

## 초소형 터보엔진용 PWM 연료조절장치의 설계 및 모델링에 관한 연구

주상현\* · 최호진\* · 박종승\* · 임진식\*\*

### A Study on the Design and Modeling of PWM Fuel Metering Unit for Miniature Turbo Engines

Sanghyun Joo\* · Hojin Choi\* · Jongseung Park\* · Jinshik Lim\*\*

#### ABSTRACT

A fuel metering unit using PWM(Pulse Width Modulated) solenoid valve has some advantages such as low cost, small size and simple structure. The mathematical model and its experimental rig of the fuel metering unit using PWM solenoid valve and CPDV(Constant Pressure Drop Valve) for miniature turbo engines were constructed. As the results of simulation, some major parameters which have dominant effects on the performance were found. And the experimental results verified the validity of established model by showing the good agreement with the numerical simulation results. Hence, this system modeling could be used effectively in the actual development of a PWM fuel control system.

#### 초 록

펄스폭 변조방식(PWM)으로 작동되는 솔레노이드 밸브를 이용하는 연료조절장치는 값이 싸고, 크기가 작으며, 간단한 구조로 되어있다. 본 논문에서는 이러한 장점을 이용하여 PWM 솔레노이드 밸브와 차압유지밸브(CPDV)로 구성되어, 초소형 엔진에 적용 가능한 PWM 연료조절장치를 구성하였다. 수학적 모델의 확립과 시뮬레이션을 통해 시스템의 특성과 주요 파라미터에 대한 영향을 분석하였고, 시험장치를 구성하여 시험을 수행한 결과, 시뮬레이션과 일치된 결과를 얻었으며 모델의 타당성을 확인할 수 있었다. 제안된 모델은 PWM 연료조절시스템 개발에 사용될 수 있을 것이다.

Key Words: PWM Control(펄스폭변조 제어), Fuel Metering Unit(연료조절장치), Constant Pressure Drop Valve(차압유지밸브), Solenoid Valve(솔레노이드 밸브)

#### 1. 서 론

† 2006년 2월 9일 접수 ~ 2006년 5월 16일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소 3체계개발본부

\*\* 종신회원, 국방과학연구소 4체계개발본부  
연락처, E-mail: jooshce@paran.com

일반적으로 공기흡입식 추진기관으로 사용되는 엔진으로는 터보제트, 터보팬, 램제트, 스크램

제트 엔진 등 여러 종류가 있다. 이러한 엔진들은 연료공급 및 조절을 위한 장치로 필요하며 가장 일반적으로 쓰이는 장치로서 미터링 밸브를 사용한 연료조절장치를 들 수 있다[1].

Figure 1은 일반적인 공기흡입식 추진기관용 연료공급 시스템에 대한 구성도이다. Fig. 1에서 나타난 바와 같이 연료공급 시스템은 크게 연료탱크 부와 펌프 부 그리고, 연료조절장치 부 (CPDV & Metering v/v)로 구성된다.

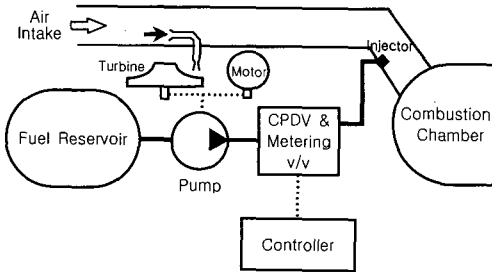


Fig. 1 Typical Fuel Control System

이때, 연료조절장치는 일반적으로 고압부인 펌프 출구 단에 장착되므로 크기를 줄이는 데 한계가 있으며, 또한 고가의 서보(servo) 장치를 사용하기 때문에 소형, 저가의 시스템이 필요한 초소형 엔진에 적용하는 데에는 부적합하다.

한편, 소형, 저가로 구성 가능한 시스템으로 Fig. 2와 같은 PWM 솔레노이드 밸브를 사용한 연료조절장치가 제안된 바 있다[2].

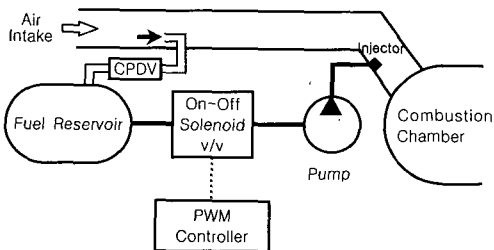


Fig. 2 PWM Fuel Control System

Figure 2에서 보듯이 비행 시 흡입된 공기는 CPDV 밸브를 거쳐 일정한 압력으로 조절되어 연료를 가압하고, 가압된 연료는 PWM 제어신호

에 따라 작동되는 솔레노이드 밸브에 의해 유량이 조절되어 펌프에 전달된다. 전달된 저압의 연료는 펌프에 의해 승압되고, 그 압력에 의해 연소실로 분사된다.

이러한 소형 저가의 PWM 연료조절장치는 엔진추력 50(lbf) 급의 소형 무인기 엔진의 연료공급시스템에 적용된 사례가 있으나, 세부기술에 대해서는 발표되지 않고 있다[2]. 이에, 본 연구에서는 기존 적용 사례분석을 통하여 PWM 연료조절 시스템의 수학적 모델을 수립하고, 시뮬레이션을 통해 시스템의 특성을 파악하며, 시험결과와 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 시뮬레이션 모델의 타당성과 동 연료조절장치의 실용화 가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 수학적 모델링 및 시뮬레이션

PWM 연료조절장치를 다음의 Fig. 3과 같이 구현하여 모델링을 실시하였으며, 3장에서 시험장치도 같은 개념으로 제작하였다.

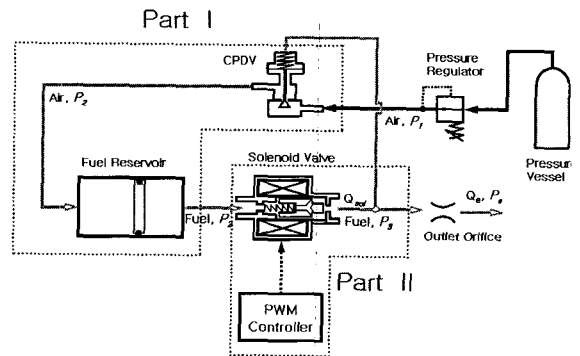


Fig. 3 Schematic Diagram of PWM Flow Control System

### 2.1 CPDV 및 연료저장조(Fuel Reservoir)의 수학적 모델 (Part I)

CPDV와 연료저장조의 수학적 모델을 구성하였다. Fig. 4에 CPDV와 연료저장조의 개략도를 나타내었는데, 첨자 p는 공압(pneumatic)을 의미하고, 첨자 h는 유압(hydraulic)을 의미한다.

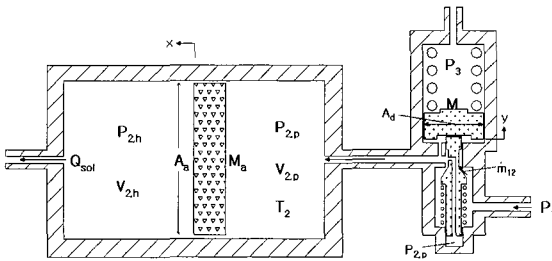


Fig. 4 Structure of Fuel Reservoir and CPDV(Part I)

모델링을 위한 기본가정은 다음과 같다.

- 1) 기체는 완전기체이며, 일정한 비열비를 가짐.
- 2) 기체역학적인 과정은 가역단열과정임.
- 3) 작동 중 발생하는 연료에서의 온도변화 무시.

기본가정으로부터 연료탱크에서의 기체의 연속방정식은 식(1)과 같다[3].

$$\dot{P}_{2,p} = \frac{\gamma RT_2}{V_{2,p}} (\dot{m}_{12} - \rho_2 A_a \dot{x}) \quad (1)$$

여기서

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$V_{2,p} = V_{2,p0} + A_a \cdot x$$

$$\rho_2 = \frac{P_1}{RT_1} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\gamma}$$

위 식에서  $P$ 는 유체의 압력,  $\gamma$ 는 비열비,  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 유체의 온도,  $V$ 는 제어체적,  $\dot{m}$ 는 질량유량,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $A_a$ 는 피스톤의 단면적,  $x$ 는 피스톤의 변위를 나타낸다. 또한 첩자 1은 CPDV를 통과하기 전의 상태를 나타내며, 첩자 2는 CPDV와 연료저장조 사이의 유체 상태를 나타낸다.

CPDV를 지나는 질량유량 식은 식(2)와 같다.

$$\dot{m}_{12} = \frac{C_d K P_1 N_{12} A_{12}}{\sqrt{T_1}} \quad (2)$$

여기서

$$K = \left[ \frac{\gamma g}{R} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$A_{12} = \pi d (Y - y) \sin \theta$$

$$N_{12} = \left[ \frac{(P_2/P_1)^{2/\gamma} - (P_2/P_1)^{(\gamma+1)/\gamma}}{\frac{\gamma-1}{2} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$C_d$ 는 밸브 오리피스에서의 유량송출계수 (discharge coefficient),  $Y$ 는 CPDV 포켓의 최대 변위,  $y$ 는 CPDV 포켓의 변위,  $\theta$ 는 CPDV 포켓의 각도,  $g$ 는 중력가속도이다.

CPDV에서의 운동방정식은 식(3)과 같다.

$$M \ddot{y} + ky = (P_{2,p} - P_3) A_d - E_1 (P_1 - P_{2,p}) A_{12} - F_s - F_\mu \quad (3)$$

여기서  $M$ 은 포켓과 센서의 무게,  $k$ 는 스프링 상수,  $A_d$ 는 CPDV 센서의 단면적,  $F_s$ 는 스프링 초기 압축 힘,  $F_\mu$ 는 마찰력,  $E_1$ 은 유량힘 보정 계수, 첩자 3은 솔레노이드 밸브를 지난 연료의 상태를 나타낸다.

연료저장조의 연료가 작용하는 부분의 연속방정식은 식(4)와 같다[4].

$$\dot{P}_{2,h} = \frac{\beta_e}{V_{2,h}} (-Q_{sol} + A_a \dot{x}) \quad (4)$$

여기서  $\beta_e$ 은 연료의 유효체적탄성계수 (effective bulk modulus),  $Q_{sol}$ 은 솔레노이드 밸브를 통과하는 유량이다.

또한, 연료저장조에서의 운동 방정식은 식(5)와 같다.

$$M_a \ddot{x} = (P_{2,p} - P_{2,h}) A_a - F_\mu \quad (5)$$

여기서,  $M_a$ 는 피스톤의 무게이다.

## 2.2 PWM 솔레노이드 밸브 모델 (Part II)

유체가 솔레노이드 밸브를 통과한 후의 연속방정식은 식(6)과 같다.

$$\dot{P}_3 = \frac{\beta_e}{V_3} (Q_{sol} - Q_e + A_d \dot{y}) \quad (6)$$

여기서  $Q_e$ 는 출구 오리피스 밸브를 통과하는 유량이다. 이때 솔레노이드 밸브를 통과하는 유량( $Q_{sol}$ )은 식(7)과 같다[5].

$$Q_{sol} = C_h \cdot A_{sol} \cdot f(R_{ov}, t) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_h} (P_{2,h} - P_3)} \quad (7)$$

여기서  $C_h$ 는 유체의 유량계수,  $A_{sol}$ 은 솔레노

이드 밸브부의 오리피스 면적,  $f(R_{oj}, t)$ 는 유량 변조함수(flow rate modulation function)이며 조건에 따라 1 또는 0의 값을 갖는다.

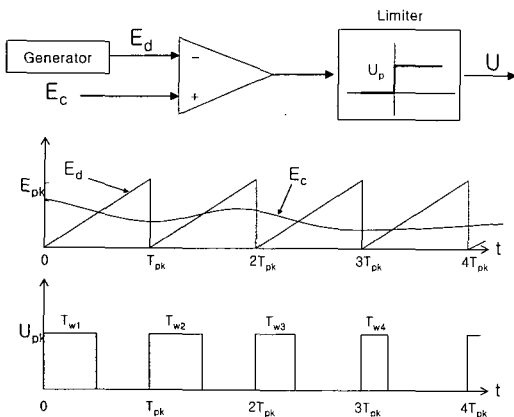


Fig. 5 Principle of Pulse Width Modulator and Timing Diagram

위의 Fig. 5는 펄스폭 변조의 원리를 설명한 그림이며, 그림에서  $E_c$ 는 기준신호이며,  $E_d$ 는 삼각파 신호이며,  $U$ 는 밸브구동명령 신호이다. 기준신호와 삼각파 신호의 차이에 의해 발생하는 밸브 구동신호의  $j$ 번째 펄스폭(pulse width)은 식(8)과 같다.

$$T_{wj} = E_c [(j-1)T_{pk}] T_{pk} / E_{pk} \quad (8)$$

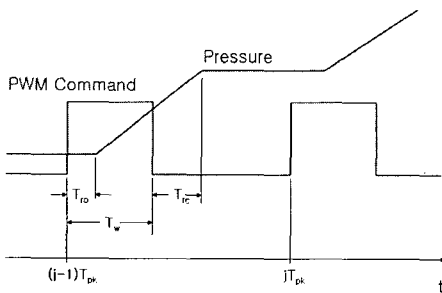


Fig. 6 Definition of  $T_{ro}$  and  $T_{rc}$

위의 Fig. 6은 솔레노이드 밸브에서의 열림시간( $T_{ro}$ )과 닫힘시간( $T_{rc}$ )의 개념이며, 그림에서 보듯이 열림시간이란 밸브명령신호 (PWM Command)의 인가 후 압력신호가 올라가기 시

작할 때까지의 시간이며, 닫힘시간이란 밸브명령신호의 단락 후 압력신호의 증가가 멈출 때까지의 시간이다.

실제 PWM 명령을 주기위한  $j$ 번째 기준신호의 크기( $E_{cj}$ )에 따른  $j$ 번째 펄스폭( $T_{wj}$ ), 열림시간( $T_{roj}$ ), 닫힘시간( $T_{rcj}$ )은 식(9),(10),(11)과 같이 되며, Fig. 7은 그 개념을 보여준다.[5]

$$T_{wj} = \begin{cases} 0, & 0 \leq E_{cj} < E_0 \\ (E_{cj} - E_0) T_{pk} / V_{pk}, & E_0 \leq E_{cj} < E_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$T_{roj} = \begin{cases} 0, & 0 \leq E_{cj} < E_0 \\ T_{rom}, & E_0 \leq E_{cj} < E_2 \\ T_{rom} [1 - (E_{cj} - E_2) / (E_3 - E_2)], & E_2 \leq E_{cj} < E_3 \\ 0, & E_3 \leq E_{cj} < E_{pk} \end{cases} \quad (10)$$

$$T_{rcj} = \begin{cases} 0, & 0 \leq E_{cj} < E_0 \\ T_{rc0} + (E_{cj} - E_0) (T_{rcm} - T_{rc0}) / (E_1 - E_0), & E_0 \leq E_{cj} < E_1 \\ T_{rcm}, & E_1 \leq E_{cj} < E_{pk} \end{cases} \quad (11)$$

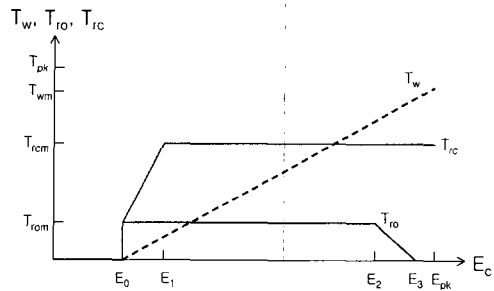


Fig. 7 Variations of  $T_w$ ,  $T_{ro}$  and  $T_{rc}$  as a function of  $E_c$

여기에서  $E_0$ 는 밸브가 열리기 시작하는 전압이며,  $E_1$ 은 밸브가 완전히 열리기 시작하는 전압이며,  $E_2$ 는 밸브가 완전히 열린 후 완전히 닫히지 않기 시작하는 전압이며,  $E_3$ 는 밸브가 닫히지 않고 계속 완전히 열려있기 시작하는 전압이다.

실제 솔레노이드 밸브가 열리는 비율(open ratio,  $R_{oj}$ )은 식(12)와 같이 표현된다.

$$R_{oj} = (T_{wj} + T_{rcj} - T_{roj}) / T_p \quad (12)$$

그러므로, 다음의 식(13)의 조건이 만족 될 때 실제로 밸브에 연료가 흐르게 된다. 즉 이 조건이 만족될 때  $f(R_{oj}, t)$ 가 1이 된다.

$$E_c > E_0, \quad (13-1)$$

$$(j-1)T_p + T_{roj} < t < (j-1)T_p + \text{Min}(R_{oj}T_p + T_{roj}, T_p) \quad (13-2)$$

출구 오리피스 밸브를 통과하는 유량( $Q_e$ )은 식 (14)와 같다[3].

$$Q_e = C_h \cdot A_e \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_h} (P_3 - P_e)} \quad (14)$$

2.3 시뮬레이션 결과 및 검토

이상의 수학적 모델을 이용하여 Fig. 8과 같이 Matlab/SIMULINK Program으로 PWM 연료조절장치의 성능해석 프로그램을 작성하였다.

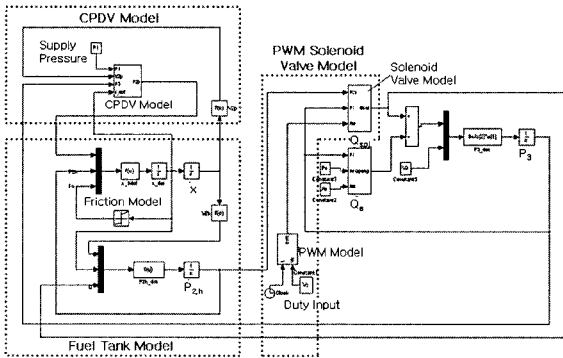


Fig. 8 Diagram of SIMULINK Program

위의 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 Table 1 과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 시뮬레이션은 듀티율(Duty Ratio)이 50%일 때, PWM 주파수 (50, 100 Hz)와 밸브 반응시간(1, 5, 10 msec)별로 각각 수행되었다. 여기서 듀티율이란 밸브의 작동 1주기 당 밸브개방 시간 비율을 의미한다.

Table 1. The Fluctuation of the Outlet Pressure of Solenoid valve

Response PWM Time frequency	Response		
	1msec	5msec	10msec
50Hz	about 3psi(1)	-	about 3psi(2)
100Hz	about 1.5psi(3)	about 1.5psi(4)	-

\* The numbers in ( ) match up the numbers in the title of Fig. 9-12

시뮬레이션 결과, Table 1에 나타난 바와 같이 단순히 솔레노이드 밸브의 응답 속도를 빠르게 하는 것은 압력 및 유량 섭동에 영향을 미치지 못하나, PWM 주파수를 높이는 것은 압력 및 유량섭동(fluctuation)의 크기를 감소시키는 것으로 확인되었다. Fig. 9 ~ Fig. 12는 위의 Table 1에서 각각의 경우에 대한 압력과 유량의 시뮬레이션 결과로서,  $P_2$ 와  $P_3$ 는 각각 솔레노이드밸브 입구 및 출구압을,  $Q_{sol}$  과  $Q_e$ 는 솔레노이드 출구 및 연료조절시스템 출구유량을 나타낸다. 그림에서 PWM 주파수와 압력 및 유량의 섭동 주파수는 동일함을 볼 수 있는데, 이는 PWM 연료공급 장치의 고유한 특성으로 판단된다.

PWM 주파수 50Hz에서의 유량섭동의 크기는 평균유량 대비 약 14%정도였으며, 100Hz에서의 유량섭동의 크기는 약 5.7%정도였다.

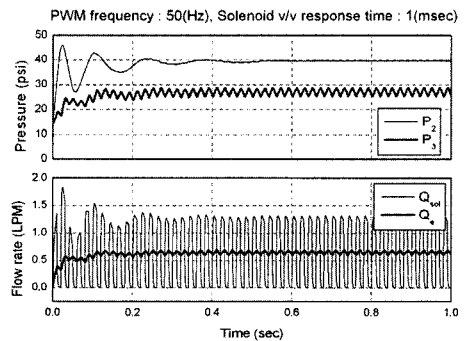


Fig. 9 Simulation Results (1)

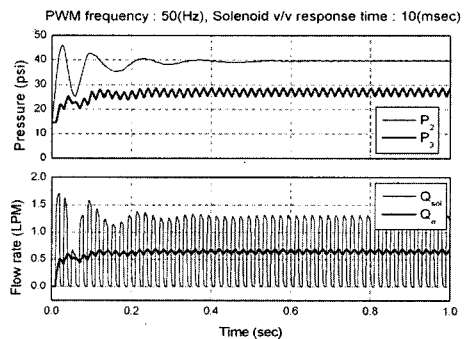


Fig. 10 Simulation Results (2)

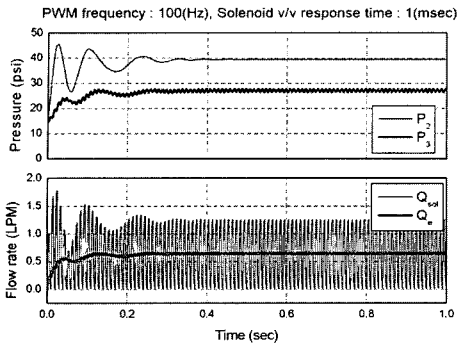


Fig. 11 Simulation Results (3)

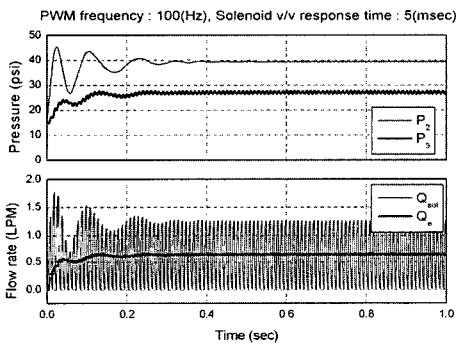


Fig. 12 Simulation Results (4)

3. 리그 시험 및 결과 분석

3.1 시험리그의 구성

PWM 연료조절장치의 시험리그를 Fig. 13에 나타내었는데, 반응시간 2msec 수준의 고속솔레노이드밸브와 CPDV, 제어기, 그리고 압력 및 유량센서 등으로 구성하였다. 시험조건으로 CPDV의 공급압력을 70 psi로하고, CPDV의 조절압력은 40psi로 설정하여 시험을 수행하였다. 시험장치에서 PWM 신호는 삼각파 발생기의 전압과 목표유량치의 환산전압과의 차이에 의해 펄스폭이 변조되어 솔레노이드 밸브에 전달된다.

3.2 시험결과 및 분석

시험은 PWM 주파수가 각각 30, 50, 70 Hz 일 때,

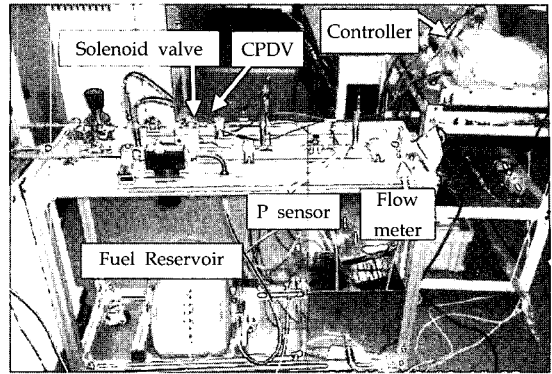


Fig. 13 Test rig of PWM Fuel Flow Control System

PWM 명령신호의 듀티율을 20% 에서 80% 까지 증가시키면서 솔레노이드 밸브 후단에서의 압력과 유량을 측정하였다.

시험 결과는 Fig. 14 에 나타난 바와 같이 듀티율 20% 에서 80% 사이에서 유량이 듀티율에 거의 선형적으로 변화됨을 확인하였고, 이때 압력 섭동은 3 psi 이내의 값을 보였다.

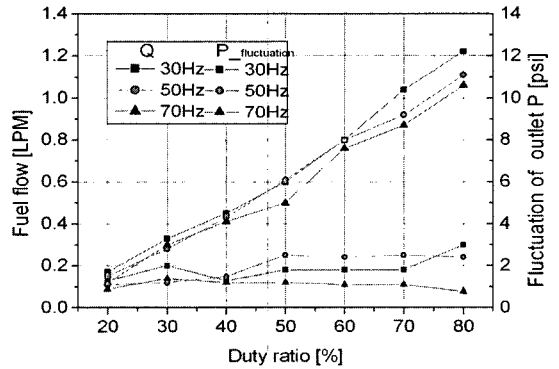


Fig. 14 Experiment result

또한, Fig. 14의 결과를 살펴보면, PWM 주파수 50Hz에서 상대적으로 선형성이 높은 결과를 보여주고 있다. 이에, 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위하여 이 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 시험결과와 비교하였는데, 그 결과를 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 시험결과와 시뮬레이션 결과

과가 잘 일치함을 확인함으로써 모델의 타당성을 검증하였고, 따라서 이 모델은 향후 PWM 연료조절장치의 실제개발에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

하였고, 입력 대 출력의 선형성으로부터 이 장치의 실용화 가능성을 확인하였다.

### 참고문헌

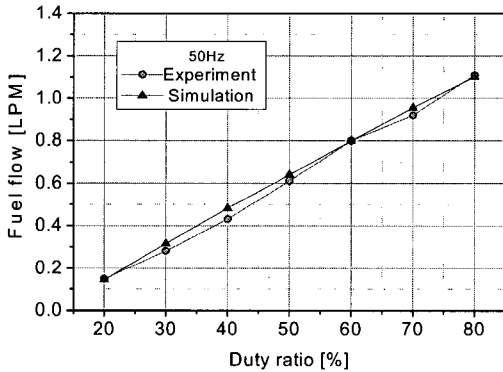


Fig. 15 Comparison of Experiment and Simulation Data at PWM Frequency 50Hz

### 3. 결 론

초소형 엔진에 적용 가능한 소형, 저가의 PWM 연료조절장치를 설계/구성하였으며, 해석과 시험을 통하여 시스템의 특성을 파악하였다. 또한, 시험장치를 구성하여 수행한 시험결과와의 비교를 통해 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증

1. Gordon E. Jensen, David W. Netzer, "Tactical Missile Propulsion," Vol. 170, Progress In Astronautics And Aeronautics, AIAA Inc., 1996, pp.423-446
2. Malcolm John McArthur, "Pulse Width Modulated Fuel Flow Control For An Engine", United States Patent US6209309B1, Apr.3, 2001
3. Blaine W. Andersen, "The Analysis and Design of Pneumatic Systems," John Wiley & Sons, Inc., 1967
4. Herbert E. Merritt, "Hydraulic Control System", John Wiley & Sons, Inc., 1967
5. N. Ye, S. Scavarda, M. Betemps, A. Jutard, "Models of a Pneumatic PWM Solenoid Valve for Engineering Applications" Vol. 114, Transactions of the ASME, December 1992, pp.680-688