

論文94-31B-6-7

퍼지논리를 이용한 자동차 엔진의 공회전 속도 제어

(Idle Speed Control of Automotive Engine using Fuzzy Logic)

張 宰 豪 * , 金 炳 國 *

要 約

본 논문에서는 자동차 엔진의 고효율화 저공해화를 위하여 퍼지논리를 이용한 공회전 속도 제어를 개발하였다. 공회전 속도가 너무 낮은 경우에는 엔진의 작동이 원활하지 못하며 반대로 너무 높은 경우에는 연료의 소모량이 증대된다. 따라서 공회전 속도는 기관의 작동이 원활하게 유지되는 한도내에서 가능한한 낮게 유지되어야 한다. 설계된 공회전 속도 제어기는 엔진의 상태에 따라 적절한 제어 신호를 발생시키고, 예기치 못한 경우에도 적절하게 잘 동작함을 시뮬레이션을 통해 입증하였다. 아울러 제어기의 개발기간과 경비를 단축시키고 제어기 개발의 편리를 위해 엔진 시뮬레이터를 개발하였다.

Abstract

In this paper, a fuzzy logic-based idle speed controller is designed for automotive engine with a purpose of high efficiency and low pollution. When the idle speed is low engine operation is not smooth, otherwise fuel consumption is increased. Therefore the idle speed must be maintained as low as possible within the scope that ensures smooth operation of engine. By simulation, we show that the idle speed controller has generated a proper control signal as engine condition or environment varies, and also operated well for unexpected cases. Also, an engine simulator, which is used as a basic tool for controller design, is developed and utilized for reduction of development time and cost.

1. 서론

오늘날 자동차 공업기술은 저공해, 연비향상, 경량화, 그리고 고속화에 비례하는 안전성 확보에 중점이 두어져 있다. 특히 자동차 배출가스 규제가 강화되면

서 저공해 내지는 무공해 기관에 대한 기술 혁신이 급속도로 진행되고 있다. 연비향상과 저공해를 동시에 달성하기 위한 방법으로 혼합기 형성 장치가 종래의 기화기 방식에서 가솔린 분사 방식으로 전환되고 있다. 그리고 이에 따른 자동차 엔진 제어 장치의 개발 또한 주요 관심사가 되고 있다.

최근에는 자동차 엔진 제어기의 효율을 높이기 위해서 마이크로프로세서를 사용한 전자식 엔진 제어 방식이 사용되고 있다. 이와 같은 전자 제어 방식은

* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Engineering, KAIST)
接受日字 : 1993年 8月 24日

기존의 기계제어 방식에 비해 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 여러가지의 정교한 센서를 사용해 보다 세밀한 제어를 할 수 있다. 둘째, 센서를 사용해 다양한 제어기능을 추가하더라도 제어기의 설치를 위해 자동차 내부에 더이상의 공간을 필요로 하지 않는다. 셋째, 엔진 제어에 여러가지 고급 제어 알고리즘을 적용하기 쉽다. 현재 엔진의 전자 제어에는 연료 분사 제어, 점화 시기 제어, 노크(knock) 제어, 배기 가스 재순환 제어, 공회전 속도 제어 등이 있으며 위와같은 장점을 바탕으로 자동차의 전자화 추세는 더욱 더 가속화될 전망이다.

그러나 엔진이 비선형 시스템인 반면 전자식 엔진 제어에서 실제로 사용되는 제어기는 대부분 PID 제어기이고 제어 알고리즘의 프로그램 방식 또한 패턴 기동형의 방식 - 각각의 경우마다 보정해주는 방식 - 이 주로 사용되고 있다. 이와같은 기법은 엔진의 동특성(dynamics)을 정확히 알고 있어야 하며 동특성이 외부의 상태에 따라 크게 변동이 없다는 가정을 필요로 한다. 또 엔진의 특성을 알아내기 위해 많은 경험과 실험 그리고 장기간의 개발기간을 필요로 하면서도 도로의 상태, 기어의 변속 등 예기치 못한 경우가 발생했을 경우에는 그 경우에 대해 미리 프로그램 되어있지 않기 때문에 제대로 잘 동작하지 못하는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 극복하기 위해 전문가의 지식을 언어적 제어규칙으로 구성할 수 있고 제어대상의 정량적인 모델을 필요로 하지 않으면서도 예기치 못한 경우에 추론을 통해 제어입력을 생성시킬 수 있는 특징을 갖는 퍼지 제어를 구성한다. 실제로 퍼지 이론이 자동차에 처음 적용되기 시작한 것은 1980년대 부터이며, 자동차의 정속도 주행장치에 퍼지 이론이 처음으로 도입되었다.^[5] 그후, Takahashi 등은 자기조정 퍼지 제어기(self-tuning fuzzy logic controller)를 사용하여 자동차의 정속도 주행 장치를 구성하였으며^[6], 자동 변속 장치의 개발에 퍼지 추론을 사용하였다.^[4] Kawai 등은 엔진 제어의 기본적 논리를 기초로 하여 퍼지룰을 구성하고 연료 분사 제어와 점화시기 제어를 제어 룰(rule) 테이블을 사용하여 실시간으로 제어하고 있다. 실시간 엔진제어를 위한 퍼지 제어기로는 아닐로 그 퍼지 칩을 사용하였다.^[3]

본 논문에서는 제어기의 개발기간을 단축시키고 개발 경비를 줄이면서도 제어기의 개발에 편리성을 제공하는 엔진 시뮬레이터를 개발하여 엔진의 각 부분을 모델링하는 동시에 제어기에서 필요로 하는 각종 신호들을 적절하게 생성시키는 문제를 다루며, 개발된 엔진 시뮬레이터에 퍼지 이론을 도입해서 기존의

제어기가 예기치 못한 경우에 적절히 동작하지 못하는 단점을 극복하기 위해 공회전 속도 퍼지 제어기를 구성한다. 이 공회전 속도 퍼지 제어기에서는 제어에 필요한 적절한 룰(rule)과 소속 함수를 사용하여 보다 효율적인 공회전 속도 제어가 가능함을 시뮬레이션을 통해 입증하였고, 또한 퍼지 제어를 엔진에 도입했을 때의 장단점에 대해 고찰하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. Ⅱ절에서는 엔진모델을 설계하고 설계된 모델로부터 제어기 설계에 필요한 각종 센서신호들을 생성해 내며, Ⅲ절에서는 기존의 공회전 속도 제어 방식에 대해 알아본다. Ⅳ절에서는 엔진 제어기의 효율을 높이기 위해 적절한 룰과 소속 함수를 사용하여 공회전 속도 퍼지 제어기를 설계하고 Ⅴ절에서는 시뮬레이션을 통해 기존의 PID 제어기와 퍼지 제어기의 성능을 비교하고 장단점에 관해 고찰하였다. 끝으로 Ⅶ절에서는 결론및 추후연구과제에 대해 서술한다.

Ⅱ. 엔진 모델링

일반적으로 어떤 대상 시스템에 대한 시뮬레이터의 개발은 다음과 같은 의의를 지니고 있다. 첫째, 설계된 시스템이 상황의 변화에 따라 어떻게 동작하는지를 알고자 할때 유용하며 둘째, 제어기의 설계과정에 있어서 개발기간, 경비 등을 단축시키는 유용한 도구로서의 역할을 한다. 따라서 엔진 제어기의 개발과 개발된 제어기의 성능을 입증하고 제어기의 개발기간과 경비를 축소시키기 위해서는 엔진 모델의 개발을 필요로 한다.

본 연구에서 제시된 모델은 입력으로 드로틀(throttle) 각도, 연료분사시간, 점화시기, 듀티 비(duty ratio) 등을 받아 출력으로 엔진 회전 속도, 흡기다기관압력, 냉각수온 등 제어기의 구성에 필요한 각종 센서 신호를 생성해내고 있다. 전체적인 엔진 모델의 블럭 다이어그램은 그림 1과 같다. 구성된 엔진 모델은 공기 흡입 장치, 흡기 다기관, 연소 장치, 동력 장치, 변속 장치, 센서 신호의 생성 모델 등으로 구성된다. 구성된 엔진 모델은 참고문헌 [1] [6] [9] [11] [13] 을 기초로하여 구성되었으며, 효과적인 제어기의 구성을 위해 필요한 냉각수온, 내부부하 등의 각종 센서 신호는 참고문헌 [7] 을 참조하여 이치에 알맞게 적절하게 생성되었다.

1. 공기 흡입 장치

자동차의 외부에서 흡기 다기관 안으로 공기를 흐르게하는 가장 중요한 요인은 외부와 흡기 다기관 안

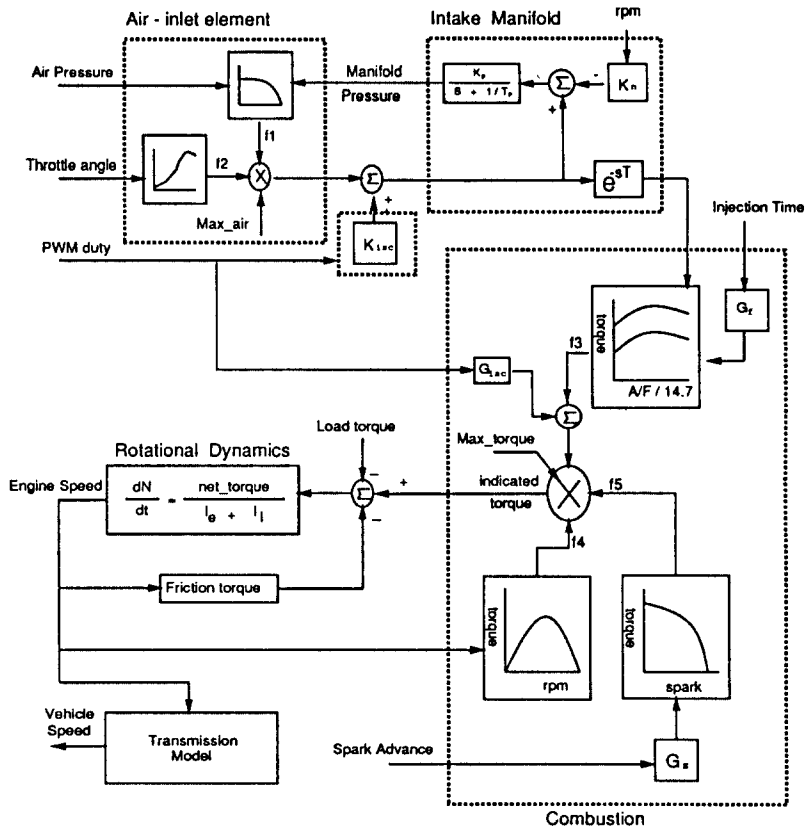


그림 1. 엔진 모델 블럭 다이어그램
Fig. 1. Engine model block diagram.

의 압력 차이와 드로틀 밸브의 개도이다. f_1 은 압력 차이의 효과를 시뮬레이션하는 요소로서 참고문헌 [1]에 정의되어 있으며, f_2 는 드로틀 밸브의 개도가 공기의 흐름에 미치는 영향을 시뮬레이션하는 요소이다.

$$f_1 = \begin{cases} 3.87(\frac{P_m}{P_b})^{0.71}[1 - (\frac{P_m}{P_b})^{0.29}]^2 & \frac{P_m}{P_b} \geq 0.528 \\ 1.0 & \frac{P_m}{P_b} \leq 0.528 \end{cases} \quad (2.1)$$

$$f_2 = 1 - \cos \alpha \quad (2.2)$$

여기에서 P_m 은 흡기다기관 압력을 나타내며, P_b 는 대기압을 나타내고, α 는 드로틀 각(throttle angle)을 나타낸다. 모델이 특정 엔진에 국한되지 않도록 하기 위해서는 흡기 다기관 안으로 흘러 들어가는 실제 공기의 흐름을 다음과 같이 시뮬레이션 한다.

$$\dot{m}_{a,i} = \dot{m}_{a,m}(P_b, T_i) f_1 f_2 \quad (2.3)$$

$\dot{m}_{a,i}$ 는 흡기 다기관 안으로 흘러 들어가는 공기의 질량 흐름율을 나타내며 $\dot{m}_{a,m}(P_b, T_i)$ 는 고려 대상인 엔진에 대한 최대 공기 질량 흐름율을 나타낸다. P_b 와 T_i 는 대기압과 흡입 공기의 온도를 나타낸다. $\dot{m}_{a,m}(P_b, T_i)$ 가 대부분의 엔진에 대해서 측정 가능한 양이라는 사실을 고려하면 식 (2.3)은 모든 엔진의 공기 흐름의 특성을 정확하게 나타내고 있음을 알 수 있다.

2. 흡기 다기관

흡기 다기관이 공기의 흐름에 미치는 가장 큰 영향이 공기 흐름의 지연(delay) 현상이라고 가정하면 공기 흐름에 대한 흡기 다기관의 동특성(dynamics)은 지연항(delay term)으로 묘사된다. 흡기 다기관의 압력을 시뮬레이션하기 위해서는 질량 보존의 법칙을

사용한다. 온도가 거의 일정하다고 가정하면 흡기 다기관 압력의 변화율은 다음과 같이 된다.

$$\dot{P} = K_p(\dot{m}_{a,i} - \dot{m}_{a,o}) \quad (2.4)$$

여기에서 K_p 는 기체 상수, 기체의 분자량, 다기관의 압력과 온도에 따라 변화하는 상수이며, $\dot{m}_{a,o}$ 는 흡기 다기관에서 흘러나가는 공기의 질량 흐름율을 나타낸다. 공기의 질량 흐름율이 다기관의 압력과 공기 흡입 장치와 ISC 밸브를 통과한 공기량, 엔진 Pumping 효과에 의해 실린더로 들어가는 공기량 등에 영향을 받는다는 사실에 의해 (2.4)식을 선형화시키면 다음과 같이 된다.

$$\Delta \dot{P} = K_p \left[\left(\frac{\partial \dot{m}_{a,i}}{\partial P} - \frac{\partial \dot{m}_{a,o}}{\partial P} \right) \Delta P + \Delta \text{airflow} + K_{isc} \Delta \text{duty} - K_n \Delta N \right] \quad (2.5)$$

여기에서 K_n 은 pumping feedback gain이며, K_{isc} 는 ISC 밸브를 통과한 공기량이 압력의 변화율에 미치는 영향을 나타낸다. ΔP 의 계수의 역수를 다기관의 시상수 τ_p 로 정의하면 다기관의 압력에 대한 동특성(dynamics) $P_m(s)$ 는 다음과 같이 일차의 플랜트로 묘사할 수 있다.

$$P_m(s) = \frac{K_p}{s + \frac{1}{\tau_p}} \quad (2.6)$$

3. 연소장치

여기서 제시하는 연소장치에 대한 모델은 실린더 내부의 자세한 연소과정을 시뮬레이션하는 것이 아니고 여러가지 엔진 파라미터들의 함수로 엔진의 토오르크를 예측하는 것이다. 엔진 토크와 엔진의 여러 파라미터들 사이의 관계는 수년동안 여러형태의 엔진에 대해서 조사되어 왔다. 엔진의 토크에 영향을 미치는 중요한 요소로는 공연비, 드로틀 각, 엔진회전 속도, 점화시기 등이 있다. 식 (2.7)에서 f_3 은 공연비와 드로틀 각이 엔진 토오르크에 미치는 영향을 나타내는 요소이며, f_4 는 엔진회전속도가 엔진의 토오르크에 미치는 영향을 나타내는 요소이고, f_5 는 점화시기가 엔진 토오르크에 미치는 영향을 나타내는 요소이다. 위의 f_3 , f_4 , f_5 에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [1]을 참조하면 된다. 위의 세개의 토크 발생 요소에 의해 연소장치에서 발생하는 토오르크는 다음과 같이 시뮬레이션 한다.

$$T_q = (T_q)_{\max} \cdot f_3(\alpha, A/F) \cdot f_4(\text{rpm}) \cdot f_5(SA) \quad (2.7)$$

여기에서 $(T_q)_{\max}$ 는 엔진에 의해서 발생하는 최대 토오르크를 나타낸다. 일반적으로 최대 토오르크는 엔진의 크기, 압축비, 그리고 여러가지 파라미터들의 함수이다. 최대 토오르크는 실린더 당 공기의 양에 비례한다고 가정할 수 있으며 고려대상인 엔진에 대해서 측정가능하다. 본 논문에서 고려대상인 엔진은 공회전시 공회전 속도 제어를 위해 비례 슬레노이드식 ISC 밸브를 사용하므로 공회전시에는 ISC 밸브에 의해 엔진에 흡입되는 공기의 양에 따라 엔진의 출력이 조절된다. ISC 밸브는 공회전 속도 제어기에서 나오는 PWM(Pulse Width Modulation) 신호의 펄스 폭에 의해 밸브의 열림이 결정되므로 공회전시 연소장치에 의한 모델은 ISC 밸브의 구동방식에 따라 식 (2.8)과 같이 적절히 수정되어야 한다. 발생하는 출력 토오르크는 다음과 같다.

$$T_q = (T_q)_{\max} \cdot (f_3(\alpha, A/F) + G_{isc} \cdot \text{duty}) \cdot f_4(\text{rpm}) \cdot f_5(SA) \quad (2.8)$$

상수 G_{isc} 는 공회전 속도 제어 액츄에이터가 출력 토오르크에 영향을 미치는 비율을 나타낸다.

4. 동력장치

동력장치에서의 입력은 토오르크이며 출력은 엔진 회전 속도이다. 연소장치에 의해 발생된 토오르크는 마찰 토오르크와 부하 토오르크에 의해 감소되고 나머지 토오르크는 엔진을 가속시키기 위하여 엔진 관성과 부하 관성에 대하여 작용한다. 동력장치에서 엔진 회전 속도의 변화량은 토오르크에 대해 다음과 같이 변화한다.

$$\frac{\delta N}{\delta t} = \frac{T_q - (T_q)_f - (T_q)_l}{I_e + I_l} \quad (2.9)$$

여기에서 $(T_q)_f$ 은 부하 토오르크를, $(T_q)_l$ 은 마찰 토오르크를 의미하며 I_e 는 엔진 관성을, I_l 은 부하 관성을 의미한다. I_e 와 I_l 의 값은 참고문헌 [9]에 나타나 있는 값을 사용하였다.

5. 변속(transmission) 장치 모델

여기에서 생각하는 자동 변속기의 모델은 엔진 회전 속도를 입력으로 하고 차속을 출력으로 한다. 그리고 엔진회전 속도의 변화에 따라 기어비가 자동적으로 변속되는 기능을 갖는다고 가정한다. 기어에 따른 변속비(gear-ratio)는 참고문헌 [7]에 나타나 있는 것을 사용하였다. 자동차의 주행속도는 기관의 회전 속도에 비례하며 다음과 같이 계산된다.

$$\text{차속} = G_{vp} \cdot 60 \cdot \text{rpm} \cdot 2\pi \cdot D_o / 10^5 \cdot \text{변속비} \quad (2.10)$$

여기에서 D_o 는 자동차 바퀴의 반지름이며 G_{vsp} 는 브레이크에 의한 감속비 등을 고려한 상수이다.

6. 냉각장치 및 수온생성 모델

본 논문에서 사용되는 냉각장치 모델은 수냉식 냉각장치를 가지고 있으며 냉각수온을 조절하기 위해서 수온 조절기(thermostat)가 부착되어 있다고 가정한다. 수온 조절기는 기관 내부의 냉각수 온도의 변화에 따라 밸브가 자동적으로 개폐하여 레이디에이터(radiator)로 흐르는 유량을 조절함으로써 냉각수를 적정온도로 유지하는 일종의 밸브장치이다. 실제로 수온 조절기의 밸브가 열리는 온도는 80℃ 안팎이며 수온은 80℃에서 90℃ 사이에서 일정하게 유지된다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 수온 조절기의 모델링을 위해 수온 조절기는 그림 2와 같은 히스테리시스 현상을 갖는다고 가정하였다. 자동차의 수온이 올라가는 이유는 연소 과정에서 발생한 열량이 일(동력)로 전환되는 과정에서 열량의 일부가 냉각 장치로 전달되기 때문이다.⁽⁷⁾ 즉, 전체 출력중 일부는 실제 출력인 토오크로 변환되며 일부는 냉각장치로 전달된다. 토오크가 큰 경우는 냉각장치로 전달되는 열 손실 또한 커지게 되므로 냉각장치에 공급되는 열량은 토오크에 비례한다고 가정한다. 따라서 공급된 열량에 의한 냉각수온은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = K_w \int Q dt - \int C dt \quad (2.11)$$

여기에서 상수 K_w 는 냉각수온의 질량, 비열 등에 의해 결정되는 상수이며, Q 는 기관으로부터 냉각 장치에 전달되는 열량이고, C 는 수온 조절 밸브의 특성곡선에 의해 결정되며 냉각 장치에서 방출되는 열량이다.

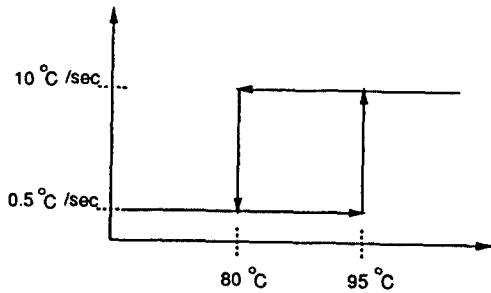


그림 2. 수온 조절 밸브의 특성곡선
Fig. 2. Characteristic curve of the thermostat valve.

7. 부하와 부하토크 및 마찰 토크의 생성모델
엔진의 부하는 도로의 상태, 차체의 무게, 승객의 수에 따른 외부 부하와 에어컨, 자동 변속 장치, 동력 조향 장치 등에 의한 내부 부하로 나누어진다. 외부 부하의 상태가 증가하면 운전자는 가속페달(accelerator pedal)을 밟을 것이다. 따라서 엔진이 느끼는 외부 부하는 가속 페달에 비례한다고 생각할 수 있다. 즉, 가속페달을 최대로 밟았을 경우에는 전부하상태이며, 페달을 밟지 않았을 경우에는 무부하 상태이다. 외부부하는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{외부부하} = G_{\text{angle}} \cdot \text{드로틀각} \quad (2.12)$$

여기에서 G_{angle} 은 드로틀 각이 외부부하에 미치는 영향을 나타내는 요소이다. 전자장치에 의한 내부부하 또한 엔진에 영향을 주는 요소이다. 예를 들면, 에어컨을 ON상태로 하게되면 기관의 작동에 영향을 주기 때문에 엔진회전속도를 높여줌으로써 에어컨에 의한 영향을 최소화 시킨다. 내부 부하는 그림 3과 같은 특성을 갖는다고 가정하였다. 따라서 엔진이 느끼는 전체부하와 부하 토크는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{전체부하} = \text{외부부하} + \text{내부부하} \quad (2.13)$$

$$\text{부하토크} = G_{\text{angle}} \cdot \text{기어비} \cdot \text{외부부하} + G_{\text{internal}} \cdot \text{내부부하} \quad (2.14)$$

여기에서 G_{external} 은 외부부하가 기어를 통해 부하 토크에 미치는 영향을 나타내는 요소이며, G_{internal} 내부부하가 부하 토크에 미치는 영향을 나타내는 요소이다.

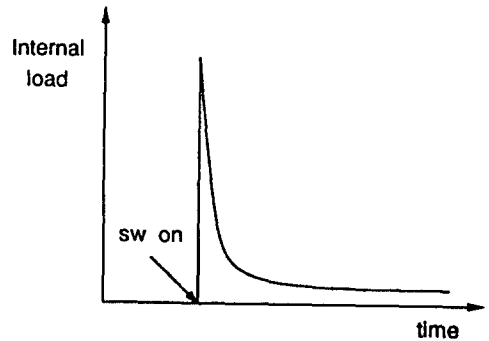


그림 3. 내부 부하의 특성곡선
Fig. 3. Characteristic curve of the internal load.

기관에는 기관자체의 마찰력이 존재한다. 이 마찰력의 크기는 일반적으로 기관의 회전속도와 밀접한 관계가 있으며 여러형태의 엔진에 대해서 얻어진 엔진회전속도와 마찰력과의 관계가 참고문헌 [1] 에 나타나 있다. 마찰 토오크는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{마찰토오크} = G_{friction} \cdot \text{rpm} + \text{정지시 엔진 자체의 마찰 토오크} \quad (2.15)$$

여기에서 $G_{friction}$ 은 엔진회전속도가 마찰 토오크에 미치는 영향을 나타내는 요소이다.

Ⅲ. 기존의 공회전 속도 제어 방식

1. 공회전 속도 제어(ISC)의 개요

가솔린 엔진은 운전자가 가속 페달로 드로틀(throttle) 밸브의 개도를 조작하여 기관에 흡입되는 공기량을 조절하는 방식으로 출력을 제어한다. 공회전 속도는 공회전시에 공급된 공기에의한 출력과 기관 자신의 마찰력이 평형을 이루는 선에서 결정된다. 따라서 기관의 마찰력이 시간에 따라 변화하거나, 흡입 공기량이 변화하는 경우에는 공회전 속도가 변화하게 된다. 공회전 속도는 너무 낮을 경우 기관의 작동이 원활하지 못하며 반대로 너무 높으면 연료 소모율이 증대된다. 따라서 공회전 속도는 가능한 낮을수록 좋으며 기관이 어떠한 상태일지라도 일정속도가 유지되어 기관이 원활하게 작동하도록 제어되어야 한다. 이와같이 기관의 운전조건이 변화하더라도 공회전 속도를 일정범위로 제어하는 기능을 공회전 속도 제어(ISC)라 한다.

2. 동작모드(mode)및 제어방식

현재의 엔진 제어방식에서는 엔진으로부터 발생되는 신호에 따라 엔진의 동작을 여러개의 구동모드(mode), 예를 들면, 시동 모드, 가속 모드, 감속 모드, 정속주행 모드, 아이들링 모드, 고장진단 모드 등으로 분류한다. 여기에서는 제어방식을 단순화하면서도 효과적인 제어를 수행하기 위해서 엔진의 상태를 시동 모드, 아이들링 모드, 주행 모드의 3가지 동작모드로 분류한다.

시동 모드란 점화스위치가 온(ON)상태가 된 후, 엔진회전 속도가 기준 회전속도 이상으로 되기까지의 상태를 말한다. 이 구간에서는 엔진의 출력을 높이기 위해 농후한 혼합기를 공급하며 점화시기도 평상시보다 약간 앞으로 조정되어 엔진의 출력을 높이고 기관의 상태를 원활하게 한다. 아이들링 모드란 시동직후

기관의 상태를 원활히 하기 위해 또는 자동차가 달리다 일시 정지하는 경우에 동작하는 모드이다. 여기에서는 기관의 작동이 원활한 범위 이내에서 연료소모량을 최소로 하기 위해 closed loop 제어가 수행된다. 주행 모드란 일반적으로 자동차가 달리는 상태를 나타내며 정속주행, 가속주행, 감속주행 상태를 나타낸다. 이 상태에서의 출력은 사용자에게 의해 적절히 제어되므로 open loop제어가 수행된다.

3. 공회전속도 제어 알고리즘

공회전 속도를 제어하는 ISC 밸브는 비례 솔레노이드(solenoid)식 밸브이며, 이는 펄스 폭에 비례하여 밸브의 열림이 결정된다. 따라서 ISC 제어기는 현재 엔진의 상태에 알맞는 적절한 양의 혼합기를 엔진에 공급하기위해 Pulse Width Modulation(PWM) 신호를 발생시켜 ISC 밸브를 제어한다. 이를 위해 제어기는 엔진의 현재 상태를 체크하고 이에 알맞는 목표 회전수를 설정한다. 예를들면, 현재 수온은 어느 정도이며, 기어는 중립 상태에 있는가?, 에어컨은 켜져있는가? 등을 검사한 후 이에 해당하는 엔진의 목표 회전수를 산출해낸다. 그후 제어기는 공회전(idle) 스위치가 on 상태인가?, 뉴트럴(neutral) 스위치는 on 상태인가?, 차속은 얼마인가?, 엔진 회전 속도는 얼마인가? 등을 검사한후 공회전 속도 제어에 closed loop 제어를 사용할 것인지 open loop 제어를 사용할 것인지를 결정한다. 이 밖에도 제어기는 자동차에 여러가지 장치 - 에어컨, 동력조향장치(power steering), 자동 변속 장치(automatic transmission) -가 부착되어 있을 경우에도 기관의 작동이 원활하도록 적정량의 보정량을 ISC 밸브 구동신호에 더해주는 역할도 한다. 그러므로 ISC 제어기는 다음과 같이 크게 3가지의 제어 신호를 ISC 밸브에 내보낸다.

표 1. 공회전 속도 제어 신호의 분류

Fig 1. Class of the idle speed control signal.

* Closed loop 제어신호	PID 제어신호
* Open loop 제어신호	Dash pot 보정량, 시동후 보정량
	학습 보정량, 부압 보정량
* Closed loop 제어신호	에어콘 보정량
	동력 조향 장치 (power steering) 보정량 자동
	변속 장치(automatic transmission)보정량

공회전 속도 제어기의 가장 큰 목적은 공회전시 공회전 속도를 기관의 작동이 원활한 범위 이내에서 가

능한 낮게 유지하는 것이다. 즉, ISC 제어기는 공회전시 PID 컨트롤러를 사용해 최적의 공회전 속도를 유지한다. ISC 제어기는 공회전시기가 아닌 경우에는 PID 컨트롤러의 동작을 중지시키고 open loop 컨트롤을 수행한다. 부속 장치에 의한 보정량은 각각의 보정량에 해당하는 장치가 동작할 경우에 동작하며 에어컨 보정량, 동력 조향 장치 보정량, 자동 변속 장치 보정량 등이 있으며, 이는 각 해당 장치가 작동될 경우 기관의 작동 상태에 미치는 각 장치의 영향을 최소화 하기 위한 보정량이다.

IV. 공회전속도 퍼지 제어기의 설계

공회전 속도 퍼지 제어기는 엔진 제어의 기본적인 논리를 바탕으로 엔진의 상태에 따라 그에 알맞는 PWM신호를 추론해 낸다. 아이들링 모드일 때는 closed loop 제어를 수행하여 엔진회전 속도를 아이들(idle) 목표 회전수가 되도록 한다. 주행모드일 때는 open loop 제어를 수행하며 내부부하, 드로틀 각, 냉각수온, 엔진회전속도에 따라 적절한 PWM duty를 생성해 낸다. 공회전 속도 퍼지 제어기의 구성도는 그림 4와 같으며 주행 모드 일 때는 FLC1과 FLC3가 작동하고 아이들링 모드 일 때는 FLC1과 FLC2가 작동한다. FLC4는 시동 모드를 제외한 엔진의 전 상태에서 아이들 목표 회전수를 계산해 내며, FLC5는 시동이 걸린후 시동 모드에서 벗어날 때 기관의 작동을 원활히 하기 위해 일시적으로 동작하는 시동후 보정량을 추론해 낸다.

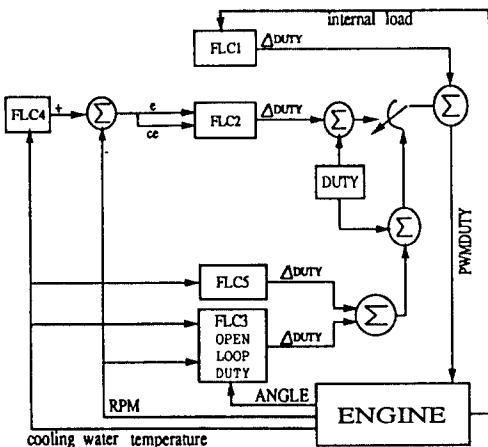


그림 4. 공회전 속도 퍼지 제어기
Fig. 4. Idle speed fuzzy controller.

공회전 속도 퍼지 제어기의 입력변수로는 드로틀 각, 엔진 회전 속도, 냉각 수온, 내부 부하, 에러

(error), 에러의 변화율(change in error)이 사용된다. 내부 부하, 에러, 에러의 변화율은 아이들링 모드의 입력 변수이며 드로틀 각, 엔진 회전 속도, 냉각수온, 내부부하는 주행 모드에서의 입력 변수이다. 출력변수로는 PWM duty ratio가 사용되었다. 이는 공회전 속도 제어에 사용되는 액츄에이터(actuator)가 비례 솔레노이드식 밸브이기 때문이다.

공회전 속도 제어기의 제어규칙과 소속함수의 생성을 위해 엔진 제어 사양서²⁾ 등을 참고하였다. 아이들링 모드에서 동작하는 FLC2의 입출력 변수는 7개의 퍼지 변수를 사용하였으며 삼각형 형태의 소속함수를 사용하였다. 냉각수온, 내부부하, 엔진회전속도, 드로틀 각 등은 FLC2를 제외한 나머지 제어기의 입력 변수로 사용되었으며 냉각수온과 내부부하는 2개의 퍼지 변수, 엔진회전속도와 드로틀 각은 3개의 퍼지 변수를 사용하였다. 2개의 퍼지 변수는 단조형 형태의 소속함수를, 3개의 퍼지 변수는 삼각형 형태의 퍼지 변수를 사용하였다.

단, 엔진은 시동시 또는 주행시 냉각수온에 따라 목표회전속도 또는 시동후 보정량을 결정하게 된다. 그런데, 수온에 대한 목표회전속도와 시동후 보정량은 비선형적인 특성을 갖는다. 이러한 비선형적인 특성을 만족시키면서도 각 제어기에서 쓰이는 적절한 룰의 구성을 위해 비선형적인 특성을 갖는 소속함수를 사용하였다. 물론 여러개의 퍼지 변수를 사용하고 삼각형 형태의 간단한 소속함수를 사용하더라도 위의 비선형 특성을 나타낼수 있으나 추론 시간이 많이 걸리므로 여기에서는 적은수의 퍼지 변수와 비선형 특성을 갖는 소속함수를 선택하였다. 표 2부터 표 6까지는 각 제어기에서 사용된 제어규칙표이다. 각각의 규칙은 엔진의 동작 특성, 엔진 제어사양서의 내용, 수온의 소속함수의 모양을 고려하여 적절하게 구성되었다. 표 2는 주행시에 동작하는 제어 규칙에 해당한다. 표 2의 첫번째 규칙은 냉각수온이 높고 드로틀 각이 적고 엔진 회전 속도가 느리면 PWM duty의 변화량을 적게하라는 뜻이다. 이 경우는 자동차가 평지를 저속으로 달리는 경우에 해당하며 ISC 밸브의 열림을 크게 할 필요가 없게 된다. 표 2의 마지막 규칙을 고려해 보자. 이 규칙은 자동차가 고속으로 달리는 경우, 또는 언덕을 오르는 경우이다. 이런 경우 공회전 속도 퍼지 제어기는 ISC 밸브의 열림을 크게 조절함으로써 운전자의 요구를 충족시키게 된다. 표 2에서 냉각수온이 PS인 경우를 고려하지 않은 이유는 실제로 냉각수온이 시동후 일정한 온도로 올라가서 일정하게 유지되기 때문이다. 표 3은 시동후 보정량의 추론에 사용된 제어 규칙이다. 이 규칙은 시

동시에만 동작하고 기관의 작동을 원활히 하기 위해서 동작하므로 ISC 밸브의 열림을 크게 하도록 규칙이 구성되었다. 표 4는 전자장치의 보정에 사용된 제어 규칙이다. 운행중 전자장치가 작동하면 자동차의 내부부하는 증가하고 FLC1에 의해 ISC 밸브의 열림은 커지게 될 것이다.

표 2. 주행 모드(open loop - FLC3)에서 동작하는 제어 규칙표

Table 2. The rule table used in FLC3.

전 건 부			후 건 부
냉각수온	드로틀 각	엔진회전속도	DUTY의 변화량
PB	PS	PS	PS
PB	PS	PM	PS
PB	PS	PB	PS
PB	PM	PS	PM
PB	PM	PM	PM
PB	PM	PB	PB
PB	PB	PM	PM
PB	PB	PB	PB

표 3. 시동후 보정량의 계산(FLC5)에 사용된 제어 규칙표

Table 3. The rule table used in FLC5 for post-start compensation.

냉각수온	시동후보정량
PS	PB
PB	PB

표 4. 내부 전자 장치의 보정(FLC1)에 사용된 제어 규칙표

Table 4. The rule table used in FLC1 for internal electric device.

냉각수온	보정량
PS	PB
PB	PB

표 5. 목표 회전 속도의 계산(FLC4)에 사용된 제어 규칙표

Table 5. The rule table used in FLC4 for reference RPM computation.

냉각수온	목표회전속(type 1)	냉각수온	목표회전속(type 1)
PS	PB	PS	PB
PB	PB	PB	PM

V. 시뮬레이션 및 결과 검토

여기에서는 기존의 제어방식을 이용한 엔진 제어, 설계된 퍼지 제어기를 이용한 엔진 제어에 관한 내용을 시뮬레이션 하고 공회전 속도 퍼지 제어기의 장점을 고찰한다.

1. 기존의 제어 방식을 이용한 엔진 제어

여기에서 사용된 제어기는 현재 사용되고 있는 전자식 엔진 제어 방식을 구성된 모델에 알맞게 수정 변경한 것이다. 시뮬레이션은 사용자가 점화 스위치를 on 시킨 상태에서부터 수행되었다. 점화 스위치가 on 된 후 엔진 회전 속도가 판정 기준 엔진 회전 속도를 넘어서게 되면 ECU는 엔진의 상태를 체크하고 있다가 제어 방식을 시동 모드에서 주행 모드로 전환한다. 시동 직후 엔진의 출력이 갑자기 떨어지는 것을 방지하기 위하여 시동후 보정량이 수행되며, 엔진은 아이들링 상태로 들어가게 된다. 아이들링 모드에서는 closed loop 제어가 수행되며 ECU는 엔진 회전 속도를 아이들 목표 회전수가 되도록 공회전 속도 액츄에이터의 입력 신호를 조절한다. 그후 아이들링 상태가 지속되는 동안 기관의 온도는 점점 높아지며 냉각수 온은 수온 조절기에 의해 일정 범위 이내에서 머무르게 된다. 그후 사용자는 가속 페달을 밟으므로써 주행을 시작하고 주행도중 에어콘을 켜다고 가정하였다. 일정 시간이 지난 후 가속 페달을 놓고 브레이크를 밟음으로써 자동차는 정지하게 되고 엔진은 다시 아이들링 모드로 들어가게 된다. 그림 5는 위와 같은 가정하에 수행한 시뮬레이션 결과이다.

시뮬레이션에서 사용된 초기 조건은 다음과 같다.

- 흡입 공기 온도 = 20℃
- 배터리 전압 = 16 volt
- 드로틀 각 = 1°
- 엔진 회전 속도 = 0 rpm
- 냉각 수온 = 10℃
- 대기압 = 760 mmHg
- 흡기 다기관 내의 압력 = 500 mmHg
- 차속 = 0 km/h

2. 퍼지 제어기를 이용한 엔진 제어

IV절에서 구성된 퍼지 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 주행 상태 및 초기 조건은 5.1절과 똑같이 사용되었다. 그림 6에 시뮬레이션 결과가 나타나 있다. 전체적인 제어 특성은 PID 제어기와 유사하나 제어 입력의 특성이 기존의 제어 방식에 비해 부드럽지 못한 특성을 보였다. 이는 입력변수의

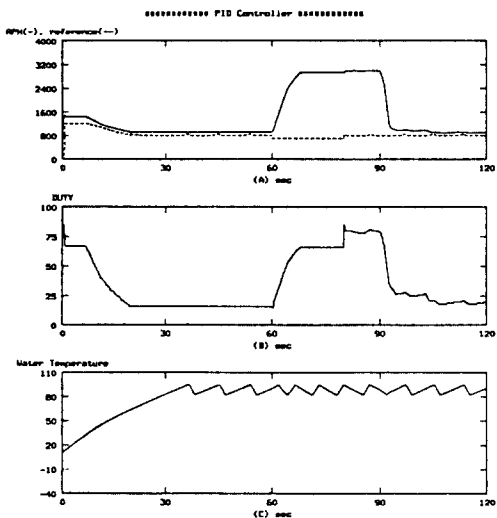


그림 5. PID 제어 방식에 의한 공회전 속도 제어
 Fig. 5. Idle speed control using PID controller.

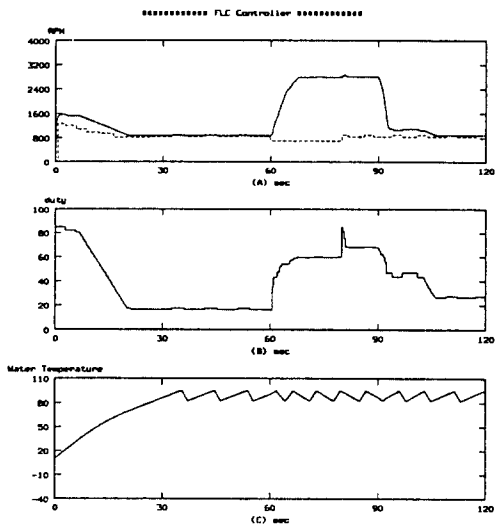


그림 6. 퍼지 제어를 이용한 공회전 속도 제어
 Fig. 6. Idle speed control using fuzzy controller.

이산화 준위를 늘임으로써 개선할 수 있다. 그리고 주행중 에어컨을 켜줄 경우에도 설계된 퍼지 제어기는 잘 동작함을 알 수 있었다. 이는 설계된 퍼지 제어기가 전체적으로 입력 변수별 제어 형태를 취하고 있기 때문이며, 엔진에 부하를 주는 다른 예기치 못

한 경우가 발생하더라도 기존의 제어기에 비해 잘 동작할 수 있음을 보여주는 것이다. 그림 5의 시뮬레이션 결과는 주행중 에어컨을 켜줄 경우 에어컨이 엔진에 미치는 영향을 많은 실험을 통해 미리 알아내야 하며 제어 프로그램에서 에어컨이 엔진 동역학(dynamics)에 미치는 영향을 미리 상쇄시켜 주도록 프로그램되어 있어야 한다. 그러나 퍼지 제어기의 경우는 에어컨을 켜면 내부 부하가 증가하게 되고 제어 규칙을 통해 이에 알맞는 새로운 제어 입력을 추론해 내게 된다. 기존의 제어기는 미리 프로그램 되어 있지 못한 상황에 대해서는 잘 동작하지 못하는 반면 퍼지 제어기는 입력 변수별 제어를 통해 훨씬 능동적으로 대처하게 된다.

VI. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 제어기 개발의 편리성을 위해 간단한 형태의 엔진 모델을 제시하였다. 제시된 모델은 필요한 각종 신호(수온, 부하, 부하 토크, 차속)들을 이치에 알맞게 생성시킴으로써 제어기의 개발에 큰 역할을 할 수 있었다. 제시된 모델을 사용해서 기존의 PID 제어기와 퍼지 제어를 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다.

기존의 패턴 형식의 제어 방식은 각종 MAP 데이터를 탑재하고 있어야 하기 때문에 많은 양의 메모리를 필요로하고 데이터들을 구하기 위해서는 많은 실험을 필요로 하므로 경비, 개발 시간의 면에 있어서는 효율적이라 할 수 없다. 반면 퍼지 제어기는 룰(rule)을 사용하기 때문에 메모리 측면에서 불매 효율적이며 또 퍼지 제어기의 특성이 정성적인 모델을 필요로 하지 않는다는 점을 고려할 때 제어기 개발시간, 경비 등이 절약될 수 있다.

본 연구에서 설계된 퍼지 제어기는 이러한 단점을 극복하기 위하여 퍼지 변수의 수를 가능한 최소화 하였다. 개발된 제어기의 성능은 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 분석하였으며, 입력 변수별 제어를 통하여 전자 장치(에어콘, power steering 등), 도로의 상태, 기어의 변속 등 예기치 못한 상태에 대해서 잘 동작할 수 있음을 보여주었다.

추후연구과제로는 개발된 엔진 시뮬레이터와 퍼지 제어를 하드웨어로 구현하고 실시간으로 엔진을 제어하는 문제가 남아있으며, 모델의 확장과 함께 연료 분사 제어, 점화시기 제어, 공연비 제어, 배기가스 재순환 제어 등의 성능을 분석한 후, 엔진의 효율을 높이기 위한 고급 제어 알고리즘의 적용 등을 들 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] C. F. Taylor, "The internal combustion engine in theory and practice", 2nd edition, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1985.
- [2] 현대 자동차, "소나타 제어 사양서"
- [3] H. Kawai, H. Shirakawa, Y. Tanoue, H. Ogawa and T. Kudo, "Engine Control System", Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp. 929 - 937, 1990.
- [4] H. Takahashi, K. Ikeura, T. Yamamori, "5-speed Automatic Transmission installed fuzzy reasoning", Fuzzy Engineering toward Human Friendly Systems, pp. 1136 1137, 1991.
- [5] 박 민용, 최 향식, "퍼지 시스템의 응용 입문", 대영사, 1990.
- [6] D. J. Dobner, "A mathematical engine model for development dynamic engine control", SAE paper 800054, 1980.
- [7] 중원사 자동차 연구회, "자동차 공학", 중원사, 1992.
- [8] 김 재취, "자동차 기술된 분사장치 - 자동차 전자제어 이론 편", 중원사, 1992.
- [9] W. W. Yuen, and H. Servati, "A Mathematical Engine Model Including the Effect of Engine Emissions", SAE Papers 840036, 1984.
- [10] H. Laurent, L. Ang and P. Daly, "Integrated Engine Control-The Next Step in Electronic Engine Technology", SAE Paper 840540, 1984.
- [11] J. R. Pimental and M. T. Loeffler, "A real time engine simulator using multiple microcomputers", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-30, No.2, May 1983.
- [12] J. F. Cassidy, M. Athans and W. H. Lee, "On the design of electronic automotive engine control using linear quadratic control theory", IEEE Trans. on Automotive Control, Vol. AC-25, No.5, Oct. 1980.
- [13] J. J. Moskwa and J. K. Hedrick, "Automotive Engine Modeling For Real Time Control Application", Proceedings of 1987 American Control Conference, vol. 1, pp. 341 - 346, June 1987.

— 著 者 紹 介 —



張宰豪(正會員)

1967年 8月 5日生. 1991年 2月
한국과학기술원 전기 및 전자공학과(학사). 1993年 2月 한국과학기술원
전기 및 전자공학과(석사).
1994年 현재 한국과학기술원 전기
및 전자공학과(박사과정)

金炳國(正會員) 第29卷 B編 第8號 參照

한국과학기술원 전기 및 전자공학과
부교수