} + \dot{M}_{fi} = \dot{M}_{fc} \quad (5)$$

여기서  $\dot{M}_{fi}$ 는 연소실에 들어가는 실제 연료분사율이고,  $\dot{M}_{fc}$ 는 제어기에서 명령된 연료분사율이다. 연료공급시정수  $C_f$ 는 연료분사방법에 따라 다소 차이가 있으나 널리 사용되는 단점분사방법(single point injection method)의 경우, 연료분사기의 구동에 필요한 시간지연과 연료의 이동시간을 함께 고려하면서 다음과 같이 모델링된다.

$$C_f = k_2 + k_3 \frac{M_{fc}}{W_e} \quad (6)$$

위에서 언급한 엔진모델의 물리적 매개변수들은 실

험에 의하여 경험적으로 결정된다. 본 논문에서는 연료분사제어기의 실시간 시뮬레이션을 위하여, 조동일과 헤드릭이 발표한 중형자동차용 엔진의 정형적인 모델의 제원과 매개변수를 사용한다.<sup>(8)</sup>

공연비 측정을 위하여 일반적으로 사용되는 지르코니아형 산소센서<sup>(9)</sup>는 Fig. 2와 같은 특성을 보인다. 센서의 출력전압은 배기가스의 산소분압에 따라 급변하므로, 이론공연비는 근방의 좁은 영역 외에는 높은 비선형성을 갖는다. 공연비 피드백은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 혼합공기가 흡입, 연소, 배출과정을 거쳐 배기계에 부착된 산소센서에 도달에 필요한 이동시간 만큼 지연된다. 감지에 소요되는 지연시간  $t_d$ 는 참고문헌<sup>(10)</sup>과 같이 표현된다.

$$t_d = k_4 + \frac{k_5}{W_e} [\text{sec}] \quad (7)$$

### 3. 퍼지가변구조 제어

이론공연비  $\beta$ 의 허용범위 내에서 공연비를 제어하기 위하여, 설계의 편리하도록 단순화된 아래와 같은 미분형 공연비를 정의한다.

$$\frac{\dot{M}_{ao}(t)}{\dot{M}_{fi}(t)} = \beta \pm 0.2 \text{ and } \beta = 14.64; \forall t > 0 \quad (8)$$

이는 실제 공연비보다 민감하므로, 제어기가 보수적(conservative)으로 설계 되도록 한다. 촉매성능은 이론공연비에서 조금만 벗어나도 급격히 저하되지만, 평균효과(averaging effect) 때문에 공연비의 미세한 떨림( $\pm 0.2$ )현상은 실제로 촉매성능을 높인다. 그리고 운전모드에 따라서는 주행성능에 역점을 두어서 농후한 공연비로 연료를 분사하는 경우도 있다. 그러나 이론공연비를 벗어나는 순간이 짧다면, 촉매성능을 크게 떨어뜨리지는 않는다. 따라서, 본 논문은 정상상태의 운전모드에서 식(8)의 범위로 공연비를 제어링시켜 촉매성능을 극대화하는 것을 제어목표로 한다.

#### 3.1 연료분사장치의 슬라이딩제어

이러한 제어목표 달성을 위하여, 이론공연비에서 스위칭 평면  $S(t)$ 를 선정한다.

$$S(t) = \dot{M}_{ao}(t) - \beta \cdot \dot{M}_{fi}(t) \quad (9)$$

흡입다양체(attractive manifold) 개념의 다음식과

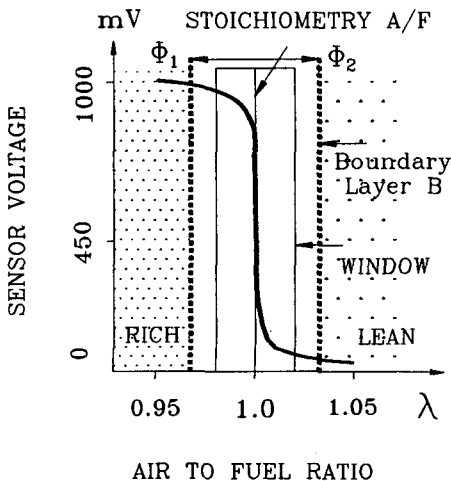


Fig. 2 Characteristics of  $ZrO_2$  oxygen sensor

같은 슬라이딩 조건식이 만족되면, 상태공간상에서 궤적이 유한시간 내에 스위칭 평면  $S(t)=0$ 에 도달하여서 슬라이딩 운동과 채터링을 지속하게 된다.

$$\dot{S}(t) = -\eta \cdot \text{sign}(S(t)), \quad \eta > 0 \quad (10)$$

시스템의 불확실성을 아래의 구조화된 곱셈형 모델 오차로 가정하면,

$$\dot{M}_{ao}(t) = (1 + E_a(t)) \cdot \tilde{M}_{ao}(t) \quad (11)$$

$$C_f(t) = (1 + E_f(t)) \cdot \tilde{C}_f(t) \quad (12)$$

여기서 '~'은 공칭값의 표시이다. 그리고 시간에 따라 변하는 흡기계와 연료분사계의 모델오차의 최대한계를 각각  $E_a$ 와  $E_f$ 로 가정한다.

슬라이딩 조건식과 모델오차를 함께 고려하기 위하여, 식(10)에 식(9)를 미분한 식을 대입한다. 그리고 식(5), 식(12)와 함께 식(11)의 미분식을 정리하면, 공연비 제어를 위한 슬라이딩제어법칙은 아래와 같이 구해진다.

$$\dot{M}_{rc}(t) = \tilde{M}_{rc}(t) + \frac{\tilde{C}_f(t)}{\beta} \{ \tilde{M}_{ao}(t) + K(t) \cdot \text{SIGN}(S(t)) \} \quad (13)$$

여기서, 강인성 변수  $K(t)$ 는 작동조건 변화에 따라 다음과 같이 자동 조정된다.

$$K(t) = (E_a + E_f + E_a \cdot E_f) \cdot |\tilde{M}_{ao}(t)| + (1 + E_f) \cdot \dot{E}_a \cdot \tilde{M}_{ao}(t) \quad (14)$$

공기유량의 미분은 라플라스 영역에서 표현되는 미분형 필터를 이용하고, 시정수  $N$ 은 일반적으로 10을 취한다.<sup>(11)</sup>

$$\tilde{M}_{ao}(s) = \frac{s}{1 + Ns} \tilde{M}_{ao}(s) \quad (15)$$

피드백 신호  $\text{SIGN}(S(t))$ 를 Fig. 2와 같은 특성을 갖는 온-오프형 산소센서의 출력에서 얻는데, 지연 시간  $t_d$ 가 소요된다. 이를 반영하기 위하여, 슬라이딩제어법칙은 다음 식과 같이 수정된다.

$$\dot{M}_{rc}(t) = \tilde{M}_{rc}(t) + \frac{\tilde{C}_f(t)}{\beta} \{ \tilde{M}_{ao}(t) + K(t) \cdot \text{SIGN}[450\text{mV} - v(t - t_d)] \} \quad (16)$$

여기서, 산소센서의 출력전압 450 mV는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 이론공연비를 뜻한다.

### 3.2 평탄화를 위한 퍼지제어

슬라이딩제어는 스위칭평면으로 구속된 제어공간

을 설정하고, 원하는 상태제적이 이 공간상에 유지되도록 마찰감쇠(friction damping)개념의 구속력을 제어입력에 포함시킨 것이다. 그러므로, 이 방법은 시스템 불확실성에 강인한 반면, 제어불연속에서 기인되는 채터링을 피할 수 없다. 슬로틴<sup>(12)</sup>은  $S(t)=0$  근방의 스위칭 경계역 안에서 부호함수  $\text{SIGN}(S(t))$ 를 포화함수  $\text{SAT}(S(t)/\Phi)$ 로 대체하여서 제어불연속을 선형적으로 평탄화하였다. 그러나, 산소센서의 비선형성 때문에 효과적인 채터링 감소를 위한 별도의 평탄화 방법이 필요하다. 본 논문에서는 이를 위하여 퍼지가변구조제어 방법을 제안한다. 먼저, 상태공간은 슬라이딩제어와 퍼지제어의 부영역으로 구분하는 경계역  $B(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$B(t) = [\lambda, \Phi 1 < S(v(\lambda; t)) < \Phi 2] \quad (17)$$

여기서  $\lambda$ 는 공연비를  $\beta$ 로 나눈 정규화된 공연비이고,  $S[V(\lambda; t)]$ 는  $\lambda$ 와 시간  $t$ 에 따라 변하는 출력전압  $v$ 의 함수로 표현되는 슬라이딩 평면을 뜻한다. 그리고 경계역  $B(t)$ 의 밖에서는 식(11)과 동일한 슬라이딩제어를 사용하고, 경계역 안에서는 부호함수  $\text{SIGN}(S(t))$ 를 퍼지제어로 비선형보간(nonlinear interpolation)을 하여서 제어불연속을 평탄화한다. 이렇게 하면, 슬라이딩제어법칙은 퍼지제어 형태인 피드백 FLC( $S(t)$ )와 합성된다.

$$\dot{M}_{rc}(t) = \tilde{M}_{rc}(t) + \frac{\tilde{C}_f(t)}{\beta} \{ \tilde{M}_{ao}(t) + K(t) \cdot \text{FLC}(S(t - t_d)) \} \quad (18)$$

실제의 피드백 신호 FLC( $S(t - t_d)$ )는 시간지연  $t_d$ 를 감안한 것이다. 설명의 편의를 위하여, 이제부터 피드백 신호는 FLC( $S(t - t_d)$ )에서  $t_d$ 를 생략한 FLC( $S(t)$ )로 표현한다.

$$\text{FLC}(S(t)) = FZ\{V(v(t), VC(vc(t)))\} \quad (19)$$

여기서, FZ는 Table 1의 스케일링 요소와 Fig. 3

Table 1 Scaling factor of fuzzy set

Adjective	NB	NS	ZE	PS	PB
V	100	250	450	750	940
VC	-15000	-5000	0	5000	15000
A	-1	-0.4	0	0.4	1

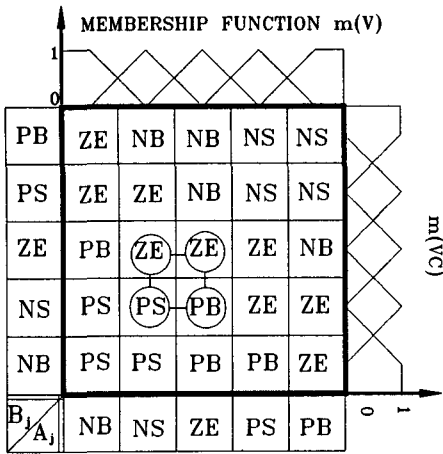


Fig. 3 Fuzzy rule base for feed-back

의 규칙기반에 의하여 정의되는 퍼지관계를 의미한다. 퍼지변수  $V$ 와  $VC$ 는 각각 크리스포한 값인 센서전압  $v(t)$ 와 센서전압의 변화율  $vc(t)$ 와 관련된 퍼지제어기에 대한 입력이다.

「어떤 상황에서 무엇을 할 것인가」라는 관점에서 단원성(modularity)이 뛰어난 Mamdani형 퍼지규칙<sup>(13)</sup>을 이용하면, 가능성높은 추론결과를 얻을 수 있다.

$$\text{ALSO}^n \{ \text{IF} (V \text{ is } A_i \text{ AND } VC \text{ is } B_i), \text{ THEN} (\Delta \text{ is } C_i) \} \quad (20)$$

여기서 퍼지변수  $A$ 는 출력을 뜻한다. 형용사  $A_i, B_i$ 와  $C_i$ 는 멤버쉽함수로 표현되는 속성 “NB, NS, ZE, PS, PB”중의 하나를 갖는데, 각각 “음으로 크다, 음으로 작다, 영 근처이다, 양으로 작다, 양으로 크다”를 의미한다. 또한 하첨자  $i$ 는 규칙의 번호이다.

규칙기반 설계의 요점은 정량적인 산소센서의 출력특성으로부터 정성적인 지식을 추출하여 퍼지규칙의 “상황-행동” 짝에 간결하게 반영하는 것이다. 그러나, 경험이나 지식을 다양하게 반영하는 것이 퍼지논리 적용의 이점인 동시에 조직적인 설계를 곤란하게 하는 단점도 된다. 역설적이지만, 조직적인 설계법일수록 설계의 유연성이 제한되므로 퍼지제어의 다양성이라는 특징과는 상충된다. 그러나 주어진 시스템에 적합한 수학적 제어구조는 퍼지규칙 설계에도 적합하다고 가정하고, 아래의 슬라이딩제어 방책으로 규칙기반의 후보를 얻는다.

(가)  $v(t)$ 가 경계역 밖이고  $vc(t)$ 의 크기가 작으면, 슬라이딩제어에 따른다.

(나)  $v(t)$ 가 경계역 안이면, 슬라이딩 조건식을 만족하는 범위에서 센서의 비선형성을 고려하여 제어 불연속을 평탄화한다.

(다)  $v(t)$ 가 경계역 안이고  $vc(t)$ 가 크면, 평탄화에 시간지연을 감안한다.

이렇게 얻는 기본규칙에서 설계자의 직관과 시행착오적인 방법으로 부분영역의 제어규칙을 만족스러운 성능이 얻어질 때 까지 수정하여서, Fig. 3과 같은 규칙기반을 고안한다. 규칙기반은 센서보다는 판단자로서의 역할이 크다고 간주되므로, 퍼지제어를 이용한 피드백은 센서신호만의 피드백보다 불확실성에 대하여 강인하다. 이는 퍼지제어가 언어적 제어규칙을 센서기술로 전환하여 산소센서의 불확실성을 정성적으로 다룰 수 있도록 하기 때문이다. 산소센서의 미분 불가능한 비선형 특성을 정성적으로 판단하여 제어불연속을 효과적으로 평탄화할 수 있는 규칙기반의 획득이 문제가 된다. 사실, 많은 연구에도 불구하고 퍼지규칙을 얻을 수 있는 일의적인 방법을 찾기는 어렵다. 이는 퍼지규칙의 배경이 축적된 경험이라는 사실에서 기인하는 것으로, 앞에서 설명한 방법은 시행착오를 줄일 수 있도록 비교적 조직화된 방법 중의 하나이다.

### 3.3 퍼지추론의 단순화

퍼지제어와 센서기술의 융합을 위해서는, 정성적인 추론결과와 정량화가 비퍼지칩에서 구현되어야 한다. 퍼지제어는 분할된 정보공간에 대한 if-then 형식의 규칙들을 종합하여 제어값을 추론하는 병렬 형식이므로, 퍼지칩이 아닌 마이크로 프로세서에서 구현하려면 많은 계산량이 문제가 된다. 본 연구에서는 주어진 상태에 가까운 대표점으로 카티지안(cartesian) 직교형의  $A_i \times B_i \times C_i$  트리플(triple)을 선정하고, 선정된 규칙만을 발화시키는 단순화된 퍼지추론방법<sup>(14)</sup>을 이용한다.  $[v(t), vc(t)]$ 에 대한 4개의 트리플의 작동구간 설정은,

$$\begin{aligned} A_i(t) < v(t) < A_{i+1}(t), \text{ and} \\ B_i(t) < vc(t) < B_{i+1}(t) \end{aligned} \quad (21)$$

작동역의 멤버쉽함수를 비작동구간과 분리되게 선정하면, 퍼지추론은 모든 규칙기반 대신에 지배역의 규칙만을 추론하여도 일반성을 잃지 않는다.  $v(t)$ 와  $vc(t)$ 의 크리스포값에 대하여, Fig. 4에서 보는 바와 같이 퍼지제어를 지배하는 다음의 4개의

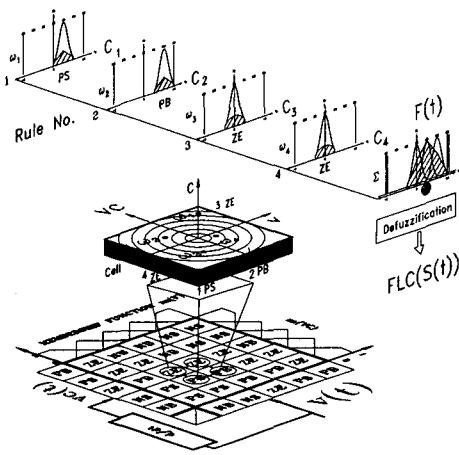


Fig. 4 Simplified fuzzy inference

규칙만으로 추론이 가능하다.

- R 1: IF  $V$  is NB AND  $VC$  is PS, THEN  $A$  is PS
- R 2: IF  $V$  is ZE AND  $VC$  is NS, THEN  $A$  is PB
- R 3: IF  $V$  is ZE AND  $VC$  is ZE, THEN  $A$  is ZE
- R 4: IF  $V$  is NS AND  $VC$  is ZE, THEN  $A$  is ZE

그리고, 조건문 연결어 AND를 위하여 만족도의 대수곱을, 규칙 문장간의 연결어 ALSO에는 대수평균을 이용하여 결론부의 멤버쉽함수를 합성한 조작량의 가능성 분포  $F(t)$ 를 구한다.

$$F(t) = \sum_{i=1}^4 w_i(t) \cdot C_{id} \quad (22)$$

여기서,  $C_{id}$ 는 멤버쉽함수  $C_i$ 가 역퍼지화된 언어 변수를 가장 잘 나타내는 확정값이다. 그리고, 아래 식과 같이 표현되는 조건문의 적합도  $w_i(t)$ 는 퍼지제어의 결론부에 대한  $i$ 번째 규칙의 공현도를 나타낸다.

$$w_i(t) = A_i^m(v(t)) \cdot B_i^m(vc(t)) \quad (23)$$

여기서, 상첨자  $m$ 은 멤버쉽함수의 값을 뜻한다. 이렇게 구한 조작량의 가능성 분포를 역퍼지화하여서, 제어에 필요한 크리스프한 값을 얻는다. 이를 위하여, 식 (22)와 무게중심법을 이용하면 단순화된 퍼지추론이 다음 식과 같이 얻어진다.

$$FLC(S(t)) = \frac{F(t)}{\sum_{i=1}^4 w_i(t)} \quad (24)$$

규칙공백이 없는 전체공간을  $N$ 개로 양자화하고 멤

버쉽함수를  $M$ 개로 이산화한 경우, 제안된 추론법은 계산량을  $4/(M * N^2)$ 배로 줄여서 비퍼지침에서 퍼지제어의 효과적인 구현을 가능케 한다.

### 3.4 퍼지 다단규칙

운전조건 변화에 따라, 엔진작동의 상태는 연비 개선에 중점을 둔 공회전이나 정속모드와 같은 정상 운전상태와 시동이나 급가속 등의 주행성능 위주의 과도 운전상태로 분류된다. 그리고 슬라이딩제어에서 흡인력을 주는 제어부분은 정상 운전상태의 공연비제어에는 적합한 제어구조이지만, 과도 운전상태에서는 오버슈트나 정상상태 도달시간을 크게한다. 두 상태를 모두 만족시키기 위한 절충설계의 방안으로, 퍼지가변구조제어에 Fig. 5의 블록선도에서 보는 바와 같이 퍼지 다단규칙을 도입한다.

이 방법은 조작량을 추론중인 결론부의 가능성 분포에서 직접 구하지 않고 동적인 멤버쉽함수를 표현하는 중간변수를 이용하여 처리하기 때문에, 규칙 분할과 규칙 삭감이 용이하다. 그러므로, 운전상태의 변화에 적응하도록 피드백 신호 FLC(S(t))를 보정하는 피드포워드 이득계획(feed-forward gain scheduling)을 퍼지 다단규칙을 이용하여 퍼지가변구조제어에 포함시킨다. 피드포워드 이득은 공기유량과 그 변화량을 변수로 하여 과도운전상태의 응답을 개선할 수 있는 Fig. 6과 같은 규칙 기반에 의하여 표현된다.

산소센서의 출력으로부터 추론 합성된 조작부의 멤버쉽함수를 중간변수로 잡은 퍼지 다단규칙은 다음과 같이 기술된다.

$$\text{ALS}^n \text{O}^n \{ \text{IF} (M \text{ is } D_i \text{ AND } MC \text{ is } E_i), \text{ THEN} (U \text{ is } F_i) \} \quad (25)$$

여기서, 상첨자  $nn$ 은 퍼지 다단규칙의 수를 나

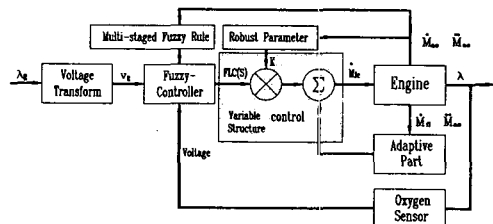


Fig. 5 Fuzzy variable structure controller

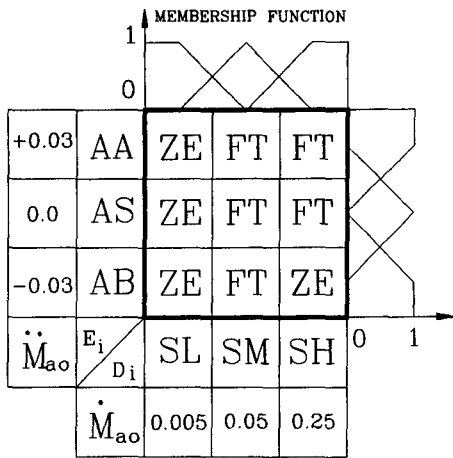


Fig. 6 Fuzzy rule base for feed-forward

타낸다. 퍼지변수  $M$ 과  $MC$ 는 각각 공기유량과 그 변화량에 관련된 퍼지제어기에 대한 입력이고, 퍼지변수  $U$ 는 출력을 뜻한다. 형용사  $D_i$ 는 “저속, 중속, 고속”을 의미하는 속성 “SL, SM, SH”을 갖고,  $E_i$ 는 “감속, 정속, 가속”을 의미하는 속성 “AB, AS, AA”를 갖는다. 그리고, 퍼지 출력변수에 대한 형용사  $F_i$ 의 속성으로 식(22)에서 보여지는  $F(t)$ 와 영(zero)이 주어지고, 이들은 각각 “FT, ZE”로 표시된다. 조작부의 가능성분포  $F(t)$ 가 중간변수의 역할을 하게된다. 이러한 퍼지 다단규칙에 대하여 단순화된 퍼지추론을 하면, 식(24)의 퍼드백 신호  $FLC(S(t))$ 는 다음과 같이 수정된다.

$$FLC(S(t)) = \frac{\sum_{i=1}^4 h_i(t) \cdot F_i(t)}{\sum_{i=1}^4 h_i(t)} \quad (26)$$

여기서,  $i$ 번째 규칙의 적합도  $h_i(t)$ 는 식(23)과 유사하게 표현된다.

$$h_i(t) = D_i^m(\dot{M}_{ao}(t)) \cdot E_i^m(\ddot{M}_{ao}(t)) \quad (27)$$

제안된 방법의 특징은 퍼지제어나 수학적인 슬라이딩제어의 보완적인 복합구조가 안정도와 강인성을 함께 보장하는데 유효하다는 것으로 요약된다. 즉, 퍼지제어만으로는 수학적 안정성을 논하기 어렵고, 슬라이딩제어 역시 센서의 불확실성을 보상할 수 없다. 퍼지가변구조제어는 스위칭 경계역 밖에서 리아프노프(Lyapunov) 의미의 안정성이 슬라이딩제어에 의하여 보장되고, 경계역 안에서는 센

서 불확실성에 대한 강인성이 퍼지제어로 얻어지는 이중 목적을 만족시키는 방법이다. 또한, 퍼지 다단규칙과 단순화된 퍼지추론은 비퍼지칩에서 적용성있고 실용적인 제어기의 구현을 가능케 한다.

#### 4. 실시간 시뮬레이션

퍼지가변구조제어기가 12비트의 A/D와 D/A 변환기를 사용한 16비트의 12 MHz 속도를 갖는 인텔 80C186 마이크로 콘트롤러에서 C언어로 구현된다. 엔진속도와 흡입 다기관관의 압력과 온도 등을 측정하여 인젝터에 연료공급률을 명령하는 제어기에서 입출력과 알고리즘의 계산에 소요되는 시간은 5 ms 이내이지만, 시뮬레이션 목적이 제어구조의 가능성을 보고자하는 것이므로 샘플링시간을 10 ms로 충분히 여유있게 선정한다. 제어기의 작동범위가 엔진속도 3000 rpm으로 제한되지만, 샘플링시간을 5 ms로 줄이면 6000 rpm까지 확장할 수 있다. 그러나, 설계여유를 위해서는 샘플링시간을 더욱 줄일 수 있는 프로그래밍법의 개선이 필요하다. 이러한 사실을 감안하더라도, 비퍼지칩에서 퍼지제어의 어느 정도의 고속구현이 가능하게 된 것은 단순화된 퍼지추론 때문이다. 이 방법은 퍼지칩과 비퍼지칩간의 호환성 문제를 배제할 수 있어서 설계자유도를 확장시킨다.

타당성 검증을 위해, 구현된 제어기를 엔진모델과 함께 실시간 시뮬레이션을 한다. 실시간 시뮬레이션의 핵심은 시험용 하드웨어가 연결 가능하고 엔진 시뮬레이션에 필요한 고속의 연산기능을 갖는 Applied Dynamics사의 AD100 컴퓨터이다.<sup>(15)</sup> AD100 컴퓨터 전용언어인 ADSIM으로 작성된 엔진모델의 프로그램의 실행과 구현된 제어기의 작동에 대한 입출력 명령은 주 전산기(host computer)인 VAX컴퓨터에 의하여 주어진다.

흡기계 모델오차  $E_a$ 를 임의의 주파수 역에서 최대 30퍼센트로 잡고, 연료계 모델오차  $E_r$ 도 0.3 Hz이내의 주파수 역에서 최대 30퍼센트로 여유있게 선정한 엔진모델에 대하여 (a) 슬라이딩제어, (b) 퍼지가변구조제어, (c) 퍼지 다단규칙을 이용한 퍼지가변구조제어와 같은 방법을 이용하여 설계된 제어기들을 작동조건 2000 rpm인 정상 운전상태에서 시뮬레이션한 결과, Fig. 7과 같은 공연비를 얻었다. (a)의 슬라이딩제어 보다 퍼지가변구조제어에서 채터의 감소가 큰데, 이는 퍼지논리로

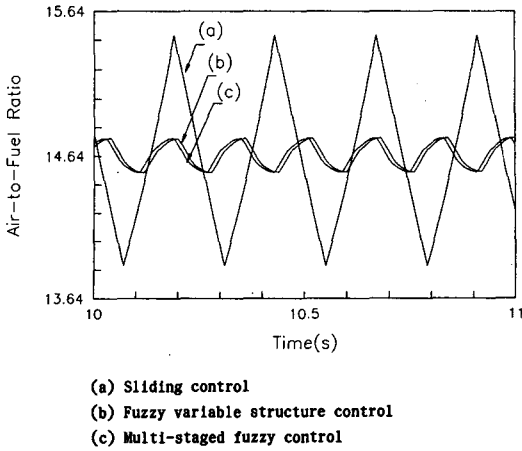


Fig. 7 Comparison of air to fuel ratio for steady state

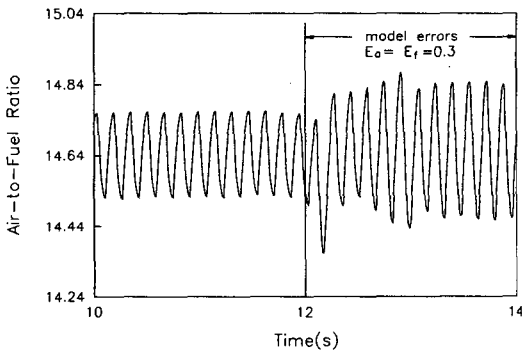
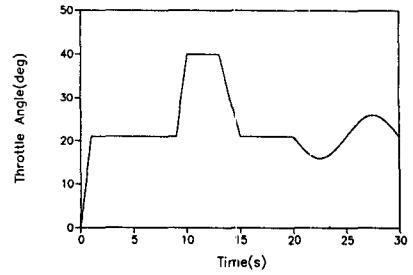


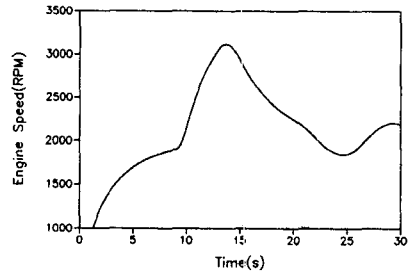
Fig. 8 Air to fuel ratio for model errors

산소센서의 불확실성을 보상하는 효과에서 기인한다. (b)와 (c)가 비슷한 크기의 채터링을 갖는 이유는 두 방법이 정상상태 운전에서는 유사하기 때문이다. 슬라이딩제어의 스위칭 때문에 현용되는 PID형 제어기에 비하여 공연비 주파수가 상대적으로 높은 5 Hz 정도가 됨을 알 수 있다. 이는 바람직한 현상은 아니지만 제어기 성능을 악화시키는 수준도 아니다.

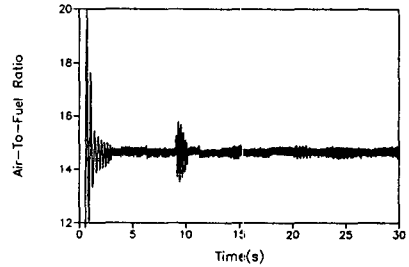
강인성 시험을 위하여 충분히 크게 가정한 모델 오차를 퍼지가변구조제어에 포함하여도, Fig. 8에서 보는 바와 같이 채터링의 크기가 약간 증가될 뿐, 설정역 내에서 공연비를 유지하자는 제어목표는 여전히 만족된다. 이러한 결과는, 채터링 감소를 위하여 설계시 고려하는 모델오차의 허용범위를 줄여서 강인성을 희생시켜야 되는 슬라이딩제어와는 달리, 퍼지가변구조제어가 경계역 안에서는 퍼지제어



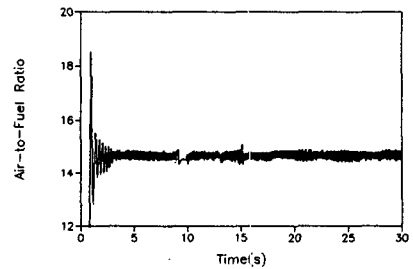
(a) Driving scenario



(b) Engine speed



(c) Fuzzy controller



(d) Multi-staged fuzzy controller

Fig. 9 Comparison of air to fuel ratio for transient state

를 이용한 평탄화로 성능강인성을 개선하고 경계역 밖에서는 슬라이딩제어에 의하여 안정도 강인성을 보장함을 보인다.

과도 운전상태의 공연비 응답을 보기 위하여, Fig. 9(a)처럼 고안된 「급속히 변하는 운전명령」으



로 시뮬레이션을 한다. 그 결과, Fig. 9(b)의 엔진 속도에서 보는 바와 같이 급가속과 감속모드에서는, 퍼지가변구조제어에 퍼지 다단규칙구조를 도입한 것이 효율적으로 과도상태의 공연비를 개선한다는 사실을 Fig. 9(c)와 Fig. 9(d)에 나타난 시동 후 10초 근방의 공연비 비교에서 알 수 있다. 이는 정상상태에서는 퍼지가변구조제어의 공연비 응답을 그대로 유지하면서, 퍼지 다단규칙에 의하여 급가속이나 감속과 같은 운전모드 변화에 적응하여 공연비의 과도한 오버슈트를 개선하기 때문이다. 시동시 공연비가 희박해지는 사실은 설계된 제어가 원활한 시동을 위하여 농후한 공연비를 유지하게 하는 별도의 제어규칙을 고려하지 않았기 때문이다. 실제 엔진개발에서는 시동모드를 위해서 냉각수 온도측정과 별도의 제어규칙이 필요하다. 그러나 퍼지 다단규칙은 이 경우에도 운전모드별 제어규칙간의 원활한 변환을 위해서 이용될 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 연료분사제어기의 설계에 퍼지 다단규칙을 이용한 퍼지가변구조제어 방법을 제안하였다. 이것은 비선형 엔진모델에 대한 적용성이 뛰어난 가변구조제어의 틀에 현재 널리 쓰이고 있는 산소센서의 불확실성을 고려하기 위한 퍼지제어를 합성하여서, 센서 융합을 시도한 방법이다. 특히 퍼지 다단규칙과 단순화된 퍼지추론법의 도입은 운전조건 변화에 적응성을 부여하고 비퍼지칩에서 퍼지제어의 구현을 가능케 하여서, 제안된 방법이 공연비제어 설계에 실용적이 되게 한다. 정상 운전모드와 급가속과 감속같은 과도 운전모드에서는, 타당성있는 모델오차 감안하더라도, 설계된 제어가 설정역  $14.64 \pm 0.2$ 에서 공연비를 유지할 수 있음을 실시간 시뮬레이션을 통하여 입증하였다. 제안된 방법의 장점을 요약하면,

(1) 값싼 산소센서와 비퍼지칩으로 정밀한 공연비제어기를 구현할 수 있다.

(2) 센서의 불확실성 보상에 필요한 규칙기반의 설계가 유연하게 조정된다.

(3) 퍼지 제어시스템의 안정도와 강인성을 해석적으로 보장할 수 있다.

(4) 퍼지 다단규칙은 운전조건 변화에 대한 적응성을 높인다.

그러나, 본 논문의 제어기는 제안된 방법의 가능

성을 보기 위한 단편적인 것이므로, 실제 제어가 개발에서는 실험을 통한 모델오차의 감소를 위한 추가적인 강인성변수의 조정과 규칙기반의 산정이 필요하고, 시동모드를 위한 별도의 제어규칙이 부가되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) Canale, R., Carlson, C., Winegarden, S. and Miles, D., 1978, "General Motors Phase II Catalyst System," SAE Paper 780205.
- (2) Cho, D. and Hedrick, J. K., 1988, "A Nonlinear Control Method for Fuel Injected Automotive Engines," ASME Journal of Engineering Gas Turbines and Power, Vol. 110, No. 2, pp. 313 ~ 320.
- (3) 김종식, 황이철, 1989, "연료분사식 엔진을 위한 슬라이딩모드 제어기 설계," 대한기계학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 1147~1155.
- (4) 김종식, 고용서, 강건용, 황이철, 1991, "MPI 가솔린 엔진용 슬라이딩모드 연료분사 제어기 설계 및 컴퓨터 제어," 대한기계학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 1147~1155.
- (5) Slotine, J. J. E. and Sastry, S. S., 1983, "Tracking Control Nonlinear System Using Sliding Surface with Application to Robot Manipulators," Int. J. of Control, Vol. 38, No. 2, pp. 465 ~ 492.
- (6) 최종호, 윤영준, 고상근, 노승탁, 1991, "신경 회로망을 이용한 연료분사식 자동차공연비 제어," '91한국자동차제어학술회의논문집(국내학술편), pp. 1006~1011.
- (7) 山本哲彦, 金城 寛, 玉城史朗, 1991, "ガソリンエンジンの空燃比ファジィ制御," 日本機械學會論文集(C編), Vol. 57, No. 542, pp. 140~143.
- (8) Nam, S. K., Kim, J. S. and Yoo, W. S., 1992, "Fuzzy Sliding-Mode Control of Gasoline Fuel- Injection System with Oxygen Sensor," JSME International Journal of Dynamics, Control, Robots, Design and Manufacturing, Paper No. 923020, Received June 1992.
- (9) Falk, C. D. and Mooney, J. J., 1980, "Three-way Conversion Catalyst Effect of Closed-Loop Feed-Back Control and Other Parameters on

- Catalyst Efficiency," SAE Paper 80046.
- (10) Cho, D. and Hedrick, J. K., 1991, "Sliding Mode Fuel Injection Controller: Its Advantages," ASME Journal of Dynamic systems, Measurement and Control, Vol. 113, No. 3, pp. 537~541.
- (11) Astrom, K. J. and Wittenmark, B., 1984, Computer Controlled Systems, Prentice-Hall, pp. 180~181.
- (12) William, J. F., 1980, "Zirconia Oxygen Sensor-an Equivalent Circuit Model," SAE Paper 800020.
- (13) Mamdani, E. H., 1976, "Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controllers," Int. J. of Man-Machine Study, Vol. 8, No. 6, pp. 669~678.
- (14) 남세규, 김종식, 유완석, 1992, "퍼지제어 셀을 이용한 퍼지논리제어기의 조직적인 설계방법," 대한기계학회논문집, 제16권, 제7호, pp. 1234~1243.
- (15) Powell, B. K., Lawson, G. P. and Hogh, G., 1988, "Advanced Real-Time Powertrain Systems Analysis," ASME Journal of Engineering Gas Turbines and Power, Vol. 110, No. 3, pp. 325~333.