

캠리스엔진 밸브액츄에이터의 동역학 시뮬레이션 및 밸브타이밍 적응제어

남강현*¹⁾·최세범¹⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾

Dynamic Simulations and an Adaptive Valve Timing Control for a Camless Engine Valve Actuator

Kanghyun Nam*¹⁾ · Seibum Choi¹⁾

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

Abstract : Camless Engine Valve Actuation (CEVA) technologies have been known for improving fuel efficiency, enhancing power output, and reducing emissions of Internal Combustion(IC) engine. Electro-Hydraulic valve actuators are used to eliminate the camshaft of an existing Internal Combustion(IC) engine and to control the valve timing of intake and exhaust valves, valve duration independently. This paper presents a research activity like hydraulic valve actuator design, dynamic simulations, analysis and adaptive valve timing control of Camless Engine Valve Actuator. Electro-Hydraulic valve actuator's main function is to provide fully variable open/close valve timing. The Camless Engine Valve Actuator (CEVA) system has been modeled by means of a powerful hydraulic simulation tool, AMESim, which is useful for the dynamic simulations and analysis of hydraulic systems. The designed model has been validated through comparison with mathematical model and experimental results obtained in a prototype test bench. This research is focused on Adaptive valve timing control of Camless Engine Valve Actuator (CEVA) system. A proposed valve timing control in this paper is used to robustly control opening timing, duration, closing timing regardless of fluid temperature variations without high-cost sensors. Test bench data and simulation results indicate that a Camless Engine Valve Actuator (CEVA) system would verify the effectiveness and feasibility of a fully variable valve timing technology.

Key words : CEVA(Camless Engine Valve Actuator), Snubber(스너버), Landing velocity(안착속도), Valve timing control(밸브 타이밍 제어), Timing detection(시간감지), Viscosity effects(점성효과)

Nomenclature

$P_{1,2}$: pressure of cylinder chamber1,2, N/m²
 $Q_{1,2}$: meter in and meter out flow-rate, m³/s
 β_e : effective bulkmodulus, N/m²
 $A_{1,2}$: ram areas of the cylinder, m²

x_p : piston displacement, m
 P_s : supply pressure, N/m²
 ρ : density, kg/m³
 δ_0 : initial displacement of valve spring, m
 t_{on} : voltage on-duration during opening, sec
 $\Delta T_{reference}$: reference opening/closing time, sec
 $\Delta T_{measured}$: measured opening/closing time, sec

* 남강현, E-mail:nkh6189@kaist.ac.kr.

x_v : servo-valve displacement, m

2. 밸브액츄에이터 모델링

밸브액츄에이터의 동특성은 밸브액츄에이터를 구성하는 피스톤의 설계변수, 동작환경등 다양한 인자에 의하여 영향을 받는다. 이러한 밸브액츄에이터의 인자변화에 따른 동특성을 해석하기 위하여 유압식 밸브액츄에이터의 AMESim 모델을 개발하였고 다양한 인자조건하에서 동역학 시뮬레이션을 통해서 밸브액츄에이터의 상세설계를 하였다. 동역학 시뮬레이션을 통해서 최적화된 설계치수를 반영하여 제작된 밸브액츄에이터의 성능은 AMESim 모델, Matlab/Simulink 모델의 시뮬레이션결과와 Test bench 결과를 비교함으로써 검증하였다.

1. 서론

캠리스엔진 밸브액츄에이터를 이용한 무한가변 밸브시스템의 구현은 내연기관의 에너지효율, 유해배기가스, 출력토크등에 있어서 획기적인 향상을 가져온다. 기존의 내연기관에서 흡기/배기밸브의 개폐를 담당하는 캠구동 밸브트레인의 기능을 유압식액츄에이터가 대신함으로써 독립적인 엔진밸브의 개폐타이밍, 리프트제어를 가능하게 한다. 캠리스엔진 밸브액츄에이터의 독립적인 제어는 엔진이 작동하는 전 영역에서의 성능최적화를 가능하게 하는 밸브 타이밍제어기술로서 연구가치가 크다. 엔진의 공회전 시 엔진rpm을 낮출 수 있고, 스로틀밸브없이 엔진의 동작이 가능하기 때문에 펌핑손실을 최소화할 수 있다. 또한 엔진의 작동상황에 따른 실린더 디액티베이션 기술도 가능하게 한다.

본 연구에서는 유압식 밸브액츄에이터의 성능검증을 위하여 유압해석 프로그램인 AMESim과 Matlab/Simulink를 활용하였다. AMESim 모델의 동역학 시뮬레이션을 통해서 모델을 최적화하고 Test bench 실험을 통해서 모델을 검증하였다. 유압식 밸브액츄에이터를 구성하는 액츄에이터 피스톤의 내구성확보를 위하여 피스톤 양단에 완충역할을 하는 Snubber를 설계하였고 실험을 통해서 검증하였다. 마지막으로 검증된 밸브액츄에이터 모델을 활용하여 밸브타이밍 적응제어 전략을 수립하고 고가의 변위센서를 사용하지 않고 밸브타이밍을 제어하는 알고리즘을 개발하였다. 온도변화에 따른 유체의 점성변화가 밸브타이밍에 직접적으로 영향을 주기때문에 온도변화에 강인한 타이밍제어 전략이 반영된 제어알고리즘을 AMESim 모델과 Matlab/Simulink의 co-simulation을 통해 검증하였다.

2.1 설계인자 및 시스템사양

캠리스엔진 밸브액츄에이터의 성능을 충족시키기 위해 필요한 설계인자와 시스템사양은 엔진의 동작조건에 의해서 결정된다. 엔진의 고속 동작영역에서는 엔진의 흡기/배기밸브가 신속하게 열리고 닫혀야하고, 액츄에이터의 노이즈저감 및 충격력을 최소화하도록 설계가 이루어져야한다. 캠리스엔진 밸브액츄에이터의 기본적인 동작사양은 Table1 과 같다.

Table 1 Design and Performance Specifications

Specification	Target	Actual
Maximum engine speed	5000rpm	4000rpm
Gas valve diameter	28mm	28mm
Maximum valve opening time	3msec	5msec
Maximum valve Landing velocity	0.3m/sec	0.3m/sec
Maximum valve lift	7.1mm	7.1mm
Supply pressure	100bar	80bar

Fig.1은 서보밸브에 인가하는 전압에 따른 밸브액츄에이터의 리프트변화와 속도변화를 나타낸다. 밸브의 개폐시간, 밸브안착속도는 Fig.1 에서와 같이 정의된다.

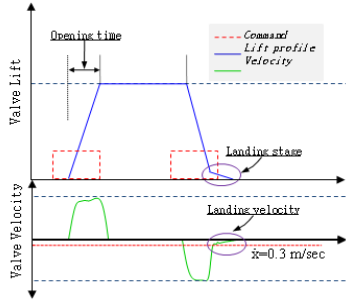


Fig. 1 Valve lift and velocity event with command signals

2.2 시스템 모델링

캠리스엔진 밸브액츄에이터 시스템의 간략한 유압회로는 Fig 2 와 같고 시스템은 액츄에이터를 제어하는 서보밸브, 액츄에이터(피스톤, 유압블럭), 유체공급장치(유압모터, 펌프, 필터등)등으로 구성된다.

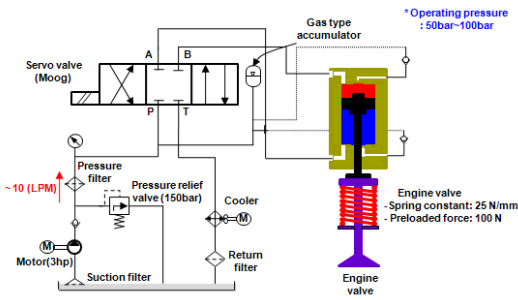


Fig. 2 Schematic of the valve actuator system

2.2.1 AMESim 모델

유압액츄에이터의 AMESim 모델은 유압시스템이 갖는 복잡한 비선형특성을 잘 모사한다. 다양한 조건하에서의 시뮬레이션을 통해 밸브액츄에이터의 설계사양을 결정하였고 실제로 제작된 밸브액츄에이터의 검증모델로 사용된다. 그리고 AMESim 모델은 Matlab/simulink와의 co-simulation을 통해서 밸브타이밍제어의 성능을 검증하기 위한 플랜트모델로도 사용된다.

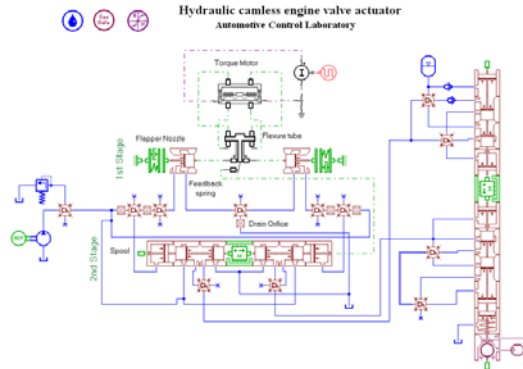


Fig. 3 AMESim model of valve actuator system

2.2.2 수학적 모델

캠리스엔진 밸브액츄에이터의 수학적 모델은 에너지보존의 법칙과 뉴턴의 제2법칙에 의해서 유도된다. 액츄에이터 피스톤에 작용하는 힘에 의한 동역학식은 식(1)과 같이 유도된다.

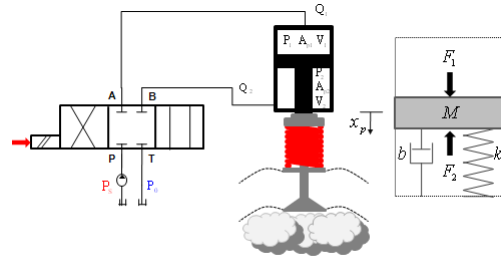


Fig. 4 Model of the valve actuator system

$$M\ddot{x}_p + b\dot{x}_p + kx_p + F_{preload} = P_1A_{p1} - P_2A_{p2} \quad (1)$$

여기서 M 은 액츄에이터 피스톤의 질량과 엔진밸브 질량의 합, b 는 댐핑계수, k 는 엔진밸브스프링의 강성, $F_{preload}$ 정상상태에서 엔진밸브스프링의 압축력, $P_1A_{p1} - P_2A_{p2}$ 는 피스톤에 작용하는 유압력을 나타낸다. 피스톤 양단에 작용하는 유체의 압력은 연속방정식과 오리피스 유동방정식을 통한 수학적식은 다음과 같다.

$$\dot{P}_1 = \beta_e / V_1 (Q_1 - C_{ip} (P_1 - P_2) - A_{p1} \dot{x}_p) \quad (2)$$

$$\dot{P}_2 = \beta_e / V_2 (-Q_2 + C_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}P_2 + A_{p2}\dot{x}_p) \quad (3)$$

$$Q_{n-in} = C_d A(x_v) \sqrt{2/\rho(P_s - P_n)} \quad (4)$$

$$Q_{n-out} = C_d A(x_v) \sqrt{2/\rho(P_n - P_0)} \quad (5)$$

$n = 1, 2$

식(1)~식(5)로 표현되는 밸브액추에이터 모델은 복잡한 비선형모델이기때문에 실시간제어기를 구현하기에 상당한 어려움이 따른다. 비선형모델에서의 시뮬레이션 결과와 제어목적으로 단순화된 모델의 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 단순화된 모델을 검증하였다. 단순화된 모델은 유압력방정식(1)의 우변항, $P_1A_{p1} - P_2A_{p2}$ 이 서보밸브의 동작 신호에 따라 펄스파와 유사한 형태로 형성된다는 가정에 기인한다. 이러한 가정은 서보밸브의 동작 특성과 서보밸브 스톱의 움직임에 따른 실린더내 압력과의 관계식에 의해 정의된다. 단순화된 밸브액추에이터 모델은 다음의 방정식(6)과 같다.

$$M\ddot{x}_p + b\dot{x}_p + k(x_p + \delta_0) = F(t) - F(t - t_{on}) \quad (6)$$

$$F(t) = 0, \quad \text{if } t < 0$$

$$F(t) = P_1A_{p1} - P_2A_{p2}, \quad \text{if } t \geq 0$$

방정식(6)은 밸브가 열리는 단계에서 적용되는 단순화모델이다. 질량, 스프링, 댐퍼로 구성되고 펄스입력이 주기적으로 가진되는 2차시스템으로 단순화되었다. 단순화된 2차시스템모델과 비선형모델에 동일한 입력이 인가될 때 응답특성은 다음의 Fig.5 에서 보여진다.

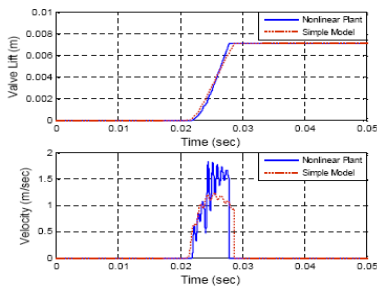


Fig. 5 Model validation (Nonlinear model/Simple model)

3. 밸브타이밍제어

본 연구에서 제안하는 밸브타이밍제어는 다양한 온도조건에서 밸브액추에이터 응답특성의 재현성확보에 목적이 있다. 고가의 변위센서를 사용하지 않고 밸브의 개폐시간만을 측정하여 밸브액추에이터의 동작타이밍을 보상하는 방법으로 제어알고리즘이 개발되었다.

3.1 밸브타이밍 제어알고리즘

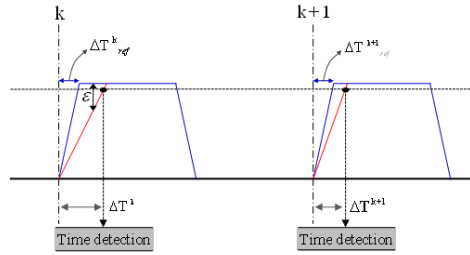


Fig. 6 Control concept and definition

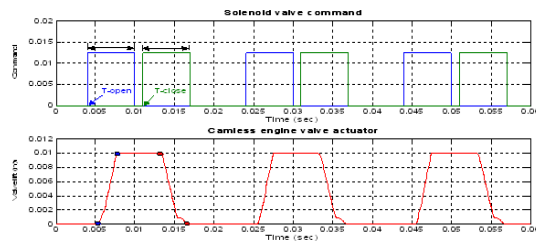
k번째 사이클에서 엔진밸브의 열리는 시간을 측정하여 엔진의 동작영역에 따라 정의된 기준시간과의 차이값이 k+1번째 밸브동작을 위한 입력 타이밍을 보상하는 방법으로 점성변화의 효과를 간접적으로 고려하는 제어전략이다. 다음의 수식(7)은 밸브타이밍을 매 사이클마다 보상해주는 제어입력을 나타낸다.

$$M\ddot{x}_p + b\dot{x}_p + k(x_p + \delta_0) = u + \hat{u}$$

$$\hat{u}^k = k_g [(\Delta t_{measured})^k - (\Delta t_{reference})^k] \quad (7)$$

여기서,

$$0 < (\Delta t_{measured})^k - (\Delta t_{reference})^k < 5\text{msec}$$



4. 시뮬레이션 및 실험결과

AMESim 액츄에이터 모델의 시뮬레이션과 Test bench(Fig.7)를 통한 실험을 기반으로 개발된 액츄에이터의 성능을 검증하였다.

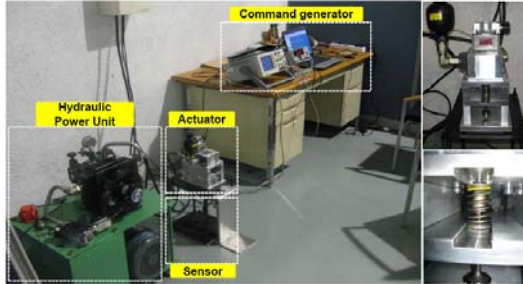


Fig. 7 Test bench configuration

Fig.8 과 fig.9은 Test bench를 통한 캠리스엔진 밸브액츄에이터의 실험결과를 나타낸다. 서보밸브의 입력단에는 10Hz의 펄스전압이 인가되었고 Snubber(스너버)에 의한 피스톤의 완충효과를 확인하기 위해서 레이저변위센서에서 측정된 밸브변위를 수치미분하여 밸브개폐 시 밸브의 속도변화를 목표값과 비교하였다.

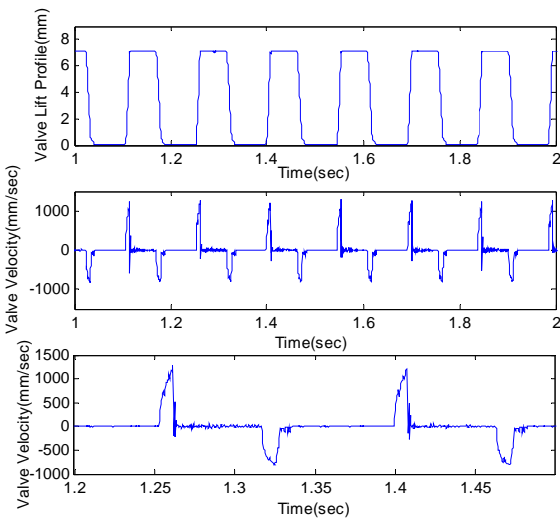


Fig. 8 Valve lift and velocity profile

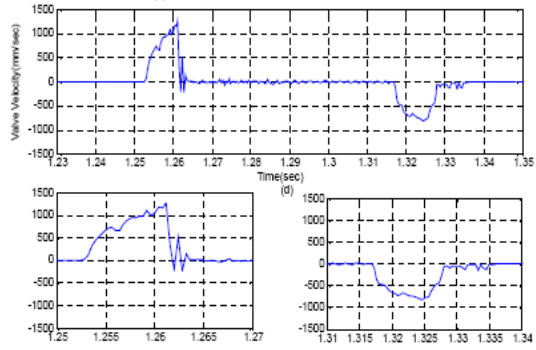


Fig. 9 Valve velocity profile

Fig.10 에서는 AMESim model에 Matlab/simulink 기반으로 개발된 밸브타이밍 적응제어기를 적용하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸다.

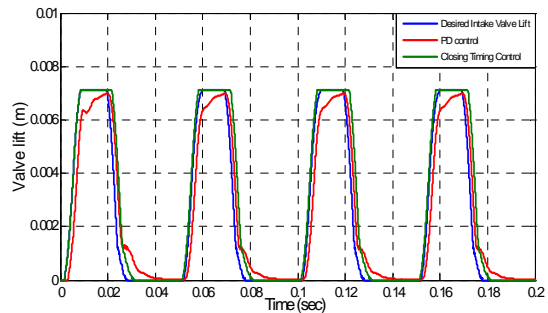


Fig. 10 Simulation of valve timing control

Fig.11 과 Fig.12 은 AMESim 모델과 실제 밸브액츄에이터의 동일한 입력에 대한 응답특성을 보여준다.

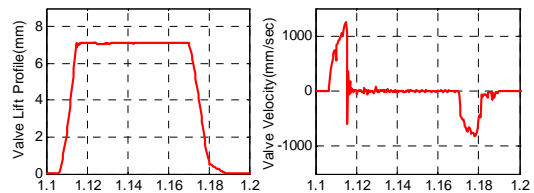


Fig. 11 Valve lift and velocity profile (Actual)

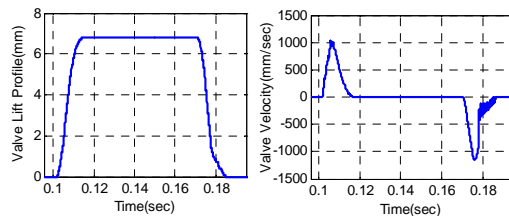


Fig. 12 Valve lift and velocity profile (AMESim model)

5. 결 론

본 연구에서는 유압식 캠리스엔진 밸브액츄에이터를 설계하고 유압해석프로그램인 AMESim을 활용하여 밸브액츄에이터의 동역학 시뮬레이션을 통해서 설계변수를 최적화하고 Test bench 실험을 수행하여 성능을 검증하였다. 다양한 작동조건하에서 밸브액츄에이터 응답특성의 재현성확보를 위한 밸브타이밍제어기법을 개발하고 Matlab/simulink, AMESim 을 이용한 co-simulation을 통해서 제어알고리즘을 검증하였다.

- 1) 밸브액츄에이터의 성능을 검증하기 위하여 1Hz 에서 30Hz 까지 펄스입력의 주파수를 변화시키면서 밸브액츄에이터의 응답특성을 확인하였다.
- 2) Snubber(스너버)에 의한 액츄에이터 피스톤의 쿠션닝 효과를 시뮬레이션과 실험을 통해서 확인할 수 있었다.
- 3) 작동유체의 점성변화에 따른 밸브타이밍제어기법을 개발하고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 작동유체의 온도변화에 따라 밸브액츄에이터의 반응이 정확하게 어떻게 달라지는지는 실험을 통해서 알 수 있을 것이고 그에 따라 밸브타이밍제어기법이 수정,보안될 것이다.

References

- 1) Sun, Z. and Cleary, D., "Dynamics and Control of an Electro-Hydraulic Fully Flexible Valve Actuation System", Proceedings of the American Control Conference, Denver, CO, pp. 3119-3124, June, 2003.
- 2) Postrioti L., Foschini L., Battistoni M. and Cristiani M., "Experimental and Numerical Study of an Electro-Hydraulic Camless VVA System", SAE Paper 2008-01-1355, 2008.
- 3) Battistoni M., Foschini L., Postrioti L. and Cristiani M., "Development of an Electro-Hydraulic Camless VVA System", SAE Paper 2007-24-0088, 2007.
- 4) Battistoni M., Mariani F., Foschini L., "A Parametric Optimization Study of a Hydraulic Valve Actuation System", SAE Paper 2008-01-1356, 2008.
- 5) Jia Ma, Harold Schock, Urban Carlson, Anders Høglund and Mats Hedman, "Analysis and Modeling of an Electronically Controlled Pneumatic Hydraulic Valve for an Automotive Engine," SAE 2006-01-0042, 2006.
- 6) Mark D. Anderson, Tsu-Chin Tsao and Micheal B. Levin, "Adaptive Lift Control for a Camless Electrohydraulic Valvetrain," SAE 981029, 1997.
- 7) Herbert E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", New York: John Wiley & Sons, 1967,
- 8) 홍예선, "자동차용 유압제어밸브의 기본구성 및 작동방식" 한국자동차공학회 학회지, 13권 6호, pp.30~38, 1991