

## 신경회로망을 이용한 연료 분사식 자동차 엔진의 공연비 제어

최종호    원영준  
공과대학 제어계측공학과,  
자동차 시스템 공동 연구소,  
제어계측 신기술 연구센터

고상근    노승탁  
공과대학 기계공학과

서울대학교

### An Air-Fuel Ratio Control for Fuel-Injected Automotive Engines by Neural Network

Chong-Ho Choi    Yeong-Jun Weon

Sang-Keun Ko    Seung-Tak Ro

Dept. of Control & Instrumentation Eng.

Dept. of Mechanical Eng.

ASRI, ERC-ACI

Seoul National University

#### ABSTRACT

In this paper, a neural network estimator which estimates the output of the wide range oxygen sensor is proposed. The neural network estimator is constructed to give the output of the wide range oxygen sensor from rpm, fuel injection time, throttle position, and output voltage of the exhaust gas oxygen sensor. And, using this estimator, PI controller for air-fuel ratio control is designed. Experiment results show that the proposed method gives good results for SONATA engine under light load and constant rpms.

#### 1. 서론

대기오염의 심각한 원인이 되고 있는 자동차로부터의 유해 배기가스 배출을 억제하기 위하여 현재 대부분의 가솔린 엔진 자동차에서는 배기가스를 촉매변환 장치(catalytic converter)로 정화하는 방법을 사용하고 있다. 촉매변환장치는 이론공연비(stoichiometric air-fuel ratio)로 연소된 가스가 통과할 때 가장 높은 효율을 가지며 이 이론공연비에서의 작은 변화도 촉매변환장치의 효율을 크게 떨어뜨린다(그림 1). 따라서 유해배기가스 제어는 배기가스의 공연비가 이론공연비가 되도록 연료와 공기의 혼합비를 조절하는 것으로 본 논문에서 다룰 연료분사식 엔진에 있어서는 연료분사량을 알맞게 조절하는 것이다. 현재 이를 위하여 연소된 가스중의 산소농도로 배기가스공연비를 측정하는 산소센서(exhaust gas oxygen sensor)를 이용한 폐쇄환 루프제어(closed loop control)가 이용되고 있다.

그러나 현재 쓰이고 있는 산소센서는 이론공연비 부근에서 급격히 변하는 뱅뱅 타입(bang-bang type)에 가까운 출력전압을 나타낸다(그림 1). 그래서 배기가스공연비를 정확히 측정하기는 불가능하고 실제로는 배기가스의 상태가 공기량이 많은 것을 표시하는 희박(lean), 또는 연료량이 많은 것을 표시

하는 농후(rich)인가만을 판단할 수 있는 온-오프(on-off)형태의 특성을 갖는다. 따라서 이 센서를 사용한 정밀한 제어는 어렵다. 현재 실용화 되지는 않지만 배기가스에 대한 공연비를 거의 정확히 측정할 수 있는 광역산소센서(wide range oxygen sensor)가 있다. 이 센서는 출력전압이 공연비와 넓은 범위에 있어서 거의 선형관계에 있다.

이 논문에서는 신경회로망을 사용하여 광역산소센서처럼 배기가스에 대한 공연비를 추정할 수 있는 추정기(estimator)를 구하고 이 추정기를 이용한 비례적분 제어기(proportional-integral controller)를 설계하겠다. 그리고 실제 실험을 통하여 경부하(light load)하에서 일정속도로 운전할 때 기존의 ECU(engine control unit)가 제어하는 경우보다 좋은 결과를 얻을 수 있음을 보이겠다.

#### 2. 신경회로망을 사용한 배기가스에 대한 공연비 추정기 구성

신경회로망은 어떤 입력을 다른 출력으로 대응(mapping)시키는 일을 한다. 이 때 내부의 뉴런(neuron)들간의 가중치(weight)를 변화시켜 줌으로써 이 대응관계를 변화시킬 수 있다. 신경회로망을 학습시킨다는 것은 신경회로망에 주어진 입력, 출력의 데이터로부터 그 관계를 추정하고 이를 이용하여 신경회로망의 가중치들을 변화시켜서 신경회로망이 원하는 입출력관계를 수행하도록 하는 것이다. 이 때 중요한 것은 입출력관계가 어떠한 함수이건 어떠한 형태로 표현하는 것이든 상관없이 단지 입출력 데이터만 있으면 되는 것이다.

본 연구에서는 신경회로망중 가장 대표적인 다층인식자를 사용하였다. 일반적으로 어떤 함수이든간에 그 함수를 근사화시킬 수 있는 다층인식자가 존재한다는 사실이 알려져있다 [1]. 즉, 은닉층의 노드(node)수를 충분히 주고 훈련을 시키면 임의의 함수를 근사화 할 수 있다는 것이다.

배기가스에 대한 공연비 추정기는 이러한 다층인식자의 상상능력을 이용하여 광역산소센서로 측정된 배기가스에 대한 공연비와 이에 영향을 미치리라 생각되는 여러가지 입력요소

들 사이의 대응관계를 구하는 것이다. 출력인 배기가스공연비에 영향을 주는 입력요소로는 엔진 속도(rpm), 연료량, 공기량 등이 있다. 그림 2는 실험에서 사용한 광역산소센서의 특성을 보여주고 있다. 실제로는 완전한 선형은 아니지만 그림처럼 두개의 기울기를 갖는 직선으로 보고 공연비를 구하였다. 그림에서  $\lambda$ (lambda)는 공기-연료비를 이론공연비로 알려진 14.7로 나누어서 정규화(normalize)한 것이다.

실험은 소나타 2000 cc 다중분사(MPI, multipoint injection)엔진에 대하여 냉각수 온도가 80 °C 이상되는 정상 상태에 대하여 하였다. 그림 2에서 보듯이 산소센서를 되먹임(feedback)하여 비례적분 제어를 하는 상태의 데이터를 얻었다. 이 경우 산소센서는 한계사이클(limit cycle) 형태의 출력을 나타낸다[2], [3].

이러한 실험을 통하여 엔진속도(rpm(n)), 연료량에 비례하는 injector의 출력 펄스폭(pulse width)인 연료분사시간(fuel(n)), 공기량에 비례하는 공기량센서의 출력, 쓰로틀 위치를 표시하는 값(tp(n)), 산소센서의 출력(yd(n)), 광역산소센서의 출력(y(n)) 등을 엔진 사이클(engine cycle)마다 샘플(sample)하여 측정하였다.

추정기는 무부하상태와 부하가 조금 있는 상태로 나누어서 구성하였다. 각각의 훈련 데이터는 엔진 속도가 다른 여러가지를 섞어서 만들었다.

먼저 무부하상태일 때 입력이 30개이고 은닉층이 1개, 은닉층의 노드가 30개의 구조를 갖는 다중인식자로 구성하였다. 목표치는 광역산소센서로 측정한 배기가스에 대한 공연비이고 입력으로는 rpm(n-i), fuel(n-i), tp(n-i) (i=2,3,...,9), yd(n-i) (i=1,...,6)도 택하였다. 은닉층의 노드수도 계산량을 고려하지 않고 학습오차를 줄이기 위해 충분히 많이 주었다. 입력 선정은 몇차례의 시행착오를 거쳐 제일 좋은 경우를 택한 것이다. 공기량 센서의 출력을 사용하지 않은 것은 tp(n)와 거의 일대일 대응 관계에 있기 때문이다. yd(n-i) (i=1,...,6)는 입력요소는 아니지만 이를 추가함으로써 출력오차를 크게 줄일 수 있었다. 이는 되먹임 제어(feedback control)를 하고 있는 상태라 yd와 y사이의 상관관계가 크기 때문이라 생각된다. 학습 방법은 표준 오차 역전달 방법(standard back error propagation method)을 사용하였다. 학습이 끝나고 얻은 가중치로 실험에서 구한 데이터들을 테스트한 결과가 표 1과 그림 4에 있다. 그림 4는 1500rpm 일 때의 결과를 그린 것이다. 테스트한 데이터들은 학습에 사용하지 않은 데이터들이다. 표 1은 실제  $\lambda$ 값과 추정기에서 구한  $\lambda$ 값의 평균자승오차(root mean square error)를 표시하고 있다. 표 1에서 평균자승오차는 그림 4에서 보면  $\lambda$ 가 변하는 범위의 3x내임을 알 수 있다.

그런데 이 모델은 구조가 너무 커서 학습시간도 오래 걸리고 출력을 얻기 위한 계산량이 너무 많아서 실제 제어에 이용할 때 정해진 시간 내에 출력을 구할 수 없는 문제가 발생한다. 그래서 비교적 같은 성능을 유지하면서 계산량이 적은 구조가 필요하다. 입력으로 rpm(n-i), fuel(n-i), tp(n-i) (i=4,5,6,7) 과 yd(n-i) (i=1,2,3) 15개로 은닉층의 노드를

10개로 줄여보았다. 이 때의 테스트 결과가 표 1에 있는데 앞 경우와 비교하여 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

부하가 걸린 경우 무부하시와는 달리 소나타 ECU의 제어를 끊고 같은 제어방식으로 비례적분 계수값을 크게 하여  $\lambda$ 값의 변화 범위를 크게하여 학습 데이터를 얻었다. 부하는 엔진 다이나모메타(engine dynamometer)를 사용하여 걸었으며 부하의 값은 다이나모메타에 가해주는 전압과 rpm에 의하여 결정된다. 이 실험에서는 전압을 최대 전압의 10x로 고정시켰다. 추정기의 구조는 무부하시와 똑같이 하였다. 즉, rpm(n-i), fuel(n-i), tp(n-i) (i=4,5,6,7) 과 yd(n-i) (i=1,2,3)의 입력 15개, 은닉층의 노드 10개로 하였다. 무부하시와 똑같이 입력을 취한 이유는 rpm과 tp로 부하에 대한 정보가 들어가리라 생각했기 때문이다. 학습후의 테스트 결과가 표 2에 나와 있고 그림 5는 실제값과 추정값의 비교를 보여 주고 있다. 단 순히 오차만 무부하일 때와 비교하면 7 - 8 배이지만 그림 5에서 실제  $\lambda$ 값이 변하는 범위를 고려하면 6x내로 2배 정도 크다. 오차가 무부하일 때보다 큰 이유가 무부하시와는 달리 다른 입력 변수가 필요한지는 좀 더 연구해야 할 대상인 것 같다.

### 3. 추정기를 이용한 비례적분 제어 및 실험 결과

앞에서 산소센서의 특성때문에 이를 이용한 정밀한 제어는 어렵다는 점을 밝혔다. 실험 대상인 소나타 엔진 ECU(engine control unit)는 산소센서를 되먹임(feedback)하여 비례적분 제어(proportional-integral control)를 한다는 것이 밝혀졌다[4]. 또한, 현재 대부분의 자동차에서는 비례적분 제어가 실제 사용되고 있는 제어방식이다. 비례적분 제어이외로 D.Cho[5] 등의 매우 복잡한 비선형 모델에 의거한 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control), Kamei[6] 등의 광역산소센서를 이용한 선형화된 모델의 LQ제어 등이 연구된바 있다.

여기서는 앞 절에서 구한 배기가스에 대한 공연비 추정기를 이용하여 그림 6과 같은 비례적분 제어기를 설계하였다. 추정기를 구한  $\lambda$ 값과 기준입력(reference input)인  $\lambda=1$ 과의 오차가 0이 되도록 제어하는 것이다. 그림 6에서 보면 연료량은 기본 분사량과 제어기에 의한 분사량의 합으로 되어 있다. 기본분사량이 필요한 이유는 연료량을 되먹임 제어량만으로 하게 되면 엔진이 꺼질 염려도 있고 동적인(dynamic) 상태에서 정상상태(steady state)로 들어가는데 오랜시간이 걸릴 수도 있는 등이 있다. 또 센서 고장시에 기본분사량이 없으면 문제가 발생할 수 있다. 그래서 개 루프(open loop)방식으로 기본분사량을 결정하고 있다. 소나타 ECU에서는 기본분사량을 엔진 속도와 공기량 센서의 출력의 함수로 결정하고 있다[4]. 여기서는 엔진 속도와 부하에 따라서 일정한 값으로 결정하여 사용하였다.

본 논문의 목적은 쓰로틀 위치(throttle position)의 변화가 없는(다시 말하면, rpm의 변화가 거의 없는) 정상상태시 본 논문에서 제안한 추정기를 이용한 되먹임 제어시의 배기가스에 대한 공연비의 비교에 있기 때문에 기본분사량은 크게 중요치 않다고 생각된다. 그러나 동적인 상태도 고려하게 되

면 기본분사량은 중요한 개념이 될 것이다.

실험조건은 앞 절에서 데이터를 얻을 때와 마찬가지로 냉각수 온도가 80 °C 이상이고 쓰로틀의 위치가 변화가 없는 정적인 상태로 제한하였다. 냉각수 온도를 80 °C 이상으로 제한한 것은 소나타 ECU를 보면 냉각수 온도가 낮으면 그에 따른 보정이 들어가는데(4), 이러한 개 루프(open loop)방식의 보정이 영향을 거의 주지 않는 경우에서 단순히 산소센서 되먹임에 의한 영향이 나타날 때의 결과와 비교하기 위해서다. 실제 실험을 한 방법은 소나타 ECU로 시동, 점화시기 제어(ignition control) 등을 하고 소나타 ECU의 연료량 제어(injection control) 부분만 끊고 하였다. 즉, 인젝터(injector)로 가는 연료분사시간만 제어하여 소나타 ECU의 제어결과와 비교하였다.

그림 7을 보면 광역 산소센서로 측정된  $\lambda$ 값이 나오고 있다. 이 그림은 무부하시 1500 rpm 정도일 때 소나타 ECU가 제어를 하고 있는 상태에서 250 엔진 사이클(engine cycle)후에 추정기를 사용한 제어모드로 전환한 결과이다. 따라서 250 엔진 사이클에서 300 엔진 사이클 사이에서는 갑자기 연료량이 바뀌어서 과도응답을 보이다가 300 엔진 사이클 후에는 정상상태(steady state)로 들어간다. 과도응답을 보이는 시간은 기본분사량과 비례 적분 계수값에 의존한다. 이 부분은 동적인 특성을 비교할 때는 중요한 문제이다. 여기서는 300 엔진 사이클 후의 정상상태(steady state)와 250 엔진 사이클 이전의 소나타 ECU가 제어하는 부분의  $\lambda$ 값을 비교하겠다. 그림 7에서 보면 추정기를 사용한 비례적분 제어시기가 진폭이 훨씬 작음을 알 수 있다. 그림 8은 이 당시의 엔진 속도를 나타내고 있다. 엔진 속도는 서로 비슷한 출력을 보이고 있다. 그림 9는 제어량인 연료분사시간을 나타내고 있다. 250 엔진 사이클 이전은 소나타 ECU가 250 엔진 사이클 후는 추정기를 이용한 제어가 계산한 것이다. 이때 기본연료 분사시간은 3 msec로 하였다. 추정기를 쓰는 경우 연료량의 변화폭이 훨씬 줄어들었음을 알 수 있다. 그런데 연료분사시간의 평균을 보면 추정기를 이용한 제어가 작으므로  $\lambda$ 값의 평균도 더 희박한 상태로 나타나야 할 것 같은데 그림 7을 보면 그렇지 않다. 이 점에 대해서는 아직 정확한 원인을 모르겠다. 비례적분 계수값은 모든 rpm에 대하여 같은 값을 사용하였다. 표 3와 4는 여러 엔진 속도의 경우  $\lambda$ 값과 엔진 속도의 평균과 표준편차를 구해서 두가지 제어 결과를 비교하고 있다. 엔진 속도는 비슷하고  $\lambda$ 는 엔진 속도가 낮을 때를 제외하고는 추정기를 사용한 비례적분 제어시에 표준편차가 소나타 ECU 제어시의 1/3 - 1/2정도로 작음을 알 수 있다. 그러나 평균을 보면 소나타 ECU의 제어시도 마찬가지로이지만  $\lambda=1$ 에는 만족할 만큼 접근하지 못하고 약간 희박(lean)하다. 부하가 있는 실험은 5 - 12 마력(HP, horse power)정도 걸고 하였다. 표 5와 6에  $\lambda$ 값과 엔진 속도의 평균과 표준편차를 보이고 있다. 무부하시와 비슷한 결과이다.

그림 10은 추정기를 이용한 제어시 광역산소센서로 측정된  $\lambda$ 값과 추정기로 측정된  $\lambda$ 값을 비교하고 있는데 앞 절에서 테스트한 결과와 비교하면 오차가 크게 나타남을 알 수 있다. 그림에서 실제  $\lambda$ 값의 평균은 1.008014이고 추정값의 평균은

1.000005로 0.008 정도 희박(lean)하게 바이어스(bias)되어 있음을 알 수 있다. 이 바이어스가 앞에서 말한  $\lambda$ 의 평균을 약간 희박하게 만든 것이다. 또 평균자승오차는 0.011정도로 크다. 그럼에도 불구하고 제어한 결과가 좋은 이유는 각 순간의 오차의 크기가 큰 의미를 갖지 않음을 알 수 있다. 즉, 제어에 있어서는 추정오차의 크기보다는 추정기가 전체적으로  $\lambda$ 값의 변화 경향을 나타내주고 바이어스(bias)의 크기가 얼마인가가 중요한 요소인 것이다. 추정기가  $\lambda$ 값의 변화경향을 표현하지 못하면 제어가 제대로 될 수 없을 것이고 바이어스의 크기가 크면 원하는 목적인  $\lambda=1$ 을 쫓아가지 못하고 이 보다 희박(lean) 혹은 농후(rich)한  $\lambda$ 값을 쫓아가게 될 것이다. 이러한 것을 방지하기 위해서는 추정기 혼련시  $\lambda=1$ 에 해당되는 값이 제대로 사상(mapping)되는가를 증시해야 하고 그 다음 전체적인 변화 경향을 따라가지를 증시해야 한다.

지금까지의 결과를 보면 정상상태에서는 소나타 ECU가 제어할 때보다 이론공연비에서의 변화폭을 더 줄일 수 있었다. 그러나 동적인(dynamic) 특성을 고려치 않았기 때문에 소나타 ECU보다 더 좋은 제어방식이라고 아직은 말할 수 없다. 동적 특성까지 고려하려면 동적 상태에 대한 추정기 신경회로망을 다시 구성해야 하고 기본분사량과 비례적분 계수값 결정을 증시해야 한다. 한편 이번 실험에서 부하가 있는 경우와 무부하시 때의 추정기를 나누어서 제어에 이용하였는데 이를 하나로 합할 수 있는지는 더 연구할 과제인 것 같다. 또 부하가 전체 부하(full load)의 10% 내에 대해서만 고려하였는데 이를 확장시키는 것도 앞으로의 과제라 생각된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 신경회로망을 사용하여 배기가스에 대한 공연비를 구하는 추정기를 구하였다. 추정기는 배기가스공연비와 rpm, 연료분사시간, 쓰로틀 위치, 산소센서 출력 전압 등 사이의 대응관계를 구하였다. 이 추정기는 광역산소센서처럼  $\lambda$ 를 측정하는데는 좋은 성능을 보이지 못했지만 이를 이용한 비례적분 제어기는 rpm의 변화가 거의 없는 정상 특성에서는 기존의 소나타 ECU보다 좋은 제어 결과를 보였다. 여러가지 부하 상태와 동적 특성을 고려한 추정기와 제어를 설계하는 것이 앞으로의 할 일이다.

#### 참고문헌

- [1] Robert Hecht-Nielsen, "Neurocomputing", Addison Wesley, pp.122-123, 1990.
- [2] D.R.Hamburg and M.A.Schulman, "A closed-loop A/F control method for internal combustion engines", SAE paper No. 800826, 1980.
- [3] B.K.Powell, H.Wu and C.F.Aquino, "Stoichiometric air-fuel ratio control analysis", SAE paper No. 810274, 1981.
- [4] 박경석, "MPI 엔진의 공연비 제어에 관한 실험적 연구", 서울대학교 공과대학원 기계공학과 석사학위논문, 1991.

[5] D.Cho and J.K.Hedrick, "A nonlinear controller design method for fuel-injected automotive engines", ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.110, pp.313-320,1988.

[6] E.Kamei, H.Namba, K.Osaki and M.Ohba, "Application of reduced order model to automotive engine control system", ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.109, pp.232-237, 1987.

표 1. 평균자승오차 (무부하시)

Table 1. Root mean square error ( load = 0 )

	입력 30개일 때	입력 15개일 때
1000 rpm	0.0011592	0.001236
1500 rpm	0.0015890	0.0013302
2000 rpm	0.0014107	0.0016126
2500 rpm	0.0016643	0.0017107

표 2. 평균자승오차 (부하가 조금 있는 경우)

Table 2. Root mean square error ( load : 4.84 - 13 )

엔진 속도	부하(HP)	평균자승오차
1100 rpm	4.84	0.007536
1300 rpm	6.06	0.008029
1500 rpm	7.50	0.010653
1900 rpm	10.3	0.008620
2300 rpm	13.0	0.008414

표 3. 공연비의 비교 (무부하시)

Table 3. Comparison of the lambda ( load=0 )

엔진속도	소나타 ECU		추정기사용 PI제어	
	평균	표준편차	평균	표준편차
1000 rpm	1.006433	0.015503	1.011509	0.014008
1200 rpm	1.005738	0.013497	1.009831	0.011427
1300 rpm	1.007542	0.013957	1.006190	0.006450
1500 rpm	1.009243	0.015551	1.007137	0.007806
1700 rpm	1.007357	0.017902	1.004155	0.006132
2000 rpm	1.005075	0.015546	1.002603	0.005327
2500 rpm	1.029582	0.013246	1.009567	0.007130

표 4. 엔진 속도의 비교 ( 무부하시 )

Table 4. Comparison of rpm ( load=0 )

엔진속도	소나타 ECU		추정기사용 PI제어	
	평균	표준편차	평균	표준편차
1000 rpm	1048.5	14.5	1049.5	14.7
1200 rpm	1212.0	13.0	1210.4	17.1
1300 rpm	1317.2	16.7	1319.4	11.1
1500 rpm	1569.6	9.5	1566.5	9.7
1700 rpm	1792.5	9.2	1795.3	9.1
2000 rpm	2083.1	8.7	2087.8	8.2
2500 rpm	2503.8	11.9	2529.2	9.2

표 5. 추정기 사용 제어시의 공연비

(부하가 조금 있는 경우)

Table 5.  $\lambda$  when the estimator is used for control ( load : 5.86 - 12.79 )

엔진속도	부하(HP)	평균	표준편차
1100 rpm	5.86	1.006325	0.006225
1400 rpm	8.40	1.006126	0.007266
1500 rpm	9.50	1.005950	0.006909
1900 rpm	12.79	1.006886	0.008775

표 6. 추정기 사용 제어시의 엔진속도

(부하가 조금 있는 경우)

Table 6. RPM when the estimator is used for control ( load : 5.86 - 12.79 )

엔진속도	부하(HP)	평균	표준편차
1100 rpm	5.86	1141.5	3.1
1400 rpm	8.40	1399.2	3.8
1500 rpm	9.50	1519.1	3.7
1900 rpm	12.79	1920.7	3.2

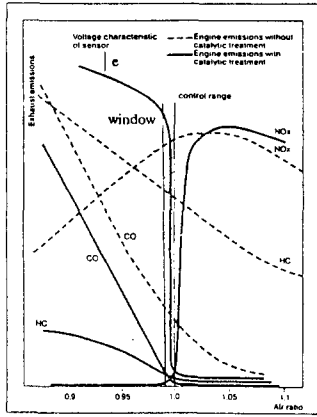


그림 1. 촉매변환장치와 산소센서의 특성  
 Fig 1. Characteristics of the catalytic converter and the exhaust gas oxygen sensor

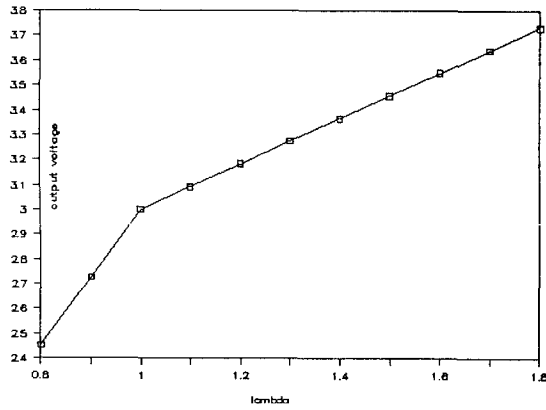


그림 2. 광역산소센서의 특성  
 Fig 2. Characteristics of the wide range oxygen sensor

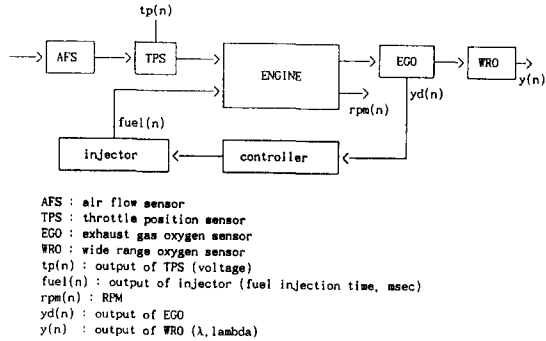


그림 3. 실험 장치의 구성  
 Fig 3. Block diagram of the experimental apparatus

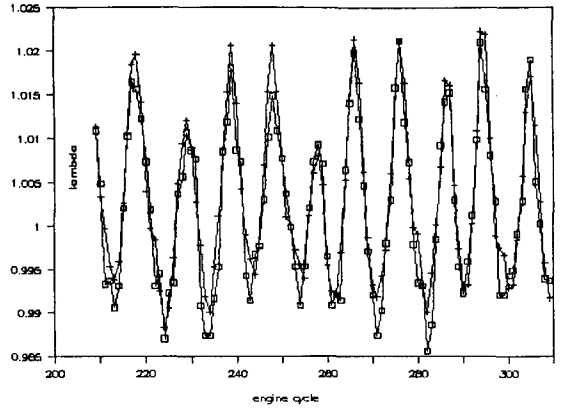


그림 4. 측정 lambda(□)과 추정값(+의 비교(무부하, 1500rpm)  
 Fig 4. Comparison between the measured  $\lambda(\square)$  and the estimated value(+ (load =0, 1500 rpm)

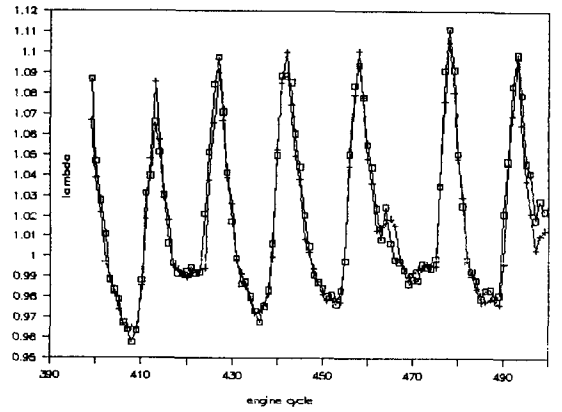


그림 5. 측정 lambda(□)과 추정값(+의 비교 (부하 = 7.5 HP, 1500rpm)  
 Fig 5. Comparison between the measured  $\lambda(\square)$  and the estimated value(+ (load = 7.5 HP, 1500 rpm)

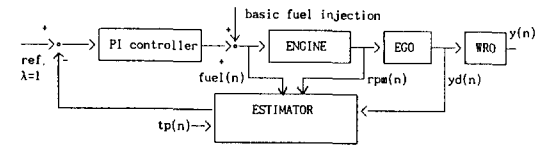


그림 6. 추정기를 이용한 제어기의 구조  
 Fig 6. Structure of the controller using the neural network estimator

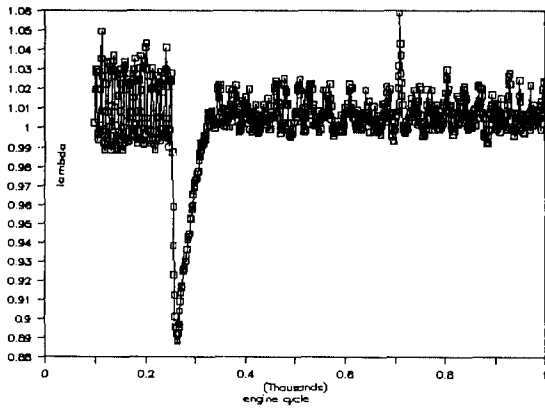


그림 7. 배기가스공연비의 변화 (무부하, 1500 rpm)  
 Fig 7. Variation of the lambda ( load=0, 1500 rpm )

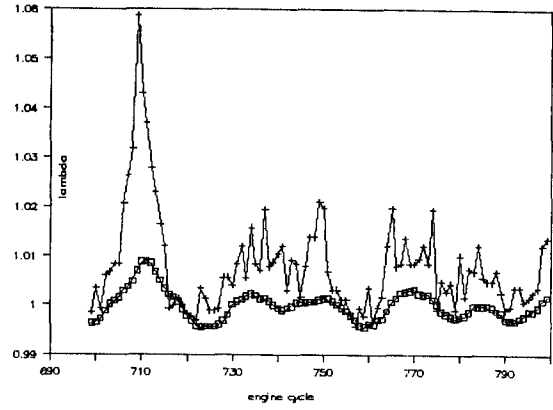


그림 10. 추정기 사용 제어시 측정 값과 추정치의 비교  
 (무부하, 1500 rpm, □: 추정치, +: 측정 λ)  
 Fig 10. Comparison between the measured λ and the  
 estimated value when the estimator is used for  
 control (load=0, 1500rpm, □: estimated, +: measured)

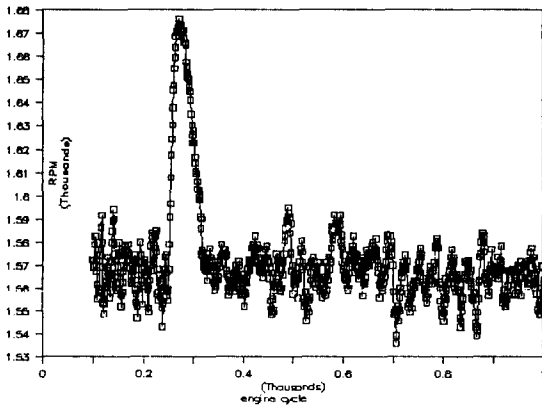


그림 8. 엔진속도의 변화 (무부하, 1500 rpm)  
 Fig 8. Variation of rpm ( load=0, 1500 rpm )

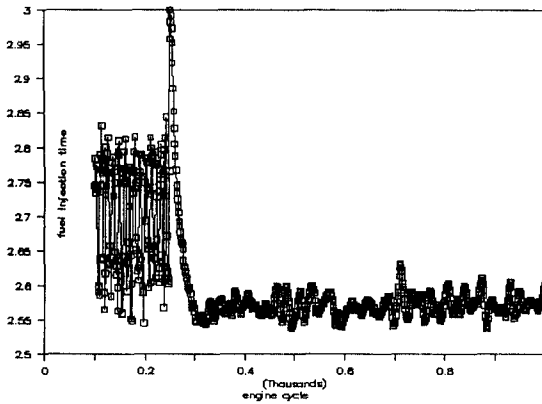


그림 9. 연료분사시간의 변화 (무부하, 1500 rpm)  
 Fig 9. Variation of the fuel injection time  
 ( load=0, 1500 rpm )