

10 MW급 복합재 풍력 블레이드의 굽힘-비틀림 커플링 거동 연구

김수현* · 신형기** · 방형준*†

Bend-Twist Coupling Behavior of 10 MW Composite Wind Blade

Soo-Hyun Kim*, Hyunki Shin**, Hyung-Joon Bang*†

ABSTRACT: In this study, a structural optimal design of 10 MW composite blade was performed using bend-twist coupled(BTC) design concept. Bend-twist coupling of blade means the coupling behavior between the bending and torsional deflections due to the composite lamina with fiber angle biased from the blade longitudinal axis. This can potentially improve the overall performance of composite blade and reduce the dynamic loading. Parametric studies on layup angle, thickness and area of off-axis carbon UD were conducted to find the optimum coupling effect with weight reduction. Comparing the results of fatigue load analysis between conventional model and BTC applied model, the damage equivalent load(DEL) of blade root area were decreased about 3% in BTC model. To verify the BTC effect experimentally, a 1:29 scaled model was fabricated and the torsion at the tip under deflection behavior of blade stiffener model was measured by static load test.

초 록: 본 연구에서는 굽힘-비틀림 커플링(bend-twist coupled, BTC) 설계개념을 적용한 10 MW급 복합재 풍력 블레이드의 구조 최적 설계를 수행하였다. BTC 설계개념은 동적 하중 상황에서 블레이드의 굽힘과 비틀림 거동 사이의 연동을 유도하여, 단면 받음각 변화에 의한 수동적인 적응 하중저감이 가능하다. 인자연구를 통해 최적의 BTC 설계인자를 추출하여 블레이드 구조설계에 적용하였다. BTC 개념이 동적 하중 감소에 미치는 영향을 가늠하기 위해 블레이드 루트 부에서의 피로등가하중을 계산한 결과, BTC 개념이 적용된 블레이드를 적용한 경우 피로등가하중이 2-3% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. BTC 효과를 시험적으로 검증하기 위해 1:29 비율의 블레이드 stiffener 축소모델을 제작하였으며, 정하중 시험을 통해 처짐 거동 시 끝단에서의 비틀림을 측정하였다.

Key Words: 복합재 블레이드(Composite blade), 풍력발전기(Wind turbine), 굽힘-비틀림 연성(Bend-twist coupled), 피로등가하중(Damage equivalent load), 축소모델(Scaled model)

1. 서 론

전 세계적으로 풍력발전기 시장이 확대되고 설계기술이 발전하면서 발전기의 정격출력 용량뿐만 아니라 블레이드의 길이 역시 지속적으로 증가하는 추세로, 최근 상용화되기 시작한 6-7 MW 터빈의 블레이드 길이는 80 m에 이른다. 블레이드의 공력 및 구조 특성은 풍력발전기 시스템의

전반적인 설계하중에 가장 큰 영향을 미치므로, 최적화를 통한 블레이드의 경량화는 기어박스 및 구동부, 타워와 같은 주요 구성품의 구조 안전성과 가격을 결정하는 주요 설계 목표가 된다[1,2].

블레이드의 주요 재료인 섬유강화 복합재료는 구조 경량화를 가능하게 하는 높은 비강성과 비강도라는 주요한 장점 외에도, 적층 각과 패턴을 조절해 원하는 물성으로 최적

Received 30 November 2016, received in revised form 16 December 2016, accepted 22 December 2016

*Korea Institute of Energy Research, Convergence Materials Laboratory

*†Korea Institute of Energy Research, Convergence Materials Laboratory, Corresponding author (E-mail: bang@kier.re.kr)

**Korea Institute of Energy Research, Thermal Energy Conversion Laboratory

화가 가능하다는 특성을 지니고 있다. 특히 블레이드의 적층 각 혹은 3차원적 형상을 이용한 단면 물성의 커플링(coupling) 개념은 아직 상용적으로 적용되지는 않고 있으나, 그 잠재적인 가능성과 이점에 대해서는 최근 활발히 연구되고 있다[3-5]. 굽힘-비틀림 커플링(bend-twist coupled, BTC) 설계는 동적 하중 상황에서 블레이드의 굽힘과 비틀림 거동 사이의 연동을 유도하는 설계 개념이다. 이를 통해 풍속이 순간적으로 변하는 돌풍(gust) 상황에서 블레이드의 휘어짐에 따라 단면의 받음각이 의도하는 만큼 변화하도록 하는 수동적인 적응 하중저감(adaptive load reduction) 설계를 통해, 블레이드의 피로하중과 같은 동적 하중을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 10 MW급 복합재 풍력 블레이드 설계를 위해 blunt root 형상개념을 구현하고 최적화된 BTC 설계 인자 연구를 적용하여, 투영 단면적당 질량 95.09 kg/m^2 , 총 질량 40.6 ton의 경량 구조 설계를 달성하였다. 피로하중계산을 통해 BTC 개념이 동적 하중 감소에 미치는 영향을 가늠하였으며, 블레이드 stiffener 축소모델을 제작하여 BTC 효과를 시험적으로 검증하였다.

2. 10 MW 블레이드 모델

2.1 블레이드 설계 사양

풍력 블레이드의 설계 과정에 있어 설계하중의 예측은 가장 중요한 요소 중에 하나이므로, 이를 위해서는 목표로 하는 풍력발전기 시스템 모델을 최대한 현실적으로 구성하는 것이 요구된다. 본 연구에서는 대형 해상풍력발전용으로 이미 상용화에 성공한 5-7 MW급을 넘어 미국의 Sandia National Laboratories(SNL)[6,7], 덴마크 Technical University of Denmark(DTU)[8,9]와 같은 선진 연구기관에서 현재 개념연구가 진행되고 있는 10 MW급 풍력발전시스템을 위한 블레이드의 설계를 목표로 삼았다. 이를 위해 지금까지 공개된 5-7 MW급 상용 시스템에 대한 자료와, 선행연구를 통해 자체적으로 개념설계를 수행한 7 MW 시스템 모델을 기반으로 scale-up 연구를 통해 10 MW급 풍력발전시스템 및 블레이드의 사양을 Table 1과 같이 결정하였다.

지금까지 개발된 대형 풍력발전 시스템의 정격용량 및

블레이드 크기에 대한 추세선 분석을 기반으로, 본 연구에서 목표로 하는 10 MW급 블레이드의 설계 로터 직경을 176 m로 결정하였다. 그리고 블레이드 팁 속도 제한을 92 m/s 로 가정하여 약 10 rpm에서 정격 출력을 얻을 수 있음을 예측하였다. 또한 국내외 주요 제작사들이 설계한 해상용 대형 블레이드의 설계등급을 분석하여, IEC 국제규격[10]에 정의된 class IB로 설계등급을 정하였다.

그리고 최근 SNL에서 수행한 100 m 블레이드의 연구 결과[11]에 따르면 로터 직경 176 m의 경우 블레이드의 무게는 대략 37~50 ton 범위를 가질 것으로 예상되므로, 본 연구에서는 도전적으로 41 ton의 설계 무게를 목표로 잡고 저하중-경량화 방향으로 설계를 진행하였다.

2.2 블레이드 형상 설계

10 MW급 복합재 블레이드의 외형 설계를 위해 플랫폼(flatback) 에어포일을 적용한 blunt root 형상개념이 적용되었다. 플랫폼 에어포일은 뒷전(trailing edge, TE)에서의 두께가 코드 길이 10% 정도 되도록 설계되어, 기존의 에어포일에 비해 동일한 두께비에서 단면 면적이 20% 정도 증가하므로, 블레이드 inboard 영역에서 구조 강성 측면에서의 장점을 지니게 된다[12,13]. 본 연구의 블레이드 설계에서는 45~35% 두께비 위치에 한국에너지기술연구원에서 자체적으로 개발한 플랫폼 에어포일을 적용하였고[14], 나머지 18~30%의 두께비 위치에는 일반적으로 많이 사용되는 DU와 NACA 에어포일을 적용하였으며 각각의 단면 형상은 Fig. 1과 같다.

2.3 블레이드 구조 설계

10 MW급 복합재 블레이드에는 unidirectional lamina(UD), bi-axial woven fabric(2AX), 그리고 tri-axial woven fabric(3AX45, 3AX60) 복합재료가 사용되었다. 블레이드 구조는 기본적으로 Balsa wood 및 PVC 코어를 사용한 샌드위치 타입의 스킨과, 높은 강성의 카본 UD가 적용된 스파캡(sparcap)과 전단웹(shearweb)으로 구성된 박스 스파 형태의 개념이

Table 1. Design parameters of 10 MW blade

Parameters	Specifications	Units
Rated Power	10.0	MW
IEC Wind Class	IEC class IB	-
Rotor Diameter	176.0	m
Blade length	85.5	m
Root Diameter	5.0	m
Design TSR	8	-
Pre-bend	3.35	m

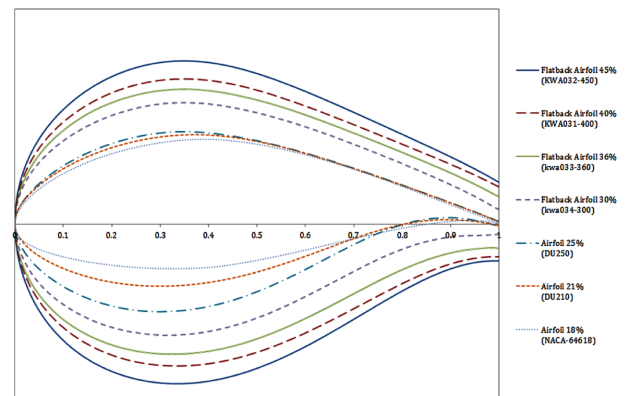
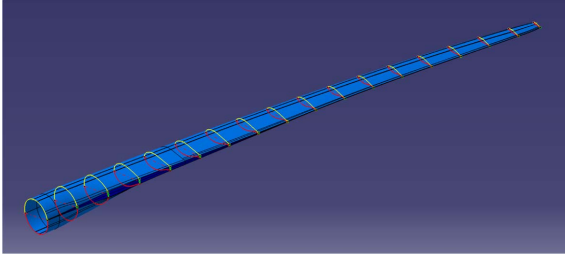


Fig. 1. Airfoil geometric shapes used for 100 MW blade model

Table 2. Mechanical properties of composite materials

Mechanical property	Unit	Carbon UD	2AX	3AX45	3AX60
E_1	GPa	147	120	29.4	32.6
E_2	GPa	13.4	120	15.1	12.0
G_{12}	GPa	7.61	11.0	7.10	6.16
ν_{12}	-	0.34	0.55	0.43	0.54

**Fig. 2.** 3D shape of 10 MW Blade**Fig. 3.** FE mesh model for structural analysis

적용되었다. 설계단계에서의 물성확보를 위해 일방향탄소 섬유 및 유리섬유 직조 시편에 대해 1,2방향 인장시험 및 전단시험을 수행하였으며, 각 재료별 기계적 물성을 Table 2에 나타내었다.

블레이드 대형화에 따른 좌굴 문제의 해결을 위해 별도의 스파 구조를 적용하는 대신, Fig. 2와 같이 뒷전(trailing edge, TE) UD 적층 및 루트부 천이 구간까지 적용된 플랫폼 에어포일을 통해 뒷전 부분을 하중 분산 구조로 활용하는 개념을 적용하였다.

블레이드의 거동을 분석하고 구조해석을 수행하기 위해 3차원 유한요소(finite element, FE) 해석모델을 Fig. 3과 같이 구성하였다. 블레이드의 3D 모델링을 위해서는 CATIA를 사용하였으며, 상용 FE 해석코드인 ABAQUS를 사용하여 구조해석을 수행하였다. 요소수렴시험(Mesh convergence test)를 통해 요소의 크기는 대략 100 mm로 결정하였으며, 2D 쉘요소를 사용하여 115,849개의 노드와 118,104개의 요소로 구성되었다.

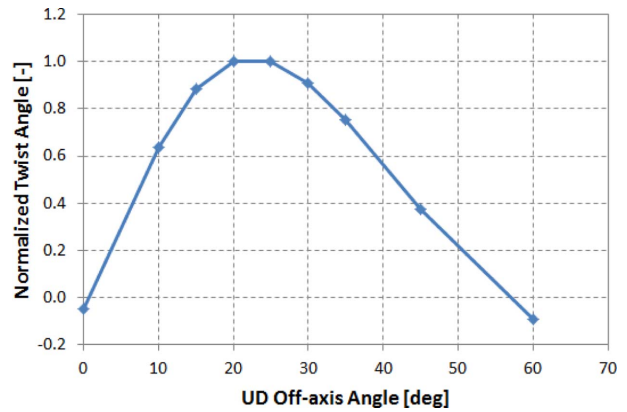
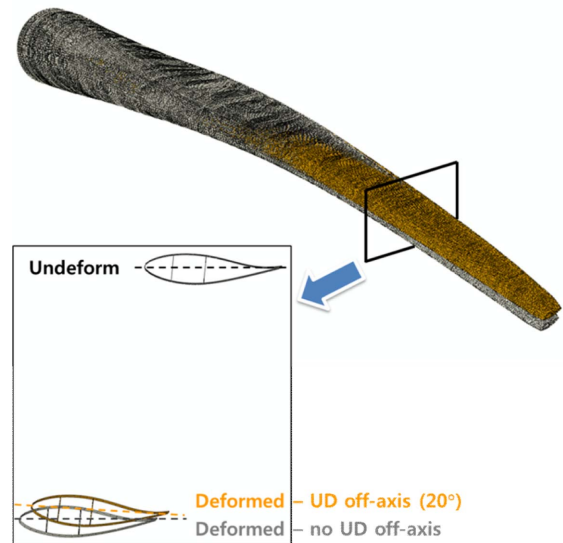
3. BTC 기반 블레이드 구조설계

3.1 BTC 설계인자 연구

굽힘-비틀림 커플링 개념은 블레이드 외곽 스킨에 경사

축(off-axis) 적층된 카본 UD층을 적용하여 블레이드의 굽힘에 따른 비틀림 연성 현상을 유도하는 것으로, 돌풍 상황에서 블레이드 단면의 받음각을 하중을 감소시키는 방향으로 변화시키는 것이 목적이다. 이러한 BTC 개념을 10 MW 블레이드에 적용하기 위한 사전연구를 위해, 11 m/s의 정격 풍속 상황에서 경사축 UD층의 적층각도, 두께 및 적층영역 등의 인자연구를 수행하여, 각각의 설계 변수가 블레이드의 변형 후 비틀림각에 미치는 영향을 파악하였다.

경사축 UD 적층은 무게대비 최적의 커플링 효과를 얻을 수 있도록 최대 코드 지점에서 끝단까지의 영역에 국한하였다. 그리고 코드길이 방향으로의 적층 영역에 따른 영향을 분석하기 위해, 앞전(leading edge, LE)에서 스파까지는 제외하고 적층된 case 1과, LE부터 TE까지를 전부 덮는 case 2의 두 가지 경우를 해석하여 비교하였다. 그 결과 case 2의 경우 case 1에 비해 추가적인 무게증가가 상대적으로 크나

**Fig. 4.** Twist angle after bending deformation by the off-axis angle**Fig. 5.** Deformation results of FE analysis model w.r.t. off-axis angle

그에 비해 비틀림 계수의 증가가 훨씬 높아 더욱 효과적임을 확인하였다.

경사축 UD층의 적층 각에 따른 영향을 분석하기 위해, 적층 각을 0도에서 60도까지 변화하며 변형 후 블레이드 끝단의 비틀림 거동을 비교하였다. 그 결과 Fig. 4와 같이 적층각이 20도에서 25도일 때 최대의 비틀림 각을 보임을 확인하였다. 또한 경사축 UD의 적층 수를 늘려 두께를 증가시켜도 비틀림 거동이 증가하나, 경사축 UD의 면적을 증가하는 방법에 비해 커플링 효과는 상대적으로 낮고 무게가 증가하는 단점이 있어, 경사축 적층각 20도의 카본 UD 1장을 case 2 영역에 적용하는 것으로 결정하여 이를 블레이드 구조 설계에 반영하였다(Fig. 5).

3.2 BTC 블레이드의 피로하중해석

위와 같이 BTC 개념 적용으로 인한 동적 하중의 감소 영향을 확인하기 위해, BTC를 적용한 블레이드와 적용하지 않은 블레이드 모델(baseline)을 구성하여 피로하중의 변화를 비교하였다. 각 블레이드에서의 굽힘-비틀림 커플링 계수는 VABS[15] 코드를 사용하여 주요 지점에서의 단면물성을 추출하여 적용하였다. 하중해석을 위한 풍력발전기 시스템의 모델링에는 상용프로그램인 Bladed를 사용하였으며, IEC 및 GL guideline[16]에 지정된 하중해석 절차에 따라 20년주기 피로하중 해석을 수행하였다. 풍력 블레이드의 설계수명 동안의 피로하중을 나타내기 위해서는 위에서와 같이 계산된 변동 하중을 rain flow cycling counting (RFCC) 방법을 통해 특정한 크기 및 반복횟수를 지니는 개별적인 하중 사이클로 변환하여 계산하게 된다. 이렇게 계산된 하중 주기를 Miner' rule에 의해 피로 누적에 의한 손상 정도를 대표적으로 표현할 수 있는 지표로 나타내는 것이 피로등가하중(damage equivalent load, DEL)이다[17,18].

본 연구에서는 블레이드 루트 부에서 flapwise 및 edgewise 방향의 피로등가하중을 계산하였으며, RFCC 계산 시 재료물성에 의해 결정되는 S-N curve slope 인자 값은 유리섬유

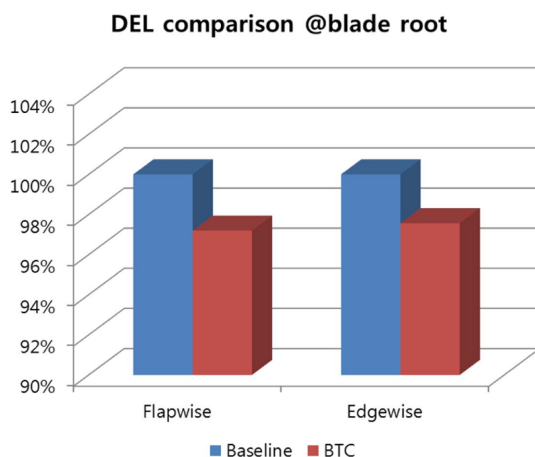


Fig. 6. Comparison of blade DEL according to BTC application

복합재료를 대표하는 값인 10으로 설정하였다[16]. BTC 설계 개념의 적용 여부에 따른 피로등가하중의 비교 결과를 Fig. 6에 나타내었다. BTC 개념이 적용된 블레이드를 적용한 경우 적용하지 않은 경우에 비해 flapwise 방향의 피로등가하중은 2.8%, edgewise 방향 피로등가하중은 2.4% 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

일반적인 대형 블레이드의 설계하중을 평가함에 있어 피로하중은 5% 내외의 매우 근접한 여유마진을 가짐을 감안하면, 이러한 피로하중 감소는 블레이드의 저하중 및 경량화 설계에 매우 긍정적인 영향을 미친다고 판단할 수 있다.

4. 블레이드 축소모델 시험

4.1 시험장치 구성

블레이드 외곽 스킨의 경사축 적층에 의한 BTC 효과를 시험적으로 검증하기 위해, 설계된 10 MW 블레이드의 축소모델을 제작하였다. 축소 비율은 1:29로 하여 전체길이 2870 mm이고 루트 체결부의 폭은 100 mm이다. 블레이드의 최대 코드길이 위치에 해당하는 510 mm 위치부터 끝단까지는 10 MW 모델과 동일한 형상을 지니며, 루트 부는 구조 강도와 체결 지그 형상을 고려하여 형상을 설계하였다. 비틀림 거동을 보다 명확히 구현하고 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 LE 및 TE 부분을 제외한 열린 단면을 갖는 보강재(stiffener) 형상의 축소모델로 구성하였다.

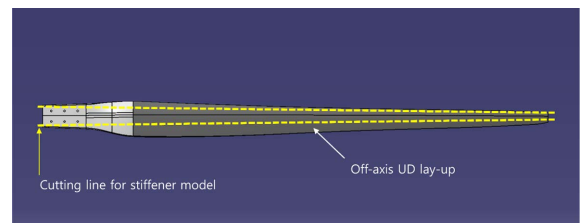


Fig. 7. Shape of blade stiffener scaled model

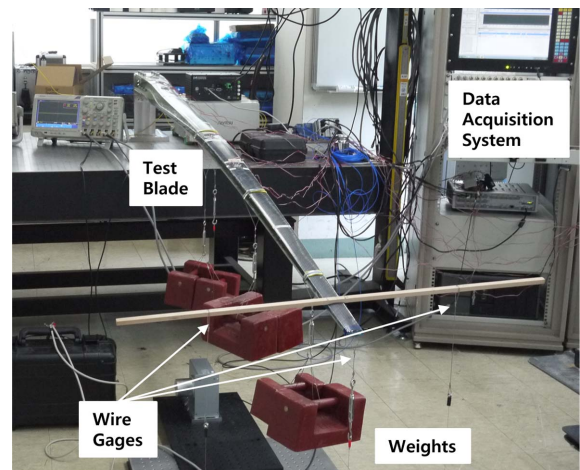


Fig. 8. Configuration of BTC static load experiment

스킨 및 웹에는 $[\pm 45]$ 의 biaxial 유리섬유 복합재를 적용하였으며, 최대 코드길이 위치에서부터 끝단까지의 스킨 최외곽에 20도로 경사축 적층된 탄소섬유 UD층을 1장 적용하여 제작하였다. 제작된 축소모델의 길이방향으로 중간 및 끝단 지점에 처짐량과 비틀림량을 측정하기 위한 Wire-gage를 설치하였으며, 무게 추를 이용한 정하중 상황하에서의 변형률을 측정하기 위한 시스템을 Fig. 8과 같이 구축하였다.

4.2 시험 결과

제작된 축소모델의 검증을 위해 FE 해석모델을 구성하여 정하중 상황에서의 변형률을 비교하였다. Fig. 9과 같이 블레이드 길이의 55, 70, 90% 위치에 각각 196, 196, 147 N의 정하중을 인가하였다. 그리고 축소모델 상부 스킨의 중심선을 따라 길이방향으로 5곳에 부착한 변형률 게이지를 통해 변형률을 측정한 후, Fig. 10과 같이 동일한 위치에서의 해석결과와 비교하였다. 측정 위치에 따라 다소 차이를 보이나, 최대 오차 8.6% 내에서 제작된 축소모델과 해석모델이 동일한 변형률 분포를 보임을 확인하였다.

블레이드 보강재 축소모델에 대해 flapwise 및 edgewise 방향에 대해 각각 impact modal 시험을 수행하였다. 6개의 1축 가속도계를 축소모델의 상하 면에 설치하였고, Fig. 11와 같이 모드형상 및 고유진동수 측정하였다. 시험결과와 검증에 의해 앞서 구성한 ABAQUS FE 해석모델을 활용하여 Ritz 방법에 의해 고유진동수를 추출하였다. Table 3에서

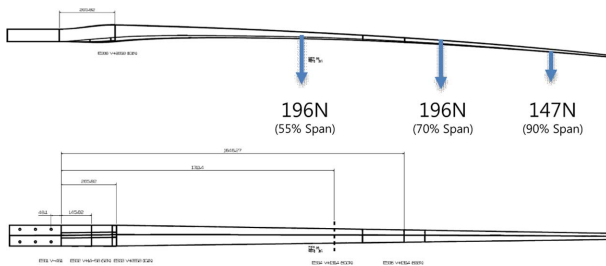


Fig. 9. Loading position of blade stiffener scaled model

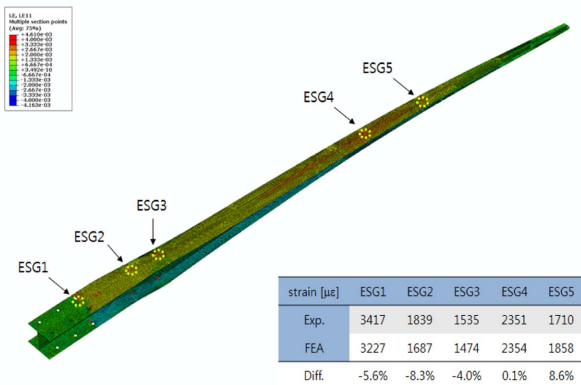


Fig. 10. Strain results on the strain gage (ESG) points

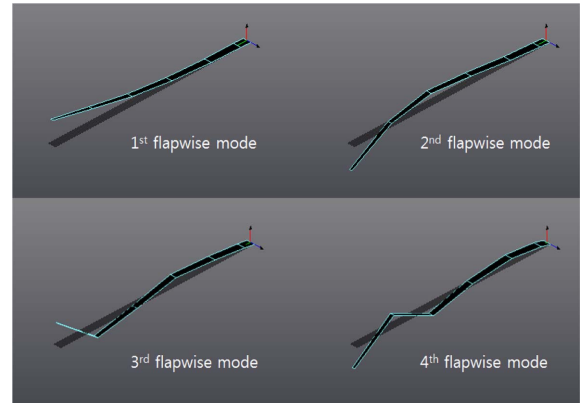


Fig. 11. Mode shape of scaled model in flapwise direction

Table 3. Design parameters of 10 MW blade

Mode	Experiment Freq. (Hz)	FE analysis Freq. (Hz)	Diff. (%)
1 st Edgewise	7.642	7.754	-1.5
1 st Flapwise	8.619	8.516	1.2
2 nd Flapwise	25.448	25.368	0.3
2 nd Edgewise	26.669	26.633	0.1

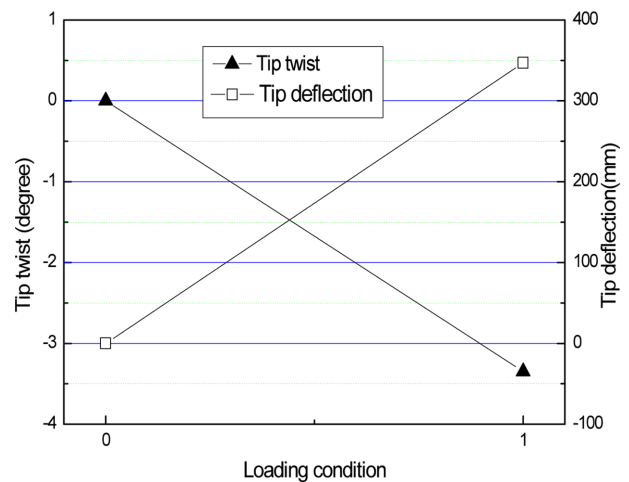


Fig. 12. Twist and bending deflection result of BTC static load experiment

확인할 수 있듯, 최대 1.5%의 오차 안에서 두 결과가 정확히 일치함을 확인하였다.

축소모델의 BTC 거동을 검증하기 위해, 앞서 정하중 검증시험과 동일한 하중을 부과하고, 길이 방향 95% 위치에 설치한 2개의 선형변위계를 통해 끝단에서의 비틀림을 측정하였다. 하중이 주어지기 전후의 끝단에서의 비틀림 각도와 처짐량 값을 Fig. 12에 나타내었다. 시험 결과 축소모델의 끝단에서 347 mm의 처짐이 발생할 때 3.35도의 비틀림 각도가 형성됨을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 BTC 설계개념을 적용한 10 MW급 복합재 풍력 블레이드의 구조 최적 설계를 수행하였다. 10 MW급 복합재 블레이드의 외형 설계를 위해 자체적으로 개발한 45~35% 두께비의 플랫폼 에어포일을 적용한 적용한 blunt root 형상개념을 적용하였다.

BTC 개념을 블레이드 설계에 적용하기 위해, 경사축 UD 층의 적층각도, 두께 및 적층영역 등의 설계 변수가 블레이드의 변형 후 비틀림각에 미치는 영향을 파악하는 인자연구를 수행하였다. 이를 통해 경사축 적층각 20도의 카본 UD 1장을 최대 코드 지점에서 끝단까지의 영역에 전부 적용하여 블레이드 구조 설계에 반영하였다.

BTC 개념이 동적 하중 감소에 미치는 영향을 가늠하기 위해 블레이드 루트 부에서의 피로등가하중을 계산한 결과, BTC 개념이 적용된 블레이드를 적용한 경우 flapwise 방향의 피로등가하중은 2.8%, edgewise 방향 피로등가하중은 2.4% 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

BTC 효과를 시험적으로 검증하기 위해 1:29 비율의 블레이드 보강재(stiffener) 축소모델을 제작하였으며, 제작된 축소모델의 검증을 위해 FE 해석모델과 정하중 시험 및 impact modal 시험을 수행하였다. 정하중 시험 결과 최대 오차 8.6% 내에서 동일한 변형률 분포를 보임을 확인하였으며, 모드 시험 역시 최대 1.5%의 오차 안에서 고유진동수 결과가 정확히 일치하였다. 정하중 시험을 통해 처짐 거동 시의 비틀림 발생량을 측정하여, 끝단에서 347 mm의 처짐이 발생할 때 3.35도의 비틀림 각도가 형성됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2012-2015년 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호 20123010020130).

REFERENCES

1. Kong, C.D., *et al.*, "Investigation on Design and Impact Damage for a 500 W Wind Turbine Composite," *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 21, No. 1, 2009, pp. 22-31.
2. Park, G., *et al.*, "A Study on Design of 500 W Class High Efficiency Horizontal Axis Wind Turbine System(HAWTS) Blade Using Natural Fiber Composites," *Composites Research*, Vol. 28, No. 3, 2015, pp. 104-111.
3. De Goeij, W.C., Van Tooren, M.J.L., and Beukers, A., "Implementation of Bending-torsion Coupling in the design of a Wind-turbine Rotor-blade," *Applied Energy*, Vol. 63, No. 3, 1999, pp. 191-207.
4. Lobitz, D.W., *et al.*, "The Use of Twist-coupled Blades to Enhance the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines," SAND2001-1003, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 2001.
5. Capellaro, M., "Design Challenges for Bend Twist Coupled Blades for Wind Turbines : and Application to Standard Blades," 2012 Sandia Wind Turbine Blade Workshop, USA, 2012.
6. Buckney, N., Pirrera, A., Weaver, P.M., and Griffith, D.T., "Structural Efficiency Analysis of the Sandia 100 m Wind Turbine Blade," *Proceeding of 32nd ASME Wind Energy Symposium*, 2014, pp. 0360.
7. Richards, P.W., Griffith, D.T., and Hodges, D.H., "Aeroelastic Design of Large Wind Turbine Blades Considering Damage Tolerance," *Wind Energy*, Vol. 20, 2017, pp. 159-170.
8. Bak, Christian, *et al.*, "Light Rotor: The 10-MW Reference Wind Turbine," *Proceeding of EWEA 2012-European Wind Energy Conference & Exhibition*, 2012.
9. Bayati, I., *et al.*, "On the Aero-elastic Design of the DTU 10 MW Wind Turbine Blade for the LIFES50+ Wind Tunnel Scale Model," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 753, No. 2, 2016, pp. 022028.
10. IEC 61400-1 International Standard, Wind Turbine Generator Systems – Part 1: Safety Requirements.
11. Griffith, D.T., "An Update on the Sandia 100-meter Blade Project: Large Blade Public Domain Reference Models and Cost Models," Sandia Wind Turbine Blade Workshop, Albuquerque, NM, USA, 2004.
12. Chow, R., and van Dam, C.P., "Computational Investigations of Blunt Trailing-edge and Twist Modifications to the Inboard Region of the NREL 5 MW Rotor," *Wind Energy*, Vol. 16, No. 3, 2013, pp. 445-458.
13. Kim, S.H., *et al.*, "Composite Structural Analysis of Flat-Back Shaped Blade for Multi-MW Class Wind Turbine," *Applied Composite Materials*, Vol. 21, No. 3, 2014, pp. 525-539.
14. Kim, T., *et al.*, "Numerical Simulation of Flatback Airfoil Aerodynamic Noise," *Renewable Energy*, Vol. 65, 2014, pp. 192-201.
15. Cesnik, Carlos E.S., and Hodges, D.H., "VABS: A New Concept for Composite Rotor Blade Cross-sectional Modeling," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 42, No.1, 1997, pp. 27-38.
16. Germanischer Lloyd: Rules and Guidelines Industrial Services IV - Guideline for the Certification of Wind Turbines, Edition 2010, 2010.
17. Bossanyi, E.A., "Wind Turbine Control for Load Reduction," *Wind Energy*, Vol. 6, No. 3, 2003, pp. 229-244.
18. Kim, S.H., *et al.*, "A Study of the Wake Effects on the Wind Characteristics and Fatigue Loads for the Turbines in a Wind Farm," *Renewable Energy*, Vol. 74, 2015, pp. 536-543.