단면형상이 변하는 박판보의 진동해석에 관한 연구

이 기 준¹ · 사 진 용¹ · 김 준 식^{1*}

¹금오공과대학교 기계시스템공학과

On the Free Vibration Analysis of Thin-Walled Box Beams having Variable Cross-Sections

Gi-Jun Lee¹, Jin-Yong Sa¹ and Jun-Sik Kim^{1*}

¹Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, 39177, Korea

Abstract

In this paper, a local deformation effect in thin-walled box beams is investigated via a finite element modal analysis. The analysis is carried out for single-cell and multi-cell box beam configurations. The single-cell box beam with and without a neck, which mimics a simple wind-turbine blade, is analyzed first. The results obtained by shell elements are compared to those of one-dimensional(1D) beam elements. It is observed that the wall thickness plays a crucial role in the natural frequencies of the beam. The 1D beam analysis deviates from the shell analysis when the wall thickness is either thin or thick. The shell modes(local deformations) are dominant as it becomes thin, whereas the shear deformation effects are significant as it does thick. The analysis is extended to the single-cell box beam with a neck, in which the shell modes are confined to near the neck. Finally the multi-cell box beam with a taper, which is quite similar to real wind-turbine blade configuration, is considered to investigate the local deformation effect. The results reveal that the 1D beam analysis cannot match with the shell analysis due to the local deformation, especially for the lagwise frequencies. There are approximately 5~7% errors even if the number of segments is increased.

Keywords : Local deformation, wind turbine blade, thin-walled box beam, finite element analysis

1. 서 론

고갈되고 있는 석유자원을 대체하기 위하여 새로운 에너지원의 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중에서도 풍력 발전 시스템이 다른 환경오염 문제가 전무한 무공해 천연 에너지로써 각광을 받고 있다. 그렇기 때문에 풍력터빈 시장이 세계적으로 크게 확대되고 있으며, 더 높은 용량을 위해 발전 시스템의 크기도 점점 증가되고 있다. 풍력 발전 시스템의 구조는 운동 에너지를 회전에너지로 변환시키는 블레이드, 회전날개의 무게를 지지하는 허브 그리고 회전동력의 증속을 담당하는 기어 박스로 구성되어 있다. 시스템의 대형화를 위해서는 길이 100~150m에 이르는 대형 블레이드가 필수 요소이다(Fig. 1). 이러한 대형 블레이드는 파손되었을 경우 발전시스템의 기능 상실 또는 대형 사고를 유발할 수 있다. 블레이드의 초기설계

단계에서 주파수 및 모드형상 해석에 대한 가이드라인의 확립과 정확한 성능평가가 중요하다(Park *et al.*, 2008).

풍력 블레이드는 구조적인 안정성과 경량화를 얻기 위하여 스킨의 두께가 얇고 끝부분으로 갈수록 가는 형태로 되어있다. 대형 풍력 발전 블레이드의 경우 그 복잡성으로 인해 일반적으로

Fig. 1 A schematic of a typical wind turbine blade

* Corresponding author:

Tel: +82-54-478-7397; E-mail: junsik.kim@kumoh.ac.kr

Received December 19 2016; Revised January 6 2017;

Accepted January 7 2017

© 2017 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.

셀 유한요소 모델을 이용하여 진동특성과 같은 성능평가를 수행한다. 셀 모델을 이용한 해석은 국소변형을 고려할 수 있어 보 모델보다 비교적 정확하지만 피로해석 등의 반복계산이 필요한 경우에는 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다(Sa, 2015). 단순 보 모델은 빠른 해석이 가능하다는 장점이 있어서 전반적인 성능평가에 주로 사용된다. 그러나 이러한 모델들은 대형 풍력 블레이드에서와 같이 스킨 구조물이 상대적으로 얇은 경우에 주파수 및 모드형상에 주요한 인자로 작용하는 국소변형을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 특히 국소변형은 일반적으로 등가 보 이론의 유도에 적용되는 생브낭의 원리(Kim *et al.*, 2011; Jeong *et al.*, 2016)를 적용할 수 없기 때문에 기존의 보 모델들을 그대로 사용할 수 없을 것으로 예상된다. 한편 국소변형 모드는 최신의 전산점근해석기법(Kim *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2013)을 사용하면 계산할 수 있는 것으로 보고되어 있으나, 이를 포함하는 등가 보 모델은 문헌상에서 찾아 볼 수 없다.

현재까지는 국소변형이 등가 보 모델의 정확도에 어떻게 영향을 주는지에 대한 체계적인 분석이 부족한 형편이다. 따라서 본 연구에서는 단일셀 및 다중셀 박판 보에 대한 유한요소 보 모델과 셀 모델을 이용하여 진동해석을 수행하고 비교함으로써 국소변형이 미치는 영향의 정도를 알아보고자 한다.

2. 본 론

이 장에서는 대형 풍력발전 블레이드에서의 국소변형 현상에 대한 체계적 분석을 위하여, 여러 가지 형상의 등방성 박스 보들에 대한 시뮬레이션 조건 및 결과를 분석한다. 블레이드 형상을 가장 단순화한 단일셀 박스보로 시작하여, 목을 고려한 박스보 그리고 테이퍼를 가지는 멀티셀 박스보의 순으로 진동 해석 결과를 분석하고자 한다. 특히 블레이드를 간소화시킨 모델에서는 단면이 급격히 변화하는 부분에 나눈 단면 정보의 개수에 따른 결과들을 서로 비교한다.

2.1 단일셀 박스 보

실제 풍력 블레이드의 형상은 두께가 얇은 박판으로 제작되므로 이를 Fig. 2와 같이 단일 박스 보 모델로 가장 간단히 간소화시킬 수 있다. 박스 보의 제원은 폭(B) 20mm, 높이(H) 5mm, 길이(L) 350mm, 박판두께(T) 0.01mm의 초기 치수를 갖는다. 재료 물성은 Young's 계수 200 GPa, 포아송 비 0.3 그리고 밀도는 7850kg/m^3 로 가정하였다.

단일셀 박스 보의 제원이 어떠한 조건일 때 국소변형에 큰

Fig. 2 Geometry of a single-cell box beam

Table 1 Dimensions of single-cell box beams(unit: mm)

	Width(B)	Height(H)	Length(L)	Thickness(T)
Case 1	20	5	350	0.01~2
Case 2	20	5	200~800	0.01

영향을 미치는지 알아보기 위하여 Table 1과 같이 단면의 차원을 고정시키고 보 전체 길이와 박판두께를 변화시켜 가며 자유진동해석을 수행하였다. Table 1에서 Case1은 박판두께의 영향을 조사하기 위하여, Case 2는 보 전체 길이가 국소변형에 미치는 영향을 분석하기 위하여 설정하였다. 경계조건은 풍력발전 블레이드와 유사한 조건인 외팔보 조건(즉, 고정단-자유단)을 부과하였다. 굽힘 주파수 및 모드형상에 대한 구분을 위하여 두께(H)방향 진동은 'flapwise'로, 폭(B)방향 진동은 'lagwise'로 각각 명명하였다. 유한요소 셀 모델과 등가 보 모델을 이용하여 계산된 고유진동수 결과를 서로 비교함으로써 국소변형 발생 조건을 확인하고자 한다. 이러한 차이는 단면변형 효과에 의해서도 발생할 수 있기 때문에 단면변형을 포함한 모드형상을 분석함으로써 최종적으로 국소변형모드(셀 모드)로 판정할 수 있다.

먼저 박판두께의 변화에 따른 고유주파수의 결과를 조사하였다. Table 1에서 Case 1의 결과를 flapwise 그리고 lagwise 방향 모드로 구분하여 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 도시하였다. 각 그림은 박판두께(T)에 따른 주파수 변화를 나타낸다. 예상대로 등가 보요소의 결과와 셀요소의 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러나 박판두께가 매우 얇거나 두꺼운 경우에는 오차가 발생함을 알 수 있다. 박판두께가 매우 얇은 ($T=0.01\text{mm}$) 경우에는 flapwise모드(Fig. 3) 주파수 오차가 5.8%로 상대적으로 크며, 두꺼운($T=2\text{mm}$)은 경우에는 1% 미만의 작은 오차를 보인다. 이러한 경향성은 lagwise모드(Fig. 4)에서도 관찰되나, 오차의 폭은 증가하는 것으로 나타난다. 특히 박판두께가 얇은 경우에는 주파수 오차가 79%로 가장 크게 발생하였다.

오차가 발생하는 원인이 국소변형 때문인지를 알아보기 위해 셀 요소 결과의 flapwise모드에서의 단면변형 형상을 박판 두께(T)가 0.01~2mm인 경우에 대해 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 3 Flapwise frequency variation vs wall thickness for the single-cell box beam

Fig. 4 Lagwise frequency variation vs wall thickness for the single-cell box beam

Fig. 5 Cross-sectional deformations of flapwise mode shapes with various wall thickness(T) for the single-cell box beam

박판두께가 얇은 경우인 0.01mm와 0.02mm 두께에서 국소 변형이 뚜렷하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 국소변형은 보 요소를 이용한 유한요소해석에서는 고려할 수 없기 때문에 주파수에 오차가 발생하는 것으로 판단된다. 두께가 0.1mm 이상인 경우에는 국소변형이 적어 보 요소의 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

이제 보의 전체 형상이 국소변형에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 1의 Case2 와 같이 박판두께를 고정하고 보 길이를 변화시켜 가면서 자유진동해석을 수행하였다. 박판두께를 0.01mm로 고정한 이유는 국소변형의 영향을 명확하게 보기

Fig. 6 Flapwise frequency variation with various beam length for the single-cell box beam

Fig. 7 Lagwise frequency variation with various beam length for the single-cell box beam

Fig. 8 Cross-sectional deformations of flapwise mode shapes with various beam length for the single-cell box beam

위함이다. 보 길이(L)에 따른 flapwise 및 lagwise 주파수 변화를 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였고, 여기서 보의 길이는 200m~800mm까지 고려하였다.

박판두께 변화에 따른 주파수 변동의 경우(Fig. 3과 Fig. 4)와 마찬가지로 보의 길이가 짧아질수록 등가 보요소와 셀 요소의 결과 차이가 커짐을 알 수 있다. 일반적인 경우에 최대 단면차원 대비 길이의 비가 10이면 고전 보 이론의 오차가 10%미만으로 알려져 있으나, 박판 보의 경우에는 오차가 60% 이상으로 나타났다. 특히 lagwise 주파수는 그 오차가 366%에 달한다. 박판 보가 길어짐에 따라 국소변형의 영향은

급격하게 줄어들게 되며 두 결과들은 잘 일치한다. 이러한 국소변형의 영향은 모드형상을 분석함으로써 확인할 수 있다.

Fig. 8에 오차가 크게 발생하는 길이가 200~800mm인 박판 보에 대한 모드형상을 나타내었다. 길이가 짧은 경우에는 극단적으로 보의 평균 변위가 0이 되는 순수한 쉘모드(국소변형) 만이 나타나며, 길이가 늘어날수록 등가 보 요소의 결과로 수렴함을 알 수 있다. 지금까지의 결과를 종합하면, 단일셀 박스보는 길이가 짧을수록 그리고 박판두께가 얇을수록 국소 변형의 영향이 커지는 반면에, 길이가 길수록 두께가 두꺼울수록 국소변형의 효과는 감소한다. 박판두께가 두꺼울 경우에는 등가 보의 횡방향 전단변형 효과를 정확하게 표현할 수 없기 때문에 쉘 요소와 오차를 보이지만, 얇은 경우보다는 그 영향이 적다. 만약 적절한 전단수정계수를 계산하여 입력하면 오차는 더욱 줄어들 것으로 예상된다.

2.2 목이 있는 단일셀 박스 보

풍력발전 블레이드는 공기역학적 성능 및 구조적 안정성을 위하여 고정단 근처에서 단면의 크기가 반전되는 형상을 가지는 특징이 있다. 이 특징을 간소화시켜 국소변형에 미치는 효과를 알아보기 위하여 단일셀 박스 보에 목을 추가한 모델을 고려하였다. 목이 있는 박스 보의 형상은 Fig. 9와 같으며 목 길이 () 30mm, 몸통 길이(l_1) 200mm, 높이(h) 5mm, 목의 폭 (b_2) 10mm, 몸통의 폭(b_1) 20mm 의 초기제원을 가진다. 목 길이의 변화 및 몸통 길이에 따른 국소변형 효과를 조사하기 위하여 목 길이(l_2)는 30~70mm, 그리고 몸통 길이(l_1)는 200~800mm까지 변화시켜 가며 자유진동해석을 수행하였다.

목이 짧은 경우(30mm)에 박스 보의 몸통길이에 따른 lagwise 주파수 변화를 Fig. 10에 나타내었고, 목이 긴 경우 (70mm)는 Fig. 11에 도시하였다. 그림에서도 알 수 있듯이 목이 짧은 경우에 등가 보 해석 결과는 상대적으로 크게 나타나며, 몸통길이가 길수록 오차가 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 이 경향성은 단일셀 박스 보의 경우 마찬가지이나,

Fig. 9 Geometry of a box beam with the neck

Fig. 10 Lagwise frequency variation vs beam length for the single-cell box beam with the short neck (30mm)

Fig. 11 Lagwise frequency variation vs beam length for the single-cell box beam with the long neck (70mm)

lagwise 주파수 오차는 몸통길이가 길어짐에도 불구하고 짧은 목의 영향으로 인하여 오차가 5% 미만으로 줄어들지 않음을 알 수 있다.

Lagwise 모드에서 주파수 오차가 더 큰 이유를 규명하기 위하여 쉘 요소결과의 모드형상을 flapwise모드 형상과 lagwise 모드형상을 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. Flapwise 모드의 경우 목 주위에서의 국소변형은 미미하나, lagwise 모드에서는 국소변형이 목 주위에서 상대적으로 크게 발생함을 알 수 있다. 이러한 국소변형이 몸통길이가 길어짐에도 불구하고

Fig. 12 Flapwise mode shape of the box beam with the short neck

Fig. 13 Lagwise mode shape of the box beam with the short neck

주파수 오차의 주요한 원인임을 모드형상의 국소변형 유무에서 확인할 수 있었다.

Fig. 13에서 볼 수 있듯이 lagwise 모드는 목과 박판 보의 몸통이 만나는 부분에서 울룩불룩하게 보의 전체변형 방향과 수직방향으로 발생하는 것을 볼 수 있다. Flapwise모드(Fig. 12)에서는 전체변형과 국소변형 방향이 같게 나타나는 반면에, lagwise모드(Fig. 13)에서는 단면이 급격히 변하는 목 주위에서 국소변형이 전체변형과 서로 수직이면서 윗면과 아랫면의 방향이 반대이기 때문에 등가 보에서의 변형에너지에 포함되지 않는다.

2.1절에서 분석한 단일셀 박스 보의 경우와 비교해 보면, 목이 없는 경우에는 국소변형의 양상이 자유단 부분에 집중되어 나타나는 반면에 목이 있는 경우에는 단면의 급격한 변화로 인하여 목 주위에 국소변형이 발생한다. 즉, 국소변형은 단면의 구속여부 보다는 그 급격한 변화에서 발생하며, 주파수 오차에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

2.3 풍력발전 블레이드를 모사한 다중셀 박판 보

2.1절과 2.2절에서는 풍력 블레이드를 매우 단순화하여 국속변형의 발생 조건을 조사하였다. 이제 실제 풍력 블레이드의 기본 구조와 비슷한 형상에 대한 자유진동해석을 수행하고자 한다. 풍력 블레이드의 구조적 특징을 잘 모사할 수 있도록 허브 부분에서 단면형상의 점진적 변화(테이퍼)와 다중셀 단면을 가지는 박스 보를 기준 모델로 고려하였다. 제원은 앞서 수행한

Fig. 14 Geometry of a multi-cell box beam with continuously variable cross-sections

박스 보들 중 중간 길이 정도의 몸통 길이(l_1) 300mm, (l_2) 35mm, 목 길이(l_3) 15mm, 몸통의 폭(b_1) 30mm, 목의 폭(b_2) 10mm, 높이(h) 5mm, 스파 폭(n) 5mm 그리고 박판 두께는 스킨(skin) 0.1mm, 스파(spar) 0.4mm로 설정하여 해석을 수행하였다. Fig. 14에 다중셀 박스 보 모델에 대한 기하학적 형상 및 제원을 도시하였다.

이 모델은 단면이 축 방향에 따라 연속적으로 변하기 때문에 등가 보 요소로 해석을 할 때, 일정 구간마다 단면 정보를 달리 해서 해석해야 한다. 앞 절에서의 결과들을 참고하면, 단면이 급격히 변화하는 l_2 부분에 몇 개의 단면 정보를 나누느냐에 따라 자유진동해석의 정확도가 달라질 것으로 예상할 수 있다. Fig. 14의 형상을 참고하여 다음의 세 가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 먼저 Case 1은 l_2 에 대한 단면 정보를 두 개로, Case 2는 세 개, 그리고 Case 3은 4개로 나누었다. 이 세 가지 경우에 대한 전체적인 단면 분할 정도를 Fig. 15에 도시하였다.

Fig. 15 Beam finite element discretizations for the multi-cell box beam

셀 요소와 등가 보 요소를 사용하여 자유진동해석을 수행하여 얻어진 flapwise 그리고 lagwise 모드에 대응하는 주파수들을 비교하여 Table 2에 나타내었다. Flapwise 모드의 경우에 셀 요소 결과와 보 요소 결과들이 서로 잘 일치함을 알 수 있고, 단면 분할 정도가 증가함에 따라 정확도가 상승함을 알 수 있다. 단면이 가장 세분화된 보 요소(Case 3) 결과에 의한 주파수 오차는 약 0.2%이다. 이러한 경향성은 lagwise 모드에서도 확인되나, 셀 요소와 오차가 상대적으로 큼을 알 수 있다. 특히 세분화된 단면 정보의 분할에도 lagwise 주파수 오차는

Table 2 Comparison of flapwise and lagwise frequencies for the multi-cell box beam

Frequency (Hz)	Flapwise	Error(%)	Lagwise	Error(%)
Case 1	50.31	0.33	98.15	8.66
Case 2	52.27	0.25	97.15	7.54
Case 3	50.26	0.23	96.91	7.28
Shell FEM	50.14	-	90.33	-

Fig. 16 Cross-sectional deformation of the lagwise mode shape near the neck for the multi-cell box beam

약 7%로 나타났다. 앞에서도 살펴보았듯이 이는 lagwise 모드에서는 국소변형이 크게 발생하기 때문인 것으로 예측할 수 있다.

보다 정확한 분석을 위하여 Fig. 16에 단면변화의 구배가 큰 부분에서의 단면변형 형상을 나타내었다. 2.2절의 목이 있는 단일셀 박판 보에서와 마찬가지로 국소변형은 lagwise 방향 변형과 수직인 방향으로 발생함을 알 수 있다. 이러한 국소변형에 의한 보의 기준축에서의 평균변위는 0으로 계산되기 때문에 등가 보 모델로 고려할 수 없다. 이러한 관점에서 국소변형을 순수한 셀 변형으로 생각할 수 있으며, 고전적인 등가 보 모델을 사용하는 한 이 오차를 줄일 수 없다.

2.3절에서의 결과는 2.1 및 2.2절에서 언급된 국소변형과 그 맥락을 같이하고 있다. 박판 보의 문제에서는 일반적으로 보 모델에서 중요하게 생각하는 전단변형의 효과보다 박판두께의 얇은 정도에 따른 국소변형의 효과 지배적임을 알 수 있다. 특히 대형 풍력발전 블레이드의 경우 구조물이 매우 크기 때문에 박판두께는 상대적으로 얇을 수밖에 없다. 피로하중 해석 등에서는 등가 보 모델의 사용이 필수적인 만큼 대형 블레이드 개발을 위해서는 국소변형을 고려할 수 있는 새로운 고차 보 모델의 개발이 요구된다고 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 셀 요소 및 보 요소를 이용하여 단면형상이 변하는 박판 보에 대한 자유진동문제를 해석하고, 두 모델들 사이의 차이에 대한 분석을 수행하였다. 얻어진 결과들을 다음과 같이 요약 정리할 수 있다.

- 단일셀 박판 보: 박판두께에 따른 영향이 상대적으로 크며, 얇을수록 국소변형의 영향이 크고, 두꺼울수록 전단변형의 영향이 커진다. 보의 길이가 길어짐에 따라 국소변형의 영향은 줄어든다. 국소변형은 자유단 부분에서 발생하며, 이는 단면변형에 대한 구속여부에 기인하는 것으로 사료된다. 순수한 국소변형의 경우 등가 보 모델로 전혀 예측할 수 없다.
- 목이 있는 단일셀 박판 보: 목이 없는 경우와 비교하여 국소변형은 단면형상이 변하는 접합부에서 크게 발생하며, flapwise 보다는 lagwise에서 크게 나타난다. Lagwise 모드에서의 국소변형은 보의 전체거동과 수직인 방향으로 나타나며, 자가평형을 이룬다. 보의 길이가 길어짐에

따라 국소변형의 영향은 줄어든다. 국소변형의 유무는 주파수 오차에 크게 기여한다.

- 다중셀 박판 보: 단일셀 박판 보와 경우와 마찬가지로 등가 보 요소의 결과는 lagwise 주파수의 정확도가 떨어지며, 단면변화의 구배가 큰 곳에서 국소변형이 자가평형 양상으로 발생한다. 일반적인 기대치와는 다르게 단면의 분할 정도의 영향은 미약하고, 국소변형의 영향이 주파수 오차의 주원인으로 나타난다.

본 논문에서 다룬 단일 셀 및 다중 셀 박판 보의 형상은 실제의 대형 풍력발전 블레이드를 구조적 형상을 모사하고 있어 응력 및 진동해석 시에 본 연구가 보 모델의 한계점에 대한 가이드라인으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2016R1D1A1B01009576).

References

- Park, S., Han, K. (2008) Structural Analysis and Proof Test of Composite Rotor Blades for Wind Turbine, Proc of KSNRE Conference, pp.299~302.
- Sa, J.-Y. (2015) *Vibration Analysis of Box Beam with Tailored Stiffeners and Local Deformation*, MS Thesis, Kumoh Natl Inst Tech.
- Kim, J.-S., Cho, M. (2011) A Novel Methodology of Improving Stress Prediction via Saint-Venant's Principle, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(2), pp.149~156.
- Jeong, Y.-M., Kim, J.-S. (2016) A Thermal Stress Improvement of Beam Structures via Saint-Venant Principle by Considering Out-of-plane Warping Functions, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29(3), pp.229~235.
- Kim, J.-S., Wang, K.W. (2010) Vibration Analysis of Composite Beams with End Effects Via the Formal Asymptotic Method, *ASME: J. Vib. Acoustics*, 132(4), pp.041003:1~8
- Kim, H., Kim, J.-S. (2013) A Rankine-Timoshenko-Vlasov Beam Theory for Anisotropic Composite Beams Via an Asymptotic Strain Energy Transformation, *Euro. J. Mech. A Solids*, 40, pp.131~138.

요 지

본 논문에서는 유한요소 자유진동해석을 수행하여 박판 보에서의 국소변형효과를 조사하였다. 자유진동해석은 단일셀 및 다중셀 박스보에 대해 수행하였으며, 풍력발전 블레이드를 가장 단순하게 모사할 수 있는 단일셀 박스보를 먼저 해석하였다. 셸요소 해석결과를 보요소 해석결과와 비교하여 보았을 때 박스 보의 박판 두께가 정확도에 매우 중요한 역할을 함을 확인하였다. 두께가 얇은 경우에는 셸의 국소변형(또는 셸 모드)이 주요하게 나타난 반면에 두꺼울 경우에는 전단변형의 효과가 크게 나타남을 알 수 있었다. 목이 있는 단일셀 박스보에서의 국소변형은 목 주위에 집중되어 나타남을 확인하였다. 마지막으로 실제 블레이드와 유사한 다중셀 테이퍼 보의 주파수 및 모드형상을 분석하였다. 보 요소 해석결과는 셸 요소 결과와 비교하여 약 5~7% 주파수 차이를 보였으며, 이는 보요소가 국소변형을 제대로 모사하지 못하기 때문이다. 특히 래그모드(lagwise mode)의 경우에는 단면의 분할 정도의 영향보다 국소변형의 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 국소변형, 풍력 블레이드, 박판 박스 보, 유한요소해석