부유식 해상풍력발전 유지보수 계획 최적화 모형 개발

상민규[1], 이남경[2], 신용혁[3], *오영진[2], *이철웅[1]
[1]고려대학교 산업경영공학과, [2]한국전력기술(주) 스마트융합실, [3]건국대학교 산업공학과

발표자 : 고려대학교 교통물류정보시스템연구실 상민규

목차

1. 연구배경 및 목적

2. 연구방안

3. 모델 개발 결과

4. 향후 연구계획

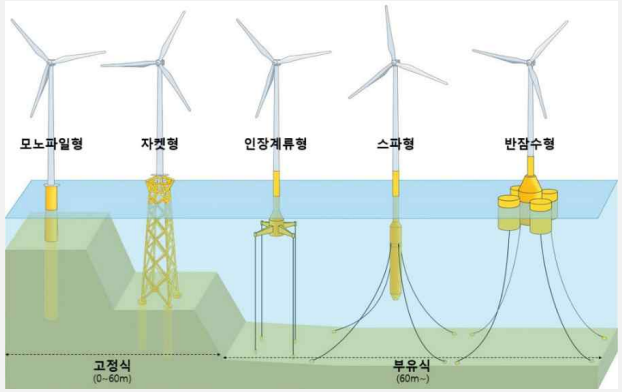
1. 연구배경 및 목적

부유식 해상풍력발전 소개

- 해상풍력발전은 육상풍력발전보다 풍력이 강력하고 일정하여 장시간 고출력 발생이 가능하고 소음, 공간적 한계, 경관훼손 등 기존 육상풍력발전의 단점을 보완함

- 해상풍력발전에도 터빈을 해저 지반에 고정된 기초 위에 설치하는 고정식과, 부유체에 터빈을 설치해 운영하는 부유식 두가지가 있음

- 부유식 해상풍력은 연안이 아닌 먼 바다에도 설치 가능해 더욱 우수한 바람 자원을 활용할 수 있고 입지 제약에서 상대적으로 자유로워 초대형 터빈으로 대규모단지 조성이 가능함



<고정식과 부유식 터빈 형태>

1. 연구배경 및 목적

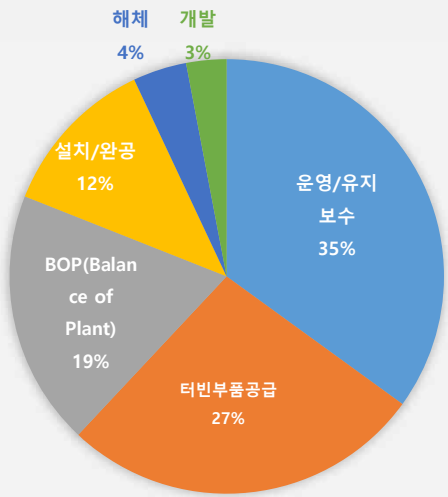
부유식 해상풍력발전단지 유지보수의 중요성

- 이러한 대규모 풍력단지의 경우 단지 운영/유지보수 비용이 전체 공급사슬 비용의 상당 부분을 차지하고 있어 기상여건과 터빈 상태의 가변성에 대응할 수 있는 체계적인 정비계획이 더욱 요구됨

- 운영비용 중에서는 기술자와 부품 이송 등 정비 활동에 직접 투입되는 선박 운항비용이 가장 큰 비중을 차지함(Dinwoodie et al. (2013), Dalgic et al. (2015))

- 탄소중립 패러다임 관점에서도 해상풍력단지의 정비 운항이 비효율적으로 운영된다면 온실가스를 저감하기 위한 재생에너지 확대에 역행하는 아이러니를 초래할 수 있음 (Kaldellis and Apostolou (2017))

따라서, 해상풍력발전을 효율적으로 장기간 가동하기 위해서는 적절한 유지보수 계획 및 인프라 구축이 필수적임



<해상풍력 공급사슬 비용구조>
출처 : 포스코경영연구원

1. 연구배경 및 목적

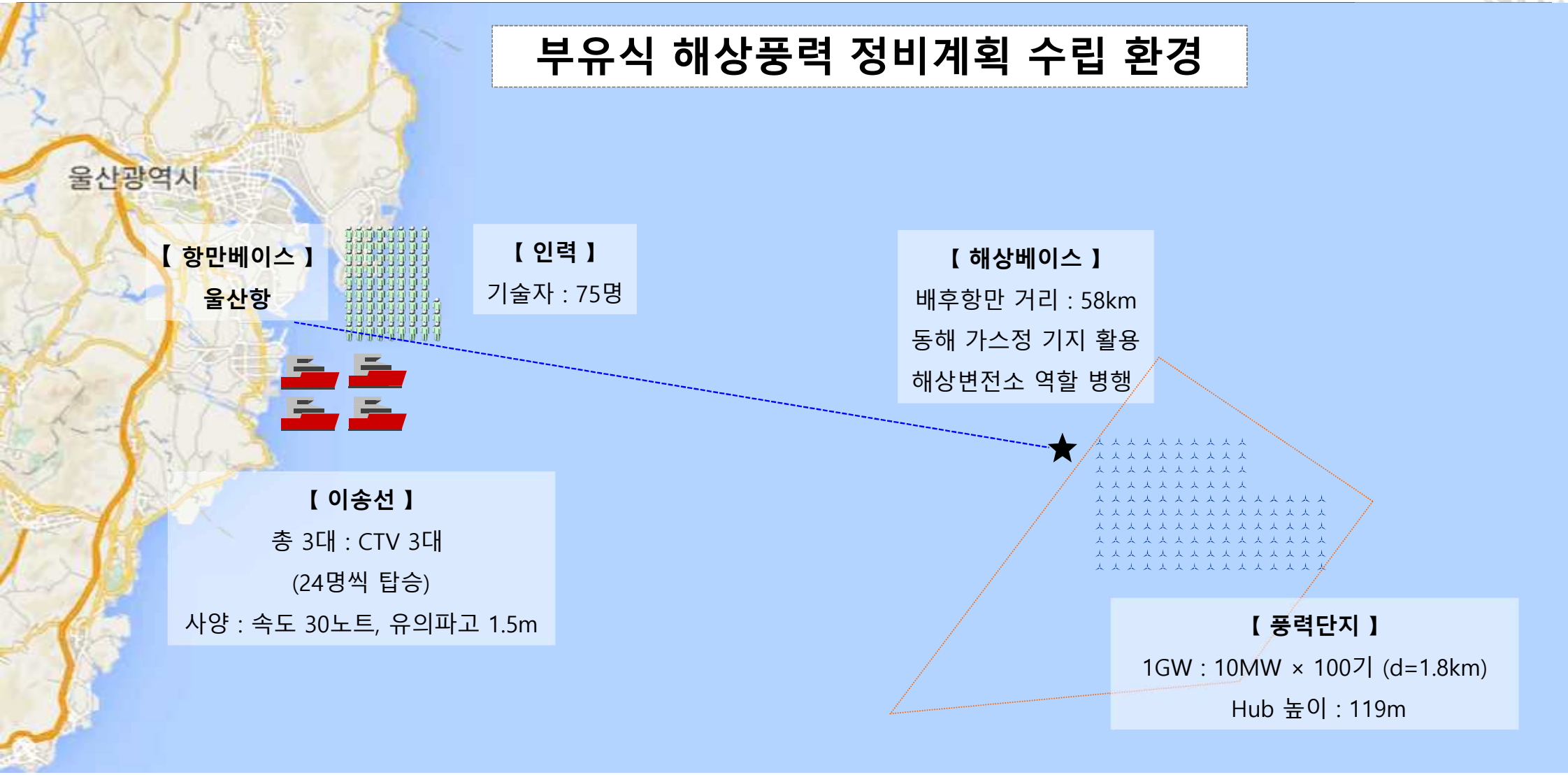
울산 부유식 해상풍력사업 개요

발전량	1차 1.4GW, 최종 6.0GW
투자 규모	약 36조원
지역	울산 해상 동해가스전 인근
기간	1차 건설 2025년, 최종적으로 2030년 완공 목표
참여	쉘, SK E&S 포함 5개 민간기업, 한국석유공사, 한국전력공사 등

- 울산 동해 부유식 해상풍력사업 - 울산항 동쪽 58km 해상(동해 가스전)에 대형 부유식 해상풍력 발전단지를 건설 예정
- 2023년부터 건설에 들어가 2025년까지 1.4GW 이상 규모로 1차 건설을 완료, 이후 최종적으로 2030년까지 6.0GW 규모를 설치할 예정
- 운영과 관리를 위해 60km 떨어진 육상에 베이스를 구축하고 석유공사의 가스 플랫폼 자켓 하부구조를 변전소로 재사용할 계획
- 국내의 개발사업자들은 부유식 해상풍력 운영 경험이 부족한 상황이고, 대규모 프로젝트의 효율적 운영을 위해서는 안정적인 O&M 계획과 인프라를 구축하여야 함

1. 연구배경 및 목적

부유식 해상풍력 정비계획 수립 환경



2. 연구 방안

울산의 시나리오를 정리하여 모델링 계획 수립

- 베이스인 울산항에서부터 약 58km 떨어져 있는 1GW 규모의(10MW 터빈 100개) 해상풍력단지를 유지보수
- 기술자를 배후항만에서 터빈까지 운송하기 위해 유인운송 선박(CTV)을 이용하여 하루 사이에 선박이 오가며 유지보수 수행
- 유지보수 업무는 크게 계획정비(Preventive Maintenance)와 고장정비(Corrective Maintenance)로 나뉨
  - 계획정비의 경우 터빈 유지보수 매뉴얼에 따라 1년에 각 터빈당 정해진 횟수만큼 실행
  - 고장정비의 경우 다시 정비에 필요한 시간에 따라 Minor / Medium / Large 로 나뉘고, 발전량에 악영향을 끼치므로 고장이 발생하였을 때 최대한 빠르게 실행하도록 하여야 함
- 과거 기상 데이터를 활용하여 선박 운영이 가능한 날을 예측하고, 후류 효과를 반영한 정비 계획 수립
- 노동 정책, 계획정비 관련 정책 등을 모두 반영하면서 최적의 인력/자원/작업 배치를 통하여 최소한의 비용으로 모든 정비를 완료하는 것을 목표로 함

2. 연구 방안

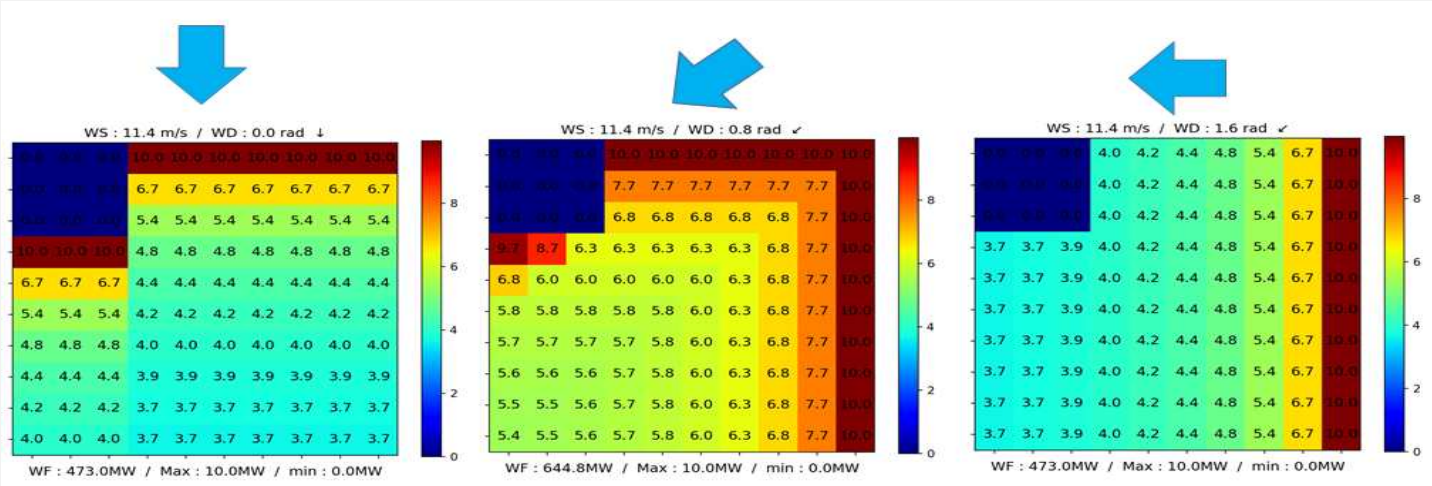
날씨 데이터 활용

- 반영해야 하는 날씨 데이터로는 풍속 데이터, 풍향 데이터, 그리고 유의파고 데이터가 있음
- NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 한국 해양학 데이터베이스에서 추출한 바람장 자료를 기반으로 대상 해상풍력단지 위치에 대한 바람/파랑 후측데이터를 생성하였음
- 이송선(CTV)은 일반적으로 풍속이 10m/s(북해 15m/s)이상, 유의파고가 1.5 m 이상일 경우 풍력단지 접근이 제한된다고 알려져 있으므로 풍속과 유의파고 데이터를 사용하여 언제 해상풍력단지에 접근이 가능한지 파악
- 풍속과 풍향 데이터를 사용하여 일별로 터빈의 비가동 비용을 계산할 수 있음
- 비가동 비용을 계산할 때, 한국전력공사에서 제공해준 후류 효과를 고려한 Jensen모델 기반의 발전량과 최신 REC 가중치를 반영한 비가동비용 계산 모델을 사용함

2. 연구 방안

후류 효과 반영

- 후류 효과란 앞쪽에 배치된 풍력터빈에서 발생한 난류가 뒤쪽 풍력터빈의 출력을 감소시키는 것을 말하는데, 전단 풍력터빈이 정비로 비가동 상태일 경우에는 후단 풍력터빈은 후류 효과 감소로 출력이 만회될 수 있음
- 10x10 모형이라는 가정 하에, 고장이 난 터빈들을 지정하고, 풍향과 풍속 데이터를 입력하면 당시의 각 터빈별 발전량을 계산할 수 있음
- 후류 효과를 반영한 풍력단지의 발전량 예측으로 정비 스케줄링 시 정비 대상 터빈의 우선순위를 고려할 수 있음



< 후류 효과를 고려한 발전량 계산 예시 >

2. 연구 방안

2-Stage

- Mixed Integer Linear Programming 모델을 기반으로 한 Deterministic 접근
- 일 단위 스케줄링까지 한번에 풀어보려고 했으나 문제의 복잡성 때문에 두 단계의 stage로 나눔
- **Stage 1 (Tactical Level)**
  - 각 time shift마다 인력을 몇 명 배치하고, 선박을 몇 대 활용하여 정비를 총 몇 번 수행할 것인지 결정하는 인력/자원 할당 계획 문제
  - 주 단위 planning
- **Stage 2 (Operational Level) – Future Research**
  - Stage 1에서 정해진 내용을 바탕으로, 어떠한 경로로 어느 시간대에 어떤 기술자가 어떤 터빈을 정비하고 돌아올지 정하는 스케줄링 문제
  - 일 단위 scheduling

3. 모델 개발 결과

결정변수 설명

x_{it} : Number of preventive tasks of type i∈NP worked on during shift t.

y_{it} : Number of corrective tasks of type i∈NC worked on during shift t.

w_{it} : Number of turbines down at t requiring finishing corrective maintenance type i∈NC

z_t : Number of vessels utilized in shift t

u_t : Number of teams required in shift t

- 각 time shift는 일주일 단위, 총 52개(1년)
- 각 주에 진행할 계획정비와 고장정비 수, 투입할 기술자(팀 단위)의 수, 그리고 가용할 선박의 수를 결정함
- 고장은 났지만 아직 고치지 못한 터빈의 수도 카운트함(비가동비용 계산을 위해 필요)

3. 모델 개발 결과

목적식

$$\min \sum_{t=1}^{T} V_t z_t + \sum_{t=1}^{T} C^{team} u_t + \sum_{i \in NP} \sum_{t=1}^{T} EH_t N_i x_{it} + \sum_{i \in NC} \sum_{t=1}^{T} ED_t w_{it}$$

① ② ③ ④

- 선박 가용비용 + 기술자(팀 단위) 고용비용 + 계획정비로 인한 비가동비용 + 고장정비로 인한 비가동 비용으로 이루어져 있음
- 비가동비용은 터빈이 꺼져있는 동안의 전력손실량을 액수화한 것인데 후류 영향을 고려한 Jensen 모델 기반의 발전량과 최신 REC 가중치를 반영함
- 계획정비의 경우 터빈을 점검하는 시간동안만 비가동됨
- 고장정비의 경우 정비하는 시간동안만 비가동되는 것이 아니라 고장이 발생한 시점부터 정비를 완료하는 시점까지 계속 비가동비용 발생

3. 모델 개발 결과

주요 제약식

- 각 팀은 이동시간을 포함하여 주별로 최대 40시간까지 일할 수 있음(근로기준법 반영)

$$\sum_{i \in NP} x_{it} N_i + \sum_{i \in NC} y_{it} N_i + u_t W_t T^R \leq u_t \times W^L (= 40) \quad \forall t \in (1,2,...,52)$$

- 계획정비의 경우, 파고와 비가동비용이 낮은 3월 ~ 10월 사이에 집중적으로 수행함(3분의 2 이상을 수행)

$$\sum_{t=10}^{40} x_{it} \geq 200 \quad \forall i \in NP, t \in (1,2,...,30)$$

- 일주일 안에 작업되는 일들의 수는 그 주에 일하는 기술자들의 수와 일할 수 있는 날의 수에 의해 제한됨

$$\sum_{i \in NP} x_{it} N_i + \sum_{i \in NC} y_{it} N_i \leq W_t W^{\max} u_t \quad \forall t \in (1,2,...,52)$$

3. 모델 개발 결과

주요 제약식

- t시점에서 필요한 고장정비의 수는 (t-1)시점에서 필요한 고장정비 수 – (t-1)시점에 실행한 고장정비 수 + t시점에 발생하는 고장정비 수 (생산계획의 재고-수요 제약조건과 비슷)

$$w_{it} = w_{i(t-1)} - y_{i(t-1)} + G_{it} \qquad \forall i \in NC, t \in (2,3...,52)$$

- 각 time shift에 진행하는 정비작업 건수 ≤ 각 time shift에 필요한 고장정비 수
(한 주에 진행하는 정비작업 건수가 그 주에 필요한 고장정비 수보다 클 수 없는 것은 t 시점에서 고장 나지 않은 터빈을 미리 고칠 수 없기 때문)

$$y_{it} \leq w_{it} \quad \forall i \in NC, t \in (1,2,...,52)$$

- 연말까지 처음에 계획된 계획정비 수만큼 모두 실행함

$$\sum_{t=1}^{52} x_{it} = PP_i (= 300) \quad \forall i \in NP$$

3. 모델 개발 결과

Gurobi 솔버를 활용한 결과 예시

Time Shift	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Preventive Tasks	0	0	0	0	0	0	8	8	0	14	0
Corrective Tasks	7	7	7	7	8	8	9	9	8	7	8
Number of Teams	5	5	5	5	6	6	6	8	6	8	6
Number of Vessels	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Time Shift	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**
Preventive Tasks	0	0	14	0	0	0	0	0	0	22	16
Corrective Tasks	8	7	7	6	7	8	9	7	9	7	9
Number of Teams	6	5	8	4	5	6	6	5	6	10	10
Number of Vessels	2	2	2	1	2	2	2	1	4	3	3
Time Shift	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**
Preventive Tasks	8	19	19	8	19	2	14	16	14	0	0
Corrective Tasks	9	8	8	9	8	7	7	6	7	8	8
Number of Teams	8	10	10	8	10	10	8	8	8	6	6
Number of Vessels	2	3	3	2	3	3	2	2	2	2	2
Time Shift	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**	**41**	**42**	**43**	**44**
Preventive Tasks	22	0	0	19	8	0	8	0	11	0	0
Corrective Tasks	7	7	6	5	9	9	9	7	8	9	9
Number of Teams	10	5	4	8	8	6	8	5	8	6	6
Number of Vessels	3	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
Time Shift	**45**	**46**	**47**	**48**	**49**	**50**	**51**	**52**	Total Cost		
Preventive Tasks	0	19	0	0	0	0	0	0			
Corrective Tasks	9	8	7	8	9	9	8	7	1339652124		
Number of Teams	6	10	5	6	6	6	6	5			
Number of Vessels	2	3	2	2	2	2	2	2			

3. 모델 개발 결과

모델의 의의

- 해상/기상 데이터, 과거 고장이력 데이터 등 실제 데이터를 분석하여 활용함
- 계획정비 관련 기준 정책, 근로기준법을 반영하는 등 국가와 운영사업자의 정책들을 고려하여 현실적인 계획을 수립하였으며, 따라서 국내 해상풍력단지 유지보수를 위한 기초적인 가이드라인의 역할을 할 수 있을 것으로 예상됨
- 주어진 문제에 큰 영향을 미치지 않고 제약 조건을 부분적으로 추가하고 삭제할 수 있어 문제 자체에 포함되어야 하는 조건을 유연하게 조절할 수 있다는 장점을 가짐
- 기존의 연구들처럼 모든 터빈들의 비가동 비용이 모두 같다고 가정하지 않고, 후류 효과를 고려한 각 터빈별 비가동 비용을 계산하여 계획정비 및 고장정비의 우선순위를 파악 가능하므로 더욱 의미있는 연구로 이어질 수 있음

4. 향후 연구계획

향후 연구계획

- 이 모델로 얻을 수 있는 선박/인력 배치와 터빈 유지보수 계획을 활용하여 전에 언급한 Stage2 문제를 풀어볼 수 있음
- 즉, 정해진 선박 수와 인력 수를 사용하여 어떠한 경로로 어느 시간대에 어떤 터빈을 정비하고 돌아올 지 정하는 하루 단위의 스케줄링 문제로 이어질 수 있음
- 또한, 이 모델을 활용한 민감도 분석(Sensitivity Analysis)를 통하여, 몇 대의 선박과 인원을 가용하였을 때 가장 효율적으로 유지보수를 진행할 수 있는지도 파악이 가능함
- 날씨 데이터 같은 경우에도 인공지능 기법을 통해 분석하여 예측을 한다면 더욱 정확한 유지보수 계획을 수립할 수 있을 것으로 기대됨

Acknowledgement

- 본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No. 2020301020050)의 성과입니다.