

슬라이딩 모드 관측기에 의한 최적의 공회전 제어기 설계

이영춘*, 이성철**

Design of Optimal Idle Speed Controller by Sliding Mode Observer

Young-Choon Lee*, and Seong-Cheol Lee**

ABSTRACT

This paper presents an approach to nonlinear engine idle controller and intake manifold absolute pressure(MAP) observer based on mean torque production model. A stable engine idle speed is important in that the unstable engine idle mode can make engine to drooping or stall state. A sliding fuzzy controller has been designed to control engine idle speed under load disturbance. A sliding observer is also developed to estimate the intake manifold absolute pressure and compared with the actual MAP sensor value. The sliding mode observer has shown good robustness and good tracking performance. The inputs of sliding fuzzy controller are the errors of rpm and MAP. The output is a duty cycle(DC) for driving a idle speed control valve(ISCV).

KeyWords : Sliding fuzzy controller(슬라이딩 퍼지 제어기), Sliding mode observer(슬라이딩 모드 관측기), MAP sensor(흡기 절대압력 센서), Idle speed control valve (ISCV: 공회전 속도제어 밸브)

1. 서 론

자동차 외부 설계 및 동력 계통(powertrain) 개발자들이 접하는 많은 어려운 사항들 중의 하나로써 연비 향상 문제를 들 수 있다. 자동차 연료를 전적으로 외국에 의지하고 있는 우리나라로서는 자동차 연비의 향상은 절대적으로 필요한 것이다. 일반적으로 자동차 주행 사이클(drive cycle)을 분석하여 보면 많은 시간 동안 엔진 공회전 상태에 놓여있으며, 엔진 공회전 속도를 떨어뜨리는 것은 연료소비를 더욱 촉진시키는 결과로 보이고 있다.

엔진 공회전에 영향을 미치는 2가지 요인으로는

전기적인 요소와 기계적인 요소로 나눌 수 있으며, 전기적인 요소로는 냉각수 온도 상승에 따른 라디에이터 냉각 팬의 High-Low 구동 및 전조등(head lamp)의 On/Off 등을 들 수 있다. 기계적인 측면은 파워스티어링 펌프(power steering pump)의 구동과 에어컨 압축기 작동 등이 있다. 이러한 외부의 토크 변화 요인을 제어하기 위해서는 전자 제어장치(electronic control unit: ECU)의 중요성이 더욱 강조되고 있으며, 안정한 공회전 제어를 하기 위한 많은 연구⁽¹⁻⁹⁾가 행하여지고 있다.

~ 2000년 8월 29일 접수

* 원광대학교, 의과학연구소

** 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

엔진에 관련된 각 센서들의 노화와 제조상의 실수에 따라서 실제 측정값들 사이에는 오차가 발생한다. 이러한 모델링 오차를 해결하기 위하여 관측기⁽⁸⁾를 설계함으로써 비선형계의 안정성을 도모하는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 슬라이딩 모드 관측기를 설계하여 흡기 대기관 내의 압력을 추정하였으며, 추정된 압력을 퍼지 제어기 내에 하나의 전건부 입력 항으로 선택하였다. 엔진 모델링 방정식은 비선형이기 때문에 전문가의 경험에 기초한 퍼지 제어기⁽⁹⁾를 이용하였으며, 슬라이딩 모드 관측기에 의한 추정 값과 실제 압력 센서(MAP sensor)와의 비교를 통하여 관측기 설계의 정확성을 검증하였다. 실험 결과로는 가솔린 기관에 대하여 슬라이딩 퍼지 제어기를 설계하고 에어컨 부하 시 목표 회전수로의 접근과 잔류 진동 제어상태를 ECU 맵 방법과 비교하였다.

2. 엔진 모델링

엔진은 비선형 방정식⁽¹⁰⁻¹²⁾으로 모델링되며 실질적인 상황을 고려하기 위하여 Dobner (1980)⁽¹²⁾의 정상상태 엔진 맵에 의한 실험적 모델과 실 차에서의 토크 변환치를 사용하였다.

2.1 흡기 매니폴드 압력

흡기 매니폴드 압력 P_m 은 유체의 이상기체 방정식(ideal gas equation)과 연속 방정식(continuity equation)을 이용하여 구한다.⁽¹⁰⁾

$$\dot{P}_m = \frac{RT_m}{V_m} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{ac}) \quad (1)$$

여기서, V_m 과 T_m 은 흡기 매니폴드 체적과 온도이며, R 은 기체상수, \dot{m}_{in} 은 흡기 매니폴드 내로 유입되는 공기 질량, \dot{m}_{ac} 는 실린더 내로 유입되는 공기 질량이다.

2.2 엔진 공기 유동 질량

흡기 매니폴드를 지나 실린더 내로 유입되는

공기 질량 \dot{m}_{ac} 의 유동방정식⁽¹⁰⁾은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{ac} = \frac{V_d P_m}{4\pi R T_m} \omega_e \eta_v \quad (2)$$

여기서, V_d 는 양정 체적, P_m 은 흡기 매니폴드 압력, R 은 이상기체 상수, ω_e 은 엔진 회전수, η_v 는 체적 효율이다.

2.3 도시 토크

도시 토크 T_i 는 다음 식으로 주어진다.

$$T_i = \frac{\eta_f \cdot \dot{m}_f \cdot Q_{Hv}}{\omega_e} = \frac{\eta_f \cdot \dot{m}_{ac} \cdot Q_{Hv}}{\omega_e \cdot AFR_{stoic}} \quad (3)$$

여기서, η_f 는 연료 효율, \dot{m}_f 와 Q_{Hv} 는 연료의 질량과 열가이며, AFR_{stoic} 는 이론 공연비이다.

2.4 마찰 토크

이론상으로 마찰 토크 T_f 를 계산하는 것은 어려우나, 식 (4)와 같은 Heywood's 실험계산치⁽¹⁰⁾인 마찰 평균 유효 압력으로부터 마찰토크를 유도하여 사용하였다.

$$T_f = \frac{V_d}{4\pi} (97000 + 15 \times \omega_e + 0.005 \times \omega_e^2) \quad (4)$$

2.5 엔진 관성 모멘트

엔진 관성모멘트(engine inertia moment) J 는 다음 식(5)로부터 구할 수 있다.

$$\dot{\omega}_e = \frac{1}{J} (T_i - T_f - T_l) \quad (5)$$

여기서, 엔진 회전수 변화율 $\dot{\omega}_e$ 는 도시 토크 T_i , 마찰토크 T_f 와 부하토크 T_l 의 함수이며, 엔

진의 관성모멘트는 엔진 내의 여러 회전체 및 질량의 함수이다.

3. 슬라이딩 모드 관측기 설계

관측기는 측정할 수 없는 상태변수를 추정하는 컴퓨터 프로그래밍이다. 비선형 방정식인 흡기 다기관 내의 압력을 추정하기 위해서 관측기가 필요하며, 이러한 방법으로 센서의 노이즈와 신호 지연을 피할 수 있다. 현재, 슬라이딩 모드 방법을 응용한 비선형계에서의 관측기 설계가 연구되고 있으며, 모델링과 측정 오차에 대하여 강인한 특성을 보이고 있다. 이러한 관측기를 슬라이딩 모드 관측기라 한다. 가솔린 기관에 대한 슬라이딩 모드 관측기의 설계 시 엔진 모델링은 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_e &= f_w(\dot{m}_f, P_m) \\ \dot{P}_m &= f_p(DC, P_m) \end{aligned} \quad (6)$$

엔진 모델링의 관측기 구조는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\omega}}_e &= \hat{f}_\omega + K_1 \tilde{\omega}_e + h_1 \text{sign}(\tilde{\omega}_e) \\ \dot{\tilde{P}}_m &= \hat{f}_p + K_2 \tilde{\omega}_e + h_2 \text{sign}(\tilde{\omega}_e) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\text{sign}(\cdot)$ 은 부호함수, 필터이득 K_1, K_2 는 상태를 슬라이딩 영역에 근접시키며, 이득 h_1, h_2 는 슬라이딩 평면상에서 수렴을 보장하는 값이다. $\tilde{\omega}_e$ 는 추적 오차, $\hat{\omega}_e, \hat{f}_\omega, \hat{f}_p$ 는 ω_e, f_w, f_p 의 추정치로 다음과 같다.

$$\tilde{\omega}_e = \omega_e - \hat{\omega}_e \quad (8)$$

$$\hat{f}_\omega = \frac{1}{J} \left(\frac{V_d \hat{P}_m}{4\pi R T_m} \frac{\eta_v}{AFR_{stoic}} - \hat{T}_f - \hat{T}_l \right) \quad (9)$$

$$\hat{f}_p = \frac{RT_m}{V} (K_1 TC(f) P(f) - \frac{P_m}{4\pi} \omega_e \eta_v) \quad (10)$$

여기서, \hat{T}_f 는 마찰토크에 대한 추정치로써, 공회전 중에 도시토크에 비해 극히 작은 값을 갖음

으로 무시하였으며, 부하토크의 추정치 \hat{T}_l 은 실험치를 사용하였다. $TC(f)$ 는 드로틀 각에 관한 영향함수, $P(f)$ 는 압력에 관한 영향함수이다. 한편, ω_e 와 P_m 에 대하여 슬라이딩 평면을 설계할 수 있으며, 두 개의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의된다.

$$S_P = \hat{P}_m - P_m \quad (11)$$

$$S_{\omega_e} = \hat{\omega}_e - \omega_e \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)가 슬라이딩 평면에 근접하기 위한 조건은 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 &= \dot{s} \cdot s \leq -\eta |s| \\ (\eta : \text{strictly positive constant}) \end{aligned} \quad (13)$$

이 조건을 만족하는 오차방정식(error dynamics)과 오차방정식의 슬라이딩 모드에 대한 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\omega}}_e &= \hat{f}_\omega - K_1 \tilde{\omega}_e - h_1 \text{sign}(\tilde{\omega}_e) \\ \dot{\tilde{P}}_m &= \hat{f}_p - K_2 \tilde{\omega}_e - h_2 \text{sign}(\tilde{\omega}_e) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_e \{ \Delta f_\omega - K_1 \tilde{\omega}_e - h_1 \text{sign}(\tilde{\omega}_e) \} &< 0 \\ \tilde{P}_m \{ \Delta f_p - K_2 \tilde{\omega}_e - h_2 \text{sign}(\tilde{\omega}_e) \} &< 0 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $\Delta f_\omega, \Delta f_p$ 는 엔진 회전부 동력학식에서의 모델링 오차로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta f_\omega &= f_\omega - \hat{f}_\omega \\ \Delta f_p &= f_p - \hat{f}_p \end{aligned} \quad (16)$$

식 (14)와 식 (15)를 만족하기 위한 이득 h_1 과 h_2 값은 다음과 같은 하한을 갖는다.

$$\begin{aligned} h_1 &> |\Delta f_\omega| + |K_1 \cdot \tilde{\omega}_e| \\ h_2 &> |\Delta f_p| + |K_2 \cdot \tilde{\omega}_e| \end{aligned} \quad (17)$$

그러므로, 슬라이딩 영역에서의 각 동적 거동은

다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_e &= 0, \quad \dot{P}_m = 0 \\ \Delta f_\omega - K_1 \tilde{\omega}_e - h_1 \text{sign}(\tilde{\omega}_e) &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

식 (16)에 식 (18)을 대입하여 흡기 다기관내의 압력 추정식 (19)를 얻는다.

$$\dot{P}_m = -H \cdot \Delta f_\omega + \Delta f_P \quad (19)$$

여기서, H 는 h_2/h_1 이며 슬라이딩 이득이다.

4. 제어기 설계

Fig. 1은 제어기 설계에 관한 순서도이며, Fig. 2는 예측지연(anticipation delay)을 갖는 슬라이딩 퍼지 제어기의 구성도이다.

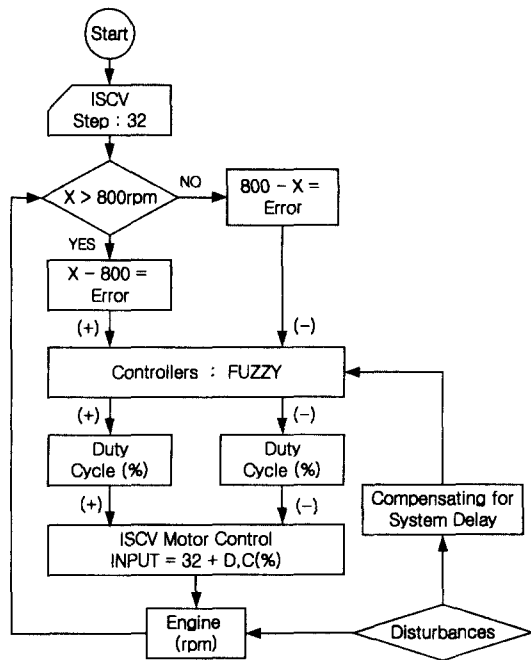


Fig. 1 Flowchart of controller design

예측지연은 공회전 속도 제어 밸브를 통하여 입력된 공기 질량이 불꽃 점화하여 엔진 토크를 발

생시킬 때까지의 지연시간을 보상하는 방법이다.⁽⁹⁾ 입력은 엔진 회전수 ω_e 이며, ω_{ed} 는 기준 엔진 요구 회전수로 800rpm이며, 입력과 기준입력 사이의 오차는 식 (20)과 같으며, 퍼지 전건부의 첫 번째 입력 항이 된다.

$$e(t) = \omega_e(t) - \omega_{ed} \quad (20)$$

한편, Fig. 2에서 보는 바와 같이 퍼지 전건부는 2개의 입력 항을 가지고 있으며, 두 번째 입력 항은 슬라이딩 모드 관측기에 의해 추론된 흡기 다기관 내의 압력변화 값이다. 퍼지 합성방법으로 최대-최소합성법(max-min composition)을 사용하고, 추론과정에서는 맘다니(mamdani) 방법을 채택하였다. 엔진 공회전 속도를 제어하기 위하여 출력의 모 집단에서 애매한 값을 명확한 값으로 변환해 주는 비퍼지화(defuzzification)는 무게 중심법(center of gravity method)을 사용하였다.

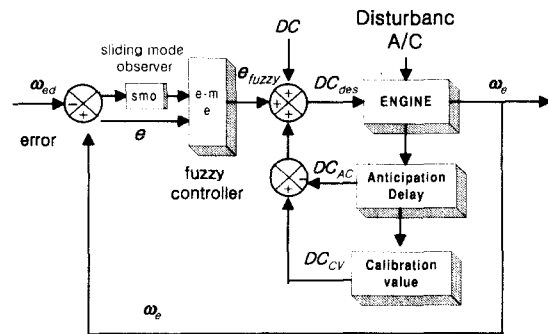


Fig. 2 Schematic diagram of sliding fuzzy controller with anticipation delay

Fig. 3은 본 실험에서 적용된 입력부와 출력부의 멤버쉽 함수이다. e_{FUZZY} 는 퍼지 제어기에 의한 출력 값이며, 목표 듀티율은 식 (21)과 같다.

$$DC_{des} = DC + e_{FUZZY} + DC_{AC} + DC_{CV} \quad (21)$$

여기서, DC 는 기본 듀티율, DC_{des} 는 최종 보상 값인 목표 듀티율, DC_{AC} 는 에어컨 보상 듀티율, DC_{CV} 는 보정 듀티율이다.⁽⁹⁾

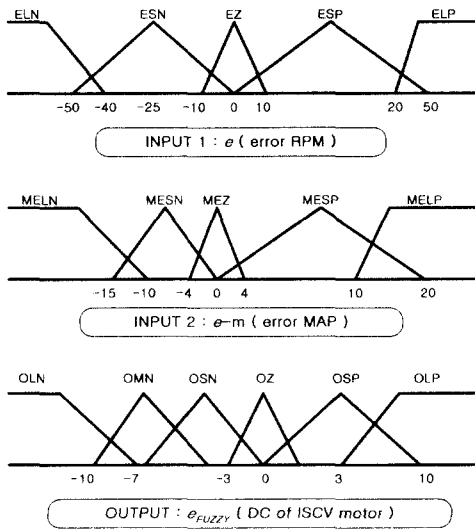


Fig. 3 Membership function of I/O

5. 실험 장치 및 결과

공회전 속도 제어를 위하여 dSPACE사의 입력력 제어보드(DS1103)를 사용하였다. 입력 요소로는 홀(hall) 센서 신호, 엔진 내부의 냉각수와 엔진오일 온도, 대기 온도, 에어컨 스위치 On/Off 신호로 구성되어 있다. 홀 센서로부터 엔진 공회전수를 감지하고, 외부와 엔진오일 온도는 K-형 열전대를 이용하였으며, 냉각수 온도는 냉각수 출구 쪽의 온도 센서에서 값을 측정하여 각각의 측정된 온도를 동일한 실험조건을 유지하는데 이용하였다. 출력 요소들은 공회전 속도 제어밸브 내의 직류 모터를 구동하는 신호들로서, 3개의 출력 신호인 CLOSE 및 OPEN 파형과 12V로 구성된다. 한편, 실험상에서 일정한 이득 값을 유지하기 위하여, 별도의 전원 공급기를 설치하였다. 실험 차량의 고유한 공회전 유량을 공급하기 위하여 동일한 타입의 센서를 사용하였으며, 이 경우 공회전 상태에서의 흡입 공기량은 1.0~2.0 //sec, 시동 시는 3.4~3.5 //sec이다. 외란이 작용하지 않는 경우, 800 rpm을 유지하기 위한 기본 듀티율, DC는 각각 CLOSE 32%, OPEN 68%로 설정하였다.

실험 차량의 엔진 배기량은 1800cc이며, 동일한 실험조건을 유지하기 위하여 냉각수 온도는 81℃

부근으로 하였고, 이는 냉각수 Low 팬의 작동 온도 범위이다.

페루프 제어인 퍼지 알고리즘을 실시간 처리할 수 있도록 데스크 탑 PC(cpu:펜티엄-III)를 사용하고, 전자 제어장치 내의 EPROM 데이터를 변경하지 않았다. 공회전 이외의 다른 값들은 맵 값을 사용하였으며, 실험의 편리를 위하여 각 센서에서 입출력 값을 구하였다.

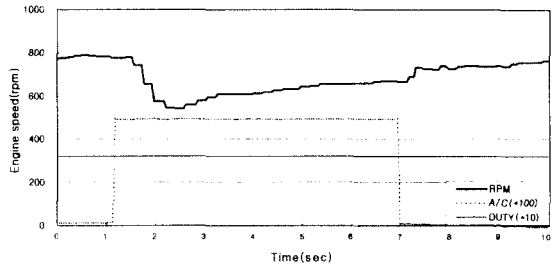


Fig. 4 Rpm change under A/C load (w/o controller)

제어 입력은 엔진에 장착된 홀 센서를 직접 이용하여 최대한 지연시간을 줄이도록 노력하였으며, 클램핑(Clamping) 회로를 설계하여 안정된 구형파를 얻었다. 한편 출력은 직류모터 구동용 듀티 펄스를 생성하도록 설계하였다.

에어콘 압축기 On/Off 동작에 대한 엔진 회전수 변화를 Fig. 4에서 보이고 있다. 그림은 공회전 제어를 하지 않는 경우의 압축기 작동의 유무에 따른 엔진 회전수 및 에어컨 스위치 On/Off와 목표 듀티율(%)간의 관계를 보이고 있다. 에어컨 스위치의 On과 함께 0.4초 후부터 회전수의 강하가 서서히 일어나기 시작하여 최고 550rpm 부근까지 강하함을 보이고 있으며, 이때의 에어컨 압축기 구동 토크는 10Nm 이었다. 한편 에어컨 스위치를 Off함에 따라 서서히 목표 엔진 회전수에 접근하고 있다.

Fig. 5는 전자 제어장치 내의 EPROM에 내장된 공회전 제어 값인 맵에 의한 제어상태이다. 이는 개루프(open-loop) 제어 방식으로 순간적인 회전수 강하는 방지하였으나 에어컨 압축기 토크의 전달과 함께 회전수가 920rpm까지 상승하는 불안정한 상태를 보인다. 이러한 결과 값은 상용 엔진 개발 시에 최적의 맵 값을 프로그래밍한 것으로써, 엔진 부품의 노화와 예측치 못한 외란에 대해서는

더욱 불안정한 공회전 상태를 보인다. 한편 압축기 부하를 제거함에 따라 신속히 목표 회전수로 복원되고 있다.

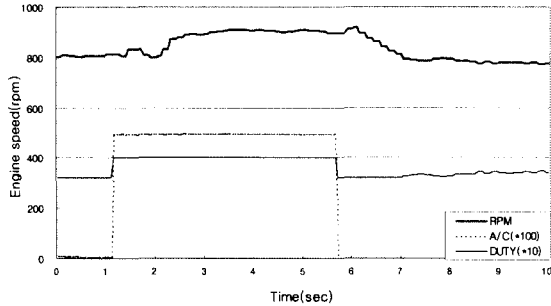


Fig. 5 Rpm change under A/C load (map table)

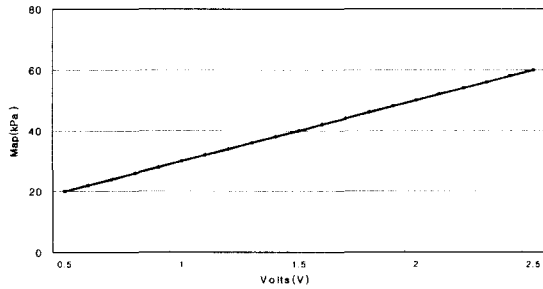


Fig. 6 Relationship between intake manifold pressure and map sensor volts

Fig. 6은 실험차에 장착된 흡기 매니폴드 압력 센서(intake manifold absolute pressor)의 실제 측정 전압과 절대 압력과의 관계이다. 엔진 회전수 800 rpm에서 30kPa의 값을 갖으며, 전자 제어장치에 입력되는 전압은 1.0 V 정도이다.

Fig. 7은 실제의 흡기압력 값과 슬라이딩 관측기에 의한 추정 값과의 비교이다. 에어컨 압축 토크가 작용할 때, 슬라이딩 이득이 각각 0.5, 0.25에서의 추정치와 실제 값 사이의 정확도를 비교한 것으로 0.5에서 관측기의 설계가 보다 정확하였다.

Fig. 8은 슬라이딩 퍼지 제어기에 의한 제어 결과이다. 에어컨 압축기 토크 부하가 주어졌을 경우, 안정된 엔진 회전수 변동량을 보이고 있다. 에어컨 스위치의 On과 함께 예측 지연에 의한 듀티율이 인가되어 초기의 회전수 강하를 제어하고 있

으며, 동시에 슬라이딩 관측기에 의한 흡기 대기 관내의 압력 추정치가 퍼지 제어기의 입력항으로 주어짐에 따라 정상상태의 오차를 제거하고 있다. 초기에 30-50rpm의 회전수 상승이 있으나 곧 안정되고 있으며, 압축기 부하를 제거할 경우에도 같은 정도의 회전수 상승을 보인 후 곧바로 안정된 공회전 상태를 보이고 있다.

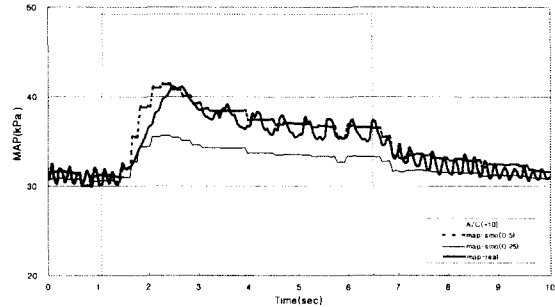


Fig. 7 Pressure changes of intake manifold under A/C load(real & smo)

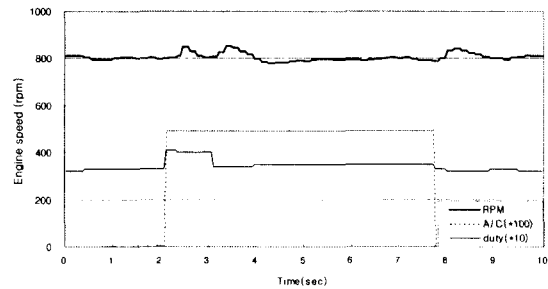


Fig. 8 Rpm change under A/C load (sliding fuzzy control)

6. 결 론

자동차 엔진의 공회전 상태는 자동차의 연비와 운전자의 승차감에 관련되기 때문에 안정한 공회전 제어를 위하여, 흡기 절대압력 값을 슬라이딩 관측기를 사용하여 추론하였다. 한편, 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 슬라이딩 퍼지 제어를 설계하고 공회전 안정성을 검증한 결과, 상용되는 전자 제어장치의 공회전 제어 방식인 맵 방식보다 최고 110rpm 정도의 공회전 안정성을 보였다. 또, 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 추론된 흡기

매니폴드 절대압력 값은 실제 센서로부터 얻은 값과 일치하였으며, 흡기 매니폴드 압력 센서로부터 직접 입력 값을 받을 경우 많은 잡음이 신호에 포함되기 때문에 특수한 필터를 설계해야하는 번거로움을 피할 수 있었다.

본 연구에서 이용된 제어시스템은 상용되는 전자 제어장치의 공회전 속도제어에 응용되어 연비 및 승차감을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. John S. Mills, "Multivariable Control of Engine Idle Speed," SAE, 970611, pp. 55-64, 1997.
2. L. Kjergaard, et al., "Advanced Nonlinear Engine Idle Speed Control Systems," SAE, 940974, pp. 1490-1501, 1994.
3. Patrick Kaidantzis, Per Rasmussen, Michael Jensen, Thomas Vesterholm, and Elbert Hendricks, "Advanced Nonlinear Observer Control of SI Engines," SAE, 930768, pp. 1029-1037, 1993.
4. Minesh A. Shah, and Matthew A. Franchek, "Nonlinear Modeling and Control of I.C. Engine Idle Speed," SAE, 970512, pp. 125-131, 1997.
5. Sei-Bum Choi, and J. K. Hedrick, "Robust Throttle Control of Automotive Engines: Theory and Experiment," Trans. of ASME, Vol. 118, pp. 92-98, 1996.
6. J. J. Moskwa, "Sliding Mode Control of Automotive Engines," J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp. 678-693, 1993.
7. C. Y. MO, A. J. Beaumont, and N. N. Powell, "Active Control of Driveability," SAE, 960046, pp. 215-224, 1996.
8. 이영춘, 외 2인, "안정한 엔진 공회전 모드를 위한 제어기 설계," 한국정밀공학회지, 제17권, 제6호, pp. 89-95, 2000.
9. 이영춘, 외 2인, "급격한 에어컨 외란에 안정한 제어기 설계," 한국정밀공학회지, 제17권, 제7호, pp. 106-112, 2000.
10. Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill Book, 1988.
11. J. J. Moskwa, and J. K. Hedrick, "Modeling and Validation of Automotive Engines for Control Algori-

- thm Development," J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.114, pp. 278-285, 1992.
12. Dobner. D. J., "A Mathematical Engine Model For Development of Engine Dynamic Control," SAE Report No. 800054, 1980.
13. K. Ogata., "Modern Control Engineering," Prentice Hall, 3rd Edition, 1997.
14. R. T. Stefani, et al., "Design of Feedback Control Systems," 3rd/e, Saunders College Publ., 1994.