

엔진 시스템 동특성의 비선형 모델링과 컴퓨터해석

김유남 박의철 이덕규 우광방

연세대학교 전기공학과

Nonlinear Modeling and Computer Simulation of an Engine System Dynamics.

Y. N. Kim, H. C. Park, D. K. Lee, K. B. Woo

Yonsei University, Dept. of Electrical Engineering.

Abstract

In this paper an engine system model is developed to characterize and dynamic interactions among various process of engine components in the system utilizing computer simulation.

simulation of the dynamics of the entire engine process and emission, including air-fuel inlet element, intake manifold, combustion unit is carried out.

1. 서론

자동차 엔진의 성능 향상으로 인해 연료 소비를 감소하려는 노력이 계속되고 있고, 최근에는 연료 소비의 절약뿐만 아니라 엄격한 배기가스 규제에 대응하기 위하여 유해가스를 줄여 자동차에 의한 공해 문제를 축소하려는 연구도 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 자동차 엔진의 연료 분사 제어 장치의 개발은 자동차 산업에 있어서 중요한 관심사가 되고 있다. 최근까지 대부분의 제어 장치들은 설계한 제어장치를 자동차에 직접 설치하고 테스트하는 방법으로 개발되었다. 그러나 이러한 방법은 제어 장치의 설계가 완전히 실제 엔진 데이터에 기초하여 개발될 수 있다는 장점이 있지만 많은 자금과 시간을 요하는 단점이 있다.

어떤 대상을 설명할 수 있는 제어 시스템을 정확히 분석하는데 있어서 물리적 현상에 대한 연구는 필수적이다. 엔진 제어 장치 개발에 있어서 분석적인 엔진 모델은 다른 엔진 구조와 운전 상태에서도 별 데이터 없이 시뮬레이션이 가능하다. 그러나 이러한 연구가 "black box" 접근 방법의 발전을 가져오게 하였지만 다기관에 들어가는 공기량에 따라 변화하는 다기관의 온도 변화, 그리고 연료 기화와 연료 배출에 영향을 미치는 온도변화의 효과에 대해서 정확히 모사하지 못했다. 또, 현재까지 나온 엔진 모델들은 연료 분사를 예측할 수가 없다. 엔진 장치들은 특정한 분사 표준량 범위내에서 작동되어야 하기 때문에 엔진 모델들은 실제 응용에 있어서 여러가지 문제점들을 가지고 있는 것이다.

그래서 본 연구에서는 이러한 어려움을 극복할 수 있는 엔진에 관한 수학적엔진모델을 발전시키고 이 수학적 모델을 엔진의 동작 상태를 변화시켜 컴퓨터 시뮬레이션함으로써 실제로 이 엔진 모델이 엔진의 동작을 정확히 묘사할 수 있는지를 알아보고 그 응용을 제시하고자 한다.

2. 모델의 구성

본 연구에서 제안된 모델은 모듈러 기법에 의해 개발되었다. 그림 1에 엔진의 중요한 구성요소의 개략도를 나타내었다.

중요한 구성요소는 공기-연료 흡입 장치, 흡기다기관, 연소장치, 동력장치등이다. 공기-연료 흡입장치는 스토름 각의 변화에 따라 공기의 양을 받아 들이는데, 또한 마이크로 프로세서로 조정되는 인젝터에 의해 연료를 분사한다. 흡기다기관에서는 공기-연료 흡입장치에서 받아들인 공기와 연료를 연소장치에 보내게 되는데, 흡기다기관내에서의

연료의 기화율과 필름생성에 의한 연료의 전달 지연으로 인해 입력된 연료와는 다른 양의 연료가 흡입된다. 연소장치에서는 입력된 공기, 연료와 점화 진각의 함수로써 토크와 배기가스를 발생시킨다. 이 발생된 토크와 부하 토크, 마찰 토크등과의 산술적 계산에 의해 가속 또는 감속 토크가 발생하며 동력장치에 의해 엔진속도로 변환된다.

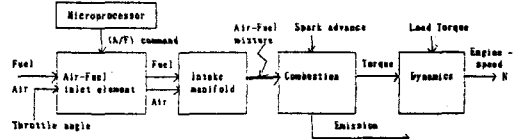


그림 1. 엔진 모델

엔진 모델의 입력은 다음과 같다.

- α 스토름 각
- $(A/F)c$ 공기-연료비 명령

중요한 출력들(시간의 함수)은 다음과 같다.

- m_{a-i} 다기관으로 들어오는 공기의 질량 변화율
- m_{f-i} 다기관으로 들어오는 연료의 질량 변화율
- m_{a-o} 다기관에서 나가는(실린더로 들어가는) 공기의 질량 변화율
- m_{f-o} 다기관에서 나가는(실린더로 들어가는) 연료의 질량 변화율
- m_{CO_2} 배기가스에 포함되어 있는 CO2의 체적 흐름율
- m_{NOx} 배기가스에 포함되어 있는 NOx의 체적 흐름율
- m_{CO} 배기가스에 포함되어 있는 CO의 체적 흐름율
- m_{CH} 배기가스에 포함되어 있는 HC의 체적 흐름율
- N 엔진 속도

일반적으로 m_a 와 m_f 는 모두 흡기 다기관내에서 위치의 함수이다. 수학적인 복잡성을 피하기 위해서 이 모델에서는 평균 체적값을 사용하였다.

그림 1과 같은 엔진모델을 제시하고 입력상태(스토름 각, 공기-연료비 명령 $(A/F)c$)에 따른 엔진 속도의 변화를 고찰한다. 특히 빠른 가속시 명령 $(A/F)c$ 와 실제로 실린더에 유입되는 $(A/F)o$ 와의 시간적 지연을 최소화 하기 위하여 A/F 및 연료 공급 시간을 적절히 조절하여 최적의 A/F 와 연료 공급 시간을 얻고자 한다.

2.1 공기-연료 흡입장치

자동차 외부에서 자동차 내부의 다기관 안으로 공기를 흐르게 하는 중요한 요인은 외부의 압력과 다기관 안의 압력과의 압력 차이이다. 그리고 스토름 밸브의 위치도 공기가 흐를 수 있는 면적을 변화 시킴으로써 공기 흐름의 비에 영향을 준다. 공기가 흐르는데 발생하는 압력 차의 효과를 시뮬레이션하기 위해서, 관을 통과하는 압축 공기의 흐름에 대한 관계식을 사용해야 한다.

$$f_1 = \begin{cases} 3.87 (Pm/Pb)^{0.71} [1 - (Pm/Pb)^{0.29}]^{1/2} & Pm/Pe > 0.528 \\ 1.0 & Pm/Pe < 0.528 \end{cases} \quad (1)$$

Throttle 각의 함수로서 공기가 올라가는 면적의 효과는 다른 인자 f_1 에 거의 비례한다.

$$f_2 = 1 - \cos \alpha \quad (2)$$

여기서 α 는 스톱플 각이다. $\alpha = 90$ 는 스톱플 벨브가 완전히 열린 것을 나타낸다. 식 (1)과 (2)는 모든 내연기관에서 공기의 흐름에 영향을 끼치는 여러가지 요소들을 정확히 설명하는 식이다. 이 모델이 특정한 엔진에 한정되는 것을 피하기 위해서 흡기 다기관으로 들어가는 실제 공기 흐름의 비율 다음 식과 같이 쓸 수 있다고 가정한다.

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{am}(P_b, T_1) f_1 \cdot f_2 \quad (3)$$

여기서 $\dot{m}_{am}(P_b, T_1)$ 는 채택한 엔진에 대한 P_b 와 T_1 의 함수로서 최대 공기 흐름의 비율 나타내며 대부분의 엔진에 대하여 측정할 수 있는 양이다. 인젝터에서 나오는 연료 흐름의 비는 다음과 같이 가정하였다.

$$\dot{m}_{fi} = \frac{Dm_f}{Dt} \quad (4)$$

여기서

$$Dm_f = \frac{Vd \cdot \gamma Pm}{R \cdot Tm \cdot AF} \quad (4a)$$

$$Dt = \frac{120}{N Nc} \quad (4b)$$

Dm_f 는 엔진이 한번 점화될 때 인젝터가 내뿜는 연료의 양이며 Dt 는 주어진 엔진 속도 N 에 대한 엔진 점화 사이의 시간 간격이다. 식 (4a)에서 Vd 는 엔진의 배기량이고, γ 는 체적 효율이며, R 은 기체 상수, AF 는 공기-연료비이다. Nc 는 이 엔진의 실린더 수이다.

2.2 흡기 다기관

흡기 다기관에서 발생하는 가장 중요한 물리적 현상은 연료의 전달 지연이다. 분사된 연료가 다기관 안에서 기체와 무화 상태의 연료 그리고 액체 연료 필름형태로 될 때 실린더로 들어가는 연료의 양은 속도가 서로 다르기 때문에 분사된 연료의 양과 다르다. 흡기 다기관에서 공기와 기체 연료의 보존 법칙에 의해 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{dm_a}{dt} = \dot{m}_{a1} - \dot{m}_{a0} \quad (5)$$

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_{fi} - \dot{m}_{fo} \quad (6)$$

흡기 다기관에서 나가는 공기의 양과 연료의 빠른 흐름 양은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{m}_{a0} = \frac{Vd \cdot Pm}{R \cdot Tm} Xa \cdot \gamma \quad (7)$$

$$\dot{m}_{fo0} = \frac{Vd \cdot Pm}{R \cdot Tm} (1 - Xa) \cdot \gamma \quad (8)$$

여기서 γ 는 체적 효율이고 Xa 는 혼합기체에서의 공기의 양이다. 체적 효율 γ 의 값은 각 엔진마다 그리고 운전 조건마다 다르다.

다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$\gamma = \gamma_p \cdot \gamma_{\gamma} \quad (9)$$

는 공기가 흐름 때 흡기 다기관과 배기 다기관의 압력 차에 의한 영향을 나타낸다. 는 체적 효율이 엔진 속도와 흡기 다기관의 온도에 영향을 받는다. 그림 2에 흡기 다기관에서의 정상상태의 연료 흐름 모델을 나타냈다.

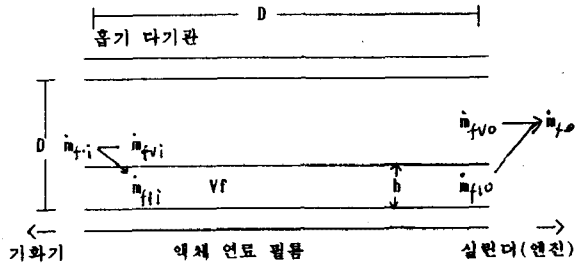


그림 2. 흡기 다기관에서 정상상태의 연료 흐름 모델

흡기 다기관을 흐르는 연료는 두가지로 나누어지는데 하나는 흡기 다기관의 가운데로 흐르는 기체연료이다. 이 기체연료는 공기와 같은 형태로 흐른다. 다른 하나는 액체 필름 형태의 연료인데 이 연료는 흡기 다기관의 안쪽 표면에 붙어서 이동하는데 이 연료는 소용돌이치며 지나가는 공기에 의해 천천히 움직인다. 이제 질량 보존의 법칙과 에너지 보존의 법칙을 이용하여 이 흡기 다기관에서의 연료들의 관계를 살펴 보면 다음과 같다.

$$\dot{m}_{fi} = \dot{m}_{fvi} + \dot{m}_{fii} \quad (10)$$

$$\dot{m}_{fo} = \dot{m}_{fvo} + \dot{m}_{fio} \quad (11)$$

정상상태일 때

$$\dot{m}_{fi} = \dot{m}_{fo} \quad (12)$$

그러나 과도상태일 때, 예를들어 스톱플 벨브를 빨리 열었을 때, 흡기 다기관과 들어가는 연료 필름의 두께는 증가하고 그래서 \dot{m}_{fii} 는 필름의 두께가 증가하는 즉, \dot{m}_{fii} 의 형태로 더 많이 변한다. 연료 필름이 흡기 다기관을 따라 흘러가는 동안 이 연료의 일부는 기화를 한다. 그래서 다음과 같은 식으로 된다.

$$\dot{m}_{fvo} = \dot{m}_{fvi} + \dot{m}_{fvg} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{fio} = \dot{m}_{fii} - \dot{m}_{fvg} \quad (14)$$

2.3 연 소

연소의 기본적인 관계는 실린더에 들어오는 공기-연료량에 비례하여 토르크를 발생하는 것이다. 혼합기체의 공기-연료비와 함께 스톱플 각, 엔진속도 그리고 점화 시기등이 엔진 토르크를 발생시키는 데 중요한 영향을 끼친다. 브로틀과 공기-연료비의 영향을 나타내기 위하여 factor $F_1(\alpha, AF)$ 이 규준화 되었다.

점화 시기의 영향을 기술하기 위해서 두번째로 규준화된 factor F 를 정의했다.

엔진 속도에 대한 영향을 나타내기 위하여 F_2 로 나타내었다.

세계의 토르크 factor에 근거하여, 특정한 엔진에 의해 발생한 토르크에 대한 여러가지 엔진 파라미터의 영향을 다음 식으로 시뮬레이션할 수 있다.

$$Tq = (Tq)_{max} F_1(\alpha, AF) F_2(N) F_3 \quad (15)$$

여기서 $(Tq)_{max}$ 는 엔진에 의해 발생된 최대 토르크를 나타낸다. $(Tq)_{max}$ 는 일반적으로 어떤 엔진의 크기와 압속비 그리고 다른 기하학적인 파라미터들의 함수이다.

2.4 동력 장치

동력 장치 모델의 개략도가 그림 3에 나타내었다. 부하 토르크와 엔진 관성 그리고 부하 관성등이 특정한 엔진의 특성이고 이 시뮬레이션에서의 입력이다. 그러나 이러한 일반적인 관계는 마찰 토르크를 기술하는데 사용될 수 있는데 이것은 대부분 엔진의 속도에 의존한다.

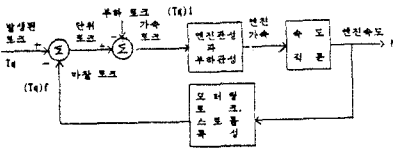


그림 3. 동력장치 모델
엔진의 가속(또는 감속)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{Tq - (Tq)_f - (Tq)_b}{Ie + If} \quad (16)$$

여기서 (Tq)은 부하 토크를, (Tq)_f는 마찰 토크를 의미하며, Ie는 엔진 관성을, I은 부하 관성을 의미한다.

2.5 배기 가스

연소하고 있는 혼합 기체의 공기-연료비는 배기 가스 구성에 대단히 중요한 영향을 미치는 변수이다. 흡기 다기관 온도와 압력 그리고 점화 시기는 엔진의 배기 가스에 어느정도 영향을 주는 인자이다. 이 모델에서는 실린더 안에서 혼합기체의 공기-연료비가 변화할 때의 엔진의 동작을 기술하므로, 배기 모델은 단지 공기-연료비의 영향을 시뮬레이션한다. 실린더에서 소비되는 공기에 대한 배기 가스 생성률의 데이터에 의하여 흡입 공기 질량당 CO, CO₂, NOx, HC 그리고 O₂의 생성율을 공기-연료비의 함수로 변환시킬 수 있다. 대부분의 데이터에서는 배기 가스 중에서 산소 농도의 측정은 포함하지 않는다. 산소 농도가 배기 가스의 조성에 직접적으로 의미는 없지만 이것이 촉매 변환기의 효율에 영향을 미치기 때문에 엔진을 시뮬레이션 하는데 중요하다.

3. 실험 및 결과

실험에 사용된, 이 엔진의 기하학적인 파라미터는 다음과 같다.

- 실린더 수(Nc) = 8
- 실린더의 지름(b) = 10.16 cm
- 실린더 행정(Ls) = 8.84 cm
- 최대 공기 흐름(m_am) = 150 gm/sec
- 압축비(r) = 7
- 흡기 다기관 체적(Vm) = 2850 cm
- 엔진 관성(Ie) = 1.36 X 10 dyne-cm-sec/RPM
- 부하 관성(I_b) = 5.42 X 10 dyne-cm-sec/RPM

3.1 스토름의 급격한 변화에 대한 고찰

이 엔진 모델을 사용해서 초기 아이들링 상태에서 엔진을 빠르게 가속한 상태를 시뮬레이션하였다. 이것은, 운전자가 가속 페달을 갑자기 밟아서 스토름을 순간적으로 완전히 얻 것과 같다. 이러한 운전자의 행동은 마이크로 프로세서에 의해서 빠르게 감지되고 원하는 공기-연료비는 (초기 아이들링에서의 공기-연료비 14.7에서) 즉시 12.5로 변화해서 많은 연료가 가속을 위해 필요한 힘을 얻기 위해서 엔진 안으로 들어 올 수 있다. 수학적으로, 위의 과정은 다음과 같이 t = 0에서 엔진 변수를 새로운 값으로 변화시킴으로써 시뮬레이션을 할 수 있다.

$$(A/F)_c = 12.5$$

$$T_i = 300^\circ K$$

$$= \begin{cases} 10 + 600t & t < 0.133 \text{ sec} \\ 90 & t > 0.133 \text{ sec} \end{cases}$$

이 흡기 온도는 초기 온도 320°K에서 300°K로 감소 되었는데 이것은 스토름 값이 변화함으로써 공기의 흐름이 급격히 증가하였기 때문이다.

이 시뮬레이션에서 얻은 (A/F)₀와 엔진 속도들 그림 4에 나타내었다. 엔진 속도는 연료가 증가하는데 대한 영향이 나타나기 전에 어느 정도 지연된다. Santa Barbara와 Delco Electronics에서 이 시뮬레이션과 비슷한 실험을 하여 구한 엔진 속도에 대한 데이터값들과 일치한다는 것을 알 수 있었다.

실린더로 유입되는 공기-연료비에 의하여 배출되는 4가지의 배기 가스의 성분과 농도는 그림 5에 나타내었다.

3.2 공기-연료비의 변화에 대한 영향

특정한 엔진에 대한 간단한 '가장좋은' 공기-연료 조절 방법을 개발하는 것은 매우 광범위한 일이다. 급격한 가속을 하는 동안의 공기-연료비의 조절 방법에 대해서 이 경우에는 새가지 형태로 시뮬레이션하였다. 엔진의 효율과 배기 가스에 대한 Δt₁, Δt₂, (A/F)₁, (A/F)₂의 영향을 이 엔진 모델 시뮬레이션에서 결정하였다. 새가지 형태의 공기-연료비와 공급시간은 표 1과 같다

표 1 새가지 형태의 공기-연료비

	(A/F) ₁	Δt ₁ (초)	(A/F) ₂	Δt ₂ (초)
a	5	0.2	20.0	1.3
b	5	0.5	20.0	1.0
c	7	0.7	12.5	0.8

a는 아이들링 상태의 공기-연료비 14.7에서 스토름을 얻는 순간 A/F를 0.2초간 5로 하고 그다음 1.3초간은 20으로, 1.5초 후에는 12.5로 혼합비를 준 상태이다. b는 처음 0.5초간 A/F를 5로 하고 그다음 1.0초간은 20으로 하고 1.5초 후에는 12.5로 한 경우이다. c는 처음 0.7초간 A/F를 7로 하고 그다음부터는 12.5로 공기-연료비를 준 상태이다. 모든 경우에 있어서 1.5초 후에는 똑같이 혼합비를 12.5로 주었다 (c는 0.7초 이후부터 12.5).

위의 새가지 공기-연료비 조절 방법에 의하여 실린더로 들어가는 혼합기의 공기-연료비 차이를 그림 5에 나타내었다.

그림에서 보는바와 같이 초기에 공급되는 연료비와 공급 시간에 따라 혼합비에 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

여기서는 초기에 공기-연료비는 거의 비슷하게 하고 공급 시간을 서로 다르게 주었을 때 처음에는 거의 비슷한 혼합비가 나타나나 시간의 경과에 따라 공기-연료비의 차이가 생긴다. c의 경우가 혼합기의 공기-연료비 변화가 적고 원하는 값에 빨리 다다르게 된다.

스토름 각의 변화가 일정 함에도 불구하고 연료조절 방법에 따라 최후적인 안정 상태에 도달할 때까지의 시간 및 가속성에 많은 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 새가지의 공기-연료 조절 방법 중 c의 경우가 다른 두가지 형태 보다도 효과적이라는 것을 알 수 있다.

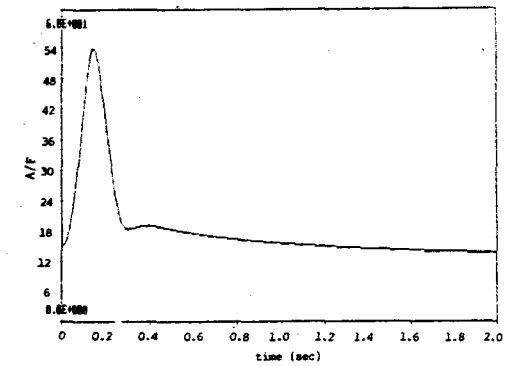
4. 결 론

본 연구에서는 엔진 제어 장치를 개발하는데 있어서 실제 엔진을 쓰지 않고, 컴퓨터 시뮬레이션을 함으로써 실제 엔진과 유사한 동작을 얻을 수 있는 수학적 엔진 모델을 제시하고, 제시된 모델을 시뮬레이션 하여 이 모델이 자동차의 실제 동작과 유사한 지를 비교 검토 하였다. 이 엔진 모델을 사용하여 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

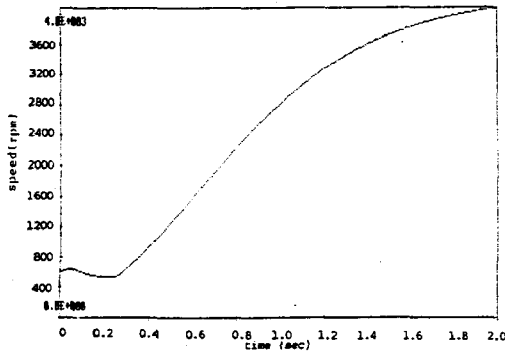
1. 스토름 각의 급격한 변화에 있어서 연료의 증가 시점에도 불구하고, 초기에 오히려 공기-연료비가 희박하게 되고, 엔진 속도는 바로 증가하지 않고 약 0.3초 속도 지연이 있었다.
2. 실린더로 유입되는 공기-연료비에 의해 배기장치에서 배출되는 배기 가스의 성분과 농도를 예측할 수 있다.
3. 빠른 가속을 할 때에 발생하는 초기 공기-연료비의 상승과 속도 지연 및 배 기가스를 줄이기 위해 공기-연료비와 연료 공급시간을 조절함으로써 초기 공기-연료비 상승을 어느정도 억제하고 배기 가스를 줄일 수 있었다. 따라서 이러한 수학적인 모델을 이용함으로써 엔진 제어 장치를 개발하는데 있어서 컴퓨터 시뮬레이션만으로 엔진의 성능분석을 할 수 있으므로 제어장치 개발에 필요한 시간과 경비를 절약할 수 있다. 그러므로 이러한 수학적인 엔진 모델은 엔진제어기 개발에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

5. 참고 문헌

- 1) Cassidy, J.F., "On the Design of Electronic Automotive Engine Controls Using Linear Quadratic Control Theory," GMR Report ET-181, December 5, 1981.
- 2) Tennant, J.A. et al., "Development and Validation of engine model via automated dynamometer tests," SAE paper No. 790118, February, 1979.
- 3) D.J. Dobner, "A mathematical engine model for development of dynamic engine control", SAE paper No. 800054.
- 4) R.G. Delosh, K.J. Brewer, L.H. Bush and T.F.W. Ferguson, "Dynamic computer simulation of a vehicle with Electronic Engine Control." SAE paper No. 810447, February, 1981.
- 5) Dobner, D.J., "Engine characteristics for the dynamic engine model." GMR Report EG-177, May 30, 1980.
- 6) W.W. Yuen, and H. Servati, "A mathematical engine model including the effect of engine emissions", SAE paper No. 840036.
- 7) D.J. Dobner, "Dynamic engine models for control development part-1; Nonlinear and linear model formulation", GMR report GMR - 3783, Jan 13, 1982
- 8) C.F. Taylor, "The internal - combustion engine in theory and practice", 2nd edition, The M.I.T press cambridge, Massachusetts.

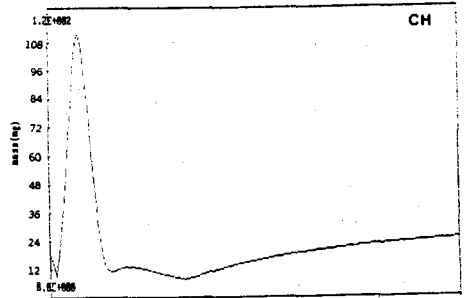


(a)

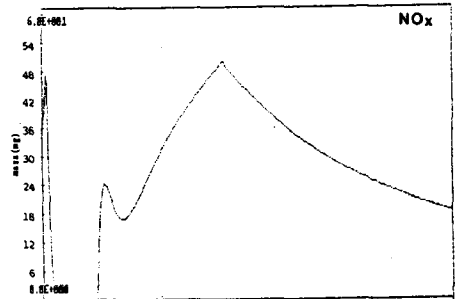


(b)

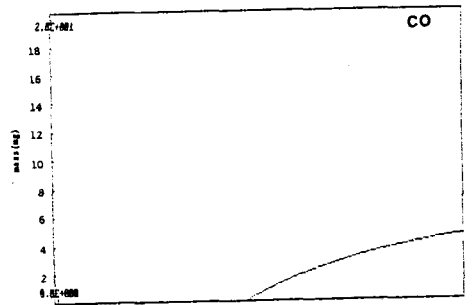
그림 4. 브로콜라의 급격한 변화시 (a) 공기-연료비와 (b) 엔진 속도



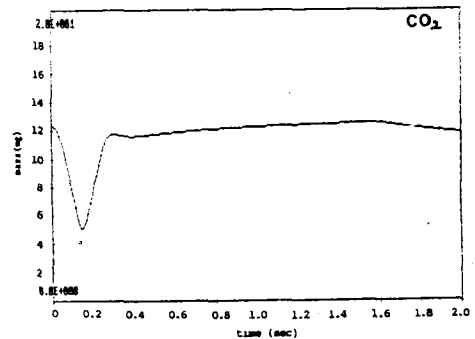
(a)



(b)

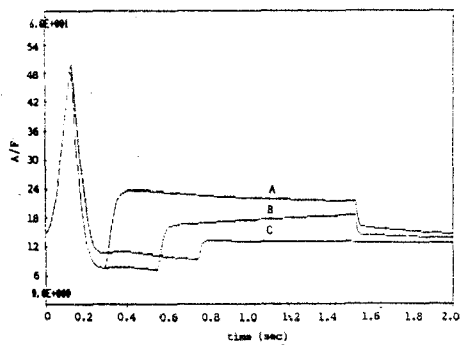


(c)

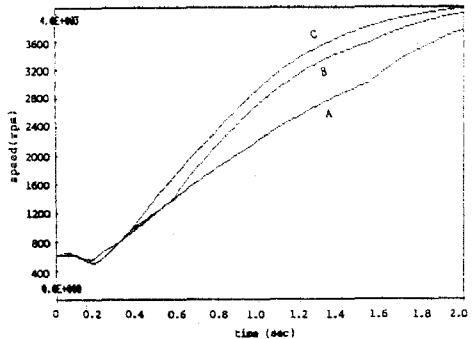


(d)

그림 5. 브로콜라의 급격한 변화시 배기가스



(a)



(b)

그림 6. 공기-연료비 평형의 조절 방법에 의한
(a) 공기-연료비와 (b) 엔진 속도