

퍼지 제어 기법을 이용한 하이브리드 연료 제어

김성진* · 윤성기* · 강성은* · 김광백* · 박충식**

*신라대학교 컴퓨터정보공학부

**영동대학교 컴퓨터공학과

Hybrid Fuel Control using Fuzzy Control system

Sung-jin Kim* · Sung-Ki Yun* · Sung-eun Kang* · Kwang-baek Kim* · Choong-shik Park**

*Division of Computer and Information Engineering, Silla University

**Dept. of Computer Engineering, Youngdong University

요 약

본 논문에서는 하이브리드 차량 내부 전기모터의 등판 마력값과 회전 RPM, 흡기온도 센서의 온도 변화와 공기 및 연료의 혼합비율인 공연비에 대해 퍼지 제어 기법을 적용하여 차량의 연료 소비를 제어하는 방법을 제안한다. 제안된 기법에서는 초기 가속부분에서 등판 마력값과 회전 RPM을 퍼지 제어 규칙에 의해 전기모터와 엔진의 사용비율을 제어하고, 엔진이 가동될 때 각각의 공기유입량과 연료 분사량을 이용하여 공연비 수치를 구한 후, 공연비, 흡기온도, 최종 연료 보정량에 대해 설정된 퍼지 소속 함수와 퍼지 추론 규칙에 따라 차량 연료를 제어한다. 시뮬레이션을 통하여 실험한 결과, 제안된 퍼지 제어 기법을 이용한 엔진 및 연료 제어 방법이 퍼지기법을 적용하지 않은 제어방법보다 평균연비가 개선되어 제안된 연료 제어 방법이 효율적임을 확인하였다.

1. 서 론

지구환경에 대한 자각과 노력이 본격화 되고 있는 오늘날, 줄어드는 에너지의 위기의식으로 국제유가가 연일 사상 최고치를 경신하고 있어 자동차 산업은 첨단 기술을 환경과 결합한 친환경 자동차를 요구하고 있다. 해가 갈수록 심각해지는 자연재해와 국제사회의 식량, 경제, 전쟁난들로 인해 국제 유가는 좀처럼 떨어질 기미를 보이지 않는다.

2008년 현재 휘발유와 경유가 리터당 2000원을 돌파하면서, 자동차를 이용하는 사람들의 가계에 상당한 압박감을 주고 있으며, 생계형 사업자들은 더욱 큰 고통을 받고 있어 대체에너지의 개발 또한 시급한 실정이다.

하이브리드 자동차의 동력은 엔진과 전기모터에서 생산한다. 전기 모터만으로 차륜을 구동 하는 것을 직렬형 하이브리드 자동차라고 하고, 엔진과 전기모터가 필요에 따라 모터 단독 또는 엔진 단독으로 차륜을 구동하고, 등판 가속이나 고속주행 추월 시 등 큰 힘을 필요로 할 때는 엔진

과 전기모터가 동시에 서로 협조하여 차륜을 구동 하는 시스템을 병렬형 하이브리드 자동차라 한다.

자동차 연료 분사는 공기유량센서, 흡기온도센서, 대기압센서, 냉각수 온도센서, 스톱틀 포지션 센서, 모터 포지션 센서 등에 의해서 제어된다. ECU는 이들 센서에서 보내오는 정보를 이용하여 연료량을 제어한다[1].

본 논문에서는 주행 때 항상 필요한 마력을 구하여 저속 주행시에는 차량의 필요 마력 소속 함수와, 전기 모터의 회전 RPM 소속 함수를 이용하여 전기모터를 제어하고, 일정한 속도 이상이 되어 고속 주행시에는 공기유입량과 연료 분사량의 정보를 이용하여 공연비의 수치를 계산하여 공연비에 대한 퍼지 소속 함수와, 온도에 대한 소속 함수를 이용해 연료분사 조정량에 대한 퍼지 소속 함수를 적용한다. 또한 이들의 소속 함수를 이용하여 퍼지 제어 규칙에 적용한 후, 전기모터와 엔진의 작동 및 연료의 사용을 제어하고, 무게 중심법을 이용하여 비퍼지화를 수행 후, 최종 연료 보정량을 계산한다.

II. 하이브리드 전기모터의 구동 원리 및 제어

하이브리드 자동차는 방식에 따라 저속에서 전기모터의 쓰임새가 다르다. 일본 도요타사의 하이브리드 차량인 프리우스에 탑재된 Toyota Hybrid System(THS)은 병렬형과 직렬형을 조합한 통합형 하이브리드 시스템이다. 출발과 저속 주행시에는 철저히 전기모터로 주행하게 하여 연료 효율을 극대화 하는 방식으로 하이브리드 자동차 방식들 중 가장 진보적인 방법으로 거론 되고 있다. 그림 1은 하이브리드 자동차의 구조를 나타내었다.

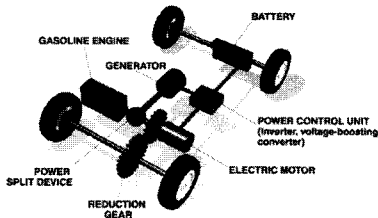


그림 1. 하이브리드 자동차의 구조

본 논문에서는 일정속도 주행시 필요한 마력값과 전기모터회전 RPM 값을 통해 퍼지 제어기법을 적용하여 모터컨트롤러에서 제어한다. 식(1)은 차량이 일정한 속도로 주행하고 있을 때 마력값을 구하는 식을 나타내었고, 차량이 언덕길을 올라가기 위해 필요한 마력값은 식(2)와 같이 계산한다[2].

$$\text{마력 [PS]} = \frac{\text{주행저항력 [F]} \times \text{주행속도 [V]}}{270} \quad (1)$$

$$\text{마력 [PS]} = \frac{\text{주행저항력 [F]} \times \text{주행속도 [V]}}{270} + \frac{\text{등판저항력 [F]} \times \text{주행속도 [V]}}{270} \quad (2)$$

III. 퍼지 제어를 이용한 전기모터 및 자동차 연료 제어

본 논문에서 제안하는 퍼지제어 기법은 그림 2와 같다.

출발이나 저속 주행 시 사용하는 전기모터 부분에서는 차량의 현재 주행 시 필요마력의 소속도와 전기모터의 회전 RPM에 대한 소속도를 구하여 퍼지제어 규칙에 적용하여 모터컨트롤러가 값을 입력 받아 전기모터의 작동유무를 결정하고 전기모터 작동 시에 계산된 조정량을 이용하여 전기모터와 엔진의 비율을 조절한다. 속도가 일정 수준 이상이 되어 엔진 사용 부분에서는 흡기온

도 센서의 온도 소속도와 공연비의 농후함에 대한 소속도를 이용하여 퍼지 제어 규칙을 적용하여 최종 연료 조정량을 계산한 후, 계산된 조정량을 기존의 일반 차량의 연료 분사량에 반영시킨 후 연료분사 밸브에서 분사한다.

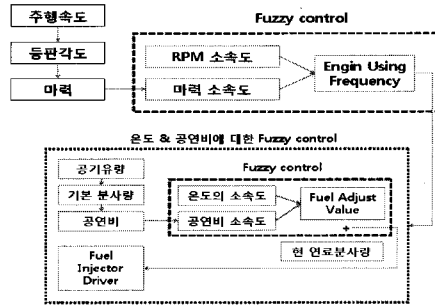


그림 2. 퍼지 제어 시스템

3.1 등판마력의 소속 함수

본 논문에서는 도요타사의 하이브리드 자동차인 프리우스의 최대출력 50kw(68PS)전기모터를 기준으로 잡았다. 주행중 입력되는 출력 값을 모터컨트롤러에서 마력 값으로 변환한다.

차량 주행 시 필요마력 소속도를 구하는 식은 다음과 같고, X를 마력의 입력 값으로 사용한다. 마력의 퍼지 소속 구간은 총 3구간이며 마력이 약한 구간은 P1, 보통인 구간은 P2, 강한 구간은 P3로 분류한다. 마력에 대한 소속 함수는 그림 3과 같다.

(1) 마력이 약한 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(X \leq 0) \text{ Then } \mu(X) = 1 \\ & \text{Else IF } (X > 34) \text{ Then } \mu(X) = 0 \\ & \text{Else } \mu(X) = \frac{-1}{34-0} (X-34) \end{aligned}$$

(2) 마력이 보통인 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(X \leq 0) \text{ or } (X \geq 68) \text{ Then } \mu(X) = 0 \\ & \text{Else IF } (X < 34) \text{ Then } \mu(X) = \frac{1}{34-0} (X-0) \\ & \text{Else IF } (X \geq 68) \text{ Then } \mu(X) = \frac{-1}{68-34} (X-68) \end{aligned}$$

(3) 마력이 강한 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(X \leq 34) \text{ Then } \mu(X) = 0 \\ & \text{Else IF } (X \geq 68) \text{ Then } \mu(X) = 1 \\ & \text{Else } \mu(X) = \frac{1}{68-34} (X-34) \end{aligned}$$

3.2 RPM의 소속 함수

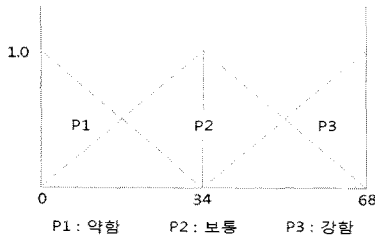


그림 3. 등판마력에 대한 소속 함수

하이브리드 차량의 전기모터는 기어단수가 없기 때문에 RPM은 차량의 속도에 비례하게 된다. 전기모터의 최대 회전수는 6000RPM으로 50kw의 모터를 기준으로 설정하였다[3].

전기모터의 회전 RPM의 소속도를 구하는 식은 다음과 같다. Y를 회전 값의 입력 값으로 사용한다. 회전 RPM의 퍼지 소속 구간은 총 3구간이며 회전이 느린 구간을 R1, 보통인 구간을 R2, 빠른 구간을 R3로 분류한다. RPM에 대한 소속 함수는 그림 4와 같다.

(1) RPM이 낮은 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(X \leq 0) \text{ Then } \mu(Y) = 1 \\ & \text{Else IF}(Y > 3000) \text{ Then } \mu(Y) = 0 \\ & \text{Else } \mu(Y) = \frac{-1}{3000 - 0} (Y - 3000) \end{aligned}$$

(2) RPM이 보통인 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(X < 0) \text{ or } (Y > 6000) \text{ Then } \mu(Y) = 0 \\ & \text{Else IF}(Y < 3000) \text{ Then } \mu(Y) = \frac{1}{3000 - 0} (Y - 0) \\ & \text{Else IF}(Y > 6000) \text{ Then } \mu(Y) = \frac{-1}{6000 - 3000} (Y - 6000) \end{aligned}$$

(3) RPM이 강한 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(Y \leq 3000) \text{ Then } \mu(Y) = 0 \\ & \text{Else IF}(Y > 6000) \text{ Then } \mu(Y) = 1 \\ & \text{Else } \mu(Y) = \frac{1}{6000 - 3000} (Y - 3000) \end{aligned}$$

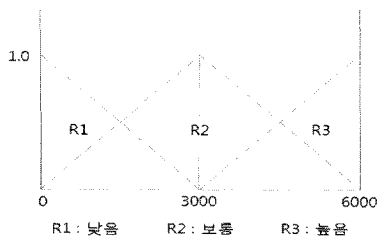


그림 4. RPM에 대한 소속 함수

등판마력과 RPM의 소속도 $\mu(X)$, $\mu(Y)$ 가 구해

지면 아래의 퍼지 제어 규칙을 적용하고 MAX_MIN 방법으로 추론한다.

- If X is P1 and Y is R1 then Wis E1
- If X is P1 and Y is R2 then Wis E1
- If X is P1 and Y is R3 then Wis E2
- If X is P2 and Y is R1 then Wis E1
- If X is P2 and Y is R3 then Wis E2
- If X is P3 and Y is R1 then Wis E1
- If X is P3 and Y is R2 then Wis E2
- If X is P3 and Y is R3 then Wis E2

추론 규칙에 의하여 가솔린 엔진의 사용 여부를 결정하고, 식(3)의 무게 중심법[4]을 이용하여 비퍼지화를 수행한 후, 최종 엔진 비율 보정량 W를 결정한다. 그리고 계산된 엔진 비율 보정량을 기본 엔진 사용량과 조합하여 엔진을 사용하게 한다. 그림 5는 엔진 비율 보정량을 계산하는 소속 함수이다.

$$W = \frac{\sum \mu(y)xy}{\sum \mu(y)} \quad (3)$$

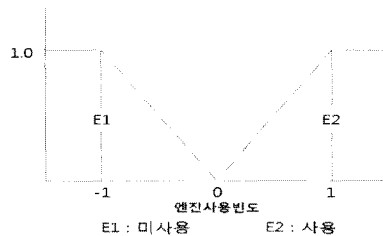


그림 5. 엔진 비율 보정량 소속 함수

IV. 흡기온도에 따른 차량의 연료 증량비

엔진 ECU는 차량에 장착된 여러 센서들로부터 정보를 입력받아 현재 기관 상태에 알맞은 제어 값을 출력하여 연료 분사 시기, 분사량 등을 제어한다[5].

일반적으로 흡기온도에 의한 ECU의 연료제어는 20℃를 기준으로 20℃이하이면 센서에 큰 전류를 보내 연료 분사량을 늘리고, 20℃이상이면 분사량을 줄인다[6]. 엔진의 분사량은 식(4)과 같이 계산된다.

$$\text{분사량} = \text{기본분사량} \times \text{증량비} \quad (4)$$

V. 퍼지제어를 이용한 자동차 연료 제어

퍼지 제어 기법을 이용한 차량의 연료 제어 구성도는 그림 6과 같이 흡기 온도 센서, 공기 유량 센서, 연료 압력 정보를 받아서 공연비 수치를 구

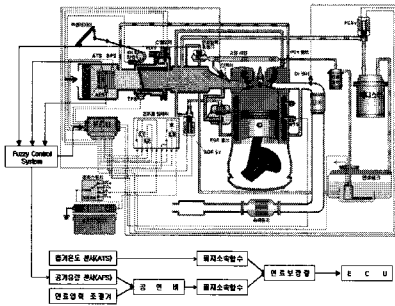


그림 6. 퍼지 제어 시스템을 이용한 차량 연료 제어

한 후에 온도와 공연비 정보를 퍼지 제어 시스템에 적용한다.

5.1 온도의 소속 함수

온도에 대한 소속도를 계산하는 식은 아래와 같으며, I를 온도의 입력값으로 사용한다.

온도에 대한 퍼지 소속 구간은 총 3구간이며 온도가 낮은 구간을 T1, 보통인 구간을 T2, 높은 구간을 T3로 분류한다. 흡기온도에 대한 소속 함수는 그림 7과 같다. X를 흡기온도의 입력값으로 사용한다.

(1) 온도가 낮은 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(I \leq 0) \text{ Then } \mu(I) = 1 \\ & \text{Else IF } (I > 20) \text{ Then } \mu(I) = 0 \\ & \text{Else } \mu(I) = \frac{-1}{20 - 0}(I - 20) \end{aligned}$$

(2) 온도가 보통인 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(I < 0) \text{ or } (I \geq 40) \text{ Then } \mu(I) = 0 \\ & \text{Else IF } (I < 20) \text{ Then } \mu(I) = \frac{1}{20 - 0}(I - 0) \\ & \text{Else IF } (I \geq 20) \text{ Then } \mu(I) = \frac{-1}{40 - 20}(I - 40) \end{aligned}$$

(3) 온도가 높은 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(I \leq 20) \text{ Then } \mu(I) = 0 \\ & \text{Else IF } (I \geq 40) \text{ Then } \mu(I) = 1 \\ & \text{Else } \mu(I) = \frac{1}{40 - 20}(I - 20) \end{aligned}$$

5.2 공연비의 소속 함수

공연비는 공기와 연료의 혼합비율을 의미하는 것으로 14.7:1 이 연료의 효율이 가장 좋다[7,8]. ECU는 혼합기의 혼합비율을 최대한 이른 공연비에 맞추도록 제어한다.

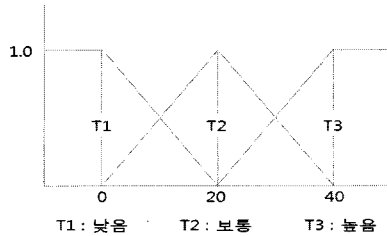


그림 7. 온도에 대한 소속 함수

본 논문에서는 공연비의 농후함에 따라 소속도를 계산하여 최종 연료 보정량을 계산한다. 입력되는 공연비의 값을 J로 사용하였으며, 퍼지 소속 구간은 총 3구간으로 구분한다. 공연비가 낮은 구간을 G1, 보통인 구간을 G2, 높은 구간을 G3로 분류한다. 공연비에 대한 소속 함수는 그림 8과 같다.

(1) 공연비가 낮은 구간의 소속도(농후)

$$\begin{aligned} & \text{IF}(J \leq 11) \text{ Then } \mu(J) = 1 \\ & \text{Else IF } (J \geq 14) \text{ Then } \mu(J) = 0 \\ & \text{Else } \mu(J) = \frac{-1}{14 - 11}(J - 14) \end{aligned}$$

(2) 공연비가 보통인 구간의 소속도

$$\begin{aligned} & \text{IF}(J \leq 11) \text{ or } (J \geq 17) \text{ Then } \mu(J) = 0 \\ & \text{Else IF } (J < 14) \text{ Then } \mu(J) = \frac{1}{14 - 11}(J - 11) \\ & \text{Else IF } (J \geq 14) \text{ Then } \mu(J) = \frac{-1}{17 - 14}(J - 17) \end{aligned}$$

(3) 공연비가 높은 구간의 소속도(희박)

$$\begin{aligned} & \text{IF}(J \leq 14) \text{ Then } \mu(J) = 0 \\ & \text{Else IF } (J \geq 17) \text{ Then } \mu(J) = 1 \\ & \text{Else } \mu(J) = \frac{1}{17 - 14}(J - 14) \end{aligned}$$

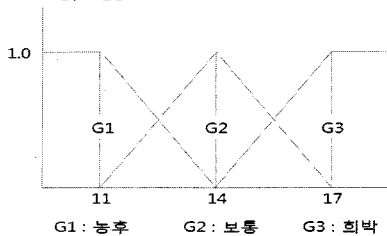


그림 8. 공연비에 대한 소속 함수

온도와 공연비의 소속도 $\mu(I)$, $\mu(J)$ 의 값이 구해지면 아래의 퍼지 제어 규칙을 적용하여 Max_Min 방법으로 결과를 추론한다.

If $I_{is} T1$ and $J_{is} G1$ then $W_{is} C1$
 If $I_{is} T1$ and $J_{is} G2$ then $W_{is} C2$
 If $I_{is} T1$ and $J_{is} G3$ then $W_{is} C2$
 If $I_{is} T2$ and $J_{is} G1$ then $W_{is} C1$
 If $I_{is} T2$ and $J_{is} G3$ then $W_{is} C2$
 If $I_{is} T3$ and $J_{is} G1$ then $W_{is} C1$
 If $I_{is} T3$ and $J_{is} G2$ then $W_{is} C1$
 If $I_{is} T3$ and $J_{is} G3$ then $W_{is} C2$

추론 규칙에 의하여 연료의 분사를 결정하고, 식(3)의 무게 중심법[4]을 이용하여 비퍼지화를 수행한 후, 최종연료 보정량 W 를 결정한다. 그리고 최종 연료 보정량을 기본 연료 분사량과 조합하여 연료분사를 하게 된다. 그림 9는 연료 보정량을 계산하는 소속 함수이다.

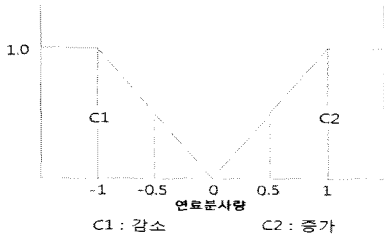


그림 9. 연료 보정량 소속 함수

VI. 실험 및 결과 분석

제안된 퍼지 제어 기법을 적용하여 자동차 연료 제어를 구현하기 위하여 Pentium IV CPU가 장착된 IBM호환 PC상에서 Visual C++ 6.0으로 구현하였다.

제안된 방법을 실험하기 위해 온도에 대한 구간을 총 6구간으로 나누었으며, 일반 차량의 연료 제어 방법과 퍼지 제어 기법을 적용한 연료제어 방법을 시뮬레이션을 통하여 연료 소비량을 측정하였다. 시뮬레이션을 구현하기에 앞서 차량의 기준을 표 1과 같이 설정하였다.

표 1. 시뮬레이션에 쓰인 차량의 환경

실험 차량의 환경	기준 값
차량 중량	1500kg
구름저항계수	0.015
공기저항계수	0.003
차량전면투영면적	1.5m ²

다양한 환경에서 시뮬레이션하기 위하여 온도가 높은 구간과 보통 구간, 낮은 구간으로 임의값을 주어 주행을 시켰으며, 전기모터 퍼지 제어 부분에서 도출된 무게 중심값을 낮은 수치, 보통 수치, 높은 수치로 설정하여 연료소비량을 계산하였

다. 그림 10은 제안된 방법을 실험하기 위한 차량 시뮬레이터 화면이다.

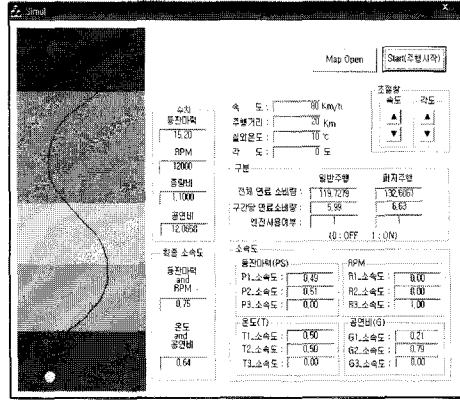


그림 10. 차량 시뮬레이션 화면

온도가 높은 50도인 주행 환경에서는 일반주행보다 퍼지 제어 기법을 적용한 주행에서 연료소모가 아주 효율적임을 그림 11에서 확인 할 수 있다.

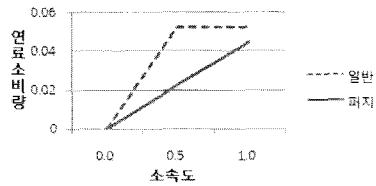


그림 11. 온도가 50도 일때 소속도에 따른 연료소비량

온도가 보통인 30도의 주행환경에서도 일반주행보다 퍼지 제어 기법을 적용한 주행이 연료소모가 효율적임을 확인할 수 있다.

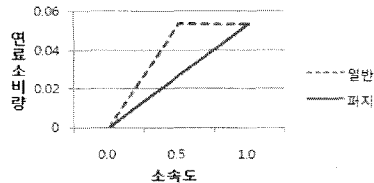


그림 12. 온도가 30도 일때 소속도에 따른 연료소비량

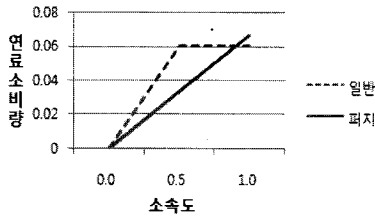


그림 13. 온도가 10도 일때 속도에 따른 연료소비량

제안된 퍼지 제어 기법을 적용할 경우에는 온도가 10도에서 속속도가 낮아진다. 따라서 전기모터가 주로 적용될 때는 일반 주행보다 퍼지 제어 기법이 적용된 주행이 연료 소모율이 적었다. 그러나 속속도가 1.0에 도달하면 엔진으로만 주행하게 되므로 퍼지 제어 기법이 적용된 주행의 연료 소모가 더 많아 짐을 확인할 수 있었다.

표 2. 512Km 주행시 각 온도에서 속도에 따른 총 연료소비량

온도	속속도	일반	퍼지
10	0.0	0	0
	0.5	30.7102	17.0068
	1.0	30.7102	34.0136
30	0.0	0	0
	0.5	27.3600	13.6800
	1.0	27.3600	27.3600
50	0.0	0	0
	0.5	26.8016	11.3969
	1.0	26.8016	22.7938

표 2는 512Km를 주행 했을 때의 전체연료소모량을 나타내었다. 온도가 높은 50도와 중간인 30도에서는 연료 소비량이 퍼지 제어 기법을 이용한 제어방법이 일반 주행일 때 보다 소모량이 낮음을 확인할 수 있었다. 그러나 온도가 낮은 10도에서는 엔진만 구동되는 속속도 1.0 위치에서 일반제어보다 퍼지제어가 연료 소모량이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

VII. 결 론

본 논문에서는 퍼지 제어 기법을 적용하여 차량 연료를 제어하는 방법을 제안하였다. 주행 중인 차량의 출력 마력 속속 함수와 전기모터의 회전 RPM 속속 함수를 적용하여 전기모터 작동유무를 제어하였고, 엔진의 흡기 온도 속속 함수와 공연비 속속 함수의 값들을 이용하여 무게 중심

법을 이용하여 비퍼지화를 수행하여 연료 분사량을 조정하였다. 최종적으로 전기모터 작동유무를 결정할 때 비퍼지화를 수행하여 얻은 무게 중심 값을 연료 분사량과 조합하여 연료를 최종적으로 분사하도록 설계하였다.

제안된 방법에서 연료의 소비량을 분석하기 위하여 기존의 연료 제어 방법과 시뮬레이션을 통하여 비교 분석한 결과, 기존의 연료제어방법보다 제안된 방법이 연료제어에 있어서 보다 효율적인을 확인할 수 있었다.

향후 연구 과제로는 퍼지 제어를 적용한 경우에 온도가 낮은 부분의 연료소비량이 일반제어방법보다 더 많이 소비됨을 확인할 수 있었다. 전기모터의 적용으로 큰 차이를 줄일 수 있었으나 차량의 다른 센서들도 퍼지 제어 기법을 적용하여 다양한 환경에서도 효율적인 연료소비량을 얻을 수 있도록 개선할 것이다.

참고문헌

- [1] 김청균, 자동차 엔진 공학, 골든벨, 1998.
- [2] 김길현, 자동차·중기 계산공식해설집, 골든벨, 1998.
- [3] 모터제어기술의기초와응용, 월간전자기술, 1999년, 5월.
- [4] J. Mohammad, V. Nader, J. R. Timothy, Fuzzy Logic and Control, Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [5] 정태균, ECU를 내 손으로 만들자, 골든벨, 2001.
- [6] 배태열, 하재기, 이승철, 문훈영, 자동차 가솔린 엔진, 북두출판사, 2004.
- [7] D. G. Copp, K. J. Burnham, F. P., Locket, "Model Comparison for Feedforward Air/Fuel Ratio Control," KACC International Conference on Control, Vol.9, pp.670-675, 1998.
- [8] 김광백, 우영운, 하상안, "퍼지 제어 기법을 이용한 차량의 연료 제어," 한국해양정보통신학회논문지, 11권 5호, pp.1013-1018, 2007.