

구부러진 3 차원 박판 구조물의 고유 진동수 극대화를 위한 보강재 배치 최적화

Stiffener Layout Optimization to Maximize Natural Frequencies of a Curved Three-Dimensional Shell Structure

이준호*·박윤식**·박영진**

Joon-Ho Lee, Youn-Sik Park and Youngjin Park

Key Words: Stiffener layout optimization(보강재 배치 최적화), Natural frequency(고유 진동수), Curved shell structure(구부러진 박판 구조물), Projection method(투영법), Geometry algorithms(기하 알고리즘)

ABSTRACT

Based on the authors' previous work, where a geometric constraint handling technique for stiffener layout optimization problem using geometry algorithms was proposed, stiffener layout optimization to maximize natural frequencies of a curved three-dimensional shell structure was performed with a projection method. The original geometry of the shell structure was first projected on a two-dimensional plane, and then the whole optimization process was performed with the projected geometry of the shell except that the original shell structure was used for the eigenproblem solving. The projection method can be applied to baseline structures with a one-to-one correspondence between original and projected geometries such as automobile hoods and roofs.

1. 서론

구조물 동특성 변경법(Structural Dynamics Modification)은 그림 1 과 같이 고유 진동수 및 모드 형상, 주파수 응답함수와 같은 기저 구조물(baseline structure)의 동특성을 향상시키기 위해, 부가 구조물(auxiliary structure)의 침착을 통해 기저 구조물을 최적으로 변경하고자 할 때 많이 사용되어 온 방법으로, 1970 년대 이후로 많은 연구가 수행되어 왔다^[1].

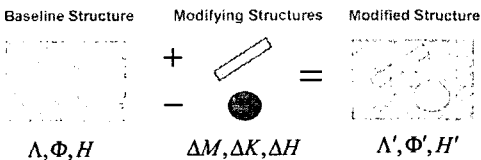


Fig. 1 Concept of structural dynamics modification

특히 보 형태의 보강재는 구조물 동특성 변경의 일환으로 기저 구조물의 고유 진동수를 높이는 목적으로 많이 사용되어 왔는데, 이는 보강재의 부착에 의해 유발되는 질량 증가량에 비해 전체 구조물의 강성 증가량이 매우 큰 특징이 있기 때문이다. 보 보강재를 이용한 기저 구조물의 고유 진동수 극대화 문제를 다룬 대부분의 선행 연구들의 경우,

보강재의 단면 치수들만을 주요 설계 변수로 고려하고 보강재의 위치나 길이들은 최적화 이전에 이미 결정해 두고 설계 변수로는 고려하지 않는 것이 일반적이었다. 그러나, 이러한 간과된 설계 변수들(즉, 위치나 길이) 역시 기저 구조물의 동특성에 상당한 영향을 주는 것이 밝혀졌다^[2-8]. 특히 보강재가 놓일 수 있는 영역을 기저 구조물 내부로 제약(constraint)을 두었을 경우, 이러한 기하구속조건은 보강재 배치 최적화를 위해서는 어떤 형태로든 수식적으로 표현되어야만 하는데, 이준호 등^[7,8]은 기하 알고리즘을 사용해서^[9] 이를 쉽게 처리할 수 있는 기하구속조건 처리기법을 제안하였고, 2 차원 상에 존재하는 L 자 평판에 대한 보강재 배치 최적화를 통해 제안된 방법론을 검증하였다. 본 논문에서는 기 제안된 기하구속조건 처리기법을 그림 2 와 같은 투영법(projection method)을 통해 확장시켜서 3 차원 상에 존재하는 구부러진 박판 구조물에 대해서도 동일하게 적용 가능함을 보이고자 한다.

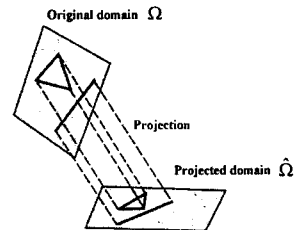


Fig. 2 Projection method

* 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : justinlee@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3060, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과

2. 기하구속조건 처리기법을 이용한 보강재 배치 최적화: 개요

기하 알고리즘을 바탕으로 한 기하구속조건 처리기법^[7,8]을 사용해서 보강재 배치 최적화를 수행하는 절차는 다음과 같다. 그림 3 과 같이 내부에 구멍이 존재하는 기저 구조물이 주어질 경우, 보강재가 놓일 수 있는 영역(빋금 친 부분)을 두 개의 다각형 VO 와 VI 로 정의하고, 이를 이용해서 계산되는 기하구속조건 위배량을 바탕으로 보강재 배치 최적화를 수행하게 된다. 이때의 기하구속조건 위배량은 식 (1)로 정의된다.

$$C(x) = \max \left\{ \frac{l_{out}}{l_{in} + l_{out}} + \text{floor} \left(\frac{l_{out}}{l_{in} + l_{out}} \right) \cdot \text{dist}, 0 \right\} \quad (1)$$

여기서, 식 (1)은 다음과 같은 두 개의 사항을 고려하고 있다.

- ① 다각형 VO 의 외부 혹은 다각형 VI 의 내부에 놓여있는 보강재의 부분 비율 ($l_{out} / (l_{in} + l_{out})$).
- ② 보강재가 다각형 VO 의 외부 혹은 다각형 VI 의 내부에 완전히 놓여있는 경우, 보강재에 가장 가깝게 위치한 다각형의 모서리로부터 보강재까지의 최단거리 dist .

최적화 시의 설계 변수 x 는 보강재의 한쪽 끝점의 좌표 (x_i, y_i) , x 축으로부터의 보강재의 회전 각 θ , 보강재의 길이 L_i 이다.

이 방법은 기저 구조물의 영역이 매우 복잡하거나, 내부에 돌출부 및 구멍을 가지고 있는 경우에도 쉽게 적용 가능하다는 특징이 있다.

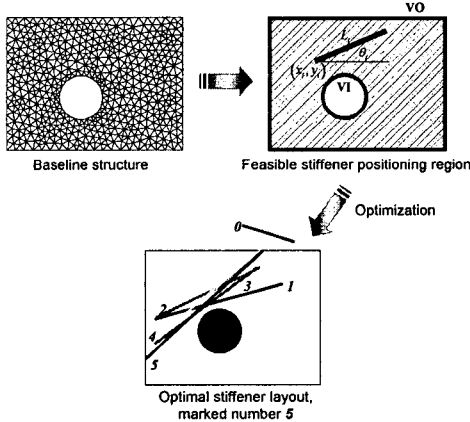


Fig. 3 Stiffener layout optimization using a geometric constraint handling technique

3. 투영법을 이용한 보강재 배치 최적화

먼저 대상 구조물로서, 그림 4 와 같은 구부러

진 3 차원 박판 구조물을 고려하였다. 박판 구조물의 곡률 반경 r 은 1.4324 m 이고 사잇각 θ 는 60° 이다.

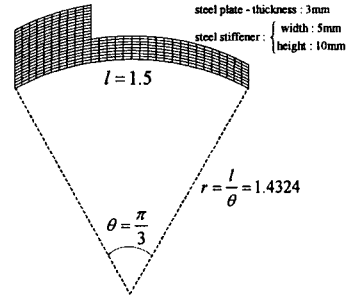


Fig. 4 FE model of a curved L-shaped shell

3 차원상의 구부러진 박판 구조물에 보강재를 붙이기 위해서는 그림 5(a)와 같이 박판 구조물의 표면을 따라서 보강재를 구부러서 붙여야만 한다. 하지만 이러한 조건을 만족시키면서 박판 구조물의 표면 상의 임의의 위치로 보강재를 옮기는 것은 쉽지가 않다. 대신에 먼저 박판 구조물을 2 차원으로 투영시킨 후에 (그림 5(a)→5(b)), 이 투영된 그림자 상에서 보강재의 그림자의 위치를 변경한 후 (그림 5(b)→5(c)), 보강재의 위치 변경 후의 실제 보강재 부착위치를 역으로 구할 수 있다면 (그림 5(c)→5(d)), 적은 수의 설계 변수를 사용해서도 보강재의 움직임을 쉽게 표현할 수 있을 것이다.

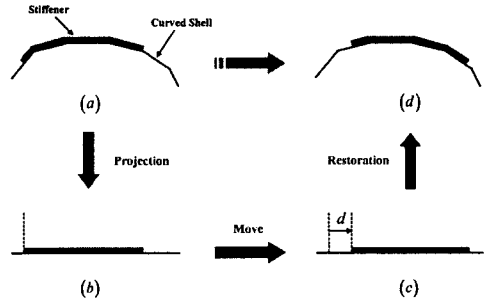


Fig. 5 Scheme of moving a stiffener along the surface of a curved shell by projection method

하지만, 투영법은 그림 6 과 같이 투영된 박판 구조물의 그림자 상에 겹쳐지는 부분이 존재하는 경우에는 적용하지 못하는 제약을 가지고 있다. 참고적으로 본 논문에서는 투영 시, 그림자가 선분이 되는 보강재 만을 고려하기로 한다.

그림 7 은 3 차원 박판 구조물의 유효요소모델의 geometry 를 2 차원 XY 평면 상으로 투영시킨 그림자 (projected geometry)를 보여주고 있다. 여기

서 보강재가 놓일 수 있는 영역은 XY 평면 상의 오목 육각형 VO 으로 정의된다. 참고로 박판의 투영된 그림자는 실제로 존재하는 유한요소모델이 아니며, 단지 절점의 위치와 연결관계에 관한 기하 정보만을 가지고 있다. 그리고 두 geometry 의 절점들 간에는 z 좌표값 만이 차이가 나게 된다.

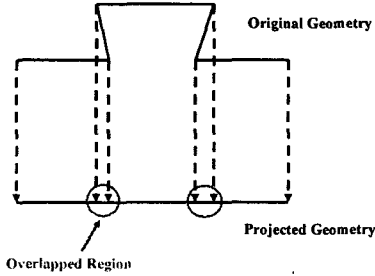


Fig. 6 Overlapped regions after projection

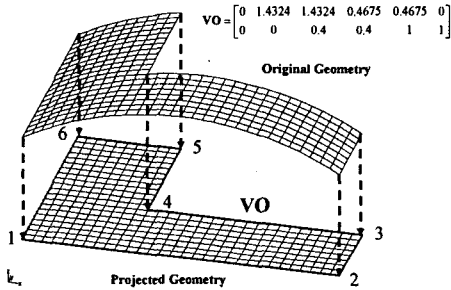


Fig. 7 Original and projected geometries of the curved L-shaped shell structure

3 차원 상의 임의 곡률을 가진 표면을 따라서 보강재가 위치하기 위해서는 그림 8 과 같이 보강재의 그림자와 투영된 박판의 geometry 간의 모든 교점들 상에 보강재의 절점들을 위치시켜야만 하는데, 그래야만 박판과 보강재가 완전히 붙어서 함께 움직일 수 있기 때문이다.

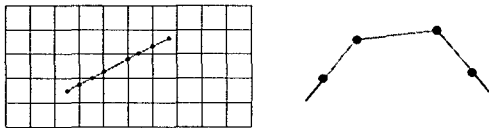


Fig. 8 FE nodes of the stiffener located at crossing points between projected geometries of a shell and a stiffener

여기서 보강재 절점들의 x, y 좌표 값을 구할 수 있다.

마지막으로 보강재 절점들의 z 좌표 값들은

그림 9 에서와 같이 평면과 직선이 만나는 교점을 구하는 방법을 통해서 얻어지게 된다. 그림 9 의 오른쪽 그림에서 사각형은 3 차원 상에 존재하는 임의의 법선 벡터 \mathbf{n} 을 갖는 박판의 유한 요소이고, \mathbf{P}_0 는 XY 평면 상의 보강재 그림자의 절점, $\mathbf{P}(s_i)$ 는 3 차원 박판 구조물의 표면 상의 절점을 나타낸다. 이상의 과정을 통해, 3 차원 박판 구조물의 표면을 따라 위치하는 보강재의 유한요소모델을 구성할 수 있다.

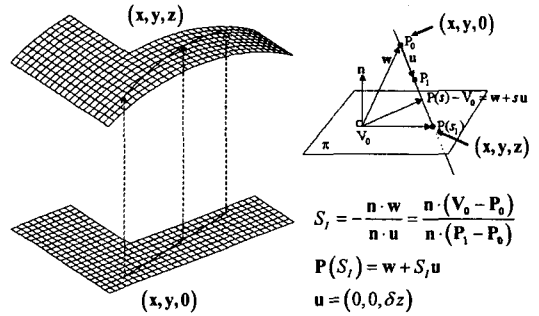


Fig. 9 Obtaining z coordinates of FE nodes of a stiffener by line-plane intersection search technique in geometry algorithms

4. 모의 실험 결과

이상의 내용을 바탕으로 해서, 3 차원 상의 구부러진 박판 구조물의 첫 번째 고유 진동수를 극대화 하기 위한 보강재 배치 최적화를 수행하였다. 그림 10 은 첫 번째 모드 ($\omega_1 = 5.9157 \text{ Hz}$) 에서 박판에 걸리는 모달 동적 변형을 에너지를 보여주고 있는데, 그림 7 의 4 번 꼭지점 부근에 높은 변형을 에너지가 존재함을 알 수 있다.

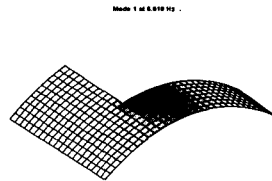


Fig. 10 Modal dynamic strain energy distribution of the curved L-shaped shell at first flexible mode (bending)

보강재의 배치 최적화를 위해서 진화 전략

(evolution strategies)^[10] 및 EVOSLINOC 기법^[11]을 사용하였고, 설계 변수로는 보강재 그림자의 위치 및 길이를 고려하였다.

최적화 과정 동안의 보강재 배치 변화 양상 및 그 때의 첫 번째 고유 진동수 상승량은 그림 11과 같다. 최적화를 통해서 보강재는 4번 꼭지점에 접하면서 수평으로 놓여졌으며 (그림 11에서 5로 표시) 이 때, 첫 번째 고유 진동수는 6.5418 Hz로 상승되었다.

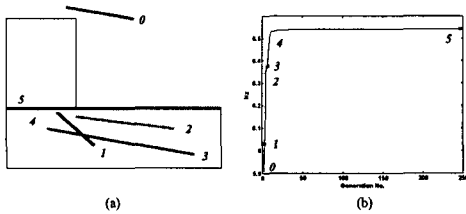


Fig. 11 (a) Variation of stiffener layout and (b) improvement of the first flexible natural frequency of the stiffened curved shell during the optimization process

5. 결론

본 논문에서는, 기 제안된 기하구속조건 처리기법을 투영법을 통하여 구부러진 3 차원 박판 기저 구조물의 고유 진동수를 극대화 하기 위한 보강재 배치 최적화에 확대, 적용할 수 있는 방법을 제안하였다. 이러한 투영법은 자동차의 후드나 지붕과 같이 투영 시에, 투영된 그림자 상에 겹쳐지는 영역이 존재하지 않는 구조물에 대해 적용 가능한 방법이라고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업 “진동 저감을 위한 동특성 변경기술”과 두뇌한국사업(BK21)의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) Avitabile, P., 2002, “Twenty years of structural dynamics modification – a review”, Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference, Los Angeles, CA, USA, pp. 356-372.
- (2) Liu, Z. S., Hansen, J. S., and Oguamanam, D. C. D., 1998, “Eigen value sensitivity of stiffened plates with respect to the location of stiffeners”, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 16, pp. 155-161.
- (3) Marcelin, J. L., 2002, “Genetic optimization of stiffened plates without the FE mesh support”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 54, pp. 685-694.
- (4) Fatemi, J., and Trompette, P., 2002, “Optimal design of stiffened plate structures”, Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Denver, CO, USA, AIAA Paper 2002-1672.
- (5) Jung, E. I., and Park, Y. S., 2003, “Structure optimization using coupling position of substructure based on measured frequency response functions”, Proceedings of Inter-Noise 2003, Seogwipo, Jeju, Korea, pp. 3576-3583.
- (6) Lee, J. H., and Park, Y. S., 2003, “SDM, utilizing evolution strategies: application to substructures having non-matching nodes”, Proceedings of the 21st International Modal Analysis Conference, Kissimmee, FL, USA, Paper No. 114.
- (7) 이준호, 박영진, 박윤식, 2004, “보 보강재 배치 최적화 문제에서의 기하구속조건 처리기법”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 870-875.
- (8) Lee, J. H., Kim, G. H. and Park, Y. S., 2004, “A geometry constraint handling technique for stiffener layout optimization problem”, Journal of Sound and Vibration, accepted.
- (9) O'Rourke, J., 1998, Computational Geometry in C, 2nd edition, Cambridge University Press.
- (10) Ohkura, K., Matsumura, Y., and Ueda, K., 2001, “Robust evolution strategies”, Applied Intelligence, Vol. 15, pp. 153-169.
- (11) Binh, T. T., and Korn, U., 1997, “Scalar optimization with linear and nonlinear constraints using evolution strategies” Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1226, pp. 381-392.