

솔리디티에 따른 H-로터의 공기역학적 특성 및 성능해석

주성준* · 이주희**†

Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristics and Performance Analysis on H-rotor with Various Solidities

Sungjun Joo*, Juhee Lee**†

Key Words : Aerodynamic Characteristics(공기역학적 특성), Aerodynamic Interference(상호작용), Blockage Effect(막음효과), H-rotor(H-로터), Solidity(솔리디티)

ABSTRACT

Three-dimensional unsteady numerical analysis has been performed to observe aerodynamic characteristics of a H-rotor. Generally, the structure of the H-rotor is simple but the aerodynamic characteristics are exceptionally complicated since the angle of attacks and incident velocities to a blade are considerably varied according to the azimuth angles and solidities. The blade in the upwind revolution between 0 to 180 degree obtains aerodynamic energy from the free stream but the blade in the downwind revolution between 180 to 360 degree does not. When the rotating speed increases, the blade in the downwind revolution accelerates the air around the blade like a fan and it consumes the energy and shows negative torque in the area. On the other hand, the direction of the free stream is bent because of the interaction between blade the free stream. Therefore, the operation point (highest power coefficient) appears at a lower tip-speed-ratio what it is expected.

1. 서 론

풍력발전기는 무한히 재생 가능한 바람의 운동에너지를 발전기의 회전력을 이용하여 전기에너지로 변환하는 청정에너지 변환장치이다. 날개의 회전방향과 바람방향에 따라 수평축풍력발전기(horizontal axis wind turbine, HAWT)와 수직축풍력발전기(vertical axis wind turbine, VAWT)로 구분할 수 있다. VAWT는 바람방향 변화에 덜 민감하며 대체적으로 제작이 쉽고 관리에 들어가는 비용이 적으나 HAWT에 비하여 성능이 떨어진다는 단점을 가지고 있다. VAWT는 바람의 항력을 주로 이용하는 사보니우스(Savonius), 양력을 이용하는 다리우스(Darrieus)⁽²⁾로 대별된다. 다리우스 풍력발전기 중 3차원 곡선 날개 대신 유한길이의 직선날개를 사용하는 것을 H-로터(H-rotor) 혹은 직선날개 다리우스(straight-bladed Darrieus) 풍력발전기라고 한다.

다리우스풍력발전기는 수평축풍력발전기에 비하여 바람의 방향에 영향을 받지 않고 기어와 같은 추가적인 장치를 사용하지 않으며 발전기가 지면 가까이 있어 유지보수에 유리하다는 장점을 가지고 있어 국내외적으로 다양한 관심을 가지고 있다. 특히 70년대와 80년대에 미국의 SANDIA 연구소에서 곡선(troposkien, skipping rope)형의 다리우스풍력발전기의 일반적인 특성⁽³⁾에서부터 실험⁽⁴⁻⁷⁾, 성능예측⁽⁸⁻¹¹⁾, 실증⁽¹²⁾, 구조해석⁽¹³⁻¹⁵⁾ 등 다양한 분야에 연구가 집중적으로 이루어졌다.

SANDIA 연구소에서 주로 연구한 솔리디티($\sigma = cN/R$)가 낮은 곡선형의 다리우스풍력발전기는 끝단 속도비(tip speed ratio, $TSR = R\omega/u$)가 2~3에서 매우 낮은 토크를 보이는데 이것은 유동과 익형의 상대적인 각도가 매우 커져 실속(dynamic stall)이 발생하고 이로 인하여 양항비가 급격히 감소하기 때문이다. 또 경우에 따라 날개에 작용하는 토크가

* 호서대학교, 전자공학전공(Electric engineering, Hoseo university)

** 호서대학교, 자동차ICT공학과(Department of ICT automotive engineering, Hoseo university)

† 교신저자, E-mail : juheele@hoseo.edu

음(-)의 값을 가질 수 있으며 이로 인하여 자구동(self-starting)이 불가능해진다. 반대로 TSR 이 높은(TSR 7) 경우에는 상대 받음각이 감소하게 됨으로 실속은 발생하지 않으나 받음각이 줄어들음으로 인하여 양력이 감소하고 이로 인해 성능이 저하되게 된다.⁽¹⁶⁾ 그러므로 곡선형의 다리우스풍력발전기는 모터를 이용하여 발전회전속도까지 회전속도를 높이며 이후 바람에 의하여 이 보다 빨라지는 풍속에서 발전을 시작하는 유도발전에 적합하다.

H-로터는 날개가 직선형(straight bladed)으로 되어 있어 제작하기 쉽고 경제적이기 때문에 몇몇 회사에서 상업적으로 생산하고 있으나 성능향상을 위한 체계적인 연구를 필요로 하고 있다.⁽¹⁶⁾ 최근 Islam et al.⁽¹⁶⁾은 여러 가지 형태의 수직축풍력발전기(VAWT)에 관하여 소개하였다. 또한 이들을 해석하기 위한 여러 모델들을 정리하였으며 이들 중 이중-다중유관모델(double-multiple stream tube model)이 가장 일반적으로 사용되고 있으며 와류모델(vortex model)과 케이스케이드모델(cascade model)이 그 다음으로 많이 사용되고 있다고 하였다. 그러나 이중-다중유관모델은 솔리디티가 높은 H-로터에 적용하기에는 많은 어려움이 있으며 특히 상류에서의 날개의 상호작용⁽¹⁷⁾이 있으므로 이에 대한 수정이 필요하다. Yoo⁽¹⁸⁾은 다중유관이론과 고정후류이론을 혼합한 혼합이론을 이용하여 다리우스 풍력터빈의 성능을 예측하였으며 이를 실험값과 비교하여 혼합이론의 타당성을 검증하였으며, 이를 이용하여 다리우스 풍력터빈의 공기역학적 설계요소가 성능에 미치는 영향에 관하여 연구를 수행하였다. 다리우스 풍력터빈의 최적의 솔리디티는 약 0.2이며 같은 면적비일 경우 날개의 개수가 많을수록 성능이 저하한다고 하였다.

솔리디티가 낮은 다리우스풍력발전기의 설계 및 성능해석에 사용된 BEM(Blade Element-Moment)방법은 H-로터의 해석에 적절하지 않기 때문에 수치적인 방법을 이용한 연구가 시도되었다. Mohamed⁽¹⁹⁾는 전산유체역학(CFD)을 이용하여 20개의 다양한 형태의 익형에 대하여 성능을 평가를 수행하였다. 이들 중 대칭형 익형인 s-1046은 $TSR=10$, $\sigma=0.1$ 까지 확장할 수 있으며 출력계수(power coefficient)가 26.8%로 가장 높게 나타난다고 하였다. 또한 기존의 NACA 계열의 익형보다 약 10.9% 정도 향상된 기능을 보인다고 하였다. 또 솔리디티가 낮은 것이 효율 면에서 유리하다고 하였다. 그러나 이러한 주장은 효율이라는 측면만을 고려한 것으로 전체적인 발전기의 성능이라는 측면에서는 다를 수 있다. 일반적으로 솔리디티가 낮은 경우 유도교란이 적으므로 높은 TSR 에서 운전이 가능하고 효율이 높으나 낮은 TSR 에서는 큰 받음각으로 인하여 실속이 발생할 수 있어 자구동이 어려워진다.

Castelli et al.⁽²⁰⁾은 BEM이 대부분 실속영역이 아니고 높은 Re수(Reynolds number)에서 유도된 한계로 인하여 H-

로터에 적용이 어렵기 때문에 CFD를 이용하여 성능을 평가하였다. CFD를 통하여 날개로 들어오는 상대 입사각과 유속을 이용하여 성능을 예측하고 분석을 수행하였다. 날개에 작용하는 토크는 크게 상반구(upwind revolution)영역과 하반구(downwind revolution) 영역으로 구분할 수 있으며 상반구에서 실속한계(stall limit)을 넘어 최대토크가 발생함을 보였다. 이러한 최대토크는 1회전을 8개의 영역으로 나눌 때 4-5번째 분면(90도 근방)에서 최대 토크가 발생한다고 주장하였다. 또한 순간적으로 효율(power coefficient, $C_p = P/(0.5\rho v^3 A)$)이 베츠한계(Betz's limit)를 넘어가는 현상을 관찰하였다.

최근 소형 풍력발전에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있으며 정 등⁽²¹⁾은 수직축 발전기의 폐쇄율이 성능에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 또 강 등⁽²²⁾은 혼합형 블레이드를 갖는 수직축 풍력발전기에 대하여 실험성을 검증하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. H-로터는 형상이 다른 풍력발전기에 비하여 간단하기 때문에 다양한 형태의 익형에 대하여 연구가 수행되고 있다. 정 등⁽²³⁾은 날개의 끝단에 에어포켓을 설치하여 다리우스 풍력발전기의 단점 중의 한 가지인 기동성을 향상시키도록 하였다. 에어포켓의 성능을 검증하기 위하여 다양한 각도(azimuth angle)에서 정적인 바람이 불어오는 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 포켓이 없는 경우보다 포켓이 있는 경우 포켓으로 인하여 유동은 복잡하여졌으나 약 20% 정도의 기동토크가 높아지는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 대상으로 한 모델은 2개의 대칭형익형(NACA0012)을 가진 H-로터로 3차원 비정상 해석을 통하여 다양한 솔리디티에 따른 공기역학적 특성과 성능의 관계를 고찰하였다. 솔리디티가 큰 경우, 저속에서 기동할 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면 날개 상호 간의 간섭 증가로 하류에 위치하는 날개로 유입되는 유동속도의 급격한 감소로 인하여 양력이 감소하고 날개의 회전속도에 의하여 주변의 공기가 가속되면서 항력의 증가로 성능이 저하되었다. 반면 솔리디티가 낮은 경우, 교란은 감소하나 설치각으로 인한 받음각의 변화로 적절한 양력을 얻을 수 없었다.

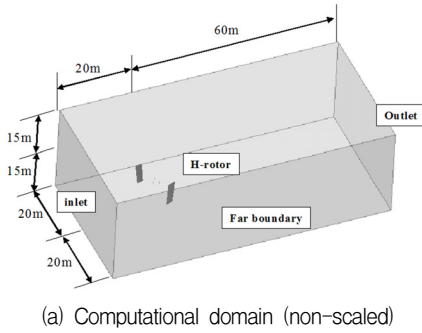
2. 지배방정식과 전산해석모델

2.1 지배방정식

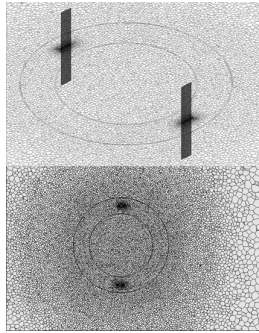
H-로터 날개 주위유동의 비정상상태유동을 지배하는 보존방정식을 텐서 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = s_m \quad (1)$$

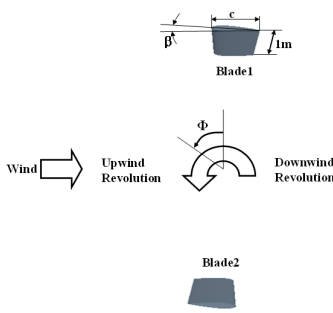
$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (2)$$



(a) Computational domain (non-scaled)



(b) Grids



(c) Dimensions and azimuth angle

Fig. 1 Computational domain, grids, specification of H-Darius turbine

여기서, u_i , u_j 는 각 방향 속도성분, p 는 압력을 나타낸다. 또한 τ_{ij} , s_m , s_i 는 각각 응력텐서, 질량생성, 운동량생성을 의미한다. 본 연구에서 3 차원 점성, 비압축성 비정상유동으로 가정하였으며 유동해석은 상용소프트웨어인 STAR-CCM+(24)를 사용하였다. 난류모델은 realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.2 전산해석모델 및 검증

발전기의 형상은 Fig. 1에 보듯이 직선날개를 가진 양력식 풍력발전기로 정격출력이 350 W급 (@11m/s)의 소형풍력발전기이다. 날개 시위(chord)는 솔리디티에 따라 0.1~0.35이며 날개길이(span)는 1m이다. 날개 수는 2개며 회전반경은 1m로 되어 있다. 풍속은 7 m/s로 입구에서 일정하게 불어오는 것으로 가정하였다. 계산을 위한 조건은 Table 1에

Table 1 Computational conditions

Item	Value	Note
Chord	0.1-0.35 m	
V_{in}	7 m/s	free stream
Blade height	1 m	
Radius	1 m	
Solidity (σ)	0.2~0.7	
Aspect ratio	2.8-10	
Pitch angle	3 deg.	
Re	$0.46-1.61 \times 10^5$	chord based

Table 2 mesh dependency test ($TSR=1.8$, $\sigma=0.7$)

cases	No. of cells	torque [N-m]	relative error	comp' time (H)
Coarse	250,000	2.935	0.34%	25
Base	490,000	3.001	2.62%	45
Refine	1,200,000	2.964	0.65%	143
Refine2	1,700,000	2.945		285

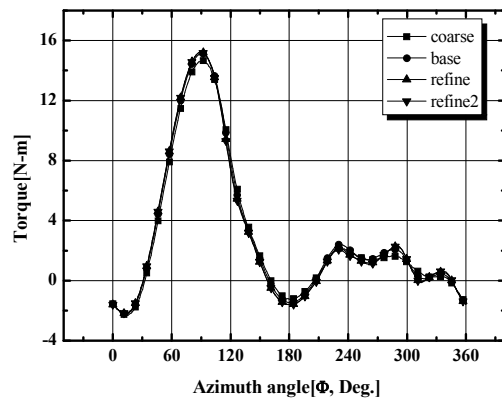


Fig. 2 Comparison of torques between consecutive meshes ($TSR=1.8$, $\sigma=0.7$)

자세하게 나타내었다. 계산 영역은 Fig. 1(a)와 같이 경계에 의하여 날개의 유동이 영향을 받지 않도록 입구(upstream)와 출구(downstream)영역으로 날개 길이의 약 13배, 40배 확장하였다. 그 외의 영역에서는 약 10배 이상 확장하였고 상호 간섭이 없다고 생각하여 미끄럼 경계(slip boundary)를 사용하였다. 입구에서는 일정한 속도로 바람이 불어온다고 가정하여 균일한 속도분포를 주었으며 출구에서는 압력 경계(pressure boundary condition)를 주었다. 계산에 사용한 격자는 격자 의존성(mesh dependency)을 거쳐 약 120만 개를 사용했으며 날개 주위의 경계층 영역을 잘 모사하기 위하여 날개주변에 4개의 층격자를 사용했다. 격자종속성을 확인하기 위하여 25만, 49만, 120만개, 170만개의 격자에 대하여 연산을 수행하였으며 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 날개 주위의 유동을 적절히 모사하기 위하여 층격자 뿐 아니

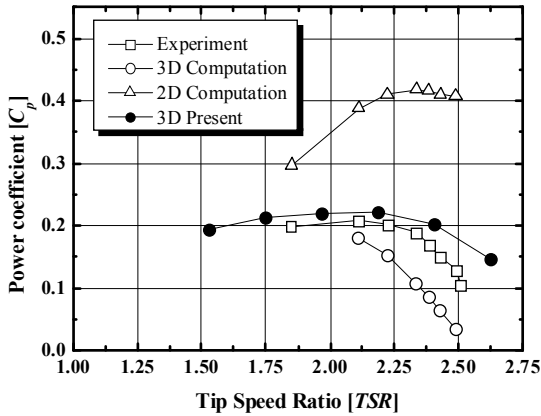
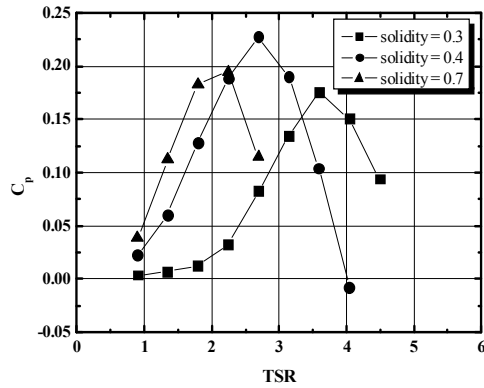


Fig. 3 Comparison of power coefficients for numerical model validation

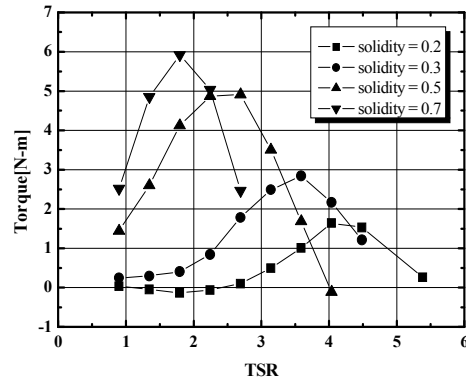
라 격자의 밀도를 집중시켰으며 날개와 날개 주위의 격자는 Fig. 1(b)에 나타내었다. Fig. 2은 날개 1개에서의 토크를 방위각에 따라 표시한 것이다. 120만개의 격자에서 얻어진 토크와 170만개의 격자에서 얻어진 토크의 전체적인 경향이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 해의 정확성을 고려하여 120만개의 격자를 이용하여 모든 계산을 수행하였다. 격자는 자동격자생성이 쉬우며 사면체 격자에 비하여 정확도가 높은 다면체 격자(polyhedral mesh)를 사용하였다. 날개 표면에서 y^+ 는 최대 50 이하가 되도록 층격자의 간격을 조정하였다.

풍력발전기의 수치적 해석방법에는 날개의 회전효과만을 고려한 MRF(moving reference frame)방법과 날개주변의 격자를 직접 회전시키는 회전격자(moving grid)방법이 있다. 날개가 회전경로에 비하여 차지하는 공간이 작으므로 MRF방법보다 해의 정확도가 높고 날개의 방위각에 따라 상세한 거동을 관찰할 수 있는 회전격자방법을 사용하였다. 또 여러 가지 계산 결과의 비교가 편리하도록 시간간격(time step)은 매 시간간격마다 날개의 회전각도가 1° 정도가 되도록 회전속도(rpm)에 따라 0.0005~0.001로 조정 하였다. 각 시간마다 충분히 수렴할 수 있도록 하위반복(sub-iteration)을 20회로 일정하게 하였으며 20회의 반복계산이 끝난 후에 잔차(residual)가 $O(10^{-3})$ 이상 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

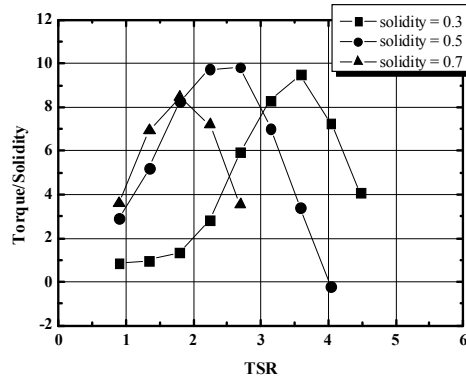
본 연구에서 사용한 수치모델을 검증하기 위하여 Fig. 3에 풍동실험 결과⁽²⁵⁾와 TSR에 따라 비교하였다. 경계조건, 계산영역 등 수치적 조건에 관해서는 선행연구인 Joo et al.⁽²⁶⁾에 자세히 나와 있다. 실험에서 사용한 풍력발전기는 날개길이 0.4 m, 코드길이 0.1 m이며 입구속도를 기준으로 ($v_{in} = 5.07m/s$) $Re_y = 35000$ 이다. 익형은 지속성능과 구조적으로 유리한 두께가 두꺼운 NACA0022을 사용하였다. 수치해석의 결과를 실험결과와 직접비교하기 위하여 풍동의 단면(test section)의 크기와 같은 영역을 계산 영역의 단면으로 설정하였다. 본 연구에서는 날개를 제외한 벽면은 마찰이



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Comparison of performances : (a) Power coefficient, (b) Torque, and (c) Torque/solidity

없는 경계(slip wall)를 사용하였으며 날개에 의한 막힘효과(blockage effect)가 실험에서와 같이 고려되도록 하였다. TSR에 따라 풍동실험에서 얻어진 효율과 같은 논문에서 수행된 2차원과 3차원 수치해석을 함께 나타내었다. 실험에서 얻어진 효율은 브레이크 동력계(brake torque)에서 얻어진 값을 보정 없이 도시하였다. 이에 반해 본 연구는 기계적인 손실이 고려되지 않은 날개에 의해 얻어진 동력이므로 실험에 비하여 약간 높게 예측하고 있다. 그러나 C_p 의 최댓값의 위치와 낮은 TSR에서의 완만한 효율증가와 C_p 의 최댓값 이후 급격한 감소를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

3. 결과 및 분석

H-로터는 단순한 형상에 비하여 회전속도와 회전각도 (azimuth angle)에 따라 받음각의 변화가 크며 날개간의 상호작용, 3차원효과(wing tip vortex), 동적실속과 같은 비정상 유동효과로 인하여 매우 복잡한 유동을 나타낸다. H-로터의 설계요소는 솔리디티($\sigma = cN/R$), 익형, 설치각(β)이 있다. 설계 회전속도와 익형이 결정되면 이에 맞는 최적의 솔리디티와 설치각을 결정하게 된다. 솔리디티를 작게 하거나 설치각을 작게 하면 운전 TSR 이 증가하며 반대로 솔리디티와 설치각을 크게 하면 운전 TSR 이 감소하게 된다.

TSR 에 따른 H-로터의 성능을 Fig. 4에 도시하였다. 솔리디티가 변함에 따라 최적의 TSR 뿐 아니라 성능특성도 많은 차이를 보이고 있다. 흥미로운 사실은 Fig. 4(c)에서 보듯이 단위길이(chord) 당 얻어지는 토크가 TSR 에 따라 약간의 차이를 보이지만 비슷한 크기를 갖는다는 것이다. 즉 날개에서 얻어지는 실제 양력(토크와 양력은 비례)은 입사되는 유속의 제곱에 비례하나 여러 가지 요인으로 인하여 그렇지 못하다는 것을 나타냈다. Fig. 4(a)에서 $\sigma=0.5$, $TSR=2.69$ 에서 최대성능 값($C_p=23\%$)을 가지며 이 보다 낮은 $\sigma=0.3$ 에서 성능($C_p=18\%$)은 약간 낮으면서 회전속도가 약간 더 높게($TSR=3.1$) 나타나고 있다. 반대로 $\sigma=0.7$ 은 $TSR=2.24$ 에서 최대점($C_p=19\%$)을 보이고 있다. 솔리디티가 낮아짐에 따라 TSR 은 높아지는 전형적인 H-로터의 형태를 보여주고 있다.

Fig. 4(b)의 토크를 보면 $\sigma=0.5$ 보다 $\sigma=0.7$ 일 때 가장 높음을 알 수 있다. $\sigma \geq 0.5$ 에서는 비교적 회전속도가 낮은 영역에서 비교적 큰 양(+)의 토크를 가지고 있는 반면 $\sigma=0.3$ 인 경우는 전체적으로 토크가 매우 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 기존 연구⁽¹⁹⁾에서 언급한 것과 같이 솔리디티가 낮은 경우 자구동이 불가능할 뿐 아니라 정상적으로 발전을 하기 위한 회전수에 이르는데 상당한 시간이 걸림을 예상할 수 있다. 그러므로 이러한 블레이드는 유도발전기에 적합하다. 솔리디티가 낮은 경우 최대 성능점을 지나면서 급격히 성능이 감소하는데 반하여 낮은 경우는 최대점 부근의 토크가 비교적 완만하게 변할 뿐 아니라 이후에도 비교적 완만하게 감소한다. 이는 운전구간이 비교적 넓으므로 제어가 쉬우며 충분한 성능을 얻는데 유리함을 나타낸다.

Fig. 4(c)는 토크를 코드 길이로 나눈 단위길이 당 토크 값을 나타낸 그림으로 곡선의 전체적인 모양은 Fig. 4(a)나 (b)와 비슷하나, Fig. 4(a)와 (b)에 비하여 솔리디티 간에 차이가 상당히 적음을 알 수 있다. 즉 단위길이 당 얻어지는 토크는 솔리디티에 관계없이 비슷한 값을 얻고 있다는 것이다. 모든 경우에 날개의 길이(span), 자유유동(free stream)의 유속, 회전반경(R), 날개의 개수가 같으므로 토크는 곧 각 날개에서 얻어지는 접선방향 힘(tangential force)에 비례하게 된다. 이 접선방향 힘은 양력계수, 항력계수, 유입속도에

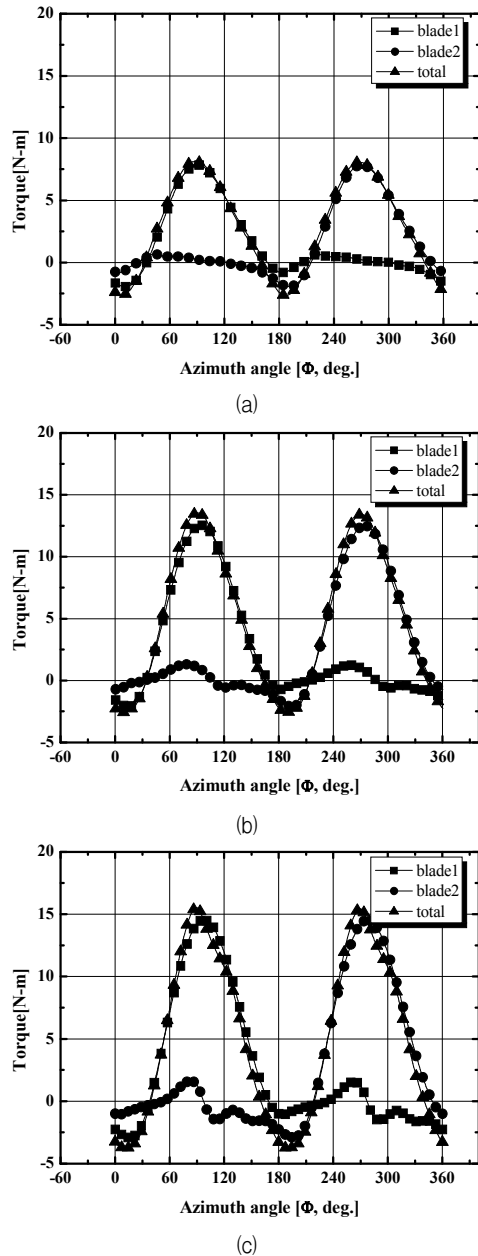


Fig. 5 Torque vs. azimuth angles : (a) $\sigma=0.3$, $TSR=3.1$, (b) $\sigma=0.5$, $TSR=2.7$, and (c) $\sigma=0.7$, $TSR=2.2$

의하여 결정된다. 성능이 우수한 블레이드를 설계하기 위해서는 실제 단위길이 당 토크를 증가하는 설계를 하여야 한다. 그러나 토크가 큰 경우 날개에 접선방향 힘이 증가하게 되나 반대로 막음효과(blockage)와 유동과 날개의 상호작용이 증가하게 되므로 운전회전속도가 낮고 하반구에 유동이 감소하게 됨으로 성능이 떨어지게 되는 어려움이 있다.

솔리디티에 따른 최대 성능점의 토크를 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구의 H-로터는 두 개의 날개로 구성되어 있기 때문에 한 바퀴 회전에 2개의 피크를 보이고 있다. 회전방향 각도는 기준 날개가 12시 위치에 있을 때가 "0°"가 되며 이때 나머지 한 개의 날개는 반대쪽인 180° 위치하게 된다. 해

석의 편의를 위하여 날개가 0~180° 영역에 있을 때는 상반구, 80~360° 180~360도 영역을 하반구라고 정하였다. 솔리디티가 다른 세 경우 모두 상반구에 해당하는 영역에서는 높은 토크 값을 가지는 반면 하반구에서는 거의 “0”의 값을 나타내고 있다. 또한 최대 피크 값은 자유유동과 날개가 서로 직교하는 90° 근방에서 나타나고 있다. H-로터 설계의 복잡성은 상반구에서 토크가 증가하는 경우, 자유유동을 방해(blockage)하게 되어 하반구에서 토크가 감소하게 된다. 반대로 상반구에서의 교란이 적은 경우 충분한 토크를 얻을 수 없어 성능이 감소하게 된다. 날개가 0°와 180°에 놓이게 되면 양력이 발생하여도 작용하는 방향이 원주방향에 가깝기 때문에 회전력이 발생하기 않거나 미미하게 발생하게 된다. 이에 반하여 항력은 접선방향으로 작용하기 때문에 가장 큰 값을 가지게 되며 전체 토크는 음의 값을 가지게 된다. 이 영역에서 날개는 회전 관성력으로 지나가게 된다.

계산을 수행한 모든 경우에 하반구에서 에너지를 거의 얻을 수 없기 때문에 전체 날개에서 얻어지는 토크는 상반구에 놓이는 날개의 토크와 거의 같아지게 된다. 즉 하반구에 놓이는 날개가 회전을 방해하지 않는 곳에서 최대 성능을 얻게 된다. 최대성능 점을 지나서부터 하반구에 놓이는 날개는 상반구의 날개에 의한 막음에 의하여 유속이 급격히 감소하고 이로 인하여 이 구간을 지나는 날개는 주위의 공기속도를 증가시키는 역할을 하게 되며 선풍기와 같이 에너지를 소모하며 주위의 공기를 가속하게 된다. 가장 우수한 성능을 보인 $\sigma=0.5$ 의 경우(Fig. 5(b)), 날개 1개의 토크보다 두 개를 합한 것이 약간 더 큰 값을 가지는 것은 후반부에 놓이는 날개의 토크가 양의 값을 가지기 때문이다. 이는 아직 후반부에서 항력보다는 양력이 더 크며 상반구 날개의 막음효과에도 불구하고 x 방향으로 유동이 있음을 의미한다. 하반구에도 미약하나마 공기는 에너지를 포함하고 있음을 뜻한다. 그러나 $\sigma=0.7$ 의 경우(Fig. 5(c)) 막음효과로 인하여 하반구에 놓이는 날개가 음의 토크를 가지게 되며 전체 날개의 성능은 상반구에 놓이는 날개의 성능보다 약간 낮게 나타남을 알 수 있다. 에너지는 토크와 회전속도에 비례하므로 토크의 증가가 회전속도 감소에 미치지 못하기 때문이다.

$\sigma=0.3$ 의 경우, $\sigma=0.5$ 비하여 상대속도가 더 클 뿐 아니라 교란 성분도 작다. 또 두 경우 모두 같은 익형을 사용하므로 최대 양력계수($C_{l,max}$)는 같으므로 $\sigma=0.3$ 인 경우가 더 높은 성능이 나와야 하나 실제 Fig. 5를 보면 그렇지 못하다. 이러한 원인은 날개로 들어오는 유동의 각도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 설치각($\beta=3^\circ$)으로 인하여 충분한 회전속도에 이르기 전에 최대양력계수에 이르기 때문이다. $TSR=3.59(300\text{ rpm})$ 을 넘어가는 경우 상반구에서의 받음각이 급격히 감소하고 이로 인하여 충분한 양력이 발생하지 못하여 성능이 떨어지게 된다. 그러므로 발전기 설계에 있어서 설치각과 솔리디티는 적절한 조합이 필요하다. 반대로 솔리

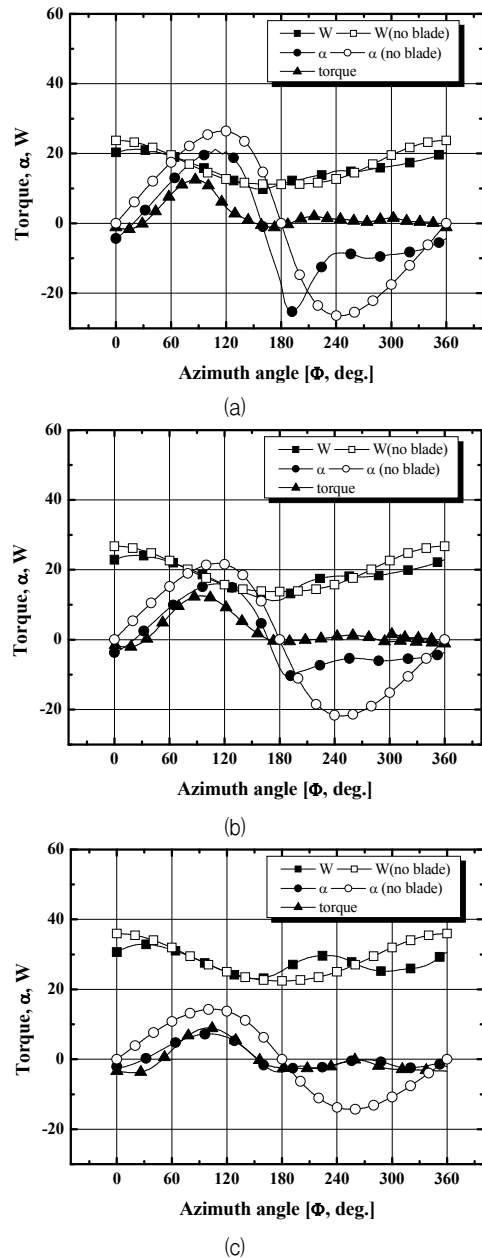


Fig. 6 Relative flow velocity and angle of attack according to TSR ($\sigma=0.5$); (a) $TSR=2.2$, (b) $TSR=2.7$, and (c) $TSR=4$

디티가 큰 경우($\sigma=0.7$), 토크가 더 큼에도 불구하고 더 낮은 성능을 보이는 것은 운전점(TSR)이 낮기 때문에 얻을 수 있는 일의 양은 감소하게 된다. 또한 하반구에서 음의 토크 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 상반구의 막음효과와 날개의 상호작용에 의한 급격한 유동각 0°와 유속의 감소로 인하여 토크가 크데 비하여 충분한 회전속도가 얻어지지 못하기 때문이다.

날개로 들어오는 입사각(α)과 유속(w)은 H-로터의 성능에 가장 중요한 요소들이다. Fig. 6은 날개 1회전동안에 3° 간격으로 블레이드로 입사되는 속도와 받음각을 평균하여 나타내었다.⁽²⁰⁾ 날개가 위치하는 곳에서의 유속은 측정되지

않기 때문에 날개를 중심으로 앞뒤로 3점(9°)을 제외하고 평균을 취하였다. 토크는 평균값이 아니며 날개가 위치했을 때의 계산 값에 해당한다. 그림에서 빈 도형(hollow shape)은 날개에 의한 교란이 없을 경우의 입사각과 유동속도를 나타낸다. Fig. 6은 $\sigma=0.5$ 의 경우로 비교적 날개가 차지하는 공간이 커기 때문에 교란이 없는 유동에 비하여 받음각이 상당히 작아져 있음을 알 수 있다. TSR 이 증가함에 따라 그 차이가 약간씩 증가하고 있다. 이는 회전수가 빨라지면 같은 시간에 날개가 차지하는 공간이 커짐으로 인하여 교란이 증가하기 때문이다. 먼저 Fig. 6(a)의 $TSR=2.2$ 인 경우를 보면 실제 날개로 들어오는 받음각은 $\phi \geq 90$ 영역에서 $\alpha=10^\circ$ 이상으로 상당히 큼을 알 수 있다. 이로 인하여 실속이 생기고 이후에 토크가 급격히 감소하고 있다. 날개가 없는 경우를 보면 최대 받음각이 $\phi=120^\circ$ 근방에서 발생하고 있으며 $\alpha=20^\circ$ 정도의 값을 가진다. $\sigma=0.5$ 의 경우 날개와 TSR 기준으로 $Re=2.9 \times 10^5$ 로 이 영역에서는 동적실속에 의한 실속지연은 거의 없다⁽¹²⁾. 그러므로 $\alpha=10^\circ$ 근방에서 실속이 발생하고 토크가 감소하고 있다. 하반기에서는 상반기의 날개에 의한 막음 효과로 인하여 유속의 감소와 받음각의 큰 변화를 확인할 수 있다. Fig. 6(c)의 $TSR=4$ 에서는 상반기의 전체 영역에 걸쳐 실속이하로 받음각이 상당히 작음을 알 수 있다. 이로 인하여 실속은 발생하지 않으나 충분한 양력을 발생시키지 못하고 토크가 작게 나타남을 알 수 있다. 이에 반하여 전반구에 놓이는 날개의 막음에 의한 영향으로 하반기에서는 큰 속도 감소와 받음각의 감소를 볼 수 있다. 또한 이로 인한 음(-)의 토크도 확인 할 수 있다. 이 영역에서는 전술한바와 같이 에너지를 얻을 수 없으며 선풍기와 같이 주변공기를 가속하는 역할을 하게 된다. Fig. 6에는 표시하지 않았으나 $\sigma=0.3$ 의 경우 솔리디티가 작기 때문에 날개에 의한 교란이 유동교란이 적어 날개가 없는 경우와 날개가 있는 경우가 거의 비슷한 값을 얻을 수 있었다. 반대로 $\sigma=0.7$ 은 유동교란에 의하여 날개가 없는 경우와 있는 경우의 받음각 차이가 매우 컸으며 비교적 상반기에서 막음효과에 의한 유속감소를 확인할 수 있었다.

날개와 유동의 상호작용에 의한 유동 막음효과와 상반기에서의 유동의 각도의 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 7에 $r/R=0.5, 1.0, 1.5$ 위치에서의 속도 벡터를 나타내었다. 이때 날개의 위치는 $\phi=0^\circ$ 로 0° 부근에서 날개에 의한 속도 교란을 볼 수 있다. 모든 경우 하반기에서의 유속은 막음효과로 인하여 감소된 것을 확인 할 수 있다. 또 $r/R < 1$ 영역에서도 속도 변화를 관찰 할 수 있다. Fig. 7(c)는 날개와 유동의 상호작용으로 인하여 상반기에서 y 방향의 유동과 하반기에서 상당히 큰 y 방향의 유동을 관찰 할 수 있다. 또한 실제 에너지를 가지고 있는 x 방향 유동은 거의 없음을 알 수 있다. $r/R < 1$ 에서는 거의 유동이 존재하지 않으며 이는 상반기의 날개에 의하여 거의 모든 운동에너지가 회전에너지로 변환

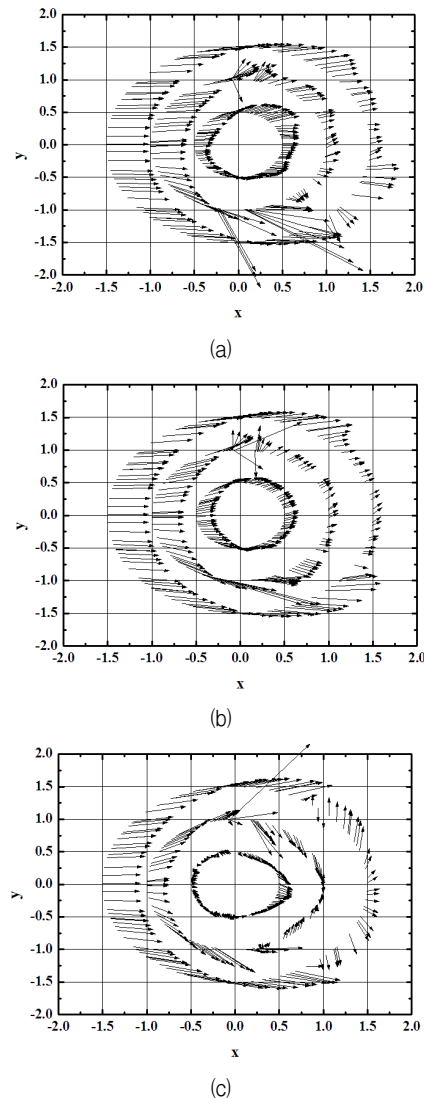


Fig. 5 Torque vs. azimuth angles : (a) $\sigma=0.3, TSR=3.1$, (b) $\sigma=0.5, TSR=2.7$, and (c) $\sigma=0.7, TSR=2.2$

되고 마치 벽과 같이 하류로 흘러가는 유동을 막고 있음을 나타낸다.

날개를 포함한 주변영역의 유동속도와 와도를 Fig. 8와 9에 각각 나타내었다. $TSR=1.8$ 에서는 날개와 유동속도의 차이가 상대적으로 작기 때문에 매끈하게 빠져나가지 못하고 있으며 막음효과가 비교적 적어 회전반경내에도 공기의 유입이 있음을 알 수 있다. 이에 반해 $TSR=2.7$ 과 4에서는 막음효과에 의하여 하류의 유동이 감소하며 하류로 흘러나가는 각도도 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 8(c) ($TSR=4$)에서 가로방향(x)으로 유동이 거의 없는 공간이 있으며 이러한 공간은 날개의 위치와 관계없이 항상 같은 위치에 존재하고 있다. 이러한 현상에 대하여는 명확한 원인이 알 수 없으며 향후 추가적인 연구가 필요한 것으로 여겨진다. 와도를 나타낸 Fig. 9에서도 속도성분과 비슷한 경향들을 보이고 있다. 회전반경내에 있는 날개에서는 양(+)의 와가 발생하고

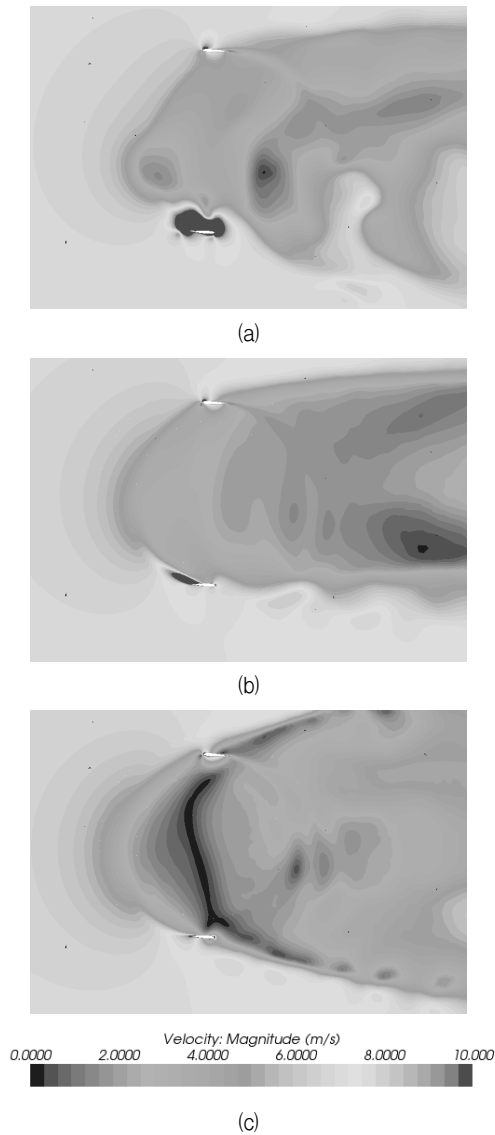


Fig. 8 Velocity distributions at (a) $TSR=1.8$, (b) $TSR=2.7$, and (c) $TSR=4$

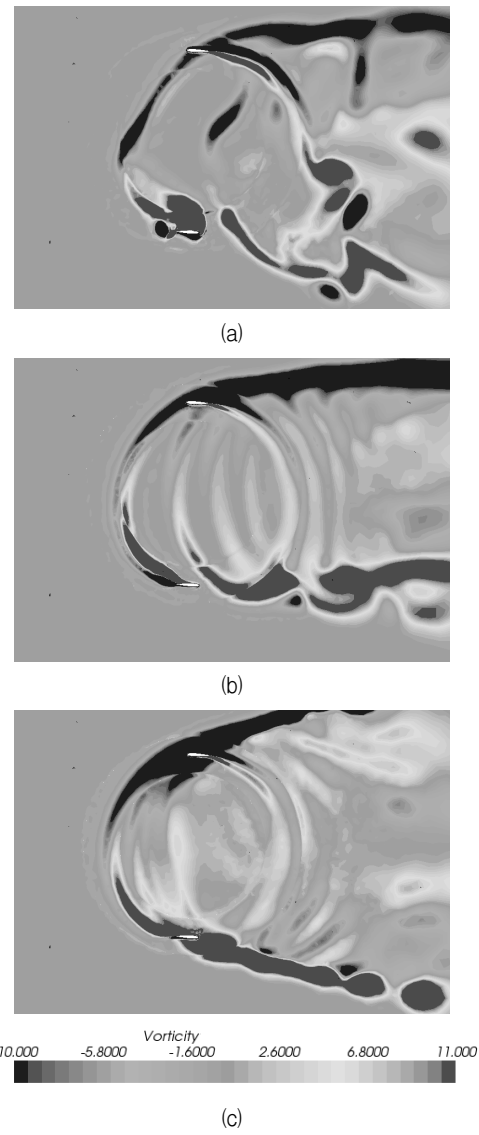


Fig. 9 Vorticity distributions at (a) $TSR=1.8$, (b) $TSR=2.7$, and (c) $TSR=4$

있으며 밖의 날개에서는 음(-)의 와가 발생하고 있다. $-90 \leq \phi \leq 90$ 영역에서는 음의 와가 강한 영향을 나타내고 있으며 $90 \leq \phi \leq -90$ 에서는 양의 와가 강하게 나타나고 있다. 또한 회전반경 내부를 보게 되면($TSR=2.7$) 상반구에 가까운 영역에서는 와가 하류로 빠르게 이동하고 있으나 하반구에서는 점점 느려지고 있다. $TSR=4$ 에서는 내부에서 유속이 매우 느리며 Fig. 8(c)에서 보듯이 거의 “0”인 영역이 있으므로 이 영역이후에는 와의 형상도 거의 없음을 알 수 있다.

6. 결 론

대칭형 익형(NACA0012)을 가지며 시위의 길이가 다른 H-로터($\sigma=0.3, 0.5, 0.7$)에 대한 3차원 비정상 해석을 통하여 성능 및 공기역학적인 특성에 관하여 고찰하였다. 날개의

설치각은 3° 로 모두 같으며, $\sigma=0.5$, $TSR=2.7$ 에서 최고성능($C_p=23\%$)을 나타내었다. 상반구에서 H-로터의 공기역학적인 특성은 주로 날개로 들어오는 공기의 받음각과 유속으로 설명이 가능하였다. 그러나 하반구에서 교란되지 않은 이상적인 유동과는 상당한 차이를 보였으며 최고성능점에서 조차 날개에 의한 양력이 발생하지 않았다. 또 $TSR=2.2$ 의 경우 실속이 발생하였음에도 불구하고 $TSR=2.7$ (최고성능점)과 거의 같은 토크분포를 보였다. 이는 $\phi=90^\circ$ 근방에서 받음각이 최대이면서 실속이 발생하지 않으며 양력이 최대가 될 때 최고성능점이 됨을 나타낸다. 이때 토크와 회전수가 최대인 점이 된다. 즉 H-로터로부터 최대의 에너지를 얻을 수 있다. $TSR=4.0$ 로 최고성능점보다 높은 회전을 갖는 경우, 하반구에서 날개로 입사되는 공기의 유동각도는 거의 0° 가 되었으며 유속은 일정한 값을 나타내었다. 이러한 현상은

발전기의 날개가 운동에너지를 잃은 공기를 선풍기와 오히려 운동에너지를 공급하여 함께 회전하고 있음을 나타낸다. 이로 인하여 하반구에서 토크는 음의 값을 나타내었으며 에너지를 얻는 대신 오히려 공급하게 된다. 이러한 상반구와 하반구에서 상이한 공기역학적인 특성은 기존의 곡선형 다리우스 수직축 풍력발전기와는 다른 특성을 나타내며 BEM과 같은 설계기술을 이용하여 H-로터를 설계하는데 한계를 나타내는 원인이 된다.

상반구에서 유동각도의 변화는 날개와 날개간의 상호작용과 날개와 유동과의 상호작용으로 날개에 업와시(up-wash)와 다운와시(down-wash)로 설명이 가능할 것으로 여겨지나 CFD의 특성상 명확하게 구분이 어렵다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요하며 이를 통하여 정량적 성능예측이 가능할 것으로 예상된다.

References

- (1) Savonius, S. J., 1931, "The S-Rotor and Its Applications," *Mech. Eng.*, Vol. 53, No. 5 pp. 333~338.
- (2) Darrieus, G. J. M., 1931, "Turbine Having Its Rotating Shaft Transverse to the Flow of the Current," US Patent No.1835081.
- (3) Blackwell, B. F., 1974, "The Vertical Axis Wind Turbine How It Works," SANDIA, SLA-74-0160.
- (4) Blackwell, B. F., Sheldahl R. E., and Feltz, L. V., 1976, "Wind Tunnel Performance Data for the Darrieus Wind Turbine with NACA0012 Blades," SANDIA, SAND76-0130.
- (5) Carne, T. G., 1980, "Guy Cable Design and Damping for Vertical Axis Wind Turbines," SANDIA, SAND80-2669.
- (6) Oler, J. W., Strickland, J. H., Im, B. J., and Graham, G. H., 1983, "Dynamic Stall Regulation of the Darrieus Turbine," SANDIA, SAND83-7029.
- (7) Sheldahl, R. E., Klimas, P. C., and Feltz, L. V., 1980, "Aerodynamic Performance of a 5-meter Diameter Darrieus Turbine with Extruded Aluminum NACA-0015 blades," SANDIA, SAND80-0179.
- (8) Reuter, R. C. Jr, 1977, "Vertical Axis Wind Turbine Tie-down Design with an Example," SANDIA, SAND77-1919.
- (9) Klimas, P. C. and Sheldahl, R. E., 1978, "Four Aerodynamic Prediction Schemes for Vertical-Axis wind Turbines: a Compendium," SANDIA, SAND78-0014.
- (10) Ashwill, T. D. and Loenard, T. M., 1986, "Developments in Blade Shaped Design for a Darrieus Vertical Axis Wind Turbine," SANDIA, DAND86-1085
- (11) Klimas, P. C., 1984, "Tailored Airfoils for Vertical Axis Wind Turbines," SANDIA, SAND84-1062
- (12) Sheldahl, R. E. and Klimas, P. C., 1980, "Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbine," SANDIA, SAND80-2114.
- (13) Popelka, D., 1982, "Aeroelastic Stability Analysis of a Darrieus Wind Turbine," SANDIA, SAND82-0672.
- (14) Reuter, R. C., Jr. and Worstell, M. H., 1978, "Torque Ripple in a Vertical Axis Wind Turbine," SANDIA, SAND78-0577.
- (15) Carne, T. G., Lobitz, D. W., Nord, A. R., and Watson, R. A., 1982, "Finite Element Analysis and Modal Testing of a Rotating Wing Turbine," SANDIA, SAND82-0345.
- (16) Islam, M., Ting, D. S. K., and Fartaj, A., 2008, "Aerodynamic Models for Darrieus-Type Straight-Blade Vertical Axis Wind Turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 4, pp. 1087~1109.
- (17) Lee, J. H. and Yoo, Y. S., 2011, "Aerodynamic Characteristics of Giromill with High Solidity," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 35, No. 12. pp. 1273~1283.
- (18) Yoo, N. S., 1992, "A Study of the Performance Prediction of the Darrieus Wind Turbine," *Transaction of JSAS*, Vol. 20, No. 1, pp. 80~94.
- (19) Mohamed, M. H., 2012, "Performance Investigation of H-rotor Darrieus Turbine with New Airfoil Shapes," *Energy*, Vol. 47, No. 1, pp. 522~530.
- (20) Castelli, M. R., Englaro, A., Ernesto, B., 2011, "The Darrieus Wind Turbine: Proposal for a New Performance Prediction Model Based on CFD," *Energy*, Vol. 36, No. 8, pp. 4919~4934.
- (21) Jeong, H. G., Lee, S. H., and Kwon, S. D., 2014, "Effect of Blockage Ratio on Wind Tunnel Testing of Small Vertical-axis Wind Turbines," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 34, No. 3. pp. 98~106.
- (22) 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.
- (23) Jeong, J. H., Kang, K. W., Kim, B. S., and Lee, J. H., 2011, "Effect of Geometric Variation on Starting Characteristic Analysis of H-Darrieus Blades," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 14, No. 3, pp. 45~49.
- (24) STAR-CCM+, 2006, Methodology, CD-adapco.
- (25) Howell, R., Qin, N., Edwards, J., and Durrani, N., 2010, "Wind Tunnel and Numerical Study of a Small Vertical Axis Wind Turbine," *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 412~422.
- (26) Joo, S., Choi, H., and Lee, J., 2015, "Aerodynamic Characteristics of Two-bladed H-Darrieus at Various Solidities and Rotating Speeds," *Energy*, Vol. 90, pp. 439~451.