

Smith-predictor 기법을 이용한 엔진
공기-연료비 제어에 관한 연구

박 의철, 김 유남, 이 덕규, 조 장원, 우 광방

연세 대학교 전기공학과

A Study on Engine A/F Control by Smith-predictor

Hee-Chul Park, You-Nam Kim, Deog-Kyoo Lee, Jang-Won Jo, Kwang-Bnag Woo

Dept. of Electrical Eng. Yonsei University

Abstract

Recently electronic control of engine is used to satisfy exhaust gas restriction and to increase fuel economical efficiency and acceleration.

In this paper, Smith-predictor method is applied to increase control performance for A/F command and disturbance. A/F control performance is simulated by A/F command and disturbance of Chevrolet 5.7 liter engine and Toyota 4A-ELU engine.

This method can be applied to A/F controller so that more accurate and rapid A/F control is possible.

1. 서 론

초기의 공기-연료비 제어는 산소 센서를 이용하여 이상 공기-연료비로의 제어를 목표로 하였다. 산소 센서는 공기-연료비의 농후, 희박 상태를 판단하므로 선형적 제어를 실현할 수 없었다[1]. 1985년 공기 공급을 높여 엔진 효율을 증대시켜 연료의 경제성을 높이고 배기 가스 중 CO와 NOx를 감소시킬 수 있는 희박 연소에 대한 연구가 시작되었다[3,4]. 희박 연소는 비교적 불안정한 영역에서 작동하므로 좀더 정확한 제어 기술이 필요하게 되었다. 1988년 J. Ishii[5]는 PID 제어를 이용한 공기-연료비 제어 알고리즘을 제시하였다. PID 제어 기법을 이용한 시스템은 공기-연료비 오차는 보상을 하나 공기-연료비 모델의 큰 지연 시간으로 인하여 입력 공기-연료비 명령의 변화에 대해서는 제어할 수 없다. 따라서 입력 공기-연료비 명령의 변화에는 개루우프로 처리하여야만 한다. 위의 시스템은 Ziegler-Nichols 방법을 이용하여 PID 파라미터를 구하거나 엔진 실험을 통하여 각 동작 조건에 대한 PID 파라미터를 측정하여야 한다. 또한 PID 제어는 시간 지연이 크지 않은 좋은 응답을 기대할 수 없다.

본고에서는 Smith-predictor 기법을 이용하여 공기-연료비 제어를 구현한다. Smith-predictor는 신호의 지장이 필요하므로 아날로그 시스템에서는 응용이 어려우나 디지털 시스템에서는 용이하다[8]. 또한 디지털 시스템에서는 Smith-predictor 내의 시간 지연을 단순한 이동 명령으로 쉽게 처리할 수 있다. 이 시스템은 시간 지연에 상관없이 일정한 이득을 가지므로 시간 지연을 가지는 프로세서에 대하여 좋은 응답을 나타낸다. 이 시스템은 외란 뿐만 아니라 입력 공기-연료비 명령에 대해서도 빠른 응답을 나타낸다. 따라서, 희박 연소 상태에서 공기-연료비 오차를 빨리 보상할 수 있어 배기가스 CH를 줄일 수 있으며 큰 토오크 요구시 가속성이 뛰어나다.

2. 엔진 모델링

그림 1에 엔진의 중요한 구성요소의 개략도를 나타내었다. 중요한 구성요소는 공기, 연료 흡입장치, 흡기 다기관, 연소장치, 동력장치로 나뉠 수 있다. 공기, 연료 흡입장치는 브로틀 각의 변화에 따라 공기의 양을 받아들이고, 또한 마이크로 프로세서를 가지는 ECU(Engine Control Unit)로 조정되는 인젝터에 의해 연료를 공급받는다. 흡기 다기관에서는 공기, 연료 흡입장치에서 받아들

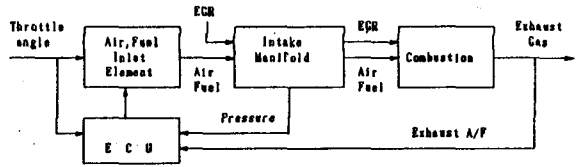


그림 1. 엔진 모델

인 공기, 연료 혼합기와 EGR(Exhaust Gas Recirculation)을 연소장치로 보내게 되는데, 흡기 다기관 내의 공기, 연료, EGR은 빠른 흐름과 느린 흐름으로 나눌 수 있으며 이들의 전달 지연으로 흡입 혼합기는 입력된 혼합기와는 차이가 있다. 연소장치에서는 입력된 혼합기를 연소시켜 토오크를 발생시키며 연소된 혼합기는 배기 가스로 나간다. 엔진의 주변 장치로는 인젝터 하단에 장착되어 있는 초음파 오터바이저와 배기 다기관에 위치한 공기-연료비 센서와 공기-연료비를 제어하는 ECU가 있다.

2.1 공기, 연료 흡입 장치

공기, 연료 흡입 장치는 흡기 다기관으로 들어갈 공기와 연료를 제공한다. 공기 흐름을 구하는 방법에는 크게 '속도-밀도'와 '질량-흐름'을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다[2]. 본고에서는 인젝터가 브로틀 바디에 장착되어 있는 시스템에 대해 고찰하므로 '질량-흐름'을 이용하며 그중에서도 최대 공기 흐름을 이용하는 방법을 채택하였다.

브로틀 각이 흡기 다기관 내로 들어가는 공기 흐름에 미치는 영향을 나타내는 인자 f1은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f1 = 1 - \cos \alpha \quad (1)$$

여기서 α 는 브로틀 각을 나타낸다.

흡기 다기관 압력과 대기압의 차가 흡기 다기관 내로 들어가는 공기 흐름에 미치는 영향을 나타내는 인자 f2는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f2 = \begin{cases} 3.87(Pm/Pb)^{0.71} [1 - (Pm/Pb)]^{0.29} & (Pm/Pb) > 0.528 \\ 1.0 & (Pm/Pb) < 0.528 \end{cases} \quad (2)$$

식(2)는 이상 기체라는 가정하에서 얻어진 식이며 Pb는 대기압을 나타낸다. 그러므로, 브로틀 바디의 공기 흐름 Ma1은 다음과 같이 계산 되어질 수 있다.

$$\dot{M}a1 = \dot{M}am \cdot f1 \cdot f2 \quad (3)$$

여기서 $\dot{M}am$ 는 최대 공기 흐름이다. 브로틀 바디의 연료 흐름 $\dot{M}fi$ 는 $\dot{M}a1$ 에 의해 구할 수 있다.

$$\dot{M}f_i = \frac{\dot{M}a_i}{Afc} \quad (4)$$

Afc : 공기-연료비 명령

연료 분사 장치인 인젝터를 구동시키는 것은 분사 주기와 분사 시간이다. 분사 주기는 엔진 속도 외의하여 결정되며 분사 시간 즉 펄스 폭은 단위 분사량을 결정한다. 인젝터 구동 펄스 폭 PW는 아래와 같다.

$$PW = \frac{\dot{M}a_i}{Afc A Nc N} + T \quad (5)$$

A : 인젝터 개방시 연료 흐름비
Nc : 실린더 수
T : 밧대리 전압 보정 시간

2.2 흡기 다기관

흡기 다기관 내에서 혼합기의 흐름은 빠른 흐름과 느린 흐름으로 나누어진다. 빠른 흐름은 공기와 기와 또는 미립자화된 연료 그리고 EGR이며 느린 흐름은 이의외 연료를 나타낸다. 흡기 다기관 내에서 모든 빠른 흐름은 같은 전달 지연을 가진다. 만약, 흡기 다기관이 선입선출(FIFO) 지연 체제만을 가진다고 가정하면 빠른 흐름의 시간 지연 T_f 는 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$T_f = \frac{120 Vm}{Nc N e_v Vd} \quad (6)$$

e_v : 채적 효율
N : 엔진 속도
Vm : 흡기 다기관 채적
Vd : 실린더 채적

실제의 흡기 다기관은 식(7)의 선입선출 지연체제만을 가지는 것이 아니라 흡기 다기관을 통해 전달되는 동안 유연성(smoothing)을 가지게 된다. 라플라스 연산자를 이용하여 전달지연과 유연성을 합한 식은 아래와 같다.

$$\frac{e^{-(1-0.7E_f)T_f s}}{E_f T_f s + 1} \quad (7)$$

느린 흐름 연료는 흡기 다기관의 입구에서 연료막을 형성하며 이 연료막은 단순한 지연 필터의 성질을 나타낸다. 느린 흐름 연료가 연료막을 형성한 후에는 기화되어 빠른 흐름과 같은 전달지연과 유연성을 가지며 전달된다. 느린 흐름의 전달 함수는 다음과 같이 근사시킬 수 있다[6].

$$\frac{e^{-(1-0.7E_f)T_f s}}{T_f s + 1} \quad (8)$$

2.3 주변 장치

(1) 오터마이저

만약 공기-연료비가 초 회박외에서 제어될 수 있다면 엔진의 연소 효율을 크게 향상시킬 수 있으며 배기 공해 가스중 CO와 NOx를 감소시킬 수 있다. 그러나, 이런 회박 공기-연료비에서의 연소는 일반적으로 매우 불안정하며 출력 토르크가 심하게 진동한다. 이런 문제를 극복하기 위해서는 엔진 조절 변수의 좀더 정확한 제어 기술과 균일한 혼합 기체를 공급하기 위한 연료 오터마이저(atomizer)가 필요하다. 초음파 오터마이저를 이용한 경우, 연료 방울의 지름이 40 μ m가 되어 연료가 공기에서 쉽게 전달되므로 흡기 다기관에 혼합되는 연료 방울의 수는 현저하게 줄어든다. 그러므로, 흡기 다기관 내에서 연료의 느린 흐름은 무시할 수 있어 연료 흐름 속도는 공기 흐름 속도와 같다.

(2) 진 공기-연료비 센서

산소 센서를 이용한 페루프 제어는 단지 정상상태에서만 가능하며 제어기의 계수를 엔진의 상태에 관계없이 일정한 값만을 가진다. 산소 센서가 충분히 가열되지 않아 정확한 공기-연료비를 판단하지 못할때, 엔진의 최대부하시, 가속시에는 페루프 제어가 운전 성능을 해치는 원인이 되기때문에 이를 때에는 페루프 제어를 중지시켜야 한

다. 진 공기-연료비 센서를 사용함으로써 인하여 정상상태 뿐 아니라 가속시동 모던 엔진상태에서 정확한 공기-연료비 제어가 가능하다. 진 공기-연료비 센서가 감지할 수 있는 공기-연료비는 8에서 26까지이다.

3. 공기-연료비 제어 알고리즘

자동차 엔진의 공기-연료비 제어는 외란에 상관없이 출력 공기-연료비가 입력 공기-연료비 명령을 유지하게하거나 공기-연료비 명령의 변화에 따라 출력 공기-연료비가 빠르고 안전하게 공기-연료비 명령을 따라가게하는 보상제어 문제이다. 연료 집약을 위하여 공기-연료비를 높이거나 큰 토르크를 얻기위해 공기-연료비를 낮출때 공기-연료비 제어는 오버슈트를 줄이며 빠른 시간내에 공기-연료비 명령을 따라가야한다. 배기가스중 일부가 흡기 다기관으로 들어오는 EGR로 인한 공기-연료비의 오차도 빨리 보상되어 제어한다.

그림 2는 공기-연료비 제어 시스템의 블록 선도이다.

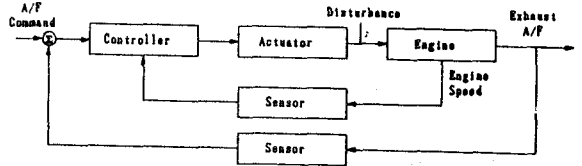


그림 2. 공기-연료비 제어 시스템의 블록 선도

3.1 엔진의 공기-연료비 모델

오터마이저를 사용하는 시스템에서는 흡기 다기관내의 느린 흐름이 존재하지 않아 연료가 공기와 함께 전달된다. 한 실린더의 흡기 밸브와 다음 실린더의 흡기 밸브가 동작하는 시간을 샘플링 시간으로 잡으면 샘플링 시간 T_s 는

$$T_s = \frac{120}{Nc N} \quad (9)$$

이다. 실린더에서 3행정 정도의 전달 지연을 가지므로 흡기 다기관과 실린더를 거쳐 진 공기-연료비 센서가 위치한 배기 다기관까지의 전달함수 $G(s)$ 를 시간 지연 T_d 와 시상수 T_c 로 간단히 나타내면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{e^{-T_d s}}{Tc s + 1} \quad (10)$$

$T_d = (1 - 0.7 E_f) T_f + \frac{3}{4} Nc T_s$
 $Tc = E_f T_f$

시간 지연을 가지는 연속시간 시스템은 다음과 같은 상태 공간 형태로 나타낼 수 있다. 따라서, 식(10)를 상태 공간 형태로 나타내면 다음과 같다.

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

uc 는 공기-연료비 명령, x 는 상태 변수, y 는 출력 공기-연료비이다. 시간 지연 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)를 샘플링한 식은 아래와 같다.

$$y(kT_s+T_s) = \phi y(kT_s) + Tc y'(kT_s-T_s) + u(kT_s-dT_s-T_s) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \phi &= e^{-T_s/Tc} \\ &= \int_0^{T_s-T'} e^{-Ts/Tc} ds Tc^{-1} \\ &= e^{-(T_s-T')/Tc} \int_0^{T'} e^{-Ts/Tc} ds Tc^{-1} \end{aligned}$$

3.2 제어 알고리즘

그림 3은 Smith-predictor의 블록 선도이다 [8]. G_p 는 시간 지연을 제외한 프로세서의 전달함수이며 G_r 은 G_p 를 보상하는 보상의 전달함수이다. Smith-predictor를 이용한 시스템에서는 신호를 저장하여 처리할 수 있어야 한다. 이는 아날로그 시스템에서는 매우 어려운 것이지만 마이크로 프로세서를 사용하는 시스템에서는 시간 지연을 샘플링마다 신호를 이동시킴으로써 쉽게 실현할 수 있다. Smith-predictor 제어기의 전달함수를 G_s 라하면 G_s 는 다음과 같다.

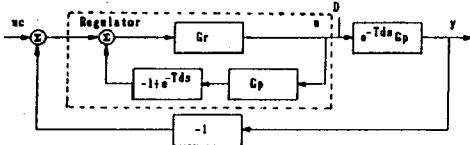


그림 3. Smith-predictor의 블록 선도

$$G_s = \frac{G_r}{1 - G_r G_p (e^{-Ts} - 1)} \quad (14)$$

입력에 대한 시스템 전체의 전달함수 H 는 다음과 같다.

$$H = \frac{G_r G_p e^{-Ts}}{1 + G_r G_p} \quad (15)$$

그러므로, 식(17)은 프로세서의 시간 지연을 제외한 전달함수 G_p 를 적절히 보상할 수 있는 G_r 을 구하면 시간 지연을 가지는 시스템도 시간지연이 없는 시스템과 똑같이 보상할 수 있음을 나타낸다.

의한에 대한 전달 함수 H_d 는 다음과 같다.

$$H_d = \frac{[1 - G_r G_p (e^{-Ts} - 1)] G_p e^{-Ts}}{1 + G_r G_p} \quad (16)$$

G_p 가 1차이므로 G_p 를 보상하는 G_r 을 PI 제어기로 구성할 수 있다. 그러므로 G_r 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_r = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] \quad (17)$$

원하는 페루프 극점의 비교 감쇄율을 ζ , 주파수를 ω 라 하면 PI 파라미터는 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$K_p = \frac{2\zeta\omega T_c - 1}{\omega^2 T_c} \quad (18)$$

$$T_i = \frac{2\zeta\omega T_c - 1}{\omega^2 T_c}$$

프로세서의 지연중 T 만의 지연을 가지는 프로세서 모델의 출력 y_m 으로 나타낸다. Smith-predictor를 마이크로 프로세서로 실행할 수 있도록 샘플링한 상태 공간 형태 y_m 을 나타내면 다음과 같다.

$$y_m(k+1) = \Phi y_m(k) + \Gamma_0 u(k) + \Gamma_1 u(k-1) \quad (19)$$

현재의 프로세서 모델의 출력 y_m 이고 d 샘플링 전의 값이 $y_m d$ 라하면 PI 제어기의 입력인 오차 e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = u_c - y - y_m + y_m d \quad (20)$$

PI 제어기의 출력인 제어신호 u 는 다음과 같다.

$$u = K_p(e + e Ts/T_i + i) \quad (21)$$

여기서 i 는 적분값이다. 그러므로 보상된 인체터의 구동 점스프 PW_c 는 식(5)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PW_c = \frac{\dot{M}a_i}{u A N_c N} + T \quad (22)$$

공기-연료비 제어의 흐름도는 그림 4에 나타내었다.

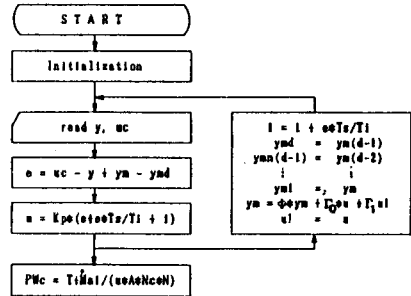


그림 4. 공기-연료비 제어를 위한 흐름도

4. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

시뮬레이션은 입력 공기-연료비 명령과 외란에 대한 출력 공기-연료비의 계단 응답을 나타내었다. 본고에서는 Chevrolet 5.7 liter 엔진과 Toyota 4A-ELU 엔진에 대하여 각각 시뮬레이션하였다. 표 1은 이 엔진들의 기하학적 파라미터를 나타낸 것이다.

표 1. 엔진의 기하학적 파라미터

엔진	실린더 수	총기 다기관 체적	실린더 체적
Chevrolet	8	2850cm ³	712.5cm ³
Toyota	4	794cm ³	397cm ³

Chevrolet 엔진의 체적효율 e_v 가 0.69라 실험적 데이터 E_p 가 0.9라 가정하면 공기-연료비 모델의 샘플링한 상태 공간 형태식은 다음과 같다.

$$y(k+1) = 0.6855y(k) + 0.2911uc(k-7) + 0.0465uc(k-8) \quad (23)$$

식(23)의 계수들은 체적효율이 일정하다면 엔진 속도에 상관없이 항상 일정한 값을 가진다.

위와 같은 방법으로 Toyota 4A-ELU 엔진에 대한 상태 공간 형태식은 다음과 같다.

$$y(k+1) = 0.6816y(k) + 0.2992uc(k-4) + 1.4270uc(k-5) \quad (24)$$

4.1 공기-연료비 명령의 변화에 대한 출력 공기-연료비 변화

페루프 제어를 위하여 Ziegler-Nichols 방법에 의한 PI 제어를 이용한 시스템의 Chevrolet 과 Toyota 4A-ELU 엔진에 대한 제어신호 u 는 다음과 같다.

$$u = 0.3363 (e + e*0.0470 + i) \quad (25)$$

$$u = 0.5765 (e + e*0.0818 + i) \quad (26)$$

Smith-predictor 제어기의 경우 PI 파라미터는 $0.7 K_p$ 를 1이라 놓으면 PI 파라미터는 다음과 같다.

$$K_p = 1 \quad (27)$$

$$T_i = 0.7 T_c \quad (28)$$

따라서 식(25)에 의하여 Chevrolet 엔진과 Toyota 엔진의 제어신호 u 는 다음과 같다.

$$u = (e + e*0.5394 + i) \quad (29)$$

$$u = (e + e*0.5476 + i) \quad (30)$$

그림 5는 Chevrolet 엔진의 경우 입력 공기-연료비 명령이 계단 입력일 때의 각 시스템의 제어 신호와 출력 공기-연료비를 나타낸 것이다. 표 2는 Chevrolet 엔진의 경우 각 시스템의 입력 공기-연료비 명령의 계단 응답 특성

표 2. Chevrolet 엔진의 계단 입력 응답 특성

시 스템	상승 시간 (Ts)	최대 오버슈터 (%)
Open-loop	17	0
PI	126	0
Smith-predictor	12	10.8

을 나타낸 것이다. 상승 시간은 출력이 입력치의 90% 내에 도달하는 시간을 나타낸다. 그림 6은 Toyota 4A-ELU 엔진에서의 입력 공기-연료비가 계단 입력일 때의 각 시스템의 제어 신호와 출력 공기-연료비를 나타낸 것이다. Smith-predictor를 이용한 시스템에서는 시간 지연에 상관없이 보상을 행할 수 있으므로 어떤 시간 지연을 가지는 프로세서에서도 훌륭하게 보상할 수 있다. 표 3은 Toyota 4A-ELU 엔진에서의 입력 공기-연료비 변형에 대한 각 시스템의 계단 응답 특성을 나타낸 것이다.

표 3. Toyota 4A-ELU 엔진의 계단 입력 응답 특성

시 스템	상승 시간 (Ts)	최대 오버슈터 (%)
Open-loop	11	0
PI	55	0
Smith-predictor	7	12.7

4.2 외란의 변화에 대한 출력 공기-연료비 변화
그림 7은 Chevrolet 엔진의 경우 외란이 계단 입력일 때의 제어 신호와 출력 공기-연료비를 나타낸 것이다. Smith-predictor를 사용한 시스템에서는 회복 시간이 상당히 짧아 단순 PI 제어기보다 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다. 표 4는 Chevrolet 엔진에서의 외란에 대한 계단 응답 특성을 나타낸 것이다. 안정 시간은 목표치의 5% 내외 값에 도달하는 시간을 나타낸다.

그림 8은 Toyota 4A-ELU 엔진의 경우 외란이 계단 입력일 때의 제어 신호와 출력 공기-연료비를 나타낸 것이다. 표 5는 Toyota 4A-ELU 엔진에서의 외란에 대한 계단 응답 특성이다.

표 4. Chevrolet 엔진의 계단 외란 응답 특성

시 스템	안정 시간 (Ts)	최대 오버슈터 (%)
PI	182	83.7
Smith-predictor	27	87.3

표 5. Toyota 4A-ELU 엔진의 계단 외란 응답 특성

시 스템	안정 시간 (Ts)	최대 오버슈터 (%)
PI	92	84.9
Smith-predictor	15	84.7

이전의 공기-연료비 제어 시스템은 정상 상태 내에서 PI, PID 제어법을 이용하여 외란이나 오차에 대한 제어를 행하여 왔다. 이런 시스템에서는 입력의 변화에 대해서는 시간 지연으로 인하여 나쁜 성능을 나타내므로 입력 변화시는 엔진의 어떤 상태에서도 동작이 가능하며 외란에 의한 보상뿐 아니라 입력 변화시에도 개루프보다 빠른 응답을 나타낸다.

연료의 경제성을 위한 최박 연소시에는 공기-연료비가 작은 외란에도 큰 영향을 받게되므로 보다 정확하고 빠른 제어가 필요하다. 큰 토오크가 필요한 경우에도 공기-연료비가 빨리 응답하므로 가속성이 뛰어나다. 이 시스템은 엔진 상태에 민감하게 반응하므로 최박 연소시 불연소(miss firing)인한 CH가 증가할 위험성을 크게 감소시킬 수 있어 배기가스가 줄어든다.

5. 결 론

본 논문에서는 Smith-predictor 기법을 이용하여 공기-연료비 제어를 구현하였다.

Chevrolet 5.7 liter 엔진과 Toyota 4A-ELU 엔진에서의 공기-연료비 변형과 외란에 대한 출력 공기-연료비의 응답을 시뮬레이션하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 시간 지연의 크기에 상관없이 일정한 이득을 가질 수 있어 공기-연료비 변형과 외란에 대한 제어 성능이 향상된다.
2. 공기-연료비 변형의 변화에 대한 이 시스템의 응답은 개루프 응답 보다 상승 시간을 30% 이상 줄일 수 있다. 그러나 약 10%의 오버슈트가 생긴다.
3. 외란에 대한 출력 공기-연료비의 안정 시간은 기존의 PI 제어 보다 80% 이상 감소된다.
4. 채적 효율이 일정하다면 엔진 속도에 상관없이 일정한 제어 계수를 가지므로 ECU 내에서의 처리 시간을 줄일 수 있다.

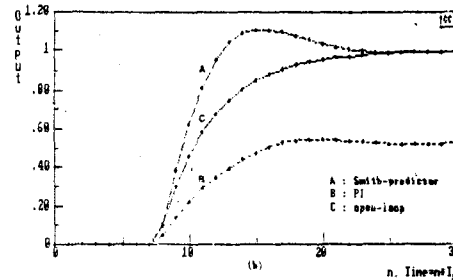
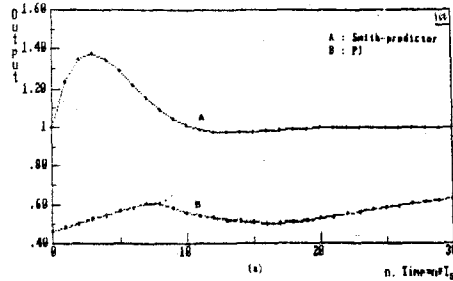


그림 5. 계단 입력시의 Chevrolet 엔진의 (a) 제어 신호와 (b) 출력 공기-연료비

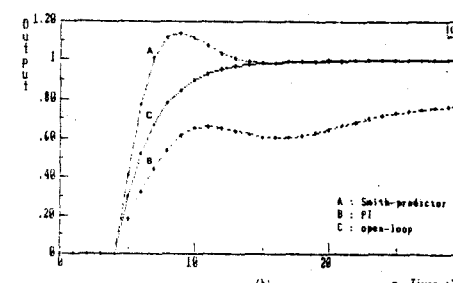
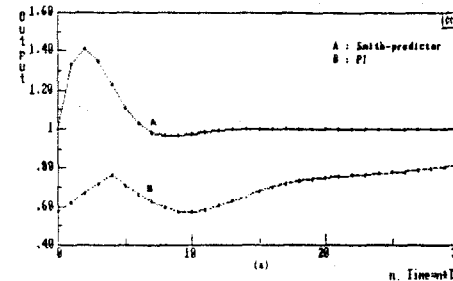


그림 6. 계단 입력시의 Toyota 4A-ELU 엔진의 (a) 제어 신호와 (b) 출력 공기-연료비

참고 문헌

- 1) D. R. Hamburg and M. A. Shelman : "A Closed-Loop A/F Control Model for Internal Combustion Engines", SAE Paper No. 800826, 1980.
- 2) C. F. Aquino : "Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injection Engine", SAE Paper No. 810494, 1981.
- 3) S. Matsushita and et al., "Development of the Toyota Lean Combustion System", SAE Paper No. 850044, 1985.
- 4) K. Takeda and et al., "Toyota Central Injection (Ci) System for Lean Combustion and High Transient Response", SAE Paper No. 851675, 1985.
- 5) J. Ishii and et al., "Wide Range Air-Fuel Ratio Control System", SAE Paper No. 880134, 1988.
- 6) D. J. Dobner : "Dynamic Engine Models for Control Development Part I ; Nonlinear and Linear Model Formulation", GMR Report GMR - 3783, Jan 13, 1982.
- 7) K. J. Astrom and T. Hagglund : "Automatic Tuning of PID Regulators", Rep., Uppsala Univ. Dept. of Tech. Sweed, 1987.
- 8) K. J. Astrom and B. Wittenmark : "Computer Center Systems Theory and Design", Prentice-Hall, Inc., 1984.
- 9) 이윤우 : "수학적 엔진 모델의 컴퓨터 시뮬레이션", 연세대학교 대학원 석사학위 논문, 1989.

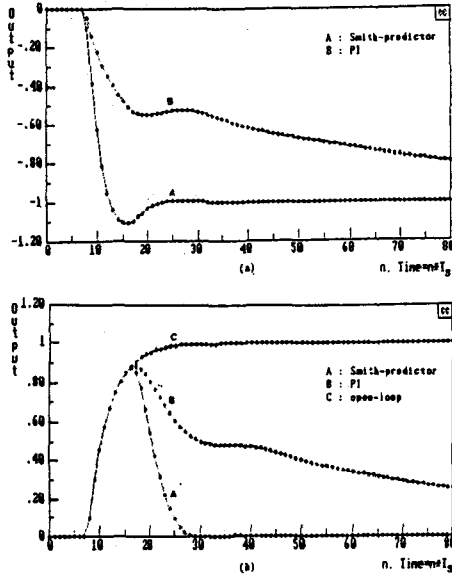


그림 7. 계단 외란시의 Chevrolet 엔진의 (a) 제어 신호와 (b) 출력 공기-연료비

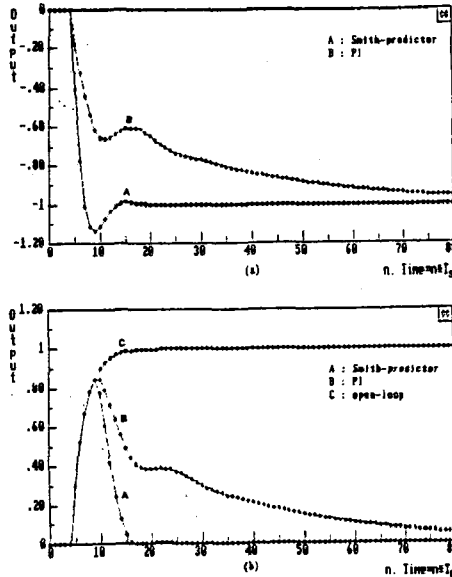


그림 8. 계단 외란시의 Toyota 4A-ELU 엔진의 (a) 제어 신호와 (b) 출력 공기-연료비