한국정밀공학회지 제 25 권 제 9 호 (2008 년 9 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 9, September 2008

가변 밸브타이밍을 위한 신개념 전자기 리니어 엑츄에이터

김진호#

A Linear Electromagnetic Motion Device for VVT in Combustion Engine

Jin Ho Kim#

ABSTRACT

The traditional engine valve train in a combustion engine is the mechanically driven camshaft system that provides one-fixed valve timing. The variable valve timing (VVT), however, is highly required to achieve the significant improvement in fuel economy. To achieve VVT in combustion engine, the solenoid type of actuator had been developed in past years, but it requires current in all operation period, the starting is difficult and the efficiency is low. In this paper, a new linear actuator using permanent magnet (PM) is proposed and verified its feasibility by finite element (FE) analysis.

Key Words : Variable valve timing (가변 밸브타이밍), Permanent Magnet (영구자석), Solenoid (솔레노이드), Linear actuator (선형 엑츄에이터), Finite element analysis (유한요소)

기호설명

A = magnetic vector potential
C = capacitance
H = magnetic coercitivity
i = current
J = external current density
K = equivalent spring stiffness
M = intrinsic magnetization density
m = moving mass
x = displacement
λ = flux linkage
μ = permeability
R = resistance
RPM = revolution per minute
t = time
V = voltage

1. 서론

현재의 내연 연소 엔진의 밸브는 캠샤프트 (camshaft) 시스템으로 작동된다. 즉, 캠샤프트의 회전에 따라 캠이 흡기와 배기 사이클의 일정 시간동안 밸브를 열고 닫는다. 따라서, 연료효율, 토크 등의 극대화를 위해서는 밸브타이밍의 최적화가 필요로 하는데, 이는 캠의 형상을 최적 설계를 통해 가능하다. 하지만, 캠의 형상의 최적화는 매우 좁은 영역의 엔진작동 조건에서만 가능하다.[1]

☞ 접수일: 2008 년 1 월 15 일; 게재승인일: 2008 년 5 월 30 일
* 영남대학교 공과대학 기계공학부
E-mail: jinho@ynu.ac.kr Tel. (053) 810-2441

하지만, 각각의 다른 엔진작동 조건에서는 각각의 다른 최적화된 밸브타이밍이 필요로 한다. 예를 들어, 고속의 운전조건에서는 효과적인 연소와 토크 증대를 위해 좀 더 많은 양의 공기가 필요하다. 그러나, 캠샤프트 시스템에서는 많은 양의 공기가 유입되기 전에 흡기밸브가 닫히게 된다. 한편, 낮은 엔진속도의 구동환경에서는 극한적으로 가정해 보면 캠이 배기밸브를 오랜 시간동안 열고 있기 때문에 유입된 연료가 연소되기 전에 엔진에서 배출된다. 이런 이유에서 캠샤프트 시스템은 엔진효율의 향상에 한계를 지니고 있다.

가변밸브타이밍(Variable Valve Timing)은 기존의 캠샤프트 밸브시스템의 한계를 극복하고 밸브타이밍을 캠샤프트의 회전과 관계없이 독립적으로 제어할 수 있는 기술이다. 가변밸브타이밍이 내연 연소엔진에서 구현될 수 있다면, 15%의 연료효율과 10%의 토크출력 향상, 그리고 15% 정도의 CO2 배기가스를 감소시킬 수 있다.[2,3] 지난 수년간 가변밸브타이밍을 구현하기 위해 기계적 메커니즘이나 유압, 모터 등을 활용하여 여러 가지 시스템이 개발되어왔다. 그 중 현재 가장 활발히 이용되고 있은 시스템은 혼다 (HONDA) VTEC 엔진이다. 이 엔진은 출력 특성을 저속·중속·고속의 3 단계로 나누고 흡기밸브에 각 속도별 캠을 1 개씩 따로 두어 밸브 개폐 타이밍과 개폐량을 3 단계로 조절한다. 하지만, 이 시스템은 밸브타이밍이 3 단계에 불과하고, 무겁고 또한 토크출력의 향상에는 별다른 기여를 하지 못하는 단점이 있다.[4]

지금까지 개발된 시스템 중 가장 진보된 시스템은 솔레노이드 엑츄에이터 (Solenoid Actuator) 이다. 그림 1 은 솔레노이드 엑츄에이터의 개략도를 보여준다. 주 작동원리는 스프링의 자유진동이고, 코일에 가해지는 전류를 제어함으로써 가변 밸브타이밍을 구현할 수 있다.[5] 하지만, 솔레노이드 엑츄에이터는 운전시 전력 소모가 너무 크다는 치명적인 단점을 지니고 있다. 왜냐하면 시동 시에는 순간적으로 매우 큰 전력이 소모되고, 또한 운전시에도 엔진구동을 위해 지속적으로 전력이 요구되기 때문이다.[6] 따라서 솔레노이드 엑츄에이터의 문제점을 해결하기 위해 이동 전기자 (Armature)의 일부를 영구자석으로 대체하는 등의 여러 연구가 진행되어 왔다.[7-10] 하지만, 이 경우 전기자의 영구자석이 고정자와의 충격에 노출되어 있는 단점이 있다.

이 연구에서는 영구자석을 활용한 새로운 개념의 전자기 선형 엑츄에이터 (Linear Actautor)가 소개된다. 소개된 새로운 엑츄에이터의 향상된 성능을 규명하기 위하여, 상용 자기장 유한요소해석 프로그램인 멕스웰 (MAXWELL)을 사용하여 유한요소해석 (Finite Element Analysis)을 수행하였다.

2. 밸브 제어를 위한 신개념 엑츄에이터

2.1 작동원리

그림 2 는 신개념 엑츄에이터의 개략도를 보여준다. 이 엑츄에이터는 두 개의 영구자석, 한 개의 솔레노이드, 그리고 박판스틸 (Lamination Steel)로 만들어진 고정자 (Stator)와 전기자 (Armature), 두 개의 스프링 (Spring), 그리고 엔진밸브로 구성되어 있다. 전기자와 밸브는 연속된 하나의 강체이기 (One rigid body) 때문에, 전기자가 아래 위로 움직이게 되면, 밸브는 열고 닫히게 된다. 또한, 영구자석은 고정자 안에 위치한다. 전기자의 총 이동거리는 8mm 이다. 그림 3 은 엑츄에이터의 작동원리를 보여준다. 화살표는 영구자석의 자기력선을 나타내고, 점선 화살표는 솔레노이드의 자기력선을 나타낸다. 시작 시에는 영구자석의 자기력이 전기자를 맨 위 지점에 위치하도록 유지시킨다.

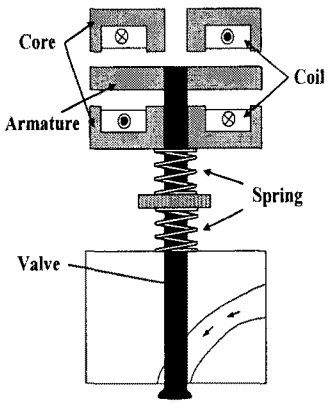


Fig. 1 Schematic diagram of solenoid actuator

즉, 밸브가 닫혀있는 상태이다. 하지만, 밸브 개방 시에는 영구자석의 자기력을 상쇄할 반대의 전자기력이 발생시키도록 솔레노이드에 전류를 흘린다. 이 때, 전기자는 압축된 스프링 힘에 의해 아랫방향으로 이동하게 된다. 중간지점에서부터는

솔레노이드에 가해지는 전류를 반대방향으로 흐르게 컨트롤한다. 이에 따라, 영구자석의 자기력 방향과 솔레노이드의 자기력은 같은 방향으로 작용하게 되어, 전기자를 아래쪽으로 끌어당기게 되고 결국 밸브는 완전히 열리게 된다. 전기자가 아래 지점에서 위 지점으로 이동하는 원리는 위에 설명한 내용과 유사하다. 전체적인 엑츄에이터의 크기는 대략 $120mm$(폭)$\times 94mm$(높이)$\times 38mm$(두께)이다.

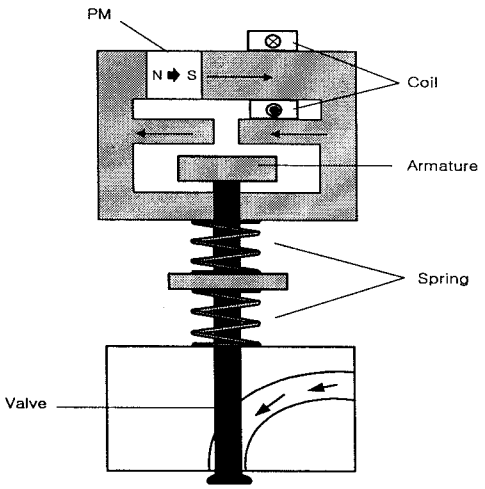


Fig. 2 Schematic diagram of new electromagnetic engine valve actuator

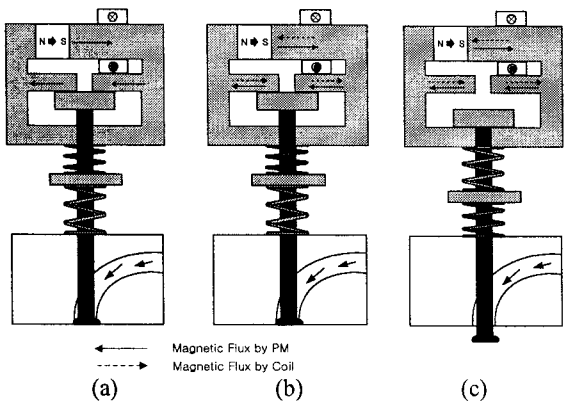


Fig. 3 Principle of operation (a) at the upper end (b) at starting and (c) at the lower end

2.2 솔레노이드 엑츄에이터와의 성능비교

솔레노이드 엑츄에이터와 비교하면 영구자석을 활용한 신개념 엑츄에이터는 무엇보다도 전력 소모를 크게 감소시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 첫째, 제안된 엑츄에이터는 솔레노이드 엑츄에이터와는 달리 최초 사이클의 시동 시 전력의 소모가 전혀 없다는 장점이 있다. 왜냐하면, 엔진이 꺼져있는 동안 영구자석의 잔류자기장이 전기자를 위쪽으로 지속적으로 끌어당기고 있기 때문에 밸브가 닫혀있는 상태가 유지되기 때문이다. 또한, 제안된 엑츄에이터의 경우에는 엔진 구동 시에도 많은 전력 소모를 감소시킬 수 있다. 그림 4 는 엔진 구동 시 필요로 하는 전력의 소모 기간에 관한 도표이다. 솔레노이드 엑츄에이터의 경우 밸브가 완전히 열려있는 상태나 닫혀있는 상태를 유지하기 위하여 전력이 소모되지만, 제안된 엑츄에이터의 경우는 밸브의 과도운동 상태에서만 전력이 소모된다. 대부분 실제 엔진 사이클에서는 완전히 밸브가 닫혀있거나 열려있는 구간이 밸브 움직임 구간보다 훨씬 크다. 엔진의 평균속도인 약 3000 RPM 의 경우 밸브가 완전히 열려있거나 닫혀있는 시간은 한 사이클의 시간(0.04 초)의 80%를 차지한다.

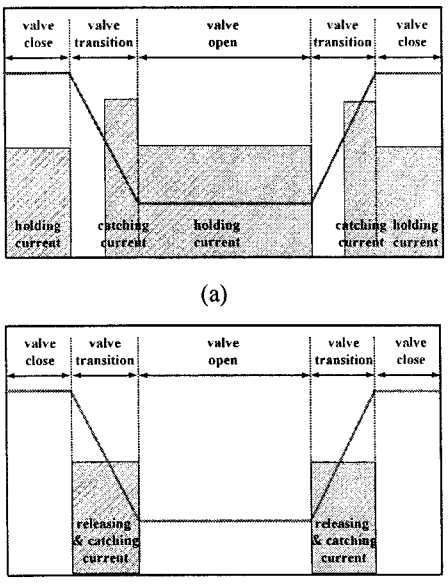


Fig. 4 Current command profiles with the valve operation (a) solenoid actuator (b) new actuator

2.3 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션

액츄에이터의 성능을 시뮬레이션 하기 위하여 유한요소모델을 생성하고 상용 자기장 유한요소 해석 소프트웨어인 MAXWELL 을 활용하여 동적 유한요소해석을 실행하였다. 새로운 액츄에이터는 기계시스템, 자기시스템, 전기시스템, 세 가지 서브 시스템으로 구성되어있다.

자기시스템의 지배방정식과 경계조건은 수식(1)과 같다. 자속 밀도를 극대화 하기 위하여 실리콘 스틸 (silicon steel)의 비선형 B-H 특성이 고정자 부분과 전기자 부분에 주어졌고, 영구자석의 경우에는 엔진의 열에 의한 영구자석의 자기소거를 고려하여 열에 강한 SmCo28 의 특성이 주어졌다. 표 1 는 SmCo28 자석의 자기적 특성에 대해 나타내고 있다.

$$\nabla\times\left(\frac{1}{\mu}\nabla\times\vec{A}_\theta\right)=\vec{J}_{ext}+\frac{1}{\mu}\nabla\times\vec{M}$$

boundary condition: $A_\theta = 0$ (1)

$\vec{A}_z$: magnetic vector potential in z-direction

$\vec{J}_{ext}$: external current density

기계시스템의 지배방정식은 수식(2)와 같다. m 은 전기자와 엔진밸브의 총질량, 그리고 k 에는 스프링의 강성이 각각 할당되었다. 표 3 에는 기계시스템의 질량, 스프링 강성, 고유진동수 등이 나타나 있다.

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+2kx=F_{magnetic}+F_{gravity}$$

initial condition $x(0)=-4mm,\ \dot{x}(0)=0$ (2)

$F_{magnetic}$: magnetic force

$F_{gravity}$: gravity force

전기시스템의 지배방정식은 수식 (3)과 같고, 표(4)에 입력전압의 초기값, 케페시턴스, 코일수, 코일저항 등이 나타나 있다.

$$\frac{d\lambda(i,x)}{dt}+Ri+\frac{1}{C}\int idt=0$$

initial condition $i(0)=0, V_c=V_o$ (3)

V_c = initially charged voltage in capacitor

Table 1 Specification of magnetic subsystem

Residual Induction	1.0188 (T)
Coercivity	-754176 (A/m)
Relative permeability	1.07

Table 2 Specification of mechanical subsystem

Mass	110 gram
Spring stiffness	170 (kN/m)
Natural frequency	1243

Table 3 Specification of electric subsystem

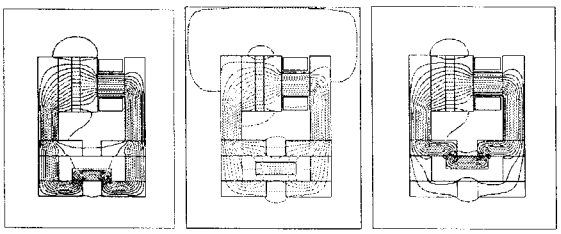
Input voltage	100 V
Number of turns	170 turns
Capacitance	100 μF
Resistance	0.85 Ω

결합된 세 시스템을 해석하기 위하여 30,000 여 개의 삼각형 요소로 구성된 동적 2-D 유한요소 모델을 만들고, 전기자가 최하단 지점에서 최상단 지점까지의 과도운동을 시뮬레이션 하였다. 해석은 총 0.004 초 동안 10 밀리초의 간격으로 수행하였다. 전기자에 가해지는 자기력은 Virtual Work 방법으로 계산하였다.

2.4 결과

그림 5 는 전기자의 과도운동 중 세가지 위치에서 각각의 자기력선의 형태를 보여준다. 그림 5(a)는 맨 아래 시작점에서의 자기력선을 보여주고, 5(b)는 과도운동 중간지점에서, 그리고 5(c)는 맨 위 지점에서의 자기력선의 형태를 보여준다. 중간지점에서는 위쪽 고정자와 아래쪽 고정자에서 전기자로 흐르는 자기력선이 대칭이기 때문에, 전기자에 미치는 자기력은 서로 상쇄가 된다. 그림 6, 그림 7 그리고 그림 8 은 각각 시간에 따른 전기자의 위치, 전기자에 미치는 자기력과 스프링력, 그리고 코일의 전류의 프로파일을 보여준다. 총 과도운동시간은 3.87 밀리초이다. 코일의 전류는 감쇄 사인커브 (Damped sine curve)처럼 진동한다. 코일에 흐르는 첫 번째 반주기의 양의 전류는 영구자석의 자기장과 반대방향의 자기장을 생성하고,

두 번째 반주기의 음의 전류는 영구자석과 같은 방향의 자기장을 생성한다. 코일의 인덕턴스 (Inductance)로 인해 전기자가 맨 밑 지점의 고정자에서 릴리즈 (Release) 되기 전 0.9 밀리 초 (millisecond) 정도의 시간지연 (Time delay)이 있다.



(a) (b) (c)

Fig. 5 Flux distribution in solenoid type actuator with permanent magnet excitation (a) at lower end (b) at neutral position (c) at upper end

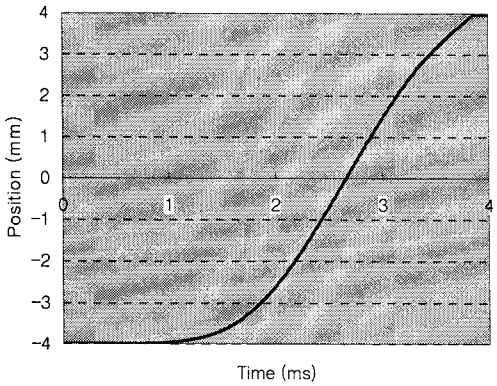


Fig. 6 Position profiles versus time

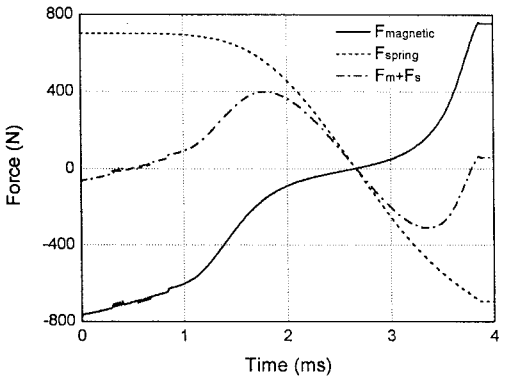


Fig. 7 Magnetic force and spring force profiles versus time

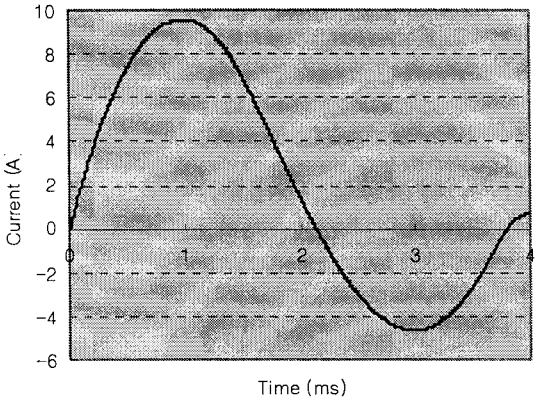


Fig. 8 Current profile versus time

참고문헌

1. Levin, M. B. and Schlecter, M. M., "Camless Engine," SAE Paper No. 960581, 1996.
2. Barkan, P. and Dresner, T., "A Review of Variable Valve Timing Benefits and Modes of Operation," SAE Paper No. 891676, 1989.
3. Pischinger, M., Salber, W., Staay, F., Baumgarten, H. and Kemper, H., "Benefits of the Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation," SAE Paper No. 2000-01-1223, 2000.
4. Hamazaki, M. and Hosaka, T., "Development of the Variable Valve Timing and Lift (VTEC) engine for the Honda NSX," SAE Paper No. 910008, 1991.
5. Wang, Y., Megli, T., Haghgooie, M., Peterson, K. S. and Stefanopoulou, A. G., "Modeling and Control of Electromechanical Valve Actuator," SAE Paper No. 2002-01-1106, 2002.
6. Giglio, V., Iorio, B. and Police, G., "Analysis of Advantages and of Problems of Electromagnetic Valve Actuators," SAE Paper No. 2002-01-1105, 2002.
7. Sugimoto, G., Sakai, H., Umemoto, A., Shimizu, Y. and Ozawa, H., "Study on Variable Valve Timing System Using Electromagnetic Mechanism," SAE Paper No. 2004-01-1869, 2004.
8. Kim, J. and Lieu, D., "Designs for New, Quick-Response, Latching Electromagnetic Valve," Proceeding of International Electric Machines and

Drives Conference 2005, pp. 1773-1779, 2005.
9. Kim, J. and Lieu, D., "A New Electromagnetic Engine Valve Actuator with Less Energy Consumption for Variable Valve Timing," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 602-606, 2007.
10. Park, S., Oh, S., Lee, J., Park, K. and Kim, D., "The Analysis and Experiments for the Design of Electro-mechanical Variable Valve Train System," Transactions on KSAE, Vol. 9, No. 3, pp. 60-67, 2001.