

대형 풍력발전기 블레이드의 볼트체결부 응력감소를 위한 설계연구

하광태* · 허준** · 정재호***

Design investigation of the stress reduction of bolted joint connection components in a large wind turbine blade

Kwang Tae Ha*, June Hur** and Jae-Ho Jeong***

Key Words : Large wind turbine (대형풍력발전기), Blade (블레이드), Root joint (루트조인트), Bolted joint (볼트체결부), Stress connection factor (응력집중계수)

ABSTRACT

Today, the power capacity of a wind turbine and the size of a blade is increasing to capture more wind resources, reduce the number of wind turbines on a wind farm, and reduce the cost of energy. As the blade size becomes larger, attention is being paid to the structural integrity of the blade root connection due to the heavy gravitational load effect and increased aerodynamic loads on the large blade, which could cause catastrophic failure of the blade. Therefore, the secure bolted joint connection of the blade to the hub is very important. In this paper, attention was given to the stress concentration factor (SCF) at the first thread between the M42 bolt and nut. The effect of various design parameters on the stress concentration factor was investigated, which included nut type, nut height, and reduced shank bolt. From a close design investigation of the numerical results, it turned out that the use of a reduced shank bolt resulted in the largest reduction of the stress concentration factor by 40 %, and the round nut type also reduced the SCF by 10 %, which will be beneficial to large wind turbine blades over 100 meters.

기호설명

K_t : 응력집중계수 [무차원]
 σ_{max} : 최대응력 [N/m^2]

$\sigma_{reference}$: 기준응력 [N/m^2]
 HV : 비커스경도 (Vickers harness) [kgf/mm^2]
 HRC : 로크웰경도 [kgf/mm^2]

1. 서론

풍력 터빈 발전기(WTG)는 화석 연료의 대안으로 가장 깨끗하고 환경 친화적인 에너지 자원 중 하나를 활용한다는 점에서 많은 주목을 받고 있다[1]. 현대식 풍력 터빈은 일반적으로 블레이드, 발전기와 기어박스를 포함하는 나셀, 타워와 같은 하부 구조로 구성된다. 2개 또는 3개의 블레이드는 블레이드 루트 조인트 연결에 의해 피치 베어링 시스템을 통해 회전 가능한 허

* 울산대학교 부유식해상풍력학과 연구교수(주저자/교신저자)
** 울산대학교 부유식해상풍력학과 석사과정
*** 가천대학교 기계공학부 조교수 (교신저자)
E-mail : kwangtaeha@ulsan.ac.kr
DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2022.13.4.004>
Received : August 11, 2022, Revised : October 21, 2022
Accepted : October 25, 2022

브에 결합되는 구조로 되어 있다[2].

현재 상업용 풍력 터빈 블레이드에는 두 가지 유형의 루트 조인트 연결이 널리 사용되고 있으며, Fig. 1에서처럼 스틸 인서트 타입 (Steel Insert Type) 과 T-볼트("IKEA" 연결 타입이라고도 함) 타입이 있다. 전통적으로 T-볼트 또는 IKEA 연결은 비교적 쉬운 제조 공정과 교체의 편의성으로 인해 블레이드를 풍력 터빈의 허브에 연결하는 데 널리 사용되고 있다. T-볼트 조인트에는 루트 실린더 표면에 수직으로 위치하는 크로스 볼트가 있고 세로 볼트는 허브를 크로스 볼트에 연결하는 구조이다.[3]. Martinez는 수치 및 실험을 통해 T-볼트 조인트를 조사하고 T-볼트 조인트가 신뢰할 수 있고 저렴하다는 결론을 도출하였다. 또한, Martinez는 루트조인트의 3차원 유한요소모델을 구성하여 이를 통해 조인트에 의해서 하중을 받는 유리섬유 복합체에 작용하는 응력분포를 분석하였다. 이를 위해 유사한 이중 랩 조인트 (Double Lap Joint)의 실험을 통해 해석결과와 비교를 수행하였다[4]. 그러나 블레이드 길이가 증가함에 따라 구조적 내구성을 확보하기 위해 블레이드 원형 직경(BCD) 증가 및 루트 층 두께 증가로 인한 운송의 어려움 및 과도한 재료 사용과 같은 여러 문제가 발생되고 있다[5, 6]. 국내에서는 실규모 구조시험을 모사한 유한요소해석을 수행하여 블레이드 전체 길이에 대한 변형율을 구하고, 최대인장응력이 루트부에서 발생함을 도출하였다. 하지만, 루트 조인트에 대한 자세한 연구는 미미한 실정이다[7].

지난 10년 동안 인서트 조인트 기술이 특히 대형 해상 블레이드에 적용되어 T-볼트 연결에 대한 대안으로 BCD와 블레이드 루트 층 무게를 줄일 수 있었다[8]. 장점은 기존의 T-볼트 연결에 비해 약 35% 더 많은 볼트(강도)를 구현할 수 있다는 것이며, 드릴링에 의한 손상이 필요하지 않고, 인서트가 블레이드 루트 부위에 조립형태로 포함될 수 있다는 이점들이 있는 것으로 알려져 있다[9].

블레이드 크기가 커질수록 더 높은 중력에 의한 예지방향 굽힘 하중으로 인해 블레이드 루트 영역의 피로 하중이 증가될 수 있다[10, 11]. 즉, 블레이드 루트 영역에 대한 더 커진 예지방향 피로 하중의 영향이 중요해짐에 따라 피로에 민감한 루트부 볼트와 나사 연결부에서의 응력 집중 계수(SCF)도 구조 건전성을 결정하는 중요한 매개변수가 된다[12-14]. 루트 인서트 조인트의 품질을 확보하기 위해 접합부 메커니즘 및 제조 품질 등을 실험적/수치적으로 분석하는 많은 연

구가 수행되었다[15, 16]. 그러나 볼트, 너트 및 인서트의 다양한 기하학적 매개변수에 따라 달라지는 볼트-너트 조인트 및 볼트-인서트 조인트 연결의 응력 집중 계수에 대한 연구는 미미한 단계이다. 따라서 대형 블레이드루트부의 예상치 못한 구조적 파손을 방지하기 위해 인서트와 볼트 사이 혹은 볼트와 너트 사이의 나사 인터페이스에서 응력 집중 계수(SCF)에 대한 포괄적인 이해가 매우 중요해 지고 있다.



(a) T-bolts type



(b) Insert Type

Fig 1. Blade root connection types

본 연구에서는 인서트 조인트에서 서로 결합되는 볼트와 너트 형상 설계변수들의 응력집중계수(SCF)에 대한 영향성을 2D와 3D 모델의 유한요소해석(FEA)을 통해 조사하였다. 이러한 설계변수 영향성 조사를 통하여 피로수명에 영향을 주는 응력집중계수의 감소에 최적인 볼트/너트 형상을 도출할 것이다. 본 연구는 대형 일체형 블레이드뿐만 아니라 세그먼트 또는 모듈식 블레이드의 볼트 조인트 설계에도 도움이 될 것이다[17, 18].

2. 수치해석 모델

이 장에서는 인서트, 볼트 및 너트로 구성된 블레이드 루트 연결부의 사강과 접촉요소 (Contact elements)와 경계조건 (Boundary conditions)을 포함하는 유한요소모델을 기술하고 있다.

2.1 블레이드 루트 조인트 모델 사양

본 연구에서는 7 MW 상업용 풍력발전기에 장착되는 83.5미터의 블레이드를 레퍼런스로서 선정하고 이에 상응하는 M42 볼트로 구성된 인서트 타입을 가진 루트조인트 모델을 분석하여 볼트/너트 설계변수에 따른 응력집중계수 영향성을 연구하였다. 본 연구에 사용되는 루트조인트 모델의 사양은 표 1과 같다.

Table 1. Description of a blade root joint model

Items	Description	Items	Description
Blade length	83.5 m	Thread size	M42
Root connection type	Insert type	Thread pitch	4.5 mm
Outer diameter	4.32 m	Bolt/nut grade	10.9
Blade circle diameter(BCD)	4.2 m	Number of bolts/nuts	168 ea

Fig 2 및 3은 현재 해석에 사용된 볼트 및 너트 형상의 설계 매개변수를 보여준다. 유한요소해석을 통해 수치해석이 수행되었으며, 3장에서 볼트/너트 조인트 모델의 응력 집중 계수(SCF)에 대한 아래의 매개변수가 미치는 영향성이 분석될 것이다.

- 너트 타입 효과
- 너트 높이(또는 나사 결합 수) 효과
- Neck-down (or reduced shank) Bolt 적용 효과

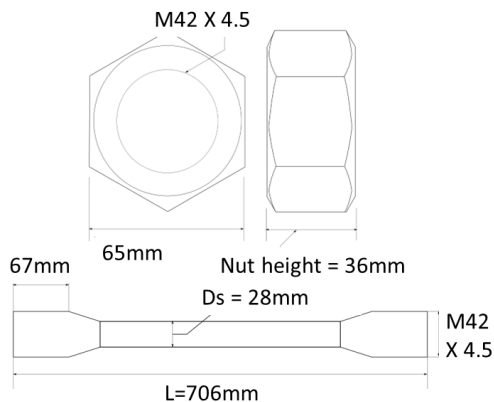


Fig 2. Geometry of nut and bolt

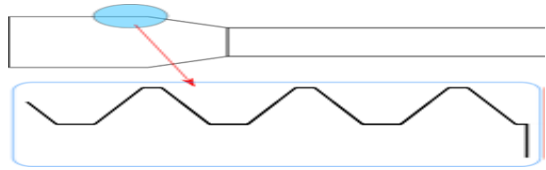


Fig 3. Schematic diagram of a thread shape in neck-down bolt type (Partial image)

2.2 유한요소 모델

블레이드 루트, 피치 베어링 및 허브 조각을 포함하는 루트 연결부의 대칭모델과 볼트/너트 연결부의 상세 유한요소모델은 Fig 4와 Fig. 5에 나타나 있다.

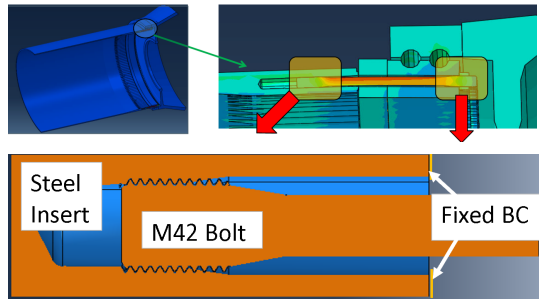


Fig 4. A half section of blade root model and cross section view of bolted joint connection

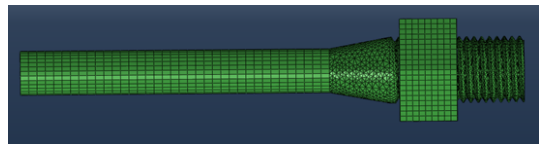


Fig 5. FE model of a bolt/nut in insert type

위의 유한 요소 모델은 Fig. 6과 같이 ABAQUS의 C3D8 3차원 요소를 사용하여 구현되었다. C3D8 요소는 범용 선형 브릭 요소 (Brick element) 로 2x2x2 적분점을 사용하며 각 좌표 방향에서 선형 보간을 사용하기 때문에 종종 1차 요소로 간주된다. 모든 노드는 x, y 및 z방향으로의 3 자유도를 가지고 있다 [19].

또한 볼트와 너트의 접촉을 고려하기 위해 ABAQUS/Standard의 일반 접촉 (General contact) 옵션에서 표면 대 표면 (surface to surface) 접촉공식이 사용되었으며, 마스터 표면 (너트 또는 인서트 나사 표면)과 슬

레이브 표면(볼트 표면)의 접선 마찰 계수로써 0.1이 적용되었다. ABAQUS 매뉴얼의 표면 정의에 따라 접촉 해석 중 전단력 및 개폐 변화를 허용하기 위해 법선 방향으로의 기본 값이 사용되었다. 마지막으로 시드크기 (Seed size)는 매우 거친 메쉬로 (Coarse mesh) 인한 잘못된 접촉 동작, 즉 마스터 표면의 슬레이브 표면으로 침투하는 것을 방지하기 위해 2.0의 값 이하로 사용되었다. 본 연구에 사용되는 볼트와 너트의 물성치는 일반적으로 7 MW 급 이상의 대형 풍력 발전기에 사용되는 값으로 사용되었으며, 이는 Table 2와 Table 3에 기술되었다.

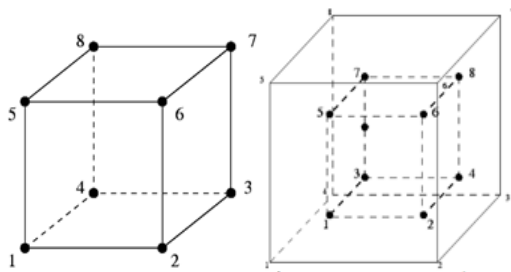


Fig 6. C3D8 8-node brick element and 2x2x2 integration point scheme points in ABAQUS/Standard

Table 2. Material properties of insert, bolt, and nut

Material	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
42CrMo4	200,000	0.3	900	1,100

Table 3. Experimental properties of bolts

Property	Value
Elastic modulus (MPa)	200,000
Poisson's ration (MPa)	0.3
Elongation* (%)	14
Reduction of area* (%)	52
Yield strength* (MPa)	983
Tensile strength* (MPa)	1,075
Srurface hardness* (HV)	364
Cone hardness* (HRC)	36
Impact* (J)	35

*: Average measurement data (from 4 specimens)

2.3 응력집중계수 (Stress Concentration Factor)

응력 집중 계수 (Kt)는 구조물 혹은 부품에 응력이 얼마나 집중되어 있는지 정량화하는 데 사용되는 무차원 계수로써, Eq. 1과 같이 기준 응력 (Reference stress) 과 가장 높은 응력의 비율로 정의된다.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{reference}} \quad (Eq.1)$$

응력 상승 요인이라고도 하는 응력 집중은 응력 흐름 (Stress flow) 의 단절 (Discontinuity) 을 유발하는 구성 요소 재료 또는 형상의 불규칙성의 결과로 발생하며, 이러한 현상은 일반적으로 구멍, 홈, 노치 및 필렛과 같은 불연속성에서 발생한다. 응력 집중은 흠집 및 굽힘과 같은 우발적인 손상으로 인해 발생할 수도 있다.

일반적으로 볼트에서의 기준 응력은 인장 시 응력 변화가 상대적으로 미미한 볼트 몸통 중앙의 평균응력으로 나타낸다. 볼트에서 응력 집중계수는 일반적으로 첫 번째 맞물린 나사산 (thread) 에서 가장 높고 볼트 끝으로 이동하는 각 연속 나사산에서 감소되는 특징을 가지고 있다.

3. 수치해석 결과

응력집중계수에 대한 설계매개변수의 영향성을 조사하기 전에 유한요소모델의 메쉬 크기, 즉 요소 크기에 따른 3차원 유한요소해석의 수렴이 검토되었다. Seed 크기가 2.0 mm인 거친 메쉬 모델은 seed 크기가 0.2 mm인 미세 메쉬 모델에 비해 편차가 5.7 %에 불과했으며 응력 집중 계수도 첫 번째 맞물린 스레드에서 가장 높았고 끝으로 이동하는 각 연속 스레드에서 점차 감소됨이 동일하게 확인되었다. 시간이 많이 소요되는 계산 비용을 고려하여 0.2 mm의 시드 크기는 나사산과 천이 영역에 사용되었고 2.0 mm의 크기는 볼트와 너트의 몸체에 사용되었다. 일반적으로 메쉬 사이즈가 작아짐에 따라 기준응력은 증가하는 경향이 있지만, 본 연구에서의 나타난 1st thread에서의 응력은 Seed 크기 변화에 큰 영향이 없음을 나타내고 있다.

Table 5. Mesh size effect on the stress concentration factor

Items	Fine mesh (seed=0.2)	Coarse mesh (seed=2.0)
Nominal stress at shank (theory)	649.61	649.61
Nominal stress at shank (FEA)	650.60	653.12
1st thread stress	2,098	1,975
2nd thread stress	529	1,066
Stress concentration factor at the 1st thread	3.23	3.04
Stress concentration factor at the 2nd thread	0.82	1.64
Deviation	0 %	5.7 %

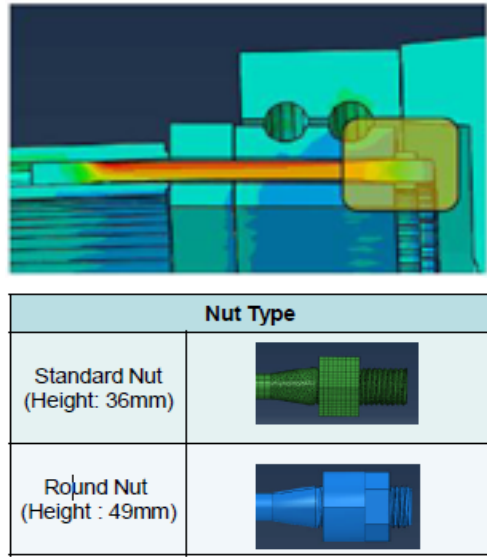


Fig 7. Nut type (standard nut and round nut)

유한요소모델링에 있어 2D FE 모델은 CA4X 요소를, 3D FE 모델은 C4D8 요소가 사용되었다.

이 장에서는 다양한 설계 형상이 적용된 볼트/너트 체결 모델을 분석하여 응력집중계수에 대한 영향성을 조사하였다. 다양한 설계 형상에는 너트 형상 유형, 너트 높이(체결된 나사산 수), Reduced shank (neck-down) 볼트 적용이 포함된다.

3.1 응력집중계수에 대한 너트 형상 영향성

Fig 7과 같이 응력집중계수(SCF) 감소를 위해 표준형과 원형의 두 가지 너트형이 분석되었다. 신뢰성 있는 해석을 위해 Fig 8와 같이 3D 모델과 2D 모델이 적용되었으며, 3차원 선형 FE 해석과 2차원 FE 해석의 결과는 Table 4와 5에 나타나 있다. 두 표에서 보이듯이 원형 타입의 너트가 사용되었을 시 응력집중계수가 10 %이상 감소되는 것을 확인할 수 있다.

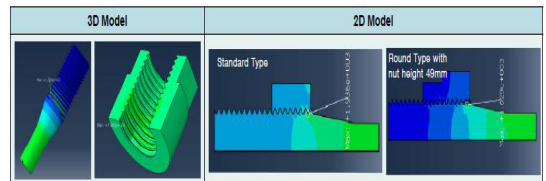


Fig 8. Finite element model (3D model and 2D model)

Table 6. 3D FE model analysis results

Nut type (3D)	Normal stress at shank (MPa)	max. stress at thread (MPa)	SCF	Reduction	Number of engaged threads
Standard	649	1,975	3.04	0 % (base)	8
Round	649	1,564	2.41	21 %	9

3.2 응력집중계수에 대한 너트 높이의 영향성

너트 높이, 즉 체결된 스레드(Engaged threads) 개수에 따른 응력집중계수의 영향성이 Fig. 9와 같이 3가지 경우에 대해서 2D 유한요소 해석을 통해서 검토되었다.

Table 7. 2D FE model analysis results

Nut type (2D)	Normal stress at shank (MPa)	maximum stress at thread (MPa)	SCF	Reduction	Number of engaged threads
Standard	649	1,936	2.98	0 % (base)	8
Round	649	1,629	2.51	16 %	9

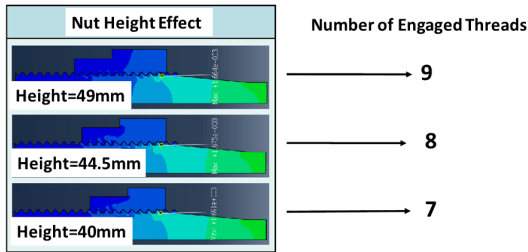


Fig 9. Height and number of engaged threads of M42 nut

Table 8. Nut height effect on SCF

Nut height (mm)	Norm stress (MPa)	Max. stress (MPa)	Number of engaged threads	SCF
49	650	1664	9	2.56
44.5	650	1675	8	2.58
40	650	1691	7	2.60

표 5에서의 수치해석결과를 보면 너트 높이는 응력 집중계수에 대한 영향성이 매우 미미한 것으로 나타나고 있다.

3.3 응력집중계수에 대한 Shank 영향성

본 세션에서는 일자형 (Straight) 볼트와 생크 (Shank) 혹은 neck-down 타입의 볼트 사용시 응력집중계수에 대한 영향성이 Fig. 10와 같이 2D 유한요소 해석을 통해 분석되었다.

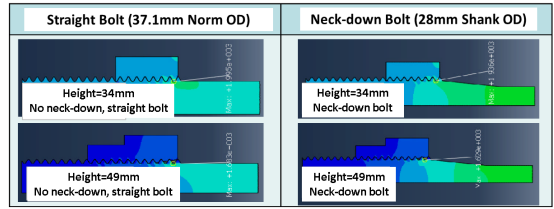


Fig. 10. 2D stress analysis of straight bolt and neck-down (reduced shank) bolt

표 7에서는 일반형 너트 사용시 볼트 타입 (Straight 또는 Reduced) 에 따른 응력집중계수의 비교를 보이고 있다. 그 결과 Reduced 타입의 볼트로 대체시 응력집중계수가 45 % 가량 감소됨을 확인할 수 있었다. 마찬가지로 표 8에서는 라운드형 너트 사용시 볼트타입에 따른 응력집중계수를 비교하였다. 수치해석결과 Reduced 타입의 볼트 사용시 일반형 볼트보다 응력집중이 45 % 가량 감소됨을 확인할 수 있었다. 표 7과 표 8을 동시에 비교 시 라운드형 너트와 Reduced 볼트 타입의 조인트 조합이 일반형 너트와 Reduced 볼트 타입의 조합보다 10 % 가량 응력집중을 감소시킴을 확인할 수 있었다. 이는 3.1장에서는 도출된 라운드형 너트가 일반형 너트보다 10 % 응력집중을 감소시키는 결과와 동일한 경향을 보임을 확인할 수 있었다.

4. 결론

풍력 터빈 로터 블레이드의 크기가 증가함에 따라 응력 집중 계수(SCF)는 설계측면에서 블레이드 루트부의 손상 및 파손을 줄이기 위한 중요한 설계 변수로 고려될 수 있다.

Table 9. Bolt shank effect on SCF (connected with round nut type)

Nut type	Shank type	Norm diameter (mm)	Norm stress (MPa)	Max. principal stress (MPa)	SCF	Reduction
Round	Straight	37.1	369	1683	4.56	0 % (base)
Round	Reduced	28	650	1629	2.51	45 %

Table 10. Bolt shank effect on SCF (connected with standard nut type)

Nut type	Shank type	Norm diameter (mm)	Norm stress (MPa)	Max. principal stress (MPa)	SCF	Reduction
Standard	Straight	37.1	369	1995	5.40	0 % (base)
Standard	Reduced	28	650	1936	2.98	44.8 %

본 연구에서는 다양한 형태의 볼트와 너트의 2차원 및 3차원 선형 유한요소 모델을 구성하여 응력집중계수 (SCF, Stress Concentration Factor)를 자세히 분석하였다. 이 연구를 통해 (1) 원형 너트 형상만으로 표준형 너트보다 응력 집중 계수를 18.5 % 감소시키는 데 이점이 있음을 확인하였으며, (2) 너트높이, 즉 Engaged threads 의 개수는 응력집중계수의 감소에 영향성이 미미함을 확인하였으며, (3) neck-down 혹은 reduced shank 볼트의 사용시 2D 및 3D FE 결과 모두에서 SCF를 40 % 줄이는 데 중요한 역할을 하고 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 수행된 설계 변수 영향성 조사를 통하여 피로수명에 영향을 주는 응력집중계수의 감소에 최적인 볼트/너트 형상은 라운드형 너트와 reduced 타입 볼트임을 도출하였다. 블레이드가 대형화됨에 따라 중력에 의해 블레이드가 받는 에지방향의 피로하중은 대형 블레이드 설계에서 매우 중요한 설계 인자 (Design Driver)로써 인지되고 있다. 종래에는 블레이드 루트부에 걸리는 하중의 영향성이 볼트-너트 조인트가 접하는 복합재의 손상에 초점이 이루어졌지만, 블레이드가 대형화됨에 따라 볼트-너트 체결부의 나사산에 증가된 하중이 집중될 수 있다. 이때 발생하는 높은 응력집중으로 인해 예기치 못한 루트부 조인트의 이른 파손, 더 나아가 블레이드의 파손이 야기될 수 있기 때문에 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 신재생에너지핵심기술사업(20213030020380, “육상풍력운송한계돌파를 위한 70m이상 접착식 분리형 블레이드 개발”)의 연구결과임. 본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20203020020030)의 연구결과임. 연구비 지원에 감사사를 드립니다.

참고문헌

[1] IRENA, October 2019, Future of Wind: Deployment, Investment, Technology, Grid Interaction, Socio-

Economic Aspects, ISBN 978-92-9260-155-3.

- [2] J.F. Manwell et al, 2002, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons.
- [3] R Scherer, V. Martinez, J.A. Mayugo, and J. Cost, Design and Performance of the T-Bolt Connection of Rotor Blades, proceedings of the European Wind Energy Conference, March 1-5, 1999.
- [4] Víctor Martínez, Alfredo Güemes, Dani Trias, and Norbert Blanco, Numerical and Experimental Analysis of Stress and Failure in T-Bolt Joints. Compos. Struct, 2011, 93, 2636-2645
- [5] Dayton Griffin, Blade System Design Studies Volume I-Composite Technology for Large Wind Turbine Blades, Sandia National Laboratories, USA, July 2002.
- [6] Stephen Nolet, October 2019, NAWEA/WINDTECH 2019, Plenary 4: Large Turbines on Land - “A Blade Maker’s View”.
- [7] Hong Kwan Kim, Tae Seong Kim, Jang Ho Lee, and Byung Young Moon, “Full Scale Structural Testing of Small Wind Turbine Composite Blade,”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, vol. 35, no. 11, The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 1407 - 1413, 01-Nov-2011.
- [8] DNV/Riso, Second Edition, 2002, Guidelines for Design of Wind Turbines, Chapter 5. Rotor.
- [9] General Electric Company, October 2016, Rotor Blade Assembly Having A Stiffening Root Insert, US 9464622B2
- [10] Turaj Ashuri, 2012, Beyond Classical Upscaling: Integrated Aeroservoelastic Design and Optimization of Large Offshore Wind Turbines, Master of Science in Aerospace Engineering, Sharif University of Technology.
- [11] Find Mølholt Jensen, Alexander Kling, and John Dalsgaard Sørensen, 2012, Change in failure type when wind turbine blades scale-up, Sandia Wind Turbine Workshop, Bladena BLADE ENABLER.

- [12] James D. Chalupnik, September 1968, Stress concentrations in bolt-thread roots, *Experimental Mechanics* 8, 398-404.
- [13] Toshimichi Fukuoka, Naoki Yamasaki, Hiroshi Kitagawa, and Minoru Hamada, 1986, Stress Concentration at the Root of a Screw Thread : Effects of Root Radius and Friction Coefficient, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A*, 1986, Volume 52, Issue 481, Pages 2201-2208.
- [14] T. Fukuoka Evaluation of the Method for Lowering Stress Concentration at the Thread Root of Bolted Joints With Modifications of Nut Shape, *ASME.(American Society of Mechanical Engineers), J. Pressure Vessel Technol*, February, 1997 119(1): 1 - 9,
- [15] Alexander JE Ashworth Briggs, Zhongyi y Zhang, and Hom N Dhakal, 2014, Study on T-bolt and pin-loaded bearing strengths and damage accumulation in E-glass/epoxy blade applications, *Journal of Composite Materials*. 49.
- [16] Victor Martínez, Alfredo Güemes, Norbert Blanco, 2001, Josep Costa Three-Dimensional Stress Analysis of the T-Bolt Joint, *MAT* 2000-0741-C02-01.
- [17] Mathijs Peeters, Gilberto Santo, Joris Degroote, and Wim Van Paeppegem, 2017, The Concept of Segmented Wind Turbine Blades: A Review, *MDPI, Energies*, 10, 1112, *Energies* 10(8), 1112.
- [18] Kwangtae Ha, Moritz Bätge, David Melcher, and Steffen Czichon, *Wind Energy Science*, May 2020, "Development and feasibility study of segment blade test methodology",
- [19] Smith, M, 2011, *ABAQUS/Standard User's Manual*, Version 6.14, Dassault Systèmes Simulia Corp.