



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

‘Bladed’를 이용한 5MW 부유식 해상풍력발전시스템의
하중해석 검토

Evaluation of the load cases for the 5MW floating
offshore wind turbine using the ‘Bladed’

울산대학교 대학원
부유식해상풍력학전공
허 준

‘Bladed’를 이용한 5MW 부유식 해상풍력발전시스템의
하중해석 검토

지도교수 김 종 배

이 논문을 공학석사 학위 논문으로 제출함

2022년 06월

울산대학교 대학원
부유식해상풍력학전공
허 준

허준의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 임 옥 택

인

심사위원 장 영 식

인

심사위원 김 종 배

인

울산대학교 대학원

2022년 8월

감사의 글

지난 2년간 함께한 해양공학수조 교수님 및 선배님들께 가장 먼저 감사의 말을 전하고 싶습니다.

어려운 상황에서도 김종배 교수님의 훌륭한 지도로 큰 난관 없이 연구를 할 수 있었으며, 밤, 낮 없이 헌신적으로 지도해주신 덕분에 학위를 잘 마칠 수 있었습니다. 교수님과 함께 지내며 잊을 수 없는 추억을 갖게 되어 감사합니다.

한국의 부유식 해상풍력을 이끄신 신현경 교수님께도 감사의 말을 전합니다. 교수님의 연구 덕분에 좋은 환경과 좋은 논문들을 통해 많은 것을 배울 수 있었습니다.

항상 따뜻한 격려와 조언으로 연구와 생활까지 많은 도움을 주신 하광태 교수님께도 감사의 말을 전합니다. 교수님의 따뜻한 말씀 덕분에 대학원 생활에 힘이 되었습니다.

대학원 생활 중 가장 많은 시간을 보낸 유영재 선배님에게 많이 의지할 수 있어서 큰 힘이 되었던 선배로 항상 존경했으며, 밖에서는 믿음직한 형으로 커피의 맛을 알게 해 준 형께 너무 감사합니다.

또한 묵묵하게 기다려주시고 아낌없이 지원해주신 부모님에게도 감사의 말을 전하며 언제나 가족이라는 힘으로 힘이 되었습니다.

그리고 한없이 부족한 저의 논문을 심사해주시고 나아가 세밀한 조언을 해주신 임옥택 교수님, 장영식 박사님께도 깊은 감사드립니다.

이렇듯 훌륭하신 분들 덕분에 학위를 잘 마치게 되었고 끝으로 대학원 생활 밖에서 도움을 주신 친구들에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

국문 요약

‘Bladed’를 이용한 5MW 부유식 해상풍력발전시스템의 하중해석 검토

2015년 파리기후협정 이후 전세계적으로 현재까지 제도적 기반 강화를 통해 탄소중립을 위한 노력을 보이고 있다. 한국 정부도 이에 맞추어 탄소 중립 추진 전략으로 ‘3+1’전략을 제시했다.

본 논문의 목적은 해상풍력 발전단지 설계 시 해상환경조건을 고려하여 적합한 해상풍력발전시스템, 특히 최적 부유체를 개발하는 것이다. 이를 위해 Bladed 해석을 통하여 프로그램의 이론과 구조를 이해하고자 노력하였다.

5MW NREL Semi-submersible 부유식 해상풍력발전시스템을 Bladed 모델에 적용하고, 가장 기본적인 정상운전 조건과 정지(Idling) 조건에 대하여 해석을 수행하였으며 아울러 모델에 대한 검증과결과를 검토하였다.

부유식 해상풍력발전에 대한 기술표준은 IEC TS 61400-3-2이며 육상풍력발전시스템에 대한 표준 IEC 61400-1과 고정식 해상풍력발전에 대한 표준 IEC 61400-3-1을 준용한다. 이를 적용하여 NREL 5MW 부유식 해상풍력발전시스템에 대하여 통합 연성해석 프로그램인 Bladed를 사용하여 하중 조건에 대한 통합해석을 실시하였으며, 검증차원에서 규칙파에 대한 부유체의 응답특성(RAO)에 대한 해석을 추가하여 기존 결과와 비교하였다.

키워드: 부유식 해상풍력발전, 공탄성프로그램, 통합연성해석, Bladed

목 차

1. 서 론	6
1.1 연구 배경	6
1.2 연구 목적	8
1.3 관련 연구 현황	9
2. 수치 해석	10
2.1 해상풍력발전기 하중	10
2.2 풍력 발전기 출력	11
2.3 외부환경 조건	16
2.4 설계 하중 조건	17
2.5 파도 하중 조건	18
2.6 풍력 터빈 등급	19
2.7 설계 하중 케이스	20
3. 수치 해석	22
3.1 해석 제원	22
3.2 수치해석 프로그램	23
3.3 GH-Bladed	23
4. 하중해석 결과 비교	24
4.1 응답특성(RAO) 검토	25
4.2 하중해석 검토	26
4.3 향후 검토	31
5. 결론	32
참고 문헌	33
Abstract	34

그림 목차

그림 1. 탄소중립 추천 전략 "3+1"정책	7
그림 2. Offshore wind turbine structures	8
그림 3. 풍력터빈 공기 흐름 궤적	11
그림 4. 풍력 터빈 전후의 공기 흐름 궤적	12
그림 5. 후류회전에 의한 손실	13
그림 6. 후류 회전	13
그림 7. 블레이드 단면에 작용하는 힘	14
그림 8. Combined BEM theory flow diagram	15
그림 9. Pierson-JONSWAP Spectrum	18
그림 10. GH-Bladed 통합연성해석 프로그램	23
그림 11. Bladed RAO(Heave)	25
그림 12. 기존 논문 RAO(Heave)	25
그림 13. 운전조건에서의 풍속 비교	26
그림 14. 운전 조건에서의 회전수 비교	27
그림 15. 운전조건에서의 허브 모멘트(My) 비교	28
그림 16. 운전조건에서의 계류장력 비교	28
그림 17. 정지(Idleing) 조건에서의 상하 운동 비교	29
그림 18. 정지(Idleing) 조건에서의 허브 모멘트(My) 비교	30

표 목차

Table 1. IEC 61400-1 wind turbine class	19
Table 2. 설계하중조건	21
Table 3. 설계하중조건 약어	21
Table 4. NREL 5MW 제원	22

1. 서론

1.1 연구 배경

전 세계는 2015년 파리기후협약 이후 재생 에너지 확대를 위해 노력 중이다.

그러나 2021년 가스의 비용 증가로 인해 비교적 값이 싼 석탄의 사용량이 증가하였다. 전력 생산에서의 탈탄소화는 현재 기후 정책에서의 가장 핵심 구성 요소 중 하나이다.

현재 전 세계는 기후 변화 위협을 해결하기 위해 집중하고 있다. 이를 위해 단기, 중기, 장기적으로 세분화하여 기후 정책을 수립하여 전력 생산에서 재생 에너지 확대를 위해 노력 중이다. 재생 에너지 중 하나인 풍력은 현재 전 세계 발전 용량은 최대 837GW로 전 세계가 매년 12억 톤 이상의 이산화탄소를 줄이는데 도움이 되며, 이는 남미의 연간 탄소 배출량과 같은 양이다.

제 26차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26)에서 2030년을 목표로 한 배출량 감소에 서약을 하였으며, 한국 정부는 이에 따라 탄소중립 추진 전략으로 그림 1의 "3+1" 전략을 제시하였다.

여기서 "3+1"전략이란 1. 저탄소산업 생태계 조성, 2. 경제구조의 저탄소화, 3. 탄소중립 사회로의 공정전환, 4. 탄소중립 제도적 기반 강화 이렇게 4개의 탄소중립 목표를 보여 준다. 이전 정책인 "재생에너지 3020"에서는 2030년까지 전체 에너지 비중 중 재생 에너지 발전 비중을 20%인 63.8GW까지 늘리는 것을 목표로 한다. 목표 달성을 위한 재생 에너지 63.8GW 중 16.5GW(34%)를 풍력으로 대체할 계획이며 약 13GW를 해상풍력이 차지하며, 국내의 풍력자원의 기술적 자원 잠재량을 고려하였을 때 이는 실현 가능한 목표로 보인다.

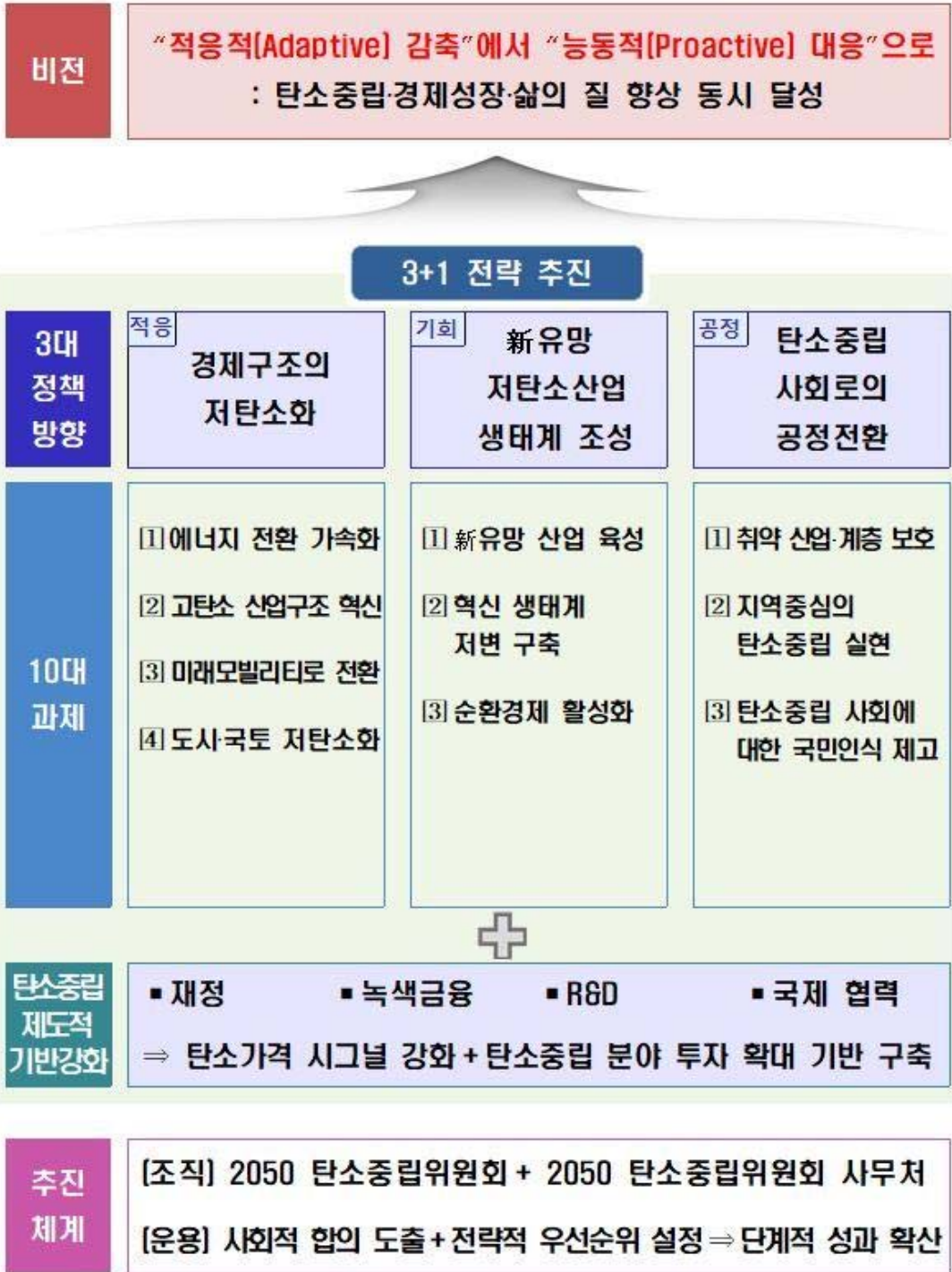


그림 1. 탄소중립 추천 전략 ‘3+1’정책

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 해상풍력 발전단지 건설 시 해상환경조건을 고려하여 적합한 해상풍력발전시스템을 개발하는 것이다.

해상풍력발전기의 경우 해상 환경으로 인해 육상풍력발전기보다 복잡한 하중이 작용한다. 또한 해상환경이 지역마다 다르므로, 설치 지역의 환경 특성을 반영한 해석이 중요하다.

해상풍력은 고정식과 부유식 2가지로 구분 된다. 고정식 해상풍력발전기는 비교적 낮은 수심에서 고정식 해상구조물에 풍력발전기를 설치하는 구조이고, 부유식 해상풍력발전기는 선박과 같이 떠 있는 구조물로 계류 장치에 의해 위치를 유지하는 구조이다. 수심이 50m 이상인 경우 설치 난이도로 인해 부유식이 유리하며, 부유식 하부구조물의 종류로는 Spar, Tension Leg Platform, Semi-submersible 등의 종류가 있으며, 설치 지역의 해상 환경에 따라 적합한 구조물이 사용된다.

본 연구에서는 IEC 61400-3-2 국제 표준에 명시되어 있는 하중 조건에 따라 해상풍력발전기의 하중 해석이 수행되었다.

그림 2는 해상풍력 발전시스템의 여러 형태를 보여준다.

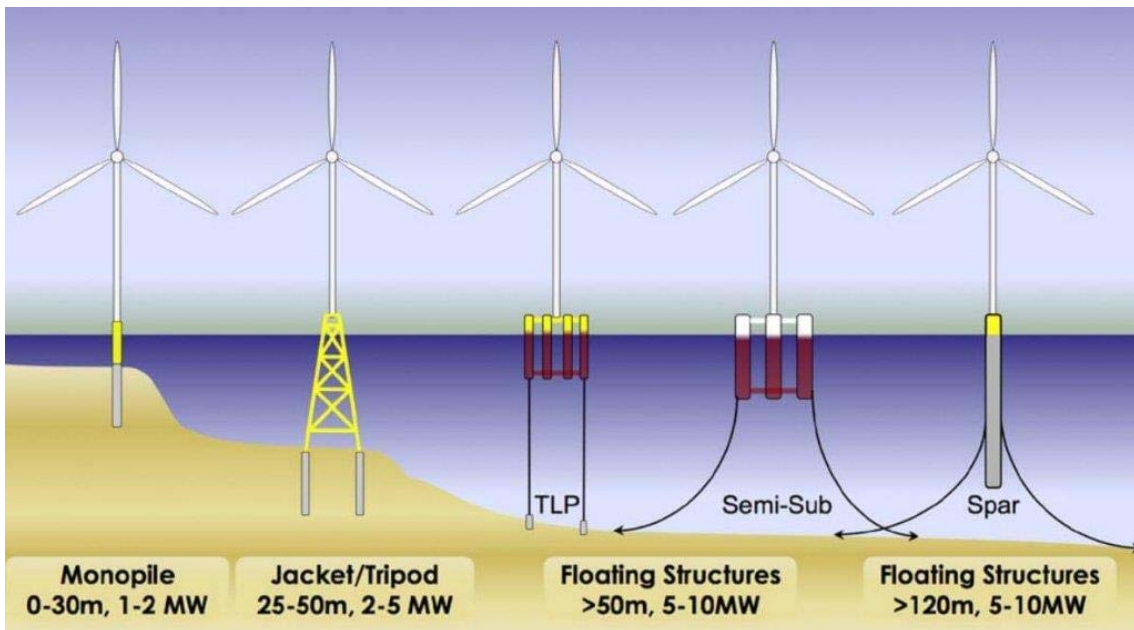


그림 2. Offshore wind turbine structures

1.3 관련 연구 현황

1.3.1 풍력발전시스템 시뮬레이션 코드 개발 연구

풍력발전시스템의 전기 생산을 위해 필요한 바람은 제트기류, 난류바람, 후류 등의 공력형태로 작용한다.

육상 풍력발전기인 경우 지반의 역학적 거동이나 지진 등의 외력이 작용하므로 이를 검토해야하며, 해상의 경우 환경 외력인 파도, 조류, 조위 등의 유체역학적 외력을 추가로 검토해야한다.

그 중 부유식 해상풍력발전기의 경우는 계류삭의 거동이 추가로 고려되어야 한다. 이렇듯 많은 환경적 외력을 고려하여 풍력발전시스템의 동특성 해석을 수행할 수 있는 GH Bladed, HAWC2, BHAWC, FAST, Flex5, ADAMS 등과 같은 시뮬레이션 코드 등이 개발 되어 있다.

이와 같은 프로그램들은 코드 별로 다양한 해석접근 방법을 적용하고 있으며, 이 중 FAST의 경우 제한적인 수치 자유도 내에서 블레이드와 타워의 저차 고유모드를 이용하는 모달법과 MBD 알고리즘을 혼용하여 사용하며 공력하중은 AeroDyn 코드를 사용한다.

2. 수치 해석

2.1 해상풍력발전기 하중

풍력에너지는 효율적이고 환경 친화적인 에너지이다. 해상풍력발전기의 수가 전 세계적으로 증가하고 있으며, 경제성과 효율성을 위하여 풍력발전기는 대형화가 진행되고 있다.

특히 해상풍력발전기는 주거단지와 떨어져 있으므로 풍력 발전 시 소음으로 인한 피해와 발전단지의 부지선정으로부터 육상에 비해 비교적 자유로우며 해상으로 나아갈수록 안정적이고 높은 바람을 확보할 수 있어 부유식 해상풍력발전이 유리하다.

해상풍력시스템에 발생하는 하중은 공기역학적 및 유체역학적 효과에 의한 것이 가장 지배적이며, 부유식의 경우 계류시스템에 작용하는 하중 또한 고려해야 한다.

2.2 풍력 발전기 출력

풍력 터빈 공기역학은 풍력 발전 단지의 성능 예측과 같은 공기역학적 힘의 모델링 및 예측과 관련이 있다. 풍력의 모든 에너지는 바람의 운동에너지로부터 발생한다. 바람이 풍력 터빈을 통과하면 속도는 떨어지지만 정압은 상류와 하류 모두 동일하다.

풍력 터빈에 의한 바람 에너지 회수 효율은 최대 59.3%를 넘지 못한다. 즉 바람이 가진 운동에너지는 기계적인 힘이며, 블레이드에 의해 변환된 운동에너지는 기어 박스를 거쳐 발전기 축에 전기에너지로 변환되어 전달된다. 회전 동력이 기어 박스를 통해 전달되면서, 기어 사이의 마찰열이나 소음으로 에너지의 일부가 외부로 방출되는데, 이것을 풍력터빈의 기계적 손실이라 한다. 이 손실을 제외한 나머지가 발전기에 전달되는데 이를 공극(air gap) 파워라 하며 발전기에서 발생하는 열을 전기적 손실이라 한다. 이러한 손실을 모두 감안하면 이상적인 풍력 터빈이라도 가용 전력의 59% 이상을 생산할 수 없는 이유이다.

본 연구에서는 공역학적인 측면에서의 효율 즉 파워계수(Power Coefficient)를 검토하여, 바람에 의한 로터의 회전력(Torque)과 추력(Thrust) 생성 메커니즘을 이론적으로 살펴보고자 한다.

풍속과 블레이드 끝단의 선속도와와 관계인 날개끝단 속도비(TSR, Tip Speed Ratio) 즉, 블레이드 길이 및 회전수는 후류(Wake) 회전에 영향을 주어 파워계수에 직접적인 영향을 준다.

블레이드 전체에 대하여 단면은 일정 길이로 나누어 설계되며 양력과 항력에 최적화하여 블레이드의 회전력을 최대화 하게 된다.

2.2.1 Betz 법칙

Betz 한계는 특정 속도로 흐르는 유체에서 무한히 얇은 회전판을 통해 파생될 수 있는 최대 에너지이며 이론상 최대 효율은 $16/27(59.3\%)$ 이다.

풍력터빈 전후의 공기 흐름 궤적을 나타내는 가상적인 유선(stream line)에서 공기의 압축성을 무시하면 각 단면을 통과하여 흐르는 단위 시간당 공기의 양은 모든 단면에서 동일하다는 이론인 식(1)에 근거한다.

$$\dot{m} = \rho S_1 V_1 = \rho S V = \rho S_2 V_2 = \text{constant} \quad (1)$$

여기서

- ρ : 공기밀도
- V, S : 로터에서의 풍속과 단면적
- V_1, S_1 : 로터 전면의 풍속과 단면적
- V_2, S_2 : 로터 후면의 풍속과 단면적

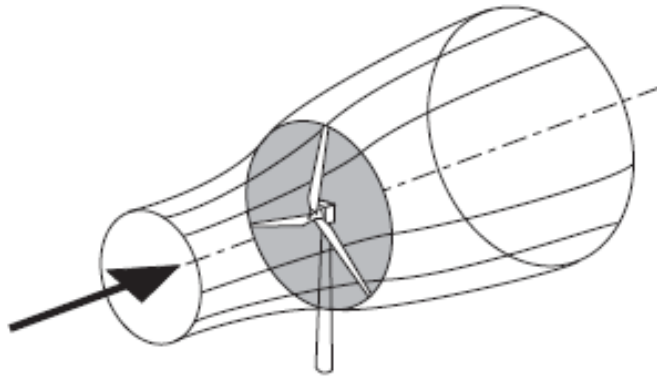


그림 3. 풍력터빈 공기 흐름 궤적

로터에 작용하는 풍속 V 가 중요하지만 알 수 없으므로 알고 있는 로터 전/후면의 풍속비를 이용하면 파워계수(Power coefficient)는 식(2)로부터 계산되며 식 (5)는 최대 파워계수를 구한 식이다.

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - a^2)(1 + a) \quad (2)$$

따라서 최대효율은

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \Rightarrow a = \frac{1}{3} \quad (3)$$

$$a = V_2/V_1 = \frac{1}{3} \Rightarrow V_2 = \frac{1}{3} V_1 \quad (4)$$

$$C_{p, \max} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right) \left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (5)$$

2.2.2 Momentum theory

회전하는 3개의 블레이드를 actuator disc(파공 원판)로 가정하면 일정하고 균일한 질량 흐름을 갖는다. 회전 원판을 통과하는 공기 입자들이 원판을 회전하게 만드는 회전 토크를 생성한다면, 작용-반작용 원리에 의하여 blade는 공기 입자들에 동일한 크기의 반대 방향 회전 토크를 전달하게 되어 blade를 통과하는 공기의 흐름은 회전 원판의 반대 방향으로 회전하는 속도 성분을 갖게 되며 이러한 현상을 후류 회전(wake rotation)이라 한다.

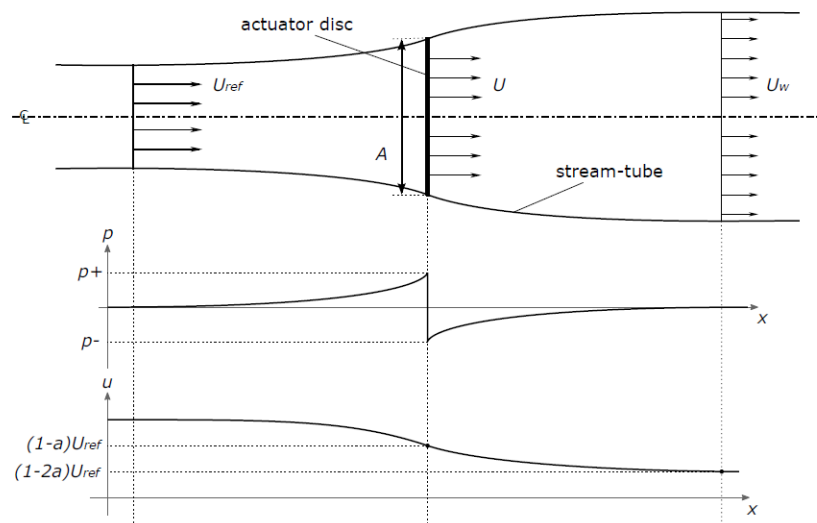


그림 4. 풍력 터빈 전후의 공기 흐름 궤적

풍력 터빈 전후의 공기 흐름 궤적에서 공기 입자의 흐름은 연속적이므로, 원판 전후에 대하여 공기 입자의 속도는 같으며 에너지 보존 법칙에 의하여 운동 에너지도 변화하지 않는다. 그림 4와 같이 풍력터빈에 의하여 변환된 전기 에너지만큼 계단형 감소가 일어나게 되며 원판을 통과한 공기 입자의 압력은 대기 압력으로 서서히 회복되는데, 이는 사용된 에너지만큼 공기 입자의 운동 에너지는 더욱 더 감소한다. 그러므로 공기의 흐름 단면적은 풍력터빈을 통과한 후에도 계속 증가하게 된다.

후류회전에 따른 풍력터빈의 효율은 풍속에 대한 로터의 회전속도에 관계가 있으며 날개끝단 속도비(TSR: Tip speed ratio)는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_1} \quad (6)$$

여기서 Ω 는 로터의 회전 각속도(rad/s)이며 R 은 회전반경(m)이다.

그림 5에서처럼 λ (날개끝단 속도비)가 커질수록 풍력터빈 효율의 한계인 16/27(0.593)에 수렴하는 것을 확인 할 수 있다. 풍력터빈의 최적 운전을 위해서는 λ

값이 약 5보다 크게 되도록 설계하여야 하며, λ 가 작은 영역에서의 C_p 값이 작은

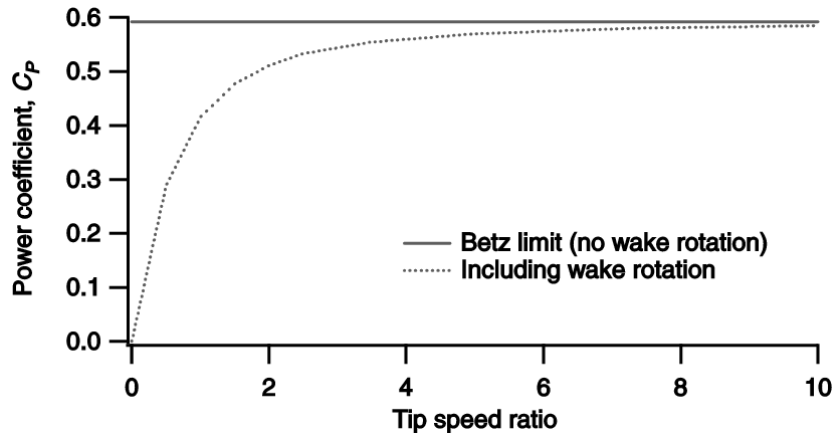


그림 5. 후류회전에 의한 손실

것은 후류회전 효과 때문이다. 후류의 회전 운동에너지는 풍력터빈 관점에서는 회수되지 않고 버려지는 손실 에너지로 바람에 의해 3개 블레이드에 형성되는 회전토크가 클수록 후류회전 효과가 크게 나타나므로 에너지 손실이 크게 된다.

Momentum theory에 따라서 추력(Thrust)과 회전력(Torque)는,

$$\delta T = 2\rho\delta A_D V_1^2 a(1-a) \quad (8)$$

$$\delta Q = \rho\delta A_D V_1(1-a)2\Omega a' r^2 \quad (9)$$

여기서 $\delta A_D = 2\pi r\delta r$ 은 중심에서 r 만큼 떨어진 δr 두께의 고리의 면적이며 $a' = a(1-a)/\lambda^2$ 은 그림 6과 같이 로터의 회전(Ω)에 대한 후류의 회전비($2\Omega a'$)이다.

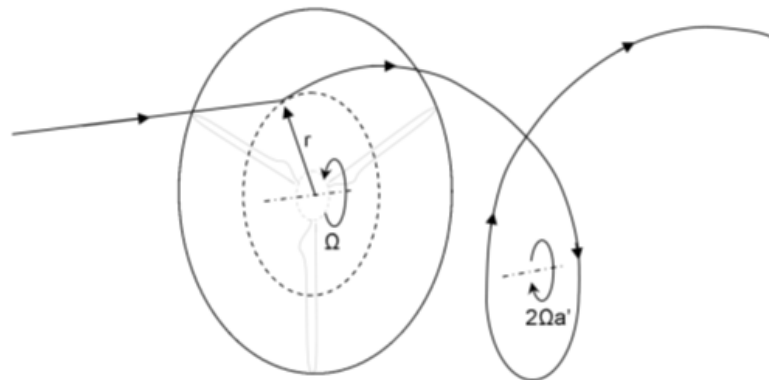


그림 6. 후류 회전

2.2.3 BEM(blade element momentum) theory

로터는 보통 3개의 블레이드로 구성되며 각 블레이드는 회전 효율을 증가시키기 위하여 최적화된 날개 단면을 가지고 있다. 비행기 날개(Aerofoil)와 같이 바람이 불어오면 그림 7에서 보여주듯이 블레이드 단면에 항력(Drag)과 양력(Lift)으로 작용하고 이는 블레이드에 회전력과 추력으로 변경된다.

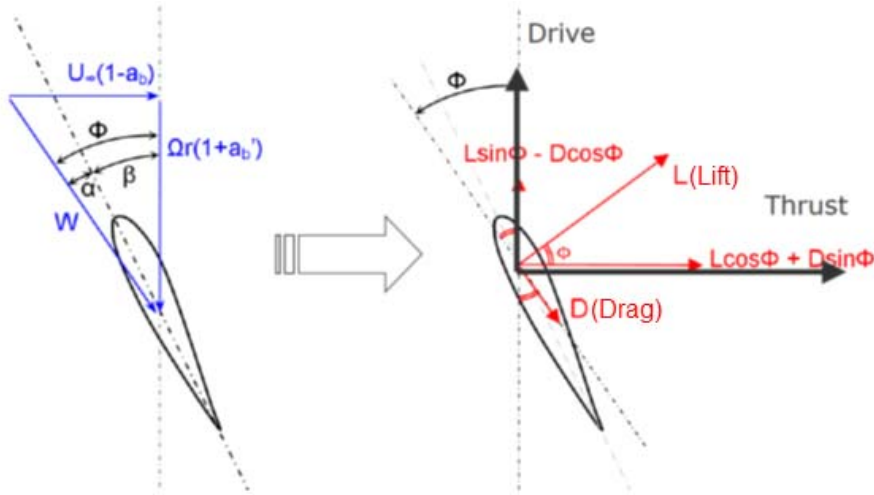


그림 7. 블레이드 단면에 작용하는 힘

단위길이 δr 의 블레이드 요소에 작용하는 양력(Lift)과 항력(Drag)은,

$$L_{element} = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_l(\alpha) \delta r \quad (10)$$

$$D_{element} = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_d(\alpha) \delta r \quad (11)$$

여기서 c 는 단면의 chord 길이, W 는 단면에 가해지는 풍속이다.

따라서, 최종 추력과 회전력은,

$$\delta T = \frac{1}{2} \rho W^2 N c (C_l(\alpha) \cos \phi + C_d(\alpha) \sin \phi) \delta r \quad (12)$$

$$\delta Q = \frac{1}{2} \rho W^2 N c r (C_l(\alpha) \sin \phi - C_d(\alpha) \cos \phi) \delta r \quad (13)$$

여기서 N 은 블레이드 개수이다.

2.2.4 Combined BEM(blade element momentum) theory

Bladed에 적용된 Combined BEM이론은 blade element 이론과 momentum 이론을 결합한 이론으로 회전 블레이드에 발생하는 공력 하중과 출력 방법을 결정할 수 있다.

Momentum theory에서 momentum의 변화율은 바로 블레이드 요소에 가해지는 힘이며 두 개의 값에 대한 등가 비교를 통하여 그림 8에서 보여주듯이 반복 계산으로 로터 전후의 풍속비, 후류의 회전비를 보정하고 블레이드의 회전력에 직접 영향을 주는 풍향을 계산하며 양력과 항력계수를 검토하여 최종 추력과 회전력을 결정한다.

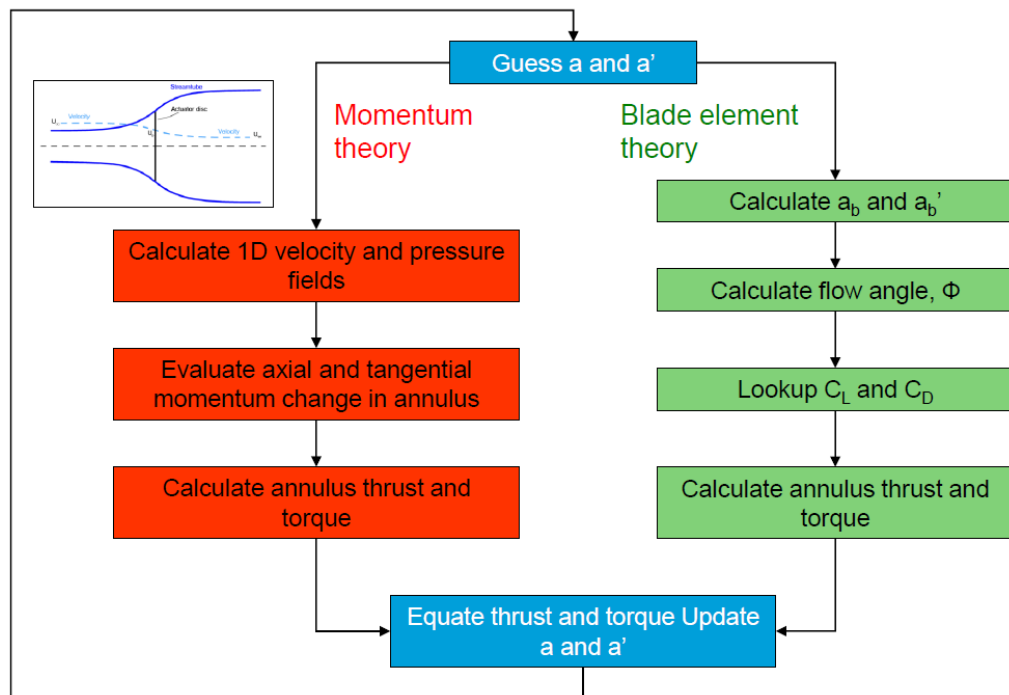


그림 8. Combined BEM theory flow diagram

2.3 바람의 난류 특성

바람의 특성은 끊임없이 변화하므로 단정적으로 결정되지 않는다. 그러므로 통계적인 방법을 활용하여 바람의 특성을 예측할 수 있어야 한다. 난류란 1분 주기로 변화하는 바람 성분을 의미한다. 실제와 유사한 바람을 사용하여 풍력터빈의 제어 시스템 성능을 평가하는 것은 매우 중요하다. 난류 성분에 의한 제어 특성 변화, 구조물의 잔류 진동 영향 등의 해석이 가능하기 때문이다.

바람의 난류 특성을 확률 통계적으로 기술하는 파워 스펙트럼 밀도 함수인 von-Karman, Kaimal, Mann 등이 있으며, 본 논문에서는 Kaimal 스펙트럼을 이용하였다. 풍력터빈 전용해석 소프트웨어에서 시뮬레이션을 수행할 때 동일한 평균풍속과 난류강도에서도 어떤 난류 모델을 사용했는가에 따라 결과가 달라질 수 있다. Kaimal 스펙트럼의 종방향(u), 횡방향(v) 및 수직방향(w) 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{nS_u(n)}{u_*^2} = \frac{102f}{(1+33f)^{5/3}} \quad (14)$$

$$\frac{nS_v(n)}{u_*^2} = \frac{17f}{(1+9.5f)^{5/3}} \quad (15)$$

$$\frac{nS_w(n)}{u_*^2} = \frac{2.1f}{1+5.3f^{5/3}} \quad (16)$$

여기서 무차원 주파수 $f = nz/U$, n 은 주파수(Hz), z 는 지면으로부터 관측높이(m) 그리고 U 는 10분 평균풍속, $S_{u,v,w}$ 는 스펙트럼 밀도함수, u_* 는 마찰속도(0.05-0.1 U_{10})이다. 밀도함수(S_u)를 적분하면 분산(σ_u^2)이 되며 이는 곧 난류성분(σ_u)이 된다.

상기 식 (14), (15), (16)을 적분하면,

$$\int_0^\infty \frac{nS_u(n)}{u_*^2} dn = \frac{\sigma_u^2}{u_*^2} = \int_0^\infty \frac{102}{(1+33f)^{5/3}} df \approx 2.15^2 \Rightarrow \sigma_u \approx 2.15u_* \quad (17)$$

$$\int_0^\infty \frac{nS_v(n)}{u_*^2} dn = \frac{\sigma_v^2}{u_*^2} = \int_0^\infty \frac{17}{(1+9.5f)^{5/3}} df \approx 1.64^2 \Rightarrow \sigma_v \approx 0.76\sigma_u \quad (18)$$

$$\int_0^\infty \frac{nS_w(n)}{u_*^2} dn = \frac{\sigma_w^2}{u_*^2} = \int_0^\infty \frac{2.1}{1+5.3f^{5/3}} df \approx 1.08^2 \Rightarrow \sigma_w \approx 0.5\sigma_u \quad (19)$$

상기 식 (18)과 (19)에서 u 방향의 난류성분을 알면 v 방향과 w 방향의 성분을 알 수 있다. Bladed에서는 스펙트럼을 지정하면 자동적으로 난류환경을 모델링한다.

2.4 설계 하중 조건

IEC 61400-3은 해상용 풍력발전기의 구조, 기계, 전기 및 제어시스템의 기술적 안정성을 달성하기 위한 엔지니어링 및 기술적 요구사항이 규정된 국제 표준이다.

부유식 해상풍력발전 관련 IEC 코드는 다음과 같다.

- IEC 61400-1: 2019 RLV, Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements
- IEC 61400-3-1: 2019, Wind energy generation systems - Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines
- IEC TS 61400-3-2: 2019, Wind energy generation systems - Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines

부유식 해상풍력발전에 대한 기술표준은 IEC TS 61400-3-2이며 육상풍력발전시스템에 대한 표준 IEC 61400-1과 고정식 해상풍력발전에 대한 표준 IEC 61400-3-1을 준용한다.

본 논문에서는 NREL 5MW Semi-submersible 부유식 해상풍력발전기를 통합 연성해석 프로그램인 Bladed를 사용하여 하중해석을 수행하였다.

처음 사용하는 해석 프로그램인 이유로 하중 조건에 대한 통합하중해석과 별도로 결과 검증차원에서의 규칙파에 대한 응답특성(RAO)에 대한 해석을 추가하여 기존 결과와 비교하였다.

2.5 파도 하중 조건

파도 조건은 유의 파고(H_s) 및 파주기(T_p)를 매개변수로 사용하여 스펙트럼으로 나타낸다.

H_s 는 임의의 관측 시간동안 관측된 파고 중에서 파고가 높은 순서로 전체 1/3에 해당 되는 파고들의 평균이며, T_p 는 파도 스펙트럼 중 파고가 큰 순서로 전체 파랑의 1/3까지 파랑들의 파주기를 평균한 값이다.

파도 하중은 유의파고와 유의파주기의 관계에 따라 그림 9에 보이는 Pierson-Moskowitz와 JONSWAP 스펙트럼으로 분류할 수 있다.

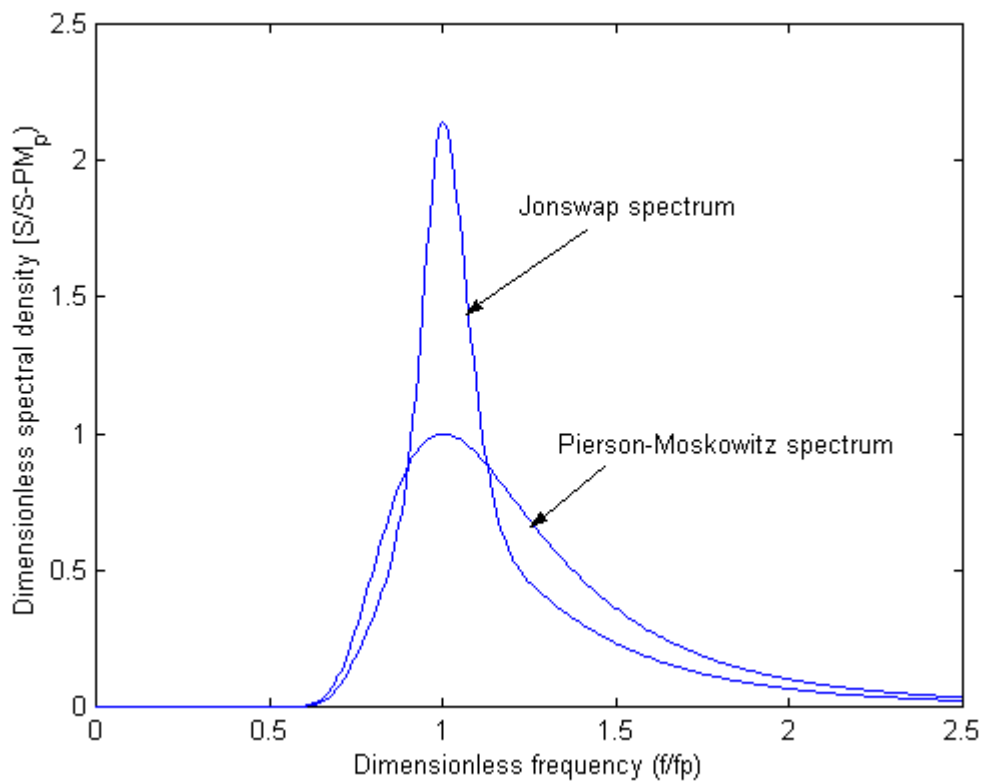


그림 9. Pierson-JONSWAP Spectrum

본 계산에는 JONSWAP Spectrum이 적용되었으며 결과 비교를 위하여 규칙파를 적용한 해석을 추가하였다.

Bladed의 경우, 유체력(hydrodynamic) 계산에 모리슨(Morison) 공식과 BEM(Boundary Element Method)을 적용할 수 있다.

브레이싱(Bracing)과 같이 수중 구조물의 세장비(직경/파장) D/λ 가 0.2 이하면 회절(diffraction)과 방사(radiation) 효과를 무시하는 모리슨 공식으로

간단하게 항력과 관성력을 계산하여 구조물에 적용할 수 있다.

그러나, 칼럼(Column)과 같이 직경이 큰 구조물은 회절과 방사 효과뿐만 아니라 구조물에 가해지는 압력(hydrostatic force)도 고려하여야 한다. BEM 유체력 계산에는 서로 다른 주파수의 규칙파를 중첩하여 불규칙파를 생성하게 된다.

Bladed에서는 보통 Bracing element는 모리슨 공식으로, Column body는 BEM으로 유체력을 계산한다.

2.6 풍력 터빈 등급

풍력터빈의 설계 수명은 20년 이상이며, 평균 풍속이 비교적 높은 환경에 설치된다. 바람은 환경마다 다르기 때문에 풍력 발전기가 안정적인 전력을 생산하기 위해서는 각 설치 장소의 바람 특성을 고려하여 최적의 풍력터빈이 설계 되어야 한다.

IEC 61400-1에서는 풍력터빈이 설치될 장소의 바람특성을 고려하여 풍력터빈의 등급을 표 1과 같이 분류하고 있다. 풍력 터빈 등급은 최대풍속(V_{ref}) 및 난류 강도(I_{ref})로 정의하며, 최대풍속은 풍력터빈이 견뎌야 할 허브 높이에서의 풍속을 뜻 한다.

본 연구에서는 풍력터빈 등급 II를 고려하였다. 즉 EWM에서 허브풍속으로 42.5 m/s를 적용하였다. ($V_{hub} = V_{ref}$)

Table 1. IEC 61400-1 wind turbine class

Parameter	IEC Wind Turbine Class			
	I	II	III	S
Reference wind speed (m/s)	50	42.5	37.5	30
Annual average wind speed (m/s)	10	8.5	7.5	6
50yr return gust (m/s)	70	59.5	52.5	42
1yr return gust (m/s)	52.5	44.6	39.4	31.5

2.7 설계 하중 케이스

풍력발전시스템의 하중 케이스는 운전 상태 또는 정지 조건을 고려한다. 모든 하중 케이스는 제어 및 보호 시스템의 동작, 타당한 발생 확률을 고려하여야 한다.

풍력 터빈의 구조적 완전성을 위하여 사용하는 설계 하중 케이스의 조합은 다음과 같다.

- 정상 설계 상태 및 정상 또는 극치 외부조건
- 고장 설계 상태 및 해당 외부 조건
- 수송, 설치, 유지보수의 설계 상태 및 해당 외부 조건

각 설계 상태 중 몇 개의 설계 하중 케이스를 고려하여, 풍력 터빈의 구성 부품의 구조적 완전성에 집중하여야 한다. 설계 하중 케이스는 각각의 설계 상태에 대하여 바람, 전기적 외부 조건 및 기타 외부 조건이 규정되어 있다.

각 설계 하중 조건에서 “F”는 피로 강도의 평가에 사용하는 피로 하중의 해석을 나타내며 “U”는 재료의 최대 강도를 초과한 해석, 블레이드 선단의 변형 해석 및 안전성 해석 등 극한 하중 해석을 나타낸다.

하중 조건은 부유식 해상풍력발전기에 맞게 IEC TS 61400-3-2에서 정의된 하중 2개의 조건에 대해 검토하였다.

- 1) Power production 9.2: NTM + NSS
- 2) Parked 10.2: EWM + ESS

이 조건은 기존해석 하중조건(IEC 61400-3-1)과 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

- 1) Power production 1.2: NTM + NSS
- 2) Parked 6.2: EWM($V_{hub}=V_{ref}$) + ESS($H_s=H_{s50}$)

상기 1.2의 하중 조건은 풍력발전기에 운전모드에 대한 해석이며, 피로해석은 본 연구에서는 제외하고 극한 하중에 대한 통합 연성해석에 집중하였다.

Table 2. 설계하중조건

DLC	Design Situation	Wind condition	Waves	Type of analysis
1.2	Power production	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS	F
6.2	Parked (standing still or idling)	EWM $V(z_{hub}) = V_{ref}$	ESS	U

Table 3. 설계하중조건 약어

Abbreviation	Definition	Appendix
DLC	Design Load Case	IEC 61400-1
NTM	Normal Turbulence Model	IEC 61400-1
EWM	Extreme Wind speed Model	IEC 61400-1
NSS	Normal Sea State	IEC 61400-3
ESS	Extreme Sea State	IEC 61400-3
F	Fatigue	IEC 61400-1
U	Ultimate strength	IEC 61400-1

상기 표에서는 해석에 가장 중요한 외력인 바람과 파도만을 고려하였지만 정확한 계산을 위해서는 바람과 파도의 방향, 해류 및 수위 변화에 대한 입력 자료가 필요하다. 본 연구에서는 통합연성 해석을 통한 부유체의 운동과 이에 따른 풍력발전기에 발생하는 하중 검토에 집중하고자 부수적인 외력은 제외하였다.

3. 수치해석 도구

3.1 해석 제원

수치해석에는 미국신재생에너지연구소의 5MW Semi-submersible 부유체 제원을 GH-Bladed에 활용하였으며 표 4에 정리하였다.

Table 4. NREL 5MW 제원

Nacelle definition	
Width	6 m
Length	12 m
Height	6 m
Drag coefficient	1.2
Nacelle mass without rotor	240,000 kg
Nacelle yaw inertia	2,610,000 kgm ²

Blade mass data	
Blade mass	17,744 kg
First moment of mass	363,092 kgm
Second moment of mass	11,749,730 kgm ²

Rotor & Hub definition	
Number of Blades	3
Diameter	126 m
Hub height	90 m
Hub vertical offset	2.4 m
Cone angle	-2.5°
Rotor shaft tilt angle	5°
Overhang	5 m
Rotational direction	Clockwise
Orientation	Upwind
Speed type	Variable
Cut-in wind speed	3 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Root length	1.5 m
Diameter	3.5 m
Spinner diameter	3 m
Drag coefficient	0
Hub Mass	56,800 kg
Inertia about shaft	116,000 kgm ²
Inertia perpendicular to shaft	0 kgm ²
Center of mass	0 m

3.2 수치해석 프로그램

수치해석에 활용된 프로그램은 Bladed로 사용하였다.

풍력발전시스템의 해석 접근 방법으로 MBD해석, 유한요소해석(FEA), 모달해석법 (Modal analysis)으로 구분되어지며, 시뮬레이션 코드들은 3가지 방법 중 하나를 적용하거나 혼용하여 적용한다.

프로그램을 사용하기 전 입력되는 해석 조건들을 동일하게 적용하여 해석을 수행하였다.

3.3 Bladed

Bladed는 육상 및 해상 풍력 터빈 설계를 위한 소프트웨어로 터빈 모델을 구축하고 하중 및 성능을 계산하는데 사용된다.

Bladed에 터빈을 정의하고 환경조건인 바람과 파도를 입력한 후 IEC 61400-1에 적합한 계산 유형을 통해 풍력발전시스템의 부하 및 성능을 계산할 수 있다.

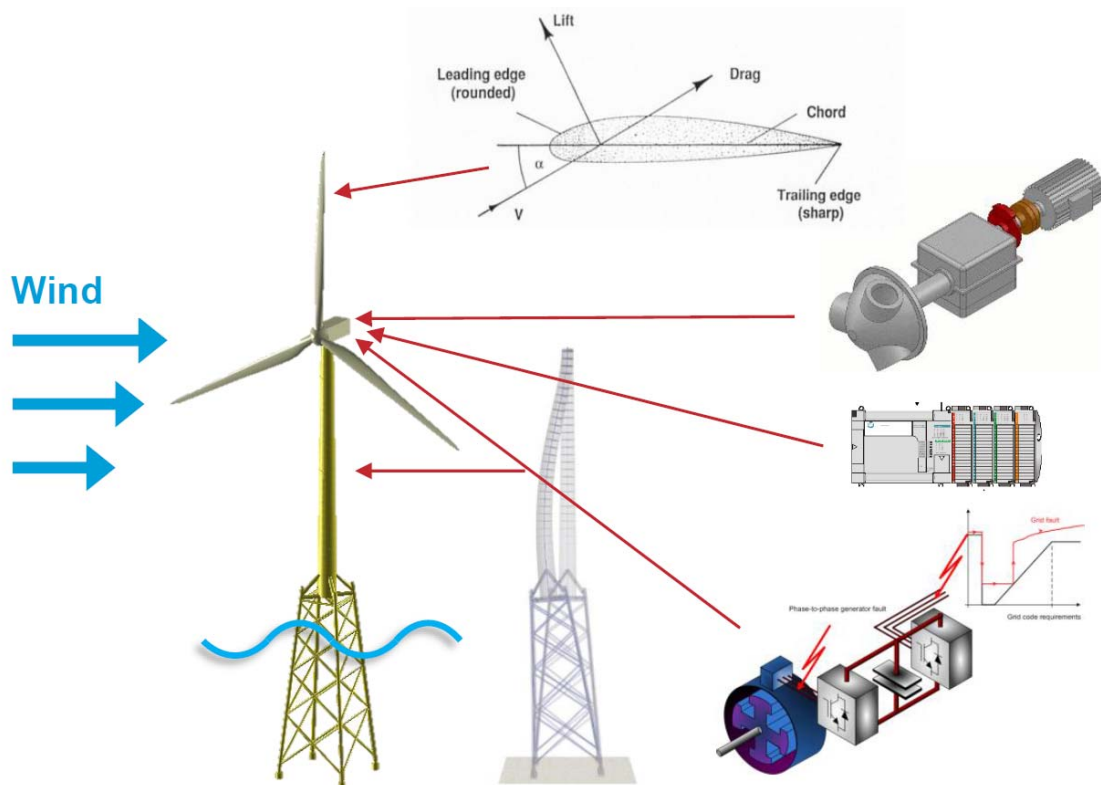


그림 10. Bladed 통합연성해석 프로그램

4. 하중해석 결과 비교

4.1 응답특성(RAO) 검토

Bladed는 공력학 이론을 통한 풍력발전기의 발전 효율 등 Blade 및 제어 관련 모사(simulation)에 특화된 프로그램이며 또한 바람과 파도 등 외력에 대한 로터의 추력과 부유체의 거동을 동적 해석하여 Tower 및 시스템에 가해지는 하중을 계산하는 통합 연성해석 프로그램이다.

따라서, 해석 결과에 대한 이해 및 검증이 쉽지 않은 이유로 하중 해석 전에 부유체의 거동을 대표하는 응답 특성을 계산하여 기존 자료와 검토 비교하여 결과를 검증하였다.

검증을 위해 Bladed를 이용하여 유의파고 4m의 규칙파를 1초에서 25초까지 1초 간격으로 주기를 적용하여 동적해석 하였으며 Tower 상단의 최대 위치변화를 확인하여 응답특성을 비교해 보았다. 부유체 중심이 아닌 Tower 하단(Node 13)에 대한 거동이라 수직거리에서 10m 정도의 차이로 Surge와 Sway는 응답이 다소 과장되어 Heave를 비교하였다(그림 11 및 12).

최대 응답은 주기 17초(0.36rad/s)에서 1.25정도로 기존 논문의 응답 특성과 비교적 일치함을 볼 수 있었다.

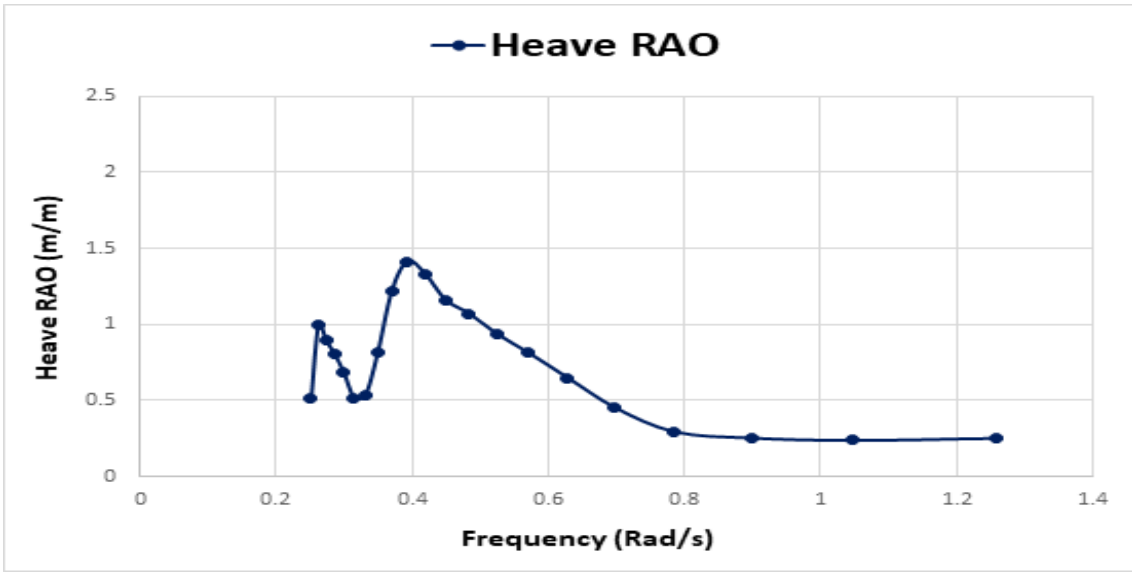


그림 11. Bladed RAO (Heave)

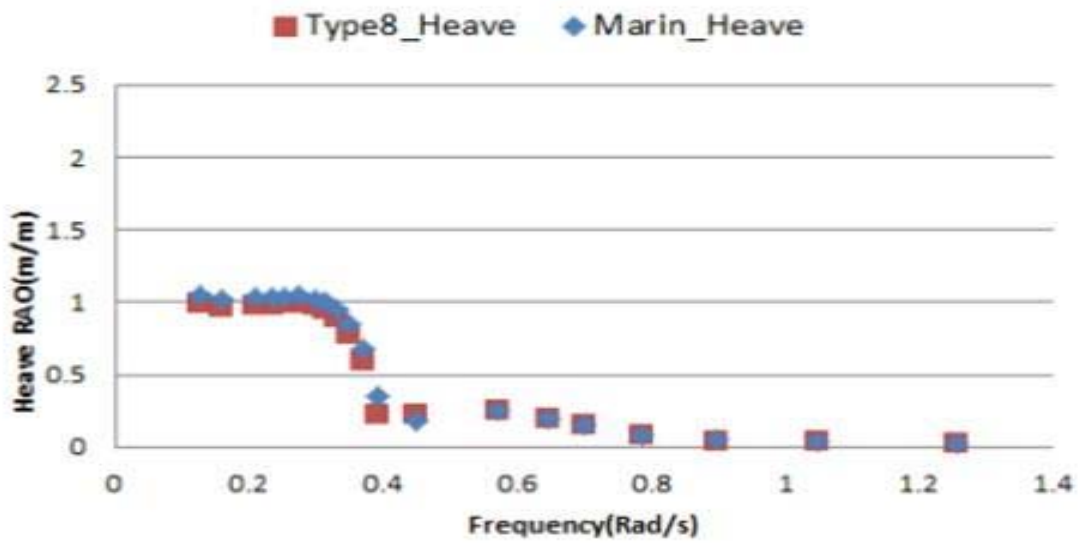


그림 12. 기존 논문 RAO (Heave)

박정훈, 신현경, 부유식 해상풍력발전기의 최적형상 설계에 관한 연구, 대한조선학회논문집 제52권 제3호 2015년 6월

4.2 하중해석 검토

2.4 설계하중 조건에서 언급한 하중 조건을 고려하여 운전 및 정지 조건에 대하여 Bladed로 해석을 수행하였다.

4.2.1 운전 중 하중검토(DLC 9.2)

IEC 61400-1과 3에서 요구하는 운전 중 하중 조건은 피로해석을 위한 것이며 정상난류모델(NTM)과 정상해상조건(NSS)을 적용하여 해석을 수행한다.

정격풍속 11.2 m/s와 유의파고 3.6 m 및 주기 9.8s를 적용하였다. 본 연구에서는 피로해석을 포함하지 않아서 상기 조건에 따른 해석과 함께 풍력발전기의 정지 풍속(Cut-out wind speed) 25m/s를 적용하여 운전조건과 정지(Idleing)조건에 대한 해석을 추가하여 함께 비교하였다. 그림 13에서는 풍속을 보여주며 정상운전에서는 정격풍속 11.2m/s 그리고 정지조건에 해당하는 25m/s의 풍속을 평균으로 난류 형태를 보여준다.

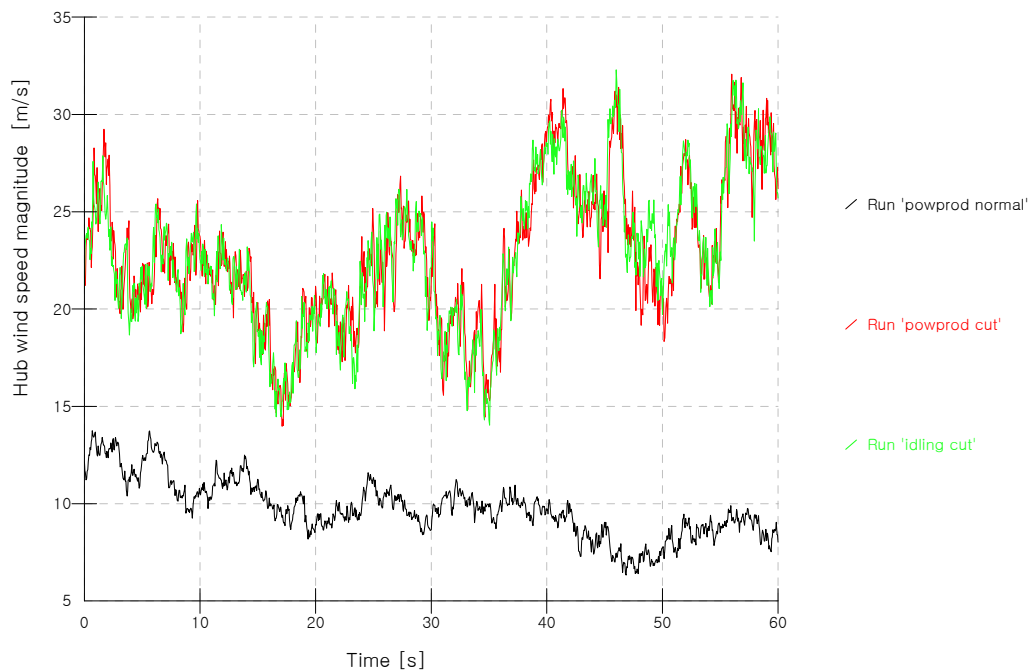


그림 13. 운전조건에서의 풍속 비교

그림 14에서는 정상운전 및 정지풍속에 달했을 때의 운전에 대한 블레이드 회전수를 보여준다. 정상운전에서는 제어 모드에 따라서 풍속 11.5m/s에서 약 25 rpm의 회전수로 운전됨을 알 수 있으며 풍속이 증가되어 25m/s에 달하면 약 16 rpm 정도로 감속 운전하다가 최종 정지하는 것으로 제어됨을 알 수 있다.

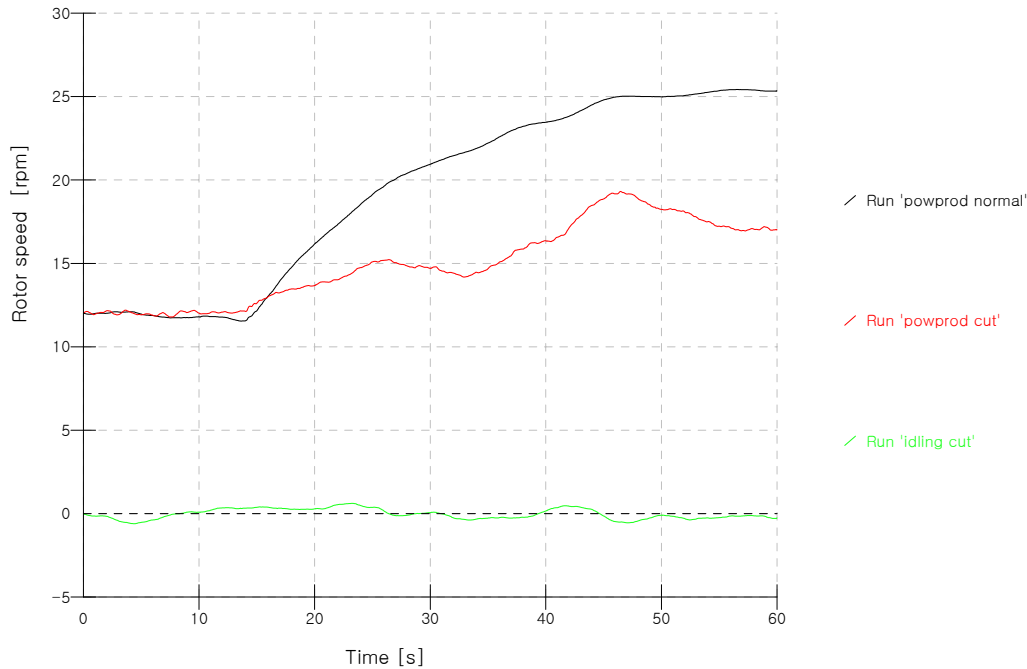


그림 14. 운전 조건에서의 회전수 비교

그림 15에서는 정상운전 및 정지풍속에서의 허브(Hub)에 가해지는 Pitch 모멘트를 비교하였다. 정상운전에서는 +6,000,000Nm(611ton-m) /-7,500,000Nm(765ton-m) 정도에서 정지풍속에서는 +10,000,000Nm(1,019ton-m) /-17,000,000Nm(1,733ton-m)로 증가함을 알 수 있다. 풍속 2.23배 증가에 최대모멘트도 거의 비슷하게 증가한다고 할 수 있다. 정지 상태에서는 추력이 없으므로 모멘트 역시 무시할 수 있다.

그림 16에서는 운전조건에서 계류장력을 비교하였다. 부유체의 운동으로 장력은 계속 변하지만 Idling, 정지풍속에서의 운전 및 정상운전 순서로 장력이 큰 것을 알 수 있다. 상부 풍력발전기 로터의 회전이 부유체의 장력에 중요한 영향을 주는 것으로 판단되며 이에 대한 추가 검토가 필요해 보인다.

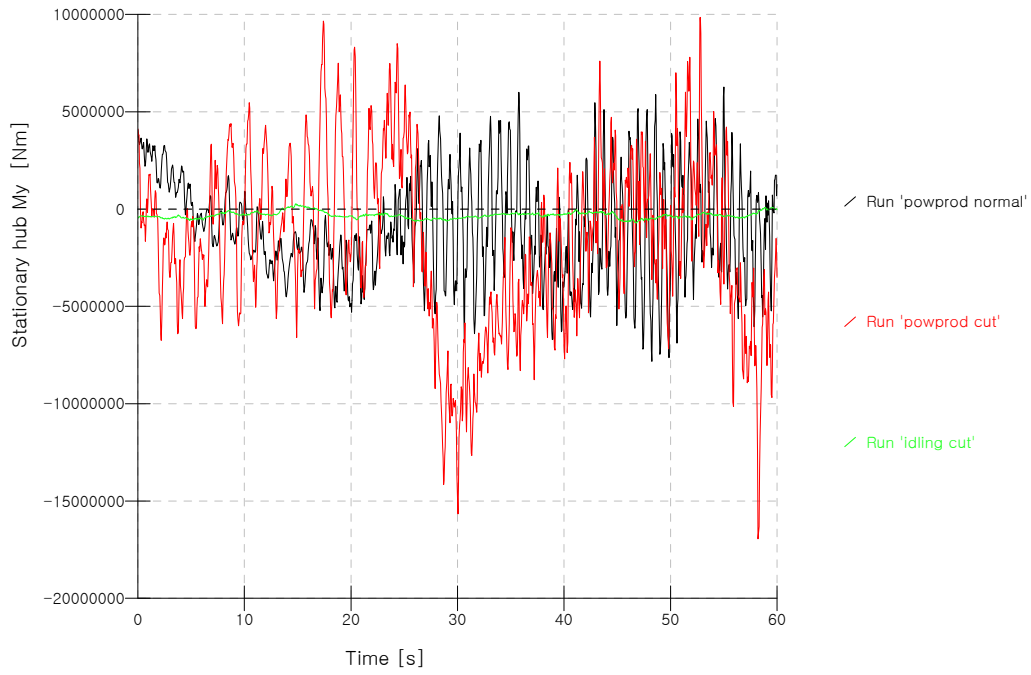


그림 15. 운전조건에서의 허브 모멘트(My) 비교

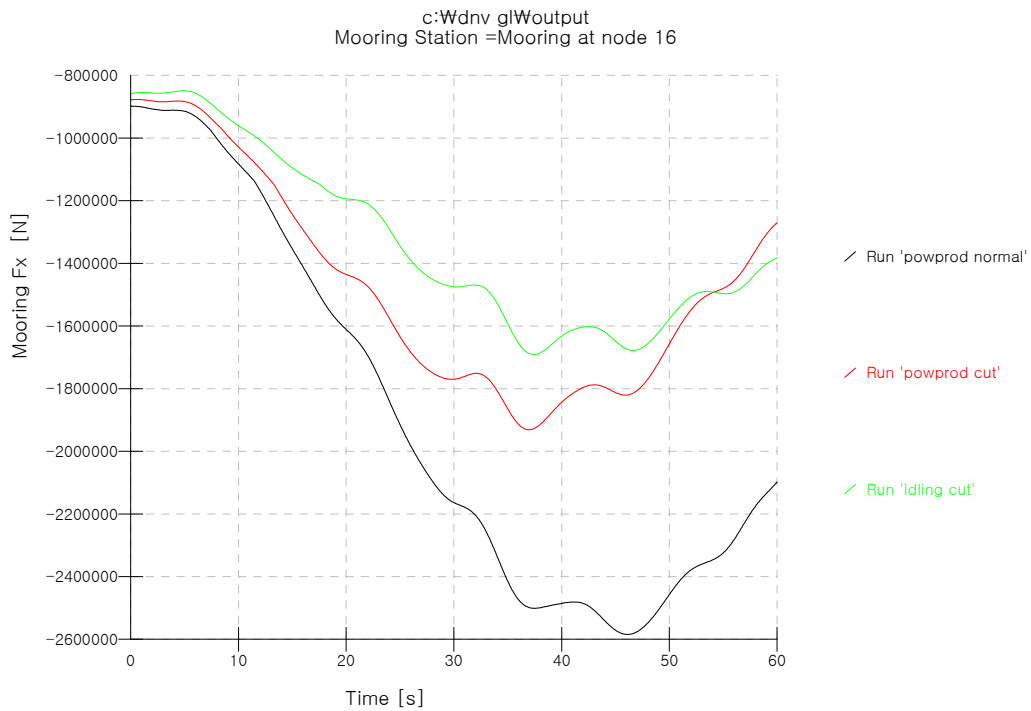


그림 16. 운전조건에서의 계류장력 비교

4.2.2 정지(Parking) 중 하중검토(DLC 10.2)

정지조건에 대한 하중 검토는 극한한계상태(ULS) 확인을 위한 구조해석이다.

극한한계에 상응하는 외력 즉 풍력터빈-II에 준하여 45 m/s 풍속의 바람과 50년 재현빈도의 유의 파고 11.32 m와 주기 15.1s의 파도를 적용하여 Idling 상태에서 하중을 검토하였다. 파도는 JONSWAP spectrum을 적용하였으며 참고를 위해 규칙파를 추가하였다. 그림 17에서는 정지조건에서 규칙파와 불규칙파(JONSWAP spectrum)를 적용하였을 때 부유체 상하운동을 비교해 보았다. 이는 파도의 형상과 거의 연동된다고 할 수 있다.

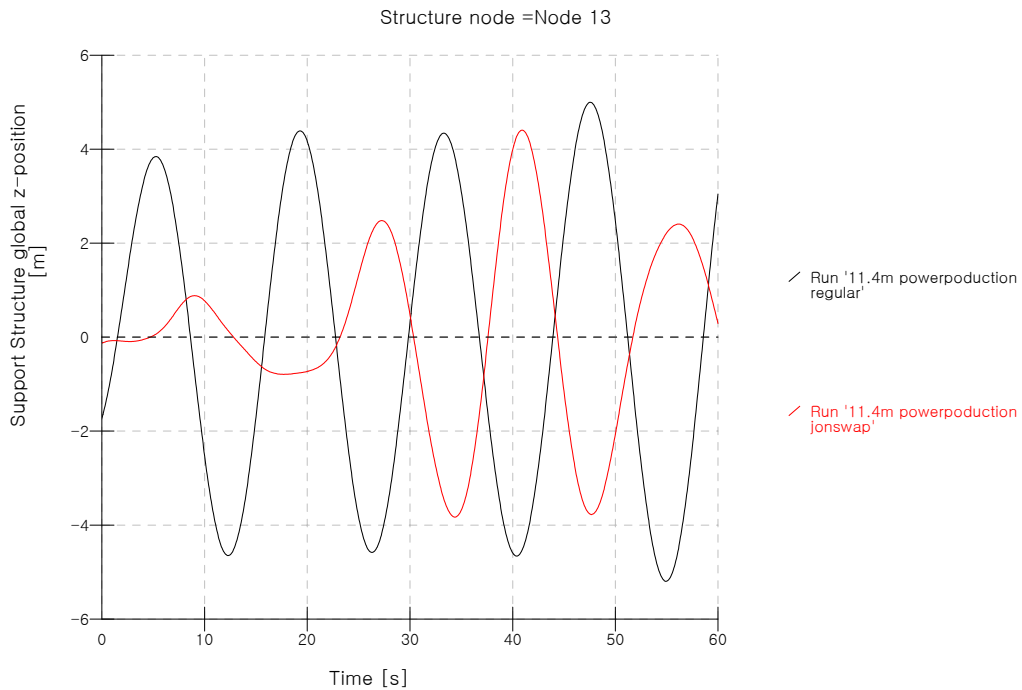


그림 17. 정지(Idling) 조건에서의 상하 운동 비교

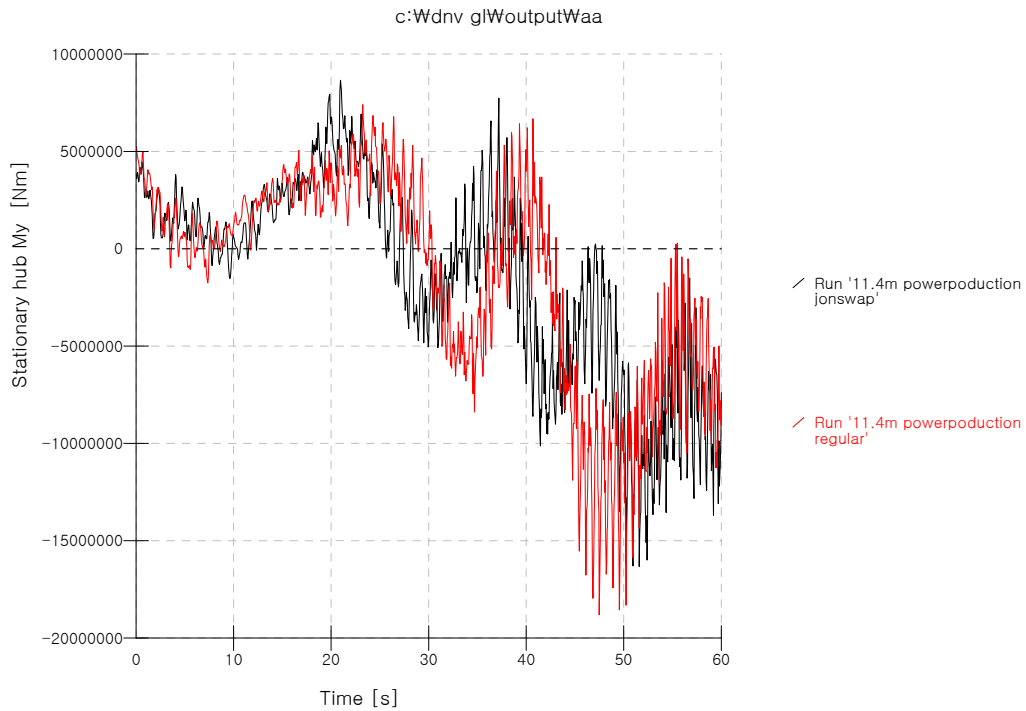


그림 18. 정지(Idling) 조건에서의 허브 모멘트(My) 비교

그림 18에서는 정지조건에서 규칙파와 불규칙파(JONSWAP spectrum)를 적용하였을 때 허브(Stationary hub)에서의 Pitch 모멘트를 비교해 보았다.

로터의 회전에 따른 추력이 없이 부유체의 운동에 따른 모멘트로 +7,000,000Nm(713ton-m) / -15,000,000Nm(1,530ton-m)로 4.2.1 운전 중 하중검토의 모멘트와 비슷함을 알 수 있다. 이는 정지풍속 25 m/s에서 16 rpm 정도의 로터 회전에 의한 모멘트와 유사함을 알 수 있다.

규칙파와 JONSWAP 불규칙파 적용에 따른 모멘트는 거의 비슷함을 알 수 있다.

4.3 향후 검토

Bladed에 대한 교육 및 해석에 필요한 시간이 충분하지 않은 이유로 여러 가지 하중 및 환경 조건을 적용하여 다양한 하중 조건에 대한 연구가 진행되지 못하였으며 바람과 파도의 방향 변화 및 수위변화에 따른 해석 민감도 역시 확인하지 못했다. 향후 해류를 포함하여 다양한 환경 외력을 고려한 추가해석을 통하여 기존 결과와의 비교 검토가 필요하다.

부유식 해상풍력발전의 기술표준인 IEC TS 61400-3-2에 따르면 부유체의 부력공간의 상실에 대한 Redundancy Check에 대한 확인이 요구됨으로 부유체의 안정성 해석 통과 연계하여 추가 해석이 필요하다.

외력에 대한 Bladed 통합 연성해석 결과를 기준으로 IEC 61400-1과 3에서 요구하는 각 부품의 극한한계 해석 및 피로해석이 부유식 해상풍력발전시스템의 신뢰도를 최종 확인하는 것이므로 기존 구조해석 통과 연계 등 체계적인 설계 절차에 대한 이해 및 구축에도 관심을 가져야 할 것이다.

5. 결론

본 연구의 1차 목표는 Bladed를 이용한 부유식 해상풍력발전시스템의 통합연성해석이며 이를 통하여 프로그램의 이론과 구조를 이해하고자 노력하였다.

5MW NREL Semi-submersible 부유식 해상풍력발전시스템을 Bladed 모델에 적용하고 가장 기본적인 정상운전 조건과 정지(Idling) 조건에 대한 해석을 수행하여 모델에 대한 검증과 아울러 결과를 검토하였다.

Bladed에 대한 이해를 통한 해석과 아울러 IEC 61400-1과 3의 요구조건에 대한 검토도 병행하여 부유체 설계에 필요한 지식을 정리할 수 있었으며 Bladed에 의한 해석이 끝이 아니며 이 하중 결과를 이용하여 피로해석과 ULS 검토 등 본격적인 구조해석으로 확장 할 수 있는 기초를 만들었다.

참고 문헌

1. 김기하, 김동현, 광영섭, 김수현 (2015). “FAST, GH Bladed 및 CFD기법을 이용한 5MW 해상풍력터빈 시스템 설계하중조건 해석 및 비교”: 한국유체기계학회 논문집: 제18권, 제2호, pp.14~21)
2. David A. Johnson, Mingyao Gu, and Brian Gaunt(2016). “Wind Turbine Performance in Controlled Conditions: BEM Modeling and Comparison with Experimental Results”: Hindawi Publishing Corporation International Journal of Rotating Machinery Volume
3. 박정훈, 신현경 (June 2015). “부유식 해상 풍력 발전기의 최적 형상 설계에 관한 연구”: 대한조선학회논문집 : Vol.52, No. 3, pp. 171-179
4. International Electrotechnical Commission(2005). IEC 61400-1
5. International Electrotechnical Commission(2009). “Design requirements for offshore wind turbines”: IEC 61400-3
6. International Electrotechnical Commission(2019). “Design requirements for floating offshore wind turbines”: IEC TS 61400-3-2
7. Garrad Hassan & Partners, DNV GL(2020). “BladedTheoryManual“
8. Garrad Hassan & Partners, DNV GL(2020). “UserManual“
9. J.C.Kaimal, J.C.WYNGAARD, Y.IZUMI and O.R.COTE(July 1972). “Spectral characteristics of surface-layer turbulence”: Quarterly Journal of THE Royal METEOROLOGICAL Society, Vol 98, No 417.
10. 남윤수(March 2013). “풍력터빈 시스템 제어”: 도서출판 GS인터비전
11. 권대용, 박현철, 정진화, 김용천, 이승민, Wei Shi(September 2010). “해상풍력 하부구조물 하중영향평가 및 해석기술연구”: 포항공과대학교 풍력특성화대학원
12. 김정태(December 2016). “통합연성해석을 통한 12MW급 부유식 해상풍력발전기의 동적응답 연구”: 울산대학교 조선 및 조선해양공학과 공학석사 학위 논문.
13. 성해진 (April 2020). “대형 초전도 풍력발전기 개발 필요성 및 현황”: 전기저널 2020.04.06.
14. Nana O. Abankwa, Steven J. Johnston, Mark Scott & Simon J. Cox. (October 2015) “Ship Motion Measurement Using an Inertial Measurement Unit”

Abstract

Evaluation of the load cases for the 5MW floating offshore wind turbine using the 'Bladed'

Korean government proposed "3+1" strategy to drive Carbon Zero emission. Since 2015 Paris Climate Change Accord, there are continuous efforts to make strong strategic basis for Carbon zero emission.

This study aims to develop a suitable floating offshore wind turbine system including optimization of the floater for offshore wind farms considering the specific environmental condition. For the global analysis of the fully coupled system, GH-Bladed from DnV GL is used while studying its theories and structure for comprehensive understanding of the analysis process and results.

5MW NREL Semi-submersible floating offshore wind turbine system is applied to the Bladed model and analyses of the normal power production mode and the critical idling mode are done for validation of the model and evaluation of results.

Technical specification for the floating offshore wind turbine is IEC TS 61400-3-2 and also complies with IEC 61400-1 and IEC 61400-3-1 for relevant parts. According to this specification, load cases are applied to the Bladed for necessary analyse and RAO analysis is done additionally for comparison with the referenced paper to check whether the modelling is correct.