

원통캠 형상에 따른 틸팅식 풍력터빈의 성능에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on the Performance Characteristics of a Tilting-Type Wind Turbine According to Cylindrical Cam Shape

유환석(Hwan Suk Yu), 성재용(Jaeyong Sung)*†

서울과학기술대학교 일반대학원 기계공학과 석사과정, *서울과학기술대학교 기계자동차공학과 교수
Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

*Professor, Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

Abstract

Conventional wind power generators have limited installation sites due to low efficiency due to reverse resistance or high cut-in speed. To compensate for these problems, this study proposed another new type of tilting wind turbine. The key to this method is the structural design of a cylindrical cam with a guide groove that allows the blade to tilt. As the blade rotates by the cam, it tilts according to the angle. In the section that generates torque by receiving drag, the blade is made perpendicular to the wind. And it is a structure that creates a parallel state with the wind in the section where reverse resistance occurs. We prepared six types of cams considering the length of the section subject to drag, reverse resistance, tilting section. The performance was analyzed as the maximum value of the output, torque coefficient, and efficiency coefficient, which is indicated by setting different wind speed and low TSR.

Key words: Tiltable blades(틸팅식 블레이드), Tip-speed-ratio(주속비), Wind turbine(풍력발전기), Cylindrical cam(원통캠), Horizontal axis(수평축)

†Corresponding author

E-mail: jysung@seoultech.ac.kr

접수일: 2021년 02월 16일; 심사일: 1차: 2021년 02월 22일, 2차: 2021년 02월 26일; 채택일: 2021년 02월 27일

기호 설명

A_s	: 수풍면적 [m^2]
C_L	: 양력계수
C_P	: 효율계수
C_{TQ}	: 토크계수
D	: 풍력터빈 반경 [m]
n	: 로터의 회전수 [rpm]
T_b	: 블레이드 토크 [Nm]
T_e	: 추력 [Nm]
V_w	: 풍속 [m/s]

그리스 문자

σ	: 솔리디티(solidity)
ρ_a	: 공기밀도 [kg/m^3]
ω	: 로터의 각속도 [rad/s]
λ	: 주속비(TSR)

1. 서 론

최근 지속적인 화석연료 사용과 무분별한 자원사용 등으로 인한 자원고갈과 환경오염 문제가 대두되고 있다. 이에 따라 기존 화석연료를 대체할 신·재생에너지의 개발과 연구가 필요한 상황이다.

우리나라의 경우 기존 사용 에너지 발전량을 줄이고 재생에너지 발전량을 늘리는 ‘재생에너지 3020’ 정책을 발표·실행중이다. 이 정책에서는 풍력과 태양광의 비중을 다른 재생에너지보다 높게 책정하였다. 이는 다른 재생에너지 대비 장소적, 시간적 제한이 적고 최대 발전효율도 높기 때문이다. 그렇기 때문에 풍력과 태양열의 비중 상승이 다른 재생에너지 대비 효과적이며 절대적으로 필요하다.

하지만 우리나라의 경우 해안지방 및 도서지방이 내륙지방보다 평균풍속과 풍력에너지 밀도가 높아 풍력자원이 풍부하다[1]. 이로 인하여 현재 우리나라에 설치된 대다수의 풍력발전은 대형 양력형으로 해안지방과 도서지방에 설치되어 있다. 이로 인해 발전에 필요한 평균풍속이 높으며 가동 시 소음 및 안전적인 문제점이 꾸준히 발생되고 있다. 재생에너지 발전량을 늘리는 정책을 위해서는 풍력의 비중 상승이 필요하다. 그러기 위해선 여러 가지 요구조건 등을 연구하고 우리나라 지형에 적합한 풍력터빈의 개념정립과 기술요구사항이 필요하다[2].

본 연구의 대상인 틸팅식 풍력발전기는 항력식이다. 항력식 풍력발전기에 대한 기존 연구들로는 여러 가지 설계인자에 따른 효율과 성능평가에 대한 실험적 연구가 많이 진행되어 왔다. 날개의 크기와 개수 및 형상에 따른 토크와 출력이 주로 고찰되었고, 주속비(TSR : tip-speed-ratio)와 다양한 실험조건에서의 성능 변화를 고찰하였다[3-4]. 항력식은 대부분 수직축(vertical axis)을 기반으로 하고 있으며, 컴퓨터와 시뮬레이션 기술이 발달하면서 비정상 3차원 수치해석 및 PIV기법을 이용한 날개 주위 유동장 특성 연구도 진행되었다[5-6].

풍력발전기는 그 형태가 다양하고 날개 형상, 개수 등 설계인자가 매우 많다. 본 연구에서 관심을 가지는 날개 틸팅형 풍력발전기는 항력식이지만 날개 회전에 따른 역저항을 최소화하도록 설계되어 있어 저풍속의 도심형 풍력발전기에 적합하다. 그러나 틸팅형 풍력발전기는 Jung et al. [7]이 3차원 시뮬레이션을 통해 날개 주위의 유동특성을 고찰한 것이 유일하고, 그 이후에는 연구 자료로 보고된 바가 없는 새로운 모델이다. 따라서 틸팅형 풍력발전기의 설계 인자와 그에 따른 출력 계수에 대한 실험적 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 기존 풍력발전의 설치 장소적 제한을 해결하기 위한 새로운 방식의 틸팅식 풍력터빈의 성능을 실험적으로 고찰한다. 실험 변수로 회전 날개의 틸팅을 위한 원통캠의 형상을 설정하였고, 축소 모형을 제작하여 작동 및 성능 측정을 하였다. 주속비에 따른 출력계수와 효율계수를 고찰함으로써 틸팅식 풍력터빈의 설계인자가 성능에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 주속비(TSR)

풍력터빈이 가동되어 블레이드가 회전할 때 블레이드 끝단에서의 속도를 끝단속도(Tip speed)라고 한다.

이를 이용하여 유입 풍속과 끝단속도의 비로 정의하는 것이 주속비(Tip Speed Ratio, TSR)이며 계산하는 방법은 식 (1)과 같다. 또한 식 (1)에서 로터의 각속도는 식 (2)로 계산된다.

$$\lambda = \frac{D\omega}{2V_W} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2n\pi}{60} \quad (2)$$

식 (1)로 구해진 주속비를 이용하여 풍력터빈의 성능을 나타내기도 하며 최적의 주속비를 확인할 때도 필요하다[8].

2.2 성능평가

풍력터빈의 성능평가는 객관적인 평가를 위해 무차원 성능계수로 표현하며, 사용되는 성능계수에는 효율계수, 토크계수, 추력계수, 솔리디티 등이 있다.

식 (3)의 효율계수는 실제출력과 유체 운동에너지의 비로 나타내며, 터빈을 사용하여 유체에너지에서 운동에너지로 변화가 가능한 출력의 비(ratio)이다. 또한 베츠의 법칙(Betz Law)에 따르면 최대값은 0.593이며 고성능 프로펠러의 경우 0.45, 항력형 사보니우스의 경우 0.15~0.2의 수치를 나타낸다.

$$C_p = \frac{T_b \omega}{\frac{1}{2} \rho_a A_s V_W^3} \quad (3)$$

양력형의 경우 블레이드 회전면에서 발생하는 양력성분에 의한 모멘트, 항력형의 경우 항력성분에 대한 모멘트를 토크라는 물리적 의미로 정의할 수 있다. 토크계수는 이를 이용하여 식 (4)와 같이 표현된다.

$$C_{TQ} = \frac{T_b}{\frac{1}{2} \rho_a A_s V_W^2 D} \quad (4)$$

추력은 풍력터빈 로터에 작용하는 바람이 풍력터빈을 지나면서 후방으로 누르는 힘이다. 식 (5)의 추력계수는 이를 이용하여 무차원으로 표현한 성능계수로 풍력터빈 가동 시 효율과 저항에 영향을 미치게 된다.

$$C_T = \frac{T_e}{\frac{1}{2} \rho_a A_s V_W^2} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{C_L} \frac{16}{9} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2 \quad (6)$$

여기서, 솔리디티(solidity) σ 는 풍력터빈의 수평면적에 대한 블레이드 전체 투영면적 비로 식 (6)처럼 정의할 수 있다. 이때 투영면적은 회전축에 수직인 면으로 설정하고 주속비와는 강한 상관관계를 가진다.

3. 실험장치 설계 및 방법

기존에 사용하는 풍력터빈의 경우 높은 효율을 위해 대부분 크기가 대형인 양력형 풍력터빈을 사용하였다. 하지만 이 경우 높은 컷인(cut-in) 풍속이 요구되는 특징이 있다. 컷인(cut-in) 풍속은 바람으로 풍력터빈을 발전시킬 수 있는 최소 풍속이며 동시에 작동이 시작되는 풍속이다.

우리나라의 경우 이 컷인(cut-in) 풍속을 충족시키는 지역이 제한되어 있으며, 또한 설치된 장소에 소음 및 안전문제로 인한 민원이 발생하고 있다. 설치된 장소가 대부분의 전기가 사용되는 도심과 떨어져 있어 생산된 전기를 보내는 과정에 저항으로 인한 높은 손실이 발생하고 있다. 따라서 본 실험은 이러한 점을 해결하기 위해 기존 방식과는 다른 방식으로 작동되는 풍력터빈 개발을 위하여 진행하였다.

3.1 실험장치 설계

실험을 위해서는 기존 방식과는 다르게 낮은 풍속에서도 발전이 가능하며, 중·소형 크기를 가진 풍력터빈 방식이 필요하다. 앞에서 요구되는 특징들을 기반으로 항력을 이용한 틸팅식 풍력터빈을 Fig. 1과 같이 설계하였다. 틸팅식 풍력터빈은 바람의 힘을 직접적으로 이용하기 때문에 양력형에 비해 낮은 컷인(cut-in) 풍속이 요구되며 크기 또한 상대적으로 유연하게 조절이 가능하다. 그러나 항력을 이용한 터빈의 경우 가동 시 역저항으로 인한 손실이 크기 때문에 효율이 낮다는 단점이 있다[9].

이 점을 보완하기 위해 Fig. 2와 같이 원통캠(cylindrical cam)을 이용하여 블레이드를 틸팅시키는 방식을 선택하였다. 이 원통캠은 기계의 구조상 캠의 회전축을 종동절과 평행하게 하고자 할 때 사용되며, 안내 홈에 맞물리는 종동절의 종류에 따라 운동을 하며 캠으로 원통 위에 설계된 안내 홈(guide groove)으로 형상을 형성한다. 이러한 안내 홈 구간을 블레이드 회전에 따라 바람을 크게 받는 구간(X_1, θ)과 받지 않는 구간(X_2, θ)으로 나누고 바람을 받는 구간에서는 블레이드를 바람방향과 수직상태로 만들어 최대한 많은 풍

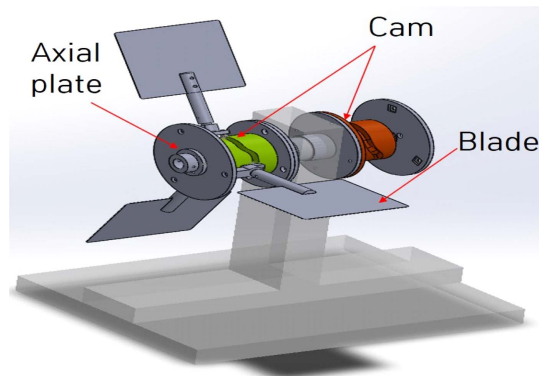


Fig. 1. 3D design of a tilting-type wind power generator based on cylindrical cam

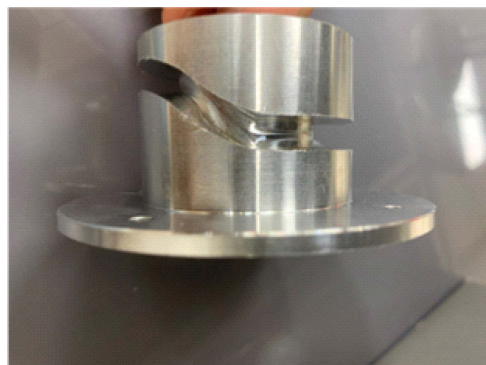


Fig. 2. Guide groove of the cylindrical cam

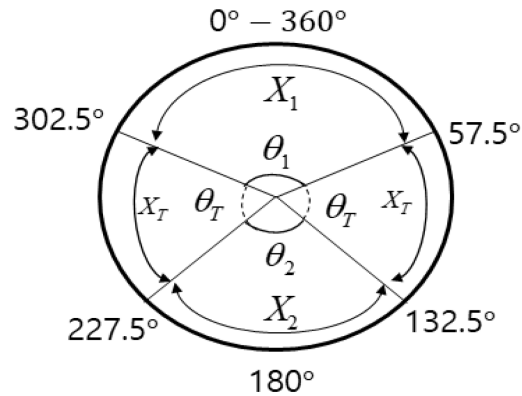


Fig. 3. Angles in section along guide groove of the cam

Table 1. Cam specifications applied for the experiments

Type	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$X_1(\text{mm})$	$X_2(\text{mm})$
1-1		95°		38.96
1-2	115°	100°	47.17	41.02
1-3		105°		43.07
2-1		95°		38.96
2-2	125°	100°	51.27	41.02
2-3		105°		43.07

력을 받고 반대구간에서는 바람방향과 평행상태로 만들어 역저항을 최소화하도록 설계하였다. 이때, 바람 방향에 따라 블레이드를 틸팅시키는 역할은 캠이 담당하는데 수학적인 설계를 통해 Fig. 3과 같이 각 부분의 치수를 설정하여 형상을 만들었다. 바람을 받는 구간(X_1 , θ_1)과 받지 않는 구간(X_2 , θ_2) 이외 구간은 블레이드가 틸팅되는 구간이다.

3.2 실험방법

실험장치는 Fig. 4와 같이 틸팅식 풍력터빈, 토크센서, AC 서보모터, 인디케이터, 풍동장치로 구성하였다. 먼저 캠의 안내 홈은 Table 1과 같이 상부부분의 길이 X_1 과 각도 θ_1 은 고정하고 하부부분 길이 X_2 와 각도 θ_2 를 다르게 제작하였다. 이는 역저항이 발생하는 각도에 의한 블레이드 틸팅 속도와 역저항 최소화 구간길이에 의한 영향을 확인하기 위해서이다. 상부부분의 길이 X_1 과 각도 θ_1 가 같은 Type별로 실험하여 비교하였다.

틸팅식 풍력터빈 전산해석 결과[7] 낮은 주속비에서 최대 출력과 토크가 발생하였다. 이를 바탕으로 AC 서보모터 제어 가능 범위 내에서 풍속에 따른 주속비를 계산하여 적용하였다. 양력형 풍력터빈의 경우 컷인(cut-in) 풍속이 평균 약 14 m/s가 요구된다. 하지만 우리나라의 경우 기상청 데이터를 살펴보면 도심, 내륙지역의 평균풍속이 1~6 m/s로 확인된다[1]. 이를 바탕으로 실험에서는 최대 15 m/s까지 풍속조절이 가능한 오픈형 풍동(open-type wind tunnel)을 이용하였고, 풍속을 도심, 내륙 평균 풍속 중 비율이 높은 3~5 m/s로 설정하여 진행하였다. 풍동의 시험부(test section)는 300 × 300 mm²이며, 시험부를 통해 토출되는 바람을 이용하여 풍력 터빈을 가동하였다.

수평면적은 수직투영면적으로 블레이드의 회전 넓이로 정의한다. 하지만 틸팅식 풍력터빈의 경우 새로

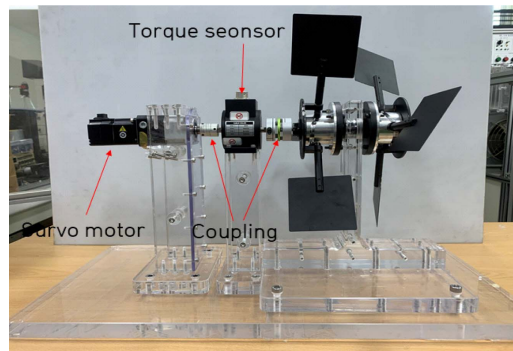


Fig. 4. Experimental system for the tilting-type wind power generator

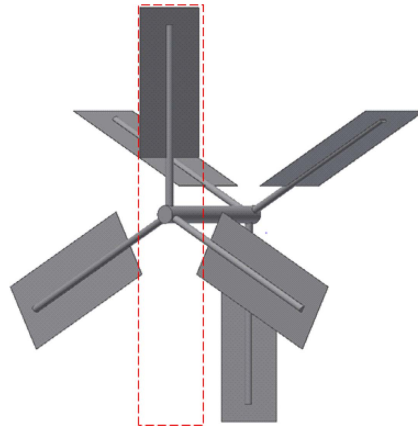


Fig. 5. Definition of projected area in the wind turbine

운 방식이기 때문에 기존 방식과 같은 수평면적 선정이 불가능하다. 따라서 Fig. 5와 같이 회전축을 포함하여 바람의 영향을 받는 영역으로 설정하였다. 실험은 조건 하나씩 약 30 s 정도 데이터를 측정하였으며, 실험실 온도는 22℃, 습도는 58% 상태에서 진행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 출력 특성

Figs. 6(a)-(c)는 각각 풍속 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s에서의 측정된 출력 그래프이다. 역저항을 최소화하는 구간인 하부부분 X_2 길이가 출력에 영향을 미치는 것으로 보인다. X_2 길이가 길수록 역저항이 감소하기 때문에 발생된 출력의 손실이 적어진다. 주속비 0.22일 때 모두 최대 출력이 발생하였다.

주속비 0.22 이후 출력이 감소하는 것은 AC 서보모터 제어에 의한 토크 발생보다 틸팅식 풍력터빈이 바람에 의해 생성되는 토크보다 크기 때문이다. 틸팅식 풍력터빈의 토크 감소는 설계한 풍력터빈의 크기와 한계 RPM으로 올라갈수록 진동으로 인한 부품 마찰 및 충격으로 판단된다. 또한 RPM이 높아질수록 주속비가 상승하여 상부부분 X_1 에서 머무는 시간이 짧아지면서 같이 짧아진 전력생산 가능시간도 토크 감소 이유 중 하나로 생각된다.

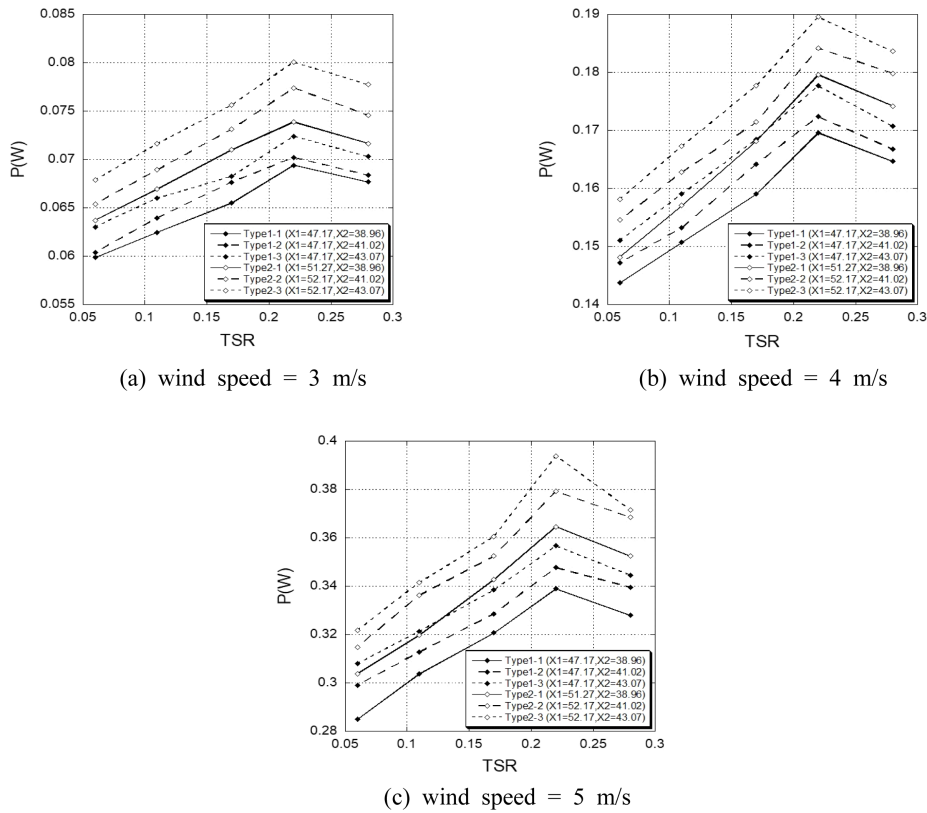


Fig. 6. Power according to the tip-speed-ratio (TSR) at different wind speed

4.2 토크계수

Figs. 7(a)-(c)에서 확인 가능한 토크계수 또한 주속비 0.06일 때 값이 최대이며 이후부터는 감소하게 된다. 또한 Type1 보다 Type2의 토크계수가 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 이는 상부부분 X_1 길이의 영향 큰 것으로 판단된다. 길이가 길어질수록 바람으로부터 항력을 받는 시간이 길어져 토크생성에 유리하기 때문이다. 각각의 Type 중에서도 역저항 최소화 구간이 하부부분 X_2 가 길수록 토크계수가 높게 나타났다. 틸팅식 풍력터빈이 가동하면서 역저항 발생구간에서 블레이드를 바람과 평행한 상태로 만들어 역저항을 최소화시켰기 때문이다.

토크는 각속도와 반비례관계를 가진다. RPM과 각속도가 상승하게 되면 주속비가 커지고 토크는 감소하게 된다. 주속비가 크다는 것은 상대적으로 각속도의 변동량 보다 토크 변동량이 크다는 의미이다. 따라서 높은 토크를 발생시키기 위해서는 주속비가 낮아야 한다. 하지만 본 실험의 경우 장치적인 이유도 존재한다고 판단된다. AC 서보모터 작동으로 인한 진동이 축의 비틀림을 측정하는 토크 센서에 전달되어 측정되는 토크가 감소한다고 판단된다.

4.3 효율계수

효율계수는 풍력터빈 성능평가에서 가장 많이 사용되는 지표이다. Figs. 8(a)-(c)는 풍속별 효율계수를 계산한 그래프이다. 출력과 동일하게 주속비 0.22에서 최대 효율이 발생하는 것으로 나타나며 그 이후부터

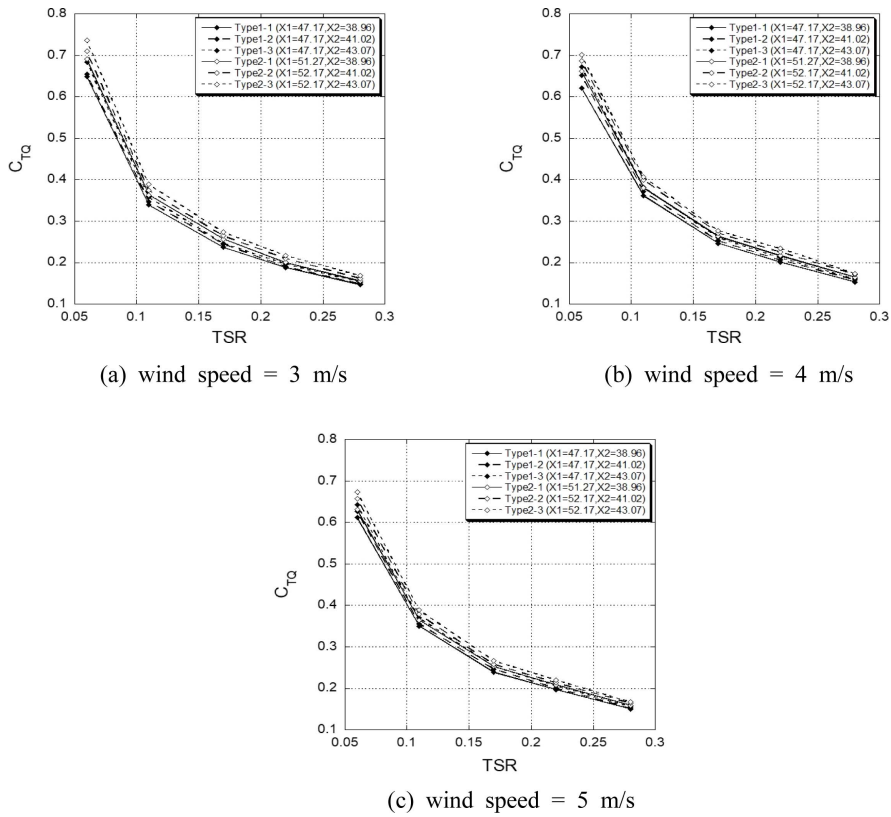


Fig. 7. Torque coefficient according to the tip-speed-ratio (TSR) at different wind speed

는 감소한다. 그래프를 보면 Type 1-1에서 2-3으로 갈수록 풍속이 증가할수록 효율계수가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 상부부분 X_1 길이가 길어진 영향으로 항력을 받는 시간이 길어지고 이로 인해 보다 많은 토크가 발생되기 때문이다. 상부부분 X_1 길이가 길어질수록 블레이드 틸팅구간의 길이가 짧아져 틸팅속도는 빨라지게 된다. 빨라진 속도만큼 틸팅이 이루어지는 부분에서의 역저항도 감소하게 된다. 하지만 틸팅속도가 빨라지게 되면 진동발생과 캠(cam)이 파손될 가능성이 있다.

회전 날개가 틸팅식이 아닌 고정식 항력형 풍력터빈의 효율계수는 0.15~0.2 인데[10], 본 연구에서 진행한 틸팅식 풍력터빈의 최대 효율계수는 약 0.103으로 날개 고정식 풍력터빈 효율계수보다 낮게 계산되었다. 이는 틸팅식 풍력터빈의 부품 한계로 생각된다. 본 연구는 틸팅식 풍력터빈의 성능 특성을 실험적으로 고찰한 연구이며, 풍속이 낮은 도심에서 사용시 경제성과 효율성 측면은 추가적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

본 연구는 풍력터빈 크기의 선택이 자유롭고 저풍속에서도 발전이 가능한 틸팅식 풍력터빈 개발을 위해 진행되었으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 출력은 주속비 0.22일 때 약 0.08 W의 최댓값을 나타내며 이후 감소한다. 이는 각속도의 상승보다 토크감소량이 더 크기 때문이다.
- (2) 주속비 0.06일 때 약 0.074의 최대 토크계수가 발생하며 각속도의 상승과 AC 서보모터의 고속회전으로 인한 진동발생으로 토크계수가 감소한다. 이에 다음 실험을 위해서는 진동 감소 대책이 요구된다.

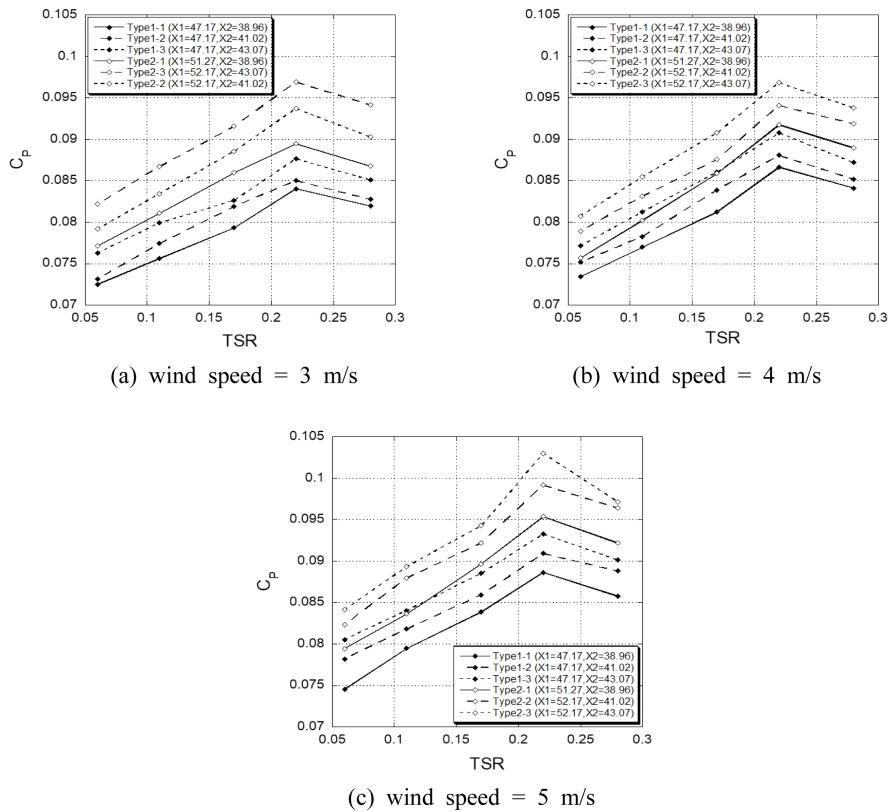


Fig. 8. Power efficiency according to the tip-speed-ratio (TSR) at different wind speed

(3) 약 0.103의 효율계수가 주속비 0.22일 때 발생하고 앞선 지표들과 마찬가지로 상부부분 길이와 하부부분 길이에 의한 영향이 크다.

(4) 출력과 토크계수, 효율계수의 최댓값이 주속비 0.22와 0.06에서 발생하는 것으로 보아 틸팅식 풍력터빈은 저풍속에서도 가동되어 발전이 가능하다. 또한 추후 시험시 설계수정을 통하여 파손방지 및 장비를 이용한 정확한 데이터 측정이 요구된다.

References

1. Park, K. H., Kim, K. H., and Chung, H. S., 1990, Characteristics Analysis of Domestic Wind Energy Resources, The Korean Solar Energy Society., Vol. 10, No. 2, pp. 3-9.
2. Choe, J. S., Kim, G. H., and Lee, G. T., 2001, Preliminary Analysis of the Wind Turbine Requirements for Domestic Use, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences., Vol. 30, No. 1, pp. 165-172.
3. Kim, D. K., Kim, M. K., Cha, D. K., and Yoon, S. H., 2006, Design of drag-type vertical axis miniature wind turbine using arc shaped blade, KSFM J. Fluid Mach., Vol. 9, No. 2, pp. 7-12.
4. Park, J. Y., Lee, M. J., Lee, S. J., and Lee, S., 2009, An experimental study on the aerodynamic performance of high-efficient, small-scale, vertical-axis wind turbine, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 33, No. 8, pp. 580-588.
5. Orlandi, A., Collu, M., Zanforlin, S., and Shires, A., 2015, 3D URANS analysis of a vertical axis wind turbine in skewed flows, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 147, pp. 77-84.

6. Fujisawa, N., 1996, Velocity measurements and numerical calculations of flow fields in and around Savonius rotors, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, Vol. 59, pp. 39-50.
7. Jung, C. D., Bae, H. W., and Sung, J., 2020, Power Coefficient and Pressure Distribution on Blade Surfaces of a Wind Turbine with Tilttable Blades by 3D Simulations, *Korea Society of Geothermal Energy Engineers.*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-8.
8. Kang, D. H., Shin, W. S., and Lee, J. H., 2014, Experimental study on the performance of urban small vertical wind turbine with different types, *The KSFM Journal of Fluid Machinery.*, Vol. 17, No. 6, pp. 64-68.
9. Kim, B. K., Kim, Y. H., Song, W. S., Lee, S. B., Nam, S. K., and Kim, S. M., 2007, An Experimental Study on the Performance of the Vertical-Axis Wind Turbine, *Korean Society for Fluid Machinery.*, Vol. 10, No. 3, pp. 17-24.
10. Hau, E., 2005, *Wind Turbines*, Springer, p.101.