

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(2), 85-91(2017)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.2.85>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

NREL 5 MW 풍력터빈 모형의 후류 유동장에 대한 실험적 연구

강승희*, 유기완**

An Experimental Study on Wake Flow-Field of
NREL 5 MW Wind Turbine Model

Seung-Hee Kang* and Ki-Wahn Ryu**

Chonbuk National University* , **

ABSTRACT

A wind tunnel test for 1/86 scaled down model of the NREL 5 MW offshore wind turbine was conducted to investigate the wake and flow fields. Deficit of flow speed in the wake region and variations of the turbulence intensity were measured using a hot wire anemometer at rated tip speed ratio of 11.4 m/s and a rotational speed of 1,045 rpm. According to the test results, velocity deficits along both of lateral and vertical directions were recovered within 2 rotor radii downstream from the rotating disc plane. The tip vortices effect was negligible after 5 rotor radii downstream from the rotating plane. Turbulence intensities showed maximum value around the blade tip, and decreased rapidly after one radius apart from the rotating plane, and those values were preserved until 6 rotor radii downstream.

초 록

본 연구에서는 NREL 5 MW 해상풍력터빈 모형의 후류 유동장 분석을 위해 1/86 축소 모형을 사용한 실험적 연구를 수행하였다. 정격출력 속도 11.4 m/s와 회전수 1,045 rpm 조건에서 열선풍속계를 사용하여 반경의 6배까지 후류에서 속도 결핍 및 난류도 변화를 측정하는 풍동시험을 수행하였다. 그 결과 풍력터빈의 후류에서의 속도결핍은 횡방향과 수직 방향으로 반경의 2배 이내에서 회복됨을 볼 수 있었으며, 끝단 와류에 의한 영향은 반경의 5배 이후에는 나타나지 않음을 볼 수 있었다. 또한, 후류의 난류도는 블레이드 끝단 부근에서 크게 나타나며 길이방향으로 반경 거리까지는 급격한 감소가 일어나지만 이 이후부터 반경의 6배까지 유지되었다.

Key Words : Wind Turbine Wake(풍력터빈 후류), NREL offshore 5 MW wind turbine(NREL 5 MW, 해상풍력터빈), Wind Tunnel Test(풍동시험), Hot-Wire Anemometer(열선풍속계)

† Received : August 7, 2016 Revised : January 23, 2017 Accepted : January 23, 2017

** Corresponding author, E-mail : kwryu@jbnu.ac.kr

I. 서론

공기가 풍력터빈 블레이드를 지나면서 바람의 운동에너지를 풍력터빈으로 빼앗기게 되어 바람의 속도는 감소하게 된다. 대단위 풍력단지에서 풍력터빈이 이러한 후류에 놓여있게 되면 출력이 감소하게 되어 전체 풍력단지의 전력 생산성이 감소하게 된다. 또한, 이러한 조건에 놓인 풍력터빈은 바람의 비정상 변동에 의한 하중 변동으로 부품의 수명 감소를 유발시켜 단지 유지보수 비용을 증가시킬 수 있게 된다. 따라서 풍력터빈 단지 설계시 후류에 의한 손실을 최소화하도록 발전단지 내의 풍력터빈 배치를 효율적으로 수행하고, 풍력터빈의 가용 운용 시간을 최대화하기 위해서는 후류 영향에 대한 정확한 예측 연구가 필요하다[1-4].

풍력터빈에 의해 발생하는 후류는 블레이드 직경의 약 1배 ~ 2배 정도까지 후방 지역인 근접 후류(near wake)와 이 이후의 영역인 원거리 후류(far wake)로 나누어 해석이 수행되고 있다. 근접 후류의 경우는 풍력터빈의 기하학적 형상 및 운용조건에 영향을 상대적으로 많이 받는 것으로 알려져 있다. 원거리 후류의 경우는 대기흐름과 후류와의 혼합으로 풍력터빈 형상에 대한 영향을 상대적으로 적게 받으며 설치 지형 및 사용되는 후류 모델 등에 따라 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다. 일부 연구자들에 의해 전산유체역학(CFD) 기법을 사용하여 후류 영향을 분석하는 시도가 이루어지고 있으나, 난류 모델링 등에 대한 검증이 충분히 이루어지지 않고 있는 현실에서 제한된 연구 결과만 제시되고 있는 상황이다 [2-6]. 따라서 풍력발전 단지의 보다 효율적 배치 등을 위해서는 후류의 감소 정도 및 후류 유동장에서의 비정상 유동성분 등의 정확한 자료 제공 및 이에 근거한 모델 개발 등이 필수적으로 요구되고 있다. 이를 위해서는 체계적이고 정밀한 시험 자료 제시 등을 통한 기초연구가 필요한 상황이다.

본 연구에서는 풍력터빈 후류의 유동장 분석 및 정확한 자료 제시를 위해 삼축 열선풍속계(hot-wire anemometry)를 사용한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 대용량 해상풍력터빈인 NREL 5 MW 해상풍력터빈(NREL 5 MW offshore wind turbine) 로터 블레이드의 축소모형을 사용하여 균일한 유동장 조건 하에서 풍동 시험을 수행하였다. 열선 프로브를 정밀이송장치에 부착하여 풍력터빈 블레이드 후류 유동장에서 삼축 방향의 속도 및 난류도 분포 변화를 측

정하여 후류 유동장에서의 속도 감소 경향 및 주파수 분석을 통한 후류 내에서의 비정상 유동 변화 그리고 난류도 변화 등에 대한 연구를 수행하였다.

II. 풍동시험 및 모형

2.1 풍동시험

본 연구에 사용된 풍동은 공군사관학교의 중형 아음속풍동으로 단일 폐회로 순환식이다. 시험이 수행된 시험부는 2.45 m (H) × 3.5 m(W) × 8.7 m(L) 이며, 수축비는 7.26:1 이다. 풍속은 5 ~ 92 m/s이며, ±0.03 m/s 범위 내에서 제어된다. 빈 시험부의 압력계수 구배는 74 m/s에서 0.001/m이며, 흐름각은 피치각과 옆미끄럼각 모두 0.1°이내이다. 풍력터빈 후류에서의 속도감소 및 난류도(turbulence intensity) 변화 등을 측정하기 위해 공군사관학교에서 보유 중인 정밀이송장치(probe-traverse system)를 사용하였다. 이 장치는 세 개의 드라이브 시스템을 사용하여 로봇팔(arm)처럼 거동되며, 장치 끝에 센서 등을 장착하여 속도 분포 등을 측정할 수 있게 되어있다. 각 팔은 DC 서보 모터와 10,000:1 감속기를 사용하며 각 위치는 회전형 센서(rotary encoder)로 측정된다. 장치에 의한 흐름의 교란을 최소화하기 위해 팔의 형상은 두께대시위비 30%를 갖는 RAE103 익형 형상으로 제작되었다. 이 장치의 위치 정밀도는 ±3 mm이내이며, 반복도는 ±0.5 mm 이내이다[7, 8].

2.2 풍동시험 모형

본 연구에 사용된 블레이드 형상은 NREL의 5 MW 해상풍력터빈이다[9]. 이 풍력터빈은 세개의 블레이드로 구성되어 있는 upwind 방식으로 가변속도, 가변 페더링 방향 피치방식(variable blade-pitch-to-feather control) 으로 제어되는 5 MW급 해상 풍력터빈이다. 터빈 직경은 126 m이며, 풍력터빈 허브까지 높이는 90 m 그리고 블레이드의 솔리디티(solidity)는 약 5.2이다. 시동 풍속(cut-in speed)은 3 m/s, 정격풍속 (rated speed)은 11.4 m/s 그리고 정지풍속(cut-out speed)은 25 m/s 이다. 시동 시 회전수는 6.9 rpm이며, 정격풍속 이후는 12.1 rpm을 유지토록 설계되었다. 정격풍속으로 회전 시 끝단속도(tip speed)는 80 m/s이다.

본 연구에 사용된 모형은 실물 로터 블레이드의 1/86 크기이다. 로터 블레이드의 직경은 약

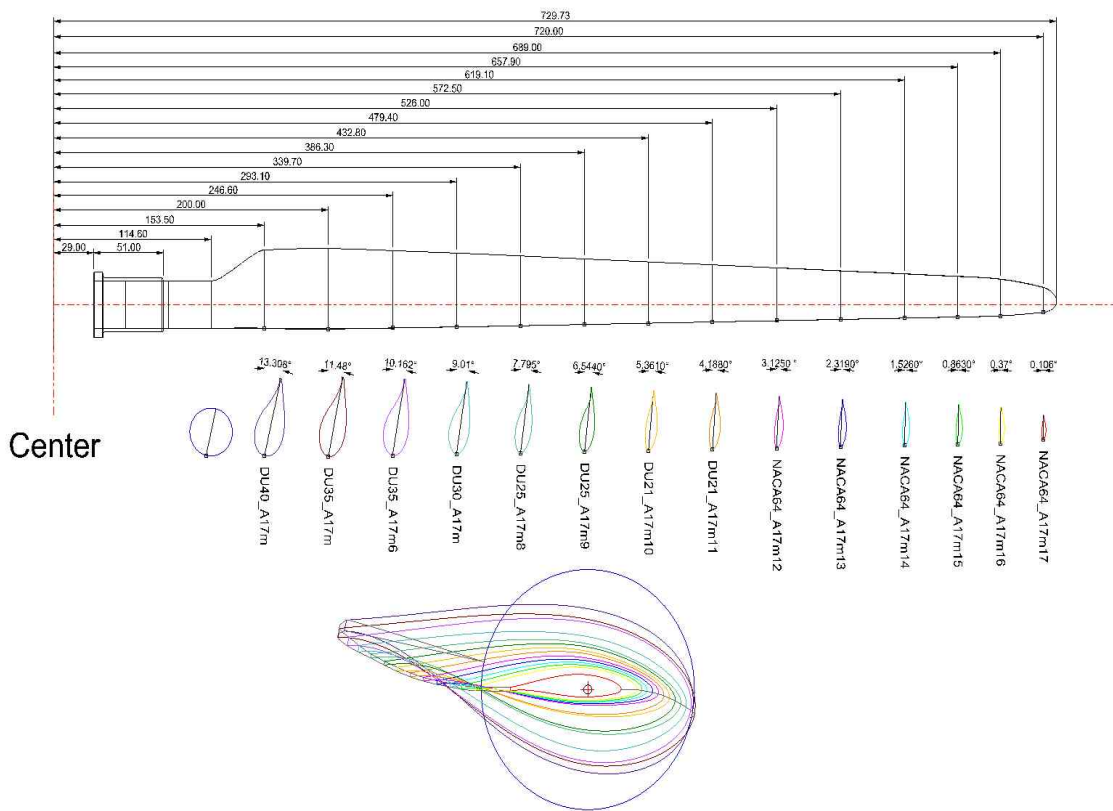


Fig. 1. Blade model of NREL 5 MW offshore wind turbine

1.46 m이며 블레이드 하나 자체의 길이는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 약 0.7 m이다. 블레이드 각 단면에서의 익형 형상과 비틀림 각은 Fig. 1에서 보는 바와 같으며, 블레이드 끝단은 유선 형태로 페어링 되도록 설계하였다. 허브(hub)는 시험장치와 모델 블레이드 간의 간섭을 최소화 하고자 타원형 형태로 제작하였으며 길이는 0.152 m, 직경은 0.180 m이다. 블레이드는 가벼우면서 회전 시 우수한 강도를 제공하기 위해 탄소섬유를 사용하여 제작하였다. 이를 위해 알루미늄 Al-6061 재질의 몰드를 삼차원 기계 가공한 후 탄소섬유와 에폭시 등을 사용하여 제작하였다. 각 블레이드의 무게는 150 g을 초과하지 않도록 제작되었으며, 제작 후 안전한 회전성을 보장하기 위해 밸런싱 작업(balancing)이 수행되었다. 시험장치의 나셀에는 장기간 시험 중에도 발열에 의한 문제가 발생되지 않도록 냉각 홀이 설치되었다. 나셀의 폭과 높이는 각각 0.18 m로 로터 직경 대 폭비는 약 0.12이다.

후류에서의 속도 결핍 및 난류도 변화를 측정하기 위해 DANTEC사의 열선풍속계가 사용되었다. 후류 유동장 내에서의 속도 감소 및 난류도는 삼축 필름 프로브 (DANTEC probe type 55, R91)[10]를 사용하여 길이 방향인 x축, 횡 방향인

y축 그리고 수직 방향인 z축 방향의 속도인 u , v , w 를 실시간으로 측정하였다. 모형 풍력터빈에 공급되는 기준 풍속의 속도 및 난류도를 측정하기 위해 시험부 입구 부근에 I형 프로브 (DANTEC probe type 55, P11) [10]를 설치하였다. 또한, 센서 교정시와 시험시 발생할 수 있는 온도차에 의한 영향을 보상하기 위해 삼축 프로브 부근에 RTD 센서를 설치하여 실시간으로 온도를 측정하면서 시험을 수행하였다. 자료는 Streamline Ver. 3.4를 사용하여 30 kHz로 1초간 획득하였다.

풍동 시험은 실물의 정격출력 속도인 11.4 m/s와 이 속도에서 실물과 같은 날개 끝 속도비를 갖는 회전수 1,045 rpm에 대하여 수행하였다. 측정 지점은 블레이드의 반경 방향(r/R)으로 15개 지점 (0.164, 0.323, 0.423, 0.523, 0.623, 0.723, 0.823, 0.923, 1.023, 1.123, 1.223, 1.323, 1.423, 1.523, 1.623), 축방향(x/R)으로는 8개 지점 (0.083, 0.583, 0.833, 1.083, 2.083, 3.083, 5.083, 6.083)에 대해 측정하였다. 여기서 r 방향은 시험장치 지지대의 영향이 적을 것으로 판단된 수평 방향(-y 방향)으로 측정된 결과를 사용하였다. 시험은 피치각 0° 조건에서 표면거칠기가 모사된 형상에 대해 수행하였으며, 표면거칠기 모사는

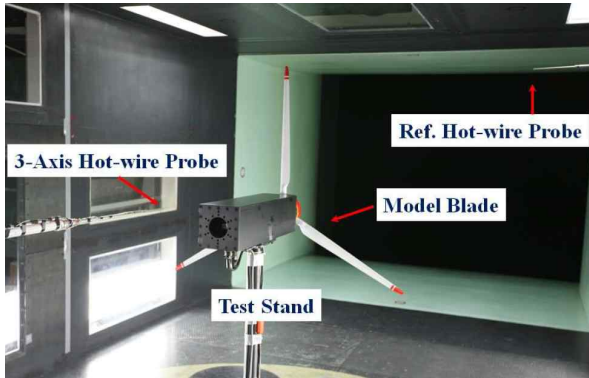


Fig. 2. Test set-up of wind turbine model for wake-field survey

두께가 0.3 mm인 70° zig-zag 테이프를 블레이드 상·하면 각 시위의 10% 지점에 부착하였다. Fig. 2에 시험 장면 및 설치된 센서 및 장치들을 나타내었다.

III. 결과 검토

풍력터빈 블레이드 후류 유동장의 정량적 해석을 위해 NREL 5 MW 풍력터빈 모형을 사용하여 삼차원 속도 분포 및 난류도 분포를 측정하였다. 측정된 결과는 유입 풍속 조건인 풍동 자유흐름과 상대 비교하였다. 속도분포는 블레이드 반경 방향으로 반경의 약 0.16에서 1.62배 까지 측정하였으며, 길이 방향(x)으로는 시험부 길이 제약으로 인하여 반경의 약 6배까지 측정되었다. 후류 유동장에서 길이 방향 속도의 평균 성분인 u_m 은 유입속도와 차를 유입속도로 무차원화하였으며, 수평 방향과 수직 방향 속도 평균 값인 v_m 과 w_m 은 유입속도로 무차원화 하였다. 삼축 방향의 난류도는 각각 I_x , I_y 그리고 I_z 로 측정된 비정상 속도분포로부터 계산되었다.

풍력터빈 후류에서의 무차원화 한 속도 결핍 결과를 Fig. 3 ~ Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 후류에서의 속도 결핍 현상은 회전면에 매우 근접한 영역으로 다른 결과와 상이한 경향성을 보인 반경의 0.083배에서의 결과를 제외하면, 블레이드 끝단과 허브 부근에서 크게 나타남을 볼 수 있다. 또한, 길이 방향으로 멀어질수록 점차적으로 결핍되는 양이 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 반경 방향으로 블레이드 반경의 약 1.2 ~ 1.3 배 부근에서 속도 결핍 현상이 나타나지 않음을 볼 수 있다. 횡 방향인 y 방향 속도는 반경의 약 두 배 이내에서 결핍되는 양이 거의 없이 자유흐름 상태를 보임을 볼 수 있다.

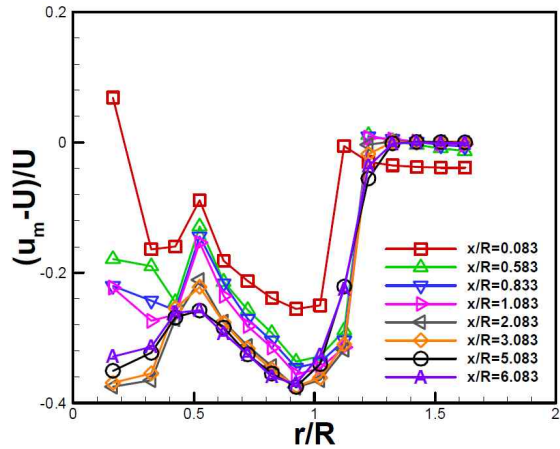


Fig. 3. Normalized mean axial velocity change versus radial direction

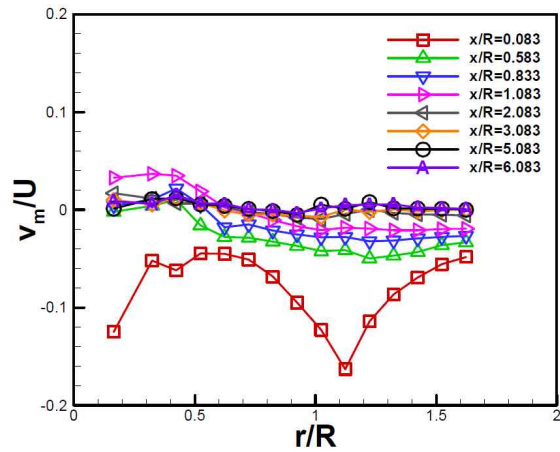


Fig. 4. Normalized mean lateral velocity change versus radial direction

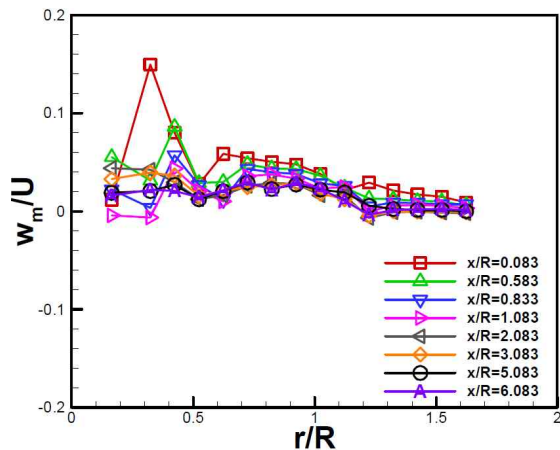


Fig. 5. Normalized mean vertical velocity change versus radial direction

수직 방향인 z 방향 속도는 반경의 약 두 배 부근까지는 자유흐름 속도의 2~3%까지 급격히

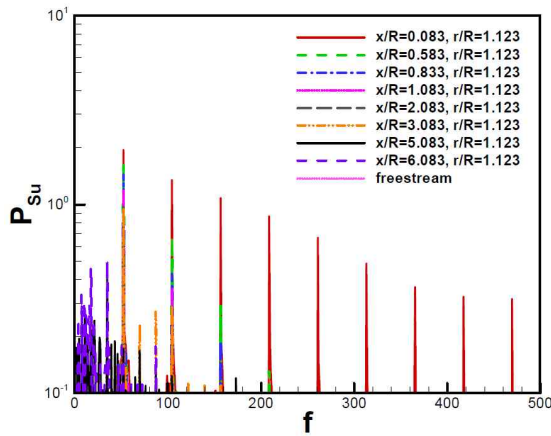


Fig. 6. Power spectrum of u at $r/R=1.123$

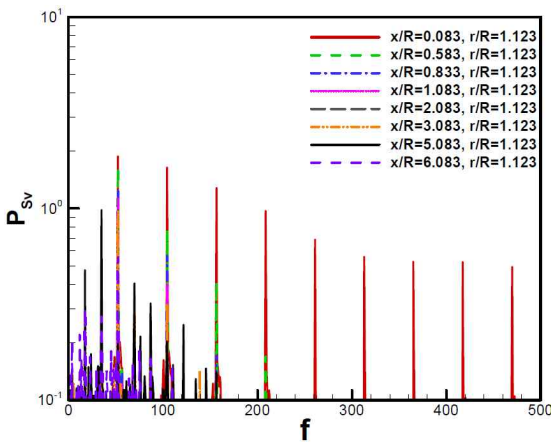


Fig. 7. Power spectrum of v at $r/R=1.123$

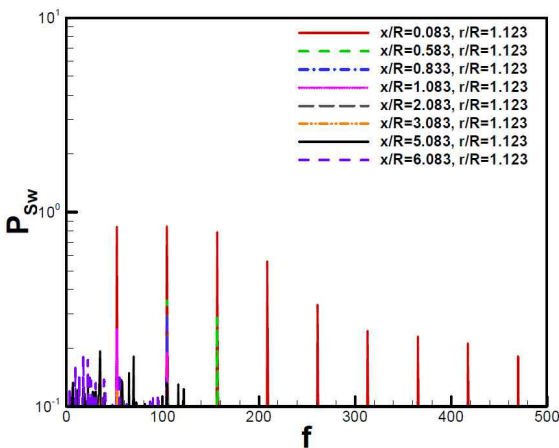


Fig. 8. Power spectrum of w at $r/R=1.123$

수렴하다가 점차적으로 자유흐름의 속도로 수렴해 가는 경향을 보임을 알 수 있다. 그러나 길이 방향 속도는 반경의 5배 까지는 결핍되는 속도 양이 점차적으로 증가하다가 이 이후부터 약간 유지되는 경향성을 보인다. 반경의 5배 까지는

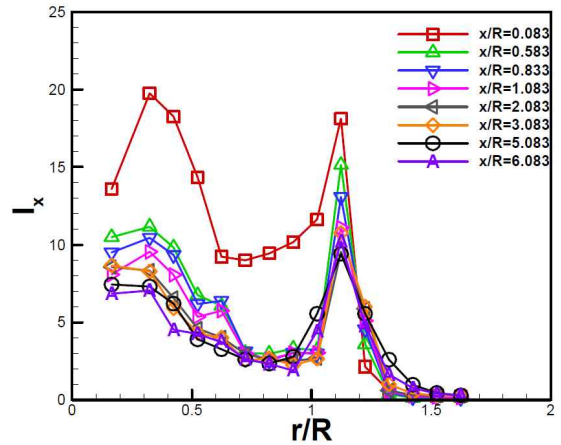


Fig. 9. Longitudinal turbulence intensity change

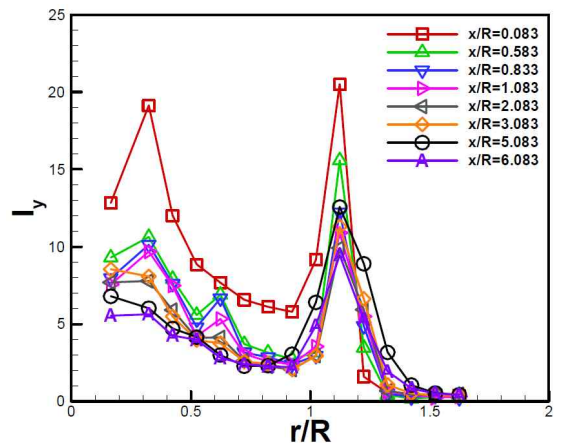


Fig. 10. Lateral turbulence intensity change

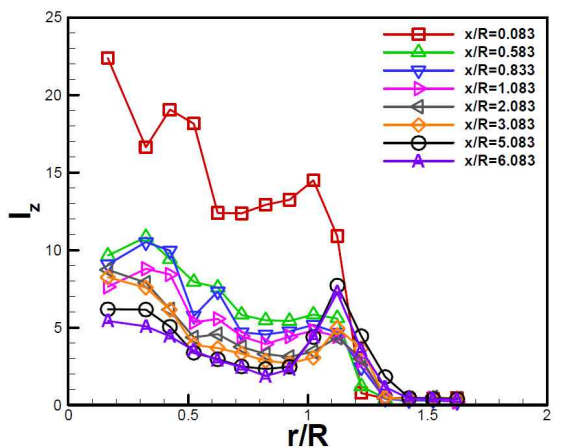


Fig. 11. Vertical turbulence intensity change

자유흐름의 약 26 ~ 38%까지 속도가 결핍되며, 본 연구가 수행된 6배 까지도 결핍된 속도 성분이 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 경향성은 타 연구에서 제시된 결과 [4, 11, 12]와

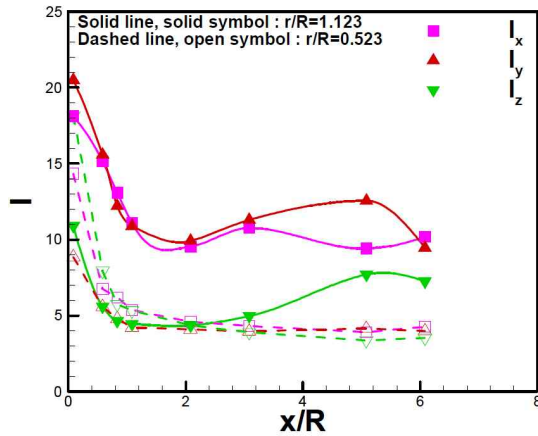


Fig. 12. Turbulence intensity change

유사한 특성을 보임을 알 수 있다.

블레이드의 끝단 부근 후류에서의 주파수 성분 분석을 위해 반경 방향으로 반경의 1.123 위치에서 측정된 세 방향 속도 분포를 고속 푸리에변환(FFT) 해석하여 나타난 파워 스펙트럼(power spectrum) 결과를 Fig. 6 ~ Fig. 8에 나타내었다. 여기서 자유흐름(freestream)은 시험부 전방 부분에 설치된 열선 프로브로부터 매 시험 측정된 값으로부터 구한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 자유흐름의 주파수 분석 결과는 그림에서 보는 바와 같이 블레이드 회전에 의한 영향 성분이 나타나지 않는 것을 볼 수 있으며, 이때의 난류도는 0.08% 이내로 매우 저 난류도 흐름 조건 상태에서 시험이 수행된 것임을 확인할 수 있었다. 길이 방향으로 터빈 블레이드와 근접한 위치에서는 회전수 \times 블레이드 수를 의미하는 52 Hz와 그 고조파 성분이 강하게 나타남을 볼 수 있다. 이러한 주파수 성분은 블레이드 중간 부분과 뿌리(root) 부근에서는 발생되지 않았으며, 블레이드 끝단에서 강하게 나타나는 것으로 블레이드 끝단 와류에 의한 것으로 판단된다. 이러한 끝단 와류에 의한 영향은 블레이드에서 멀어질수록 자유흐름과의 혼합 등으로 그 고조파 성분이 작아짐을 볼 수 있었다.

블레이드 후류에서의 난류도 변화를 Fig. 9 ~ Fig. 11에 나타내었으며, Fig. 12에는 블레이드 중간 부근과 끝단(tip) 부근에서의 축 방향에 따른 난류도 성분의 변화를 나타내었다. 난류도의 경우는 블레이드 반경 방향으로 갈수록 감소하다가 끝단 와류가 발생하는 블레이드 끝단 부근인 반경의 1.1배 부근에서 급격히 증가하고 이 이후에서는 자유흐름 성분으로 급격하게 회복 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 12에 보이는 바와 같이 블레이드 중간 부분이 $r/R = 0.523$ 에서는 길이 방

향으로 반경의 1 배 부근까지 감소하다가 이 이후부터는 감소폭이 상당히 줄어드는 반면, 날개 끝단 부근에서는 축방향으로 약 1배 반경까지 급격한 감소를 보이며 이 이후부터 반경의 6배까지 약간의 진폭을 보이며 유지되는 경향을 보였다.

IV. 결론

본 연구에서는 대용량 풍력터빈의 후류의 유동장 분석 및 정량적 자료 제시를 위해 대용량 풍력터빈인 NREL 5 MW 해상풍력터빈 로터 블레이드의 축소모형을 사용한 실험적 연구를 수행하였다. 1/86 축소모형을 사용하여 정격출력 속도 11.4 m/s와 회전수 1,045 rpm 조건에서 삼축 열선풍속계를 사용하여 후류에서 속도 결핍 및 난류도 변화를 측정하는 풍동시험을 수행하였다. 그 결과 풍력터빈의 후류에서의 속도결핍은 횡방향과 수직 방향으로 반경의 2배 이내에서 회복되지만 난류도는 블레이드 끝단 부근에서 크게 나타나며 길이방향으로 반경 거리까지는 급격한 감소가 일어나지만 이 이후부터 시험이 수행된 반경의 6배까지 유지되는 경향을 보였다. 본 연구 결과를 통해 대규모 해상풍력단지 후류모델 개발 및 검증 등의 기본적인 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

References

- 1) Sanderse, B., "Aerodynamics of Wind Farm Wakes," ECN-E-09-016, 2009.
- 2) Barthelmie, R. J. et al., "Flow and Wakes in Large Wind Farms: Final Report for UpWind WP8," Risø-R-1765(EN), 2011.
- 3) Vermeer, L. J., Sørensen, J. N., and Crespo, A., "Wind Turbine Wake Aerodynamics," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 39, 2003.
- 4) Ko, K.-N., Park, M.-H., and Huh, J.-C., "An Analysis of Wake Effect in a Wind Farm," Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 2, 2013.
- 5) Kim, J., Kang, S.-H., and Ryu, K.-W., "Comparison of Aerodynamic Loads for Horizontal Axis Wind Turbine (I): with and without Turbulent Inflow," J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences,

Vol. 44, No. 5, 2016, pp. 391-398.

6) Larsen, T. J., Madsen, H. A., Larsen, G. C., and Hansen, K. S., "Validation of the Dynamic Wake Meander Model for Loads and Power Production in the Egmond aan Zee Wind Farm," *Wind Energy*, Vol. 16, 2013, pp. 605-624.

7) KAFA Subsonic Wind Tunnel, http://www.afa.ac.kr/index_frame_kk.html.

8) Operation Manual, "AEROTECH Probe Traverse System for KAFA," AEROTECH Ref. 9705

9) Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development;

National Renewable Energy Laboratory,"NREL TP-500-38060, 2009.

10) DANTEC Dynamics, Probe for Hot-wire Anemometry, 103-105-07.

11) Ryu, K.-W, Yoon, S.-J., Lee, C.-S. and Choy, S.-O., "Aerodynamic Performance for Horizontal Axis Wind Turbine Model using Subsonic Wind Tunnel," *J. of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 35, No. 11, 2007.

12) Neff, D. E., Meroney, R. N., "Mean Wind and Turbulence Characteristics due to Induction Effects near Wind Turbine Rotors," *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69, No. 71, 1997