

과도시간 감소를 위한 전자기 엔진밸브 액츄에이터 형상 최적 설계

김진호* · 박상신

영남대학교 공과대학 기계공학부, 경북 경산시 대동 214-1, 712-749

(2009년 11월 11일 받음, 2010년 1월 4일 최종수정본 받음, 2010년 1월 4일 게재확정)

솔레노이드 전자기 엔진 밸브 액츄에이터는 현재의 내연 엔진의 가변 밸브 타이밍에 가장 적합하고 진보된 장치이다. 하지만 솔레노이드 전자기 액츄에이터는 전력소모가 크다는 단점을 가지고 있다. 따라서 전력소모가 작은 가변 밸브 타이밍을 구현하기 위해 영구자석을 활용한 새로운 전자기 엔진 밸브 액츄에이터를 제안한다. 이 연구에서는 엔진 밸브의 과도운동 시간의 최소화를 통해 엔진의 속도를 극대화하기 위하여 새롭게 제안한 액츄에이터의 형상을 최적 설계하였다. 최적화를 위해 유전자 알고리즘을 사용하고 Matlab과 Maxwell을 활용하여 전역 최적화 시뮬레이션을 수행하였다.

주제어 : 영구자석 엔진 밸브 액츄에이터, 최적 설계, 유전 알고리즘, 유한요소해석, 과도시간

I. 서 론

가변 밸브타이밍은 자동차의 연료효율, 엔진 토크를 향상시키고, CO₂ 배기가스를 줄일 수 있는 매우 중요한 기술이다 [1, 2]. 지난 수년간 가변 밸브타이밍을 구현하기 위해 여러 가지 시스템이 개발되어왔지만, 지금까지 개발된 시스템 중 가장 진보된 시스템은 원리적으로 무한한 가변성을 갖는 솔레노이드 액츄에이터이다[3]. 그러나 이 시스템은 너무 많은 전력을 소모하는 치명적인 단점을 갖고 있다[4]. 솔레노이드 액츄에이터의 단점을 보완하기 위하여, Kim과 Lieu는 영구자석을 이용한 새로운 전자기 엔진밸브 액츄에이터를 제시하였다[5]. 이 액츄에이터는 기존의 솔레노이드 액츄에이터와 달리 전력을 크게 줄였다는 장점을 지니고 있다. 첫째 이유는 시동을 끈 상태에서 영구자석의 잔류 자기장이 밸브를 지속적으로 닫은 상태로 유지시켜 주기 때문이고, 둘째 이유는 엔진 운전 시 밸브의 과도운동상태에서만 전력이 소비되기 때문이다.

Fig. 1은 신개념 전자기 엔진밸브 액츄에이터의 개략도를 나타낸다. 이 액츄에이터는 두 개의 영구자석, 한 개의 솔레노이드, 그리고 박판스틸로 만들어진 고정자와 전기자, 두 개의 스프링, 그리고 엔진밸브로 구성되어 있다. 전기자와 밸브는 연속된 하나의 강체이기 때문에, 전기자가 아래위로 움직이게 되면, 밸브는 열고 닫히게 된다. 전기자의 총 이동거리는 8 mm이다. Fig. 2는 액츄에이터의 작동원리를 보여준다. 화살표는 영구자석의 자기력선을 나타내고, 점선 화살표는 솔레노이드의 자기력선을 나타낸다. 밸브가 닫혀있을 시작시에는 영구자석의 자력이 전기자를 맨 위 지점에 유지시킨다. 하지만, 솔레노이드에 전기가 가해지면, 영구자석의 자력은 솔레노이드

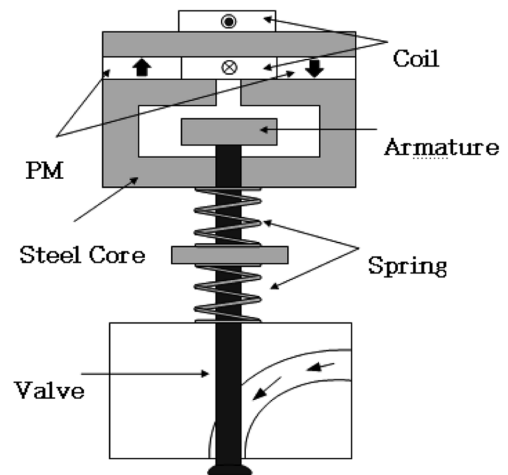


Fig. 1. Schematic diagram of new electromagnetic engine valve actuator suggested by Kim and Lieu.

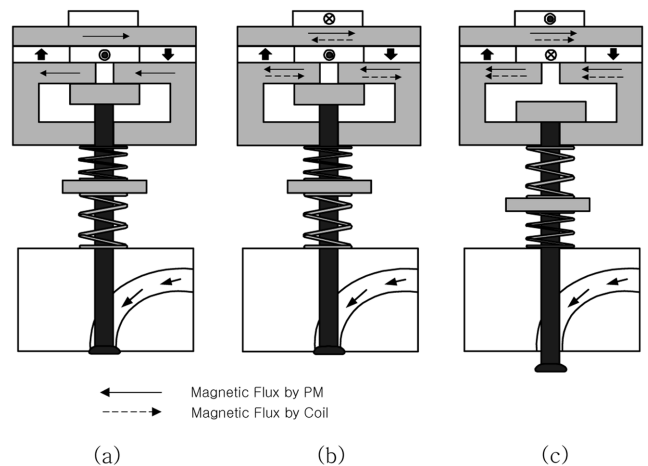


Fig. 2. Principle of operation (a) at the upper end (b) at starting and (c) at the lower end.

*Tel: (053) 810-2441, E-mail: jinho@ynu.ac.kr

드의 자력과 상쇄되어, 결국, 압축된 스프링의 힘이 자력보다 더 커지게 되어, 전기자는 위쪽에서 아래쪽으로 가속되어 이동하게 된다. 중간지점에서부터는 솔레노이드에 가해지는 전류 방향을 반대방향으로 제어하여, 솔레노이드의 자속을 영구자석의 자속과 같은 방향으로 흐르게 하여, 솔레노이드와 영구자석의 합쳐진 자력은 전기자를 아래쪽으로 끌어당기게 되고 결국 밸브는 완전히 열리게 된다. 전기자가 아래 지점에서 위 지점으로 이동하는 원리는 위에 설명한 내용과 유사하다.

전기자의 과도운동시간은 밸브가 열려있는 상태에서 닫히는 상태 또는 닫혀있는 상태에서 열리는 상태까지 소요되는 시간으로 정의된다. 과도운동시간이 적을수록, 액츄에이터는 보다 높은 엔진 회전속도에서 가변 밸브 타이밍을 구현할 수 있다. 현재 제안된 액츄에이터는 약 5,000 rpm의 회전속도까지 작동 가능하다. 액츄에이터의 주 작동 원인은 스프링계의 진동 이므로 액츄에이터의 과도운동시간은 고유진동수를 증가시킴으로써 감소시킬 수 있다. 따라서 과도운동시간은 스프링계의 고유진동수에 따라 대부분 결정된다. 고유진동주파수는 $(\sqrt{k/m})$ 로 정의된다. 여기서, k 는 스프링의 강성계수이고 m 은 밸브와 전기자의 총 질량이다. 영구자석의 자기력은 연료가스의 힘을 고려하여 전기자가 맨 아래 또는 맨 위 지점에 위치했을 때 스프링의 힘보다 100 N 정도 크게 설계되기 때문에 스프링의 이용 가능한 최대 강성은 영구자석의 자력에 비례한다. 이 논문에서는 고유진동수의 최대화를 통한 전기자의 과도운동시간을 최소화하기 위해 액츄에이터 형상의 최적설계를 유전 알고리즘을 통해 구현한다. 또한, 유전알고리즘의 효과적인 구현을 위해, Matlab과 전기기계 해석 및 설계에 가장 유용하게 활용되고 있는 유한요소해석 프로그램 인 Maxwell을 동시에 활용한다.

II. 최적 설계

1. 설계변수와 구속조건

새롭게 제안된 액츄에이터 형상의 최적 설계를 위한 설계 변수는 Fig. 3과 같다. 이때, 전체 크기를 결정 짓는 변수 $L_{ac} = 37.1$ mm 및 $W_{ac} = 120.6$ mm이고, 이 액츄에이터의 몇 가지 구속조건은 다음과 같다.

첫째, 액츄에이터의 전체적인 크기는 액츄에이터 설치를 위한 엔진마운트의 공간이 제한되어 있기 때문에, 액츄에이터의 전체 크기 또한 제한되어 있다. 즉, 액츄에이터의 두께와 폭은 고정되어 있다. 하지만, 액츄에이터의 설치 시 캠과 캠 샤프트는 더 이상 필요 없기 때문에 액츄에이터 윗 방향으로 공간은 어느 정도 여유가 있다.

$$H_{ac} < (2H_t + H_c + H_m + H_{bi_2} + H_{bi_1})_{max} + 164.7 \text{ mm} \quad (1)$$

둘째, 밸브가 위 아래로 운동할 수 있도록 고정자의 치형

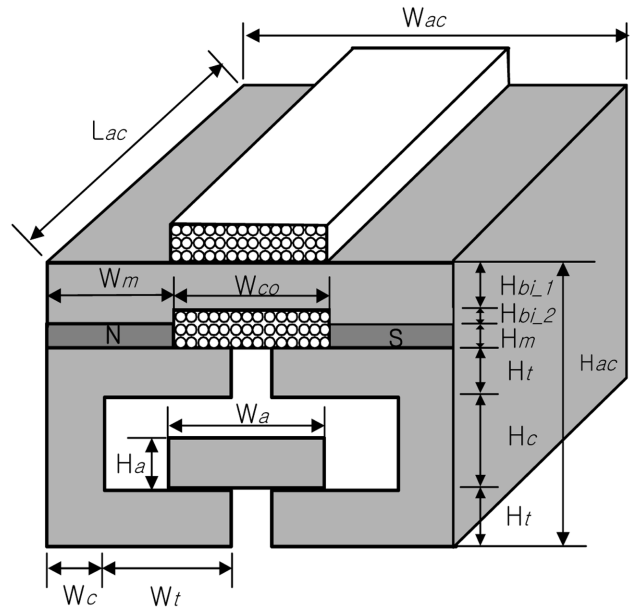


Fig. 3. Design optimization parameters for maximizing latching force frequency of vibration at bottom end position of armature.

사이의 간격이 최소 10 mm가 되도록 설정되어야 한다.

$$W_t < W_{ac}/2 - W_c - 5 \text{ mm} \quad (2)$$

셋째, 이 연구의 최적설계에서는 영구자석의 크기를 증가시켜 영구자석의 자력을 증가시키는 목적이 아니므로 영구자석의 크기는 기존의 디자인과 동일하다.

$$W_m = 44.45 \text{ mm}, H_m = 4.7625 \text{ mm}$$

넷째, 전기자가 8 mm의 운동을 할 수 있도록 전기자의 크기가 설계되어야 한다.

$$W_a < W_{ac} - 2W_c - 5 \text{ mm} \quad (3)$$

$$H_a = H_c - 8 \text{ mm}$$

다섯째, 고정자의 위 치형과 아래 치형이 대칭이 되도록 동일하게 설계되어야 한다.

2. 설계 목적함수

최적화를 위한 목적 함수는 고유진동수를 최대화하는 수식 (4)과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{(F_{Latching} - 100)/x_{max}}{v_a \times \rho_s \times m_v}} \quad (4)$$

3. 최적화 과정 및 방법

제안된 액츄에이터 구조의 최적설계를 위해 시행착오법 (trial-and-error) 또는 켈레구배법 (conjugate-gradient method)

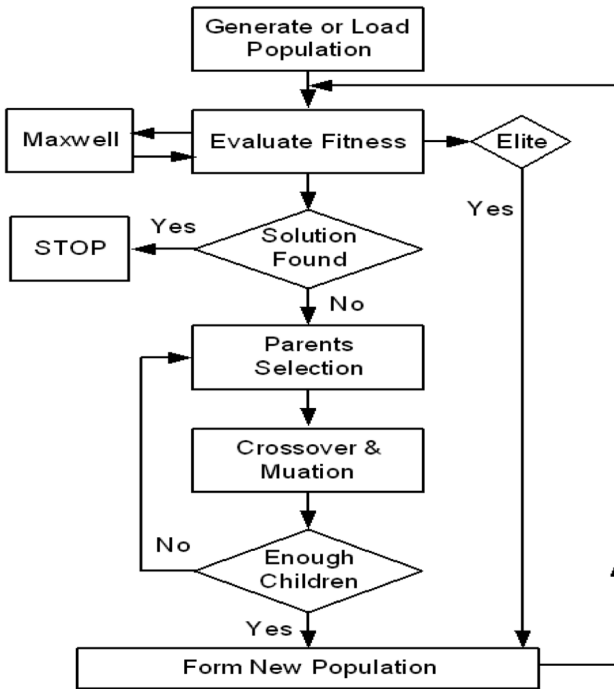


Fig. 4. Genetic algorithm process to evolve toward global solution.

과 준 뉴턴법(quasi-Newton methods)과 같은 전통적인 기법을 종합적으로 사용할 수 있다. 하지만, 이러한 방법들은 다변수 최적화 문제에서 최적해를 구해주는 일반적인 방법이 아니다. 유전자 알고리즘은 기계시한 국소 최적화 기법과 달리 초기값과 제약조건에 독립적이다. 이러한 이유로 본 논문에서는 전역 최적화 기법인 유전자 알고리즘을 사용하였다.

Fig. 4는 유전자 알고리즘으로 최적화하는 과정을 보여준다. 우선 액츄에이터의 개체집단을 무작위로 생성한다. 개체집단의 각 개체는 일련의 이진 문자열로서 Fig. 5에서 보여주듯이 하나의 완전한 액츄에이터 염색체를 나타낸다. 그리고 염색체 안의 각 유전자는 실제 변수 값으로 나타낼 수 있다.

$$p = p_{min} + \left(\frac{p_{max} - p_{min}}{2^N - 1} \right) \sum_{n=0}^{N-1} 2^n b_n \quad (5)$$

여기서, p 는 주어진 p 의 최소값과 최대값에 대한 실제 값이고, b_n 은 p 와 관련된 n 번째 유전자의 이진 비트(0 or 1)이다. 해독된 변수 값은 평가를 위해서 Maxwell에 전달되고, 각 염색체의 우수성은 계산을 통해서 결정된다. Matlab이

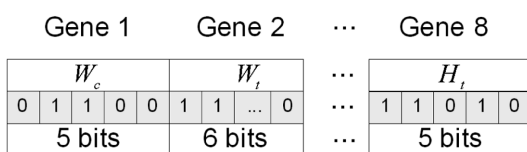


Fig. 5. Chromosome structure.

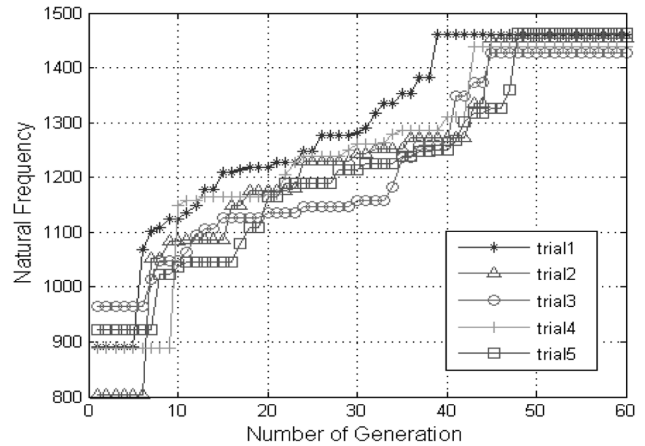


Fig. 6. The best fitness values in each generation.

Maxwell의 전자기해석을 위한 Maxwell스크립트를 반복적으로 작성하고 진동수를 결정하는 자기력의 값을 읽는다. 주어진 개체집단의 시뮬레이션을 완결하고 나면 유전 알고리즘은 새로운 개체집단의 생성을 위해서 기존 염색체를 교배하거나 변이한다[6].

구조물 최적설계의 목적은 고유진동수를 최대화하는 것이므로 적용함수는 식(6)과 같이 표현된다. 여기서, ω_n 은 전기자의 진동고유진동주파수이다.

$$\text{Fitness Function} = \text{Maximize}(\omega_n) \quad (6)$$

개체집단 크기 그리고 교배와 변이의 비율을 변화시키면서 프로그램이 여러 번 독립적으로 수행되면서 최적 값에 수렴된다. Fig. 6은 최적 값에 수렴하는 과정을 보여준다.

4. 최적화 결과

Table I에는 최적설계 결과를 보여준다. 고정자 치의 폭은

Table I. Actuator dimensions (all dimensions in millimeters).

Symbol	Quantity	Exiting dimensions	New optimized dimension
L_{ac}	Thickness of actuator	38.1	38.1
W_{ac}	Width of actuator	120.65	120.65
H_{ac}	Height of actuator	93.34	95
H_{co}	Width of coil	31.75	31.75
W_m	Width of magnet	44.45	44.45
H_m	Height of actuator	4.7625	4.7625
W_a	Width of armature	44.45	30.216
H_a	Height of armature	19.03	12
W_t	Width of teeth	34.29	27.325
H_t	Height of teeth	19.05	19
W_c	Width of core	19.05	28
H_c	Height of core	27.05	20
H_{bi_1}	Height of back iron 1	19.05	28.75
H_{bi_2}	Height of back iron 2	4.7625	3.5

Table II. Comparison of existing design and optimal design.

Characteristics	Existing design	Optimal design
Magnetic latching force	1525 N	1262 N
Available spring stiffness	358 kN/m	292 kN/m
Moving mass	0.284 kg	0.136 kg
Natural frequency	1123	1465

증가한 반면, 전기자의 전체적인 크기는 감소되어, 전기자의 질량이 감소되었다.

Table II는 기존의 액츄에이터와 최적화된 액츄에이터를 특성을 비교하고 있다. 전자기기가 스트로크 양 끝단에 위치했을 때 자기력은 1525 N에서 1262 N으로 감소하여 활용 가능한 최대 스프링 강성계수는 358 kN/m에서 292 kN/m로 19 % 감소하였다. 하지만, 전기자를 포함한 운동 질량은 264 g에서 136 g으로 49 %로 감소되어, 결과적으로 고유진동수는 30% 증가하였다.

III. 결 론

이 논문에서는 유전 알고리즘과 유한요소해석법을 활용한 신개념 엔진밸브 액츄에이터 형상의 최적설계에 대해 소개되었다. 최적설계의 목적은 전기자의 과도 운동시간을 감소시키기 위한 고유진동수를 최대화하고, 최적설계를 통해 약 30 %

정도의 고유진동수가 증가되었다. 이로 인해, 신개념 엔진밸브 액츄에이터가 기존의 액츄에이터보다 약 500 rpm 높은 엔진회전속도에서도 활용이 가능해졌다. 그러나, 실제 차량 엔진에 적용하기 위해서는 좀 더 많은 향후 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 교육과학부가 주관한 나노원천기술개발 사업(2009008228)을 수행하면서 얻은 연구 결과임.

참고문헌

- [1] P. Brakan and T. Dresner, SAE Technical Paper Series, Paper No. 891676 (1989).
- [2] M. Pischinger and W. Salber, SAE Technical Paper Series, Paper No. 2000-01-1223 (2000).
- [3] G. Sugimoto, H. Sakai, A. Umemoto, Y. Shimizu, and H. Ozawa, SAE Technical Paper Series, Paper No. 2004-01-1869 (2004).
- [4] V. Giglio, B. Iorio, and G. Police, SAE Technical Paper Series, Paper No. 2002-01-1105 (2002).
- [5] J. Kim and K. Lieu, Annals of the CIRP, **39**(2), 517 (1990).
- [6] J. M. Johnson and Y. Rahmat-Samii, IEEE Antennas Propagation Magazine, **39**(4), 7 (1997).

Design Optimization of Linear Actuator for Fast Response of Electromagnetic Engine Valve

Jin-Ho Kim* and Sang-Shin Park

School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

(Received 11 November 2009, Received in final form 4 January 2010, Accepted 4 January 2010)

This paper presents the design optimization of a linear actuator for fast response of electromagnetic engine valve. The optimization is performed using generic algorithm which is one of global search techniques and not highly dependent on either initial conditions or constraints in the solution domain to maximize the mechanical frequency of the armature mass and valve spring stiffness for fast response of the engine valve. In the results, the mechanical frequency is improved by 30 %.

Keywords : electromagnetic engine valve, permanent magnet, finite element analysis, genetic algorithm, fast response