

서로 다른 축척비를 갖는 수평축 풍력발전기 축소모형의 후류 특성에 대한 실험적 연구

박성수¹, 김진옥¹, 강상균¹, 서대원², 오정근², 이장호^{3*}
¹군산대학교 해상풍력연구원, ²군산대학교 조선해양공학과, ³군산대학교 기계공학부

Wake Characteristics Experimental Study of Scale Models of Horizontal Axis Wind Turbines with Different Scale Factors

Sung Soo Park¹, Jin Ok Kim¹, Sangkyun Kang¹,
Dae-Won Seo², Jungkeun Oh², Jang-Ho Lee^{3*}

¹Institute of Offshore Wind Energy, Kunsan National University

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University

³School of Mechanical System Engineering, Kunsan National University

요약 바람이 풍력터빈을 지나가며 에너지가 추출될 때, 바람의 속도는 감소하고 난류강도는 증가하는 후류가 생성된다. 이러한 후류는 풍력발전단지 내에서 후방에 위치한 풍력터빈의 출력이 감소하는 원인이며, 풍력발전단지의 다양한 전력 손실 중 가장 높은 비중을 갖는 것으로 확인되고 있다. 이러한 손실을 최소화하기 위해 수치해석이나 축소모형의 풍동실험 등 후류 분석을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만 축소모형에 대한 대부분의 연구는 단일 모형을 활용하여 후류를 분석하기 때문에 서로 다른 축척비를 갖는 축소모형의 후류에 대한 상관관계를 분석한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 축척비를 갖는 축소모형의 풍동실험을 통해, 축소모형 크기에 따른 상관관계가 분석되었다.

Abstract As wind passes through a wind turbine and undergoes energy extraction, the wake generated reduces wind speed, increases turbulence, and significantly reduces the power outputs of wind turbines in the wake paths created in wind farms. Various numerical simulations and scale model wind tunnel experiments have been conducted to minimize these losses. However, a single model was used to analyze wake losses in most scale model studies, and as a result, few studies have investigated the effects of model scale on wake losses. In this study, we studied the effects of model scale on wake characteristics using wind tunnel experiments.

Keywords : Wind Turbine, Wind Tunnel Test, Scale Model, Wake, Tip Speed Ratio

1. 서론

풍력터빈은 바람의 운동에너지를 블레이드를 통해 기계적 에너지로 변환하고, 발전기를 통해 전기에너지로

변환하는 장치이다[1,2]. 바람이 풍력터빈을 지나가며 에너지가 추출될 때, 바람의 속도는 감소하고, 난류강도는 증가하는 후류가 생성된다. 이러한 후류로 인해 풍력발전단지 내에서 후방에 위치한 풍력터빈의 출력이 감소하

This work was supported by KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER CO., LTD(No. 22-Tech-06) and by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF 2017R1D1A3B06032145).

*Corresponding Author : Jang-Ho Lee(Kunsan Univ.)

email: jangho@kunsan.ac.kr

Received August 28, 2023

Accepted October 6, 2023

Revised September 21, 2023

Published October 31, 2023

게 되며, 풍력발전단지의 다양한 전력 손실 중 가장 높은 비중을 갖는 것으로 확인되고 있다[1]. 또한 후류는 난류 강도가 크기 때문에 후방에 위치한 풍력터빈에 반복하중을 야기해 피로하중을 증가시켜 설계수명에도 영향을 미치게 된다. 따라서 풍력발전단지 내 터빈 배치 시 후류를 주요 인자로 고려하여 에너지생산량을 최대화하고, 후방에 위치한 풍력터빈의 피로파괴를 방지하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다[3,4].

후류는 일반적으로 근접 후류와 원거리 후류로 분류된다. 근접 후류는 풍력 블레이드 직경의 약 1~2배 후방 영역까지를 의미하며, 풍력터빈의 기하학적 형상 및 운용조건에 상대적으로 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다. 2배 이상의 후방 영역은 원거리 후류를 의미하며, 약 2~4배 후방 영역은 난류특성, 지형의 영향, 후류 모델 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이후 영역에서는 풍속의 감소가 둔해지게 된다[3,5].

풍력터빈의 후류 분석을 위해 수치해석이나 풍동실험 등 다양한 연구가 수행되고 있다. 수치해석의 경우 난류 모델링 등에 대한 검증이 충분히 이루어지지 않고 제한된 연구 결과만 제시되고 있는 상황이기 때문에[5], 정확한 분석을 위해서는 수치해석 결과와 풍동실험 결과가 서로 비교되어 검증될 필요가 있다. 실제 축소모형 후류에 대한 풍동실험도 다수 이루어지고 있지만, 대부분의 연구에서는[6-8] 단일 축소모형만으로 실험을 진행하기 때문에 서로 다른 축척비의 축소모형에서 발생하는 상관관계를 분석하는 연구는 부족한 실정이다. 따라서 축소모형을 활용하여 보다 신뢰성 있는 후류 예측을 위해 실제 풍력터빈의 후류, 축소모형의 풍동실험이 서로 연동되어 서로 간의 비교 및 상관관계 분석 등의 연구가 필요한 시점이다.

본 연구는 이를 위한 기초 연구로, 서로 다른 축척비를 갖는 축소모형의 후류를 비교 분석하고 서로 간의 상관관계를 확인하였다. 이를 위해 본 연구진이 보유하고 있는 20kW 소형풍력터빈을 기반으로 축척비 1:33, 1:50, 1:67의 축소모형을 제작하고, 자체 개발된 실험실 규모의 풍동을 활용하여 후류 실험이 진행되었다. 실험 시 20kW 소형풍력터빈의 정격 주속비 상사를 맞춰 풍동 내 유동장 분석 및 후류가 분석되었다. 추후 자체 보유하고 있는 20kW 소형풍력터빈의 후류 측정 데이터 및 수치해석 결과와 비교 분석을 통해, 실제 소형풍력터빈과 축소모형의 상관관계를 분석하는 기초 자료로 활용할 예정이다.

2. 축소모형

실험에 활용된 축소모형은 본 연구진이 보유하고 있는 20kW급 소형풍력터빈(상용제품)을 참조하여 제작되었다. 해당 풍력터빈은 세 개의 블레이드로 구성된 Upwind 타입으로, 로터 회전직경은 10 m, 풍력터빈 허브 높이는 24 m이다. 정격 풍속은 11.5 m/s, 정격 회전수는 125 rpm이며, 이때 주속비는 5.7이다.

풍력터빈의 축소모형 실험을 위해서는 기하학적 상사, 주속비(Tip Speed Ratio, TSR) 상사, Reynolds 수 상사 등에 대한 검토가 필요하다. 축소모형의 기하학적 상사를 맞추기 위해 3D 스캔을 통해 20 kW 소형풍력터빈 블레이드의 형상을 확보하였으며, 허브, 너셀 및 타워 등은 제원표 및 실측을 통해 확보하였다. 20 kW 풍력터빈 축소모델의 축척비에 따른 후류 상관관계를 분석하기 위해 서로 다른 축척비를 갖는 3개의 축소모형이 활용되었다.

풍동실험 시 단면 폐쇄효과의 영향을 방지하기 위해서는 일반적으로 폐쇄율이 10 % 미만, 이상적인 경우는 5 % 미만[9]으로 설정해야하기 때문에, 축소모형의 최대크기는 20 kW 풍력터빈의 약 1:33 수준으로 설정하였다. 이때 축소모형의 회전직경은 0.3 m이며, 회전직경을 기준으로 폐쇄율은 4.9 %이다. 나머지 축소모델은 각각 1:50, 1:67 규모로 회전직경은 0.2 m, 0.15 m이며, 폐쇄율은 2.2 %, 1.2 %이다. 블레이드 형상 및 각 단면에서의 익형과 풍력터빈의 전체적인 형상 정보는 Fig. 1과 Table 1에 나타내었으며, 제작된 축소모형의 형상은 Fig. 2와 같다. 또한 유입류와 풍력터빈 블레이드 선단속도의 함수인 주속비 상사를 맞추기 위해서는 Eq. (1)과 같이 축소모형의 크기에 따라 블레이드의 회전속도가 증가해야 한다. 본 연구에서는 풍동의 풍속만으로 주속비를 제어하는 데에는 한계가 있기 때문에, 너셀부에 DC 모터를 부착하여 외부에서 전원을 공급하는 방법을 통해 블레이드의 회전속도를 증가시켜 주속비 상사를 구현하였다[3,10].

$$TSR = \frac{R\omega}{V_\infty} \quad (1)$$

Where, R denotes rotor diameter, ω denotes rotor rotation speed, V_∞ denotes inflow wind speed

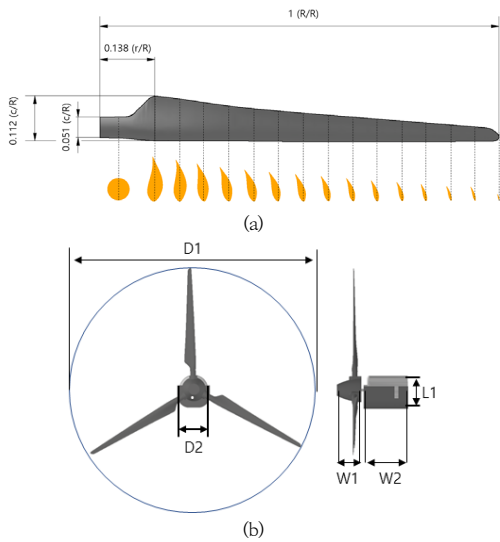


Fig. 1. Geometry of wind turbine scale model
 (a) Blade normalized to radius (R: Blade length, c: Chord length) (b) Normalized of wind blade size (D: Diameter, L: Nacelle height, W1: Rotor length, W2: Nacelle length)

Table 1. Normalized wind turbine blade and shape size

| Category | Scale [-] | 1:33 [m] | 1:50 [m] | 1:67 [m] |
|----------------|-----------|----------|----------|----------|
| D1 | 1.0 D | 0.3 | 0.2 | 0.15 |
| D2 | - | 0.04 | 0.026 | 0.026 |
| L1 | 0.13 D | 0.04 | 0.026 | 0.02 |
| W1 | 0.10 D | 0.03 | 0.02 | 0.015 |
| W2 | 0.18 D | 0.055 | 0.036 | 0.027 |
| Blockage ratio | - | 4.9 % | 2.2 % | 1.2 % |

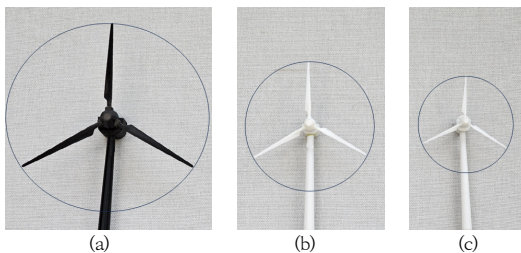


Fig. 2. Experimental wind turbine scale model
 (a) 1:33 scale (b) 1:50 scale (c) 1:67 scale

Eq. (2)와 같이 표현되는 Reynolds 수의 상사를 만족하는 축소모형 실험을 위해서는 축소모형 크기에 따라 풍속이 증가되거나, 점성계수가 높은 물 등의 다른 유체를 사용해야 하지만 현실적으로 Reynolds 수 상사를 맞추는 것은 어려운 실정이다. 하지만 Reynolds 수가 후류

에 미치는 영향은 일반적으로 크지 않다고 알려져 있으므로[11-13], 본 연구에서는 Reynolds 수의 영향은 무시되었다.

$$Re = \frac{\rho V_R c}{\mu} \quad (2)$$

Where, ρ denotes air density, V_R denotes relative wind speed, c denotes chord length, μ denotes viscosity

3. 풍동실험

3.1 풍동

본 연구에서는 축척비에 따른 축소모형의 후류 실험을 위해 터빈 축소모형 및 익형 실험 등에 활용할 목적으로 개발된 실험실 규모의 풍동이 활용되었다[14]. 해당 풍동은 일반적인 풍동의 구조와 달리 확산부, 정체실 등이 구분되어있지 않고, 96개의 고유량 DC fan이 부착된 송풍부에서 발생하는 유동이 바로 시험부로 이어진 후 밖으로 배출되는 개회로식의 풍동이다. 송풍부와 시험부를 결속하는 위치에 난류강도 조절용 스크린이 부착되어있고, 실내 설치 조건을 고려하여 탈·부착이 가능한 구조로 제작되었다. PWM 제어를 통해 최소 0.9 m/s부터 최대 6.7 m/s 까지, 약 0.2 m/s 간격으로 풍속 조절이 가능하며, 선행연구를 통해 풍동의 최대풍속 조건에서 시험부의 평균풍속은 6.7 m/s, 난류강도는 평균 1.83%, 공간편차는 0.117 m/s, 로 확인되었다. 풍동 시험부의 크기는 0.985 m (H) x 1.47 m (W) x 2.56 m (L)이며, 상세 사양은 Table 2에 나타내었다[14].

3.2 실험 방법

후류 실험 및 분석을 위해서는 풍력터빈으로 유입되는 유입류와 풍력터빈을 지나가는 후류가 모두 측정되어야 한다. 이를 위해 Fig. 3과 같이 풍동의 하단부에 레일을 설치하고, 레일 상단에 열선유속계를 결합하여 유속 측정 장비가 구축되었다.

유입류 측정 위치는 축소모형별 회전 직경에 따라 무차원화하여 측정하였다. 유입류 측정은 1:33 축소모형의 경우 세 색선이 측정되었으며, 1:50과 1:67 축소모형은 총 네 색선이 측정되었다. 후류는 축소모형별 회전 직경에 따라 1:33 scale의 경우 1~4D, 1:50 scale은 1~6D, 1:67 scale은 1~ 8D 까지 측정되었다. 축소모형의 유입

류 및 후류의 측정구간은 Table 3과 같으며, 풍동의 최대풍속 조건에서 진행되었다.

Table 2. Specification of wind tunnel[14]

| Specification | | Size |
|---------------|------------------|-----------|
| Testable size | Height (H) | 0.985 m |
| | Width (W) | 1.47 m |
| | Length (L) | 2.56 m |
| DC fan | Rated Voltage | 24 VDC |
| | Input currents | 0.88 A |
| | Rotational speed | 4,600 RPM |
| | Max. flow | 200.9 CFM |
| Wind speed | Max | 6.7 m/s |
| | Min | 0.9 m/s |

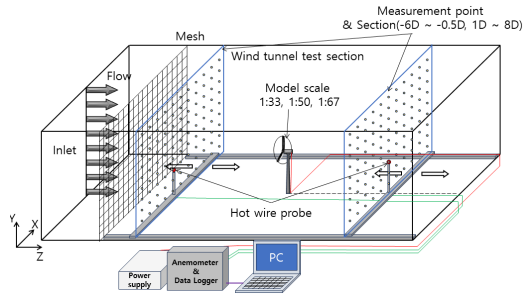


Fig. 3. Schematic diagram of the wind turbine wake experimental setup

Table 3. Inflow and wake measurement ranges

| Scale | | 1:33 | 1:50 | 1:67 |
|--------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Inflow | relative coordinate | -1D, -2D, -3D | -1D, -2D, -3D, -4.5D | -1D, -2D, -3D, -6D |
| | Wake (relative coordinate) | 1D ~ 4D (interval:1D) | 1D ~ 6D (interval:1D) | 1D ~ 8D (interval:1D) |

각 섹션에서 풍속 측정 포인트는 Fig. 4와 같다. 축소 모형으로 인해 발생하는 후류 및 블레이드 회전에 의해 발생하는 후류를 측정하기 위해 축소모형의 로터 중심과 로터의 중심으로부터 회전직경에 비례하여 측정 포인트를 선정하였으며, 한 섹션 당 총 99개의 포인트에서 풍속을 측정하였다. 후류 실험의 모습은 Fig. 5와 같다. 유입류 및 후류 측정시 OMEGA 사의 열선유속계 (HHF-SD1)가 활용되었고, 실험 전 한국산업기술시험원에서 검교정이 수행되었다(신뢰수준은 약 95%, 상대측정불확도는 약 2.6%). 풍속은 각 측정 포인트에서 1Hz 간격으로 총 60초간 측정되었으며, Eq. (3)과 같이 평균화되었다.

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (3)$$

Where, V denotes measured wind speed, n denotes number of measured data

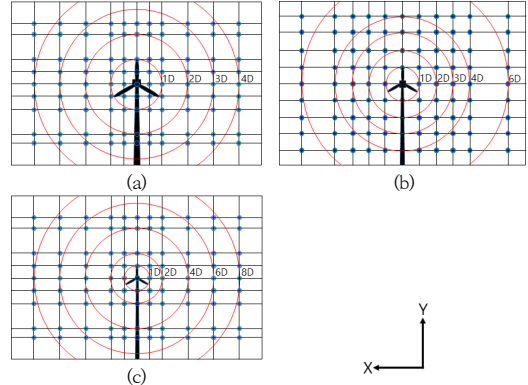


Fig. 4. Layout of the measuring positions of each scale model
(a) 1:33 Scale (b) 1:50 Scale (c) 1:67 scale

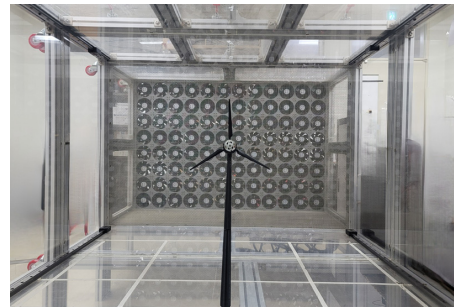


Fig. 5. Experimental setup of scaled wind turbine in the wind tunnel test

4. 실험 결과

4.1 유동장 분석

후류를 객관적으로 평가하기 위해 각 측정 포인트에서 Eq. (4)와 같이 유입류와 후류의 비로 무차원화 되었다. 이때 유입류는 축소모형으로부터 전방 3D에서 측정된 풍속이 활용되었다. 이를 Fig. 6과 같은 형태로 각 섹션 별 풍속 분포를 확인한 후 풍동 내 전체적인 유입류와 후류의 유동장이 분석되었다.

$$V_{wake} = \frac{\bar{V}}{V_{\infty}} \quad (4)$$

Where, \bar{V} denotes mean wind speed, V_∞ denotes inflow wind speed

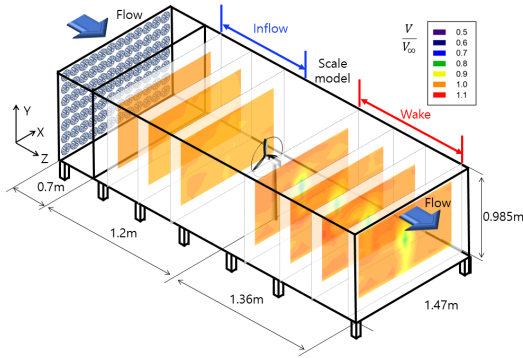


Fig. 6. Normalized flow field of a 1:33 scale model in a wind tunnel

축소모형별 후류 실험 이전에, 1:33 축소모형을 활용하여 실험의 재현성을 확인하였다. 로터의 중심을 기준으로 하여 후방으로 발생하는 후류를 측정하였으며, Eq. (4)와 같이 측정된 유입류에 대한 후류의 비로 무차원화하였다. 재현성 실험 결과 평균 1.12%의 오차를 갖는 것으로 확인되었으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

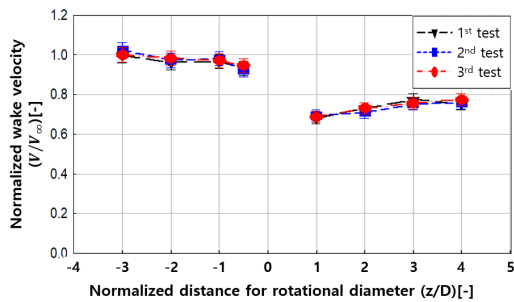


Fig. 7. Repeatability results of the wind turbine wake experiment

축소모형별 후류 실험을 통해 Fig. 8, Fig. 9와 같이 풍동 내 유입류와 후류의 유동장이 확인되었다[15]. Fig. 8은 축소모형들의 로터 중심을 기준으로 Y-Z 평면(수직)에 대한 유동장이며, Fig. 9는 축소모형들의 로터 중심을 기준으로 X-Z 평면(수평)에 대한 유동장이다. Fig. 8, Fig. 9에서 x축은 풍력터빈 후방 영역에 대한 거리를 풍력터빈 축소모형의 블레이드 회전직경에 대한 비율로 무차원화하였으며, y축은 풍력 블레이드의 길이 방향에 대한 영역을 블레이드 회전직경에 대한 비율로 무차원화하였다.

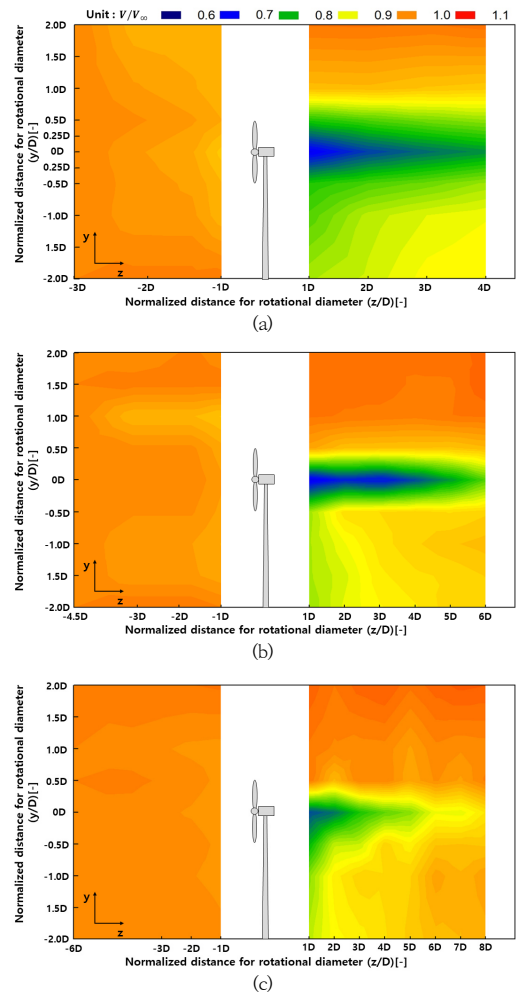
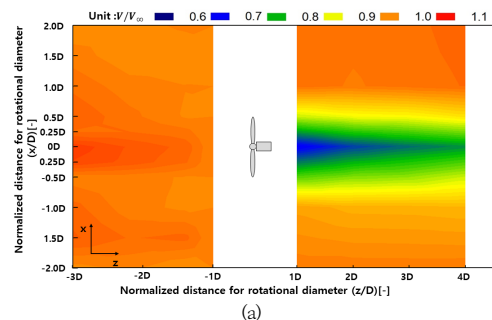


Fig. 8. Comparison of normalized velocity filed of y-z plane for uniform inflow (a) 1:33 Scale (b) 1:50 Scale (c) 1:67 Scale



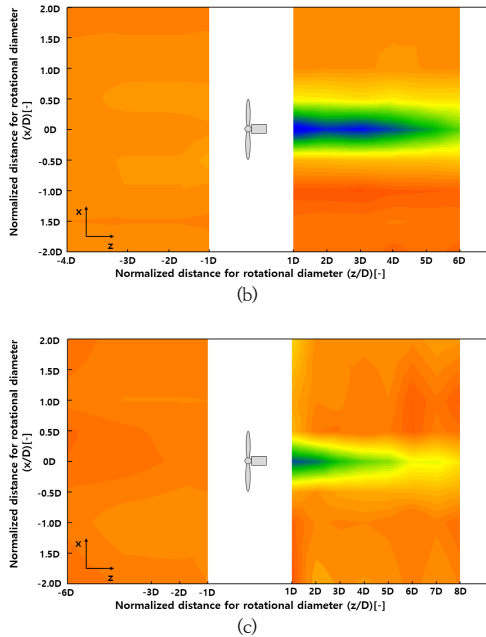


Fig. 9. Comparison of normalized velocity filed of x-z plane for uniform inflow
(a) 1:33 Scale (b) 1:50 Scale (c) 1:67 Scale

이를 통해 풍력터빈 축소모형에 의한 후류가 확인되었으며, 후류가 후방으로 멀어질수록 점차 회복되는 경향이 확인되었다. 이때, 축소모델 정면 기준으로 좌측 부분의 후류와 우측 부분의 후류가 서로 다른 경향을 나타내는데, 이는 블레이드가 시계방향으로 회전함에 따라 좌측과 우측에서 일부 서로 다른 유동 특성을 나타내기 때문인 것으로 판단되며, 다른 선형연구에서도 유사한 현상이 발견되는 것으로 확인되었다[16].

4.2 후류 분석

위와 같은 결과들을 활용하여 Fig. 10에 로터 중심을 기준으로 Y-Z 평면과 X-Z 평면에 대한 후류를 축소모형 크기에 따라 수치적으로 비교하여 나타내었으며, 이때 상대측정불확도를 같이 표시하였다.

Fig. 10 (a), (b)와 같이 후류가 1~4D까지 측정된 1:33 축소모형은 로터 중심을 기준으로 1D에서 무차원화 된 후류가 (V/V_{∞}) 0.69, 4D에서 0.78로 점차 회복되는 경향이 확인되었다. Fig. 10 (c), (d)와 같이 후류가 1~6D까지 측정된 1:50 축소모형의 경우, 1~4D 영역에서는 1:33 축소모형과 유사한 후류 회복 거동이 확인되었으며, 이후 점차 후류가 회복되어 최대 후방 지점인

6D에서는 후류가 0.85로 확인되었다. Fig. 10 (e), (f)와 같이 1~8D 까지 측정된 1:67 축소모형은 1:33모형 및 1:50 모형과 유사한 후류 회복 거동을 나타내며, 8D에서는 0.92로 일정부분 회복되는 것으로 확인되었다.

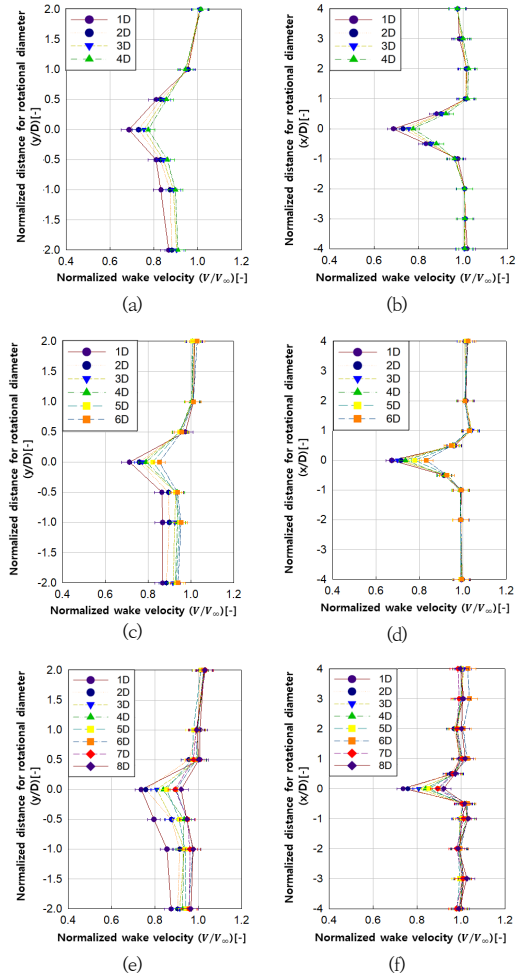


Fig. 10. Normalized horizontally and vertically wake velocity profiles by scale model size
(a) 1:33 Scale at Y-Z plane (b) 1:33 Scale at X-Z plane (c) 1:50 Scale at Y-Z plane (d) 1:50 Scale at X-Z plane (e) 1:67 Scale at Y-Z plane (f) 1:67 Scale at X-Z plane

종합적으로 Fig. 11에 축소모형별 로터의 중심을 기준으로 후방으로 발생하는 Y-Z평면, X-Z평면의 후류 형태를 나타내었으며, Fig. 12에 로터 중심에서 후방으로 측정된 후류를 나타내었다.

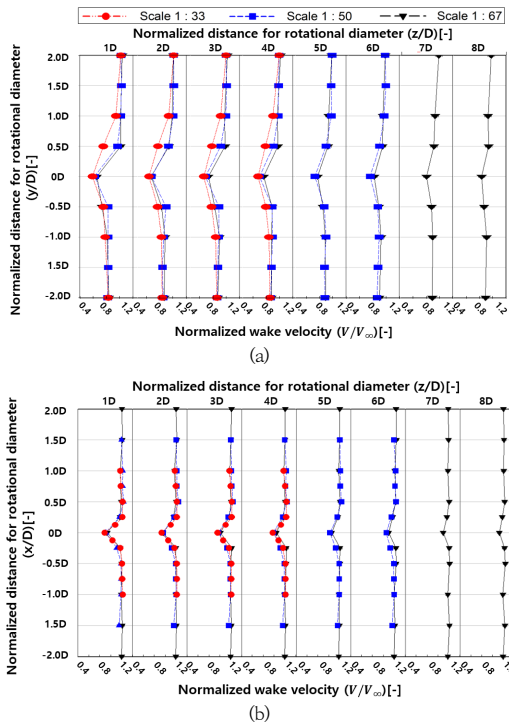


Fig. 11. Wake velocity profiles according to Normalized Separation distance
(a) Y-Z plane (b) X-Z plane

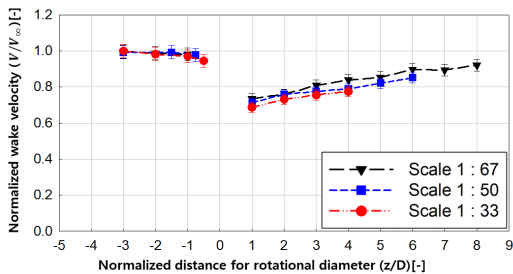


Fig. 12. Normalized wake velocity at centre of rotor

또한 Table 4에는 Fig. 12에서 확인된 각 후류에 대해 Eq. (5)와 같이 오차를 나타내었다.

$$Error\ rate = \frac{|V_{wake\ i} - V_{wake\ j}|}{V_{wake\ i}} \times 100 \quad (5)$$

Where, $V_{wake\ i}$ denotes normalized wake of 1:100 scale, $V_{wake\ j}$ denotes normalized wake of 1:33 and 1:50

1:33 축소모형을 기준으로 1:50과 1:67 축소모형의 후류 분석결과, 1:50 축소모델의 경우 2.0% ~ 3.9%의

오차율을 가지며 4D영역까지 평균 3.1% 내외의 오차율이 나타났다. 1:67 축소모델의 경우 3.8% ~ 8.2%의 오차로 평균 6.6% 내외의 오차율로 분석되었으며 후류 거동은 각 축소비들 모두 유사한 거동을 보이며 회복되는 것이 확인되었다.

Table 4. Scale factor error results

| z/D | 1:33 Scale (reference) | 1:50 Scale | 1:67 Scale |
|---------|------------------------|------------|------------|
| 1 | - | 3.8% | 7.2% |
| 2 | | 3.9% | 3.8% |
| 3 | | 2.5% | 6.9% |
| 4 | | 2.0% | 8.2% |
| Average | - | 3.1% | 6.6% |

5. 결론

본 연구에서는 실험실 규모의 풍동을 활용하여 서로 다른 축척비를 갖는 20kW 급 소형 풍력터빈의 축소모형에 대한 후류 실험이 진행되었다. 실험시 축소모형들의 주속비는 20kW 급 소형 풍력터빈의 정격 주속비에 맞춰 진행하였으며, 연구 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 축척비 1:33의 축소모형의 후류 실험을 반복하여 실험 재현성을 확인하였으며, 평균 1.12 %의 오차 범위를 갖는 것으로 확인되었다.
- 2) 축소모형의 축척비 별 1~4D 영역까지 후류를 비교한 결과, 1:33 축소모형과 1:50 축소모델은 평균 약 3.1%의 오차가 나타나는 것으로 확인되었으며, 1:33 축소모형과 1:67 축소모델의 경우 평균 약 6.6%의 오차가 나타내는 것으로 확인되었다. 후류 거동은 각 축소비들 모두 서로 유사한 경향을 보이며 회복되는 것이 확인되었다.
- 3) 축소모형 후류 실험시 TSR 상사와 기하학적 상사를 만족하더라도 축소모형의 축척비에 따라 결과 값에 오차가 발생한다. 따라서, 후류 실험시 단일 축척비를 활용한 실험 이전에, 다양한 축척비에 대한 실험을 진행하고, 축척비에 따라 발생할 수 있는 현상에 대한 이해가 선행될 필요가 있다.
- 4) 본 연구는 20 kW 급 소형풍력터빈에서 발생하는 후류와 축소모형에서 발생하는 후류의 상관관계를 분석하기 위한 기초연구로, 추후 20 kW 급 소형풍력터빈의 후류 실측 결과 및 수치해석 결과와 비교 분석을 통해 축소모형에서 발생할 수 있는 오류에

대한 분석 및 축소모형을 통한 실제 풍력터빈의 후류 예측에 대한 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] M. G. Lee, W. S. Park, "Output Characteristics of Small Wind Power Generator Applying Multi-Layered Blade", *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.11, pp.663-667, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.11.663>
- [2] I. T. Kim, "Design of Supersonic Wind Tunnel for Analysis of Flow over a Backward Facing Step with Slot Injection", *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, 17(11), 363-367, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.11.363>
- [3] S. H. Lee, H. G. Jeong, and S. D. Kwon, "Effects of Turbulence Intensities on Wake Models of Horizontal Wind Turbines", *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 27(4), 273-279, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2014.27.4.273>
- [4] K. N. Ko, M. H. Park, J. C. Huh, "An analysis of wake effect in a wind farm", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 17(2), 13-20, April, 2013. DOI: <https://doi.org/10.9726/kspse.2013.17.2.013>
- [5] S. H. Kang, K. W. Ryu, "An Experimental Study on Wake Flow-Field of NREL 5 MW Wind Turbine Model", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 45(2) 85-91 February, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.2.85>
- [6] H. G. Jeong, S. H. Lee, S. D. Kwon, "Experimental study on the wake characteristics of vertical axis wind turbine", *Journal of Wind Energy*, 8(1), 26-33, 2017. DOI: <https://doi.org/10.33519/kwea.2017.8.1.003>
- [7] D. Y. Jeong, Y. S. Won, S. H. Kang, "Comparison Study on Aerodynamic Performance and Wake Flow Field for a MW-Class Wind Turbine Model", *Journal of the Korean Society of Visualization*, 17(2), 32-38, August, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5407/jksv.2019.17.2.032>
- [8] D. Bingzheng, G. Michele, L. Liping, Z. Pan, "Experimental investigation of the performance and wake effect of a small-scale wind turbine in a wind tunnel", *Journal of Energy*, 166, 819-833, January, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.103>
- [9] H. G. Jeong, S. H. Lee, S. D. Kwon, "Effect of Blockage Ratio on Wind Tunnel Testing of Small Vertical-Axis Wind Turbines", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 34(3), 98-106, June, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.7836/kses.2014.34.3.098>
- [10] P. S. Victor, J. K. Hans, "Wind-tunnel modelling of the tip-speed ratio influence on the wake evolution", *Journal of Physics*, 753, 1-11, September, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/753/3/032061>
- [11] P. C. Leonardo, R. E. A. Arndt, Sotiropoulos. F Sotiropoulos, "Reynolds number dependence of turbulence statistics in the wake of wind turbines", *Wind Energy*, 15(5), 665-825, June, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/we.501>
- [12] S. McTavish, D. Feszty, F. Nitzsche, "Evaluating Reynolds number effects in small-scale wind turbine experiments", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 120, 81-90, September, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.006>
- [13] R. B. Cal, J. Lebrón, L. Castillo, H. S. Kang, C. Meneveau, "Experimental Study of the Horizontally Averaged Flow Structure in a Model Wind-turbine Array Boundary Layer", *Journal of Renewable Sustainable Energy*, 2, 013106, January, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3289735>
- [14] S. K. Kang, J. O. Kim, Y. S. Kim, W. S. Shin, S. I. Lee, J. H. Lee, "Airfoil Testing to Obtain Full-range Aerodynamic Characteristics based on Velocity Field Measurements Utilizing a Digital Wind Tunnel", *Journal of New & Renewable Energy*, 18(3), pp.60-71, February, 2022. DOI: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2022.0009>
- [15] M. G. Lee, H. Oh, W. S. Park, "Experimental Study of Small Vertical Axis Wind Turbine according to Type of Blades", *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, 18(12), 88-92, December, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.12.88>
- [16] R. V. Rodrigues, and C. Iengsfeld, "Development of a Computational System to Improve Wind Farm Layout, Part II: Wind Turbine Wakes Interaction", *energies*, 12(7), pp.1-27.

박 성 수(Sung soo Park)

[정회원]



- 2020년 2월 : 군산대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 해상풍력연구원 주임연구원

<관심분야>

신재생에너지, 풍력, 기계

서 대 원(Dae-Won Seo)

[정회원]



- 2007년 2월 : 인하대학교 대학원 조선해양공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 인하대학교 대학원 조선해양공학과 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 2020년 2월 : 한국 선급 책임연구원
- 2020년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

조선해양, 풍력

김 진 옥(Jin Ok Kim)

[정회원]



- 2023년 2월 : 군산대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 해상풍력연구원 주임연구원

<관심분야>

풍력, 기계

오 정 근(Jungkeun Oh)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학박사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 군산대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

조선해양, 풍력

강 상 균(Sangkyun Kang)

[정회원]



- 2015년 2월 : 군산대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2023년 2월 : 군산대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 해상풍력연구원 박사후 연구원

<관심분야>

풍력, 기계

이 장 호(Jang-Ho Lee)

[정회원]



- 1995년 2월 : 포항공과대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 포항공과대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

풍력, 열유체, 기계