

## 10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전 시스템의 다수 풍력터빈 배치 설계 및 성능 평가

박세완<sup>1</sup> · 김경환<sup>1</sup> · 이강수<sup>1</sup> · 박연석<sup>2</sup> · 오현석<sup>3</sup> · 신형기<sup>4</sup> · 홍기용<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

<sup>2</sup>목포대학교 해양시스템공학과

<sup>3</sup>한국선급 기술본부연구소

<sup>4</sup>한국에너지기술연구원

## Arrangement Design and Performance Evaluation for Multiple Wind Turbines of 10MW Class Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation System

Sewan Park<sup>1</sup>, Kyong-Hwan Kim<sup>1</sup>, Kang-Su Lee<sup>1</sup>, Yeon-Seok Park<sup>2</sup>, Hyunseok Oh<sup>3</sup>,  
Hyunki Shin<sup>4</sup> and Keyyong Hong<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 305-343, Korea

<sup>2</sup>Department of Ocean Engineering, Mokpo National University, Mokpo 534-729, Korea

<sup>3</sup>Machinery Technology Research Team, Korean Register, Busan 618-814, Korea

<sup>4</sup>Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

### 요 약

본 연구에서는 10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템에 설치되는 다수 풍력발전기의 배치 설계를 수행하고, 전산유체역학 해석기법을 통해 다수 풍력발전기의 성능을 평가하였다. 날개요소운동량이론을 기반으로 한 풍력발전 단지 설계용 프로그램 WindPRO를 이용하여, 발전시스템의 적지 환경 풍황조건에 대해 최대에너지를 생산할 수 있는 배치 설계를 도출하였고, ANSYS CFX를 이용하여 다수 풍력발전기간의 후류 간섭영향을 발전기 성능 측면에서 검토하여, 근거리 다수 풍력발전기간의 후류 간섭이 시스템에 미치는 영향을 평가하였다.

**Abstract** – In this study, an arrangement design process for multiple wind turbines, placed on the 10MW class floating wave-offshore wind hybrid power generation system, was presented, and the aerodynamic performance was evaluated by using a computational fluid dynamics. An arrangement design, which produces a maximum power in the site wind field, was found by using a commercial program, WindPRO, based on a blade element momentum theory, then the effect of wake interference on the system between multiple wind turbines was studied and evaluated by using ANSYS CFX.

**Keywords:** Hybrid Power Generation System(복합발전 시스템), Multiple Wind Turbine Arrangement Design(다수 풍력터빈 배치 설계), Blade Element Momentum Theory(날개요소운동량이론), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Wake Interference(후류 간섭)

### 1. 서 론

지속적으로 온실가스 문제가 제기되고 원자력 발전의 위험성이 대두됨에 따라 신재생에너지 발전에 대한 관심과 연구개발 투자가

증가하고 있다. 특히, 파력, 해상풍력, 조류, 해수온도차 등으로 대표되는 해양에너지는 전 세계 25여개 국가에서 발전시스템 개발 연구를 진행하고 있을 정도로 국제적 기술 선점의 대상이 되고 있다. 그 중에서도 지속적으로 해양에너지 개발 분야에서 큰 관심을 받아온 파력발전은 조류, 조력, 해수온도차 등에 비해 많은 연구가 이루어지고 있으며, 육상풍력발전의 기술 실현으로부터 해상풍력

<sup>†</sup>Corresponding author: khong@kriso.re.kr

발전에 대한 개발 의지도 국제적으로 더욱 확고해지고 있다(NRG Expert[2011], Butterfield *et al.*[2005]). 특히, 최근에는 적지가 일치하는 바람과 파도에너지를 복합적으로 이용하여 경제성을 제고하기 위한 연구들이 수행되고 있다. 덴마크 Floating Power Plant 사는 부유식 기반구조물에 설치된 3기의 풍력발전기와 10기의 파력발전기를 복합적으로 이용하여 전력을 생산하는 시스템을 개발하고, 그에 대한 실험적 실증을 진행하고 있으며, 영국의 Green Ocean Energy 사는 고정식 해상 풍력발전기에 부착할 수 있는 500 kW급 파력발전기를 개발한 바 있다.

이러한 국제 해양에너지 개발 흐름에 맞춰, 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에서는 다수의 해상 풍력발전기와 파력발전기를 단일 부유식 구조물에 결합함으로써, 바람과 파도에너지를 복합적으로 이용하여 전력을 생산하는 발전시스템 개발 연구를 2013년부터 진행하고 있다. 현재까지 설계된 시스템은 4기의 풍력발전기가 반잠수식 구조물 상부 네 모서리에 탑재되고, 24기의 파력발전기가 구조물의 자유수면 둘레를 따라 배치되는 형태로, 파력발전기와 풍력발전기를 통합적으로 제어하여 최대 10MW 전력을 생산하는 개념으로 고안되었다. 복합발전 시스템의 개념 설계 내용은 Kim *et al.*[2015]에 발표될 예정이다.

파력-해상풍력 복합발전 구조물에 배치되는 다수의 풍력발전기는 부유체의 제한적인 크기로 인해 비교적 서로 아주 가까운 거리에 위치하게 된다. 상류에 위치한 풍력발전기에서 발생하는 후류가 하류에 위치한 풍력발전기에 유입되게 되며, 후류의 특성으로 인해 하류 풍력발전기의 발전 효율이 저하된다. 이로 인해, 다수 풍력발전기 정격 출력을 모두 합하는 것으로 풍력발전기 전체 출력을 추정하는 것은 무리가 있으며, 해양 풍황조건에 따른 전체 풍력발전기 출력을 후류 간섭 효과를 고려하여 추정하는 것이 필요하다. 또한, 다수 풍력발전기의 다양한 배치 형태에 따른 전력 생산량을 예측하고, 이를 평가하여 배치안을 도출하는 것이 설계과정에서 요구되며, 더불어 상류 풍력발전기에서 발생한 후류의 특성을 파악하고 하류 풍력발전기에 미치는 영향을 정량적으로 검토하여 풍력발전기의 안전성을 평가해야 한다.

풍력발전기 성능 해석에는 날개요소운동량이론(Blade Element Momentum Theory; BEMT) 기법과 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 기법이 주로 활용되었으며, 날개요소운동량이론은 지금까지 수많은 풍력발전기 설계에 활용되어 왔고, 수십 년간의 연구를 거치면서 점차 실제 현상에서 발생하는 효과들을 모델링할 수 있도록 보완되었다(Vermeer *et al.*[2003]). Benini and Toffolo[2002]는 날개요소운동량이론 및 최적화 알고리즘을 이용하여 풍력발전기 최대 연간생산량 밀도 및 에너지 비용 관점에서의 최적 설계를 수행하였고, Kang *et al.*[2008]은 전산유체역학 해석 기법을 이용하여 NREL(National Renewable Energy Laboratory) Phase VI 로터에 대한 공력해석을 수행 및 검증한 후 후류 간섭에 의한 로터 성능저하 효과를 평가한 바 있다. Choi *et al.*[2011]은 6MW 해상풍력발전단지의 풍력발전기 이격거리에 따른 공력학적 출력 변화를 전산유체역학 해석을 통해 평가하였으며, 결과를 통해

풍력발전기 직경의 5배에 해당하는 이격거리가 공력학적 출력 평가기준 거리가 될 수 있음을 보인바 있다.

그러나 기존의 풍력발전기 후류 간섭에 관한 연구는 풍력발전단지의 성능평가 목적으로 수행된 것이기 때문에, 풍력발전기간의 거리가 로터(Rotor) 직경대비 최소 5배 이상 이격되어 있는 조건을 전제로 한다. 반면, 복합발전 시스템의 경우 풍력발전기가 단일 부유체에 탑재된다는 특성에서 기인하여, 풍력발전기가 로터 직경대비 2-3배 이내의 이격 거리로 배치되므로 근접 후류영역에 속하게 된다. 근접 후류영역에서는 날개요소운동량이론에 주로 사용되는 후류모델의 정확성이 충분히 검증되지 않았기 때문에 날개요소운동량이론 해석만을 통해 후류영향을 평가하는 것은 다소 불확실성이 존재할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 다수의 풍력발전기 전체 성능을 효율적으로 추정할 수 있는 날개요소운동량이론 기법을 통해 최대 전력 생산 관점의 배치 설계를 도출하고, 풍력발전기 유동 문제를 비교적 상세히 모델링하여 후류를 시뮬레이션 할 수 있는 전산유체역학 해석기법을 적용하여 복합발전 시스템의 후류 특성 및 풍력발전기 성능을 정량적으로 평가함으로써 향후 다수 풍력발전기의 근거리 배치에 대한 적합한 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 문제 정의

복합발전 시스템 개념설계의 결과로, 대상 구조물은 링(Ring) 형태의 반잠수식 구조물로 설계되었다. 복합발전 구조물은 4기의 풍력발전기와 24기의 파력발전기를 탑재해야 하기 때문에 그 크기가

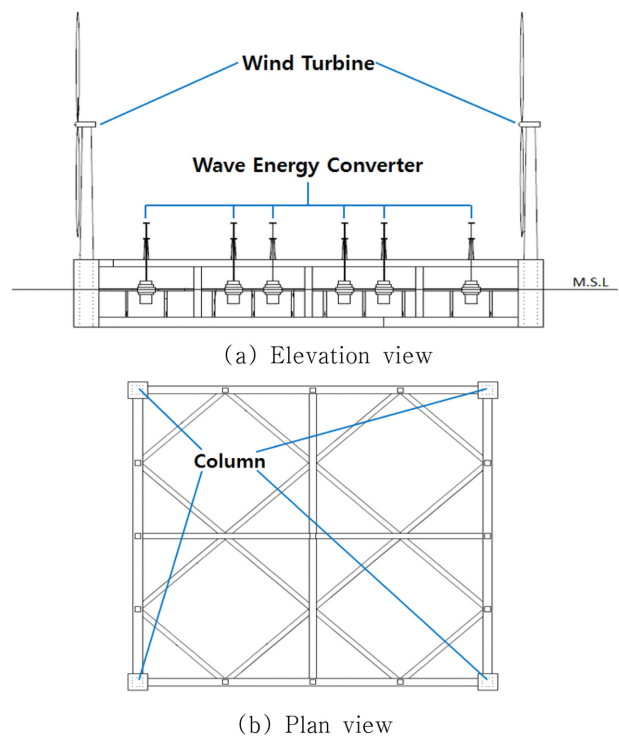


Fig. 1. Baseline platform geometry.

**Table 1.** Principal dimensions of the baseline platform

Item	Value
LOA (m)	158.5
Height (m)	27
Draft (m)	15
Total Weight (Ton)	23,285

거대하다는 특징이 있다. Fig. 1 및 Table 1에는 복합발전 구조물의 주요치수 및 형상을 나타내었다. 기반구조물은 길이와 폭이 동일한 대칭형 구조이며, 양 컬럼(Column) 외측 간의 거리가 158.5 m로, 통상적인 석유 시추용 반잠수식 구조물의 크기보다 2배 이상 크다. 흘수 및 높이는 각각 15 m, 27 m로, 자유수면 위로부터 컬럼 상부까지의 길이는 12 m이다. 4기의 풍력발전기는 각 컬럼 상부에 설치되기 때문에 실제 풍력발전기 나셀(Nacelle)은 타워 높이에 구조물 건현 높이를 합한 위치에 놓이게 된다.

### 3. 해석 기법

#### 3.1 날개요소운동량이론

날개요소운동량이론은 로터를 통과하는 유선의 운동량이 평형을 이룬다는 운동량이론(Momentum Theory)과 로터 날개에 작용하는 힘은 날개 반경 위치별 각 단면이 받는 양력과 항력에서 기인한다는 날개요소이론(Blade Element Theory)을 결합한 것으로, Glauert [1935]에 의해 정립되었다. 상용 프로그램인 WindPRO의 날개요소 운동량이론에 대한 상세 내용은 Sanderse[2009]의 문헌에 정리되어 있다.

날개요소운동량이론을 기반으로 하여, 풍력발전기 로터에서 발생한 속도 손실을 계산하기 위해 N.O. Jensen 후류 모델을 적용하였다. 이는 후류 분포의 직경이 선형적으로 증가하면서 전파된다는 가정에 기반을 두어 정립된 기법으로 Katić *et al.*[1986]에서 최초로 고안되었으며, Sørensen *et al.*[2008]에서는 여러 후류 모델에 대한 날개요소운동량이론 해석결과와 실제 풍력발전 단지의 계측 데이터의 비교 검증을 수행하여, N.O. Jensen 후류 모델이 가장 적합한 것으로 평가된 바 있다.

날개요소운동량이론 기반의 상용 프로그램 WindPRO를 이용하여, 풍력발전기 용량, 배치 거리, 배치 방향에 대한 민감도해석(Parametric Study)을 수행하였다. 덴마크 RISØ 연구소에서 개발한 바람데이터 특성 분석 프로그램인 WASP 모델의 BZ-model을 사용하여 복합발전 시스템 설치 해역의 바람 풍속, 방향, 난류 강도 등의 풍황조건을 모델링 하였으며, WindPRO 결과로부터, 후류 손실을 고려한 잠재 연간에너지생산량(Potential Annual Energy Production; Potential AEP)과 이용률(Capacity Factor; C.F.)을 계산하여 풍력발전기 성능을 평가하였다. 잠재연간에너지 생산량은 후류 간섭효과를 고려한 풍력발전기의 연간총에너지생산량을 나타내고, 이용률은 정격 출력을 기준으로 한 연간총에너지생산량 대비 실제 에너지생산량의 비율로 정의된다.

#### 3.2 전산유체역학

전산유체역학 해석 문제에서 유동 지배방정식은 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식과 연속방정식으로 구성되었다. 미지수항인 Reynolds 응력은 Boussinesq 가설에 의해 평균속도구배 관계식으로 정리되었으며, Menter[1994]가 고안한  $k-\omega$  SST 난류 모델을 적용하여 난류운동에너지( $k$ ) 및 난류주파수( $\omega$ )에 대한 이송 방정식을 도입하였다. 해당 기법에 대한 수식은 Park *et al.*[2013]에 정리되어 있다. 유동 지배방정식을 유한체적법 기반의 상용 전산유체역학 해석프로그램인 ANSYS CFX를 사용하여 해석하였다. 이류(Advection)항 및 확산(Diffusion)항은 2차 정도의 고분해능법(High Resolution Scheme) 및 중심차분법(Central Difference Scheme)을 적용하여 이산화하였으며, 속도-압력 결합은 Rhie and Chow[1982]가 제안한 이산화기법으로 수행하였다. 풍력발전기 후류를 시뮬레이션하기 위해서는 날개 회전을 고려한 비정상(Unsteady) 해석을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 날개를 직접 회전시키기 위하여 전체 해석영역을 회전영역과 비회전영역으로 구분하였으며, 슬라이딩 격자(Sliding Mesh) 기법을 통해 풍력발전기 날개 회전운동을 모델링하였다. 회전영역과 비회전영역 사이 경계면의 경우, 시간 간격별로 격자의 상대적인 위치가 변화하는 슬라이딩 격자기법의 특성을 보완하기 위해 계산 영역간의 상대적 위치에 따른 물리량을 전달해주는 Transient Rotor-Stator 기법을 적용하였다.

### 4. 다수 풍력발전기 배치 설계

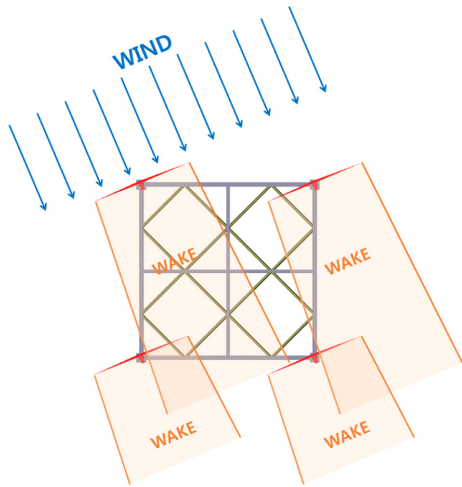
#### 4.1 해석 조건

본 연구에서는 복합발전 시스템의 향후 대용량 확장성을 고려하여, 10 MW 목표출력 달성을 위해 정격출력이 각각 3 MW와 2 MW인 풍력발전기를 민감도해석 대상으로 하였다. 대상 풍력발전기의 주요 제원은 Table 2에 나타내었으며, 이때 허브(Hub) 높이는 자유수면 높이를 기준으로 표기되었다. 대상 풍력발전기 블레이드는 한국에너지기술연구원에서 연구용으로 자체 설계한 블레이드 모델을 참고한 것이다. 복합발전 시스템에 설치되는 다수 풍력발전기 배치조합은 4기 모두 WT-3MW인 경우(SCENARIO 1), 4기 모두 WT-2MW인 경우(SCENARIO 2), WT-3MW 및 WT-2MW가 각각 2기씩 설치되는 경우(SCENARIO 3)로 총 세 가지 조건을 고려하였다.

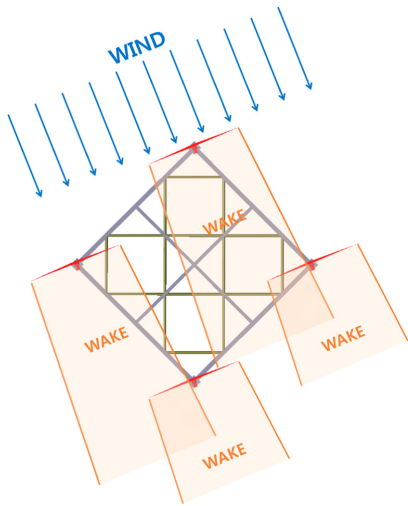
개념 설계된 부유식 기반구조물의 측면 컬럼 중심간 길이는 150 m이지만, 풍력발전기간 이격거리를 변수로 두기 위해 기반구조물의 크기를 변경한다는 전제로 125 m, 140 m, 150 m, 160 m의 총 4가지 풍력발전기 이격거리조건을 산정하였다. 또한, 부유식 기반구조

**Table 2.** Specifications for baseline wind turbines

	WT-3MW	WT-2MW
Rated power (MW)	3	2
Rotor diameter (m)	112	90
Hub height (m)	78	66
Cut-in wind speed (m/s)	3	3
Cut-out wind speed (m/s)	25	25



(a) 0° Platform Orientation

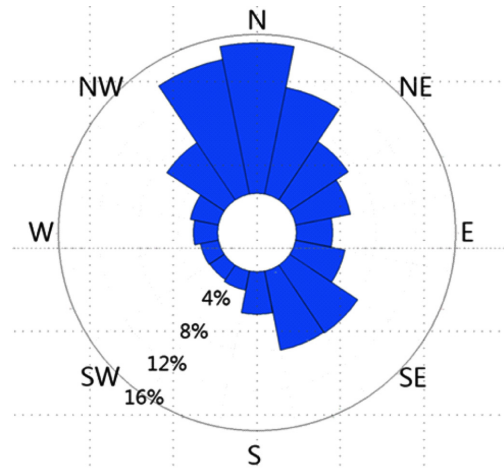


(b) 45° Platform Orientation

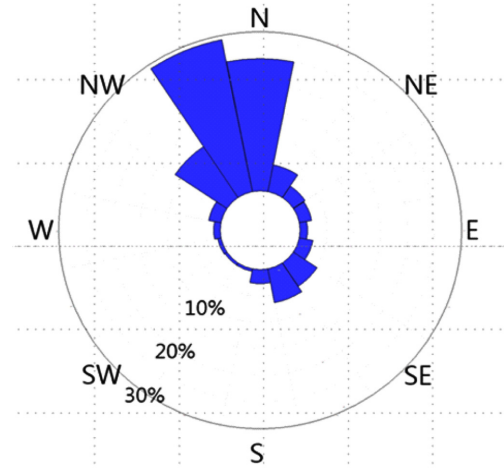
Fig. 2. Platform orientation cases.

물의 정복을 기준으로 하여 시계반대방향으로 11.25° 간격의 0°부터 45°까지 총 5개의 구조물 방향조건을 산정하였다. 구조물 방향조건 중 북북서풍에 대한 0° 및 45° 조건을 Fig. 2에 도식화하여 나타내었다. 풍력발전기용량조합 변수 3개, 이격거리변수 4개, 구조물 방향변수 5개를 모두 조합하여 전체 60개 경우의 수가 산정되었으며, 그에 대한 다수 풍력발전기 성능해석을 WindPRO를 이용하여 수행하였다.

복합발전 시스템 설치지역으로 선정된 제주도 차귀도 서쪽 해역 부근 고산기상대에서 측정한 실험역 데이터를 바탕으로, 고도 및 위치 보정을 수행하여 얻은 재해석데이터의 바람 장미도를 Fig. 3에 나타내었다. (a)는 각 풍향의 발생빈도 비율을 나타낸 것이고, (b)는 풍력에너지 분포 비중을 방향별로 나타낸 것이다. 단순 바람발생풍향비율만 고려하면 북풍(N)과 북북서풍(NNW)의 비중이 높고 남동풍(SE)과 남남동풍(SSE) 방향의 바람도 일부 존재하였으나, 풍력에너지 분포를 보면 북북서풍과 북풍에서 각각 30% 및 25%로



(a) Wind frequency rose



(b) Wind energy rose

Fig. 3. Rose plot for wind frequency and wind energy on the site.

대부분을 차지하였다. 해역의 주풍향은 풍력에너지 분포비중을 기준으로 정하며, 따라서 북북서풍 방향임을 알 수 있다.

### 4.2 해석 결과

Fig. 4~6에 60개의 해석조건에 대한 전체 해석결과를 요약하여 나타내었다. 후류손실의 고려 유무에 따른 4기 풍력발전기 전체의 연간에너지생산량 효율을 보면, SCENARIO 1에서 최소 85.5%에서 최대 88.5%, SCENARIO 2에서 최소 85.3%에서 최대 88.6%, SCENARIO 3에서 최소 86.2%에서 최대 89.4%로 대체로 높고 편차가 적은 효율을 나타내고 있다. 통상적인 풍력발전단지 관점에서 평가하면 다소 낮은 효율로 판단될 수 있으나, 풍력발전기간 이격거리가 아주 짧은 복합발전 시스템의 특성에 비추어 볼 때, 기대보다 높은 효율결과를 얻을 수 있었다.

SCENARIO 1의 160m, 45° 조건, SCENARIO 2의 160 m, 45° 조건, SCENARIO 3의 160 m, 0° 조건에서 모두 최대 효율이 발생하였다. 이는 기반구조물 회전각이 0°와 45°일 때 주풍향에 대한 풍

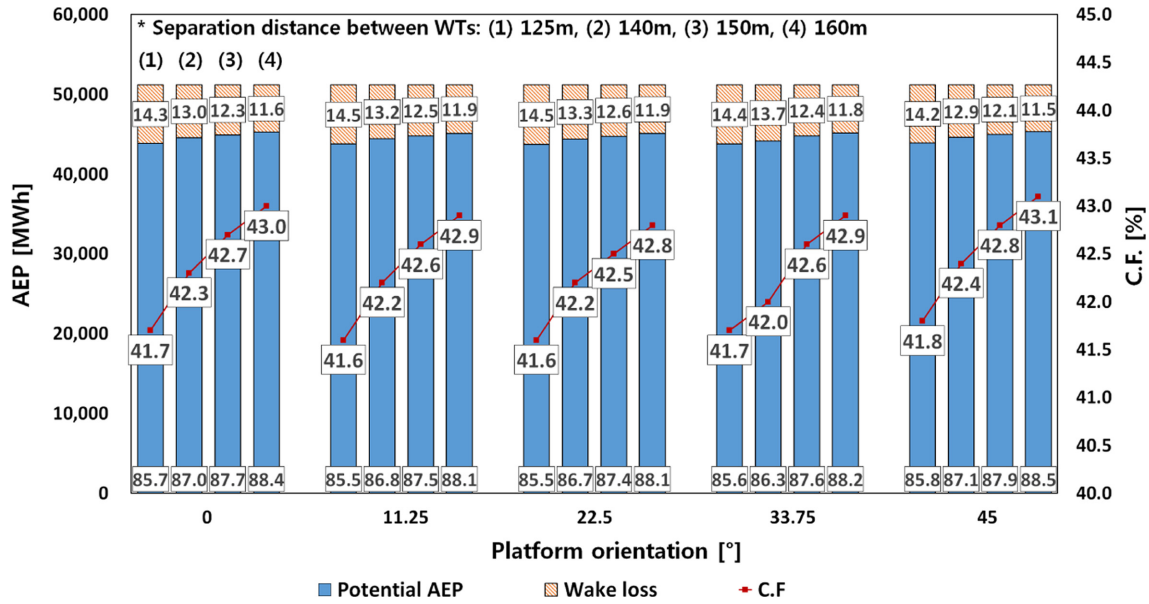


Fig. 4. AEP and C.F. for variation of WT distance and platform orientation (Scenario 1).

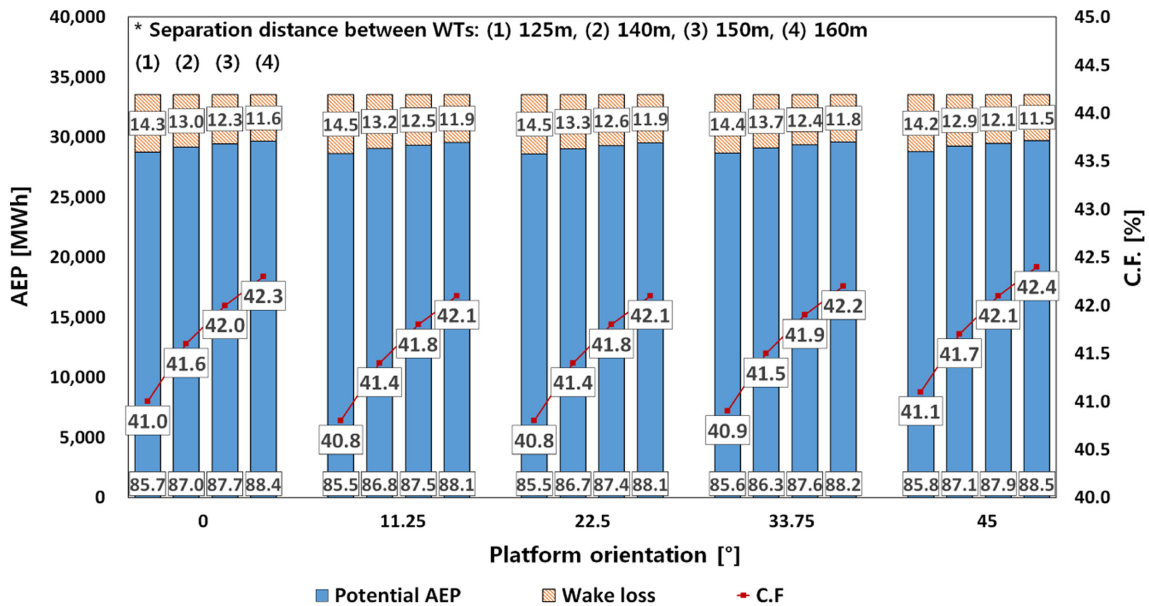


Fig. 5. AEP and C.F. for variation of WT distance and platform orientation (Scenario 2).

력터빈간 후류중첩구간이 가장 적어 후류영향에 의한 손실이 줄어들기 때문이다. 따라서 해당 해역에 대한 복합발전 시스템의 다수 풍력발전기 배치설계에는 가능한 최대 이격거리를 확보하는 것과 주풍향에 대해 0° 또는 45°의 각도로 기반구조물을 배치하는 것이 중요하다고 볼 수 있다.

해역의 연평균 8.6m/s에 달하는 풍부한 풍향자원으로 인해, 전체 SCENARIO에서 40.8% ~ 43.2%의 비교적 높은 이용률을 보여주고 있다. 연간에너지생산량 효율이 최대로 나온 조건에서 각각 최대 이용률 43.1%, 42.4%, 43.2%가 도출되었다. 이용률 결과로 평가하면 SCENARIO 3의 160m, 0° 조건이 가장 많은 전력을 생산

할 수 있는 배치 형태이지만, SCENARIO 1 및 2의 최대 이용률 조건과의 차이가 작기 때문에, 건조비용, 제어방법 등의 시스템 전체 측면을 고려한다면 SCENARIO 1 및 2와 같이 단일 종류의 풍력발전기를 배치하는 것이 더 유리하다고 판단된다. 또한, 길이 및 폭이 158.5m에 달하는 초대형 구조물의 건조 비용 및 건조가능성 등을 고려한다면 구조물의 크기는 작을수록 유리하지만, 후류 해석 결과에서 나타난 바와 같이 풍력발전기 간 이격거리가 줄어들수록 후류에 의한 성능손실이 크게 발생한다. 더불어, 구조물 배치방향에 따른 성능 종속성을 살펴보면, 배치방향 변화에 대해서 이용률이 약 0.1% 정도만 증감하였으며, 이를 통해 구조물 배치방향은 다

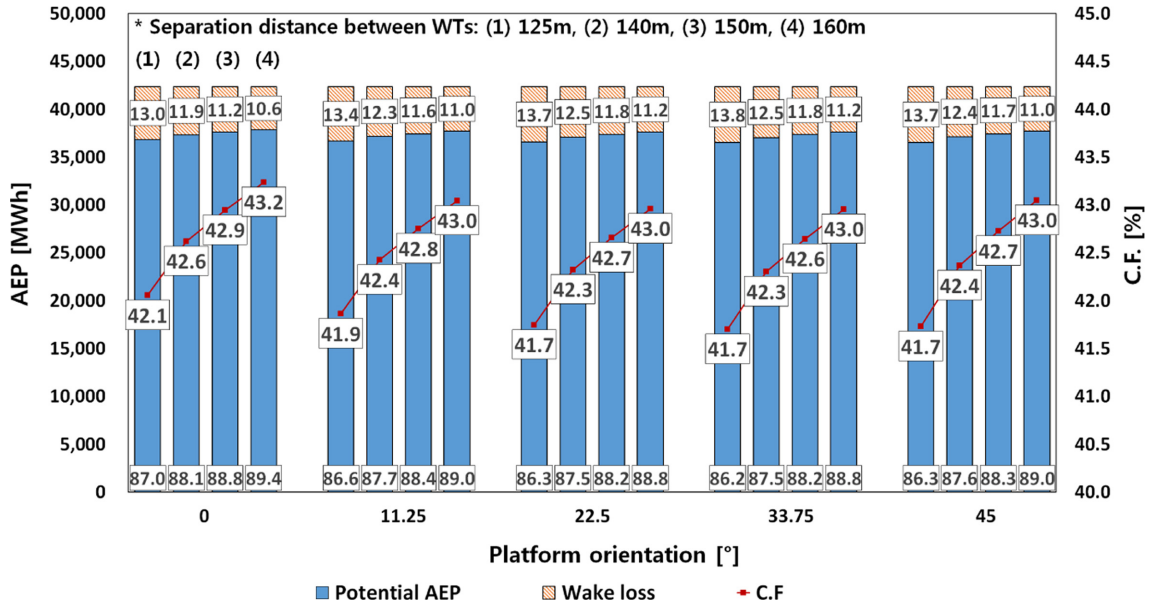


Fig. 6. AEP and C.F. for variation of WT distance and platform orientation (Scenario 3).

수 풍력발전기 성능에 큰 영향을 미치는 요소가 아닌 것을 확인하였다. 따라서 본 연구과제에서는 시스템 개념설계 단계의 불확실성을 고려하여, 풍력발전기 용량과 구조물 배치방향에 대해서는 가능성을 열어두고 이격거리에 대해서만 150 m로 결정하여 설계를 진행하였으며, 본 연구의 해석조건으로는 SCENARIO 2의 150 m 이격거리 및 0° 배치안을 선정하여 복합발전 시스템 개념설계에 적용하였다.

### 5. 풍력발전기 후류 영향 평가

#### 5.1 해석 조건

풍력발전기 해석도메인을 구성하기 위하여, 정렬격자와 비정렬 격자를 복합적으로 사용하는 혼합격자 기법을 적용하였다. 혼합격자 기법은 Kim and Kim[2011]에서 도입되어 전산유체역학 기법을 이용한 풍력발전기 성능해석에 활용되었고, Lee et al.[2012]의 연구에서 수평축 조류발전 터빈의 전산유체역학 해석에 적용되어, 터빈 날개주위 유동을 포착하는 것에 적합한 방법을 보인 바 있다. 풍력발전기 후류 시뮬레이션을 위해서는 날개 후방영역에 정렬 격자를 분포시키는 것이 타당하며, 이를 위해 비교적 정렬격자 생성이 어려운 허브 주위 영역에만 비정렬격자계를 적용하였다. 해석 영역을 효율적으로 구성하기 위하여 풍력발전기 외부 영역에서는 상대적으로 적은 수의 격자를 분포시켰으며, 날개 주위 및 후류영역에는 조밀한 격자를 분포시켰다. Fig. 7에는 단일 풍력발전기 조건인 경우, 날개와 허브로 구성된 회전영역에 약 150만개, 비회전 영역에는 약 300만개의 격자를 분포시켜 총 450만개의 격자가 사용되었으며, 풍력발전기 2기가 배치된 조건에서는 총 600만개의 격자가 사용되었다.

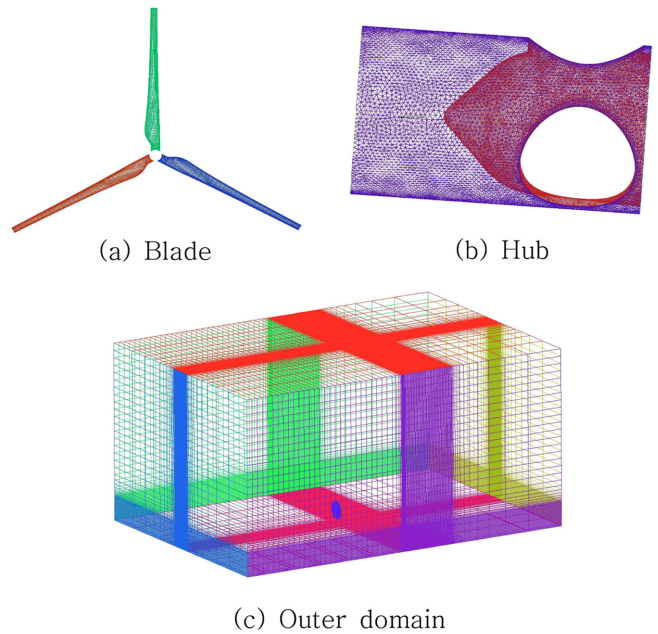


Fig. 7. Computational mesh for the single wind turbine case.

유동해석을 위한 전체 영역은 경계면 영향을 최소화하기 위하여 로터직경(D)을 기준으로 입구 및 출구에서 풍력발전기 허브중심까지의 거리를 각각 10D, 양측벽에서 풍력발전기까지 거리를 각각 7D, 상부 벽에서 풍력발전기 허브중심까지의 거리를 10D로 두었으며, 해석영역 크기 테스트를 수행하여 적합성을 검토하였다. 2기 풍력발전기가 배치되는 조건에서도 두 풍력발전기 사이에 이격거리 만큼만 추가하고 다른 경계면간 거리는 유지하였다. 입구 경계 조건으로는 유입속도조건을 적용하였고, 출구조건은 압력조건, 상하부 및 양측면 경계면에는 점착조건을 고려하지 않는 자유벽면조

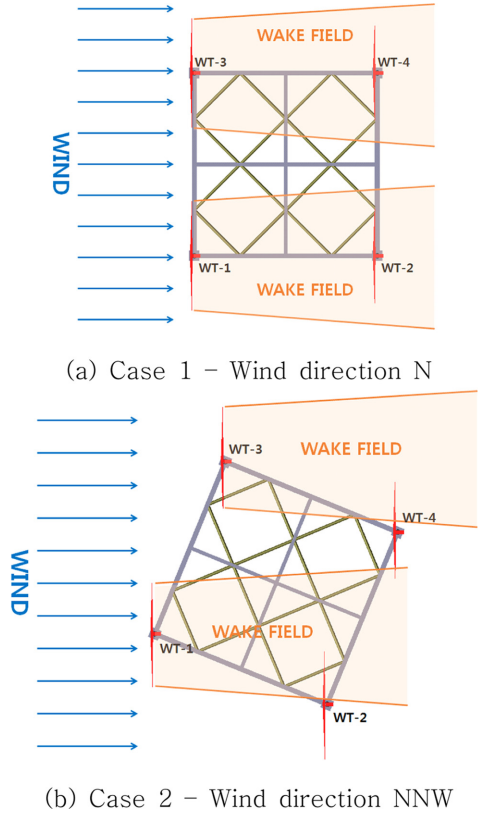


Fig. 8. CFD analysis cases.

건을 부여하였다.

기반구조물 상부 네모서리에 4기의 풍력발전기가 배치되는 형태이나, 전산유체역학 해석기법을 이용하여 효율적으로 후류 영향을 평가하기 위해 풍력발전기 2기만을 해석대상으로 하였다. 주풍향 북북서풍과 북풍에 대한 풍력발전기 후류 간섭 문제를 해석하기 위해, Fig. 8과 같이 총 두 가지 해석조건을 선정하였다. 첫 번째는 북합발전 시스템에 북풍이 유입되는 조건으로, 이 때 전후로 배치된 풍력발전기 2기 사이에서 후방 풍력발전기가 후류영향을 받게 된다(CASE 1). 두 번째는 북북서풍이 유입되는 조건으로, 전후 배치된 풍력발전기 2기 사이에서 후방 풍력발전기가 후류영역에 놓이게 되며, 이때 유입유동의 각도 변화에 의해 CASE 1과는 후류 간섭양상이 달라진다(CASE 2).

CASE 1의 경우, 후방 터빈이 전방 터빈에 의한 후류영역에 완전히 속하게 되므로 후방 풍력발전기에 유입되는 풍속은 급격하게 감소한다. 풍력발전기는 풍속에 따라 최적의 효율을 내도록 로터회전속도를 제어하게 되므로, 후방터빈에 유입하는 풍속에 대한 회전속도를 후방 풍력발전기에 적용시켜야 한다. 따라서 CASE 1, 2의 해석에 앞서, 단일 풍력터빈의 전산유체역학 해석을 수행하여, 후방 터빈에 유입되는 풍속을 먼저 도출하고, 그에 대한 로터회전속도를 CASE 1 해석에 적용하였다. 더불어, 본 연구에서 적용하는 전산유체역학 해석기법의 유효성을 검토하기 위하여 단일 풍력발전기에 대한 날개요소운동량이론 해석결과와 전산유체역학 해석결과를 비교하였다.

Table 3. BEMT and CFD results for the single wind turbine case

TSR	$C_p$ (BEMT)	$C_p$ (CFD)	(BEMT-CFD)/BEMT
6.28	0.433	0.425	-2%
7.54	0.484	0.45	-8%
9.42	0.439	0.411	-7%

### 5.2 해석 결과

전산유체역학 해석기법을 2MW 용량의 단일 풍력발전기(WT-2MW)에 적용하여 수치해석을 수행하였다. 정격 회전속도 16 rpm을 기준으로, 입구 풍속을 8 m/s에서 12 m/s까지 변화시켜 주속비(Tip Speed Ratio; TSR)에 따른 출력계수(Power Coefficient;  $C_p$ )를 계산하여 Table 3에 날개요소운동량이론 해석결과와 함께 나타내었다. 두 결과를 비교해보면, 증감 추세는 비슷하지만 전산유체역학 해석결과값이 날개요소운동량이론 결과값 보다 더 낮게 추정되었다. 날개요소운동량이론은 3차원 효과를 잘 구현하지 못하기 때문에 통상 전산유체역학 해석이 성능을 더 낮게 계산하는 것으로 알려져 있고, 전체적인 정성적 경향이 일치하므로 해당 전산유체역학 해석기법이 적합한 타당성을 갖는다고 판단하였다.

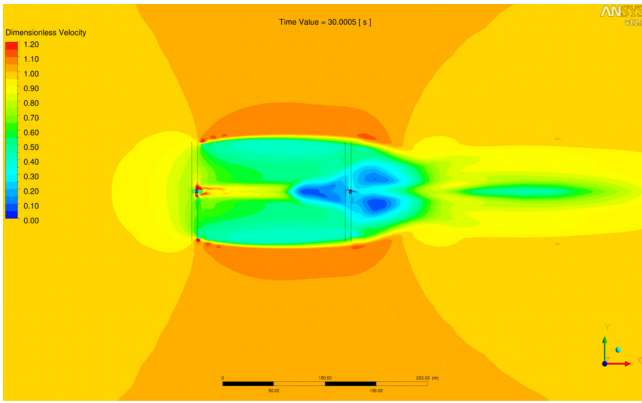
CASE 1 해석의 후방 풍력발전기 회전속도를 산출하기 위하여, 단일 풍력발전기의 전산유체역학 해석결과로부터, 후류 영역내의 후방 풍력발전기 위치에서의 평균풍속을 도출하였다. 전방 풍력발전기로부터 150 m 떨어진 지점에서 로터 평면상 로터직경이내 영역의 풍속을 획득하였으며, 그 결과 약 4.45 m/s의 평균풍속을 도출하였다. 이는 정격풍속 10 m/s 대비 약 45% 수준에 해당된다. 해당 유입속도를 최대 효율이 발생하는 지점의 주속비( $TSR = r\Omega/V_{in}$ ; r: 로터반지름,  $\Omega$ : 로터회전속도,  $V_{in}$ : 입구풍속)에 적용하여 로터회전속도 6.7 rpm을 역추산하였다. 따라서 CASE 1 해석에서는 후방 풍력발전기 회전속도로 6.7 rpm을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

Table 4에는 CASE 1 해석결과로부터 도출된 전방 및 후방 풍력발전기의 추력, 토크, 출력을 나타내었다. 전방 풍력발전기에서 발생한 후류로 인해 후방 풍력발전기에 유입하는 풍속이 급격히 감소하였고, 그에 따라 후방 풍력발전기의 회전속도도 더 작은 값이 적용되었기 때문에, 추력 및 토크는 전방 풍력발전기 대비 약 80% 감소하였고, 파워는 약 90% 감소하는 것을 확인하였다.

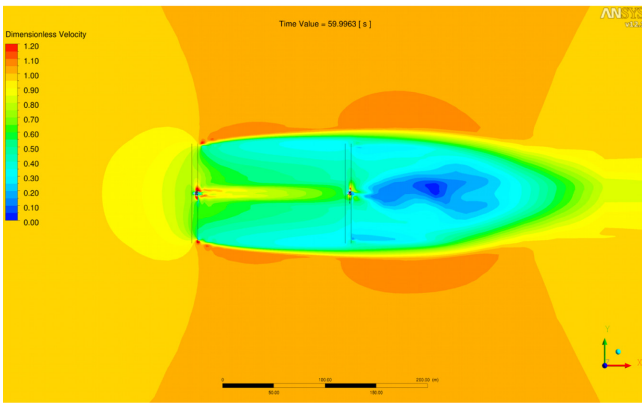
Fig. 9에는 CASE 1 해석결과의 시간에 따른 후류 유동장 분포를 나타내었다. 이때, 유동장 분포는 유입유동속도( $V_{in}$ )에 대한 유동분포속도( $V_{in}$ )의 상대 비율로 나타내었다. 후방 풍력발전기가 전방 풍력발전기에 의해 발생한 후류영역에 완전히 속해있으며, 후방 풍력

Table 4. Thrust, torque, and power results from the Case 1 (tandem, wind direction N) simulation

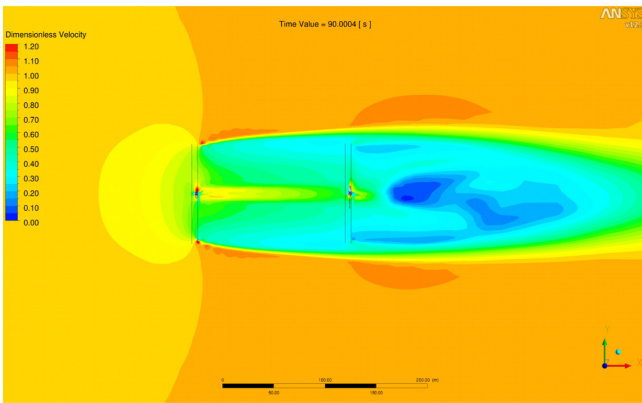
	Upwind WT	Downwind WT	(Upwind-Downwind)/Upwind
Thrust (N)	3.50E+05	7.19E+04	-79%
Torque (N·m)	9.64E+05	2.24E+05	-77%
Power (W)	1.61E+06	1.57E+05	-90%



(a) t = 30s



(b) t = 60s



(c) t = 90s

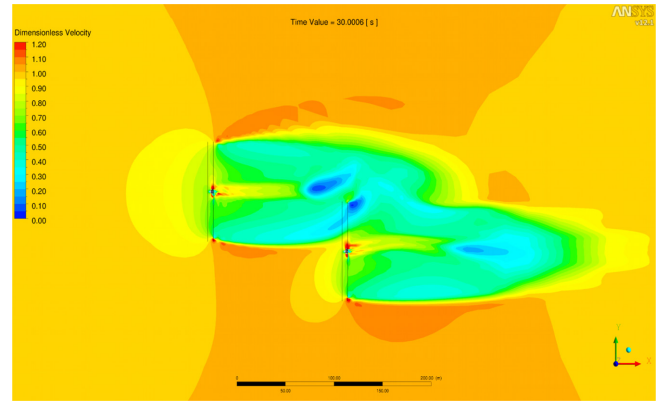
**Fig. 9.** Dimensionless velocity( $=V_m/V_\infty$ ) distribution in the wake region (Case 1).

발전기에 의해 이후 유동이 급격히 불안정해 지는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 풍력발전기 2기가 풍향에 대해 일직선상에 놓이는 조건에서는 후방 풍력발전기의 성능이 급감하기 때문에, 가급적 해당 조건을 회피하는 것이 바람직하다.

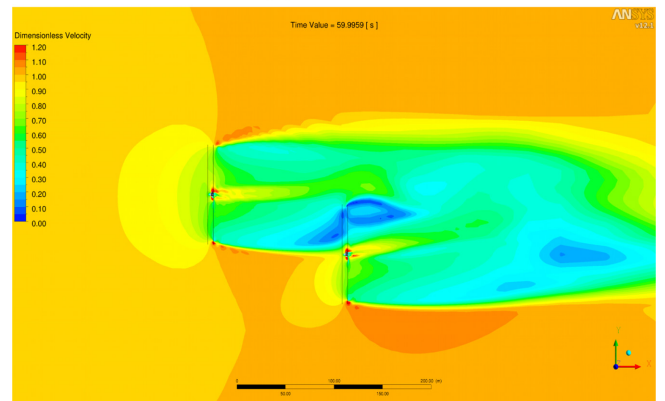
CASE 2의 북북서풍 해석에서는 전방 풍력발전기에 의한 후류가 후방 풍력발전기 전체에 영향을 미치지 않고, 후방 풍력발전기 회전영역 중 일부에 걸치게 된다. 그에 따라 후방 풍력발전기에 유입되는 풍속은 CASE 1에 비해 크게 감소하지 않으므로, 본 해석 조건에서는 2기의 풍력발전기 모두 정격 회전속도 16 rpm을 적용하였다.

**Table 5.** Thrust, torque, and power results from the Case 2 (tandem, wind direction NNW) simulation

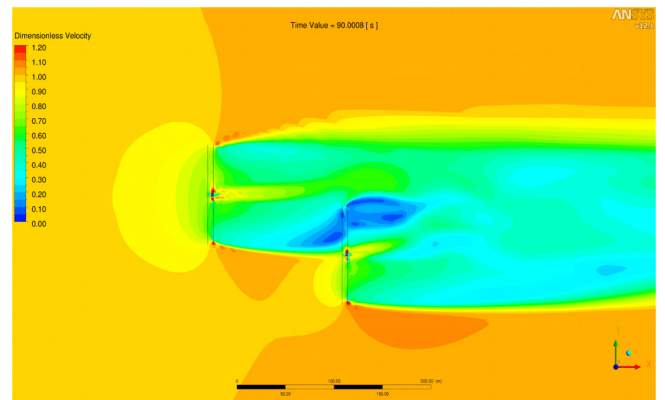
	Upwind WT	Downwind WT	(Upwind-Downwind)/Upwind
Thrust (N)	3.46E+05	2.85E+05	-18%
Torque (N·m)	9.27E+05	6.67E+05	-28%
Power (W)	1.55E+06	1.12E+06	-28%



(a) t = 30s



(b) t = 60s

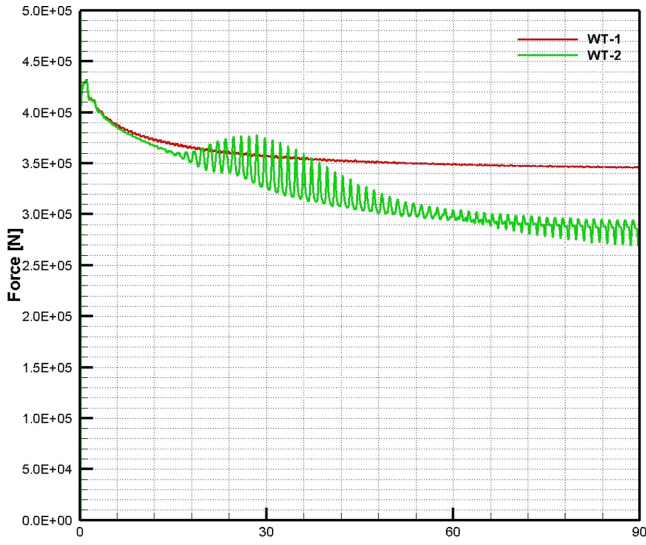


(c) t = 90s

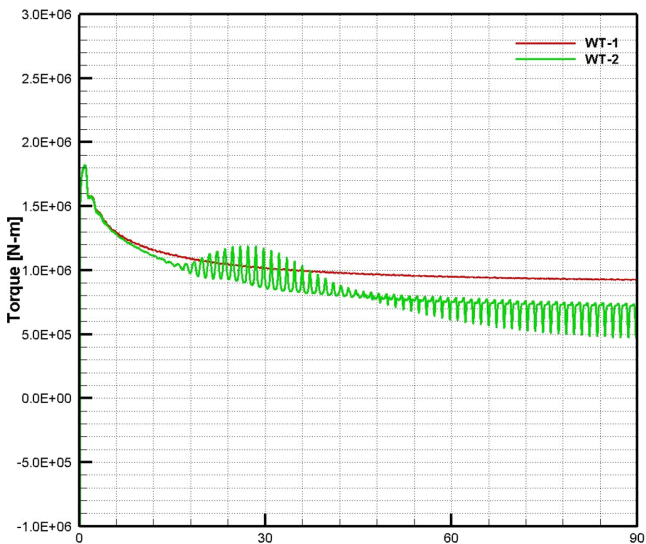
**Fig. 10.** Dimensionless velocity( $V_m/V_\infty$ ) distributions in the wake region (Case 2).

Table 5에는 CASE 2에 대한 전방 및 후방 풍력발전기의 추력, 토크, 출력을 나타내었으며, Fig. 10에는 CASE 2 해석결과의 시간에





(a) Thrust



(b) Torque

Fig. 11. Convergence history of the rotor thrust and torque (Case 2).

따른 후류 유동장 분포를 나타내었다. 그림에서, 유입유동은 x축 방향으로 들어오고, 기반구조물은 22.5°(NNW)만큼 회전되어 있으며, 풍력발전기 로터는 요(Yaw) 제어가 반영되어 유입유동방향을 향하고 있다. CASE 1과는 달리, 전방 풍력발전기에 의한 후류가 후방 풍력발전기 회전영역 중 일부에만 영향을 주는 것을 확인하였다. 그 결과로 Table 5와 같이, 후방 풍력발전기의 성능 손실이 CASE 1에서 급감한 양 만큼 현저하지 않았다.

Fig. 11에는 CASE 2 해석의 수렴과정에서 전방(WT-1) 및 후방(WT-2) 풍력발전기의 추력 및 토크변화를 나타내었다. 수렴구간 이후의 결과에서 후방 풍력발전기의 추력 및 토크가 약 0.8 Hz의 주파수로 진동하였는데, 이는 날개 3개의 풍력발전기 로터가 정격회전수 16 rpm으로 회전하는 주파수와 일치한다. 이로부터, 후방 풍

력발전기의 추력 및 토크가 진동하는 원인이 후방 풍력발전기의 날개가 후류영역에 입출을 반복하기 때문인 것으로 판단하였다. 풍력발전기 로터 날개에 주기적으로 진동하는 추력과 토크가 작용하게 되면, 이는 날개 및 나셀 기계 장치 등에 피로하중으로 작용하게 된다. 즉, 통상적인 풍력발전 단지에서 원거리로 배치된 풍력발전기 후류에 의한 피로문제 보다 더 크고 빈번한 피로하중을 받게 되므로, 이는 곧 풍력발전기의 설계수명단축으로 이어진다. 따라서 향후 복합발전 시스템 설계과정에서 로터 날개 및 나셀 기계장치 등의 피로문제에 대한 분석과 대안이 요구된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템에 탑재되는 다수 풍력발전기 간의 후류 간섭효과를 고려하여, 수치해석을 통한 풍력발전기 배치설계를 수행하고, 풍력발전기 후류 특성 및 성능 간섭효과를 평가하였다.

복합발전 시스템 설치해역의 풍황조건에 대해서, 날개요소운동량 이론 기반의 수치해석프로그램 WindPRO를 이용하여 풍력발전기 용량조합, 이격거리, 배치방향에 대한 민감도해석을 수행하였으며, 2MW 용량의 풍력발전기 4기를 수평거리 150 m 이격간격으로 배치하고, 구조물 방향은 0°로 하는 배치 설계안을 시스템 개념설계 배치안으로 도출하였다. 해당 배치안의 후류 손실을 고려한 연간에너지생산량효율 및 이용률은 각각 87.7% 및 42.0%로 비교적 높은 수치를 보여주었다.

도출된 풍력발전기 배치안에 대해, 상용 전산유체역학 해석프로그램 ANSYS CFX를 이용하여 설치 해역의 주풍향인 북북서풍 및 북풍 조건에서 풍력발전기 성능해석을 수행하였다. 북풍향 바람조건에서 후방 풍력발전기 성능이 약 90% 감소되었으며, 북북서풍향 바람조건에서는 후방 풍력발전기 성능이 약 28% 감소하였다. 또한, 북북서풍향 조건과 같이 전방 풍력발전기에 의한 후류에 후방 풍력발전기가 부분적으로 영향을 받게 되면, 후방 풍력발전기 로터 날개가 후류영역에 입출을 반복하게 되어 로터 날개가 받는 추력 및 토크에 진동이 발생하는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해, 복합발전 시스템의 풍력발전기 배치방안을 도출하였으며, 향후 후류에 의한 풍력발전기 피로피로문제 등에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지기술개발사업 “10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

[1] Benini, E. and Toffolo, A., 2002, “Optimal design of horizontal-

- axis wind turbines using blade-element theory and evolutionary computation”, *J. Solar Energy Engineering*, Vol. 124, 357-363.
- [2] Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., Scavounos, P., and Wayman, L., 2005, “Engineering challenges for floating offshore wind turbines”, *Proc 2005 Copenhagen Offshore Wind Conf.*, Copenhagen, Oct., 26-28.
- [3] Choi, N.-J., Nam, S.-H., Jeong, J.-H. and Kim, K.-C., 2011, “CFD Study on Aerodynamic Power Output of 6 MW Offshore Wind Farm According to the Wind Turbine Separation Distance”, *J. Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 35, No. 8, 1063-1069.
- [4] Glauert, H., 1935, *Aerodynamic theory*, Julius Springer, Berlin, 169-360.
- [5] Kang, T.-J., Lee, S.-W., Cho, J.-S. and Gyeong, N., 2008, “Aerodynamic Analysis of the NREL Phase VI Rotor using the CFD”, *J. Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 36, 315-320.
- [6] Katić, I., Højstrup, J. and Jensen, N.O., 1986, “A simple model for cluster efficiency”, *Proc European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, Rome, Oct. 7-9.
- [7] Kim, J.-I. and Kim, W.-J., 2011, “Viscous flow analysis around a wind turbine blade with end plate and rake”, *J. Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 14, 273-279.
- [8] Kim, K.-H., Lee, K.-S., Sohn, J.-M., Park, S., Choi, J.-S. and Hong, K., 2015, “Conceptual design of 10MW class floating wave-offshore wind hybrid power generation system”, *Proc 25<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conf.*, Big Island, Jun., 21-26.
- [9] Lee, J.H., Park S., Kim, D.H., Rhee, S.H. and Kim, M.-C., “Computational methods for performance analysis of horizontal axis tidal stream turbines”, *J. Applied Energy*, Vol. 98, 512-523.
- [10] Menter, F.R., 1994, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”, *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, 1598-1605.
- [11] NRG Expert, 2011, *Global Ocean Energy Report*, Workshop on Tidal & Oil-Spill Modeling, NRG Expert, Ed. 1, 11-12.
- [12] Park, S.W., Park, S. and Rhee, S.H., 2013, “Performance predictions of a horizontal axis tidal stream turbine considering the effects of blade deformation”, *Proc 3<sup>rd</sup> International Symposium on Marine Propulsors Conf.*, Tasmania, May 5-8.
- [13] Rhie, C.M. and Chow, W.L., 1982, “A numerical study of the sturbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation”, *AIAA Journal*, Vol. 21, 1525-1532.
- [14] Sanderse, B., 2009, “Aerodynamics of wind turbine wakes - literature review”, *Energy Research Centre of the Netherlands Technical Report*, ECN-E-09-016.
- [15] Sørensen, T., Thøgersen, M.L., Nielsen, P., Grötzner, A. and Chun, S., 2008, “Adapting and calibration of existing wake models to meet the conditions inside offshore wind farms”, *EMS International A/S Report*.
- [16] Vermeer, L.J., Sørensen, J.N. and Crespo, A., 2003, “Wind turbine wake aerodynamics”, *J. Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 39, 467-510.

---

Received 12 March 2015

Revised 21 April 2015

Accepted 22 April 2015