

안정한 엔진 공회전 모드를 위한 제어기 설계

이영춘*, 방두열**, 이성철***

Controller Design for Stable Engine Idle Mode

Young-Choon Lee*, Du-Yeol Pang**, and Seong-Cheol Lee***

ABSTRACT

The engine idle speed mode becomes worse as one drives a vehicle for several years. This is due to ageing of engine and power-train parts. In this case, unstable idle conditions such as engine stall and droop are frequently experienced when the engine gets heavy torque loads due to power steering pump and air conditioning compressor. The objective of this paper is to study on the idle speed control using PID controller under load disturbances. The input of the PID controller is an error of rpm. The output of the PID controller is an ISCV duty cycle. The dSPACE Controller Boards are used to interface with engine. The on-vehicle test is realized using by SIMULINK and BLOCKSETS tools. The real time interface control panel supplied by Control Desk S/W is designed to have good results in engine idle speed control.

Key Words : PID controller(비례-적분-미분 제어기), Idle speed control valve (공회전 속도제어 밸브), Engine idle speed (엔진 공회전 속도), Duty cycle(듀티 사이클)

기호설명

m_{ac} : cylinder air-mass(kg)

P_m : manifold pressure(kPa)

Q_{Hv} : heating value of fuel(Kcal)

R : ideal gas constant(J/kgK)

T_m : intake manifold gas temperature(K)

T_L : load torque(Nm)

T_i : engine indicated torque(Nm)

T_f : engine friction torque(Nm)

V_d : displacement volume(m³)

V_m : manifold volume(m³)

η_f : fuel efficiency(%)

ω : engine speed (rad/s)

ω_d : desired engine speed (rad/s)

AFR_{stoic} : stoichiometric air to fuel ratio

1. 서 론

운행되는 차량 수의 증가에 따라 교통 신호 대기 시간이 늘어나고 있다. 이런 상황에서 운전자는 많은 스트레스를 받게 되어, 미미한 엔진 공

* 전북대학교 기계공학과 대학원

** 순천제일대학 기계전기제어과

*** 전북대학교 기계공학과, 자동차신기술연구소

회전 상태에도 신경이 민감해진다. 자동차의 엔진 부품이나 동력 계통 등의 노화가 심해질수록 공회전 시 엔진 회전수의 변동량은 많아지고, 외부 부하가 작용하는 경우에는 시동 꺼짐과 ECU 리셋 상태가 될 수도 있다. 또한, 자동차의 전자제어 시스템의 발달과 편리한 부품의 추가 장착으로 인하여 자동차 엔진은 더욱 많은 외부 부하에 노출되고 있다. 즉, 부품 작동의 배터리 전압 강하나 엔진 회전 중 기계적인 토크 및 마찰 손실 등이 빈번하게 일어나고 있으며, 이 경우 운전자는 엔진 공회전 시 회전수 변동을 느끼며, 간혹 심각한 엔진 불안정 상태와 손상을 경험하게 된다.

자동차의 엔진 공회전 상태에 영향을 주는 것으로는 크게 전기적인 요소와 기계적인 요소 2가지로 분류하고 있다. 전기적인 요소로는 냉각수 온도 상승에 따른 라디에이터 냉각 팬의 High-Low 구동, 운전자 선택에 의한 에어컨 On/Off, 자동 창문의 작동 등을 들 수 있다. 기계적인 요소는 파워 스티어링(Power steering) 펌프와 에어컨 압축기 구동 등이 있다. 이러한 외부의 토크 변화 요인을 제어하기 위해서는 ECU (Electronic control unit)의 중요성이 더욱 강조된다.

한편, 근래의 ECU 내의 엔진 공회전 제어 알고리즘은 각각의 외부 변수와 회전수의 맵(Map)을 사용함으로써 제어하고 있으나, 이 경우 고려된 입력 변수에 대해서만 어느 정도의 제어가 가능하며, 개루프 제어의 특성인 오프셋 량의 오차가 남아 있다. 즉, 현재 상용 차량의 경우, 룩업 테이블(Look-up table)과 배터리 보상으로 어느 정도 목표 회전수에 근접하고 있으나 만족스러운 상태는 아니다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해서, PID 제어를 사용하여 목표 회전수에 근접시키고 오프셋 량과 잔류 진동의 감쇠 제어를 시도하였다. 그리고 엔진 회전수와 목표 회전수의 오차를 분석하고, 실험에서는 dSPACE사 제품의 제어 보드를 사용하여 SIMULINK상에서 제어 알고리즘을 구성하였다. 실시간 실행을 위하여 제어보드와 함께 제공된 Control Desk S/W로 직접 제어 패널을 설계하였고, 최적의 P, I, D 이득 값과 공회전 속도제어 밸브의 구동 신호인 듀티 사이클을 구하였다.

2. 엔진의 모델링

엔진 모델링 방정식을 구하기 위하여 Dobner (1980)⁽¹⁾의 정상상태의 엔진 맵에 의한 실험적 모델과 Moskwa 와 Hedrick(1992)⁽²⁾의 복잡한 비선형 엔진 방정식 모델들을 조합하여 사용하였다.

Fig. 1은 엔진 모델링의 시스템 개략도로서, 본 논문은 공회전 시의 공기량 변화만을 고려하는 제어기를 설계하고 실험하였다. 운전 영역은 엔진속도가 400rpm에서 1000rpm, 흡기 매니폴드 압력(Intake manifold pressure)은 20kPa에서 50kPa의 영역으로 하였으며, 공회전 속도제어 밸브(ISCV; Idle speed control valve)로부터 크랭크축의 회전력 전달까지의 지연시간을 800ms로 하였다

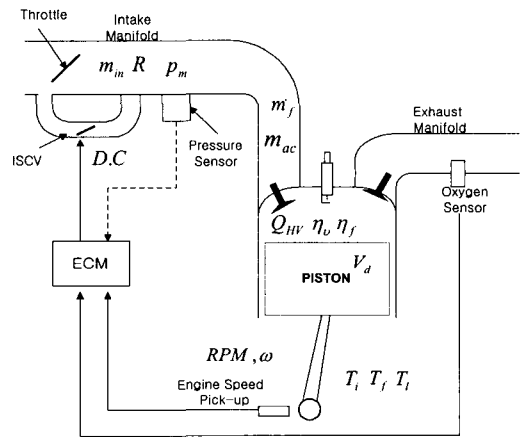


Fig. 1 Schematic diagram of engine idle speed control system

본 연구에서 적용한 엔진 모델링 방정식은 다음과 같다.^(3,4)

- 1) 흡기 매니폴드 압력, \dot{P}_m :

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

- 2) 공기 질량 유동 방정식, \dot{m}_{ac} :

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

- 3) 도시 토크, T_i :

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

4) 엔진 각속도, $\dot{\omega}$:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (T_i - T_f - T_L) \quad (4)$$

여기서, 엔진 회전수 ω 의 변화율은 도시 토크 T_i 및 마찰 토크 T_f 와 부하 토크 T_L 의 함수이다. 부하 토크 T_L 은 외란으로 전기적인 부하와 기계적인 부하에 해당하며, 엔진 관성 모멘트 J 는 엔진 내의 여러 회전체 및 질량의 함수이다.

3. 제어기 설계

Fig. 2(a), (b)는 엔진 공회전 제어기의 블록 선도이다. 제어기의 설계는 SIMULINK상^(5,6)에서 직접 MDL파일로 설계하였으며, 엔진에 부착된 홀센서를 이용하여 엔진 회전수를 감지하여 제어기의 입력 부분으로 사용하였고, 클램핑(Clamping) 회로를 설계하여 안정된 구형파를 얻도록 하였다. 한편 출력으로는 직류 모터 구동용 듀티 펄스를 생성하도록 하였다. 입력과 출력 측의 연결은 dSPACE사의 S/W Tool⁽⁷⁾을 이용하였다. 한편 제어부에서는 엔진 공회전 제어를 위하여 PID 알고리즘을 설계하였다.

제어기의 기준 엔진 회전수 ω_d 를 800rpm으로 하고, 구동되고 있는 엔진 회전수를 ω 라 할 때, PID 제어기에 입력되는 오차 신호 값은 다음과 같다.

$$e(t) = \omega(t) - \omega_d \quad (5)$$

오차를 이용한 기본적인 PID 제어기와 이의 이산화시킨 식⁽⁸⁾은 다음과 같다.

$$e(t)_{PID} = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (6)$$

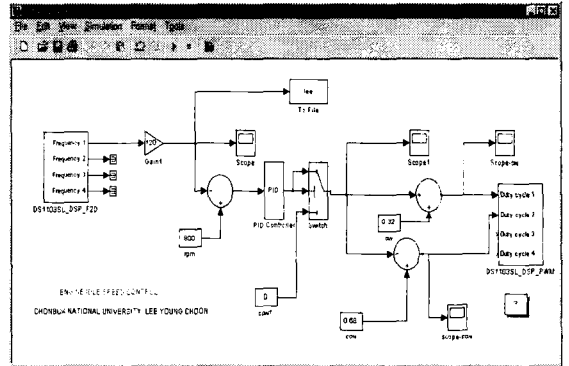
$$e(k)_{PID} = P(k) + I(k) + D(k) \quad (7)$$

$$P(k) = K_p (\omega(k) - \omega_d) \quad (8)$$

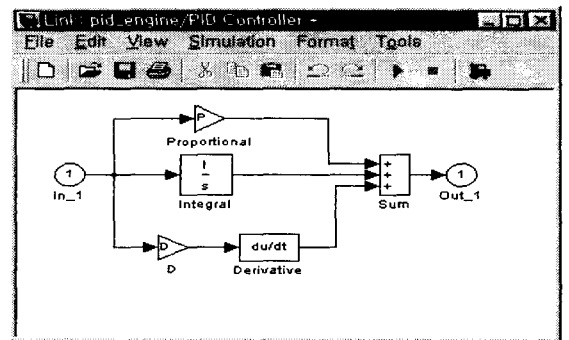
$$I(k) = I(k-1) + K_p \cdot T_s / T_i (\omega(k) - \omega_d) \quad (9)$$

$$D(k) = K_p \cdot T_d / T_s (\omega(k) - \omega(k-1)) \quad (10)$$

여기서, $P(k)$, $I(k)$, $D(k)$ 는 k 시간에서의 비례, 적분, 미분항이고, $I(k-1)$ 은 $k-1$ 시간에서의 적분항, $\omega(k)$ 와 $\omega(k-1)$ 은 k , $k-1$ 시간에서의 엔진 회전수, K_p 는 비례 이득, T_i 는 적분 시간, T_d 는 미분 시간, T_s 는 샘플링 시간이다. 비례 이득 K_p 를 G_p 라하고, $K_p \cdot T_s / T_i$ 는 적분 이득 G_i , $K_p \cdot T_d / T_s$ 는 미분 이득 G_d 이다. 여기서 T_s 는 100ms이다.



(a) Idle speed controller



(b) PID-controller

Fig. 2 System block diagram

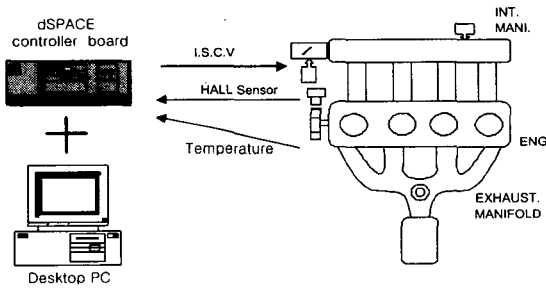
한편, $D.C$ 를 공회전수 800rpm을 유지하기 위한 공회전 속도제어 밸브에 공급되는 기본 듀티율(32%)이라 하면, PID 제어기에 의하여 계산된 e_{PID} 값은 기본 듀티율($D.C$)에 더해져 목표

듀티율($D.C_{des}$)를 결정하게 된다. 식 (11)은 최종적으로 결정된 목표 듀티율을 나타내고 있다.

$$D.C_{des} = D.C + e_{PID} \quad (11)$$

4. 실험 장치 및 제어화면 설계

Fig. 3(a), (b)는 본 연구에 사용된 실험용 차량의 엔진과 PC와의 인터페이스 구성도이다. 공회전 제어를 위하여 dSPACE사 제어보드(DS1103)⁽⁹⁾를 사용하여 입력과 출력 값을 측정하였다. 엔진 내부의 냉각수 및 엔진 오일과 대기 온도를 확인하기 위하여 K-형 열전대를 이용하였으며, 냉각수 온도는 엔진 내의 냉각수 출구 쪽에서 값을 측정하고, 회전자 측정기를 사용하여 프로그램된 값과 항상 비교할 수 있도록 하였으며, 디지털 오실로스코프(TDS220)로 출력되는 듀티율을 확인할 수 있도록 하였다.



(a) Schematic diagram



(b) Actual system configuration

Fig. 3 Experimental system setup

한편, Fig. 4는 공회전 속도조절 밸브의 직류

모터를 구동하는 전류 증폭 회로이다. 시스템의 안정과 잡음 방지를 위하여 입력부에 포토 커플러를 사용하였다. 실험에 사용된 직류 모터를 구동하기 위해서 12V 공급 전압과 상반되는 듀티율을 갖는 CLOSE 과형과 OPEN 과형이 공급되며, 실험상에서 항상 일정한 이득 값을 유지하기 위하여, 별도의 전원 공급기로 전압과 전류를 공급하였다. 실험 차량의 고유한 공회전 유량을 공급하기 위하여 동일한 형식의 센서를 사용하였으며, 이 경우 공회전 상태에서의 흡입 공기량은 1.0~2.0 l/sec, 시동 시에는 3.4~3.5 l/sec이었다. 한편, 공회전 이외의 다른 값들은 ECU의 록업 테이블 값을 사용하였으며, 실험의 편의를 위하여 ECU 판에서 입, 출력 데이터를 취득하였다.

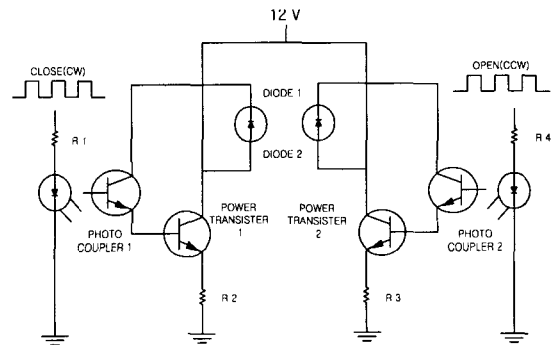


Fig. 4 Design of current amplifier for DC motor

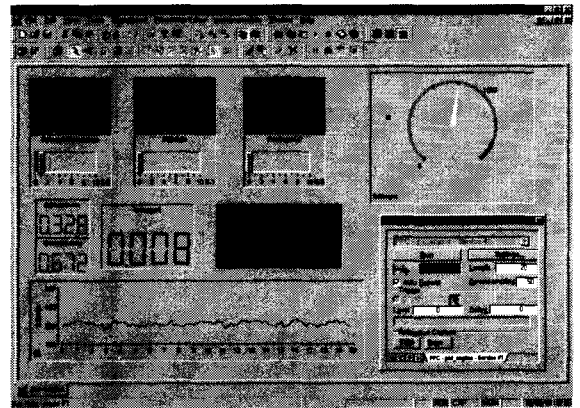


Fig. 5 Experimental main control panel

Fig. 5는 실험의 편리성을 위하여 Control Desk S/W⁽⁹⁾를 이용하여 설계한 주 조작 패널이다. 정

한 실험을 위하여 회전수 계지를 실제와 똑같이 설계하였으며, 이의 연속적인 데이터의 경향을 보기 위하여 플로터와 디지털 디스플레이를 추가하였다. 한편 PID 제어기의 각각의 이득 값을 정확하고 빠르게 결정할 수 있도록 슬라이더 조작에 의하여 실험 중 변경할 수 있게 하였다.

출력 값으로 주어지는 CLOSE와 OPEN 듀티율 값과 e_{PID} 값인 듀티율 변화량은 디지털 디스플레이를 통하여 확인할 수 있다. 한편 각각의 변환되는 값들은 선택에 의하여 파일로 저장된다.

5. 실험 결과

외부 부하로 주어지는 요소들로는 전조등, 자동 창문, 냉각 팬, 파워 스티어링, 에어컨 등의 ON/OFF 동작을 들 수 있다. 이들을 다시 부하 요인별로 분석하면, 전조등 및 자동 창문, 냉각 팬의 작동에 따라 배터리의 일시적인 전압 강하를 유발하여 공회전수 강하를 일으키며, 파워 스티어링 펌프 구동의 경우는 흡기 매니폴드 내의 압력 변화를 일으켜 공회전수 강하가 발생한다. 한편, 에어컨 작동에 따라 압축기로부터 엔진 토크 손실을 유발하여 공회전수 강하가 발생한다. 이와 같이 엔진 공회전수에 영향을 주는 요인들은 복잡적으로 나타나고 있다.

실험에 사용된 차량의 엔진 배기량은 1800cc이며, 동일한 실험 조건을 유지하기 위하여 냉각수 온도는 냉각수 Low팬 작동 온도 범위인 81℃ 부근으로 하였다.

현 차량의 엔진 공회전 부조화 상태를 검증하고 개선하기 위하여 엔진부하 작동 시 ① ECU로부터 제어를 받지 않는 경우, ② 현 상용차량 제어 시스템의 맵 값을 사용한 제어, ③ dSPACE 보드에 의한 PID 제어의 3가지 실험을 하였다. 각각의 경우에 대한 회전수 변화를 Fig. 6 - Fig. 8에서 설명하고 있다.

Fig. 6은 공회전 제어를 하지 않는 경우로, 먼저 전기적인 신호인 전조등 ON 시에 회전수 강하가 50rpm 정도로 나타나고 있으며, 자동 창문 작동 시에는 추가적으로 75rpm 정도의 회전수 강하가 발생하였다. 이 경우 관성력에 의하여 순간적으로 최고 90rpm 정도의 강하를 보이고 있다.

가장 부하가 크게 걸리는 파워 스티어링 동작

의 경우는 순간적으로 200rpm 강하를 보인 후, 160rpm 정도의 일정한 회전수 손실 값을 갖는다. 그리고 최종적으로 인가한 에어컨의 부하에 대하여는 더 이상의 추가 강하를 보이지 않고 있는데, 이는 엔진의 드롭(Droop)과 스톱(Stall) 상황하에서의 회전수 최저 값 유지로 보인다. 이와같이 공회전 제어를 하지 않는 경우에 280rpm 강하를 보이고 있다.

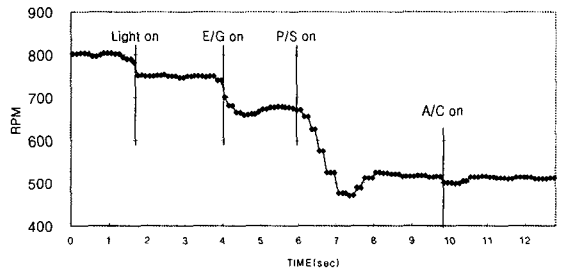


Fig. 6 RPM changes under loads (w/o control)

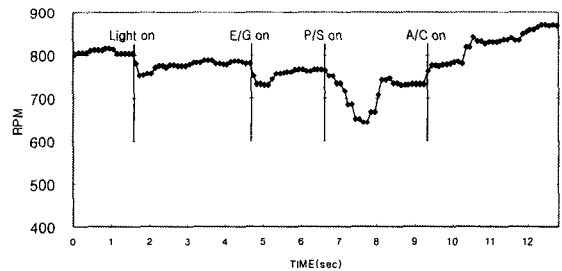


Fig. 7 RPM changes under loads (Map table)

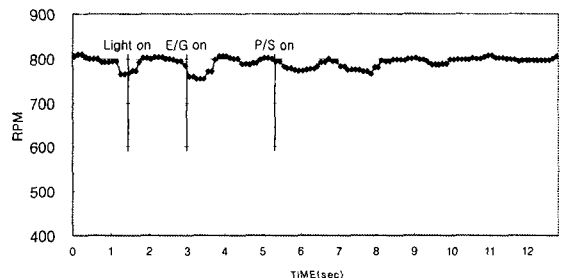


Fig. 8 RPM changes under loads (PID control)

Fig. 7은 ECU 내의 맵에 의한 제어 결과로, 전조등 ON 시, 순간적으로 50rpm 정도의 강하를 보인 후, 서서히 회전수 보상이 이루어지고 있다. 그

후, 자동 창문의 동작에 따라 다시 추가적으로 강하되고 있다. 위와 같은 전기적인 신호에 대하여는 만족한 공회전 제어가 이루어지고 있고, 배터리 전압 보상에 따른 회전수 보상이 서서히 이루어진다. 다음 동작으로 파워 스티어링을 인가하였을 경우에는, 인가 후 140rpm 정도의 강하 후 맵에 의한 공회전 보상에 의하여 기준 회전수대비 70rpm 정도의 강하를 보인다. 이와 같이 실 차량에서의 공회전 제어는 최고 160rpm 정도의 회전수 강하와 70rpm의 일정한 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 PID 제어($G_p : 0.00061$, $G_d : 0.1$, $G_i : 0.00063$)에 의한 실험 결과이다. 앞에서와 같이 각각의 부하가 주어지는 경우, 안정된 회전수 변동을 보이며, 특히 파워 스티어링 동작 시에 변동량이 극히 작음을 알 수 있다. 전기적인 부하에 대하여는 초기에 다소 30 - 50rpm 정도의 회전수 강하가 있으나 곧 안정되고 있다.

이와 같이 PID 제어에서는 현재 상용되는 제어의 결과치 보다 최고 100rpm 정도 개선되고 있음을 보이고 있다.

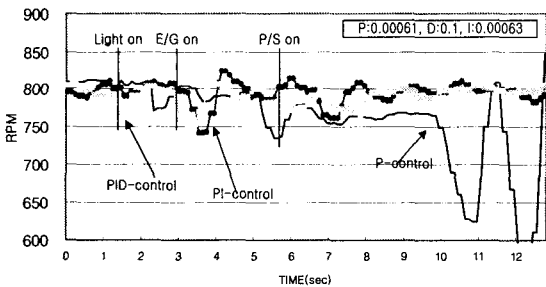


Fig. 9 Comparison of RPM changes controlled by P, PI and PID controllers

한편, Fig. 9 - Fig. 11은 PID 제어기를 사용하여 엔진 공회전 제어를 하는 경우, 각 이득 값들과 회전수와의 관계를 나타낸다.

Fig 9에서는 각각의 P, I, D 이득 값의 추가에 따른 회전수 변동량을 비교하였다. P 제어에서는 전기적인 신호와 파워 스티어링의 작동 하에서 목표치와의 오프셋량을 보이고 있으며, PI 제어에서 오프셋량의 제거와 정착 시간의 감소가 이루어지고 있다. 그러나 미세 잔류 진동이 남아 있으며, 미분기의 추가에 의하여 좀더 안정된 엔진 공회전 상태가 되었다.

Fig. 10과 Fig. 11은 P, D 이득 만의 변화에 따른 회전수 변동량을 나타낸다. P 이득 값이 0.00061일 경우를 최적으로 설계한 경우와 잔류 진동이 발생하는 경우의 이득 값(0.001)을 비교하였다. 후자의 이득 값을 이용하여 Ziegler-Nichols Tuning 법^(10,11)에 의한 P, I, D 이득 값을 확인한 후, 최적의 이득 값을 설정하였다.

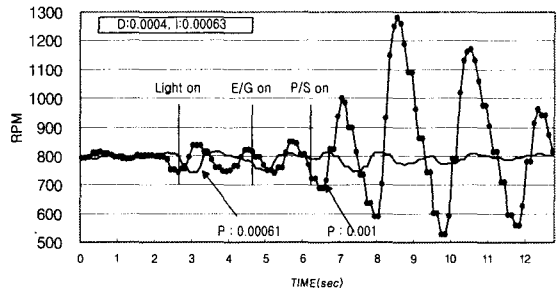


Fig. 10 Comparison of RPM changes controlled by different P gains

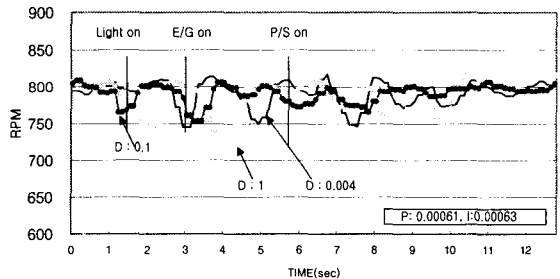


Fig. 11 Comparison of RPM changes controlled by different D gains

Fig. 11에서는 적절한 D 이득 값의 선택으로 잔류 진동이 억제되는 상태를 보이고 있다. 이 경우도 P 이득과 마찬가지로 지나치게 큰 이득 값에서는 과감쇠가 발생함을 알 수 있다. 최적의 공회전 제어를 위해서는, 즉 이득 값 설정 시 먼저 과감쇠 값을 찾고 각각의 이득 값 사이의 절충이 이루어지도록 한다.

6. 결론

엔진 공회전 시 외부 부하를 받는 경우, 엔진

속도 제어에 PID 제어기를 사용하고 이를 상용차량의 제어 시스템과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 엔진 공회전 제어를 향상시키기 위하여 PID 제어기를 적용한 결과, 엔진 회전수 강하에서 현재 상용되는 ECU 상의 맵 방식보다 최고 100rpm 정도의 개선 효과를 얻었다.
2. PID 제어기를 SIMULINK로 설계하고, 실시간으로 그래픽 처리할 수 있는 Control Desk S/W를 통하여 제어 패널을 최적 설계함에 따라 엔진 공회전 성능 개발 시간의 단축과 데이터의 신뢰성을 얻었다.
3. 공회전 속도제어 밸브를 통한 공기량 제어로 전기적인 부하와 기계적인 부하가 작용하는 엔진의 공회전 제어가 용이하였다.

참 고 문 헌

1. Dobner, D. J., "A Mathematical Engine Model For Development of Engine Dynamic Control," SAE Report No. 800054, 1980.
2. J. J. Moskwa, and J. K. Hedrick, "Modeling and Validation of Automotive Engines for Control Algorithm Development," J. of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 114, pp. 278-285, 1992.
3. Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill Book, 1988.
4. John S. Mills, "Multivariable Control of Engine Idle Speed," SAE, 970611, pp. 55-64, 1997.
5. The MathWorks Inc., "SIMULINK Dynamic system Simulation for MATLAB, Ver.3," 1999.
6. The MathWorks Inc., "Real-Time Workshop For Use with SIMULINK, Ver.3," 1999.
7. dSPACE Inc., "RTI and RTI-MP Implementation Guide," dSPACE GmbH, 1999.
8. G. T. Yang, et al., "End-point Position Control of a Flexible Arm by PID Self-Tuning Fuzzy Controller," KACC, pp. 496-500, 1993.
9. dSPACE Inc., "Control Desk Experiment Guide," dSPACE GmbH, 1999.
10. K. Ogata., "Modern Control Engineering," Prentice Hall, 3rd/e, 1997.

11. R. T. Stefani, et al., "Design of Feedback Control Systems," 3rd/e, Saunders College Publ., 1994.
12. 이영춘, 외 2인, "PID형 퍼지 제어기에 의한 공회전 제어," 한국정밀공학회 '99년도 춘계학술대회 논문집, pp. 230-233, 1999.
13. 이영춘, 외 2인, "공회전 엔진속도의 실시간 PID 제어 시뮬레이션," 한국정밀공학회 '98년도 추계학술대회 논문집, pp. 490-493, 1998.