

풍력발전기 블레이드 패브릭 스킨의 정적 유체-구조연성 해석에 관한 연구

안형주¹ · 배재성^{2,*} · 황재혁²

¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Static Fluid Structure Interaction Analysis of Wind Turbine Blade Skin Fabric

Hyung-ju An¹, Jae-sung Bae^{2,*} and Jai-hyuk Hwang²

¹Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School at KAU

²Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

This study analyzes the fabric skin of a wind turbine blade. The fabric skin is a membrane structure that was analyzed using a static Fluid Structure Interaction (FSI) method. For this study the blade of large 5 MW wind turbine was selected. In order to examine the validity of the analysis, a variety of reference data were used. Before conducting static FSI analysis, a Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis and modal analysis were done. Then interaction analysis was conducted. FSI analysis was done with imported Aerodynamic data that resulted from the CFD analysis. The resulting observations about the membrane structure, inherent tensions, deformation of the final structure, and aerodynamic forces caused by deformation are reported.

초 록

본 논문에서는 박막구조물 형태를 가진 풍력발전기 블레이드 패브릭스킨의 유체-구조연성해석을 수행하였다. 풍력발전기 블레이드는 5MW급의 중대형 풍력발전기로 선정하여 분석하였으며, 해석의 타당성을 높이기 위하여 다양한 참고문헌을 이용한 검증을 마쳤다. 본 해석에 앞서서, CFD해석과 모달해석을 나누어서 해석을 수행한 후 연성해석 진행하였다. CFD해석에서 나온 공기력 데이터를 장력으로 유지되는 박막구조물인 패브릭스킨에 적용시켜서 최종 구조물의 변형과 변형된 구조물로 인한 공기력의 변화를 확인하였다.

Key Words : FSI(유체-구조 연성해석), wind turbine blade(풍력발전기 블레이드), CFD(전산유체해석), membrane structure(박막 구조물), aerodynamic data(공기력 데이터)

1. 서 론

신재생 에너지는 현재나 향후 미래지향적인 관점에서 크게 대두되고 있는 에너지 기술인데, 많은 신재생에너지 중에 풍력발전 에너지와 태양열 에너지 등은 대중적으로 많이 알려져 있는 신재생 에너지이다.

그 중 풍력에너지의 경우 조금이라도 더 큰 에너지를 만들어 에너지 효율의 증대 및 전력기반시설 구축 등의 비용 절감을 통한 경제성 향상을 위해 매우 빠른 속도로 대형화가 되고 있다. 하지만 풍력 발전기가 대형화가 됨으로써 더 많은 에너지를 가져오는 장점이 있으나, 그에 따르는 단점도 따라오게 된다. 그에 따른 단점으로써는 대형 설계 및 제작으로 인한 Fig. 1과 같은 운송과 설치에 큰 어려움을 가지고 있다.

Received: Aug 10, 2016 Revised: Oct 16, 2016 Accepted: Oct 20, 2016

† Corresponding Author

Tel: +82-2-300-0102, E-mail: jsbae@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering



Fig. 1 Shipping of Wind turbine blade

따라서, 가볍고 비용이 적게 들며 크기에 제한을 받지 않는 새로운 대형 블레이드 설계/제작 기술의 개발이 필요하다고 판단하여, 패브릭 블레이드라는 새로운 설계 및 제작기술의 연구를 진행하였다. 패브릭 블레이드는 금속재질의 스파 및 리브를 사용하여 블레이드의 뼈대 구조를 구성하고 에어포일을 형상을 유지하기 위해 패브릭 계열의 소재를 덮는 구조를 가지는 블레이드 형상이다. 이러한 구조는 블레이드의 모든 하중을 스파가 담당하고, 패브릭은 약간의 비틀림 하중을 담당하게 된다. 그래서 기존의 블레이드 구조에 비해 구조부재 사용을 최소화하여 무게를 상당히 줄일 수가 있게 된다. 또한, 패브릭 블레이드 구조는 기존의 일체형 몰드 성형 방식과 달리 여러 부분으로 나누어진 구조부재로 스파를 구성하고, 리브를 체결하는 조립식이 가능하므로 설치와 이동적인 문제에도 매우 큰 장점이 있다. 이렇게 되면 블레이드의 경량화, 제조 공정 및 설치의 간략화까지 이룰 수 있게 된다.

본 연구의 연구동향 측면에서 풍력발전기 블레이드에 관한 FSI 해석은 풍력 터빈 블레이드 구조 건전성 평가 및 선형좌굴 해석을 통한 구조 안정성을 예측하고 날개의 변형, 그에 따른 최대응력이 발생하는 부분 예측등과 같은 다양한 방면으로 연성해석이 이루어지고 있었다[1-4].

본 논문에서는 블레이드의 스파와 리브로 구성되어 있는 구조물을 덮는 스킨의 막 재료의 물성치를 기인하여, 해석 전문 프로그램 Ansys Workbench를 사용하여 구조-유체 연성해석인 FSI 해석을 수행하였다. CFD와 구조적 해석을 실행을 한 뒤, 연성해석을 진행하였다. 실제 대상 모델의 해석에 앞서서 다양한 형상을 갖는 박막 구조물(membrane structure)의 모달 해

석 검증과 해석 대상으로 선정된 풍력 블레이드의 CFD 해석검증을 먼저 실행을 함으로써 경계조건 설정 등과 같은 해석의 타당성을 높이기 위해 충분한 검증을 먼저 이행 하였다. 이 해석으로써 블레이드가 설치되는 환경에 따라 바람의 속도를 유동장을 구성하여서, 인장력을 받아야만 굽힘 변형이 일어나는 박막 구조물의 물리적 변형을 보고, 그에 따른 변형을 통해 하중을 많이 받는 부분에 대해 분석하였다. 또한, 변형이 이루어진 막 구조물로 인하여 변형이 이루어지기 전과 이루어지기 후로 기준으로 삼아 공기력에 어떤 영향을 미치는지 공기력 데이터의 비교를 통해 확인하였다.

2. 해석의 타당성을 위한 검증

2.1 Square membrane 검증해석

본 연구에서 풍력발전기 블레이드 표면은 패브릭으로 제작이 되고, 그 특성상 박막형태의 구조(membrane structure)를 갖는다. 박막은 기본적으로 2차원 시스템이며 평형상태에서 평면을 유지한다. 박막에서 그 구조물 자체로는 굽힘을 지탱하지 못하므로 장력에 의해서만 복원력이 생긴다. 1차원 시스템에서 줄(String)과 비슷하다. 박막의 자유진동방정식은 식 (1)과 같다[13].

$$\tau \nabla^2 w(x, y, t) = \rho w_{tt}(x, y, t) \quad (1)$$

여기에서 τ 를 박막의 단위길이당 장력, ρ 를 박막의 단위면적당 질량이다. ∇^2 는 라플라스 연산자를 뜻하며, 라플라스 변환을 거쳐 좌표계를 가지는 박막의 진동방정식은 식 (2)와 같이 표현된다[13].

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (c = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}) \quad (2)$$

이에 따라서 기본 사각형 형태의 박막 구조물에 대한 모달해석 검증을 실시하였다.[5,6] 검증해석은 이후에 실시할 FSI 해석에서 사용할 패브릭 스킨 박막구조물의 경계 조건(boundary condition) 적용을 위해 실시하였으며, reference data에서 제시한 재료 물성

치는 Table 1 과 같다.

Table 1 Material property of square membrane

a,b	0.2 m
E	11.9 GPa
ρ	790 kg/m ³
t	0.0001 m
ν	0.3

Ansys Workbench Pre-stressed modal analysis 를 사용하여 수행하였다. 검증한 자료의 모우드 형상 과 고유진동수 비교는 아래의 Fig. 2 와 Table 2 과 같다.

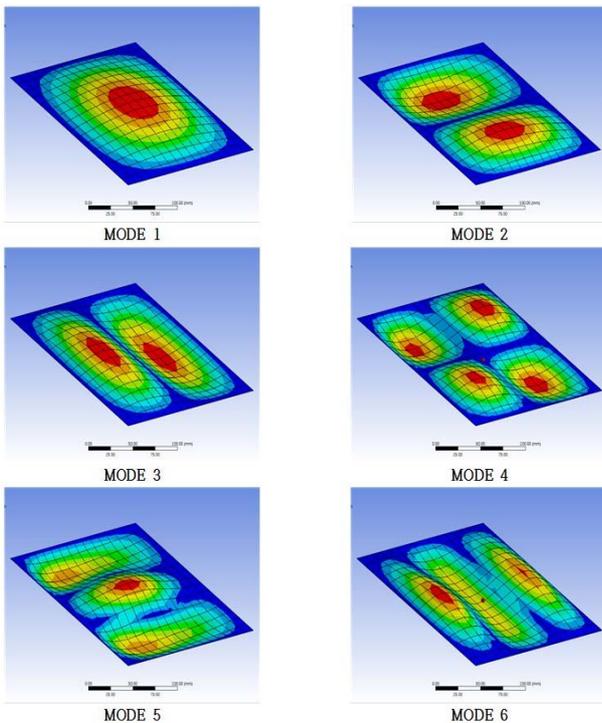


Fig. 2 Mode shape of square membrane

Table 2 Comparison of Natural frequency [Square membrane]

Prestress (N/m)	Natural Frequency(Hz) [Reference data] [5]	Natural Frequency(Hz) [Analytical data]
10	39.66	39.43
20	56.08	55.76
30	68.69	68.29
40	79.56	78.85
50	88.67	88.16

Figure 2 에서 볼 수 있듯이, 상용프로그램을 사용 해서 reference data와 모우드 형상을 비교하고, Table 2 에서는 장력의 세기에 따른 1차 모우드에 대한 고유진동수 비교확인을 통해 검증을 마쳤다.

2.2 곡률이 존재하는 Shell membrane 검증해석

풍력블레이드에 씌울 패브릭 스킨은 메인스파와 리어스파가 이어지는 부분에 부착이 되는데, 이는 곡률이 존재하는 형상이 된다. 그래서 평면이 아닌 3축의 변위를 가지는 곡률형상의 박막 구조물도 해석검증을 실시하였다[7]. reference data에서 제시한 재료 물성치와 형상은 Table 3, Fig. 3와 같으며, 검증해석은 평면 박막 해석과 같이 Ansys Workbench Pre-stressed modal analysis를 사용하여 수행하였다. 검증한 자료의 모우드 형상과 고유진동수 비교는 아래의 Fig. 4 와 Table 4 와 같다.

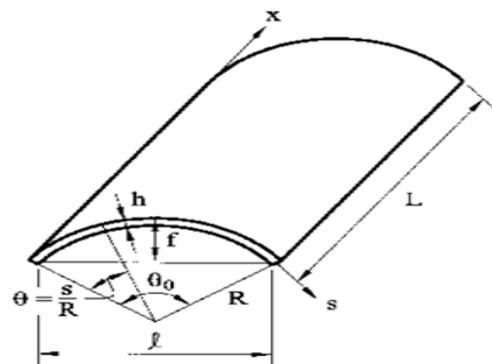
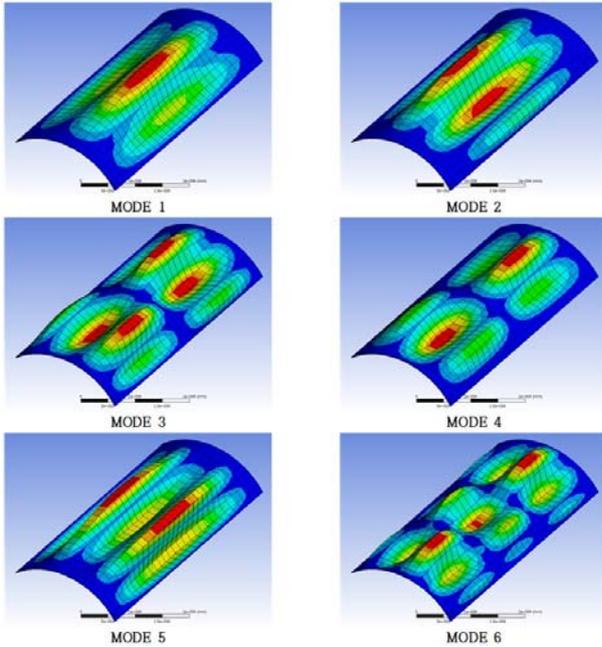


Fig. 3 Geometry of shell membrane

Table 3 Material property of shell membrane

L	55 m
l	21 m
f	5 m
R	15 m
H	0.1 m
θ_0	1.6 rad
E	6 GPa
ρ	$1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
ν	0

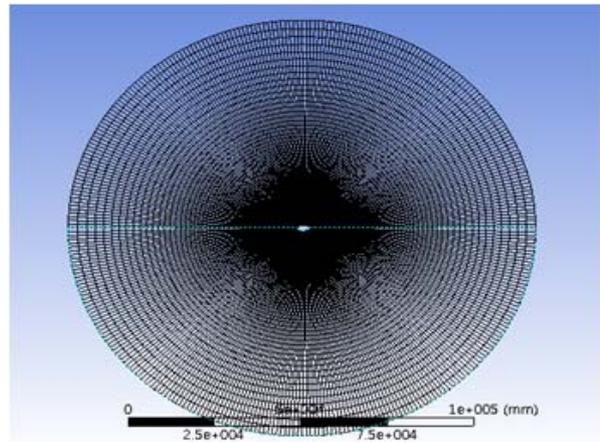
**Fig. 4** Mode shape of shell membrane**Table 4** Comparison of Natural frequency [Shell membrane]

Mode	Natural Frequency(Hz) [Reference data] [7]	Natural Frequency(Hz) [Analytical data]
1	2.34	2.26
2	2.34	2.52
3	3.52	3.38
4	3.52	3.77
5	4.47	4.44
6	4.47	4.57

Figure 4와 Table 4에서 보이는 바와 같이, 모드 형상과 고유진동수를 비교검증을 함으로써 오차율이 5%내로 일치함을 확인 할 수 있었다.

2.3 Wind turbine blade CFD 검증해석

디자인 모델로 선택한 NREL-5MW Wind turbine blade의 유동해석과 관련된 검증해석을 실시하였다.[8,9]. O-grid 유동장 형태를 디자인하고 격자형태는 계산시간이 빠르게 할 수 있는 장점을 이용한 비정렬격자가 아닌 정렬격자로 형성하였고 이에 대한 형태는 다음 Fig. 5와 같다. Ansys workbench cfx 프로그램을 사용하여 해석을 진행하였다.

**Fig. 5** O-grid mesh of NREL blade (full shot)

유동장의 크기는 날개 시위 길이를 기준으로 날개 길이 방향과 상,하 거리를 15배 만큼의 거리를 설정하여 유동이 안정 될 수 있도록 하였다. 외부에서 들어오는 유속은 속도로 하여 12.1 m/s로 설정하였으며, 양쪽 벽면은 벽면효과를 없애기 위하여 symmetry 효과를 주었다. 해석유동장의 절점의 개수는 총 368,742 개이며, 총 격자의 수는 330,000이다. 이때의 레이놀즈 수는 3.0×10^6 이다.

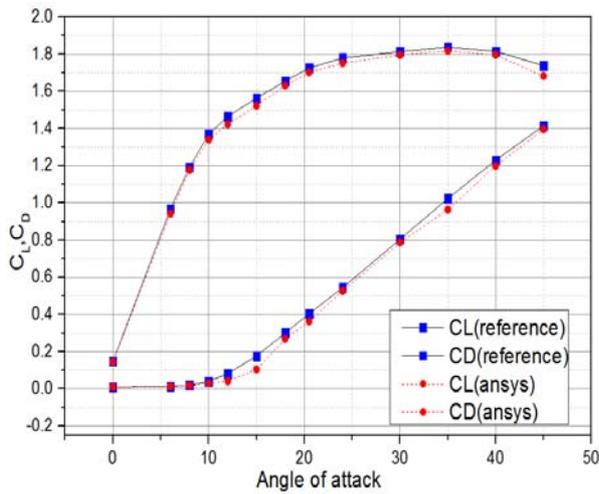


Fig. 6 Comparison of C_L, C_D data

Reference data에서 받음각에 대한 양력계수, 항력계수를 나타냄에 따라, 받음각 $0^\circ \sim 45^\circ$ 에 대한 공기력을 비교해 보았다. 이에 대한 비교 그래프는 아래의 Fig. 6와 같고, 보이는 바와 같이 오차율이 2%내로 결과값이 산출됨으로써 검증을 마쳤다.

3. Wind turbine blade FSI static analysis

3.1 Airfoil 설정 및 구조해석 경계조건 설정

Figure 7에서 보이는 NREL-5MW wind turbine blade 부분중에 DU₄₀ 부분을 선택을 하여 해석을 진행하였다. 에어포일의 형상은 메인 스파와 리어 스파가 이어지는 부분에 패브릭 스킨을 적용하여 Fig. 8과 같이 모델링을 도출하였다.

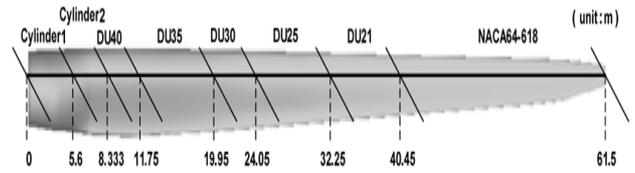


Fig. 7 Distributed airfoil types of the NREL-5MW wind turbine blade

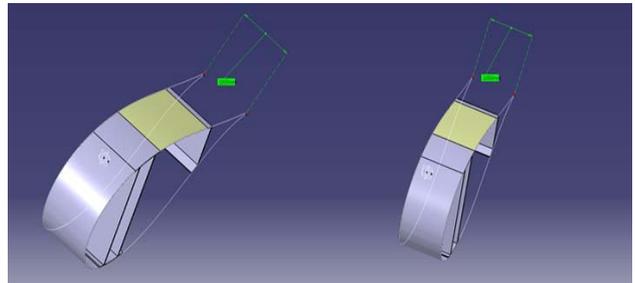


Fig. 8 DU₄₀ airfoil attached with fabric skin geometry

수정한 모델을 상용프로그램으로 데이터를 이동시킨 후, 앞서 검증한 박막 구조물의 경계조건을 적용시켰다. 스킨의 물성치는 평면 박막 구조물을 검증한 reference data의 물성치를 인용하였으며 박막의 두께는 0.6 mm로 변경설정 하였다. Fig. 9에서 보이는 바와 같이 정렬 격자를 이용하여 격자구성을 완료하고 스킨에 먼내 방향으로 적용한 장력은 10N 으로 임의로 설정하였으며 양 끝 Edge 부분은 단순 지지로 설정하였다.

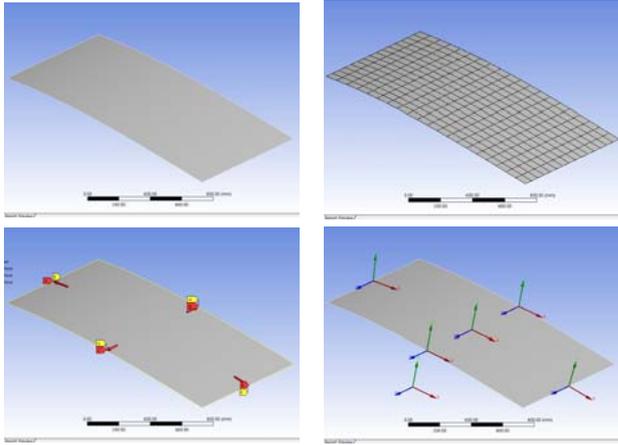


Fig. 9 Boundary condition setting of fabric skin

경계 조건 설정을 끝낸 후, 구조해석을 먼저 시행하게 되면 Fig. 10 와 같은 결과가 나오게 되는데 장력으로 인한 박막이 안쪽으로 들어가지는 형상이 나타나게 된다.[12] 실제 일어나는 변위는 0.06769 mm로 미소변위로 일어나게 된다는 것을 확인 할 수 있었다.

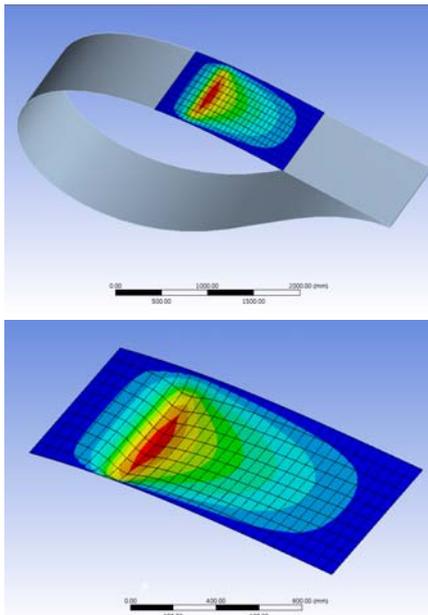


Fig. 10 Total deformation of fabric skin true scale(up), 8.0×10^2 X scale(down)

3.2 유동해석 경계조건 설정 및 결과

유동해석의 경우에는 앞서 NREL-5MW wind

turbine blade 검증해석을 한 유동장의 형태를 그대로 사용하였다. Fig. 11과 같이 정렬격자로 구성된 o-grid형태의 유동장을 모델링 하여 구성하였으며, 외부 far-field는 속도 조건으로 주어 풍력 블레이드의 평균 공기 유입 속도인 10 m/s 로 설정하였고, 양 쪽 벽면은 벽면효과를 없애기 위하여 symmetry 설정을 더하고 interface 설정으로 유동장이 펼쳐져서 맞물리는 격자들을 안정적으로 구성을 해주었다.

Figure 12에서와 같이 공기유량에 따른 받음각이 0° , 10° 일 때로 하여 유동해석을 진행하였으며 블레이드 주위에 일어나는 압력 분포는 이와 같았다.

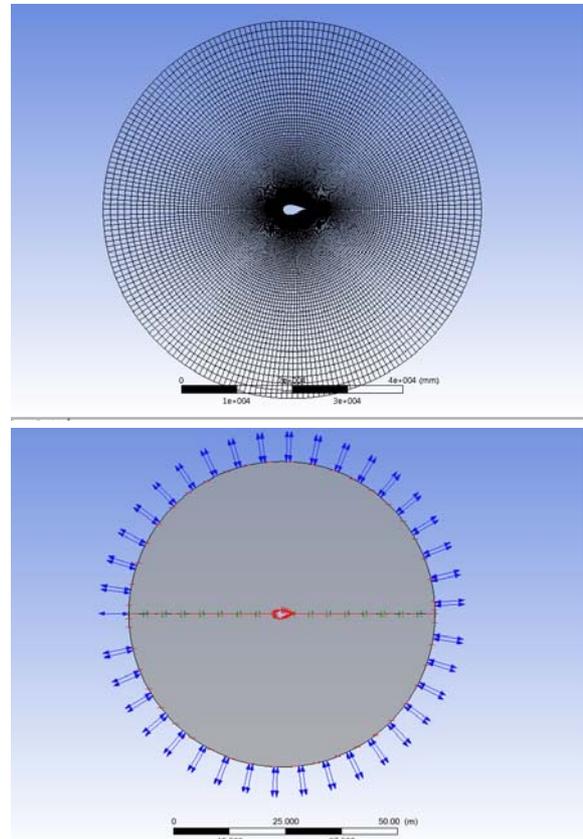


Fig. 11 O-grid mesh (up), boundary condition setting of CFD (down)

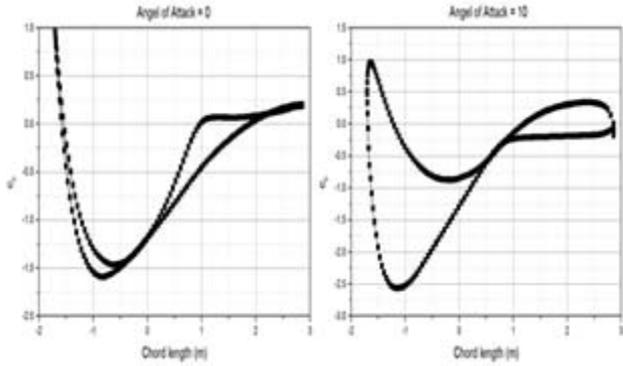


Fig. 12 Aerodynamic data about AOA[0°] (left) and AOA[10°] (right)

3.3 Static FSI analysis 설정 및 결과

앞 절에서 구조해석과 유동해석을 마친 결과를 토대로 하여 FSI 경계조건 설정을 진행하였다. Fig. 13 와 같이 유동해석을 통하여 블레이드에 영향을 주는 압력 분포를 구조해석을 한 결과에다 적용을 시키는 형태로 설정을 부여하였다.

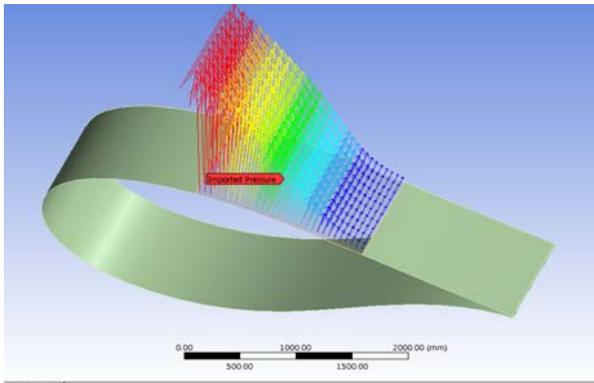


Fig. 13 Imported pressure from CFD to membrane structure

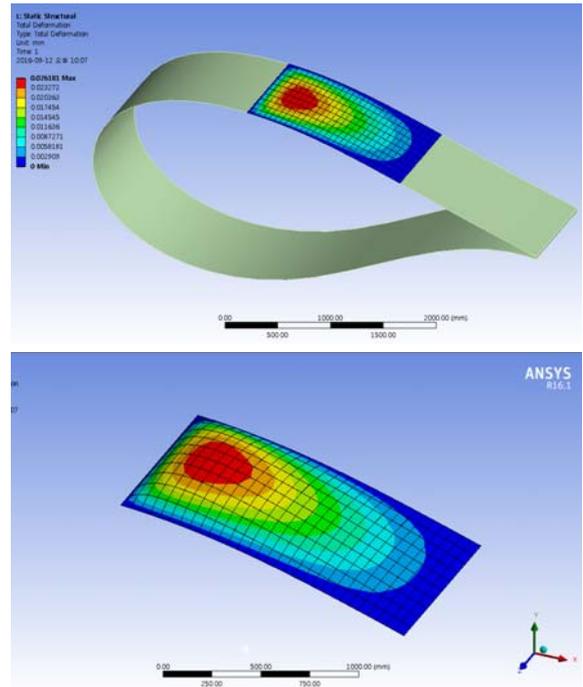


Fig. 14 Total deformation after FSI analysis AOA [0°]

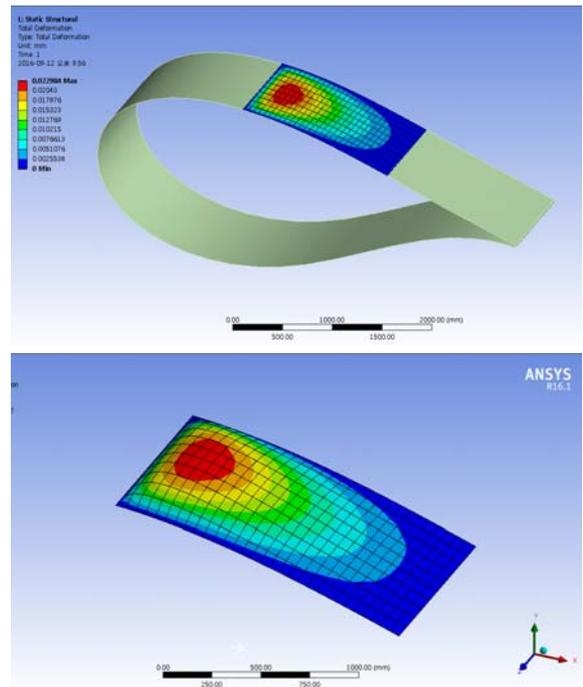


Fig. 15 Total deformation after FSI analysis AOA [10°]

경계조건 설정을 마치고 해석을 시행한 결과 Fig. 14, Fig. 15와 같이 받음각 0° , 10° 일 때 별로 패브릭 스킨의 최종 변형을 확인 할 수 있었다. 받음각이 0° 일 때는 0.26715 mm, 10° 일 때는 0.23551 mm로 미소한 변위가 일어났으며, 전체적인 형상은 유속에 의한 압력 분포로 인해 장력으로 박막이 안쪽이 들어가지는 형상에서 위로 부풀어 오르는 형상을 확인 할 수 있었다.

변형이 일어난 패브릭 스킨이 공기력에는 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여, 변형이 일어난 패브릭 스킨은 절점의 데이터를 분석하여 변형이 일어나기 전 구조물과 공기력 비교를 Fig. 16, Fig. 17에서 나타내고 양력계수와 항력계수 비교를 Table 5, Table 6 와 같이 비교하였다.

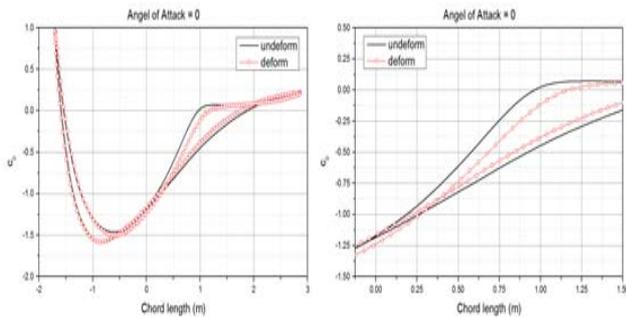


Fig. 16 Comparison of aerodynamic data AOA - 0° chord length(left), membrane part(right)

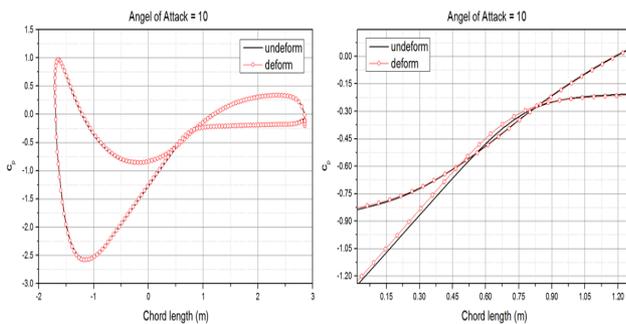


Fig. 17 Comparison of aerodynamic data AOA - 10° chord length(left), membrane part(right)

Table 5 Comparison of C_L , C_D [AOA - 0°]

	변형 전	변형 후	변화율(%)
C_L	0.1492	0.1338	10.32
C_D	0.0246	0.0239	2.85

AOA = 0°

Table 6 Comparison of C_L , C_D [AOA - 10°]

	변형 전	변형 후	변화율(%)
C_L	0.8048	0.8111	0.78
C_D	0.0502	0.0516	2.71

AOA = 10°

위의 Fig. 16, Fig. 17 과 Table 5, Table 6에서 보이는 바와 같이 패브릭스킨을 이용함으로써 일어난 변형으로 공기력의 변화와 양력계수 항력계수가 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 패브릭 스킨의 변형이 미소하게 일어남에 따라 공기력의 변화도 미세하게 변화하는 것을 확인 할 수 있는데, 받음각이 0° 일 때가 10° 일 때보다 변형량이 약간 더 큼에 따라 공기력의 변화도 좀 더 크게 나타나고 양력계수와 항력계수를 살펴보았을 때에도 0° 일 때는 감소하는 것을 확인 할 수 있으나, 10° 일 때 소폭 증가하는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 중대형 풍력 블레이드에서 메인 스파와 리어 스파가 이어지는 부분의 패브릭 스킨을 덮어 씌웠을 때 유동이 흐르는 상태에서 구조적인 변형이 어떻게 일어나며, 그에 따른 공기력의 변화가 어떻게 일어나는지에 대해 FSI 방법을 이용한 해석을 수행하였다. 실험을 수행하지 않고 오로지 해석으로써 연구를 수행해야 함에 따라, 다양한 reference data를 기반으로 하여 패브릭의 재료적인 측면인 박막 구조물(membrane structure)의 다양한 형태에 대해 알아보고 면내방향으로 작용하는 장력만으로 지지가 가능한 박막의 성질을 경계조건에 관한 타당성을 근거 있게 제시하기 위해 검증해석에 제일 먼저 초점을 두고 수

행하였다. 여러 가지 형태의 박막의 모달해석을 통한 검증 뿐만 아니라, 유동해석(CFD) 에서도 기반으로 잡은 모델의 reference data 따라 유동장을 재설정하고 경계조건을 설정한 검증해석을 통해 비교를 하여 해석을 수행하였다.

FSI 해석을 통하여, 풍력 블레이드에 씌울 패브릭 스킨은 변형이 발생하긴 하지만 그 변형량이 블레이드의 총 날개시위 길이 대비 변위가 매우 미소하게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 18에서와 같이 받음각이 0° 일 때보다 10°일 때에는 유동이 블레이드가 통과하고 나서 후류부분에 일어나는 유동박리 현상 때문에 블레이드 내부는 대기압과 같고 외부와의 압력차가 크게 일어나지 않아 스킨의 변형량이 0° 대비 더 작게 일어나고 공기력의 변화도 더 적은 것으로 판단되었다.

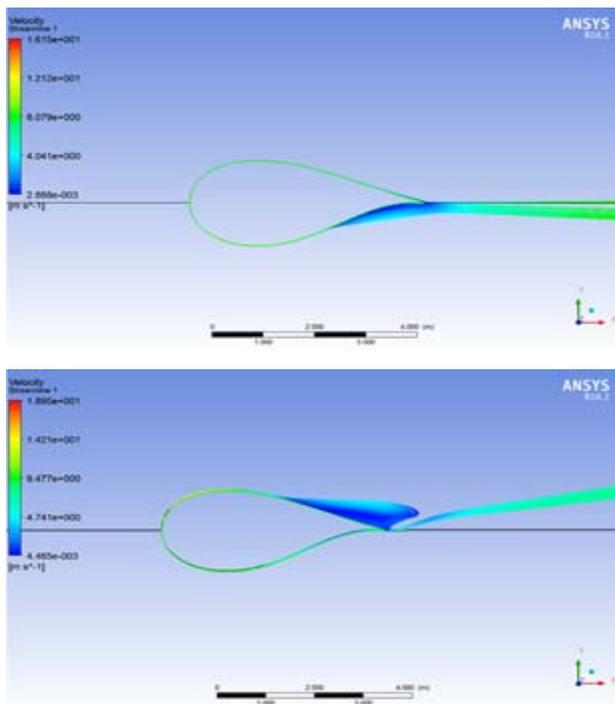


Fig. 18 Flow separation about AOA [0°] (up), AOA[10°] (down)

그러나 총 스킨의 변형량과 공기력 데이터의 변화량은 미소하게 변화함에 따라 해석을 수행한 유속 10m/s 에서는 블레이드 성능 문제에 이상이 없어 보이지만, 다양한 환경에서 회전하는 운용조건 및 극한 풍속 상태인 40m/s 이상인 유동상태를 고려하여 연구

를 수행을 필요로 한다.

또한 오로지 해석적인 측면에서 연구를 진행했기 때문에 실제 크기의 실험은 힘들겠지만, 축소 설계한 prototype을 이용한 실험은 필요한 것으로 생각된다. 또한 현재까지 정적인 측면에서 FSI 해석을 수행을 하였지만, 인용한 물성치보다 실제 사용할 패브릭단면의 강성이 더 작아서 변형량이 더 많이 일어날 것이라고 예상이 되어서 동적인 측면을 이용한 해석을 추후에 수행을 하게 되면 패브릭 스킨을 이용하는 풍력발전기 블레이드 성능에 어떠한 영향을 주는지에 대한 좀 더 정확한 판단이 예상된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 에너지기술개발사업의 연구비 지원 (No.20143030021130) 및 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 지원(No.2015M1A3A3A02027479)을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- [1] Bum-suk Kim, Ding-hwa Lee, Jong-hyun Jeong, Kang-su Lee, Mann-eung Kim “Design of a 2MW Blade for HAWT and Uni-directional Fluid Structure Interaction Simulation“, The Korean Society of Mechanical Engineers 2009.5, pp 94-99.
- [2] Woo-seok Cho, Young-Do Choi, Hyun-su Kim, “Fluid-structure interaction analysis on a low speed 200 W-class gyromill type vertical axis wind turbine rotor blade”, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 37-4 , 2013.5 , pp 344~350.
- [3] Yun Gi Kim, Kyung Chun Kim, “FSI analysis on wind turbine blade”, The Korean Society of Mechanical Engineers, 2007.5, pp 2368-2371.
- [4] Se Wan Park, Sunho Park, Shin Hyung Rhee, “Fluid-Structure Interaction Analysis for Open Water Performance of 100 kW Horizontal Tidal Stream Turbine”, The Korean Society for Marine Environment & Ener

- gy 17(1), 2014.2, pp 20-26.
- [5] S. Kukathasan and S. Pellegrino, "Vibration of Prestressed Membrane Reflectors", European Space Agency Contractor Report, page 6-12.
- [6] H.Ersoy, O.Civalek, L.Ozpolat, "Free vibration analysis of rectangular membranes with variable density using the discrete singular convolution approach", *asian journal of civil engineering (building and housing)* vol.11, no.1 (2010), pages 83-94
- [7] Eduard Ventsel Theodor Krauthammer, "Thin Plates and Shells Theory, Analysis, and Applications"(2001), The Pennsylvania state university park, Pennsylvania, page 613 - 621
- [8] Min-Soo Jeong , In Lee , Seung-Jae Yoo and Kwang-Choon Park, "Torsional Stiffness Effects on the Dynamic Stability of a Horizontal Axis Wind Turbine Blade", *Energies* 2013, 6, 2242-2261
- [9] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, "Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development", NREL Technical report/TP_500_38060, 2009.2
- [10] Ayyoob zarmehri, "Aerodynamic analysis of wind turbine", chalmers university of technology, gothenburg, sweden(2012)
- [11] F. Y. M. Wan, "Membrane and bending stresses in shallow spherical shells", *Int. J. solids structures*, 1967, vol. 3, pp 353-366
- [12] Romualdo Rivera, "Membrane Structures, First Steps towards Form Finding", Lecturer at Tensile Structures Education
- [13] Danial J. Inman, Jae-hyuk Hwang, Gun-bok lee, Tae-gun Jeong Byung-duk lim, Chan-woo An, "Engineering Vibration 3rd edition", pearson education korea (2009)
- [14] Hyeongsun Cho, Jae-Sung Bae, Sooyoung Lee, "Review of Test Methods for Fabric Skin Properties of Fabric-Covered Wind Turbine Blade", *Journal of aerospace system engineering*, Vol.9, No.3, pp.31-38, September, 2015
- [15] Mingyu Kang, Dongjin Park, Seoksoon Lee, "The Study of Aerodynamic about High-speed projectiles using Fluid Structure Interaction analysis", *Journal of aerospace system engineering*, Vol.6, No.4, pp.12-17, December, 2012