

〈論 文〉

신경회로망을 이용한 정상상태에서의 자동차 엔진의 공연비제어

최종호* · 원영준* · 고상근** · 노승탁**

(1992년 3월 9일 접수)

Air-Fuel Ratio Control of Automobile Engines in Steady States by Neural Networks

Chong-Ho Choi, Yeong-Jun Weon, Sangken Kauh and Seung-Tack Ro

Key Words: Stoichiometric Air-Fuel Ratio(이론공연비), Neural Networks(신경회로망), Estimators(추정기), Air-Fuel Ratio Control(공연비제어)

Abstract

An air-fuel ratio control method is studied to keep the air-fuel ratio of the exhaust gas in the neighborhood of the stoichiometric air-fuel ratio to maximize the conversion efficiency of the three-way catalytic converter. Estimators, which estimate the air-fuel ratio of the exhaust gas, are proposed using neural networks to overcome the limit of the presently used bang-bang type exhaust gas oxygen sensor. Using these estimators, PI controller for air-fuel ratio control is designed and is experimented for an automobile engine. The proposed controller reduces the variation of air-fuel ratio of the exhaust gas from the stoichiometric air-fuel ratio by 50%~75% when compared to the existing controller.

1. 서 론

환경오염이 심각한 사회문제로 대두되면서 CO, HC, NO_x 등의 자동차 배기가스 유해물질에 대한 규제정도가 점점 심해지고 있다. 이 유해 배기가스를 감소시키기 위한 방법으로 현재 많이 사용되고 있는 방법은 배기관에 3원촉매 전환장치(three way catalytic converter)를 설치해 배기가스의 유해성분을 정화하는 방법이다. 이 촉매장치는 배기가스의 공연비(air-fuel ratio)에 따라서 전환효율이 크게 달라지는데, 이론 공연비(stoichiometric air-

fuel ratio)로 알려진 14.7 부근에서 최대효율을 가지며 이론공연비 ±0.1에서만 CO, HC, NO_x 세 성분을 동시에 효과적으로 감소시킬 수 있다(Fig. 1).⁽¹⁾ 따라서 배기가스의 공연비를 이론공연비 부근으로 제어하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 MPI(multi point injection)엔진에서 배기가스의 공연비가 이론공연비가 되도록 제어하는 공연비제어에 대하여 연구한다. 현재 배기가스의 공연비를 측정하는데 사용되는 산소센서(exhaust gas oxygen sensor)는 이론공연비 부근에서 급격히 변하는 뱅뱅타입(bang-bang type)에 가까운 출력을 나타낸다(Fig. 1).⁽¹⁾ 그래서 이 센서로는 배기가스의 공연비를 정확히 측정하기는 불가능하고 실제로는 배기가스의 공연비가 이론공연비에 비하여 상대적으로 공기량이 많은 것을 표시하

*정희원, 서울대학교 제어계측공학과, ERC-ACI by KOSEF, ASRI

**정희원, 서울대학교 기계공학과

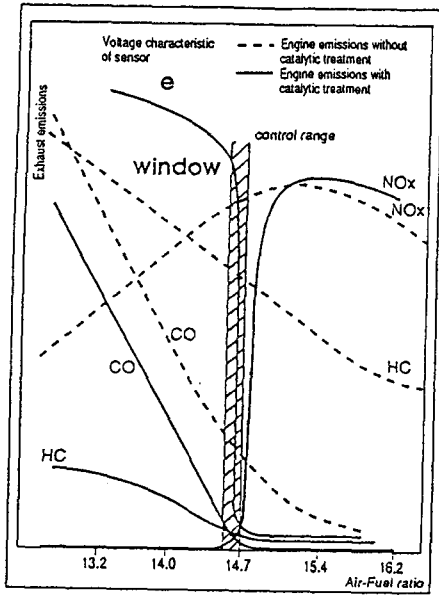


Fig. 1 Characteristics of TWC and EGO sensor

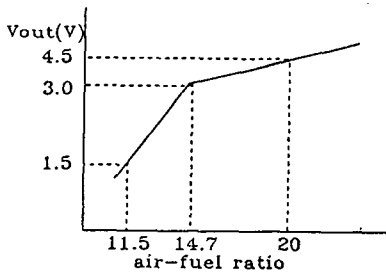


Fig. 2 Characteristics of WRS

는 희박(lean), 또는 연료량이 많은것을 표시하는 농후(rich)인가만을 판단할 수 있는 온-오프(on-off) 특성을 갖는다. 따라서 이 산소센서를 이용한 정밀한 제어는 쉽지가 않다.

한편 가격 등의 이유로 실용화되고 있지는 않지만 배기가스의 공연비를 거의 정확히 측정할 수 있는 광역공연비센서(wide range air-fuel ratio sensor)가 있다. 이 광역공연비센서는 출력전압이 공연비에 대하여 넓은 범위에 있어서 선형관계에 있다(Fig. 2).⁽²⁾

본 논문에서는 현재 사용되고 있는 산소센서의 단점을 극복할 수 있는 방법으로 광역공연비센서처럼 공연비를 추정할 수 있는 방법을 연구한다. 그

방법으로 신경회로망을 사용한 배기가스의 공연비 추정기(estimator)를 구성한다. 그리고 이 추정기를 이용한 공연비 제어를 설계하고 실제 MPI엔진에 적용하여 그 성능을 알아 보겠다.

2. 신경회로망을 사용한 배기가스의 공연비 추정

본 연구에서는 광역공연비센서를 사용하지 않고서도 광역공연비센서처럼 공연비를 비교적 정확히 알아낼 수 있는 방법을 구하도록 한다. 이러한 기존의 산소센서를 이용해서 제어보다 세밀한 제어를 좀더 쉽게 할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 엔진속도가 일정한 정상상태에 대해서 공연비를 추정하는 방법을 연구한다.

본 연구에서 제안한 공연비 추정방법은 신경회로망⁽³⁾중에 다층인식자(multilayer perceptron)를 사용하는 것이다. 신경회로망은 주어진 입력과 출력의 예제를 통해서 배우는 학습능력이 있다. 광역공연비센서로 공연비를 측정할 수 있으므로 이 측정된 공연비값을 다층인식자의 목표치(target)로 주고 다층인식자의 출력이 이 값을 따라가도록 학습시키는 것이다. 그래서 학습이 끝나면 다층인식자로 공연비를 계산해낼 수 있다. 다층인식자로 계산한 공연비가 광역공연비센서로 측정된 공연비에 비해서 얼마나 정확한가는 학습결과 정도와 일반화(generalization)가 얼마나 잘 되었나로서 판단된다. 다층인식자의 학습방법으로는 가장 많이 사용되는 오류역전파(back error propagation) 알고리즘을 사용하였다.

학습을 위해서는 먼저 입출력관계를 결정해야 하고 다층인식자의 구조, 즉, 은닉층의 수, 노드의 수 등을 결정해야 한다. 그리고 학습에 사용될 데이터를 다양하게 얻어야 한다.

실험대상 엔진은 소나타(SONATA) 2000 cc MPI 엔진이다. 엔진은 실제차체가 아닌 엔진동력계(engine dynamometer)에 설치하여 실험하였다. 엔진을 기초위에 고정시키고 동력이 클러치(clutch) 및 변속기를 거쳐 엔진동력계에 전달되게 하였다. 엔진동력계는 100 kgf까지 눈금이 있는 것으로 가해주는 직류전압과 엔진 속도(RPM)에 비례하여 마찰력이 발생하여 엔진에 가해주는 부하가

생긴다. 부하조절은 가변저항기로 직류전압을 변화시켜서 하였다. 엔진의 냉각수는 열조절밸브를 사용하여 항상 일정한 온도가 유지되도록 한다. 통상 실험은 엔진이 어느정도 가열되어 냉각수 온도가 80~90℃ 사이에서 하였다.

본 연구에서는 RPM이 거의 일정한, 다시 말하면 쓰로틀 위치(throttle position)가 일정한, 정상 상태에서 일정한 부하가 가해지는 경우에 대해서만 실험하였다. 부하는 기어(gear)를 2단으로 넣고 직류전압을 조정해서 전압이 0일 때 최대 전압의 20% 일때, 최대전압의 40%일 때로 나누었다. 이를 편의상 무부하, 부하 20%, 부하 40%라 부르겠다. 부하 20%, 40%는 전부하(full load)의 20%, 40%라는 의미는 아니다. 엔진 동력계에 나타난 부하는 부하 20%일 때 1000~2500 RPM 이면 29 kgf~45 kgf 정도이고, 부하 40% 인 경우는 1000~2000 RPM 에서 44 kg~68 kgf 정도이다. 이를 마력으로 환산하면 부하 20%는 2.4~9.4마력, 부하 40%는 3.6~11.3 마력 정도이다.

측정데이터는 소나타 ECU(electronic control unit)와 같은 기능을 하는 PC로 구성된 장치⁽⁴⁾(PC-ECU라 명칭하겠다)를 이용하여, 부하가 3가지 경우에 쓰로틀을 조정하여 RPM을 변화시켜 1000에서 2500 RPM 사이의 정상상태 데이터를 PC-ECU를 사용하여 소나타 ECU가 제어할 때 측정하거나 때에 따라서는 PC-ECU로 제어를 하여서 측정하였다. 측정된 데이터는 엔진 사이클(cycle) 단위로 샘플링한 RPM, 연료분사시간(fuel injection time), 쓰로틀위치(throttle positio), 산소센서 출력, 광역공연비센서 출력 등이다. 이들을 n 번째 엔진사이클에 대하여 다음과 같이 정의하여 사용하겠다.

- RPM(n) : 엔진 속도
- fuel(n) : 연료분사시간(msec)
- tp(n) : TPS의 출력전압(V)
- o2(n) : 산소센서의 출력(V)
- (A/F)_{out}(n) : 광역공연비센서의 출력(V)

fuel(n)은 인젝터를 개방하는 시간으로 ECU에서 인젝터로 보내는 12 V 가량의 펄스의 폭(pulse duration)이다. tp(n)은 쓰로틀위치센서(throttle position sensor, TPS)의 출력이다. 광역공연비센서는 기존의 산소센서보다 배기관외의 50 cm 가량 뒷부분에 설치하였다.

공연비 추정기(hstimator)를 학습시키려면 먼저

입출력관계를 결정해야 한다. 목표치(target)는 광역공연비센서로 측정된 배기가스의 공연비, 즉 광역공연비센서의 출력전압이 된다. 입력으로는 이 출력값에 영향을 주는 요소들을 정해야 한다. 입력 선정은 여러번의 시행착오를 거쳐서 학습이 제일 잘되는 경우를 택하였다. 추정기로 사용할 다층인식자의 구조는 은닉층 1층(노드수 10개), 입력은 RPM($n-i$), fuel($n-i$), tp($n-i$) ($i=4,5,6,7$), o2($n-i$) ($i=1,2,3$) 15개로 하였다.⁽⁵⁾

공연비 추정기는 앞에서 말한 구조로 3가지 부하 조건에 대해서 각각 구하였다. 부하별로 나누는 이유는 3가지 경우를 합할 경우 학습할 데이터 양이 너무 많고 학습오차도 나누어서 할 때보다 30% 가량 커지기 때문이었다. 학습 데이터는 앞에서 설명한 대로 1000에서 25000 RPM 까지의 데이터를 RPM 별로 조금씩 랜덤(random)하게 섞어서 만들었다. 학습에 사용시 출력 부분은 정규화하고 입력은 크기를 (1), (2), (3)과 같이

$$(A/F)_{out}(\cdot) = ((A/F)_{out}(\cdot) - 2.9) / 0.2 \quad (1)$$

$$\text{fuel}(\cdot) = \text{fuel}(\cdot) - 0.55 \quad (2)$$

$$\text{RPM}(\cdot) = \text{RPM}(\cdot) / 1000 \quad (3)$$

조절하였다. 광역공연비센서의 출력은 2.9 V~3.1 V 사이로 이론공연비에 해당하는 3 V가 0.5가 되도록 정규화(normalize)한 것이고 (2)는 인젝터의 부동시간(dead time)에 해당하는 시간을 뺀 것이다. 부동시간은 인젝터에 전압이 가해진 후, 인젝터의 밸브가 열리기까지의 지연시간을 말한다. RPM은 크기를 적당히 줄인 것이다.

일반화의 문제가 추정기 구성중 제일 어려운 부분이었으며 학습이 끝난후 테스트는 두가지로 해볼 수 있었다. 학습 데이터에 일부분 참여한 데이터의 나머지 부분을 테스트하면 학습결과와 거의 비슷하게 나온다. 그러나 새로운 엔진 실험을 통하여 얻은 학습에 전혀 포함되지 않은 데이터를 테스트해보면 오차게 크게 증가하는 경우가 생긴다. 이 오차는 대부분 전체적으로 바이어스(bias)가 생겨서 커지는 현상으로 나타났다.

이러한 문제를 해결하려면 한번 실험한 데이터로만 학습데이터를 만들지 말고 실험을 여러번 반복하여 얻은 데이터를 혼합하여 사용하는 것이 필요하다.

여러 데이터를 혼합하여 테스트한 결과는 출력값의 평균자승근(root mean square) 오차(이하 줄여

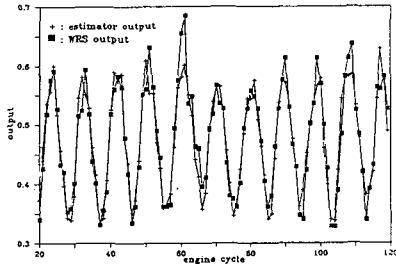


Fig. 3 Test result of estimator (no load)

서 출력오차라 한다)는 0.03~0.075 사이에 있는데 RPM과 부하에 따라서 차이가 많다. 무부하시와 부하가 있는 경우를 비교하면 무부하시가 오차가 적다. 부하가 있는 경우에는 무부하시와는 달리 다른 정보를 입력으로 추가해야 되는지는 앞으로의 연구과제인것 같다. Fig. 3은 테스트 결과중 일부를 그린 것이다. 결과를 보면 추정치가 목표치에 바이어스(bias) 없이 목표치를 비교적 잘 쫓아가고 있음을 알 수 있다.

3. 추정기를 이용한 PI 제어

산소센서의 특성때문에 이를 이용한 제어는 쉽지가 않다는 점을 언급했다. 현재 상용차에서는 산소센서를 이용한 PI 제어가 이루어지고 있다. 이 경우 PI 계수값을 잘 찾으면 광역공연비센서의 출력은 어떤 한계사이클(limit cycle) 형태를 갖는다.⁽⁵⁾ 그러나 광역공연비센서로 PI 제어를 하는 경우에는 쉽게 공연비의 변화폭을 산소센서를 사용하는 경우보다 크게 줄일 수 있다.⁽⁶⁾ 이것은 광역공연비센서처럼 공연비에 대하여 선형적으로 변하는 센서로는 같은 PI 제어이지만 더 좋은 결과를 쉽게 얻을 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 앞에서 설명한 추정기로 PI 제어를 하였다. 추정기는 광역공연비센서와 똑같은 기능을 하는 것은 아니지만 이론공연비 부근에서는 광역공연비센서와 비슷한 성능을 보였다. 그러므로 이를 이용한 PI 제어도 기존의 방법보다 더 좋은 결과를 예상할 수 있다.

본 논문에서 제안한 PI 제어기의 구조는 Fig. 4와 같다. 추정기로 구한 공연비 값과 기준값(reference)에 해당되는 이론공연비 값의 오차가 0이 되도록 하는 것이다. 추정기에서는 이론공연비

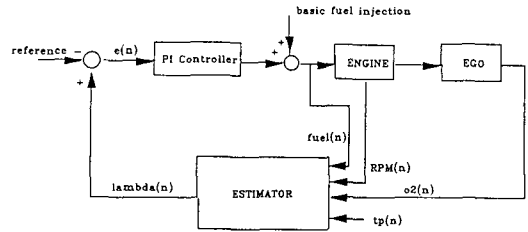


Fig. 4 Structure of PI controller using the estimator

에 해당되는 값은 0.5이다. 따라서 오차신호와 연료분사시간은 다음식과 같이 계산된다.

$$e(n) = \lambda(n) - 0.5 \tag{4}$$

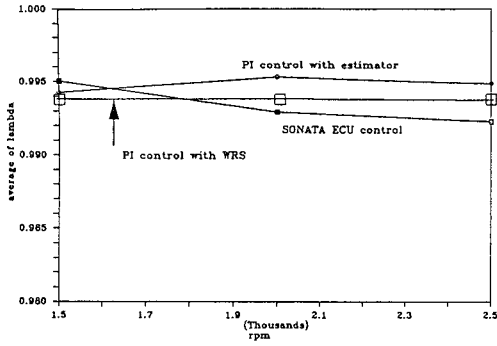
$$\text{fuel}(n) = (K_p \cdot e(n) + K_i \cdot \sum e(n) + 1) \cdot \text{BFI} \tag{5}$$

BFI=기본분사량(basic fuel injection)

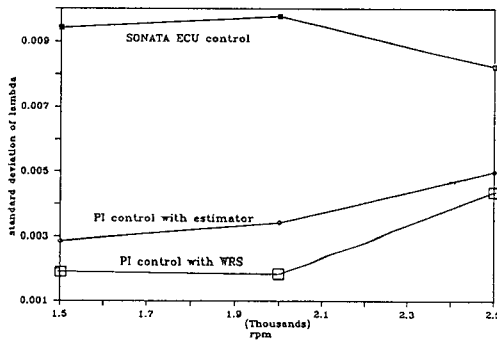
연료 분사시간은 기본분사량과 제어기의 출력으로 되어있다. 기본분사량이 필요한 이유는 엔진의 안정성과 과도응답을 좋게하는데 있다. 제어기의 출력만으로 연료량을 결정하면 엔진이 꺼질 염려도 있고 정상상태로 들어가는데 오랜시간이 걸릴 수 있다. 또, 센서 고장시에 기본분사량이 없으면 문제가 발생할 수 있다. 소나타 EDU에서는 개방루프(open loop) 방식으로 기본분사량을 결정하는데, RPM과 공기량센서 출력값의 일차함수 형태로 이른 공연비보다 조금 농후(rich)하게 결정하여 사용한다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 정상상태의 특성만 고려키 때문에 기본분사량 결정에 큰 비중을 두지않고 RPM과 부하에 따라서 적당한 값을 선택하여 사용하였다. 그러나 동적특성도 고려할 때에는 기본분사량을 정확하게 튜닝(tuning)하는 작업이 필요할 것이다.

실험은 처음에는 소나타 ECU로 제어를 하다가 150 사이클 후 연료분사제어 모드를 PC-ECU로 바꾼다. 점화시기제어는 소나타 ECU가 한다. PC-ECU에서는 Fig. 4의 구조에 (5)와 같은 추정기를 이용한 PI 제어를 하였다. PI 계수는 몇차례의 실험중 결과가 제일 좋을 때의 값을 택하였는데 계수값에 따라서 큰 차이가 나지는 않았다. 그래서 부하 및 RPM에 관계없이 일정한 값을 사용하였다 ($K_p=0.13$, $K_i=0.013$).

Fig. 5~7에 λ 값(공연비를 이론공연비 14.7로 나눈값)의 평균과 표준편차를 소나타 ECU 제어시,

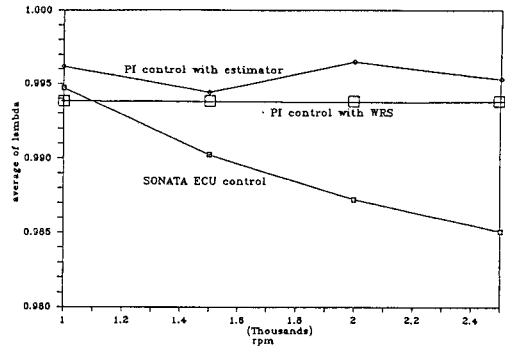


(a) mean of λ

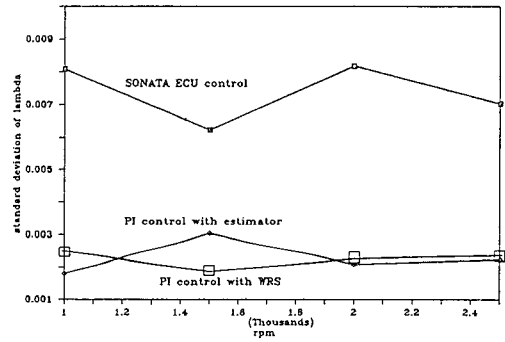


(b) standard deviation of λ

Fig. 5 Comparison of λ in three cases of A/F control (no load)



(a) mean of λ



(b) standard deviation of λ

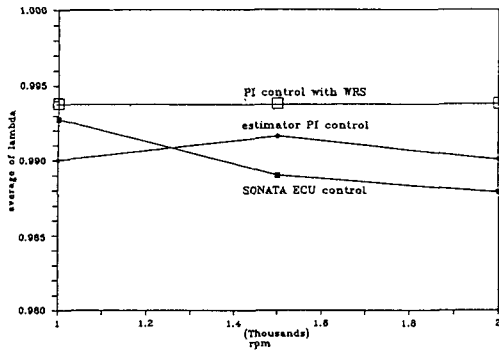
Fig. 6 Comparison of λ in three cases of A/F control (load 20%)

광역공연비센서 PI 제어시, 추정기를 이용한 PI 제어시에 각각 정리하여 3가지 부하에 대하여 RPM 별로 그린 것이다. 추정기를 이용한 제어와 소나타 ECU 제어시와 비교하면 λ 값의 변화폭이 1/4~1/2 정도로 줄었다. 이는 공연비제어를 훨씬 좁은 범위내에서 할 수 있음을 의미한다. 추정기를 이용한 제어시와 광역공연비센서 PI 제어시를 비교하면, 광역공연비센서 PI 제어시는 RPM과 부하에 관계없이 λ 값의 평균과 표준편차가 거의 일정한 반면 추정기 PI 제어시는 RPM과 부하에 따른 차이가 존재한다. 특히 부하 40% 일때는 상대적으로 λ 값의 평균이 농후하다.

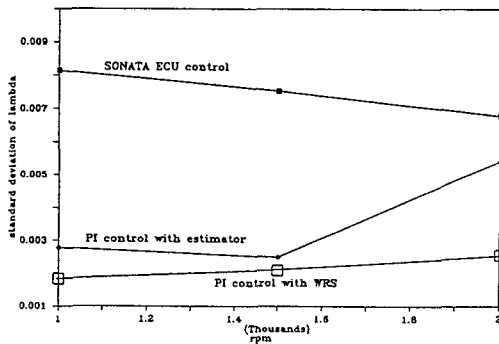
추정기를 이용한 PI 제어의 목표는 광역공연비센서를 이용한 PI 제어와 같은 결과를 얻는 것이다. 실험결과를 보면 조금은 성능이 떨어진다. 이 원인은 추정기의 성능에 있다. 2장의 추정결과를 보면 작은 변화를 하는 부분에 대해서는 세밀하게 쫓아가지 못한다. 결국 이 점이 추정기를 이용한

제어결과와 광역공연비센서를 이용한 제어결과와의 차이라 생각된다. Fig. 8은 실제 제어시의 추정기의 성능을 보여주고 있다. 추정기에서는 0~1 사이의 값이 나오지만 (1)에 의해서 환산하여 광역공연비센서로 측정된 값과 비교하고 있다. 실험결과에서 보면 무부하일 때가 가장 잘 맞고 부하 20%, 40% 시에는 세밀하게 따라가지 못한다. 특히 부하 40% 일때에는 추정값이 측정값보다 약간 큰 농후한 바이어스(bias)가 있다. 이 바이어스가 λ 값의 평균이 무부하, 부하 20% 일때보다 약간 농후하게 나온 원인이라 생각된다. 이 경우에는 바이어스의 크기가 크지 않아 문제가 되지 않았지만 바이어스의 크기가 크면 이론공연비가 아닌 다른 공연비를 기준으로 제어를 하는 결과가 되므로 문제가 커진다. 그러므로 실제 추정기를 이용한 공연비제어를 할 때에는 추정기에 바이어스가 거의 없어야 하는 점이 매우 중요하다.

추정기를 이용한 제어기는 기존의 산소센서를 이



(a) mean of λ



(b) standard deviation of λ

Fig. 7 Comparison of λ in three cases of A/F control (load 40%)

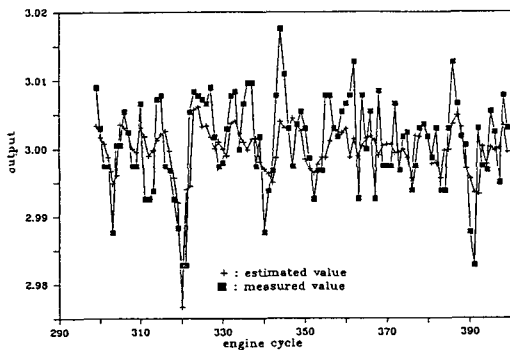


Fig. 8 Performance of the estimator (load 20%)

용한 제어의 어려움을 해결할 수 있었다. 그래서 소나타 ECU가 제어할 때보다 좋은 성능을 보일 수 있었다. 하지만 앞으로 해결해야 될 문제점들이 있다. 첫째로 안정성(stability)보장 문제이다. 엔진의 특성이나 센서(산소센서, 쓰로틀위치센서)의

특성이 변하거나 주위조건(공기, 온도, 압력 등)의 변화로 인해 추정기를 학습시킬 때 포함되지 않은 유형에 대하여 추정기가 제대로 성능을 발휘할 수 있는가 하는 문제인데 현재로는 여러번 실험을 반복하여 테스트해보는 수 밖에 없다. 둘째는 동적상태는 고려치 않은 점인데, 동적상태에서의 제어는 앞으로 더 연구할 과제이다. 셋째로는 추정기를 부하별로 구분하여 사용하고 있는 점인데 부하에 관계없는 추정기를 만드는 일이 바람직 하겠다.

4. 결 론

본 논문에서는 다층인식자를 사용하여 배기가스의 공연비를 추정하는 추정기(estimator)를 제안하였고 이 추정기를 사용한 PI 제어를 설계하였다. 추정기는 다층인식자의 학습능력을 이용하여 광역공연비센서의 출력값을 따라가도록 학습시켰다. 학습은 RPM 변화가 거의 없는 정상상태에 대해서 부하를 3가지로 나누어서 하였다. 학습이 끝난 후 구성된 추정기는 학습시킨 유형인 이론공연비 부근에서 자주변하는 정상상태에서는 순간적인 오차는 약간 존재하지만 변하는 경향은 잘 따라갔다. 추정기를 이용한 PI 제어방법은 정상상태에서는 기존의 산소센서를 이용한 PI 제어방법보다 쉽게 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 3가지 부하조건에서 소나타 ECU의 제어결과와 비교해보면 공연비의 이론공연비에서의 변화폭을 1/4~1/2 정도로 줄일 수 있었다.

동적상태는 포함하며 모든 부하상태에서 잘 동작할 수 있는 공연비 제어를 만드는 것이 앞으로의 과제이다.

참고문헌

- (1) Eckhardt Hamann, Hansjorg Manger and Leo Steinke, "Lambda-Sensor with Y_2O_3 -Stabilized ZrO_2 -Ceramic for Application in Automotive Emission Control," SAE Paper 770401.
- (2) Sadayasu Ueno, etc., "Wide Range Air-Fuel Ratio Sensor," SAE Paper 860409.
- (3) Robert Hecht-Nielsen, Neurocomputing, Addison Wesley, 1989.
- (4) 박경석, 1991 "MPI 엔진의 공연비제어에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 기계공학과

석사학위 논문.

공학과 석사학위 논문.

- (5) 원영준, 1992 “신경회로망을 이용한 MPI 엔진의 공연비제어,” 서울대학교 대학원 제어계측

- (6) “SONATA Shop Manual,” 1988 Hyundai Motor Co.