

LPG 엔진 모델링 및 ECM 설계에 관한 연구

Development of an Engine Modeling and an Engine Control Module for an LPG Engine

심한섭*, 선우명호**
Hansub Sim, Myounggho Sunwoo

ABSTRACT

Liquid Petroleum Gas(LPG) has been widely used for commercial light-duty vehicles worldwide. Since LPG has a higher octane number and a lower maximum combustion temperature than gasoline, it becomes more popular fuel for reducing exhaust emissions.

In this study, mathematical models of air intake and fuel delivery system are presented, and a PI-controller is designed for air-fuel ratio control. Hardware and software of an engine control module(ECM) are designed for an LPG engine. The ECM is built using a Motorola MC68HC05. In order to control the air-fuel ratio at stoichiometry, the PI-control algorithm is implemented in the ECM.

The experimental results show that the proto LPG ECM and its control scheme perform well to meet the stoichiometric air-fuel ratio requirement.

주요기술용어 : Liquid Petroleum Gas: LPG(액화석유가스), Air-fuel ratio control(공연비제어), Engine Control Module: ECM(엔진 제어 장치), PI-controller(비례적분제어기), Engine modeling(엔진 모델링)

Nomenclature

$A_t(\theta)$: Effective throttle area[m ²]	\dot{m}_{max} : Max. air mass flow at standard condition[kg/sec]
$a = \frac{d}{D}$: Diameter ratio of throttle shaft(d) and throttle bore(D)	m_{fm} : Fuel flow of main line[kg]
$K_p(n)$: Variable proportional gain[-]	m_{fi} : Fuel flow of bypass injector[kg]
$K_I(n)$: Variable integral gain[-]	n : Engine speed[rpm]
k_i : Injector constant[kg/sec]	P_0 : Ambient pressure[kPa]
	P_m : Manifold pressure{kPa}
	P_C : Calibration pressure[kPa]
	P_I : Injection pressure[kPa]
	PR : Pressure ratio(= P_m/P_0)[-]
	PRI : Pressure ratio influence[-]

* 정회원, 한양대학교 대학원

** 정회원, 한양대학교 자동차공학과

- R : Gas constant[=0.287kJ/kg·K]
- T_C : Calibration temperature[K]
- T_I : Injection temperature[K]
- T_0 : Ambient temperature[K]
- τ_D : Transport time delay[sec]
- τ_C : Time constant of oxygen sensor[sec]
- TC : Throttle characteristics[-]
- t_I : Injection time[sec]
- t_{offset} : Injector offset time[sec]
- λ_s : Lambda at the stoichiometric air-fuel ratio[-]
- λ_i : Lambda at injector[-]
- λ_e : Lambda at the exhaust manifold[-]

1. 서 론

자동차의 배기가스에 의한 대기오염의 증가로 유해 배출가스를 줄이기 위한 제어기술 개발과 대체연료 사용이 권장되고 있다.

LPG는 석유의 정제과정에서 발생하는 가스를 액화한 것으로 연소시에 공해물질 배출이 적고, 연료 가격이 저렴하여 가솔린 대체연료로 널리 사용되어져 왔다. LPG 연료의 장점으로는 연소 과정에서 공해물질이 적게 발생하며, 가솔린에 비하여 옥탄가가 높기 때문에 고압축비를 이용한 열효율의 향상이 가능하다.[1] 혼합기의 단위 체적당 발열량이 적기 때문에 냉각손실이 감소하며 비열비의 증대로 기관의 열효율이 증가한다. 또한 가격이 저렴하고, 다른 대체연료에 비하여 대체연료 차량으로 개조시 비용이 적게 들고, 충전 시설이 비교적 잘 갖추어져 있어서 연료의 공급이 원활하다.

한편 단점으로는 단위 질량당 발열량은 높지만 혼합기의 단위 체적당 발열량이 가솔린에 비하여 5%정도 적고, 가스상태로 엔진에 공급되어 충전효율이 저하되기 때문에 출력이 감소한

다.[5][9] 연소시에는 화염의 전파속도가 느리기 때문에 실린더 내경이 큰 엔진에는 적용하기 어렵다. 또한 고압용기 사용으로 차량의 무게가 증가하고, 비중이 공기보다 크기 때문에 밀폐영역에 누출시 폭발 위험성이 있다.

엔진에서 공연비 제어를 위한 모델링은 주로 가솔린 엔진을 대상으로 많이 연구되어 왔다. LPG 엔진은 CNG 엔진과 같이 기체연료를 공급하므로 연료공급 및 연료거동 모델에서 가솔린 엔진과 차이를 나타낸다. 가솔린 엔진에서는 액체 연료를 분사하므로 기화, 벽류생성 등이 고려되어야 하나, 기체연료를 공급하는 LPG 엔진에서는 이러한 현상이 발생하지 않는다.

이 연구에서는 LPG 엔진제어에 필요한 흡기장치, 연료공급장치 및 공연비제어 시스템에 대한 모델링을 하였고, 공연비제어를 위한 엔진제어장치(ECM) 설계와 이 ECM을 실제 엔진에 적용하여 성능시험을 수행하였다.

2. LPG 엔진 연료 공급 및 제어장치

LPG 엔진은 Fig. 1과 같이 기화기에서 기화된 기체연료를 압력 조절기에서 감압하여 혼합기(Mixer)에 공급하는 구조이다.

연료는 주 공급라인(Main line)과 정밀한 공연비 제어를 위한 바이패스 인젝터(Bypass injector)로 나누어진다. 이때 공급되는 연료량은 공급 연료 압력과 믹서의 압력차에 의하여 결정되며, 대부분이 주 공급라인을 통하여 공급되고, 바이패스 인젝터에서는 정밀한 이론공연비를 맞추도록 제어한다. 주 공급라인과 공연비 제어용 바이패스 인젝터에서 공급되는 연료량을 그래프로 나타내면 Fig. 2와 같다. 배출가스 정화용 삼원촉매의 변환효율은 이론공연비 영역에 가장 높으므로 산소센서를 이용하여 공연비를 판정하고 이론공연비에 맞추도록 연료량을 제어한다.

3. LPG 엔진 모델

이 LPG 엔진의 모델은 흡기장치와 연료공

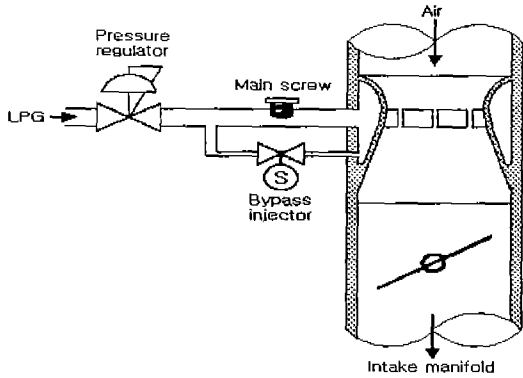


Fig. 1 Fuel delivery system of the LPG engine

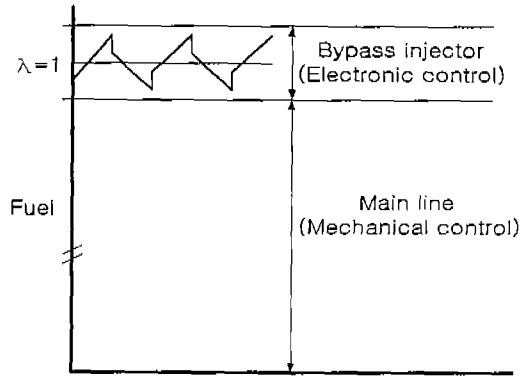


Fig. 2 Air-fuel ratio control of the LPG engine

급장치로 나누어진다.

3.1 흡기장치 모델

3.1.1 흡입 공기량 모델

스토틀을 통하여 흡기 매니폴드로 유입되는 공기량은 식(1)과 같이 표현될 수 있다.[2] 여기서 ϕ 는 흡입 공기의 유속이 아음속(Subsonic-flow)일 때는 식(2-1)과 같고, 초음속(Sonic-flow)에서는 식(2-2)과 같다.[3]

$$\dot{m}_a = \frac{C_D A_t P_0}{\sqrt{R T_0}} \phi \quad (1)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_m}{P_0} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_m}{P_0} \right)^{(k+1)/k} \right]} \quad (2-1)$$

$PR > 0.528$

$$\phi^* = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (2-2)$$

$PR \leq 0.528$

스토틀을 통과하는 최대 공기량은 압력비가 0.528 이하에서 음속이 되었을 때이고, 압력비가 커져도 공기량은 증가하지 않는다. 이것을 초킹(Choking) 현상이라고 하며, 이때 압력비를 임계 압력비(Critical pressure ratio)라고 한다. 여기서 유량계수는 실제값에 대한 이론값의 비율이므로 실험적으로 구할 수 있다.

식(1)을 근거로 하여 스토틀을 통하여 매니폴드로 유입되는 공기량은 Fig.3과 같이 불럭선도a

로 나타낼 수 있다.

\dot{m}_{max} 는 표준상태에서 스토틀을 통과하여 흡기매니폴드로 흡입되는 최대 공기량이므로 대기 압력, 온도 및 압력비에 대한 보정이 필요하다.

3.1.2 스토틀의 기하학적 특성

스토틀이 θ (rad)만큼 열려있을 때, 공기가 통과하는 유효면적(A_f)은 식(3)으로 표현된다.

$$A_f(\theta) = \frac{\pi D^2}{4} \left\{ \left(1 - \frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} \right) + \frac{2}{\pi} \left[\frac{a}{\cos \theta} \sqrt{\cos^2 \theta - a^2 \cos^2 \theta_0} + \frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} \sin^{-1} \left(a \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} \right) - a \sqrt{1 - a^2} - \sin^{-1} a \right] \right\} \quad (3)$$

Fig. 3에서 TC는 임의의 각도에 대한 스토틀 유효면적 $A_f(\theta)$ 을 나타내는 식(3)을 최대 스토틀 면적(A_{max})으로 나누어 0(Close)과 1(Wide open)로 표준화(Normalization)한 그래프이다. TC는 식(3)을 최대면적으로 나눈 값으로 식(4)와 같이 표현되고 그래프로 나타내면 다음 Fig. 4와 같다.

$$TC = \frac{A_f(\theta)}{A_{max}} \quad (4)$$

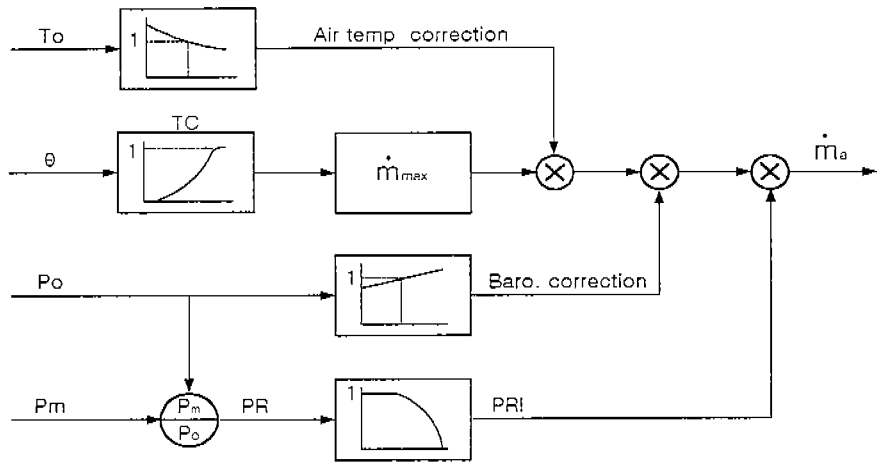


Fig. 3 Block diagram of throttle air flow rate calculation

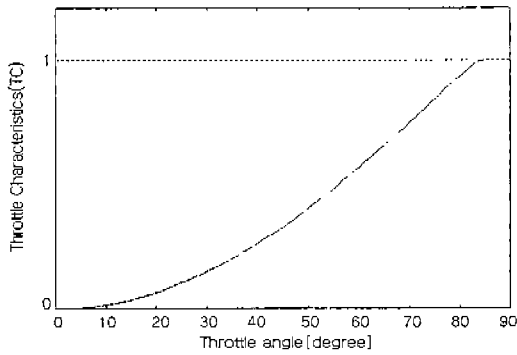


Fig. 4 Throttle characteristics(TC)

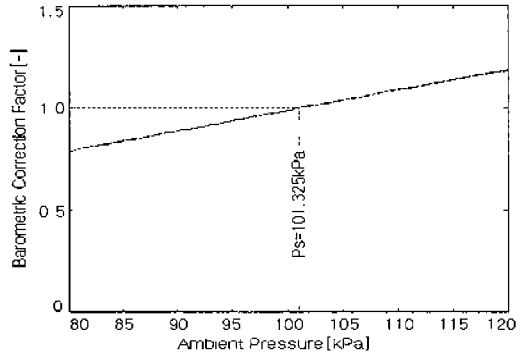


Fig. 5 Barometric correction characteristics

3.1.3 대기압력 보정

최대 공기량(\dot{m}_{max})은 표준 대기압 ($P_s=101.325kPa$)에서의 공기량이므로 대기압력 변화에 대한 보정이 필요하다. 보정계수는 대기압(P_0)을 표준대기압(P_s)으로 나누는 값으로 식(5)와 같고, 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다.

$$\text{Barometric correction factor} = \frac{P_0}{P_s} \quad (5)$$

3.1.4 흡입 공기 온도 보정

스로틀을 통하여 매니폴드로 유입되는 최대 공기량(\dot{m}_{max})은 표준 온도 ($T_s=273.15K$)에서의 공기량이므로 흡입 공기온도 변화에 대한 보정이 필요하다. 흡입 공기온도에 대한 보정계수는 식(6)과 같다. 이것을 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다.

$$\text{Temp. Correction factor} = \frac{\sqrt{T_s}}{\sqrt{T_0}} \quad (6)$$

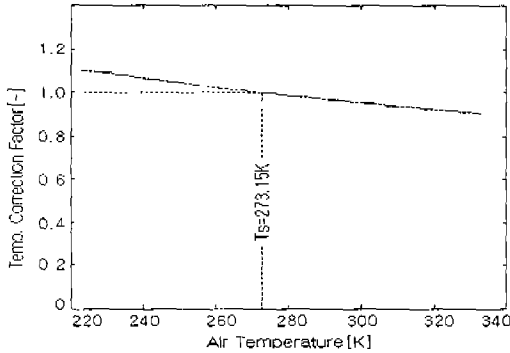


Fig. 6 Temperature compensation

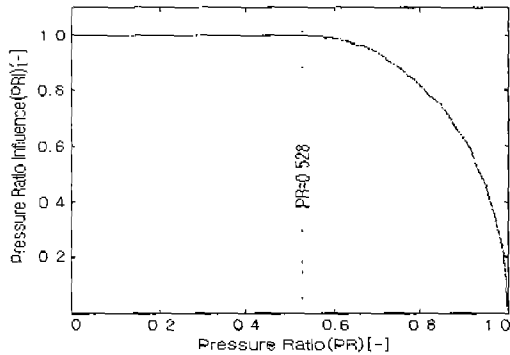


Fig. 7 Pressure ratio influence

3.1.5 실제유량의 압력비 영향

아음속 상태에서 흡기 매니폴드 압력 변화에 대한 실제유량의 압력비 영향(PRI : Pressure Ratio Influence)은 식(7)과 같다. 압력비가 0.528 이상인 아음속에서는 식(7-1)과 같고, 압력비가 0.528 이하인 음속에서는 식(7-2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$PRI = \frac{\phi}{\phi^*}, \quad (PR > 0.528) \quad (7-1)$$

$$= 1, \quad (PR \leq 0.528) \quad (7-2)$$

흡기 매니폴드에서 압력을 P_m 이라고 하고, 압력비에 대한 PRI의 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다.

3.2 연료 공급장치 모델링

LPG 연료는 공급압력과 스톱 밸브 전면의 압력차에 의하여 공급된다. 이 연료는 가스 상태로 주 공급라인과 바이패스 인젝터를 통하여 분사되며, 총 연료량(m_f)은 식(8)과 같다.

$$m_f = m_{fm} + m_{fi} \quad (8)$$

여기서 주 공급라인을 통하여 공급되는 연료량(m_{fm})은 압력차에 의하여 공급되는 연료이므로 식(1)과 같은 유형으로 표현할 수 있고, 바이패스 인젝터에서 분사되는 연료량(m_{fi})은 압력차와 구동시간에 대한 함수이며 식(9)와 같다. 인젝터 상수(k_I)는 연료압력, 출구압력, 온도 및 구동전압에 대한 함수이다. C_f 는 연료의 분사온도 및 압력에 대한 보정계수이며, 식(10)과 같다.

$$m_{fi} = C_f k_I (t_I - t_{offset}) \quad (9)$$

$$C_f = \frac{P_I \sqrt{T_C}}{P_C \sqrt{T_I}} \quad (10)$$

5. LPG 엔진 제어장치(ECM) 설계

5.1 하드웨어 설계

LPG 엔진 제어장치인 ECM은 Fig. 9와 같이 각종센서의 신호를 입력받아 제어에 필요한 신호를 출력한다. 엔진 제어용 Microcontroller는 Motorola의 MC68HC05을 사용하였으며 ECM은 Fig. 10과 같다.[10][11] 입력신호는 엔진 냉각수 온도(WTS), 스톱 밸브 위치센서(TPS), 공회전 스위치(Idle S/W), 제어용 산소센서 및 점화 신호이다. 엔진제어시스템의 출력신호는 바이패스 인젝터, Idle-up 솔레노이드, 경고등을 제어하기 위한 것이다. 바이패스 인젝터는 연료량을 조절하여 공연비를 제어하며, Idle-up 솔레노이드는 공회전 영역에서 엔진 부하에 따라 공회전 속도를 증감시킨다. 경고등은 각종 이상신호의 발생을 알려주기 위하여 이용된다.

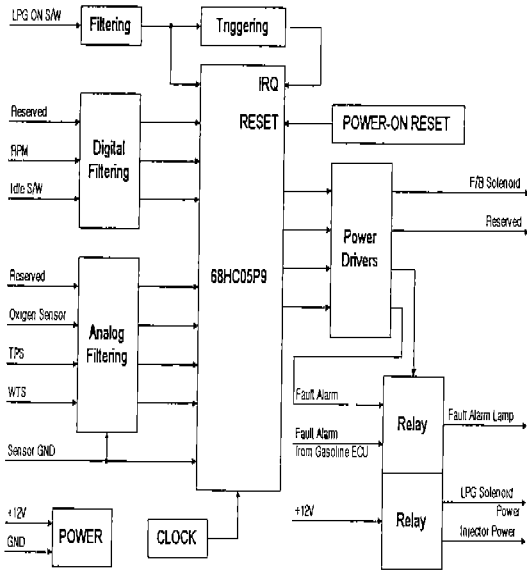


Fig. 8 Block diagram of ECM

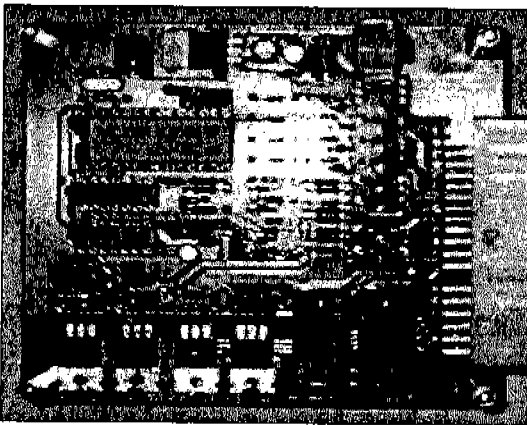


Fig. 9 LPG ECM hardware(Prototype)

5.2 LPG 엔진제어 알고리즘

5.2.1 공연비 제어기 설계

LPG 엔진의 공연비 제어기는 비례적분제어기를 이용하여 설계하였다.[6][7] 이 제어기의 블록선도는 Fig. 10과 같다.

산소센서는 이론공연비 부근에서 급격하게 변화하므로 이상적인 릴레이(Ideal relay)와 같은 특성을 갖는다.[12]

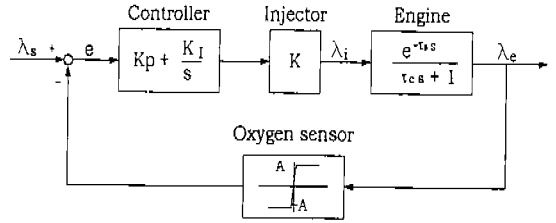


Fig. 10 Block diagram of PI-controller

엔진에서의 전달 시간지연(τ_D)은 스토틀에서 흡기포트까지 전달시간, 사이클 지연시간, 배기포트에서 산소센서까지 전달시간의 합으로 계산된다.[14] 이때 전달 지연시간에는 산소센서 고유의 시간지연(τ_C)도 포함된다.

5.2.2 엔진제어 알고리즘

LPG 엔진제어 알고리즘은 Fig. 11과 같은 순서도로 구성되어 있다. 초기화(Initialize)에서는 각 변수의 초기화와 센서 진단(Diagnostics) 기능이 있으며, 엔진에서 이상이 발생하면 이상신호표시기에 나타내어 ECM을 검사할 수 있게 한다. 변수입력부에서는 제어에 필요한 공연비, 수온, 엔진회전수, 스토틀 위치 등을 각 센서로부터 입력한다. 제어변수의 계산부에서는 센서 입력을 바탕으로 운전조건에 맞는 바이패스 인젝터 제어값을 결정한다. Control routine에서는 계산된 제어값을 출력하여 바이패스 인젝터를 구동한다. 제어 알고리즘은 이러한 과정을 되풀이하는 무한 순환구조로 되어 있다.

공연비 제어특성은 엔진 운전조건에 따라 다르기 때문에 비례적분제어기에서 Gain(K_P , K_I)은 엔진조건에 따라 변화되어야 한다. PI Gain은 LPG 엔진에서 여러 번의 실험을 통하여 최적값을 선택하여 ECM에 저장시켜놓고, 엔진조건에 따라 Gain을 선택하도록 하였다. Table 1은 엔진 회전수 1000rpm에서 비례적분제어기의 K_P 와 K_I 값을 나타내고 있다.

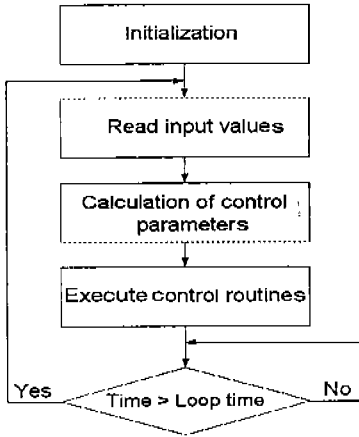


Fig. 11 Flow chart of control program

Table 1 Example of PI-control gains at 1000 rpm

Gain	Control condition (Oxygen sensor signal)	Value
K _P	Lean→Rich excursion	-3%
	Rich→Lean excursion	+3%
K _I	Continuous Lean	-2%/sec
	Continuous Rich	+2%/sec

5.3 공회전 영역에서 공연비 제어

공회전 영역에서는 연비와 엔진의 안정성이 중요한 변수이므로 적절한 회전수를 유지하기 위한 바이패스 인젝터의 제어값 결정이 매우 중요하다. 에어컨, 냉각팬 등의 부하 변동에 대한 엔진 회전수 제어는 공회전 속도를 높이기 위한 솔레노이드를 작동시켜 추가로 공기를 공급한다.

Fig. 12는 공회전 영역에서 엔진 냉각수 온도 변화와 바이패스 인젝터 제어값을 나타내고 있다. 냉각수 온도가 낮을 때는 듀티를 증가시켜 엔진 회전수를 높이고, 냉각수 온도가 높으면 듀티를 감소시킨다. 냉각수 온도가 충분히 상승하면 듀티는 선택된 값으로 고정된다. 즉 냉각수 온도가 낮을 경우, 신속하게 적정온도(약 80℃)

로 상승시키기 위하여 연료를 많이 공급하도록 설계하였다.

Fig. 13은 냉각수 온도가 충분히 상승했을 때, 엔진 회전수가 증가할 때와 감소할 때 듀티의 변동량을 나타내고 있다. 이때, 듀티 변화가 회전수 감소시에 아래쪽으로 치우쳐 나타나는 것은 엔진의 공회전 속도를 안정시키기 위한 것이다.

Fig. 14는 엔진 회전수가 증가할 때에 바이패스 인젝터의 구동신호를 엔진 냉각수 온도와의 관계로 표시하였다. 각 구간에서 공연비는 일정한 듀티로 고정되도록 설계하였다.

Fig. 15는 엔진 회전수의 감소시에 엔진 냉각수 온도와의 관계를 3차원 그래프로 나타내었다. 듀티는 엔진 회전수가 증가할 때에 비하여 회전수가 낮은 쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있다.

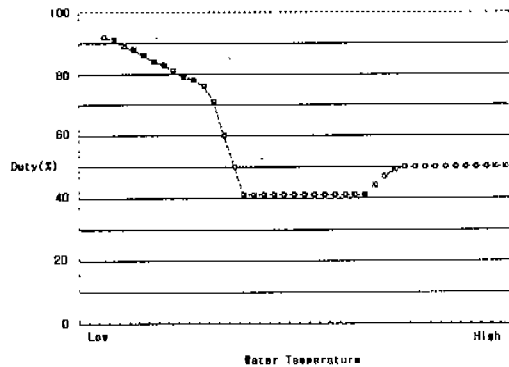


Fig. 12 Duty vs. water temperature compensation

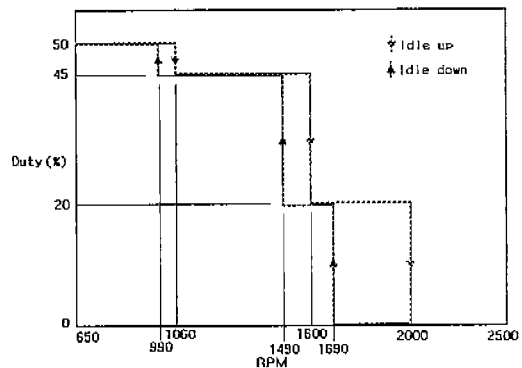


Fig. 13 Duty vs. RPM at high water temperature

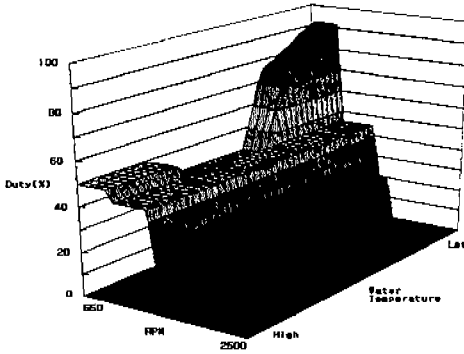


Fig. 14 Idle open-loop control(RPM--)

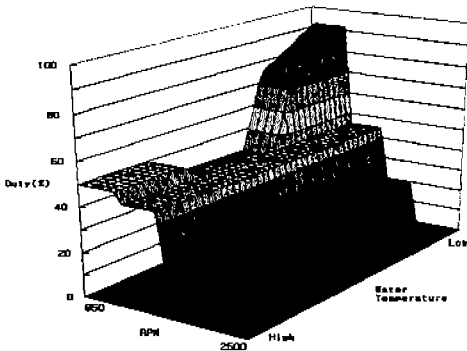


Fig. 15 Idle open-loop control(RPM++)

6. 실험 결과 및 고찰

엔진실험은 2000cc LPG 엔진을 대상으로 비례적분 제어기를 적용한 ECM 및 협대역산소센서(Narrow band oxygen sensor)를 사용하였다. 공연비 제어 성능을 측정하기 위하여 광역산소센서를 설치하였다.

Fig. 16은 2500rpm에서의 이론공연비 제어 결과를 나타내고 있다. 위쪽은 광역산소센서에서 공연비 측정 결과이며, 아래쪽은 협대역산소센서의 측정결과이다. 광역산소센서는 LPG 엔진이 이론공연비(15.6: 1) 부근에서 양호한 제어 성능을 나타내고 있다. 협대역산소센서 신호는 Lean/Rich에 따라 이론공연비를 기준으로 급격히 변하는 특성을 보여주고 있다.

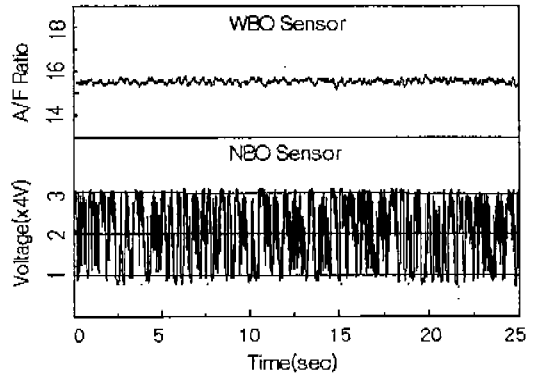


Fig. 16 Lambda control and A/F result at 2500rpm

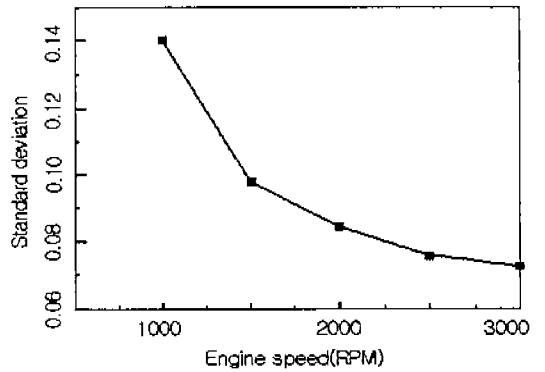


Fig. 17 Standard deviations of A/F vs. engine speed

Fig. 17은 엔진 회전수에 대한 공연비의 표준편차를 나타내고 있다. 표준편차는 엔진회전수 1000rpm에서는 0.14, 1500rpm에서는 0.098, 2000rpm에서는 0.084, 2500rpm에서는 0.076, 3000rpm에서는 0.072로 회전수가 증가할수록 감소하고 있다. 회전수가 낮을 때 편차가 증가하는 것은 연료의 분사에서 연소과정 후에 산소센서에서 공연비의 검출까지의 사이클 지연시간의 증가와 연소실 내부의 연소상황의 악화로 혼합기의 연소가 원활히 이루어지지 않기 때문이다. 이와 반대로 고회전 영역에서는 사이클 지연시간이 짧고 연소조건이 양호하여 공연비 제어성능이 우수함을 보여주고 있다. 위의 결과로부터 이 실험에서 설계한 비례적분 제어기의 공연비 제어성능이 적절함을 알 수 있다.

7. 결 론

바이패스 인젝터를 사용하는 LPG 엔진의 흡기장치 및 연료공급장치에 대한 모델링을 수행하였다. LPG 엔진 제어를 위한 엔진제어장치를 설계하여, 실제 엔진에 적용하여 실험하였다.

이 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) LPG 엔진 제어를 위하여 흡기장치 및 연료공급장치에 대한 모델링을 수행하였다. 흡입 공기량 모델링은 계산의 수월성을 위하여 최대흡입 공기량을 계산한 후에 스톨을 특성, 대기 온도 및 압력, 압력영향비 등으로 보정하는 방법을 사용하였다.

2) 엔진제어장치에 대한 하드웨어 및 제어 알고리즘 설계 기술을 정립하였다. 공연비제어기는 비례적분제어기를 이용하여 설계하였으며, K_P 와 K_I 는 엔진실험을 통하여 최적값을 결정하였고, 엔진 회전수에 따라 변경되도록 하였다.

3) 공회전 영역에서 배출가스를 저감하고 공회전 안정성을 향상시키기 위하여 바이패스 인젝터의 듀티를 냉각수 온도 및 회전수에 따라 보정하도록 하였으며, 정상온도(약 80°C) 이상에서는 듀티를 엔진실험에서 얻어진 적절한 값(50%)으로 제한하였다.

4) LPG 엔진 실험을 통하여 제어 성능이 양호함을 확인 할 수 있었다. 저회전 영역에서는 싸이클 지연시간의 증가와 연소상황이 악화로 인하여 공연비 제어 성능이 저하되었으나, 고회전 영역에서는 공연비 제어가 용이하였다.

후 기

이 연구과제는 교육부 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97-F-13)에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Sierens Ir.R, "An experimental and theoretical study of liquid LPG injection",

SAE922363, 1992.

2. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGrawHill, 1988.
3. Robert W. Weeks and John J. Moskwa, "Transient Air Flow Rate Estimation in a Natural Gas Engine Using a Nonlinear Observer", SAE940759.
4. 선우명호 외 2인, "크랭크각 기준의 엔진제어시스템 설계·제작에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 제6권 제4호, 98370090, p.188-p.210, 1998.
5. 김석주, "FBM 방식 LPG 엔진의 전자 제어에 관한 연구", 한양대학교 석사학위논문, 1997.
6. M. A. Shariati, J. Iqbal and H. Servati, "Discrete PI control algorithm for HEGO-based closed loop control", SAE970616.
7. Robert L. Barkhimer and Hoi-Ching Wong, "Application of Digital, Pulse-Width-Modulated Sonic Flow Injectors for Gaseous Fuels", SAE 951912.
8. H.U. Gruber, H.M. Wiedenmann, "Three years experience with the lambda-sensor in automotive control systems", SAE800017.
9. Jeffery S. Hepburn, "A comparison between the combustion of isoctane, methanol, and methane in pulse flame combustors with closed loop A/F control", SAE 920799.
10. Mark Glenewinkel, "System design and layout techniques for noise reduction in MCU-based systems", Motorola AN1259.
11. Joseph D. Greenfield, "The 68HC11 Microcontroller", Saunders college publishing.
12. H.M. Wiedenmann etc 4, "Exhaust gas sensor", Automotive Electronics Handbook, Chapter 6.