

주 블레이드 길이에 따른 풍력발전 전기적 특성에 관한 연구

박정철

A Study on the Electrical Characteristics of Wind Power Generation by Main Blade Length

Jung Cheul Park

요약 본 연구는 ANSYS CFD 프로그램을 이용하여 50kW급 풍력발전에 적용되는 주 블레이드 길이에 대해 연구를 하였다. 주 블레이드 길이를 70cm, 58cm로 설정하여 유동해석 및 효율과 출력전력, 출력전압, 출력전류의 특성을 확인하였다. 두 조건의 유동해석 결과는 거의 일치하였다. 공기 흐름이 블레이드 입구 부분과 출구 부분에서 균일하게 측정되었고 보조 블레이드를 통과한 공기 속도는 증가되고 회전되지 않았다. 그래서 더 큰 힘을 주 블레이드의 입구 부분에 힘을 전달하고 회전자를 거쳐서 출구 부분으로 통과시키는 것으로 나타났다. 주 블레이드 길이가 70cm인 경우, TSR이 증가할수록 토크는 낮아지고 TSR이 0.4일 때 효율은 0.293, 출력전력은 65,14kW, 전압은 31.44V, 전류는 649.1A로 측정되었다. 그리고 주 블레이드 길이가 58cm인 경우, TSR이 증가할수록 토크는 낮아지고 TSR이 0.4일 때 효율은 0.274, 전력은 61.02kW, 전압은 31.49V, 전류는 607.0A로 측정되었다. 결론적으로 터빈 직경을 14m로 하면 주 블레이드 길이가 70cm인 경우가 최적의 블레이드로 조건이 된다는 것을 알 수가 있었다.

Abstract This study used the ANSYS CFD program to study the main blade length of a wind turbine. The main blade length was set to 70 cm and 58 cm to confirm flow analysis and coefficient, output power, output voltage, and output current. The results of the flow analysis of the two conditions were almost identical. The airflow was measured uniformly at the blade inlet and outlet portions, and the air velocity through the sub-blade was increased and undiffracted, and a greater force was transmitted to the inlet portion of the main blade and passed through the rotor to the outlet portion. When the main blade length was 70 cm, the torque decreased as the TSR increased, and when the TSR was 0.4, the coefficient was 0.293, the output power was 65,14 kW, the voltage was 31.44 V, and the current was 649.1 A. And when the main blade length is 58 cm, the torque decreases as the TSR increases, and when the TSR is 0.4, the coefficient is 0.274, the power is 61.02 kW, the voltage is 31.49 V, and the current is 607.0 A. In conclusion, it was found that if the turbine diameter was 14m, the optimal blade would be the case where the main blade length was 70cm.

Key Words : ANSYS CFD, main blade, coefficient, output power, output voltage, output current.

1. 서론

현재 전 세계적으로 지구온난화로 인하여 이상 기후가 발생하고 우리나라도 화석연료 비중과 제조업 중심의 산업구조로 평균 온도가 1.4°C 상승하여 온난화 문제로 심각한 상황이다. 이러한 지구

온난화 문제를 해소하기 위해 재생에너지 발전, 온실가스 감축, 수요 대응 전략 수립, 에너지 절약 등에 대한 요구가 증가하고 있다[1,2]. 현재 세계적으로 이러한 문제점을 해소하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 2016년 파리 협정에 의해 186개국이 온실가스 배출을 줄이기 위해 보다 적극적인 계획

을 제시하도록 요구되었다[3]. 이것은 재생 가능한 기반 자원, 에너지 저장 및 전기 자동차에 의존하는 녹색 에너지 시스템의 개발에 박차를 가하고 있는 현실이다[4]. 한국은 재생에너지 3020 이행계획에서 2030년까지 재생에너지 설비용량을 63.8GW까지 보급하고 신규 설비용량의 95% 이상을 태양광, 풍력 등 청정에너지로 공급하는 계획을 수립하였다. 국내 풍력발전의 설비용량은 2022년에 약 1,934MW이고 2036년에는 약 34.1GW에 접근할 것으로 예상되고 있다[5]. 태양광발전과 풍력발전의 연간 평균 전력량을 비교하면 태양광발전은 약 15%, 풍력발전은 약 25%의 전력 생산을 한다. 이것은 태양광발전은 태양 빛이 존재하는 동안만 발전하고 풍력발전은 24시간 발전 가능한 것이다. 풍력발전은 회전자 축 방향에 따라 수평축 터빈(Horizontal Axis Wind Turbine : HAWT) 방식과 수직축 터빈(Vertical Axis Wind Turbine : VAWT) 방식으로 구분된다. 수직축 터빈은 수평축 터빈보다 풍속 방향의 조건없이 발전이 되므로 구조적으로 단순하고 설치비용이 적으며 또한 낮은 회전속도에서도 정격출력으로 발전시킬 수 있기 때문에 풍속이 낮아도 풍력발전이 가능하고 소음 또한 낮은 장점이 있다. 현재 수평축 터빈은 진동, 소음 등을 해결하는데 기술적 한계로 인하여 수직축 터빈개발이 많은 연구가 진행되고 있다. 기존의 블레이드에서 발전효율을 높이는 동시에 소음을 개선할 수 있는 누임 각, 휨 각, 비틀림 각의 조건들을 가지고 블레이드 개발이 많은 연구가 진행되고 있다. 현재에는 ANSYS 프로그램을 이용하여 아크형 날개를 적용한 항력식 수직축 소형 풍력발전기에 연구를 진행하고 있다. 본 논문에서는 50kW급 수직축 터빈을 ANSYS CFD 프로그램을 사용하여 주 블레이드 길이를 변화시켜서 최적의 출력 특성을 찾는것이 목적이다. 실험 변수로는 주 블레이드와 보조 블레이드의 매수를 각각 30매로 하고 주 블레이드 길이를 70cm, 58cm로 변화시켜서 공기 흐름과 출력전력과 효율 및 전압, 전류를 측정하고자 한다.

2. 연구방법

본 논문에서 유한요소 해석법으로 풀이되는 ANSYS CFD를 사용하여 공기 흐름과 출력전력, 전압, 전류, 효율 등을 알고자 한다[6,7]. 본 논문에서 사용된 ANSYS CFD 모델링 절차를 그림 1에 나타냈다.

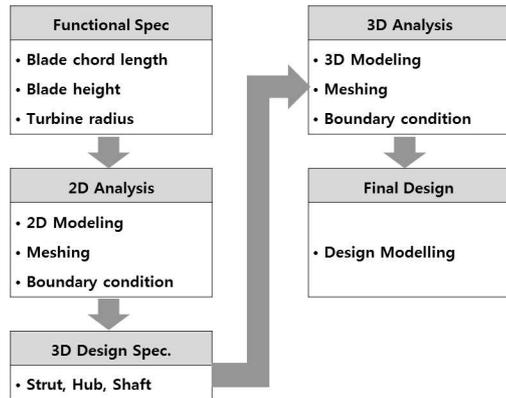


그림 1. ANSYS CFD Modeling 절차
Fig. 1. ANSYS CFD Modeling procedure.

주속비(Tip Speed Ratio : TSR)는 터빈의 성능을 나타내기 위한 것으로 공기 유입속도에 대한 블레이드 회전속도의 상대속도 비율을 의미한다. 터빈의 작동상태를 나타낼 때 사용하는 무차원수인 주속비(λ)는 블레이드 선단 속도와 풍속의 비라고 하며 주 블레이드의 비틀림각을 의미하는 피치각을 제어하지 않는다는 가정하에 식(1)과 같이 표시된다[8,9].

$$TSR = \lambda = \frac{V}{v} = \frac{R\omega}{v} = \frac{2\pi fR}{v} \quad (1)$$

여기서, v [m/s] : 풍속, ω : 블레이드 선단 각속도[rad/s], V : 터빈 로터 선단 속도[m/s], R : 터빈 블레이드 반지름[m], f : 터빈 로터 회전수[rpm], 효율(C_p)은 풍차 블레이드 회전 면적으로 유입되는 풍력에너지에 대한 기계적 에너지 변환 비율을 의미하며 식(2)로 나타냈다[8,9].

표 1. 샘플의 주요 시뮬레이션 설계값
Table 1. Major simulation design values for sample

	turbine diameter	main-blade thickness	main-blade length	sub-blade thickness	main-blade amount	sub-blade amount	wind speed
sample 1	14[m]	4[cm]	70[cm]	13[cm]	30	30	12[m/s]
sample 2	14[m]	4[cm]	58[cm]	13[cm]	30	30	12[m/s]

$$C_p = \frac{P_{max}}{P_w} = \frac{\frac{8}{27}Av^3}{\frac{1}{2}\rho Av^3} \quad (2)$$

여기서, A : 터빈의 면적 [m^2], ρ : 공기밀도 [kg/m^3], v : 풍속 [m/s], 출력전류(I_p)는 식(3)과 같으며, 출력전압(E_p)은 식(4)로 계산된다 [8,9].

$$I_p = \frac{1}{3} \frac{\rho \pi R^3}{p \lambda_{pm} \cdot \lambda(v)} C_p(v) \cdot v^2 [A] \quad (3)$$

$$E_p = \frac{\eta P_{(T-C)}}{3I_p} [V] \quad (4)$$

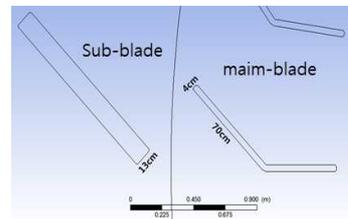
여기서, R : 로터 반지름, $\eta = 94\%$,
 $p \cdot \lambda_{pm}$: Back EMF constant, $\lambda(v)$: 주속비

본 연구 주제인 50kW급 풍력발전은 표 1에 나타난 설계조건으로 시뮬레이션을 실시하였다. 샘플 1과 샘플 2는 모든 변수를 동일하게 하였으나 샘플 1은 주 블레이드 길이를 70cm, 샘플 2는 주 블레이드를 58cm로 하여 주 블레이드 길이 변화에 따른 공기 흐름과 출력 특성을 비교 관찰하였다.

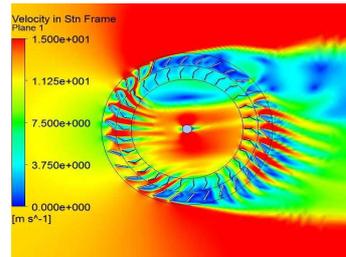
3. 결과 및 고찰

샘플 1은 주 블레이드 길이를 70cm, 보조 블레이드의 두께를 13cm로 하였으며 공기의 유입속도를 12m/s로 하여 시뮬레이션을 시행하였다. 그림 2는 샘플 1의 블레이드 형상 및 유동해석 결과를

나타냈다. 유동해석 결과, 빨간색 색상 패턴이 블레이드 입구 부분과 출구 부분에서 균일하게 나타났으며, 보조 블레이드를 통과한 공기 속도는 증가되어 회절되지 않고 더 큰 힘을 주 블레이드의 입구 부분에 힘을 전달하고 회전자를 거쳐서 출구 부분으로 통과됨으로써 터빈 하부 및 터빈 출구 부분에서 양의 회전 모멘트로 작용하고 있다고 예측되었다.



(a) Blade shape



(b) Air flow analysis

그림 2. 블레이드 형상 및 유동해석
Fig. 2. Blade shape and air flow analysis

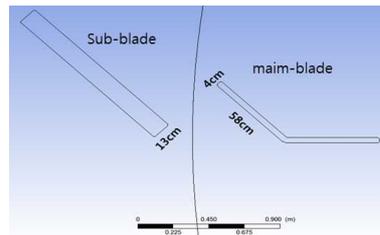
TSR 변화에 따른 토크, 효율, 출력전력 특성을 표 2에 나타냈다. 토크는 TSR이 작을수록 크게 측정되었고 효율은 TSR이 0.4일 때 가장 크게 0.293으로 측정되었고 또한 출력전력이 65,140W로 가장 크게 측정되었다.

표 2. 토크, 효율, 출력전력 결과
Table 2. Calculation results for torque, power coefficient, power output

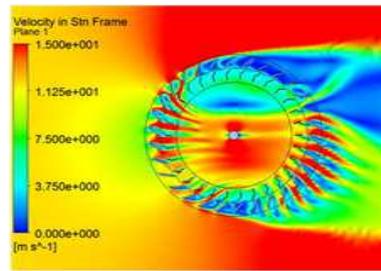
TSR	torque [Nm]	power coefficient	power output [W]
0.2	145738	0.225	50022
0.3	120024	0.286	62431
0.4	95237	0.293	65140
0.5	73579	0.284	62547
0.6	51986	0.236	53753

샘플 2의 경우는 주 블레이드 길이를 58cm로 바꾸어 실험하였다. 유동 해석 결과는 그림 3에 나타났다. 그림 3의 유동 해석 결과를 살펴보면, 샘플 1과 같이 풍속을 12m/s로 하였으므로 빨간색 색상 패턴이 블레이드 입구 부분과 출구 부분에서 균등하게 많이 나타나고 있으며, 샘플 1과 매우 유사한 유동 패턴을 보였으며 터빈 하부 부분과 터빈 출구 부분에서 양의 회전 모멘트로 작용하고 있다는 것으로 관찰되었다.

결론적으로 공기의 흐름이 보조 블레이드를 통과하면서 속도가 증가되어 더 큰 힘을 블레이드에 힘을 전달하고 터빈이 회전하는 방향과 같은 방향으로 회전하는 것을 알 수 있다. 이는 보조 블레이드가 효과적으로 공기를 유도했다는 것을 의미하며, 이들 모두 터빈의 하부 및 출구에서 더 두드러지게 나타나며 이 회전 방향에 따라 터빈이 회전하는데 양의 회전 모멘트의 요인으로 작용되었다고 예측된다. 일반적인 경우, 공기가 입구 블레이드면을 통과하면서 블레이드에 회전력을 주고 동시에 출구측 블레이드에서는 반대 방향의 회전력으로 인해 저항으로 작용하게 되는데, 보조 블레이드를 통과한 공기가 출구 블레이드를 빠져나가면서 터빈 회전 방향의 속도를 갖고 나가는 것을 볼 수 있는데 이는 터빈의 출구에서 저항의 감소로 회전력을 증가시킨 것으로 생각할 수 있다.



(a) Blade shape



(b) Air flow analysis

그림 3. 블레이드 형상 및 유동해석
Fig. 3. Blade shape and air flow analysis

표 3은 TSR를 변화하면서 토크와 효율 및 출력을 계산한 결과를 나타냈다. 샘플 2는 샘플 1과 유사하게 TSR이 증가할수록 토크는 감소 되었다. 효율과 출력전력은 TSR이 0.4일 때 각각 0.274, 61024W로 가장 크게 측정되었다.

표 3. 토크, 효율, 출력전력 결과
Table 3. Calculation results for torque, power coefficient, power output

TSR	torque [Nm]	power coefficient	power output [W]
0.2	132578	0.206	46734
0.3	112532	0.258	58937
0.4	89789	0.274	61024
0.5	69737	0.261	59255
0.6	48976	0.219	48254

샘플 1과 샘플 2의 결과에서 TSR 0.4에서 분석한 결과를 기반으로 식(3), 식(4)를 적용시켜서 전류와 전압 산출 결과를 표 4에 나타냈다.

표 4. 전류 및 전압 결과
Table 4. Calculation results for output current and output voltage

	TSR	power coefficient (C_p)	power output (kW)	current (I_p)[A]	voltage (E_p)[V]
sample 1	0.4	0.293	65.14	649.1	31.44
sample 2	0.4	0.274	61.02	607.0	31.49

샘플 1의 출력전류는 샘플 2보다 42.1A가 큰 649.1A로 계산되었고 샘플 2의 출력전압은 샘플 1보다 0.05V 큰 31.49V로 계산되었다. 결론적으로 샘플 1의 출력이 65.14kW로 샘플 2보다 높게 계산되었으므로 샘플 1의 주 블레이드와 보조 블레이드의 조건이 샘플 2보다 나은 것으로 계산되었으므로 50kW급 풍력발전에 적용 가능하다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 50kW급 수직축 터빈에서 주 블레이드와 보조 블레이드의 매수를 각각 30매로 하고 주 블레이드 길이를 70cm, 58cm로 변화시켜서 공기 흐름과 출력전력과 효율 및 출력전압, 출력전류를 측정하였다.

주 블레이드 길이 변화에 따른 유동해석 결과로는 두 조건의 유동해석 결과는 거의 일치하였다. 즉 공기 흐름이 블레이드 입구 부분과 출구 부분에서 균일하게 측정되었고 보조 블레이드를 통과한 공기 속도는 증가되어 회절되지 않았으며 더 큰 힘을 주 블레이드의 입구 부분에 힘을 전달하고 회전자를 거쳐서 출구 부분으로 통과시키는 것으로 나타났다.

주 블레이드 길이가 70cm인 경우, 효율은 0.293, 전력은 65,14kW, 전압은 31.44V, 전류는 649.1A로 측정되었다. 그리고 주 블레이드 길이가 58cm인 경우는 효율은 0.274, 전력은 61.02kW, 전압은 31.49V, 전류는 607.0A로 측정되었다.

위 실험을 통하여 50kW급 풍력발전 제작할 경

우, 현장 설치 제약조건과 경제성을 고려하여 터빈 직경을 14m로 하면 주 블레이드 길이가 70cm인 경우가 최적의 블레이드로 조건이 된다는 것을 알 수가 있었다.

REFERENCES

- [1] C. M. Lee, H. J. Choi, J. H. Park, S. H. Kim, "Control of the Wind Power Plant Frequency Variance Loop with Respect to Rotor Speed," *New & Renewable Energy* . Vol. 20, No. 2, pp.55-64, 2024
- [2] M. S. Jeong, S. S. Seo, B. K. Jo, S. K. Kim, "A review on the P2G system integration as an essential strategy of the energy transition toward carbon-neutral Korea", *KIEE Magazine*, Vol. 72, No 3, pp.30-38, 2023,
- [3] A. Ipakchi, F. Albuyeh, "Grid of the future", *IEEE Power Energy Mag.*, Vol. 7, pp. 52-62. 2009
- [4] J. Rodriguez, F. Blaabjerg, M. P. kowski, "Energy Transition Technology: The Role of Power Electronics", *Proc. IEEE* . Vol.111, pp. 329-334. 2023
- [5] Ministry of Trade, Industry and Energy, The 10th Basic Plan of Long-Term Electricity Supply and Demand Korea, 2023.
- [6] J. C. Park, "A Study of Vertical Axis Wind Turbine", *Journal of Korea Institute of Information, Electronics and Communication Technology*, Vol.10, No.5 pp.389 -395, 2017
- [7] D. H. Lee, J. C. Park, "A Study of Wind Turbine by Using ANSYS Program" *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, Vol.11 No.5, pp. 565-571, 2018
- [8] M. S. Dall'Asta, T. B. Lazzarin, "A Review of Fast Power-Reserve Control Techniques in Grid-Connected Wind Energy Conversion Systems", *Energies* , Vol.17, pp.451-478, 2024
- [9] C. Chen, L. Li , "Frequency Regulation

Adaptive Control Strategy of Wind Energy Storage System for Wind Speed Uncertainty”, *Energies*, Vol.17, pp. 2523-2537. 2024,

저자약력

박 정 철 (Jung-Chuel Park)

[정회원]



- 2000년 명지대학교
전자공학과 공학박사
- 1993년 ~현재 가천대학교
전자공학과 교수

〈관심분야〉 신재생에너지