

열 컴플라이언트 메커니즘의 위상 최적설계

이원구*, 임민규*, 박재용*, 한석영†

(논문접수일 2010. 4. 7, 심사완료일 2010. 6. 16)

Topology Optimization of Thermal Actuated Compliant Mechanisms

Won-gu Lee*, Min-gyu Im*, Jac-yong Park*, Seog-young Han†

Abstract

A compliant mechanism is a mechanism that produces its motion by the flexibility of some or all of its members when input force or thermal load is applied. Whereas the topology optimizations based on homogenization and SIMP parameterization have been successfully applied for compliant mechanism design, ESO approach has been hardly considered yet for the optimization of these types of systems. In this paper, traditional ESO method is adopted to achieve the optimum design of a compliant mechanism for thermal load, since AESO method cannot consider the effect of both heat conduction and convection. Sensitivity number, a criterion for element removal in traditional ESO, was newly defined for input thermal loading. The procedure has been tested in numerical applications and compared with the results obtained by other methods to validate these approaches.

Key Words : Compliant mechanism(컴플라이언트 메커니즘), Topology optimization(위상 최적화), MEMS(미세전자기계시스템), ESO(진화적 구조 최적화 기법)

1. 서론

컴플라이언트 메커니즘이란 메커니즘을 구성하는 일부분 혹은 전체의 탄성변형을 이용하여 설계자가 원하는 변위나 힘을 얻어내는 기구 구조물을 말한다. 이러한 기능으로 기존의 강체와 조인트로 구성된 기구와 달리 연결부위의 마모, 마찰 및 헐거움이 발생하지 않아 출력이 향상되고, 조립 및

생산과정이 단순화 되어 생산비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 MEMS, 자동차 및 항공기 시스템, 유연생산장비 등 같은 미세 동작이 요구되는 분야에 광범위하게 적용되고 있다.

지금까지 컴플라이언트 메커니즘의 설계는 밀도법이나 균질화법, 바닥 구조(ground structure) 기반의 설계기법⁽¹⁾ 등을 이용하여 개발되었다. 예를 들면 Sigmund⁽²⁾는 균질화법을

* 한양대학교 대학원 기계공학과
† 교신저자, 한양대학교 기계공학부 (syhan@hanyang.ac.kr)
주소: 133-791 서울시 성동구 행당동 17

이용하여 전체 구조의 유연성을 고려하고, 원하는 체적을 목표로 하여 기구의 입·출력비(mechanical advantage)를 최대화 하므로써 설계하는 방법을 제안하였다. 또한 Nishiwaki⁽³⁾ 등은 Bendsóe와 Kikuchi⁽⁴⁾가 제안한 균질화법을 적용하고, 다기준모델(multi-criteria model)을 이용하여 상호평균컴플라이언스(mutual mean compliance)를 최대화하는 방법으로 기구전체의 유연성을 이용할 수 있는 컴플라이언트 메커니즘 설계방법을 제안하였다. 또한 Saxena⁽⁵⁾ 등은 상호위치에너지(mutual potential energy)를 최대화하는 목적으로 프레임 요소를 사용하는 방법을 제안하였고, Lau⁽⁶⁾ 등은 스프링 모델과 밀도법을 이용하여 기구의 성능을 나타내는 입·출력비, 입·출력변위비(geometrical advantage), 일 비율을 최대화하는 설계방법을 제안하였다. 하지만 진화적 구조 최적화 기법(ESO기법, Evolutionary Structural Optimization method)⁽⁷⁾은 기법의 특성상 강성이나 진동, 좌굴 문제 등에 성공적으로 적용되어 왔지만 유연성을 추구한 컴플라이언트 메커니즘 설계에는 적용하기가 어려워 아직까지 발표된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 ESO기법을 기반으로 하여 컴플라이언트 메커니즘 설계를 제안하고자 한다. 입력이 열인 경우에 대하여 요소 제거의 기준이 되는 민감도 수를 정의하였고, 예제에 적용하여 ESO기법을 이용한 컴플라이언트 메커니즘의 설계가 효과적으로 이루어짐을 입증하였다.

2. 열 컴플라이언트 메커니즘 설계 정식화

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 2차원 열-탄성문제를 고려하여 열탄성체를 등방성재료로 가정한다. 경계를 완전히 고정하고, 탄성체에 작용하는 체력은 정식화의 단순화를 위하여 무시한다. Fig. 1에서는 스프링 모델에서 열탄성체 경계에

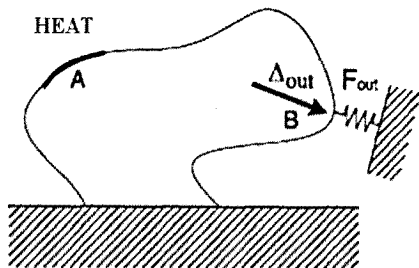


Fig. 1 Thermal compliant mechanism construction of spring model⁽¹³⁾

입력으로 주어지는 열에 의하여 T_{in} 이 작용하여 그로 인해 B점에 출력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 여기서 출력증폭 (Force Amplification; FA)⁽¹³⁾에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$FA = \frac{F_{out}}{T_{in}} \quad (1)$$

B점의 출력은 스프링 모델에서 다음과 같이 출력변위로 표현할 수 있다.

$$F_{out} = k_s \cdot \Delta_{out} \quad (2)$$

여기서 Δ_{out} 은 스프링의 수축 변위이고, 식 (2)에 의하여 입출력 비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$FA = \frac{k_s \cdot \Delta_{out}}{T_{in}} \quad (3)$$

ESO기법 중 추가법⁽⁸⁾은 힘에 의한 컴플라이언스 메커니즘을 설계하기 위하여 최대의 컴플라이언트 시스템 즉 전체가 비어있는 설계영역(empty design domain)으로부터 시작하여 목표체적까지 가장 큰 민감도수를 가지는 요소를 점진적으로 요소를 더해 나가는 방법이다. 하지만 열에 의한 컴플라이언트 메커니즘 문제에서 추가법을 사용하게 되면 대류조건을 고려할 수 없기 때문에 본 연구에서는 ESO기법의 제거법을 이용하였다.

본 연구에서의 제거법은 요소가 가지고 있는 값이 아닌 요소가 목적함수에 미치는 영향을 각각의 요소에 대해 계산한 뒤 제거해 나가는 방식이다. 마찬가지로 ESO법을 적용하기 위해서는 민감도 해석을 통해 요소제거 기준을 정해줘야 한다. 민감도 수는 식 (1)를 미분하여 얻을 수 있다.

$$\alpha_e = \frac{\Delta F_{out}(T_{in}) - F_{out}(\Delta T_{in})}{(T_{in})^2} \quad (4)$$

여기서 ΔT_{in} 은 e 번째 요소가 구조물에서 제거되었을 경우의 열하중의 차이이고, ΔF_{out} 은 e 번째 요소가 구조물에서 제거되었을 경우의 출력의 차이이다.

이러한 열-탄성해석과 민감도 해석 과정은 질량제한 조건이나 체적제한 조건과 같은 제한조건과 같은 수렴조건을 만

족시킬 때까지 반복 진행된다. ESO기법의 위상 최적화 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 구조물이 허용할 수 있는 설계영역을 정의한다.
- (2) 설계영역을 요소로 나누고, 경계조건과 열하중, 물성치를 정의한다.
- (3) 열전달 해석을 통하여 각 절점의 온도분포를 구한다.
- (4) 구한 각 절점의 온도분포를 이용하여 구조해석을 한다.
- (5) 이러한 유한요소 해석결과를 이용하여 FA를 계산한다.
- (6) 모든 요소들에 대한 민감도 수 α_i 를 계산한다.
- (7) 가장 큰 민감도 수의 요소를 제거한다.
- (8) 현재 구조물의 체적 V_k 가 목표체적 $V_{fraction}$ 을 만족할 때까지 (3)~(7)을 반복하여 최적해를 구한다.

3. 적용 예제

3.1 열 액츄에이터 설계 1

열 액츄에이터는 Fig. 2와 같이 입력단에 작용한 열하중을 출력단에서 운동이나 힘으로 변환시켜주는 기구이다. 이 기구의 특징은 입력단에 작용하는 열하중에 의하여 출력단에서 x방향으로 최대한으로 운동을 발생되어야 한다. Fig. 2는 설계영역과 경계조건들을 보여주고 있다.

설계영역은 가로 0.1m, 세로 0.1m이고, 400개의 4절점

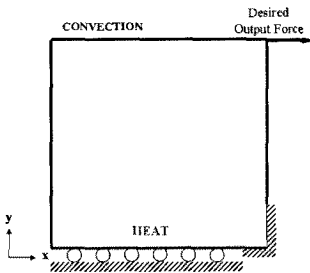


Fig. 2 Design domain with thermal loading and boundary conditions

Table 1 Thermal actuator material properties

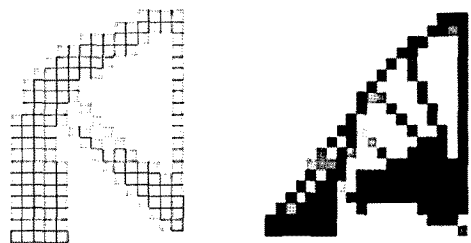
Young's modulus	1.1GPa
Poisson's ratio	0.45
Heat conductivity	0.22W/(m·°C)
Film coefficient	2W/(m·°C)
Thermal expansion coefficient	8.0e-5(mm/mm)/(m·°C)

사각형 유한요소로 나누었다. 목표체적 $V_{fraction}$ 은 전체 설계영역의 37%로 설정하였으며, 이때 사용된 재료물성치는 Table 1과 같다. Fig. 3(a)는 본 논문에서 제안한 열전달 해석 시 정상상태에서 전도와 대류를 고려한 방법에 의해 설계된 레이아웃으로 출력단에서의 변위와 출력은 0.1689mm와 5511.44N이다. Fig. 3(b)는 열전달 해석 시 비정상상태에서 전도만을 고려한 방법에 의해 설계된 최적화 형태로서 정상상태에서 대류를 고려하여 구조 해석한 결과 출력단에서 0.165mm의 변위와 3663.44N의 출력이 발생하였다. 두 위상이 서로 유사한 결과를 나타내었으며, Table 2는 초기 모델과 최적화된 위상의 변위와 출력에 대한 결과를 나타낸다. 초기 위상과 비교하여 얻어진 최적 위상의 변위와 출력이 모두 증가하였음을 알 수 있다.

3.2 열 액츄에이터 설계 2

Snap-fit 메커니즘은 부품자체에 결합될 수 있는 형상을 성형한 후, 다른 부품을 부착하는 방법으로 구조물을 체결하는 메커니즘이다. 본 논문의 Snap-fit 메커니즘은 Fig. 4와 같이 입력단에 열하중을 가한 후 출력단에서 설계자가 원하는 방향으로 구조물이 분리되도록 설계한 기구이다.

설계영역은 가로 0.085m, 세로 0.1m이고, snap-fit과 engaging counter part가 분리되는 것을 막기 위하여 두 부품의 체결 부분을 비설계영역으로 설정하였으며, 340개의 4절점 사각형 유한요소로 나누었다. 목표체적 $V_{fraction}$ 은 전체 설계영역의 35%로 설정하였고, 해석에 필요한 모델의 재료



(a) Steady state problem (b) Time-transient problem⁽⁹⁾

Fig. 3 Optimal configuration

Table 2 Performance result of thermal actuator

	Initial model	Optimum model
Displacement	0.056897mm	0.16888mm
Force	4472.5N	5511.44N

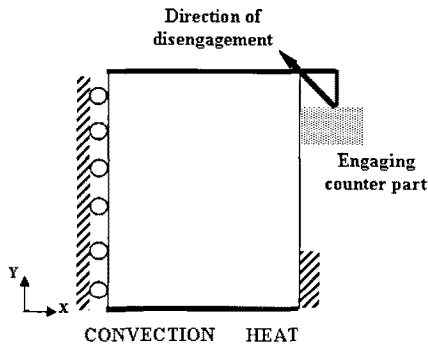
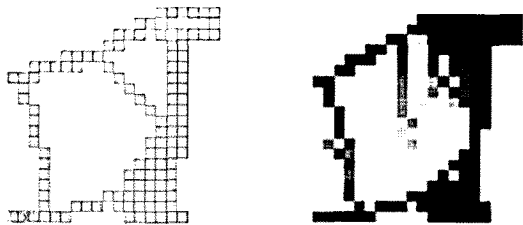


Fig. 4 Design domain of a snap-fit mechanism⁽¹³⁾



(a) Steady state problem (b) Time-transient problem⁽⁹⁾

Fig. 5 Optimal configuration

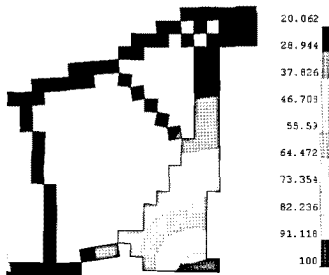


Fig. 6 Temperature distribution of optimal solution

물성치는 Table 1의 예제와 동일한 데이터를 사용하였다.

Fig. 5(a)는 본 논문에서 제안한 열전달 해석 시 정상상태에서 전도와 대류를 고려한 방법에 의해 설계된 레이아웃으로 출력단에서의 변위와 출력은 0.2517mm와 5067.07N이다. Fig. 5(b)는 열전달 해석 시 비정상상태에서 전도만을 고려한 방법에 의해 설계된 최적화 형태로써 정상상태에서 대류를 고려하여 구조해석한 결과 출력단에서 0.0609mm의 변위와 16.5N의 출력이 발생하였다. 얻어진 최적화 결과의

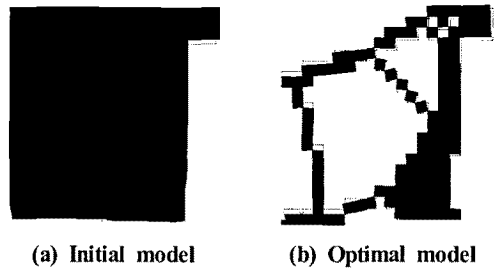


Fig. 7 Deformation comparison

Table 3 Performance result of thermal actuator 2

	Initial model	Optimum model
Displacement	0.07mm	0.2517mm
Force	6094N	5067.07N

온도분포는 Fig. 6과 같고, Fig. 7과 Table 3은 초기모델과 최적화된 형상의 변위와 출력에 대한 결과를 나타낸다. 여기서 최적화된 형상의 값과 비교해 보면 초기모델 값이 출력이 더 크지만, 예제에서 요구하는 방향을 고려해 볼 때 그 값은 설계자가 원하는 방향이 아닌 다른 방향으로 변형에 대한 결과 값이라는 것을 확인할 수 있다.

3.3 열 액츄에이터 설계 3

이 예제의 궁극적인 목적은 제한된 부피에서 열팽창으로 측정점의 출력을 최대화 하는 열 액츄에이터를 설계하는 것이다. 보편적인 액츄에이터는 전기적 영향에 의해서 열이 발생하는데 이 문제에서는 전기적 영향에 의한 열 발생은 고려하지 않고 일정한 열하중을 중앙부에서 동일하게 발생한다고 가정한다.

설계 영역은 가로 0.192m, 세로 0.248m이고, 480개의 4절점 유한요소로 나누었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 비설계영역인 평판의 위쪽과 아래쪽 모서리는 고정되어 있으며 동시에 대류에 의해서 영향을 받는다. 목표채적 $V_{fraction}$ 은 전체 설계영역의 40%로 설정하였으며, 해석에 필요한 모델의 재료물성치로 Table 1의 예제와 동일한 데이터를 사용하였다.

Fig. 9(a)는 본 논문에서 제안한 열전달 해석 시 정상상태에서 전도와 대류를 고려하여 출력증폭을 최대화하도록 설계된 레이아웃으로 출력단에서의 변위는 1.6494mm이고 출력은 335.72kN이다. Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)와 같은 해석조건

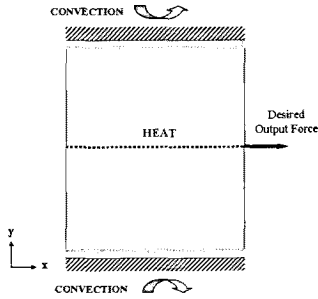
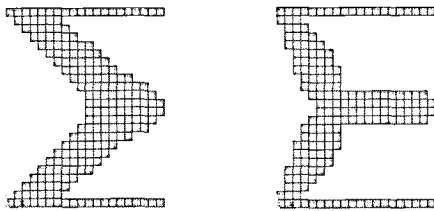
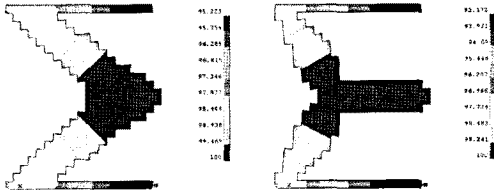


Fig. 8 Thermal actuator 3 design domain



(a) Force amplification (b) Motion amplification

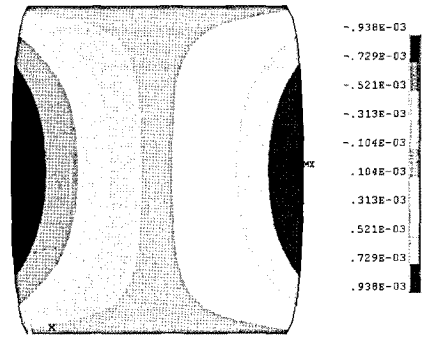
Fig. 9 Optimal configuration



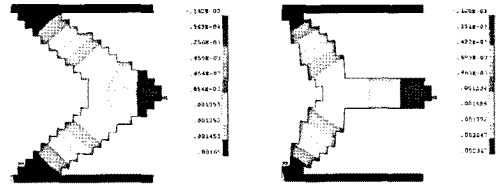
(a) Force amplification (b) Motion amplification

Fig. 10 Temperature distribution of optimal solution

과 방법으로 변위증폭을 최대화하도록 설계된 레이아웃으로 변위는 2.3174mm이고 출력은 207.31kN이다. 이때 각 요소의 온도분포는 Fig. 10과 같고, Fig. 11과 Table 4는 초기 모델과 최적화된 형상의 변위와 출력에 대한 결과를 나타낸다. 여기서 변위와 출력의 결과 값들을 비교해 볼 때 출력증폭을 최대화하는 출력 값은 초기모델의 출력 값과 변위증폭 최적화의 출력 값보다 컸고, 변위증폭을 최대화하는 변위 값은 초기모델의 변위 값과 출력증폭 최적화의 변위 값보다 크다는 것을 확인할 수 있다. 변위증폭에 최대화하는 설계방법은 변형하도록 하는 구조의 유연성을 요구하기 때문에 구조물의 기하적인 형상에 대한 대변형을 고려하도록 요구되어지고 있다. 이후의 변위증폭 최적화수행에서는 더 정확한



(a) Initial model



(b) Force amplification (c) Motion amplification

Fig. 11 Deformation and x-displacement distribution comparison

Table 4 Performance result of thermal actuator 3

	Displacement	Force
Initial model	0.93762mm	316.56kN
Optimum model (Force amplification)	1.6494mm	335.72kN
Optimum model (Motion amplification)	2.3174mm	207.31kN

최적화 레이아웃과 결과 값을 위해서 대변형을 고려한 비선형해석이 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 ESO기법에 기반한 열에 의한 컴플라이언트 메커니즘 위상 최적화 방법을 제안하였으며, 최적화를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 제안된 ESO기법을 적용하기 위해 전도와 대류에 대한 열변형을 구하고, 각 요소에 대한 민감도 수 해석을 통하여 체적조건에 맞는 위상을 구하였다.

- (2) 열 액츄에이터의 입력단에 작용하는 열하중과 출력단에 작용하는 반력을 설계에 반영하고, 출력단에서의 특정한 방향으로 출력을 증폭시키기 위한 컴플라이언트 메커니즘 구조의 레이아웃을 도출하였다.
- (3) 제안된 방법들을 이용하여 설계예제를 통해 설계자의 목적에 맞는 액츄에이터의 위상을 구할 수 있었으며, 얻어진 결과의 타당성을 변형된 형상과 결과를 통해 검증하였다.

참고 문헌

- (1) Howell, L., 2001, *Compliant Mechanisms*, Wiley, New York.
- (2) Sigmund, O., 1997, "On the Design of Compliant Mechanisms Using Topology Optimization," *Mech. Struct. and Mach.*, Vol. 25, No. 4, pp. 493~524.
- (3) Nishiwaki, S., Frecker, M. I., Min, S., and Kikuchi, N., 1998, "Topology Optimization of Compliant Mechanisms Using the Homogenization Method," *Computer Int. J. Numer. Mech. Engng.*, Vol. 42, pp. 535~559.
- (4) Lu, K. J. and Kota, S., 2006, "Topology and Dimensional Synthesis of Compliant Mechanisms Using Discrete Optimization," *Trans. of ASME*, Vol. 128, pp. 1080~1091.
- (5) Bendsée, M. P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," *Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197~224.
- (6) Saxena, A. and Ananthasuresh, G. K., 2000, "On an Optimal Property of Compliant Topologies," *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 19, pp. 36~49.
- (7) Lau, G. K., Du, H., and Lim, M. K., 2001, "Use of Functional Specifications as Objective Functions in Topological Optimization of Compliant Mechanism," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, pp. 4421~4433.
- (8) Ansola, R., Vegueria, E., Canales, J., and Tarrago, J., 2007, "A simple evolutionary topology optimization procedure for compliant mechanism design," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 44, pp. 53~62.
- (9) Li, Ying, Saitou, K., and Kikuchi, N., 2004, "Topology optimization of thermally actuated compliant mechanisms considering time-transient effect," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, pp. 1317~1331.