

설계 의존형 하중 조건을 갖는 구조물의 아이소-지오메트릭 형상 최적설계

Isogeometric Shape Design Optimization of Structures Subjected to Design-dependent Loads

윤민호*
Yoon, Minho

구본용**
Koo, Bonyong

하승현***
Ha, Seung-hyun

조선희*
Cho, Seonho

요 지

본 논문에서는 아이소-지오메트릭 해석법을 이용하여 설계 의존형 하중조건을 갖는 구조물에 대한 형상 최적설계를 수행하였다. 유한요소법 기반 형상 최적설계는 CAD와 해석 모델의 차이로 인해, 설계영역 매개 변수화에 어려움이 있다. 아이소-지오메트릭 해석법은 CAD 모델과 동일한 NURBS 기저 함수와 조정점을 해석에 이용함으로써 설계의 기하학적 변화를 해석모델에 직접적으로 표현할 수 있는 장점을 가진다. 하중조건이 설계 영역에 따라 변화하는 최적설계 문제의 경우, 정확한 설계 영역 표현은 법선 벡터, 즉 변화하는 하중의 방향, 곡률 등 고차항의 정보를 정확하게 표현할 수 있고, 따라서 목적함수를 최소 또는 최대화시키는 최적의 해로 이끌어 낸다. 유한요소법 또는 밀도법을 이용한 형상 최적설계에서 설계 의존형 하중조건을 갖는 구조물의 문제를 푸는 경우, 최적설계가 진행됨에 있어 변화하는 경계의 부정확성 때문에 정확한 설계민감도를 얻기가 어려운 점이 있다. 본 논문에서는 수치 예제를 통해 아이소-지오메트릭 설계민감도를 활용한 형상 최적설계 기법이 설계 의존형 하중조건을 갖는 구조물 문제에서 유한요소 기반의 최적설계보다 더 나은 결과를 제시함을 확인하였다.

핵심용어 : 형상 최적설계, 아이소-지오메트릭 해석법, 설계민감도 해석, NURBS 기저함수, 설계 의존형 하중

Abstract

In this paper, based on an isogeometric approach, we have developed a shape design optimization method for plane elasticity problems subjected to design-dependent loads. The conventional shape optimization using the finite element method has some difficulties in the parameterization of geometry. In an isogeometric analysis, however, the geometric properties are already embedded in the B-spline basis functions and control points so that it has potential capability to overcome the aforementioned difficulties. The solution space for the response analysis can be represented in terms of the same NURBS basis functions to represent the geometry, which yields a precise analysis model that exactly represents the normal and curvature depending on the applied loads. A continuum-based isogeometric adjoint sensitivity is extensively derived for the plane elasticity problems under the design-dependent loads. Through some numerical examples, the developed isogeometric sensitivity analysis method is verified to show excellent agreement with finite difference sensitivity.

Keywords : Shape design optimization, Isogeometric analysis, Design sensitivity analysis, NURBS basis function, Design-dependent load

1. 서 론

아이소-지오메트릭 해석법은 2003년에 기본적인 개념이 소개된 이래(Cho 등, 2003; Roh 등, 2004; 2005), 2005

† 책임저자, 정회원 · 서울대학교 조선해양공학과/RIMSE 교수
Tel: 02-880-7322 ; Fax: 02-880-9298
E-mail: secho@snu.ac.kr

* 학생회원 · 서울대학교 조선해양공학과 통합과정

** 학생회원 · 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

*** 학생회원 · 서울대학교 조선해양공학과 박사후과정

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

년에 Hughes 등에 의해 수학적으로 정립된 해석법으로 CAD의 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)를 직접 기저함수로 사용한다. 기존의 유한요소법 기반 최적설계에서는 최적화가 진행됨에 따라 유한요소망의 재구성이 필요하며, 이 과정에서 CAD 정보가 유한요소 해석에 정확히 반영되지 못하는 문제점이 있다. 그러나 아이소-지오메트릭 해석법에서는 NURBS를 직접 기저함수로 사용하기 때문에 최적화 진행에 따른 요소망의 재구성이 필요없으며, 기하학적 으로 엄밀하게 형상을 표현할 수 있다.

설계 의존형 하중조건을 갖는 구조물에 대한 최적설계는 연구가 활발하지 않은 상태이다. 위상 최적설계는 Bendsoe (1988) 이래 많은 연구가 진행되었으나, 최적화 진행에 따라 설계영역이 변화하는 문제에 대한 연구는 미미했다. 밀도법을 통해 일정 밀도 이상을 영역으로 근사화하여 압력하중을 최적화 단계마다 수정하는 방법이 연구되기도 하였으나 밀도법은 방법론적으로 요소의존 문제, 체크보드 현상과 같은 수치적 불안정성이라는 단점을 가지고 있기에, 본 논문에서는 NURBS를 사용하여 정확한 경계를 표현함으로써 설계 민감도에서 기하학적 엄밀성을 높여 최적화된 해를 구하였다.

2. NURBS 기저함수

아이소-지오메트릭 해석법에서는 변위(Displacement)와 좌표(Coordinate)를 동일한 NURBS 기저함수로 표현한다. 또한 기저함수가 기하학적 정보를 정확하게 가지고 있으며 매개 변수화 또는 요소 재구성의 과정이 필요가 없기 때문에 기존의 유한요소법에 비해 최적설계 문제에서 많은 장점이 있다.

2.1 노트 벡터 및 기저함수

노트 벡터는 파라메트릭 좌표계에서 1차원 노트 값들의 집합으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+p+1}\} \quad (1)$$

여기서, $\xi_i \in \mathcal{R}$ 은 I 번째 노트, P는 차수, n은 기저함수의 개수를 나타낸다. B-spline 기저함수는 다음과 같이 재귀적으로 구성된다.

$$N_{i,0}(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{if } \xi_i \leq \xi \leq \xi_{i+1} \quad (p=0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

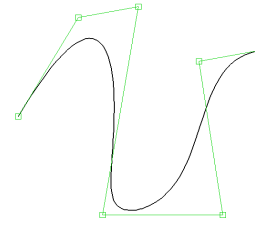


그림 1 B-spline curve

$$N_{i,p}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+p} - \xi_i} N_{i,p-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+p+1} - \xi}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\xi) \quad (3)$$

1차 B-spline 기저함수는 B-spline 유한요소 선형 형상 함수와 같으며, B-spline 기저함수의 중요한 특징은 다음과 같다.

- (1) $\sum_{i=1}^n N_{i,p} = 1$: 단위분할
- (2) $N_{i,p}$ included in $[\xi_i, \xi_{i+p+1}]$: Compact support
- (3) basis function $N_{i,p} \geq 0$ for all ξ : Non-negativity

2.2 B-spline curve

B-spline curve는 B-spline 기저함수들의 선형 조합으로 만들어지는데 이때 기저함수들의 계수들을 조정점(Control point)이라고 한다. n개의 기저함수와 n개의 조정점이 주어 져 있을 때의 B-spline 표현식은 다음과 같이 정의된다. 2, 3 차원 기저함수는 기저함수의 텐서곱으로 쉽게 얻을 수 있다.

$$C(\xi) = \sum_{i=1}^n N_{i,p}(\xi) B_i \quad (4)$$

B-spline curve의 중요한 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) p-1차 미분에 대한 연속성을 가진다.
- (2) 노트나 조정점이 k번 반복되면 연속성이 k만큼 감소 한다.

식 (4)를 통해 B-spline curve는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

3. 설계 민감도 해석

3.1 전미분

그림 2와 같은 영역의 변화는 매개변수 τ 를 이용하여 변환 T로 표현할 수 있다.

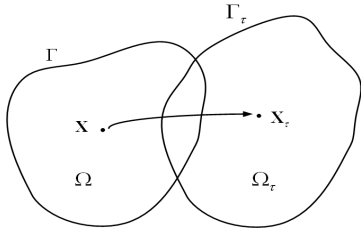


그림 2 영역의 변화

$$\mathbf{x}_\tau \equiv T(\mathbf{x}, \tau) \tag{5}$$

$$\Omega_\tau \equiv T(\Omega, \tau) \tag{6}$$

영역이 변화할 때 질점(Material point)의 변화율인 설계 속도와 이를 이용한 응답의 전미분은 다음과 같이 정의된다.

$$V(\mathbf{x}_\tau, \tau) \equiv \frac{d\mathbf{x}_\tau}{d\tau} = \frac{dT(\mathbf{x}, \tau)}{d\tau} = \frac{\partial T(\mathbf{x}, \tau)}{\partial \tau} \tag{7}$$

$$\dot{\mathbf{z}} \equiv \frac{d}{d\tau}(\mathbf{x} + \tau \mathbf{V}(\mathbf{x}))|_{\tau=0} = \dot{\mathbf{z}}' + \nabla \mathbf{z}^T \mathbf{V} \tag{8}$$

또한 영역 적분형태로 표현된 성능함수의 설계민감도는 전미분을 이용하여 다음과 같이 유도된다.

$$\psi_1 = \int_\Omega f(\mathbf{x}) d\Omega \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \psi_1' &= \frac{d}{d\tau} \int_{\Omega_\tau} f_\tau(\mathbf{x}_\tau) d\Omega|_{\tau=0} \tag{10} \\ &= \int_\Omega [f'(\mathbf{x}) + \nabla f^T \mathbf{V}(\mathbf{x}) + f \text{div } \mathbf{V}(\mathbf{x})] d\Omega \end{aligned}$$

고정 하중이 가해질 때, 경계 적분 형태로 나타나는 성능함수의 설계민감도는 다음과 같다.

$$\psi_2 = \int_\Gamma g(\mathbf{x}) d\Gamma \tag{11}$$

$$\psi_2' = \int_\Gamma [g'(\mathbf{x}) + (\nabla g(\mathbf{x})^T \mathbf{n} + \kappa g(\mathbf{x})) \mathbf{V}^T \mathbf{n}] d\Gamma \tag{12}$$

본 연구에서는 하중 크기를 나타내는 스칼라 값과 하중이 가해지는 경계의 법선 벡터로 표현되는 설계 의존형 하중 $g(\mathbf{x}) = p\mathbf{n}$ 이 가해질 때 경계 적분 형태로 나타나는 성능함수에 대한 전미분이 고려되며, 설계민감도는 다음과 같다.

$$\psi_2 = \int_\Gamma g(\mathbf{x}) d\Gamma \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \psi_2' &= \frac{d}{d\tau} \int_{\Gamma_\tau} p_\tau \mathbf{n}_\tau d\Gamma|_{\tau=0} \tag{14} \\ &= \int_\Gamma [\nabla p^T \mathbf{V} + p \text{div } \mathbf{V} - p \nabla \mathbf{V}^T \mathbf{n}] d\Gamma \end{aligned}$$

3.2 탄성문제의 설계민감도

선형 탄성체에 대한 변분 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a(\mathbf{z}, \bar{\mathbf{z}}) = l(\bar{\mathbf{z}}) \quad \forall \bar{\mathbf{z}} \in \mathcal{Z} \tag{15}$$

$$a(\mathbf{z}, \bar{\mathbf{z}}) = \int_\Omega C_{ijkl} \epsilon_{ij}(\mathbf{z}) \epsilon_{kl}(\bar{\mathbf{z}}) d\Omega = \int_\Omega C_{ijkl} z_{i,j} \bar{z}_{k,l} d\Omega \tag{16}$$

$$l(\bar{\mathbf{z}}) = \int_\Omega F_i \bar{z}_i d\Omega + \int_\Gamma T_i \bar{z}_i d\Gamma \tag{17}$$

여기서, $\mathbf{z}, \bar{\mathbf{z}}, \mathcal{Z}$ 은 각각 변위, 가상변위(Virtual displacement), 가상변위 공간이며, f_i, T_i 는 각각 체적력(Body force intensity), 표면력(Traction)을 의미한다. 압력 $T_i = pn_i$ 으로 표현되며 법선벡터 n 에 의해 설계 의존성이 나타난다. 식 (15)에 대해서 설계변수에 관한 변분을 취하면 각 항은 식 (8), (10), (14)를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a(\mathbf{z}, \dot{\bar{\mathbf{z}}}) = a(\dot{\mathbf{z}}, \bar{\mathbf{z}}) + a(\mathbf{z}, \dot{\bar{\mathbf{z}}}) - \int_\Omega C_{ijkl} z_{i,m} V_{m,j} \bar{z}_{k,l} d\Omega \tag{18}$$

$$\begin{aligned} &- \int_\Omega C_{ijkl} z_{i,j} \bar{z}_{k,m} V_{m,l} d\Omega + \int_\Omega C_{ijkl} z_{i,j} \bar{z}_{k,l} V_{m,m} d\Omega \\ l(\dot{\bar{\mathbf{z}}}) &= l(\dot{\bar{\mathbf{z}}}) - \int_\Omega F_i \bar{z}_{i,m} V_{m,l} d\Omega + \int_\Omega (F_i \bar{z}_i)_{,k} V_k d\Omega \tag{19} \\ &- \int_\Gamma T_i \bar{z}_{i,m} V_{m,l} d\Gamma + \int_\Gamma (p_{,j} V_j n_i + p V_{j,j} n_i - p V_{i,j} n_j) \bar{z}_i d\Gamma \end{aligned}$$

식 (18)과 (19)를 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a(\dot{\mathbf{z}}, \bar{\mathbf{z}}) + a(\mathbf{z}, \dot{\bar{\mathbf{z}}}) + a_V'(\mathbf{z}, \bar{\mathbf{z}}) = l(\dot{\bar{\mathbf{z}}}) + l_V'(\bar{\mathbf{z}}) \tag{20}$$

따라서 $a(\mathbf{z}, \dot{\bar{\mathbf{z}}}) = l(\dot{\bar{\mathbf{z}}})$ 임을 이용하면 설계민감도 식은 다음과 같이 최종적으로 유도된다.

$$\begin{aligned} a(\dot{\mathbf{z}}, \bar{\mathbf{z}}) &= \int_\Omega C_{ijkl} z_{i,m} V_{m,j} \bar{z}_{k,l} d\Omega + \int_\Omega C_{ijkl} z_{i,j} \bar{z}_{k,m} V_{m,l} d\Omega \tag{21} \\ &- \int_\Omega C_{ijkl} z_{i,j} \bar{z}_{k,l} V_{m,m} d\Omega - \int_\Omega F_i \bar{z}_{i,m} V_{m,l} d\Omega \\ &+ \int_\Omega (F_i \bar{z}_i)_{,k} V_k d\Omega - \int_\Gamma T_i \bar{z}_{i,m} V_{m,l} d\Gamma \\ &+ \int_\Gamma (p_{,j} V_j n_i \bar{z}_i + p V_{j,j} n_i \bar{z}_i - p V_{i,j} n_j \bar{z}_i) d\Gamma \end{aligned}$$

경계적분 항을 유한요소로 이산화한 경우에는 법선벡터 n 은 정확히 표현되기 어려우나, 아이소-지오메트릭 기법에서는 엄밀하게 표현되는 강점이 있다.

4. 아이소-지오메트릭 형상 최적설계

4.1 설계민감도의 검증

그림 3의 평면 탄성 구조물은 아래 부분이 고정되어 있으며, 압력하중이 구조물 왼쪽 면에 가해지고 있다.

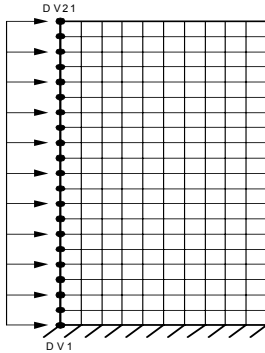


그림 3 압력을 받는 구조물

성능함수는 식 (22)와 같은 구조물의 컴플라이언스이며, 설계변수는 구조물의 왼쪽 면의 x 방향 좌표이다.

$$C = \int_{\Omega} \mathbf{T}^T \mathbf{z} d\Omega \quad (22)$$

직접 미분법을 사용한 해석적 설계민감도를 유한 차분과

표 1 설계민감도의 검증

Design Variable	유한차분	해석적 민감도(A)	일치 %	해석적 민감도(B)	일치 %
1	8.30E+02	7.92E+02	95.42	8.30E+02	99.99
2	7.44E+02	6.96E+02	93.46	7.44E+02	100
3	5.24E+02	4.78E+02	91.24	5.24E+02	99.99
4	3.71E+02	3.34E+02	89.78	3.71E+02	99.99
5	2.96E+02	2.62E+02	88.6	2.96E+02	99.99
6	2.36E+02	2.06E+02	87.34	2.36E+02	99.99
7	1.87E+02	1.60E+02	85.87	1.87E+02	99.99
8	1.45E+02	1.22E+02	84.09	1.45E+02	99.99
9	1.10E+02	9.01E+01	81.95	1.10E+02	99.99
10	8.16E+01	6.47E+01	79.31	8.16E+01	99.99
11	5.91E+01	4.49E+01	76.03	5.91E+01	99.99
12	4.15E+01	2.98E+01	71.86	4.15E+01	99.99
13	2.81E+01	1.87E+01	66.38	2.81E+01	99.99
14	1.82E+01	1.07E+01	58.77	1.82E+01	99.99
15	1.10E+01	5.19E+00	47.23	1.10E+01	99.99
16	5.96E+00	1.59E+00	26.68	5.96E+00	99.99
17	2.61E+00	-6.21E-01	-23.74	2.61E+00	99.98
18	5.52E-01	-1.86E+00	-336.74	5.52E-01	99.91
19	-5.47E-01	-2.55E+00	466.21	-5.48E-01	100.08
20	-6.82E-01	-2.26E+00	331.21	-6.83E-01	100.06
21	-7.67E+02	-3.85E+02	50.17	-7.67E+02	100

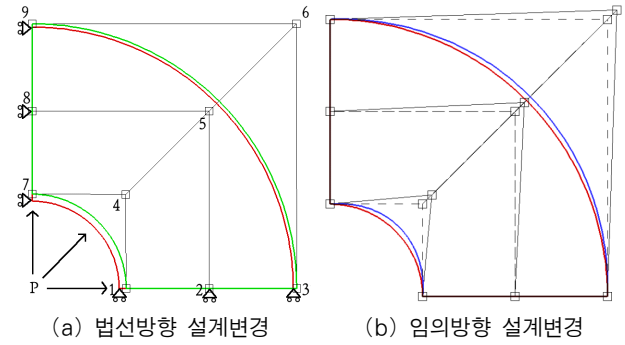


그림 4 내부압력을 받는 파이프 문제

비교하였다. (A)는 하중조건이 고정되었을 때의 설계민감도 식이며, (B)는 하중조건이 설계 의존형일 때의 식이다.

$$(A) C' = \int_{\Omega} \mathbf{T}^T \mathbf{z}' d\Omega,$$

$$(B) C' = \int_{\Omega} (\mathbf{T}^T \mathbf{z}' + (\mathbf{T}'^T \mathbf{z})) d\Omega$$

설계 의존형 하중조건을 가진 문제(A)의 경우, 유한차분법으로 구한 경우와 비교해 볼 때 설계민감도가 잘 맞지 않음을 알 수 있으며, 본 논문에서 구한 설계민감도(B)의 경우, 매우 정확한 결과를 제공함을 확인할 수 있다. 또한 하중이 가해지는 면이 곡선인 경우, 설계 의존형 하중조건을 갖는 문제의 설계민감도를 검증하기 위하여 내부압력을 받는 파이프의 1/4 모델을 고려하였다.

곡선의 법선방향으로 설계변경을 한 경우(a)와 임의의 방향으로 설계변경을 한 경우(b)에 대해서 유한차분 설계민감도와 아이소-지오메트릭 설계민감도를 비교하였다. 표 2에서 (A)는 하중조건이 고정일 때의 설계민감도이며, (B)는 설계 의존형 조건일 때의 결과이다. 설계 의존형 하중조건을 가진 문제의 경우, 유한차분법으로 구한 경우와 비교해 볼 때 하중 조건이 고정인 (A)의 경우는 앞서 예제와 마찬가지로 설계민감도가 잘 맞지 않으나 본 논문에서 구한 (B)의 경우, 설계민감도가 유한차분에서 얻어진 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

표 2 설계민감도의 검증

DOF	유한차분	해석적 민감도 (A)	일치 %	해석적 민감도 (B)	일치 %
1x	2.935839E-05	7.839463E-06	374.50	2.938916E-05	99.90
2x	1.283707E-05	1.721349E-05	74.58	1.284080E-05	99.97
3x	1.140064E-05	8.634386E-06	132.04	1.140411E-05	99.97
4x	1.866651E-05	5.778239E-05	32.31	1.868058E-05	99.93
5x	8.162132E-06	1.681284E-06	485.47	8.181002E-06	99.77
6x	1.409646E-05	1.995839E-05	70.63	1.411474E-05	99.87

4.2. 균일 압력을 받는 구조물의 최적설계

그림 5와 같이 아래 면에 압력하중을 받는 구조물에서 초기 재료량의 50%를 사용하는 제약조건 하에서 구조물의 컴플라이언스를 최소화하는 형상 최적설계를 수행하였다.

$$\text{Minimize } C = \int_{\Omega} f_i z_i d\Omega + \int_{\Gamma} T_i z_i d\Gamma \quad (23)$$

$$\text{Subject to } V = \int_{\Omega} d\Omega \leq V_{allowable} \quad (24)$$

초기 모델의 경우, 자연스러운 형상 변화를 위해 설계변수를 모델의 밀면 y 좌표로 두었으며, 사용 재료의 두께는 10 mm, 영률은 207.4Gpa이고, 포아송 비는 0.3이다.

Du와 Olhoff는 밀도법을 사용한 위상 최적설계를 수행하여, 하중이 고정된 경우 그림 6(a)의 결과를 얻었으며 설계 의존형 하중인 경우에는 그림 6(b)의 결과와 같이 다른 위상을 얻었다. 위상 최적설계에서는 경계를 암시적으로 고려하기 때문에 최적화 도중에 변화하는 암시적 경계를 정확하게 묘사하기가 어렵다. 따라서 법선벡터가 부정확하게 고려되고, 유한요소 기반 해석에서 곡률은 전혀 고려될 수가 없는 단점이 있다.

동일한 문제를 아이소-지오메트릭 기법으로 최적설계를 수행하였을 때의 결과는 그림 7과 같으며, 위상 최적설계와 비교를 하였을 때 최적형상이 더욱 부드럽고 엄밀한 형상을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

아이소-지오메트릭 최적설계는 형상설계에 기반을 두고 있으므로 그림 6(a)와 같은 위상의 변화는 기대할 수는 없다. 그림 7의 (a)와 (b)에서는 하중 방향의 변화를 고려하는 여부에 따라 다른 최적설계를 얻을 수 있음을 보여준다. 또한

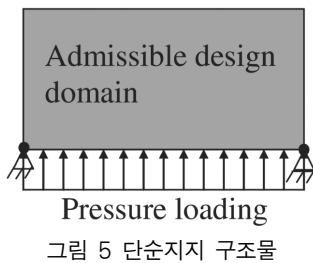
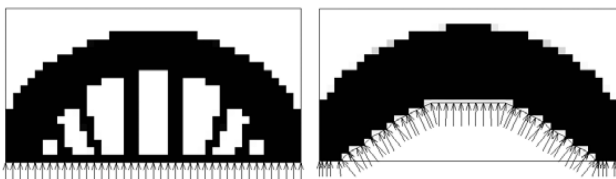
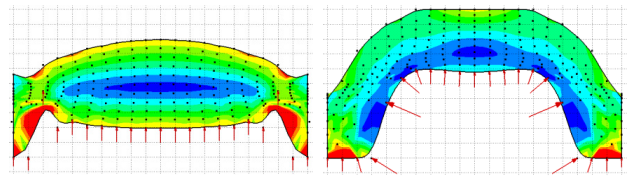


그림 5 단순지지 구조물

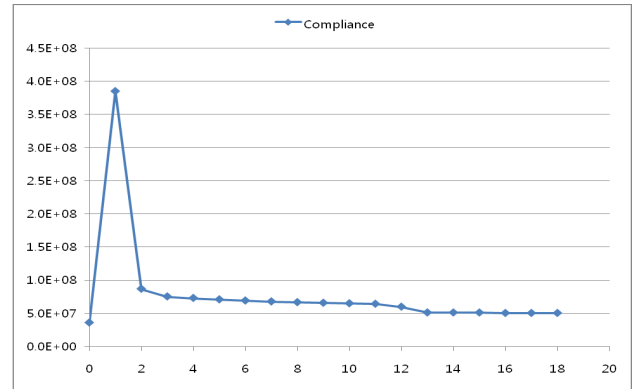


(a) 고정된 하중 (b) 설계 의존형 하중

그림 6 압력을 받는 구조물의 위상 최적설계



(a) 고정된 하중 (b) 설계 의존형 하중



(c) 컴플라이언스의 변화

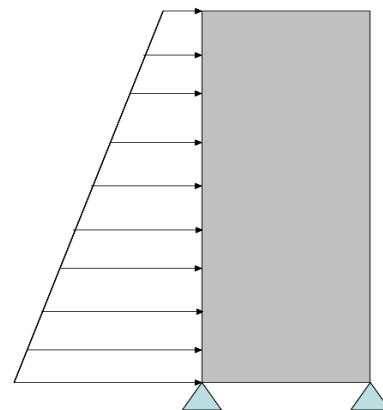
그림 7 아이소-지오메트릭 최적설계

그림 7(c)에서는 목적함수인 컴플라이언스가 매우 안정적으로 최적해에 수렴하고 있음을 보여준다.

4.3. 불 균일 압력을 받는 구조물의 최적설계

그림 8은 불 균일 하중이 가해지는 단순 지지된 평판의 형상 최적설계 문제를 나타낸다. 설계변수는 하중을 받는 면의 조정점으로 하였으며, 구조물의 일정한 체적을 유지하는 조건으로 컴플라이언스를 최소화하는 최적설계를 얻는 문제이다. 재료의 두께는 10mm, 영률은 207.4Gpa이고 포아송 비는 0.3이다.

그림 9를 통해 유한요소 기반 최적화 모델은 부정확한 법선과 곡률로 인하여 최적설계가 매끄럽지 못한 반면에 아이



Non uniform pressure

그림 8 불균일 분포 하중

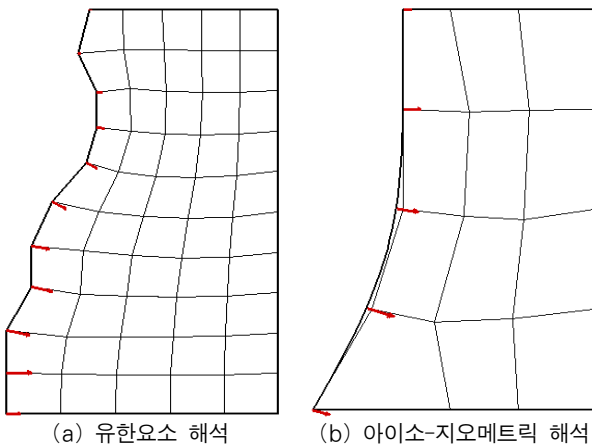


그림 9 해석 종류에 따른 최적설계 비교

표 3 최적설계 전후의 목적함수의 비교

	유한요소 기반 최적설계	아이소-지오메트릭 최적설계
초기 설계	3.64×10^{-6}	3.66×10^{-6}
최적 설계	2.57×10^{-6}	2.34×10^{-6}

소-지오메트릭 최적화 모델은 경계에서 매우 부드러운 형상을 얻었으며, 수압을 받는 댐의 형상과 유사한 결과를 제시함을 알 수 있다.

최적설계 전, 후의 최대 변위를 비교해 볼 때, 아이소-지오메트릭 최적설계는 유한요소 기반 최적설계에 비해 변위가 더욱 감소하였음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 아이소-지오메트릭 해석법을 이용하여 설계 의존형 하중을 갖는 구조물에 대해서 응답 해석, 설계 민감도 해석 및 형상 최적 설계를 수행하였다. 응답 해석 측면에서는 CAD로부터 받은 기하학 정보의 손실없이 해석 수행을 할 수 있으므로 정확한 해를 얻어낼 수 있다는 장점이 있으며, 설계민감도 측면에서는 법선 벡터와 곡률을 정확한 기하학 정보로부터 얻을 수 있으므로 유한요소 기반보다 정확한 설계민감도를 얻을 수 있다. 특히 설계 의존형 하중 조건이 가해진 경우 이를 고려해서 유도된 설계민감도는 더욱 정확한 설계민감도 값을 제공한다. 설계영역의 변화에 따라 하중의 방향이나 크기가 변하는 문제에서 정확한 설계민감도는 결과적으로 최적설계 결과에 큰 영향을 미친다. 최적설계 측면에서는 NURBS 기저함수를 이용하여 자연스러운 설계 속도장(Design velocity field)을 표현할 수 있으므로 기존의 유한요소 기반 최적화 과정보다 편리한 강점을 가진다. 실제 공학문제에서는 고정된 하중조건보다는 압력하중과 같이 변화하는 경계를 따라가는 형태의 하중이 많으므로 아이소-지오메

트릭 기법은 다양한 공학 분야, 예를 들어 수리학, 토목공학 특히 조선분야에서는 유체-구조 연성 문제(Fluid-structure interaction problem)에서 실용적으로 쓰일 수 있다. 아직 CAD 상용코드와의 호환성이 해결되지 않았지만 기하학적 엄밀성이 뛰어난 장점이 있으므로 향후 연구가 활발히 진행 될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2010-0018282).

참 고 문 헌

안승호, 김민근, 조선훈 (2010) 응력 제한조건을 갖는 구조물의 아이소-지오메트릭 형상 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 21(3), pp.275~282.

하승현, 조선훈 (2007) 등기하 해석법을 이용한 설계민감도 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 20(3), pp.339~345.

하승현, 조선훈 (2008) 등기하 해석법을 이용한 형상 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 21(3), pp.233~238.

Bendsoe, M.P., Kikuchi, N. (1988) Generating Optimal Topologies in Structural Design using Homogenization Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71, pp. 197~ 224.

Bendsoe, M.P., Sigmund, O. (1997) *Topology optimization: theory, methods and application*, Springer, Berlin.

Cho, M., Roh, H.Y. (2003) Development of Geometrically Exact New Shell Elements Based on General Curvilinear Coordinates, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 56(1), pp.81~ 115.

Cho, S., Ha, S.H. (2009) Isogeometric Shape Design Optimization: Exact Geometry and Enhanced Sensitivity, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 38(1), pp.53~70.

Du, J., Olhoff, N. (2004) Topological Optimization of Continuum Structures with Design-Dependent Surface Loading-Part I: New Computational Approach for 2D Problems, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 27, pp.151~165.

Haug, E.J., Choi, K.K., Komkov, V. (1986) *Design Sensitivity Analysis of Structural Systems*, Academic Press, New York.

Hughes, T.J.R., Cottrell, J.A., Bazilevs, Y. (2005)

Isogeometric Analysis: CAD, Finite Elements, NURBS, Exact Geometry and Mesh Refinement, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194, pp.4135~4195.

Piegl, L., Tiller, W. (1997) *The NURBS Book* (Monographs in Visual Communication), second ed., Springer-Verlag, New York.

Roh, H.Y., Cho, M. (2004) The Application of Geometrically Exact Shell Elements to B-Spline Surfaces, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193, pp.2261~2299.

Roh, H.Y., Cho, M. (2005) Integration of Geometric Design and Mechanical Analysis using B-Spline Functions on Surface, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 62(14), pp.1927~1949.

- 논문접수일 2010년 4월 23일
- 논문심사일 2010년 4월 28일
- 게재확정일 2010년 10월 28일