

난류 강도가 수평축 풍력발전기 후류 모델에 미치는 영향

이 승 호¹ · 정 회 갑² · 권 순 덕^{2*}

¹전북대학교 대형풍동실험센터, ²전북대학교 토목공학과

Effects of Turbulence Intensities on Wake Models of Horizontal Wind Turbines

Seung-Ho Lee¹, Houi-Gab Jeong² and Soon-Duck Kwon^{2*}

¹KOCED Wind Tunnel Center, Chonbuk Univ., Jeonju, 561-756, Korea

²Department of Civil Engineering, Chonbuk Univ., Jeonju, 561-756, Korea

Abstract

In this paper, wind tunnel tests of a scaled wind turbine have been performed to investigate the effects of turbulent intensity of oncoming flow on turbine wake field. The scaled turbine model was carefully designed to satisfy the similarity conditions. The wind velocities and turbulent intensities were measured using hotwire anemometer in order to compare with existing wake model. It was found from the tests that the existing wake models well fit with test results at turbulent flow rather than at uniform flow. Finally modified wake model has been proposed based on the measured data.

Keywords : wind turbine, wake model, turbulence intensity, wind tunnel test

1. 서 론

풍력발전기의 발전량은 풍속의 세제곱에 비례하게 되므로, 풍력에너지 사업의 성공을 위해서는 풍력발전기 설치 위치의 정확한 풍속 예측이 가장 우선시 되어야 한다. 풍력발전단지의 경우 각각의 풍력발전기의 설치 간격 및 위치에 따라 그림자 효과 등의 간섭이 발생하게 되며(Fig. 1), 이러한 간섭 효과는 전체 발전량을 약 40%의 큰 손실을 발생시키기도 한다(Crespo, 1999).

간섭효과 등을 최소화하기 위해 풍력발전기 사이 간격을 충분히 이격시키는 방법을 사용하고 있다. 하지만 이는 단위 면적당 에너지 발전량 감소 및 전력 그리드 연결을 위한 부대비용의 증가 등을 유발시키게 된다. 또한 대부분의 풍력발전기가 대기경계층(boundary layer) 범위 내에 설치되어, 주변 지형 및 파랑 등의 영향으로 복잡한 난류 특성을 가지게 되나, 이를 충분히 고려하지 못하여 실제 발전량은 예측시 발전량과 차이를 보이게 된다. 이러한 추정 발전량의 불

확실성으로 인해 유럽 및 미국의 510개 풍력발전단지를 대상으로 평가한 결과 발전량은 예측치의 약 93% 수준인 것으로 나타나고 있다. 이러한 불확실성의 원인으로 난류의 특성과 관련된 풍속, 지형, 조도, 웨이크, 시어 등이 있다.

보다 정확한 풍력발전단지의 발전량 예측을 위해서는 각각의 풍력발전기의 후류에 대한 특성을 파악하는 연구가 선행



Fig. 1 Wake effect in Horns Rev. wind farm(owned by Vattenfall. Phothographer Christian Steiness)

* Corresponding author:

Tel: +82-63-270-2289; E-mail: sdkwon@chonbuk.ac.kr

Received July 11 2014; Revised July 21 2014

Accepted July 23 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

되어야 한다. 자연현상의 바람은 다양한 난류 특성(평균 풍속, 난류 강도, 난류 적분길이 등)을 가지고 있다. 하지만 기존의 대부분의 풍력발전기 후류 모델들은 평균 풍속에 집중하여 개발되었다. 최근 자연 경계층 조건하 난류강도에 대한 연구가 Chamorro(2009), Espana(2012) 등에 의해 일부 실험실 수준에서 진행되었다. 하지만 다양한 난류 특성이 풍력발전기 후류에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가에 대한 연구는 별로 없는 실정이다.

또한 최근 들어 실측된 데이터를 바탕으로 분석한 연구결과와 난류 강도의 변화가 풍력발전기 성능에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 높은 난류 강도를 가지는 낮은 풍속조건에서 낮은 난류 강도 풍속조건보다 오히려 출력 성능이 높아지는 결과를 보이기도 한다(Yoo, 2008; Kim, 2013). 이는 기존에 알려진 업윈드형 Bergey XL.1에 대한 측정 결과(William, 2011)와 상반되는 결과이다. 이에 다양한 기류 조건에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

이에 본 연구에서는 기존 후류 모델을 분석하고, 축소된 풍력발전기 풍동실험을 통해 난류 강도의 변화가 풍력발전기 후류에 미치는 영향을 파악하는 연구를 수행하였고, 측정된 난류 강도를 변수로 하는 수정된 wake model 식을 제안하였다.

2. 풍력발전기 후류 모델

기본적으로 풍력발전기 후류 모델은 풍력발전기의 특성뿐만 아니라 자연 상태의 난류 조건 바람 특성을 잘 반영하여야 한다. 풍력발전기 후류 모델은 풍력발전기로부터 떨어진 거리에 따라 보통 근접후류(near wake)와 원거리후류(far wake)로 분류한다. 풍력발전기의 경우 대부분 원거리후류에 영향을 받으며, 원거리후류 모델은 Jensen model, Larsen model, Frandsen model, Ainslie model 등이 널리 사용되고 있다. 이러한 후류 모델은 풍력발전단지 설계를 위한 상용 프로그램인 WAsP, WindPRO, GH WindFarmer, FLaP 등에 현재까지 널리 사용되고 있다.

일반적으로 잘 알려진 Jensen model의 경우 난류강도를 고려하지 않고 평균 풍속손실의 영향만을 단순하게 고려한 모델이며, 대부분의 후류 모델은 별도의 난류 모델을 조합하여 사용하고 있다. 가장 널리 사용되는 상용프로그램인 WindPRO 최근 버전에 포함된 난류 모델은 DR(Danish Recommendation), Larsen, Frandsen/DIBt model, 그리고 Quarton/TNO 모델이 포함되어 있다. 본 연구에서 비교한 2개의 기본 wake model인 Jensen model과 Larsen model의 보다 자세한 설명은 다음과 같다.

2.1 Jensen model

일반적으로 사용되는 wake model 중 가장 오래된 모델이며, Jensen(1986)의 의해 제시되었다. 굉장히 간단한 모델이며, 기본적으로 풍력발전기 후류가 선형적으로 확산된다고 가정하였고, 풍속 감소는 풍력발전기에서 떨어진 거리에 비례하여 일정하게 감소한다고 제안하였다.

풍력발전기 후류의 크기(D_w)는 식 (1)과 같고, 이때 감소되는 풍속(u)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_w = D(1 + 2ks) \tag{1}$$

$$u = U_\infty \left[1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{(1 + 2ks)^2} \right] \tag{2}$$

여기서, $s = x/D$ 는 풍력발전기에서 떨어진 상대거리를 블레이드의 직경(D)로 나눈 값, U_∞ 는 유입풍속(m/s), C_T 는 추력계수(Thrust coefficient), k 는 후류 감소계수(Wake decay constant)이다. Jensen 모델에서 후류 감소계수는 일반적으로 육상에서는 0.075, 해상에서는 0.04를 사용한다.

2.2 Larsen model(EWTS II)

Larsen model은 Larsen(1996)에 의해 제안된 반해석(semi analytical)적 모델이다. Larsen model은 Prandtl's turbulent boundary layer equation으로부터 유도되었으며, EWTSII(European Wind Turbine Standards II) 모델로도 불린다.

Larsen model은 풍력발전기 후류의 크기를 R_w 라고 하면 Prandtl's 혼합 길이(mixing length)에 따라 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_w = \left[\frac{35}{2\pi} \right]^{1/5} [3c_1^2]^{1/5} [C_T A x]^{1/3} \tag{3}$$

여기서, c_1 은 무차원 혼합 길이(non-dimensional mixing length)이다.

WindPRO에서는 무차원 혼합 길이를 아래와 같은 식 (4)로 사용하였다.

$$c_1 = \left[\frac{D}{2} \right]^{-1/2} (C_T A x_0)^{-5/6} \tag{4}$$

여기서, C_T 는 추력계수, A 는 블레이드의 면적, D 는 블레이드의 직경, x_0 는 식 (5)에 의해 결정되는 근사매개변수(approximi-

mation parameter)이다.

$$x_0 = \frac{9.5D}{\left(\frac{2R_{9.5}}{D_{eff}}\right)^3 - 1} \quad (5)$$

식 (5)에서 나타난 매개변수 $R_{9.5}$ 는 식 (6)에 나타나 있다.

$$R_{9.5} = 0.5[R_{nb} + \min(h, R_{nb})] \quad (6a)$$

$$R_{nb} = \max(1.08D, 1.08D + 21.7D(I_a - 0.05)) \quad (6b)$$

여기서, I_a 는 풍력발전기 허브 높이에서는 난류 강도이며, h 는 풍력발전기 허브 높이이다.

2.3 기타 후류 모델

위의 2가지 모델에 추가하여 Frandsen model이 후류의 모멘텀만 고려하는 운동학적(kinematic) 웨이크 모델로 분류될 수 있다. 그리고 내재(implicit) 웨이크 모델은 Navier-Stokes 방정식에 바탕으로 두고 풍력단지 전체의 유체 흐름을 해석방법을 사용하며, Ainslie model이 대표적이다.

이상의 후류 모델 등은 기본적으로 평균 풍속과 난류강도 및 추력계수(C_T) 등의 함수로 이루어져 있어 다양한 난류의 특성을 반영하지 못하고 있다. 대표적인 원거리 후류 모델에 대한 비교는 Fig. 2에 나타나 있다.

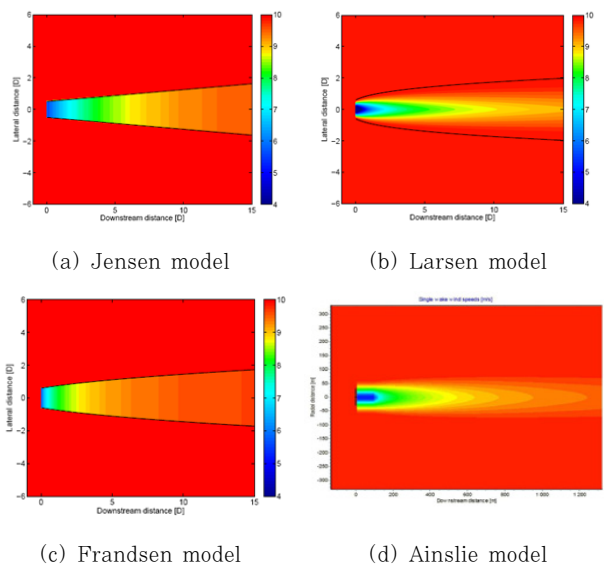


Fig. 2 Comparison of wake models(Renkema, 2007)

3. 풍력발전기 축소모형

풍력발전기 축소모형 실험을 위해서는 다음과 같은 상사가 성립하여야 한다. 첫 번째는 레이놀즈수의 영향이다. 레이놀즈수 상사를 만족하는 축소모형 실험을 위해서는 줄어든 모형 크기에 비례하여 풍속이 증가되거나, 점성계수가 다른 물 등의 다른 유체를 사용하여야 하나 현실적으로 불가능하다. 하지만 블레이드의 레이놀즈수가 후류에 미치는 영향은 일반적으로 크지 않다고 알려져 있으므로(Cal, 2010) 본 연구에서는 레이놀즈수의 영향을 무시하였다.

두 번째로 유입 풍속과 풍력발전기 블레이드의 선단속도의 함수인 주속비(TSR, tip speed ratio)를 맞추어야 한다. 식 (7)에 나타난 것처럼 모형이 축소에 따라 비례하여 블레이드의 회전각속도 역시 증가하여야 한다. 본 연구에서는 모터에 외부에서 전원을 공급하는 방법을 이용하여 블레이드의 회전각속도를 증가시켜 연구 대상 풍력발전기 TSR를 맞추어서 실험을 수행하였다(Chamorro, 2009; Kang, 2010).

$$TSR = \frac{\Omega R}{V} \quad (7)$$

여기서, Ω 는 로터회전속도(rad/s), R 은 로터회전반경(m), V 는 유입 풍속(m/s)이다.

본 연구의 대상이 되는 풍력발전기는 미국 Southwest사가 미국 에너지성 산하의 국립연구소인 National Renewable Energy Laboratory와의 협력을 통해 개발한 Skystream 3.7 모델이다. 정격 출력은 2.4kW, 블레이드의 직경은 3.72m이다. 풍동실험에 사용되는 풍력발전기는 1:70의 스케일을 적용하여 블레이드의 직경은 약 53mm이며, 실제 풍력발전기의 TSR을 고려하여 축소된 풍력발전기에 연결된 모터를 이용하여 능동적으로 제어하였다. 축소된 풍력발전기에 사용된 블레이드는 헬리콥터 RC모형에 사용되는 Walkera Technology 사의 블레이드이며, 블레이드의 폭과 두께는 5.5mm와 0.6mm

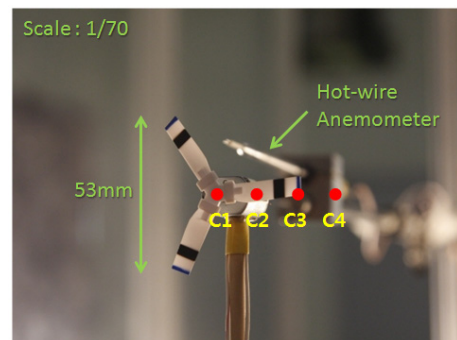


Fig. 3 Wind-turbine model and measurement point

이다.

풍동실험은 국가과학기술연구망(KREONET)에 연결된 전북대학교 대형풍동실험센터 소형풍동을 이용하여 수행하였다. 시험부의 폭은 1m 높이는 1.5m, 최대 풍속은 22m/s이다. 1:70의 스케일을 가지는 풍력발전기 후류 측정을 위해서 Dantec사의 열선풍속계를 사용하였으며, 풍력발전기 직경의 15배 거리까지 후류를 측정하였다. 풍력발전기 축소모형을 이용한 후류 측정 사진은 Fig. 3에 나타나 있다.

4. 풍동실험 및 결과

풍동실험 결과와의 비교에 앞서서 기존의 대표적인 wake model의 후류 영향권의 크기를 본 연구에서 고려한 축소된 풍력발전기에 적용하여 비교해 보았다. 비교를 위한 각각의 wake model은 MATLAB 7.8.0(R2009a)버전을 사용하여 해석했으며, wake model에 필요한 평균 풍속 및 풍속 감소 계수 등은 풍동실험을 통해 측정된 값을 사용하였다. 비교를 위한 해석결과는 Fig. 4에 나타나있다. 기본적으로 후류 영향권의 크기는 비교한 3가지의 wake model 모두 비슷한 크기를 가지는 것으로 나타났고, 15D 거리에서 블레이드의 직경 53mm의 약 1.7~1.8배의 크기를 가지는 것으로 나타났다.

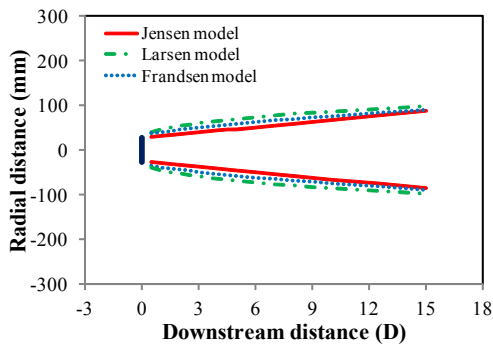


Fig. 4 Comparison of wake development after a single turbine according to wake models

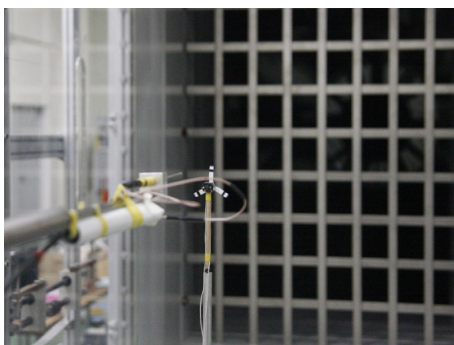


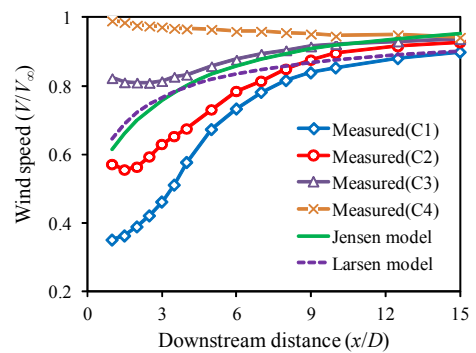
Fig. 5 Wind-turbine model with grid turbulence

풍력발전기 후류의 영향을 살펴보기 위하여 풍력발전기 정중앙(C1)을 포함하여 총 4지점에서 후류를 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 3에 나타나 있으며, 각각의 위치에서 등류 및 약 5%의 난류(격자난류) 조건에서 실험을 수행하였다. 격자난류 조건하 풍동실험 사진은 Fig. 5에 나타나있다.

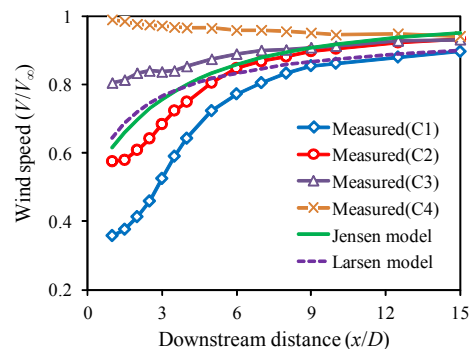
풍동실험을 통해 1:70의 스케일을 가지는 풍력발전기 축소모형의 난류 강도 변화에 따른 평균 풍속 저감율을 기존의 후류 모델인 Jensen model과 Larsen model(C2지점)과 비교하여 보았다(Fig. 6). 비교 결과 5%의 난류 강도를 가지는 풍동실험 조건에서 풍력발전기 직경의 6배 이상 떨어진 원거리 후류에서는 기존의 후류 모델과 비교적 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 이는 난류 강도의 영향이 후류에 영향을 미치며, 풍력발전기 성능 평가를 위해서는 보다 현실적인 난류 강도에 대한 영향이 고려되어야 한다는 것을 의미한다.

Fig. 7에 나타난 있는 것처럼 기존의 난류 강도 모델에 비하여 본 연구에서 측정된 난류 강도는 풍력발전기 제어를 위한 설치된 모터에 의해 발생한 비정상적인 난류 강도 증가 측정되었다. 실제 풍력발전단지에 사용되는 대형 풍력발전기에서는 허브 및 닛셀의 상대적인 크기가 작아서 그 영향을 미미하다고 판단된다.

측정 위치와 상관없이 떨어진 거리의 함수로 표현되어 평균 풍속이 일정한 Jensen model과 달리 Larsen model은

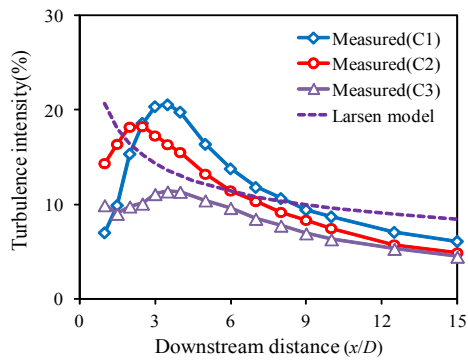


(a) Smooth flow

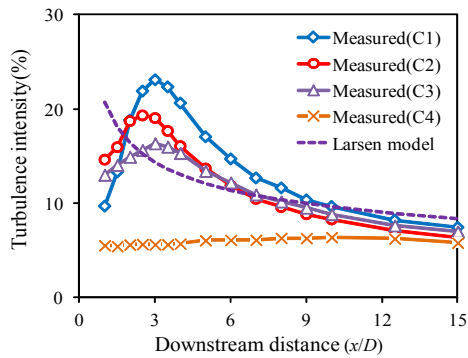


(b) Turbulence flow

Fig. 6 Reduction of mean wind speed according to turbulence conditions



(a) Smooth flow



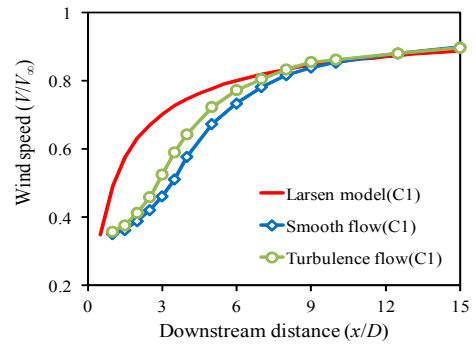
(b) Turbulence flow

Fig. 7 Turbulence intensity according to turbulence conditions

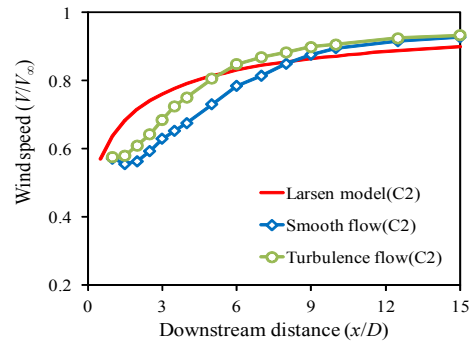
측정 위치에 따른 평균 풍속 저감율의 직접 비교가 가능하므로, 풍동실험 결과와 비교해 보았다(Fig. 8). 풍동실험 결과 풍력발전기 제어를 위한 모터의 영향으로 일부 근접 후류 영역에서는 풍속 저감 효과가 기존의 Larsen model에 비해 보다 크게 나타났으며, 난류 강도 역시 일부 영향을 받는 것으로 나타났다. 풍력발전기 직경의 6배 이상 떨어진 원거리 후류 영역에서는 기존 풍력발전기 후류 모델과 비교적 잘 일치하고 있다.

본 연구에서는 제어를 위한 모터의 영향으로 풍력발전기 축소모형 실험에서 발생된 비정상적인 난류 강도를 효과적으로 보정하기 위하여 측정된 난류 강도를 바탕으로 수정된 Larsen model 식을 제안하였다. 제안된 보정식은 기본적으로 Larsen model의 후류 영향권의 크기의 함수에 포함된 유입 풍속의 난류 강도 값에 후류에 측정된 실측 난류 강도의 차이의 비율을 1차식으로 보정하였으며, Larsen model의 후류 영향 반경에 관한 식 (6)에 추가 반영하였다. 보정된 식은 식 (8)에 나타나 있고, 제안된 wake model과 기존 결과 비교는 Fig. 9에 나타나 있다.

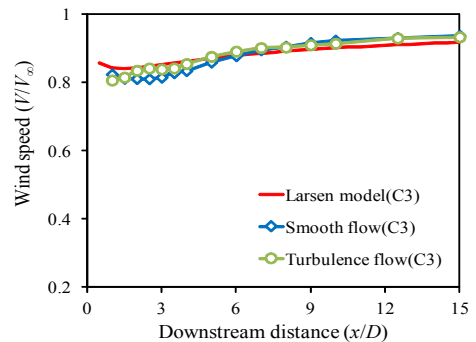
$$R_{nb} = \max(1.08D, 1.08D + 21.7D(I_u - 0.05) + 0.037(I_{um,x}/U_\infty)) \quad (8)$$



(a) C1



(b) C2



(c) C3

Fig. 8 Reduction of mean wind speed according to measurement point

여기서, I_{um,x_T} 는 풍동실험을 통해 풍력발전기 후류 방향(x)에서 측정된 난류 강도의 차이, U_∞ 는 유입 풍속이다.

측정된 난류 강도 실험결과를 바탕으로 제안한 난류 wake model은 실험 모형의 비정상적인 난류 강도로 인한 평균풍속의 영향 반경 및 크기를 5D 이상의 원거리 후류에서는 보다 효과적으로 보정하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제안된 난류 강도 보정식은 1:70 스케일의 작은 풍력발전기 모델을 대상으로 제시되는 제안식이다. 폐쇄율을 넘지 않는 범위 내에서 보다 큰 모델을 이용한 후류 측정 실험이 반드시 필요하며, 향후 본 연구와 유사한 방법으로 다양한 난류 강도와 평균 풍속 조건하에서 측정된 데이터를 바탕으로 기

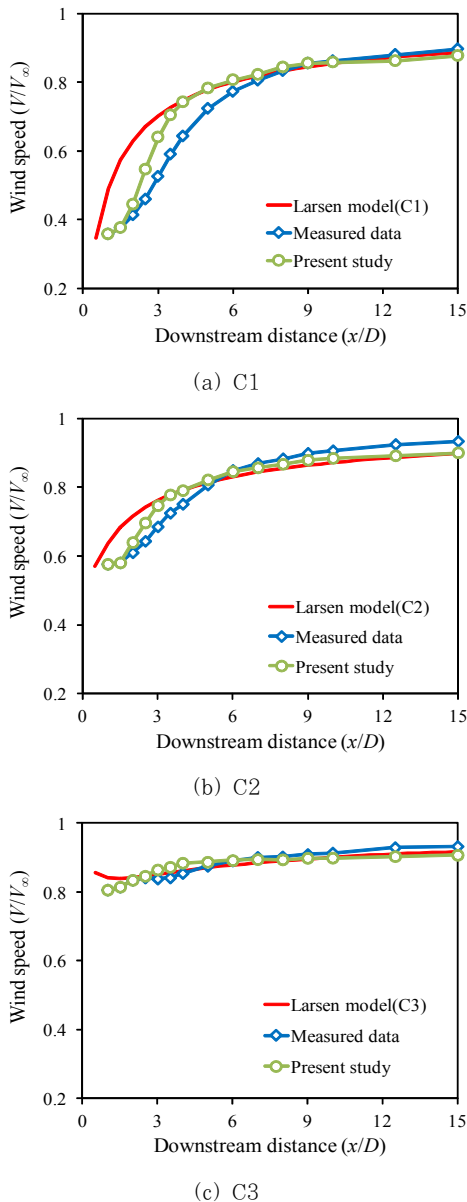


Fig. 9 Comparison with proposed wake model

존의 모델보다 정밀한 원거리 후류 모델이 제시되어야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 난류 특성이 풍력발전기 후류에 미치는 영향을 살펴보고자 축소된 풍력발전기를 이용하여 난류강도 조건에 따른 후류의 변화를 알아보았다. 실험 결과 원거리후류 영역에서 평균 풍속 및 난류강도가 등류 조건보다 격자 난류 조건에서 기존의 후류 모델과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 측정 위치에 따라 난류강도 및 평균 풍속의 변화를 보이고 있으며, 이를 합리적으로 고려하여야 하는 것으로 나타났다. 또한 측정된 난류강도를 바탕으로 수정된 wake model

식을 제안하였으며, 제한된 식은 실험 모형의 비정상적인 난류강도로 인한 평균풍속의 영향 변경 및 크기를 5D 이상의 원거리 후류에서는 보다 효과적으로 보정하고 있음을 알 수 있었다. 향후 폐쇄율의 영향을 받지 않는 보다 큰 풍력발전기 모델을 이용하여, 원거리 후류 모델에 관한 정밀한 실험 등의 추가 연구가 필요하며, 보다 다양한 난류 특성을 고려하여 풍력발전기 후류에 미치는 영향에 대하여 평가하고 이를 분석할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토교통부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다. 또한 본 실험에 KREONET망 서비스를 이용할 수 있도록 해주신 KISIT에 감사드립니다.

Reference

Cal, R.B., Lebrón, J., Castillo, L., Kang, H.S., Meneveau, C. (2010). Experimental Study of the Horizontally Averaged Flow Structure in a Model Wind-turbine Array Boundary Layer, *J. of Renewable Sustainable Energy*, 2, 013106.

Chamorro, L.P., Porté-Agel, F. (2009). A Wind-tunnel Investigation of Wind-turbine Wakes: Boundary-layer Turbulence Effects, *Boundary-Layer Meteorology*, 132, pp.129~49.

Choi, H.C., Kim, D.H., Kim, D.M. Park, K.K (2010) Seismic Response Analysis of a MW Class Wind-Turbine Considering Applied Wind Loads, *J. Comput. Struct.Eng. Inst. Korea*, 23(2), pp.209~216.

Crespo, A., Hernandez, J., Frandsen, S. (1999) Survey of Modelling Methods for Wind Turbine Wakes and Wind Farms, *Wind Energy*, 2(1), pp.1~24.

España, G., Aubrun, S., Loyer, S., Devinant, P. (2012) Wind Tunnel Study of the Wake Meandering Downstream of a Modelled Wind Turbine as an Effect of Large Scale Turbulent Eddies, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 101, pp.24~33.

Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann O., Larsen, S. Hojstrup, J. (2006),

- Analytical Modeling of Wind Speed Deficit in Large Offshore Wind Farms, *Wind Energy*, 9, pp.39~53.
- IEC** (2005). Wind Turbines. Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines. IEC 61400-12-1. *International Electrotechnical Commission*.
- Kang, H.S., Meneveau, C.** (2010). Direct Mechanical Torque Sensor for Model Wind Turbines, *Measurement Science and Technology*, 21(105206), pp.1~10.
- Kim, S.W.** (2013). Turbulence Intensity Effects on Small Wind Turbine Power Performance, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 33(6), pp.19~25.
- Larsen, G.C., Hojstrup, J. and Madsen, H.A.** (1996) Wind Fields in Wakes, *EUWEC'96*, Gothenburg. Jernmany.
- McTavish, S., Feszty, D., Nitzsche, F.** (2013). Evaluating Reynolds Number Effects in Small-scale Wind Turbine Experiments, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 120, pp.81~90.
- Okulov, V.L., Sorensen, J.N.** (2007). Stability of Helical Tip Vortices in a Rotor Far Wake, *J. of Fluid Mechanics*, 576, pp.1~25.
- Renkema D.J.** (2007). Validation of Wind Turbine Wake Models Using Wind Farm Data and Wind Tunnel Measurements. Master Thesis, *Delft University of Technology*.
- Vermeer, L.J., Sorensen, J.N., Crespo, A.** (2003). Wind Turbine Wake Aerodynamics, *Aerospace Sciences*, 39, pp.467~510.
- Yoo, N.S., Yoon, K.Y.** (2008) A Study on Effect of Wind Characteristics on the Wind Turbine Power Output, *J. of Wind Engineering Institute of Korea*, 12(2), pp.75~83.

요 지

본 논문에서는 난류 강도가 풍력발전기 후류에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 축소된 풍력발전기 모델을 이용하여 풍동 실험을 수행하였다. 실험 결과 측정 위치에 따라 풍력발전기가 가지는 특성에 따라 후류의 형태가 달라지며, 난류 강도에 따른 영향이 반드시 고려되어야 하는 것으로 나타났다. 난류 강도만을 일부 고려한 격자 난류 조건에서 등류 조건보다 기존의 후류 모델과 보다 더 잘 일치하는 경향을 보이고 있으며, 측정된 난류 강도 값을 바탕으로 수정된 후류 모델을 제안하였다. 향후 다양한 난류 특성이 고려된 합리적인 모델이 필요하다고 판단된다.

핵심용어 : 풍력발전기, 후류 모델, 난류 강도, 풍동실험