



[2019-12-WD-001]

Puck의 파손기준에 기반한 풍력발전기용 복합재 블레이드의 점진적 파손 평가

김학근¹⁾ · 장윤정²⁾ · 김재훈³⁾ · 강기원⁴⁾*

Evaluation of the Progressive Failure of Wind Turbine Composite Blade based on Puck's Failure Criterion

Hak-Geun Kim¹⁾ · Yun-Jung Jang²⁾ · Jae-Hoon Kim³⁾ · Ki-Weon Kang⁴⁾*

Received 23 April 2019 Revised 12 August 2019 Accepted 29 August 2019

ABSTRACT Composites combined physically with a reinforcing material and base material are very different from existing metal materials and show complex damage and damage patterns. To explain this, the Tsai-Hill and Tsai-Wu failure condition equations were introduced using the correlation between the vertical and shear stress and strength, and Puck's theory was introduced to explain the damage and failure mode under a combined load. In this paper, progressive failure analysis was performed to examine the damage mode of the composite blade for a wind turbine designed and manufactured as a fiber-reinforced composite material and the change in the failure mode due to the increase in load using the theory of Puck's. For this purpose, 30 kW composite blades were stacked using newly developed low-cost and high-strength pitch-based carbon fibers, and the load was acquired using a simple load calculation method according to the IEC61400-2 standard. A structural safety evaluation was performed through structural analysis under the calculated load. In addition, the damage mode was evaluated using the damage standard theory of Puck's, and progressive damage analysis was performed in the initial damage progressing gradually with a 10% and 20% increase in the load condition.

Key words Composite material(복합재료), Failure criterion(파손기준), Matrix failure mode(섬유간 파손모드), Progressive failure analysis(점진적 파손 해석), Structure analysis(구조해석), Wind turbine blade(풍력 블레이드)

1. 서론

복합재료로 제작되는 선박, 항공기, 풍력발전기 등의 고

위험 구조물이 외부적 요인으로 인하여 내부 손상 및 진전에 따른 조기 파손이 발생하면 막대한 인적·물질 피해로 인한 손실을 야기한다. 이를 보완하기 위하여 복합재 구조물의 손상여부를 정량적으로 평가할 수 있는 기술의 필요성이 확대되고 있다^[1~5]. 이러한 초기손상 및 파손 여부를 평가하기 위해서는 대표적으로 Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hashin 등이 제안한 파손기준에 따른 평가방법들이 있다. 그러나 이러한 방법들은 구조물에 작용하는 하중방향이 다양하게 발생하고, 강성조건하에서 설계되는 복합재료 구조특성상 정확히 평가하기가 곤란하다. 이는 복합재 구조물의 경우 다양한 하중 및 강성조건으로 인한 각각의 파손형태^[6]가 때

1) Ph. D. Candidate, Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University

2) Ph. D, Institute of Offshore Wind Energy, Kunsan National University

3) Researcher, Korea Railroad Research Institute

4) Professor, Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University

*Corresponding author: kwkang68@kunsan.ac.kr

Tel: +82-63-469-4872 Fax: +82-63-469-1334

우 다른 모습으로 나타나기 때문이다. 따라서, 대표적인 고 위험 구조물이며 매우 다양한 하중이 발생하는 풍력발전기 용 복합재 블레이드에 대한 파손모드 평가가 필요하다.

복합재 블레이드의 대표적 파손모드는 섬유 파손(fiber failure)과 섬유간 파손(matrix failure) 이다. 섬유 파손은 섬유방향으로 인장하중이 작용하거나 압축하중하에서 좌굴이 발생할 경우에 나타나며, 섬유간 파손은 섬유 수직 방향으로 인장 혹은 압축, 전단하중이 지배적으로 작용할 경우에 나타난다^[7,8]. 즉, 이러한 파손 형태를 고려하기 위하여 Puck 등^[9]은 새로운 파손기준식을 제안하였으며 이는 특정 조합하중에서의 복합재료에 대한 기준을 섬유 및 섬유간 파손기준식으로 분류하여 다양한 하중조건인 인장, 압축 및 전단의 복합적인 파손기준에 대한 평가방법이다. 이러한 파손기준식을 통하여 복합재 구조물에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다^[10~15]. 이러한 연구는 국부적 초기파손이 발생한 후 파손량이 증가하여 진전이 일어나는 복합재 재료 특성을 고려하기 어렵다. 그러므로 이를 위한 다양한 연구^[16~18]가 수행되고 있으나, 풍력발전기용 블레이드를 대상으로 한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 풍력발전기 용 복합재 블레이드의 초기 파손 여부와 초기 파손 이후에 대한 점진적 파손의 경향을 분석하기 위한 방법 및 이를 통

Table 1. Wind turbine specification

Type	Specification
Blade length	6 m
RPM	78.8 rpm
Rated wind speed	11 m/s
Shaft power	36 kW
Rated power	30 kW
Blade number	3

Table 3. Stack usage (Stack ID) in each panel of the blade model along the blade span

Blade span (m)	TE	TE_rein	TE_panel	Cap	LE_panel	LE
0.045	1,2,3,2	1,2,3,2	1,2,3,2	1,2,3,2	1,2,3,2	1,2,3,2
0.571	1,2,3,2	1,2,3,2	1,2,3,2	1,2,3,2	1,2,3,2	1,2,3,2
1.903	1,2,3,2	1,2,3,5,6,2	1,2,3,6,2	1,2,3,4,2	1,2,3,7,2	1,2,3,2
3.77	1,2,2		1,2,6,2	1,2,4,2	1,2,7,2	1,2,2
4.89	1,2,2		1,2,6,2	1,2,4,2	1,2,7,2	1,2,2
5.263	1,2,2		1,2,2	1,2,4,2	1,2,7,2	1,2,2
6	1,2,2		1,2,2	1,2,4,2	1,2,2	1,2,2

*Web lay-up pattern : 8,9,8

한 설계 단계에서 검토할 수 있는 구조 건전성 및 안전성 평가 기술에 대한 연구가 필요하다.

본 논문은 새로이 개발되고 있는 저가·고강성 피치계 탄 소섬유를 이용하여, 30 kW급 복합재 블레이드에 대한 점진적 파손해석을 수행하였다. 이를 위하여 먼저 적층설계와 IEC 61400-2^[19]을 통한 하중조건을 산출하였다. 이러한 적층 설계 및 하중조건하에서 유한요소해석(FEA)을 이용한 IEC61400-5^[20]에 따라 구조 안전성을 검토하였다. 이에 Puck의 파손기준을 통해 조합하중을 받는 복합재 블레이드의 초기파손 위치와 이후 손상이 증가하는 점진적 파손 경향을 분석하였다.

2. 해석방법 및 이론

2.1 대상 모델

본 논문의 대상은 군산대학교 고유익형인 KA2를 이용하여 공력설계된 30 kW급 풍력발전기용 복합재 블레이드이

Table 2. Mapping of stacks and materials

Stack ID	Stack name	Material
1	Gelcoat	Gelcoat
2	Triax skins	Glass_triax (Skin)
3	Triax root	Glass_triax (root)
4	UD carbon	Pitch_carbon (UD)
5	UD glass TE	Glass_UD
6	TE foam	Foam
7	LE foam	Foam
8	Web glass DB	Glass_DB
9	Web foam	Foam

며, 이의 사양은 Table 1에 나타내었다. 이러한 블레이드의 내부 구조는 참고문헌^[21]을 기준으로 풍력발전기에 적합한 복합재 종류와 적층 순서를 선정하였으며, 이에 대한 정보는 Table 2 및 3에 나타내었다.

2.2 해석 방법

풍력발전기용 블레이드에 대한 유한요소해석 프로그램인 Abaqus^[22]를 이용하여 공진여부를 평가하기 위한 모달 해석, 국부좌굴여부를 평가하기 위한 좌굴해석 및 복합재료 적층별 작용하는 응력을 검토하기 위한 정적해석을 통해 구조안전성 평가를 수행하였다. 이후 초기파손을 평가하기 위한 Puck's 이론기반 파손모드 평가를 진행하였으며, 파손 이후 진전 방향 및 영향을 검토하기 위한 점진적 파손해석기법을 적용하였다.

이러한 연구를 수행하기 위해 먼저 Fig. 1의 유한요소 모델에서 사용한 요소는 S4R&S3이며, 노드(node) 개수는 139,256개, 요소(element) 개수는 138,036개이다. 하중 조건은 IEC 61400-2 기준에 따른 단순하중산출법(simplified load calculation method)를 이용하여 산출된 하중에서 영향성이 큰 극한하중조건(ultimate load case)의 하중인 x , z 방향 힘과 y 방향 모멘트를 Fig. 2와 같이 블레이드에



Fig. 1. Finite element model of wind turbine blade

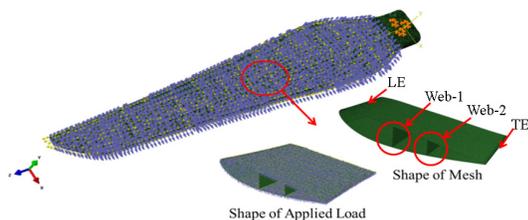


Fig. 2. Boundary condition of blade

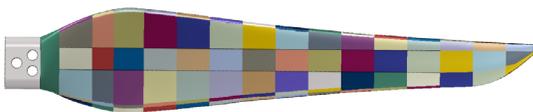


Fig. 3. Lamination section applied of blade

적용^[23]하였다.

구조 안전성 평가방법에는 대표적으로 모달 및 좌굴, 정적해석이 있다. 첫 번째로 풍력발전기용 블레이드는 외부 환경 조건과 타워 등으로 인해 고유주파수 변화에 따른 공진발생여부가 중요하며 이를 평가하기 위해서 모달해석에서 얻은 고유주파수를 이용하여 Campbell diagram 방법을 통해 공진의 회피조건을 만족하는지 검토하였다. 두 번째로 블레이드는 세장비가 긴 구조물이므로 하중 작용시 국부좌굴이 발생할 가능성이 있다. 좌굴거동이 발생하는 임계하중계수를 평가하기 위해서 좌굴해석을 통해 안전성을 검토하였다. 마지막으로 정적해석을 통해 Fig. 3과 같이 섹션에 따른 적층정보를 적용하여 최대응력과 항복강도를 비교를 통해 안전성을 검토하였다.

블레이드의 파손모드 평가를 위하여 상용 코드인 Helius Composite^[24] 프로그램과 Abaqus해석틀을 연동하여 해석을 진행하였으며, Puck의 파손기준식을 통한 복합재 블레이드에 작용하는 조합하중에 대해 평가를 수행하였다. 이러한 섬유와 섬유간에 대한 파손여부 및 위험 위치를 검토하고, 초기 파손기준을 통해 손상역학 기반으로 점진적 파손모드 결과를 분석하였다. 이와 같이 하중산출 및 구조안전성 평가방법과 파손모드, 점진적 파손평가에 대하여 절차를 Fig. 4에 나타내었다.

2.3 Puck 파손기준식

Puck의 파손기준식은 파손모드를 조합하중에서 나타날 수 있는 대표적인 섬유파손 두 가지와 섬유간 파손 세 가지로 분류되며, 섬유파손으로 새롭게 생성되는 파단면에 대한 각도(angle of fracture plane) 결정기법을 제안하였다. 이는 Puck 파손지수의 수학적 모델은 Table 4와 각 파손모드의 범위를 나타낸 Fig. 5와 같다.

여기서 ε_1 는 단일방향 레이어(unidirectional layer)의 변형률, ε_{1T} 와 ε_{1C} 는 각각 섬유방향에서의 단일방향 레이어의 인장 및 압축파단변형률, ν_{f12} 와 E_{f1} 는 섬유의 포아송비 및 탄성계수, $m_{\sigma f}$ 는 섬유수직방향에서의 섬유의 평균응력 확대상수, σ_{vt} 는 섬유수직방향응력성분, γ_{21} 와 τ_{21} 는 각각 단일방향 레이어의 전단변형률 및 전단응력, S_{21} 는 섬유방향과 수직 및 평행한 단일방향 레이어의 전단파단강도, p_{vp}^+

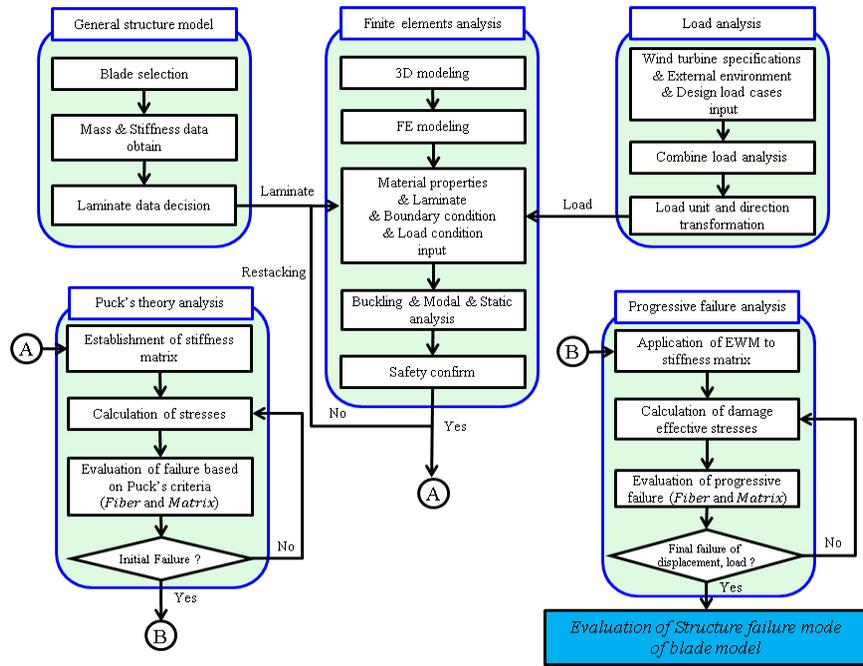


Fig. 4. Progressive failure analysis flow of wind turbine blade

Table 4. Failure criterion equation of Puck's theory

Type of failure	Failure condition
Fiber failure	Tensile $\frac{1}{\epsilon_{1T}} \left(\epsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 \right) = 1$
	Compression (kinking) $\frac{1}{\epsilon_{1C}} \left \left(\epsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 \right) \right + (10\gamma_{21})^2 = 1$
Matrix failure	Mode A for transverse tension $\sqrt{\left(\frac{\tau_{21}}{S_{21}} \right)^2 + \left(1 - p_{vp}^+ \frac{Y_T}{S_{21}} \right)^2 \left(\frac{\sigma_2}{Y_T} \right)^2} + p_{vp}^+ \frac{\sigma_2}{S_{21}} + \frac{\sigma_1}{\sigma_{1D}} = 1$
	Mode B for moderate transverse compression $\frac{1}{S_{21}} \left(\sqrt{\tau_{21}^2 + (p_{vp}^- \sigma_2)^2} + p_{vp}^- \sigma_2 \right) + \frac{\sigma_1}{\sigma_{1D}} = 1$
	Mode C for large transverse compression $\left[\left(\frac{\tau_{21}}{2(1+p_{vv}^-)S_{21}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y_C} \right)^2 \right] \frac{Y_C}{(-\sigma_2)} + \frac{\sigma_1}{\sigma_{1D}} = 1$

와 p_{vp}^- 및 p_{vv}^- 는 파단면 각도 의존 파라미터, Y_T 와 Y_C 는 섬유방향과 수직인 단일방향 레이어의 인장 및 압축파단강도, 그리고 σ_{1D} 는 선형저하(linear degradation)에 의한 응력값을 나타낸다. 이러한 수학적 모델에서 임의의 조합

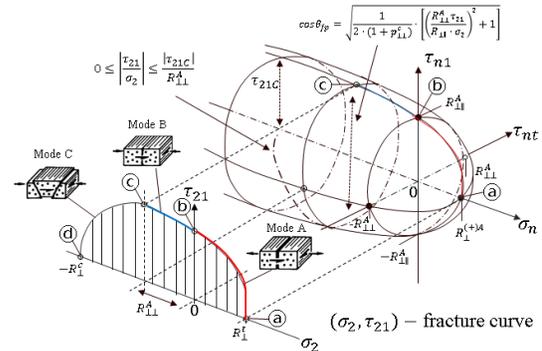


Fig. 5. Master fracture body in the (σ_2, τ_{21}) -fracture curve

하중에 놓인 적층된 복합재료에 대하여 Puck 파손기준을 적용하기 위해 유한요소해석 기반으로 기준식을 수정해야 한다. 따라서 Table 5와 같이 해석에서의 응력상태별 판단 기준식이 도출된다.

단, Table 5에서 R_{vv}^A 는 수직-수직전단응력으로 인한 파단에 반하는 활성면의 파단 저항 파라미터이다. 그리고 τ_{21c} 는 Fig. 5의 (σ_2, τ_{21}) -파단곡선의 전환점에서의 전단응력이다. 또한, Puck 파손기준을 결정짓는 주요한 파라미터인 p_{vp}^+ , p_{vp}^- , p_{vv}^- , R_{vv}^A 및 τ_{21c} 는 Table 5를 통해 계산된다. 그러나 주요 파라미터들은 분석을 통해 결정해야 되는 단점

Table 5. Application condition of Puck failure criteria

Type of failure	Failure condition
Fiber failure in tension	$\epsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 \geq 0$
Fiber failure in compression	$\epsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 < 0$
Matrix failure in moderate transverse compression (Mode A)	$\sigma_2 \geq 0$
Matrix failure in large transverse compression (Mode B)	$\sigma_2 < 0$ and $0 \leq \left \frac{\sigma_2}{\tau_{21}} \right \leq \frac{R_{vv}^A}{\tau_{21c}}$
Matrix failure in large transverse compression (Mode C)	$\sigma_2 < 0$ and $0 \leq \left \frac{\sigma_2}{\tau_{21}} \right \leq \frac{R_{vv}^A}{\tau_{21c}}$

$$p_{vp}^+ = - \left(\frac{d\tau_{21}}{d\sigma_2} \right)_{\sigma_2=0} \text{ of } (\sigma_2, \tau_{21}) \text{ curve, } \sigma_2 \geq 0$$

$$p_{vp}^- = - \left(\frac{d\tau_{21}}{d\sigma_2} \right)_{\sigma_2=0} \text{ of } (\sigma_2, \tau_{21}) \text{ curve, } \sigma_2 \leq 0$$

$$R_{vv}^A = \frac{Y_C}{2(1+p_{vv}^-)} = \frac{S_{21}}{2p_{vp}^-} \left(\sqrt{1+2p_{vp}^- \frac{Y_C}{S_{21}}} - 1 \right)$$

$$p_{vv}^- = p_{vp}^- \frac{R_{vv}^A}{S_{21}}$$

$$\tau_{21c} = S_{21} \sqrt{1+2p_{vv}^-}$$

Table 6. Typical for the materials factor

Constant	Values (GFRP/Epoxy)	Values (CFRP/Epoxy)
p_{vp}^+	0.30	0.35
p_{vp}^-	0.25	0.30
p_{vv}^-	0.20-0.25	0.25-0.30

이 존재한다. 이에 따라 Puck 등은 실험적 및 현상학적 고찰을 통해 보다 간편한 재료 상수를 Table 6과 같이 제안하였다^[9]. 또한, 점진적 해석을 진행하기 위해 요소처리방식은 요소약화법(element weakening method; EWM)^[25]을 채택하여 평가를 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 구조해석

3.1.1 모달해석

본 논문에서 사용된 블레이드에 대한 고유주파수는 Table

Table 7. Natural frequency of wind blade

Mode#	Frequency, Hz
1	15.1
2	18.4
3	85.2
4	103.4

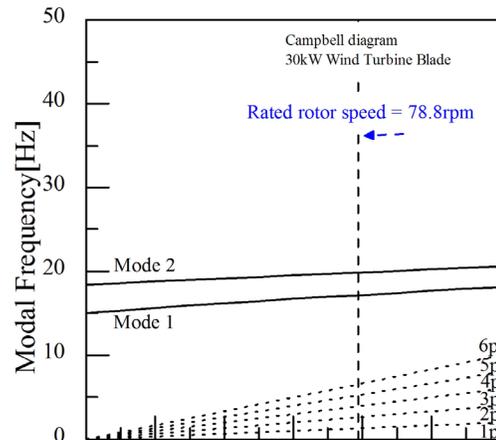


Fig. 6. Campbell diagram analysis of blade

7과 같이 결과를 도출하였으며, 하중조건에 적용된 풍력발전기의 구조인 나셀(nacelle) 회전속도에 따른 블레이드의 고유주파수 변동값을 모달해석을 통해 데이터를 획득하였다. 이러한 데이터를 이용하여 공진여부를 평가하기 위해 정격 RPM, 블레이드 날개 상수, 블레이드 고유주파수를 가지고 작성하는 Fig. 6의 Campbell diagram를 통하여 검토한 결과 정격속도에서의 3개의 날개조건 하에서 3개의 선에 대해 겹치지 않으므로 공진회피조건을 만족함을 확인하였다.

3.1.2 좌굴해석

풍력 발전기용 블레이드는 길이에 비하여 두께가 얇은 구조물로서 좌굴발생여부가 중요하므로 이를 판별하기 위하여 극한하중조건에서의 좌굴해석을 수행하였다. 좌굴현상은 임계하중값인 1.2 이상일 경우에 발생하지 않음으로 이를 기준으로 결과를 판단하였다. 따라서 좌굴 해석 결과인 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 1st 모드는 10.23, 2nd 모드는 10.62의 값을 얻었으므로 좌굴이 발생하지 않음을 확인하였다.

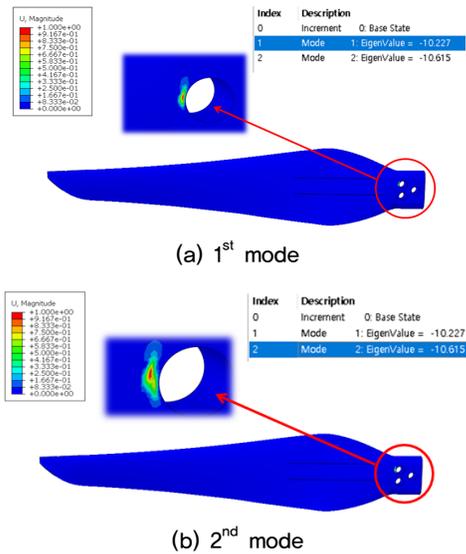


Fig. 7. Buckling analysis results of blade

3.1.3 정적해석

산출된 하중을 적용하여 블레이드에 대한 정적해석을 진행하였다. 이에 따른 결과는 Table 8에 도시되어있으며, 블레이드에 사용된 적층 재료별에 대한 인장 및 압축의 항복강도와 안전계수 1.3을 적용한 최대응력 비교를 통해 안전성을 평가하였다. 전체적으로 재료별 강도에 비해 하중에 따른 응력이 낮으므로 안전하지만, 전단웹(shear web)에서 사용된 Glass_DB 재료에서 가장 낮은 설계 여유를 가지고 있음을 확인하였다. 또한, Fig. 8과 같이 통합 면내응력(in-plane stress) 해석결과 블레이드 루트부 이후에서 최대인장 및 압축 응력이 발생한다. 이는 플랩(flap)방향 하중의 저항을 위한 구조의 역할에 기인하는 것으로 판단된다.

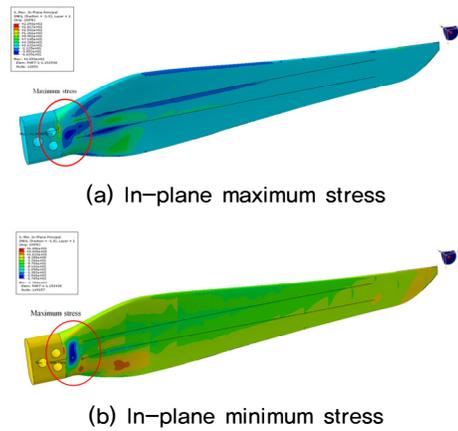


Fig. 8. Static analysis results of blade

3.2 Puck 파손기준 평가

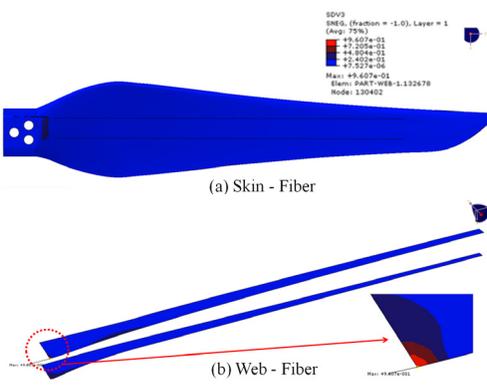
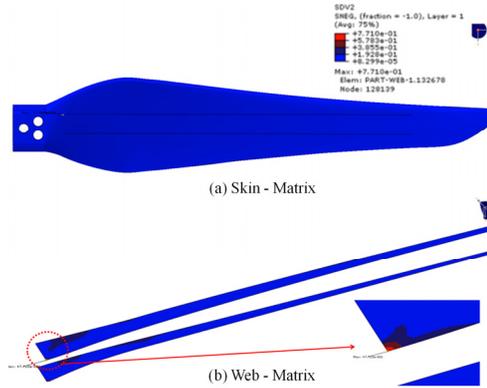
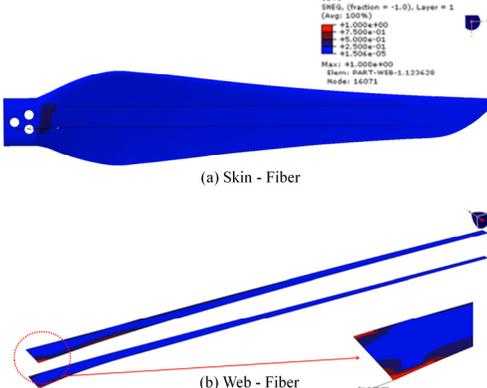
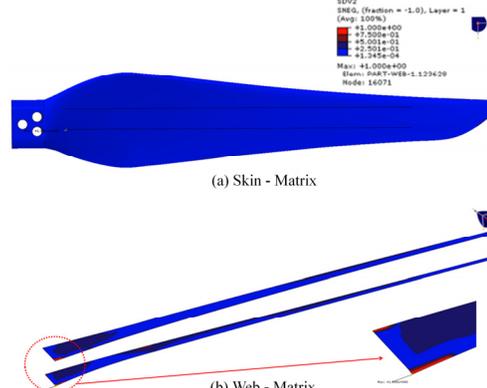
본 논문에서 언급된 Puck 이론을 적용하기 위해서는 다양한 방향에 대한 물성이 사용되며 이러한 물성^[26]과 이론을 통해 파손기준을 따른 파손평가를 진행하였다. 이에 따라 Table 9에 나타낸 섬유파손 및 섬유간 파손 조건에서의 초기파손결과를 검토한 바, 본 논문에 사용된 블레이드 모델에서의 초기파손은 발생하지 않음을 확인하였다.

반면에, 일반적으로 복합재 블레이드는 하중 및 재료에 대해 안전계수를 적용하여 응력을 평가하나, 파손모드의 경우 안전계수에 대해 명확히 정해진 규정이 없다. 그러므로 이전 블레이드 재료에 따른 파손모드 경향 분석과 구조 시험 및 파손모드해석을 이용한 후단부 접합부 파손 경향 분석^[27] 등과 같은 연구들을 기준으로 분석하였다. 즉, 본 논문의 해석 결과인 전단웹 상단의 앞부분에서 최대 및 0.96의 섬유파손 및 0.77의 섬유간 파손모드 지수가 나타남에 따라서 해당위치에서 초기파손의 가능성이 높은 것으로 확인된다. 따라서 위험지점인 전단웹에 대해 형상 변경

Table 8. Max stress of wind turbine blade

Material	Material property		Stress		Stress[Safety factor]	
	Ten.strength [MPa]	Comp.strength [MPa]	Ten.stress [MPa]	Comp.stress [MPa]	Ten.stress [MPa]	Comp.stress [MPa]
Glass_triax (Skin)	599	555	329.1	238.8	427.8	310.4
Glass_triax (root)			160.7	122.8	208.9	159.7
Pitch_carbon	980	1070	291.5	188.9	378.9	245.6
Glass_UD	729	546	124.1	150.7	147.8	195.9
Glass_DB	144	134	112.8	53.7	146.6	69.8

Table 9. Skin-web failure mode base on Puck's theory

Index load	Fiber failure	Matrix failure
100%	 <p>(a) Skin - Fiber</p> <p>(b) Web - Fiber</p>	 <p>(a) Skin - Matrix</p> <p>(b) Web - Matrix</p>
120%	 <p>(a) Skin - Fiber</p> <p>(b) Web - Fiber</p>	 <p>(a) Skin - Matrix</p> <p>(b) Web - Matrix</p>

및 공정상에서의 추가 작업이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 이러한 결과를 통하여 복합재료의 파손해석은 조합하중하에서 블레이드의 거동을 보다 자세히 설명할 수 있는 Puck의 초기파손기준식을 통하여 섬유 및 섬유간에 대한 초기파손위치를 파악할 수 있음을 확인하였다.

3.3 점진적 파손 모드 평가

Puck 이론을 통해 파손평가를 진행하여 초기파손 여부 및 위험지역을 검토하고 이에 따른 손상역학기반 점진적 파손특성 평가가 필요하다. 이러한 이유는 위험 파손 위치 및 초기에 발생한 파손이 이후 구조에 어떠한 영향을 끼치는지 판단이 필요하기 때문이다. 따라서 점진적 파손해석의 결과인 Table 9에 나타낸바와 같이 초기 파손위치인 Web-1의 앞부분에서부터 시작하여 전단웹과 스킨 접합부를 따라서 파손이 커지는 것을 확인하였다. 이러한 결과로 인하여 전단웹의 초기 파손 위험구간으로부터 점진적 파손

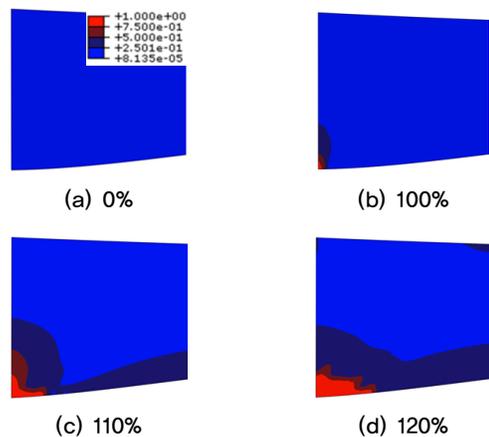


Fig. 9. Fiber failure index of web-1

모드를 검토하였다. 이를 위하여 Web-1과 Web-2(Figs. 9~12)에 대하여 하중비율을 0%, 100%, 110%, 120%로 적용하여 점진적 파손 해석 결과를 세부적으로 분석하였다. Web-1의 파손모드는 섬유 및 섬유간 파손모드 모두 동일

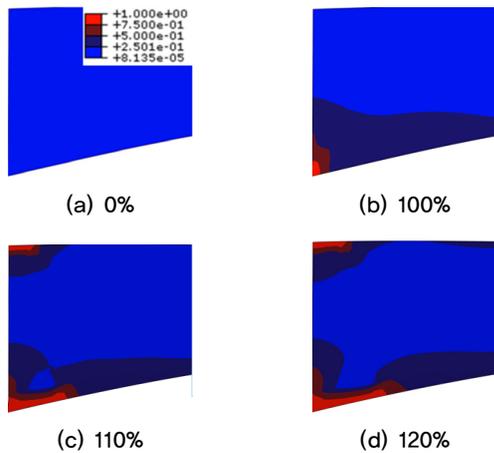


Fig. 10. Fiber failure index of web-2

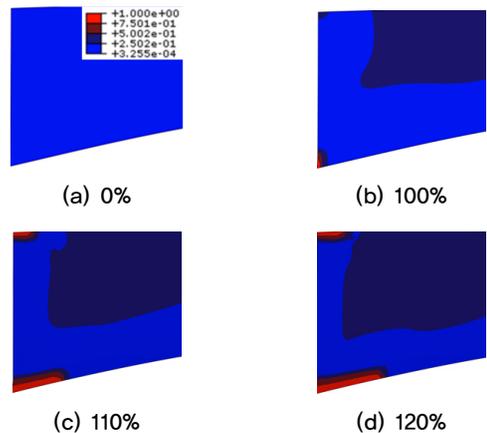


Fig. 12. Matrix failure index of web-2

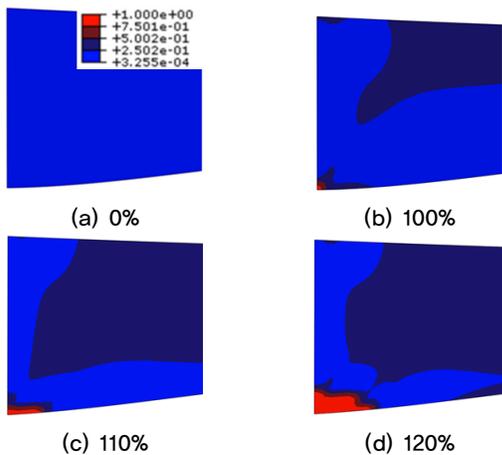


Fig. 11. Matrix failure index of web-1

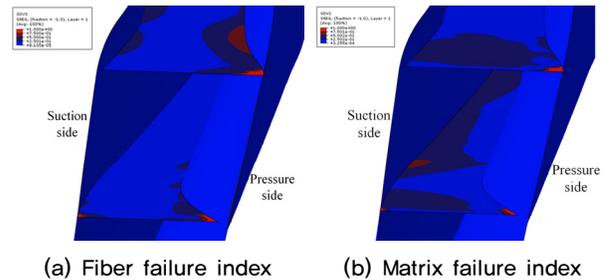


Fig. 13. Failure mode analysis at load 120%

하게 안쪽으로 파손이 발생하는 경향을 보이며, Web-2는 접합부 구조에서 점진적으로 파손이 발생함을 확인하였다. 또한, 블레이드의 파손모드는 특정 구역에서 추가 위험가능성을 나타내며 특히 웹의 30% 지점에서의 파손모드는 Fig. 13과 같이, 섬유간 파손모드 경우 흡입면(suction side)에 위치하는 웹에서 위험한 지점이 발생하며, 섬유 파손모드는 압력면(pressure side)에서 파손 위험이 발생하게 됨을 확인하였다. 이는 평가 결과를 통해 하중 증가에 따른 내부 손상의 진전 역시 점진적 파손해석을 통하여 평가할 수 있음을 확인하였다. 이러한 해석방법은 기존의 정적해석에서 검토하기 어려운 파손조건에 대해 평가할 수 있으며, 이후 점진적 파손모드 결과는 하중 및 변위 기반으로 파손경향을 예측할 수 있었다. 이를 통하여 피치계 탄소섬유를 적용한 대형 블레이드에 사용되는 복합재료의 파손모드 해석 결과

4. 결론

본 논문은 새로이 개발되고 있는 저가·고강성 피치계 탄소섬유를 이용하여, 군산대학교 고유익형인 KA2를 적용한 30 kW급 복합재 블레이드에 점진적 파손해석을 수행하였다. 이를 위하여 먼저 적층설계와 IEC 61400-2를 통한 하중조건을 산출하였다. 이러한 적층 설계 및 하중조건하에서 유한요소해석을 이용한 구조 안전성 검토하였다. 또한, 조합하중하의 파손조건을 설명할 수 있는 Puck의 파손기준을 사용하여 조합하중하의 복합재 블레이드의 초기파손 및 점진적 파손 경향을 평가하였다. 이를 통하여 전단웹에서 초기 파손이 발생할 높은 가능성을 보였으며, 블레이드 스킨과 전단웹 사이에서 섬유 및 섬유간의 파손이 접합부를 따라 점진적으로 발생함을 확인하였다. 이는 30 kW기준

하중에 대해 파손 위험성은 낮지만 기준 이상의 용량을 적용할 경우 전단웹의 접합부가 파손 될 가능성이 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK1901B8) 및 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한 한국연구재단의 지원을 받은 기초연구사업(NRF-2016R1D1A1A09918310), 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20173010024870, 20173010024950).

References

- [1] Nam, M.H., Joung, J.Y., and Kim, C.H., 2012, "Analysis of characteristic of the wind turbine blade damage", Proceedings of the KIEE Annual Conference 2012, 860-861.
- [2] McGugan, M., Pereira, G., Sørensen, F., Toftegaard, H., and Branner, K., 2015, "Damage tolerance and structural monitoring for wind turbine blades", Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci., **373**(2035).
- [3] Reinoso, J., Catalanotti, G., Blazquez, A., Areias, P., Camanho, P.P., and Paris, F., 2017, "A consistent anisotropic damage model for laminated fiber-reinforced composite using the 3D-version of the Puck failure criterion", Int. J. Solids Struct., 126-177, 37-53.
- [4] Prabhakar, P. and Waas, A.M., 2013, "Interaction between kinking and splitting in the compressive failure of unidirectional fiber-reinforced laminated composites", Compos. Struct., **98**, 85-92.
- [5] Prabhakar, P. and Waas, A.M., 2013, "Micromechanical modeling to determine the compressive strength and failure mode interaction of multidirectional laminates", Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf., **50**, 11-21.
- [6] Son, B.J., Huh, Y.H., Kim, D.J., and Kim, J.I., 2012, "Analysis of wind-turbine blade behavior under static dual-axis loads", Transactions of the KSME, **36**(3), 297-304.
- [7] Lee, C.S., and Lee, J.M., 2015, "Development of progressive failure analysis method for composite laminated based on Puck's failure criterion-damage mechanics", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **51**(1), 51-60.
- [8] Gu, J. and Chen, P., 2018, "Extension of Puck's inter fibre fracture (IFF) criteria for UD composites", Compos. Sci. Technol., **162**, 79-85.
- [9] Puck, A. and Schurmann, A., 2002, "Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models - Part B", Compos. Sci. Technol., **62**(12-13), 1163-1172.
- [10] Kim, B.S., 2014, "Structural design and evaluation of a 3MW class wind turbine blade", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, **38**(2), 154-161.
- [11] Ozyildiz, M., Muyan, C., and Coker, D., 2018, "Strength analysis of a composite turbine blade using puck failure criteria", J. Phys. Conf. Ser., **1037**(4), 1-11.
- [12] Nair, S.N., Dasari, A., Yue, C.Y., and Narasimalu, S., 2017, "Failure behavior of unidirectional composites under compression loading: effect of fiber waviness", Materials, **909**(10), 2017, 1-13.
- [13] Koh, R. and Madsen, B., 2018, "Strength failure criteria analysis for a flax fibre reinforced composite", Mechanics of Materials, **124**, 26-32.
- [14] Zhuang, L., Talreja, R., and Varna, J., 2016, "Tensile failure of unidirectional composites from a local fracture plane", Compos. Sci. Technol., **133**, 119-127.
- [15] Osswald, P.V. and Osswald, T.A., 2017, "A strength tensor based failure criterion with stress interactions", Polym. Compos., **39**(8).
- [16] Philippidis, T.P. and Antoniou, A.E., 2013, "A progressive damage FEA model for glass/epoxy shell structures", J. Compos. Mater., **47**(5), 623-637.
- [17] Bright, R.J. and Sumathi, M., 2017, "Failure analysis of FRP composite laminates using progressive failure criteria", International Journal of Scientific & Engineering Research, **8**(6), 1651-1662.
- [18] Lee, C.S., Kim, J.H., Kim, S.K., Ryu, D.M., and Lee, J.M., 2014, "Initial and progressive failure analysis for

- composite laminates using Puck failure criterion and damage-coupled finite element method”, *Compos. Struct.*, **121**, 406-419.
- [19] International Electrotechnical Commission, 2006, “IEC 61400-2: Wind turbines-part 2: design requirements for small wind turbines”, Second Edition.
- [20] International Electrotechnical Commission, 2013, “IEC 61400-5: Wind turbines-part 5: wind Turbine Blades”, Draft Version.
- [21] Resor, B.R., 2013, “Definition of a 5MW/61.5MW wind turbine blade reference model.”, Sandia Report SAND., 2013-2569.
- [22] ABAQUS Version 6.17, Dassault Systems Simulia, Inc.
- [23] Kim, S.J. and Jang., I.S., 2015, “Structure analysis of rotor-nacelle-assembly for 30kW wind turbine”, *Journal of the Korean Society of Wind Energy*, **6(2)**, 18-24.
- [24] Heliux Composite Version 2019, Autodesk, Inc.
- [25] Lee, C.S. and Lee, J.M., 2015, “A study on the evaluation of fiber and matrix failures for laminated composites using Hashin-Puck failure criteria”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, **52(2)**, 143-152.
- [26] Kim, D.W., Jeong, G., Lim, J.H., Min, B., and Lee, K.S., 2018, “A lightweight design of the spar cap of wind turbine blades with carbon fiber composite and ply reduction ratio”, *Journal of Aerospace System Engineering*, **12(2)**, 66-75.
- [27] Lahuert, F., Koorn, N. and Smissaert, D., 2018, “Wind turbine blade trailing edge failure assessment with sub-component test on static and fatigue load conditions”, *Compos. Struct.*, **204**, 755-766.