

## 엔진 밸브 자기 구동기의 설계 최적화

소현준\* · 박순옥\* · 유정훈†

(2008년 9월 19일 접수, 2009년 4월 25일 수정, 2009년 5월 1일 심사완료)

### Design Optimization for the Magnetic Engine Valve Actuator

Hyun-Jun Soh, Soon-Ok Park and Jeonghoon Yoo

**Key Words :** Topology optimization(위상최적화), Density Method(밀도법), Maxwell Stress Tensor Method(맥스웰응력텐서법), Magnetic Reluctivity(자기저항), Adjoint Variable Method(매개변수법)

#### Abstract

As the automobile energy efficiency stands out an important matter of interest, the magnetic engine valve system receives attention. It has an advantage of no engine power leakage in opening and closing the valve. Moreover, it generates much bigger force than the piezo actuator system, so it can be a good alternative system of the cam and camshaft system. However, since the valve system is not light enough, it is necessary to make its weight reduce. In this study, topology optimization is applied to find the optimal shape of the armature in a magnetic valve system combined with the finite element analysis for the magnetic field analysis. The result is used to obtain a concept design. The adjoint variable method is employed in order to calculate the design sensitivity of the magnetic driving force in the armature component mostly to reduce the computational time during the repeated sensitivity calculation. The sequential linear programming is employed for the optimization algorithm.

#### 1. 서론

최근의 자동차업계의 화두는 친환경 자동차이다. 고유가에 따른 소비자들의 친환경 차량에 대한 높은 관심도 있지만, 환경오염을 보다 적극적으로 규제하려는 각국 정부의 움직임도 자동차 업체의 친환경 차량의 개발을 독려하고 있다. 친환경 차량의 개발은 적은 연료로 높은 출력과 효율을 낼수 있는 자동차의 개발로 귀결된다. 이를 위해 직분사 엔진의 개발, 과급기를 이용한 연소 효율의 향상 등이 있으며, 캠과 캠샤프트 구조를

없애고 구동기를 이용하여 엔진 밸브를 제어하는 캠리스 엔진(cam-less engine)도 이러한 친환경 차량 모델의 하나이다.<sup>(1)</sup>

캠리스 엔진의 장점은 크게 두 가지로 정리될 수 있다. 첫째는 엔진 출력과 토크의 향상이다. 엔진의 흡배기 밸브를 열고 닫기 위해 사용되는 캠과 캠샤프트 기구는 그 동력을 엔진의 출력으로부터 얻는다. 캠리스 엔진은 크랭크 샤프트의 힘을 캠샤프트 구동에 빼앗기지 않고 오직 휠에만 전달할 수 있는 장점이 있기 때문에 출력과 토크 연비 모두 좋아지는 장점이 있다. 캠리스 엔진의 밸브 개발을 주도하는 업체들은 캠리스 엔진은 15~20%의 연료 소모가 적으며, 15~20%의 토크 상승이 있다고 주장하고 있다.<sup>(2)</sup> 다른 장점은 흡배기 밸브 제어의 용이함이다. 자동차 엔진의 흡배기 밸브의 여닫음의 타이밍은

\* 연세대학교 기계공학과 대학원

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : yoojh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2859 FAX : (02)362-2736

저속회전과 고속회전경우에 따라 차이가 있다. 저속회전 시에는 배기와 흡기의 혼류를 막기 위해 흡기와 배기밸브의 오버랩 시간을 최소화 하는 것이 필요하지만, 고속회전 시에는 흡기의 충분한 엔진흡입을 위해 어느정도의 오버랩 시간이 필요하다. 이를 위하여, 복잡한 흡배기 밸브타이밍 기구를 이용하여 제어를 하는데, 구동기로 밸브를 제어하면, 제어기를 사용하여 기구적인 복잡함을 최소화 시킬수 있다.

캠리스 엔진의 구동기의 방식은 크게 전기 유압 제어 밸브 기구(electro-hydraulic valve-train system)와 자기 구동 제어 밸브 시스템(electro-mechanical valve-train system)이 있다. 전자의 시스템은 유압에 따라 밸브의 열림, 속도 등을 제어하기 용이한 장점이 있지만, 유압기구의 복잡함과 유압생성을 위한 별도의 동력이 필요한 단점이 있다. 반면 후자는 밸브 운동의 범위에 제약이 있는 단점이 있지만, 동력소모가 적고, 소형화된 설계가 가능한 장점이 있어, 다수의 업체가 양산적용을 위한 개발을 진행하고 있다.<sup>(1)</sup>

자기 구동기 제어 밸브 시스템은 1940년대 중반에 처음 구상되었지만, 모터 스포츠와 같은 특수 분야 이외의 양산 자동차 분야에서는 특별한 주목을 받지 못하였다. 그러나 최근에 친환경 고에너지 효율 자동차가 주목을 받으면서, 관련 연구가 활성화 되고 있다. 그러나 자기 구동기 제어 밸브시스템의 연구는 전자기 해석에 의한 개념 설계나 연소 효율을 위한 제어방법등에 초점이 맞추어져 있으며, 구동기의 최적화 설계에 대해서는 소개된 것이 거의 없는 것이 현실이다.<sup>(3)</sup> 본 연구에서는 자기 구동 방식의 밸브 구동기의 구조 최적 설계에 대하여 기술하고자 한다.

최적화 설계는 설계 목적을 정의하는 목적 함수(objective function)의 정의, 설계 영역(design domain) 설정, 설계 변수(design variable) 정의, 설계 민감도 계산(design sensitivity analysis), 최적화(optimization) 등의 과정을 거치게 된다. 이 중 구조물의 설계 변수를 정의 하는 방법에 따라 치수최적설계(parameter optimization), 형상 최적설계(shape optimization), 위상최적설계(topology optimization) 등으로 구분이 된다. 그 중 위상 최적설계의 방법은 구조물의 형상과 크기를 동시에 변화시킬수 있는 방법이며, 구조물 내의 영역간의 연결을 결정하는 설계의 방법이다. 이 방법은 1988년 Bendsøe 와 Kikuchi에 의해 균질화 이론(homogenization method) 기반의 설계 방법으로

소개되었으며, 이후 보다 간단한 개념의 밀도법(density method)으로 발전하였다.<sup>(4,5)</sup> 이 설계 방법은 설계 영역에 최적의 물질 분포(optimal material distribution)을 만들어 내기 때문에 개념 설계(conceptual design)의 방법으로 효과적이며, 유한요소해석(finite element analysis)을 기반으로 하므로 유한요소해석으로 계산이 가능한 물리 범위에 적용이 가능하다. 또한, 자기 구동기와 같은 자계 영역(magnetic field)의 최적화 설계에도 활발히 적용되고 있다.<sup>(6,7)</sup> 위상최적화 과정에서의 설계 민감도의 계산은 설계 영역의 각 요소의 민감도 값을 계산하게 되는데, 다변수 문제에서는 직접법(direct method)에 비해 보조변수법(adjoint variable method)을 사용하는 것이 설계의 속도를 향상시키는데 효과적이다.<sup>(8)</sup>

본 연구에서는 자기 구동기 방식의 엔진 흡배기 밸브 구동기를 유한요소 해석모델로 구성하고, 밀도법 기반의 위상 최적화 설계를 수행하여 개념 설계안을 획득함으로써 밸브 구동기의 구동력의 향상을 얻고자 한다.

## 2. 설계 모델 및 설계 목적

### 2.1 자기 밸브 구동기 모델

자기 밸브 구동기는 하우징(housing)과 코일(coil), 복원스프링, 운동부인 아마추어(armature)로 구성되어 있으며, 개략화된 형상은 Fig. 1에 나타나 있다. 하우징과 아마추어는 자속투과율(magnetic permeability)이 높은 강자성체(ferrous material)로 구성되며, Table 1에는 해석 모델에 사용한 각 구성 요소의 상대투과율(relative permeability)의 값을 나타내었다.

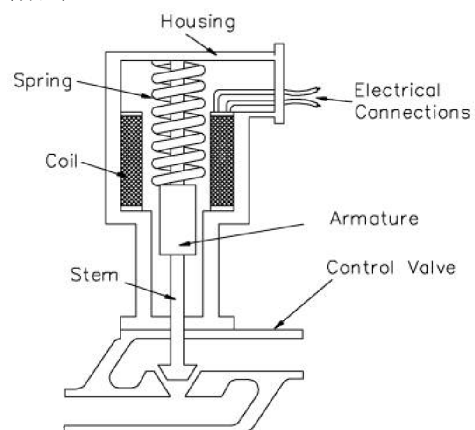


Fig. 1 Schematic model of the magnetic valve system

Table 1 Material property of components

	relative permeability
housing	4000
armature	4000
coil	1
air gap	1

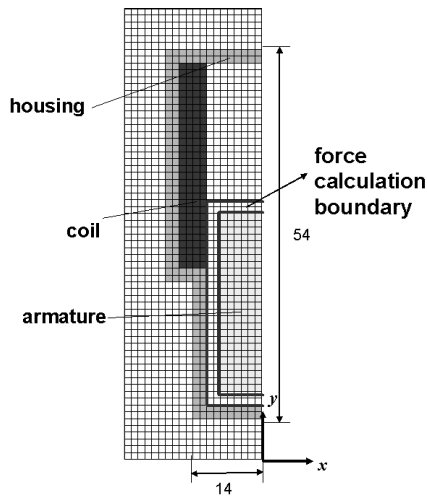


Fig. 2 The finite element model of the actuator at 2D cut section (unit : mm)

구동기의 형상은 실린더 형상의 대칭구조를 가지므로 해석에 사용한 모델은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 2차원 단면의 모델을 구성하였고, y축에 대한 축 대칭의 경계 조건을 적용 하였다.

## 2.2 설계 목적 함수의 정의

본 구동기의 설계 목적은 동일한 전력조건에서 높은 구동력을 얻는 것이다. 이를 위해서는 높은 자기력을 얻기 위한 형상의 최적화 방법과, 운동부의 질량 관성을 줄여 효율을 높이는 두 가지 방법이 고려될 수 있다. 본 연구에서는 전자의 방법을 적용하여 설계 영역을 구동부인 아마추어로 설정하고, 설계의 목적함수를 구동부에 작용하는 자기력의 극대화로 정하였으며, 제한조건은 운동부의 질량을 초기 설계 모델의 70% 이내로 줄이는 것으로 설정하였다. 이를 정식화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize (Magnetic driving force on the armature)} \\ & \text{Subject to } \text{Final Volume} \leq 0.7 \times \text{Volume}_{\text{int}} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\text{Volume}_{\text{int}}$  는 구동부의 초기 부피를 나타낸다.

## 3. 자기력 해석

### 3.1 유한요소해석을 이용한 자기력계산

시불변계(time invariant field)의 자기영역(magnetic field)에서 자속밀도(magnetic flux density)의 계산은 다음의 맥스웰 방정식(Maxwell's equation)의 계산에서 시작된다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2)$$

식 (2)는 Ampere의 회로 법칙(circuit law)으로 잘 알려져 있으며, 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)의 2계 미분항이 0이라는 것을 적용하면, 식(3)과 같은 푸아송 방정식(Poisson's equation) 형태의 자계 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (3)$$

자기 영역에서 자기력은 맥스웰 응력법(Maxwell stress method)에 의해 계산될 수 있다. 식(4)는 맥스웰 응력 텐서(tensor)를 나타내고 있으며, 이를 이용한 힘은 식(5)와 같이 계산된다.

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2}|\mathbf{B}|^2 & B_x B_y & B_x B_z \\ B_y B_x & B_y^2 - \frac{1}{2}|\mathbf{B}|^2 & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & B_z^2 - \frac{1}{2}|\mathbf{B}|^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = \int_S \mathbf{T} \cdot d\mathbf{S} \quad (5)$$

여기서  $B_x, B_y, B_z$  는 각각  $x, y, z$  방향의 자속밀도를 나타내,  $\mathbf{S}$ 는 자력이 통과하는 부분의 면적을 나타낸다. 이 방법은 가상변위가 발생했을 때의 에너지 변화를 이용하여 힘을 계산하는 가상일 방법(virtual work method)에 비해 계산이 용이할 뿐 아니라, 설계 민감도를 계산하는데 있어서 훨씬 용이한 장점이 있다.

맥스웰 응력법을 적용하기 위해서는 힘의 계산 영역이 공기와 같은 물질 특성을 갖는 공간이어야 한다. 이는 맥스웰 응력법의 식 (4)에 나타난 바와 같이 공기에서의 투자율  $\mu_0$  로 식이 구성되어

있음에 기인한다. 따라서 자기력의 계산을 위해서는 계산을 위한 공기층의 설정이 필요하며, Fig. 2에 이를 표시하고 있다.

#### 4. 위상최적화 설계

##### 4.1 밀도법을 이용한 위상최적설계

위상최적화 설계(topology optimization design)는 구조 최적설계의 한 방법으로, 구조물을 구성하는 각 요소의 연결성(topology)을 최적화하는 것이다. 이 위상최적화 설계는 기본적으로 유한요소해석의 방법을 기반으로 시작되었고, 유한요소해석에서 사용되는 각 요소의 채워짐과 비워짐의 상태를 이용하여 요소 사이의 연결을 표현하고 그에 따른 형상을 설계한다. 채워짐과 비워짐 사이의 연속성을 함수화 시키는 방법 중의 한 가지로 물질의 특성을 각 요소의 밀도와 선형적 또는 지수적인 관계로 표현하는 밀도법(density method)이 널리 사용된다.<sup>(5)</sup> 즉, 밀도계수가 0일 때, 연결성은 비워져있는 상태이며 물질 상수 또한 0이 된다. 역으로, 밀도계수가 1일 때, 연결성은 채워져있는 상태이며 물질상수는 원래 고유의 물질특성을 가진다. 밀도계수 값이 0과 1 중간의 상태는 실제 존재하지 않는 물질이지만, 물질의 특성이, 밀도계수와 거의 같은 특성을 지니게 되는 가상의 물질 상태로 약한 연결성을 가지게 된다. 이 때의 설계변수는 각 요소의 밀도계수이며, 밀도 계수의 값은 0 과 1 사이의 범위를 가지게 된다.

위상최적 설계에서는 각 설계 요소의 밀도계수의 값의 변화에 따른 설계 민감도를 계산해서, 0 또는 1로 수렴할 수 있도록 반복계산을 수행한다. 이때 중간값의 밀도를 가지는 요소의 수를 줄이고, 수렴성을 높이기 위하여, 벌칙 함수(penalty function)를 사용한다. 벌칙 함수를 사용하면, 밀도함수의 식은 변경되며, 좀 더 높은 수렴성을 보여준다. 탄성체의 설계에서는 벌칙 함수 지수의 값은 3의 값을 쓰는 것이 비교적 좋은 결과를 나타내 주는 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup>

##### 4.2 자기영역에서 위상최적설계의 적용

자기계(magnetic field)의 특성을 나타내는 가장 중요한 물질 상수는 투자율(permeability)이다. 각 물질의 투자율은 공기의 투자율 값에 대한 상대적인 값인 상대투자율(relative permeability)

값으로 표현된다.

이를 고려할 때, 자기 영역에서 위상최적설계의 설계변수는 각 요소(element)의 투자율 밀도이며, 식 (6) 과 같이 표현할 수 있다.<sup>(6,7)</sup>

$$\mu = \mathbf{X}^P \cdot \mu_e \quad (6)$$

여기서  $P$ 는 벌칙 함수를 나타내며,  $X$ 는 각 요소의 밀도를 나타내는 밀도계수이다.  $\mu_e$ 는 설계영역을 구성하는 물질의 상대 투자율 값을 의미한다.

##### 4.3 자기영역에서 물성계수

자기계의 위상최적 설계에는 투자율이 물질 상수로 사용되지만 투자율 이외에 자기저항 (magnetic reluctivity) 값이 사용될 수 있다. 자기저항의 값은 투자율 값의 역수이며 다음과 같이 표시된다.

$$\nu = \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

투자율을 나타내는 B-H 곡선은 탄성계수 곡선과 유사하지만, 실제 투자율의 의미는 탄성계수와는 반대의 의미를 가지며, 이것은 Table 2에서와 같이 탄성에너지와 자기에너지를 비교해보면 명확하게 나타난다. 따라서 위상최적 설계를 위한 자기 영역에서의 물성은 자기저항을 사용하는 것이 더 정확하다고 할 수 있다.

설계 변수인 밀도계수의 함수로 자기저항 밀도를 표현 하고, 투자율을 기반으로 계산할 경우, Fig. 3과 같이 밀도계수의 값이 0.1~1 사이에서 값의 차이가 나타나지 않으므로 설계 민감도의 계산에 어려움을 겪을 수도 있다. 따라서 자기력 기반의 목적함수를 계산에서 자기저항 밀도를 기반으로 계산하는 것이 좋은 선택이 될수 있으며, 본 논문의 최적화 결과는 자기저항 기반으로 수행하였다. 또한, 이 경우의 벌칙 함수의 값은 탄성 구조의 설계와는 달리 1의 값을 갖는 경우가 좋은 수렴성을 보여준다.<sup>(9)</sup>

**Table 2** Comparison of mechanical and magnetic system

	Mechanical system	Magnetic system
governing equation	$\mathbf{Ku} = \mathbf{F}$	$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}$
constitutive relation	$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon}$	$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$
energy formulation	$W = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon}$	$W = \frac{1}{2} \mathbf{vB}^T \mathbf{B}$

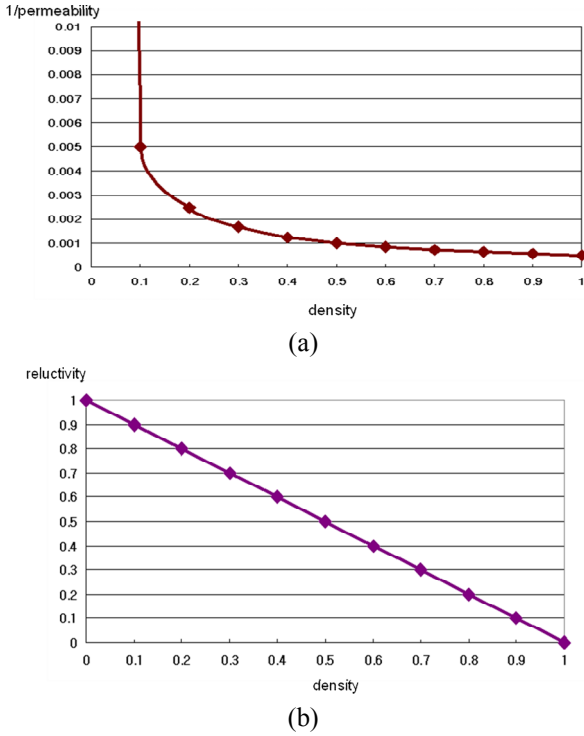


Fig. 3 Material property variation according to density variation; (a) based on magnetic permeability and (b) based on magnetic reluctivity

4.4 설계민감도의 계산

자기력  $F_{mag}$  는 벡터 포텐셜  $A_z$  의 함수이며, 설계 변수  $X$ 에 대한 민감도를 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$\frac{dF_{mag}}{dX} = \frac{\partial F_{mag}}{\partial X} + \left( \frac{\partial F_{mag}}{\partial A_z} \right)^T \frac{\partial A_z}{\partial X} \quad (8)$$

$KA_z = F$  의 관계로부터 다음의 식 (9)가 유도된다.

$$\frac{dA_z}{dX} = K^{-1} \left[ -\frac{dK}{dX} A_z + \frac{dF_{mag}}{dX} \right] \quad (9)$$

여기서  $F$ 는 자기 가진(magnetic excitation) 항을 나타낸다.  $dF_{mag}/dX=0$  에 따라 식 (8)과 (9)를 정리하면 다음의 식 (10)을 얻는다.

$$\frac{dF_{mag}}{dX} = \left( \frac{\partial F_{mag}}{\partial A_z} \right)^T K^{-1} \left[ -\frac{dK}{dX} A_z \right] \quad (10)$$

계산을 간편하게 하기 위하여 보조변수(adjoint variable)  $\lambda$ 를 식 (11)과 같이 정의할 수 있다.

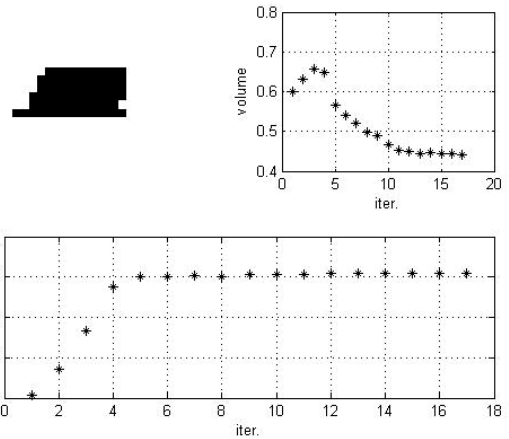


Fig. 4 Optimal shape of the armature part

$$\lambda = \left( \frac{\partial F_{mag}}{\partial A_z} \right)^T K^{-1} \quad (11)$$

보조 변수  $\lambda$ 를 사용하여 설계 민감도 계산식 식 (8)을 계산하여 정리하면, 식 (12)의 설계 민감도 식을 얻을 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$\frac{dF_{mag}}{dX} = \lambda^T \left[ -\frac{dK}{dX} A_z \right] \quad (12)$$

4.5 최적화 설계 결과

자기 구동력에 대한 아마추어의 최적형상은 Fig. 4에 나타나 있다. 초기 밀도 계수를 0.6으로 하여 위상최적화를 수행하고, 17회의 반복 계산 후에 최적 설계 형상을 얻었으며, 설계 영역대비 50%의 체적이 감소하였다. 여기서 체적 제한 조건인 0.7보다 적은 0.5이하의 값에서 최적형상을 얻어지며, 이는 목적함수의 제한조건을 회피해 최적화 과정에서 국부 최적값을 찾아 얻어진 결과로 판단된다. 상용 패키지 ANSYS로 해석된 최적 모델의 구동력은 270N 으로 초기 모델의 구동력 209N 에 비하여 29% 향상된 결과를 얻었다.

Fig. 5는 구동기 전체 모델에서 최적화된 아마추어 형상을 적용한 모델이며, Fig. 6은 초기 형상과 최적화된 형상의 벡터 포텐셜 선도를 비교하여 나타내고 있다. 자기장은 벡터 포텐셜 선도를 따라 흐르므로, 벡터 포텐셜 선도를 통해 자속의 흐름을 비교해 볼 수 있다.

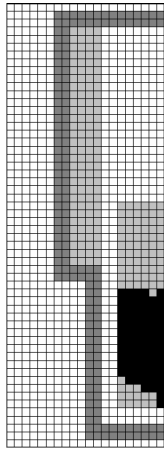


Fig. 5 Magnetic actuator with the optimized armature

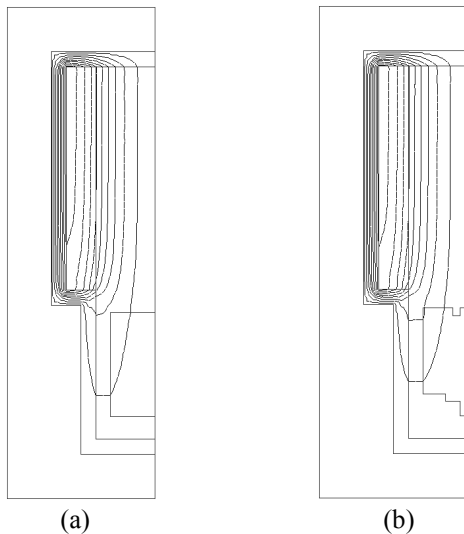


Fig. 6 Comparison of the magnetic vector potential of (a) initial design and (b) optimal design

## 5. 결론

본 연구에서는 친환경 자동차의 엔진 흡배기 밸브용 자기 구동방식의 밸브 구동기의 설계에 적용할 수 있는 위상 최적화 설계의 방법을 이용한 방법론을 제시하고, 밸브 시스템의 최적 형상을 도출하였다. 위상 최적화 설계의 결과는 유한요소의 격자 단위로 형상을 나타내기 때문에 위상 최적화 설계의 결과를 그대로 최종 설계로 옮기기에는 어려움이 있고, 제작 가능성을 고려한 치수 설계가 동반되어야 한다. 그러나 설계 대상인 구조물의 개념적 형상을 제시해 줄 수 있다는 점에서 의미가 있으며, 유한요소해석의 해석 과정을 이용하기 때문에 여러 물리계 내의 구조물의 설계도 가능하다.

자기장 내 구조물의 위상 최적화 설계에서 설계민감도의 계산은 일반적인 기계구조물과 달리 목적함수 계산 영역과 설계 변수 영역이 분리되어 계산이 복잡한 특성을 가지지만, 본 연구에서 사용한 보조변수를 도입하여 계산할 경우 계산을 간편화할 수 있어 최적의 결과를 용이하게 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D00026).

## 참고문헌

- (1) Park, S. H., 2003, Study on Design and Operating Parameters of Electromechanical Valve System, Ph D Thesis, Ajou University.
- (2) [http://www.global-autonews.com/board/view.php3?table=bd\\_chae\\_war&gubun=7&page\\_num=&idx=1707&keyfield=&key](http://www.global-autonews.com/board/view.php3?table=bd_chae_war&gubun=7&page_num=&idx=1707&keyfield=&key)
- (3) Kim, J. and Lieu, D. K., 2007, "A New Electromagnetic Engine Valve Actuator with Less Energy Consumption for Variable Valve Timing," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 602~606.
- (4) Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," *Computer methods in applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197~224.
- (5) Bendsøe, M. P. and Sigmund O., 2003, *Topology Optimization Theory, Methods and Applications*. Springer-Verlag: New York.
- (6) Dick, D. N. and Lowther, D. A., 1997, "Composite Microstructure of Permeable Material for the Optimized Material Distribution Method of Automated Design," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, Issue 2, pp. 1828~1831.
- (7) Yoo, J. and Soh, H. J., 2005, "An Optimal Design of Magnetic Actuators Using Topology Optimization and the Response Surface Method," *Microsystem Technologies*, Vol. 11, pp. 1252~1261
- (8) Haftka, R. T. and Gürdal, Z., 1992, *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic, Dordrech.
- (9) Yoo, J., Yang, S., and Choi, J. S., 2008, "Optimal Design of an Electromagnetic Coupler to Maximize Force to a Specific Direction," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, Issue 7, pp. 1737~1742.
- (10) Haug, E. J., Choi, K. K. and Komkov, V., 1986, *Design Sensitivity Analysis of Structural Systems*, Academic Press, New York.