<학술논문> **DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.8.779**

하중-변위 관계를 고려한 기하 비선형 구조물의 위상 최적 설계

노진이* · 윤길호† · 김윤영**

(2009 년 5 월 14 일 접수, 2009 년 7 월 22 일 수정, 2009 년 7 월 24 일 심사완료)

Topology Optimization of Geometrically Nonlinear Structure Considering Load-Displacement Trajectory

Jin Yee Noh, Gil Ho Yoon and Yoon Young Kim

Key Words : Topology Optimization(위상최적화), Geometrically Nonlinear(기하 비선형), Internal Element Connectivity Parameterization(I-ECP 내부 요소 연결 매개법)

Abstract

This paper is concerned with a computational approach for topology optimization of geometrically nonlinear structures following specific load-displacement trajectories. In our previous works, attention was paid to stabilize topology optimization involving large displacement and a method called the element connectivity parameterization was developed. Here, we aimed to extend the element connectivity parameterization method to find an optimal geometrically nonlinear structure yielding a specific load-displacement trajectory. In contrast to designing a stiffest structure, the trajectory design problem requires special consideration in topology optimization formulation and solution procedure. Some numerical problems were considered to test the developed element connectivity parameterization based formulation.

1. 서 론

위상 최적화 기법은 유한요소에 정의된 설계변수를 통하여 구속조건을 만족시키고 성능을 최대화 하는 위상을 찾는 방법이다.[1,2] 이 기법은 치수나 형상 최적화기법과는 달리 특별한 초기형상이 없더라도 최적화를 진행할 수 있으며 또한 형상과 위상을 동시에 결정할 수 있는 가능성이 있기 때문에 중요한 설계기법으로 활용되고 있다. 현재에 이르러서는 초소형 기계 전기 시스템에서부터 대형 항공기에 이르기까지 다양한 분야에서 활용되고 있으며 선형 강성문제나 고유치 문제를 다룰 수 있는 상용소프트웨어도 개발된 상태이다. 하지만 아직도 비선형현상이 포함되는 구조문제를 효과적으로 다루는 방법이 잘 확립되어 있지 않은 상황이다.

이런 배경하여 비선형 현상을 보이는 구조물의의 위상 최적 설계를 위해 상당한 연구가 진행된 바 있으나, 아직 해결해야 할 난제가 많이 남아 있는 상황이다. 특히 각 유한요소에 정의되어 있는 밀도를 기반으로 한 전통적인 위상 최적화 기법을 사용하면 열 전달 시스템의 위상설계에서는 물론,비선형 구조 시스템의 위상설계에서도 심각한 수치적인 문제가 발생할 수 있다는 점이 최근 여러 연구를 통하여 밝혀졌다.[3~5] 그 중에서 기하 및 재료 비선형 등을 고려한 구조물의 최적화를 수행할 때 발생하는 유한요소의 불안정성이 가장

[이 논문은 2009 년도 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회 (2009. 5. 14.-15., 한국관광공사 T2 아카데미) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부
E-mail : ghy@knu.ac.kr
TEL : (053)950-6570 FAX : (053)123-1234
* 경북대학교 대학원 기계공학과
** 서울대학교 기계항공공학부

대표적인 문제점이다. 일반적으로 비선형 구조물을 해석하기 위하여 뉴톤-랩손(Newton-Raphson)과 같은 반복기법을 사용하게 된다. 그런데 이런 반복적인 해석 과정 중에서 요소에 대변형이 발생하여 그 요소가 찌그러지면 접선 강성 행렬이 양정성(Positive-defniteness)를 잃게 되어 수렴성과 안정성에 문제가 발생한다.[3~5] 최근에 이런 문제점을 해결하기 위하여 요소의 연결성을 정의하고 최적화하는 방법으로 요소 연결 매개법 이라는 새로운 설계 방법이 제안되었다.[4,6] 이 기법은 유한요소의 밀도를 설계변수로 사용하지 않고 분할된 유한요소들을 길이가 0 인 일차원 탄성 링크(Elastic link)로 연결한다. 그리고 이 링크들의 강성을 기존에 사용하는 최적화 알고리즘을 이용하여 최적화함으로써 최적의 위상을 찾는 것이다. 이 방법에서는 설계영역을 분할하는 2 차원이나 3 차원 요소의 강성이 변하지 않기 때문에 밀도를 설계 변수로 하는 기존의 최적설계에서 발견되었던 불안정 요소가 나타나지 않기 때문에 비선형 구조물의 위상최적설계를 보다 효율적으로 수행할 수 있다.

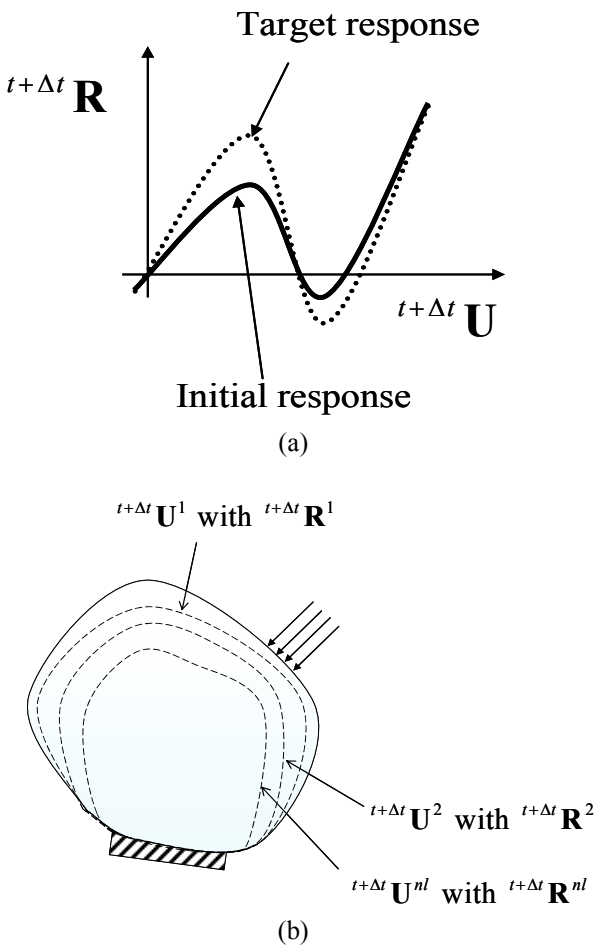


Fig. 1 The objective of the present research

본 연구에서는 요소 연결 매개법을 기하 비선형 문제에 적용하고자 하는데, 특히 설계자에 의하여 미리 설정된 구조물의 하중과 변위관계(Fig. 1 참조)를 만족시키는 최적의 위상을 설계하고자 한다.[4,6] 비선형 문제를 다룬 연구는 보고된 바 있으나 특정 하중-변위 관계를 만족시키는 위상 최적화에 대한 연구는 아직 보고된 바 없다. 이 연구에서는, Fig. 1과 같이 구조물의 초기의 하중-변위 관계와는 다른 새로운 하중-변위 관계를 설정하고 이를 만족시키는 구조물의 위상을 찾는 연구를 수행하고자 한다. 그런데, 이미 여러 연구에서 알려진 것과 같이 하중에 따른 변위 변화를 계산하는 뉴톤-랩손 방법에서는 접선 강성 행렬의 놈(Norm)이 0 인 부분에서 수렴 문제가 발생된다는 것이 잘 알려진 사실이다.[7] 따라서 이 논문에서는 구조물의 해석시 경계에서의 변위를 증가시켜 가면서 그에 따른 반발력(Reaction force)을 응답으로 계산한 하중-변위 관계가 요구된 하중-변위 관계를 만족시키게 하는 최적화 문제를 다루었다. 지금까지 유사 연구가 거의 없다는 점에서, 그리고 이 연구결과가 후속 연구의 방향을 설정하는데 가이드라인을 제시한다는 점에서 이 연구의 의의가 있다고 본다.

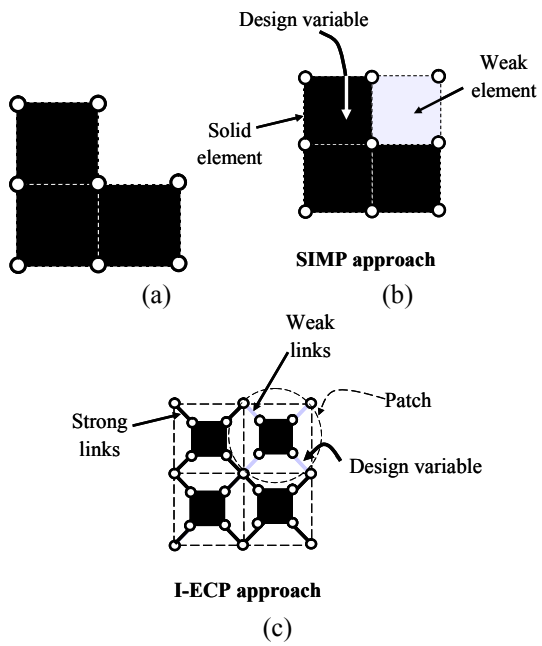


Fig. 2 The modeling comparison: (a) a considered structure, (b) the FE model by the element density method, and (c) the FE model by the internal element connectivity parameterization

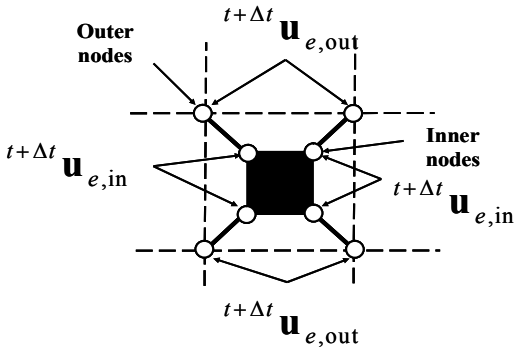


Fig. 3 An *e*-th planar rectangular patch consisting of a plane finite element and four zero-length links

2. 요소 연결 매개법

2.1 요소 연결 매개법을 이용한 비선형 구조물의 해석 절차

요소 연결 매개법과 기존의 방법을 비교하기 위한 예로 Fig. 2(a)에 있는 구조물을 살펴보고자 한다. 기존의 밀도법을 이용할 경우 Fig. 2(b)와 같이 요소에 정의되어 있는 밀도를 설계 변수로 하여 탄성계수를 아주 작은 값과 큰 값 사이에서 보간한다. 그러나 요소 연결 매개법에서는 영역을 분할하는 요소와 요소 사이의 연결성을 길이가 0 인 링크로 연결하고 이 링크들의 강성을 보간하는 방법을 이용하여 위상최적화를 수행한다.[4,6]

이 요소 연결 매개법을 이용하여 비선형 구조물을 해석하고 최적화를 수행하기 위하여 Fig. 2와 Fig. 3에서 예시된 것처럼 솔리드 요소와 링크(Link)로 구성된 패치(Patch)를 정의한다. 이 패치는 설계 영역을 분할하는 요소들을 정의하는 내부 노드(Internal Node)와 패치를 연결하는 외부 노드(Outer Node)로 구성되어 있다. 이 패치기법을 이용하여 접선 강성 행렬을 결정하기 위하여 먼저 패치 내에서의 변위를 다음과 같이 반복 기법을 사용한 뉴톤-랩손 방법을 이용하여 계산한다.[4,6,7]

$$\begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}_{e,\text{out}}^{(k)} \\ {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}_{e,\text{in}}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}_{e,\text{out}}^{(k-1)} \\ {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}_{e,\text{in}}^{(k-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{u}_{e,\text{out}}^{(k)} \\ \Delta\mathbf{u}_{e,\text{in}}^{(k)} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}_{e,\text{out}}^{(0)} \\ {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}_{e,\text{in}}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{t}\mathbf{u}_{e,\text{out}} \\ {}^{t}\mathbf{u}_{e,\text{in}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 k 는 뉴턴 랩손 방법의 반복횟수를 나타내며 점증적 기법에 의한 단계별 비선형 해석은 시간 t 에서 구조변형을 알고 있을 때 시간 증분 Δt 가 지난 시점 $t+\Delta t$ 에서의 해를 구하는 방법이다. 그리고, e 번째 패치의 외부 노드와 내부 노드의 변위는 out 과 in 의 아래 첨자를 사용하여 구분하였다.

링크의 강성은 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{k}_{I,e} = l_e(\gamma_e)\mathbf{I}_{8\times 8} \tag{3}$$

여기서 e 번째 패치의 설계 변수는 γ_e 이고 이 설계변수의 함수인 링크의 강성은 $l_e(\gamma_e)$ 이다. $\mathbf{I}_{8\times 8}$ 은 8×8 단위 행렬을 나타낸다. 그리고, 각 패치에서의 접선 강성 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k}_{I,e} & -\mathbf{k}_{I,e} \\ -\mathbf{k}_{I,e} & \mathbf{k}_{I,e} + {}^{t}\mathbf{k}_{\text{T},e}^{structure,(k-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{u}_{e,\text{out}}^{(k)} \\ \Delta\mathbf{u}_{e,\text{in}}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathfrak{R}_{e,\text{out}}^{(k-1)} \\ \mathfrak{R}_{e,\text{in}}^{(k-1)} \end{bmatrix} \tag{4}$$

식 (4) 에서 평면 고체 요소의 접선 강성 행렬은 ${}^{t}\mathbf{k}_{\text{T},e}^{structure,(k-1)}$ 이다. 여기서 요소 연결 매개법의 하중 벡터는 다음과 같이 외부 노드에 작용하는 외력 하중 ${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}_e$, 내부 요소에서 작용하는 힘인 ${}^{t+\Delta t}_{\;\;0}\mathbf{f}_e^{structure,(k-1)}$ 와 링크에서 작용하는 외력의 합으로 정의하며 다음과 같이 식을 전개할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{R}_{e,\text{out}}^{(k-1)} \\ \mathfrak{R}_{e,\text{in}}^{(k-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}\mathbf{R}_e \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ {}^{t+\Delta t}_{\;\;0}\mathbf{f}_e^{structure,(k-1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}_{\;\;0}\mathbf{f}_{e,\text{out}}^{link,(k-1)} \\ {}^{t+\Delta t}_{\;\;0}\mathbf{f}_{e,\text{in}}^{link,(k-1)} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}_{\;\;0}\mathbf{f}_{e,\text{out}}^{link,(k-1)} \\ {}^{t+\Delta t}_{\;\;0}\mathbf{f}_{e,\text{in}}^{link,(k-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{I,e} & -\mathbf{k}_{I,e} \\ -\mathbf{k}_{I,e} & \mathbf{k}_{I,e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}_{e,\text{out}}^{(k-1)} \\ {}^{t+\Delta t}\mathbf{u}_{e,\text{in}}^{(k-1)} \end{bmatrix} \tag{6}$$

식 (4),(5)와 (6)에서 정의한 각 패치에서의 접선 강성 행렬은 기존의 위상최적화 기법과 비교하여 많은 노드를 사용하기 때문에 직접 전체강성에 합을 구하여 해석을 수행하면 수치해석 시간이 많이 걸린다. 그래서, 내부 노드의 변위가 다른 주위의 패치의 내부 노드와 독립적이라는 사실을 이용하여 다음과 같이 내부 노드의 변위를 소거하는 정축약 기법(Static Condensation Method)을 사용한다. 축약 강성 ${}^{t}\mathbf{k}_{Con,e}^{(k-1)}$ 과 축약 힘 벡터 $\mathfrak{R}_{Con}^{(k-1)}$ 및 증분 변위 $\Delta\mathbf{u}_{e,\text{out}}^{(k)}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} &{}^{t}\mathbf{k}_{Con,e}^{(k-1)} \\ &= (\mathbf{k}_{I,e} - \mathbf{k}_{I,e}(\mathbf{k}_{I,e} + {}^{t+\Delta t}\mathbf{k}_{\text{T},e}^{structure,(k-1)})^{-1}\mathbf{k}_{I,e}) \end{aligned} \tag{7}$$

$$
\begin{aligned}
&{}^{t}\mathbf{k}_{Con,e}^{(k-1)}\Delta\mathbf{u}_{e,\text{out}}^{(k)} \\
&= \mathfrak{R}_{e,\text{out}}^{(k-1)} + \mathbf{k}_{I,e}(\mathbf{k}_{I,e} + {}^{t}\mathbf{k}_{\text{T},e}^{structure,(k-1)})^{-1}\mathfrak{R}_{e,\text{in}}^{(k-1)}
\end{aligned} \tag{8}
$$

$$
\begin{aligned}
&\mathfrak{R}_{Con}^{(k-1)} \\
&= \sum_{e=1}^{N_p}\left[\mathfrak{R}_{e,\text{out}}^{(k-1)} + \mathbf{k}_{I,e}(\mathbf{k}_{I,e} + {}^{t}\mathbf{k}_{\text{T},e}^{structure,(k-1)})^{-1}\mathfrak{R}_{e,\text{in}}^{(k-1)}\right]
\end{aligned} \tag{9}
$$

식 (7)과 식 (8)의 과정을 통하여 외곽 노드의 변위만 활성 자유도로 남게 되고 아래 식과 같이 그것만을 이용하여 전체 강성행렬을 구하게 된다. 이로 인하여 전체 강성의 크기는 기존의 밀도법을 이용한 위상최적화에서 사용하는 전체 강성의 크기와 같이 되어 효율적으로 최적화를 수행할 수 있게 된다.

$$
{}^{t}\mathbf{K}_{Con}^{(k\text{-}1)} = \sum_{e=1}^{N_p} {}^{t}\mathbf{k}_{Con,e}^{(k-1)} \tag{10}
$$

$$
{}^{t}\mathbf{K}_{Con}^{(k-1)}\Delta\mathbf{U}_{\text{out}}^{(k)} = \mathfrak{R}_{Con}^{(k-1)} \tag{11}
$$

2.2 최적화를 위한 링크의 강성 모델링

미분에 기반한 최적화를 위하여 링크 강성을 설계변수의 연속함수로 보간하여 사용한다. 요소 연결 매개법에서 아래의 보간식을 사용하는 것이 일반적이다.[6]

$$
l_e = \alpha\frac{\gamma_e{}^{n}}{1+(1-\gamma_e{}^{n})\tau} + \beta \tag{12}
$$

$$
\alpha = l_{\max} - l_{\min}, \beta = l_{\min} \tag{13}
$$

여기서 n 과 τ 는 벌칙상수이며, $l_{\max}$ 와 $l_{\min}$ 은 링크 강성의 최대값과 최소값이다. 벌칙 상수 n 은 축약 강성행렬과 2 차원 요소의 강성행렬 비율을 전체적으로 변화시키는 역할을 하며 벌칙 상수 τ 는 설계 변수가 1 으로 접근할 때 다항식 $\gamma_e{}^{n}$ 보다 벌칙 효과를 크게 하는 역할을 한다.[6]

3. 기하비선형을 고려한 위상최적화

3.1 위상최적화 정식화

Fig. 1(a)와 같이 하중-변위관계를 만족하는 구조물을 위상최적화로 구하기 위하여 다음과 같은 최적화 문제를 정식화하였다.

$$
\text{Min } \Phi = \Phi({}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{i}, {}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{i})\ (i=1\cdots nl) \tag{14a}
$$

$$
\text{S.t.} \quad \sum_{e=1}^{Np}\rho_e(\gamma_e)\mathrm{v}_e \le V^{*} \tag{14b}
$$

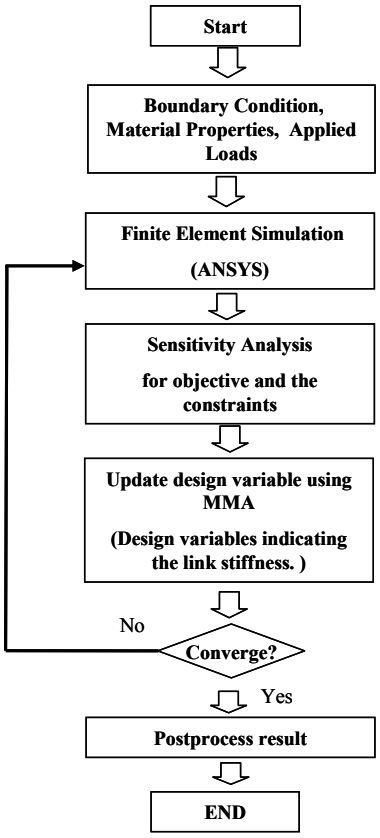


Fig. 4 A developed topology optimization procedure following a given load-displacement trajectory

식 (14b)에서 각 패치 안에 있는 요소의 부피는 v_e 이며 재료의 사용한계 부피한계는 V^{*} 로 표시하였다. 하중-변위 선도에서 고려한 대상점의 개수는 nl 개이다.

$$
\Phi = \sum_{i=1}^{nl}\left\| {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{i} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{i,ref} \right\| \tag{15}
$$

$$
\Phi = \sum_{i=1}^{nl}\left\| {}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{i} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{i,ref} \right\| \tag{16}
$$

위 식 (15)와 (16)에서 ${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{i,ref}$ 와 ${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{i,ref}$ 는 각각 설계자가 정의한 참조변위와 반발력이다. 비선형 구조 방정식을 풀 때에는 일반적으로 Fig. 1(b)에서와 같이 주어진 i 번째 하중(${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{i}$)에 대한 구조물의 응답 (${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{i}$)을 구한 후 최적화 과정을 수행하게 된다. 이때 외력에 대한 변위를 조절하는 방법과 정의된 변위에 대한 반발력을 구하는 기법이 있다.[7] 외력에 대한 변위를 계산하는 방법은 서론에서 언급한 것처럼 접선행렬의 놈(Norm)이 0 이 되는 부근에

서 수렴에 수치적인 어려움이 발생한다. 이런 이유로 넓은 비선형 영역에서 최적화 문제를 정의기 쉽지 않다. 그래서, 비선형 해석을 수행할 때 변위를 경계조건으로 하는 방법을 주로 사용한다.[7] 마찬가지로 위상최적화 문제의 목적함수를 정의하는 방법에 따라서 식 (15)와 같이 외력에 대한 변위를 조절하는 방법과 식 (16)와 같이 정의된 변위에 대한 반발력을 최적화하는 기법을 고려할 수 있다. 외력의 크기를 고정하고 변위를 조절하는 방법은 앞서 언급한 수렴의 문제가 발생하기 때문에 본 연구에서는 변위를 부가하고 그에 따른 반발력을 최적화하는 방법을 사용하였다. 결론적으로 목적함수를 구성하기 위하여 식 (16)을 사용하였다.

위에서 정의된 최적화 문제를 풀기 위하여 Fig. 1의 알고리즘에 기초하여 위상최적화를 수행하였다. 유한 요소 해석은 ANSYS 를 사용하였고 최적화 알고리즘은 MMA 를 사용하였다. 실제로는 ANSYS 비선형 해석을 위해 작성된 배치 파일을 이용하여 최적화를 수행하였다. ANSYS 의 1 차원 요소(COMBIN 14)를 사용하여 패치를 구성하였고 각 입력 변위를 위한 ANSYS 배치 파일을 따로 구성하였다. 보조 변수 매개법(Adjoint Variable Method)를 이용하여 민감도 해석을 수행하였고 실제 계산을 위해 ANSYS 의 Macro 언어를 사용하여 계산코드를 작성하였고 목적함수와 민감도는 외부 파일에 기록하였다.

3.2 위상최적화 예제

위에서 개발된 최적화 방법의 수치적 검증을 위하여 Fig. 5(a)의 양단지지경계조건과 중앙에서 가해지는 집중하중이 있는 최적화 문제를 고려하였다. 실제 최적화 수행시 이론적으로 적절한 변위와 힘에 대하여 응답의 참조값을 주는 것이 용이하지 않았다. 왜냐하면 임의의 참조값에 대해서는 최적화 해가 존재한다는 것을 보장할 수 없기 때문이다. 이런 문제점들을 해결하기 위해서 먼저 Fig. 5(a)와 같이 집중하중을 주고 선형 변위를 가정하여 식 (17)의 강성 최대화 위상최적화 결과를 얻었다.

$$\text{Min } \Phi = \mathbf{F}^{\mathrm{T}}\mathbf{U} \tag{17}$$

$$\text{S.t. } \sum_{e=1}^{Np} \rho_e(\gamma_e)\mathrm{v}_e \le V^*$$

여기서 선형 변위와 외력은 각각 $\mathbf{U}$ 와 $\mathbf{F}$ 이다. 그리고, 이 결과의 하중-변위 관계를 Fig. 5(c)와 같이 계산하였다. 여기서 입력 경계조건인 변위가 $\delta = -0.06$ m 보다 작게 되면 양 옆단의 구조물에 좌굴이 일어나고 이 때문에 비선형 관계가 뚜렷하게 나타나는 것을 관찰 할 수 있었다.

위의 결과로부터 초기에는 선형 결과보다 강성이 작지만 $\delta = -0.12$ m 에서는 선형 결과보다 더 큰 강성을 가지고 좌굴(Buckling)에 강한 결과를 주는 위상을 얻기 위한 위상 최적화 문제를 다음 식 (18)과 같이 정식화하였다.

$$\text{Min } \Phi = \sum_{i=1}^{2} \left\| {}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{i} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{i,ref} \right\| \tag{18a}$$

$$\text{S.t. } \sum_{e=1}^{Np} \rho_e(\gamma_e)\mathrm{v}_e \le V^* \tag{18b}$$

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{1,ref} = -1\times10^{-3}\ \text{N} \quad \text{at} \quad \delta = -0.06\ \text{m} \tag{18c}$$

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{2,ref} = -2\times10^{-3}\ \text{N} \quad \text{at} \quad \delta = -0.12\ \text{m} \tag{18d}$$

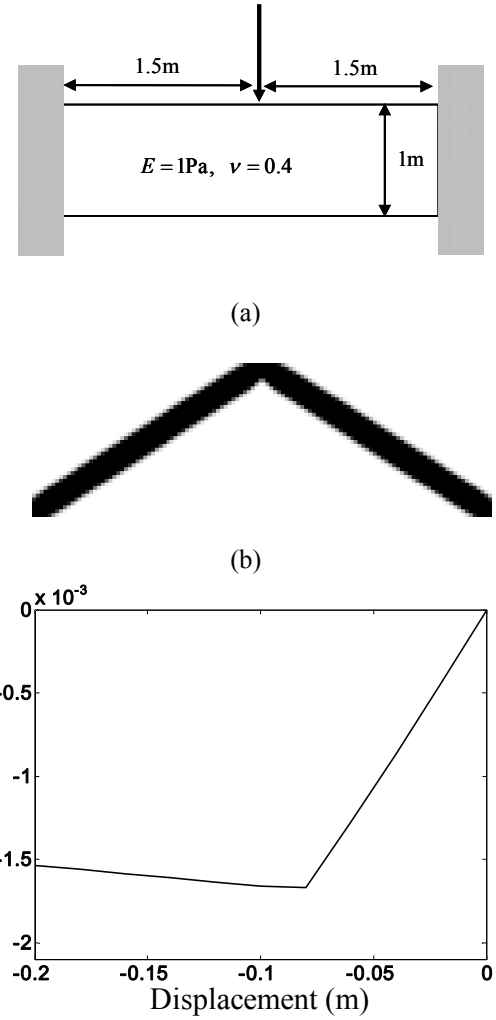
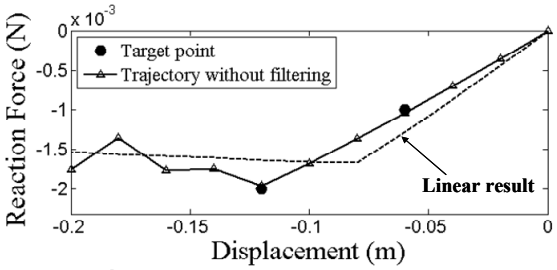
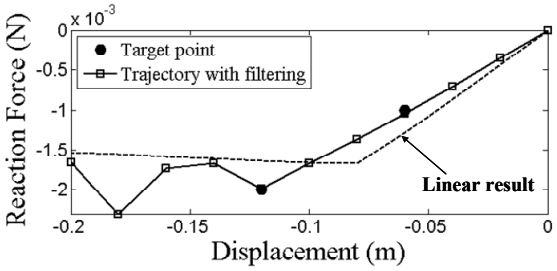


Fig. 5 Compliance minimization of a geometrically nonlinear structure. (a) Problem definition (Mass percent=20%), (b) a linear optimized result, and (c) the load-displacement response considering the geometrical nonlinearity

(a)

(b)





(c)

Fig. 6 Results of optimized structure considering load and displacement trajectory ; (a) *nl*=2 and no filtering, (b) *nl* =2 and filtering, and (c) the load-displacement responses considering the geometrical nonlinearity

Fig. 6은 최적화 결과를 보여주고 있다. Fig. 6(a)과 Fig. 6(b)의 최적화 결과에서 볼 수 있듯이 그림에서 나타난 두 부재에서 발생하는 좌굴을 방지하기 위하여 양쪽에 지지하는 구조물이 생성되어야 하는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 선형 영역에서는 강성이 선형결과보다 약하지만 비선형 영역에서 좌굴을 방지하는 구조물을 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기하 비선형 현상이 발생하는 구조물에서 주어진 변위와 하중의 관계를 만족하는 위상을 얻는 최적화 문제를 다루었다. 또한 밀도법을 이용한 위상최적화에서 약한 강성을 가지는 요소들의 찌그러짐 때문에 발생하는 불안정 문제점을 해결하기 위하여 요소 연결 매개법을 사용하였다. 안정된 수치해석을 위하여 변위를 경계조건으로 하고 이에 대한 반발력을 계산하는 해석기법을 사용하였다. 기존의 대부분의 연구와는 달리 이 연구의 가장 큰 의의는 설계자가 미리 정한 하중-변위곡선 관계를 좇아가는 기하비선형 구조물을 위상설계를 처음으로 시도하였으며 제안된 요소연결 매개법 기반의 설계방법이 효과적인 위상최적화 방법이 될 수 있다는 점을 수치예제를 통해 확인하였다는 것이다. 향후 보다 일반적인 힘-변위 관계를 만족시키는 위상을 얻기 위해서는 힘-하중 관계를 보다 정확히 좇아가면서도 수렴시 물질과 비물질 상태가 명확히 구분되는 위상을 구할 수 있는 보다 강건한 방법에 대한 후속연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

이 연구는 첫 번째 연구자가 2009 년 1 월부터 2 월까지 서울대학교 멀티스케일 창의연구단에서 진행한 연구입니다. 서울대학교 정밀기계설계공동연구소로 체결된 창의적 연구진흥사업(한국과학재단 과제번호 2009-0083278)으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Bendsøe, M.P. and Sigmund, O., 2003, *Topology Optimization Theory, Methods and Application*, Springer, New York.

(2) Bendsøe, M.P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," *Comp. Meth. Appl. Mechs. Engng.*, Vol. 20, pp. 197~224.

(3) Bruns, T.E. and Tortorelli, D.A., 2003, "An Element Removal and Reintroduction Strategy for the Topology Optimization of Structures and Compliant Mechanisms," *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* Vol. 57, pp. 1413~1430.

(4) Yoon, G.H. and Kim, Y.Y., 2005, "Element Connectivity Parameterization for Topology Optimization of Geometrically Nonlinear Structures," *International Journal for Solid and Structures*, Vol. 42, No. 7, pp. 1983~2009.

(5) Cho, S.H. and Min, S.J., 2004, "Design Sensitivity Analysis and Topology Optimization of Displacement-Loaded Nonlinear," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 28, No.2, pp. 206~213.

(6) Yoon, G.H., Kim, Y.Y., Langelaar, M. and Keulen, F.V., 2008, "Theoretical Aspects of the Internal Element Connectivity Parameterization Approach for Topology Optimization," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 76, No. 6, pp. 775~797.

(7) Bathe, K.J., 1996, *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, New Jersey.