

가솔린 엔진의 흡기밸브 리프트 변화에 따른 개별실린더 당량비 추정 및 제어 알고리즘에 관한 연구

김 준 수¹⁾ · 오 승 석¹⁾ · 이 민 광²⁾ · 선 우 명 호^{*2)}

한양대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 자동차공학과²⁾

A Study on Individual Cylinder Equivalence Ratio Estimation and Control Algorithm for SI Engines

Junsoo Kim¹⁾ · Seungsuk Oh¹⁾ · Minkwang Lee²⁾ · Myoung-ho Sunwoo^{*2)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 6 October 2010 / Accepted 22 April 2011)

Abstract : In a spark ignition engine, a variable valve lift (VVL) system has been developed for high fuel efficiency and low power loss. However, changes in valve lift cause deviations of cylinder air charge which lead to individual cylinder equivalence ratio maldistribution. In this study, in order to reduce the maldistribution, we propose individual cylinder equivalence ratio estimation and control algorithms. The estimation algorithm calculates the equivalence ratio of each cylinder by using a mathematical engine model which includes air charging, fuel film, exhaust gas, and universal exhaust gas oxygen sensor (UEGO) dynamics at various valve lifts. Based on the results of estimated equivalence ratio, the injection quantity of each cylinder is adjusted to control the individual cylinder equivalence ratio. Estimation and control performance are validated by engine experiments. Experimental results represented that the equivalence ratio maldistribution and variation are decreased by the proposed algorithms.

Key words : Equivalence ratio maldistribution(당량비 불균형), Individual cylinder(개별 실린더), VVL(가변밸브리프트), Engine model(엔진모델), Equivalence ratio estimation(당량비 추정), Equivalence ratio control(당량비 제어)

Nomenclature

m : mass, kg
 K : cylinder effective coefficient, sec/stroke
 N : engine speed, RPM
 T : time, sec
 X : fraction of fuel film
 a : throttle angle, degree
 l : valve lift, mm
 ϕ : equivalence ratio
 τ : time constant, sec

MAP : intake manifold pressure, kPa
 FF : feedforward
 FB : feedback

Subscripts

cp : confluence point of exhaust manifold
 cyl : cylinder
 ac : air charge
 ap : air exiting the intake manifold
 i : i -th cylinder
 ff : fuel film

*Corresponding author, E-mail: msunwoo@hanyang.ac.kr

fi : injected fuel
 fv : fuel vapor
 st : stoichiometric
 sen : sensor
 est : estimation
 mea : measurement

1. 서론

최근 자동차에서 배출되는 유해 배기가스를 저감하고, 엄격한 연비규제를 만족시키기 위하여 자동차 관련 엔지니어들은 친환경 고효율 엔진을 개발하는 데 많은 노력을 기울이고 있다. 이와 관련된 가솔린 엔진의 신기술로, 운전조건에 따라 흡기 밸브의 리프트를 조절하여 엔진 출력을 향상시키는 가변 밸브 리프트 시스템, 실린더 내에 연료를 직접 분사하여 펌핑손실을 줄이고 충전효율을 높이는 가솔린 직분사 시스템, 그리고 엔진의 부하조건에 따라 압축비를 변화시켜 엔진 효율을 향상시키는 가변 압축비 시스템 등이 개발되어 왔다.^{1,2)} 이러한 신기술 중 가변 밸브 리프트 시스템은 특히 저속 저부하 영역에서 엔진의 펌핑 손실 및 마찰 손실 저감을 통한 연비 향상과 고속 전부하 운전조건에서 체적 효율 향상에 따른 출력 향상, 그리고 아이들 운전 시 흡기 포트 내 공기 밀도 증가로 인한 빠른 응답성 등의 장점을 가지고 있다.^{3,4)} 그러나 이러한 장점에도 불구하고 가변 밸브 리프트 시스템은 기존의 가솔린 엔진 시스템과 달리 복잡한 밸브 기구를 가지고 있기 때문에 가변 밸브 기구의 생산 공차 또는 노후화로 인한 실린더 간 흡입 공기량 편차가 증가하는 문제가 있다.^{1,4)} 이러한 공기 불균형은 실린더 간 연소가스의 당량비 불균형까지 초래하게 된다. 최종적으로 HC, CO, NO_x와 같은 유해 배기가스의 배출이 증가하고 토크 및 엔진 효율이 감소되며 운전 성능이 떨어지게 된다.⁵⁻⁷⁾

이와 같은 실린더 간 당량비 불균형 문제점을 개선하기 위하여 많은 연구가 선행되었다. 선행된 연구들로는 두 개의 광역 산소 센서를 이용하여 6기통 엔진의 저속운전영역에서의 개별 실린더 당량비를 추정하여 제어하는 방법, 하나의 광역 산소 센서와 모델을 이용한 추정 및 제어 알고리즘을 적용하는

방법, 당량비 편차 발생시 광역 산소 센서의 출력 위상 편차를 이용한 방법 등이 있다.⁶⁻⁸⁾ 이와 같은 방법들은 정상상태 운전 영역에 대해서 주로 연구가 수행되었고, 엔진속도가 빠른 경우 제어 성능이 떨어지는 단점이 존재한다. 그리고 흡기 밸브 리프트가 고정된 기존 가솔린 엔진 시스템을 대상으로 하였기 때문에, 리프트가 변경되는 가변 밸브 리프트 엔진의 경우 바로 적용하기가 용이하지 않다.

이 논문에서는 기존에 소개된 방법들의 단점을 극복하기 위하여 하나의 광역 산소 센서와 수학적인 엔진 모델을 바탕으로 흡기 밸브 리프트에 따른 개별 실린더의 당량비를 추정 및 제어 하는 방법을 제안한다. 제안한 수학적 엔진 모델은 스로틀 개도량, 엔진속도, 흡기 밸브 리프트 등 다양한 운전 조건하에서 공기량, 연료량 및 배기가스의 거동을 표현할 수 있다. 이 엔진 모델을 바탕으로 개별실린더 당량비 추정이 가능하며, 광범위한 운전조건에서 이론당량비를 유지하고, 실린더별 당량비 편차를 저감시킬 수 있는 제어를 개발하였다. 최종적으로 제안한 개별실린더 당량비 추정 및 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 4기통 포트 분사 방식 가솔린 엔진의 흡기 밸브 리프트를 변경하면서 엔진 실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 구성

개별 실린더 당량비 추정 및 제어 알고리즘 개발 및 검증을 위하여 Fig. 1과 같이 엔진 실험 환경을 구성하였다. 이번 연구에 사용된 엔진은 4실린더 1600cc 포트 분사 방식 엔진이다. 배기 매니폴드 합류점 및 개별 실린더의 당량비를 측정하기 위하여 광역 산소 센서를 배기 매니폴드 합류점 및 각 실린더 배기러너에 각각 장착하였으며, 데이터 수집, 추정 및 제어알고리즘 구현을 위하여 dSPACE사의 Micro AutoBox를 이용하였다. Micro AutoBox는 광역 산소센서로부터 측정된 합류점의 당량비를 이용하여 개별실린더의 당량비를 추정하고, 연료 분사량을 제어함으로써 개별 실린더의 당량비를 제어한다. 이외에 흡기 밸브 리프트 변화에 따른 거동을 실험하기 위하여 리프트가 2, 4, 6, 8mm가 되도록 4종류의 캠 사프트를 교체하며 실험하였다.

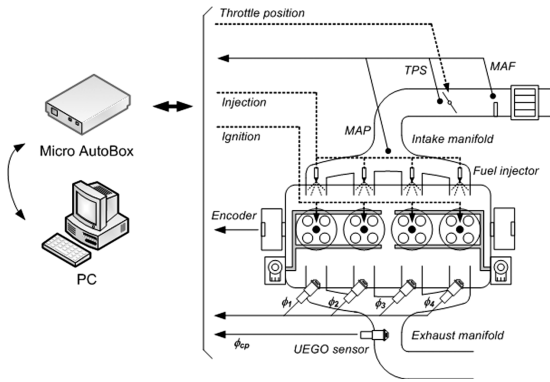


Fig. 1 실험 장치 구성도

3. 엔진 모델링

흡기 밸브 리프트에 따른 개별실린더의 당량비 추정을 위한 시뮬레이션 및 제어알고리즘 개발을 위하여 엔진의 수학적 모델을 수립하였다. 엔진 모델은 엔진의 동역학적 모델링에 널리 쓰이는 평균 값 모델을 기본으로 흡기 밸브 리프트에 따른 개별 실린더 공기량 모델, 연료막 모델, 배기가스 혼합 모델, 광역 산소 센서 모델로 구성하였다.

3.1 개별 실린더 공기량 모델링

이상적으로 4행정 엔진에서 한 사이클 동안 실린더 내로 흡입된 공기의 질량은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.⁹⁾

$$m_{ac} = \frac{\dot{m}_{ap} \left[\frac{kg}{s} \right]}{N \left[\frac{rev}{min} \right] \left[\frac{min}{60s} \right] \left[\frac{(n_{cyl}/2) stroke}{rev} \right]} = \frac{120/n_{cyl}}{N} \dot{m}_{ap} \quad (1)$$

where

- m_{ac} : 실린더내로 흡입된 공기질량
- \dot{m}_{ap} : 흡기매니폴드에서 배출된 공기유량
- n_{cyl} : 전체 실린더 수
- N : 엔진속도

그러나 실제 엔진의 경우 흡기러너의 길이 및 형상, 밸브 간극 편차 등의 영향으로 개별실린더로 흡입되는 공기량 편차가 발생하게 된다. 따라서 정확한 개별실린더의 당량비를 추정하여 당량비 편차가

발생하지 않도록 제어하는 것이 필요하다. 개별실린더의 당량비를 정확하게 추정하기 위하여 식 (2)와 같이 흡기매니폴드로부터 포트에 유입되는 공기의 질량유량과 스로틀 밸브개도, 엔진 속도 및 밸브 리프트의 영향을 반영한 실린더 영향계수 K_i 를 이용하여 개별실린더 유입 공기량을 모델링 하였다.

$$m_{ac,i} = K_i(\alpha, N, l_{valve}) \dot{m}'_{ap} \quad (2)$$

where

- $m_{ac,i}$: i 번 실린더 내로 흡입된 공기질량
- K : 실린더 영향 계수
- α : 스로틀 밸브 개도
- l_{valve} : 흡기밸브 리프트

실린더 영향 계수 K_i 는 스로틀 밸브 개도, 엔진속도 및 리프트를 변경하는 실험을 통하여 구하였으며 Fig. 2~3에 각 조건에 따른 1번 실린더의 K_i 관계를 나타내었다. 운전조건 및 밸브리프트에 따른 K_i 를 이용하면 운전조건에 따라 개별실린더 내로 유입되는 공기량 계산이 가능하다.

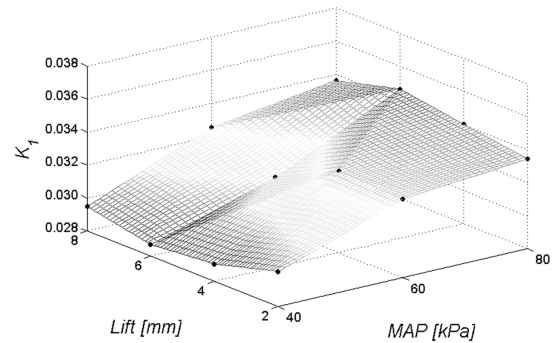


Fig. 2 Lift와 MAP에 따른 1번 실린더의 K_i (1000 rpm)

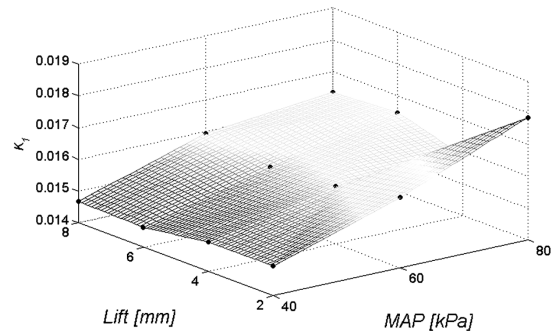


Fig. 3 Lift와 MAP에 따른 1번 실린더의 K_i (2000 rpm)

3.2 운전조건에 따른 연료막 모델링

Fig. 4에서 보는 바와 같이 인젝터에서 분사된 연료 중 일부는 분사 즉시 기화되어 흡기포트 내 기체 상태로 존재(①)하며, 나머지 연료는 흡기포트에 액체상태의 연료막(②)을 형성한다. 연료막은 일정시간 후 증발(③)하여 기체상태의 연료(①)와 함께 실린더 내부로 유입되므로 실린더 내부로 유입되는 연료량(①+③)을 정확히 추정하기 위해서는 흡기매니폴드 내 연료막 거동이 반영된 모델이 필수적이다.¹⁰⁾ 특히 밸브 리프트가 변화할 경우 연료막 형성비율 및 연료 증발시간이 변하게 되므로 특정시점에 실린더 내부로 유입되는 연료의 양을 계산하여 이를 보상할 필요가 있다. 연료막 모델은 식 (3)과 같이 Aquino 연료막 모델⁹⁾을 이용하였으며 연료막 특성을 나타내는 파라미터인 X 와 τ_f 는 다양한 엔진속도, 흡기매니폴드 압력 그리고 흡기 밸브 리프트 조건에서 실험을 통하여 구하였다. 이와 같이 실험을 통하여 얻어진 X 와 τ_f 를 바탕으로 연료 거동을 고려하게 되면, 다양한 운전조건에서 분사된 연료량 대비 실제로 실린더내로 유입되어 연소된 연료량을 추정할 수 있다. 또한 이 결과를 이용하면 당량비 제어 시 정확한 연료량 분사가 가능하다.

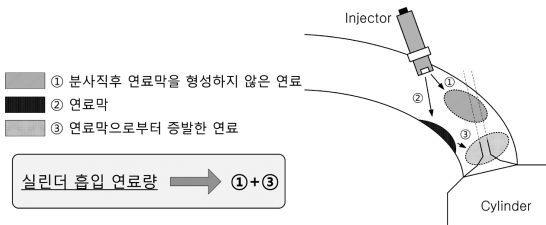


Fig. 4 흡기러너 내 연료 거동

$$\begin{aligned} \dot{m}'_{ff} &= -\frac{1}{\tau_f} m_{ff} + X \dot{m}'_{fi} \\ \dot{m}'_{fv} &= (1 - X) \dot{m}'_{fi} \\ \dot{m}'_{fc} &= \dot{m}'_{fv} + \frac{1}{\tau_f} m_{ff} \end{aligned} \quad (3)$$

where

- m_{fi} : 분사된 연료량
- m_{ff} : 연료막을 형성한 연료량
- m_{fv} : 증발된 연료량
- m_{fc} : 실린더 내로 유입된 연료량

- X : 연료막 형성률
- τ_f : 연료의 증발 시정수

3.3 배기가스 혼합모델

배기가스 혼합모델은 배기매니폴드 합류점에 설치된 한 개의 광역 산소 센서로부터 개별실린더의 당량비를 추정하기 위하여 사용된다. 개별실린더로부터 배출된 배기가스의 혼합과정은 매우 복잡하나 모델을 간소화하기 위하여 아래와 같이 가정한다.

- 1) 한 사이클 동안 연소된 가스의 성분은 동일하며 당량비는 일정하다.
- 2) 한 사이클 동안 연소된 가스는 배기매니폴드로 전량 배출된다.
- 3) 개별실린더의 배기가스는 역류하지 않고 배기매니폴드 합류점까지 이동하여 혼합된다.

위의 가정에 의해서 배기매니폴드 합류점의 당량비는 배기매니폴드 합류점의 배기가스 질량유량과 개별실린더로부터 배출된 공기 질량유량의 합의 비로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{cp} &= f(\phi_{exh,1}, \phi_{exh,2}, \phi_{exh,3}, \phi_{exh,4}) \\ &= \left(\sum_{i=1}^{n_{cyl}=4} m'_{ae,i} \cdot \phi_{exh,i} \right) / \left(\sum_{i=1}^{n_{cyl}=4} m'_{ae,i} \right) \\ &= [M_1 M_2 M_3 M_4] \begin{bmatrix} \phi_{exh,1} \\ \phi_{exh,2} \\ \phi_{exh,3} \\ \phi_{exh,4} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

where

- $m'_{ae,i}$: i 번 실린더에서 배출되는 공기질량유량
- $\phi_{exh,i}$: i 번 배기러너의 당량비 (ϕ = 실제 연료·공기비/이론 연료·공기비)
- M_i : 합류점에 차지하는 i 번 실린더유량 비율

3.4 광역 산소 센서 모델

배기가스의 당량비는 광역 산소센서를 통하여 배기가스의 산소농도를 측정함으로써 알아낼 수 있다. 광역 산소센서는 산소농도가 변한 후 즉시 반응하지 않고 일정시간이 지난 이후에 반응한다.¹¹⁾ 이 연구에서는 시간지연과 시상수를 갖는 1차 시스템으로 광역 산소 센서를 모델링 하여 식 (5)와 같이 표현한다.

$$\phi_{sen}(s) = \frac{\phi^{-T_{sen}s}}{\tau_{sen}s+1} \phi_{exh}(s) \quad (5)$$

where

- ϕ_{sen} : 광역 산소 센서에서 측정된 당량비
- T_{sen} : 광역 산소 센서의 시간지연
- τ_{sen} : 광역 산소 센서의 시상수

4. 개별 실린더 당량비 추정

4.1 개별 실린더 당량비 추정 알고리즘

배기가스 혼합모델에서 설명한 바와 같이 특징시점 배기매니폴드 합류점을 통과하는 배기가스의 질량유량은 개별실린더로부터 배출된 배기가스의 합으로 나타낼 수 있다. 각 실린더로부터 배출된 배기가스 질량유량이 배기매니폴드 합류점의 질량유량에 미치는 영향은 샘플링 시점마다 다르므로, 각 실린더의 배기가스 질량유량이 배기 매니폴드 합류점의 배기가스 질량유량에 미치는 영향을 M으로 정의하고 배기가스 혼합모델을 이산화 하여 식 (6)과 같이 표현한다.

$$\phi_{\varphi}^{(m)} = M_{1m} \cdot \phi_{exh,1}[k] + M_{2m} \cdot \phi_{exh,2}[k] + M_{3m} \cdot \phi_{exh,3}[k] + M_{4m} \cdot \phi_{exh,4}[k] \quad (6)$$

이때 시간 단계 k 는 엔진 한 사이클 주기($T_{sl} = 120/N$)와 관련된다. 또한 한 사이클 동안 배기 매니폴드 합류점에서 한 번의 샘플링은 개별 실린더 당량비 추정에 있어 불충분하므로 Fig. 5와 같이 한 사이클 동안 4회의 샘플링을 거쳐 식 (6)을 식 (7)과 같이 행렬 형태로 표시한다.

$$\begin{bmatrix} \phi_{\varphi}^{(1)}[k] \\ \phi_{\varphi}^{(2)}[k] \\ \phi_{\varphi}^{(3)}[k] \\ \phi_{\varphi}^{(4)}[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{exh,1}[k] \\ \phi_{exh,2}[k] \\ \phi_{exh,3}[k] \\ \phi_{exh,4}[k] \end{bmatrix} = \Pi \begin{bmatrix} \phi_{exh,1}[k] \\ \phi_{exh,2}[k] \\ \phi_{exh,3}[k] \\ \phi_{exh,4}[k] \end{bmatrix} \quad (7)$$

이때 시간 단계 m 은 각 실린더의 배기가스 배출 주기($T_{s2} = T_{sl}/n_{cyl} = 30/N, n_{cyl} = 4$)와 관련된다. 이와 같이 이산화된 배기가스 혼합모델을 바탕으로 배기 매니폴드 합류점의 당량비와 Π 행렬의 역행렬로부터 식 (8)과 같이 표현하고 순환최소자승법(Recursive Least square method)을 이용하여 개별실린더의

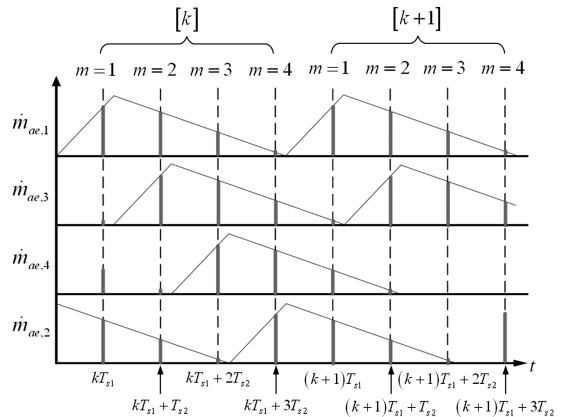


Fig. 5 개별실린더의 공기질량유량이 배기매니폴드 합류점에 미치는 영향

당량비를 추정한다.¹²⁾

$$\begin{bmatrix} \phi_{exh,1}[k] \\ \phi_{exh,2}[k] \\ \phi_{exh,3}[k] \\ \phi_{exh,4}[k] \end{bmatrix} = \Pi^{-1} \begin{bmatrix} \phi_{\varphi}^{(1)}[k] \\ \phi_{\varphi}^{(2)}[k] \\ \phi_{\varphi}^{(3)}[k] \\ \phi_{\varphi}^{(4)}[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & \pi_{14} \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \pi_{23} & \pi_{24} \\ \pi_{31} & \pi_{32} & \pi_{33} & \pi_{34} \\ \pi_{41} & \pi_{42} & \pi_{43} & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{\varphi}^{(1)}[k] \\ \phi_{\varphi}^{(2)}[k] \\ \phi_{\varphi}^{(3)}[k] \\ \phi_{\varphi}^{(4)}[k] \end{bmatrix} \quad (8)$$

4.2 개별 실린더 당량비 추정 실험 결과

개별실린더 당량비 추정알고리즘을 검증하기 위하여 엔진실험을 수행하였다. Table 1은 운전조건에 따라 전체 실린더의 당량비 추정치 및 측정치를 바탕으로 개별실린더 당량비에 대한 Root mean square

Table 1 운전조건에 따른 당량비 추정 결과 RMSE

l_{valve} [mm]	운전조건		RMSE
	N [rpm]	MAP[kPa]	
2	2000	40	0.0072
4	2000	40	0.0073
6	2000	40	0.0073
8	2000	40	0.0073
2	2500	60	0.0078
4	2500	60	0.0077
6	2500	60	0.0083
8	2500	60	0.0081
2	3000	80	0.0087
4	3000	80	0.0075
6	3000	80	0.0078
8	3000	80	0.0066
Total RMSE			0.0076

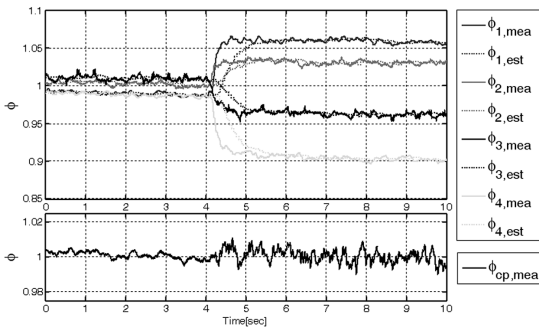


Fig. 6 개별실린더 당량비 추정 실험 결과(2000 rpm, MAP: 40 kPa, Lift: 2mm)

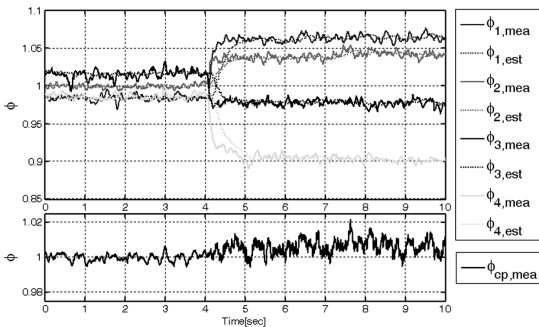


Fig. 7 개별실린더 당량비 추정 실험 결과(2500 rpm, MAP: 60 kPa, Lift: 6mm)

error(RMSE)를 나타낸 것이며, Fig. 6~7은 밸브리프트에 따른 배기매니폴드 합류점의 당량비, 개별실린더의 당량비를 엔진속도에 따라 각각 나타낸 것이다. 다양한 조건에서 추정 결과를 확인하기 위하여, 이론 당량비 부근으로 각 실린더의 연료 분사량을 일정하게 유지하고, 4초 후부터 연료 분사량을 각 실린더 마다 다르게 하여 실린더 간 당량비 편차를 증가시켰다. 추정 결과 Table 1 및 Fig. 6~7에서 보는 바와 같이 리프트 변경 또는 연료량 편차 발생에도 불구하고, 1초 안에 합류점의 당량비로부터 개별실린더의 당량비를 RMSE 0.009이내에서 정확하게 추정하는 것을 확인할 수 있다.

5. 개별실린더 당량비 제어

5.1 개별실린더 당량비 제어 알고리즘

개별실린더 당량비 제어시스템에서 개별실린더 당량비는 4장에서 소개한 개별실린더 당량비 추정 알고리즘을 이용하여 배기매니폴드 합류점의 당량비로

부터 예측한다. 또한 예측된 개별실린더 당량비를 피드백 받아 기준 당량비와의 오차를 적용하여 PI 제어기로 구성된 선형 피드백 제어기를 통해 연료 분사량을 계산한다. 이때 설계된 피드백 제어기의 전달함수는 식 (9)와 같다.

선형 피드백 제어기:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (9)$$

where

u : 연료 분사 입력

e : 기준 당량비와의 오차 ($\phi_{ref} - \hat{\phi}_i$)

5.2 정상상태 당량비 제어 실험

개별실린더 당량비 추정 및 제어알고리즘을 검증하기 위하여 정상상태 당량비 제어실험을 수행하였다. 개별 실린더 당량비 제어에 대한 영향을 확인하기 위하여 각 운전 조건에서 전체 실린더에 동일한 연료를 분사한 경우와 개별 실린더 제어를 적용한 경우의 실린더 별 당량비 편차를 비교하였다. Table 2에서 확인할 수 있듯 이 일정 연료를 분사한 경우 낮은 흡기 밸브 리프트와 고속 저부하 영역의 운전조건으로 갈수록 실린더 별 당량비 편차가 증가한다. 반면에 개별 실린더 제어를 적용한 경우 운전 조건에 관계없이 실린더 별 당량비 편차가 최대 0.0101 이내로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

추가로 개별실린더 당량비 제어기 성능을 확인하기 위하여 엔진 속도, 흡기 매니폴트 압력, 밸브리프트에 따라 실린더별로 이론 당량비 연료 분사량 대비 120%, 110%, 90%, 80%의 연료를 분사하여 당량비 편차를 증가시켰다. 그리고 4초 이후 이론 당량비가 되도록 제어를 진행한 후 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 실린더 간 당량비 편차가 큰 구간에서는 합류점의 당량비 변동을 또한 극심한 것을 알 수 있다. 개별실린더 당량비 제어 후에는 개별실린더 당량비의 정상상태 오차가 이론 당량비 기준으로 $\pm 1\%$ 미만으로 감소하였다. 과도 구간에서는 추정치와 측정치간 다소 차이를 보이는데, 이는 추정알고리즘에 사용한 순환최소자

Table 2 운전조건에 따른 개별 실린더 제어 전후 당량비 편차 비교

운전조건			동일 연료분사시 당량비편차	개별실린더 제어시 당량비편차
l_{valve} [mm]	N [rpm]	MAP [kPa]		
2	1000	40	0.0359	0.0091
	2000	40	0.0277	0.0075
	3000	40	0.0612	0.0088
4	1500	40	0.0358	0.0094
	2000	60	0.0239	0.0087
	3000	40	0.0297	0.0092
6	2500	60	0.0327	0.0069
	2500	100	0.0305	0.0080
	3000	40	0.0438	0.0069
8	2000	60	0.0269	0.0088
	2000	80	0.0272	0.0101
	3000	40	0.0496	0.0087
	3000	100	0.0269	0.0099
Total deviation			0.0348	0.0086

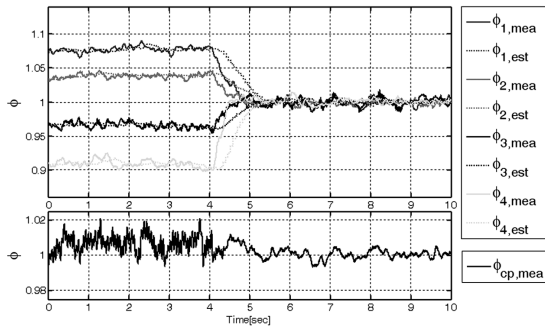


Fig. 8 개별실린더 당량비 제어실험 결과(2000 rpm, MAP: 60 kPa, Lift: 4mm)

승법의 특성상 하나의 광역 산소 센서 정보와 모델 간의 오차를 줄여나가는 과정에서 수렴속도가 실제 변화속도보다 상대적으로 느려 발생한다.

5.3 과도구간 성능향상을 위한 개선된 개별실린더 당량비 제어 알고리즘

엔진 운전조건이 급격하게 변하는 tip-in tip-out 구간에서 피드백 제어기만 있는 경우 급격한 공기량 변화로 인해 Fig. 9와 같이 20%정도의 당량비 변동을 확인 할 수 있다. 이러한 과도구간의 당량비 변동은 운전 성능 및 배기성능 악화를 초래하므로 개별 실린더 공기량 모델 및 연료막 보상 모델 등을 이

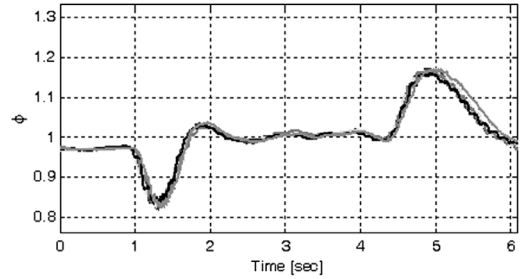


Fig. 9 피드백 제어기 의 tip-in tip-out 당량비 제어 성능 (1000rpm, MAP: 40kPa)

용하여 감소시켜야 한다. 식 (2)로 부터 운전 조건에 따라 이론 당량비를 유지하기 위한 연료량을 식 (10) 과 같이 구할 수 있다.

$$m_{f_{des,i}} = m_{ac,i} \cdot \phi_{st} \quad (10)$$

where

$m_{f_{des,i}}$: i 번 실린더에 필요한 연료량

ϕ_{st} : 이론 당량비

3.2절에서 언급한 바와 같이, 인젝터에서 분사된 연료는 일부가 연료막을 형성하여 바로 실린더 내로 유입되지 않는다. 따라서 이론 당량비에 맞게 제어하기 위해서는 흡기 러너 내의 연료 거동을 반드시 고려해 주어야 한다. 이를 위하여 식 (3)의 연료막 모델을 전달함수 형태로 정리하면 식 (11)과 같다. 연료막 모델을 바탕으로 설계한 피드포워드 연료막 보상은 식 (11)에 표현된 연료막 모델 전달함수의 역수 형태로 식 (12)과 같이 설계할 수 있으며 이 보상은 운전조건에 따라 이론 당량비를 맞추기 위하여 필요한 연료량을 결정해 준다. 또한, 연료막에 의한 영향 상쇄를 통해 실제로 실린더로 유입되는 연료량을 계산하여 분사함으로써 당량비 변동을 줄일 수 있다. 이 때 필요한 연료막 보상의 τ_f 와 X 는 3.2절에서 실험을 통하여 구한 값을 바탕으로 흡기 밸브 리프트 및 운전 조건에 따라 가변적으로 적용하였다.

연료막 모델 전달함수:

$$\frac{m_{fc}(s)}{m_{fi}(s)} = \frac{1 + (1 - X)s\tau_f}{1 + s\tau_f} \quad (11)$$

피드포워드 연료막 보상기 전달함수:

$$\frac{m_{f_{i,i}}(s)}{m_{f_{des,i}}(s)} = \frac{1 + s\tau_f}{1 + (1-X)s\tau_f} \quad (12)$$

개발된 피드포워드 보상기를 5.1절에서 제안한 선형 피드백 제어기에 추가하여 Fig. 10에 개선된 개별실린더 당량비 제어 시스템의 구성을 나타내었다. 최종적으로 선형 피드백 제어기로부터 결정된 연료 분사량에 추가로 피드포워드 보상기로부터 계산된 연료 분사량을 합하여 연료를 분사한다.

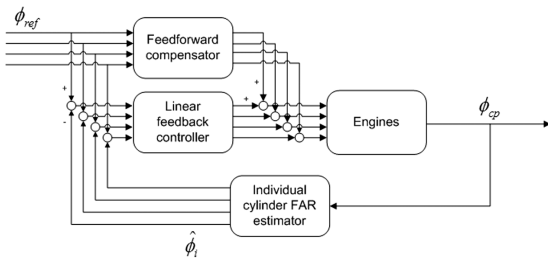


Fig. 10 개선된 개별실린더 당량비 제어 시스템 구성도

5.4 과도구간 당량비 제어 실험

개선된 개별실린더 당량비 제어 알고리즘을 적용하여 Fig. 11~12와 같이 스로틀 개도를 급격하게 변화하는 실험을 수행하였다. Fig. 11~12는 스로틀 개도량, 흡기매니폴드의 압력 그리고 배기매니폴드의 합류점 및 개별 배기 러너의 연공비를 선형 피드백 제어만 적용한 결과와 피드포워드 보상기까지 포함하여 제어한 결과를 비교하여 나타낸다.

결과그래프에서 알 수 있듯이, 급격한 스로틀 개도의 변화에 따른 실린더 내 흡입 공기량의 변화에 의해 과도 구간에서 당량비 변동이 발생한다. 이때 피드포워드 연료막 보상기까지 포함한 전체 제어기의 당량비 변동 폭이 배기매니폴드의 합류점에서 뿐만 아니라 개별 실린더에 있어서도 감소된 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 13은 전체 과도구간 제어 실험 결과를 분석한 것으로 RMSE 및 최대 편차를 비교하고 있다. 여기서 RMSE는 전체 실린더의 당량비를 이론 당량비와의 차이를 이용해 구하였으며 최대 편차는 전체 실험구간에서 이론 당량비 기준으로 차이가 가장 큰 값을 나타낸다. Fig. 13에서 확인할 수 있듯이 연료막 보상기가 적용된 경우

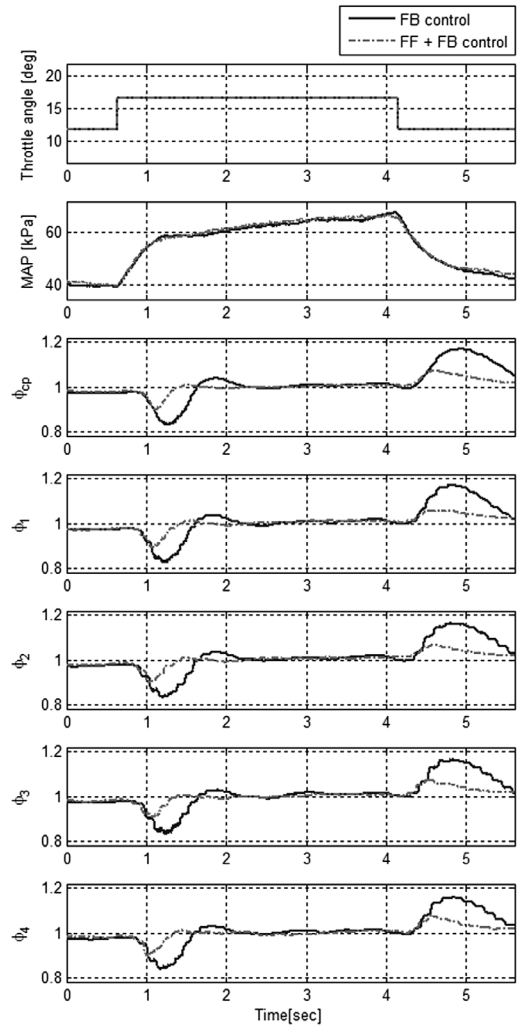


Fig. 11 연료막 보상 제어기 적용 전후 당량비 제어결과 (1000rpm, Lift: 2mm)

RMSE와 최대편차가 각각 36%, 40% 개선된 것을 알 수 있다. 이러한 과도상태 시 당량비 변동감소는 앞서 정상상태 실험결과에서 언급한 것과 같이 운전성능, 엔진 출력 및 배기성능 향상을 가능하게 해준다.

6. 결론

이상적으로는 개별실린더로 동일한 공기 유입 및 연료 분사 이후 연소가 발생하여 실린더 별 당량비가 동일해야 하지만 실제로는 인젝터 생산 공차, 흡기러너 형상, 흡기밸브 리프트 공차 등에 의해서 개별실린더의 당량비 편차가 발생한다. 이러한 당량

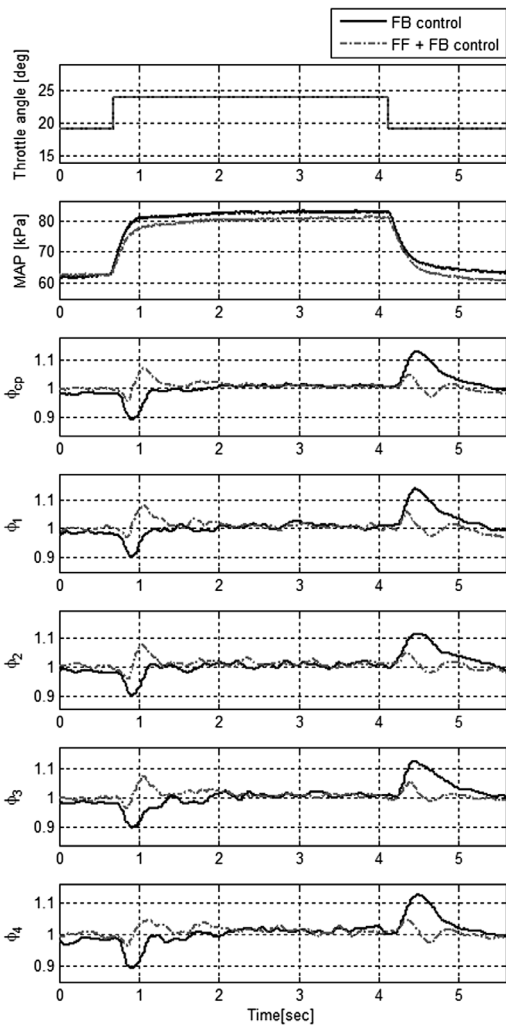


Fig. 12 연료막 보상 제어기 적용 전후 당량비 제어결과 (2000rpm, Lift: 8mm)

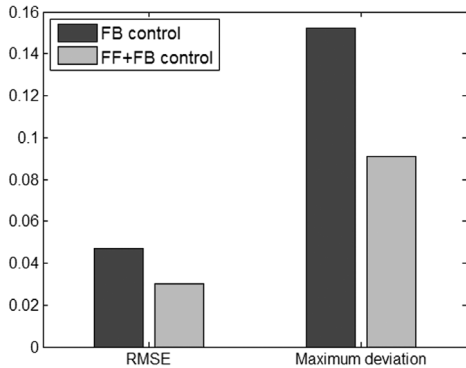


Fig. 13 연료막 보상 제어기 적용 전후 RMSE 및 최대 편차 비교

비 편차는 진동소음 증가, 유해 배기가스 증가를 초래하여 운전 성능 및 배기성능을 악화시키므로 적절하게 제어되어야 한다.

이 연구에서는 개별실린더 당량비를 제어하기 위하여 가변밸브 기구 엔진의 수학적 모델을 바탕으로 배기매니폴드에 설치된 하나의 광역 산소 센서 정보를 이용하여 개별 실린더의 당량비를 추정하였다. 추정알고리즘은 별도의 광역 산소센서를 이용하여 개별 실린더 당량비 관련 파라미터를 사전에 다양한 운전조건에 따라 실험을 통하여 추출하였다. 최종적으로 추출된 파라미터와 배기매니폴드 합류점에 설치된 단일 광역 산소 센서를 이용하면 실시간 개별실린더의 당량비를 추정할 수 있다. 이를 검증하기 위하여 연료량을 급격하게 변경하는 엔진 실험을 수행한 결과 당량비의 RMSE 0.009이 내의 우수한 추정성능을 보였다. 그리고 추정된 개별실린더 당량비를 바탕으로 피드백 선형 제어기와 피드포워드 연료막 보상제어기를 개발하였다. 개발된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 엔진 실험을 수행한 결과 개별실린더 당량비 제어 시 정상상태 오차 1% 미만의 결과를 보였다. 과도구간의 당량비 변동을 최소화하기 위해 연료막 모델을 이용한 보상기를 적용하여 이론 당량비 기준 RMSE 및 최대 편차를 각각 36%, 40% 개선하였다. 개발된 개별실린더 당량비 추정 및 제어 알고리즘은 하나의 광역 산소 센서만을 필요로 하므로, 실제 차량에 적용 시에도 추가 비용이 발생하지 않으며, 우수한 배기성능 및 운전 성능을 기대할 수 있다.

후 기

이 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 “전략기술인력양성사업”을 통해 수행된 것으로, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 1) I. Kawasumi and Y. Yasui, “Adaptive Air-fuel Ratio Controls for Continuously Variable Valve Lift Gasoline Engines,” SAE 2007-01-1198, 2007.
- 2) K. Min, “New Gasoline Engine Technology for

- the Future,” Automotive Electronics Magazine, pp.34-41, 2009.
- 3) K. Ha, W. Kim, C. Lee, H. Kim, M. Choi and D. Han, “Development of Continuously Variable Valve Lift (CVVL) Engine,” 2008 Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.70-75, 2008.
 - 4) S. M. Begg, M. P. Hindle and T. Cowell, “Low Intake Valve Lift in a Port Fuel-injected Engine,” Energy, Vol.34, No.12, pp.2042-2050, 2009.
 - 5) J. Kainz and J. Smith, “Individual Cylinder Fuel Control with a Switching Oxygen Sensor,” SAE 1999-01-0546, 1999.
 - 6) H. Kim, J. Kim and S. Kauh, “Individual Cylinder A/F Control Using Wide Band Oxygen Sensor,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.126-131, 1998.
 - 7) L. Benvenuti, “Individual Cylinder Characteristic Estimation for a Spark Injection Engine,” Automatica, Vol.39, No.7, pp.1157-1169, 2003.
 - 8) Y. Hasegawa, S. Akazaki, I. Komoriya, H. Maki, Y. Nishimura and T. Hirota, “Individual Cylinder Air-fuel Ratio Feedback Control Using an Observer,” SAE 940376, 1994.
 - 9) P. Yoon and M. Sunwoo, “A Nonlinear Dynamic Engine Modeling for Controller Design,” Transactions of KSAE, Vol.7, No.7, pp.167-180, 1999.
 - 10) M. Kwon, J. Kim, M. Lee, K. Lee and M. Sunwoo, “Development of a Cylinder Deactivation Engine Model for Mode Transition Control,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.77-83, 2008.
 - 11) S. Regitz and N. Collings, “Fast Response Air-to-fuel Ratio Measurements Using a Novel Device Based on a Wide Band Lambda Sensor,” Measurement Science and Technology, Vol.19, No.7, 2008.
 - 12) K. Shin, S. Park, P. Yoon, N. Juong and M. Sunwoo, “A Study on the Improvement of Air-fuel Ratio Control Performance in SI Engine Using STR,” Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, pp.57-64, 2001.