

등기하개념을 이용한 쉘의 위상최적화

Topology Optimization of Shell Structures using Isogeometric Concept

○이 상 진* 배 정 은
Lee, Sang Jin Bae, Jungeun

Abstract

This study introduces the isogeometric approach to the topology optimization of shell structures. Non-uniform rational B-splines (NURBS) are consistently utilized in both the geometric and analytical models. The isogeometric element formulation is based on Kirchhoff-Love theory, which addresses the linear elastic static behaviour of shells subjected to external loads. An updating scheme based on optimality criteria is employed to redistribute the shell material effectively, leading to the optimal layout of shell structures. Numerical test demonstrates that the proposed isogeometric topology optimization procedure is highly efficient in determining the optimal topology of shell structures.

키워드 : 쉘, 등기하개념, 위상최적화, 갱신알고리즘, 최적성기준

Keywords : Shell, Isogeometric Concept, Topology Optimization, Updating Scheme, Optimality Criteria

1. 서론

곡면구조의 형태를 설계하는 과정과 방법은 공학분야에서 매우 중요하게 다루어지고 있다. 그래서 형태를 결정하는 디지털 작업환경에서 캐드(CAD, computer aided design)가 꼭 필요하고 중요한 도구로 자리잡게 되었다. 캐드는 마우스를 이용하여 컴퓨터 화면에서 곡면의 형태를 조절하고 궁극적으로 최종형상을 결정하게 된다. 그런데 캐드의 내부에는 중요한 원천기술이 자리잡고 있다. 이 원천기술은 CAGD(computer aided geometric design)를 정의하는 방식과 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서는 이러한 원천기술의 하나인 넵스(NURBS)를 이용하였다. 넵스는 화면상에서 마우스로 곡면을 조절하기 위해 조절점에 기반한 수학적 정의로 발전되어 왔다. 그리고 최근에는 넵스가 구조해석을 위한 요소정식화에 직접 도입되었다. 이러한 시도는 기하학적 모델과 해석모델이 통합되는 계기가 되었으며 기하학적 모델의 기저함수를 구조물의 거동과 관련한 필드함수에 동일하게 적용하는 방식을 통해서 이루어졌다. 건축 분야에서도 등기하해석과 관련한 기반연구(Lee, 2011, 2014, 2016; Lee & Kim, 2012, 2013; Lee & Park, 2013, 2017; Park & Lee, 2016, 2014)가 지속적으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는

곡면으로 나타나는 쉘 구조의 최적위상을 도출하기 위해서 등기하 해석기법을 도입하였다. 특히 선행연구(Lee, 2014)에서 제시한 등기하 쉘 요소로 곡면구조의 반응을 해석하였다. 그리고 최적성기준을 바탕으로 고안한 절점기반 갱신알고리즘을 도입하여 쉘의 재료를 재분배하였다. 곡률을 가지는 코노이드(conoid)형태 쉘의 위상최적화를 통하여 본 연구의 정당성을 검증하고 그 결과를 쉘 구조물의 위상최적화에 대한 벤치마크 테스트로 제시하였다.

2. 쉘의 위상최적화

쉘의 위상최적화를 수행하기 위해 그림 1에 도시된 등기하개념에 기반한 얇은 쉘요소(Lee, 2014)를 도입하였다.

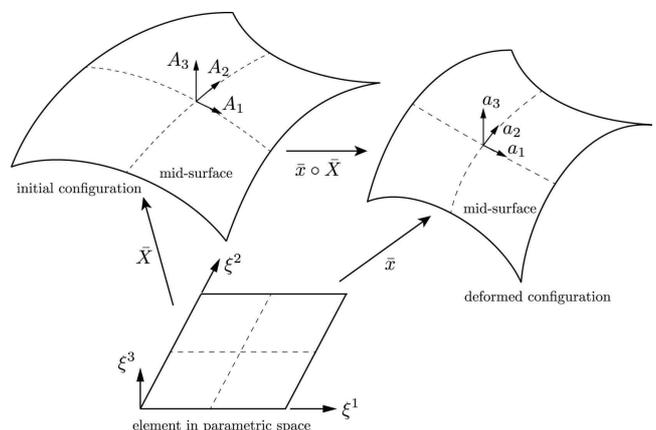


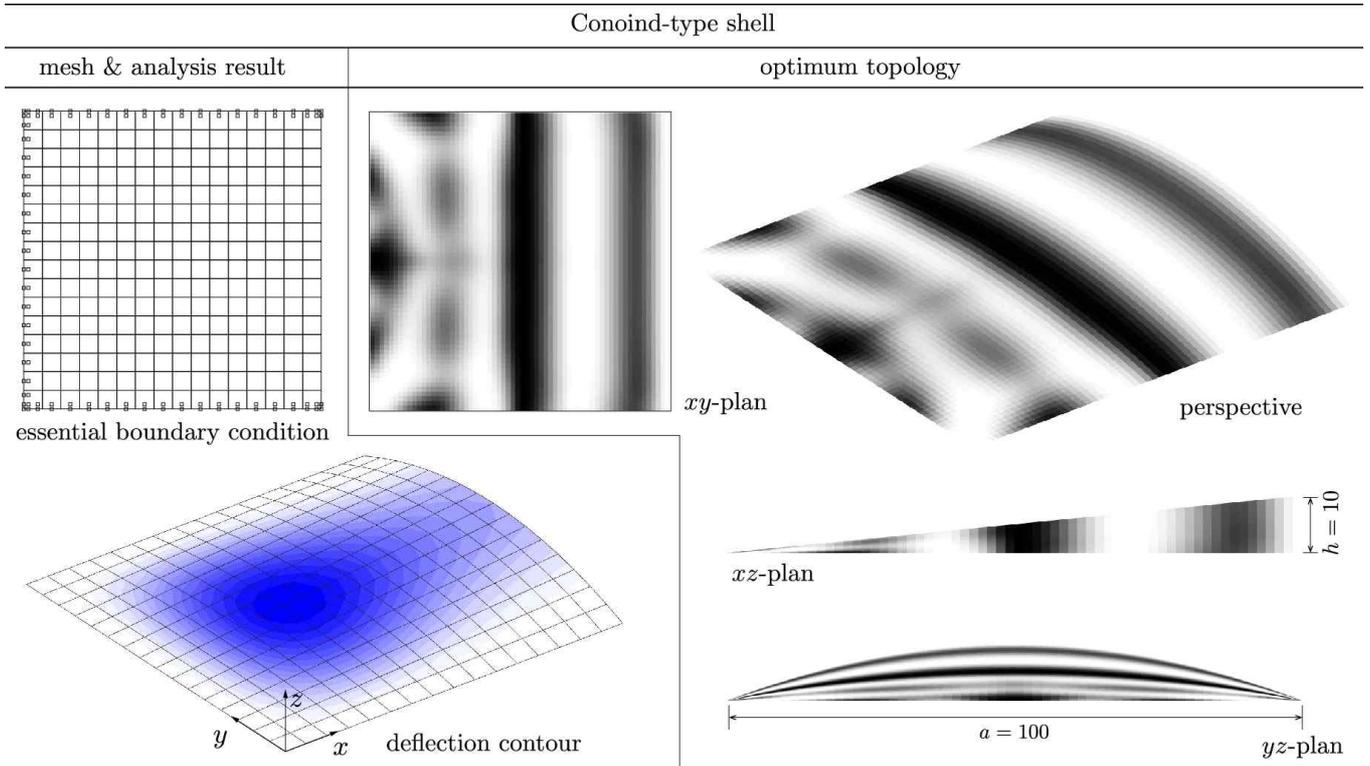
그림1. 쉘의 형상변환(Lee, 2014)

* 경상국립대학교 건축공학과 교수, PhD

** SJ미래 대표 & 경상국립대학교 구조연구실 특별연구원

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, lee@gnu.ac.kr)

표1. 코노이드(conoid) 형태를 가진 쉘의 최적위상



넵스를 이용하여 쉘 구조의 기하학적 모델과 해석모델을 통합적으로 구성하고 쉘의 반응해석을 수행하였다. 따라서 등기하해석기법이 가지는 모든 장점이 반응해석에 반영되었다. 특히 등기하해석에서는 전통적인 유한요소해석에서 이용해 왔던 h -와 p -개선법뿐만이 아니라 k -개선법을 이용할 수 있어 반응해석의 효율성과 정확성을 확보하였다. 또한 본 연구에서는 조절점에 기반한 갱신 알고리즘(Lee, 2003)으로 쉘 구조물의 재료를 재분배하였다.

표 1에는 등기하 위상최적화기법을 이용하여 도출한 쉘 구조물의 최적위상을 도시하였다. 이때 이용한 정사각형 평면($a \times a = 100 \times 100$)을 가지는 쉘의 세 변은 고정되었으며 등분포하중($w = 1$)이 작용하고 있다. 쉘의 위상최적화를 수행하기 위해 재료특성은 $E = 1 \times 10^7$ 과 $\nu = 0.3$ 을 사용하였다. 그리고 쉘의 폭-두께 비는 $a/t = 50$ 로 하였다.

3. 결론

등기하개념에 기반한 쉘 구조물의 위상최적화를 수행하였다. 이때 넵스를 이용하여 쉘의 기하학적 모델을 형성하고 이를 해석에 직접 이용함으로써 등기하해석기법이 가지는 장점을 쉘의 위상최적화에서도 모두 수용하였다. 반면 노트의 스펠에 의해 정의되는 등기하요소의 형태를 조절하는데 부가적인 노력이 필요한 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서는 등기하해석을 이용하여 쉘의 반응을 해석하므로 선행 연구(Lee & Bae, 2025)에서도 제기된 바와 같이 조절점에 대응하는 밀도함수를 도입하여 위상최적화를 수행하는 것이 효율적인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Lee, S.J. (2011). Solution of Poisson equation using isogeometric formulation, Arch. Research, 13(1), 17-24.
2. Lee, S.J. (2014). Isogeometric analysis of laminated plates under free vibration, Arch. Research, 16(3), 121-129.
3. Lee, S.J. (2014). Free vibration analysis of thin shells using isogeometric approach, Arch. Research, 16(2), 67-74.
4. Lee, S.J. (2016). Free vibrations of plates and shells with an isogeometric RM shell element, Arch. Research, 18(2), 65-74.
5. Lee, S.J., Bae, J.E. (2025), Plate topology optimization using layered artificial material model, under review.
6. Lee, S.J., Bae, J.E. & Hinton, E. (2000), Shell topology optimization using layered artificial material model, Int. J. for Numerical Methods in Eng., 47(4), 843-867.
7. Lee, S.J. & Kim, H.R. (2013). Vibration and buckling of thick plates using isogeometric approach, Arch. Research, 15(1), 35-42.
8. Lee, S.J. & Park, K.S. (2013). Vibrations of Timoshenko beams with isogeometric approach, Applied Math. Modelling, 37(22), 9174-9190.
9. Lee, S.J. & Park, G.I. (2017). Topology optimization of RC beams with openings, J. AIK, 33(6), 3-10.
10. Park, G.I. & Lee, S.J. (2016). Topology optimization for plane structures using isogeometric approach, J. AIK, 32(2), 3-10.