

기체연료 엔진에서 공연비제어를 위한 흡입공기량 추정

Estimation of Inlet Air Mass Flow for Air-Fuel Ratio Control of Gaseous-Fuel Engines

심 한섭*, 이강윤*, 선우명호**, 송창섭**
Hansub Sim, Kangyun Lee, Myoungho Sunwoo, Changeop Song

ABSTRACT

Highly accurate control of the air-fuel ratio is important to reduce exhaust gas emissions of the gaseous-fuel engines. In order to achieve this purpose, inlet air mass flow must be measured exactly, and precise engine models are necessary to design engine control systems.

In this paper, the effects of water vapor and gaseous fuel that change the air mass flow are studied. The effective air mass ratio is defined as the air mass flow divided by the mixture mass flow, and also it is applied to the estimation of the inlet air mass flow. The presence of the gaseous fuel and the water vapor in the mixture reduces the air partial pressure and the effective air mass ratio of the gaseous-fuel engines. The Experimental results for an LPG engine show that the estimation of the inlet air mass flow based upon the effective air mass ratio is more accurate than that of the normal air mass flow.

주요기술용어 : Gaseous-fuel engine(기체연료엔진), CNG(Compressed natural gas), LPG(Liquified petroleum gas), Air partial pressure ratio(공기분압비), Effective air mass ratio(유효공기질량비), Air mass flow model(공기량 모델), Estimation of inlet air mass flow(흡입공기량 추정)

Nomenclature

M	: 분자량
T	: 온도[K]
p	: 압력[Pa]
V	: 체적[m ³]
k	: 비열비[공기]=1.4]
R	: 기체상수[kJ/kg·K]

Subscripts

a	: 공기
f	: 연료
w	: 수분(수증기)
i	: 유입
o	: 유출
m	: 매니폴드
mix	: 혼합기
s	: 표준상태[273.15K, 101.325kPa]
j	: 혼합기체의 각 성분

* 회원, 한양대학교 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학부

1. 서 론

유해 배기ガ스를 저감시키기 위하여 정밀한 공연비 제어가 필수적이며, 이를 위해서는 엔진으로 유입되는 공기량의 정확한 측정과 제어 시스템 설계를 위한 모델링이 선행되어야 한다.

엔진으로 유입되는 흡입 공기량은 스로틀 개도, 매니폴드 압력, 연료의 종류, 공연비 및 연료분사방식 등에 크게 영향을 받는다. 가솔린과 같은 액체연료 엔진에서는 연료분사시에 기화열 흡수로 인한 흡입공기 밀도의 증가로 흡입 공기량이 증대되지만, 액화석유가스(LPG)와 압축천연가스(CNG) 등의 기체연료 엔진에서는 이러한 효과를 기대할 수 없다.¹⁾ 연료분사방식에 따른 흡입공기량은 다점분사(MPI)가 단점분사(SPI)식에서 보다 더 크게 나타난다. 이것은 다점분사방식에서는 연료가 고속으로 분사되어서 흡입공기의 유속을 증가시키기 때문이다.²⁾

공연비제어를 위한 흡입공기량 모델링은 주로 가솔린엔진을 대상으로 많이 연구되어 왔다.³⁾ Robert⁴⁾ 등은 기체연료를 사용하는 압축천연가스엔진에서 운전조건을 이론공연비로 가정하고, 공기분압(air partial pressure)을 이용하여 흡입공기량을 추정하는 방법에 관하여 연구하였다. 그러나 실제 엔진이 항상 이론공연비로 운전될 수 없으므로, 이론공연비가 아닌 경우에는 모델링의 정확성이 감소하게 된다. Anupam Gangopadhyay⁵⁾ 등은 천연가스엔진의 흡입 공기량 모델링에서 공기중에 포함된 수분(water vapor)의 영향은 려하지 않고, 단순히 연료와 공기의 합으로 가정하였다. 그러나 실제 흡입 공기중에는 어느 정도의 수분이 포함되어 있으므로 수분이 점유하는 양만큼 흡입공기량이 변

화된다.

이 연구에서는 기체연료 엔진에서 혼합기 속에 공존하는 연료와 수분에 의한 흡입공기량 증감에 대한 고찰과 이들의 영향을 고려한 흡입공기량 추정 관계식을 제시하고자 한다.

2. 공기량에 대한 연료와 수분의 영향

2.1 공기-연료 혼합기 형성

스로틀 전면에서 분사된 기체연료는 Fig. 1과 같이 믹서에서 혼합기를 형성하고 스로틀을 통하여 엔진 내부로 유입된다. 이때 공기와 연료는 스로틀 전면의 믹서에서 균일하게 혼합되어 매니폴드로 유입된다고 가정할 수 있다.

매니폴드 내부의 혼합기량은 질량보존법칙으로부터 다음 식(2-1)과 같이 유입량과 유출량의 차이로 표시할 수 있다.

$$\dot{m}_{mix,m} = \dot{m}_{mix,i} - \dot{m}_{mix,o} \quad (2-1)$$

그리고, 매니폴드로 유입 및 유출되는 혼합기량은 일반적으로 다음 식(2-2)과 같이 공기, 공기 중에 포함된 수분, 그리고 분사된 연료의 합으로 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_{mix} = \dot{m}_a + \dot{m}_w + \dot{m}_f \quad (2-2)$$

2.2 매니폴드에서 공기 분압비

매니폴드 전체 압력은 Dalton의 법칙으로부터, 식(2-3)과 같이 공기분압, 수분분압 및 연료분압의 합으로 표시할 수 있다.

$$p_m = p_a + p_w + p_f \quad (2-3)$$

공기, 수분 및 연료의 혼합기체를 이상기체

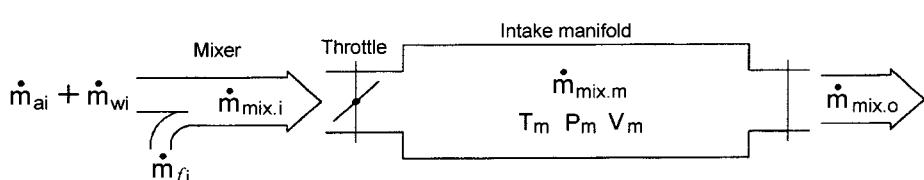


Fig. 1 Mixing process of air and LPG in an intake system

로 가정하면 다음 식(2-4)와 같이 각 성분기체(j)에 대한 기체방정식이 성립된다.

$$p_j V_m = m_j R_j T_m \quad (2-4)$$

각각의 공기, 수분 및 연료에 대한 분압은 혼합기체에 대한 이상기체방정식(2-4)으로부터 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$p_a = \frac{m_a R_a T_m}{V_m} \quad (2-5)$$

$$p_w = \frac{m_w R_w T_m}{V_m} \quad (2-6)$$

$$p_f = \frac{m_f R_f T_m}{V_m} \quad (2-7)$$

공기분압비는 매니폴드 전체압력에 대하여 순수공기 만의 압력비율을 의미하며¹⁾, 그 값은 공기과잉률에 따라 변화된다. 공기분압비는 각 성분들의 분압관계인 식(2-5), 식(2-6) 및 식(2-7)과 일반기체상수관계식($\bar{R} = M_i R_i$), 그리고 공기과잉률(λ)에 대한 관계식(2-8)으로부터, 다음 식(2-9)와 같이 유도할 수 있다. 여기서 이론 공연비는 $(A/F)_S$ 로 표시한다.

$$\frac{m_f}{m_a} = \frac{1}{\lambda (A/F)_S} \quad (2-8)$$

$$\frac{p_a}{p_m} = \left(1 + \frac{m_w M_a}{m_a M_w} + \frac{1}{\lambda (A/F)_S} \frac{M_a}{M_f} \right)^{-1} \quad (2-9)$$

식(2-9)에서 공기분압비는 공기과잉률이 증가할 수록 커지고, 분자량이 큰 기체일 수록 공기분압비에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

엔진의 운전 중에 공연비는 자주 변화되나, 공기 중에 포함된 수분은 기후 또는 실험실 환경에 의존하므로 변화가 상대적으로 매우 적다. 대부분의 실제 자동차의 공연비 제어시스템에서 대기중의 수분의 영향은 고려되지 않고 있다. 이 경우 대기 중에 포함된 수분의 함량을 고려하지 않으면($m_w = 0$) 식(2-10)과 같이 매니

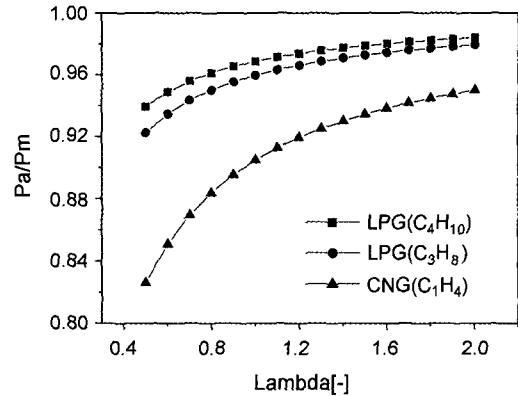


Fig. 2 Air partial pressure ratio vs Lambda

폴드 압력은 공기분압과 연료분압의 합으로 표시되고, 공기분압비는 식(2-10)과 같이 공기과잉률의 함수로 표현할 수 있다.

$$p_m = p_a + p_f, \quad p_w = 0 \quad (2-10)$$

$$\frac{p_a}{p_m} = \left(1 + \frac{1}{\lambda (A/F)_S} \frac{M_a}{M_f} \right)^{-1} \quad (2-11)$$

Fig. 2는 CNG와 LPG 연료에 대한 공기분압비를 그래프로 나타낸 것이다. 이때 수분의 영향은 고려하지 않았다. 이론공연비에서 CNG의 분압비는 0.90, LPG의 분압비는 약 0.96~0.97로 감소하였다. 이것은 혼합기 속에 존재하는 연료의 분압 만큼 공기분압이 감소하기 때문이다.

2.3 흡입공기의 유효공기질량비

매니폴드로 유입되는 혼합기는 공기, 수분 및 연료로 구성된 혼합기체이다. 이 연구에서는 전체 혼합기량 중에서 순수한 공기만의 질량비율을 유효공기질량비(effective air mass ratio)로 표시하였으며, 식(2-12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{m_a}{m_{mix}} = \frac{m_a}{m_a + m_w + m_f} \quad (2-12)$$

이상기체방정식(2-4)으로부터 공기, 수분 및 연료에 대한 질량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_a = \frac{p_a V_m}{R_a T_m} \quad (2-13)$$

$$m_w = \frac{p_w V_m}{R_w T_m} \quad (2-14)$$

$$m_f = \frac{p_f V_m}{R_f T_m} \quad (2-15)$$

위의 각 성분에 대한 질량 관계식(2-13~15)을 유효공기질량비 식(2-12)에 대입하여 정리하고, 일반기체상수에 관한 관계식($\bar{R} = M_i R_i$)으로부터, 유효공기질량비는 다음 식(2-16)과 같이 유도된다.

$$\frac{m_a}{m_{mix}} = \left(1 + \frac{p_w}{p_a} \frac{M_w}{M_a} + \frac{p_f}{p_a} \frac{M_f}{M_a} \right)^{-1} \quad (2-16)$$

실제 자동차에서는 수분의 영향을 고려하는 경우는 거의 없으므로, 수분의 질량을 무시하면 혼합기의 질량은 식(2-17)과 같이 공기량과 연료량의 합으로 나타낼 수 있다. 이 경우 유효공기질량비는 식(2-18)과 같이 공기분압비의 함수로 표현할 수 있다.

$$m_{mix} = m_a + m_f, \quad m_w = 0 \quad (2-17)$$

$$\frac{m_a}{m_{mix}} = \left[1 + \left\{ \left(\frac{p_a}{p_m} \right)^{-1} - 1 \right\} \frac{M_f}{M_a} \right]^{-1} \quad (2-18)$$

Fig. 3은 공기과잉률에 대한 CNG와 LPG의 유효공기질량비를 나타내었으며, 이때 수분의 영향은 고려하지 않았다($m_w = 0$). 공기과잉률

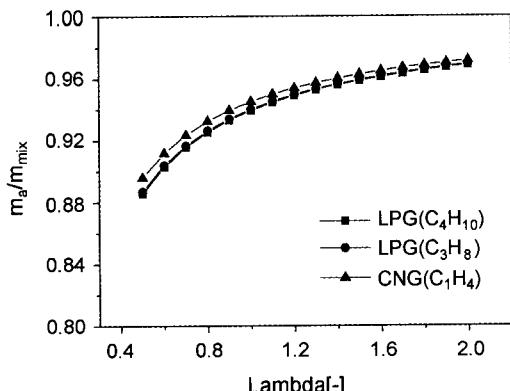


Fig. 3 Effective air mass ratio vs Lambda

이 감소할수록 유효공기질량비가 작아지며, 식(2-16) 및 식(2-18)과 같이 분자량이 큰 기체일수록 유효공기질량비가 감소됨을 알 수 있다. 이론공연비에서 CNG의 유효공기질량비는 0.939, LPG의 유효공기질량비는 0.940~0.945로 감소됨을 알 수 있다.

이 결과로 기체연료엔진에서 혼합기속에 공존하는 연료에 의해 흡입 공기량이 감소되며, 이로 인하여 엔진 출력력이 저하된다. 이를 보정하기 위하여 LPG 엔진에서는 액체연료분사(Liquid fuel injection)방식이 연구되고 있으며,⁶⁾ 대형 CNG 엔진에서는 과급기(turbo charger)를 사용하여 흡입공기량을 증가시키는 방법이 효율적이다.

3. 흡입 공기량 추정

기체연료에 의한 흡입공기량 감소효과를 고려하여 유효공기질량비를 적용한 흡입공기량 추정관계식은 식(3-1)과 같이 나타낸다.

$$\dot{m}_{ai} = C_D C_{th} \dot{m}_{aMAX} F_{PR} F_T F_P F_{wf} \quad (3-1)$$

각각의 계수에 대한 설명은 다음과 같다.⁷⁾

스로틀의 유량계수(Discharge coefficient: C_D)는 이론유량에 대한 실제유량의 비율이므로 실험으로부터 식(3-2)와 같이 구할 수 있으며,

$$C_D = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (3-2)$$

스로틀 특성(Throttle characteristics: C_{th})은 최대 유효면적(스로틀이 최대로 열렸을 경우)에 대한 임의의 스로틀 각도에서의 공기가 통과하는 유효면적의 비율로 식(3-3)과 같이 표현된다.

$$C_{th}(\theta) = \frac{A_T(\theta)}{A_T(\theta_{max})} \quad (3-3)$$

최대 공기량 \dot{m}_{aMAX} 은 표준상태(p_s, T_s)에서 스로틀이 최대로 열렸을 때, 그리고 유속이 초음속(sonic flow, $PR \leq 0.528$)일 경우에 스로틀을

통해 유입되는 공기량으로 식(3-4)와 같다.

$$\dot{m}_{aMAX} = \frac{A_T(\theta_{max}) p_s}{\sqrt{R_a T_s}} \Phi^* \quad (3-4)$$

압력비계수(Pressure ratio factor)는 식(3-5)과 같이 스로틀 전후의 압력비가 흡입공기량에 미치는 영향을 나타내는 계수이다.

$$F_{PR} = \begin{cases} \frac{\Phi}{\Phi^*} & R_p > 0.528 \\ 1 & R_p \leq 0.528 \end{cases} \quad (3-5)$$

$$\Phi = \left[\left(\frac{2k}{k-1} \right) \left(R_p^{\frac{2}{k}} - R_p^{\frac{k+1}{k}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

압력비(Pressure ratio: R_p)는 매니폴드 압력 (p_m)을 대기압력(p_0)으로 나눈 값으로 식(3-6)과 같으며,

$$R_p = \frac{p_m}{p_0} \quad (3-6)$$

공기온도 보정계수는 표준상태의 온도에 대한 흡입공기의 실제온도의 제곱근으로 다음 식(3-7)로 표시되며,

$$F_T = \frac{\sqrt{T_s}}{\sqrt{T_0}} \quad (3-7)$$

대기압력 보정계수는 대기압력을 표준대기압으로 나눈 것으로 다음 식(3-8)과 같이 표현된다.

$$F_P = \frac{p_0}{p_s} \quad (3-8)$$

기체연료 엔진에서 혼합기 중에 포함된 수분 및 연료에 의해 흡입공기량이 변화되며, 이에 대한 보정계수는 다음 식(3-9)과 같이 표현하였고, 이보정계수는 유효공기질량비와 같다.

$$F_{wf} = \frac{m_a}{m_{mix}} = \left(1 + \frac{p_w}{p_a} \frac{M_w}{M_a} + \frac{p_f}{p_a} \frac{M_f}{M_a} \right)^{-1} \quad (3-9)$$

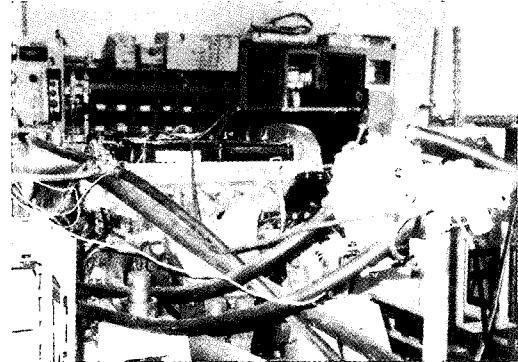


Fig. 4 Photograph of experimental setup

4. 실험 장치 및 방법

이 논문에서 제시한 유효공기질량비에 의한 흡입 공기량 추정 관계식의 정확성 검증을 위한 실험은 LPG 엔진(직렬 4기통, 2000cc)에서 수행되었다. Fig. 4는 이 실험에서 사용된 LPG 엔진과 이와 관련된 시험장치들을 보여주고 있다.

정상 운전상태에서의 엔진실험은 엔진동력계를 사용하여 매니폴드압력을 0.3~0.9bar 범위에서, 그리고 엔진 회전수는 1500~3500rpm까지 500rpm씩 단계적으로 변화시키면서 시험하였다. 과도 운전상태에서는 엔진의 회전수를 2000 rpm으로 유지하도록 하고, 스로틀을 개폐(tip-in tip-out)시 시험을 수행하였다. 정상 운전상태 및 과도 운전상태 엔진시험에서 흡입공기량 추정을 위하여 스로틀각도, 매니폴드압력, 흡입공기량, 엔진회전수 등을 측정하였으며, 측정데이터의 입력은 한양대에서 설계·제작한 엔진제어 시스템을 이용하였다.⁸⁾

5. 실험 결과

5.1 정상상태 운전 실험

Fig. 4는 스로틀 특성(C_{th})을 나타낸 것으로, 식(3-3)을 그래프로 나타낸 값이다. 스로틀이 완전히 닫혔을 때의 offset각도는 5°이며, 80°이후부터 유효면적이 증가하지 않는 것은 스로틀 플레이트가 스로틀 축과 중첩되기 때문이다.

Fig. 5는 스로틀 각도와 메니폴드 압력 변화에 대한 유량계수(C_D)를 표시하였다. 스로틀 각도가 30° 이하인 저부하 영역에서는 유량계수는 대부분 0.8~1.0 사이에 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 엔진 조건에 대한 흡입 공기량 측정값이며, 열선식 질량유량센서(Hitachi AFH 70-14)를 사용하였다. 공기량은 각각의 엔진 회전수에 대하여 메니폴드 압력의 변화에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 실제 측정한 공기량과 유효공기질량비를 고려하지 않은 흡입공기량 추정값($F_{wf} = 1.0$)과의 오차를 나타내었다. 오차는 최소 0.4 g/s에서 최대 46.5g/s로 매니폴드 압력의 증가에 따라 비례적으로 증가함을 보이고 있다.

Fig. 8은 정상상태에서 실제 측정한 공기량과

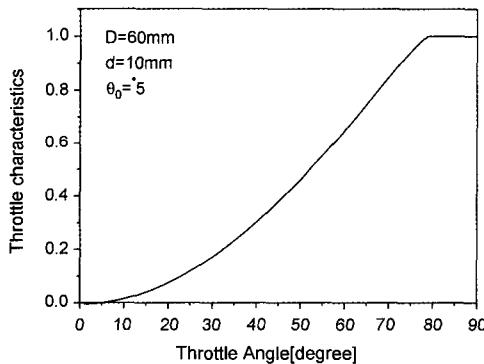


Fig. 4 Throttle characteristics(C_{th})

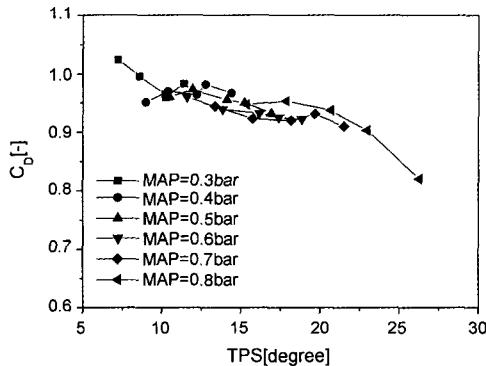


Fig. 5 Discharge coefficient(C_D)

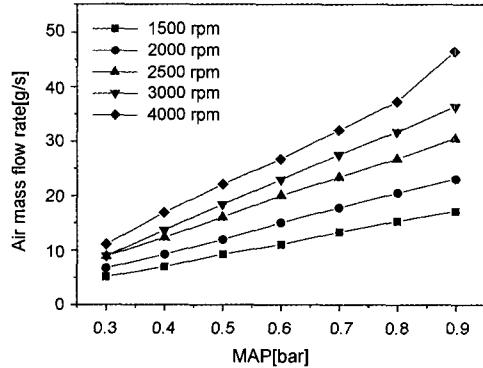


Fig. 6 Air mass flow sensor output vs MAP

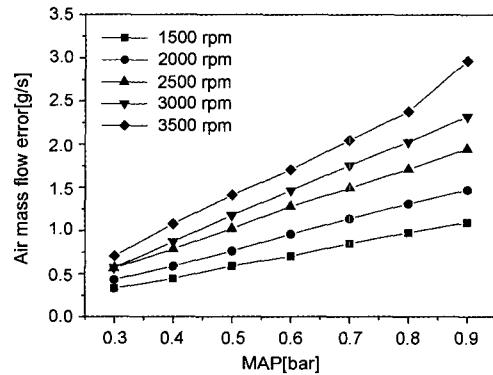


Fig. 7 Air mass flow error vs MAP at $F_{wf}=1.0$

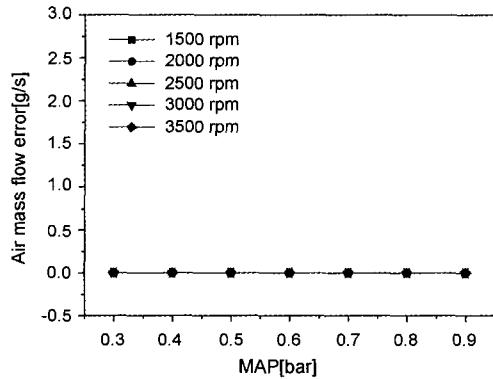


Fig. 8 Air mass flow error vs MAP at $F_{wf}=0.94$

유효공기질량비를 고려한 흡입공기량 추정값($F_{wf} = 0.94$)에 대한 오차(평균값)를 표시하였다. 이때, 추정값에는 실험값으로부터 계산된 유량계수(C_D)가 사용되었으므로, 추정값과 실제

측정값이 유사하여 오차가 아주 극소하였다.

5.2 과도 운전상태 실험

엔진의 과도 운전상태 실험을 위하여 Fig. 10과 같이 스로틀을 열고, 약 15초 경과하여 스로틀을 닫는다.

과도 운전상태에서 엔진회전속도 변화는 Fig. 11에 보여주는 것과 같이, 엔진동력계의 속도 제어 기능의 문제로 스로틀 개폐시에 약간의 변동이 있으며, 그 외의 구간에서는 2000rpm으로 정속운전되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 과도상태에서의 매니폴드 압력 변화이며, 스로틀 각도가 17°로 증가된 구간에서 매니폴드 압력은 0.48bar에서 0.75bar로 상승되었다.

Fig. 13은 공기파인률(Lambda)의 변화량이며,

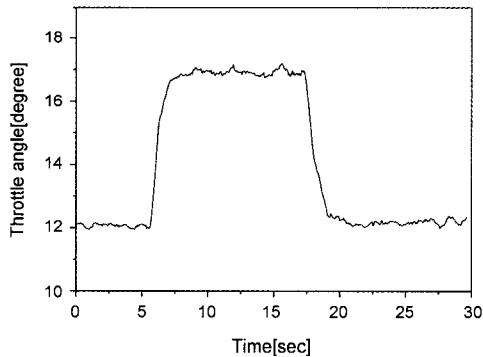


Fig. 10 Throttle angle change for transient test

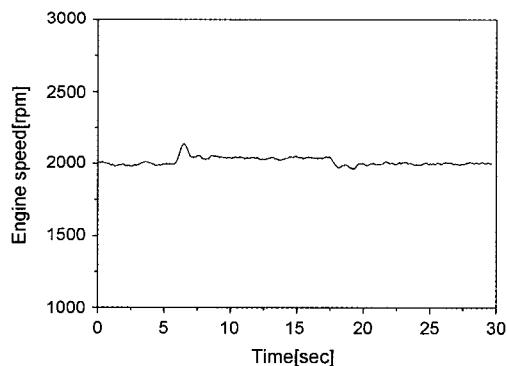


Fig. 11 Engine speed during tip-in tip-out

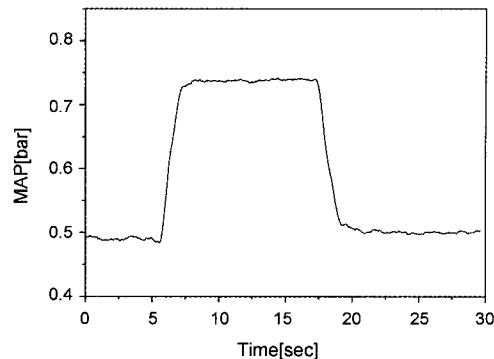


Fig. 12 MAP during the transient test

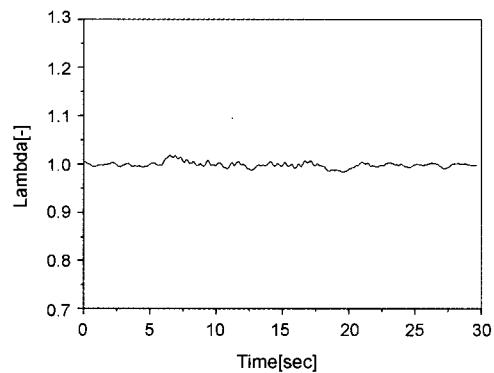


Fig. 13 Lambda change during the transient test

오차는 ± 0.03 이내로 이론공연비 부근에서 정확히 제어되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 3가지의 흡입공기량을 보여준다. 첫째는 실제 측정한 흡입공기량(measured)이며, 둘째는 유효공기질량비를 고려하지 않았을 때의 흡입공기량 추정값($F_{wf} = 1.0$)을 나타내고, 세 번째는 유효공기질량비에 의한 흡입공기량 추정값($F_{wf} = 0.94$)을 보여준다. 유효공기질량비를 고려하지 않은 흡입공기량 추정값은 13.2 g/s에서 22.7g/s로 증가하여, 측정한 흡입공기량 값과 많은 차이를 보이고 있으나 유효공기질량비를 고려한 흡입공기량 추정값은 실제측정값과 일치하여 흡입공기량 추정을 정확히 함을 알 수 있다.

Fig. 15는 Fig. 14에 얻어진 흡입공기량의 추정치와 실제 측정한 값과의 오차를 보여준다.

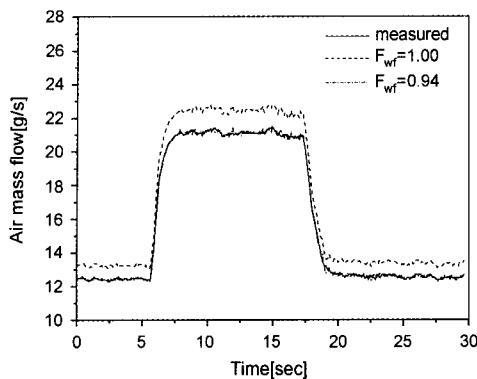


Fig. 14 Air mass flow during the transient test

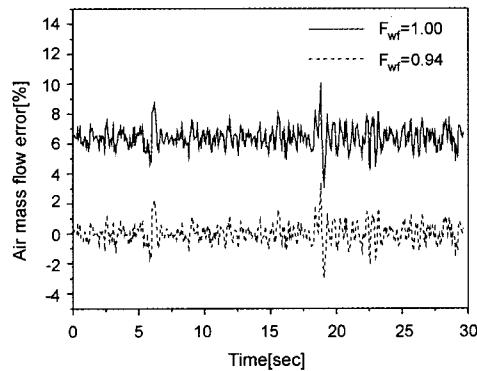


Fig. 15 Air mass flow error during the transient test

유효공기질량비를 고려하지 않은 흡입공기량 추정값($F_{wf}=1.0$)의 오차범위는 3%~10%로 매우 크게 나타났으며, 오차들의 평균값은 약 6.5% 정도로서 연료에 의한 흡입공기량 감소비율인 0.06(1.0-0.94)과 유사하다. 유효공기질량비에 의한 흡입공기량($F_{wf}=0.94$) 추정값의 오차는 ±3% 이내로서, 흡입공기량 추정이 상대적으로 정확함을 보여주고 있다.

6. 결 론

기체 액화석유가스 및 압축천연가스 등과 같은 기체연료를 사용하는 엔진에서 정확한 흡입공기량 추정을 위하여, 유효공기질량비에 의한 흡입공기량 추정식을 소개하고, 이 추정식을 검증하기 위한 LPG 엔진 실험을 통하여 얻어진

주요 결론은 다음과 같다.

1) 엔진으로 유입되는 혼합기 중에 포함된 연료와 수분의 영향을 전체 혼합기량에 대한 순수한 공기량의 비율인 유효공기질량비로 나타내었다.

2) 유효공기질량비를 흡입공기량 관계식에 적용함으로써, 기체연료 엔진에서 보다 정확한 흡입공기량 추정이 가능함을 알 수 있었다.

3) 유효공기질량비를 고려한 흡입공기량 추정의 정확성을 검증하기 위하여 기체연료 엔진 시험을 통하여, 정상 운전상태 시험에서는 유효공기질량비를 고려하지 않은 흡입공기량 추정값($F_{wf}=1.0$)과 실제 측정값의 오차가 매니폴드 압력에 따라 증가함을 보였으며, 유효공기질량비에 의한 흡입공기량 추정값($F_{wf}=0.94$)과 실제 측정값과의 오차는 전 구간에 걸쳐서 거의 무시할 정도이다. 뿐만 아니라 과도 운전 상태 시험에서도 유효공기질량비를 고려하지 않은 흡입공기량($F_{wf}=1.0$) 추정값과 실제 측정값과의 오차는 3%~10%로 크게 나타났으나, 유효공기질량비에 의한 흡입공기량($F_{wf}=0.94$) 추정값과 실제 측정값과의 오차는 ±3% 이내로 감소함을 알 수 있었다.

이 결과들로부터 유효질량비에 의한 흡입공기량 추정식이 기체연료엔진에서 흡입공기량을 계산하는데 더 효과적임을 알 수 있었으며, ○관계식은 정밀한 공연비제어를 위한 엔진모델링 작업에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 청정생산기술개발사업(한국생산기술연구원)의 연구비로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.

- 2) R. L. Barkhimer and H.-C. Wong, Application of Digital, "Pulse-Width-Modulated Sonic Flow Injectors for Gaseous Fuels", SAE 951912, 1995.
- 3) D. Cho and J. K. Hedrick, "Automotive Powertrain Modeling for Control", Transactions of the SAE, Vol.111, 1989.
- 4) R. W. Weeks and J. J. Moskwa, "Transient Air Fuel Rate Estimation in a Natural Gas Engine Using a Nonlinear Observer", SAE 940759, 1994.
- 5) A. Gangopadhyay and P. Meckl, "Modeling, Validation and System Identification of a Natural Gas Engine", Proceedings of the American Control Conference Albuquerque, New Mexico, 1997.
- 6) S. Ir. R, "An Experimental and Theoretical Study of Liquid LPG Injection", SAE 922363, 1992.
- 7) 심한섭, 선우명호, "LPG 엔진 모델링 및 ECM 설계에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 제7권 제9호, pp.1-9, 1999.
- 8) 윤팔주, 김명준, 선우명호, "크랭크각 기준의 엔진 어시스템 설계·제작에 관한 연구", 한국 자동차공학회 논문집 제6권 제4호, pp.198-210, 1998.
- 9) D. L. Harrington and J. A. Bolt, "Analysis and Digital Simulation of Carburetor Metering", SAE700082, 1990.
- 10) 김석주, "FBM 방식 LPG 엔진의 전자 제어에 관한 연구", 한양대학교 석사학위 논문, 1997.
- 11) M. A. Shariati, J. Iqbal and H. Servati, "Discrete PI Control Algorithm for HEGO-based Closed Loop Control", SAE970616, 1997.
- 12) J. S. Hepburn, "A Comparison between the Combustion of Isooctane, Methanol, and Methane in Pulse Flame combustors with Closed Loop A/F control", SAE 920799, 1992.