

복합재를 이용한 헬리컬 로터와 풍력터빈 나무 설계 및 구조해석

하민수¹ · 한경태² · 최경호³ · 박영철[†]

(원고접수일 : 2012년 11월 26일, 원고수정일 : 2013년 1월 2일, 심사완료일 : 2013년 1월 17일)

Design and stress analysis of composite helical rotor and wind power tree

Min-Su Ha¹ · Kyoung-Tae Han² · Kyoung-Ho Choi³ · Young-Chul Park[†]

요약: 본 논문은 헬리컬 풍력터빈을 이용한 풍력터빈 나무의 구조적 안정성을 검토하는데 목적이 있다. 복합재료를 적용하여 헬리컬 로터 블레이드를 설계하였으며, 유한요소 해석을 통하여 안정성을 검토하였다. 또한 4개의 헬리컬 로터를 지지하고 있는 풍력터빈 나무에 대하여 풍압, 로터의 회전 그리고 자중을 고려한 구조해석을 수행하여 설계 타당성을 검토 하였다.

주제어: 풍력터빈 나무, 수직축 풍력터빈, 복합재료, 구조해석, 헬리컬 풍력터빈

Abstract: The objective of this paper is to analyze the structure of the wind power tree using a helical type wind turbine. The blades of a helical rotor is designed with a composite material. The structural analyses of a helical rotor have been implemented by finite element method. The structural analyses of the wind power tree which support four helical rotor, have been performed under a wind load, a rotational velocity of a rotor, and dead weight.

Keywords: Wind power tree, Vertical wind turbine, Composite material, Structural analysis, Helical wind turbine

1. 서 론

화석 에너지의 고갈로 인한 대체에너지 개발과 화석 연료 사용으로 인한 지구환경 문제가 야기되면서 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다[1].

풍력발전 시스템은 전 세계적으로 비중이 높아지고 있는 유망한 신재생에너지 시스템이다. 풍력터빈은 회전 축 기준으로 크게 수평축과 수직축으로 나눌 수 있으며 풍력터빈 성능 평가, 공력 특성 해석 그리고 터빈 구조 설계에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있다 [2]-[4]. 본 논문에서는 많은 연구들이 이루어지는 풍력터빈 성능 향상과 함께 풍력터빈이라는 기계설비에 미적 디자인을 융합한 풍력터빈 나무를 설계하고

구조적으로 안정성을 검토하였다.

풍력터빈 나무는 일반 나무의 개념을 풍력터빈에 적용한 것으로, 줄기 또는 기둥으로부터 가지가 뻗어나가는 개념을 응용한 것이다. 풍력터빈 나무는 도심 및 공원에 설치 가능하도록 소음 및 환경적인 요소를 고려하여 설계하였다. 풍력터빈 나무는 하나의 줄기(타워)에 가지형식으로 여러 갈래 나뉘어 각각의 가지에 풍력터빈이 설치된다. 풍력터빈의 운전 시 후류의 영향을 최소화하기 위하여 설치 높이와 각도를 다르게 하였다. 풍력터빈 나무는 단위 용량 100 W 헬리컬 로터를 이용하여 4기로 구성되며, 손실을 고려하여 전체 용량이 360 W 출력이 되도록 설계 된 것이다. 100 W

† 교신저자: (604-714) 부산광역시 사하구 낙동대로 550번길 37

동아대학교 기계공학과, E-mail: parkyc67@dau.ac.kr, Tel: 051)200-6991

1 동아대학교 기계공학과 대학원, E-mail: msha@dnde.co.kr, Tel: 051)920-2480

2 ㈜디엔디이, E-mail: kthan@dnde.co.kr, Tel: 051)920-2480

3 ㈜디엔디이, E-mail: khchoi@dnde.co.kr, Tel: 051)920-2480

헬리컬 로터와 360 W 풍력터빈 나무는 유동해석을 통하여 성능 및 공력 특성을 평가가 완료 된 것이다[5]. 본 논문에서는 헬리컬 로터와 풍력터빈 나무에 대하여 풍압, 로터의 회전 그리고 자중을 고려하여 구조건전성을 평가하였다. 풍압 조건을 고려하기 위하여 유동-구조 연성해석 기법을 적용하였다.

2. 풍력터빈 나무 설계

풍력터빈 나무는 크게 헬리컬 로터와 나무(타워)로 이루어진다. Figure 1은 풍력터빈 나무 전체 모델을 도시한 것으로 잎이 우거진 나무와 같은 모양이 되도록 설계 하였다. 풍력 터빈은 풍향 변화에 영향을 미치지 않는 수직축 헬리컬 타입으로 선정하였다. 헬리컬 타입은 다른 수직축 풍력터빈인 다리우스 타입, 자이로밀 타입에 비해 출력 변동 폭이 좁고, 수평면적에 비해 블레이드가 차지하는 비율이 높아 효율이 높기 때문이다. 헬리컬 로터는 딱딱한 느낌이 드는 모서리를 최대한 줄이고, 나무 가지 위에 위치하도록 하였다. 줄기에 4개의 가지가 뻗어나가도록 하였으며, 하중 분배를 위하여 90도 간격으로 가지가 위치하도록 하였다.

풍력터빈 나무 구조해석은 헬리컬 로터와 나무로 나누어 수행하여 구조건전성을 평가하였다.

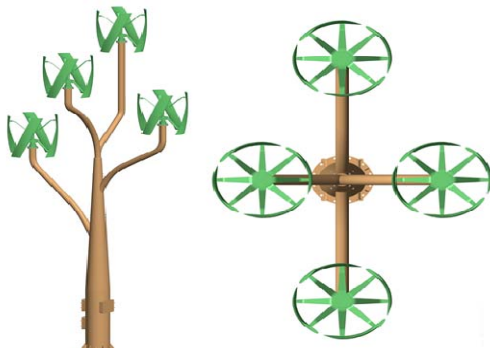


Figure 1: Wind power tree

3. 헬리컬 로터 구조해석

3.1 헬리컬 로터 해석 모델

헬리컬 로터는 블레이드, 회전축, 허브 그리고 스트

럿 등으로 이루어져 있다. Figure 2는 헬리컬 로터 3D 모델을 도시한 것이다. 회전축은 상부 허브와 하부 허브를 연결하고 풍력터빈이 정지하였을 때 바람에 의해 발생하는 굽힘에 대하여 저항하는 역할을 수행한다. 허브는 회전축과 스트럿을 고정시켜주는 부품으로 상·하단 두개로 구성된다. 스트럿은 블레이드와 허브를 연결하는 중요 부품이다.

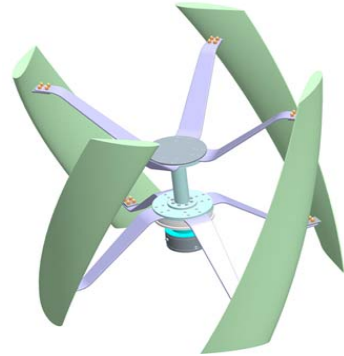


Figure 2: 3D model of helical rotor

헬리컬 로터 구성품 중에 회전축, 허브 그리고 스트럿은 SS400으로 설계하였다. SS400에 대한 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

Table 1: Material property for SS400

| Material | E [MPa] | ν | ρ [kg/m ³] | σ_y [MPa] |
|----------|--------------|-------|--------------------------------|---------------------|
| SS400 | 202,000 | 0.26 | 7,850 | 200 |

헬리컬 로터의 블레이드는 곡선으로 되어있어 제작을 용이하게 하기 위하여 유리섬유 복합재료로 설계하였다. 적용된 복합재료는 A130과 DB120이다. 두 재료에 대한 상세한 기계적 성질인 방향별 탄성계수, 프와송비 그리고 전단탄성계수를 Table 2에 나타내었다. 블레이드 적층은 블레이드 내부의 공간을 고려하여 적층수와 적층 각도를 정의하였다. 블레이드와 상·하 단개에 대한 적층 스케줄을 Table 3에 나타내었다. 블레이드는 길이 방향의 부하가 크기 때문에 비교적 강성이 높은 A130을 0° 방향으로 적층하고 뒤틀림 및 전단 방향의 강성을 가질 수 있도록 DB120을 ± 45° 방

향으로 적층하였다.

Table 2: Material property for blade

| Item | A130 | DB120 |
|---------------------|-------|-------|
| E_{xx} [MPa] | 31700 | 23200 |
| E_{yy} [MPa] | 7580 | 6550 |
| E_{zz} [MPa] | 7580 | 6500 |
| ν_{xy} | 0.32 | 0.39 |
| ν_{xz} | 0.32 | 0.32 |
| ν_{yz} | 0.32 | 0.35 |
| G_{xy} [MPa] | 3450 | 4140 |
| G_{xz} [MPa] | 3100 | 3720 |
| G_{yz} [MPa] | 3100 | 3720 |
| Thickness [mm] | 0.571 | 0.203 |
| Tensile X [MPa] | 868 | 610 |
| Tensile Y [MPa] | 33.8 | 24.9 |
| Tensile Z [MPa] | 33.8 | 24.9 |
| Compressive-X [MPa] | -334 | -551 |
| Compressive-Y [MPa] | -93.3 | -90.8 |
| Compressive-Z [MPa] | -93.3 | -90.8 |
| Shear XY [MPa] | 87.1 | 84.9 |
| Shear YZ [MPa] | 87.1 | 84.9 |
| Shear XZ [MPa] | 87.1 | 84.9 |

Table 3: Lay-up schedule

| Component | Lay-up schedule | Thickness |
|-----------|------------------------------------|-----------|
| Blade | $[\pm 45/0/6/\pm 45/0/6/\pm 45]_s$ | 8.07 mm |
| Cover | $[\pm 45/0/2/\pm 45]_s$ | 1.95 mm |

3.2 유한요소 모델

헬리컬 로터 유한요소 모델은 솔리드 요소와 셸 요소를 이용하여 생성하였다.

회전축, 허브 그리고 스트럿은 20절점 육면체 솔리드 요소를 이용하여 유한요소 모델을 생성하였다. 솔리드 요소는 병진방향으로 3개의 자유도를 가지고 있다. 블레이드는 복합재료 적층을 구현하기 위하여 8절점 적층 셸 요소(layered shell element)를 이용하

여 생성하였다. 적층 셸 요소는 병진방향 자유도 3개와 회전방향 자유도 3개를 가지고 있다. 생성된 유한요소 모델은 **Figure 3**에 도시하였으며, **Table 4**에 유한요소 모델 정보를 나타내고 있다.

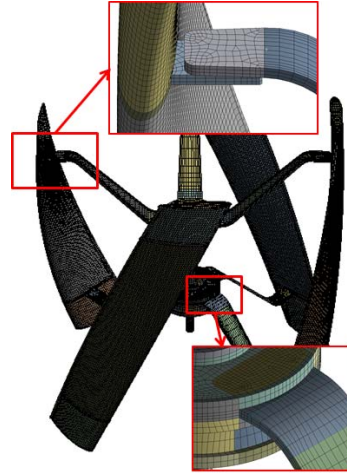


Figure 3: Finite Element model of a helical rotor

Table 4: Mesh information for helical rotor

| Item | Description |
|-----------------|-------------|
| No. of nodes | 137,407 |
| No. of elements | 120,503 |

3.3 경계조건

헬리컬 로터 구조해석을 위한 구속조건을 **Figure 4**에 도시하였다. 회전축의 반경 방향(적색), 축 방향(청색) 그리고 핀 연결 부의 반경 방향(녹색)으로 구속하였다.

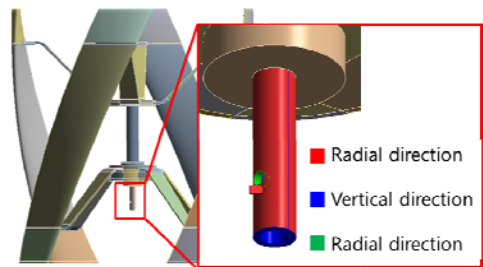


Figure 4: Boundary condition of a helical rotor for structural analysis

헬리컬 로터 구조해석을 위한 해석 조건을 Table 5에 정리하였다. 적용되는 하중은 회전속도, 풍하중 그리고 자중이다. 풍하중은 단방향 유동-구조 연성해석 기법을 이용하여 유동해석의 압력 결과를 구조해석의 하중으로 변환한 것이다. Figure 5는 대표적으로 입구 속도 11 [m/s] 조건의 하중 변환 결과를 도시한 것이다. 해석 Case 1 ~ Case 3은 정격 풍속 10 [m/s]에서 풍하중, 회전속도 그리고 자중이 모두 고려되는 조건이며, Case 4는 컷-아웃 풍속 11 [m/s]에서 풍하중, 회전속도 그리고 자중이 고려된 조건이다. Case 5는 내풍속 55 [m/s] 조건으로 로터가 정지해 있는 경우로 풍하중과 자중만 고려되는 조건이다. 구조해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS V14.0을 이용하여 수행하였다[1].

Table 5: Analysis condition for a helical rotor

| Case No. | Condition | | | |
|----------|-------------------------|-----------------|------------------------|-------------|
| | Rotation velocity [rpm] | Wind load [m/s] | Azimuth angle [degree] | Dead weight |
| Case 1 | 130 | 10 | 0 | gravity |
| Case 2 | 130 | 10 | 30 | gravity |
| Case 3 | 130 | 10 | 60 | gravity |
| Case 4 | 143 | 11 | 0 | gravity |
| Case 5 | - | 55 | 0 | gravity |

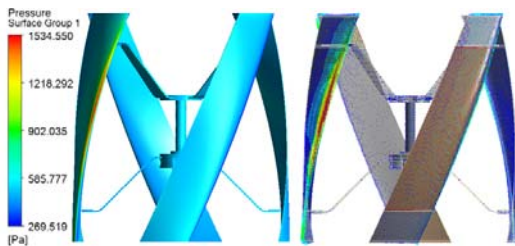


Figure 5: Interpolation result of the surface pressure under 11m/s wind velocity

3.4 구조해석 결과

Table 6에 각 해석 조건에 대한 변위, 등가응력 그리고 안전율을 나타내었다. Figure 6에 최대 변위가 Case 4의 총변형량을 도시하였다. 최대 변위는 3.24

[mm]로 블레이드 끝부분에서 발생하였다. Figure 7에 최대 응력이 발생한 Case 5의 응력 분포를 나타내었다. 최대 응력은 149.8 [MPa]로 회전축 구속 부분에서 발생하였으며, 안전율은 항복강도 기준으로 1.34로 구조적으로 안전하다고 판단된다.

Table 6: Result summary for a helical rotor

| Case No. | Total deformation [mm] | Equivalent stress [MPa] | Safety factor |
|----------|------------------------|-------------------------|---------------|
| Case 1 | 1.99 | 77.7 | 2.57 |
| Case 2 | 1.97 | 77.6 | 2.58 |
| Case 3 | 2.00 | 77.0 | 2.6 |
| Case 4 | 3.24 | 107.5 | 1.86 |
| Case 5 | 2.13 | 149.8 | 1.34 |

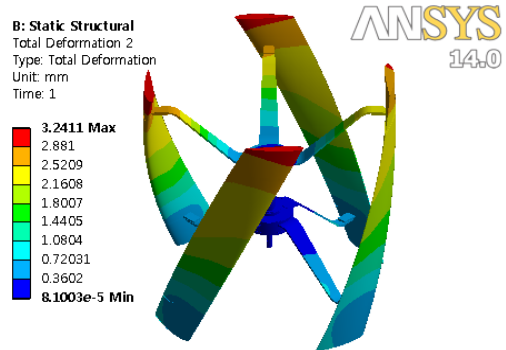


Figure 6: Total deformation under case 4

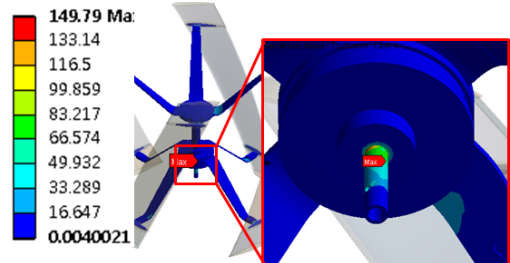


Figure 7: Equivalent stress under case 5

복합재료인 헬리컬 로터 블레이드의 구조 안정성을 평가하기 위하여 Puck's failure criteria를 적용하였다[6]. Puck's failure criteria는 섬유 파손과

섬유 간 파손을 각각 평가할 수 있다. Figure 8은 섬유 간 파손 모델을 나타내었으며, 섬유 간 파손은 3가지 모드가 존재하며, 섬유에 작용하는 응력과 전단력이 파괴 곡선을 벗어날 경우 각각의 모드로 섬유 간 파괴가 발생한다. 모드 A는 섬유의 횡 방향 인장력, 모드 B는 횡 방향 압축응력, 모드 C는 압축응력이 작용할 때의 파단 조건을 말한다. Table 7에 각 해석 조건에 대한 블레이드의 섬유 파손과 섬유 간 파손에 대한 해석 결과를 정리하였다. 모든 조건에서 섬유 파손과 섬유 간 파손 값이 1이하로 구조적으로 안전하다고 판단된다.

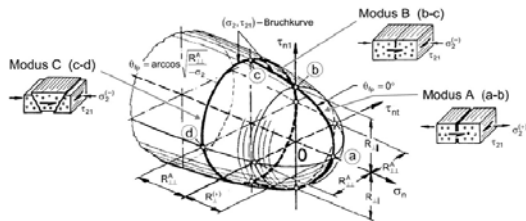


Figure 8: Puck's Inter Fiber Failure(IFF) model.

Table 7: Fiber failure and inter fiber failure results.

| Case No. | FF | IFF | Criteria |
|----------|--------|-------|----------|
| Case 1 | 0.0533 | 0.318 | 1 |
| Case 2 | 0.0532 | 0.317 | 1 |
| Case 3 | 0.0528 | 0.315 | 1 |
| Case 4 | 0.072 | 0.436 | 1 |
| Case 5 | 0.285 | 0.177 | 1 |

4 풍력터빈 나무 구조해석

풍력터빈 나무는 일반적인 나무 형상의 가지부분에 풍력터빈을 설치하여 가동한다. 이 때, 풍력터빈의 자중 및 풍하중 등으로 인해 나무의 줄기와 가지가 이어지는 부분이 상대적으로 취약하게 된다. 이에 풍력터빈 나무의 안정성을 평가하기 위해 구조해석을 수행하였다. 안정성평가는 가장 가혹한 조건인 내풍속 55 [m/s]일 경우의 항복강도 기준으로 평가하였다.

4.1 풍력터빈 나무 해석 모델

풍력터빈 나무 해석 모델은 나무의 줄기와 가지 부

분에 대하여 안정성을 평가하기 위하여 Figure 9와 같이 헬리컬 로터를 제외하여 단순화 하였으며, 풍력터빈 나무 줄기와 가지는 SS400으로 설계하였다.

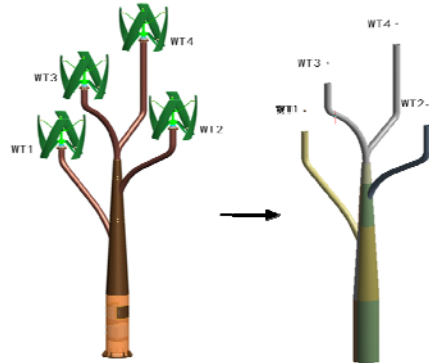


Figure 9: 3D model of the wind power tree

4.2 유한요소모델

풍력터빈 나무 유한요소 모델은 10절점 사면체 요소와 20절점 육면체 요소를 이용하여 생성하였다. 사면체 요소와 육면체 요소는 3개의 병진자유도를 가진다. Figure 10에 생성된 풍력터빈 나무 유한요소 모델을 도시하였으며, Table 8에 유한요소 모델 정보를 나타내었다.

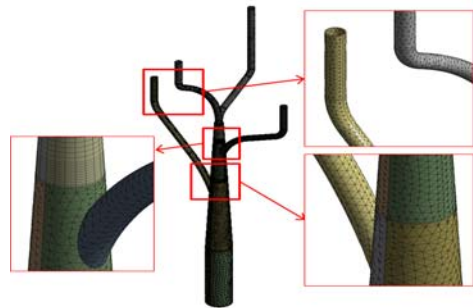


Figure 10: Finite Element model of the wind power tree

Table 8: Mesh information for the wind power tree

| Item | Description |
|-----------------|-------------|
| No. of nodes | 114,546 |
| No. of elements | 55,121 |

4.3 경계조건

풍력터빈 나무 구조해석을 위한 구속조건을 Figure 11에 도시하였으며, 바닥면의 모든 자유도를 구속하였다.

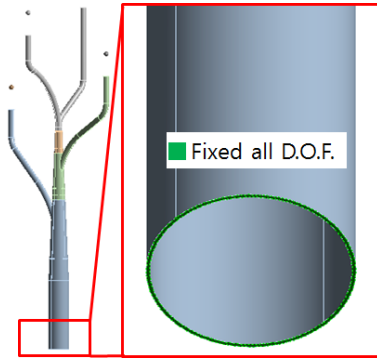


Figure 11: Boundary condition of the wind power tree for structural analysis

풍력터빈 나무의 하중조건은 극한 조건인 내풍속 55 [m/s]의 풍하중과 자중 조건을 적용하였다. 풍력터빈 나무 전체의 풍하중은 유동해석의 압력 결과를 구조하중으로 변환하여 적용하였다. Figure 12에 하중 변환 결과를 도시하였다.

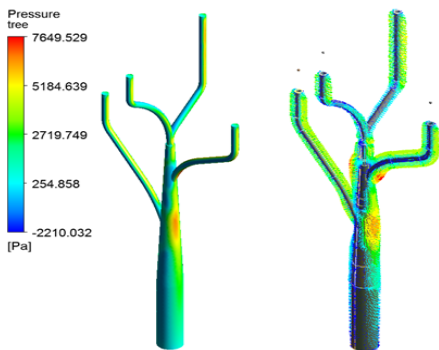


Figure 12: Interpolation result of surface pressure under 55m/s wind velocity

풍력터빈 나무 구조해석 모델에서 헬리컬 로터를 질량으로 적용하였기 때문에 헬리컬 로터에 의하여 발생하는 풍하중 또한 하중으로 고려되어야 한다. 유동해석에서 도출한 헬리컬 로터와 풍력터빈 나무가 체결되는 부분에서 하중을 Table 9에 정리하였으며, 4개의

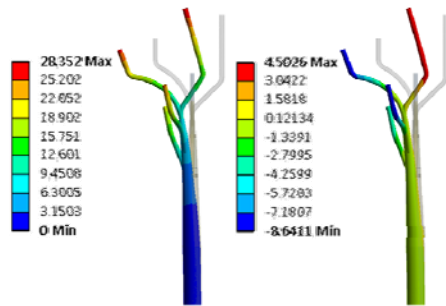
나무 가지에 하중으로 적용하였다.

Table 9: Wind load on branch of wind power tree

| Item | X Axis | Y Axis | Z Axis | Total |
|----------|---------|--------|---------|---------|
| Force[N] | -556.64 | 262.73 | -1358.3 | 1491.26 |

4.4 구조해석 결과

풍력터빈 나무의 변위 결과를 Figure 13에 도시하였다. 최대 변형량은 28.35 [mm]가 발생하였으며, 풍하중에 의하여 휨 현상이 발생하였다.



(a) total (b) vertical direction

Figure 13: Deformation of the wind power tree

Figure 14는 등가응력을 도시한 것이다. 최대 응력은 나무와 가지가 접하는 부분에서 발생하였으며, 그 값은 112.35 [MPa]이다. 이는 안전율은 1.78로 구조적으로 안전하다고 판단된다.

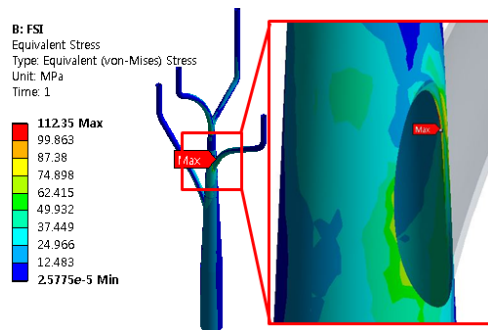


Figure 14: Equivalent stress of the wind power tree

5 결 론

헬리컬 로터와 풍력터빈 나무의 구조 설계가 완료되었으며, 구조해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 풍력터빈 나무의 헬리컬 로터에 대하여 풍하중, 회전속도 그리고 자중 조건을 고려한 구조해석을 수행하였다. 내풍속 55 [m/s] 조건에서 149.8 [MPa]의 최대 응력이 발생하였으며, 안전율 1.34로 구조적으로 안전하다고 판단된다. 블레이드의 경우 Puck's failure criteria으로 평가하였으며 최대 값이 0.436으로 컷-아웃 풍속 11 [m/s]에서 발생하였다. 최대 값이 1이하이므로 블레이드 또한 구조적은 안전하다.

(2) 풍력터빈 나무는 극한 조건인 내풍속 55 [m/s] 조건에 대하여 구조해석을 수행하였다. 최대 응력은 112.4 [MPa]이 나무와 가지가 접하는 부분에서 발생하였다. 안전율 1.78로 구조적으로 안전하다.

후 기

본 연구는 지역산업기술개발사업 (과제번호 : R0000744)의 일환으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행되었기에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J.-Y. Shin, Y.-S. Son, and D.-G. Cha, C.-G. Lee, and I.-C. Hwang, "Aerodynamic characteristics of a vertical axis wind turbine blade", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 30, no. 8, pp. 887-884, 2006 (in Korean).
- [2] B.-K. Kim, Y.-H. Kim, and W.-S. Song, S.-B. Lee, S.-K. Nam, and S.-M. Kim, "An experimental study on the performance of the Vertical-axis wind turbine", Journal of Fluid Machinery, vol. 10, no. 3, pp. 17-24, 2007 (in Korean).
- [3] C.-D. Gong, H.-S. Lee, and I.-K. Kim,

"Aerodynamic and structural design of a high efficiency small scale composite vertical axis wind turbine blade", Journal of the Korean Society of Aeronautical and Space Sciences, vol. 38, no. 8, pp. 758-765, 2011 (in Korean).

- [4] D.-H. Kim, H.-C. Choi, J.-W. Lee, G.-J. Ryu, S.-B. Kim, K.-W. Kim, H.-W. Nam, and M.-G. Lee, "Aerodynamic and structural design of 6kW class Vertical-axis wind turbine", Journal of Fluid Machinery, vol. 14, no. 2, pp. 52-58, 2011 (in Korean).
- [5] Y.-C. Park, M.-S. Ha, W.-H. Jung, and N.-J. Choi, "Design and CFD study on vertical type helical rotor blade for wind turbine tree", Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 194, 2012 (in Korean).
- [6] A. Puck and H. Schurmann, "Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models", Composite Science and Technology, vol. 58, pp. 1045-1067, 1998.