

# 혼합기 형성-유입과정을 고려한 천연가스엔진 모델링 연구

심한섭\*

## A Study of on a Natural Gas Engine Modeling for Mixture formation and Intake Process

Han-Sub Sim\*

(Received 25 May 2009; received in revised form 15 September 2009; accepted 16 September 2009)

### ABSTRACT

Development of a dynamic engine model is essential to predict and analyze of dynamic characteristics from a natural gas engine. Reducing the harmful exhaust emissions can be accomplished by a precise air-fuel ratio control. In this paper, the dynamic engine model was proposed and included mixture formation and intake process because the dynamic characteristics can be affected by the mixture components such as an air and a gaseous fuel. The air mass flow, the partial pressure ratio, and the gas constant are changed by variations of the components in the mixture formation and intake process. The dynamic engine model is applied to the natural gas engine for validation test. Experimental results show that the dynamic engine model is effective to predict the dynamic characteristics of the natural gas engine.

**Key Words** : Engine Model(엔진모델), Natural Gas(천연가스), Mixture(혼합기), Air-Fuel Ratio (공연비)

### 1. 서 론

천연가스는 연소특성이 우수하고 유해가스 배출이 적어 대형상용차량의 대체연료로 많이 사용되고 있다<sup>[1~2]</sup>. 천연가스엔진 연소과정은 불꽃점화에 의해 진행되므로 가솔린 엔진과 유사한 점이 많으나, 연료분사-혼합기 형성-유입과정에서 많은 차이가 있다.

천연가스엔진의 동특성과 제어시스템 모델링에 대한 연구에는 내연기관 연소시스템이 유사한 가솔린 엔진에서의 연구결과들이 많이 활용되었다<sup>[3~6]</sup>. 이러

한 연구들은 공연비 운전조건을 이론공연비로 가정하거나 상당분자량( $M_{eq}$ )을 도입한 모델링을 통하여 엔진 동특성을 예측하고자 하였다. 이와 달리, 실제 엔진에서는 공연비가 일정하지 않으며, 혼합기 성분 상호간에 영향을 미친다. 이 경우에 공기-연료로 구성된 혼합기의 기체상수, 공기 및 연료분압비, 흡기 매니폴드압력, 흡입 공기량 등이 달라질 수 있다.

따라서, 이 연구는 대형 천연가스엔진에서 혼합기를 구성하는 기체(공기, 연료) 상호간의 증감이 엔진의 동특성에 영향을 미치므로, 혼합기 형성 및 유입과정에서 각 성분의 영향을 고려한 엔진모델을 제시하였다. 또한, 천연가스엔진을 대상으로 실험을 통하여 이 논문에서 제시한 모델의 예측값과 실험값을 비교하여 모델의 정확성을 검증하고자 하였다.

\* 진주산업대학교 자동차공학과

\* 교신저자 : E-mail : hansub@jinju.ac.kr

## 2. 혼합기 형성 및 유입과정

### 2.1 혼합기 형성과 공연비 결정

대형 상용차량에 적용되는 천연가스엔진에서는 실린더별 공연비 불균형을 해소하기 위하여 Fig. 1 과 같은 SPI(single point injection)-system의 혼합기 형성 및 흡입장치가 적용되고 있다. 공기는 스로틀 전면에 있는 ①믹서에서 연료와 혼합기를 형성한다. 혼합기는 ②흡기공기유도관-③스로틀-④흡기매니폴드로 유입되며, 싸이클 순서에 따라 여러 개의 실린더로 순차적으로 나누어져 분배된다.

Fig. 2는 SPI-system에서 혼합기 형성 및 유입 과정으로부터 수학적 모델을 유도하기 위하여 Fig.1을 단순화하여 간략하게 나타낸 모형도이다. Fig. 2로부터 스로틀 전면에 있는 믹서에서 공기와 천연가스 연료가 혼합기를 형성하므로, 스로틀을 통과하여 흡기매니폴드로 유입되는 혼합기량은 다음과 같이 공기와 연료의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{mix,i} = \dot{m}_{a,i} + \dot{m}_{f,i} \quad (1)$$

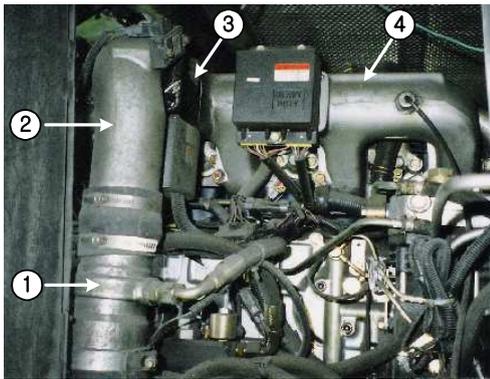


Fig. 1 Air intake and mixture formation system on a CNG-engine

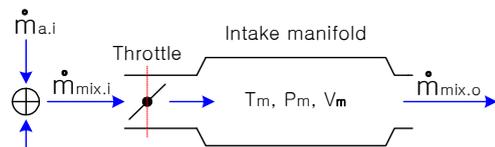


Fig. 2 Mixture formation and intake process

SPI-system에서는 흡기포트분사(PFI) 또는 실린더 내 직접분사(DI) 장치들과 달리 혼합기 형성되는 과정에서 공기와 연료의 질량비에 의하여 공연비가 결정되어야 한다. 따라서 SPI-system의 천연가스엔진에서 공연비는 다음 식(2)와 같이 흡입 공기량과 연료분사량으로부터 계산되어야 한다.

$$\left[ \frac{A}{F} \right]_{SPI} = \frac{\dot{m}_{a,i}}{\dot{m}_{f,i}} \quad (2)$$

### 2.2 스로틀을 통과하는 혼합기 유입량

흡기포트분사 또는 직접분사 장치들에서는 공기만이 스로틀을 통과한다고 가정하고 공기유입량을 추정하는 것이 일반적이지만, SPI-system에서 스로틀을 통과하는 공기-연료로 구성된 혼합기량은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$\dot{m}_{mix,i} = C_D \frac{A_T(\alpha) p_{mix,i}}{\sqrt{R_{mix} T_{mix}}} \cdot \Phi_{PR} \quad (3)$$

위 식(3)에서 스로틀 유량계수( $C_D$ )는 스로틀 각도( $\alpha$ )와 압력비( $p_m/p_{mix,i}$ )에 대한 함수이며 실험을 통하여 구할 수 있다.  $A_T(\alpha)$ 는 임의의 스로틀 각도( $\alpha$ )에서 기체가 통과하는 유효단면적이다.

스로틀을 통과하는 혼합기량은 스로틀 각도가 일정하더라도 압력조건에 따라 달라지므로, 압력비 영향계수(pressure ratio influence factor:  $\Phi_{PR}$ )는 스로틀 입구와 출구의 압력조건에 따라 다음 식(4)과 같은 식이 사용되어 진다.

$$\Phi_{PR} = \left[ \left( \frac{2k}{k-1} \right) \left\{ \left( \frac{p_m}{p_{mix,i}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_m}{p_{mix,i}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

(subsonic flow)

$$\Phi_{PR}^* = \left[ k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

(sonic flow)

아음속과 초음속으로 구분되는 임계 압력비(critical pressure ratio)는 다음 식(6)과 같이 입구와 출구의 압력조건에 따라 결정된다.

$$\frac{p_m}{p_{mix,i}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (6)$$

공기-천연가스 혼합기체에 대한 압력비영향계수는 압력비가 감소할수록 즉, 흡기매니폴드압력이 감소할수록 압력비영향계수가 증가하는 경향을 보이며, 초음속 조건에서는 압력비에 대한 영향이 없음을 알 수 있다.

공기-천연가스연료로 구성된 혼합기체의 기체상수( $R_{mix}$ )는 각 성분의 기체상수에 질량비를 곱하여 다음과 같이 구할 수 있다. 상대공연비( $\lambda$ )는 이론공연비( $[A/F]_s$ )에 대한 실제공연비이며, 상대공연비로 적용하여 표시할 수도 있다.

$$R_{mix} = \frac{m_a}{m_{mix}} R_a + \frac{m_f}{m_{mix}} R_f \quad (7)$$

$$= R_a \left( 1 + \lambda \left[ \frac{A}{F} \right]_s \frac{R_f}{R_a} \right) \frac{m_a}{m_{mix}}$$

### 2.3 흡입공기량 추정

스로틀을 통과하여 흡기매니폴드로 유입되는 혼합기는 공기와 연료로 구성되어 있으므로, 흡입공기량은 연료가 점유하는 양 만큼 감소된다. 따라서 흡입 공기량은 다음 식(8)과 같이 전체 혼합기량에서 연료량을 제외하여 추정할 수 있다.

$$\dot{m}_{a,i} = \dot{m}_{mix,i} - \dot{m}_{f,i} \quad (8)$$

$$= \dot{m}_{mix,i} \left( 1 + \frac{1}{\lambda_i} \left[ \frac{F}{A} \right]_s \right)^{-1}$$

위 식으로부터 전체 혼합기량에 대한 공기량의 비율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\dot{m}_{a,i}}{\dot{m}_{mix,i}} = \left( 1 + \frac{1}{\lambda_i} \left[ \frac{F}{A} \right]_s \right)^{-1} \quad (9)$$

### 2.4 연료 분사량 추정

인젝터를 이용한 기체연료의 분사에서는 분사압력이 일정한 경우에, 인젝터가 설치된 흡입공기 유도관 또는 흡기포트 내부의 분사출구의 압력이 변화되어도 연료분사량의 변화가 없는 초음속 조건이 되도록 분사압력을 설정할 필요가 있다. 초음속 분사조건에서 인젝터 분사출구가 완전히 열려있는 동안에 분사되는 기체연료의 정적분사량(static injection flow)은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{f,i} = C_D \frac{A_{inj} p_{f,ini}}{\sqrt{R_f T_f}} \cdot \Phi_{PR}^* \quad (10)$$

압력비영향계수( $\Phi_{PR}^*$ )는 식(5)과 유사한 형태이며, 초음속조건에서는 압력비에 관한 변수가 없으므로 압력비가 변하더라도 항상 일정한 값을 갖는다. 그러므로, 초음속조건에서 정적분사량은 분사압력에 비례하며, 출구압력의 변동에 영향을 받지 않으므로 분사량을 정밀하게 제어하는데 매우 효과적이다. 그러나, 위 식(10)은 인젝터가 지속적으로 열려있는 동안에 분사되는 가스연료의 정적분사량이므로 실제로 인젝터가 고속으로 ON/OFF 동작을 반복하면서 연료를 분사하는 동적분사량(dynamic injection flow)과는 차이가 있다<sup>[8-9]</sup>.

인젝터의 가스분사량은 분사교정시험(calibration test)<sup>[9]</sup>을 통하여 얻은 동적분사량에 분사압력, 가스온도, 구동전압 등의 변화를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{f,i} = \dot{m}_{f,cal} \cdot F_p \cdot F_T \cdot F_V \quad (11)$$

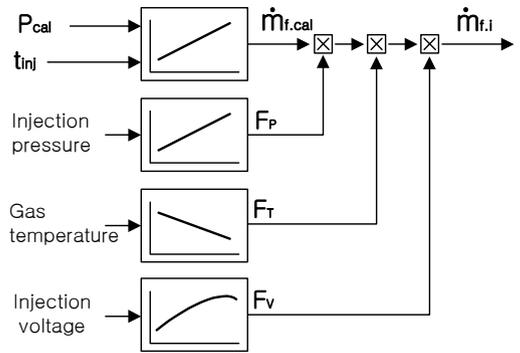


Fig. 3 Block diagram for calculation of the gas injection flow

Fig. 3는 인젝터의 연료분사량 추정과정을 나타낸 식(11)을 블록선도로 나타낸 것이다. 동적분사량( $\dot{m}_{f,cal}$ )은 일정한 압력, 온도, 구동전압 하에서 교정시험을 통하여 구한 값이다. 압력보정계수( $F_p$ )와 온도보정계수( $F_T$ )는 실험을 통하여 구할 수도 있으며, 여기에서는 식(12)와 식(13)을 이용하였다. 구동전압 보정계수( $F_V$ )는 실험으로부터 구할 수 있으며, 구동전압( $V_{inj}$ )을 변화시키면서 측정한다.

연료분사량을 일정한 전압( $V_{cal}$ )에서의 연료 분사량으로 나누어 구한 값이다. 각각의 보정계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_p = \frac{p_{f,i}}{p_{f,cal}} \quad (12)$$

$$F_T = \sqrt{\frac{T_{f,cal}}{T_{f,i}}} \quad (13)$$

$$F_V = \frac{\dot{m}_{f,i}(V_{ini})}{\dot{m}_{f,i}(V_{cal})} \quad (14)$$

### 3. 흡기매니폴드압력 동특성

#### 3.1 공기분압의 추정

흡기매니폴드의 압력은 일정한 공간 안에 있는 혼합기체의 양에 의하여 결정되므로 Dalton의 분압(partial pressure)법칙에 의하여 공기와 연료의 분압의 합으로 표현된다. 또한, 이상기체방정식으로부터 공기와 연료의 분압을 표시할 수도 있다<sup>[10]</sup>.

$$p_m = p_a + p_f \quad (15)$$

$$= \frac{m_a R_a T_m}{V_m} + \frac{m_f R_f T_f}{V_m}$$

따라서, 흡기매니폴드 내부에서 매니폴드압력과 공기분압은 일치하지 않으며, 공기와 혼합기의 분압비를 구해보면 다음과 같다.

$$\frac{p_a}{p_m} = \frac{p_a}{p_a + p_f} \quad (16)$$

$$= \left(1 + \lambda_m \left[\frac{A}{F}\right]_s \frac{R_f}{R_a}\right)^{-1}$$

또한, 식(7)을 정리하여 식(16)에 대입하면, 질량비, 분압비, 기체상수비는 다음과 같은 관계에 있다. 이때, 흡기매니폴드 내부의 혼합기는 공기와 연료가 균일하게 섞여서 공기와 연료의 온도는 같다고 가정할 수 있다. ( $T_{mix,m} \cong T_{a,m} \cong T_{f,m}$ )

$$\frac{p_a}{p_m} = \frac{m_a}{m_{mix}} \frac{R_a}{R_{mix}} \quad (17)$$

혼합기체가 유입되어 있는 흡기매니폴드 내부에서 각각의 공기분압 또는 연료분압을 직접 측정하는 것은 매우 곤란하다. 따라서, 위 식(16)으로부터 공기분압을 추정하면 식(18)과 같다. 같은 방법으

로 연료분압은 식(19)과 같이 추정하여 계산할 수 있다.

$$p_a = p_m \left(1 + \lambda_m \left[\frac{A}{F}\right]_s \frac{R_f}{R_a}\right)^{-1} \quad (18)$$

$$p_f = p_m \left(1 + \lambda_m \left[\frac{A}{F}\right]_s \frac{R_a}{R_f}\right)^{-1} \quad (19)$$

#### 3.2 흡기 매니폴드 압력 동특성

흡기매니폴드 내부의 혼합기 변화량은 질량보존 법칙으로부터 다음 식(20)과 같이 유입량과 유출량의 차이로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{mix,m} = \dot{m}_{mix,i} - \dot{m}_{mix,o} \quad (20)$$

흡기매니폴드 내부에서 공기량과 연료량은 혼합기량 중에서 공기 또는 연료가 점유한 만큼 감소하므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{m}_{a,m} = \dot{m}_{mix,m} - \dot{m}_{f,m} \quad (21)$$

$$= \dot{m}_{mix,m} \left(1 + \frac{1}{\lambda_m} \left[\frac{F}{A}\right]_s\right)^{-1}$$

$$\dot{m}_{f,m} = \dot{m}_{mix,m} - \dot{m}_{a,m} \quad (22)$$

$$= \dot{m}_{mix,m} \left(1 + \lambda_m \left[\frac{A}{F}\right]_s\right)^{-1}$$

흡기매니폴드 압력의 상태방정식은 혼합기량에 대한 이상기체방정식을 미분함으로써 구할 수 있다. 흡기매니폴드 내부에서 혼합기의 기체상수 순간변화율과 온도 순간변화율은 매우 작으므로 무시할 수 있다. ( $dR_{mix,m}/dt \cong 0$ ,  $dT_{mix,m}/dt \cong 0$ )

$$\dot{p}_m = \frac{R_{mix} T_m}{V_m} \dot{m}_{mix,m} \quad (23)$$

$$= \frac{R_{mix} T_m}{V_m} (\dot{m}_{mix,i} - \dot{m}_{mix,o})$$

흡기매니폴드에서 유출되어 실린더로 유입되는 혼합기량은 속도-밀도(speed-density) 방법으로 식(24)와 같이 구할 수 있다.

$$\dot{m}_{mix,o} = n_v \frac{V_d}{2} \frac{N_e}{60} \frac{p_m}{R_{mix} T_m} \quad (24)$$

실린더로 유입되는 혼합기중에서 공기질량비는 식(25)와 같고, 공기량은 혼합기량 중에서 연료가 점유하는 비율만큼 감소하므로 식(24)에 공기질량비를 곱하면 다음 식(26)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\dot{m}_{a.o.}}{\dot{m}_{mix.o}} = \left( 1 + \frac{1}{\lambda_o} \left[ \frac{F}{A} \right]_s \right)^{-1} \quad (25)$$

$$\dot{m}_{a.o.} = n_v \frac{V_d N_e}{2 \cdot 60} \frac{p_m}{R_{mix} T_m} \left( \frac{\dot{m}_{a.o.}}{\dot{m}_{mix.o}} \right) \quad (26)$$

최종적으로 매니폴드압력의 상태방정식은 식(3)과 식(24)을 식(23)에 대입하여 정리하여 다음 식(27)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{p}_m = \frac{R_{mix} T_m}{V_m} \left( C_D \frac{A_T^{(a)}}{\sqrt{R_{mix} T_{mix}}} \frac{p_{mix,i}}{\Phi_{PR}} - n_v \frac{V_d N_e}{2 \cdot 60} \frac{p_m}{R_{mix} T_m} \right) \quad (27)$$

위 식(27)은 기존의 연구들이 공기량만으로 흡기 매니폴드압력을 추정하는 것과 다르게 공기와 가스연료로 구성된 혼합기로서 매니폴드압력을 계산할 수 있게 하였다. 따라서 더 정확한 매니폴드 압력의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 토크생성 및 엔진 동특성

SPI-system의 대형 천연가스엔진에서 혼합기는 믹서에서 형성되어 엔진으로 유입되며, 압축-점화-연소(팽창)-배기과정을 통하여 엔진회전에 필요한 동력이 발생한다. 엔진의 회전력에 영향을 주는 주요 인자들은 여러 가지가 있으나, 이 연구에서는 공연비와 점화시기의 영향을 고려한 기존연구의 결과들을 이용하였다<sup>[11]</sup>. 엔진에서 발생하는 회전력(토크) 다음 식(28)과 같이 흡입공기량에 비례하며, 공연비와 점화시기의 지연에 따라 영향을 받으므로 다음 식(28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i = C_T \frac{\dot{m}_{ao}(\Delta t_{1T})}{N(\Delta t_{1T})} C_{A/F} C_{SA} \quad (28)$$

제동토크는 다음 식(29)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_B = T_i - (T_f - T_a - T_p) \quad (29)$$

엔진의 회전과 토크와의 관계는 다음 식과 같다.

$$I_e \cdot \dot{\omega}_e = T_B - T_L \quad (30)$$

엔진 회전각은 다음과 같이 시간으로 환산된다.

$$\Delta t = \frac{1}{6} \frac{\Delta \Theta}{N_e} \quad (31)$$

### 5. 실험방법 및 결과

#### 5.1 실험장치 및 방법

이 연구에서 고찰한 혼합기 형성 및 유입과정을 고려한 엔진모델에 대한 검증은 천연가스엔진을 대상으로 실험하였으며, 실험장치 및 조건은 Table 1과 같다. Fig. 4는 실험장치를 간략하게 나타낸 그림이다. 엔진의 배기량은 12-liter이며, 스로틀 전면에 있는 믹서에서 혼합기가 형성되는 SPI-system이다. 천연가스엔진은 직렬 6-기통으로 압축비는 9.5/1이다. 연료 분사압력은 압력조정기 (pressure regulator)에서 조절할 수 있으며, 분사압력은 초음속조건이 되도록 700kPa로 설정하였다. 인젝터는 BOSCH 가스인젝터를 사용하였으며, 인젝터 블록에 여러 개(8개)의 인젝터가 설치되어 연료분사량을 제어한다. 엔진제어는 ECU에서 담당하고 있으며, Data 수집 및 제어변수 설정을 위하여 PC를 설치하였다. 엔진의 부하는 회전축과 직결된 동력계를 이용하여 제어하였다.

Table 1 Experimental equipment and conditions

Items	Type
Engine type	Inline, 6-cylinder
Displacement	12-liter
Compression ratio	9.5 : 1
CNG injector	BOSCH gas injector
Gaseous fuel	Natural gas
Injection pressure	700 kPa
Mixture formation	SPI before the throttle valve

#### 5.2 실험 결과

Fig. 5는 상대공연비( $\lambda$ ) 변화에 대한 공기분압비 변동을 그래프로 나타낸 그림이다. 상대공연비( $\lambda$ ) 변화(0.5-1.5)에 따라 흡기매니폴드 내부에서의 공기분압비는 0.90-0.96까지 변화되었다. 이 결과로부터 혼합기가 공기와 연료로 구성되어 있으므로 흡기매니폴드압력은 순수한 공기압력과 차이가 있으며, 혼합기의 성분변화도 공기분압비에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

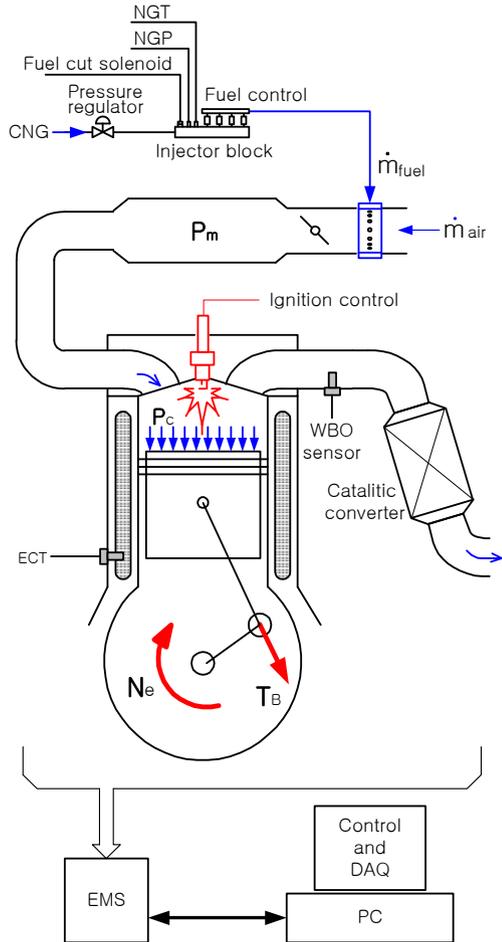


Fig. 4 Experimental set-up for validation test of the natural gas engine

Fig. 6은 천연가스엔진에서 연료의 주성분인 천연가스와 공기의 혼합비를 고려한 혼합기의 기체상수의 변화(식 7)를 그래프로 나타낸 것이다. 상대공연비( $\lambda$ )가 0.5-1.5까지 변화할 경우에 혼합기의 기체상수는 311.2-295.6까지 변화되었으며, 상대공연비가 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 SPI-system이 적용되는 대형 천연가스엔진에서 혼합기의 성분이 변화되면 제한된 공간에서 상호 영향을 미치므로 혼합기체의 기체상수도 변동되어 흡기매니폴드로 유입되는 혼합기의 유입량에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

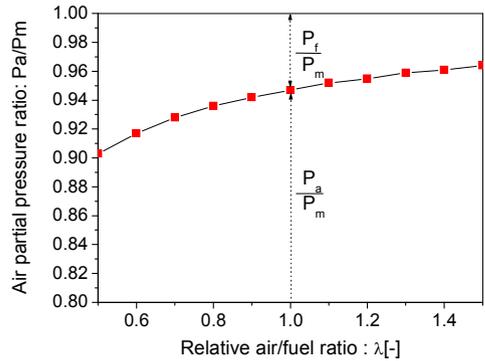


Fig. 5 Air partial pressure ratio in the intake manifold

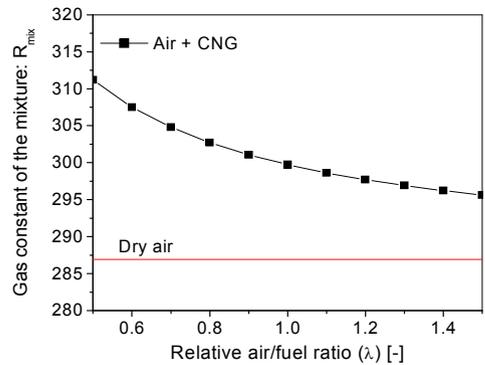


Fig. 6 Gas constant of the mixture gas for the relative air-fuel ratio

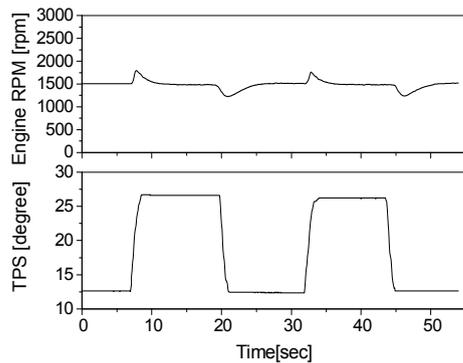


Fig. 7 TPS and engine speed conditions for the natural gas engine test

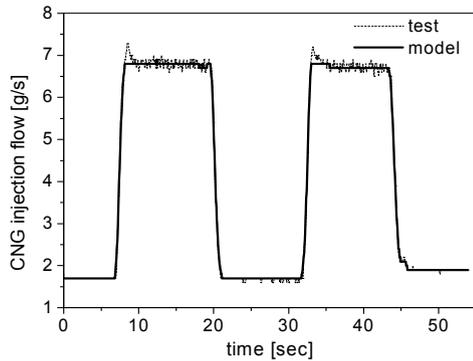


Fig. 8 Control of the dynamic injection flow during the CNG-engine test

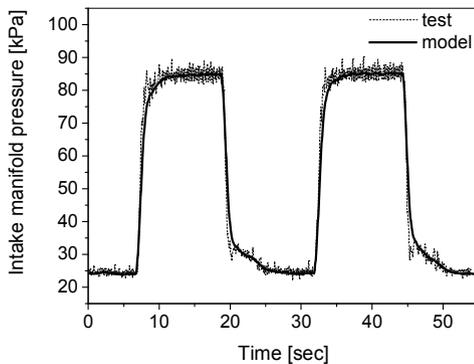


Fig. 9 Intake manifold pressure dynamics during the CNG-engine test

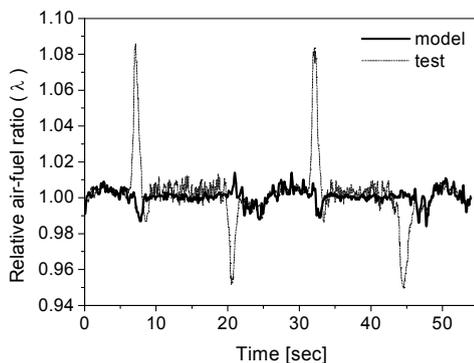


Fig. 10 Relative air-fuel ratio result during the CNG-engine test

Fig. 7은 천연가스 엔진모델의 검증을 위한 시험 조건을 나타낸 것이며, 스로틀과 엔진의 회전속도 변화를 표기하였다. 시험조건은 엔진 회전속도가 1,500rpm으로 일정한 정속도 과도상태이며, 스로틀을 약 12.5~27.0도까지 급속하게 변동시키면서 회전속도 변화를 관찰한 것이다. 엔진 회전속도는 스로틀의 급격한 증가와 감소 시에 동력계의 제어성능에 부족으로 약간의 변동이 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8은 위 엔진시험조건(Fig. 7)에서 연료분사량의 변화를 보여주고 있다. 스로틀의 급격한 증가/감소에 의해 흡입공기량도 증가/감소하므로, 이에 따라 적절한 공연비를 유지하기 위하여 연료분사량이 급격히 증가/감소시키고 있음을 알 수 있다. 모델 결과는 시험값과 오차는 스로틀 급변동 초기에 약간 증가하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 9는 동일한 시험기간에 측정된 흡기매니폴드 압력과 모델(추정값)을 나타낸 것이다. 스로틀 급변동 초기에는 모델 추정값과 시험값 사이에 오차가 증가하였으나 전체적으로 유사한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 10은 상대공연비 변화를 측정된 것이며, 모델의 추정값을 함께 비교하여 표시하였다. 모델의 상대공연비 변화는  $1.0 \pm 0.02$  이내에 있으나, 실제 시험값은 스로틀의 급격한 변동 초기에는 0.95~1.09까지 증가하였다. 스로틀 급변동시에 오차가 증가한 것은 급격한 공기량의 변화에 대하여 적절한 공연비제어가 수행되지 않고 있음을 나타내는 것이다. 그 외 스로틀이 일정한 안정적인 구간에서는 모델과 시험값이 유사함을 보여주고 있다.

## 5. 결론

SPI-system이 적용된 천연가스엔진에서 혼합기 형성과정 및 유입과정을 고려한 엔진모델에 대한 이론적 고찰과 천연가스엔진을 대상으로 검증시험을 수행한 결과, 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 혼합기 형성 및 유입과정을 고려하여, 흡입공기량, 흡기매니폴드 압력 등 엔진동특성을 추정할 수 있는 모델을 제시하였다.

2. SPI-system이 적용된 천연가스엔진에서 공연비는 혼합기가 형성되는 믹서에서 결정되며, 공연비 성분변화에 따라 흡입공기량, 공기분압비, 혼합기체의 기체상수 등이 변동될 수 있다.
3. 엔진모델의 검증을 위하여 천연가스엔진을 대상으로 수행한 정속도 과도상태 엔진시험에서는 스로틀 급변동 구간에서 모델과 시험값 사이에 오차가 증가하였으나, 대체적으로 유사한 경향을 얻을 수 있었다.

위 결과들로부터 이 연구에서 제시한 혼합기 형성 및 유입과정을 고려한 천연가스엔진 모델이 타당성이 있음을 확인하였다.

## 후기

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (KRF-2005-042-D00058).

## 참고문헌

- 1 M. L. Poulton, Alternative Fuels for Road Vehicles, CMP, 1994.
2. Choi K. H., Doo B. M., Chung C. S., Yoon H. J., Choi D. S., Development of the Dedicated CNG Engine for a Heavy-duty Commercial Vehicle, Proceeding of 8th Next Generation Vehicle Workshop, Korea Automotive Technology Institute, 2000.
3. Robert W. Weeks, John J. Moskwa, "Transient Air Fuel Rate Estimation in a Natural Gas Engine Using a Nonlinear Observer", SAE940759.
- 4 Haeng Muk Cho, Bang-Quan He, Spark ignition natural gas engines A review, Energy conversion & management 48, pp. 608-618, 2007.
- 5 A. nupam G., Peter M., Modeling, validation and system identification of a natural gas engine, Proceedings of the American Control Conference, 1997.
- 6 A. nupam G., Peter M., Modeling and validation

- of a lean burn natural gas engine, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. ASME, 2001
7. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc-Graw-Hill, pp. 902-910. 1988.
8. BOSCH, Automotive electric/electronic systems, 2nd edition, Robert Bosch GmbH, pp. 123-125, 1995.
9. Robert L. Barkhimer, Hoi-Ching Wong, Application of Digital, Pulse-Width-Modulated Sonic Flow Injectors for Gaseous Fuels, SAE951912, 1995.
10. Sim H. S., Sunwoo M. H., Development and validation of a dynamic model for a gaseous-fuel engine, Proceedings of IMechE, Vol. 218, Part D: Journal of Automobile Engineering, pp. 697-705, 2004.
11. Sim H. S., Lee. K. Y., Sunwoo M. H., Song C. S., Estimation of inlet air mass flow for air-fuel ratio control of gaseous-fuel engines, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 17, No. 1, pp. 131-139, 2001.

## Nomenclature

A	: area
k	: specific heat ratio
m	: mass
p	: pressure
R	: gas constant
T	: temperature
V	: Volume
$\rho$	: density

## Subscripts

a	: air
f	: fuel
mix	: mixture
i	: input
o	: output