

차량 엔진용 전자기식 밸브의 모델링 및 제어기 설계 Modelling and Controller Design of Electro-Magnetic Valve for Vehicle Engine

정영석
Y. S. Jung

Key Words : EMV(전자기식 밸브), Pulse Width Modulation(펄스폭 변조), Coil Driver Circuit (권선 구동 회로), Optimal Control Theory(최적 제어 이론)

Abstract : The modelling and controller design of the EMV(electro-magnetic valve) for vehicle engine are considered in this paper. For the analysis and controller design, the governing equation of the EMV system is derived. For a good performance of the system, the start control, the holding control and the swing control are included in the controller design of the EMV system. In order to reduce landing speed of the valve, the on-time delay control which mainly come from the optimal control theory is employed. In order to reduce the power consumption of the system, the pick-up and hold operation has been used for the magnetic coil. The simulation and experimental results are presented to show the validity of the control method.

기 호 설 명

- Φ : 자속(Magnetic flux)
- R : 코일 저항(Registance)
- N : 권선수(number of turns)
- U : 전원 전압(source voltage)
- F_m : 자기력(magnetic force)
- x_1, x_2, x_3, x_4 : 상태 변수(변위, 속도, 자속)
- g : 공기극(air gap)
- K_s : 스프링 상수
- C_v : 마찰 계수
- A : 자로의 면적
- m : 밸브 및 아마츄어 질량

Subscripts

- u : upper
- l : lower

1. 서 론

현재 차량용 엔진에 있어 고효율의 엔진을 개발하기 위해 많은 연구가 진행 중이다. 이 중 펌핑 손실 저감과 충전 효율 및 압축비 증대의 효과를 위해 전자기식 밸브에 대한 연구도 그 한 분야가 되고 있다. 현재 전자기식 밸브 시스템은 신뢰성 면이나 가격면에서 문제점을 내포하고 있으나, 이 시스템의 도입으로 기대되어지는 차량의 연비 향상, 배기 가스 저감 효과, 저속 고부하에서 영역에서의 토크 상승 등의 효과가 기대되고 있어 이 시스템에 대한 연구가 현재 진행 중이다. 특히 기존의 연구에서는 전자기식 밸브의 성능 향상을 위해 고성능의 마이크로프로세서가 사용되었거나¹⁾, 전자기식 밸브가 장착된 엔진에서의 특성 고찰에 중점을 두었다²⁻³⁾.

본 연구에서는 저성능의 마이크로프로세서로 우수한 제어특성을 얻을 수 있는 제어방식을 얻기 위해 전자기식 밸브의 모델링을 행하였다. 전자기식 밸브는 전기, 자기 그리고 기계 시스템으로 구성되어 있으므로 이들에 대한 모델식을 유도함으로써 전자기식 밸브에 대한 모델을 얻을 수 있다. 이 유도된 모델식을 바탕으로 3단계로 구성되어 있는 제어기를 구성하였다. 먼저 밸브가 초기 상

접수일 : 2002년 8월 13일
정영석 : 부경대학교 기계공학부

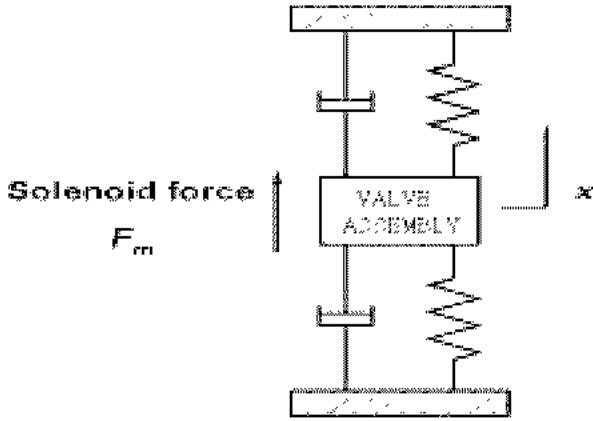


Fig. 1 Modeling structure of the EMV system : mechanical part

태인 중간 지점에서 엔진의 운전을 준비하는 초기 기동 제어(start control), 밸브가 열리거나 닫혀진 상태를 유지하는 유지 제어(holding control), 그리고 밸브 개폐의 동작에 따른 천이 제어(swing control) 들로 제어기를 구성하였다. 전자기식 밸브의 모델링 및 제어기의 성능을 고찰하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 행하였다.

2. 모델링

EMV 시스템은 기계부분과 전기부분으로 구성되어 있으며, 이들의 상호 결합은 자기 부분이 담당하고 있다. EMV 시스템의 기계부분은 질량, 댐퍼 및 스프링으로 이루어진 계로 구성되며 그 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 기계부분에 대한 모델식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m}(F_m - K_s x_1 - C_v x_2) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 m 은 질량을 K_s 는 스프링 상수, C_v 는 마찰 계수, F_m 은 자기력을 나타내며 자기력은 공극에서의 자속, Φ 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_m = \frac{2}{\mu_0 A} \{ \Phi_u^2 - \Phi_l^2 \} \quad (2)$$

그리고 EMV 시스템의 전기 부분은 경우 전원 소스(U)와 권선 저항(R) 그리고 권선과 쇄교하는 자속의 변화분으로 구성되며, Fig. 2에 있는 자기 시스템의 구조로부터 자기 시스템은 권선 전류(i)와 두 자성체 간의 간격인 공극(g), 그리고 자속과의 상관 관계로 표현될 수 있으며 이를 수식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U &= Ri + N \frac{d(2\Phi)}{dt} \\ Ni &= \Phi \left(\frac{2g}{\mu_0 A} + \frac{l}{\mu_r \mu_0 A} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

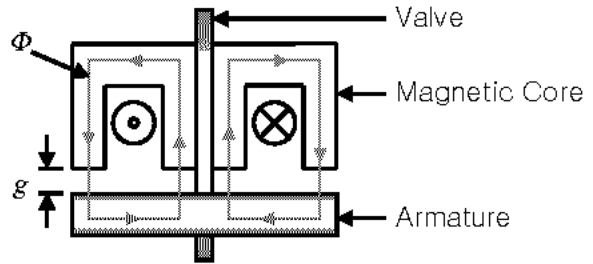


Fig. 2 Modeling structure of the EMV system : magnetic part

여기서 l 은 자성체 자로의 길이이며, μ_0, μ_r 은 각각 공극의 투자율 및 자성체의 비투자율이다. 특히 쇄교자속의 변화분을 인덕턴스와의 관계로 표현할 수 있으며, 이를 등가회로로 표현하면 Fig. 3과 같다. 이상에서 구한 EMV 시스템의 모델식을 상태변수로 표현해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m}(F_m - K_s x_1 - C_v x_2) \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{2N} \left\{ U_u - \frac{R}{\mu_0 NA} x_3 \left(X_m - 2x_1 + \frac{l}{\mu_r} \right) \right\} \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{2N} \left\{ U_l - \frac{R}{\mu_0 NA} x_4 \left(X_m + 2x_1 + \frac{l}{\mu_r} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

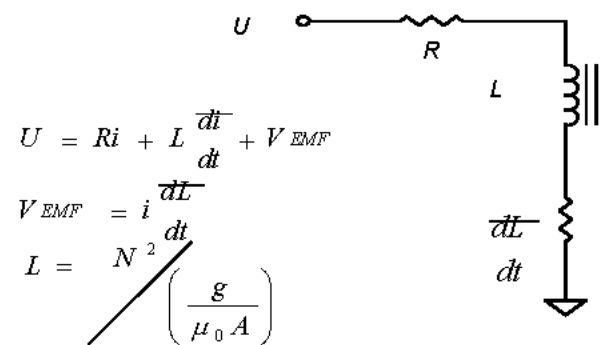


Fig. 3 Equivalent circuit of the EMV system: electro-magnetic part

여기서 x_1 은 밸브의 변위, x_2 는 속도, x_3 와 x_4 는 위쪽과 아래쪽에 위치한 자성체에 의해 생성된 자속을 각각 나타내며, X_m 은 밸브의 최대 이동변위를 나타낸다. EMV 시스템의 동특성을 확

인하기 위하여 4장에 제시된 시스템 파라미터를 사용하여 밸브의 속도, 변위 그리고 역기전력(Back EMF)과의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서는 권선에 흐르는 전류가 증가함에 따라 그리고 밸브의 위치가 자성체에 가까이 갈수록 역기전력이 급격히 증가함을 알 수 있으며 이로 인해 특히 인가 전압(42V)보다 높은 역기전력의 발생으로 인해 원하는 만큼의 전류제어가 불가하며 이로 인해 전자석이 발생하는 힘의 제어에도 영향을 주어 EMV 시스템의 제어 특성을 나쁘게 함을 알 수 있다.

3. 제어기 설계

EMV의 동작은 엔진의 동작에 따라 크게 3가지의 동작 모드로 구성된다. 이 3가지 동작모드는 먼저 초기 상태, 즉 밸브가 중립상태에서 기동하여 한쪽의 전자석으로 이동하는 단계(밸브 초기 기동 단계), 한쪽으로 이동한 밸브를 계속 그 위치에 유지하는 단계(밸브 유지 단계), 그리고 한쪽 전자석에서 다른 전자석으로의 이동 단계(밸브 천이 단계)로 나누어 볼 수 있다. 따라서 EMV의 제어기를 설계하기 위해서는 각 상태에 따른 제어기를 구성할 필요가 있으며 이를 위한 전체 제어 블록도는 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

3.1 밸브 초기 기동 제어(Start control)

밸브가 초기 기동시에는 항상 전자석면과 밸브의 아마추어가 멀리 떨어져있다. 전자석의 특성상 밸브의 위치가 전자석면과 먼 경우에는 발생하는 전자기력이 미약하고 이로 인해 요구되는 권선 전류가 상당히 증가하는 문제가 있다. 따라서 이 문제점을 해결하기 위해서는 밸브의 질량과 스프링으로 구성된 시스템의 공진 현상을 이용할 필요가 있으며 이때 밸브의 구동에 요구되는 전압을 각 권선에 인가하는 시간은 다음과 같이 계산된다.

$$T_{on} = \pi \sqrt{\frac{m}{K_s}} \quad (5)$$

3.2 밸브 유지 제어(Holding control)

밸브가 한쪽 전자석면에 붙은 상태에서는 충분히 전자기력이 발생하므로 권선에 인가되는 전류를 줄여 권선에서 발생하는 손실을 줄여줄 필요가 있다. 이를 위해 PWM(pulse width modulation) 제어가 사용되며 전류제어의 우수한 동특성을 위

해 Fig. 6과 같은 구동회로를 사용한다. 이 경우 권선에 인가 되는 평균 전압은 다음과 같다.

$$V_{avg} = U \cdot (2D-1) \quad (6)$$

여기서 V_{avg} 는 평균 전압, D 는 시비율(Duty ratio)을 나타내며, 이 시비율에 따른 권선 평균 전류는 $I_{avg} = V_{avg}/R$ 이다.

3.3 밸브 천이 제어(Swing control)

밸브가 한쪽면에서 다른쪽면으로 이동하는 과정에서 다른쪽면과 부딪히는 현상이 발생하게 된다. 이때 착지속도를 줄여줌으로써 밸브의 신뢰성을 향상 시킬 수 있다. 그러나 앞에서 살펴보았듯이 밸브가 전자석면에 가까워지면 역기전력이 증가하여 제어 성능을 떨어뜨리는 문제가 있다. 이를 위해 최적제어이론을 이용하여 온 시간 지연제어기를 구성한다. 식 (4)의 시스템 모델식을 다음과

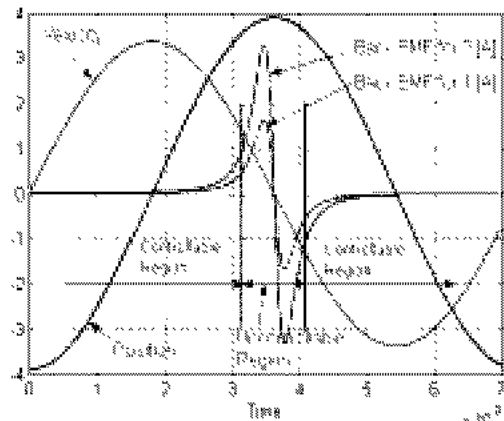


Fig. 4 Plot of Back EMF for the different coil current; velocity: 1 [m/sec]/div, position: 1 [mm]/div, Back EMF: 42 [V]/div

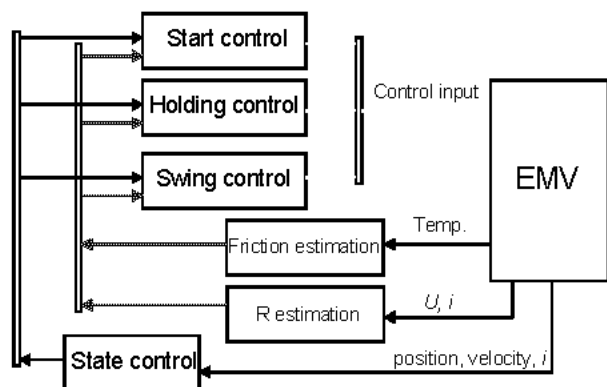


Fig. 5 Overall control block diagram of EMV system

같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$X = f(x) + bU_i \quad (7)$$

여기서 $X = [x_1 x_2 x_3 x_4]^T$,

$$U_i = [0 \ 0 \ U_u \ U_l]^T,$$

$$b = 1/2N,$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{1}{m} \left(-K_s x_1 - C_v x_2 + \frac{2}{\mu_o A} (x_3^2 - x_4^2) \right) h t \\ - \frac{R}{2\mu_o N^2 A} x_3 \left(X_m - 2x_1 + \frac{l}{\mu_r} \right) \\ - \frac{R}{2\mu_o N^2 A} x_4 \left(X_m + 2x_1 + \frac{l}{\mu_r} \right) \end{bmatrix}$$

이다.

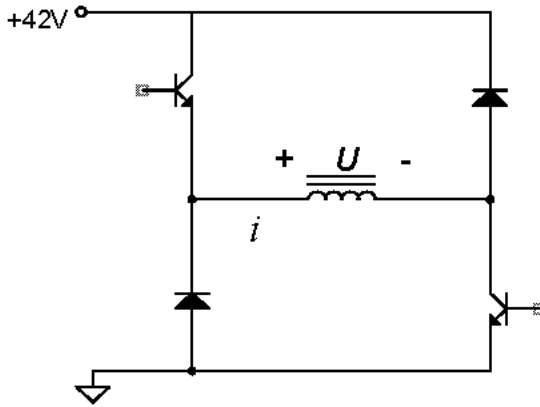


Fig. 6 Coil drive circuit for EMV system

최적제어에서 빠른 시간 내에 다른 전자석면으로 이동하기 위한 성능지수(Performance index)와 이와 관련된 해밀토니언(Hamiltonian)은 다음과 같다⁴⁾.

$$J = \frac{1}{2} (X(T) - r(T))^T S(T) (X(T) - r(T)) + \int_0^T 1 \cdot dt$$

$$H = 1 + \lambda^T (f + bU_i). \quad (8)$$

식 (7)과 (8)로부터 EMV 시스템의 costate 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$-\dot{\lambda} = \frac{\partial f}{\partial X}^T \lambda + \frac{\partial L_{lag}}{\partial X} \quad (9)$$

여기서 $L_{lag} = 1$ 이며, $\partial f^T / \partial X$ 는 Table 1에 나타내었다. 그런데 입력으로 사용되는 전압의 최대값이 42V로 제한되어 있으므로 EMV 시스템에 대한 최적제어 입력은 Pontryagin's minimum principle로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_i^*(t) = -\text{sgn}(b^T \lambda(t)) \quad (10)$$

여기서 $\text{sgn}(w) = \begin{cases} 0, & w \geq 0 \\ -1, & w < 0 \end{cases}$ 이다.

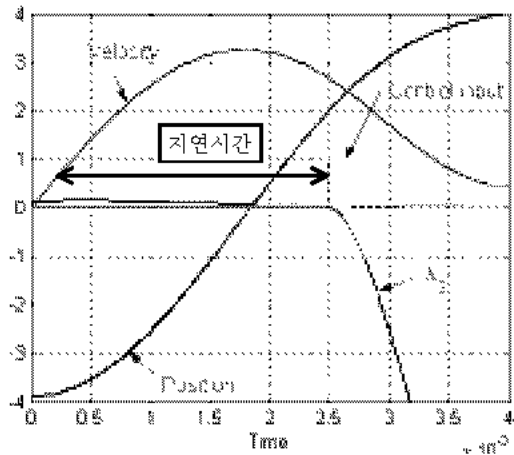


Fig. 7 Simulation waveforms of EMV system employing optimal control

Table 1 Jacobian of f

$$\frac{\partial f}{\partial X}^T = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{K_s}{m} & \frac{R x_3}{\mu_o N^2 A} & -\frac{R x_4}{\mu_o N^2 A} \\ 1 & -\frac{C_v}{m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4x_3}{\mu_o A m} & -\frac{R \left(X_m - 2x_1 + \frac{l}{\mu_r} \right)}{2\mu_o N^2 A} & 0 \\ 0 & -\frac{4x_4}{\mu_o A m} & 0 & -\frac{R \left(X_m + 2x_1 + \frac{l}{\mu_r} \right)}{2\mu_o N^2 A} \end{pmatrix}$$

Fig. 7에는 밸브 천이 제어에 최적제어기를 적용했을 경우의 밸브 동작 파형이다. 이 그림은 밸브가 아래위치에서 위로 이동하면서 닫히는 과정을 나타내고 있다. 식 (10)에서 구한 제어 입력에서 밸브가 위로 천이할 때는 위쪽 전자석이 동작하므로 $u_{upper}^*(t) = -sgn(\lambda_3)$ 이 됨을 알 수 있다.

이 그림에서 알 수 있듯이 EMV 시스템에 최적제어기를 적용할 때 제어입력이 최저 입력(0V)에서 최고 입력(42V)으로 그 값이 스위칭함을 알 수 있다. 이 특성은 실제 차량 적용에 있어서 구현상 중요한 장점을 준다. 특히 저성능의 마이크로프로세서를 사용하고서도 전자석에 전압을 인가하는 순간까지의 최적의 지연 시간을 구해, 제어해 줌으로써 개루프 방식의 최적제어기를 구현할 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 실험

EMV 시스템의 제어 특성을 확인하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 행하였다. 밸브 천이 제어에서는 최적제어의 특성을 그대로 보여줄 수 있으며 실제 사용되는 micro-processor의 성능을 고려 전자석에 전압을 인가하는 시간을 조절하는 온시간 지연제어를 사용한다. Table 2에는 EMV system의 파라미터가 요약되어 있다.

Table 2 EMV system parameters

입력전압 (U)	42 [V]
권선수 (N)	75
권선저항 (R)	0.5 [Ohm]
스프링상수 (K_s)	$2 * 75$ [N/mm]
밸브 질량 (m)	200 [g]

Fig. 8은 EMV 시스템에 대한 전체 제어를 구성하였을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 여기에는 권선 전류, 밸브의 변위 및 속도가 나타나 있으며, 각 제어 단계에 따라 제어기 동작 구간을 나타내어 주고있다. 밸브 초기 기동 단계에서는 공진현상을 이용한 밸브의 기동이 일어남을 알 수 있다. 다음 단계인 밸브 유지 단계에서는 밸브를 한쪽 전자석에서 유지될 수 있도록 제어되고 있음을 알 수 있으며 밸브 천이 제어에 의해 밸브의 착지 속도를 상당히 줄여줄 수 있음을 알 수 있다.

실험에서는 EMV 제어를 위해 Infineon사의

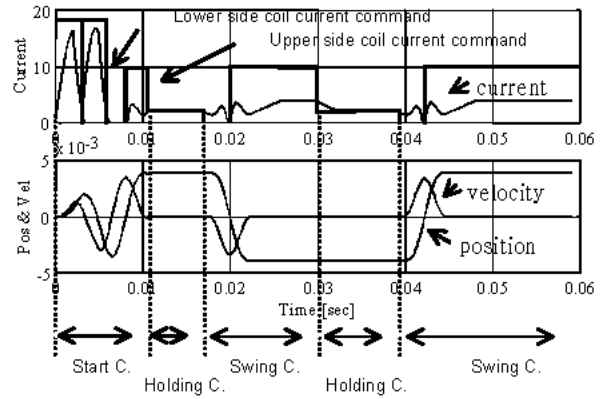


Fig. 8 Simulation waveforms of current, position, and velocity of the valve

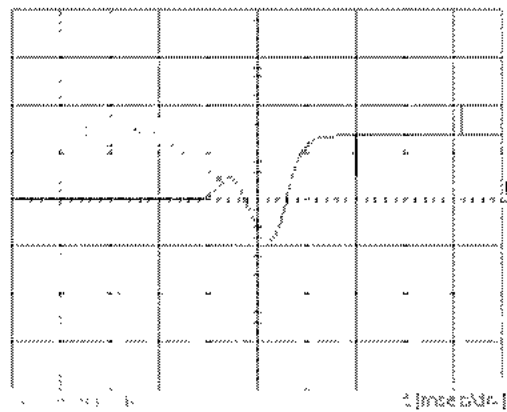


Fig. 9 Initial start-up response of the valve

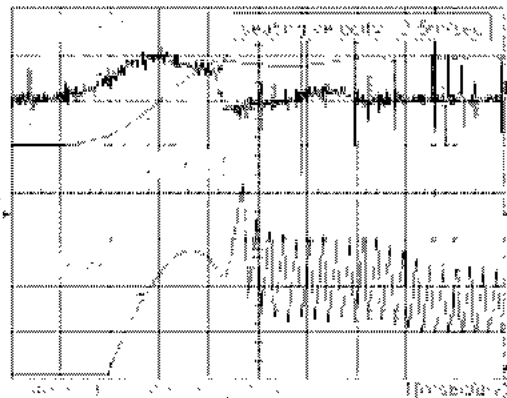


Fig. 10 Waveforms when hard landing: current, position, and velocity

C167 16bit micro-controller를 사용하여 제어를 구성하였다. 권선의 전류제어를 위해서 PWM 제어 방식을 사용하였으며 밸브 구동회로는 Fig. 6의 회로를 사용하여 전류의 다이내믹 특성을 향상시키고 권선에 저장된 에너지의 일부를 회생하여 사용하였다. Fig. 9는 밸브 초기 기동시의 밸브 변위 파형을 나타낸다. 이 그림은 공진현상을

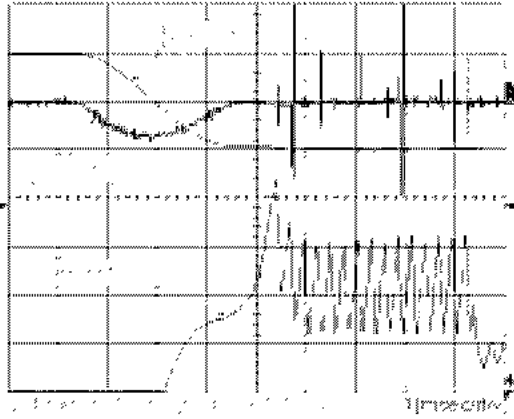


Fig. 11 Waveforms when soft landing: movement from top to bottom

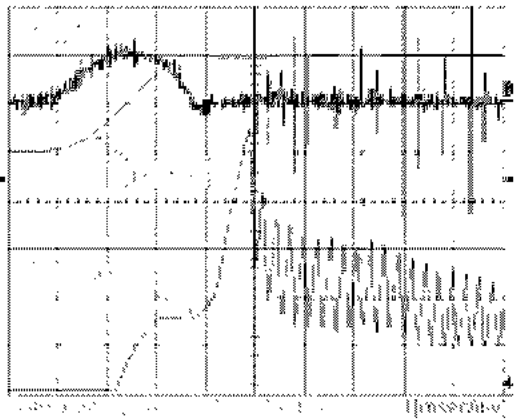


Fig. 12 Waveforms when soft landing: movement from bottom to top

이용하여 밸브를 초기 상태(변위=0)에서 위쪽 전자석으로 이동(밸브 닫힘)시키는 동안의 변위 파형이다.

Fig. 10에는 밸브가 열려 있다가 닫힐 때 권선에 전압을 인가하는 시점이 너무 이른 경우의 권선전류와 밸브의 변위 및 속도를 나타내고 있다. 이 경우 착지점에서의 밸브의 속도는 상당히 빠른 2.5[m/sec]정도가 됨을 알 수 있다.

Fig. 11과 12에는 밸브가 최적으로 닫힐 경우와 열릴 경우의 권선전류와 밸브의 변위 및 속도를 나타내고 있다. 이 두 파형에서는 최적의 온시간 지연시간을 얻음으로써 밸브의 천이시 착지점에서의 속도를 0.5[m/sec]이하로 제어할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13과 14에는 밸브의 유지제어시의 밸브의 변위와 권선전류를 나타내고 있으며, 밸브를 닫힌 상태 또는 열린상태로 유지하기 위해 필요한 전류는 4.5[A]정도임을 알 수 있다.

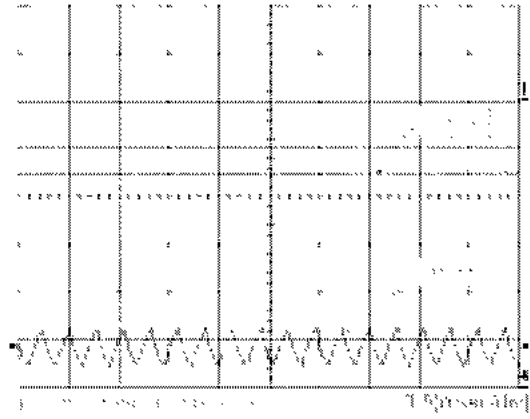


Fig. 13 Current and position waveforms when valve is opened

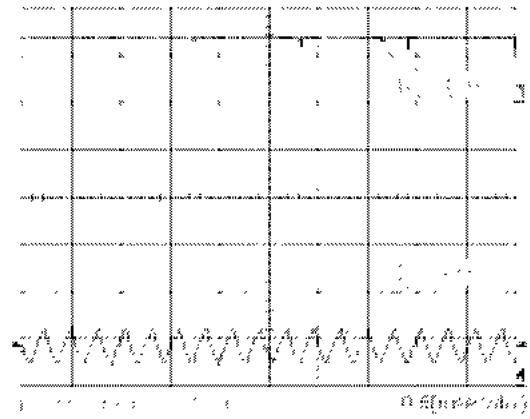


Fig. 14 Current and position waveforms when valve is closed

5. 결 론

본 논문에서는 EMV 시스템 제어를 위한 시스템 모델링 및 저성능의 마이크로프로세서로 우수한 제어특성을 얻을 수 있는 제어기 설계를 행하였다. 모델링을 통해 EMV 시스템의 제어 특성 중 특히 밸브가 전자석면 가까이로 접근하면 전류제어가 불가능해지는 구간이 존재하며 이는 EMV의 제어 특성을 어렵게 만드는 요인임을 확인하였다. 밸브가 천이할 때 이런 특성을 감안하여 착지 속도를 저감할 수 있는 최적제어기를 구성하였으며, 이는 전원 인가 시간 지연제어와 유사한 특성을 보임을 알 수 있었다. 전원 인가 시간 지연제어방식에 의해 밸브의 착지속도를 0.5[m/sec]이하로 저감할 수 있음을 알 수 있었다. 밸브가 천이하는 데 필요한 시간은 3.5[msec]정도로 엔진이 6000 RPM 정도까지 운전 가능하게 한다. 밸브의 유지제어에 의해 권선에서 소비되는 전력을 줄여

줄 수 있었으며 그 값은 4.5[A]이었다.

참 고 문 헌

1. S. Butzmann, J. Melbert, "Sensorless Control of Electromagnetic Actuators for Variable Train," SAE 2000-01-1225, 2000
2. 박승현, 이종화, 김도중, 박경식, "EMV시스템의 동특성 분석을 위한 모델 및 실험적 고찰", 한국자동차공학회논문집, 제10권, 제3호, pp. 85~92, 2002
3. 노석홍, 손진욱, 최명식, 김형준, 최재권, "저압축 고평창비 엔진의 설계기술", 차세대자동차 기술논문집, 제8회 workshop, 2000
4. Frank L. Lewis, "Optimal Control", John Wiley & Sons, New York, 1986