

하류 풍력발전기의 성능 및 하중에 대한 후류영향 연구

Study on the effect of wake on the performance and load of a downstream wind turbine

손재훈* · 백인수**† · 유능수** · 남윤수**

Son Jaehoon, Paek Insu, Yoo Neungsoo, Nam Yoonsu

(Submit date : 2014. 2. 28., Judgment date : 2014. 2. 29., Publication decide date : 2014. 4. 22.)

Abstract : The effect of wake on the performance and load of a downstream wind turbine on a floating platform is investigated with a computer simulation in this study. The floating platform consists of a square platform having a dimension of 200 m x 200 m with four 2 MW wind turbines installed. For the simulation, only two wind turbines in series with the wind direction were considered and the floating platform was assumed to be stationary due to its large size. Also, a commercial program based on multi-body dynamics and eddy viscosity wake model was used. It was found from simulation that the power from the downstream wind turbine could be reduced by more than 50% of the power from the upstream wind turbine. However, due to the increase in the turbulence intensity, the power is greater but more fluctuating than the power produced by a wind turbine experiencing the same wind speed without wake. Also, it was found that the load of the downstream wind turbine becomes lower than the load of the upstream wind turbine but higher than the load of a wind turbine experiencing the same wind speed without wake.

Key Words : 풍력발전기(Wind turbine), 후류효과(Wake effect), 성능(Performance), 하중(Load)

1. 서 론

바람이 풍력발전단지를 통과할 때 상류 풍력터빈으로부터 후류가 생성되어 하류 풍력터

빈의 성능과 하중에 큰 영향을 미치게 된다. 후류란, 바람이 상류 풍력터빈을 지나면서 발생된 와류로 인해 풍속이 낮아지고 난류강도가 높아진 바람을 의미한다. 후류에 의해서 하

**† 백인수(교신저자) : 강원대학교 융합시스템공학과
E-mail : paek@kangwon.ac.kr, Tel : 033-250-6379
*손재훈 : 강원대학교 융합시스템공학과

**† Paek Insu(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Kangwon National University.
E-mail : paek@kangwon.ac.kr, Tel : 033-250-6379
*Son Jaehoon : Department of Mechanical Engineering, Kangwon National University.

류에 위치한 풍력터빈의 발전량은 감소하게 되고, 바람으로부터 받게 되는 하중은 증가하게 된다¹⁾.

따라서, 일반적으로 풍력발전단지 내에 풍력터빈을 배치할 때 후류로 인한 영향을 줄이기 위해 풍력터빈간의 이격 거리를 7 RD~10 RD(Rotor Diameter) 로 정도로 충분히 두어 배치하게 된다. 덴마크의 Horns Rev 해상풍력발전단지의 경우 7RD x 7RD 의 이격 거리가 사용되었다²⁾.

본 연구에서는 해상풍력 기술 중 하나인 파력과 해상 풍력을 연계시킨 부유식 복합발전 시스템에 대해 풍력터빈의 후류영향에 대한 기초 연구를 수행하였다. 부유식 복합발전이란 바다에 대형 부유체를 띄워 하부에는 파력발전기를 설치하고, 상부에는 풍력터빈을 이용하여, 발전하는 시스템을 의미한다. 본 연구에서는 200m X 200m 의 정사각 부유체의 네 모서리에 가상의 2MW 풍력터빈 4기가 설치된 시스템을 대상으로 하였기 때문에 풍력터빈간의 이격거리가 200m 인 근접후류영역에서의 후류의 영향을 분석하였다. 시뮬레이션은 바람방향으로 나란한 2기의 풍력터빈을 대상으로 하였다.

후류 해석과 관련한 선행연구에서는 풍력터빈간의 이격거리가 7RD 이후인 원거리 후류영역에서 대한 연구만이 진행되어 왔다. 또한 풍력터빈 성능과 관련해서는 단순 대수식으로 주어지는 풍력터빈 모델과 단순 후류모델을 이용하여 해석한 연구가 문헌상에 제시되고 있으며, 또한 특정 풍속에 대한 후류 예측 결과가 제시되고 있다³⁾⁴⁾. 풍력터빈 하중에 대한 해석은 다물체 동역학 해석 프로그램인 GH Bladed와 해상 NREL 5MW 데모 풍력터빈을 이용한 하중해석 결과가 문헌상에 제시되고 있지만, 정격풍속 12.3 m/s에 국한된 결

과를 제시하고 있다⁵⁾.

하지만, 단순 풍력터빈 모델이 아닌 다물체 동역학 프로그램을 이용한 다양한 평균풍속을 갖는 난류 바람에서의 풍력터빈의 성능 및 하중 분석이나, 근접 후류영역에 위치한 풍력터빈에 대한 성능 및 하중분석에 대한 연구결과는 극히 제한적이다.

따라서, 본 연구에서는 일반적인 고정식 하부구조물 위에 설치되는 풍력발전단지의 경우와 달리 풍력터빈의 이격거리가 2RD~3RD 범위에 있게 되는 부유체 위에 설치되는 풍력터빈에 대해 다물체 동역학 프로그램을 적용하여 후류에 의한 하류 풍력터빈의 성능 및 하중 변화를 알아보고자 하였다. 본 연구에서는 부유체의 규모를 고려하여 부유체의 거동에 의한 풍력터빈의 영향은 무시하고, 해석을 수행하였고, 후류가 야기시키는 바람의 난류강도 증가에 따른 영향을 분석하였다.

2. 시뮬레이션 설정

풍력터빈 2기를 이용한 후류 영향분석 시뮬레이션을 수행하기 위해 국제적으로 풍력터빈 성능 및 거동 시뮬레이션 정확도를 인정받고 있는 GH bladed 프로그램을 이용 하였다. 시뮬레이션을 위해 필요한 데이터로는 아래와 같이 크게 풍력터빈 모델, 바람 모델, 후류 모델이 요구된다.

2.1 풍력터빈 모델

본 연구의 시뮬레이션을 위해 사용된 풍력터빈 모델은 가상의 2MW 풍력터빈이고, 대상 풍력터빈의 제원은 Table 1 에 나타났다. 풍력터빈의 블레이드, 타워, 나셀, 발전기에 대한 정보는 시뮬레이션을 위해 모두 GH-Bladed 프로그램에 입력되었다.

Table. 1 Data of a virtual wind turbine used

Number of blades	3
Hub height	80 m
Cut-in wind speed	3.5 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Rated wind speed	11 m/s
Rated power	2 MW

Fig. 1 은 본 연구에서 고려하고 있는 크기 200m x 200m 의 플랫폼 위에 설치되는 풍력 터빈 배치를 보여주고 있다. 본 연구에서는 그림에서 점선으로 표시된 2기의 풍력터빈에 대하여 후류효과가 가장 큰 두 풍력터빈과 나란한 방향의 바람에 대한 해석만을 수행하였다.

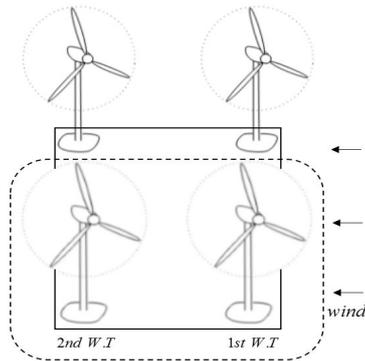


Fig. 1 Wind turbine layout on the floating structure

2.2 바람 모델

시뮬레이션을 위해서는 시뮬레이션에 적용할 바람의 생성이 필요하다. 지표면에 근접해 있는 한 지점에서의 주파수 영역에서의 바람 에너지 분포는 통계학적 표현으로 기술할 수 있는데, von Karman, Kaimal, Mann 난류 스펙트럼이 일반적으로 사용된다. 본 연구에서는 실제바람의 난류 특성과 부합하는 것으로 문헌상에 알려진 Kaimal 스펙트럼을 사용하여 바람을 생성하였다(식 (1) 참조)¹⁾.

$$\Phi_{uu}(\omega) = \frac{4\sigma_u^2 \frac{L_u}{\bar{v}}}{\left\{1 + 6 \frac{\omega L_u}{2\pi\bar{v}}\right\}^{\frac{5}{3}}} \quad (1)$$

Kaimal 스펙트럼은 식(1)과 같이 제시되며, 식에서 알 수 있듯이 주파수 영역에서의 풍속 스펙트럼은 3개 변수인 평균 풍속 \bar{v} 와, 표준편차 σ_u , 그리고 난류의 크기척도 L_u 의 함수로 나타내어진다.

또한 정상난류모델(Normal Turbulence Model)을 통해 풍속에 따른 난류강도를 설정하였다.¹⁾⁶⁾ 임의의 풍속 \bar{v} 에 대한 난류성분의 표준편차 σ_1 은 I_{ref} 를 기준으로 식 (2)와 같고, I_{ref} 는 허브 높이에서 10분간 평균 풍속이 15m/s일 때의 난류강도를 뜻한다.

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75\bar{v} + 5.6) \quad (2)$$

위의 식을 사용하여 임의의 풍속 \bar{v} 에 대한 난류성분의 표준편차를 구할 수 있고 이를 이용하여 각 풍속에서 사용해야 할 난류강도를 구할 수 있다. Fig.2 에는 시뮬레이션에 사용될 풍력터빈에 대한 평균풍속 - 난류강도의 관계를 나타냈고, 이는 전체 평균 풍속 범위에 대하여 난류강도의 최대 한계를 정의 한 것이다.

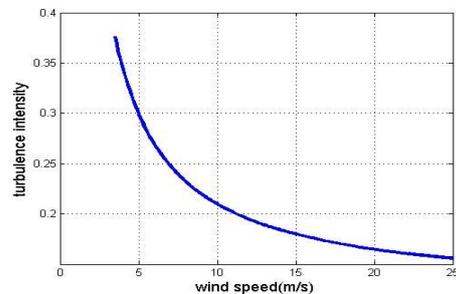


Fig. 2 Turbulence intensity vs. wind speed for NTM

2.3 후류 모델

후류효과를 정확히 모사할 수 있는 수학적 유동 모델 개발은 불가능하기 때문에 일반적으로 이를 단순화 한 후류 모델이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 풍동실험을 통한 경험식과 2RD 이내의 근접후류영역에서의 유동 방향의 압력구배를 무시한 단순화된 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식에 기반한 Ainslie's eddy viscosity 모델을 사용하였다. Eddy viscosity 모델은 Fig. 3 과 같이 후류를 축대칭 모델로 단순화 하여, 유동방정식에 대한 해를 얻게 된다. 또한 유동방향의 압력구배를 무시하기 때문에, 2RD 이후의 하류 영역에 적용 가능한 것으로 알려져 있다.

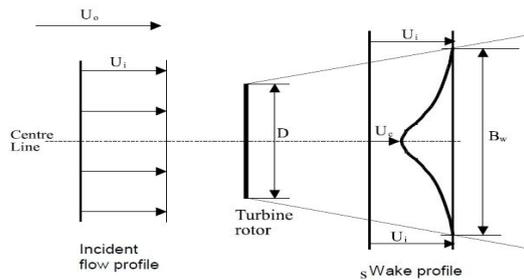


Fig. 3 Wake profile used in the eddy viscosity model⁶⁾

2.4 등가 파괴하중

시뮬레이션의 결과에서 섭동하는 하중의 분석을 위해서 Rainflow Counting 의 방법을 사용하는 등가 파괴하중(DEL: Damage Equivalent Loads)을 계산하였다. DEL 은 시뮬레이션 시간 동안의 복합하중의 크기 정도와 동등한 효과로 환산된 주파수의 단일 하중의 크기를 의미하며, 식(3) 와 같이 계산된다.⁷⁾

$$DEL = \left(\sum_i \frac{n_i S_i^m}{Tf} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

식 (3)에서 m 은 주 재료의 물성치를 나타내며, 파이버 글래스 복합체인 블레이드는 10을 사용하였고, 철제 구조물인 타워는 3.5를 사용하였다. T 는 시뮬레이션 시간을 나타내고, n_i 는 T 시간 동안의 S_i 크기하중의 사이클 수를 나타낸다.

2.5 기타 설정

시뮬레이션을 위한 기타 부수적인 요소로는 Fig. 4 와 같이 풍력터빈 간의 이격 거리는 200m 로 설정하였으며, 첫 번째 풍력터빈은 정상 상태의 바람, 두 번째 풍력터빈은 후류의 영향을 받는 바람을 맞도록 시뮬레이션 하였다. GH Bladed 는 풍력터빈 1기에 대한 해석만을 수행할 수 있기 때문에, 첫 번째 풍력터빈과 두 번째 풍력터빈에 대한 해석을 나누어 각각 수행하였다. 600초 시뮬레이션 데이터를 기준으로 풍속, 발전량, 블레이드와 타워의 하중을 비교하여 나타내었다.

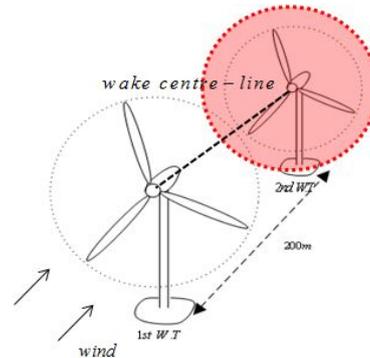


Fig. 4 The assumption of wake effect of multi wind turbine

3. 후류 영향 분석

2장에서 언급한 설정을 바탕으로 5m/s부터 3m/s 간격으로 시뮬레이션을 진행하였다. 각 풍속에 대하여, 난류강도는 앞서 언급한 바와

같이 NTM (Normal Turbulence Model)을 적용하였다.

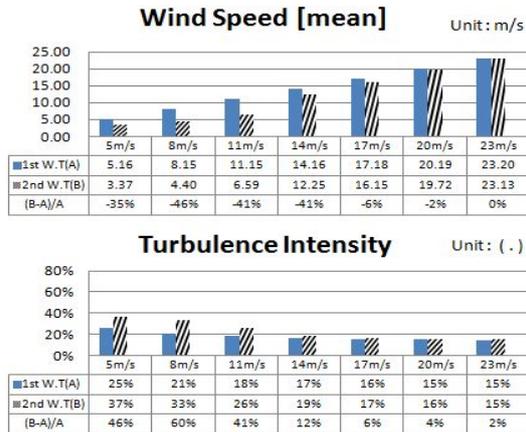


Fig. 5 Wind data for simulation

Fig. 5 에는 풍속 및 난류강도에 대한 시뮬레이션 결과를 그래프로 도시하였다. 그림에서 살펴보면, 하류에 위치한 풍력터빈(2nd)에서의 풍속이 상류에 위치한 풍력터빈(1st)에서의 풍속에 비해 저감되었음을 알 수 있다. 또한 난류강도의 경우 풍속과는 반대로 하류에 위치한 풍력터빈에서의 난류강도가 상류에 위치한 풍력터빈에서의 난류강도보다 증가한 것을 볼 수 있다. 정격풍속인 11m/s 보다 낮은 저 풍속 8m/s 에서는 1st 풍력터빈의 풍속이 8.15m/s, 2nd 풍력터빈의 풍속이 4.4m/s로 약 46% 감소하였고, 난류강도는 1st 풍력터빈은 21%, 2nd 풍력터빈은 33%로 약 60% 증가하였다. 또한 정격풍속 보다 높은 풍속을 살펴보면, 17m/s 의 경우 1st 풍력터빈의 풍속은 17.18 m/s 인 반면, 2nd 풍력터빈의 풍속은 16.15 m/s 로 약 6 % 감소하여 정격풍속 이전보다 풍속이 감소하는 비율이 작은 것을 알 수 있다. 또한 난류강도도 1st 풍력터빈에서 16% 인 반면 2nd 풍력터빈에서 17%로 약 1%

정도만 증가하여 역시 정격풍속이전보다 난류강도가 증가하는 비율이 작은 것을 알 수 있다. 이와 같이 정격풍속이전과 비교하여 정격풍속이후에서의 풍속의 감소율과 난류강도의 증가율이 작은 이유는 정격 이후에는 풍력터빈의 정격 파워보다 바람이 갖고 있는 파워가 더 높기 때문에, 1st 풍력터빈은 출력을 정격 출력으로 일정하게 유지하기 위해 블레이드의 피치각을 변화시켜 에너지를 적게 추출하고 하류로 더 에너지가 높으며, 난류성분이 적은 바람을 전달하기 때문이다.

Fig. 5 의 풍속과 난류강도의 변화가 풍력터빈의 발전량과 하중에는 어떤 영향을 미치는지 Fig. 6 와 Fig. 7 에 나타내었다. 그림에서 살펴보면, 정격풍속 보다 낮은 8 m/s 구간에서는 발전량이 1st 풍력터빈 811kW, 2nd 풍력터빈이 285kW 로 약 65% 감소하고 있고, 하중은 블레이드의 경우 8m/s 구간에서의 하중이 1st 풍력터빈은 1463kNm, 2nd 풍력터빈은 1239kNm로 약 15%, 타워의 경우 8m/s 구간에서 1st 풍력터빈은 3819kNm, 2nd 풍력터빈은 3737kNm로 약 5% 정도 감소한 것으로 나타난다. 하류에 위치한 풍력터빈의 경우 상류에 위치한 풍력터빈에 비해 하중이 작은 것을 알 수 있지만, 자신이 받게 되는 풍속의 크기와 동일한 풍속을 받는 상류터빈의 하중에 비해서는 하중이 높게 나오는 것을 확인 할 수 있다. 즉 8m/s 의 풍속에서 1st 풍력터빈은 8.15m/s 의 평균풍속을 받지만 2nd 풍력터빈은 4.4m/s 의 평균풍속을 받게 된다. 5m/s 풍속일 때 1st 풍력터빈은 블레이드의 하중은 768 kNm, 타워의 하중은 2316kNm을 받게 되는데 이를 4.4m/s 평균풍속을 받을 때와 비교해보면, 4.4 m/s 의 풍속을 받는 2nd 풍력터빈의 경우가 5m/s 의 풍속을 받는 1st 풍력터빈보다 블레이드의 하중이 약 38% 증가하였고, 타워의

하중은 약 61% 증가한 것을 확인할 수 있다.

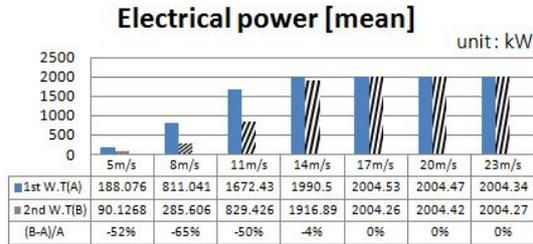


Fig. 6 Simulation results for electrical power.

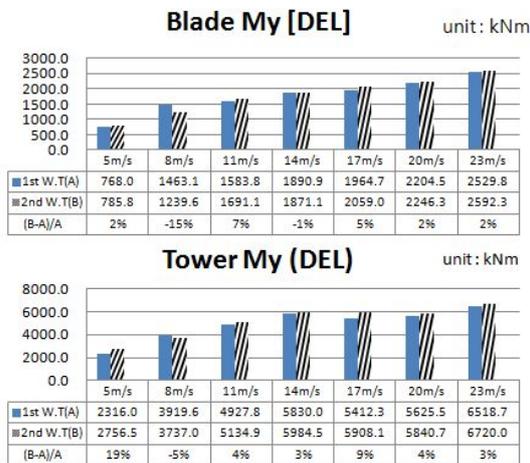


Fig. 7 Simulation results for loads

또한, 그림에서 살펴보면 정격풍속보다 높은 고 풍속 구간에서는 저 풍속 구간에서보다 후류의 영향이 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 그 이유는 앞서 설명된 것과 마찬가지로, 1st 풍력터빈의 에너지 추출량이 적어지면서, 하류로 더 높은 에너지와 적은 난류성분을 갖는 바람이 전달되기 때문이다. 하지만, 우리나라의 경우 해수면으로부터 80m ~ 100 m 높이에 있는 바람은 연평균 풍속이 10m/s 미만의 바람이기 때문에 후류의 영향은 작지 않을 것으로 판단된다.

앞의 결과에서 동일한 풍속과 비교하였을

때 1st 풍력터빈에 비해 2nd 풍력터빈의 발전량이 증가하고, 기계적 하중이 크게 나온 이유는 평균풍속이 비슷하더라도, 난류강도가 크게 증가하였기 때문이다. 난류강도의 증가가 풍력터빈에 어떠한 영향을 미치는지 자세히 살펴보기 위해 동일한 평균풍속에 대해 난류강도를 증가시켜가며 시뮬레이션을 수행하고, 난류강도 증가에 따른 출력 및 하중의 변화 경향성을 분석하였다. 시뮬레이션에는 평균풍속 8m/s의 바람을 이용하였고, NTM의 난류강도를 기준으로 하여 기준에 비해 10% ~ 60% 까지 10% 비율로 난류강도를 증가시켜가며 풍력터빈의 성능과 하중변화의 경향성을 분석하였다.

Fig. 8은 시뮬레이션에 적용한 바람의 평균 풍속과 표준편차를 막대그래프로 보여주고 있으며, Fig 9는 시뮬레이션에 적용한 바람의 난류강도 증가에 따른 시간영역에서의 풍속 분포의 변화를 보여준다. 즉, 표준편차가 커지게 되어 난류 성분이 강한 바람이 불게 된다. 그 그래프를 살펴보면 NTM 일 때는 3~12m/s 풍속 범위에 분포하게 되지만, 난류강도가 60% 증가하였을 때는 0~15m/s 풍속 범위에 분포하는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션에서 생성된 바람은 난류강도가 변해도 형상은 동일하게 나타나지만, 풍속의 크기가 달라지게 된다.

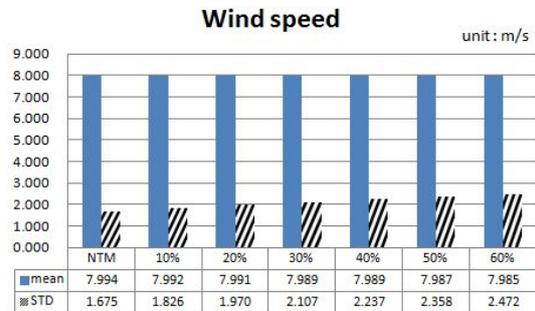


Fig. 8 Wind data for simulation

Fig. 9의 바람을 그래프로 정리하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 평균풍속은 거의 일정하지만, 표준편차의 값은 NTM일 경우에 비해 60%의 난류강도가 증가된 바람에서는 약 48% 증가하게 된다.

Fig. 9의 난류강도의 증가에 따른 바람이 출력량과 기계적 하중에 어떠한 영향을 미치는지 Fig. 10과 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 10을 살펴보면, 난류강도가 증가함에 따라 출력량이 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. NTM에 비해 60%의 난류강도가 증가된 바람이 불 때, NTM 난류강도일 때에 비해 약 5%의 출력량이 증가하지만 STD 값은 약 38%의 증가량을 보이고 있다. 즉 이는 출력량은 증가하지만, 출력의 상태가 안정적이지 못하고 그 편차가 매우 심한 것을 의미한다.

난류강도가 증가하게 되면 평균풍속을 기준으로 평균풍속보다 낮은 풍속범위에서의 빈도가 증가하게 되고 최저 풍속은 더욱 낮아지게 된다. 또한 평균풍속보다 높은 풍속범위에서의 빈도도 증가하게 되며, 최고 풍속은 더욱 높아지게 된다. 하지만, 출력은 풍속의 세제곱에 비례하기 때문에 평균풍속보다 낮은 바람의 경우 풍속이 낮아 풍속의 변화가 출력에 미치는 영향이 낮고, 평균풍속보다 높은 바람의 경우 풍속이 높아 풍속의 변화가 출력에 미치는 영향이 크게 된다.

따라서, 출력의 감소분(출력에 대한 평균풍속 이하 난류 증가의 영향)보다 출력의 증가분(출력에 대한 평균풍속 이상 난류 증가의 영향)이 크게 되므로 발전량은 증가하게 된다. 이를 증명하기 위해 Fig. 11에 Fig. 9의 NTM 과 난류강도가 60% 증가 하였을 때 두 가지 경우에 대해서 출력량 데이터를 나타내었다. NTM 일 경우에는 정격 풍속 11m/s 구간을 넘는 풍속이 적게 분포되어 있지만, 60% 증가된 바람에서는 11m/s 구간을 넘는 풍속이 늘어난 것을 확인할 수 있다. 이러한 풍속이 출력량에 영향을 미치게 되어 Fig. 11에

서와 같이 난류가 60% 증가하였을 때 발전량이 NTM 일 때 보다 증가하게 된다.

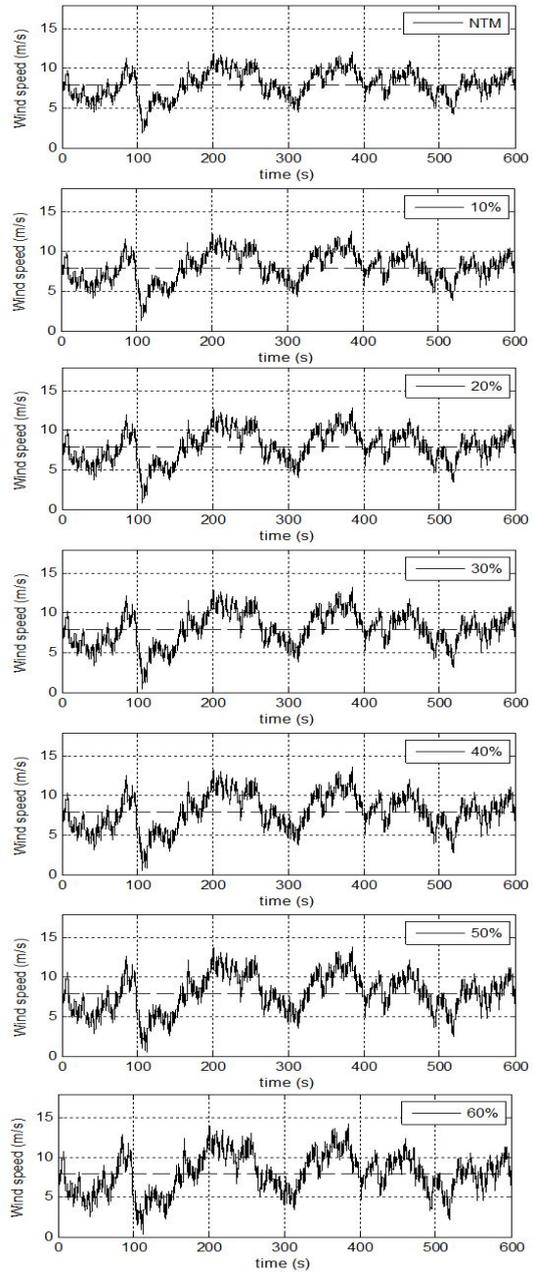


Fig. 9 Wind data for simulation in time domain. From top to bottom, wind data with NTM and 10%, 20%, 30%, 40%, 50% and 60% higher turbulence intensities than NTM.

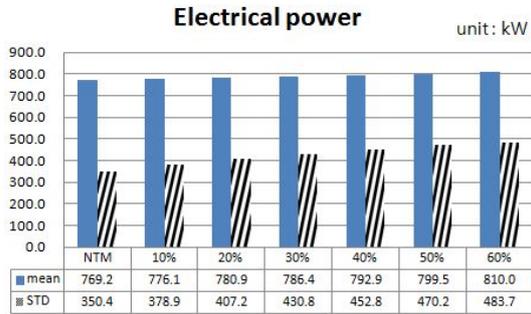


Fig. 10 Simulation results for electrical power

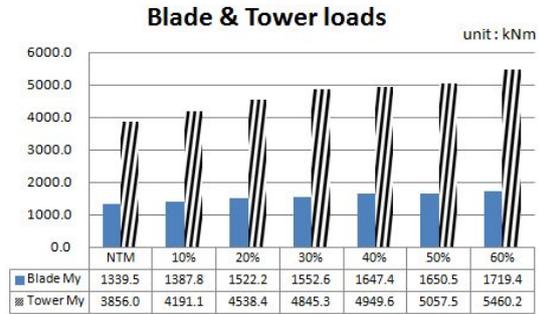


Fig. 12 Simulation results for loads

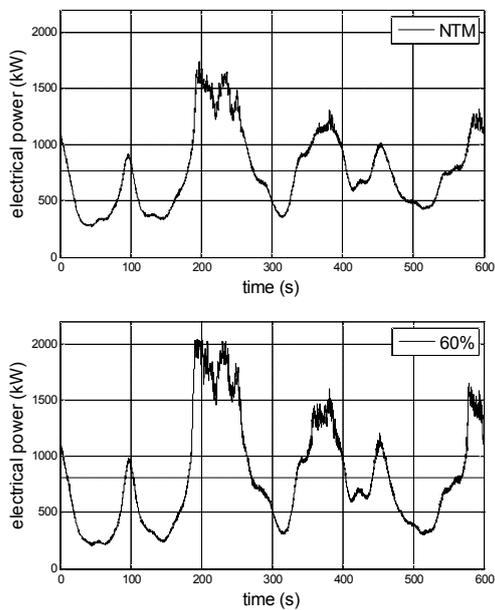


Fig. 11 Power data for simulation in time domain. From top to bottom, wind data with NTM and 60% higher turbulence intensities than NTM.

Fig. 12에는 난류강도가 증가함에 따라 풍력터빈이 받게 되는 기계적 하중의 변화를 나타내었다. 블레이드의 하중은 난류강도가 NTM 일 때는 1339.5kNm이고, 난류강도가 60% 증가하였을 때는 1719.4 kNm로 약 28% 증가하였고, 타워의 하중은 3856.0kNm, 5460.2kNm로 약 42% 증가한 것을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 GH Bladed 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 통해 부유식 플랫폼상에 설치된 풍력터빈을 가정하여, 풍력터빈간 이격거리가 200m 인 2기의 풍력터빈을 이용하여 후류효과가 하류의 풍력터빈의 성능과 하중에 미치는 영향에 대해서 분석 하였다. 시뮬레이션 결과로부터 후류의 영향으로 하류에 위치한 풍력터빈의 성능이 감소하고 하중이 증가하는 것을 정량적으로 확인할 수 있었으며, 정격 풍속이상의 고풍속 구간보다 정격풍속 이하의 저풍속 구간에서 감소율 및 증가율이 높은 것을 알 수 있었다. 또한 후류에 의한 난류강도의 증가로 인해, 동일한 평균풍속과 낮은 난류강도를 갖는 경우에 비해 풍력터빈의 발전량은 다소 증가하게 되지만 출력의 변동이 보다 심해지는 것을 확인하였으며, 하중의 경우 보다 증가하게 되는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 “10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전 시스템 개발 및 인프라 구축”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 본 연구는

2013년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호-120131441).

본 연구는 또한 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(NO.20134030200240)

Reference

1. Yoonsu Nam, Wind Turbine System Control, GS intervision, 2013, pp. 60~69, 130~137, 398~401
2. Ground-breaking wind power plant in the north sea, Horns Rev offshore wind farm, 2002
3. Yeon-Hee Kim, Analysis of the variation rate of a wind power plant considering the wake effect, Journal the Korean Institute of Electrical Engineers, 2012
4. Ko Kyung-Nam, An analysis of wake effect in a wind farm, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, 2013
5. Chung-Ok Kim, Characteristics of Fatigue Load in a Wind Turbine by the Wake, Journal of the Korean Solar Energy Society, 2011
6. Technical Guidelines for Wind Turbines, KOREAN REGISTER, 2008, pp. 88~97
7. E.A. Bossanyi, "GH Bladed Theory Manual," Garrad Hassan & Partners ltd, Bristol, 282/BR/009, 2007.
8. Jaehoon Son, The performance and load analysis of a floating wind farm due to wake, The Korean Society for Marine Environment and Energy, 2013