

# 급격한 에어컨 외란에 안정한 제어기 설계

이영춘\*, 권대규\*\*, 이성철\*\*\*

## Design of Stable Controller to Sudden A/C Disturbance

Young-Choon Lee\*, Tae-Kyu Kwon\*\*, and Seong-Cheol Lee\*\*\*

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to study on the control of the engine idle speed under sudden A/C load which is one of the most severe disturbances on engines. Three types of the closed-loop controller are developed for the stable engine idle speed control. The input of the controller is an error of rpm. The output of the controller is an ISCV duty cycle. The anticipation delay is considered to deal with the delay time of the air mass in engine. The PID, Fuzzy and PID-type Fuzzy controllers with the anticipation delay have improved the engine idle speed condition more than current ECU map table under the A/C load.

**Key Words :** PID controller(비례-적분-미분 제어기), Fuzzy controller(퍼지 제어기)  
PID-type fuzzy controller(PID형 퍼지 제어기), Anticipation delay(예측 지연)

### 1. 서 론

운전자들은 차를 운행 시에 소음과 진동을 느끼게 된다. 소음과 진동을 발생시키는 요인을 2가지로 구분하면 외부적인 요인과 내부적인 요인으로 나눌 수 있다. 외부적인 요인은 차량 밖에서 전달되어 들려오는 소음과 진동이며, 내부적인 요인은 파워 트레인 및 에어컨 압축기, 냉각 팬 등의 구동에 따른 소음과 진동으로 구분된다. 이중 내부적인 요인에 따른 소음과 진동은 엔진 회전수 변동을 동반함으로써 운전자로 하여금 불안감을 느끼게 한다. 특히, 엔진 정차 중 공회전 제어에 의하여 내부적인 소음과 진동을 줄일 수 있기 때문에 최적화된 ECU의 맵(map) 값을 구하는 것은

중요한 일이다. 그러나 차량 개발이 잘 되어도 파워트레인을 구성하는 부품들의 노화 및 외부 온도, 습도의 변화 등에 의하여 초기의 만족스런 상태로 유지하기에는 역부족이다. 더욱이 급격한 외란이 주어질 경우에는 현 ECU 공회전 제어의 한계를 보이며, 엔진 스톨(stall)과 드롭(droop) 등을 야기하고 있다.

엔진 공회전에 영향을 주는 외란은 ① 전기적인 요소와 ② 기계적인 요소로 구분할 수 있다. 전기적인 요소는 냉각 팬 및 전조등 등의 On/Off 등에 의한 것이며, 기계적인 요소는 에어컨 압축기 등의 구동에 따른 토크 감소이다. 외란에 대하여 안정된 공회전 제어를 하기 위하여 개루프 제어인 ECU 맵 보상 외에 폐루프 제어를 사용한 많

\* 전북대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 전북대학교 기계공학과 연구원  
\*\*\* 전북대학교 기계공학과, 자동차신기술연구소

은 연구<sup>(1-9)</sup>가 행하여지고 있다. 그러나 전기적인 외란과 파워 핸들(power steering) 동작 하에서의 안정된 공회전 제어 결과를 보이고 있으며, 에어컨 압축기의 동작 시에는 공회전 제어의 어려움을 보이고 있다. 한편, 공회전 제어의 입력 항으로 공회전 속도제어 밸브의 공기량과 스파크 타이밍의 진각 제어를 동시에 사용하고 있으나, 본 논문에서는 배출 가스 NOx의 생성과 관련된 스파크 타이밍 진각 제어<sup>(10)</sup>는 사용하지 않고 공기량 제어만으로 에어컨 압축기 부하가 주어졌을 경우, 엔진 공회전 제어 실험을 하였다.

안정된 공회전 제어를 수행하기 위해, 예측 지연(anticipation delay)<sup>(11)</sup>을 갖는 ① PID 제어기, ② 퍼지 제어기, ③ PID형 퍼지 제어기를 설계하고 특성들을 비교하였다. 실험에서는 dSPACE사의 입출력 제어 보드를 사용하여 SIMULINK 상에서 실시간 제어를 하였다.

## 2. 제어기 설계

Fig. 1-3은 본 논문에서 사용한 공회전 제어기들의 구성도이다. 입력은 엔진 회전수  $\omega_e$ 이며, 기준 입력은 엔진 요구 회전수  $\omega_{ed}$ 로 800rpm이다. 입력과 기준 입력 사이의 오차는 다음과 같다.

$$e(t) = \omega_e(t) - \omega_{ed} \quad (1)$$

한편, 출력은 공회전 속도제어 밸브(idle speed control valve)의 구동 신호인 목표 듀티율(duty cycle)  $DC_{des}$ 이다. 외란은 에어컨의 On/Off에 의해 주어지는 에어컨 압축기의 토크 부하이다.

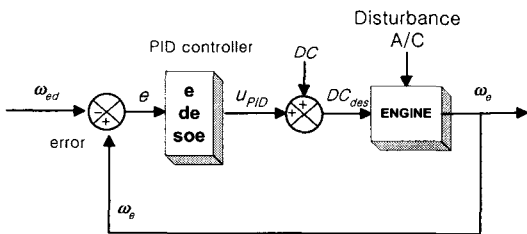


Fig. 1 Schematic diagram of PID controller

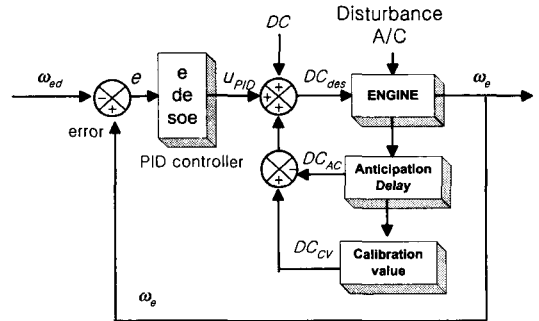


Fig. 2 Schematic diagram of PID controller with anticipation delay

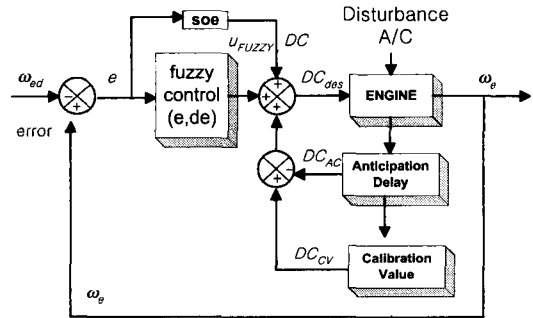


Fig. 3 Schematic diagram of PID-type fuzzy controller with anticipation delay

### 2.1 PID 제어기

오차를 이용한 PID 제어식<sup>(11)</sup>은 식 (2)과 같으며,  $K_p$ 는 비례 이득,  $T_i$ 는 적분 시간,  $T_d$ 는 미분 시간이다.

$$u(t)_{PID} = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

Fig. 1에서와 같이 PID 제어기에 의하여 계산된 출력 값은  $u_{PID}$ 이며, 이 값은 다시 공회전수 800rpm을 유지하기 위한 기본 듀티율  $DC$ 에 더해져 최종 보상 값인 목표 듀티율  $DC_{des}$ 를 결정하게 된다. 목표 듀티율은 다음과 같다.

$$DC_{des} = DC + u_{PID} \quad (3)$$

### 2.2 PID 제어기 (예측 지연 포함)

Fig. 2는 예측 지연을 포함한 PID 제어기의 구성도이다. 예측 지연은 공회전 속도제어 밸브의 개방에 의하여 발생한 공기 질량이 실린더 내까지 도달하는데 걸리는 지연 시간(D1)과 실린더 내에서 연료와의 혼합 및 폭발에 따른 동력 발생 시까지의 지연 시간(D2)을 고려한 것이다. D1은 0.8초, D2는 0.2초를 고려하여 에어컨 압축기의 작동 전에 공회전 속도제어 밸브를 제어하는 방식이다. 예측 지연에 의한 에어컨 보상 듀티율은  $DC_{AC}$ 이다. 한편, 예측 지연 제어와 함께 1초 후부터 보정 듀티율  $DC_{CV}$ 를 에어컨 보상 듀티율  $DC_{AC}$ 에 더하고 있다. 보정 듀티율  $DC_{CV}$ 의 추가는 에어컨 보상 듀티율에 따른 공회전수의 상승을 방지하기 위한 것이다. 최종 목표 듀티율은 다음과 같다.

$$DC_{des} = DC + u_{PID} + DC_{AC} + DC_{CV} \quad (4)$$

### 2.3 PID형 퍼지 제어기

Fig. 3은 예측 지연을 포함한 퍼지 제어기의 구성도로서, 새롭게 퍼지 제어 알고리즘이 추가되었다. 퍼지 제어 알고리즘의 특징은 비선형 시스템 모델식에 적합하고, 전제부에 다양한 입력 요소를 구성할 수 있으며, 특히 숙련된 전문가의 경험을 바탕으로 플랜트의 최적의 안정을 이룰 수 있다. 본 실험에서는 퍼지 합성 방법으로 최대-최소 합성법(max-min composition)을 사용하고, 추론 과정에서는 맘다니(Mamdani) 방법을 채택하였다. 엔진 공회전 속도를 제어하기 위하여 출력의 모 집단에서 애매한 값을 명확한 값으로 변환해 주는 비퍼지화(defuzzification)는 식 (5)의 무게 중심법(center of gravity method)을 사용하였다.

$$Y = \frac{\sum Y_i \cdot \mu_B(y_i)}{\mu_B(y_i)} \quad (5)$$

여기서,  $Y$  : 비 퍼지화 출력  
 $Y_i$  : 소속 함수의 양자화 값  
 $\mu_B(y_i)$  : 퍼지 집합의 소속함수

Fig. 3과 같이 입력 변수들로 출력된 엔진 회전수와 목표 회전수와 오차인  $e(t)$ 와 오차의 변

화량인  $de(t)$ 를 선택하고 이에 대응하는 멤버쉽 함수를 구성하였다. 한편, 정상 상태의 오차를 개선하기 위하여 오차의 합인  $soe(t)$  항을 추가하여 PID형 퍼지 제어기를 구성하였다. 입출력 변수의 정의에서 퍼지 제어기의 입출력 관계는 다음과 같다.

$$R(t) : e(t) \times soe(t) \times de(t) \Rightarrow u_{FUZZY} \quad (6)$$

여기서  $R(t)$ 는  $t$ 번째 규칙의 관계 행렬이며, Fig. 4는 본 실험에서 적용된 입력부와 출력부의 멤버쉽 함수이다.  $u_{FUZZY}$ 는 퍼지 제어기에 의한 출력값이며, 목표 듀티율은 식 (7)과 같다.

$$DC_{des} = DC + u_{FUZZY} + DC_{AC} + DC_{CV} \quad (7)$$

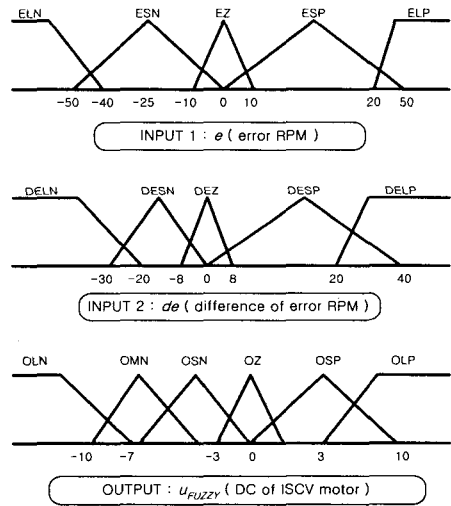


Fig. 4 Membership function of I/O

### 3. 실험 장치

Fig. 5는 본 연구에 사용된 실험용 차량의 엔진과 PC와의 인터페이스 구성도이다. 공회전 속도 제어를 위하여 dSPACE사의 입출력 제어 보드(DS1103)를 사용하였다. 입력 요소들로는 홀(hall) 센서 신호, 엔진 내부의 냉각수와 엔진 오일 온도, 대기 온도, 에어컨 스위치 On/Off 신호로 구성되어 있다. 홀 센서로부터 엔진 공회전수를 감지하고,

외부와 엔진 오일 온도는 K-형 열전대를 이용하였으며, 냉각수 온도는 냉각수 출구쪽의 온도 센서에서 값을 측정하였다. 출력 요소들은 공회전 속도 제어 밸브 내의 직류 모터를 구동하는 신호들로서, 3개의 출력 신호인 CLOSE 및 OPEN 파형, 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 1.0~2.0l/sec, 시동 시는 3.4~3.5l/sec이다. 외란이 작용하지 않는 경우, 800rpm을 유지하기 위한 기본 듀티율 DC는 각각 CLOSE 32%, OPEN 68%로 설정하였다.

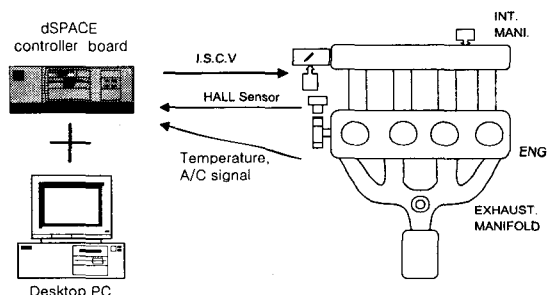


Fig. 5 Schematic diagram of experimental system

실험 차량의 엔진 배기량은 1800cc이며, 동일한 실험 조건을 유지하기 위하여 냉각수 온도는 81. C 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, ECU내의 EPROM 데이터를 직접 변경하지는 않았다. 공회전 이외의 다른 값들은 ECU의 맵 값을 사용하였으며, 실험의 편의를 위하여 ECU 편에서 입출력 값을 구하였다.

#### 4. 실험 결과

Fig. 6은 공회전 제어를 하지 않는 경우의 에어컨 스위치 On/Off에 따른 엔진 회전수(rpm)와 목표 듀티율(%)의 변화를 비교한 것으로, 실제의 에어컨 스위치 On/Off 전압치와 듀티율에 각각 100배, 10배의 값을 취하였다. 에어컨 On 상태는

전압이 0V에서 5V로 상승 할 때이며, 에어컨 Off는 반대의 경우를 나타낸다. 에어컨 부하가 주어질 경우에 기본 듀티율 32%를 계속 유지함에 따라 토크 손실이 발생하고 있음을 알 수 있다. 에어컨 스위치를 On한 경우에 0.6초 후부터 회전수가 강하하기 시작하여 관성력에 의하여 550rpm 부근까지 떨어진 후 서서히 회복하고 있으며, 이는 에어컨 압축기 구동 토크 10Nm에 해당되는 회전수 손실치이다. 한편, 에어컨 압축기 부하를 제거함에 따라 서서히 800rpm으로 회복하고 있다.

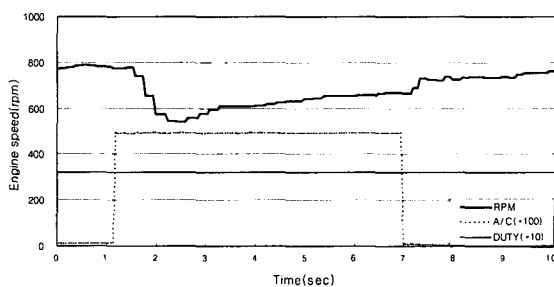


Fig. 6 Rpm change under A/C load (no control)

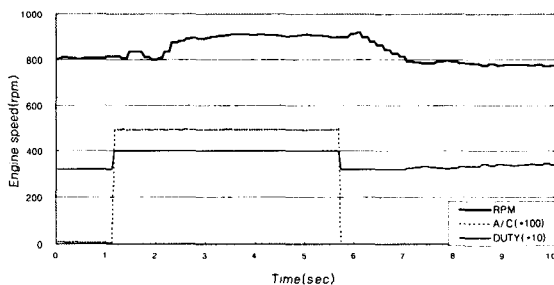


Fig. 7 Rpm change under A/C load (map table)

Fig. 7은 실험 차량의 ECU 공회전 보상 맵에 의한 제어 상태이다. 에어컨 On과 동시에 듀티율을 보상하는 예측 지연 방법을 택하고 있으나 맵 방식에 따른 회전수 상승(920rpm)을 보이고 있다. 이는 ECU 맵 상에서 최적의 보정 값을 선택한 경우이며, 계속된 부품 노화와 예측치 못한 외란에 대해서는 더욱 불안정한 엔진 공회전 상태를 보일 수 있다.

Fig. 8은 페루프 제어에 의한 회전수 변동을 설명하고 있다. 에어컨 압축기의 토크 손실을 만회하기 위하여 목표 듀티율을 32-42% 사이에서

갖도록 제어하는 PI 제어기의 한 예이다. 본 연구에서는 서로 다른 페루프 제어기들을 구성하고 제어 상태를 비교 분석하였다.

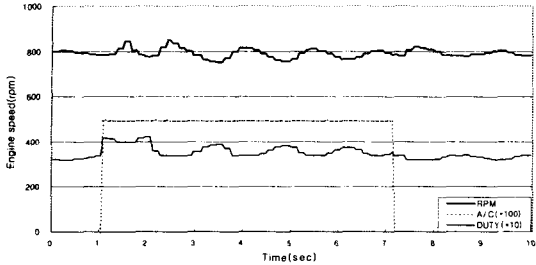


Fig. 8 Rpm change under A/C load (PI control with anticipation delay)

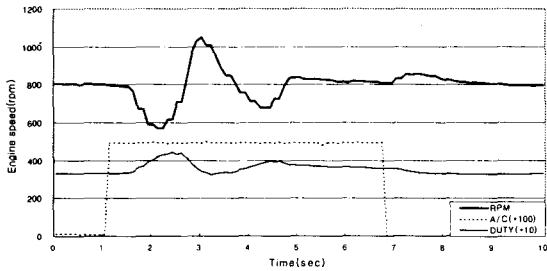


Fig. 9 Rpm change under A/C load (PID control)

#### 4.1 PID 제어 결과

Fig. 9는 예측 지연 없이 PID 제어만을 하였을 경우이다. 에어컨 신호 입력 후 0.6초부터 회전수 강하가 시작되며 동시에 듀티를 보상이 이루어지고 있다. 그러나 공회전 속도제어 밸브에 의한 흡기 매니폴드 내로 유입된 공기 질량이 이동하는데 걸리는 지연 시간이 고려되지 않아, 초기 토크 손실치에 대하여 보상을 하지 못하고 580rpm 부근까지 하락하는 결과를 보인다. 그러나 에어컨 부하 제거 시엔 비교적 안정적인 결과를 갖는다. 한편, 비례(P) 이득, 적분(I) 이득, 미분(D) 이득 값 결정은 Ziegler-Nichols tuning법<sup>(12)</sup>을 이용하였으며, 각각의 이득 값은 P: 0.0068, I: 0.001, D: 0.1이다.

Fig. 10은 예측 지연 기능을 갖는 PID 제어 결과(P: 0.0048, I: 0.001, D: 0.09)이다. 에어컨 스위치를 On함과 동시에 지연 시간과 에어컨 압축기의 토크 관성력을 고려한 에어컨 보상 듀티율(8%)이 PID 제어기에 가해져 초기 회전수 강하를 제어하고 있으며, 1초 후부터 보정 듀티율이 가해

지고 있다. 에어컨 스위치를 On한 후 0.6초 정도에서 20rpm의 회전수 강하가 있으나 곧바로 회전수 보상을 하여 800rpm에 수렴하고 있다. 잔류 진동 주기는 1.5초이며, 회전수 변동량은 760-860rpm 정도이다.

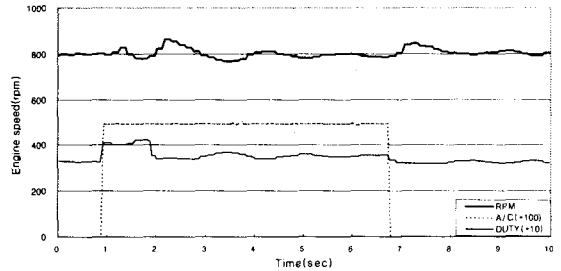


Fig. 10 Rpm change under A/C load (PID control with anticipation delay)

#### 4.2 퍼지 제어 결과

Fig. 11은 예측 지연 기능을 갖는 퍼지 제어의 공회전 제어 실험 결과이다. 퍼지의 입력함수로 목표 회전수와 출력된 회전수와의 오차인  $e(t)$ 와 오차의 변화량인  $de(t)$ 를 고려하여 제어한 결과로서, PID 제어기보다 안정된 잔류 진동의 감쇠 제어가 되고 있으나, 목표 회전수 대비 최고 50rpm 정도의 정상 상태 오차가 발생하고 있다.

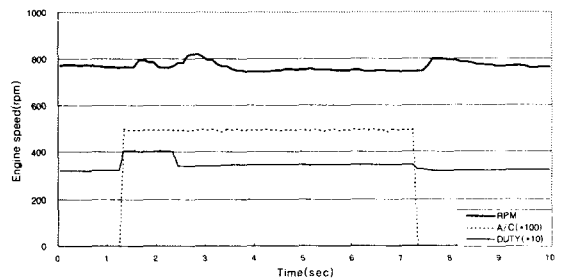


Fig. 11 Rpm change under A/C load (fuzzy control with anticipation delay)

#### 4.3 PID형 퍼지 제어 결과

Fig. 12는 예측 지연 기능을 갖는 PID형 퍼지 제어로서, 퍼지의 입력 함수인  $e(t)$ 와  $de(t)$  외에  $soe(t)$  항인 적분기(I: 0.001)를 추가하여 실험한 결과이다. 정상 상태 오차의 제거와 함께 잔류 진

동이 감소되고 있다. 회전수 변동량은 770-840rpm으로 설계한 제어기들 중 가장 우수한 성능을 보이고 있다.

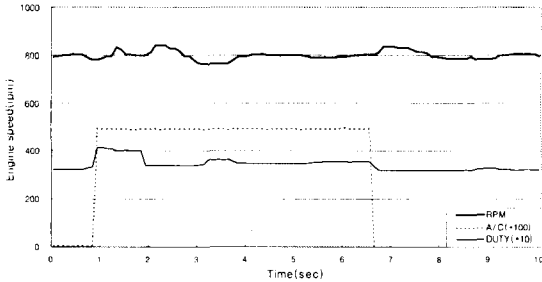


Fig. 12 Rpm change under A/C load (PID type fuzzy control with anticipation delay)

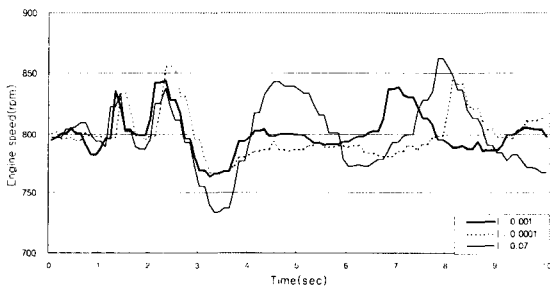


Fig. 13 RPM changes of PID type fuzzy control system according to I-gains

Fig. 13에서는 적분 이득 값의 변화에 따른 회전수의 변동량을 비교하고 있다. 적분 이득 값이 커짐(I:0.07)에 따라 변동폭이 커졌으며, 어느 값 이상에서는 공명 현상이 나타났다. 한편, 작은 적분 이득 값(I:0.0001)에서는 정상 상태 오차를 보였다.

### 5. 결 론

자동차 운행 중 정차를 할 경우, 승용차의 경우 일반적으로 800rpm 정도의 엔진 공회전수를 유지하고 있으며, 외부 환경으로부터 외란을 받게 되면 엔진 공회전 상태는 불안정하게 나타난다. 특히, 에어컨 압축기의 작동과 같은 기계적인 급격 하중이 작용할 경우엔 엔진 스톨과 드롭이 발생한다. 이와 같이 급격하게 큰 토크 량이 주어질 경우에 상용화 되고 있는 ECU의 맵 제어 방식과

페루프 제어기들을 설계하여 엔진 공회전 제어를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PID 제어기를 예측 지연 없이 적용한 결과, 580rpm까지 하락한 후 안정되어졌으나 간혹 시동 꺼짐을 유발하여, ECU의 맵에 의한 제어보다 불안정하였다.
2. 예측 지연을 갖는 PID 제어기는 엔진 회전수 변동량이 760-860rpm의 변화를 보이고 있어, 일정한 상승치 920rpm을 보이는 ECU의 맵보다 안정된 공회전 제어 상태를 보였다.
3. 예측 지연을 갖는 ①PID 제어기, ② 퍼지 제어기, ③ PID형 퍼지 제어기 중에서 가장 안정된 제어 성능을 보이는 것은 PID형 퍼지 제어기로, 회전수 변동량이 770-840rpm 정도였으며, 퍼지 제어기가 PID 제어기보다 잔류 진동의 감소 제어에서 안정적인 면을 보였으나 정상 상태 오차가 발생하였다.

### 참고문헌

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. Francheck, "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, PID형 퍼지 제어기에 의한 공회전 제어, 한국정밀공학회 99년도 춘계학술대회 논문집, pp. 230-233, 1999.
9. 이영춘, 외 2인, 공회전 엔진속도의 실시간 PID 제어 시뮬레이션, 한국정밀공학회 98년도 추계학술대회 논문집, pp. 490-493, 1999.
10. Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill Book, 1988.
11. K. Ogata., "Modern Control Engineering," Prentice Hall, 3rd Edition, 1997.
12. R. T. Stefani, et al., "Design of Feedback Control Systems," 3rd/e, Saunders College Publ., 1994.