

< 논문 >

조립성을 고려한 위상 최적설계법 개발

장강원[†] · 최국진^{*} · 김명진^{*} · 김윤영^{*}

(2005년 7월 29일 접수, 2006년 3월 6일 심사완료)

Structural Layout Optimization Strategy Considering Assemblage

Gang-Won Jang, Guk Jin Choi, Myungjin Kim and Yoon Young Kim

Key Words : Topology Optimization(위상 최적화), Assemblage(조립), Ground Structure(그라운드 구조체), Joint Effect(조인트 효과)

Abstract

In the ground-structure-based topology optimization, beam elements are regarded to be rigidly connected to each other, and joints are assumed to have infinite stiffness. Thus the optimized topology of a structure is obtained according to the assumption of no joint effect, and the resulting structure should be manufactured in one piece if the joint effect is to be excluded as much as possible. The underlying problems are that 1) the performance of the structure might be seriously decreased if the members of the structure are connected through welding or bolting, not manufactured in one piece, and 2) the topology of the structure will be changed if the joint effect is taken into account. In the paper, the assemblage issue is considered on topology optimization, and a new formulation based on the joint stiffness-varied ground beam structure is developed. Joints of a beam structure are modeled by elastic spring elements whose stiffnesses are controlled by design variables during the optimization.

1. 서론

위상 최적설계 기술은 형상 최적화 기법이나 치수 최적화 기법과는 달리 지금까지 존재하지 않는 새로운 구조물을 창의적으로 설계하기 위한 구조 설계 방법으로서, 제품의 초기 설계단계에서 구조물의 윤곽을 결정하는데 훌륭한 기준을 제공하여 세계적으로 이 분야에 대한 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

그러나 위상 최적화 기법에 의해 설계된 구조물은 제작가능성(manufacturability)의 측면에서는 아직 많은 한계를 나타내고 있다. 구조물의 개념 설계 단계에서 구조물의 윤곽을 결정하는 것도 중요하지만, 제품의 초소형화, 고집적화, 고성능화에 대한 요구가 증가하면서 제작가능성도

설계 단계에서 중요한 고려사항이 되었다. 기존의 위상 최적화 방법을 통해서 이러한 제작가능성을 고려하기에는 체커보드, 국부최소점, 요소망 의존성 등과 같은 수치적 불안정성⁽⁵⁾에 의한 어려움을 논외로 하더라도 많은 문제를 안고 있는데 대표적인 것이 조립성(assemblage)에 대한 고려이다.

기존의 위상 최적화법은 조립에 대한 기준을 제공하지 않는다. 조립 단계는 전체 생산 비용의 50%를 넘을 만큼 비용의 측면에서 큰 비중을 차지하고 제품의 성능과 품질에도 중요한 영향을 미친다. 따라서 구조물의 설계 단계에서 미리 조립 방법을 고려하는 것이 생산 비용을 낮추고 최종 생산물의 성능이나 품질을 향상시키는데 도움을 준다. 그러나 설계 변수가 요소의 단면 치수로 주어지는 기존의 최적화 방법에 의해서는 조인트에서 부재들의 조립성을 판단하기 어려운데 이는 조인트 강성 평가 방법의 문제점으로부터 야기된다. 일반적인 위상 최적화 방법은 조인트에서 변형 에너지가 발생하지 않는다는 이상적인 상황을 가정, 모든 조인트들이

[†] 책임저자, 회원, 군산대학교 기계공학부

E-mail : gangwon@kunsan.ac.kr

TEL : (063)469-4725 FAX : (063)469-4727

^{*} 서울대학교 멀티스케일 설계 연구단

무한강성을 지닌다고 설정하고 조인트 효과를 무시하므로 부재들의 조립성을 판단하기 어렵다. 따라서 기존 방법들에 의해서 최적화된 구조물을 제작하기 위해서는 조인트 효과를 최소화하기 위해서 구조물 전체를 하나의 부재로 제작하는 것이 바람직하다. 그러나 이는 실질적으로 극히 단순한 형태의 구조물을 제외하고는 거의 불가능하다. 또한 조인트에서 부재들이 용접이나 볼트를 이용한 결합을 한다는 것을 고려하여 최적화 문제를 재 공식화 한다면 최적화된 구조물의 위상은 바뀔 가능성이 크다.

본 연구의 목적은 조인트에서 부재들간의 조립성(assembly)을 고려한 위상 설계기법을 개발하는데 있다. 이를 위하여 조인트가 무한강성을 지닌다는 기존 최적화법의 가정에서 탈피하여 조인트를 최적화의 변수로 설정한다 (이를 조인트 변수법이라 일컫도록 한다.) 최적화된 결과에서 조인트들의 강성을 평가하여 구조물의 위상을 얻는 동시에 용접 등의 결합부위를 정함으로써 구조물을 제작함에 있어서 부재들간의 최적의 결합 방법을 찾고자 한다. 즉 제작성의 한계로 구조물을 여러 개의 부재로 제작하여야만 할 때, 주어진 부재의 개수에 맞는 최적의 조립방법에 대한 지침을 본 연구는 제공하고자 한다.

본 연구에서는 조인트 강성을 최적화의 변수로 설정하기 용이한 그라운드 구조체 기반 최적화법을 사용한다.

2. 조인트 변수법

2.1 조인트 요소의 도입

설계영역이 보 요소만으로 구성된 기존의 위상 최적화 모델에서는 인접한 두 개의 보 요소는 하나의 절점을 공유하며 보와 보가 연결된 조인트 부분은 강체와 같은 거동을 한다. 조립을 고려한 설계를 수행하기 위해서는 조인트의 강성 평가를 통해서 그 조인트에 연결된 부재들의 결합성(예를 들어 용접)을 판단할 수 있어야 하는데, 기존의 모델은 조인트가 강체와 같은 작용을 하기 때문에 조인트의 강성을 고려할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 1 과 같이 두 보 요소가 만나는 지점에 요소마다 각기 다른 절점을 갖도록 하고 두 절점을 조인트 스프링 요소를 이용하여 연결하도록 구성하였다. 각 절점은 삼차원 보 요소의 경우 6 개의 자유도를 가지며, 스프링 요소 또한 3 개의 병진 운동에 대한 강성과 3 개의 회전 운동에 대한 강성을 가지도록 하였다. 조인트 부위를 보 요소와 스프링을 이용하여 모델링하는 기법은 차체구조해석 분야에서 다양하게 시도되어 왔다.^(6,7) 그러나 기존

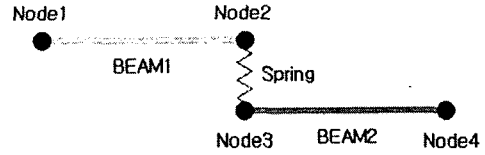


Fig. 1 The joint spring element to consider joint stiffness effect

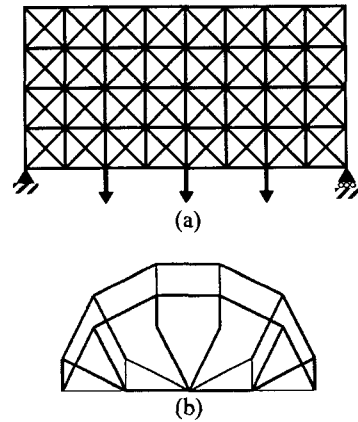


Fig. 2 (a) Example of a ground structure and (b) its optimum topology

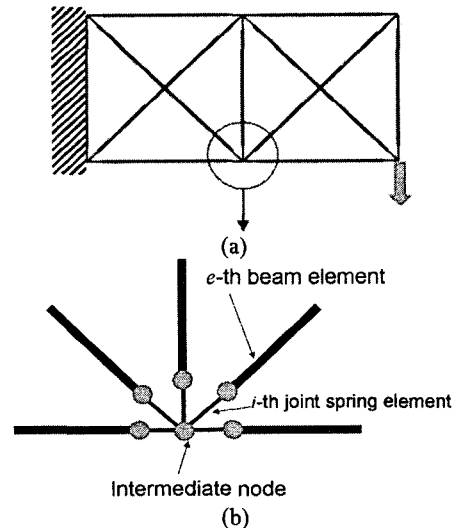


Fig. 3 Proposed joint modeling approach with joint spring elements and intermediate nodes

연구들의 초점이 정확한 조인트 강성 값의 계산을 통한 해석의 효율성 향상에 있는데 비하여 본 연구의 관심은 조인트들간의 상대적인 강성 값을 비교함으로써 구조물의 최적의 조립방법을 제시하는데 있다.

2.2 조인트 요소를 이용한 그라운드 구조체 모델링

보 구조의 위상 최적화를 수행하기 위하여 일반적으로 Fig. 2(a)와 같은 그라운드 구조체를 이용한다. 그라운드 구조체는 고정된 절점들과 절점들 사이를 연결하는 보 요소들로 구성되며, 위상은 요소의 제거 여부에 따라 Fig. 2(b)와 같이 결정된다.

기존의 위상 최적화법에서는 보 요소의 제거 여부를 결정하기 위해 보의 단면 치수를 설계 변수로 정의한다. 그러나 제안된 조립을 고려한 위상 설계기법은 앞서 언급한 조인트 요소를 도입하여 그라운드 구조체를 구성, 조인트 요소의 강성값에 따라서 위상을 결정하며 조립성도 판단하게 된다. Fig. 3 과 같이 그라운드 구조체 내에서 여러 개의 조인트 스프링 요소가 만나는 곳에는 매개 절점을 위치시키고, 보 요소의 절점과 매개 절점 사이를 조인트 스프링 요소를 이용하여 연결하도록 하며 조인트 스프링 요소는 최적화 과정에서 설계 변수로 이용된다.

요소의 절점과 절점 사이에 스프링 요소를 도입하여 위상 최적화를 수행하는 방법은 Yoon and Kim⁽⁹⁾에 의해 밀도법에 의한 연속체 기반 위상 최적화에서 발생하는 수치적인 문제를 해결하기 위해 제안된 바가 있다.

2.3 조인트 강성의 설계 변수로의 정의

보 구조물을 이용한 위상 최적화에서 기존의 설계 기법은 주로 보 요소의 단면의 직경과 같이 치수를 나타내는 값을 설계 변수로 정의하였다. 본 연구에서 제안하는 조립을 고려한 위상 설계법에서는 조인트 스프링의 강성을 매개 변수를 이용하여 정의하는데, 이 매개 변수를 설계 변수로 설정한다.

조인트 스프링의 강성 특성은 밀도법에서 널리 사용되는 SIMP 모델⁽⁹⁾과 같은 방법을 이용하여 정의할 수 있다. 밀도법에서는 요소 e 의 탄성계수 E_e 를 밀도 γ_e ($0 < \gamma_e \leq 1$)와 원 재료의 탄성계수 E_0 를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$E_e = E_0 (\gamma_e)^n, \quad 2 \leq n \leq 8^{(9)} \quad (1)$$

제안된 방법의 조인트 요소의 스프링 강성 특성은 밀도법의 그것과 유사하게 이차원 문제의 경우 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$k_i^u = k_0^u (\gamma_i)^{n_1} \quad (2a)$$

$$k_i^v = k_0^v (\gamma_i)^{n_2} \quad (2b)$$

$$k_i^\theta = k_0^\theta (\gamma_i)^{n_3} \quad (2c)$$

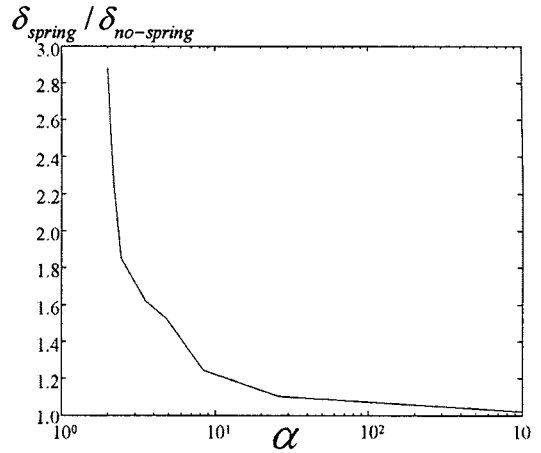


Fig. 4 Central deflection of the structure in Fig. 2 (a) with various values of α

이고

$$0 < \gamma_i \leq 1, \quad 2 \leq n_j \leq 8 \quad (j=1,2,3).$$

식 (2)에서 k_i^u , k_i^v 와 k_i^θ 는 스프링 i 의 u , v , θ 변위 방향의 강성을 각각 의미하는데, 이 방향들은 스프링이 연결되어 있는 보의 축 방향, 굽힘 방향, 굽힘에 의한 단면의 회전 방향을 나타낸다. 예를 들어 Fig. 3(b)의 조인트 스프링 i 의 경우에는 이 스프링이 연결되어 있는 보 e 의 축 방향, 굽힘 방향, 회전 방향이 각각 u , v , θ 변위 방향이다. 식 (2)에서 벌칙 지수 n_1 , n_2 , n_3 는 단면의 특성에 따라서 다르게 정의될 수 있다.

식 (2)에서 k_0^u , k_0^v 와 k_0^θ 는 조인트 스프링이 연결되어 있는 보의 축 방향, 굽힘 방향 및 회전 방향의 강성 값 k_{beam}^u , k_{beam}^v , k_{beam}^θ 에 비해 충분히 큰 값을 지니도록 하며 다음과 같이 설정하도록 한다.

$$k_0^u = \alpha k_{beam}^u \quad (3a)$$

$$k_0^v = \alpha k_{beam}^v \quad (3b)$$

$$k_0^\theta = \alpha k_{beam}^\theta \quad (3c)$$

이고

$$\alpha \gg 1.$$

식 (3)의 α 에 대한 적정 값을 제시하기 위하여 Fig. 2(a)의 구조물을 다양한 α 값에 대하여 해석을 수행한 후에 그 결과를 Fig. 4에 표시하였다 (모든 스프링 요소의 $\gamma_i = 1$ 로 설정).

그림에서 δ_{spring} 은 제안하는 조인트 스프링을 이용한 경우의 구조물 중앙 하단의 처짐을 의미하며 $\delta_{no-spring}$ 은 조인트 스프링을 이용하지 않을 경우, 즉 조인트를 무한대 강성으로 취급할 경우의 처짐을 나타낸다. Fig. 4 에서 $\alpha \geq 100$ 일 경우에 $\delta_{spring}/\delta_{no-spring}$ 은 1 에 근접한 값을 지닌다. 따라서 $\alpha \geq 100$ 의 경우 $\gamma_i = 1$ 의 값을 지니는 조인트가 무한대 강성에 근접하게 평가됨을 알 수 있다. 불필요하게 큰 값으로 α 를 설정할 경우 시스템 강성행렬의 조건수에 좋지 않을 영향을 끼칠 우려가 있으므로 본 논문에서는 모든 예제에 $\alpha = 1000$ 을 사용하였다.

조인트와 연결된 보가 길이 L , 탄성계수 E , 단면적 A , 굽힘 관성모멘트 I 의 값을 지닌다면 간단한 계산으로 아래의 강성 값들을 얻을 수 있다.

$$k_{beam}^u = \frac{EA}{L} \quad (4a)$$

$$k_{beam}^v = \frac{3EI}{L^3} \quad (4b)$$

$$k_{beam}^\theta = \frac{EI}{L} \quad (4c)$$

2.4 최적화 문제 정식화

구조물의 위상은 조인트 스프링의 강성에 따라 결정된다. 하나의 보 요소는 그 양끝에 조인트 스프링 요소와 하나씩 결합하게 되는데 최적화 결과 두 개의 조인트 스프링 중에서 하나라도 작은 강성값을 지닌다면 그 요소는 전체 구조물의 위상을 고려할 때 제외된다. 본 연구에서 설계변수의 최소값은 수치적 불안정을 피하기 위해 0 에 가까운 값인 $\gamma_i^{\min} = 0.03$ 으로 설정한다. 또한 보 요소의 제거 기준으로서 조인트 스프링 강성이 최대값 대비 5% 미만일 경우로 설정하였는데 이는 뒤 예제에서 살필 수 있듯이 위상에서 제외되는 설계변수들은 대부분 0.03~0.05 사이의 값을 가지며 이는 Table 1 에서 위상에 포함되는 설계 변수의 값이 대체로 30%를 상회하는 것을 감안할 때 매우 작은 값으로서 구조물로서 거의 의미가 없는 것으로 간주할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 구조물의 강성을 최대화시키기 위하여 컴플라이언스를 최적화의 목적함수로서 설정하였고, 구속조건으로서 구조물의 질량을 제한하였다. 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize}_{\gamma \in \mathbb{R}^{NJ}} f = \text{mean compliance} \quad (5a)$$

$$\text{subject to } g = \sum_{e=1}^{NB} m_e (\gamma_{e1} \cdot \gamma_{e2})^p - M_0 \leq 0 \quad (5b)$$

여기에서 γ 는 식 (2)에서와 같이 조인트들의 강성값을 나타내기 위한 파라미터들의 벡터로서 설계 변수이다. 또한 m_e 는 보 요소 e 의 질량, M_0 는 구조물의 질량의 상한 값이고, NB 와 NJ 는 각각 그라운드 구조체를 구성하는 보 요소의 개수와 조인트 스프링의 개수이다. 식 (5b)의 γ_{e1} 과 γ_{e2} 는 보 요소 e 의 양단에 붙어 있는 조인트 스프링에 할당된 설계 파라미터들이다. 벌칙 지수인 p 는 $\gamma_{e1} = \gamma_{e2} = 0.5$ 일 경우 해당 보의 질량을 중간 값으로 설정하기 위하여 $p = 0.5$ 를 사용하였다.

보 요소의 양단에 달려 있는 조인트 스프링 중에서 하나만 약하더라도 그 보 요소를 구조물의 위상에서 제외시키므로 식 (5b)의 질량 관계식이 γ_{e1} 과 γ_{e2} 의 곱으로 구성되어 있음을 주목하자.

3. 조인트 변수법에 의한 위상 최적화 결과 및 조립의 고려

제안된 조인트 변수법의 장점은 기존의 방법들과는 달리 보 구조물의 조인트 효과를 고려할 수 있다는 것이다. 조인트 강성을 최적화함으로써 구조물의 위상을 얻고 동시에 부재들 간의 최적의 결합 방법, 즉 조립성을 고려할 수 있다.

3.1 최적화 결과의 기존 방법과의 비교

조인트 변수법에 의한 위상 최적화 결과의 타당성을 검증하기 위하여 그 결과를 기존 방법에 의한 결과와 비교하였다. 검토할 문제는 Fig. 5 와 같이 수직하중을 받는 단순지지 구조물의 설계에 관한 것이다. Fig. 6(a)는 보 요소로만 이루어진 그라운드 구조체를 이용한 위상 최적화 결과이고, Fig. 6(b)는 보와 조인트 스프링 요소로 이루어진 조인트 변수법에 의한 위상 최적화 결과이다. 질량 제한 조건은 두 경우 모두 10%로 설정하였다. Fig. 6 에서 최적화 결과로서 얻은 두 구조물의 위상이 정확히 일치하지는 않는다는 것을 살필 수 있는데 이로써 조인트 효과를 고려할 경우와 그렇지 않을 경우는 최적화된 구조물이 다른 형태를 지닌다는 것을 알 수 있다. 그러나 최적화된 목적함수의 값은 각각 1.6038×10^{-4} 와 1.5920×10^{-4} 로서 그다지 큰

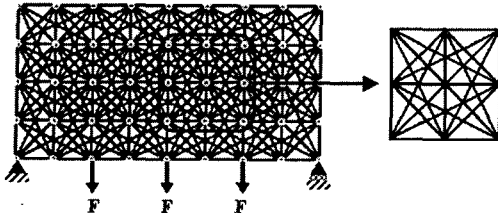


Fig. 5 Simply supported beam structure problem

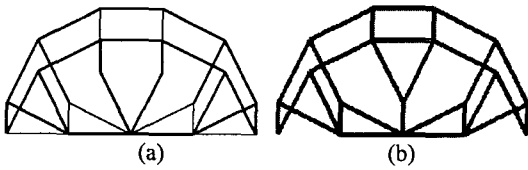


Fig. 6 Optimum topologies by using (a) a previous method without considering joint stiffness and (b) the proposed method ($\alpha = 1000$ in Eqs. (3))

차이를 보이지 않았다. 이는 조인트 변수법에 의한 결과가 기존 방법들에 의한 결과에 비교하여 충분히 타당하다는 것을 의미한다.

3.2 조립성의 고려

부재들 간의 최적의 결합 방법은 최종적으로 구조물의 위상에 포함된 조인트 스프링들의 강성의 크기를 고려함으로써 결정할 수 있다. 즉, 조인트 강성의 크기에 따라 순위를 매긴 다음 조인트 강성이 상대적으로 낮은 곳은 용접 등과 같은 체결 방법을 사용하여 조립하고, 조인트 강성이 높은 곳은 하나의 부재로 제작하는 것이 구조물 전체의 강성을 향상시키는데 바람직하다.

앞의 단순지지 구조물 문제의 경우 최적화된 결과의 조인트 강성값은 Table 1 과 같다. 표의 조인트 번호는 Fig. 7 에 표시한 바와 같고, 표의 맨 오른쪽 칸에는 조인트의 강성 순서대로 SI (significance index)를 부여하여 이를 Fig. 8 에 표시하였다.

조인트들의 SI 를 고려하여 부재들 간의 최적의 결합 방법을 정해진 부재 수에 대하여 표시하면 Fig. 9 과 같다. 부재의 수를 늘려 감에 따라서 SI 값이 낮은 조인트의 순서대로 해당 부재를 따로 제작, 용접 등으로 결합하도록 하였다. Fig. 8 을 살펴보면 구조물의 맨 바깥 프레임은 SI가 1부터 6 까지로 매우 높게 설정되어 있으며, 따라서 이 부분은 하나의 부재로 제작되는 것이 구조물의 강성을 높이는데 유리하다는 것을 알 수 있다.

4. 수치 예제

4.1 자동차 측면 프레임 설계

제안된 조인트 변수법을 이용하여 자동차의

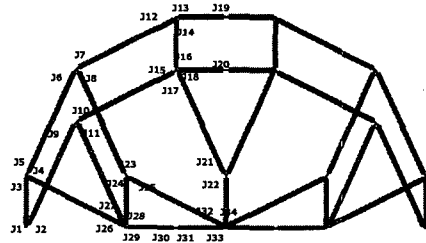


Fig. 7 Optimized topology and joint number

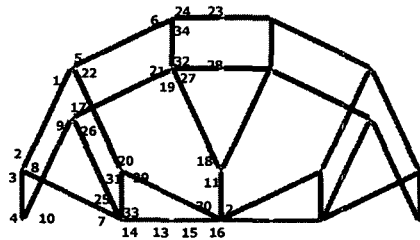


Fig. 8 Joint significance index

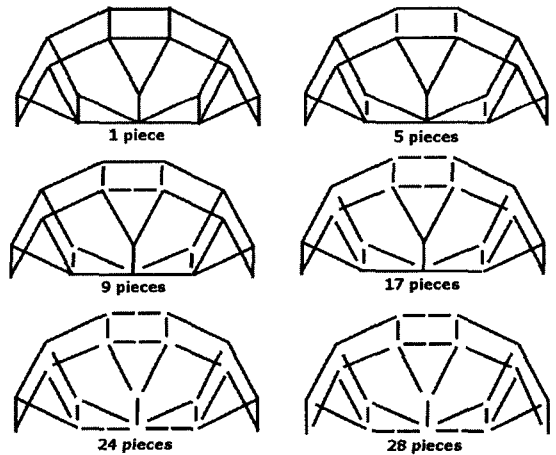


Fig. 9 Optimum assemblage for various prescribed numbers of pieces

측면 프레임을 설계하고 최적의 부재 결합 방법에 대하여 살펴보도록 한다. Fig. 10의 설계 영역에서 B 필라 부분의 25 개의 요소 중 하나만 최종적으로 선택될 수 있게끔 질량 구속 조건을 부여하여 차체의 측면 프레임 강성을 높이는 구조물의 최적 형상을 얻고, 이의 조립성을 고려하고자 한다. 해석에 사용된 요소들의 물성은 $E = 210\text{GPa}$ 이고 단면적 및 굽힘 관성모멘트는 Table 2 와 같다. 식 (2)의 벌칙 계수는 $n_1 = n_2 = n_3 = 3$ 이고, 조인트

Table 1 Optimum joint stiffness and joint significance indices

Joint	Percentage to maximum stiffness	SI (significance index)
J1	50.19%	4
J2	46.52%	10
J3	50.80%	3
J4	47.94%	8
J5	50.92%	2
J6	52.00%	1
J7	49.14%	5
J8	41.97%	22
J9	47.92%	9
J10	42.92%	17
J11	40.57%	26
J12	48.96%	6
J13	40.87%	24
J14	32.48%	34
J15	42.08%	21
J16	34.44%	32
J17	42.28%	19
J18	39.66%	27
J19	41.03%	23
J20	39.57%	28
J21	42.87%	18
J22	46.51%	11
J23	42.08%	20
J24	35.14%	31
J25	36.10%	29
J26	48.66%	7
J27	40.78%	25
J28	32.63%	33
J29	43.89%	14
J30	43.97%	13
J31	43.74%	15
J32	35.76%	30
J33	43.46%	16
J34	46.51%	12

강성을 위한 식 (3)의 파라미터 α 의 값은 1000 으로 부여하였다.

위상 최적화된 결과는 Fig. 11 에 나타내었다. 총 8 개의 조인트가 최종 구조물에 존재하며 이들의 강성 및 SI 는 Table 3 에 표시하였다. Fig. 12 은 조인트들의 SI 값을 고려하여 정한 다양한 부재수에 대한 부재들 간의 최적 결합 방법을 보여준다. Fig.

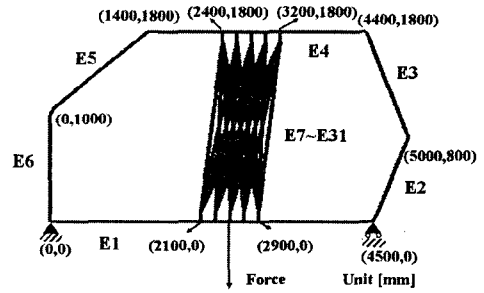


Fig. 10 Design domain of the side frame of a car body

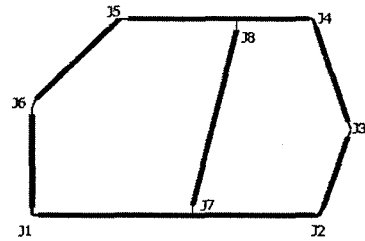


Fig. 11 Optimized topology of the side frame and joint number

Table 2 Cross sectional properties of the beam elements in Fig. 10

Element	Area ($\times 10^{-4} \text{m}^2$)	Bending moment of inertia ($\times 10^{-7} \text{m}^4$)
E1	20.73	8.79
E2	7.84	9.34
E3	12.84	9.97
E4	4.79	5.41
E5	3.86	1.86
E6	10.37	12.78
E7-E31	5.44	1.63

Table 3 Optimum joint stiffness and joint significance indices of the side frame

Joint	Percentage to maximum stiffness	SI (significance index)
J1	62.04 %	2
J2	72.91 %	1
J3	26.24 %	6
J4	52.52 %	3
J5	49.88 %	4
J6	30.97 %	5
J7	16.93 %	8
J8	19.22 %	7

10 과 같은 경계 조건 하에서는 우측 하단의 2 번 조인트에 가장 강한 강성이 요구되며, 이 부분은 하나의 부재로 제작되는 것이 측면 프레임의 강성을 높이는 데에 바람직하다.

4.2 끝 단에 집중하중을 받는 구조물 설계

Fig. 13 의 설계 영역을 지니는 문제에 대하여 조인트 변수법을 적용시키고자 한다. 설계 영역에는 총 244 개의 보 요소와 488 개의 조인트 스프링 요소가 사용되며, 질량 구속 조건은 20%이다. 해석에 사용된 요소들은 $E = 210\text{GPa}$, $A = 0.1963\text{m}^2$, $I = 0.0031\text{m}^4$ 의 특성값을 지니며, 식 (2)의 벌칙 계수는 모두 6, 조인트 강성 파라미터는 $\alpha = 1000$ 을 사용하였다.

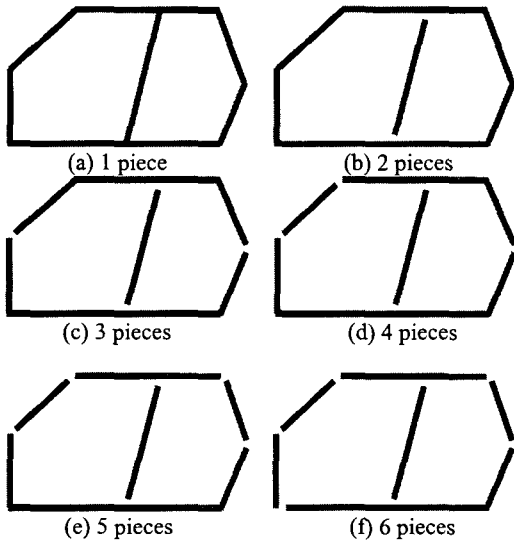


Fig. 12 Optimum assemblage of the side frame for various prescribed numbers of pieces

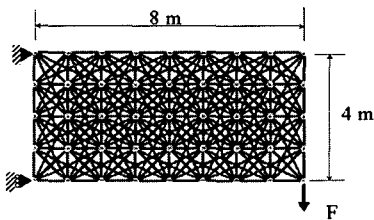


Fig. 13 Design domain for a cantilevered structure

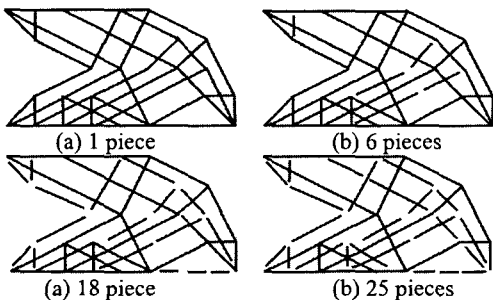


Fig. 14 Optimum topology of the cantilevered structure and its optimum assemblage for various prescribed numbers of pieces

최적화 결과 얻은 조인트들의 SI 값을 고려하여 정한 다양한 부재수에 대한 부재들 간의 최적 결합 방법은 Fig. 14 에 나타내었다.

5. 결론

위상 최적화된 구조물은 비교적 복잡한 형태를 지니게 되며 실제적인 제작은 여러 개 부재들의 조립으로 수행하게 된다. 따라서 조인트에서의 조립성의 평가는 구조물 전체 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이나 보의 단면 치수를 설계변수로 설정하는 기존의 최적화 방법들은 조인트 강성값에 대한 정보를 제공하지 못한다. 이와 같은 제작성 측면에서의 위상 최적화법의 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 조인트 스프링의 강성을 직접 최적화의 변수로 다루는 조인트 변수법을 최초로 정식화하였다. 제안된 방법을 이용하여 조인트 강성을 최적화함으로써 구조물의 위상을 얻는 동시에, 조립을 위한 부재들간의 최적의 결합 방법을 파악할 수 있음을 예제들을 통하여 알아보았다.

후 기

이 논문은 2005 년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2005-003-D00008).

참고문헌

- (1) Bendsoe, 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) Diaz, 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) Kim, Y. Y. and Kim, T. S., 2000, "Topology Optimization of Beam Cross Sections," *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 37, pp. 477~493.
- (4) Chae, J. S. and Min S. J., 2004, "Structural Design of Piezoelectric Microactuator Using Topology Optimization," *Transactions of the KSME A*, Vol. 28(2), pp. 206~213.
- (5) 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.
- (6) Moon, Y. M., Jee, T. H. and Park, Y. P., 1996, "A Study on the Joint Stiffness of Automotive Structural Model," *Transactions of the KSME A*, Vol. 20(5), pp. 1445~1457.

- (7) Yim, H. J., Kang, J. H., Kim, J. H. and Kim, Y. Y., 1995, "On the Estimation of the Box Beam T-Joint Stiffness," *Transactions of the KSAE*, Vol. 3(4), pp. 68~77.
- (8) 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.
- (9) Bendsøe, M. P. and Sigmund, O., 1999, "Material Interpolation Schemes in Topology Optimization," *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 69, pp. 635~654.