

# 솔레노이드 밸브를 이용한 고압가스의 유량제어

심한섭\*, 이치우<sup>+</sup>, 김남경<sup>+</sup>, 안국찬<sup>+</sup>, 남궁재관<sup>++</sup>

## Flow Control for High Pressure Gas by using a Solenoid Valve

Han-sub Sim\*, Chi-woo Lee<sup>+</sup>, Nam-kyung Kim<sup>+</sup>, Kook-chan Ahn<sup>+</sup>, Chai-kwan Namkoong<sup>++</sup>

### Abstract

Dynamic flow characteristics of a solenoid valve are affected by pressure difference in inlet and outlet of orifice, gas temperature, and supply voltage of a coil. In this paper, the dynamic flow characteristics for deviations of various conditions are studied. Static and dynamic flow for variation on-time of a solenoid valve open signal are measured in basic bench test. The solenoid valve is applied to a compressed natural gas(CNG) engine test for validation of flow control performance. The experimental results show that flow of high pressure gas can controlled precisely by using a solenoid valve.

**Key Words :** 솔레노이드 밸브(Solenoid valve), 고압가스(High pressure gas), 유량제어(Flow control), 동적유량(Dynamic flow)

## 1. 서론

산업계에서 널리 사용되고 있는 다양한 고압가스는 목적과 용도에 따라 적절한 유량을 제어할 필요가 있다. 가스유량의 제어는 연속적인 양과 특정한 시점 또는 공간내에 필요한 양을 공급하는 것으로 구분할 수 있으며, 소량의 고압가스를 정밀하게 제어할 경우에는 소형 솔레노이드 밸브가 많이 사용되고 있다. 솔레노이드 밸브는 ON/OFF의 형태로 밸브를 작동되지만, 고속의 ON/OFF 동작의 반복에 의하여 비례제어의 효과를 얻을 수 있다. 밸브의 설계시에서는 고압가스가 통과하는 밸브시트에 대한 유량특성 해석, 솔레노이드의 자계강도해석 및 아마추어-스프링-자기력에

대한 동특성 해석이 필수적이다. 이를 바탕으로 설계된 고압가스 제어를 위한 솔레노이드 밸브는 정적 및 동적유량 특성시험을 통하여 제어성능을 분석할 수 있다. 솔레노이드 밸브의 동적유량 특성은 가스의 입구와 출구의 압력차, 온도 및 구동전압 등에 영향을 받는다.

이 연구에서는 고압가스의 유량제어에 있어서 동적유량에 영향을 미치는 밸브의 유량특성을 역학적으로 고찰하고, 실험을 통하여 압력차 및 구동전압이 변화될 때 동적유량의 변동을 측정하였다. 또한 고압천연가스(CNG)를 연료로 사용하는 내연기관을 이용하여 정상상태 및 정속도-과도부하상태 적용시험을 통하여 솔레노이드 밸브의 고압가스 제어성능을 검증하였다.

\* 진주산업대학교 자동차공학과 (hansub@jinju.ac.kr)

주소: 660-758 경남 진주시 칠암동 150번지

+ 진주산업대학교 자동차공학과

++ 서울산업대학교 기계설계자동차공학부

## 2. 밸브 내부에서의 기체유동

솔레노이드 밸브에서 고압가스가 다음 Fig. 1과 같이 축소된 목(throat)을 통과하여 출구로 유출된다면, 에너지 보존 법칙으로부터 에너지 방정식은 식(1)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{v_1^2}{2} + gz_1 + u_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + {}_1q_a - {}_1(w_1)_2 \\ = \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + u_2 + \frac{P_2}{\rho_2} \end{aligned} \quad (1)$$

$g$  : 중력가속도

$p$  : 압력[kPa]

$\rho$  : 밀도[kg/m<sup>3</sup>]

$u$  : 내부에너지[kJ/kg]

$v$  : 속도[m/sec]

$q$  : 열

$w$  : 일

$z$  : 높이[m]

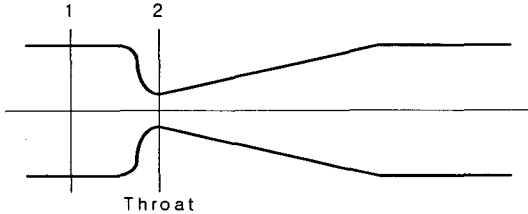


Fig. 1 Gas flow through a valve

그리고 엔탈피는  $h = u + pv$  이므로 식(1)은 다음 식(2)과 같이 유도된다. 이 식은 기체 유동에서 열에너지를 고려한 관계식이다.

$$\begin{aligned} {}_1q_a - {}_1(w_1)_2 \\ = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + (h_2 - h_1) + g(z_2 - z_1) \end{aligned} \quad (2)$$

솔레노이드 밸브 내부에서의 가스유동을 등엔트로피로 가정하면, 이에 대한 관계식은 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 관계식, 이상 기체 관계식 등이 적용된다. 또한, 마찰이나 와류에 의한 손실 등을 무시하면, 다음과 같이 일이나 열은 없고, 위치변화도 무시할 수 있다.

$${}_1q_a - {}_1(w_1)_2 = 0 \quad (3)$$

$$z_1 = z_2 \quad (4)$$

위 관계식(3)과 식(4)를 식(2)에 대입하여 정리하면, 다음과 같이 출구에서의 속도를 구할 수 있다.

$$v_2^2 = 2(h_1 - h_2) + v_1^2 \quad (4)$$

솔레노이드 밸브의 입구측과 출구측의 압력,  $p_1, p_2$ 에 대하여 출구속도는 다음과 같이 구해진다. 우선, 단열상태의 유동이므로  $\delta q = 0$ 이고, 열역학 제 1법칙으로부터 엔탈피차는 다음과 같다.

$$h_1 - h_2 = \int_2^1 V dp \quad (5)$$

이것을 다시 식(4)에 대입하면 아래와 같다. 여기서 입구 속도는 아주 작으므로 무시할 수 있다. ( $v_1 \approx 0$ )

$$v_2^2 = 2 \int_2^1 V dp \quad (6)$$

가스의 유동을 이상기체로 가정하면  $p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$ 의 관계로부터 식(7)과 같이 표현할 수 있다. ( $k$ : 비열비)

$$V = \left( \frac{p_1 V_1^k}{p} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (7)$$

따라서 유출속도  $v_2$ 는 식(8)과 같다.

$$v_2^2 = \frac{2k}{k-1} p_1 V_1 \left\{ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\} \quad (8)$$

다시 유출속도  $v_2$ 에 대하여 정리하면 다음 식(5-21)과 같다.

$$v_2 = \sqrt{R_1 T_1} \left[ \frac{2k}{k-1} \left\{ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

열역학적 관계식으로부터, 출구측의 밀도는 다음과 같다.

$$\rho_2 = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \rho_1 \quad (10)$$

출구에서의 유량은 관계식에 위의 밀도와 속도관계식을 대입하여 정리하면, 다음과 같다.

$$\dot{m} = \rho_2 A_2 v_2 = \frac{A_2 p_1}{\sqrt{RT_1}} \Phi \quad (11)$$

위 식(11)은 이상기체에 대한 질량유량이므로 실제 기체에 대한 유량으로 표기하면 다음 식(12)와 같다.

$$\dot{m} = C_D \frac{A_2 p_1}{\sqrt{RT_1}} \cdot \Phi \quad (12)$$

유량계수( $C_D$ )는 실험으로부터 구할 수 있다. 압력비 보정 계수( $\Phi$ )는 최대유량에 대한 압력비의 영향을 나타내는 계수로서 압력조건에 따라 다음 식(13)과 같은 값을 갖는다.

$$\Phi = \left[ \left( \frac{2k}{k-1} \right) \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13-1)$$

(subsonic flow)

$$\Phi^* = \left[ k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13-2)$$

(sonic flow)

위 식(13-2)는 초음속조건에서의 기체의 유동이며, 이때 밸브를 통과하는 유량은 출구의 압력에 영향을 받지 않으므로 고압기체의 유량을 정밀하게 제어할 때 효과적이다.

### 3. 솔레노이드 밸브의 유량 동특성

솔레노이드 밸브는 전자석을 이용하여 밸브를 개폐하므로, 밸브를 통과하는 유량은 전자석의 특성에 영향을 받는다. 위 식(12)는 솔레노이드 밸브의 정적유량(밸브가 열려 있는 동안에 통과하는 유량,  $Q$ )이며, 솔레노이드 밸브를 개폐(ON/OFF)하는 동안에 통과되는 유량은 동적유량이라고 한다. 실제로 동적유량  $q_{dyn}$ 은 통전시간  $t_{fi}$ 에 따라 선형적으로 증가하지만 구동초기에 밸브가 열리는데 시간지연이 발생하는데 이를 무효시간  $t_v$ 라 한다. 이는 Fig. 2에서와 같이 니들 리프트의 밸브열림시간  $t_o$ 와 밸브닫힘시간  $t_c$ 가 일치하지 않음으로 해서 구동펄스 폭과 니들리프트 폭의 차에 기인하는 것으로 보여진다. 일반적으로 밸브열림시간  $t_o$ 가 밸브닫힘시간  $t_c$ 보다 길게 나타나며 이 때 무효시간  $t_v$ 는 양수로 나타난다. 무효시간  $t_v$ 는 일정압력, 일정 구동전압 하에서 동적유량이 선형영역에 있을 때 상수로 나타내게 된다. 반면 통전시간  $t_{fi}$ 가 특정시간보다 짧을 때에는 무효시간  $t_v$ 가 불규칙하게 나타나게 되는데 이는 밸브열림시간  $t_o$ 와 밸브닫힘시간  $t_c$ 의 차가 일정하게 되지 않기 때문으로 보여진다. 이 때 통전시간  $t_{fi}$ 가 점점 짧아짐에 따라 무효시간  $t_v$ 는 대체로 선형영역에서의 무효시간  $t_v$ 보다 커지게 되는데 이는 밸브열림시

간  $t_o$ 는 거의 일정하나 밸브닫힘시간  $t_c$ 는 더 짧아지기 때문인 것으로 추정된다. Fig. 3과 같이 이러한 비선형적 영역에서는 동적유량  $q_{dyn}$ 이 상당히 불규칙하게 나타난다. 따라서 안정적인 유량제어를 위하여 이러한 비선형적 영역은 반드시 피해야 되며 솔레노이드 밸브의 선정에 있어서 중요한 요소가 된다.

선형영역에서의 동적유량  $q_{dyn}$ 은 식(14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{dyn} = \frac{Q}{60} (t_{fi} - t_v) \quad (14)$$

식(14)을 이용하면 식(15)와 같이 임의의 열림시간  $t_i$ 에서의 동적유량  $q_{ii}$ 와 정적유량  $Q$ 를 이용하여 무효시간  $t_v$ 를 구할 수 있다.

$$t_v = t_i - 60 * \frac{q_{ii}}{Q} \quad (15)$$

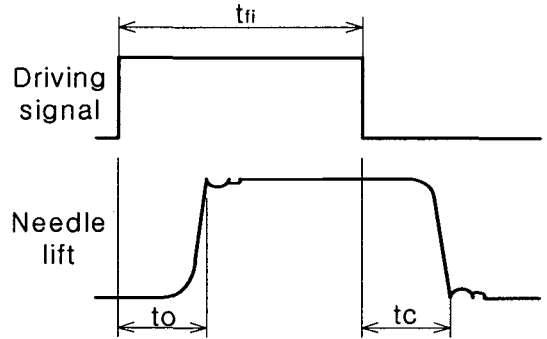


Fig. 2 Driving signal and needle lift of a solenoid valve

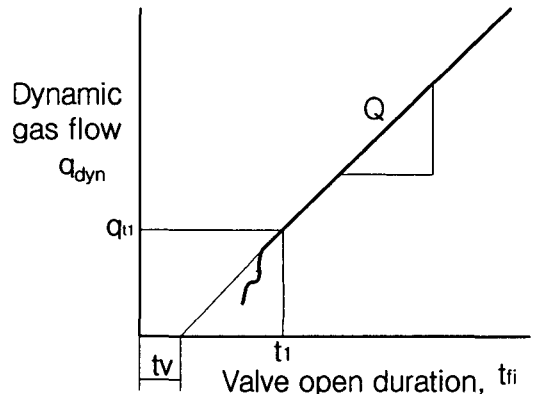


Fig. 3 Characteristics of dynamic flow of a solenoid valve

## 4. 시험 및 결과

### 4.1 솔레노이드 밸브의 유량특성 시험

전자석에 의해서 구동되는 솔레노이드 밸브의 구조는 Fig. 4와 같으며, Table. 1에는 유량특성을 시험하기 위한 솔레노이드 밸브의 특성과 시험조건을 표시하였다.

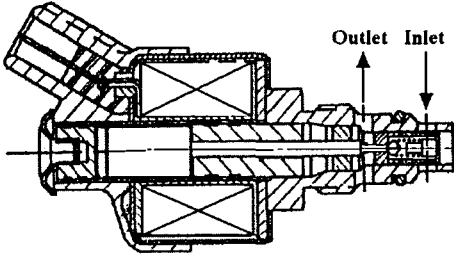


Fig. 4 Structure of a solenoid valve (SPI014)

Table 1 Bench test conditions of a solenoid valve

Solenoid valve	Servojet SPI014S1
Voltage	DC12V
Coil resistance	2.0Ω
Driving Frequency	50Hz
Driver type	Peak & Hold
Temperature	20°C
Gas	Methane(CH <sub>4</sub> )
Gas inlet pressure	0.690MPa
Gas outlet pressure	Ambient pressure
Flow measurement	Gas flow meter

Fig. 5는 메탄가스 공급압력이 각각 0.69MPa, 1.04Pa, 1.38MPa일 때, 밸브 출구의 정적유량(밸브가 열려있는 동안 오리피스를 통과하는 유량)을 보여주고 있다. 정적유량은 가스공급압력의 일차함수이므로 압력의 변화에 따라 비례적으로 증가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 솔레노이드 밸브를 50Hz로 개폐(ON/OFF) 동작을 반복하면서 밸브의 구동신호의 열림시간( $t_{ri}$ ) 변화에 대한 밸브의 1회 유출량을 측정된 결과이다. 열림시간이 5ms보다 작은 구간에서는 유량이 불규칙적이며, 5ms 이상에서는 비교적 비례적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 7은 구동전압 변화에 대한 동적유량 특성을 보여주고 있다. ( $f_{on-off}=50\text{Hz}$ ,  $t_{ri}=15\text{ms}$ ,  $p_i=0.69\text{MPa}$ ) 구동전압 감소에 따라 솔레노이드의 자기력이 작아지므로 밸브열림 지연시간( $t_o$ )이 증가하여 가스유량이 감소하고 있다.

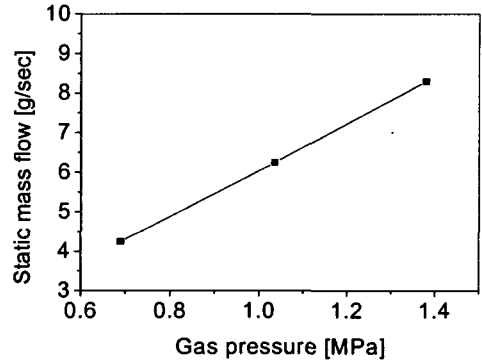


Fig. 5 Characteristics of static mass flow (CH<sub>4</sub>)

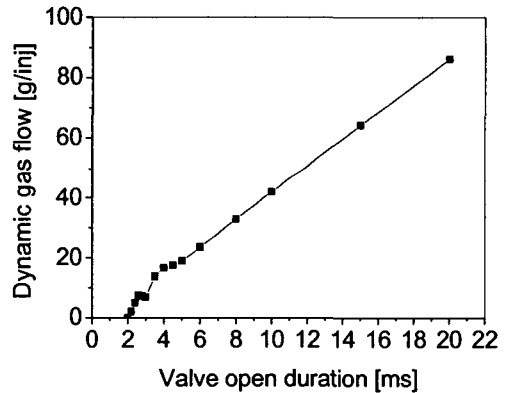


Fig. 6 Characteristics of dynamic mass flow (CH<sub>4</sub>)

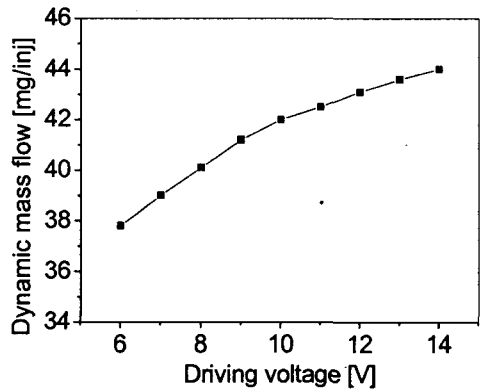


Fig. 7 Dynamic flow characteristics and voltage variations of a solenoid valve (CH<sub>4</sub>)

## 4.2 내연기관 적용 시험

이 논문에서 고찰한 솔레노이드 밸브에 대한 검증시험은 Table 2에 표시한 것과 같이 대형상용차량에 적용되는 12,000cc CNG-엔진에서 수행하였으며, 시험장치에 대한 개략도는 Fig. 8과 같다. 시험용 압축천연가스(CNG) 엔진은 직렬 6-기통으로 압축비는 9.5이며, 이론공연비( $\lambda=1.0$ ) 영역에서 시험하였다. 솔레노이드 밸브는 구동주파수가 엔진회전 속도와 비례관계에 있으며, Duty는 흡입공기량에 따라 제어된다. 흡기장치는 과급기가 없는 자연흡기방식이다.

Table 2. Basic specifications of a CNG-engine

Type	In-line, 6-cylinder
Displacement [cc]	12,000
Compression ratio	9.5 : 1
Solenoid valve	SPI014, 12V,
Driver type	Peak & hold, PWM
Gas inlet pressure	0.690MPa
Throttle	$\psi 60$ , PWM control
Intake system	Natural aspired system

Fig. 9는 정상상태 운전조건( $\lambda=1.0$ , MBT)에서 엔진 회전 수 및 부하(MAP) 조건에 대한 CNG-엔진의 가스연료의 유량을 보여주고 있다. 가스연료 유량은 다양한 엔진조건에 따라 1.05~11.17g/sec까지 변화되었으며, 엔진회전수와 부하가 커질수록 흡입공기량이 늘어나므로 가스유량이 증가하고 있다. 이때 고압 가스연료의 공급압력은 0.690MPa로서 솔레노이드 밸브의 압력비는 초음속조건이다.

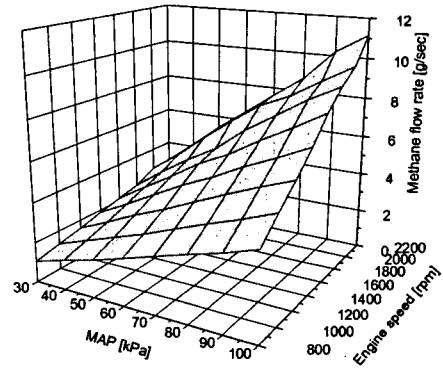


Fig. 9 Methane flow rate in a CNG-engine ( $\lambda=1.0$ )

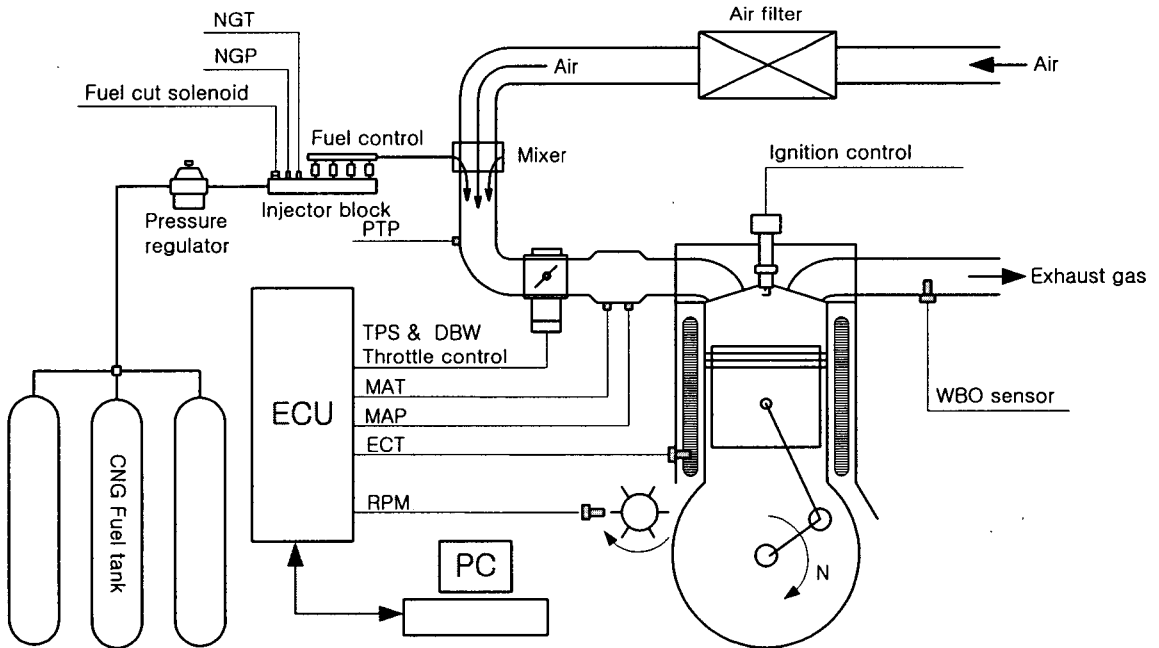


Fig. 8 A schematic diagram of experimental setups for gas flow control of a CNG-engine

## 6. 결론

고압가스의 정밀 유량제어에 사용할 수 있는 솔레노이드 밸브에 대한 유량특성 고찰과 검증시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고압가스의 정밀제어를 위해서는 밸브의유량이 출구의 압력조건에 영향을 받지 않는 초음속조건이 제어의 수월성으로 인하여 가스유량 제어성능을 향상시킬 수 있다.

2) 기본 유량특성 시험에서는 동적유량이 불규칙적인 구간( $t_r < 5ms$ )보다는 열림시간이 5ms 이상인 비례구간에서 고압가스의 유량제어가 효과적으로 나타났다.

3) 스로틀이 급변동되는 정속도 과도조건에서 솔레노이드 밸브를 고압 CNG-엔진에 적용하여 시험한 결과 고압가스의 유량제어 특성이 양호하였다.

## 참고 문헌

- (1) Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988.
- (2) Hansub Sim and Teayeon Lee, An Engine Model of a Heavy-Duty Compressed Natural Gas Engine for Design of an Air-Fuel Ratio Controller, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 12, No. 5, pp.80-87, 2003.
- (3) Hansub Sim and Myoungcho Sunwoo, An inlet air-mass flow modeling for an effective air-mass ratio on a gaseous-fuel engine, Autumn conference proceeding, Vol. 1, pp. 126-131, Korea automotive technology institute. 1999.
- (4) Hansub Sim and Myoungcho Sunwoo, Development of an engine modeling and an engine control module for an LPG engine, Transactions of KSAE, Vol. 7, No. 9, pp.1-9, 1999.
- (5) Anupam Gangopadhyay, Peter Meckl, Modeling, Validation and System Identification of a Natural Gas Engine, Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico, 1997
- (6) Robert W. Weeks, John J. Moskwa, Transient Air Fuel Rate Estimation in a Natural Gas Engine Using a Nonlinear Observer, SAE940759, 1994

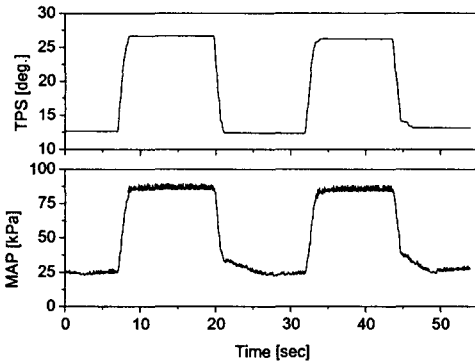


Fig. 10 Transient conditions (TPS, MAP) at a constant engine speed (1500rpm)

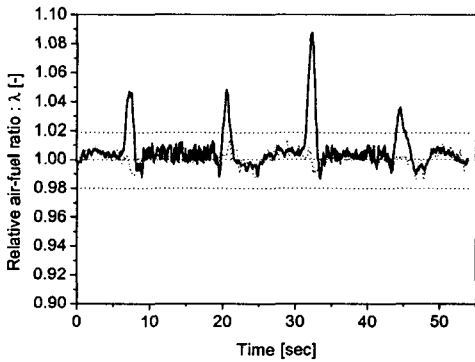


Fig. 11 Relative air-fuel ratio at a constant engine speed (1500rpm)

Fig. 10은 과도상태 등속조건(1500rpm)에서 스로틀 제어와 이에 따른 CNG-엔진의 매니폴드압력(MAP)을 표시한 것이다. 스로틀 각도는 12~27°까지 제어하였으며, 이에 따라 솔레노이드 밸브의 출구압력( $p_2$ )인 매니폴드압력은 25~85kPa까지 변화되었다.

Fig. 11은 시험조건 Fig. 10의 상태에서 솔레노이드 밸브의 유량 제어특성을 검증하기 위하여 CNG-엔진의 배기매니폴드에서 상대공연비( $\lambda$ )를 측정한 것이다. 상대공연비는 스로틀 급변동시에는 0.97~1.08이며, 스로틀이 안정된 구간에서는  $1.0 \pm 0.02$ 로 제어성능이 우수하였다. 스로틀 급변동 중에 상대공연비 오차의 증가는 가스연료의 분사시점부터 공연비 검출시점까지 소요되는 시간 지연에 따른 것으로 제어알고리즘의 개선에 의하여 성능향상이 가능하다.