아이소-지오메트릭 형상 최적설계의 실험적 검증

최 명 진¹ · 윤 민 호¹ · 조 선 호^{1*}

¹서울대학교 조선해양공학과 아이소-지오메트릭 최적설계 창의연구단

Experimental Validation of Isogeometric Optimal Design

Myung-Jin Choi¹, Min-Ho Yoon¹ and Seonho Cho^{1*}

¹National Creative Research Initiatives(NCRI) Center for Isogeometric Optimal Design, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

Abstract

In this paper, the CAD data for the optimal shape design obtained by isogeometric shape optimization is directly used to fabricate the specimen by using 3D printer for the experimental validation. In a conventional finite element method, the geometric approximation inherent in the mesh leads to the accuracy issue in response analysis and design sensitivity analysis. Furthermore, in the finite element based shape optimization, subsequent communication with CAD description is required in the design optimization process, which results in the loss of optimal design information during the communication. Isogeometric analysis method employs the same NURBS basis functions and control points used in CAD systems, which enables to use exact geometrical properties like normal vector and curvature information in the response analysis and design sensitivity analysis procedure. Also, it vastly simplify the design modification of complex geometries without communicating with the CAD description of geometry during design optimization process. Therefore, the information of optimal design and material volume is exactly reflected to fabricate the specimen for experimental validation. Through the design optimization examples of elasticity problem, it is experimentally shown that the optimal design has higher stiffness than the initial design. Also, the experimental results match very well with the numerical results. Using a non-contact optical 3D deformation measuring system for strain distribution, it is shown that the stress concentration is significantly alleviated in the optimal design compared with the initial design.

Keywords : isogeometric shape optimization, CAD model, experimental validation, 3D printer, non-contact optical 3D deformation measuring system

1. 서 론

밀도법 위상 최적설계(Bendsøe *et al.*, 1988)는 구조물의 강성설계, 고유치, 음향문제 등 여러 공학문제로 연구가 확장되었고 또한 일부는 실험적으로 검증되었다(Sigmund, 1997). 국내에서도 교량설계 문제에서 밀도법 기반 위상 최적설계 결과를 얻은 후, 이를 바탕으로 CAD 모델로 재구성하고 3D 프린터로 시제품을 만들어서 실험장비로 최적설계 전, 후의 구조적인 컴플라이언스를 측정, 비교하여 위상 최적설계의 유효성을 확인한 바 있으며, 또한 수치적 해와 비교하여 최적설계 방법론의 정확성과 유효성을 학술지에 보고하였다(Cha *et*

al., 2013). 그러나 CAD 모델로 변환과정에서 기하학적 엄밀성에 대한 손실이 발생하는 단점이 존재하였다.

아이소-지오메트릭 해석법(Isogeometric Analysis)은 2005년 Hughes 등에 의해 수학적으로 정립되었다. 아이소-지오메트릭 해석은 CAD에서 사용되는 NURBS(Non-Uniform Rational B-splines)를 기저함수로 사용하기 때문에 기하학적으로 엄밀한 형상의 표현이 가능하므로 법선 벡터나 곡률과 같은 고차의 기하학적 정보를 정확하게 계산할 수 있다. 따라서 이러한 값들이 이용되는 형상 설계민감도 해석과 형상 최적설계 분야에 있어서 기존의 유한요소법에 비해 큰 이점을 가지고 있다(Cho *et al.*, 2009). 또한, 최적화 과정에서 형

* Corresponding author:

Tel: +82-2-880-7322; E-mail: secho@snu.ac.kr

Received March 25 2014; Revised May 30 2014

Accepted June 2 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상의 변화에 따른 요소망의 재구성없이 고 정밀도의 최적형상을 얻을 수 있는 장점이 있어서 유한요소 기반 형상 최적설계의 설계변수의 매개화(Parameterization)의 어려움을 극복할 수 있다.

아이소-지오메트릭 최적설계가 이와 같은 강점을 가지고 있음에도 불구하고, 실험적으로 검증한 사례는 거의 없는 실정이다. 이는 물리적인 실험을 위하여 시제작(Prototyping)을 할 때 기하학적 손실이 발생되므로 실험적 검증이 매우 어렵기 때문이다. 그러나 최근 고 정밀 3D 프린터의 보급으로 인하여 실험 모델의 제작이 매우 수월해진 상황이다. 본 논문에서는 3D 프린터를 사용한 아이소-지오메트릭 최적설계 모델의 제작, 실험, 그리고 수치해석 결과와의 부합정도를 확인하며, 이를 통하여 개발된 아이소-지오메트릭 최적설계 방법론의 실험적 근거를 마련하고자 한다.

2. NURBS

2.1 NURBS 곡선

NURBS 기저함수는 B-Spline 기저함수를 이용하여 구성되며 B-spline 기저함수의 노트 집합은 다음과 같다(Piegl *et al.*, 1997).

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

여기서, n 은 조정점의 개수이며, p 는 기저함수의 차수이다. B-spline 기저함수는 다음과 같이 재귀적으로 구성된다.

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

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

이와 같은 B-Spline 기저함수를 사용하여 p 차 NURBS 기저함수는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R_i^p(\xi) = \frac{N_{i,p}(\xi)w_i}{\sum_i N_{i,p}(\xi)w_i} \quad (4)$$

여기서, w_i 는 각각의 i 번째 기저함수에 대응되는 가중치이다. p 차 NURBS 기저 함수 $R_i^p(\xi)$ 와 조정점 B_i 를 사용하여 NURBS 곡선을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C(\xi) = \sum_{i=1}^n R_{i,p}(\xi) B_i \quad (5)$$

2.2 NURBS 곡면

NURBS 곡면은 식 (6)과 같이 표현될 수 있으며, 기저함수는 식 (7)과 같이 텐서 곱에 의해 표현된다.

$$S(\Xi) = \sum_I W_I(\Xi) B_I \quad (6)$$

$$W_I(\Xi) = \frac{N_{i,p}(\xi) \times M_{j,q}(\eta) w_{ij}}{\sum_{i,j} N_{i,p}(\xi) \times M_{j,q}(\eta) w_{ij}} \quad (7)$$

식 (7)에서 기저함수 $N_{i,p}(\xi)$ 와 $M_{j,q}(\eta)$ 의 노트는 각각 $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+p+1}\}$, $H = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{m+p+1}\}$ 이다.

3. 아이소-지오메트릭 형상 설계민감도 해석

3.1 물질 도함수(Material Derivative)

Fig. 1과 같이 초기 영역 Ω 에서 변형된 영역 Ω_τ 로의 설계 변화를 고려하자.

변환식 T 는 매개변수 τ 로 표현될 수 있다고 할 때 $\mathbf{x}_\tau \equiv T(\mathbf{x}, \tau)$ 와 $\Omega_\tau \equiv T(\Omega, \tau)$ 는 매핑(mapping) $T: \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_\tau$, $\mathbf{x} \in \Omega$ 를 구성한다. 여기서 설계 속도장은 다음과 같이 정의된다(Haug *et al.*, 1986).

$$V(\mathbf{x}, \tau) \equiv \frac{d\mathbf{x}_\tau}{d\tau} = \frac{dT(\mathbf{x}, \tau)}{d\tau} = \frac{\partial T(\mathbf{x}, \tau)}{\partial \tau} \quad (8)$$

$\mathbf{z}_\tau(\mathbf{x}_\tau)$ 는 변형된 영역 Ω_τ 에서 다음과 같은 경계치 문제의 부드러운 해로 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} A\mathbf{z}_\tau &= \mathbf{f}, \mathbf{x} \in \Omega_\tau \\ \mathbf{z}_\tau &= 0, \mathbf{x} \in \Gamma_\tau \end{aligned} \quad (9)$$

Fig. 1 Material Derivative

여기서, A 는 경계치 문제에서의 미분연산자이다. 선형 매핑 $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \tau) = \mathbf{x} + \tau \mathbf{V}(\mathbf{x})$ 를 활용하면 $\mathbf{x} \in \Omega$ 에서 해의 물질도함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{z}} \equiv \frac{d}{d\tau} \mathbf{z}_\tau(\mathbf{x} + \tau \mathbf{V}(\mathbf{x}))|_{\tau=0} = \mathbf{z}' + \nabla \mathbf{z}^T \mathbf{V} \quad (10)$$

여기서, $\mathbf{z}'$ 은 설계변수에 관한 $\mathbf{z}$ 의 편미분 항이다. 성능함수로서 영역 범함수(Domain functional) ψ_1 와 경계 범함수(Boundary functional) ψ_2 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_1 = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}) d\Omega \quad (11)$$

$$\psi_2 = \int_{\Gamma} g(\mathbf{x}) d\Gamma \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 형상설계 매개변수 τ 에 대하여 1차 변분을 취하면 다음을 얻는다.

$$\psi'_1 = \int_{\Omega} [f'(\mathbf{x}) + \text{div}\{f(\mathbf{x}) \mathbf{V}(\mathbf{x})\}] d\Omega \quad (13)$$

$$\psi'_2 = \int_{\Gamma} [g'(\mathbf{x}) + \{(\nabla g(\mathbf{x})^T \mathbf{n} + \kappa g(\mathbf{x})) V^T \mathbf{n}\}] d\Gamma \quad (14)$$

여기서, $\kappa = \text{div} \mathbf{n}$ 는 Γ 의 곡률이다.

3.2 아이소-지오메트릭 형상 설계민감도

선형 탄성체의 변분 방정식은 다음과 같이 약형식(Weak form)으로 쓸 수 있다(Lee *et al.*, 2013).

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

$$a(\mathbf{z}, \bar{\mathbf{z}}) = \int_{\Omega} C_{ijkl} \epsilon_{ij}(\mathbf{z}) \epsilon_{kl}(\bar{\mathbf{z}}) d\Omega = \int_{\Omega} C_{ijkl} z_{ij} \bar{z}_{kl} d\Omega \quad (16)$$

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

$\mathbf{z}$ 는 변위, $\bar{\mathbf{z}}$ 는 가상변위(Virtual displacement), $\mathcal{Z}$ 는 변위공간이다. 식 (15)에 대해 전미분($\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{z}' + \nabla \mathbf{z}^T \mathbf{V}$)을 취한 설계민감도 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a(\dot{\mathbf{z}}, \bar{\mathbf{z}}) &= \int_{\Omega} C_{ijkl} z_{i,m} V_{m,j} \bar{z}_{k,l} d\Omega + \int_{\Omega} C_{ijkl} \bar{z}_{i,j} \bar{z}_{k,m} V_{m,l} d\Omega \\ &\quad - \int_{\Omega} C_{ijkl} z_{i,j} \bar{z}_{k,l} V_{m,m} d\Omega - \int_{\Omega} f_i \bar{z}_{i,m} V_{m,m} d\Omega + \int_{\Omega} (f_i \bar{z}_i)_{,k} V_k d\Omega \\ &\quad - \int_{\Gamma} T_i \bar{z}_{i,m} V_{m,m} d\Gamma + \int_{\Gamma} [(T_i \bar{z}_i)_{,k} n_k + H(T_i z_i)] (V_k n_k) d\Gamma \end{aligned} \quad (18)$$

f_i 는 체적력(Body force intensity), T_i 는 표면력(Surface traction), H 는 곡률(Curvature)을 의미한다. 아이소-지오메트릭 설계민감도 해석에서는 경계 적분항의 법선벡터와 곡률을 엄밀하게 표현할 수 있어서 높은 정밀도의 설계민감도 해석결과를 얻을 수 있다.

4. 아이소-지오메트릭 형상 최적설계

아이소-지오메트릭 해석법에서는 절점을 사용하지 않으므로 설계변수의 매개화가 필요하지 않다. 조정점과 기저함수의 선형결합으로 기하학적 형상을 표현하고, 설계변수인 조정점에 의해 형상의 변화를 나타낼 수 있다(Yoon *et al.*, 2013).

Fig. 2(a)와 같이 상대적으로 적은 수의 조정점으로 형상을 표현할 수 있다. 경계를 구성하는 조정점들을 설계변수로 하고 Fig. 2(b)와 같이 조정점의 변화량을 변위 하중으로 생각하여 내부 조정점의 위치를 부드럽게 변화시킨다. 유한요소 기반 최적설계에서는 모든 절점의 설계 속도장을 필요로 하는 반면에 아이소-지오메트릭 최적설계는 다음과 같이 조정점의 변화로만 전체적으로 부드러운 설계 속도장을 얻을 수 있으므로 구현 및 계산비용 측면에서 큰 이점이 있다(Ha *et al.*, 2010).

$$V(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{i,p}(\xi) L_{j,q}(\eta) \delta B_{i,j} \quad (19)$$

Fig. 2 Isogeometric shape optimization

4.1 굽힘 하중을 받는 단순지지 구조물

Fig. 3과 같이 굽힘 하중을 받는 단순지지 구조물에 대해서 형상 최적설계를 수행하였다. 설계변수는 모델의 아랫면과 윗면의 조정점들의 위치로 설정하였으며, 사용 재료의 두께는 15mm이고, 영률과 포아송 비는 1356MPa와 0.3을 각각 이용하였다(Cha *et al.*, 2013). 그리고 실험에서 변위

Fig. 3 Model description

경계조건의 실험오차를 줄이기 위해 변위 경계조건이 가해지는 구조물 아랫면 양쪽의 지지부는 설계변수에서 제외하여 최적설계에서 평평한 형상을 갖도록 하였다. 굽힘 하중은 700N을 가하였다.

실험과정에서 단순지지 경계조건을 정확히 양끝 지점에 가하는 것이 힘들기 때문에 양끝에서 5mm 안쪽 지점에 경계조건을 가하여 형상 최적화를 수행하였다. 목적함수는 컴플라이언스를 최소화하는 것으로 하였으며, 허용 재료량은 초기 재료량과 동일하게 하였다.

$$\text{Minimize } C = \int_{\Omega} f_i z_i d\Omega + \int_{\Gamma} T_i z_i d\Gamma \quad (20)$$

$$\text{Subject to } V = \int_{\Omega} d\Omega < V_{allowable} \quad (21)$$

최적화 알고리즘은 MMFD(Modified Method of Feasible Direction) 방법을 이용하였으며, 총 7회의 반복 계산을 통해 수렴된 결과를 얻었다. 컴플라이언스에 대한 최적화 이력은 Fig. 4와 같으며, 최적해에 매우 안정적으로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 최적화의 결과를 나타낸다. Fig. 5(b)를 보면, Fig. 5(a)의 초기형상에서 응력이 크게 발생하는 영역에 재료가 집중적으로 분포되는 것을 알 수 있다. 그 결과 최적설계에서는 고 응력이 발생하는 영역이 현저히 감소하였으며, 전체적으로 고른 응력분포를 보임을 알 수 있다. 앞서 언급

Fig. 4 Optimization history of compliance

(a) Initial design

(b) Optimal design

Fig. 5 Von-mises stress contour

하였듯이 최적형상의 아랫면 양끝 부분이 평평하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 실험 과정에서 이 부분에 변위 경계조건이 가해지게 된다.

4.2 인장력을 받는 유공판

Fig. 6과 같이 아랫면이 고정된 상태에서 윗면에 분포하중이 가해지는 유공판에 대한 형상 최적설계를 수행하였다. 구멍의 형상을 결정하는 조정점의 위치를 설계변수로 설정하였다.

허용 응력을 100MPa으로 설정하였으며, 재료 사용량을 최소화하는 최적화 문제를 구성하였다.

$$\text{Minimize } m = \int_{\Omega} d\Omega \quad (22)$$

$$\text{Subject to } \frac{\sigma_{VM}(z)}{\sigma_{allow}} - 1 \leq 0 \quad (23)$$

Fig. 6 Model description

Fig. 7 Optimization history of volume

Fig. 8 Von-mises stress contour

최적화 알고리즘은 MMFD(Modified Method of Feasible Direction) 방법을 이용하였으며, 총 14회의 반복 계산을 통해 최적형상을 얻었다. 재료 사용량에 대한 최적화 이력은 Fig. 7과 같다.

Fig. 8은 최적화의 결과를 나타낸다. Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)에 비해서 구멍 주변에서 응력 집중이 많이 완화된 것을 알 수 있다. 또한 윗면에서는 분포하중이 가해지고, 아랫면에서는 고정단으로 지지되어 수평방향의 변위가 발생되지 못하므로 구멍의 좌우 방향의 대칭성은 유지되나 상하 방향의 대칭성은 상실된 것을 알 수 있다.

5. 실험적 검증

5.1 시편의 제작과정

Fig. 9에서는 실험 시편의 제작과정을 나타낸다.

- 1) CAD를 활용하여 초기 CAD 설계를 수행한다.
- 2) 초기설계 CAD 모델을 직접 활용한 아이소-지오메트릭 형상 최적화를 수행한다.
- 3) 아이소-지오메트릭 최적설계를 통해 최적형상의 엄밀한 CAD 정보를 얻는다.
- 4) CAD 정보를 3D 프린터로 보내 시편을 제작한다.

3D 프린터로의 입력 정보는 삼각 요소망의 각 절점 좌표 및 절점 간의 연결 관계이다. Fig. 10(a)와 같이 최적형상

Fig. 9 Manufacturing process

(a) Parametric domain

(b) Physical domain

(c) Triangular mesh

Fig. 10 Generating triangular mesh from CAD model

의 매개변수 영역을 균등한 간격으로 나누면, Fig. 10(b)의 물리적 공간에서 이에 대응되는 격자점들을 얻을 수 있다. 이러한 격자점들을 이어서 Fig. 10(c)와 같은 삼각 요소망을 생성할 수 있다. 이때 생성된 삼각 요소망은 해석을 위한 조정점과는 무관하며 3D 프린터의 입력 정보로만 활용된다.

최적설계 시편의 제작에 사용된 3D 프린터의 사양은 298×185×203mm의 제작공간에 328×328×606DPI의 해상도를 갖고, 25~59μm의 형상 정확도를 갖는다. Fig. 11은 3D 프린터를 이용한 시편 제작과정을 보여준다. 3D 프린터에서 삼각 요소망 정보를 입력받아 만들어진 시편에는 지지(Support) 물질이 남아있으므로, 가열 장치(Oven)를 이용

Fig. 11 3D printing procedure

하여 약 60℃의 온도에서 지지 물질을 녹여내게 된다.

보다 정확한 실험을 위하여 구조물 제작에 사용되는 프린팅 재료의 물성치를 문헌상의 값을 이용하지 않고 시편을 실제로 프린팅하여 선형 범위 내에서 인장실험을 통해 영률을 측정하였다. 다섯 번의 실험결과, 그 평균값으로 프린팅 재료의 영률이 1,356MPa임을 확인하였다.

5.2 단순지지 구조물의 굽힘 실험

단순지지 구조물에 대하여 UTM(Universal Testing Machine)을 활용한 굽힘 실험의 결과는 Table 1과 같다. 총 20회의 실험을 수행하였으며, 상한 3개와 하한 3개를 제외한 결과들의 평균값으로서 실험값을 결정하였다.

일반적으로 구조물의 시제작을 의뢰하였을 때는 가공오차, 재료물성치의 변동성, 가공경화 등 물성치의 변화, 하중 및 경계조건의 엄밀한 구현의 난점으로 인하여 실험과 해석에서 90%이상의 높은 일치율을 얻기는 매우 어렵다. 그러나 본 논문에서는 초기설계와 최적설계 각각에서 수치해석과 실험 결과는 90%이상의 높은 일치율을 보이고 있으므로 실험으로 신뢰할 만한 결과를 얻었음을 알 수 있다. 또한, 동일한 부피를 사용한 초기설계에 비하여 최적설계 결과의 컴플라이언스 값이 더 작기 때문에 본 논문에서 수행한 아이소-지오메트릭 형상 최적설계가 유효함을 알 수 있다.

Table 1 Compliance comparison

	Numerical (a)	Experiment (b)	Agreement (a/b,%)
Initial Design	9.6156E+00	1.0501E+01	91.57
Optimal Design	6.8114E+00	7.4795E+00	91.07

5.3 유공판의 인장 실험

유공판의 인장 실험에서는 엄밀한 경계조건을 부여하기 위

(a) CAD model

(b) Manufactured model

Fig. 12 Additional parts for boundary conditions

Fig. 13 3D non-contact displacement measurement

하여 Fig. 12(a)와 같이 CAD에서 경계조건이 가해지는 영역을 추가로 모델링하여 Fig. 12(b)와 같이 제작하였다.

Fig. 13은 본 연구에서 사용된 비접촉식 3차원 변형 측정 장비이다. 본 장비는 2,448×2,050pixel의 고해상도 CCD 카메라 두 개를 장착하고 있으며, Frame rate은 최대 29Hz이다.

최적화 전, 후의 응력분포를 실험 장비를 활용하여 도시하였을 때, Fig. 14(a)의 초기설계에 비하여 Fig. 12(b)의 최적설계에서 구멍 주변에서의 응력 집중현상이 많이 완화되었음을 알 수 있다. 이는 응력제한 조건을 직접적으로 만족시키는 최적화 알고리즘 외에도 구조물의 전역 목적함수인 컴

Fig. 14 Experimental results

플라이언스를 최소화하는 방향으로 최적화가 진행되어 전반적으로 균일한 응력분포를 보임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 아이소-지오메트릭 형상 최적설계 기법을 이용하여 형상 최적설계를 수행하고, 최적형상에 대한 실험적 검증을 수행하였다. 유한요소 기법과 달리 아이소-지오메트릭 형상 최적설계 기법은 최적설계 형상을 CAD 모델로의 변환하는 과정이 필요없으므로, 최적설계를 통해 얻은 최적형상 및 재료량 정보를 구조물의 제작에도 엄밀하게 반영할 수 있다. 본 연구에서는 곱힘 하중을 받는 단순지지 구조물에 대한 최적설계 및 실험적 검증을 통해 최적형상이 초기형상에 비해 더 큰 강성을 가지며 실험결과와 수치 해석결과가 매우 잘 일치함을 보였다. 또한 인장력을 받는 유공판에 대한 형상 최적설계를 수행하였으며, 비접촉식 3차원 변형 측정 장치를 이용하여 초기설계에 비해 최적설계에서 구멍 주변에서의 응력 집중 현상이 완화됨을 확인하였다. 따라서 수치적인 방법을 활용한 최적설계가 실제 구조물에 대한 실험에서도 유효함을 입증하였다고 할 수 있다. 또한, 아이소-지오메트릭 최적설계 방법론이 기존의 유한요소법에 비해서 최적설계 결과를 제작하여 활용하는데 있어서도 훨씬 효율적이고 엄밀한 방법임을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2010-001828 2). 저자들은 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

Reference

- Bendsøe, M.P., Kikuchi, N. (1988) Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 71, pp.197~224.
- Cha, S.H., Lee, S.W., Cho, S. (2013) Experimental Validation of Topology Design Optimization, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26(4), pp.241~246.
- Cho, S., Ha, S.H. (2009) Isogeometric Shape Design Optimization: Exact Geometry and Enhanced Sensitivity, *Struct. & Multidisc. Optim.*, 38(1), pp.53~70.
- Ha, S.H., Choi, K.K., Cho, S. (2010) Numerical Method for Shape Optimization using T-Spline based Isogeometric Method, *Struct. & Multidisc. Optim.*, 42(3), pp.417~428.
- 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, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 194, pp.4135~4195.
- Lee, S.W., Cho, S. (2013) Isogeometric Shape Design Sensitivity Analysis of Mindlin Plate, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26(4), pp.255~262.
- Piegl, L., Tiller, W. (1997) *The NURBS Book* (Monographs in Visual Communication), 2nd ed., Springer, New York.
- Sigmund, O. (1997) On the Design of Compliant Mechanisms using Topology Optimization, *Mech. Struct. & Mach.*, 25(4), pp.493~524.
- Yoon, M., Ha, S.H., Cho, S. (2013) Isogeometric Shape Design Optimization of Heat Conduction Problems, *Int. J. Heat & Mass Transfer*, 62, pp.272~285.

요 지

본 논문에서는 아이소-지오메트릭 형상 최적설계 기법에서 얻은 CAD 정보를 직접 활용하여, 3D 프린터를 활용한 실험적 검증을 위한 시편을 제작하였다. 유한요소법에서는 요소망에 내재하는 기하학적인 근사가 응답과 설계민감도 해석에서 정밀도 문제를 발생시킨다. 더욱이 유한요소 기반 형상 최적화 과정에서는 CAD와의 정보교환이 필수적이거나 그 과정에서 최적설계 정보의 손실이 발생할 수 있다. 아이소-지오메트릭 기법은 CAD에서 사용된 동일한 NURBS 기저함수와 조정점을 사용하여 범선벡터와 곡률과 같은 엄밀한 기하학적 정보를 응답해석과 설계민감도 해석에 사용할 수 있다. 또한 최적설계 과정에서 CAD와 정보교환 없이 복잡한 형상을 손쉽게 변경할 수 있다. 그러므로 최적의 설계의 재료량을 실험적 검증을 위한 시편제작에 엄밀하게 반영할 수 있다. 굽힘 하중을 받는 단순지지 구조물에 대한 최적설계 및 실험적 검증을 통해 최적형상이 초기 형상에 비해 더 큰 강성을 가지며 실험결과와 수치 해석결과가 매우 잘 일치함을 보였다. 또한 인장력을 받는 유공판에 대한 형상 최적설계를 수행하였으며, 비접촉식 3차원 변형 측정 장치를 이용하여 초기설계에 비해 최적설계에서 구멍 주변에서의 응력집중 현상이 완화됨을 확인하였다. 따라서 수치적인 방법을 활용한 최적설계가 실제 구조물에 대한 실험에서도 유효함을 입증하였다고 할 수 있다. 또한, 아이소-지오메트릭 최적설계 방법론이 기존의 유한요소법에 비해서 최적설계 결과를 제작하여 활용하는데 있어서도 훨씬 효율적이고 엄밀한 방법임을 보였다.

핵심용어 : 아이소-지오메트릭 형상 최적설계, CAD 모델, 실험적 검증, 3D 프린터, 비접촉식 3차원 변위측정기