

반응표면법을 활용한 소형풍력터빈의 유인날개 형상 최적화에 관한 연구

김인철* · 최현준* · 구희석* · 정해창** · 양창조**†

A Study on Optimization of Guide Vane for Small Wind Turbine Using Response Surface Method

In-Cheol Kim*, Hyen-Jun Choi*, Hui-Seok Gu*, Haechang Jeong**, Changjo Yang**†

Key Words : Small wind power(소형풍력), Guide vane(유인날개), CFD(전산유체역학), Response surface method(반응표면법),
Performance curve(성능곡선)

ABSTRACT

Small wind power generation is a power facility with a blade rotation area of 200m² or less (rated output of less than 1kW), and is an eco-friendly energy source. However, in Korea, location conditions require a minimum wind speed of 6 m/s or more, and the initial investment cost is relatively high. Due to this, the penetration rate is low, and due to the lack of blade and generator design technology, it is experiencing difficulties such as reduced effective power generation, noise/vibration, and maintenance. However, in Japan, research on small wind power generation using additional devices is actively underway, and research on the form of power generation by combining several wind turbines is also in progress. In this study, we aim to optimize the shape of guide vanes, which have the advantage of increasing output and reducing drive flow speed, by increasing the inlet flow rate of small wind power generators, and apply them to blades to compare the performance of the presence or absence of guide vane.

1. 서 론

우리나라의 에너지 소비량은 2016년을 기준으로 8위에 해당하며, 4차 산업의 활성화로 인해 에너지 소비는 더욱 늘어날 것으로 전망되며, 공급 에너지의 94.2%를 해외 수입에 의존하고 있다[1]. 높은 화석 연료 비중과 제조업 중심의 산업구조를 갖는 우리나라도 최근 30년 사이 평균 온도가 1.4℃ 상승하면서 온난화 경향이 심해지고 있다[2]. 이러한 탄소배출 저감과 환경문제 해결을 위해 전 세계적으로 온실가스 배출량을 줄이고 재생에너지 비중을 높이는 방향으로 에너지 전환 정책을 추진 중이다. 지난해 세계 풍력 발전설비는 906GW가 누적 설치되어 2021년 설치된 837GW와 비교하여 12.4% 증가하였다[3-5]. 특히 태양광 발전보다 같은 용량 대비 생산 비용이 낮은 차세대 에너지원으로 소형

풍력 발전이 각광을 받고 있다[6].

소형 풍력발전은 날개 회전면적, 최소풍속의 제한 등 요구되는 입지 조건의 제약이 상대적으로 높지만, 출력향상을 위해 부가장치를 활용한 소형풍력 발전이 일본에서 활발히 연구되고 있다. Torresi 등은 2D RANS를 이용한 수치해석을 수행하여, 터빈을 적용하지 않은 단일 유인날개 해석을 통해, 11m/s에서 1.037배의 속도 증가를 얻고 있다[7]. 또한 Ohya 등은 출력 증대를 위하여 유인날개를 활용한 소형 풍력기를 여러 대 합쳐 발전하는 방식을 연구하였다[8].

유인날개를 활용한 방법은 1970년대 석유 위기 중에 도입되었으며, Shrouds라고도 알려진 디퓨저는 항공기 엔진용 터보 기계에서 흔히 볼 수 있는 방법이다. 로터 스위치 면적 측면에서 풍력터빈 로터의 규모를 확대하는 것이 전

* (재)녹색에너지연구원(Green Energy Institute)

** 국립목포해양대학교(Mokpo National Maritime University)

† 교신저자, E-mail : cjyang@mmu.ac.kr

력 출력과 용량을 증가시키는 주요 방법이라고 항상 가정되어 왔다. 유인날개의 활용은 소음 저감과 구동유속 및 정격유속이 낮아지는 이점이 있다. 그러나 유인날개를 활용한 출력향상은 규모경제 접근방식을 따르지 않고, 날개의 구조, 제조, 설치 및 유지관리에 대한 기초타위도 강화해야 한다[9].

따라서 본 논문에서는 풍력발전기의 출력증가를 위해 반응표면법을 활용하여 유인날개의 형상에 대한 최적화 설계와 이에 따른 유속 및 출력 증가 방안에 대한 연구를 수행하고자 한다.

2. 유인날개의 설계

2.1 설계변수

상용코드(ANSYS Workbench 2019)의 반응표면법을 활용하여 3개의 형상에 대한 최적화 설계를 수행하였으며, 기본 형상에 대한 설계는 참고문헌[8, 10, 11]을 참고하여 유인날개 입구의 축소 및 확대관의 형상이 유속증가에 미치는 영향을 보기위해 모델링 하였다. 설계변수는 Fig. 1과 같이 유인날개의 길이, 곡률길이, 플랜지 높이, 입구각이라 명명한 형상값에 대하여 설계변수를 두고, Fig. 2와 같이 총 3개 형상을 모델링하여 설계 및 분석을 수행하였다.

유인날개-1은 설계변수로 입구각, 유인날개의 길이, 플랜지 높이 3개의 변수를 적용하였으며, 유인날개-2는 입구각, 유인날개 전체길이, 유인날개 앞단길이, 플랜지 높이의 4개의 변수를 적용하여 모델링을 진행하였고, 마지막으로 유인날개-3은 곡률길이, 유인날개 길이, 플랜지 높이의 3개의 변수를 적용하였다.

최적화에 대한 형상의 수치는 기준수치에서 $\pm 10\%$ 오차 범위 내에 변경을 수행하였으며, 설계변수 설정과 최적화 진행, 마지막으로 형상 최소화에 최대유속이 나올 수 있도록 해석 및 분석을 수행하였다.

2.2 수치해석 격자

해석에 사용된 격자의 경우 상용코드를 이용하여 격자를 생성하였으며, 격자형식은 테트라-프리즘을 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에 적용한 유동장과 유인날개의 형상에 대한 격자 계산을 확인할 수 있다. 격자는 유인날개 부분의 형상을 구현하기 위하여 170만 노드 사용하여 조밀하게 작성하였으며, 벽면에 대한 유동장 구현을 위하여 프리즘 격자를 구성하였다. 또한, 계산의 안정성을 위하여 외부 유동장의 크기는 유인날개 직경의 입구로 3D(D: 유인날개 직경), 출구로 7D, 오픈방향으로 5D만큼 유동장을 형성하였다.

Table 1 Boundary & analysis condition

Simulation type	Steady state
Turbulence model	k-Epsilon
Fluid	Air at 25 °C
Inlet	5 m/s
Outlet	Average static pressure 1[atm]

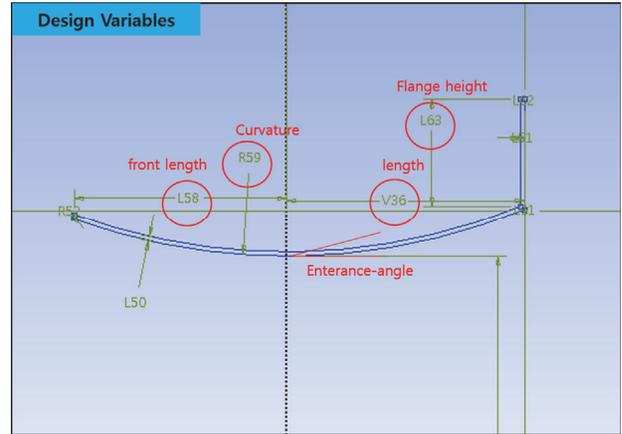


Fig. 1 Design variables

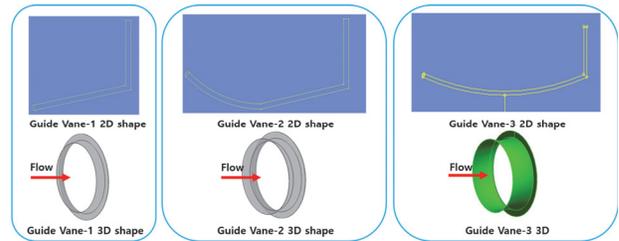


Fig. 2 Geometry of guide vane

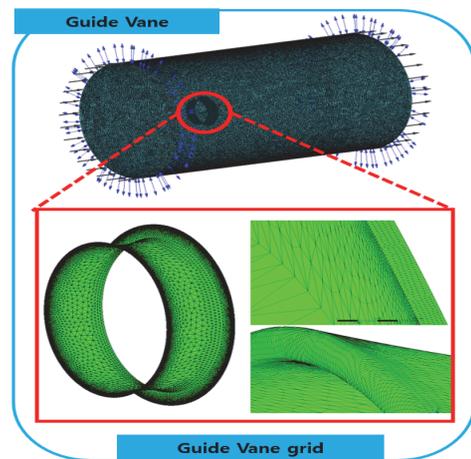


Fig. 3 Numerical grids of flow field

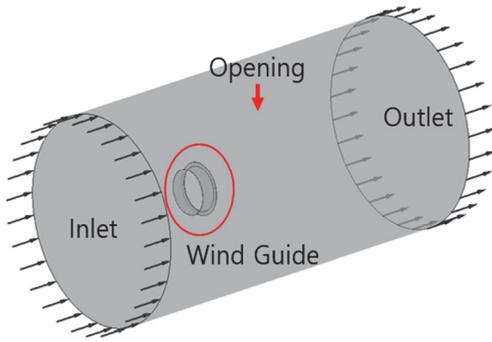


Fig. 4 Boundary condition

Table 2 Initial design value

	Guide vane-1	Guide vane-2	Guide vane-3		
Guide vane length(m)	0.182	0.338	0.494		
flange height(m)	0.13	0.13	0.13		
Entrance angle(°)	12	12	-		
		front length(m)	0.229	curvature (m)	0.676

2.3 경계조건 및 해석조건

모든 해석에 대한 경계조건은 Fig. 4와 같이 구성되어 있으며, 상부는 개방(opening) 조건을 주었으며, 입구(inlet)와 출구(outlet) 조건으로 해석을 수행하였다.

Table 1에서와 같이 모든 계산은 정상상태 계산을 수행하였으며, 계산 수행에 사용된 난류 모델로서는 k-Epsilon 모델을 적용하였다. 유체는 공기를 사용하였으며, 입구 경계조건은 유속조건으로 5m/s로 부여하였고, 출구에는 대기압에 해당하는 압력 조건을 부여하였다.

최적화 계산 전 플랜지 높이는 0.13m로 고정하였다. 유형별에 따른 날개길기와 각도 등 변수로 하였으며, 이는 Table 2에서 변수값에 대한 수치를 확인할 수 있다. 최적화를 위한 수치의 변화는 현재 수치의 ±10%의 범위를 주고 최대유속이 나오는 형상최적화와 형상크기의 최소화일 때의 최대유속을 얻을 수 있도록 최적화를 수행하였다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 유인날개-1의 수치해석

Fig. 5 표면반응법 해석의 결과로써 설계변수의 변화에 따른 평균유속에 대한 경향을 보여주고 있으며, (a)는 입구 각도가 증가함에 따라 유속은 감소하며, (b)는 유인날개 길이가 증가함에 따라 유속이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

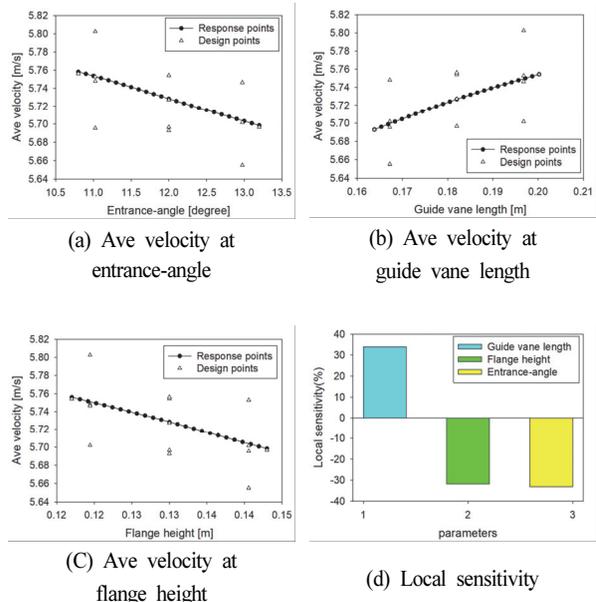


Fig. 5 Response chart for guide vane-1

(c)는 플랜지 길이가 증가함에 따라 유속이 감소하였고, (d)는 유속변화에 있어 각 변수의 민감도를 보여주고 있다.

Table 3은 설계값에 대한 유속값을 보여주고 있으며, 설계값 유속은 5.72m/s 최적화에 대한 최대 유속은 5.8m/s 유속으로 확인할 수 있다. 이는 초기 설계값에 비해 유속증가가 0.08m/s 증가한 것을 확인하였다.

또한 최적화에 따른 유인날개의 설계변수 수치 변화는 Table 4에서 확인할 수 있으며, 크기를 최소화하며 최대 유속 값을 찾기 위한 최적화를 진행한 결과 설계값보다 0.03m/s 증가함을 보여준다.

Table 3 Results of design point

Guide vane length [m]	Flange height [m]	Entrance-angle [Degree]	Ave velocity [m/s]
0.18	0.13	12.00	5.73
0.16	0.13	12.00	5.69
0.20	0.13	12.00	5.75
0.18	0.12	12.00	5.75
0.18	0.14	12.00	5.70
0.18	0.13	10.80	5.76
0.18	0.13	13.20	5.70
0.17	0.12	11.02	5.75
0.20	0.12	11.02	5.80
0.17	0.14	11.02	5.70
0.20	0.14	11.02	5.75
0.17	0.12	12.98	5.70
0.20	0.12	12.98	5.75
0.17	0.14	12.98	5.66
0.20	0.14	12.98	5.70

Table 4 Results of design variables(Guide vane-1)

Guide vane-1			
	Initial value	Optimization	Minimize shape & maximum flow rate
Guide vane length(m)	0.182	0.20	0.16
flange height(m)	0.13	0.12	0.12
Enterance angle(°)	12	11.02	10.8
Flowrate (m/s)	5.72	5.8	5.75

3.2 유인날개-2의 수치해석

Fig. 6 유인날개-2의 표면반응법 해석의 결과로서 설계 변수의 변화에 따른 평균유속에 대한 경향을 보여주고 있으며, (a)는 입구각도가 증가함에 따라 유속이 감소, (b)는 유인날개 길이가 증가함에 따라 유속이 감소하는 것을 확인하였다. (c)는 유인날개 앞단의 길이가 길어지면 유속이 감소하는 것을 볼 수 있으며, (d)는 플랜지 길이가 증가함에 따라 유속이 증가하고, (e)는 유속변화에 있어 각 변수의 민감도를 보여준다.

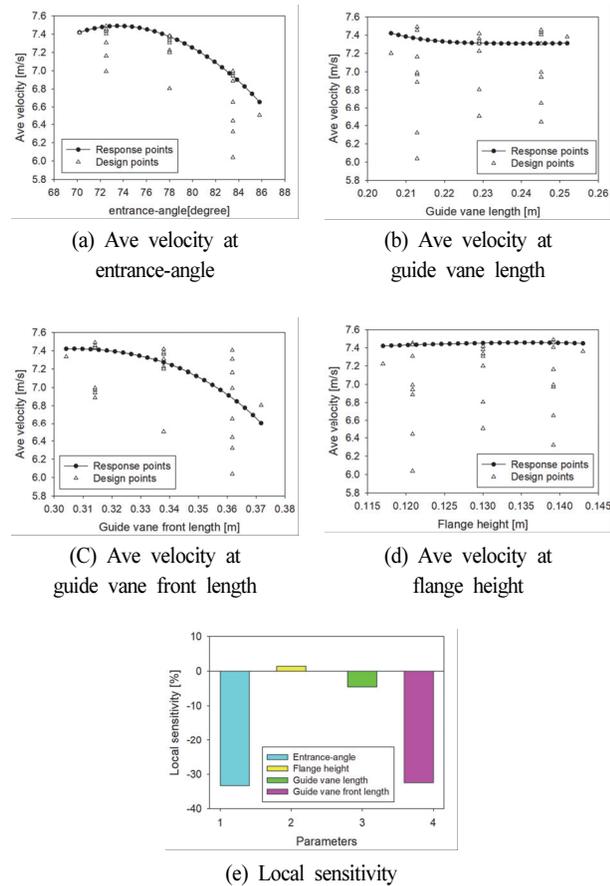


Fig. 6 Response chart for guide vane-2

Table 5은 디자인 포인트에 대한 유속값을 보여주고 있으며, 설계값 유속은 7.31m/s이며, 최적화에 대한 최대 유속은 7.49m/s로 초기 설계값에 비해 유속이 0.18m/s 증가함을 알 수 있다.

최적화에 따른 유인날개의 설계변수 수치 변화는 크기의 최소화에 따른 최대 유속을 찾기 위한 최적화 진행결과 설계값보다 0.11m/s 증가함을 확인하였고, 이는 Table 6와 같다.

Table 5 Results of Design Point

Guide vane length [m]	Guide vane front length [m]	Flange height [m]	Enterance-angle [Degree]	Ave velocity [m/s]
0.34	0.23	0.13	12.00	7.31
0.34	0.23	0.13	19.80	7.42
0.34	0.23	0.13	4.20	6.50
0.34	0.23	0.12	12.00	7.22
0.34	0.23	0.14	12.00	7.36
0.34	0.21	0.13	12.00	7.20
0.34	0.25	0.13	12.00	7.38
0.30	0.23	0.13	12.00	7.33
0.37	0.23	0.13	12.00	6.80
0.31	0.21	0.12	17.49	7.45
0.31	0.21	0.12	6.51	6.89
0.31	0.21	0.14	17.49	7.49
0.31	0.21	0.14	6.51	6.97
0.31	0.25	0.12	17.49	7.43
0.31	0.25	0.12	6.51	6.94
0.31	0.25	0.14	17.49	7.46
0.31	0.25	0.14	6.51	6.99
0.36	0.21	0.12	17.49	6.99
0.36	0.21	0.12	6.51	6.04
0.36	0.21	0.14	17.49	7.16
0.36	0.21	0.14	6.51	6.32
0.36	0.25	0.12	17.49	7.31
0.36	0.25	0.12	6.51	6.44
0.36	0.25	0.14	17.49	7.40
0.36	0.25	0.14	6.51	6.65

Table 6 Results of design variables(Guide vane-2)

Guide vane-2			
	Initial value	Optimization	Minimize shape & maximum flow rate
Guide vane length(m)	0.338	0.314	0.304
flange height(m)	0.13	0.139	0.117
Guide vane front length(m)	0.229	0.213	0.206
Enterance angle(°)	12	17.49	19.8
Flow rate(m/s)	7.31	7.49	7.42

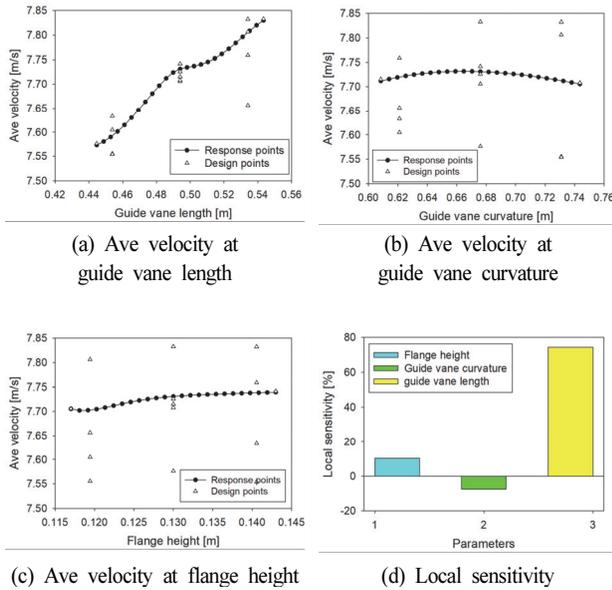


Fig. 7 Response chart for guide vane-3

3.3 유인날개-3의 수치해석

Fig. 7 표면반응법 해석의 결과로써 설계변수의 변화에 따른 평균유속에 대한 경향을 보여주고 있으며, (a)는 유인날개 길이가 증가함에 따라 유속이 증가하며, (b)는 유인날개 곡률길이가 증가함에 따라 유속이 감소하는 것을 알 수 있다. (c)는 플랜지 길이가 증가함에 따라 유속이 증가하며, (d)는 유속변화에 있어 각 변수의 민감도를 보여준다.

Table 7은 디자인 포인트에 대한 유속값을 보여주고 있으며, 설계값 유속은 7.73m/s이며, 최적화에 대한 최대 유속은 7.83m/s 유속으로 확인할 수 있으며, 초기 설계값에

Table 7 Results of Design Point

Guide vane length [m]	Flange height [m]	Guide vane curvature [m]	Ave velocity [m/s]
0.49	0.13	0.68	7.73
0.49	0.12	0.68	7.71
0.49	0.14	0.68	7.74
0.49	0.13	0.61	7.72
0.49	0.13	0.74	7.71
0.44	0.13	0.68	7.58
0.54	0.13	0.68	7.83
0.45	0.12	0.62	7.60
0.45	0.14	0.62	7.63
0.45	0.12	0.73	7.56
0.45	0.14	0.73	7.55
0.53	0.12	0.62	7.66
0.53	0.14	0.62	7.76
0.53	0.12	0.73	7.81
0.53	0.14	0.73	7.83

Table 8 Results of design variables(Guide vane-3)

Guide vane-3			
	Initial value	Optimization	Minimize shape & maximum flow rate
Guide vane length(m)	0.494	0.543	0.44
flange height(m)	0.13	0.13	0.12
Guide vane curvature(m)	0.676	0.676	0.61
Flow rate(m/s)	7.73	7.83	7.59

비해 유속증가가 0.1m/s 증가하였다.

마지막으로, Table 8은 최적화에 따른 유인날개 설계변수의 수치 변화에 대한 것을 보여주며, 크기를 최소화하여 최대 유속값을 찾기 위한 최적화 진행 결과 설계값보다 0.14m/s 감소함을 확인하였다.

3.4 유동해석 및 고찰

Fig. 8~10은 유인날개의 중간 위치 단면에서의 유속과 압력 분포를 나타낸다. 본 논문에서 채택한 유인날개의 경우, 플랜지를 활용해 유인날개의 뒤편에 와류를 만들어 압력을 낮추어 유입되는 유속을 증가시켰다.

유인날개를 적용한 풍력발전용 터빈의 경우, 유입되는 유속의 증가 및 압력의 감소에 따라 출력의 증가율은 높아진다. 이는 Fig. 10의 유인날개 부근에서의 유속과 압력 분포와 같이 최적화 분석에 따른 유인날개 3이 유인날개 1, 2 보다 압력이

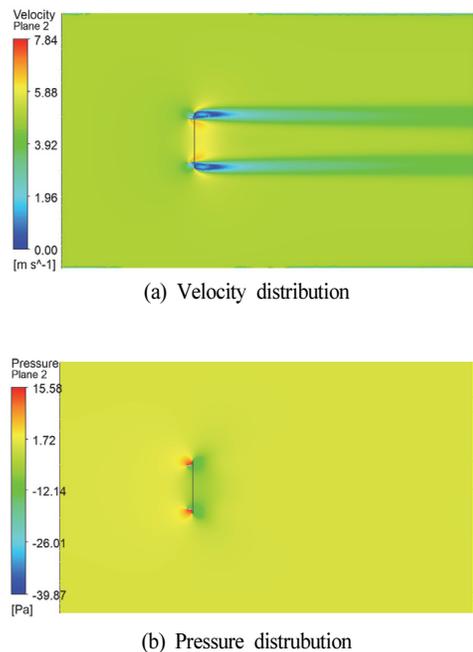
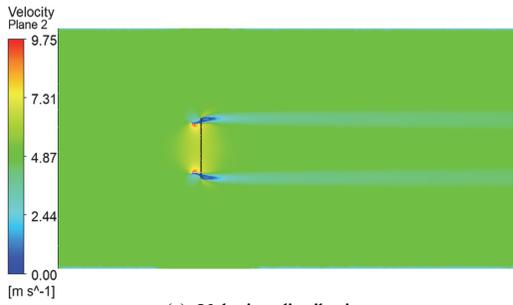
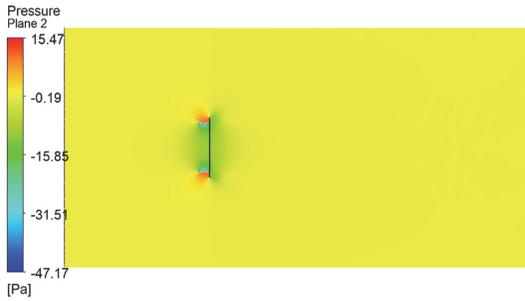


Fig. 8 Flow field around guide vane-1

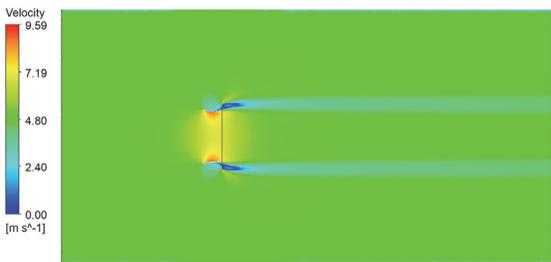


(a) Velocity distribution

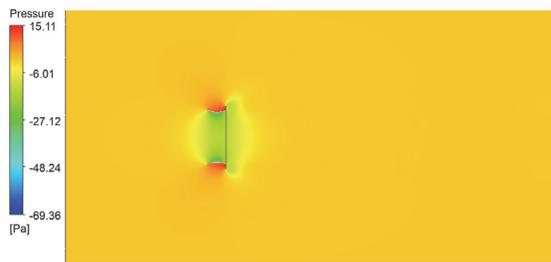


(b) Pressure distribution

Fig. 9 Flow field around guide vane-2



(a) Velocity distribution



(b) Pressure distribution

Fig. 10 Flow field around guide vane-3

더 낮아 높은 유속을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 유인 날개 3의 형상이 유속증가에 유리한 것을 확인할 수 있다.

4. 소형풍력터빈 적용해석

4.1 모델링 및 격자

이 논문에 사용된 소형풍력터빈의 용량은 500W 소형풍력터빈을 설계하여 계산을 수행하였고, 로터의 직경은

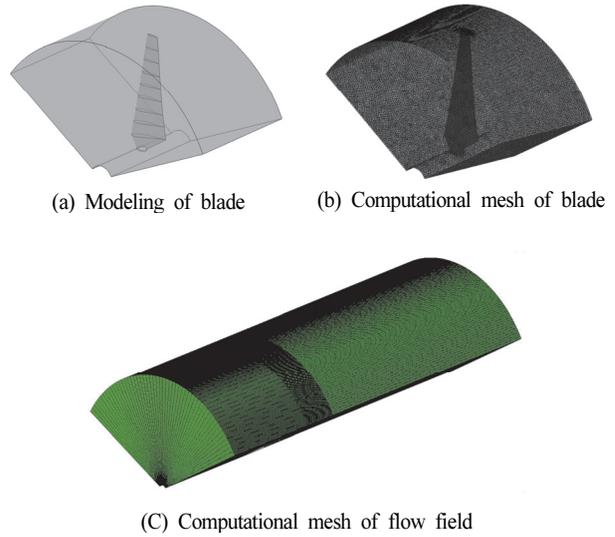


Fig. 11 Computational domain

1.36m, 설계 정격유속은 11m/s, 주속비는 4로 설계하였으며, 에어포일은 s814를 사용하여 설계하였다.

계산격자의 경우, 수치해석에 사용된 상용코드를 이용하였으며, 블레이드 격자형식은 테트라-프리즘과 헥사격자를 활용하였다.

Fig. 11의 (a)는 해석을 위한 블레이드 3D 모델링을 보여주며, (b)는 블레이드의 수치해석 격자를 보여준다. 블레이드의 형상 유지 및 y+값을 1이하로 하기 위해 총 486만 노드 격자를 사용하여 구성하였으며, (c)는 전체 유동장 격자로, 총 유동장의 격자수는 914만개 노드 격자를 사용하여 구성하였다.

계산의 안정성을 위하여 외부 유동장의 크기는 블레이드의 크기의 입구로 5D(D: 터빈직경), 출구로 10D, 오픈방향으로 7D만큼 유동장을 형성하였다.

4.2 경계조건 및 해석조건

모든 해석에 대하여 경계조건은 Fig. 12와 같이 구성되어 있으며, 상부는 개방(opening) 조건을 주었으며, 입구(inlet)와 출구(outlet) 조건을 주고 해석하였다.

Table 9와 같이 모든 계산은 정상상태 계산을 수행하였으며, 계산에 사용된 난류 모델로서는 k-Epsilon 모델을 적용하였다. 유체는 공기를 사용하였으며, 입구 경계조건은 유속조건으로 11m/s로 부여하며, 출구는 대기압에 해당하는 압력 조건을 부여하였다.

해석은 주속비 3~8까지 총 6개 케이스 계산을 수행하였으며, 최종적으로 설계 주속비 4에서 유인날개의 최적화를 동시에 진행하는 계산을 진행하여 출력에 대하여 결과를 도출하였다.

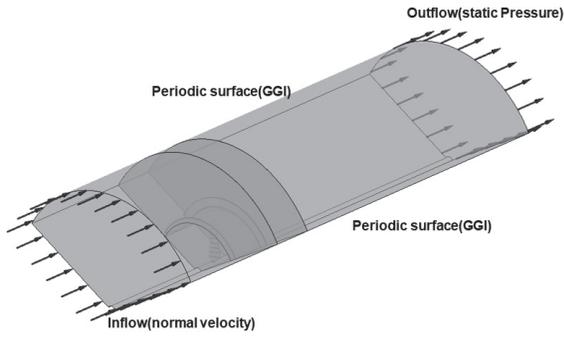


Fig. 12 Boundary conditions for CFD analysis

Table 9 Boundary & analysis condition

simulation type	Steady state
Turbulence model	k-Epsilon
Fluid	air at 25 °C
Inlet	11 m/s
TSR	3,4,5,6,7,8
outer wall	opening
Outlet	Average static pressure 1[atm]

4.3 수치해석 결과

Fig. 13은 유인날개의 유무에 따른 해석 결과를 보여준다. (a)는 유인날개의 유무에 따른 출력토크를 보여주고 있으며, (b)는 풍력터빈의 성능계수를 비교하고 있다. 설계 주속비 4에서 최대 출력을 보여주고 있으며, 각각 474W와 671W의 출력을 나타내는 것을 확인할 수 있다. (b)와 같이 유인날개가 없는 경우 효율은 0.41을 보여주고 있으나, 유인날개를 사용할 때 0.56까지 상승함을 알 수 있다. 여기서, 효율은 식 (1)을 이용하여 산출하였으며, 유인날개 유무와 관계없이 면적(A)은 블레이드 단면적을 동일하게 사용하여 비교분석 하였다.

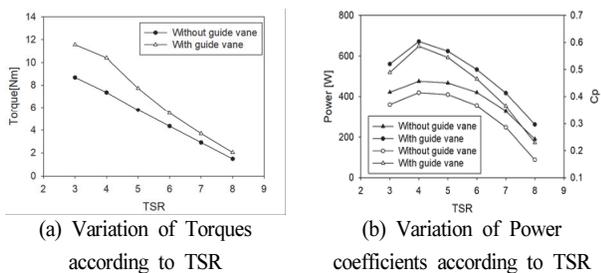


Fig. 13 Torque and Power coefficient Results

$$C_p = \frac{P}{1/2\rho AV^3} \quad (1)$$

Table 10 Results of Design Point

Guide vane length [m]	Flange height [m]	Guide vane curvature [m]	Power [W]
0.52	0.14	0.71	671.00
0.52	0.14	0.64	716.36
0.52	0.14	0.78	560.51
0.52	0.12	0.71	647.65
0.52	0.15	0.71	686.65
0.47	0.14	0.71	600.29
0.57	0.14	0.71	674.40
0.47	0.12	0.65	650.82
0.47	0.12	0.76	528.59
0.47	0.15	0.65	693.03
0.47	0.15	0.76	582.49
0.56	0.12	0.65	691.88
0.56	0.12	0.76	580.15
0.56	0.15	0.65	716.50
0.56	0.15	0.76	625.81

마지막으로, Table 10은 표면반응법을 통해 블레이드를 적용한 최적화 디자인 포인트를 보여준다. 기본 유인날개의 출력은 671W였으며, 최적화를 통해 계산된 최대 출력값은 716.5W로 확인할 수 있다. 또한, Table 11은 기본 형상에서의 최적화에 따른 결과값을 나타내며, 형상 최소화를 통한 최적화를 진행한 결과, 644W의 출력으로 기본 형상보다 출력이 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 표면반응법을 활용하여 최적화를 진행할 때, 정확히 얻고자 하는 값을 도출값으로 설정 후 최적화를 진행하여야 한다.

본 논문에는 단일 유인날개와 블레이드의 최적화 결과값 경향이 다르다는 것을 확인할 수 있는 것처럼 회전체같이 전체 유동장에 영향을 주는 변수값은 선정 후 계산함으로써, 더욱 정확한 최적화가 가능할 것으로 사료된다.

Table 11 Comparison of results of design variables

Guide vane-3			
	Initial value	Optimization	Minimize shape & maximum flow rate
Guide vane length(m)	0.52	0.56	0.47
flange height(m)	0.14	0.15	0.12
Guide vane curvature(m)	0.71	0.76	0.64
Power(W)	671	716.5	644

5. 결 론

본 논문에서는 표면반응법을 활용한 유인날개 형상의 최적화를 수행하였으며, 유인날개의 길이, 플랜지 높이, 곡률, 입구각과 같은 설계변수 수치의 $\pm 10\%$ 내로 설정하여 CFD 성능해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 표면반응법을 활용하여 최적화한 결과 유인날개가 없는 것보다 출력이 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, 최적화 설정에 따라 다양한 최적화된 값을 얻을 수 있다.
- 2) 표면반응법을 통하여 유인날개-3이 7.83m/s로 가장 많은 유속 증가를 나타내었으며, 형상의 최소화를 통한 최적화에서는 초기설계보다 낮은 유속인 7.59m/s의 유속을 보였다.
- 3) 유인날개의 활용을 통해 블레이드 출구쪽 압력을 감소시켜 유입되는 유속을 증가시켜 출력은 474W에서 671W까지 증가하였으며, 유인날개의 형상 최적화를 통해 716.5W로 출력이 증가하였다.

후 기

본 과제(연구물)는 2023년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체 대학 협력기반 지역혁신사업(2021RIS-002)과 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.

References

- (1) Ministry of Trade, Industry and Energy, 2018, "NEW & RENEWALBE ENERGY WHITE PAPER", Korea.
- (2) Korea 2050 Carbon Neutral Strategy, 2020, pp. 14.
- (3) Renewable Energy 3020 Policy(in Korea), 2017.
- (4) Lim T.H., Lee H. S., Jung J. H., Choi Y. R., Han S. H., and

- Kim. Y. H., 2020, "The Calculation of Renewable Thermal Limit Capacity Considering Optimal Operation of District Heating and Cooling Facility" The Korean Institute Of Illuminating And Electrical Installation Engineers, Vol.34, No.1, pp. 28-36.
- (5) Seong J.M., Soo S. S., Keun J. B., and Kim S. K., 2023, "A Review on the P2G System Integration as an Essential Strategy of the Energy Transition toward Carbon-neutral Korea" Korea Electrotechnology Research Institute., Vol. 72, No. 3, pp. 30-38.
- (6) Park. S. C., 2020, "A Study on Characteristics and Strategies of the United Kingdom's Energy Transition Policy", Vol. 25, No. 1, pp. 39-77.
- (7) Torresi M., Postiglione N., Filianoti P.F., Fortunato B., Camporeale S.M., 2016, "Design of a Ducted Wind Turbine for Offshore Floating Platforms", Wind Engineering, Vol. 40, no.5, pp. 468-474.
- (8) Ohya Y., Uchida T. and Karasudani T., Hasegawa M., Kume H., 2012, "Numerical Studies of Flow around a Wind Turbine Equipped with a Flanged-Diffuser Shroud using an Actuator-Disk Model", Wind Engineering, Vol. 36, no.4, pp. 455-472.
- (9) Lubitz, W. D. and Shomer, A., 2014, "Wind loads and efficiency of a diffuser augmented wind turbine (DAWT)". Proceedings of The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress 2014. Toronto, Ontario, Canada. CSME International Congress 2014: 1-5.
- (10) Lipoan M., Karczewski M., Olasek K., 2015, "Sensitivity study of diffuser angle and brim height parameters for the design of 3 kW Diffuser Augmented Wind Turbine", Open engineering, Vol. 5 no.1, pp. 280-286.
- (11) Shi W., Wang D., Atlar M., Guo B. and Seo K. C., 2015, "Optimal design of a thin-wall diffuser for performance improvement of a tidal energy system for an AUV", Ocean engineering, Vol. 108, pp. 1-9.