

바닥 보 구조 기반 조인트 강성 조절법을 이용한 컴플라이언트 메커니즘의 설계

Ground Beam Structure Based Joint Stiffness Controlling Method for the Design of Compliant Mechanism

김 명 진* · 장 강 원** · 김 윤 영***

Kim, Myung-Jin · Jang, Gang-Won · Kim, Yoon Young

ABSTRACT

Topology optimization has been widely used in many research areas due to its ability in providing initial designs for the problems with complex boundary conditions. This also has been useful in compliant mechanisms, but resulting layouts may not be immediately manufacturable because they usually consist of members with varying widths and shapes. Also, there occurs some numerical difficulties such as checkerboards or hinge patterns which result from 1-node connection, and intermediate values which make the manufacturing of the designed structure difficult. Though there are many remedies given to avoid this problems, they cannot be prevented. One may avoid this difficulty by employing uniform ground beams and explicit hinge joints. The proposed method is to connect uniform ground beams with elastic short-beam hinge joints. By choosing the widths of short beams as design variables, dominant deformations can occur mainly by flexible joints having intermediate widths. Unlike the conventional methods used for compliance minimization, intermediate widths must appear in compliant mechanism design problems. Also, the present approach does not encounter the problem of one-point hinges.

Keywords: topology optimization, compliant mechanisms, ground structure, elastic hinge joint

1. 서 론

위상 최적 설계 기술(Bendsoe and Kikuchi, 1998)은 외부의 경계 조건이 복잡하여 직관만으로 설계하기 어려운 제품들의 초기 설계에 윤곽을 제시해 주는 데 매우 유용하기에 다양한 분야(Kim et al, 2000; Diaz and Kikuchi, 1992; Kim et al, 2005b)에서 활용되고 있다. 컴플라이언트 메커니즘을 위한 위상 최적 설계 기술은 주로 연속 설계 공간(continuous design domain)을 이용하는데 이러한 경우 체커 보드나 힌지 형상과 같은 4절점 요소간의 1점 연결에 의한 수치적 문제점이나 중간 밀도 문제와 같이 메커니즘의 실제 제작을 어렵게 만드는 문제점들이 발생한다. 물론 이러한 문제점들에 대처하기 위한 여러 가지 해결법(Yoon et al, 2004; Jang et al, 2003; Kim et al, 2005a; Poulsen, 2002) 성공적

* 서울대학교 기계항공공학부 박사과정 Email: dootoomi@idealab.snu.ac.kr

** 군산대학교 기계공학부 교수 Email: gangwon@kunsan.ac.kr

*** 서울대학교 기계항공공학부 교수 Email: yykim@snu.ac.kr

이었으나 이러한 문제점들을 완벽하게 통제하기란 쉽지 않다. 컴플라이언스 최소화(compliance minimization) 문제에서는 물질의 유무를 결정하기 위해 설계 변수가 0 또는 1로 수렴하기만 하면 되지만, 컴플라이언트 메커니즘의 경우에는 물질의 강성이 위치에 따라 다양하게 분포하거나 힌지와 같은 형상이 나타나는 것이 적절한 위치에서의 변형 또는 회전이 생기기에 유리하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 언급한 문제점들을 극복하기 위한 대체적인 방법을 제시하고자 하며 다음과 같은 특징들을 가진다: 1) 1점 연결에 대한 문제가 발생하지 않으며 2) 단순한 최종 위상으로 인해 탄성 힌지의 위치 및 크기 정보를 쉽게 알아낼 수 있으며, 3) 저장되는 탄성 에너지의 양을 최소화할 수 있다는 것이다.

컴플라이언트 메커니즘의 변형은 대부분 국부적인 탄성 힌지에서 일어나기 때문에 힌지의 위치와 강성을 파악하는 것은 본 연구에서 필수적이다. 이를 위해 일정한 단면 형상 및 크기를 지니는 보 요소로 이루어진 바닥 구조(ground structure)가 설계 영역으로 이용하며 이러한 보 요소들을 연결하기 위해 다양한 크기의 단면을 지니는 조인트 요소를 도입한다. 이러한 조인트 요소는 보 요소에 비해 매우 짧은 길이의 보 요소로 구성되며, 어느 정도 이하의 단면을 지닐 때 탄성 힌지로서의 역할을 수행하게 된다. 따라서 조인트 요소의 단면의 크기가 위상 최적 설계의 영역이 되며 바닥 보 요소는 준강체로서 탄성 에너지가 사실상 저장되지 않게 된다. 반면 연속 설계 영역에서 설계된 컴플라이언트 메커니즘에서는 탄성 힌지 부위 이외의 부분에도 많은 양의 탄성 에너지가 저장되기 때문에 에너지 효율이 낮아지게 된다.

다시 말해, 높은 에너지 효율의 컴플라이언트 메커니즘을 얻기 위해서는 탄성 에너지가 저장되는 영역을 최소화 할 수 있어야 하며, 본 연구에서는 매우 짧은 길이의 조인트 요소에 집중되게 된다. 또한 보 요소들은 양 끝단에 1개의 절점만을 지니기 때문에 1점 연결에 의한 형상이 문제가 되지 않으며 일정한 단면을 지니기 때문에 기존의 결과 보다 훨씬 단순한 위상을 얻을 수 있다. 요소 간의 탄성 조인트를 구성하는 방법은 몇몇 연구에서(Fredricson et al, 2003; Yoon et al, 2005) 수행된 바 있다. 여기서 제시하는 연구 결과는 김명진 등(2005)와 Jang 등(2006)이 수행한 연구에 기초하였다.

2. 바닥 보 구조에서의 조인트 강성 조절법

서론에서 언급했듯이, 본 연구에서는 위상 최적 설계 영역으로 바닥 보 구조를 사용하게 되는데, 이러한 바닥 보 구조를 사용하면 1점 연결에 의한 수치적 문제들을 해결할 수 있다. 그러나 일반적으로 사용되는 바닥 보 구조는 그림 1(a)와 같이 요소 A와 B가 j 번째 절점을 공유하기 때문에 그림 1(b)와 같이 조인트는 자체 변형이 없는 강체와 같은 거동을 하게 된다. 그러나 컴플라이언트 메커니즘에서는 조인트에서의 회전 운동이 매우 중요하기 때문에 본 연구에서는 그림 2(a)와 같이 각각의 요소가 서로 다른 절점 j 와 k 를 가지며 이 절점 j 와 k 는 강성을 조절할 수 있는 모델을 사용하며 이를 통해 그림 2(b)와 같이 조인트에서의 회전이 가능하게 된다.

유한 요소 해석을 위해 보 요소와 조인트 요소는 모두 식 티모셴코(Timoshenko) 보 이론에 따른 요소를 사용하게 되며 바닥 보 요소들은 설계 과정동안 일정하게 유지되기에 단면적, 물성치, 굽힘 모멘트 등에 의한 강성 행렬 또한 일정하게 유지되나 i 번째 조인트 요소의 폭은 그림 3과 같이 설계 변수 γ_i 에 의해 보 요소의 폭에 비례하여 결정되기 때문에 식(1)과 같이 폭과 단면적, 굽힘 모멘트가 결정된다. 수치적 오류를 방지하기 위해 γ_{\min} 은 0에 가까운 5×10^{-6} 으로 설정되었다.

$$b_i = \gamma_i B, \quad (0 < \gamma_{\min} < \tilde{\gamma} \leq \gamma_i \leq \gamma_{\max} = 1) \quad (1a)$$

$$A_i^{joint} = b_i t = \gamma_i B t, \quad I_i^{joint} = \frac{b_i^3 t}{12} = \frac{\gamma_i^3 B^3 t}{12} \quad (1b)$$

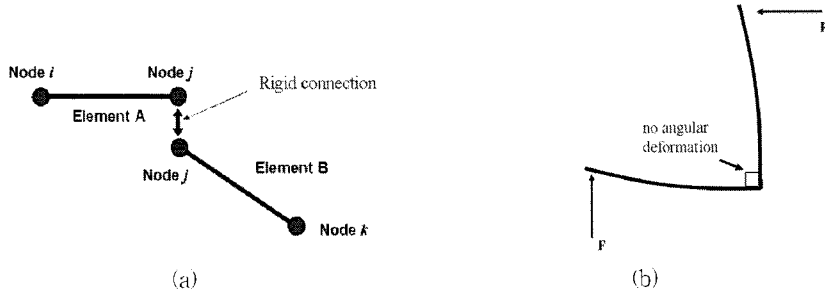


그림 1 일반적인 바닥 보 구조에서의 (a) 절점 연결 및 (b) 조인트에서의 변형

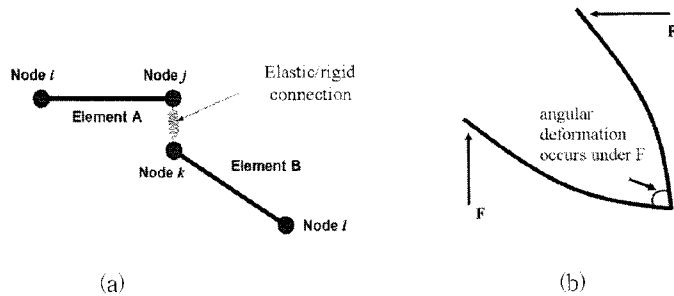


그림 2 조인트 요소가 삽입된 바닥 보 구조에서의 (a) 절점 연결 및 (b) 조인트에서의 변형

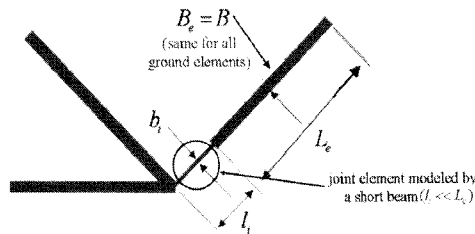


그림 3 짧은 길이의 보 요소를 이용한 조인트 요소의 길이 및 폭

그림 4는 조인트 요소에 의해 각각의 보 요소가 어떻게 연결되는 지를 보여주는데, 각각의 보 요소는 조인트 부분에서 한 개의 매개 절점에 조인트 요소로 연결돼 있다. 그림 5는 각 조인트의 γ_i 에 따라 위상이 어떻게 결정되는 지를 보여준다. 보 요소들은 전체의 구조에 조인트 요소에 의해 연결돼 있는데, 보 요소의 양 측면에 연결된 조인트 요소 중 어느 하나라도 그 폭이 매우 작아지면 보 요소는 사실상 구조물 내에서 의미가 없어져 버리므로 $\gamma_i < \tilde{\gamma}$ ($\tilde{\gamma} = 0.01$)인 경우 해당 보 요소는 위상에서 제외되고, 양쪽의 조인트 요소가 일정 두께 이상인 경우에만 구조에 나타내 진다.

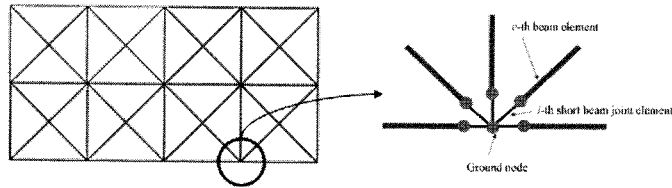


그림 4 매개 절점에 조인트 요소를 통해 연결된 보 요소

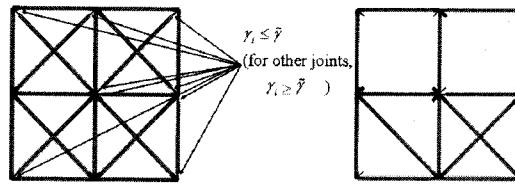


그림 5 짧은 길이의 보 요소를 이용한 조인트 요소의 길이 및 폭

γ_i 의 값에 따른 조인트의 기능은 다음과 같이 구분돼 해석될 수 있다.

- 1) $\tilde{\gamma} \leq \gamma_i \leq \gamma_{\max}$: 보 요소는 조인트 요소를 통해 구조에 연결돼 있으며 $\gamma_i = \gamma_{\max}$ 인 경우 조인트는 강체 거동을 하게 된다. γ_i 가 중간 값(일반적으로 0.1~0.7)을 지날 경우 조인트 요소는 탄성 힌지의 역할을 하게 된다.
- 2) $\gamma_{\min} \leq \gamma_i < \tilde{\gamma}$: 조인트 요소의 폭이 매우 좁기 때문에 보 요소는 구조에 연결되지 않은 것으로 간주된다.

조인트 요소의 길이인 l_i 는 $\gamma_i = \gamma_{\max}$ 인 경우 강체 거동을 할 수 있게 하기 위해서 충분히 작은 값을 지녀야 하는데, 본 연구에서는 $l_i = L_e/40$ 을 사용하였다.

3. 위상 최적화 정식화와 수치 예제

3.1. 위상 최적 설계 정식화

위상 최적화의 목적함수로는 주어진 외력에 의한 출력단에서의 변위인 u_{out} 를 정해진 질량 제한 조건 내에서 최대화하는 것을 설정한다.

$$\text{Maximize } (f = u_{out})_{\gamma \in \{1, N_s\}} \quad (2a)$$

$$g = \sum_{e=1}^{N_s} A_e L_e [\gamma_{e_1} \gamma_{e_2}]^s - M_o \leq 0 \quad (2b)$$

식(2b)를 보면 구조물의 질량은 보 요소의 양쪽에 붙어 있는 조인트 요소의 설계 변수들 γ_{e_1} 과 γ_{e_2} 의 기하 평균으로 나타내지는 것을 알 수 있다. 이는 보 요소에 인접한 조인트 요소 중 어느 하나라도 그 설계 변수가 0에 가까워지면 보 요소는 사실상 구조물에서 제외되기 때문에 해당 보 요소의 질

량이 구조물의 질량에 더해지지 않도록 하기 때문이며, 반대로 γ_{e_1} 과 γ_{e_2} 가 모두 1이 될 경우에는 보 요소의 질량 전체가 구조물의 질량에 더해지게 된다.

3.2. 마이크로 집계의 설계

조인트 강성 조절법의 효용성을 검토해 보기 위해 그림 6과 같은 3차원 영역에서 마이크로 집계 (micro gripper)를 설계해 보기로 한다. 이 설계 영역은 120개의 보 요소와 240개의 조인트 요소로 이루어져 있으며 144개의 설계 변수를 가진다. 입력단인 P와 출력단인 Q에는 각각 외부 스프링이 달려 있어 설계되는 힘 변환기가 어느 정도의 강성을 지닐 수 있도록 한다. 설계된 힘 변환기는 그림 7(a)와 같은 위상을 가지며 그림 7(b)와 같은 형태로 변형하게 된다. 그림 7(a)의 확대된 부분에 있는 강체 연결 부위를 제외한 부분을 제외한 조인트들이 탄성힌지의 역할을 함을 볼 수 있다.

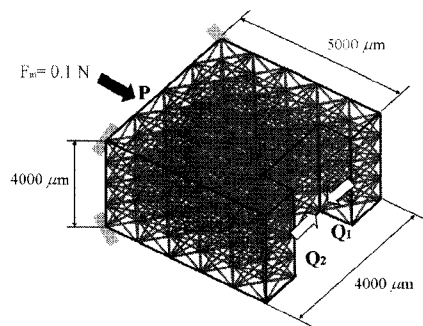


그림 6 힘 변환기의 설계 영역

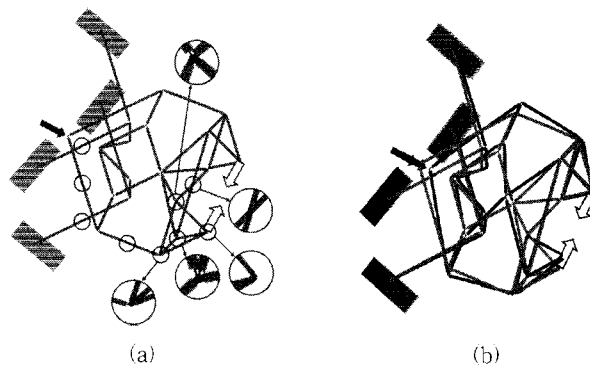


그림 7 (a) 마이크로 집계의 위상과 조인트 요소의 설계 변수 값 (b) 변형 형태

4. 결론

체커보드, 힌지 형상이나 중간 밀도 값과 같은 현상들은 기존의 연속 설계 영역에서 컴플라이언트 메커니즘을 설계할 때 피하기 어려운 문제들이었다. 본 연구에서는 조인트 요소가 도입된 바닥 보 구조를 설계 영역으로 한 조인트 강성법을 이용함으로써 체커 보드나 힌지 형상과 같은 1점 연결 문제

의 발생을 미연에 방지하고 중간 밀도 값을 회피의 대상이 아닌 탄성 한지 발견을 위한 필수적인 요소로 인식할 수 있게 되었다. 또한 변형을 국소적인 탄성 한지에서만 일어나도록 함으로써 컴플라이언트 메커니즘에 저장되는 탄성 변형 에너지를 최소화할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 창의적 연구 진흥 사업단의 후원에 의해 (한국 과학 기술 재단 승인 번호:2006-033, 서울대학교 정밀기계공동설계연구소를 통해 계약됨) 진행되었습니다.

참고문헌

- 김명진, 장강원, 김윤영 (2006), 컴플라이언트 메커니즘 설계를 위한 바닥 보 구조 기반 조인트 강성 조절법, *대한기계학회*, 30(10), pp. 1187~1193.
- Bendsøe, M.P. and Kikuchi, N. (1998), Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Computer Methods in Applied Mechanical Engineering*, 71, pp.197~224
- Díaz, A. R. and Kikuchi, N. (1992), Solutions to Shape and Topology Eigenvalue Optimization Problems using a Homogenization Method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 35, pp.1487~1502.
- Fredricson, H., Johansen, T., Klarbring, A., Petersson, J. (2003), Topology optimization of frame structures with flexible joints, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 25, pp.199-214.
- Jang, G, Jeong, J.H., Kim, Y.Y., Sheen, D., Park, C., and Kim, M. (2003), Checkerboard-free topology optimization using non-conforming finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57, pp.1717-1735.
- Jang, G., Kim, M.J., Kim, Y.Y. (2006), Topology Optimization of Compliant Mechanisms by Ground Structures Consisting of Semi-rigid Beams and Elastic hinge Joints, submitted
- Kim, J.E., Kim, Y.Y., Min, S. (2005a), A note on hinge-free topology design using the special triangulation of design elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 21, pp.701-710.
- Kim, W., Kim, J.E., and Kim, Y.Y. (2005b), Coil Configuration Design for the Lorentz Force Maximization by the Topology Optimization Method, *Sensors and actuators. A, Physical*, 121(1), pp.221~229.
- Kim, Y.Y. and Kim, T.S. (2000), Topology Optimization of Beam Cross Sections, *International Journal for Solids and Structures*, 37, pp.477~493.
- Poulsen T.A. (2002), A simple scheme to prevent checkerboard patterns and one-node connected hinges in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 24, pp.396-399.
- Yoon, G.H., Kim, Y.Y. (2005), Element connectivity parameterization for topology optimization of geometrically nonlinear structures, *International Journal of Solids and Structures*, 42, 7, pp.1983-2009.
- Yoon, G.H., Kim, Y.Y., Bendsøe, M.P., and Sigmund O. (2004), Hinge-free topology optimization with embedded translation-invariant differentiable wavelet shrinkage, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 27, pp.139-150.