

부유식 해상풍력단지의 장/단기 정비계획 시뮬레이션

이남경* · 안송강** · 오영진***

Approach to Simulation of Long- and Short-Term Maintenance Planning in Floating Offshore Wind Farms

Nam-Kyoung Lee*, Song-Kang An** and Young-Jin Oh***

Key Words : Offshore wind farm (해상풍력단지), Maintenance planning (정비계획), Scheduling (스케줄링), Operations & Maintenance (운영 및 유지정비)

ABSTRACT

Operations and maintenance (O&M) in offshore wind farms accounts for a substantial portion of the life cycle cost due to harsh weather conditions and vessel dispatching. In this regard, it is crucial to expedite O&M technologies in South Korea, which is in the early stage of harnessing wind resources from the ocean. This contribution investigates an O&M planning and scheduling model for floating offshore wind farms with a literature review and use case study. We introduce the development of a long- and short-term maintenance planning framework as part of an integrated O&M platform. This contains a single vessel and fleets routing composition along with technicians and a maintenance job list based on numerical algorithms. Additionally, the routing search presents the basis of decision support for economic trade-offs regarding smooth operation corresponding to ever-changing wind farm situations. The maintenance planning simulator will ultimately contribute to support yearly and day-to-day power-related decisions in a cost-effective manner.

1. 서론

정부는 재생에너지 발전량 비중을 2030년까지 20 %로 충족하는 '재생에너지 3020 이행계획'에서 더 나아가 2040년에는 35 %까지 올리는 '제3차 에너지기본계획'을 수립하였다. 이에 따라 2030년까지 48.7 GW의

신규 재생에너지 발전시설이 필요한데 풍력의 경우 17 GW 이상의 신규 단지가 필요하며, 이중 13 GW 이상은 해상풍력발전으로 설치될 것으로 예상된다 [1-2]. 2020년 말 기준으로 국내 해상풍력발전단지(실증 포함)는 총 9개소에 142 MW가 운영 중이고, 총 33 개소의 4.7 GW 규모 해상풍력발전에 대한 전기사업허가가 완료된 상태이다 [3]. 현재 해상풍력발전은 고정식(Fixed)이 주류를 이루고 있으나 환경, 민원 등 현안 문제에서 상대적으로 자유로우면서 우수한 풍황 자원을 이용할 수 있다는 측면에서 대규모 부유식(Floating) 해상풍력이 주목받고 있다.

이런 배경에서 부유식 해상풍력 기술력 확보를 위한 핵심기술개발사업으로 '8 MW급 부유식 해상풍력 시스템 개발(과제고유번호: 1415175456, 주관기관: 두산

* 한국전력기술(주) 스마트융합실
금오공과대학교, 디지털융합공학과 박사과정

** 한국전력기술(주) 스마트융합실

*** 한국전력기술(주) 스마트융합실 (교신저자)

E-mail : yjoh2@kepc0-enc.com

DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2022.13.2.001>

Received : February 3, 2022, Revised : March 3, 2022

Accepted : April 12, 2022

중공업)', '5.56 MW 부유식 해상풍력 시스템 개발(과제고유번호: 1415169200, 주관기관: 고등기술연구원)', 'MW급 부유식 해상풍력 시스템 개발(과제고유번호: 1415169335, 주관기관: 울산대학교산학협력단)', '디지털터빈 기술에 기반한 부유식 해상풍력 시스템의 예지적 유지보수 기술 개발(과제고유번호: 1415169780, 주관기관: 울산테크노파크)' 등 풍력시스템부터 유지정비에 이르기까지 다방면의 국책과제가 수행 중이다.

해상풍력발전의 유지정비는 육상풍력발전에 비해 기상 상황 등에 따른 수행 및 접근 제한요소가 많으며, Table 1과 같이 생애주기 관점에서는 단지의 운영 및 유지정비(O&M)가 전체 비용의 20-30 %를 차지하는 등 유지정비 효율화에 의한 발전량 증대 및 비용 절감 효과가 큰 것으로 알려져 있다 [4-5]. 특히, 부유식 형태로 단지의 규모가 확대됨에 따라 일상적인 계획정비 및 상태진단 등에 따른 고장정비를 구성하는 정비요건, 인력, 부품 등의 요소와 더불어 정비작업에 투입되는 선박의 도입 및 운영 등은 관리의 복잡성은 더욱 증가하여 이를 종합적이고 체계적으로 관리할 수 있는 통합 플랫폼의 필요성 역시 커지고 있다.

Table 1. Lifecycle opex ratio of offshore wind farm [6-7]

Type	2018	2019
Fixed	34.1 %	34.4 %
Floating	31.4 %	29.6 %

본 기고에서는 대규모 부유식 해상풍력발전단지의 유지정비를 효율적이고 체계적으로 관리할 수 있는 통합 플랫폼의 개념을 제시하고, 이를 위해 개발된 정비 시뮬레이션 전산모듈을 소개하고자 한다.

2. 해상풍력단지 유지정비 시뮬레이션

2.1 부유식 해상풍력발전의 특성

부유식 해상풍력발전단지는 수심에서 수백 km의 원거리 심해에 건설되는 것이 일반적이며, GW급 이상의 대규모 단지는 대상 해역의 크기가 수십 km에 이른다. 그러므로 해상풍력발전단지의 유지정비 기지 역할을 하는 베이스(Base)를 배후항만에 설치할 경우는 베이스에서 정비대상 터빈으로 이동에 상당한 시간이 소요되며, 해상풍력단지에 가까운 곳에 베이스를 두더라도 정비작업을 위한 이동거리는 결코 무시할 수 없다. 또

한 GW급 해상풍력단지의 경우 설치될 풍력터빈이 100기가 넘을 것이고, 정비팀들이 2척 이상의 이송선 또는 작업선에 배치되어 해상을 누비는 숨가쁜 정비 일상이 매일 반복될 것이다.

해상풍력은 육상풍력과 달리 풍황(풍속 등) 및 해황(파랑, 해무, 태풍 등)에 따라 정비대상 터빈에 대한 이송선 또는 기술인력의 접근에 대한 예측이 쉽지 않다. 또한 단지 운영사는 예상치 못한 터빈의 고장이 발생할 경우 예정된 정비일정을 변경해 고장정비를 우선 수행할지 아니면 풍황 추이와 이송선 또는 작업선의 운용 효율성을 고려해 고장정비를 미룰지 등 의사결정에 수없이 직면하게 되는데 이는 목표 발전량 충족과 연계된 체계적인 정비계획의 필요성을 제기한다.

해상풍력은 풍황 자원 활용을 극대화하기 위해 3-4 월경부터 약 6 개월 동안 계획정비를 집중적으로 수행하는 계절적 특성을 갖는 것으로 알려져 있으며 GW급의 부유식 해상풍력발전에 도 유사한 정비 관례가 적용될 것이다. 특히 수익성에 직결되는 선박의 도입과 운용 및 풍황·해황에 기반한 풍력터빈 정비 비가동과 관련한 목표 발전량 달성 등은 해상풍력단지 운영자 입장에서 매우 중요한 이슈이다.

부유식 해상풍력발전 유지정비 통합 플랫폼은 이러한 해상풍력의 운영상 특성을 고려해 체계적인 정비계획과 의사결정을 지원해야 한다.

2.2 선행연구 검토 및 벤치마킹

해상풍력의 정비계획은 필요한 선박, 기술인력, 정비요건을 비롯해 기상 상황, 설비 상태 등을 포함한 다양한 변수가 복합적으로 고려되는 까다로운 영역으로 알려져 있다 [8]. 해상풍력 정비계획 방법론은 크게 2가지로 접근할 수 있는데 하나는 터빈 고장에 대한 예측을 기반으로 운영기간(time horizon) 동안 정비계획을 시뮬레이션(Simulation based)하는 것이고, 두번째는 기상, 설비 고장 등 확률론적 요소를 가정하고 정비계획을 도출(Optimization based)하는 방법이다 [9].

Dalgic et al. (2015)은 풍력터빈의 고장 상태와 기상 조건 등 정비 접근성을 고려하여 정비방안의 개선점 도출을 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 연간 단위로 정비계획을 수립하면서 발전량 확보를 위해 고장정비를 우선적으로 수행하고 계획정비는 상반기부터 착수가 필요하다는 점을 제시하였다[10].

Gutierrez-Alcoba et al. (2019)는 운영 및 유지정비

비용을 최소화하기 위한 선박과 정비작업의 조합을 찾는 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming, MIP) 기반의 최적화 모델을 제시하였다. 계획정비와 고장정비에 대한 세분화된 비용 요소를 종합적으로 다룬 모형으로서 운영사의 주요 관심사인 정비 중 비가동에 따른 발전량 손실을 비용 인자로 모델링하였다 [11].

한편 풍력단지 운영을 위한 상용 솔루션들은 다음과 같은 기능들을 통해 단지 수익성의 개선을 도모하고 운영 편의성을 제공하는 것으로 파악되며 Fig 1, 2에서 조사한 솔루션의 예시 화면을 제시하였다.

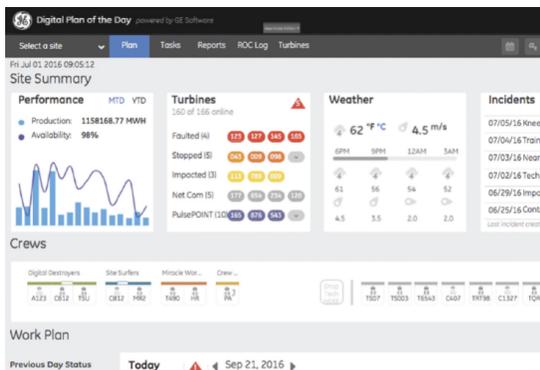


Fig 1. Digital Plan of the Day in Digital Wind Farm [12]

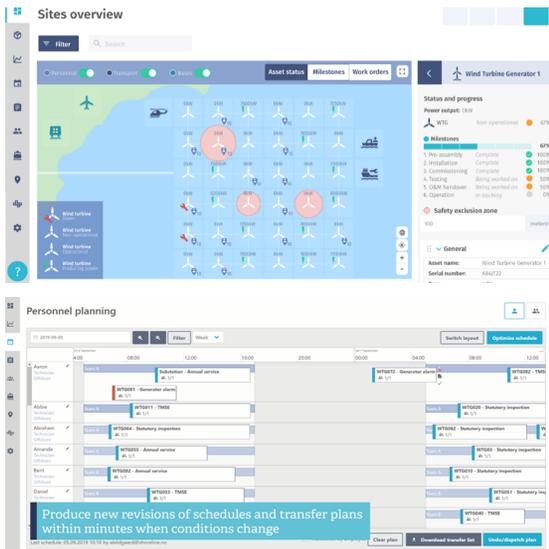


Fig 2. Dashboard and Scheduling in O&M Management [13]

- SCADA와 상태진단 정보의 실시간 가시성 제공
- 정비작업 최적화를 위한 스케줄링 및 시뮬레이션

- 풍해황 데이터 외부 연동 및 예측 정보 제공
- 생산성, 성능지표 등의 정보를 대시보드로 제공
- 정비활동 데이터베이스화 및 리포팅
- 물류, 파트, 조직 등 자산 관리 기능

2.3 부유식 해상풍력단지 정비계획 시뮬레이터

Fig 3은 본고에서 제안하는 부유식 해상풍력발전단지(Floating Offshore Wind Farm, FOWF)에 대한 정비계획 시뮬레이터의 구성을 나타낸 것으로서 장기(연간) 정비계획, 단기(2주) 정비계획, 일간 정비계획 시뮬레이션 기능으로 구분된다. 이같은 시뮬레이터를 활용하기 위해서는 풍력터빈(Wind Turbine Generator, WTG), 부유체 제작사가 제공하는 정비 매뉴얼에 따르는 계획정비 작업목록(Job list)과 각 부품별로 고장 발생 시 적용되어야 하는 고장정비 작업목록이 시뮬레이터 데이터베이스의 정비작업 마스터로 사전에 정의되어야 한다.

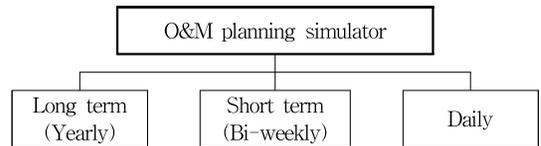


Fig 3. Outline of FOWF O&M planning simulator

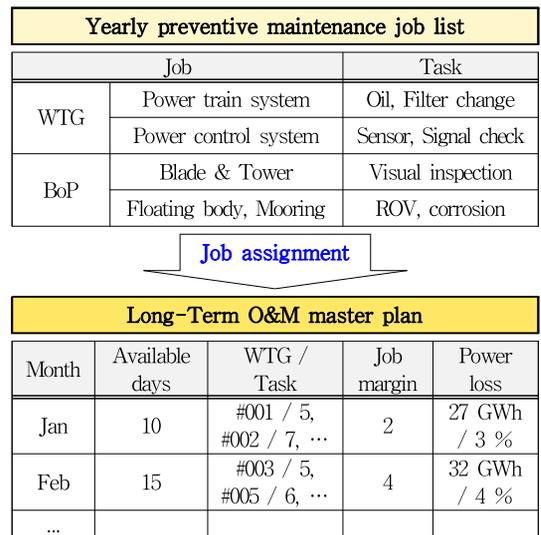


Fig 4. Long-Term O&M planning schema

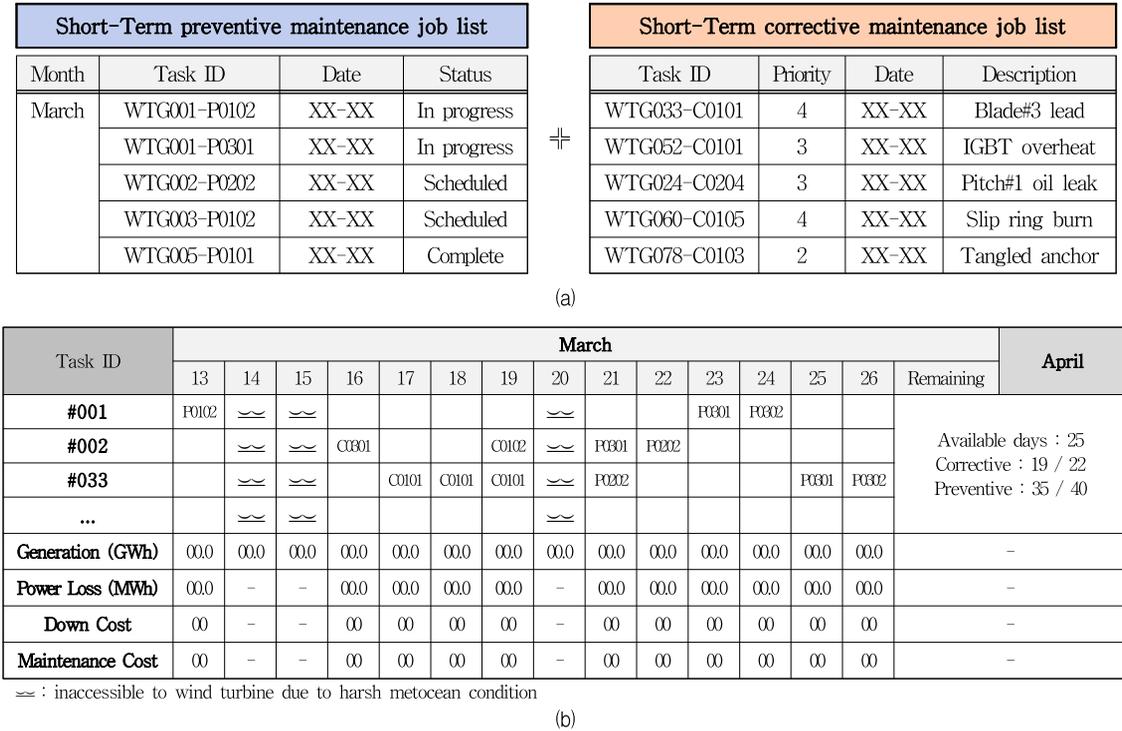


Fig 5. Short -Term (Bi-weekly) O&M planning and scheduling schema

Fig 4는 연간 정비계획 시뮬레이터의 주요 기능을 요약한 것이다. 사용자는 연간 계획정비 작업목록과 전년도 계획정비 이력을 바탕으로 매월 수행할 정비작업(Job & Task)을 배정한다. 연간 정비계획은 연간 풍황·해황 특성을 분석 및 예측한 결과를 반영하여 정비가능일수(Available days)와 작업 여유도(Job margin)를 제시한다. 월별 작업 할당(Job assignment)에 따라 계산된 정비작업 여유도는 사용자의 판단하에 적절히 조정할 수 있으며, 이는 해당 풍력단지에 대한 월별 고장발생 빈도(Failure rate) 등의 운전경험 데이터가 축적될수록 보다 효과적인 의사결정이 가능하다. 또한 시뮬레이터에는 앞선 풍황 예측 기반의 발전량 계산 결과를 제시한다. 이 정보는 사용자가 정비작업 할당에 따른 발전량 손실(Power loss)을 개략적으로 예상할 수 있도록 하며, 월간 발전량이 큰 기간에 정비작업 할당량을 축소 조정함으로써 효과적인 단지 운영이 가능하다. 풍황·해황 예측은 기상 후측 데이터 또는 해당 풍력단지에 탑재된 Met master 등에서 관측된 과거 기상 데이터를 기반으로 자동회귀적 이동평균모델(Autoregressive integrated moving average, ARIMA)

등 통계적 기법 또는 딥러닝 알고리즘인 장단기 기억 신경망(Long short term memory, LSTM) 등을 활용해 접근가능일 정보를 제공한다.

Fig 5-(a)는 단기(2주) 정비계획 시뮬레이터의 주요 기능을 요약한 것이다. 기상청 등이 제공하는 기상 정보 API(Application program interface, 응용프로그램 인터페이스)를 통해 풍속, 풍향, 파고 등에 대해 10-15일까지 예보되므로 2 주간은 풍력터빈 집안 및 정비작업 가능시간에 대한 결정론적 판단이 가능하다. 따라서 2 주 동안의 기상예보를 기반으로 계획정비에 대한 상세 스케줄링이 가능하며, 간트 차트(Gantt chart)와 같은 시각적인 인터페이스로 일자별로 할당된 정비작업을 확인 또는 조정할 수 있다. 만약 예상하지 못한 고장(또는 고장예지)이 발생하였을 경우, 해당 고장정비 작업을 즉시 일별 정비작업 스케줄에 할당함으로써 사용자가 정비 일정 조정을 효과적으로 판단할 수 있다. Fig 5-(b)는 이러한 스케줄링의 예시를 나타낸 것이다. 2 주 이후의 날짜에 대해서는 일반적인 기상예보를 참고할 수 없으므로 작업 가능일수 등에 대한 연간 예측값을 참고하여 단기 정비계획의 전체 운영기간

부유식 해상풍력단지의 장/단기 정비계획 시뮬레이션

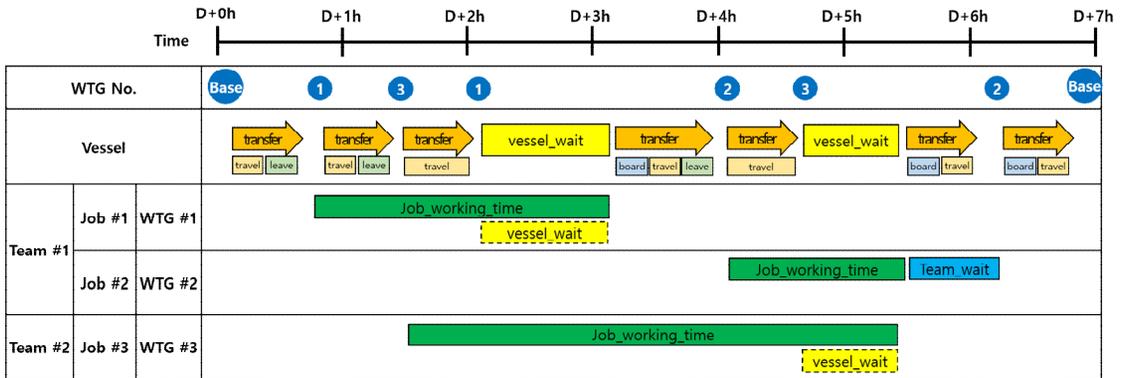


Fig 6. Daily O&M scheduling schema

(time horizon)인 2 개월의 잔여기간(1-1.5 개월)에 계획된 정비작업을 완료할 수 있을지에 대하여 사용자가 판단할 수 있는 정보뿐만 아니라 예상 발전량, 비가동 손실, 정비 비용 정보 등을 제공한다.

상기에 설명한 단기 정비계획 시뮬레이터에서는 기상 상태에 따른 터빈 접근 가능 여부에 따라 계획정비와 고장정비 작업을 일자별로 할당할 수 있으나, 해당 정비작업의 소요시간이 터빈 내에서 정해진 근무시간 이내에 완료할 수 있는 작업인지 판단하기는 쉽지 않다. 따라서, 정해진 근무시간(일간 8 시간 등) 이내에 수행할 정비작업을 한정된 이송선과 정비팀에 배정하는 상세 스케줄링에 대한 시뮬레이션이 필요하다. Fig 6는 이에 대한 간략한 개념도이다.

2.4 예지적 O&M 통합 플랫폼

2.3에서 설명한 정비계획 시뮬레이터는 부유식 해상풍력발전단지 종합관리시스템의 일부로서 기능을 발휘할 수 있다. 앞서 설명했던 바와 같이, 계획정비 작업 목록 및 고장 발생에 대한 조치항목으로서의 고장정비 작업목록은 정비계획과 관련된 기능들과 연계된 데이터로 관리될 필요가 있다. 이는 소모품, 예비품, 정비용 공구/장비, 선박, 정비팀 및 정비요건 등과 함께 데이터베이스로 구축됨으로써 유지정비 리소스의 현황을 실시간으로 파악할 수 있고, 운영 및 정비 활동에 필요한 소모품 및 예비품 등에 대한 주문관리 자동화 시스템 등과 연계하는 기능으로 확대될 수 있다. 이러한 기능들은 궁극적으로 해상풍력발전단지의 터빈, 부유체, 변전소 등의 구성 설비들의 정비 이력 및 형상 관리와 유기적으로 연동되어 운영·정비 데이터 기반의

의사결정과 비용 절감을 지원할 수 있도록 해상풍력발전전에 특화된 생애주기 데이터모델까지 확장하여 O&M 통합 플랫폼으로 구현될 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 풍력터빈의 효율적인 운영 및 유지정비를 위해서는 발전단지와 배후항만에서의 풍향·해황에 대한 장·단기 예측이 중요한 기능을 담당하기 때문에 풍향·해황 예측시스템이 O&M 통합 플랫폼에 포함되어야 한다. 또한 최근 풍력터빈 시스템에 적용이 확대되고 있는 상태진단시스템(Condition monitoring system, CMS) 또는 예지 진단(Predictive diagnosis)과 주요 부품에 대한 잔여 수명(Remaining useful life, RUL) 기능이 함께 탑재되어 유기적으로 운용되면 O&M 의사결정에 대한 부가가치는 증대될 것이다.

아울러 디지털 트윈과 각종 지원 기능을 추가한 예지적 O&M 통합 플랫폼의 종합적인 개념은 Fig 7과 같이 나타낼 수 있다.

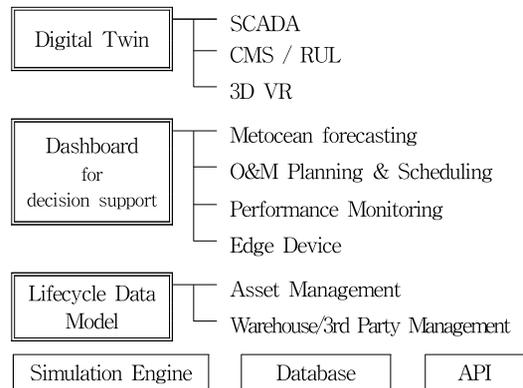


Fig 7. Predictive O&M platform for FOWF

3. 일일 최적 정비 스케줄링 모형

해상풍력단지에 대한 일일 정비 스케줄링은 아래 Table 2와 같이 구성되는 모델로 정의할 수 있다.

Table 2. Main components for daily O&M scheduling

Entity	Attributes
Vessel	Velocity, Fuel consumption, Capacity, Availability, Accessible wave height
Technician	Team, Type, Certification, Availability
Job & Task	Set, Type(Preventive, Corrective), Job Duration, Time to board and leave
WTG	Location

정비작업이 정비팀에 할당되고 정비팀별로 선박을 배정하면 선박별 정비대상 터빈들에 대한 이동경로가 설정된다. 이렇게 스케줄링이 중첩되는 모든 경우를 탐색하여 최적 정비 일정을 도출할 수 있으나, 대규모 부유식 해상풍력발전단지의 상황을 적용하기에는 경우의 수가 매우 커지므로 모든 경우를 탐색하는 것은 계산속도 등 기술적인 제약이 따른다. 본 모형은 정비 스케줄링의 프로토타입으로서, 우선 터빈별 작업 목록에 정비팀을 할당하고, 정비팀별 배정된 이송선의 이동경로에 대한 최적화 탐색 모델을 개발한 것이다.

3.1 단일 이송선 이동 경로 탐색 (Single vessel routing)

이송선은 정비 베이스를 출발하여 정비 대상 풍력 터빈마다 배정된 정비팀을 하선시키고 각 터빈별 정비작업이 끝나면 최종적으로 모든 정비팀을 다시 태워 베이스로 복귀한다. n 개 터빈에 대한 정비작업이 할당되는 경우 이송선은 터빈마다 승·하선을 위해 2 회씩 정박하므로 베이스를 출발한 후 $2n$ 개의 목표 지점을 경유한 후 베이스로 복귀한다고 간주할 수 있다. 이때 터빈별 중복 경유는 순서에 상관없이 없으므로 탐색하여야 하는 이동 경로의 경우의 수는 아래와 같다.

$$Number\ of\ cases = \frac{(2n)!}{2!} \tag{1}$$

이렇게 도출된 각 이동 경로에 대해 베이스와 터빈,

터빈 간의 이동시간을 적용하면 터빈별로 이송선이 도착하는 시각을 계산할 수 있다. 이동시간은 정비팀이 이송선에서 터빈으로 이동하는 하선(leave) 시간, 이송선의 운항(travel) 시간 및 정비팀이 복귀를 위해 이송선으로 다시 승선(board)하는 시간의 합이고, 이송선 운항시간은 베이스와 터빈 간 거리 및 운항속도로 계산할 수 있다. 정비팀 하선 시간은 이송선이 정박하는데 걸리는 소요시간과 각종 장비, 예비품 등을 함께 하적하는 시간의 합으로 정의되며, 승선 시간도 이와 동일하다.

정비작업을 마치고 복귀하는 과정에서 이송선은 터빈에 도착했는데 정비작업이 종료되지 않아 이송선이 대기하는 경우가 있다. 이 경우 이송선 도착 시각과 작업 종료 시각의 차이를 이송선 대기시간(vessel wait time)으로 정의하고 후속 경유 예정 터빈에 대한 이송선 도착시각을 업데이트한다. 반대로 터빈에서 정비작업은 끝났지만 이송선이 도착하지 않았을 때는 이송선을 기다리는 시간이 정비팀 대기 시간(team wait time)으로 정의되며, 해당 이송선의 도착시각은 업데이트될 필요가 없다. 한 정비팀에 2 개 이상의 터빈에 대한 정비작업이 배정되는 경우는 경로 순서상 선행작업 종료 이전에 다음 대상 터빈에 이송선이 도착하는 경우는 탐색 대상에서 제외한다.

상기 순서에 따라 정비 경로상의 전체 이벤트에 대한 시작/종료 시각이 결정될 수 있으며 앞서 소개한 Fig 6과 같은 도식으로 표현될 수 있다. 각 정비팀의 정비대상 터빈 도착시각, 작업시간 및 대기시간의 파악이 가능하므로 탐색 대상이 되는 모든 이송선 정비 경로에 대한 각각의 이동거리와 소요시간을 합산하면 비용 관점에서는 이동거리, 정비일정 관점에서는 소요시간을 기준으로 단일 이송선에 대한 최적 이동경로를 결정할 수 있다.

3.2 다수 이송선별 정비작업 배정 시뮬레이션 (Fleets routing)

3.1은 개별 이송선에 정비팀(작업)이 배정되는 경우의 이동 경로 탐색 모델인데, 대규모 해상풍력단지에서는 2 척 이상의 이송선을 투입하여 동시다발적으로 정비작업이 수행되는 경우가 빈번하게 발생할 것으로 예상된다. 수리적으로 보면 n 개 정비작업을 m 척 이송선에 빠짐없이 할당하는 상황인데, 이는 n 개 원소를 갖는 집합이 m 개의 공집합이 아닌 부분집합으로

분할되는 경우들의 집합으로 그려질 수 있다. 이런 경우의 수는 일반적으로 제2종 스티어링 수(Stirling numbers of the second kind)로 알려져 있으며 아래와 같이 표현된다 [14].

$$x^n = \sum_{m=0}^n S_2(n, m)x(x-1)\cdots(x-m+1) \quad (n \geq 0) \quad (2)$$

여기서 x 는 탐색하여야 하는 이송선 할당 경우의 수이며, 상기 식은 x 를 결정하기 위한 점화식을 반영한 재귀적 표현이다. Python 라이브러리로 제공되는 itertools 모듈[16]은 이런 경우의 수를 호출하는 기능을 제공하며, Fig 6과 같이 모든 이송선 할당 시나리오에 대한 탐색이 가능하다.

전체 n 개의 작업목록(Job list)는 이송선 대수에 해당하는 m 개의 그룹으로 묶어져 이송선별 작업목록(Job list grouped by vessel)이 생성되며 해당 작업목록들을 이송선 1 번부터 m 번까지 순환적으로 매칭하여 이송선-작업 세트(Vessel-Job match set)를 생성한다. 각 이송선별로 매칭된 정비작업마다 3.1의 단일 이송선 최적 정비 경로를 탐색하면 m 개 이송선을 투입하는 시나리오에 대한 정비 경로의 탐색으로 확장되는 것이다. 이를 통해 가용한 이송선이 모두 투입된 상황에서 정비대상 터빈들을 경유하는 이동거리(또는 연료소모) 및 정비 소요시간을 기준으로 풍력단지 전체에 대한 최적의 정비 스케줄링을 도출할 수 있다.

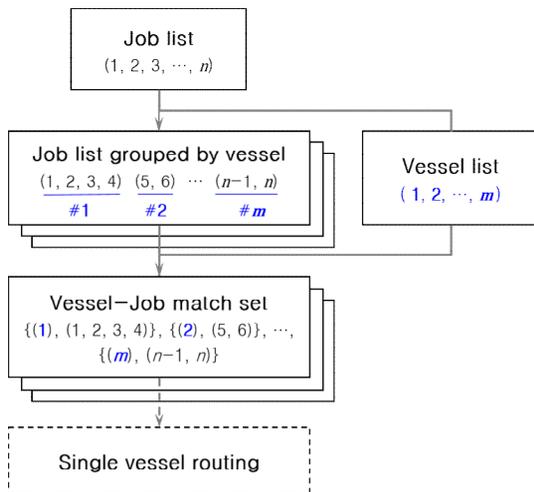


Fig 8. Vessel and Job allocation algorithm

이송선별 정비작업을 배정하는 시뮬레이션은 최종 정비계획 결정을 위해 Fig 9와 같이 각 경우 방법들의 이동거리와 소요시간을 함께 제시한다. 이는 현장관리자가 수익성과 정비 여건을 감안하여 정비계획 의사결정을 하도록 지원하는 도구로서 일반적으로 이동거리와 소요시간이 가장 최적인 경우를 선택하겠지만 정비현황이 긴박하거나 갑작스런 기상 악화가 예상되는 경우 소요시간이 의사결정의 우선순위에 있을 수 있음을 고려한 것이다.

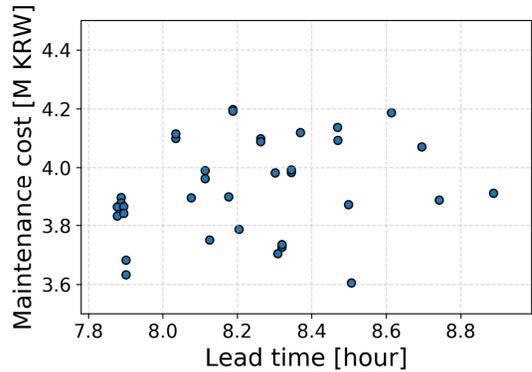


Fig 9. Economic trade-off chart for maintenance scheduling

4. 결론

본 기고에서는 부유식 풍력발전단지의 특성을 고려하여 운영 및 유지정비 활동을 체계적으로 수행하기 위한 예지적 O&M 통합관리시스템의 구축을 전제로 정비계획 시뮬레이터를 중심으로 한 전산모델 개발 현황을 소개하였다. 정비계획 시뮬레이터는 장기(연간), 단기(2주) 및 일일 정비계획 단위로 구분하여 각 목적에 맞는 정비계획의 개념을 제시하였다. 풍력단지 운영 실무에서 활용도가 높은 일일 정비 스케줄링은 이송선과 더불어 정비작업, 정비팀을 동시에 고려해야 하는 특수성을 반영하여 단일/다수 이송선이 투입되는 정비 경로 탐색 전산모델을 통해 최적 정비계획을 도출하고 있음을 확인하였다.

본 기고에서 서술한 정비 스케줄링 방법론은 다수의 정비작업을 이송선에 할당하며 해상정비의 다양한 변수를 고려하고 있지만, 정비 경로의 탐색 제약 또한 극복해야 하므로 정비팀별 정비계획의 최종 결정은 수동으로 선택하고 있다. 정비작업을 이송선에 배정하는

탐색 알고리즘 관점에서는 대상 작업과 이송선 수가 증가함에 따라 탐색 건수가 기하급수적으로 증가하여 일정 건수 이상에 대해서는 계산 효율이 급격히 감소하는 한계도 존재한다. 해상풍력단지의 운영 관점에서는 시시각각으로 기상 상황 등에 기민하게 대응하기 위해 신속한 정비 스케줄링 검토가 필수적이므로 향후에는 선행연구에서 제시된 수리계획법(Mathematical programming) 등의 최적화 방법론의 도입으로 발전량을 고려한 통합적인 형태의 전산모델 개발도 필요할 것으로 검토되었다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제번호: 20203010020050)를 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017, Renewable Energy 3020 Initiative (in Korean).
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019 Third Energy Master Plan (in Korean).
- [3] Korea Wind Energy Industry Association (KWELA), 2021, 2020 Annual Report on Wind Energy Industry in Korea (in Korean).
- [4] Snyder, B., Kaiser, M. J., 2009, "Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy," *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 6, pp. 1567~1578.
- [5] Li, X., Ouelhadj, D., Song, X., Jones, D., Wall, G., Howell, K. E., Igwe, P., Martin, S., Song, D., and Pertin., E., 2016, "A decision support system for strategic maintenance planning in offshore wind farms," *Renewable Energy*, Vol. 99, pp. 784~799.
- [6] Stehly, T. and Beiter, P., 2020, 2018 Cost of Wind Energy Review, NREL/TP-5000-74598, National Renewable Energy Laboratory.
- [7] Stehly, T., Beiter, P., and Duffy, P., 2020, 2019 Cost of Wind Energy Review, NREL/TP-5000-78471, National Renewable Energy Laboratory.
- [8] Dalgic, Y., Lazakis, I., Dinwoodie, I., McMillan, D., and Revie, M., 2015, "Advanced logistics planning for offshore wind farm operation and maintenance activities," *Ocean Engineering*, Vol. 101, pp. 211~226.
- [9] Lazakis, I. and Khan, S., 2021, "An optimization framework for daily route planning and scheduling of maintenance vessel activities in offshore wind farms," *Ocean Engineering*, Vol. 225, Article 108752.
- [10] Irawan, C. A., Ouelhadj, D., Jones, D., Stålhane, M., and Sperstad, I. B., 2017, "Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms," *European Journal of Operational Research*, Vol. 256, pp. 76~89.
- [11] Gutierrez-Alcoba, A., Hendrix, E. M. T., Ortega, G., Halvorsen-Weare, E. E., and Haugland, D., 2019, "On offshore wind farm maintenance scheduling for decision support on vessel fleet composition," *European Journal of Operational Research*, Vol. 279, pp. 124~131.
- [12] GE Renewable Energy, Digital Wind Farm Services & Solutions, Available online: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/onshore-wind/digital-wind-farm.html>, accessed on February 1, 2022.
- [13] Shoreline AS, Available online: <https://www.shoreline.no>, access on February 1, 2022.
- [14] Kim, T., 2017, "A note on degenerate Stirling polynomials of the second kind," *Proceedings of the Jangjeon Mathematical Society*, Vol. 20, No. 3, 319 - 3.