

## 받음각 변화에 따른 아르키메데스 풍력발전 날개 주위의 유동장 변화

리치양\* · 김현동\* · 지호성\* · 김경천†

### Flow Characteristics around Archimedes Wind Turbine according to the Change of Angle of Attack

Qiang Li, Hyun Dong Kim, Ho Seong Ji and Kyung Chun Kim

**Abstract.** This paper describes aerodynamic characteristics of an Archimedes spiral wind turbine with various angles of attack. The range of angles was controlled from  $-30^\circ$  (clockwise) to  $+30^\circ$  (clockwise). The rotating speed of wind turbine at the same angle of attack in both directions was different. The reason why the maximum rotational speed was observed at  $15^\circ$  in clockwise direction can be explained based on angular momentum conservation. Quantitative flow visualization around Archimedes wind turbine blade was carried out between  $-15^\circ$  (clockwise) and  $+15^\circ$  (counter clockwise) using high resolution PIV method. The relationship between drag force and rotating speeds was discussed. From these results, optimum design on yawing system of Archimedes spiral wind turbine may provide high efficiency on small wind power system.

**Key Words:** Spiral Wind Power Generation(스파이럴형 풍력발전), Archimedes Spiral(아르키메데스 나선), Aerodynamics Characteristics(공력특성), PIV measurement(PIV 측정), Angle of Attack(받음각)

#### 기호설명

- $\theta$ : Angle of Attack [ $^\circ$ ]
- $\lambda, \Phi$ : Blade의 축과 Blade Spiral이 이루는 각 [ $^\circ$ ]
- $V_{total}$ : Total Speed [m/s]
- $V_e$ : Effective Speed [m/s]
- $V_2$ : Model Linear Speed [m/s]
- $V_1$ : Wind Speed [m/s]
- $N$ : Revolution [RPM]

#### 1. Introduction

화석연료의 고갈과 화석연료의 연소에 의해 배출되는 오염물질에 의한 온실효과 등으로 인하여 지구의 온난화가 급속하게 진행되는 것을 감소시키기 위하여 대체에너지의 개발이 활발하게 이루어지고 있으며, 또

한 저탄소 녹색에너지를 확보하기 위한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다. 그 중에서 매년 20% 이상의 빠른 성장을 보이고 있으며 현재 가장 활성화되어 있는 풍력발전은 태양광, 연료전지에 비해서 이미 상용화 단계에 접어들어 유럽을 중심으로 큰 시장이 형성되어 있으며, 최근 중국, 미국, 유럽을 중심으로 시장이 확대되고 있다.

풍력발전분야 중 선진국에서 상용화중인 대형 풍력 발전시장에 비해 소형 풍력발전시장은 개발 및 투자가 활성화되지 않은 초기 시장으로, 최근 들어서 도시나 농어촌마을에서 자가 발전을 통한 분산 발전을 하고자 하는 경향이 증가하고 있으므로 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

소형 풍력발전은 회전축의 형태에 따라 수평축 풍력 발전기와 수직축 풍력 발전기로 구분할 수 있다. 수평축 풍력 발전기는 바람의 방향과 회전하는 로터축이 평행한 반면, 수직축 풍력 발전기는 바람 방향과 로터축의 방향이 수직인 형태를 갖는다. 아르키메데스 수차에 착안되어 고안된 스파이럴 풍력 블레이드는 항력과 양력을 모두 이용함으로써 바람에 의한 공력 성능을 극대

†School of Mechanical Engineering, Pusan National University  
E-mail : kckim@pusan.ac.kr

\*School of Mechanical Engineering, Pusan National University

화할 수 있는 특성을 지니고 있다<sup>(1)</sup>.

소형풍력발전시스템의 공력특성에 관한 선행연구를 살펴보면 Button 등<sup>(2)</sup>은 수평축 프로펠러형 블레이드에 대한 공력특성을 예측할 수 있는 이론적인 BEMT (Blade Element Moment Theory)을 유도하였고, 김 등<sup>(3)</sup>은 상용코드인 CFX-TASC flow를 이용하여 500 kW 수평축 블레이드에 대한 전산해석을 수행하여 BEMT 이론에 의해 예측된 출력과 비교하여 10% 이내의 오차범위 내에서 일치된 결과를 얻었음을 보고하였다. 한편, 황 등<sup>(4)</sup>은 1 kW급 수직축 풍력 발전기의 개별 블레이드 피치제어방식을 이용한 시스템의 공력해석을 수행하였으며, 공 등<sup>(5)</sup>은 500 W급 수직축 풍력 블레이드에 대한 공력설계 및 유동해석 상용코드인 ANSYS CFX를 이용하여 공력특성을 연구하여 실험과 비교하였다. 또한, 박 등<sup>(6)</sup>은 사보니우스 방식의 1 kW급 제트-휠-터보형 수직축 풍력터빈에 대한 공력성능을 실험/전산해석의 방법으로 비교/분석하여 최대동력계수 및 최적의 입출구 면적비, 반음각을 도출하였다. 최근, Howell 등<sup>(7)</sup>은 4:1의 종횡비를 가지는 다리우스타입의 수직축 블레이드에 대한 전산유체해석을 수행하여 실험과 비교하여 일치된 결과를 얻었다. 최근 여 등<sup>(8)</sup>은 직경이 약 1.5 m인 500 W급의 도시경관형 스파이럴 풍력 터빈 블레이드를 대상으로 이론적 해석연구와 전산유체역학적연구를 통하여 설계 및 공력특성에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구대상인 스파이럴형 풍력 블레이드의 공력특성과 관련하여 접근유동장의 변화에 따른 날개주위의 유동장 변화를 정량적으로 관찰한 선행연구가 없으므로 본 연구에서는 접근하는 유동장의 각도변화에 따른 소형 아르키메데스풍력발전기의 회전수 변화와 날개주위의 유동장 변화에 대한 정량적 유동가시화를 수행하여 최적효율을 제공할 수 있는 접근유동장에 대하여 공기역학적으로 평가를 하였다. 이때 접근유동장의 각도는 기울어짐이 없는 0°를 기준으로 시계방향과 반시계 방향으로 각각 5°씩 증가시켜 15°까지 정량적 유동가시화를 수행하여 날개주위의 유동특성을 관찰하였으며, 0°부터 30°까지 5°씩의 변화에 따른 아르키메데스풍력발전기 날개의 회전수 변화를 비교 관찰하였다.

## 2. Experimental Setup and Methods

Figure 1은 본 연구에서 풍력터빈 날개주위의 유동

장에 대한 정량적 가시화 연구를 수행하기 위하여 구성된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 기본적으로 직경 15 cm의 Archimedes Spiral Wind Blade 모형, 유동을 제공하기 위한 출구의 단면적이 30 cm×30 cm의 개방형 풍동으로 구성되었다. 실험적 연구는 입구풍속의 변화에 따른 풍력날개의 회전수를 광학센서를 이용하여 관찰하였다. 개방형 풍동의 출구를 통하여 외부로 공급되는 유동장의 Core 내부에 모형이 위치되도록 하기 위하여 풍동의 출구로부터 약 15 cm 이격 시켰으며, 풍력터빈의 중심이 개방형 풍동의 중심과 일치되도록 위치시켰다.

정량적 유동가시화 연구에 적용한 PIV 시스템은 Mini-YAG 레이저(U-Wave 사), 고해상도 Cooled CCD 카메라, 제어 및 계산용 컴퓨터, 그리고 동기장치로 구성되었으며, 추적입자는 풍동의 입구에 라스킨 노즐을 설치하여 1 μm의 올리브오일 액적을 생성시켜 투입하였다.

날개주위의 정량적 유동가시화를 위하여 고해상도 고속카메라(PCO Sensi Cam QE)로 12bit의 입자영상을 획득하였으며, 이때 영상획득장치의 해상도는 1 K×1 K이며 입자영상의 관측창(Field of View)의 크기는 150mm×120mm이다. 그리고 카메라에는 60 mm 표준렌즈를 부착하였다. 그리고 측정하고자 하는 유동단면에 원통형 렌즈(Cylindrical Lens)를 이용하여 얇은 평면광을 조사하여 추적입자에 의해 산란된 유동영상을 CCD 카메라로 획득하였으며, 카메라는 모형의 아래면에 위치시켰다. 또한 조사된 평면광에 대하여 수직으로 관찰하도록 카메라를 배치하였다.

유동장의 반음각(Angle of Attack)의 변화에 대한 날개주위의 정량적 유동가시화를 위하여 주유동 방향을

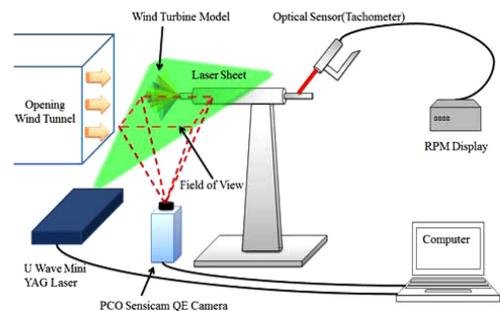
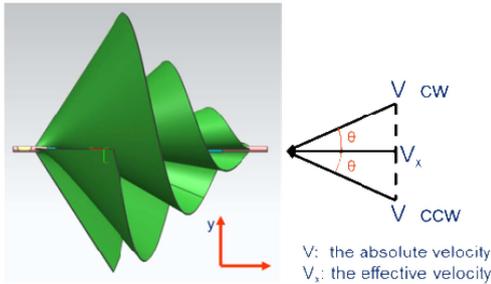


Fig. 1. Experimental Setup for Quantitative Flow Visualization around Archimedes Wind Turbine.

**Table 1.** Rotational velocity (rpm) with respect to angle of attack and velocity of incoming flow

Wind	Dirction	Angle	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
		4.5 m/s	clockwise	655	600	633	630	570	550
	counter clockwise			642	660	560	560	550	520
5.5 m/s	clockwise		1171	1135	1180	1200	1080	1030	985
	counter clockwise			1207	1205	1100	1035	1000	955
6.8 m/s	clockwise		1823	1780	1825	1845	1650	1580	1510
	counter clockwise			1866	1899	1730	1590	1530	1450
8.2 m/s	clockwise		2495	2385	2430	2420	2200	2145	2030
	counter clockwise			2490	2510	2325	2150	2060	1970



**Fig. 2.** The Definition on the Experimental Coordination System for Angle of Attack Change.

x축으로 설정하였으며, 축에 수직방향을 y축으로 설정하였다. 그리고 개방형 풍동의 출구와 주유동 방향의 축을 중심으로 Clockwise로 정의한 접근유동방향은 카메라의 렌즈를 기준으로 설정하였다. 그리고 반대방향의 받음각의 접근유동방향을 반시계 방향(Counter Clockwise)로 정의하였다(Fig. 2 참조).

CCD카메라를 통해 얻은 입자영상에 2화상(2-Frame) 상호상관(Cross Correlation) 기법의 속도장 추출 알고리즘을 적용하여 날개 주위유동의 속도장을 측정하였다. 이때 미소조사구간(Interrogation Window)의 크기는 48×48 pixels이며, 각 구간을 50% 중첩하였다. 얻어진 순간 속도장은 본 연구실에서 개발한 후처리 프로그램을 이용하여 에러벡터를 제거하고, 통계적 처리과정을 거쳐 평균속도장을 계산하였다. 이때 2,000장의 순간 속도장을 이용하여 각각의 실험에 대한 평균 속도장을 계산하였다.

### 3. Results and Discussions

#### 3.1 RPM Characteristics

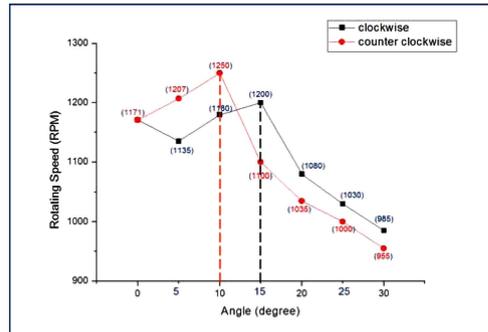
Table 1은 접근유동장의 받음각 변화와 속도변화에

대한 날개의 회전수 특성을 나타낸 표이다. 접근유동장의 받음각을 0°부터 30°까지 5°씩 증가시켰으며, 카메라의 렌즈를 기준으로 Clockwise와 Counter Clockwise를 설정하여 관찰하였다. 이때 접근하는 유동장의 속도는 4.5 m/s, 5.5 m/s, 6.8 m/s 그리고 8.2 m/s에 대하여 회전수를 관찰하였다.

실험을 통하여 관찰된 회전수 특성에 있어서 접근하는 유동장이 0°일 때 최대회전수가 관찰되지 않고 약 10°혹은 15°일 때 최대회전수가 관찰되는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 결과를 도식적으로 관찰하기 위하여 5.5 m/s의 접근 유동장에 대하여 그래프로 표현하였다(Fig. 3 참조). 받음각이 0°일 때 분당 회전수 1171를 나타내었으나 받음각이 증가함에 따라, 시계방향의 경우는  $\theta = 15^\circ$ 일 때, 반시계방향의 경우는  $\theta = 10^\circ$ 일 때 각각 최대회전수 1200 RPM과 1250 RPM을 나타내는 것을 관찰할 수 있다.

이는 날개의 축을 중심으로 축대칭을 이루지 못하기 때문에 서로 다른 단면적에 작용하는 접근하는 유동장에 의해 형성되는 Drag Force에 의한 것으로 사료된다.



**Fig. 3.** RPM Characteristics with Angle of Attack Change for Wind Speed of 5.5 m/s.

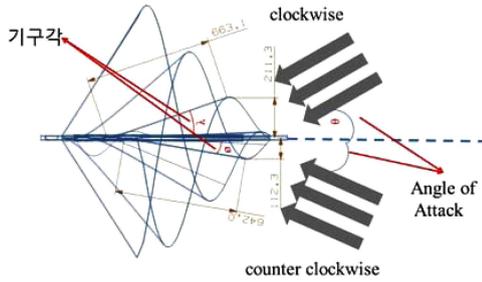


Fig. 4. The Definition on Angle of Attack, Flow Direction.

즉, 시계반대방향으로 유동이 접근할 때, 축과 날개가 이루는 각도는 10.07°를 이루고 있으며, 이는 받음각이 0°에 비하여 유동을 받는 단면적이 최대를 이루고 있는 것으로 판단되며 이로 인하여 최대회전수가 관찰되는 것으로 여겨진다(Fig. 4 참조).

그리고 시계방향의 받음각이 제공되는 유동에 있어서는 날개의 축과 Blade의 Spiral이 이루는 각이 약 18.58°( $\because \lambda = \cos^{-1}(211.3/663.1)$ )를 보여주고 있으며, 이렇게 형성되는 각도에 의해 실제 Blade의 내부에 가해지는 풍하중이 최대한 가해지는 것으로 판단되며, 이로 인하여 15°의 받음각에서 최대회전수가 관찰되는 것으로 생각된다.

### 3.2 Mean Velocity Fields

Figure 5는 접근하는 유동의 속도가 5.5 m/s이고, 받음각이 0°일 때 즉, 아르키메데스풍력터빈날개를 개방형 풍동과 일직선으로 위치 시켰을 때의 평균 속도장을 나타낸 것이다. 이때 최대속도가 관찰되는 영역은 날개로부터 축의 수직방향으로 벗어날수록 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 날개로 접근하는 유동장

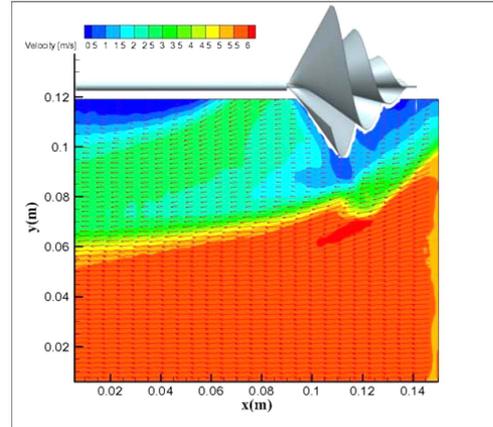


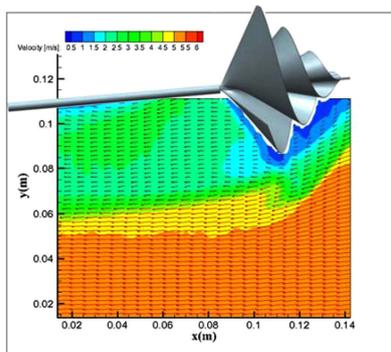
Fig. 5. Mean Velocity Fields (Angle of Attack: 0°/Wind Speed: 5.5 m/s).

은 날개의 회전 Momentum으로 작용하므로 속도를 상실하기 때문에 상대적으로 낮은 속도가 관찰되는 것으로 판단된다.

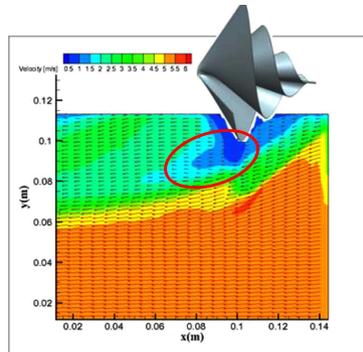
Figures 6~8은 접근하는 유동의 속도가 5.5 m/s이고, 시계방향의 받음각이 5°, 10° 그리고 15°일 때 날개주위의 평균 속도장과 시계반대방향으로의 받음각이 5°, 10° 그리고 15° 일 때 날개주위의 평균 속도장을 각각 나타낸 것이다. 전체적으로 날개주위에서는 유동이 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내고 있으며, 날개 끝단과 날개의 후류 영역에서는 접근유동장의 속도가 현저히 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

### 4. Conclusions

받음각의 변화에 따른 아르키메데스 풍력터빈 날개



Clockwise



Counter Clockwise

Fig. 6. Mean Velocity Fields (Angle of Attack: 5°/Wind Speed: 5.5 m/s).

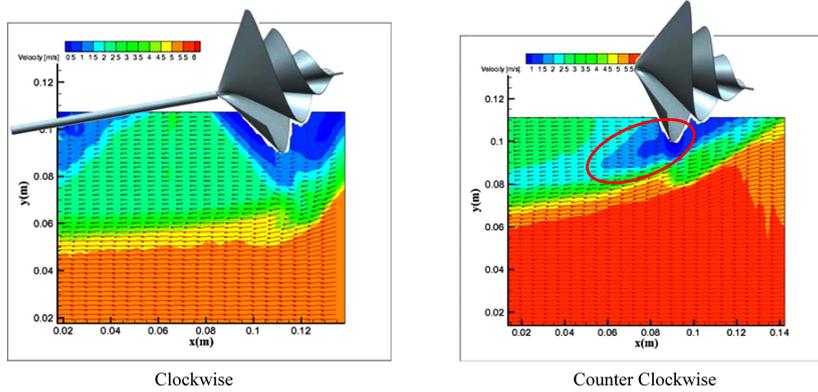


Fig. 7. Mean Velocity Fields (Angle of Attack:  $10^\circ$ /Wind Speed: 5.5 m/s).

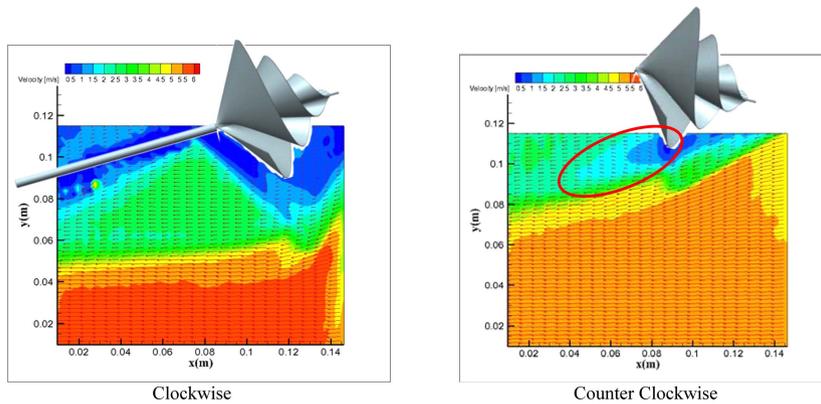


Fig. 8. Mean Velocity Fields (Angle of Attack:  $15^\circ$ /Wind Speed: 5.5 m/s).

의 회전수 특성과 날개주위의 유동에 대한 정량적 유동가시화에 대한 실험적 연구를 통하여 다음과 같이 요약하여 기술할 수 있다.

1) 속도와 받음각 변화에 대한 풍력터빈날개의 회전수 특성 관찰을 통하여, 받음각이  $0^\circ$ 에 비하여  $10^\circ \sim 15^\circ$  사이에 시계방향이든 반시계 방향이든 최대 회전수를 나타내고 있으며, 이는 아르키메데스 Spiral의 내부 단면적 변화가 회전수에 영향을 미치는 것으로 여겨진다. 즉, 아르키메데스 풍력발전시스템의 경우, Yawing system에 대한 최적설계를 통하여 최대발전효율을 얻을 수 있는 시스템의 설계에 있어서 중요한 참고자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

2) 받음각의 변화에 따른 풍력터빈 날개주위의 정량적 유동가시화를 통하여 날개의 끝단 주위에서 생성되는 상세한 유동구조를 끝단 와류크기의 변화가 관찰되며, 반시계 방향의 경우가 시계방향의 경우에 비하여

조금 더 크게 나타나는 것으로 보여진다. 이는 회전수의 결과에서와 동일한 현상으로 판단되며, 축을 중심으로 Spiral 형태로 이어진 날개의 내부면적의 비대칭형상에 의해 회전력으로 전달되는 유동의 momentum 차이가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)에서 지원하는 신재생 에너지융합원천기술개발사업(No. 20113030020010) 및 2011년도 인력양성사업(No. 20114010203080)에 의해 수행한 연구과제이며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- 1) Dalley, S., Oleson, J. P., 2003, "Sennacherib,

- Archimedes, and the Water Screw: The Context of Invention in the Ancient World”, *Technology and Culture* Vol. 44(1).
- 2) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., 2001, “WIND ENERGY HANDBOOK”, John Wiley & Sons, Ltd, New York, pp. 40-65.
  - 3) Kim, J. H., Kim, T. S., Lee, Y. W., Kim, Y. D., 2005, “A Study on Aerodynamic Analysis on HAWTs by CFD”, *Trans. of the WEIK*, Vol. 9(1), pp. 103-108.
  - 4) Hwang, I. S., Min, S. Y., Jeong, I. O., Lee, C. H., Lee, Y. H., Kim, S. J., 2006, “Aerodynamic Analysis and Rotor Control of Efficient Vertical Axis Wind Turbine using the Individual Blade Pitch Control System”, *Proc. Spring Conference of KSAS*, pp. 119-122.
  - 5) Gong, C. D., Lee, H. S., Kim, I. K., 2011, “Aerodynamic and Structural Design of A High Efficiency Small Scale Composite Vertical Axis Wind Turbine Blade”, *Trans. of the KSAS*, Vol. 39(8), pp. 758-765.
  - 6) Park, J. Y., Lee, M. J., Lee, S. J., Lee, S. B., 2009, “An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of High-efficient, Small-scale, Vertical-axis Wind Turbine”, *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 33(8), pp. 580-588.
  - 7) Howell, R., Qin, N., Edwards, J., Durrani, N., 2010, “Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine”, *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 412-422.
  - 8) Lu Q., Li Q., Kim Y. K. and Kim K. C., 2012, “A study on design and aerodynamic characteristics of a spiral-type wind turbine blade”, *KSV*, Vol. 10(1), pp. 27-33.