

상반회전 풍력발전 시스템의 설계형상 최적화에 관한 연구

이주영, 정성남
전북대학교 기계항공시스템공학부

송승호, 김동용
전북대학교 차세대풍력발전연구센터

Optimum Shape Design of Counter-rotating Wind Turbine System

Ju-Young Lee, Sung-Nam Jung,
Dukjin-ku, Chonju, Chonbuk National University

Seung-Ho Song, Dong-Yong Kim

Abstract - 상반회전 풍력발전 시스템의 경우 전방에 위치한 로터의 후류 효과를 적절히 반영하여 설계에 이용해야 한다. 본 연구에서는 이러한 로터의 후류효과 및 블레이드의 실속후 모델을 고려하여 30kW급 상반회전 시스템의 설계형상에 대한 검토연구를 수행하였다. 기본 공력이론은 모멘텀 이론과 2차원 준정상 공기력 이론을 통합한 형태를 사용하였다. 로터의 후류영향을 고려하기 위해 축소형 풍차 블레이드 모델에 대한 풍동시험 결과를 적절히 이용하며, 이로부터 보조로터를 지난 후류의 축속도 및 각속도 성분을 결정하였다. 최종적으로 상반회전 시스템의 로터 반경 및 상호 이격거리 등을 고려한 성능해석을 수행하고 이로부터 최적 설계형상에 대한 파라미터 연구결과를 제시하였다.

1. 서 론

현재 인류 문명을 유지하는데 필수적인 요소는 바로 에너지이다. 문명의 이기들을 사용함에 있어서 에너지는 중요한 역할을 수행하지만 이에 따라서 발생한 환경오염 및 2100년경에 화석 연료의 고갈이라는 문제는 우리에게 경각심을 불러일으키기에 충분하다. 이 때문에 대체 에너지 개발이 필요하게 되었고 풍력은 이에 부합하는 중요한 에너지원이다.

상반회전 풍력 시스템은 최근에 특히 등록된 베벨-유성 기어[1]를 사용하여 수평축 풍력 시스템과 수직축 풍력 시스템이 결합된 형태로 현재 새만금 인근에 성공적으로 설치되어 운용되고 있다(Fig. 1). 이 상반회전 시스템은 주 로터와 보조 로터 두개의 독립된 로터로 구성되어 있다. 주 로터 안쪽 30% 영역은 실속영향 때문에 추력의 감소가 발생하므로 블레이드와 로터 허브를 연결하는 보로 대치하였고 주 로터 지름의 절반 크기를 가진 보조 로터를 주 로터 전면부에 설치하여 보조의 추력을 발생하도록 하였다. 상반회전 풍력 시스템은 주 로터 전면에 보조 로터가 위치하기 때문에 구조적으로 복잡하지만 단일로터 시스템에 비해 높은 공력 효율을 얻을 수 있고, 풍향 추종성이 뛰어난 장점이 있다[2]. 표 1에 상반회전 풣력 시스템의 로터 재원이 나와 있다.

본 연구는 30kW급 상반회전 풣력발전 시스템의 실제 운용 경험 및 기록 운전 자료를 토대로 시스템의 성능을 평가하고, 기존의 단일 로터 풣력 시스템과의 비교 연구를 수행한다. 또한 로터 전후방의 공력 특성을 측정한 풍동 시험 결과 및 모멘텀 이론 그리고 블레이드 요소이론에 입각하여 현재 설계 형상에 대한 수치적인 검증 작업을 실시한다.

2. 이 론

상반회전 풣력 시스템에 대한 성능해석은 Glauert[3]의 최적조건, 준정상 공기력 이론과 모멘텀 이론 그리고 블레이드 요소 이론을 통합한 형태를 사용하였다.

Fig. 2는 풣차 블레이드의 기하학적 변수 및 특성 값을 나타내며 이들은 다음과 같이 표현된다.

$$a' = (1 - 3a)/(4a - 1) \quad (1)$$

$$\lambda_r = \Omega r / V_w \quad (2)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1-a}{\lambda_r(1+a')} \right) \quad (3)$$

$$\theta = \phi - a = \theta_{tw} + \theta_0 \quad (4)$$

여기서 a 와 a' 는 입력 풍속에 대한 축 방향 및 접선 방향 풍속에 대한 유도인자(induction factor)를 나타내며 λ_r 과 ϕ 는 각각 유입비와 유입각을 나타낸다. θ , θ_{tw} 와 θ_0 는 각각 피치각, 비틀림각과 입력 피치각을 나타내고, a 는 받음각을 나타낸다. 블레이드 한쪽 영역에 존재하는 실속 영향을 고려하기 위하여 Viterna와 Corrigan[4]이 제한한 실속 모델을 사용하여 공력 해석에 적용하였다. 또한 익단 손실의 영향을 고려하기 위하여 Prandtl의 익단 손실 모델을 적용하였다[5]. 이렇게 하여 구한 추력, 토크, 파워는 다음과 같이 표현된다.

$$T = \int_0^F \frac{N_b}{2} \rho c V_r^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dr \quad (10)$$

$$Q = \int_0^F \frac{N_b}{2} \rho c V_r^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) dr$$

$$P = \Omega Q$$

여기서 N_b 는 블레이드의 개수, ρ 는 공기 밀도, c 는 코드 길이, V_r 은 블레이드의 상대속도, Ω 는 로터의 분당 회전수, F 는 익단 손실 효과, 그리고 C_l , C_d 는 각각 양력과 항력 계수를 나타낸다.

상반회전 풣력 시스템의 경우 보조 로터에 의해 발생한 후류가 시스템 성능에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 Neff와 Meroney[6]의 풍동 실험 데이터를 바탕으로 하여 공력 성능을 예측하였다. 53.4cm의 지름을 가진 NACA 4415 블레이드를 사용하여 로터의 전방과 후방 및 가로방향에서 로터 회전 당 67개의 샘플을 58개의 공간 위치에서 측정하였다. 이때의 실험 결과를 보조 로터를 통과한 후류 영역의 평균 속도라 가정하고 보조 로터와 주 로터의 거리를 고려하여 속도 크기를 구하고 이를 주 로터에 유입되는 흐름의 속도 크기로 가정하여 상반회전 풣력 시스템의 성능을 해석하였다.

3. 결과 및 검토

Fig. 3은 Neff와 Meroney[6]의 실험 데이터를 바탕으로 보조 로터를 통과한 후의 축 방향 바람속도의 양상을 나타내고 있다. 실험에서 얻은 값들을 기반으로 나머지 점들의 값을 구하였다. 그럼에서 나타낸 점들은 실험에서 측정된 지점들이다. 풣차는 바람으로부터 에너지를 흡수하기 때문에 Fig. 3에서 보면 유선이 로터 면을 통

과한 후 확장되는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 바람의 속도가 로터 앞에서 약간의 속도가 감소하고 로터를 지난 후 최고 45%까지 속도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면에 유선바깥쪽 영역은 12%까지 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 로터의 회전속도는 블레이드 길이에 비례하여 선형적으로 증가하므로 주 로터 위치에서 안쪽 영역의 속도 감소에 비하여 바깥쪽 영역의 속도 증가는 결과적인 시스템의 성능에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 상반회전 풍력 시스템에서 주 로터에 대한 보조 로터의 크기, 주 로터와 보조 로터 사이의 거리가 성능과 관련해 큰 영향을 끼치게 된다.

Fig. 4는 주 로터에 대하여 보조 로터의 크기를 증가시키면서 구한 효율을 주 로터만 있을 때와 비교한 것이다. 보조 로터의 크기가 증가할수록 낼 수 있는 동력도 증가하다가 거의 주 로터의 절반 크기가 되면 최대 값을 갖고 그 이상으로 증가하면 효율이 감소한다. 이는 보조 로터가 커질수록 자유흐름보다 작은 속도가 더 많이 주 로터에 들어가기 때문이다. 주 로터만 있을 때 보조 로터가 있을 때 효율은 20%증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 주 로터에 대한 보조 로터의 위치에 따른 효율을 나타내고 있다. 실험 데이터의 제한 때문에 보조 로터 크기의 절반까지 효율을 구하였다. 거리가 멀어질수록 효율은 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 구조적 제한 때문에 보조로터는 주 로터 앞에 보조 로터의 40% 위치에 존재한다. Fig. 6은 지금까지의 이론식에 실험 모델들을 적용하여 해석한 얻은 동력을 나타내고 있다. 시스템 정격 속도인 10.6m에서 상반회전 풍력 시스템은 단일 로터에 비하여 약 21%의 증가가 있었다. 실제 설치 운용되고 있는 시스템에서 얻은 데이터와 비교했을 때 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 실제 설치 운용되고 있는 시스템에서 얻은 바람의 속도, 끝단속도 비(Tip Speed Ratio)에 따른 동력계수(C_p)를 나타내고 있다. 최대 동력계수가 0.5의 값에 이르는 것으로 볼 때, 상반회전 풍력 시스템은 바람으로부터 에너지를 얻는데 대단히 효과적이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 30kW급 상반 회전 풍력발전 시스템의 운용 결과를 토대로 시스템의 운전성능을 평가하고 기존의 단일 로터 시스템과의 성능 비교 예측을 실시하였다. 풍차 블레이드의 성능 해석을 위해 블레이드 요소이론과 모멘텀 이론을 적용하였으며, 로터 전후방의 공력 특성에 대한 풍동 시험 결과를 이용하였다. 상반회전 풍력 시스템에 대한 공력 해석 및 운전시험 결과 기존 시스템에 비해 20% 정도의 성능 향상이 기대됨을 보였으며, 시스템의 최대 동력계수는 0.5에 근접함을 확인하였다. 또한 두 로터간 이격거리와 같은 현재 형상에 대한 설계 검증결과 이론적으로 타당성이 있음을 보였다.

(후기)

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

(참 고 문 현)

- [1] "Over-drive Gear Device," U.S. Patent No. 5222924, June 1993.
- [2] 동경민, 정성남, "후류영향을 고려한 상반회전 풍력발전 시스템의 공력성능 예측에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제30권, 제7호, 2002, pp. 20-28.[2]
- [3] Glauert, H., *Aerodynamic Theory*, Vol. IV, Berlin, 1935, pp. 324-330.

[4] Spera, D. A., *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, ASME Press, 1994, Ch. 5.

[5] Tony, B., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, 2001, pp. 78-93.

[6] Neff, D. E. and Meroney, R. N., Mean Wind and Turbulence Characteristics due to Induction Effects near Wind Turbine Rotors, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69-71, 1997, pp. 413-422.

Table. 1 Properties of 30kW counter-rotating wind turbine system.

	M/R	A/R
No. of blades	3	3
Rotor diameter	11 m	5.5 m
Rotor position	downwind	upwind
Airfoil	NACA 0012	NACA 4415
Twist	-2 deg.	0 deg.
Rotor RPM	150	300
Blade materials	glass/epoxy	glass/epoxy
Rotation	counter-clockwise	clockwise
Pitch control	variable	variable

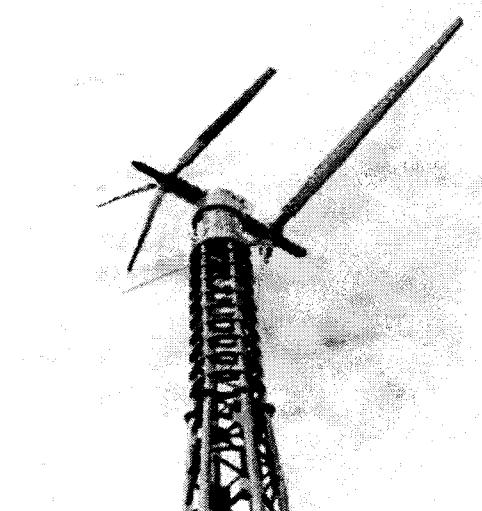


Fig. 1. A 30kW counter-rotating wind turbine system.

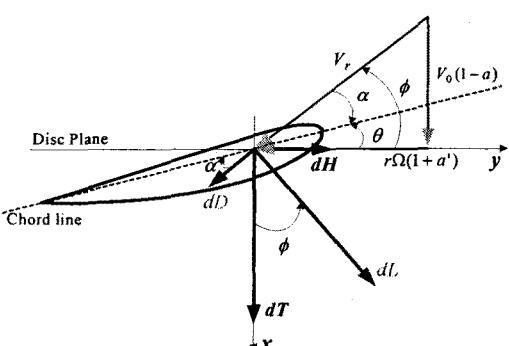


Fig. 2 Blade section aerodynamics.

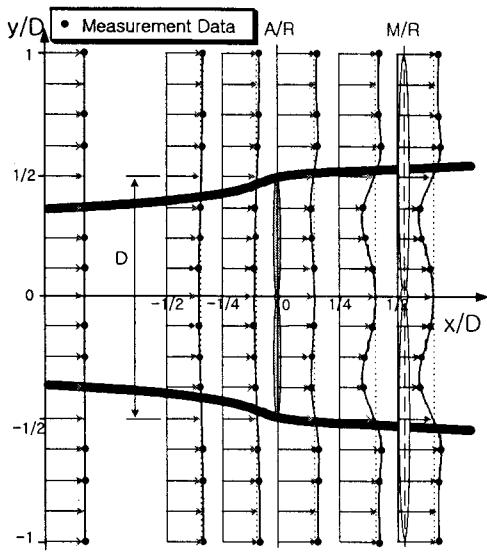


Fig. 3 Wind speed profiles along the axial direction.

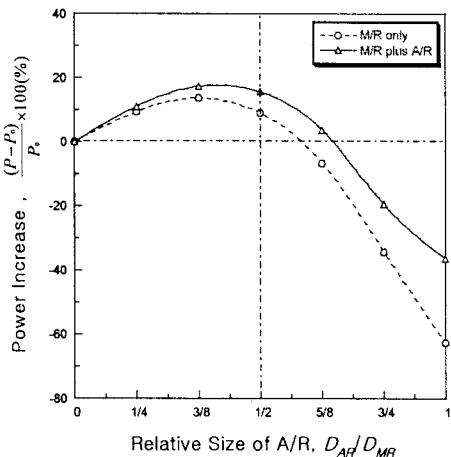


Fig. 4 Effect of A/R size on the increase of power.

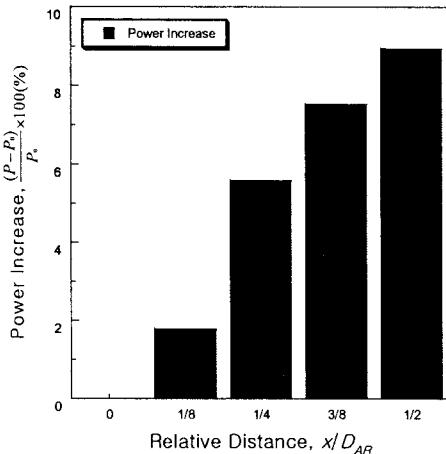


Fig. 5 Effect of the interval on the change of power.

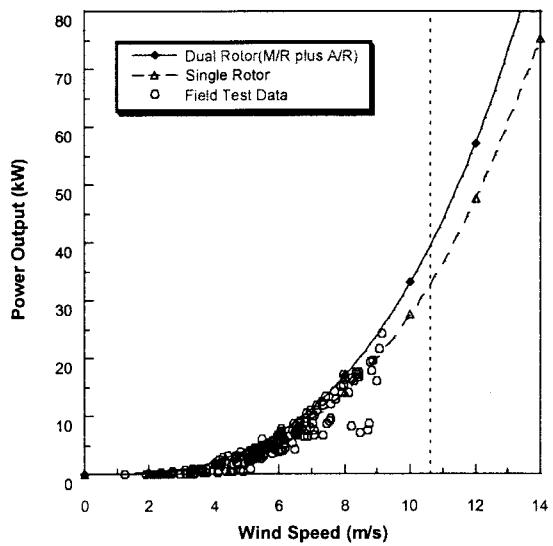


Fig. 6 Comparison of power curves.

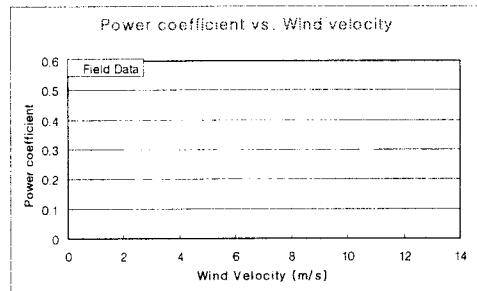


Fig. 7 Power coefficients as a function of wind speeds.

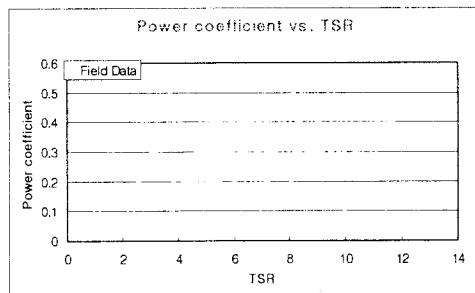


Fig. 8 Power coefficients as a function of tip speed ratio.