

높은 솔리디티를 갖는 자이로밀의 공기역학적 특성

이 주 희^{*†} · 유 영 소^{**}

* 호서대학교 메카트로닉스공학과, ** 한양대학교 대학원 기계공학과

Aerodynamic Characteristics of Giromill with High Solidity

Juhee Lee ^{*†} and Young So Yoo ^{**}

* Dept. of Mechatronics Engineering, Hoseo Univ.,
**Graduate School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received February 25, 2011; Revised September 13, 2011; Accepted September 27, 2011)

Key Words : Symmetric Airfoil(대칭익형), Vertical Axis Wind Turbine(수직축풍력발전기), Giromill(자이로밀), Aerodynamic Characteristics(공기역학적 특성), CFD(전산유체역학), High Solidity(높은 솔리디티),

초록: 3 차원 비정상유동해석을 통하여 자이로밀의 공기역학적 특성을 고찰하였다. 일반적으로 소형자이로밀은 구조가 간단하고 솔리디티가 높아 제작이 쉽고 자구동(self-starting)이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 *TSR* (tip speed ratio)가 4~7 인 다리우스풍력발전기와 다르게 1~3 정도로 매우 낮다. 본 연구에 사용한 자이로밀은 일정한 단면을 가진 3 개의 직선날개로 구성되어 있으며 솔리디티는 0.75 이다. 솔리디티가 매우 낮은 다리우스풍력발전기와 다르게 자이로밀은 *TSR* 이 증가함에 따라 날개 상호간의 간섭과 하류에 위치하는 날개로 유입되는 유동속도의 급격한 감소로 인하여 양력이 감소하고 날개의 회전속도에 의하여 주변의 공기가 가속되면서 항력의 증가로 성능이 저하되었다. 이로 인하여 *TSR* 이 2.4 에서 최고의 성능을 나타내며 이후로 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다.

Abstract: A 3-dimensional unsteady numerical analysis has been performed to evaluate the aerodynamic characteristics of a Giromill. Generally, the structure of a Giromill is simple and therefore easy to develop. In addition, the high solidity of the Gironmill helps improve the self-starting capacity at a low tip speed ratio (*TSR*). However, contrary to the Darrieus wind turbine which has a *TSR* of 4–7, a Giromill has a low *TSR* of 1–3. In this study, the aerodynamic characteristics of the Giromill are investigated using computational fluid dynamics (CFD). Three straight-bladed wings are used, and the solidity of the Giromill is 0.75. In contrast to a Darrieus wind turbine having low solidity, the Giromill shows a sudden decrease in the aerodynamic performance because of the interference between the wings and an increase in the drag on the wings in the downstream direction where wind flow is significantly reduced. Consequently, the aerodynamic performance decreased at a *TSR* value lower than 2.4.

- 기호설명 -

Re	: 레이놀즈수 ($\rho u C / \mu$)	r	: 날개회전반경 (m)
<i>TSR</i>	: 끝단속도비 ($r\omega / u$)	u	: 바람속도
C	: 코드길이 (m)	ρ	: 밀도 (kg / m^3)
L	: 양력 (N)	σ	: 솔리디티 (nc / r)
D	: 항력 (N)	ϕ	: 방위각 (Deg.)
C_p	: 동력계수 ($P / \rho u^3 Hr$)	θ	: 받음각 (Deg.)
H	: 날개길이 (m)	ω	: 회전속도 (rad / sec)
n	: 날개수	μ	: 점성계수 ($N - s / m^2$)
P	: 동력 (W)		

1. 서론

풍력발전기는 무한히 재생가능한 바람 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 청정 에너지 변환장치

† Corresponding Author, juheelee@hoseo.edu
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

이다. 날개의 회전방향이 바람 방향에 수직한 수직축풍력발전기(vertical axis wind turbine)는 주로 항력을 이용하는 사보니우스(Savonius)⁽¹⁾형, 양력을 이용하는 다리우스(Darrieus)⁽²⁾형, 다리우스형과 같이 양력을 주로 이용하지만 유한길이의 날개가 직선으로 구성된 자이로밀(giromill)로 나누어진다.⁽³⁾

수직축 풍력발전기는 축대칭적인 구조를 가지고 있으므로 잦은 풍향과 풍속 변화에도 안정적으로 발전이 가능하여 국내외적으로 많은 관심을 가지고 있다. 특히 다리우스풍력발전기는 미국의 SANDIA 연구소에서 70 년대와 80 년대에 일반적인 특성,⁽⁴⁾ 실험적연구,⁽⁵⁻⁸⁾ 설계를 위한 성능예측,⁽⁹⁻¹²⁾ 실증,⁽¹³⁾ 구조해석⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 등 다양한 분야에 연구가 이루어졌다.

다리우스풍력발전기는 수평축풍력발전기에 비하여 바람의 방향에 영향을 받지 않고 기어와 같은 장치를 사용하지 않으며 발전기가 지면 가까이 있어 유지보수에 유리하며 제작비가 적다는 장점을 가지고 있다. TSR 이 2~3 에서 성능이 낮은 주요 원인은 유동과 익형의 상대적인 각도가 방위각(azimuth angle)에 따라 매우 커져 실속(dynamic stall)이 발생하고 이로 인하여 양항비가 급격히 감소하며 성능이 떨어지게 된다. 그러므로 날개에 작용하는 토크가 음(-)을 가질 수 있으며 이로 인하여 자구동(self-starting)이 불가능한 경우가 있다. 반대로 TSR 이 높은(TSR >7) 경우에는 상대 받음각이 감소하게 됨으로 실속은 발생하지 않으나 받음각이 줄어들므로 인하여 양력이 감소하고 이로 인하여 양항비가 나빠지게 되어 성능이 감소하게 된다.⁽⁴⁾

국내에서는 다리우스풍력발전기의 설계를 위한 성능예측에 관한 연구가 주로 이루어졌다. Yoo⁽¹⁷⁾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 솔리디티(σ)는 약 0.2 이며 같은 면적비일 경우 날개의 개수가 많을수록 성능이 저하한다고 하였다. 또 Park 등⁽¹⁸⁾은 사보니우스풍력발전기(항력식)에 입구안내익(Inlet guide vane)과 측후면 안내익(side guide vane)을 장착함으로써 성능을 기존의 다리우스형의 성능($C_p=0.4$)으로 끌어 올리는 연구를 수행하였다. 이를 통하여 입구 안내익 통과 후 로터로 들어가는 유동의 최적각도는

15~20 도 라고 하였으며 최적의 입출구 면적비는 0.45~0.55 라고 하였다. 그러나 입구와 출구의 안내익은 바람의 방향에 따라 적절히 그 방향을 바꾸기 위한 장치를 필요로 함으로 여전히 추가적인 연구가 필요하다. Jung 등^(19,20)은 대칭형 익형과 날개 단면의 한쪽 면을 제거하여 최대두께 이후에는 한 쪽 면만을 가진 익형의 기동 특성에 관하여 연구를 수행하였다. 그러나 이 연구에서는 날개 주변의 유동영역의 압력과 속도만을 도시하였을 뿐 명확한 물리적인 의미들을 도출 하지 못하였다.

자이로밀은 날개가 직선형(straight bladed)으로 되어 있어 제작하기 쉬워 경제적이기 때문에 몇몇 회사에서 상업적으로 생산하고 있지만 국내뿐 아니라 국외에서도 체계적인 연구가 이루어지고 있지 않은 실정이다.⁽³⁾ 최근 Islam 등⁽³⁾은 여러 가지 형태의 수직축풍력발전기(VAWT)에 관하여 소개하였다. 또한 이들을 해석하기 위한 여러 모델들을 정리하였으며 이들 수직축풍력발전기 중 기존의 다리우스형과는 다르게 날개를 제작하기 쉽게 직선형으로 만든 날개를 가진 발전기를 특히 “straight-bladed Darrieus-type VAWT” 라고 했으며 이들의 설계를 위한 성능평가를 할 수 있는 모델들 중 이중/다중 유선모델(double-multiple streamtube model)이 가장 일반적으로 사용되고 있으며 vortex model 과 cascade model 이 그 다음으로 많이 사용되고 있다고 하였다.

Wahl⁽²¹⁾은 Amundsen-Scott 남극기지에 설치할 23 kW 의 자이로밀을 설계, 제작, 실증적 연구를 수행하였다. 남극기지의 풍속은 4~5 m/s 가 전체 바람의 40%정도를 차지하며 최고 24.6 m/s 의 바람이 불었다. 설계변수로는 솔리디티, TSR , 가로세로비(aspect ratio), 코드비(chord to radius ratio)를 고려하였으며 매개변수법(parametric study)을 이용하여 각 설계요소를 최적화 하였다. 최종적으로 솔리디티는 0.27, 코드길이는 0.45 m 인 대칭형익형(NACA0018)을 선정하였다. NACA0012 가 NACA0018 에 비하여 약간 우수한 성능을 보였으나 구조적인 안정성을 고려하여 NACA0018 을 선택하였다. Amundsen-Scott 남극기지의 풍력발전기는 지붕에 설치하게 됨으로 구조적해석을 수행하였으며 구조적 안정성을 높이기 위하여 서포트 암(support arms)을 설치하는 대신 타워의 높이를 줄여 tipping 모멘트를 줄였다. 그 외 온도와 눈의 영향을 고려하여 설계를 하였다. 이를 통하여 설계된 자이로밀을 설치하여 평균 5 kW 의 전기를 얻을 수 있었다.

기존의 다리우스풍력발전기에 관한 연구는 TSR 이 낮은 영역($2 < TSR < 3$)에서의 실속과 발전 영역($4 < TSR < 7$)에서의 공기역학적 특성과 설계를 위한 성능모델링이 주를 이루어지고 있다. 그러나 자이로밀은 다리우스풍력발전기와 같이 양력에 의해 구동되지만 솔리디티가 높아 주로 낮은 TSR (1~3) 영역에서 운전됨으로 기존 다리우스풍력발전기에서 얻은 결과를 적용하기 어려우며 단순한 모양에 비하여 복잡한 유동을 가지고 있어 이에 대한 공기역학적 연구가 절실하다. 본 연구에서 대상으로 하는 자이로밀은 3 개의 단면이 일정한 직선형 날개로 구성되어 있으며 날개와 날개 간의 간격이 멀어 MRF(Multiple Rotating Frame)방법으로 적절한 해를 얻을 수 없기 때문에 회전영역의 격자를 직접 움직이는 비정상 이동격자 방법(unsteady moving grid method)을 사용하였다.

이 연구에서 대상으로한 모델은 3 개의 대칭형 익형(NACA0012)을 가진 자이로밀로 3 차원 비정상 해석을 통하여 공기역학적 특성을 고찰하였다. 비교적 솔리디티가 큰 자이로밀은 저속에서 기동할 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면 회전속도 (TSR)가 증가함에 따라 날개 상호 간의 간섭 증가와 하류에 위치하는 날개로 유입되는 유동속도의 급격한 감소로 인하여 양력이 감소하고 날개의 회전속도에 의하여 주변의 공기가 가속되면서 항력의 증가로 성능이 저하되었다. 이로 인하여 주로 양력에 의한 회전력을 얻음에도 다리우스형의 수직축 풍력발전기와 다르게 비교적 낮은 회전속도인 $TSR = 2.4$ 에서 최고의 성능을 나타내며 이후로 급격히 감소하는 공기역학적 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

2. 지배방정식과 해석모델검증

2.1 지배방정식

날개 주위유동의 비정상상태유동을 지배하는 보존방정식을 텐서 형태로 나타내면 다음과 같다.

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

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

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 가정하였으

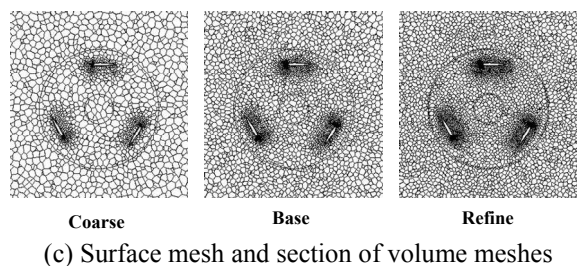
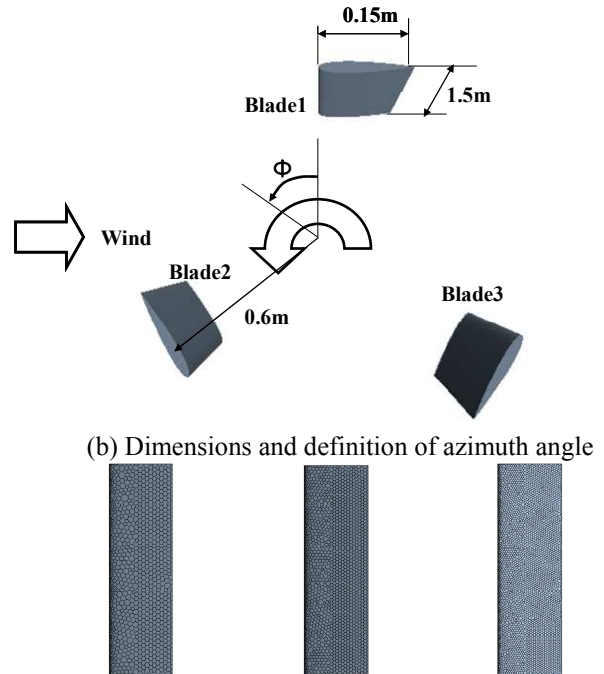
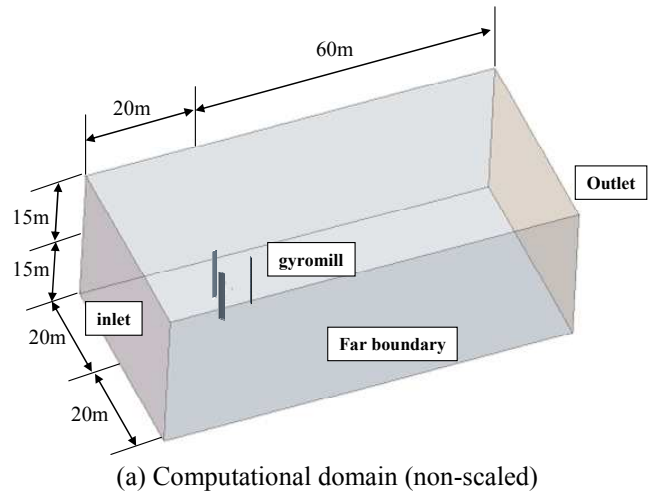


Fig. 1 Computational domain and specification of gyromill

며 유동해석은 상용소프트웨어인 STAR-CCM+(22)를 사용하였다. 난류모델은 realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.2 계산영역과 날개의 구성

발전기의 형상은 Fig.1 에 보듯이 직선날개를

Table 1 Computational conditions

Item	values	unit	note
chord	0.15	m	
vin	7	m/s	wind speed
height	1.5	m	
radius	0.6	m	
solidity	0.75		
aspect ratio	10		
pitch angle	5	deg.	
Re	68950		chord

Table 2 Grid dependency

	Mesh		
	Coarse	Base	Refine
No. of mesh	204000	440000	855000
Comp time[h]	30	67	150
Torque	0.43	1.337	1.568
Relative Err	71.10%	15%	

가진 양력식의 자이로밀로 정격출력이 250 W 급의 소형풍력발전기이다. 날개 시위(chord)는 0.15 m 이며 날개길이(span)은 1.5 m 이다. 날개 수는 3 개며 회전반경은 0.6 m 로 되어 있다. 풍속은 7 m/s 로 입구에서 일정하게 불어오는것으로 가정하였다. 계산을 위한 조건은 Table 1 에 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 13 배, 40 배 확장하였다. 그 외의 영역에서는 약 10 배 이상 확장하였고 상호 간섭이 없다고 생각하여 미끄럼 경계(slip boundary)를 사용하였다. 입구에서는 일정한 속도로 바람이 불어 온다고 가정하여 균일한 속도분포를 주었으며 출구에서는 압력경계(pressure boundary condition)를 주었다. 계산에 사용한 격자의 총 수는 약 44 만개를 사용했으며 날개 주위의 경계층 영역을 잘 모사하기 위하여 날개 주변에 4 개의 층격자를 사용했다. 격자중속성을 확인하기 위하여 20 만, 44 만, 85 만개의 격자에 대하여 연산을 수행하였으며 그 결과는 Table 2 에 나타내었다.

날개위의 표면격자와 날개주위의 격자를 Fig. 1(c)에 나타내었다. 격자주위의 유동을 잘모사하기 위하여 층격자뿐 아니라 격자의 밀도를 집중시켰다. 계산 시간은 각각 약 30 시 간, 67 시 간, 150 시 간이 걸렸으며 이 때 얻어진 토크는 약 0.43, 1.3, 1.6 이 었다. Fig. 2 는 날개 1 개에서의 토크를 방위각에 따라 표시한 것이다. 44 만개의 격자에서 얻어진

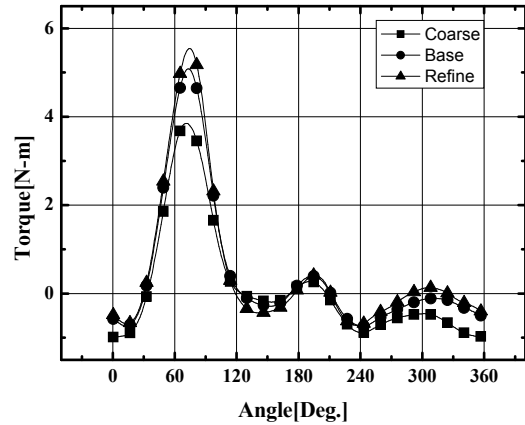


Fig. 2 mesh dependency test

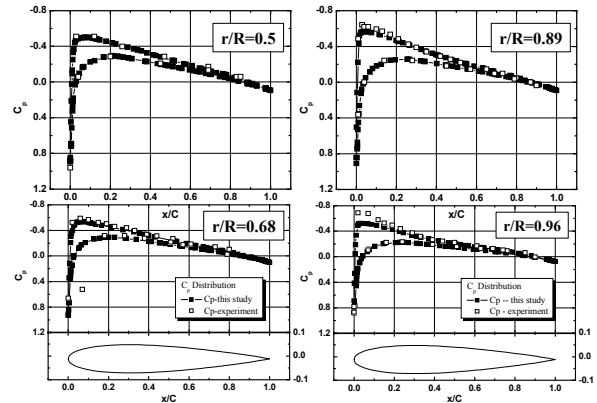


Fig. 3 Pressure coefficient on the wing surface

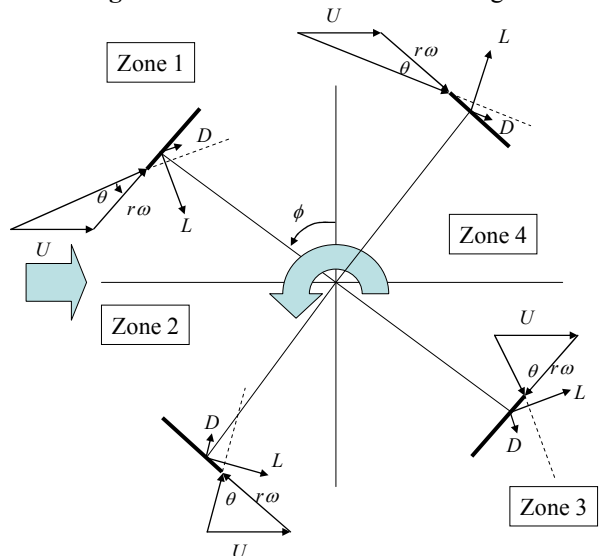


Fig. 4 Relative angle of attack and forces on the wing surface

토크와 85 만개의 격자에서 얻어진 토크의 전체적인 경향이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 계산의 경제성을 고려하여 44 만개의 격자를

이용하여 모든 계산을 수행하였다.

2.3 해석모델 검증

본 연구에서 사용한 수치해법의 적절성을 검증하기 위하여 한쌍의 회전하는 3 차원 날개에 관하여 실험⁽²³⁾과 비교하였다. NACA0012 의 단면을 갖 있으며 뒤틀어지지 않고 단면이 일정한 날개에 관하여 실험을 수행하였다. 대상으로하는 날개의 회전수는 650rpm 이며 날개 끝단에서의 마하수 (mach)는 0.22 로 전영역에 걸쳐 공기에 의한 압축성효과는 무시할 수 있는 비압축성 비정상 유동이다. 해석모델도 실험과 같은 크기를 가지고 있으며 회전축은 계산의 편의를 위하여 계산 영역에 포함시키지 않았다. 본 연구의 자이로밀과 같이 솔리디티가 낮으므로 이동격자(moving grid)방법을 이용하여 계산을 수행하였다.

실험은 날개 반경의 50~96%영역 내에서 압력을 측정하였으며 같은 지점에서 수치해석에서 얻어진 결과와 비교하였다. Fig. 3 에 보듯이 날개의 끝단 (wing tip)을 제외한 영역에서 압력분포가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 이동격자방법과 같은 수치모델을 자이로밀에 적용하였다.

3. 결과 및 분석

자이로밀은 다리우스풍력발전기와 같이 양력에 의해 구동되지만 솔리디티가 높아 TSR 이 비교적 낮은(1.5~2.5) 영역에서 구동되며, 이로 인하여 날개로 유입되는 상대반음각이 크며 다른 한편 상류 날개의 유동교란이 하류에 있는 날개에 영향을 미치게 되어 성능이 떨어지게 된다. TSR 은 날개 끝단 속도($r\omega$)와 자유속도(freestream, u)의 비로 성능에 중요한 역할을 한다. 같은 출력을 내는 경우 TSR 이 큰 경우가 손실이 적다. 즉 토크가 작고 회전속도가 빠른 경우 효율이 더 높게 된다. 그러므로 이 연구에서는 TSR 을 바꾸어가며 자이로밀의 공기역학적 특성을 분석하였다. 방위각(ϕ)은 바람이 Fig. 1 과 같이 날개의 왼쪽에서 불어 올 때 12 시 방향을 기준으로 반시계방향으로 증가한다. 3 개의 날개는 Fig. 1 과 같을 때 12 시방향에 있는 날개를 1 번 그 다음 120 도 방향과 240 도 방향에 있는 날개를 각각 2 번, 3 번으로 하였다.

3.1 자이로밀의 특성과 성능

자이로밀의 성능은 주로 날개에 작용하는 양력과 항력에 의해 결정된다. Fig. 4 는 방위각에 따라

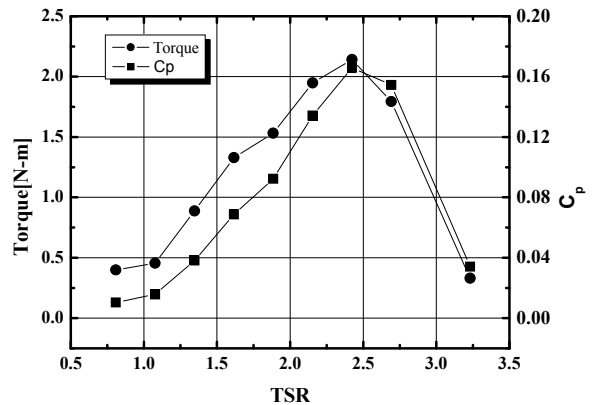


Fig. 5 Torque and power coefficient

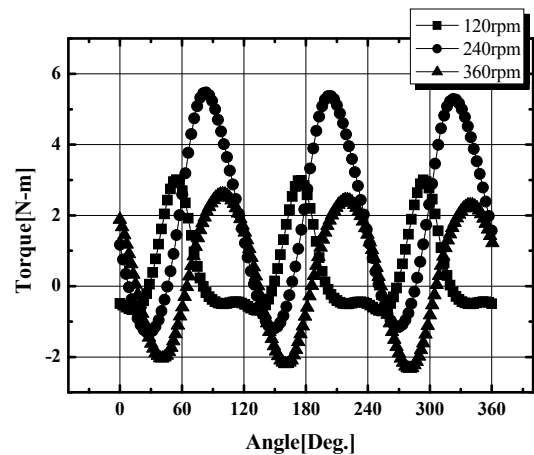


Fig. 6 Comparison of torque with respect to RPM

날개에 유입되는 상대 속도와 이 때 날개에 작용하는 양력과 항력을 나타내고 있다. 일반적으로 솔리디티가 큰 자이로밀은 날개간의 상호 간섭과 상류날개의 막힘(blockage)에 의하여 실제 날개로 유입되는 바람의 방향은 일정하지 않고 급격하게 변화하게 되나 상대 반음각의 영향을 알아 보기 위하여 바람은 Fig. 4 에서와 같이 모든 방위각에서 수평으로 일정하게 들어온다고 가정하였다.

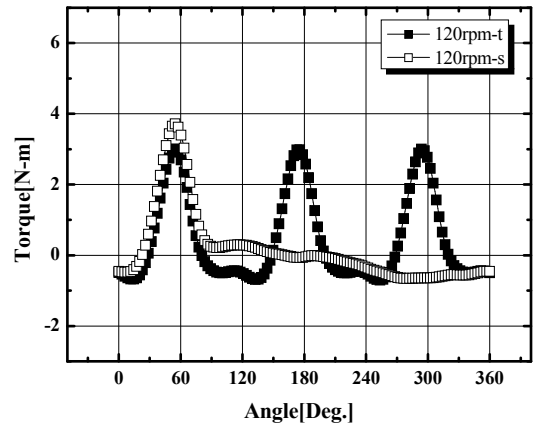
Fig. 4 에서 보듯이 모든 영역에서 양력에 의해서 양(+)의 토크를 가지며 항력에 의해서는 음(-)의 토크를 가지게 된다. 그러므로 양항비가 큰 익형일수록 우수한 성능을 가진다는 것을 알 수 있다.⁽⁴⁾ 또 zone 1, 2 에서는 바람의 상대 유입각도가 회전면에 대하여 바깥면에서 내부로 불어오는 반면 zone 3, zone4 에서는 안에서 밖으로 작용하는 것을 알 수 있다. 또 입사각도(θ)는 zone 1 과 4, zone 2 와 3 이 서로 비슷한 성향을 보이고 있음을 알 수 있다. 여기서 유의할점은 zone 1, 2 는 유동의 상류

에 놓이게 되며 zone 3, 4는 유동의 하류에 놓이게 된다. 그러므로 TSR이 높은 경우 상류에 놓이게 되는 zone 1과 2에서는 Fig. 4에 보는 것과 비슷한 속도성분을 가지겠지만 zone 3, 4에서는 상류에 놓이는 날개의 영향으로 이와 상당히 다른 유동특성을 가지게 된다. 이러한 zone 3, 4로 인하여 다리우스형의 수직축 풍력발전기보다 자이로밀은 낮은 성능을 가지게 되는 중요한 원인이 된다.

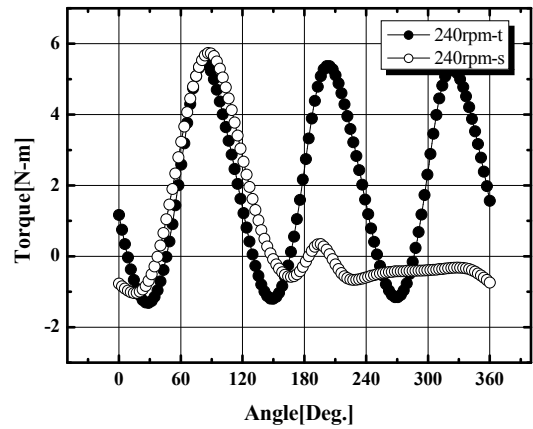
자이로밀의 성능을 확인하기 위하여 날개의 회전속도에 따른 C_p 와 토크를 Fig. 5에 나타내었다.

일반적으로 풍력발전기의 정격출력은 풍속이 11 m/s 에서 일반적으로 이루어지나⁽²⁴⁻²⁶⁾ 본 연구에서는 낮은 한국의 바람환경을 고려하여 이 보다 낮은 영역에서의 공기역학적 특성을 파악하기 위하여 7 m/s 에서 연구를 수행하였다. 효율(C_p , 날개의 공력에너지에 대한 발전기투영면적($H2r$)으로 들어오는 바람에너지($0.5\rho v^3$)의 비)은 $TSR=2.4$ 에서 최대로 약 17%였으며 이때 토크는 $2.14\text{ N}\cdot\text{m}$ 였다. 일반적으로 바람의 속도가 빨라지게 되면 레이놀즈수(Re)가 증가하게 됨으로 성능이 좋아지는 경향⁽²⁷⁾을 가지고 있으므로 실제 정격성능은 이보다 높을 것으로 생각된다. 또 TSR이 2.4보다 낮은 영역에서 C_p 는 TSR에 따라 완만하게 증가하고 있으며 2.4 이후에는 급격히 감소하고 있다. TSR이 3을 넘어가면서는 회전력이 거의 “0”이 되며 실제 에너지를 얻을 수 없는 상태가 된다. 최대 전력을 얻기 위한 운전점은 $TSR=2.4$ 가 되며 이때 날개의 회전수는 270 rpm 이 된다.

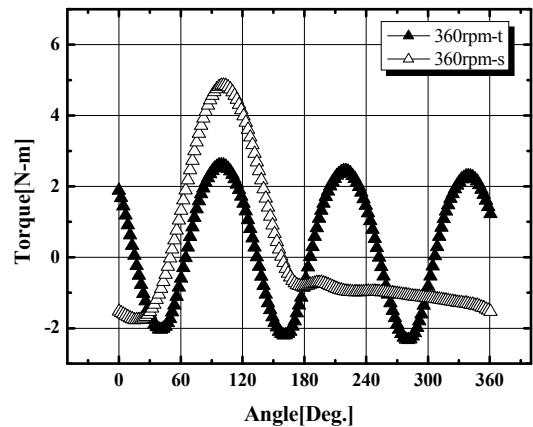
TSR에 따른 발전기의 공기역학적 특성을 파악하기 위하여 Fig. 6과 같이 일정한 간격(120rpm)으로 떨어진 3가지 회전속도(120, 240, 360)에 대한 토크를 각 날개의 방위각(ϕ)에 따라 나타내었다. 이 연구에서 그림으로 나타내지는 않았으나 가장 높은 성능을 보인 $TSR=2.4$ 과 $TSR=2.1$ 은 비슷한 특성을 보였으며 일정한 회전수간격으로 비교하기 위하여 $TSR=2.4$ 대신 $TSR=2.1$ 을 선택하였다. 이때 각 회전속도에 대한 TSR은 1.1, 2.1, 3.2에 해당한다. 발전기는 3개의 날개로 구성됨으로 1회전에 3개의 피크(peak)가 나타나고 있다. $TSR=2.1$, 3.2의 경우에는 사인함수와 같이 주기적인 형태를 나타내고 있으나 $TSR=1.1$ 인 경우는 다른 형태를 보이고 있다. 이는 $TSR=1.1$ 의 경우 날개와 회전 방향이 나란한 180도 근방에서는 날개에 대한 바람의 상대 속도가 거의 “0”이므로 날개로 입사되는 바람의 상대 속도는 거의 없는 상태가 된다.



(a) $TSR=1.1$



(b) $TSR=2.1$



(c) $TSR=3.2$

Fig. 7 Comparison of torque; filled symbol for entire blade and line for single blade

그리고 이 보다 작은 방위각($90 < \phi < 180$)에서도 바람과 나란히 날개가 회전하게 됨으로 날개로 입사되는 바람의 상대 속도는 거의 없거나 오히려 날개의 후연으로 들어오게 된다. 이러한 특성으로

인하여 Fig. 6 에 보는 것과 같이 $\phi=90$ 이후에서는 토크가 급격히 감소하며 위치에 따라서는 오히려 음(-)의 값을 나타내게 된다. 또 이 영역에서는 날개로 유입되는 각도가 급격히 증가하고 이로 인하여 실속이 발생하기 때문이다. 그러나 $TSR=2.1, 3.2$ 의 경우에는 모든 영역에서 바람보다 회전속도가 빠름으로 날개의 전연을 통하여 유동이 날개로 유입되게 된다. 그러므로 $TSR=2.1, 3.2$ 에서는 주기적인 사인파(sine wave)의 모양을 나타내고 있다. 가장 이상적인 경우에는 바람의 상대속도는 실속(stall)보다 작은 값을 가지며 이 경우 모든 영역에서 토크가 양의 값을 가지게 된다. 그러나 앞뒤날개의 상호 간섭, 상류에 존재하는 날개에 의한 교란, 날개의 막힘(blockage)으로 인하여 zone 2, 3($\phi>180$)에서 음의 토크값을 나타내게 된다.

TSR 이 증가함에 따라 최대 토크의 위치는 뒤로 이동하고 있으며 사인파의 폭도 넓어지고 있다. 이는 회전속도가 빨라짐으로 인해 자유유동의 영향이 적어지며 날개로 입사되는 상대받음각이 감소하기 때문이다. 그러나 $TSR=3.2$ 인 경우는 전체 토크값이 감소하고 있다. 이는 주로 앞뒤날개의 상호 간섭과 상류(upstream)에 존재하는 날개의 막힘(blockage)의 의한 양력의 급격한 감소에 기인한다. 이러한 특성이 일반적인 다리우스풍력발전기와와의 차이점이라 할 수 있다. 다리우스풍력발전기의 경우 TSR 이 5-7 이상에서 급격한 감소현상을 관찰할 수 있는데 이는 주로 솔리디티가 낮기 때문에 상대 받음각의 감소에 의한 양력의 급격한 감소가 함께 일어난다⁽⁴⁾.

일반적으로 다리우스풍력발전기는 솔리디티가 작기 때문에 회전에 의한 앞날개와 그 다음 날개 간의 상호 간섭이 적으며 상류에 존재하는 날개에 의한 교란도 유동을 따라 하류로 흘러가지 않고 유동이 빠르게 회복되게 됨으로 하류영역($\phi>180$)에서 급격한 토크의 감소현상 비교적 적다. 그러므로 높은 TSR 에서 발전이 가능한 것이다. 그러나 이러한 특성으로 인하여 낮은 자유유동 속도에서는 회전을 시작할 수 있는 토크가 발생하지 않을 뿐 아니라 경우에 따라서는 음(-)의 토크를 가져 스스로 기동을 할 수 없게 된다⁽⁴⁾. 그러나 자이로밀은 솔리디티가 크므로 날개 간의 상호간섭과 상류의 교란이 하류에 많은 영향을 주게 된다. 그러므로 방위각에 따라 다리우스 풍력발전기와는 상이한 토크 분포를 나타내게 된다. 방위각에 따른 힘들의 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 7 에 방위각에 따른 토크를 나타내었다.

Fig. 7 에서 “t” 는 전체 날개의 토크의 총합을 나타내며 “s” 는 한개의 날개에 있어서 토크를 나타낸다. Fig. 7(a), (b)와 (c) 모두 날개의 전체합이 한개에 작용하는 토크보다 최고치는 감소하고 있다. 이것은 120 도씩 떨어진 나머지 2 날개의 토크의 합이 음(-)의 값을 가지기 때문이다. 방위각이 180 도 보다 작은 영역($\phi<180$)에서는 날개에 작용하는 상대 속도가 회전중심쪽에서 바깥쪽으로 작용하게 되지만 이보다 큰 영역($\phi>180$)이 되면 날개에 작용하는 힘의 방향이 회전방향의 안쪽에서 바깥쪽으로 바뀌게 된다. 이러한 방향의 변화로 인하여 캠버가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 불리하게 작용하게 된다. 즉 캠버가 있는 익형의 경우 비교적 큰 받음각에서도 박리가 일어나지 않고 양력을 발생하지만 음(-)의 받음각에서는 적은 각도에서도 전연에서부터 박리가 발생하고 실속이 일어나 양력이 감소하고 항력이 증가하게 된다. 그러므로 본 연구에서와 같은 자이로밀은 대표적인 양력형으로 캠버가 있는 경우보다 캠버가 없는 대칭형 익형이 유리할 것으로 생각된다.

$TSR=1.1$ 인 경우 자유유동과 회전속도가 거의 같은 크기를 가지게 된다. 그러므로 방위각에 따라 Fig. 7(a)에 보는것과 같이 4 개의 다른 영역으로 구분이 가능하다. 먼저 zone 1($0<\phi<90$)에서 양의 토크를 가지며 에너지를 얻는 영역이다. 이 때 날개로 들어오는 상대 받음각은 그리 크지 않으며 양력에 의한 회전력이 생기게 되는 영역이다. 바람의 속도(u)와 회전속도($r\omega$)가 비슷함으로 zone2 ($90<\phi<180$) 영역은 받음각이 매우 커 대부분의 영역에서 실속이 발생하고 양력이 발생하지 못하게 됨으로 토크는 거의 “0”에 가까운 값을 가지게 된다. Zone 3 ($180<\phi<270$)의 영역은 zone2 ($90<\phi<180$)영역과 비슷하며 단지 상대 유동의 방

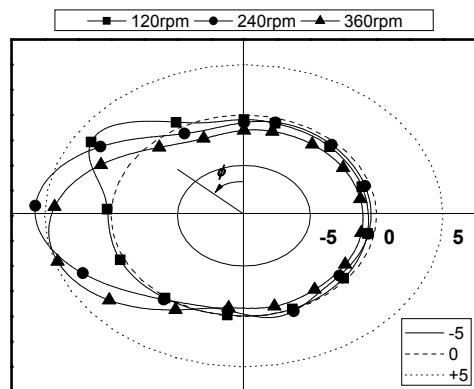


Fig. 8 Torque with respect azimuth angle

향이 회전중심에서 밖으로 작용한다는 것 만이 다르다. 그러나 이 영역에서는 앞에서 언급한 것 과 같이 상류의 교란과 상류날개의 벽면효과에 의해 하류에서는 유동이 형성되지 않고 이로 인하여 토크가 감소하게 된다.

TSR 이 증가함에 따라 대부분의 영역에서 날개에 대한 유동의 상대 유입각이 감소하면서 양(+)의 값을 나타내는 영역이 증가하게 된다. Fig. 7(b)($TSR=2.1$)에서 보게 되면 Fig. 7(a)($TSR=1.1$)과는 다르게 40도 영역에서부터 150도 영역에 걸쳐 양의 토크값을 나타내며 그 최대값 또한 증가함을 알 수 있다. 방위각이 180도를 지나 짧은 영역에 걸쳐 양의 값을 보이고 있다. 이후 zone 3 영역은 $TSR=1.1$ (Fig. 7(a))와 같이 상류의 영향으로 인하여 여전히 음(-)의 값을 보이고 있다. $TSR=2.1$ 의 경우 전체 TSR 에서 가장 높은 C_p 값을 나타내고 있으며 실제 발전을 위한 운전영역이 된다. 이러한 영역에서도 여전히 방위각이 180도 이상의 하류영역에서는 음(-)의 토크를 나타내고 있다. 그러므로 다리우스형에 비하여 C_p 가 낮아진다. 자이로밀의 성능을 향상하기 위해서는 이러한 후류에 놓이는 날개에 대한 유동개선이 꼭 필요한 것으로 생각된다. $TSR=1.1$ 에서 최고 토크의 위치가 60도 정도에서 발생한 것에 비하여 회전속도가 빨라짐에 따라 후방으로 이동하여 90도 정도에서 최대치를 보이고 있다.

날개 끝단에서의 속도가 더욱 빠른 Fig. 7(c)에서는 최고 토크의 위치가 더욱 후방으로 이동하며 방위각 110도 근방에서 발생하고 있다. 그러나 그 값은 $TSR=2.1$ 에 비하여 다소 감소하고 있다. 이는 앞날개의 교란성분이 충분히 하류로 흘러가기전에 다음 날개가 도착하게 되어 실제적인 날개에 대한 유동의 받음각이 감소하고 이로 인하여 양력이 감소하기 때문이다. 날개가 후류에 놓이게 되는 zone 3과 4($180 < \phi < 360$)에는 유동의 막음현상(blockage)에 의하여 회전반경내의 압력은 더욱 감소하여 외부의 유동을 끌어들이는 흡입력이 있음에도 불구하고 회전반경내에 유동이 감소하며 음(-)의 토크가 더욱 강하게 나타나고 있다. 이로 인하여 전체 날개의 회전력은 급격히 감소하게 되며 한 주기 내에서 양의 회전력과 음의 회전력의 합은 거의 비슷하게 되며 발전이 불가능하게 된다. 만약 솔리디티가 더욱 커다면 날개간의 상호 간섭과 막음효과는 더욱 증가하게 되며 이로 인하여 최대효율을 갖는 운전점(TSR)은 더욱 낮아지게 된다.

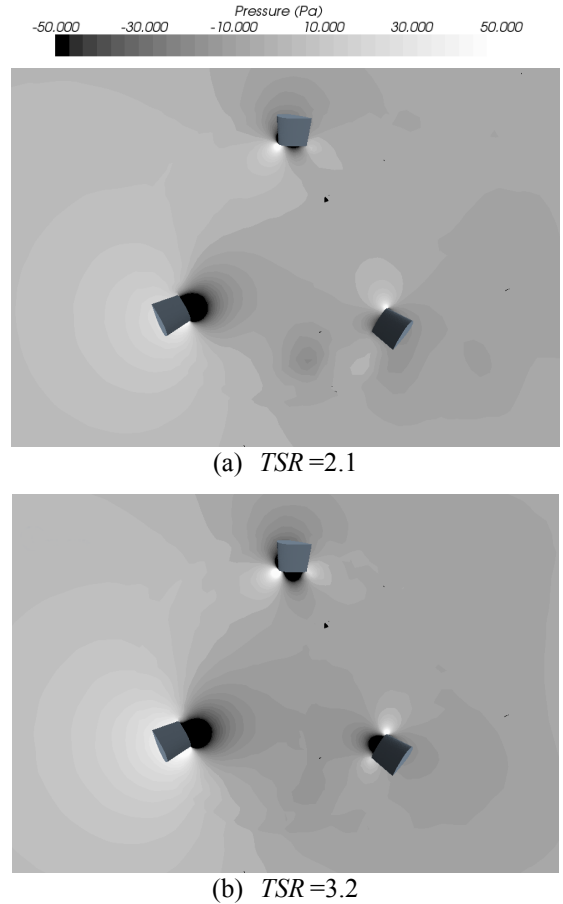
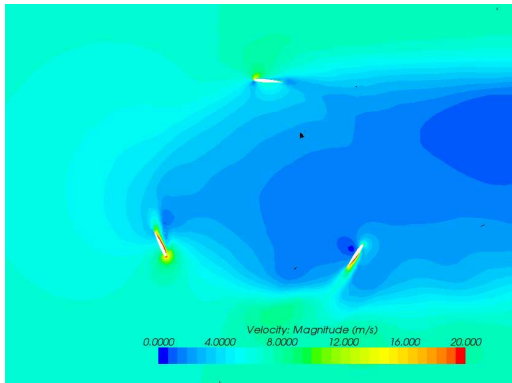


Fig. 9 Pressure distribution at mis-span

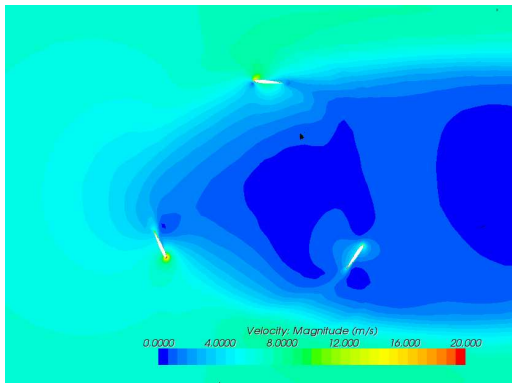
Fig. 8는 각 날개의 위치에 따른 토크를 명확하게 확인하기 위하여 토크를 극좌표계의 형식으로 표시하였으며 “zero line”이 토크가 0인 점을 나타내며 이보다 작은 반경을 가진 경우는 음(-)의 토크를 가지는 것이며 반대로 이보다 큰 경우 양(+)의 토크를 나타낸다. 전술한 바와 같이 TSR 이 빨라짐에 따라 최대 토크의 위치는 방위각이 큰 쪽으로 이동하고 있으며 그 폭 또한 증가하고 있음을 알 수 있다. $TSR=1.1$ 인 경우 45도 근방에서 양의 토크를 나타내고 있으나 $TSR=2.1, 3.2$ 에서는 거의 대부분의 상류에서 양의 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 전술한 바와 같이 상대 유입각이 감소함에 따라 나타나는 현상이다. $TSR=3.2$ 의 경우 거의 모든 하류영역에서 음의 토크값을 나타내고 있다. 이로 인하여 전체적인 성능이 급격히 감소하게 된다.

3.2 자이로밀의 유동특성

Fig. 9는 $\phi=0$ 에서 $TSR=2.1$ 과 3.2에 관하여 날개의 중심(mid-span)에서의 압력분포를 나타내고



(a) $TSR=2.1$

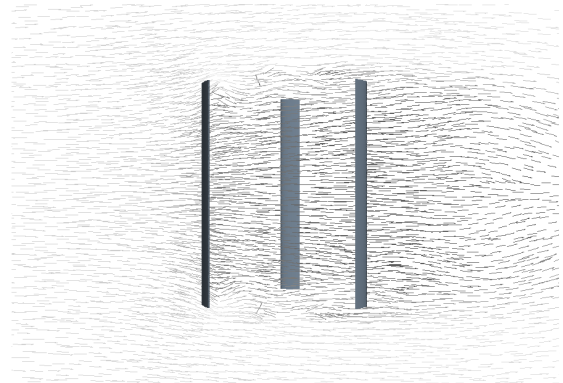


(b) $TSR=3.2$

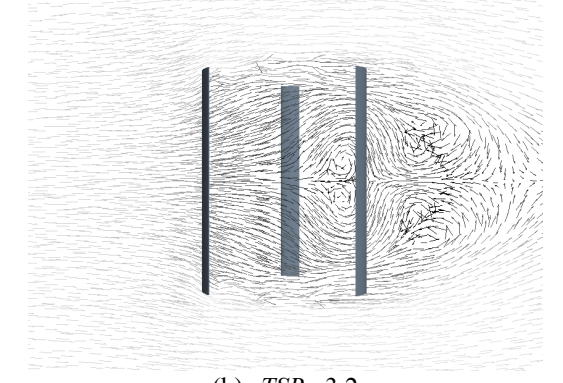
Fig. 10 Velocity magnitude distribution.

있다. 전체적인 압력분포는 비슷한 모양을 나타내고 있으나 $TSR=3.2$ 인 경우가 회전반경내에서 더 낮은 압력분포를 나타내고 있다. 2 번째 날 개의 아래 위에 있어서 더 큰 압력변화를 나타내고 있으나 이는 Fig. 8 에서 보듯이 $TSR=3.2$ 인 경우 110 도 근방에서 최고치를 나타내기 때문이다. 그러나 $TSR=2.1$ 인 경우는 이보다 앞선 90 도 영역에서 최고치를 나타내고 있으며 120 도 근방에서는 비교적 낮게 나타나고 있다. Fig. 9 (b)에서 날개 1 번과 3 번의 경우 날개의 아래위 모두에서 매우 낮은 압력영역이 존재함을 알 수 있다. 이로 인하여 이 영역에서는 양력이 발생하지 않고 항력이 증가하고 음(-)의 토크가 발생하게 된다. 이는 상류에 존재하는 날개의 회전으로 인하여 유동이 날개를 따라 회전하게되고 하류에 존재하는 날개에는 거의 유동이 없는 상태가 되며 날개로 바람이 유입되는 대신 날개는 정지한 공기를 가속하게 되며 이로 인하여 압력은 급격히 떨어지고 항력이 증가하게 된다. 이러한 현상은 하류영역($180 < \phi < 360$) 영역에서 지속적으로 발생하게 된다.

Fig. 9 에서 하류에 위치하는 날개의 윗면과 아래면 모두에서 낮은 압력이 존재하는 원인을 알아



(a) $TSR=2.1$

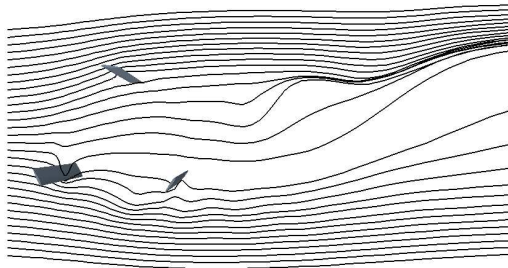
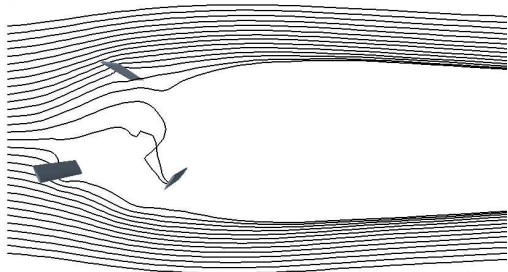


(b) $TSR=3.2$

Fig. 11 Velocity vector at mid-section($y=0$)

보기 위하여 같은 지점(mis-span)에서의 속도분포를 Fig. 10 에 나타내었다. $TSR=2.1$ 에 비하여 $TSR=3.2$ 에서 회전반경내에서 더욱 낮은 속도분포를 가짐을 알 수 있다. 또 $TSR=3.2$ 에서 회전반경 내는 거의 유동이 없는 공간이 존재하며 이는 하류에 존재하는 날개와 유동의 상호 간섭으로 인하여 내부에 이차유동이 발생하고 있기 때문이다. 이러한 이차유동은 Fig. 11 의 속도 벡터에서 잘 나타나고 있다. $TSR=2.1$ 인 Fig. 11(a)에서는 이차유동이 없는 반면 Fig. 11(b)에서는 하류날개의 영향으로 2 차유동이 발생한것을 확인할 수 있다. Fig. 10(b)에서 보면 회전반경 내는 유동정체가 발생하며 이 사이를 날개가 지나감으로 인하여 날개주위의 공기가 가속되는 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 원인으로 인하여 $TSR=3.2$ 에서는 성능이 급격하게 감소하게 된다.

Fig. 12 의 순간적인 유선(Stream line)에서도 Fig. 10 에서와 마찬가지로 중심에서의 회전반경내로 상류의 유동이 충분히 들어오지 못하고 날개의 회전을 따라 회전하고 있음을 가지적으로 확인할 수 있다. 그러므로 날개가 더 빠른 속도로 회전하는 $TSR=3.2$ 에서는 유동이 회전반경내로 거의 들어

(a) $TSR=2.1$ (b) $TSR=3.2$ **Fig. 12** Instance stream line at mid-span.

오지 않고 있음을 알 수 있다. 이로 인하여 방위 각이 180도보다 큰 하류영역(zone 3, 4)에서 큰 음(-)의 토크를 가지게 된다.

4. 결 론

대칭형 익형(NACA0012)을 가진 수직축풍력발전기인 자이로밀에 대한 3 차원 비정상 해석을 통하여 성능 및 공기역학적인 특성에 관하여 고찰하였다. 다리우스풍력발전기와 다르게 자구동이 가능한 높은 솔리디티를 가진 본 연구의 자이로밀은 TSR 이 2.4에서 최고성능을 나타냈으며 이후에 급격한 성능의 저하를 나타내었다. 이러한 급격한 성능의 저하는 주로 하류에 존재하는 날개의 급격한 양항비 감소에 의한 음(-)의 토크의 발생에 기인하였다.

TSR 이 증가하는 경우 날개로 유입되는 상대받음각이 줄어 실속이 감소하고 최고 토크의 위치도 45도 → 90도 → 120도로 변화하였다. 또한 그 폭도 증가하였다. 그러나 $TSR=3.2$ 에서는 토크의 피크도 날개간의 상호 간섭에 의하여 감소하였으며 회전반경의 상류에 존재하는 날개의 막힘현상의 증가로 인하여 공기가 회전반경을 가로질러 하류에

도달하지 못하고 이로 인하여 하류에 존재하는 날개는 양력이 감소하고 항력이 증가하게 됨으로 급격히 토크가 감소하고 성능이 저하됨을 알 수 있었다. 그러므로 향후 자이로밀의 성능을 향상하기 위해서는 하류의 유동을 개선하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Savonius, S. J., 1931, "The S-Rotor and Its Applications," *Mech. Eng.*, Vol. 53, No. 5 pp. 333~338.
- (2) Darrieus, GJM, 1931, Turbine Having Its Rotating Shaft Transverse to the Flow of the Current, US Patent No.1835081.
- (3) Islam, M., Ting, David S.-K., and Fartaj, A., 2008, "Aerodynamic Models for Darrieus-Type Straight-Blade Vertical Axis Wind Turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 1087~1109.
- (4) Blackwell, B. F., 1974, *The Vertical Axis Wind Turbine How it Works*, SANDIA, SLA-74-0160.
- (5) Blackwell, B. F., Sheldahl R. E., Feltz, L. V., 1976, *Wind Tunnel Performance Data for the Darrieus Wind Turbine with NACA0012 Blades*, SANDIA, SAND76-0130.
- (6) Carne, T. G., 1980, *Guy Cable Design and Damping for Vertical Axis Wind Turbines*, SANDIA, SAND80-2669.
- (7) Oler, J. W., Strickland, J. H., Im, B. J., Graham, G. H., 1983, *Dynamic Stall Regulation of the Darrieus Turbine*, SANDIA, SAND83-7029.
- (8) Sheldahl, R. E., Klimas, P. C., Feltz, L. V., 1980, Aerodynamic Performance of a 5-Meter Diameter Darrieus Turbine with Extruded Aluminum NACA-0015 Blades, SANDIA, SAND80-0179.
- (9) Reuter, R. C. Jr, 1977, *Vertical Axis Wind Turbine Tie-down Design with an Example*, SANDIA, SAND77-1919.
- (10) Klimas, P. C. and Sheldahl, R. E., 1978, *Four Aerodynamic Prediction Schemes for Vertical-Axis Wind Turbines: a Compendium*, SANDIA, SAND78-0014.
- (11) Ashwill, T. D., Loenard, T. M., 1986, *Developments in Blade Shaped Design for a Darrieus Vertical Axis Wind Turbine*, SANDIA, DAND86-1085
- (12) Klimas, P. C., 1984, *Tailored Airfoils for Vertical Axis Wind Turbines*, SANDIA, SAND84-1062
- (13) Sheldahl, R. E., Klimas, P. C., 1981, *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.
- (14) Popelka, D., 1982, *Aeroelastic Stability Analysis of*

- a Darrieus Wind Turbine*, SANDIA, SAND82-0672.
- (15) Reuter, R. C., Jr. and Worstell, M. H., 1978, *Torque Ripple in a Vertical Axis Wind Turbine*, SANDIA, SAND78-0577.
- (16) Carne, T. G., Lobitz, D. W., Nord, A. R., Watson, R. A., 1982, *Finite Element Analysis and Modal Testing of a Rotating Wing Turbine*, SANDIA, SAND82-0345.
- (17) Yoo, N. S., "A Study of the Performance Prediction of the Darrieus Wind Turbine," *Transaction of JSAS*, 1992, Vol. 20, No. 1, pp. 80-94.
- (18) Park, J.-Y., Lee, M. J., Lee, S.-J. and Lee, S., "An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of High-Efficient, Small-Scale, Vertical-Axis Wind Turbine," 2009, *Transaction of JMST B*, Vol. 33, No. 8, pp. 580-588.
- (19) Jung, H.Y., Lee, Y. W., and Kim, Y.D., 2008, "Numerical Study on the Starting Characteristics of Vertical Axis Wind Turbine," *Proceedings of 2008 Korea Marine Engineering Conference*, pp. 297~298. (Korean)
- (20) Jung, H.Y., Lee, Y.W., and Kim, Y.D., 2008, "A Simulation on the Starting Characteristics of Vertical Axis Wind Turbine," *Proceedings of 11th Wind Engineering*, pp. 127~132. (Korean)
- (21) Wahl, M., *Designing an H-Rotor Type Wind Turbine for Operation on Amundsen-Scott South Pole Station*, UPPSALA University, 2007, UPTec ES070030.
- (22) STAR-CCM+, 2006, *Methodology*, CD-adapco.
- (23) Caradonna, F. X. and Tung, C., 1981, *Experimental and Analytical Studies of a Model Helicopter Rotor in Hover*, NASA Technical Memorandum 81232.
- (24) Kim, D.-K., Kim, M.-K., Cha, D.-K., Yoon, S.-H., 2006, "Design of Drag-type Vertical Axis Miniature Wind Turbine Using Arc Shaped Blade," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 9, No. 2, pp.7-12.
- (25) WAKUI, T., TANZAWA, Y., HASHIZUME, T., and NAGAO, T., 2005, "Hybrid Configuration of Darrieus and Savonius Rotors for Stand-Alone Wind Turbine-Generator Systems," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 150, No. 4, pp. 259-266.
- (26) Wahl, M., 2007, *Designing an H-rotor type Wind Turbine for Operation on Amundsen-Scott South Pole Station*, Thesis, Uppsala University.
- (27) Kirke, B. K., 1998, *Evaluation of Self-Starting Vertical Axis Wing Turbines for Stand-Alone Application*, Ph.D. Thesis, Griffith University.