

PID 및 적응학습 제어기법을 이용한 자동차 엔진의 공기-연료비 제어시스템 연구

이덕규 최돈 우광방
연세대학교 공과대학 전기공학과

PID and Adaptive Learning Control for Engine Air-Fuel Control System

Deong Kyoo Lee Don Ckoi Kwang Bang Woo
Dept. of Electrical Engineering
Yonsei University

Abstract

In the air-fuel control of automotive engine to improve its efficiency, fuel economy and less emissions, conventional control methods using O₂ sensor or the lean air-fuel ratio sensor provide only open control in rich conditions. Control with a wide range air-fuel sensor makes it possible to employ closed loop control for all engine conditions including rich combustion. With a wide range A/F sensor and A/F transfer functions, a PID control system is constructed which employs an learning scheme. A/F controller is designed which enables to improve the ability of its compensation for sensors and actuators, and its control operation is evaluated by computer simulation.

1. 서론

최근의 승용차에는 전자식 가솔린 엔진이 많이 사용되고 있다. 전자식 가솔린엔진의 사용은 배기가스 규제를 만족시키고 연료의 경제성을 높이게 된다. 초기에는 산소센서(O₂ sensor)를 이용하여 이상 공기-연료비(air-fuel ratio; A/F ratio)로의 제어를 목표로 하였고 이어 희박 공기-연료비 센서를 개발하여 희박 공기-연료비를 제어하였다. 최근에는 이들의 작동범위를 넓힌 광영역 공기-연료비 센서가 개발되었다. 광영역 공기-연료비 제어는 유연한 토오크 운영과 연료절약과 함께 더 나은 과도 특성을 제공하고 화학식량적(stoichiometric) 영역을 포함하여 광범위한 공기-연료비 영역을 감지하며 특히 시동, 아이들링, 과부하 상태와 과도 상태에 대해서 희박 센서보다 더욱 효과적이다. O₂ 센서나 희박 센서를 사용하는 전통적인 jump and jump 제어

방법은 농후 조건들에는 효과를 거두지 못한다. 한편 광영역 공기-연료비 센서를 사용하는 제어는 농후 연소를 포함한 모든 엔진 상태에 대해서 페루프 제어를 적용할 수 있다. 따라서 광영역에 걸친 공기-연료비를 제어함으로써 유해 배기가스량을 더욱 효과적으로 감소시킬 수 있을 것이다.

이 논문에서는 광역 공기-연료비 센서의 특성과 공기-연료비 전달함수를 이용하여 연료제어를 위한 PID 제어시스템을 구성하고 또한 학습맵(learning map)을 이용하는 적응학습제어(Adaptive learning control)를 적용하여 센서와 액츄에이터에 대한 보상능력을 개선시키는 공기-연료비 제어기를 구성하고 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 제어동작 특성을 평가한다.

2. 시스템 구성

그림 1은 광영역 공기-연료비 제어에 대한 엔진의 시스템 구성을 나타낸다. 핵심적인 센서들 중의 하나인 광영역 공기-연료비(A/F) 센서가 배기 다기관에 설치되어있다. 다른 중요한 액츄에이터(actuator)는 초음파 분사기로 벤츄리에 한개가 부착된 단일포인트 인젝터(single point injector:SI)이다. 초음파 분사기는 흡기다기관에서의 연료점성을 감소시키고, 더 나은 연소를 이루도록 인젝터로부터 분사되는 연료입자를 최소화시킨다. 공기 흐름율은 hot-wire(H/W) 공기 흐름 미터기에 의해서 감지된다. 엔진은 5600 cc 용량의 8개의 실린더로 이루어져 있으며 16 bit 마이크로 컴퓨터를 가진 컨트롤러가 엔진제어와 고속 데이터 습득에 사용된다. 그림 2는 광영역 A/F 센서의 특성으로서 공기과잉비는 $\lambda = 1/14.7 (\dot{M}_{ai}/\dot{M}_{fi})$ 이다. 여기서 \dot{M}_{ai} 은 공기 흐름율이며 \dot{M}_{fi} 는 분사된 연료 흐름율을 나타낸

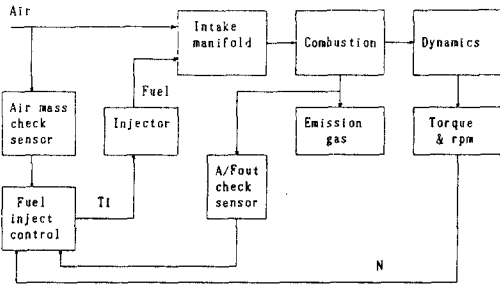


그림 1 엔진 모델의 구성도

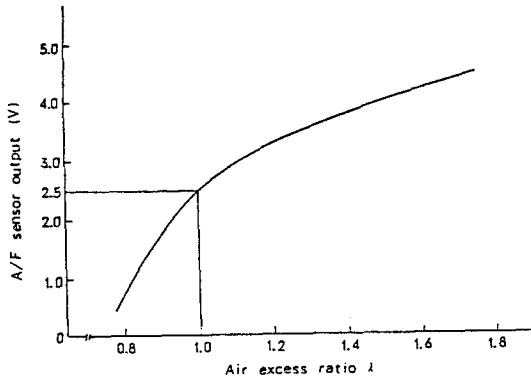


그림 2 광영역 공기-연료비 센서의 특성

다. 공기 과잉비가 $\lambda=1$ 일때 출력 전압은 2.5 V 이며 감지할 수 있는 공기 과잉비 λ 의 범위는 0.8에서 1.8이다.

3. 공기-연료비 전달 함수와 그 제어

3.1 공기-연료비 전달함수

그림 3은 A/F 전달함수를 보인다. 이 모델은 엔진의 공기-연료비 전달함수를 묘사한 것으로써 두개의 입력과 출력을 갖는 공기-연료비의 선형적 모델이다. 공기 흡입장치에서 공급된 공기와 연료가 흡기다기관 내에서 빠른흐름과 느린흐름으로 나누어진다. 빠른흐름은 공기와 기화 또는 미

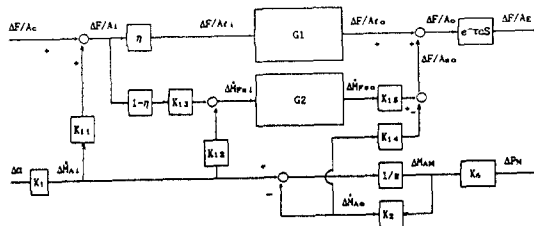


그림 3 공기-연료비의 선형적 모델

립자화된 연료이며 그 외에는 필름과 같은 느린흐름 연료이다. 이 두 흐름의 분리비(spilt ratio)는 η 이다. 빠른흐름의 시간지연을 τ_f 라 하고 흡기다기관을 통해 전달되는 동안의 유연성을 고려하면

$$G_1 = \frac{e^{-(1-0.7\epsilon_f)\tau_f}}{\epsilon_f \tau_f s + 1} \quad (1)$$

$$\tau_f = \frac{V_m}{e v V_d} T_s \quad (2)$$

여기서,
 V_m : 흡기다기관 체적
 $e v$: 체적효율
 V_d : 행정체적
 T_s : 샘플링 시간

한 실린더의 흡기밸브와 다음 실린더의 흡기밸브가 동작하는 시간을 샘플링 시간으로 잡으면 샘플링 시간 T_s 는

$$T_s = 120 / (N_c N) \quad (3)$$

여기서 N_c 는 실린더의 수, N 은 엔진의 속도를 나타낸다.

(1)식에서 선입선출지연 τ_f 후의 흡기다기관의 출력은 입력의 50%가 나타난다. 여기서 ϵ_f 는 엔진실험에서 얻을 수 있는 데이터이다. 느린흐름 연료는 흡기다기관 입구에서 지연필터의 성질을 나타내는 연료막을 형성하며 점차 기화되어 빠른흐름과 같은 전달지연과 유연성을 갖게된다.

$$G_2 = \frac{e^{-(1-0.7\epsilon_f)\tau_f}}{\epsilon_f \tau_f s + 1} \frac{1}{\tau_f s + 1} \quad (4)$$

여기서 τ_f 는 연료막 지연필터의 시상수로서 τ_f 의 1.5배가 되므로 (4)식에서 $(\epsilon_f \tau_f s + 1)$ 항을 무시할수 있다. 따라서 위의 G_2 는 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$G_2 = \frac{e^{-(1-0.7\epsilon_f)\tau_f}}{\tau_f s + 1} \quad (5)$$

초음파 분사기를 사용하는 시스템에서는 흡기다기관내의 느린흐름이 존재하지 않아 연료가 공기와 함께 전달된다. 따라서 흡기다기관내의 공기-연료비 전달함수 $G_{man}(s)$ 는 식 (1)에 의해 다음과 같다.

$$G_{man}(s) = \frac{e^{-(1-0.7\epsilon_f)\tau_f}}{\epsilon_f \tau_f s + 1} \quad (6)$$

따라서 흡기다기관의 출구에서 실린더를 거쳐 전 공기-연료비 센서가 위치한 배기다기관까지의 전달함수 $G_{cyl}(s)$ 는 3 행정의 전달지연을 가지므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{cyl}(s) = e^{-(3/4)N_c T_s s} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 공기-연료비 모델의 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{e^{-(1-0.7\epsilon_f)\tau_f s - (3/4)N_c T_s s}}{\epsilon_f \tau_f s + 1} \quad (8)$$

위의 전달함수를 시간지연 T_d 와 시상수 T_c 로 나타내면

$$G(s) = \frac{e^{-T_d s}}{T_c s + 1} \quad (9)$$

여기서,

$$T_d = (1 - 0.7 \epsilon_f) r_f + (3/4) N_e T_s$$

$$T_c = \epsilon_f r_f$$

시간지연을 가지는 연속시간 시스템은 다음과 같은 상태공간 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A x(t) + B u_c(t-T_d) \\ y(t) &= C x(t) \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 식 (9)을 상태 공간 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -T_c x(t) + T_c u_c(t-T_d) \\ y(t) &= x(t) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 u_c 는 공기-연료비 명령, x 는 상태변수, y 는 출력 공기-연료비이다. 시간지연 T_d 가 샘플링 시간 T_s 보다 큰 경우는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_d = d T_s + T' \quad 0 < T' < T_s \quad (12)$$

d 는 정수이다. 그러므로 식 (10)을 샘플링한 식은 아래와 같다.

$$y(kT_s + T_s) = \Phi y(kT_s) + \Gamma_0 u(kT_s - dT_s) + \Gamma_1 u(kT_s - dT_s - T_s)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{-T_s/T_c} \\ \Gamma_0 &= \int_{T_s-T'}^{T_s} e^{-T_s/T_c} ds T_c^{-1} \\ \Gamma_1 &= e^{-(T_s-T')/T_c} \int_{T_s-T'}^{T_s} e^{-T_s/T_c} ds T_c^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

윗 식은 시간지연을 가지는 공기-연료비 모델을 샘플링한 상태공간 형태의 식이다.

3.2 PID 제어기의 구성

공기-연료비는 연료분사시간 T_f 를 증가시키거나 감소시킴으로써 제어된다.

$$T_f = \left\{ (1 + \beta) T_f \text{ COEF} / \lambda \right\} + T_v$$

$$T_p = K Q_a / N \quad (14)$$

여기서,

- K : 인젝터 계수
- T_p : 부하에 따른 기본적인 연료분사시간
- COEF : 물 온도 계수 등
- λ : 공기 과잉비
- T_v : 밧데리 전압 보상시간
- N : 엔진속도

방정식 (14)로 부터 연료분사시간은 공기흐름 Q_a 와 엔진속도 N에 의해 영향받는다.

PID 제어기에서의 β 항은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \beta &= \beta_p + \beta_i + \beta_d \\ \beta_p &= K_p e \\ \beta_i &= K_i \Sigma e \\ \beta_d &= K_d e' \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

- K_p : 비례이득
- K_i : 적분이득
- K_d : 미분이득
- e : 목표 A/F와 출력 A/F 사이의 오차
- e' : 시간에 대한 오차의 미분

엔진모델은 2개의 파라미터, 전달지연과 시상수로 나타낼 수 있다. 8개의 실린더 엔진의 경우에 전달지연 T_d 와 시상수 T_c 는 방정식 (16)와 (17)에 의해서 표현된다.

$$T_c = 2.6486 T_s \quad (16)$$

$$T_d = 7.0889 T_s \quad (17)$$

이들 방정식은 T_s 가 엔진속도에 대한 방정식이므로 실린더로의 공기흐름 속도가 높은 엔진속도에서 증가하고 전달시간과 시상수는 감소한다는 사실에 기초한다.

우리가 사용하는 엔진모델은 위의 방정식을 따르는 A/F 전달특성을 갖고며 PID제어기의 이득은 Ziegler-Nichols 방법을 사용하여 방정식 (18)-(20)로서 주어진다.

$$PI: K_p = 0.9 T_c / T_d \quad PID: K_p = 1.2 T_c / T_d \quad (18)$$

$$K_i = 3.0 T_d \quad K_i = 2.0 T_d \quad (19)$$

$$K_d = 0.5 T_d \quad (20)$$

K_i 와 K_d 는 엔진속도에 의존한다. 그러므로 매 회전마다 K_i 와 K_d 의 값을 계산하는 것이 필요하다. 회전동기 샘플링을 사용하면 K_i 와 K_d 값은 일정하게 된다. 그러므로 엔진회전에 대한 A/F를 동기적으로 얻을 수 있다. 그림 4에 보인것과 같이 A/F 센서의 출력은 엔진회전과 함께 동기적으로 샘플링된다. 기준맵(reference map)(A/F)은 기본적인 분사시간 T_p 와 엔진속도 N에 의해 결정된다. PID 제어기는 목표 A/F값과 플랜트 출력 A/F와의 오차 e 를 기반으로 β 를 계산하며 이때 연료 분사시간 T_f 는 β 에 의해 결정된다.

4. 연료비 학습제어

자동차 엔진에 대해 PID 제어기와 함께 A/F 제어가 적용될 수 있다. 그 이유는 센서들과 액츄에이터들에 대한 그 보상능력 때문이며 PID 제어기는 전체시스템의 안정도 문제와 기본적인 제어입력부분을 담당하고, 학습제어기는 PID 제어기가 해결하지 못하는 부분을 담당하는 형태가 된다. 광영역 A/F 센서를 가진 학습제어는 정상상태 학습방법의 향상, 명확한 과도 학습, 농후영역과 희박영역, 그리고 냉시동(cold starting)상태를 포함하는 N과 T_p 에서의 학습영역의 확장이라는 측면에서 O_2 센서에서의 경우보다 더욱 효과적이다. 그림 4에 광영역 A/F 제어에 대한 전체시스템의 구성도가 나타나 있다. 이 시스템은 PID 제어기, 정상학습 블럭과 과도학습 블럭으로 이루어져 있으며 확장된 페루프 제어가 실현된다.

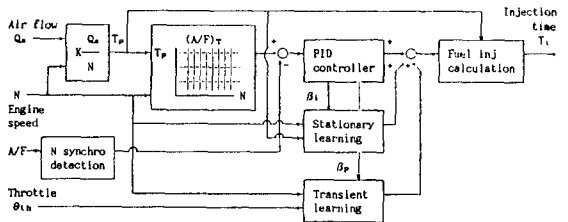


그림 4 광영역 공기-연료비 제어를 위한 전체시스템 구성도

4.1 정상상태 적응학습 제어

그림 5 는 정상상태 A/F 학습의 흐름도를 나타낸다. 정상상태 학습에서 학습맵(learning map)은 엔진속도 N 과 부하 T_p 로 부터 구성된다. 이 흐름도는 학습맵 $\beta_1(N, T_p)$ 의 값을 새로 쓰는 동작을 나타낸다. 그림에서 옅게 파인 블럭은 판단을 표시한다. 만일 정상상태와 학습허가, 그리고 β_1 한계값에서의 모든 판단이 "Yes"이라면 정상학습은 다음과 같이 실행된다. : 학습포인트(N, T_p)를 결정하고 β_1 을 다시 쓰고, β_1 를 0으로 놓는다.

4.2 과도학습

과도학습 알고리즘의 개념은 목표 A/F가 화학식량적 일 때 운전자가 가속기를 동작시킴에 따라 A/F 응답이 희박과 농후 스파이크(spike)의 형태를 나타내는데 이러한 조건들 하에서 비례이득 β_p 는 동조되지 않는 과도투입을 반영한다. 따라서 비동기 과도투입은 비례항에 의해 보상된다.

그림 6는 과도학습 알고리즘의 흐름을 나타낸다. 그림과 같이 모든 판단이 "Yes"라면 과도학습은 완성된다. 과도 학습맵(learning map)은 엔진속도 N 과 과도분사시간 T_p 에 의해 정의된 2차원 맵(map)이다. 과도학습은 학습지점을 결정하고 학습값을 다시 쓰는 과정이다.

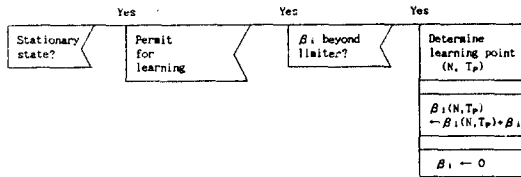
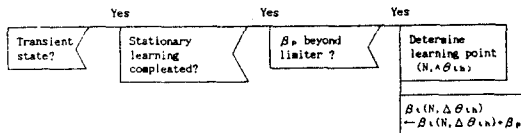


그림 5 정상상태 공기-연료비의 학습 흐름도



Flow chart of transient A/F learning

그림 6 과도상태 공기-연료비의 학습 흐름도

5. 시뮬레이션 및 결과고찰

제어이득을 결정하는 단계를 다음과 같이 하였다.

- 1) Ziegler-Nichols 방법에 의한 초기 이득 셋팅
- 2) 오버슈트가 없고 작은 정상상태 오차에 대한 표본을 사용한 PI와 PID 제어 이득 결정

5.1 공회전 특성

PI와 PID제어를 비교하면 PID가 공회전 상태에 대해서 PI보다 낫다. 그 이유는 미분항 K_d 의 영향으로 정상상태 오차가 더 작기 때문이다. 먼저 Ziegler-Nichols 방법에

의해 구한 초기 이득값 $K_p=0.4484$, $K_i=0.3034$, $K_d=0.0759$ 에 대한 공기-연료비의 출력이 그림 7(a)에 나타나 있다. 그림 7(b)에서 공회전 상태에 대한 PID의 이득들 중 짧은 상승시간, 즉 오버슈트가 없고 작은 정상상태 오차를 갖는 최고의 특성은 (b) $K_p=0.0791$, $K_i=0.7012$, $K_d=0.070$ 에 대해서 얻어진다. 제어이득으로서 $K_p=0.20$, $K_i=0.90$, $K_d=0.08$ 을 갖는 (c)의 경우는 (b) 보다 정상상태 오차가 크다. 따라서 적분항 β_1 는 오차에 따라 크게 변하고 아울러 연료분사시간 T_1 도 큰 오차를 나타내며 연료분사시간이 불안정한 상태가 된다.

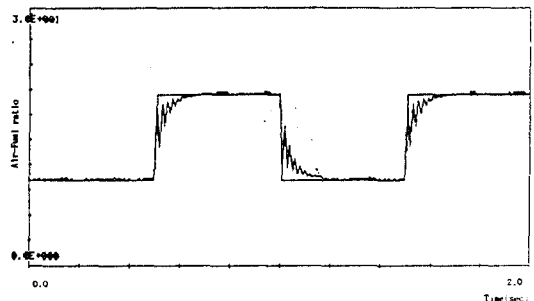
5.2 WIDE OPEN 트로틀 특성

와이드 오픈 트로틀(wide open throttle :WOT)의 경우에는 PI 제어가 정상상태 A/F 오차의 관점에서 PID 보다 우수하다. 그 이유는 WOT 에 대해 공기 흐름 변동율이 더욱 커지므로 미분항이 존재한다면 증폭되고 전반적인 제어동작은 PI제어기 보다 약화된다. 그림 8의 (a)는 Ziegler-Nichols 방법에 의한 $K_p=0.3363$, $K_i=0.2127$ 일때의 출력을 나타낸다. 오차가 적은 최고의 특성은 (b)에 나타난 것과 같이 $K_p=0.0355$, $K_i=0.5611$ 에서 얻어진다. (c)의 그림은 (a)와 (b)에서의 PID 이득에 대한 각각의 PID 출력 β 를 나타낸다.

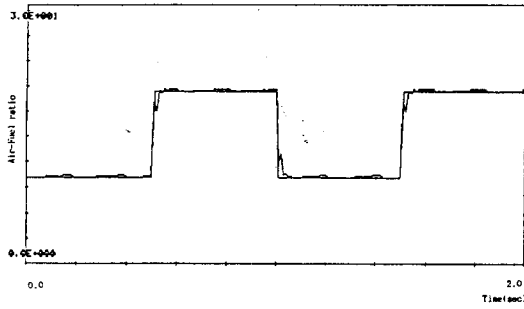
윗 부분에서 서술한 것과 같이 다음과 같은 운전조건에 따라 제어 파라미터를 변화시키는 것이 필요하다.

- 1) 공회전 상태 $\dots \dots \dots K_p=0.0791, K_i=0.7012, K_d=0.0700$
- 2) WOT $\dots \dots \dots K_p=0.0355, K_i=0.5611, K_d=0.0000$

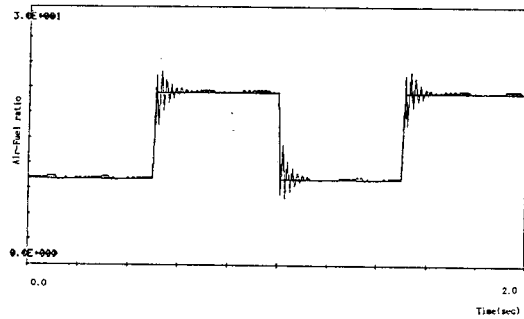
이 결과로 부터 PID 이득은 과증된 부하로 인해 더 작아져야만 한다. 2)의 경우, 미분항이 A/F 응답을 악화시키기 때문에 Q_a 변동이 1)에서 보다 더 커진다. 이로 부터 미분항 K_d 는 Q_a 변동을 증폭시킨다는 사실을 알수 있다. 목표 A/F가 변화할 때 약간의 채터링(chattering)이 초기상태에서 발생한다. 그러므로 기준맵(reference map)은 T_p 의 이탈에 의해 발생하는 채터링을 피하기 위해 N 과 T_p 에 관한 히스테리시스(hysteresis) 함수를 가져야만 한다.



(a) Ziegler-Nichols 방법에 의해 구한 초기 이득값에 대한 공기-연료비의 출력

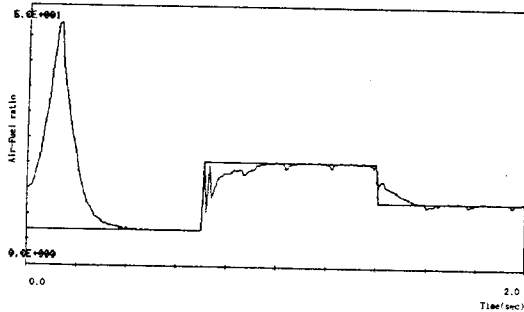


(b) 최고의 특성을 갖을 때의 공기-연료비의 출력

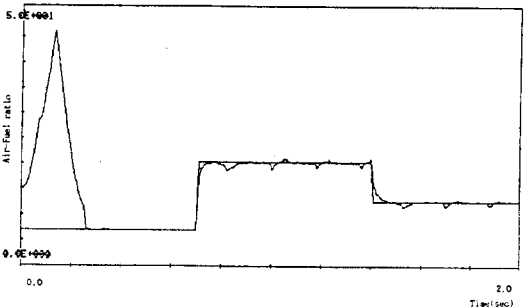


(c) 다른 이득에 대한 공기-연료비의 출력

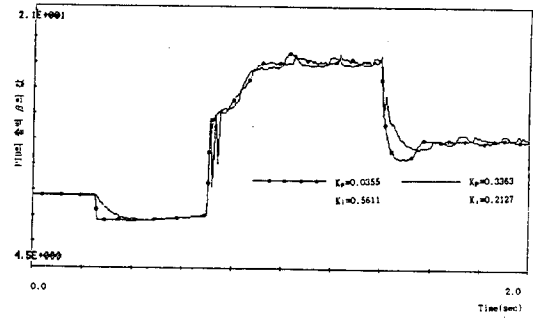
그림 7 공회전 상태에서의 이득에 따른 공기-연료비 출력



(a) Ziegler-Nichols 방법에 의해 구한 초기 이득값에 대한 공기-연료비의 출력



(b) 최고의 특성을 갖을 때의 공기-연료비의 출력



(c) (a)와(b)의 이득에 대한 각각의 PID 출력 β

그림 8. WOT 상태에서의 공기-연료비 출력과 PID의 출력

6. 결론

광영역 A/F 센서와 초음파 분사기를 가진 광영역 A/F PID 제어 시스템에서 Ziegler-Nichols 방법에 의해 엔진의 속도에 관계하는 초기이득으로부터 오버슈트가 작고 정상 상태에 빠르게 도달할 수 있게 하는 PID 계수를 구할 수 있었다. PID 제어기만으로도 시스템의 안정도를 유지하고 플랜트의 입력으로써 만족스러운 결과를 나타내었지만 트로플 각의 변화에 따르는 공기-연료비의 변화에 PID 제어기만으로는 제어가 어려우며 따라서 이를 보정하는 제어기로 시 학습제어의 필요성을 알 수 있었다. 이러한 학습방법을 사용하여 파라미터들을 적응적으로 제어하기 위해서는 여러 가지 운전상태에 대한 맵데이터가 필요하게 되며 블랙박스 식으로 접근하여 구성하는 엔진모델의 신뢰성도 문제가 된다. 따라서 이들 문제를 해결하고 나서 퍼지제어와 같은 운전자 경험을 정량화시킨 제어이론의 적용은 보다 향상된 제어기능을 구현하게 될 것이다.

7. 참고문헌

- [1] Junichi Ishii, Matsuo Amano and et al., "Wide Range Air-Fuel Ratio Control System", SAE Paper No. 880134, 1988.
- [2] D.J.Dobner, "Dynamic Engine Models for Control Development Part I: Nonlinear and Linear Model Formulation", GMR Report GMR - 3783, Jan 13, 1982.
- [3] C.F.Taylor, "The Internal - Combustion Engine in Theory and Practice", 2nd Edition, The M.I.T Press, Cambridge, Massachusetts.
- [4] 김유남, "엔진 시스템 모델링과 컴퓨터 해석", 박사학위논문, 1989년 6월, 연세대학교 대학원.
- [5] 박희철, "Smith-Predictor 기법을 이용한 엔진 공기-연료비 제어의 컴퓨터 해석", 석사학위논문, 1989년6월, 연세대학교 대학원.