

수치해석을 이용한 어선용 수직축 풍력터빈의 기초연구

정광열¹·이영길^{2,†}·하윤진¹·강봉한¹·강대선²
인하대학교 대학원 조선해양공학과¹
인하대학교 항공·조선·산업공학부 조선해양공학전공²

A Fundamental Study on the Vertical-Axis Wind Turbine for Fishing Boat using Numerical Analysis

Kwang-Leol Jeong¹·Young-Gill Lee^{2,†}·Yoon-Jin Ha¹·Bong-Han Kang¹·Dae-Sun Kang²
Deop. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School of Inha University¹
Deop. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, the flow characteristics and structural safety of a 500W class vertical-axis wind turbines(VAWT) for a fishing boat are investigated by numerical simulations. Guide vanes to increase the performance of the VAWT are investigated. And the best guide vane in the numerical simulations is applied to the VAWT. Also, modal analyses are performed to find out the natural frequencies of the VAWT, and the resonance safety of the VAWT is evaluated. The structural analysis of the VAWT is carried out by one-way FSI(Fluid Structure Interaction). And the results are used for the evaluation of structural safety according to IEC 61400-1 code. Finally, the possibility of the installation of the VAWT on the wheelhouse of a 9.77ton class fishing boat is checked. The results of the present research could be used as one of the fundamental data to design a VAWT for a fishing boat.

Keywords : Vertical-axis wind turbine(수직축 풍력발전기), Numerical simulation(수치시뮬레이션), Modal analysis(모드해석)

1. 서론

최근 유류비 상승으로 소형 선박의 운항이나 어업 등에 큰 어려움을 겪고 있다. 특히, 오징어나 갈치 채낚기 어선은 전체 유류비의 60~65%를 조업 시 집어등 전력으로 사용하고 있는 실정이다. 전체 유류비에서 많은 부분을 차지하는 집어등 사용전력의 일부를 풍력에너지로 대체 할 수 있다면 유류비 절감 뿐 아니라 이산화탄소 배출감소 측면에서도 이점을 가질 수 있을 것이다. 조업 중인 선박에서 풍력발전을 하기 위해서는, 크기가 작고 풍향의 영향을 적게 받는 터빈이 필요하다.

풍력터빈의 종류는 잘 알려진 대로 수직축 풍력터빈과 수평축 풍력터빈으로 분류된다. 수평축 풍력터빈(Horizontal-Axis Wind Turbine, HAWT)은 효율이 높지만 바람의 영향을 많이 받기 때문에 별도의 요잉(yawing)제어 장치가 필요하다. 반면, 수직축 풍력터빈(Vertical-Axis Wind Turbine, VAWT)은 효율이 떨어지지만 풍향의 영향이 적은 장점을 갖고 있다. 또한, 구조적인 측면이나 설치비용 측면에서도 유리하다 (Korea Electric Engineers Association,

2009). 따라서 수직축 풍력터빈이 소형 선박에 적용하기에 적절할 것으로 판단된다.

소형 선박 위에 풍력터빈의 설치가 가능한 공간으로 선수, 선미 갑판 또는 조타실 위의 공간을 생각해 볼 수 있지만 선수나 선미 갑판에는 어구를 끌어올리는 윈치가 설치되고 선원들의 작업 공간이 좁아질 수 있으므로 풍력터빈을 설치하기 어려울 것으로 생각된다. 인테나가 설치되는 조타실 상부 공간이 풍력터빈을 설치하기에 적절할 것으로 생각되나 구조적인 문제와 의장품의 배치에 대한 추가적인 검토가 필요할 것이다.

본 연구에서는 어선의 유류비 절감을 위한 풍력발전 시스템을 적용하기 위한 기초연구로서 집풍장치를 통한 풍력발전기의 성능 개선을 연구하였다. 먼저 유동해석 기법의 정도를 검증하기 위하여 기존의 공개된 실험과 동일한 조건에서 수치계산을 수행하여 출력계수를 비교하였다. 다양한 형태의 집풍장치를 시뮬레이션 하여 적절한 집풍장치를 결정하였으며, 수치계산을 통하여 집풍장치를 통한 성능향상을 확인하였다. 그리고 모드해석을 통하여 풍력터빈의 공진안전성을 파악하였으며, one-way FSI(Fluid Structure Interaction)로 구조해석을 수행하여 구조 부재의 극한 강도를 평

가하였다. 유동해석은 Fluent 6.3을 이용하였으며, 구조해석은 ANSYS 14를 이용하여 계산하였다.

2. 수치기법의 검증

유동해석 방법의 정도를 확인하기 위하여 Takao et al.(2008)의 실험과 동일한 조건에서 수치계산을 실험하여 Takao et al.(2008)의 실험결과와 비교하였다. Takao et al.(2008)의 실험에 사용된 풍력터빈의 주요제원은 Table 1과 같다. 풍력터빈은 자이로밀형으로 날개의 수는 3개이고 유입풍속은 9m/s이다. Table 1의 solidity (고형성)은 투영면적과 날개면적의 비를 나타내며, 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (1)$$

Table 1 Principal dimensions of the VAWT (Takao, et al., 2008)

Foil shape	NACA-0015
Chord length, c [m]	0.137
Radius, r [m]	0.300
Span length, L [m]	0.700
c/r	0.457
Number of blades, N	3
Solidity, σ	0.218
Pitch angle [deg.]	0.000

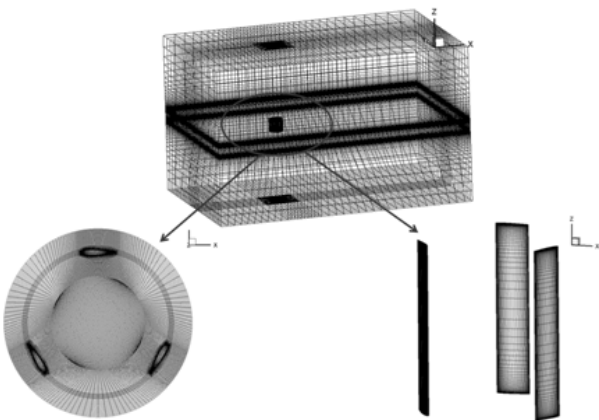


Fig. 1 Grid system of the present numerical simulations for verification

수치계산은 Fluent 6.3을 이용하였다. 지배방정식의 속도와 압력은 SIMPLE알고리즘을 이용하였으며, QUICK법을 이용하여 공간이산화 하였다. 난류모델은 2차원 날개의 실속을 비교적 정확

하게 예측할 수 있는 SST $k-\omega$ 모델을 사용하였다 (Hwang et al., 2010). 수치계산에 사용된 격자계와 계산영역은 Fig. 1과 같다. 스트럿과 샤프트는 무시하고 날개만을 모델링 하였다. 직사각형의 정렬격자로 작성하였으며, 경계층 해석을 위하여 상대적으로 표면마찰력이 큰 날개 앞전(leading edge)과 끝단(tip)에서 $y+<30$ 이 되도록 하였으며, 이외의 영역은 $y+<100$ 이 되도록 하였다. 터빈의 회전을 고려하기 위하여 터빈과 함께 회전하는 원통형의 계산영역과 고정된 외부의 계산영역으로 분리하여 작성하였으며, 터빈의 회전은 sliding moving mesh법을 이용하여 처리하였다. 수치계산에서 유입풍속에 따른 출력의 영향을 알아보기 위하여 6m/s와 9m/s에서 계산을 수행하였으며, 주속비(Tip Speed Ratio, TSR)는 0.8~1.4까지 0.2간격으로 수행하였다. 주속비는 식 (2)와 같이 정의된다. 식 (2)의 w 는 각속도를 나타낸다.

$$TSR = \frac{rw}{V_{wind}} \quad (2)$$

수치해석을 통해 얻은 출력계수와 Takao et al.(2008)의 실험결과를 Fig. 2에 비교하였으며, 서로 근접한 경향을 보이는 것을 볼 수 있다. Fig.2의 C_p 는 동력계수로서 식 (3)과 같다. 식 (3)의 P_{out} 는 터빈의 출력을 나타내고, ρ 는 밀도, $A(=2rL)$ 는 터빈의 투영면적을 나타낸다.

또한, 풍속 6m/s와 9m/s의 수치해석결과에서 결과에 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 본 계산의 결과로 미루어 보아 상용 프로그램인 Fluent를 이용하여 유용한 유동해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각되어 이후 진행되는 500W급 풍력발전기의 유동해석에 활용하였다.

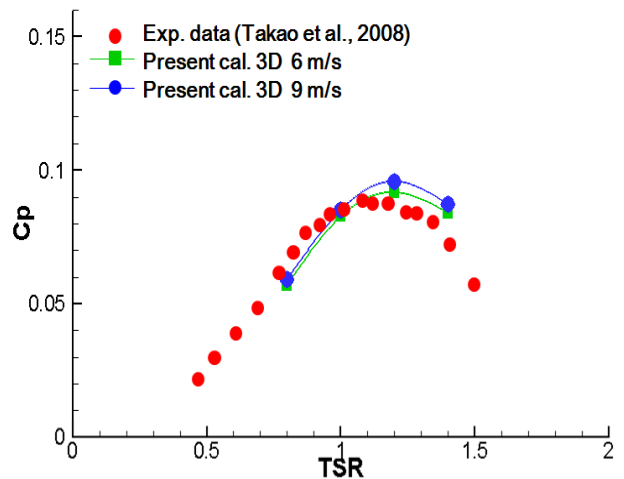


Fig. 2 Comparisons of the power coefficients of the VAWT between the present calculation results and experimental data

$$C_p = \frac{P_{out}}{\frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3} \quad (3)$$

3. 500W 풍력터빈 주위의 유동해석

3.1 500W급 풍력터빈의 출력성능

500W급 풍력터빈의 주요제원은 Table 2와 같다. Takao et al.(2008)의 모형에 비하여 높이에 비하여 폭이 넓고 solidity가 작다.

날개가 두꺼우면 양력은 감소하는데 반하여 실속이 높은 각도에서 일어나기 때문에 터빈의 익형은 NACA-0024로 결정하여 넓은 영역에서 양력이 발생하도록 하였으며, 구조적 안전성도 증가시켰다. 효율향상을 위하여 pitch 각도를 -5.0 도(앞전이 바깥을 향함) 결정하였다. 날개형상과 pitch 각도가 효율에 주는 영향에 대한 자세한 내용은 Fiedler and Tullis (2009)에서 찾아볼 수 있다. Fiedler and Tullis (2009)의 연구보다 σ 를 크게 결정하여 시동 속도(cut-in velocity)를 작아지도록 chord길이를 결정하였다.

Table 2 Principal dimensions of the 500W class VAWT

Foil shape	NACA-0024
Chord length, c [m]	0.270
Radius, r [m]	0.750
Span length, L [m]	1.600
c/r	0.347
Number of blades	3
Solidity, σ	0.172
Pitch angle [deg.]	-5.0

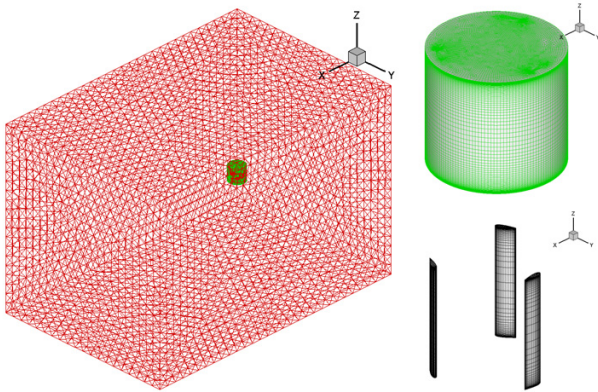


Fig. 3 Grid system and computational domain for 500W class VAWT

풍력터빈의 출력과 토크 성능을 알아보기 위하여 Fig. 3에 보이는 것과 같이 풍력터빈의 날개만을 모델링 하였으며, 계산결과에 상대적으로 영향이 적은 풍력터빈 외부 영역은 삼각뿔 형태의 비정렬 격자로 작성하였다. TSR은 0.8~1.4까지 0.2간격으로 작성하였다. 풍속은 설계풍속인 12m/s이다. 수치계산을 통해 얻은 출력곡선과 토크곡선은 Fig. 4와 같다.

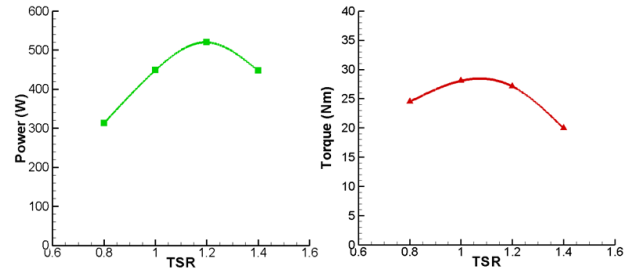


Fig. 4 Torque and power curves of 500W class VAWT (results of the present calculation)

풍력터빈의 최대출력은 TSR=1.2 주위에서 나타나는 것을 볼 수 있으며, 정격 출력인 500W보다 다소 높은 약 510W가 나오는 것을 볼 수 있다. 출력곡선으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 최대 출력계수는 약 0.2로 Fiedler and Tullis (2009)의 연구결과에 비하여 약 30% 작게 나타난다. 이것은 σ 이 크기 때문인 것으로 생각된다.

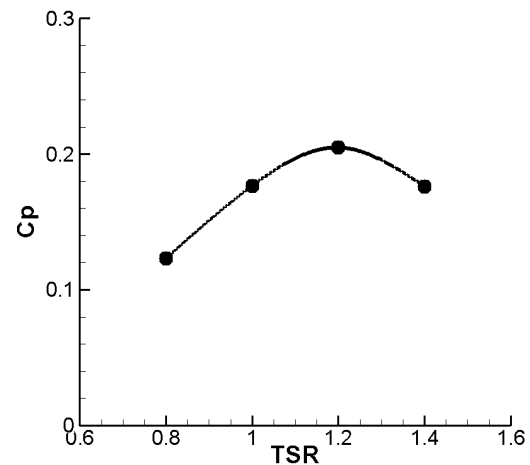


Fig. 5 Power coefficient curves of 500W class VAWT (results of the present calculation)

3.2 집풍장치 설계를 위한 2차원 유동해석

집풍장치설계를 위한 설계자료를 얻기 위하여 2차원 유동해석을 수행하였다. 일반적으로 집풍장치는 풍향에 따라 회전하여 효율이 최대가 되도록 하지만 (Takao, et al., 2008), 본 연구에서는 높은 내구성과 단순한 구조를 위하여 고정된 형태를 검토 대상으로 하였다. 집풍장치가 고정되면 바람의 방향에 따라 성능의 차이가 클 것이 예상되기 때문에 그 차이가 작아지도록 Fig. 5와 같이 4개와 5개의 타원형(장축:단축=1:20)의 집풍장치를 등간격으로 배치하였다. CASE 1-2와 CASE 2-2는 바람방향의 영향을 알아보기 위하여 CASE 1-1과 2-1을 회전하여 배치한 경우이다. 수치계산은 출력이 최대가 나타나는 TSR=1.2에서 수행하였다. Fig. 6에 보이는 것과 같이 집풍장치가 4개인 경우가 5개인 경우에 비하여 성능이 높게 나타난다.

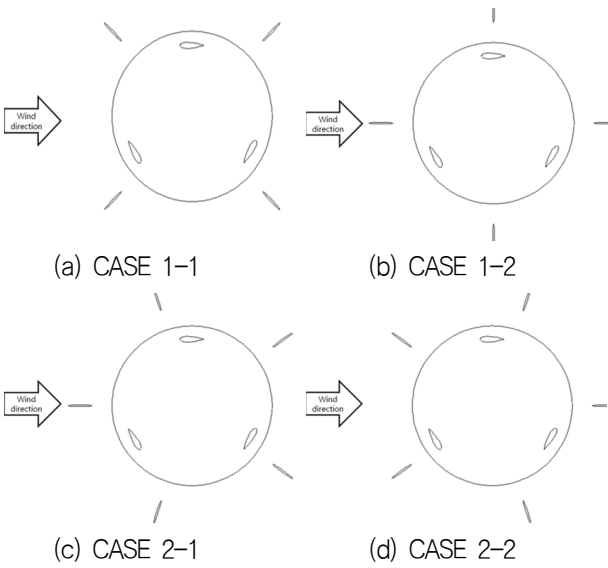


Fig. 6 Arrangements of elliptic guide vanes

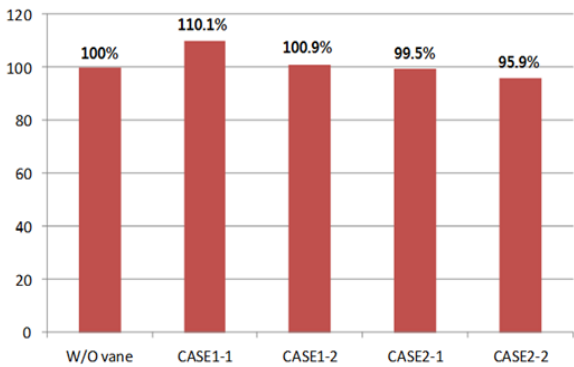


Fig. 7 Comparison of the power of VAWTs with elliptic guide vanes (two-dimensional numerical simulation results)

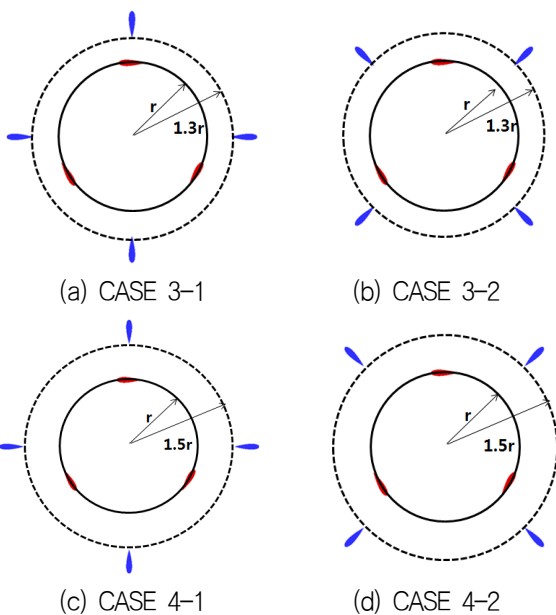


Fig. 8 Arrangements of NACA-0024 guide vanes

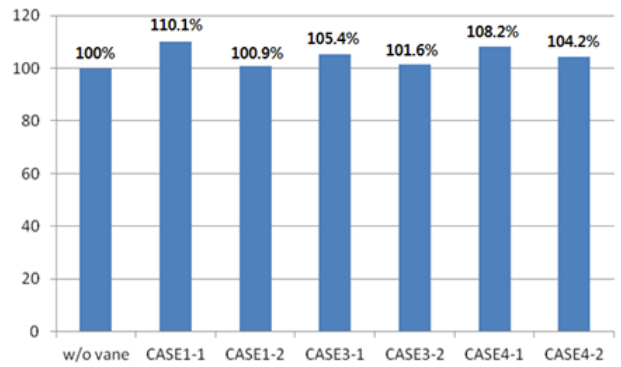


Fig. 9 Comparison of the power of VAWTs with NACA-0024 guide vanes (two-dimensional numerical simulation results)

3.3 집풍장치에 의한 성능 향상 평가

집풍장치에 의한 성능 향상을 평가하기 위하여 Fig. 9와 같이 풍력발전기의 지지구조물을 포함한 유동해석을 수행하였다. 내부의 중요 구조물을 포함한 계산이기 때문에 격자생성의 편의를 위하여 삼각뿔형태의 비정렬격자를 이용하여 수치계산을 수행하였다.

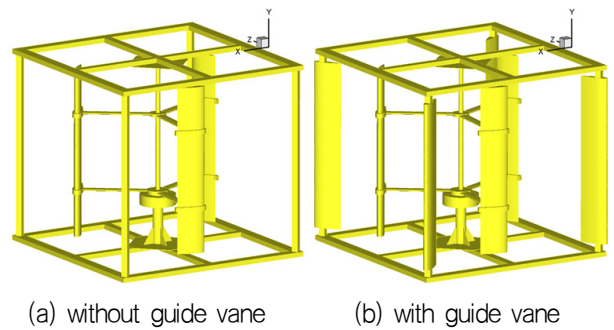


Fig. 10 perspective view of 500W class wind turbine

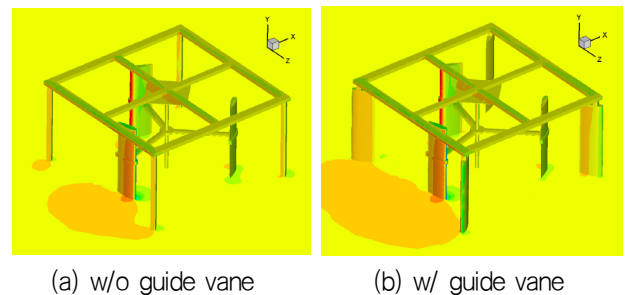


Fig. 11 Comparison of pressure contour around the 500W class VAWT (Z=0.8m, 2.61sec, wind direction : left to right)

Fig. 11은 터빈 주위 압력의 분포를 나타낸 그림이다. 터빈의 압력면에 압력이 다소 상승하지만 그 차이가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나 이러한 압력의 차이가 Fig. 12에 나타난 것과 같이 터빈의 회전력을 다소 상승 시키는 것을 볼 수 있다.

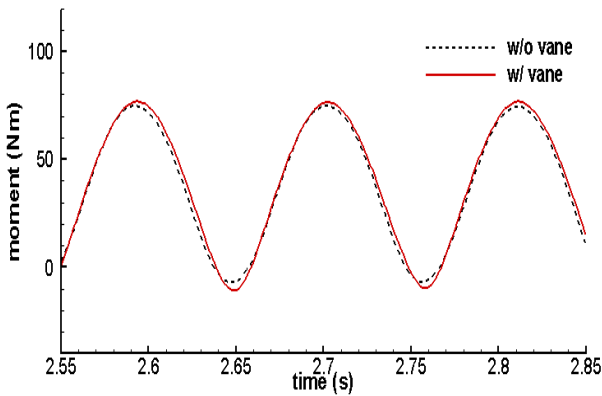
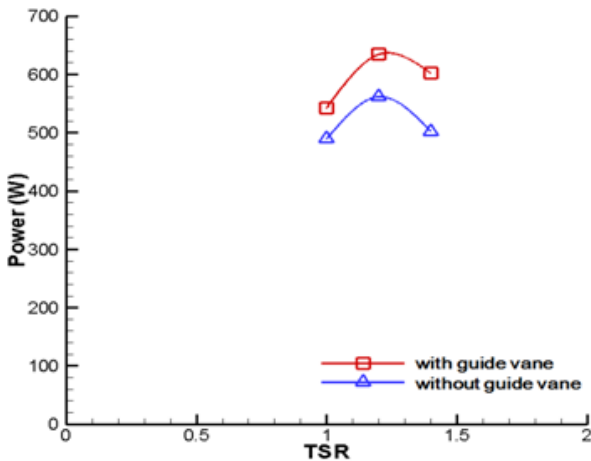
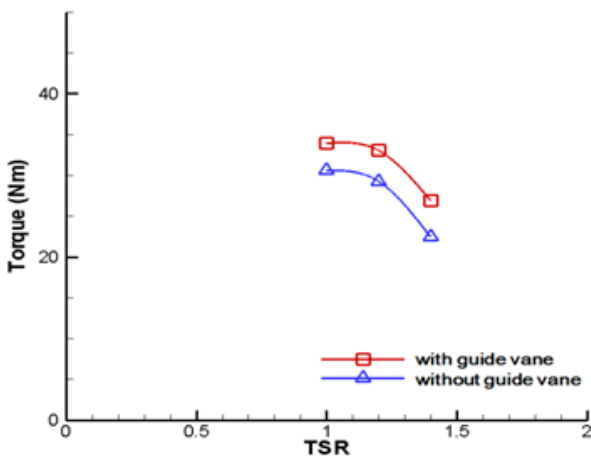


Fig. 12 Comparison of torque histories of the 500W class VAWT

회전력의 증가량이 진폭에 비하여 작지만 회전력을 평균하면 Fig. 13과 같이 약 13% 증가하고 출력도 동일한 비율로 상승하게 된다. 모든 풍속에서 터빈의 출력이 최대라고 가정하고 속도에 따른 출력을 비교하면 Fig. 14와 같다.



(a) power curves



(b) torque curves

Fig. 13 Comparison of torque and power curves of the 500W class VAWT w/ and w/o guide vanes

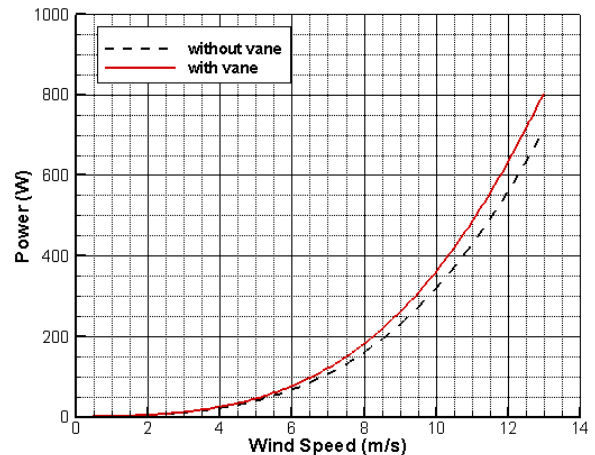


Fig. 14 Comparison of the power curves of the 500W class VAWT by guide vanes

4. 500W급 풍력발전기의 구조 안정성 평가

소형 풍력발전용 터빈의 구조적인 안정성에 대해 적절한 안전 수준 확보 여부를 판정하기 위해 구조부재의 모드해석과 극한강도에 대한 모형실험을 통해 확인해야 한다.

본 연구에서는 수치적인 방법으로 소형 풍력터빈의 구조 안정성을 평가하였다. 구조해석에는 상용 프로그램 ANSYS 14.0을 이용하였다. 격자생성 프로그램인 ANSYS ICEM CFD를 이용하여 Fig. 15와 같은 Tetra-hedral 격자계를 생성하였다. 전체 노드 수는 약 45만개이며, 3D 솔리드요소로 작성하였다. 날개와 날개를 중심축과 연결하는 지지대는 알루미늄이고 이외의 구조물은 모두 구조용 강이다. 각 재료의 물성치는 Table 3과 같다.

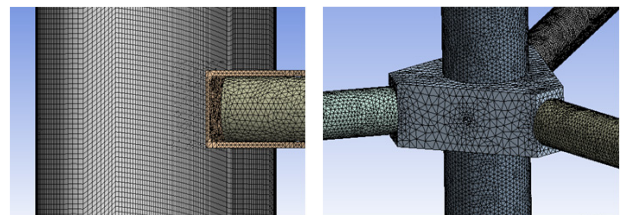


Fig. 15 Grid systems of 500 W class wind turbine

Table 3 Properties of a material for the modal analysis

	Structure steel	Alumimun alloy
Shear modulus[Pa]	7.4 x 10 ¹⁰	2.7 x 10 ¹⁰
Young's modulus[Pa]	2.0 x 10 ¹⁰	7.1 x 10 ¹⁰
Yield Strength[Pa]	2.5 x 10 ¹⁰	2.8 x 10 ¹⁰
Density[kg/m ³]	7850	2770

4.1 모드해석

풍력발전 시스템은 바닥 코너가 고정되어 있다고 가정하여 바닥면의 코너 네 곳은 모든 방향이 구속되어 있는 것으로 설정하였으며, 터빈 축의 지지하는 부분은 축방향 회전이 자유롭고 나머지 방향은 모두 구속되었다고 설정하였다.

Fig. 16은 풍력발전기 1차 ~ 4차 모드에 의한 변위를 나타낸 그림이다. 공진 발생 시 날개를 지지하는 스트럿과 샤프트의 연결부분에서 큰 변위가 예상된다. Fig. 17은 TSR에 따른 풍력터빈의 진동수와 모드해석의 고유진동수를 비교한 것이다. TSR이 증가하여도 고유주기와 기진주기에 차이가 있어 공진에 대하여 안정한 것으로 판단된다. 향후 소형 선박에 풍력터빈이 설치되었을 때에 대하여 선박에 의한 진동을 고려하지 못하였지만, TSR에 따른 회전 시 풍력터빈의 진동수에 비하여 고유진동수가 높기 때문에 향후 소형 선박에 설치되어도 공진에 안정할 것으로 예상된다.

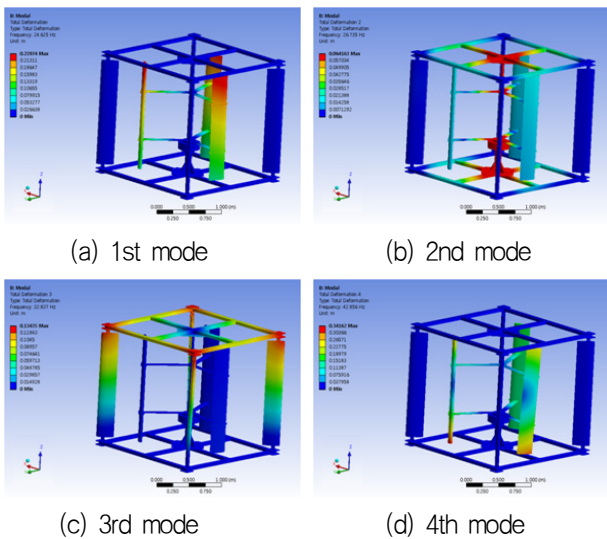


Fig. 16 Displacement of the 500W class VAWT at the first 4 modes

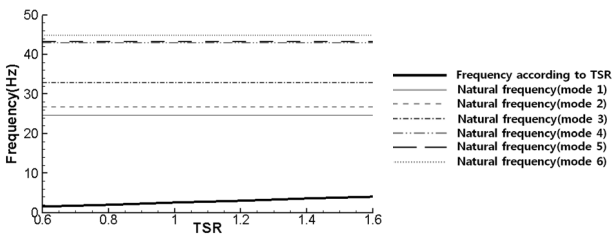


Fig. 17 Comparison of the natural frequencies with the frequency according to TSR

4.2 강도해석

IEC(International Electrotechnical Commission) 61400-1 (2005)에서 규정하는 풍력발전기 전체 시스템의 구조에 대한 설

계 기준에 따라 구조부재의 극한강도 평가를 수행하였다. 이 기준은 정격 출력 1 kW급 미만의 초소형 풍력발전시스템에 적용된다. 이 기준에 따르면 본 연구의 대상 풍력발전기는 1등급으로 풍속 50m/s의 조건에서 안전하도록 설계되어야 한다. 이를 평가하기 위하여 one-way FSI방법을 사용하였다. Fluent를 이용하여 풍속 50m/s에서의 풍압력을 계산하였으며, 수치계산으로 얻은 풍압력을 구조계산용 모델에 적용하여 구조해석을 수행하였다.

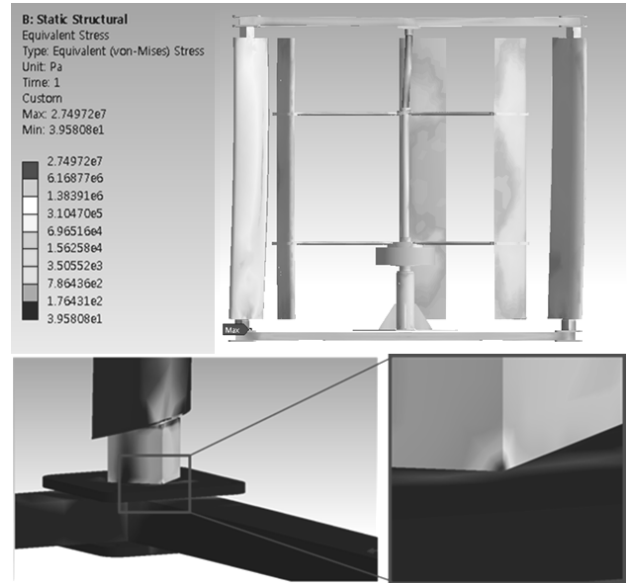


Fig. 18 Stress contour on the 500W class VAWT with guide vanes

풍력터빈의 경우, 태풍과 같은 극한 환경이 되면 초기 상태(Idle state)로 고정 시키기 때문에 계산 조건은 초기 상태로 풍력터빈을 고정하였으며, 풍력터빈과 지면이 맞닿아 있는 부분은 바닥에 고정시켰다. Fig. 18은 집풍장치가 있는 500W급 풍력터빈 표면의 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 18을 보면, 풍속 50m/s일 때 풍력터빈의 중심축 상단부에 상대적으로 큰 응력이 발생되고, 집풍장치의 날개 하단부 파이프에서 최대 응력이 발생된다. 이는 풍력터빈 날개의 집풍장치에 큰 유체하중이 작용하기 때문으로 판단된다. 풍력터빈을 지지하는 중심축과 집풍장치 날개 내부의 파이프에서 높은 응력이 발생하지만, 최대 응력이 27.5MPa로 구조용강의 항복 응력인 250MPa에 비하여 매우 낮다. 전체적인 구조해석결과를 Table 4에 정리하였다. IEC 61400-1(2005)에서 규정하는 풍력발전기 전체 시스템의 구조에 대한 극한 강도 평가 기준은 식 (4)와 같다.

Table 4 Results of structure analysis of the 500W class VAWT with guide vanes

Yield stress (Structural steel)	Maximum stress	Maximum modulus of strain	Maximum strain
250.0MPa	27.5MPa	$2.5 \times 10^{-4}m/m$	$3.7 \times 10^{-4}m$

$$S_{St} = \frac{\sigma \times \gamma_F}{\sigma_a \times \gamma_M} \leq 1.0 \quad (4)$$

여기서 σ 는 하중, σ_a 는 재료의 허용응력, γ_F 는 하중의 안전계수, γ_M 은 재료의 안전계수이다. IEC 61400-1 (2005)를 보면, 재료의 안전계수, 재료특성 결정에 대한 요인과 극한하중에 대한 안전계수들이 있다. 본 해석에서는 재료특성 결정에 대한 요인들을 제대로 고려하기 어려우므로 보수적인 평가를 위하여 재료 안전계수 3.0을 사용하였다. 또한 극한하중에 대한 안전계수도 보수적인 평가를 위하여 3.0을 사용하였다. 극한강도의 구조 안정성 평가 결과, Safety margin이 0.99로 극한 풍속에서 풍력터빈이 만족해야할 극한 강도의 조건 1.00이하로 만족한 것을 확인할 수 있다.

5. 9.77톤 갈치채낚기어선에 적용가능성 검토

수행된 연구를 바탕으로 소형 어선 중 9.77톤 갈치채낚기 어선에 적용가능성을 개략적으로 검토하였다. 2007년부터 정부차원에서 LED 집어등 상용화 사업을 추진하고 있다. 9.77톤 갈치채낚기 어선이 LED 집어등을 사용하려면, 사용전력은 약 4kW이며, 발전에 필요한 유류비는 한 달에 약 115만원 이다.

Fig. 19는 9.77톤 갈치채낚기어선의 일반배치도 중 측면도이다. 조타실 위쪽에 설치된 GPS와 안테나의 위치를 이동하면 길이방향으로 1.9m정도의 공간을 확보할 수 있을 것이며, 그 위치에 500W급 풍력터빈의 설치가 가능할 것으로 생각된다. Fig. 19는 조타실 위쪽에 설치된 500W급 수직축 풍력터빈에 대한 개략적인 모습이다. 집풍장치를 포함한 500W급 풍력터빈의 크기가 조타실 위의 공간에 비해 크기 때문에 집풍장치를 제외한다면 풍력터빈 설치가 가능할 것으로 생각된다.

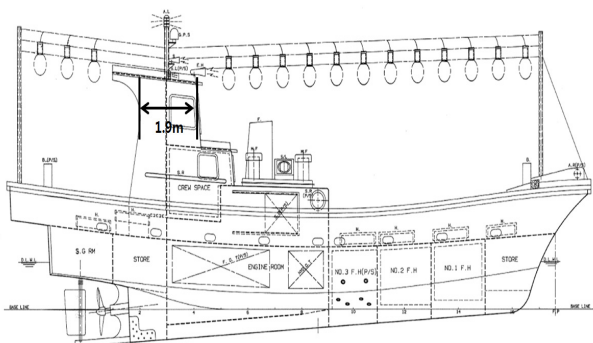


Fig. 19 General arrangement of the G/T 9.77 ton class fishing boat(profile)

선박의 상부에 풍력발전기를 설치하게 되면 복원성에 영향을 줄 수 있으므로 풍력발전기는 최대한 가볍고 무게중심이 낮게 제작 되어야 한다. 또한, 선박의 항주 시 풍력발전기의 넓은 면적은

공기저항 증가의 원인이 되므로 면적을 최소화하기 위한 방법이 필요하다. 따라서 항주 시 풍력터빈 및 운항 시 선박의 안정성을 위하여 풍력터빈을 조타실 위에 놓힐 수 있도록 접이식으로 고안한 개략적인 방법을 Fig. 20에 나타내었다. 또한 500W급 풍력터빈을 본 선형의 조타실 위에 설치하였을 때 기대할 수 있는 유류비 감소량은 약 13%이다. 현재까지 풍력터빈은 선박에 적용하기에 너무 크므로 풍력터빈의 크기 감소를 위한 관련된 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다. 이처럼 선박에 적용되는 풍력터빈의 경우 크기를 감소시키는 것 외에도 풍력터빈과 운항 시 선박의 안정성 및 안전성을 고려하여야 한다.

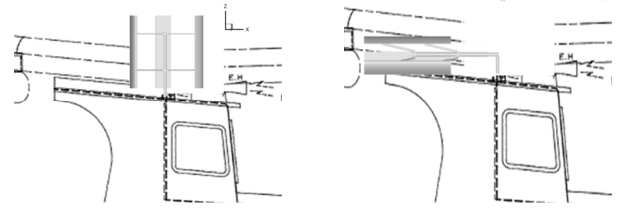


Fig. 20 Schematic view of the 500 W class VAWT installed on the wheelhouse

6. 결론

본 연구에서는 항 후 소형 수직축 풍력터빈의 설계를 위한 기초연구로 유동해석, 모드해석과 구조해석을 수행하였다. 그리고 9.77톤 갈치채낚기 어선에 적용가능성을 검토하여 보았다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 500W급 풍력터빈에 대하여 집풍장치의 효과를 확인하였다. 집풍장치는 풍속 증가 시키는 효과가 없으며, 날개에 작용하는 압력을 상승시켜 풍력터빈 성능을 개선한다. 본 연구의 대상 터빈의 경우 집풍장치에 의하여 설계속도에서 약 13%의 성능이 향상 되었다.
- 2) 모드해석결과 각 모드의 고유진동수가 풍력터빈의 진동수에 비하여 높기 때문에 본 연구의 대상 풍력터빈은 공진에 안전할 것으로 예상된다. 그러나 선박적용 시 선박의 진동과 지지 구조물의 특성에 대한 연구를 추가적으로 수행하여야 한다.
- 3) One-way FSI 방법으로 풍력발전기의 극한하중을 평가하였으며, 본 연구의 대상 풍력발전기는 IEC 61400-1의 규정을 만족하는 것을 확인하였다. 본 연구결과에서 풍력터빈의 표면 응력들을 확인하였을 때 풍력터빈의 중심축 상단부에 상대적으로 큰 응력이 발생하고 집풍장치의 날개 하단부의 파이프에서 최대 응력이 발생하였다.
- 4) 소형어선에 수직축 풍력터빈의 설치 가능성을 검토하기 위하여 9.77톤 갈치채낚기 어선에 적용해보았다. 본 선형의 조타실 상부 공간은 풍력터빈 설치에 적절할 것으로 보았으며, 개략적인 고안이지만 접이식으로 풍력터빈을 설치하였을 때 풍력터빈과 운항 시 선박의 안정성 및 안전성을 고려할 수 있다.

또한 500W급의 풍력터빈을 9.77톤 갈치채낚기 어선에 설치 하였을 때 약 13%의 유류량을 감소시킬 수 있다. 따라서 소형 선박에 풍력터빈을 설치하게 되면, 경제적인 측면에서 유리할 것이다.

Takao, M., Maeda, T., Kamada, Y., Oki, M. & Kuma, H., 2008. A Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine with a Directed Guide Vane Row, *Journal of Fluid Science and Technology*, 3(3), pp.379-386.

후 기

이 논문은 2010년도 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20110062).

References

- Fiedler, A.J. & Tullis, S., 2009. Blade Offset and Pitch Effects on a High Solidity Vertical Axis Wind Turbine, *Wind Engineering*, 33(3), pp.237-246.
- Hwang, M.H. Kim, D.H. Lee, J.W. Oh, M.W. Kim, M.H. & Ryu, G.J., 2010. Aerodynamic analysis and comparison of experimental data for 2-bladed vertical axis wind turbine, *Korean Society for Computational Fluids Engineering*, 15(4), pp 85-91.
- IEC 61400-1, 2005. *Wind turbines part 1 : Design requirements*. International Electrotechnical Commission.
- Korea Electric Engineers Association, 2009. *Electrical power technology query reply casebook for electric engineers(V)*, Seoul: Korea Electric Engineers Association.



정 광 열



이 영 길



하 윤 진



강 봉 한



강 대 선