

〈 논문 〉

컴플라이언트 메커니즘 설계를 위한 바닥 보 구조 기반 조인트 강성 조절법

김명진[†] · 장강원* · 김윤영**

(2005년 12월 22일 접수, 2006년 8월 14일 심사완료)

Ground Beam Structure Based Joint Stiffness Controlling Method for Compliant Mechanisms

Myungjin Kim, Gang-Won Jang and Yoon Young Kim

Key Words : Compliant Mechanism(컴플라이언트 메커니즘), Topology Optimization(위상 최적화), Ground Beam Structure(바닥 구조), Joint Stiffness Control (조인트 강성 조절)

Abstract

Traditionally, the continuum-based topology optimization methods employing the SIMP technique have been used to design compliant mechanisms. Although they have been successful, the optimized mechanisms by the methods are usually difficult to manufacture because of their geometrical complexities. The objective of this study is to develop a topology optimization method that can produce easy-to-fabricate mechanism structure. The proposed method is a ground beam method where beam connectivity is controlled by the beam joint stiffness. In this approach, beam joint stiffness determines the mechanism configuration. Because the ground structure beams have uniform thicknesses varying only discretely, the resulting mechanism topologies become easily manufacturable.

1. 서 론

위상 최적설계 기술은 외부의 경계 조건이 복잡하여 직관만으로는 설계하기 어려운 제품들의 초기 설계 윤곽을 제시해 주는 데 매우 유용하여 다양한 분야에서 활용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 연속 변수 공간에서의 위상 최적설계 기법은 체커보드 패턴이나 중간 밀도값 문제, 힌지 형상 등의 수치적인 문제점⁽⁴⁾과 결과물의 형상이 복잡하다는 단점을 지닌다.

보 요소를 이용한 바닥 구조(ground structure) 기반의 최적설계 기법⁽⁵⁾은 앞에서 언급된 문제점 중 체커보드 패턴이나 힌지 형상을 피할 수 있다는 장점이 있다.

무엇보다도 최적화된 구조물이 단면이 일정한 보 요소가 결합된 단순한 형태를 지니므로 연속체 기반의 방법에 의한 결과들에 비해 제작이 훨씬 용이하다.

그러나 기존의 바닥 구조법들은 보 요소들이 교차하는 조인트에서 변형 에너지가 발생하지 않는다는 이상적인 상황을 가정하여 조인트 효과를 무시하였다. 따라서 조인트에서 구조물의 변형 거동을 살피는 것은 불가능하다. 이것은 조인트 부분의 굽힘 변형이 운동 전달에 큰 역할을 하는 컴플라이언트 메커니즘 구조물을 설계하는 데 있어서 주요 장애 요소이다.

이러한 문제점을 해결하려면 조인트가 유한한 강성을 지닐 수 있어야 하는데, 이를 위해서 본 연구에서는 조인트들의 강성 값을 최적화의 설계 변수로 설정한다(이를 조인트 강성 조절법이라 칭한다). 최적화된 위상에서 조인트들의 강성을 평가함으로써 강체 조인트들과 탄성 조인트들로 구분하여 제작할 수 있게 되며, 메커니즘은 최적의 위

[†] 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

* 회원, 군산대학교 기계공학부

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계 공동연구소 멀티스케일설계연구단

E-mail : yykim@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7154 FAX : (02)872-5431

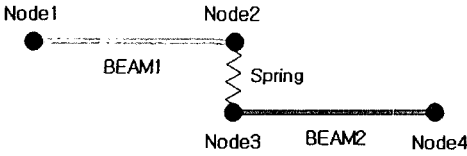


Fig. 1 The joint spring element to consider joint stiffness effect

치의 조인트들에서 변형을 일으켜 요구되는 운동을 수행할 수 있다.

그런데 조인트의 강성이 연속적인 변수 공간에서 최적화 된다면 다양한 강성 값을 가지게 된다. 이 경우 연속적인 강성 값을 지니는 조인트들이 최적해로 나타나기 때문에, 설사 기반 보 구조를 사용한다 하더라도 제작이 매우 어려운 문제점이 발생한다.

따라서 본 연구에서는 실제로 제작 가능한 컴플라이언트 메커니즘 기반의 구조물을 설계하고자 조인트의 강성을 불연속적으로 조절할 수 있는 기법을 제안하고자 한다. 즉 최적화 후에는 몇 개의 제시된 강성 값만을 갖는 조인트만을 얻을 수 있어야 한다. 이를 위해서 기반 보를 길이가 0 인 조인트 스프링으로 연결한 다음, 각각의 스프링에 개별적인 변수를 부여하여 조인트 스프링의 강성이 이들 설계 변수들의 조합으로 표현될 수 있도록 하였다. 최적화된 위상의 조인트 스프링은 조인트 스프링에 할당된 다중 변수들 중 하나만이 최대값으로 수렴하고 나머지들은 최소값이 됨에 따라 미리 설정된 이산화된 강성 값들 중 하나를 취하게 하였다. 제안된 방법의 효용성은 마이크로 힘 변환기 설계 문제에서 검증하였다.

2. 유한한 강성을 지니는 조인트 요소의 도입

기존의 위상 최적화 모델에서는 조인트에서 여러 개의 보 요소가 하나의 절점을 공유하므로 조인트는 자체변형이 없는 강체와 같은 거동을 한다. 본 연구에서는 조인트의 강성을 고려할 수 있도록 Fig. 1 과 같이 조인트에서 보 요소들이 각각 다른 절점을 지니도록 하고 그 절점들을 스프링 요소로 연결하여 구성하였다. 이 조인트 스프링은 3 차원 문제의 경우 3 개의 병진 운동 강성과 3 개의 회전 운동 강성을 지닌다.

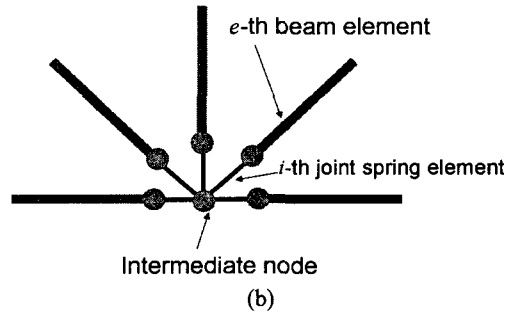
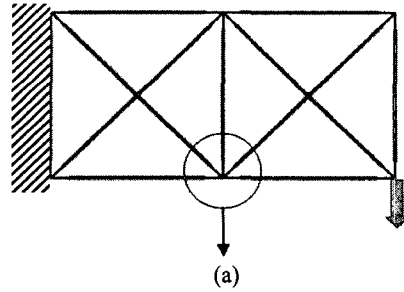


Fig. 2 Proposed joint modeling approach with joint spring elements and intermediate nodes

본 연구에서는 설계 영역의 이산화를 위하여 Fig. 2(a)와 같은 바닥 구조를 사용하는데, 이는 일반적으로 보 요소들끼리 직접 연결되는 바닥 구조와는 달리 Fig. 2(b)와 같이 조인트에 매개 절점을 위치시키고 그 매개절점과 조인트 스프링 요소들을 연결하였다. 요소의 절점과 절점 사이에 스프링 요소를 도입해 위상 최적화를 수행하는 방법은 Yoon and Kim⁽⁶⁾과 장강원 등⁽⁷⁾에 의해 제안된 바 있다.

조인트 스프링의 강성은 매개 변수를 이용하여 정의하게 되는데 제안하는 조인트 변수법을 이용한 최적 설계에서는 이 매개 변수를 설계 변수로 설정한다. 조인트 스프링의 강성 특성은 SIMP 로⁽⁸⁾ 모델링하였다. 즉, 요소 e 의 탄성계수 E_e 는 원 재료의 탄성 계수 E_0 와 밀도 γ_e ($0 < \gamma_e \leq 1$)를 이용해

$$E_e = E_0 (\gamma_e)^n, \quad 2 \leq n \leq 8 \quad (1)$$

와 같이 표현하는데 본 논문에서의 조인트 스프링 강성은 식 (1)과 유사한 방법으로 이차원 문제의 경우 아래 식들과 같이 정의한다.

$$k_i^u = \alpha k_{\text{beam}}^u (\gamma_i)^n, \quad (2a)$$

$$k_i^v = \alpha k_{\text{beam}}^v (\gamma_i)^n, \quad (2b)$$

$$k_i^\theta = \alpha k_{\text{beam}}^\theta (\gamma_i)^n, \quad (2c)$$

$$2 \leq n \leq 8 \quad (j=1,2,3), \quad \alpha \gg 1.$$

위에서 k_i^u , k_i^v 와 k_i^θ 는 스프링 i 가 연결 되어 있는 보 요소의 수평, 수직 그리고 회전 방향의 강성이다. 이 식 (2)에서 α 는 조인트 스프링이 보에 비해 충분히 큰 강성을 지니는 강제 조인트 연결이 가능하도록 하는 역할을 하는데, 본 연구에서는 α 의 값을 1000 으로 설정하였다. 조인트가 연결된 보가 길이 L , 탄성계수 E , 단면적 A , 굽힘관성모멘트 I 의 값을 지닌다면 보의 강성값들은 아래의 식들로 표현된다.

$$k_{\text{beam}}^u = \frac{EA}{L} \quad (3a)$$

$$k_{\text{beam}}^v = \frac{3EI}{L^3} \quad (3b)$$

$$k_{\text{beam}}^\theta = \frac{EI}{L} \quad (3c)$$

3. 조인트 변수법을 이용한 컴플라이언트 메커니즘 설계

최적화된 메커니즘의 위상은 조인트 스프링에 의해 결정된다. 보 요소의 양 끝에 연결된 조인트 스프링 중 어느 하나라도 그 강성값이 매우 작아지게 되면 그 보 요소는 구조물로서의 의미가 사실상 없어지게 되므로 위상을 고려할 때 제외되는 데 본 연구에서는 그 기준을 조인트 스프링의 최대 강성 대비 0.1% 미만으로 설정하였다.

메커니즘은 가해지는 입력 힘에 의해 원하는 출력부위에서 최대의 변위가 일어나야 하므로 목적함수는 다음과 같이 변위의 음의 값이 최소가 되도록 설정한다.

$$\underset{\gamma \in \mathbb{R}^N}{\text{Minimize}} \quad f = -u_{\text{out}} \quad (4)$$

위에서 u_{out} 은 출력 절점에서의 원하는 방향으로

의 변위이며 \mathbb{R}^N 은 N 차원의 실수 영역으로서 N 은 설계 변수의 개수이다. 식 (4)에서 γ 는 식 (2)에서와 같이 조인트들의 강성값을 나타내기 위한 파라미터들의 벡터로서 설계 변수이다.

최적화의 구속 조건으로서는 구조물 전체의 질량에 제한을 두도록 사용하였는데, 본 연구에서는 다음의 형태를 취하였다.

$$g = \sum_{i=1}^{NB} m_i (\gamma_i \cdot \gamma_{i_2})^p - M_0 \leq 0, \quad 0 < p \leq 1 \quad (5)$$

식 (5)에서 γ_i 과 γ_{i_2} 는 보 요소 i 의 양쪽에 달린 조인트 스프링 변수의 밀도변수이며 m_i , M_0 , p , NB 는 각각 보 요소 i 의 질량, 구조물 전체의 제한 질량, 벌칙 계수, 보 요소의 개수를 나타낸다. 조인트 스프링은 보요소간의 연결상태를 구현하기 위해 도입되었기 때문에, 메커니즘 전체 질량에 대한 기여도가 없도록 하였다. 또한 식 (5)에서처럼, i 번째 보요소의 질량을 그 요소 양단에 달리는 스프링 밀도변수들 (γ_i 과 γ_{i_2})의 곱으로 표현함으로써, 두 변수가 동시에 1로 수렴할 때만 그 요소가 존재하도록 하였다. 따라서, γ_i 과 γ_{i_2} 중 어느 하나라도 0이 되면 해당 보요소의 질량은 무시되고 그 요소는 전체 위상에서 존재하지 않은 것으로 평가된다 본 연구에서는 p 를 0.5로 설정하여 보 요소 본래의 질량에 γ_i 과 γ_{i_2} 의 기하 평균을 곱하도록 하였다.

제시된 목적함수, 구속조건과 Fig. 2 와 같이 매개 절점과 조인트 스프링으로 구성된 바닥 구조를 이용하여 마이크로 컴플라이언트 집계를 (compliant gripper) 설계해보도록 한다. Fig. 3 는 조인트로 연결된 보 요소로 이산화된 설계 영역을 보여주고 있는데, 왼쪽 입력 단에 가해진 힘 $F_{in} = 1000 \mu N$ 에 의해 오른쪽 집계 부분의 변위를 최대화하는 것을 최적화의 목적함수로 설정하였다. 설계 영역은 총 58 개의 보 요소와 116 개의 조인트 스프링 (혹은 설계 변수)로 구성되어 있으며 보 요소의 물성치 및 단면 특성은 $E = 210 GPa$, $A = 2.5 \times 10^3 \mu m^2$, $I = 6.25 \times 10^6 \mu m^4$ 이다. 입력 단과 출력 단에는 각각 $k_{in} = 1000 \mu N/\mu m$, $k_{out} = 100 \mu N/\mu m$ 의 강성을 지니는 스프링을 부가하여 구조물이 유연성과 더불어 적절한 강성을 지닐 수 있도록 하

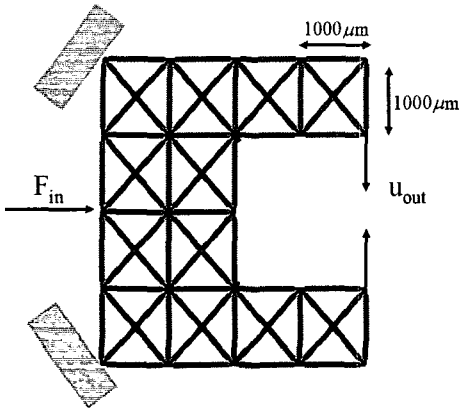


Fig. 3 Discretized design domain for a gripper problem

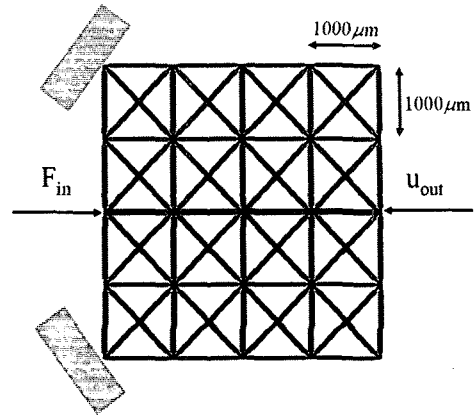


Fig. 5 Discretized Design domain of a force inverter problem

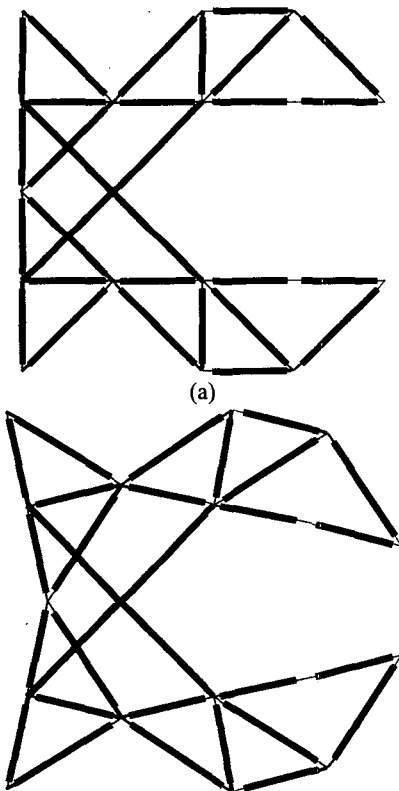


Fig. 4 (a) Optimized topology of a micro gripper and (b) its deformed shape

였으며,⁽⁹⁾ 15% 질량 구속 조건을 사용하였다.

Fig. 4(a)는 최종적으로 얻어진 마이크로 집계의

위상이다. 그림에서 조인트들의 최종 강성 값은 선의 굵기로 표현하였다. Fig. 4(b)의 변형 모습에서 알 수 있듯이 집계의 입력 단에 힘이 가해졌을 때, 입력 단에서 오른쪽으로 변위가 일어나고 집계의 중앙부가 강체에 가까운 강성으로 받침점 역할을 함으로써 오른쪽 끝의 간격이 좁아진다.

Fig. 5는 힘 변환기 설계를 위한 이산화된 설계 영역으로서 72개의 보 요소와 144개의 조인트 스프링들로 구성되어 있고 사용된 보의 물성치 및 단면 특성은 앞의 예제의 경우와 동일하다. 가해진 힘은 $F_{in} = 1000 \mu N$ 으로 왼쪽 중앙에서 오른쪽으로 주어지며 오른쪽 출력 단에서 입력 힘과 반대 방향으로 변위가 최대가 되도록 설계한다. 입력 단과 출력 단에 부가된 스프링의 강성은 각각 $k_{in} = 1000 \mu N/\mu m$, $k_{out} = 1000 \mu N/\mu m$ 으로 설정되었으며, 이때 k_{in} 과 k_{out} 은 각각 입력 단의 힘 또는 출력 단의 변위의 방향과 평행한 방향으로만 강성을 지니는 1 자유도 스프링으로서 마이크로 집계 구조물에 강성을 부여하는 역할을 한다 질량 구속 조건은 10%이다.

Fig. 6은 최종적으로 얻어진 힘 변환기의 위상이다. 그림에서 흐린 선은 변형 후의 힘 변환기의 모양을 나타낸다. 힘이 가해졌을 때 위와 아래쪽 중앙부의 조인트들과 왼쪽과 오른쪽의 중앙부 조인트들에서 주로 굽힘 변형이 일어나고 그 외의 부분은 조인트들이 강체와 비슷한 역할을 한다는 것을 관찰할 수 있다.

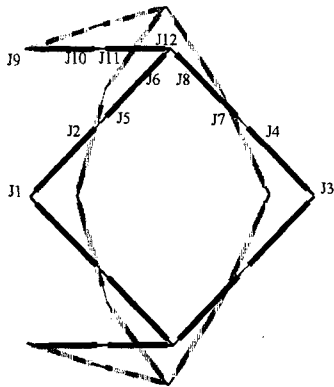


Fig. 6 Optimized topology of a force inverter (gray lines: deformed shape of the gripper)

Table 1 Joint stiffness of the optimized force inverter

Joint index	k^u ($\mu N / \mu m$)	k^v ($\mu N / \mu m$)	k^θ ($\mu N \cdot m / \mu r$)	Ratio to max (%)
1	2.901×10^8	2.720×10^5	1.813×10^5	99.84
2	7.140×10^5	6.642×10^2	4.463×10^2	13.48
3	2.892×10^8	2.711×10^5	1.807×10^5	99.73
4	7.430×10^5	6.966×10^2	4.644×10^2	13.66
5	3.919×10^7	3.647×10^4	2.450×10^4	51.23
6	3.860×10^7	3.619×10^4	2.413×10^4	50.97
7	4.146×10^7	3.887×10^4	2.591×10^4	52.20
8	3.846×10^7	3.606×10^4	2.404×10^4	50.91
9	2.383×10^8	4.468×10^5	1.489×10^5	83.30
10	2.383×10^8	4.468×10^5	1.489×10^5	83.30
11	5.443×10^7	1.021×10^5	3.402×10^4	50.92
12	2.385×10^8	4.473×10^5	1.491×10^5	83.33

Table 1 은 Fig. 6 에 표시된 조인트들의 조인트 변수 값과 실제로 계산되는 강성 값을 표시한 것이다. 표에서 보면 알 수 있듯이, 일부 조인트 변수들은 최대값인 1 에 가깝게 수렴하나, 중간 값을 가지는 설계 변수들도 적지 않다. 이러한 중간 밀도들에 의해서 다양하게 얻어지는 조인트 스프링의 강성 값들로는 최적화된 메커니즘을 실제로 제작하기 어렵다. 앞에서 다룬 마이크로 집게 설계에서도 유사한 현상이 관찰되었다. 하지만, 물리적인 관점에서는 이러한 중간 값이 최적의 메커니즘을 설계하는 데 도움이 되는 값이 될 수 있기 때

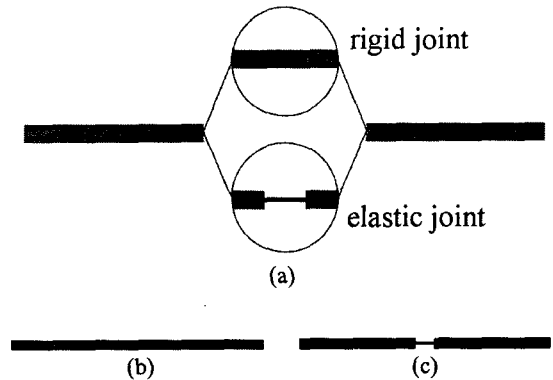


Fig. 7 Joint spring modeling concept by using the proposed multi-variable method (joint length = 0)

문에 최적 설계 단계에서 여러 개의 이산화된 강성 값을 갖는 조인트를 찾는 문제로 정식화할 필요가 있다. 따라서 다음 절에서는 불연속 조인트 강성 값을 갖는 메커니즘 설계 문제 정식화를 제안하고자 한다.

4. 불연속 강성 값을 지니는 조인트로 구성된 메커니즘 설계

4.1 다중 설계 변수의 도입

이 절에서는 조인트 강성 조절법에 의해 최적화된 메커니즘의 조인트 스프링의 강성은 설계 변수의 수렴된 최종 값들이 임의의 값을 가지는 문제점을 개선하는 방안을 제안하고자 한다. 조인트 스프링의 강성이 유한 개의 이산적인 값들 중에서 선택될 수 있도록 하기 위해서 본 연구에서는 하나의 조인트 스프링에 두 개 이상의 변수를 할당하는 다중 설계 변수 할당법을 이용하여 위상 최적화를 정식화 하고자 한다

Fig. 7(a)와 같이 조인트 스프링은 두 종류의 강성 중 하나를 가지도록 문제를 재정의하도록 한다 즉, 조인트 스프링은 Fig. 7(b)의 강한 결합이나 Fig. 7(c)의 유연한 결합 중 하나의 강성값을 지닐 수 있도록 한다.

4.2 다중 설계 변수를 이용한 조인트 스프링 강성의 정의

식 (2)의 γ_i 는 다중 설계 변수를 이용하여 다음과 같이 재정의한다.

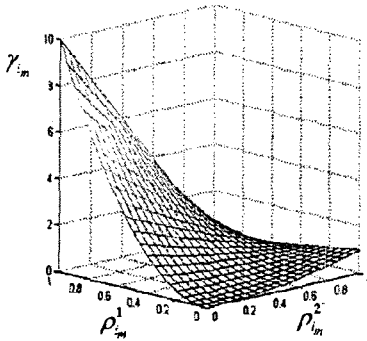


Fig. 8 The value of γ_{im} in accordance with ρ_{im}^1 and ρ_{im}^2

$$\gamma_{im} = \beta_1 (\rho_{im}^1)^p (1 - \rho_{im}^2)^q + \beta_2 (\rho_{im}^2)^p (1 - \rho_{im}^1)^q \quad (6)$$

$$0 < \rho_{im}^1 \leq 1, 0 < \rho_{im}^2 \leq 1$$

이때, ρ_{im}^1 과 ρ_{im}^2 는 i 번째 보 요소에 부착된 조인트 스프링 m 에 할당된 다중 설계 변수인데, 그 값이 ($\rho_{im}^1 = 1$ $\rho_{im}^2 = 0$)이면 강체조인트를, ($\rho_{im}^1 = 0$ $\rho_{im}^2 = 1$)이면 탄성 조인트 상태를 표현하도록 하였다. 또한 이를 위해, 식 (2)에서 β_1 이 β_2 보다 매우 큰 값($\beta_1^n = 1000$, $\beta_2^n = 1$, $\alpha = 1$)으로 선정함으로써 i 번째 요소에 조인트가 생성될 때, 강체 또는 탄성조인트가 선택되도록 하였다. 식 (6)에서 p 와 q 는 벌칙 계수로서 본 연구에서는 p 는 2, q 는 1 을 사용하였다. 이와 같이 하나의 요소에 두 가지 이상의 변수를 도입하는 기법은 Stegmann and Lund⁽¹⁰⁾에 의해서 다양한 방향성을 지닌 재료를 이용하는 복합 셀 구조물의 위상 최적 설계 문제를 해결하는데 이용된다.

식 (6)에서 ρ_{im}^1 과 ρ_{im}^2 의 값에 따른 γ_{im} 의 값은 Fig. 8 과 같이 거동한다. 식 (6)에서 통상 1 보다 큰 벌칙 계수 p 와 q 를 사용하여 최적화 수렴시 연속변수 ρ_{im}^1 , ρ_{im}^2 가 1 또는 최소값(≈ 0)으로 수렴하게 한다.

식 (6)에서 만약 두 변수가 모두 최소값을 갖게 해당 조인트는 강성값을 지니지 않게 되고 또한 조인트가 연결된 보 요소는 전체 위상에서 제외된다. 주목할 것은, ρ_{im}^1 과 ρ_{im}^2 모두 1 로 수렴할

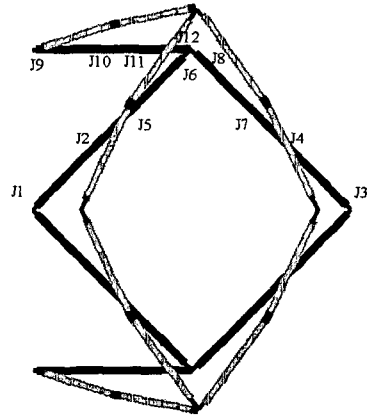


Fig. 9 Optimized micro force converter layout by using the multi-variable method (gray lines: deformed shape of the gripper)

Table 2 Non-vanishing joint stiffness of the optimized force converter

Joint index (type)	k^u ($\mu N / \mu m$)	k^v ($\mu N / \mu m$)	k^θ ($\mu N \cdot m / \mu r$)	Ratio to max (%)
1(J_2)	1.755×10^8	1.646×10^5	1.097×10^5	95.2
2(J_1)	2.204×10^{11}	2.065×10^8	1.377×10^8	98.3
3(J_2)	1.972×10^8	1.849×10^5	1.233×10^5	98.7
4(J_1)	1.320×10^{11}	1.237×10^8	8.249×10^7	92.6
5(J_1)	1.386×10^{11}	1.300×10^8	8.663×10^7	92.5
6(J_2)	2.474×10^8	2.319×10^5	1.546×10^5	99.9
7(J_1)	1.957×10^{11}	1.834×10^8	1.223×10^8	97.0
8(J_2)	2.013×10^8	1.887×10^5	1.258×10^5	97.5
9(J_2)	3.280×10^8	6.150×10^5	2.050×10^5	99.4
10(J_1)	1.863×10^{11}	3.493×10^8	1.164×10^8	92.0
11(J_1)	1.829×10^{11}	3.492×10^8	1.143×10^8	92.0
12(J_2)	3.057×10^8	5.733×10^5	1.911×10^5	98.3

경우에는 $\gamma_{im} = 0$ 이 된다는 것이다. 이 때 그 조인트는 강성을 가지지 않지만, 조인트가 연결된 보의 질량은 아래에 기술될 질량 표현식 의해 전체질량에 더해지게 되므로, 최적화 과정이 이런 상태가 나타나지 않도록 진행된다.

질량 구속 조건은 다음과 같이 정의된다.

$$g = \sum_{i=1}^{NB} m_i \left[\prod_{m=1}^2 (\rho_{im}^1 + \rho_{im}^2) \right]^p - M_0 \leq 0 \quad (7)$$

여기서 ρ_i^r 과 ρ_i^s ($r, s = 1, 2$) 는 i 번째 보 요소의 양 옆에 부착된 조인트 스프링의 다중 설계 변수를 나타낸다. 따라서 $\rho_{i_2}^1$ 과 $\rho_{i_2}^2$ 중 하나가 1로 수렴하는 설계 변수가 있다면 해당하는 보 요소 i 의 질량은 m_i 로 평가된다.

4.3 불연속 조인트 강성을 지니는 컴플라이언트 메커니즘 설계

Fig. 9 는 앞서 설계했던 힘 변환기의 예제를 다중 변수 기반의 위상 최적설계법을 이용하여 다시 설계한 결과이다. Table 2 는 Fig. 9 에 표시된 조인트들의 강성값을 나타내었다. 표의 첫 번째 열에서 J_1 로 표시한 것은 $\rho_{i_m}^1$ 이 최대값을 지니는 경우로 강체 조인트, J_2 는 $\rho_{i_m}^2$ 가 최대값을 지니는 탄성 조인트를 의미한다. 표의 맨 우측 열에서 볼 수 있듯이, 대부분의 설계 변수들이 Table 1 과는 다르게 최대값에 가깝게 수렴하며 중간 값들이 배제된 것을 관찰할 수 있다. 따라서 이 메커니즘은 보 요소와 두 종류의 조인트 스프링만으로도 제작이 가능하며 3 절에서 언급한 임의의 조인트 강성을 지니는 메커니즘들에 비해서 높은 제작 가능성 및 경제적 효율성을 지닌다.

5. 결론

기존의 바닥 구조를 이용한 위상 최적 설계 기법과는 달리 조인트 변수법은 조인트 스프링의 강성을 위상 최적설계의 변수로 설정한다. 이 기법의 장점은 조인트에서 구조물의 변형 거동을 고려할 수 있다는 것으로, 이는 조인트 힌지의 영향이 구조물의 성능을 크게 좌우하는 컴플라이언트 메커니즘의 제작에 효과적이다. 또한, 다중 변수를 이용한 최적설계 기법을 도입하면 조인트 스프링이 임의의 연속적인 강성을 지니지 않고 한정된

개수의 이산적인 강성을 지니므로 최적화된 메커니즘의 제작성을 크게 높일 수 있다. 현재 이 기법으로 설계된 컴플라이언트 메커니즘의 제작을 구상하고 있다.

참고문헌

- (1) Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng.* Vol. 71, pp. 197~224.
- (2) Díaz, A. R. and Kikuchi, N., 1992, "Solutions to Shape and Topology Eigenvalue Optimization Problems using a Homogenization Method," *Int. J. Numer. Meth. Engng.* Vol. 35, pp. 1487~1502.
- (3) Bendsøe, M.P. and Sigmund, O., 2003, *Topology Optimization*, Springer, New York..
- (4) Sigmund, O. and Petersson, J., 1998, "Numerical Instabilities in Topology Optimization: A Survey on Procedures Dealing with Checkerboards, Mesh-independencies and Local Minima," *Structural Optimization*, Vol. 16, pp. 68~75.
- (5) Ben-Tal A. and Bendsøe, M. P. 1993, "A New Method for Optimal Truss Topology Design," *SIAM Journal on optimization*, Vol. 3 No. 2, pp. 322~358.
- (6) Yoon, G. H. and Kim, Y. Y., 2005, "Element Connectivity Parameterization for Topology Optimization of Geometrically Nonlinear Structures," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 7, pp. 1983~2009.
- (7) Jang, G. W., Kim, Y. Y. Choi, K. K., and Kim, M. J., 2005, "Structural Layout Optimization Strategy Considering Assemblage and Discrete Cross-Sectional Dimensions," *Trans Of KSME(S)*,
- (8) Vol Bendsøe M. P. Sigmund O., 1998, "Material Interpolation Schemes in Topology Optimization," *Archive of Applied Mechanics : Ingenieur-Archiv*, Vol. 69 No. 9/10, pp.635~654.
- (9) Sigmund O., 1997, "On the Design of Compliant Mechanisms Using Topology Optimization," *Mechanics of Structures and Machines*, Vol. 25 No. 4, pp. 493~524
- (10) Stegmann J, Lund E., 2005, "Discrete Material Optimization of General Composite Shell Structures," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 62, pp. 2009~2027.