

소형 수직축 풍력발전기 풍동실험시 폐쇄율의 영향

Effect of Blockage Ratio on Wind Tunnel Testing of Small Vertical-Axis Wind Turbines

정회갑* · 이승호** · 권순덕***†

Jeong Houi-Gab*, Lee Seung-Ho** and Kwon Soon-Duck***†

(Submit date : 2014. 4. 28., Judgment date : 2014. 4. 28., Publication decide date : 2014. 6. 23.)

Abstract : The effect of blockage ratio on wind tunnel testing of small vertical-axis wind turbine has been investigated in this study. Height and rotor diameter of the three blades Darrieus vertical axis wind turbine used in present test were 0.4m and 0.35m respectively. We measured the wind speeds and power coefficient at three different wind tunnels where blockage ratio were 3.5%, 13.4% and 24.7% respectively. The test results show that the measured powers have been strongly influenced by blockage ratio, generally increased as the blockage ratio increases. The maximum power at higher blockage ratio has been obtained at relatively high tip speed ratio compared with that at low blockage ratio. The measured power coefficients under high blockage ratio can be improved from proper correction using the simple correction equation based on blockage factor. In present study, the correction error for power coefficient can be less than 5%, however correction effectiveness reveals relatively poor at high blockage ratio and low wind speed.

Key Words : 수직축 풍력발전기(VERTICAL-axis wind turbine), 폐쇄율(Blockage ratio), 풍동실험(Wind tunnel test), 폐쇄효과(Blockage effect), 폐쇄지수(Blockage factor), 출력계수(Power coefficient)

***† 권순덕 : 전북대학교 토목공학과
E-mail: sdkwon@chonbuk.ac.kr, Tel: 063-270-2289
*정회갑 : 전북대학교 토목공학과
**이승호 : 전북대학교 대형풍동실험센터

***† Kwon, Soon-Duck (corresponding author) : Department of Civil engineering, Chonbuk National University, Chonju, Chonbuk, 561-756 Korea.
E-mail: sdkwon@chonbuk.ac.kr, Tel: 063-270-2289
*Jeong, Houi Gab : Department of Civil Engineering, Chonbuk National University.
**Lee, Seung-Ho : KOCED Wind Tunnel Center, Chonbuk National University.

기 호 설 명

- D : Rotor diameter(m)
- U : Wind speed(m/s)
- n : RPM
- BF : Blockage factor
- TSR : Tip speed ratio
- β : Blockage ratio
- λ : Tip speed ratio
- ρ : Density of air(kg/m^3)
- ω : Rotor angular speed(rad/s)
- P^{WT} : Mechanical power of wind turbine(W)
- T^{WT} : Mechanical torque acting on the wind turbine rotor(Nm)
- A_S : Rotor swept area(m^2)
- A_T : Wind tunnel test section area(m^2)
- C_P : Power coefficient
- C_{PF} : Power coefficient in free stream
- C_{PT} : Power coefficient in the wind tunnel
- U_F : Wind speed in free stream conditions(m/s)
- U_T : Tunnel wind speed with the rotor (m/s)

1. 서 론

최근 에너지 수급문제가 심각해짐에 따라 신재생 에너지의 사용이 증가하고 있다. 그 중 에서 풍력에너지는 비교적 성숙 기술로 인정 받고 있으며, 낮은 발전단가로 인해 상용화와 대량생산에 있어 엄청난 잠재력을 가지고 있다. 풍력발전은 경제성을 높이기 위하여 점차 대형화 되고 있으며 대형 풍력발전기, 대규모 풍력단지 등을 중심으로 매년 큰 성장을 보이고 있다. 풍력발전이 대형화에 초점을 맞추어 성장하고 있는 동안 도심형 또는 주거지 인접

설치용으로 다양하게 활용될 수 있는 소형 풍력발전에 대한 연구와 시장 또한 급성장하고 있다. 소형풍력발전기의 기준은 나라마다 다르지만 IEC 61400-21)에서 회전자 회전 면적 (Rotor Swept Area)이 40m² 이하이고, 1,000V AC 또는 1,500V DC 미만의 전압으로 발전하는 것으로 정의되고 있다.

풍력발전기는 회전축 방향에 따라 수평축과 수직축으로 나눌 수 있다. 이중 수직축 풍력발전기는 풍향에 관계없이 발전이 가능하고 소음이 거의 없고 낮은 풍속에서도 발전이 가능하기 때문에 그 수요가 점차적으로 증가하고 있다. 풍력발전기가 설치될 지역에 가장 적합한 풍력발전기를 설계하기 위해서는 다양한 형태의 풍력발전기에 대해 출력성능을 평가해야 할 필요가 있다.

출력성능 평가방법으로는 현장실험과 풍동 실험으로 나눌 수 있다. 현장실험에 비하여 풍동실험은 시간과 비용측면에서 유리하지만, 풍동시설의 한계로 인해 단면폐쇄효과가 발생하게 되고, 이는 풍력발전기의 출력성능의 왜곡으로 이어질 수 있다. 따라서 제한된 단면에서 풍동실험 시 폐쇄율에 따라 풍속과 출력의 변화를 확인하여 단면폐쇄효과에 따른 출력을 보정해줄 필요가 있다. 이에 대한 연구로 Chen 과 Liou²⁾는 수평축 소형 풍력발전기에 대해 주속비, 피치 각, 풍동 폐쇄율 및 자유기류의 풍속에 따른 효과에 대한 연구를 진행하여 주속비와 폐쇄율이 클수록 BF(Blockage Factor)는 감소하고 폐쇄율 10% 미만에서는 폐쇄율에 대한 보정이 필요 없다고 하였다. Hirai 등³⁾은 1MW급 프로토타입과 1/30 축소 모형을 이용하여 각각 현장과 폐쇄율 10% 미만의 풍동에서 토크와 풍하중을 측정하여 두 개의 결과가 유사함을 확인하였다. Bahaj 등⁴⁾은 캐비테이션 터널에서 조류발전기의 출력성능 실험

을 실시하여 폐쇄율 18%인 발전기에 대해 폐쇄효과에 대한 보정을 하였다. 이 외에도 사보니우스형 풍력발전기에 대한 출력성능 및 보정방법에 대한 연구도 몇몇 연구자들에 의해 일부 수행되었다(Kamoj, 2007; Ross, 2011)⁵⁶⁾. Cho 등⁷⁾에 의해 다리우스형에 대한 연구도 진행된바 있다. 하지만 이 연구는 풍력발전기의 크기를 변화시켜 폐쇄율을 조정한 연구로, 풍력발전기 크기 변경으로 인한 발전기 자체에서의 출력성능 왜곡이 나타날 수 있는 문제점이 있다.

본 연구에서는 다리우스형 풍력발전기에 대해 풍력발전기 크기는 변화시키지 않고 풍동 크기를 변화시켜 폐쇄율에 따른 풍속 및 출력계수의 영향을 확인하였고, 보정 전·후의 출력계수를 비교하였다.

2. 단면폐쇄 효과

풍력발전기의 풍동실험 시 폐쇄율(blockage ratio)은 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{A_S}{A_T} \quad (1)$$

여기서, A_S 는 풍력발전기 로터의 단면적이고, A_T 는 풍동 시험부의 단면적이다. 무한한 공간상에 존재하는 실제 구조물에 대하여 풍동이라는 경계면을 가지는 제한된 공간 A_T 에서 실험을 수행하기 때문에 단면폐쇄효과가 발생한다. 모형을 통과하는 기류가 풍동시험부의 벽면, 천정면, 바닥면 등의 경계면에 의하여 구속되면, Fig. 1과 같이 시험체 부근에서 풍속은 증가하고 압력은 감소하게 된다. 이러한 이유로 경계면이 없는 경우에 비하여 풍동 내부의 공기역학적 특성이 달라지게 된다⁸⁾.

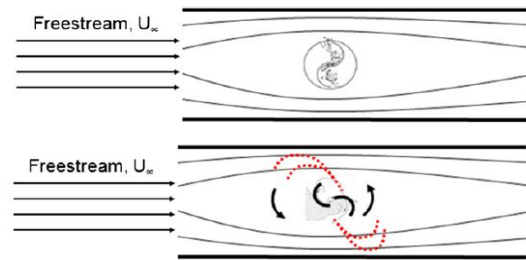


Fig. 1 VAWT influence upon streamline (top) solid blockage, (bottom) wake blockage⁹⁾

단면폐쇄효과의 영향을 피하기 위하여 일반적으로 건축물 풍동실험의 경우에 폐쇄율을 5% 이내로 제한하고 있다¹⁰⁾. 수직축 풍력발전기의 경우에도 폐쇄율이 증가하게 되면 출력계수 특성이 실제와 상이하게 나타날 수 있기 때문에 단면폐쇄효과를 고려해야 한다.

3. 풍동실험

3.1 실험모형 및 실험시설

본 연구에서 사용된 수직축 풍력발전기는 날개길이가 0.4m이고 회전자 직경이 0.35m인 3블레이드 H형 다리우스 형식이다. 블레이드 형식은 NACA4415으로 시위길이와 두께가 각각 75mm와 12.5mm 이다. 이때 샤프트는 두께가 10mm인 베어링 봉을 사용하였다(Fig. 2).

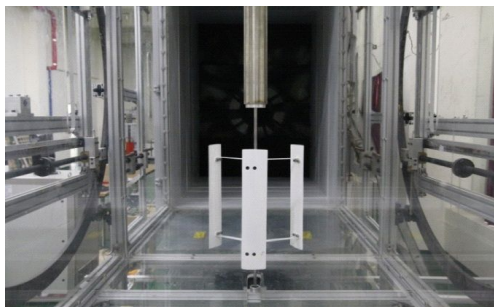
본 연구에서는 폐쇄율 이외의 다른 조건이 풍력발전기의 출력성능에 영향을 끼치지 않도록 하기 위하여 동일한 실험모형 및 계측시스템을 사용하였다. 즉 시스템을 그대로 사용하고 크기가 다른 풍동만 3가지를 사용하였다. 폐쇄율을 변화시키기 위하여 전북대학교 대형풍동실험센터의 고속시험부(high speed test section), 소형풍동(small wind tunnel) 및 전북대학교 경계층풍동실험실의 설풍동(snow wind tunnel)에 각각 Fig. 2의 (a)~(c)와 같이 풍력발전기를 설치하여 실험을 진행하였다. 각 풍동의 구체적인 제원은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Specification of wind tunnel and blockage ratio

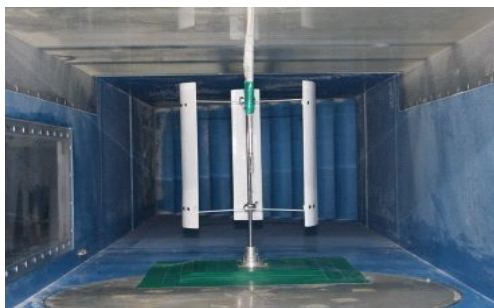
Wind tunnel	Circulation type	Width (m)	Height (m)	Length (m)	Wind speed (m/s)	Blockage ratio (%)
High speed test section	Closed circuit	5	2.5	20	0.5 ~ 30	3.5
Small wind tunnel	Open circuit	1	1.5	5	0.3 ~ 20	13.4
Snow wind tunnel	Closed circuit	0.9	0.6	4	0 ~ 10	24.7



(a) High speed test section



(b) Small wind tunnel



(c) Snow wind tunnel

Fig. 2 Wind turbine at wind tunnel

3.2 실험장치 및 측정시스템

풍력발전기의 출력 성능을 평가하기 위하여 발전기의 전력을 측정하는 방법과 회전축의 토크를 측정하는 방법이 있다. 전자의 경우에 기계손실과 전기손실을 고려한 최종 출력인 전력을 얻는다는 장점이 있어서 대형 풍력발전기의 현장실험에 주로 사용된다. 하지만 발전기를 적절히 설계하지 못하면 출력 성능이 매우 낮게 나올 수 있다. 후자의 경우에 발전기의 전기적인 부분을 분리하여 블레이드에서 회전축의 토크로 전환되는 기계적인 효율만 평가하는 방법으로, 일반적인 풍력발전기 풍동실험에 사용되는 방법이다. 본 연구에서도 후자의 방법을 사용하였다.

수직축 풍력발전기 실험장치는 Fig. 3에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 풍동 내부에는 풍력발전기 블레이드만 설치되어 있고, 블레이드를 지지하는 수직축은 아래위가 베어링으로 지지되어 있다. 이러한 수직축 샤프트는 토크 센서를 거쳐서 최종적으로 AC 모터에 연결되어 있다. 이때 샤프트의 연결을 위하여 커플러가 중간에 설치되어 있다.

풍력발전기의 풍동실험 시 TSR과 출력의 관계를 측정한다. TSR은 블레이드가 회전할 때 블레이드 선단이 가지는 속도이다. 임의 풍속에서 로터에 의하여 발생하는 출력계수의 크기는 블레이드 끝단과 바람 사이의 상 속도에 크게 좌우된다. 출력계수가 TSR에 따라

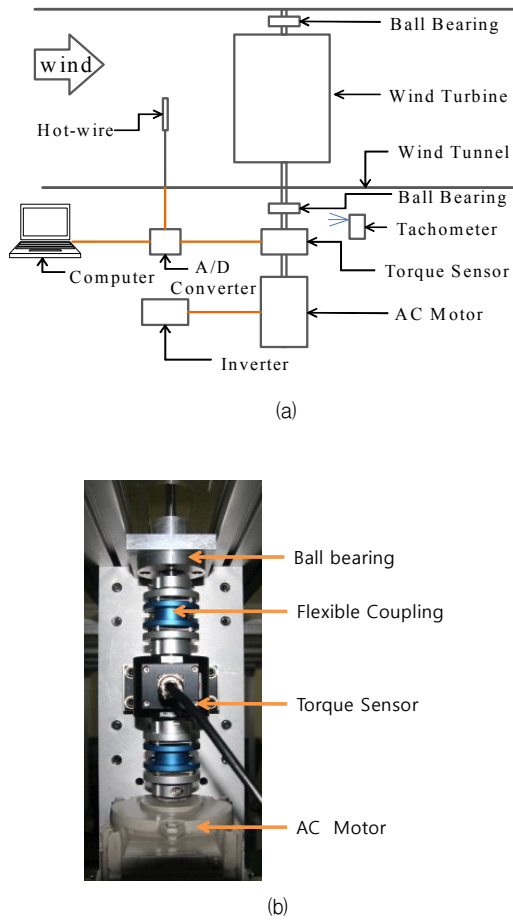


Fig. 3 Experimental setup

달라지지만 에너지 전달이 가장 효율적이고 최대의 출력 성능이 나타나는 최적의 TSR이 존재한다. 그런데 낮은 풍속에서는 원하는 TSR을 낼 수 없고, 높은 풍속에서는 블레이드가 과도하게 회전하여 원하는 TSR보다 훨씬 커진다. 따라서 AC모터는 발전용이 아니라 TSR을 제어하기 위하여 사용되며, 외부에 연결된 인버터를 사용하여 원하는 TSR이 나오도록 조정하였다.

본 연구에서 사용한 AC 모터는 Siemens의 3상 4극 모터로 정격출력 0.37kW, 정격속도는 1670rpm이다. 모터의 rpm을 제어하기 위하여

사용한 인버터는 LS산전의 SV008iG5A-4 모델로 최대출력 주파수는 400Hz, 정격 출력 주파수는 50~60Hz이다. 입력전압은 1상 200~230V, 최대출력 전압은 3상 200~230V이고 0.75kW 모터까지 제어가 가능하다.

토크센서는 수직축 샤프트가 회전중에 출력(토크)를 측정하는 장치이다. 본 연구에서는 rated output이 1.5mV/V이며, 최대 9.8N·m의 토크를 측정할 수 있고, 6000rpm까지 사용가능한 Dacell의 TRD-1K 회전식 토크센서를 사용하였다. 샤프트의 회전속도는 측정범위가 5~200,000rpm이고 정밀도가 0.01%인 Monarch의 PLT200 레이저 타코메터를 사용하여 측정하였다. 풍속은 TSI의 8455 모델로 0.127 ~ 50.8m/s 까지 0.5% 이하의 정확도로 풍속을 측정할 수 있는 열선 풍속계를 사용하였다. 토크 및 풍속 측정 시 sampling rate는 1000Hz로 하여 30초간 측정된 평균값을 사용하였다. 이렇게 측정된 수직축 풍력터빈의 토크에는 베어링 마찰에 의해 에너지가 손실되는 기계 손실이 포함된 출력이다. 측정된 토크와 파워의 관계는 식 (2)과 같이 표현된다¹¹⁾.

$$P^{WT} = T^{WT} \omega \quad (2)$$

여기서, T^{WT} 는 토크센서로부터 측정된 토크(Nm), P^{WT} 는 풍력발전기의 기계적 출력(W)이고 ω 는 로터의 각속도(rad/s)이다.

3.3 출력성능 실험

본 연구에서는 앞서 언급한 수직축 풍력발전기와 측정시스템에 대해 폐쇄율에 따른 풍속과 출력성능 변화를 확인하기 위하여 폐쇄율은 3.5%, 13.4% 및 24.7% 조건에서 실험하였다. 이때 풍속은 4m/s, 5m/s 및 6m/s 조건에서 실험을 진행하였고 실험 조건은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Experimental condition

Case	Blockage ratio	Wind speed	TSR
1	3.5%	4m/s, 5m/s, 6m/s	0 ~ 2
2	13.4%	4m/s, 5m/s, 6m/s	0 ~ 2
3	24.7%	4m/s, 5m/s, 6m/s	0 ~ 2

폐쇄율에 따른 풍속 변화를 측정하기 위하여 풍속계를 설치하였다. 풍속은 풍력발전기 전면에서 느려지기 때문에 풍속계를 너무 가까이 위치시키지 말아야 하며, 반대로 너무 멀 경우에는 측정풍속과 풍력발전기의 풍속에 편차 발생하여 풍속과 출력사이의 상관관계가 떨어질 수 있다. 따라서 설치 위치는 회전자 지름의 2배에서 4배가 적당하며 가장 적절한 거리는 2.5배이다. 수직축 풍력발전기의 수평 축풍력발전기에 대한 등가지름 D 는 $2\sqrt{A_s/\pi}$ 로 정의 되고, 설치거리는 $L+0.5D$ 로 정의 된다¹²⁾. 여기서 A_s 는 회전자의 단면적이고, L 은 로터중심과 풍속계와의 거리이다.

따라서 풍력발전기의 풍상측 방향으로 2.5배 떨어진 1.1m 지점에 열선풍속계를 설치하여 풍속을 측정하였고, 측정된 풍속으로부터 다음 식(3)로 정의되는 폐쇄지수²⁾를 구하였다.

$$BF = \left(\frac{U_T}{U_F} \right)^3 \quad (3)$$

여기서, U_F 는 자유기류 조건에서의 풍속이고 U_T 는 풍력발전기가 설치된 풍동에서의 풍속이다.

폐쇄율 및 풍속별 출력성능은 풍력발전기의 TSR에 따른 출력계수의 관계를 사용하여 확인하였다. 이러한 TSR을 변화시키기 위하여 인버터를 이용하여 AC모터의 rpm을 제어하고, 이때 레이저 타코미터로부터 측정된 rpm으로

부터 식 (4) 및 식 (5)에 의해 TSR을 구하였다.

$$\omega = \frac{2n\pi}{60} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{D\omega}{2U} \quad (5)$$

여기서, ω 는 로터의 각속도(rad/s), n 은 로터의 회전수(RPM), λ 는 주속비(TSR)이고 U 는 풍속(m/s)이다.

또한 출력계수는 회전식 토크센서로부터 나오는 토크를 측정하여 다음의 식 (6)의 관계로부터 구하였다.

$$C_P = \frac{T^{WT}\omega}{\frac{1}{2}\rho A_s U^3} \quad (6)$$

여기서, C_P 는 출력계수, T^{WT} 는 토크센서에서 측정된 토크(Nm), ω 는 로터의 각속도(rad/s), ρ 는 공기밀도(kg/m³), A_s 는 풍력발전기 회전자의 단면적이고 U 는 풍속(m/s)이다.

4. 실험결과

4.1 폐쇄지수

Fig. 4는 실험풍속별 폐쇄율과 TSR에 따른 폐쇄지수의 측정결과를 보여주고 있다. 모든 실험조건에서 TSR이 커질수록 폐쇄지수는 작게는 0.91에서 최대 0.71까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 식 (5)에서 알 수 있듯이 일정한 풍속에서 TSR이 높아지면 RPM 또한 높아지게 되는데, 높은 RPM일수록 풍력발전기 내부를 통과하는 기류의 흐름이 낮은 RPM일 때보다 상대적으로 방해가 많이 받기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 또한 풍속 4m/s

이고 폐쇄율 24.7%인 실험조건을 제외하면, 풍속이 동일한 조건에서는 폐쇄율이 클수록 폐쇄지수가 작아지는 것으로 나타났다.

가 크게 나타났고, 그 차이는 실험풍속이 높아질수록 작아지는 것으로 나타났다. 또한 폐쇄율이 커질수록 최적 TSR도 커지는 것으로

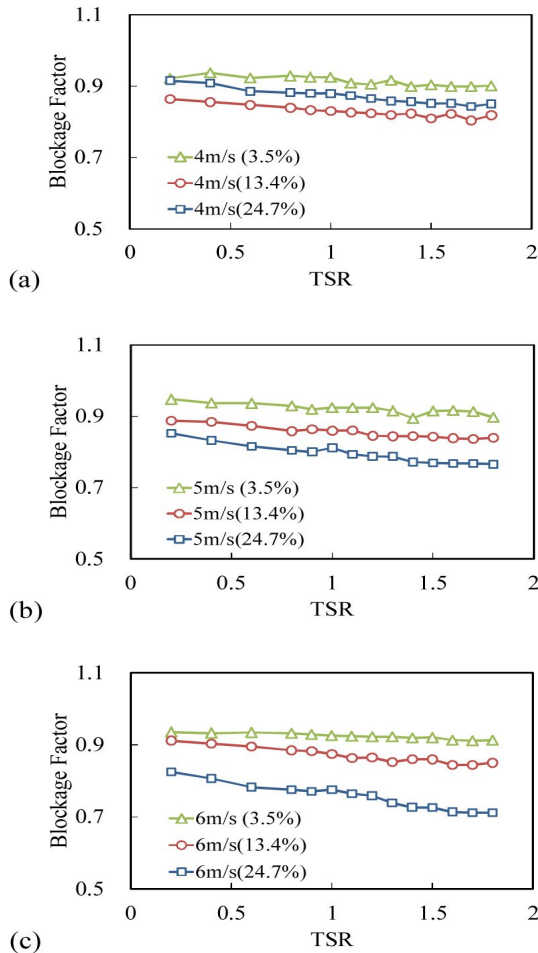


Fig. 4 Relationships between Blockage Factor and TSR under three different blockage ratio : (a) wind speed 4m/s, (b) wind speed 5m/s, (c) wind speed 6m/s

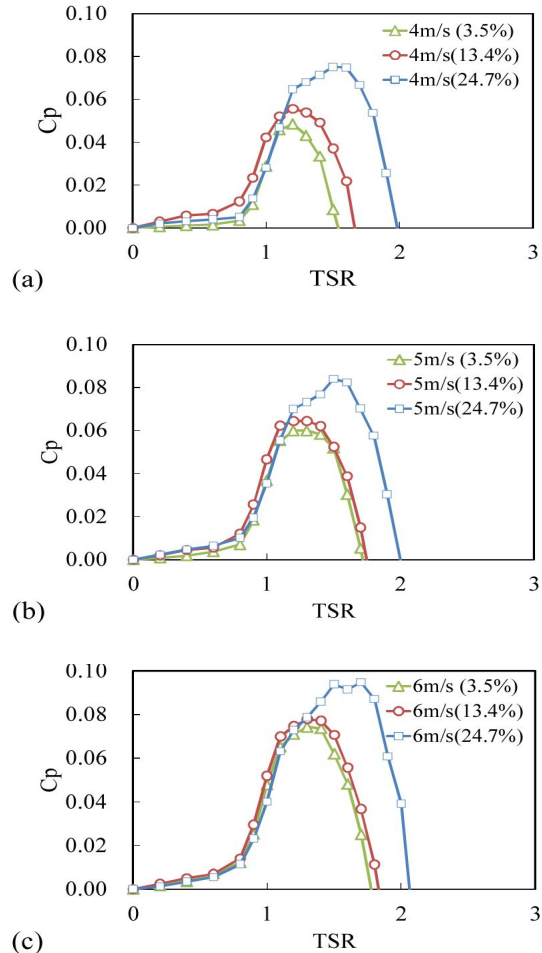


Fig. 5 Relationships between C_p and TSR under three different blockage ratio before correction : (a) wind speed 4m/s, (b) wind speed 5m/s, (c) wind speed 6m/s

4.2 출력계수

Fig. 5에서는 폐쇄율에 따른 출력계수를 보여주고 있다. 실험시 측정된 최대 C_p 의 불확도는 폐쇄율 13.4%의 풍속 4m/s조건에서 가장 컸으며, 그 값은 $0.056 \pm 4.7\%$ (95% 신뢰수준)로 나타났다. 동일 풍속에서 폐쇄율이 클수록 최대 C_p

나타났다. 이는 풍력발전기의 출력성능이 풍동 폐쇄효과에 의해 과대평가됨을 의미한다.

본 연구에서는 이를 보정해주기 위하여 다음의 식 (7)과 같이 간단한 식²⁾을 통하여 출력계수를 보정하였다.

$$C_{PF} = C_{PT} \left(\frac{U_T}{U_F} \right)^3 \quad (7)$$

여기서, C_{PF} 는 자유기류 조건에서의 출력계수, C_{PT} 는 풍동 안에서의 출력계수, U_F 는 자유기류 조건에서의 풍속(m/s)이고 U_T 는 풍동 안에서의 풍속(m/s)이다. 식 (7)에 의한 보정 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 폐쇄율 3.5%에서의 최대 C_p 값을 기준으로 보정전과 보정후의 최대 C_p 값 차이비를 Table 3에 정리하였다.

그 결과를 보면, 폐쇄율 3.5%에 대한 13.4%의 보정전·후의 최대 C_p 값 차이비는 풍속 4m/s인 경우 14.8%에서 4.5%로, 5m/s인 경우 7.5%에서 -1.8%로 그리고 6m/s인 경우 4.7%에서 -3.2%로 모든 풍속조건에서 5% 미만으로 개선되었다.

폐쇄율이 큰 24.7%에 대해서도 풍속이 6m/s인 경우에는 최대 C_p 값 차이비가 27.5%에서 0.7%로 개선되었다. 하지만 풍속이 낮을수록 그 차이비가 커지고 4m/s인 조건에서는 보정후의 최대 C_p 차이비가 오히려 커진 것으로 나타났다.

폐쇄지수를 이용한 간단한 보정방법은 일정한 폐쇄율 이하에서는 상당한 정확도를 가지는 것으로 나타났다. 하지만 폐쇄율이 큰 조건, 특히 풍속이 낮은 조건에 대해서는 정확도가 떨어지고 최적 TSR에 대해 보정을 할 수 없다는 단점이 있는 것으로 나타났다.

Table 3 Errors of measured power coefficients before and after correction

Wind speed	Error of maximum C_p before correction(%)			Error of maximum C_p after correction(%)		
	3.5%	13.4%	24.7%	3.5%	13.4%	24.7%
4m/s	0	14.8	54.5	0	4.5	62.8
5m/s	0	7.5	40.0	0	-1.8	16.6
6m/s	0	4.7	27.5	0	-3.2	-0.7

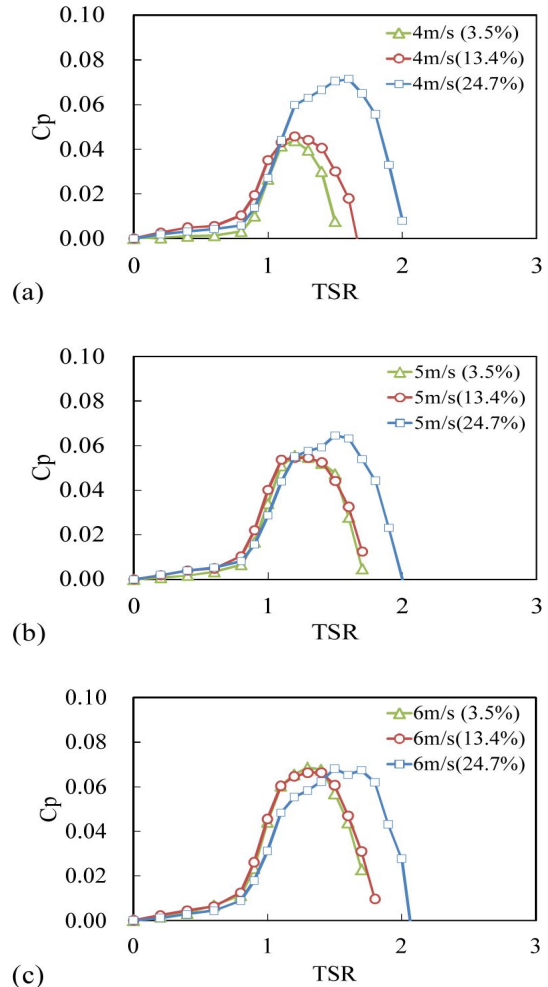


Fig. 6 Relationships between C_p and TSR under three different blockage ratio after correction : (a) wind speed 4m/s, (b) wind speed 5m/s, (c) wind speed 6m/s

5. 결 론

본 연구에서는 다리우스형 수직축 풍력발전기의 출력성능 평가를 위한 풍동실험 시, 풍동의 단면 폐쇄율이 풍력발전기의 출력성능에 어떠한 영향을 미치는지를 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 풍동의 폐쇄지수는 일정하지 않고 폐쇄율과 TSR이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나

타났다. 이는 TSR이 높아짐에 따라 풍력터빈을 통과하는 기류의 흐름이 상대적으로 방해를 많이 받기 때문인 것으로 판단된다.

- (2) 풍력발전기의 출력성능이 풍동 폐쇄효과에 의해 과대평가되는 것으로 나타났다. 즉 풍속이 동일한 경우에 폐쇄율이 클수록 풍력발전기의 출력이 크게 나타났고, 그 차이는 실험풍속이 높아질수록 작아지는 것으로 나타났다. 아울러 폐쇄율이 커질수록 최대 출력이 나오는 최적 성능 최적 TSR도 커지는 것으로 나타났다.
- (3) 폐쇄지수를 이용하여 출력계수를 보정한 결과, 폐쇄율 3.5%와 13.4% 사이의 보정 전·후 최대 C_p 값의 차이비가 모든 풍속에 대해 5% 미만으로 개선되었다. 하지만 폐쇄율이 크고 풍속이 작을수록 보정의 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 향후 폐쇄율이 큰 조건에서도 정확도를 높일 수 있고, 최적 TSR도 보정해줄 수 있는 보정식에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역대학 우수과학지원사업(2013R1A1A4A01005784)에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

Reference

1. IEC 61400-2, Wind turbine generator systems - Part 2 : Safety of small wind turbines, 2004.
2. T.Y. Chen and L.R. Liou, Blockage corrections in wind tunnel tests of small horizontal-axis wind Turbines, *Experimental Thermal and Fluid Science* 35, pp. 565~569, 2011.

3. S. Hirai, A. Honda, and K. Kariromi, Wind loads investigations of HAWT with wind tunnel tests and site measurements, Paper Presented in Wind Power Asia, Beijing, June 2008.
4. A.S. Bahaj, A.F. Molland, and J.R. Chaplin, W.M.J. Batten, Power and trust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank, *Renewable Energy* 32, pp. 407 - 426, 2007.
5. M.A. Kamoji, S.B. Kedare, and S.V. Prabhu, Performance tests on helical Savonius rotors, *Renewable Energy* 34, pp. 521 - 529, 2008.
6. I. Ross and A. Altman, Wind tunnel blockage corrections: Review and application to Savonius vertical-axis wind turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, pp. 523 - 538, 2011.
7. K.P. Cho, S.H. Jeong and I.T. Chang, A Study on blockage effects of vertical axis wind turbines, Vol. 16 No. 3, *The Wind Engineering Institute of Korea*, pp. 117~223, 2012.
8. C.K. Choi and D.H. Kwon, Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behaviors of square section, Vol. 3 No. 1, *The Wind Engineering Institute of Korea*, pp. 89~98, 1999.
9. J.B. Barlow, W.H. Rae and A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*, third edition, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
10. ASCE Standard, *Wind tunnel testing for buildings and other structures*, June 1997.
11. H.S. Kang and C. Meneveau, Direct mechanical torque sensor for model wind turbines, Vol. 21, No. 10, *Measurement Science and Technology*, 2010.
12. IEC 61400-12-1, *Wind turbines - Part 12-1 Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, 2005.