

LPG 엔진의 공회전 영역에서 공연비 제어 특성

이태연*, 심한섭**

Air-Fuel Ratio Control Characteristics of an LPG Engine at Idle

Taeyeon Lee*, Hansub Sim**

Abstract

Since LPG has a higher octane number and a lower maximum combustion temperature than gasoline, it is getting more popular for reducing emissions from the vehicle.

This paper, when an LPG engine works in the range of idle, analyzed the operating range precisely and provides reducing method of emissions for the LPG engine. An electronic control unit(ECU) for the LPG engine using a feedback mixer is presented. The ECU is built by using a microcontroller MC68HC05. A PI-controller is implemented in the ECU in order to handle Air/Fuel ratio control.

The experimental results exhibit that the required engine performance are satisfied at idle.

Key Words : Liquefied Petroleum Gas(LPG : 액화석유가스), Electronic Control Unit(ECU : 전자제어장치), LPG Engine(LPG 엔진), Air-Fuel Ratio Control(공연비 제어)

1. 서 론

액화석유가스(LPG)는 석유의 정제과정 중에서 생산되며, 가솔린에 비하여 배출가스중 유해물질이 적은 청정연료로서 가격이 저렴하고 경제성이 높아서 가솔린엔진의 대체연료로 많이 사용되고 있다. LPG는 가솔린에 비하여 출력이 비교적 낮으나, 옥탄가가 높아서 압축비를 높일 수 있고, 가스상태로 공급되므로 혼합기의 형성이 원활하여 엔진 내부에서 연소특성이 향상되므로 오염물질이 적게

배출된다.⁽¹⁾

LPG 엔진에서 공급되는 연료는 최종 압력이 저압(약 0.3kgf/cm²)이기 때문에 미약한 흡입압력의 변화에도 민감하게 작용한다. 특히 공회전 영역에서는 주 공급라인에 비하여 공연비 제어용 슬레노이드로 통과되는 연료량이 고회전 영역 보다 많고, 산소센서까지 도달하는 시간이 길어서 정밀한 공연비제어가 곤란하다.^(2,3) 또한 duty 변화에 대하여 엔진 회전수의 변동량이 고회전 영역 보다 상대적으로 크다. 그러므로 공회전 영역에서는 일반적으로

* 원주대학 동력기계과
** 한양대학교 대학원

개루프(open-loop) 제어에 의하여 미리 정해진 duty로 공연비 제어용 솔레노이드를 구동시킨다.

본 연구에서는 LPG 엔진의 공회전 영역에서 엔진의 특성을 예측하고, 엔진이 최소 회전수를 유지하면서도 부하 변동에 적절히 대응할 수 있는 공연비 제어기술을 연구하였다.

2. LPG 엔진 시스템

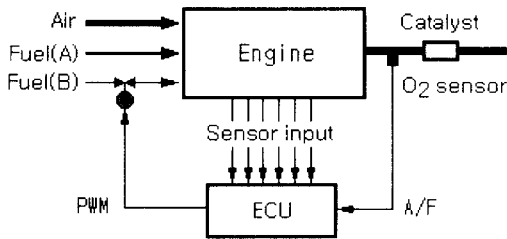
2.1 엔진 시스템의 연료 공급 체계

LPG 엔진의 연료공급은 연료탱크 - 차단밸브-압력조정기(기화기 포함) - 믹서(스로틀바디에 포함)를 통과하여 공기와 혼합기체를 형성하여 가스상태로 실린더에 흡입된다.

차단밸브는 냉각수 온도가 15℃ 이상이면 액체연료를 공급하고, 15℃ 이하이면 기체연료를 공급하여 냉시동을 향상시킨다. 기화기는 LPG 연료장치중 중요한 부품으로 감압, 기화의 기능을 가지고 있으며, LPG 공급압력을 약 0.3kgf/cm²으로 유지한다. 믹서는 기화기에서 기화된 LPG와 공기를 혼합하여 엔진에 공급하는 장치로서, 엔진 부하에 의해 연료유량이 조절되고, 보조라인의 피드백 솔레노이드를 통과하는 연료의 양을 조절하여 산소센서 및 부하조건에 맞는 공연비를 제어한다.

2.2 공연비 제어 특성

LPG는 연료의 특성상 압력을 높이면 쉽게 액화하기 때문에 고압으로 연료를 분사하기 곤란하며 기체상태의 저압 가스연료를 스로틀 밸브 전면에 분사한다. Fig. 1과 같이 주공급라인(fuel A)과 정밀한 공연비 제어를 위한 보조라인(fuel B)으로 나누어진다. 이때 솔레노이드 밸브를 통하여 공급되는 연료는 공급압력과 흡기매니폴드의 압력



Fuel(A) : Main Fuel(mechanical control)

Fuel(B) : Aux. Fuel(electronic control)

● : Aux. A/F ratio control solenoid

Fig. 1 Block diagram of the LPG Engine

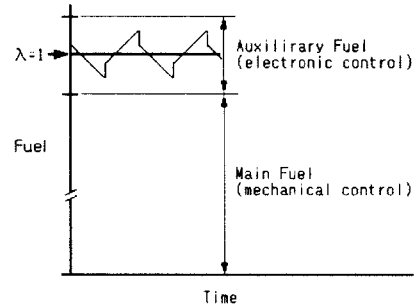


Fig. 2 Fuel control of the LPG Engine

에 의하여 결정되어진다.

솔레노이드 밸브는 pulse-width-modulation (PWM)에 의하여 일정한 주파수를 갖는 연속적인 펄스에 의하여 구동되므로 duty(%)에 의하여 연료의 연료량이 결정된다. Duty는 PWM제어의 펄스파형에서 1사이클 시간에 대한 솔레노이드가 ON되는 시간의 비율을 의미한다. 공연비의 정밀한 제어를 위한 보조라인의 솔레노이드 밸브는 산소센서의 피드백 신호에 의하여 공연비 제어를 수행한다. 이때 솔레노이드 밸브를 통하여 공급되는 연료는 PI-controller가 공연비 제어용 솔레노이드에 전압을 인가한 시간에 의하여 결정된다.^(4~5)

Fig. 2는 주공급라인의 연료(main fuel)과 솔레노이드로 공급되는 보조연료(auxiliary fuel)를 개략적으로 표시한 그림이다. 주연료는 스로틀 전면에 설치된 믹서에서 흡입 공기량 변화에 따른 압력차에 의하여 결정되고, 보조연료는 실제공연비를 이론공연비로 나눈 값인 공기과잉률(λ)이 1.0에 맞도록 솔레노이드에 의해 연료량이 제어된다.

2.3 기체 연료와 공기의 혼합과정

LPG 엔진에서 연료는 가스상태로 공급되어 공기와 혼합기체를 형성한다. 공기와 연료의 혼합기체는 스로틀을 통하여 매니폴드로 입력되므로 일정량의 혼합가스가 유입된다면, 연료량의 변화는 흡입공기량에 영향을 미치지 않는다. 연료량이 많아지면 상대적으로 흡입공기량은 적어지게 될 것이다. 이러한 혼합과정은 이상기체 방정식 및 돌턴의 분압에 관한 법칙으로부터 설명이 가능하다.^(6~7)

Fig. 3은 단점분사(SPI)식 엔진의 연료-공기의 공급 및 혼합과정을 나타낸 것이다.

흡기매니폴드 내부의 혼합기량은 유입량과 유출량의 차이로 나타낸다.

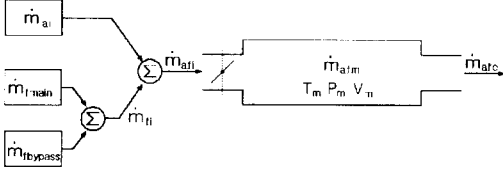


Fig. 3 Mixing process of air and LPG

$$\dot{m}_{afm} = \dot{m}_{afi} - \dot{m}_{afo} \quad (1)$$

\dot{m}_{afi} : 유입되는 공기-연료 혼합기량[kg/s]

\dot{m}_{afm} : 내부의 공기-연료 혼합기량[kg/s]

\dot{m}_{afo} : 유출되는 공기-연료 혼합기량[kg/s]

\dot{m}_{ai} : 매니폴드로 유입되는 공기량[kg/s]

\dot{m}_{fi} : 매니폴드로 유입되는 연료량[kg/s]

\dot{m}_{fmain} : 주 공급라인의 공급 연료량[kg/s]

$\dot{m}_{fbypass}$: 솔레노이드의 연료량[kg/s]

매니폴드로 흡입되는 혼합기량은 공기량(수분 포함)과 연료량의 합이다.

$$\dot{m}_{afi} = (\dot{m}_{ai} + \dot{m}_w) + \dot{m}_{fi} \quad (2)$$

공기중에 포함된 수분 \dot{m}_w 는 아주 작다 ($m_w / m_a \leq 0.03$). 그러므로 흡기매니폴드로 수분에 의한 영향을 무시하면 공기와 연료량의 전체 질량유량은 식(3)과 같다.

$$\dot{m}_{afi} = \dot{m}_{ai} + \dot{m}_{fi} \quad (3)$$

매니폴드 전체 압력은 돌턴의 법칙으로부터, 식(4)과 같이 흡입공기의 분압 (p_a), 수분 분압 (p_w) 및 연료 분압 (p_f)의 합이다. 그리고 혼합기체도 이상기체로 가정하면 각 성분기체 (i)에 대한 다음 식(5)가 성립한다.

$$p_m = p_a + p_w + p_f \quad (4)$$

$$p_i V_m = m_i R_i T_m \quad (5)$$

각각의 공기, 수분 및 연료에 대한 분압은 혼합기체에 대한 이상기체방정식(5)으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$p_a = \frac{m_a R_a T_m}{V_m} \quad (6)$$

$$p_w = \frac{m_w R_w T_m}{V_m} \quad (7)$$

$$p_f = \frac{m_f R_f T_m}{V_m} \quad (8)$$

위 식에 일반기체상수 관계식 ($\bar{R} = M_i R_i$)를 적용하고 식(4)에 대입하여 정리하면 매니폴드 압력은 식(9)와 같다.

$$p_m = \frac{m_a}{M_a} \left(1 + \frac{m_w M_a}{m_a M_w} + \frac{m_f M_a}{m_a M_f} \right) \frac{\bar{R} T_m}{v_m} \quad (9)$$

매니폴드 전체 압력에 대한 공기의 유효압력비 (p_a / p_m)는 식(6)을 식(9)로 나누고, 각각의 질량유량을 순간 질량유량으로 표기하면 식(10)과 같이 표시할 수 있다. 그리고 혼합기체에 대한 이상기체방정식으로터 부분압력비는 체적비와 같다.

$$\frac{p_a}{p_m} = \left(1 + \frac{\dot{m}_w M_a}{\dot{m}_a M_w} + \frac{\dot{m}_f M_a}{\dot{m}_a M_f} \right)^{-1} \quad (10)$$

식(10)으로부터 공기의 유효압력비는 연료/공기비 (\dot{m}_f / \dot{m}_a)가 증가할수록 작아지고, 연료의 분자량이 작을 수록 영향이 더 크다. 즉, 가벼운 기체연료일 수록 공기 유효압력비에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

매니폴드 전압력 중에서 공기 성분압력만이 흡입공기에 영향을 준다고 가정하면 식(10)로부터 식(11)과 같이 공기의 성분압력은 유효압력비와 매니폴드 압력의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$p_a = \left(\frac{p_a}{p_m} \right) p_m \quad (11)$$

또한, 공기과잉률 (λ)은 엔진에서 실제 공연비를 이론 공연비로 나눈 값으로 공기/연료비는 식(12)로 나타낼 수 있다. (A/F)_s는 이론 공연비이다.

$$\frac{\dot{m}_{fi}}{\dot{m}_{ai}} = \frac{1}{\lambda \cdot (A/F)_s} \quad (12)$$

공기 유효압력비에 대한 공기과잉률의 영향은 식(12)를 식(10)에 대입하여 정리하면 다음 식(13)과 같다. 단, 습도 ($h = \dot{m}_w / \dot{m}_a$)는 질량비이다.

$$\frac{p_a}{p_m} = \left(1 + h \frac{M_a}{M_w} + \frac{1}{\lambda \cdot (A/F)_s} \frac{M_a}{M_f} \right)^{-1} \quad (13)$$

LPG의 주성분인 부탄 (C_4H_{10}), 프로판 (C_3H_8)에 대하여, 이론공연비로 운전되고 있을때, 흡입 공기의 유효압력비는 식(14a)과 식(14b)와 같다. 수분에 의한 영향은 고

려하지 않았다.

$$\left(\frac{p_a}{p_m}\right)_{C_3H_8} = 0.9687 \cong 0.97 \quad (14a)$$

$$\left(\frac{p_a}{p_m}\right)_{C_2H_6} = 0.9597 \cong 0.96 \quad (14b)$$

따라서 실제 공기분압은 이론공연비에서 연료분압을 고려하지 않을 경우 보다 부탄은 3%정도, 프로판은 4% 정도 감소하게 된다. 이것은 기체연료를 사용하는 엔진에서 일반적으로 나타나는 현상이다.^{17, 18)} 이에 대한 대책으로 MPI 방식의 액체연료를 분사하는 방법이 연구되고 있다.¹⁹⁾ 액체 연료의 분사는 기화열에 의한 흡입공기의 냉각으로 흡입공기량을 더욱 많이 확보할 수 있다.

Fig. 4는 프로판 (C₃H₈), 부탄 (C₄H₁₀), 메탄 (CH₄) 및 수소 (H₂)의 기체연료에 대한 식(10)을 나타낸 그래프이다. 이때, 수분에 의한 영향은 고려하지 않았다.

매니폴드 내부에서 전압력은 식(11)로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_m = \left(\frac{p_m}{p_a}\right) p_a \quad (15)$$

유효 흡입공기량은 수분에 의한 영향을 무시하면 식(2)로부터 식(16)과 같이 표현할 수 있다. 그리고 \dot{m}_f / \dot{m}_{ai} 는 식(10)으로부터 식(17)으로 나타낼 수 있으므로 유효 흡입공기량은 식(18)과 같다.

$$\dot{m}_{afi} = \dot{m}_{ai} + \dot{m}_{fi} \quad (16)$$

$$\frac{\dot{m}_{fi}}{\dot{m}_{ai}} = \left(\frac{p_m}{p_a} - 1\right) \frac{M_f}{M_a} = \frac{p_f}{p_a} \frac{M_f}{M_a} \quad (17)$$

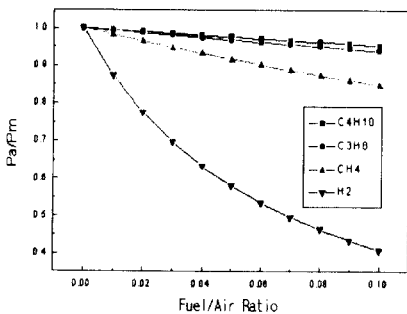


Fig. 4 Effect of the gaseous fuel for an inlet air partial pressure

$$\frac{\dot{m}_{ai}}{\dot{m}_{afi}} = \left[1 + \frac{p_f}{p_a} \frac{M_f}{M_a}\right]^{-1} \quad (18)$$

이론공연비에 대하여 LPG의 주성분인 부탄과 프로판의 유효질량비는 다음과 같다.

$$\left(\frac{m_a}{m_{af}}\right)_{C_2H_6} \cong 0.9837 \quad (18a)$$

$$\left(\frac{m_a}{m_{af}}\right)_{C_3H_8} \cong 0.9779 \quad (18b)$$

실제 공기량은 이론공연비에 대하여 공기의 유효질량비를 고려하지 않은 경우 ($m_a = m_{af}$)와 비교하여 부탄은 0.9837, 프로판은 0.9779로 감소함을 알 수 있다.

3. 공회전 영역에서 공연비 제어

공회전 영역에서 엔진은 안정적이면서 최소회전수를 유지하여야 하며, 냉각팬, 에어컨 등의 각종 부하에 대하여도 정상적으로 작동되어야 한다. 엔진의 최소 회전수는 연료소비가와 밀접한 관계가 있으며, 회전수가 낮을수록 연료소비가 적어서 경제적인 뿐만 아니라 배기가스 저감에도 효과적이다. 따라서 엔진이 최소 회전수를 유지하면서도 부하 변동에 적절히 대응할 수 있는 제어기술이 요구된다.

3.1 엔진 냉각수 온도 보정

엔진의 냉각수 온도가 낮을수록 실린더벽을 통한 열손실이 증가한다. 또한 온도가 낮은 실린더벽 주위에서 연소되지 않은 미연가스가 배기가스중에 포함되어 배출되므로 대기오염을 증가시킨다. 따라서 엔진 냉각수 온도를 신속히 적정온도에 도달시키기 위한 엔진제어가 필수적이다.

3.2 엔진 회전수에 따른 duty 제어량

공회전 영역에서 엔진이 최소 회전수를 유지하면서도 부하 변동에 적절히 대응하여 안정적인 회전수를 유지할 수 있어야 한다. 즉 엔진의 회전수가 필요이상으로 증가하게 되면 연료소비가와 배출가스가 증가하므로 duty를 제어하여 엔진회전수를 적절히 제한할 필요가 있다.

3.3 부하에 대한 공회전 속도의 안정성

엔진이 공회전 영역에서 작동되고 있을 때, 엔진의 최소 회전수를 유지하는 것도 중요하지만 냉각팬, 에어컨 등의

각종 부하 변동으로 엔진이 정지하지 않도록 적정의 회전 속도를 유지하는 것이 필요하다.

4. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 LPG 엔진, ECU, 시뮬레이터(simulator) 및 PC(programming and data acquisition)로 구성하였다.

시뮬레이터는 ECU의 개발시에 필수 장비로서 엔진의 동작없이 센서신호를 발생시킬 수 있고, 액츄에이터의 상태를 표시할 수 있도록 제작하였다.

PC는 ECU의 제어로직 프로그래밍과 입출력신호를 분석한다.

실험장치의 규격은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications

Engine	2,000cc, LPG Engine 4-cylinder, DOHC
ECU	MC68HC05P9(Motoroller) PWM A/F control
PC	ECU Programming & Data acquisition
Simulator	Engine signal generation & Display

5. 실험 결과

공회전 영역에서 공연비는 냉각수 온도와 회전수(rpm)에 의해 결정되도록 설계하였다. Fig. 5은 온도변화와 솔레노이드 구동 duty(%)를 나타내고 있다. 냉각수 온도가 낮을 때는 duty(%)를 증가시켜 연료량을 증가시키고, 냉각수 온도가 높으면 duty를 감소시킨다. 냉각수 온도가 충분히 상승하면 duty는 50%로 고정된다.

Fig. 6은 냉각수 온도가 충분히 상승했을 경우, 엔진 회전수가 증가할 때와 감소할 때 duty의 변동량을 나타내고 있다. 엔진 회전수의 증가시에는 구간별로 duty가 50%(~1,060rpm), 45%(1,060~1,600rpm), 20%(1,600~2,000rpm)이고, 2,000rpm 이상에서는 피드백 솔레노이드를 통하여 연료를 공급하지 않도록 하였다. 회전수 감소시에는 20%(1,490~1,690rpm), 45%(990~1,490rpm), 그리고 900rpm 이하에서는 50%로

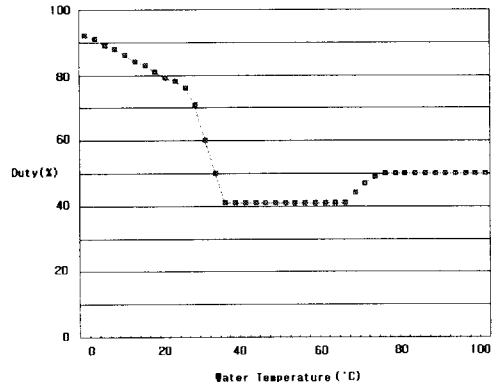


Fig. 5 Duty vs. water temperature

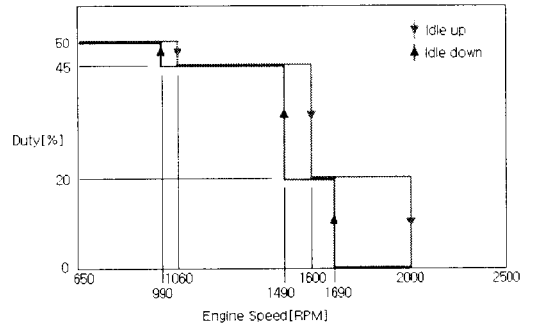


Fig. 6 Duty vs. RPM at idle

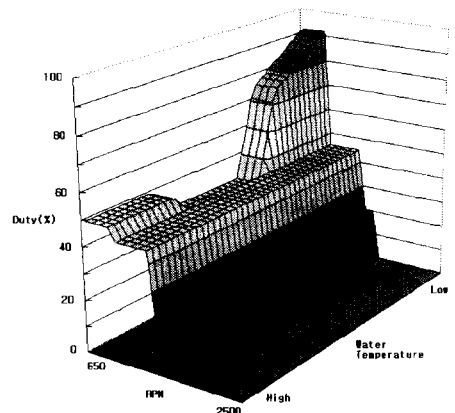


Fig. 7 Idle open-loop control(RPM++)

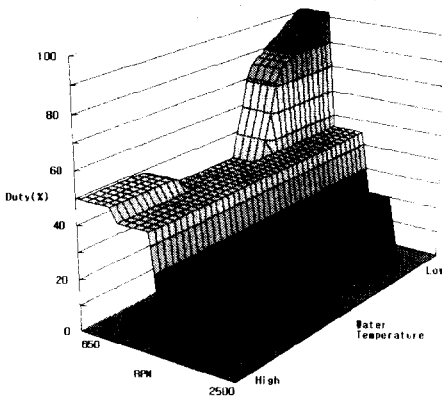


Fig. 8 Idle open-loop control(RPM--)

설정하였다. 이때, duty 변화가 회전수 감소시에 아래쪽으로 치우쳐 나타나는 것은 엔진의 공회전 속도를 안정시키기 위하여 좀더 낮은 회전수까지 연료를 많이 공급하는 것이다.

Fig. 7은 엔진 회전수가 증가할 때에 온도와의 관계를 표시하였다.

Fig. 8은 엔진 회전수의 감소시에 온도와의 관계를 3차원 그래프로 나타내었다. 엔진 냉각수 온도의 변화에 따른 공연비 제어는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 회전수가 낮을(회전수 증가시는 1060rpm, 감소시는 990rpm)에 온도가 낮으면 duty를 증가시키고, 온도가 높으면 duty를 감소시킨다. 엔진 냉각수 온도가 정상온도 이상이 되면 duty를 50%로 고정하도록 하였다.

6. 결 론

LPG 엔진은 공회전 영역에서 운전특성에 따라서 민감한 영향을 받게 되므로, 운전특성에 대한 분석과 특성에 맞는 솔레노이드의 duty를 제시하였다. 이 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 솔레노이드를 사용하여 공연비 및 공회전 회전수를 제어하는 LPG 엔진의 공회전 영역에서 솔레노이드의 duty는 공회전 안정성, 부하 및 경제성을 고려하여 결정하였으며, 주요 변수를 엔진회전수와 냉각수 온도를 기초로 하여 산정하였다.

- (2) 엔진 회전수 변화에 대한 솔레노이드의 duty는 회전수가 증가할수록 duty가 낮아지며, 회전수 감소시에 회전수가 낮은 쪽에서 duty를 크게하여 공회전 안정성을 향상시켰다.
- (3) 냉각수 온도에 따른 duty는 온도가 낮을 경우 증가시키고, 온도가 높으면 감소하여, 정상온도(약 80℃)에 도달하면 50%로 설정하였다.
- (4) LPG 엔진은 스로틀 전면에서 기체연료를 공급하므로 기체상태에서 연료가 점유하는 양 만큼 공기량이 감소하며, 이론공연비 영역에서 부탄은 0.9837, 프로판은 0.9779로 감소함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) R. Sierens, "An experimental and theoretical study of liquid LPG injection", SAE 922363, 1992.
- (2) H.U. Gruber, H.M. Wiedenmann, "Three years experience with the lambda-sensor in automotive control systems", SAE800017, 1980.
- (3) Gorille, N. Rittmansberger and P. Werner, "Bosch electronic fuel injection with closed loop control", SAE750368, 1975.
- (4) M.A. Shariati, J. Iqbal, and H. Servati, "Discrete PI control algorithm for HEGO-based closed loop control", SAE 970616, 1997.
- (5) H.M. Wiedenmann, "Exhaust gas sensor", Automotive electronics handbook, Ch. 6, 1995
- (6) D. L. Harrington, J. A. Bolt, "Analysis and Digital Simulation of Carburetor Metering", SAE700082, 1970.
- (7) Robert W. Weeks, John J. Moskwa, "Transient Air Fuel Rate Estimation in a Natural Gas Engine Using a Nonlinear Observer", SAE940759.
- (8) John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Ch. 6, 1988, McGraw-Hill.
- (9) Robert L. Barkhimer and Hoi-Ching Wong, "Application of Digital, Pulse-Width-Modulated Sonic Flow Injectors for Gaseous Fuels", SAE951912, 1995.
- (10) 조진호, 최신기계열역학(SI단위제), 1998, 동명사, pp.54~74.