

## An Optimization Model for O&M Planning of Floating Offshore Wind Farm using Mixed Integer Linear Programming

Min-Gyu Sang\*, Nam-Kyoung Lee\*\*, Yong-Hyuk Shin\*\*\*, Chulung Lee\*, Young-Jin Oh\*\*

\*Integrated MS/PhD Candidate, School of Industrial Management and Engineering, Korea University, Seoul, Korea

\*\*Senior Manager, Smart Convergence Dept., KEPCO Engineering & Construction Co., Inc., Gimcheon, Korea

\*\*\*Student, Dept. of Industrial Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

\*Professor, School of Industrial Management and Engineering, Korea University, Seoul, Korea

\*\*General Manager, Smart Convergence Dept., KEPCO Engineering & Construction Co., Inc., Gimcheon, Korea

### [Abstract]

In this paper, we propose operations and maintenance (O&M) planning approach for floating offshore wind farm using the mathematical optimization. To be specific, we present a MILP (Mixed Integer Linear Programming) that suggests the composition of vessels, technicians, and maintenance works on a weekly basis. We reflect accessibility to wind turbines based on weather data and loss of power generation using the Jensen wake model to identify downtime cost that vary from time to time. This paper also includes a description of two-stage approach for maintenance planning & detailed scheduling and numeric analysis of the number of vessels and technicians on the O&M cost. Finally, the MILP model could be utilized in order to establish the suitable and effective maintenance planning reflecting domestic situation.

▶ **Key words:** Offshore Wind Farm, Operations & Maintenance, Integer Programming, Linear Programming, Optimization

### [요 약]

본 연구에서는 부유식 해상풍력발전의 운영 및 유지보수에 필요한 체계적인 정비계획 수립을 위해 최적화기법을 활용한 수리 모형을 제안하고자 한다. 주간 단위로 선박과 기술자를 운용하는 계획정비와 고장정비 작업의 배정에 혼합정수계획법(Mixed Integer Linear Programming, MILP)을 도입하였다. 본 연구의 최적화 모델을 활용한 사례연구에서는 선박과 기술자의 투입 규모가 유지 정비 비용에 미치는 영향을 확인하였으며 1년간 정비계획 수립에서 더 나아가 정비작업별 상세 스케줄링까지 연계되는 단계적 최적화 방법론을 함께 제시하였다. 세부적으로는 기상 데이터와 정비 데이터를 활용한 발전량 손실을 비가동 비용으로 반영하여 정비 우선순위를 선정하였으며, 이를 통해 국내 실정에 맞는 해상풍력단지의 유지보수 전략을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

▶ **주제어:** 해상풍력발전, 유지보수, 정수계획법, 선형계획법, 최적화

- 
- First Authors: Min-Gyu Sang and Nam-Kyoung Lee. These authors contributed equally to this work. Corresponding Author: Young-Jin Oh
  - \*Min-Gyu Sang (tkdalsrb@korea.ac.kr), School of Industrial Management and Engineering, Korea University
  - \*\*Nam-Kyoung Lee (dennis@kepco-enc.com), Smart Convergence Dept., KEPCO Engineering & Construction Co. Inc.
  - \*\*\*Yong-Hyuk Shin (shin\_yz@naver.com), Dept. of Industrial Engineering, Konkuk University
  - \*Chulung Lee (leecu@korea.ac.kr), School of Industrial Management and Engineering, Korea University
  - \*\*Young-Jin Oh (yjoh2@kepco-enc.com), Smart Convergence Dept., KEPCO Engineering & Construction Co. Inc.
  - Received: 2021. 11. 04, Revised: 2021. 12. 06, Accepted: 2021. 12. 06.

## I. Introduction

### 1. O&M of Offshore Wind Farm

해상풍력은 육상풍력보다 풍향 자원이 우수하여 장시간 고효율의 가동이 가능하다. 부유식 해상풍력의 경우 연안이 아닌 먼바다에서 더욱 풍부한 바람 자원을 활용할 수 있고 입지 제약에서 상대적으로 자유로우며 대규모 단지 조성을 통한 에너지 평균화 비용(Levelised Cost of Energy, LCOE) 절감 등에 유리하다.

다만 해상풍력은 파고, 풍속 등 기상 상태에 따라 터빈에 접근 가능한 날의 예측이 쉽지 않고, 해상 환경으로 인한 터빈의 고장률도 육상에 비해 높아 육상풍력에 비해 유지보수 비용이 훨씬 증가하여 발전사업에서 생애주기 비용의 20-30%를 차지한다 [1]. 이러한 조건 때문에 대규모 해상풍력단지의 운영 및 유지보수에 있어서는 확률적인(Stochastic) 외부 요인과 선박, 기술자 등 유지보수 재원을 동시에 고려한 체계적인 계획 수립이 필수적이다 [2].

해상풍력은 영국, 독일, 덴마크 등 북해를 접한 국가들의 주도로 다양한 연구와 사업이 진행되었으며 최근 정부도 신재생에너지 기술개발 및 보급의 일환에서 해상풍력 발전 설비 설치, 개발, 부품 국산화 등에 힘쓰며 2030년까지 13GW 신규 설치를 목표로 하고 있다. 하지만 국내 풍력사업체들은 해상풍력 운영 경험이 부족하기 때문에 향후 대규모 해상풍력단지의 본격적인 운영을 위해서는 효율적인 정비계획 수립 등의 제반 기술을 확보해야 한다.

유지보수 업무는 Fig 1과 같이 크게 계획(예방)정비(Preventive Maintenance)와 고장정비(Corrective Maintenance)로 나뉜다 [9][10]. 계획정비는 예방정비의 개념으로 수행되는 정비로서 고장이나 성능 저하를 방지하기 위해 미리 정해진 주기 또는 규정된 기준에 따라 수행되는 유지보수 활동이다 [11]. 이는 세부적으로 정해진 시간 간격으로 수행되는 주기적 유지보수(Predetermined Maintenance)와 부품의 현재 상태 기반 유지보수(Condition-based Maintenance)로 분류할 수 있다.

고장정비는 터빈 또는 부유체 등에 결함이 발생하여 터빈의 가동이 중지되었을 때 수행하는 것으로서 정비 시간 동안에만 비가동이 발생하는 계획정비와 다르게 고장 발생시점부터 정비를 완료하는 시간까지 비가동이 발생한다. 고장 상황은 비가동에 따른 발전량 손실이 커지는 주된 요인이기 때문에 고장정비는 가능한 우선 수행하여야 한다 [12]. 최근에는 IoT 센서와 기계학습의 발달로 예지 정비(Predictive Maintenance)가 도입되고 있다 [13]. 예지정비는 감시 제어 및 데이터 수집 시스템(Supervisory

Control And Data Acquisition, SCADA)과 상태 모니터링 시스템(Condition Monitoring System, CMS) 등으로 획득한 데이터를 고장 등 이력 빅데이터와 연계하여 잔존 수명과 부품 교체 필요 시기를 예측하는 알고리즘을 적용함으로써 적정 시점에 정비를 수행하는 것이다.

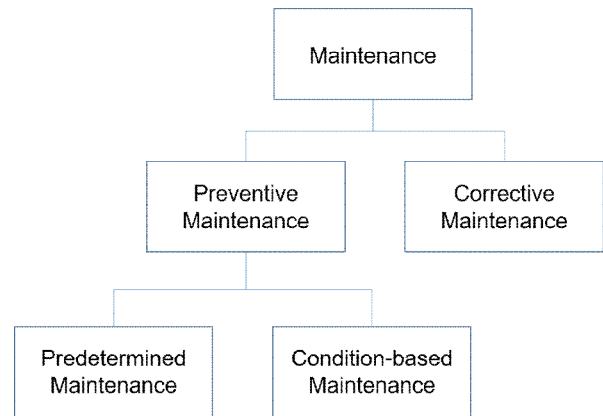


Fig. 1. Maintenance types for wind farm

해상풍력 유지보수 비용은 정비활동에 투입되는 직접적인 비용만이 아니라 터빈 정비 또는 고장으로 인해 발생하는 비가동에 수반되는 발전량 손실을 포함한다 [3]. 직접비에는 유지보수에 투입되는 선박, 기술자, 부품 등의 고정비용과 이들을 운용하는데 발생하는 변동비용이 포함된다. 직접비에서는 기술자와 부품 이송 등 정비 활동에 직접 투입되는 선박 운항비용이 가장 큰 비중을 차지하므로 도입과 운항에 다양한 시뮬레이션 기법들이 시도되고 있다 [4][5]. 선박 운영 비용은 사업자 입장의 경제적인 문제로 한정할 수도 있지만, 탄소중립 패러다임 관점에서 볼 때 해상풍력단지의 정비 운항이 비효율적으로 운영된다면 온실가스 저감을 위한 재생에너지 확대에 역행하는 아이러니를 초래할 수 있다 [6]. 터빈이 정상가동 시 풍향, 풍속, 후류 효과 등에 영향을 받기 때문에 발전 손실에 따른 비가동비용 역시 각 터빈별로 시시각각 변한다. 또한 풍력터빈 배치에 따라 출력에 영향을 미치는 후류 효과의 영향도 고려될 수 있는데, 전단 풍력터빈이 비가동일 때는 후단 풍력터빈에 후류 효과가 제거되기 때문에 후단 풍력터빈의 출력은 오히려 만회될 수 있다 [14]. 비가동 비용을 포함한 유지보수 비용을 절감할 수 있는 현실적인 최적화 계획을 세우기 위해서는 이러한 다양한 기상 여건과 터빈의 가변성을 모두 고려하여야 한다.

한편 해상풍력단지로의 접근은 기상 영향이 크기 때문에 일반적으로 기술자와 부품 운송에 쓰이는 이송선(Crew Transfer Vessel, CTV) 이외에도 다양한 운송수단이 검

토되고 있다 [7]. 유의파고가 약 1.5m 이상만 되어도 터빈 접근이 불가능한 CTV와 달리 대형 작업선(Service Operation Vessel, SOV)은 운항 비용은 비싸지만 유의파고가 2.5~3미터가 넘는 거친 기상 여건에도 기술자들이 터빈에 접근할 수 있고 풍력단지에서 오랫동안 머물면서 정비작업을 지원할 수 있다. 이외에도 헬리콥터, Jack-up 선박 등의 특수 수단들이 동원되기도 한다. 이러한 운송수단들을 통한 지속적인 유지보수 비용 절감을 위해서는 적정 대수와 조합의 선박이 투입되어야 한다 [8].

## 2. Scope of Research

해상풍력 유지보수 최적화 문제는 위의 다양한 고려사항들을 고려하면서 어떤 운송수단을 얼마나 운용하고 기술자를 어떻게 투입할 것인지 등을 결정하는 전략적인 (Tactical) 영역과 실행단계 관점에서 하루 단위로 어느 경로로 선박을 운용해 정비 비용을 최소화할지를 탐색하는 스케줄링 영역을 모두 포함하고 있다. 본 연구에서는 실시간으로 변화하는 비가동 비용을 고려한 최적의 정비계획 수립을 위하여 2-Stage 기반의 접근법을 제시한다. Stage 1은 각 주별로 투입할 선박, 기술자의 적정 투입량 그리고 수행할 정비 작업의 수를 파악하는 정비계획을 수립하는 것이다. Stage 2는 Stage 1의 정비계획을 바탕으로 언제 어느 터빈을 정비하고 베이스로 복귀해야 비용 또는 이동거리를 최소화할 수 있을지 하루 단위의 스케줄링 문제이다. 이에 본 논문에서는 우선적으로 Stage 1에서 유지보수 비용 최적화 관점에서 정비계획 수립을 위한 수리 모델을 중점적으로 다루며 발전량 손실을 고려한 혼합정수계획법(Mixed Integer Linear Programming, MILP) 모델을 소개하고자 한다.

본 연구는 동해 상에 부유식 해상풍력발전 단지를 운영하는 가상의 시나리오를 바탕으로 수행되었고, 국내외 풍력 O&M 전문가 인터뷰를 바탕으로 한 비즈니스 사례를 반영해 국내 실정에 적합한 정비 방안들을 세부적인 요건들로 삼았다. 본 연구의 시나리오가 대상으로 하는 동해 지역은 일본과 경계수역으로서 헬리콥터 운항이 제한되기 때문에 운송수단은 일반적으로 사용되는 운송선인 CTV만 고려하였으며, 주기적 예방정비와 고장정비를 위주로 정비를 수행하며 예지정비는 제외하였다. 또한 대상 해상풍력단지 위치에 대한 바람/파랑 후측 데이터를 생성하여 비가동 비용과 터빈 접근 가능일을 계산하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 2장에서는 해상풍력 유지보수와 관련된 선행연구를 살펴보고 각각의 성과와 한계점을 정리한다. 3장에서는 모델 개발의 배경이 된

시나리오와 기상 데이터 적용 과정을 설명한다. 4장에서는 해상풍력단지 유지보수를 위한 인력/선박/정비계획 할당 문제에 대한 제약식들을 포함한 MILP 모델을 제안한다. 5장에서는 이러한 모델을 적용하여 컴퓨터로 Case Study 문제를 풀어보고 그 내용과 결과에 대해 서술하며, 마지막으로 6장에서는 본 연구의 시사점과 추후 연구 발전방향을 제시한다.

## II. Literature Review

해상풍력발전 유지보수 최적화 문제는 실시간으로 변하는 기상조건과 후류 효과를 고려한 발전량 계산, 선박과 기술자의 가용성, 정비작업의 요건 등을 모두 고려하여야 하는 복잡한 문제이다. 해상풍력 유지보수를 위한 정비계획 문제는 터빈(노드)의 수가 20기 이상만 되어도 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)과 같은 휴리스틱으로 접근해야 하는 NP-hard 문제로 알려져 있다 [16][17]. Irawan et al.(2021)는 Large Neighbourhood Search 휴리스틱을 활용하여 최소한의 비용으로 정비를 완료하는 확률론적 스케줄링 모델을 제시하고, 그 효과를 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 입증하였다 [18]. Stock-Williams & Swamy (2019)는 정비작업별 소요인력을 외판원문제 (Traveling Salesman Problem, TSP)의 이동시간처럼 배정하고 정비작업별 이송계획(Transfer plan) 편성을 위해 단위작업(Service order)에 대한 우선순위를 유전자 알고리즘으로 평가하는 모델을 제시하였다 [19].

해상풍력의 운영비용 중 가장 큰 비용을 차지하는 선박 운영에 대해 어떤 선박을 몇 대 도입하여야 하는지(Fleet size and mix problem) 등을 결정하는 문제에 관한 연구도 꾸준히 진행되어 왔다. Halvorsen-Weare et al. (2017)는 날씨의 불확실성을 고려하여 최적의 선박을 편성하는 메타 휴리스틱을 제시하였다 [20]. Stålhane et al. (2021)은 전력 단가의 변화, 선박 기술의 발전 등의 장기적 불확실성과 날씨와 터빈 상태 변화에 따른 단기적 불확실성을 모두 고려하여 최적의 선박 종류와 수를 결정하는 이중 확률적 모델(Dual-stochastic model)을 제시하였다 [21]. 기상 상태와 터빈 고장이 발생하는 상황을 연구에 모두 반영할 시 모델의 난이도가 크게 높아지기 때문에 이러한 정보를 사전에 알고 있다고 가정하는 결정론적 (Deterministic) 접근도 다수 진행되었다. 이러한 접근법은 불확실성을 단순화시켜주기 때문에 휴리스틱을 사용하지 않고도 계획 수립이 가능해진다. Halvorsen-Weare et

al. (2013), Stålhane et al. (2016)은 최적의 선단 배치 계획을 위해 시나리오 기반 MILP 모델을 제시하였는데 선박과 유지보수 베이스 구성을 평가하기 위한 사전 정보, 즉 1년의 시나리오 동안 발생하는 기상 조건(풍속 및 파고) 및 고장을 사전에 알고 있다는 가정 하에 CTV, SOV, Jack-up 및 헬리콥터 등의 운송 대안을 비교하였다 [22][23]. Gutierrez-Alcoba et al. (2019)는 터빈을 각각 지정할 필요 없이 각 교대 근무 간격(time shift)에 진행하는 최적의 작업 개수를 구할 수 있는 MILP 모델을 제시하였다 [8]. 이는 다양한 유지보수 리소스를 체계적으로 제시함과 동시에 비교적 정비 업무를 잘 반영한 제약식을 제시한 효용성은 있지만, 정비작업의 선입선출(First in first out, FIFO) 이외에 정비 우선순위 등을 고려하는데는 다소 한계가 있어 추후 보완할 점이 있다. Elkinton et al.(2006)은 후류 효과를 고려하여 해상풍력발전 단지의 최적 레이아웃을 결정하였지만 후류 영향과 연동되는 유지보수 방안의 제시는 이뤄지지 않았다 [24].

이처럼 해상풍력단지 정비계획 최적화 연구들은 정비 비용, 방법, 운송수단 등을 중심으로 활발하게 진행되었으나 발전량 손실을 후류 효과와 연계한 연구는 크게 주목을 끌지 못했다. 대부분의 선행 연구는 터빈 비가동 비용이 모든 시간대에 동일하다고 가정하고 있다. 하지만 실제 발전사업자 입장에서는 정비 수행에 따른 직접적인 비용 투입보다 안정적인 발전량 확보를 위해 고려해야 할 정비 비가동이 오히려 중요한 이슈이기 때문에 이러한 상황을 주요 변수로 설정한 정비계획 모델링은 필수적이다. 이에 본 연구는 해상풍력단지 정비계획 모형에 후류 영향을 고려한 발전량 손실을 비가동 비용으로 반영하였다. 비가동 비용 계산에는 후류 영향을 고려한 Jensen모델[15] 기반의 발전량과 최신 신재생에너지 공급 인증서(Renewable Energy Certificate, REC) 가중치를 반영하였다.

### III. Scenario and Data Description

본 연구에서는 유지보수 모델링을 위해 배후항만에서 선박으로 약 1시간 거리에 위치한 가상의 부유식 해상풍력 단지를 다루기로 한다. 해당 풍력단지는 연구 분야에서 널리 활용되는 DTU 10MW 터빈 모델[25]이 도입된 것으로 가정하였고 Fig 2와 같이 100대의 풍력 터빈을 정사각형 격자 형태로 배치하였다. DTU 10MW 터빈 모델의 풍속에 따른 발전량 곡선은 Fig 3과 같으며 4m/s 풍속에서 기동을 시작하고 풍속 11.5m/s에서 정격 출력에 도달한다. 배

후항만은 유지보수 베이스를 겸하고 있으며 정비팀은 기술자 4명으로 구성된다. 해상에서 터빈 접근을 지원하는 이송선(CTV)은 최대 4팀까지 탑승이 가능한 사양이다.

정비계획에 고려되는 주요 기상 정보는 풍속, 풍향, 그리고 유의파고이다. 이송선(CTV)은 일반적으로 풍속이 10m/s(북해 15m/s) 이상, 유의파고가 1.5 m 이상일 경우 풍력단지 접근이 제한된다고 알려져 있으며 풍속과 유의파고 데이터를 통해 풍력터빈에 접근이 가능한 일정을 파악할 수 있다. 또한, 정비작업이 수행되는 일정별로 발생하는 발전량 손실은 비가동 비용으로 환산되는데 이 과정에서 풍속과 풍향 데이터가 활용된다. 단위시간(time shift, 주 단위)에 발생하는 고장정비의 수와 기상 상태는 과거 이력 데이터의 경향과 동일하다는 가정을 하였으며 국내 실정에 맞는 계획정비 관례, 근무시간 등을 반영하면서 최적의 인력/자원/작업 배치를 통하여 최소한의 비용으로 모든 정비를 완료하도록 하였다.

비가동에 따른 발전손실량 계산 등에는 단지 해역의 바람/파랑장 데이터가 필요하며, 본 연구에서는 관련 기술개발에서 확보한 특정 해역의 40년 동안의 바람/파랑 후측 데이터를 활용하였다.

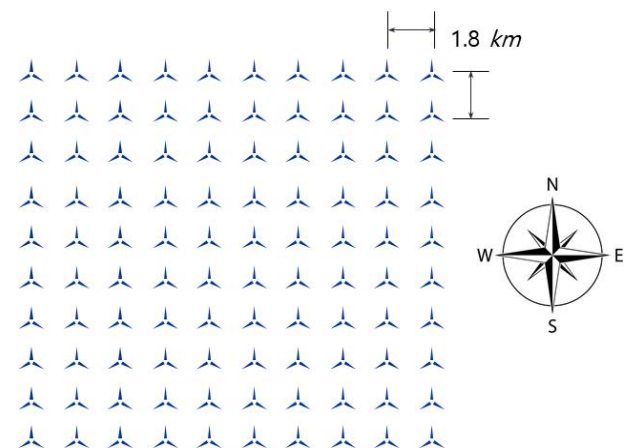


Fig. 2. Layout of hypothetical offshore wind farm

확보된 과거 해역 데이터를 바탕으로 각 주의 평균적인 풍속과 풍향을 계산하고 위에서 제시한 풍력터빈 배치와 Jensen 모델에 따른 후류 영향을 고려한 발전량 계산 결과를 비가동 비용으로 환산하였다. Stage 2에서는 개별 터빈의 정비 비가동을 고려한 발전량 손실을 반영해 비가동 비용을 산출할 것이다.

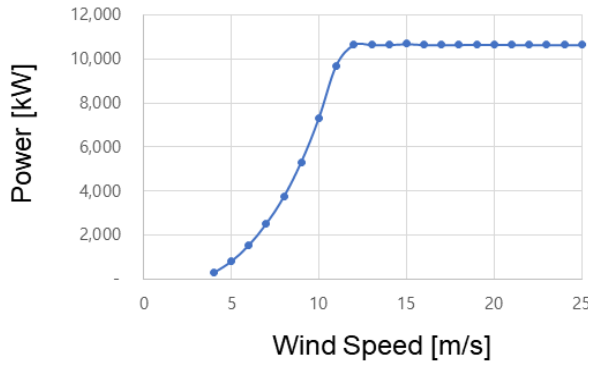


Fig. 3. Power Curve of DTU 10MW Wind turbine

### IV. Model Formulation

본 MILP 모형을 이용하여 1년 동안의 고장정비와 예방 정비에 대한 선박과 팀을 할당하는 정비계획을 도출하는 것이다. 다음은 모형에 사용되는 변수와 파라미터이다.

Sets

$PT$	계획정비 타입 세트
$CT$	고장정비 타입 세트
$T$	주차(time shift) 세트 $T \in (1, \dots, 52)$

Parameters

$V_t$	시점 $t$ 에서 터빈 접근 가능시 선박 운영비용
$C^{team}$	주당 팀별 인건비
$EH_t$	시점 $t$ 에서 시간당 터빈별 비가동 비용
$ED_t$	시점 $t$ 에서 터빈별 비가동 비용
$N_i$	$i$ 타입 정비를 마치는데 걸리는 시간
$A_t$	시점 $t$ 에 터빈 접근 가능일수
$W^{max}$	각 운항에서 가능한 최대 근무 시간
$G_{it}$	시점 $t$ 에 발생하는 타입별 고장 건수
$Q^{max}$	최대 가용 가능한 선박 수
$V^{max}$	선박당 최대 탑승가능 팀 수
$PP_i$	계획된 예방정비 수
$\bar{U}_t$	시점 $t$ 에서 최대 가용가능 팀 수
$T^R$	베이스와 풍력단지 간 왕복 시간
$W_t$	시점 $t$ 에 정비팀의 근무 가능일수

Decision Variables

$x_{it}$	시점 $t$ 에서 수행하는 예방정비 수
$y_{it}$	시점 $t$ 에서 수행하는 고장정비 수
$w_{it}$	시점 $t$ 에서 고장 미초치 건수
$z_t$	시점 $t$ 에서 필요한 선박 수
$u_t$	시점 $t$ 에서 필요한 팀 수

본 모델의 목적함수는 선박의 운영비용, 고용하는 팀의 인건비, 계획정비로 인한 비가동 비용, 고장정비로 인한 비가동비용으로 이루어져 있으며 고정비를 제외한 O&M 비용을 최소화하도록 하였다. Stage 1은 선박, 기술자, 정비작업을 얼마만큼의 물량으로 운용할지를 다루는데 중점을 두기 때문에 사실상 고정비용 보다는 변동비용 중심의 모델링이라고 할 수 있다.

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

s.t.

$$x_{it} \geq 0 \quad \forall i \in PT, t \in (1, 2, \dots, T) \tag{1}$$

$$y_{it} \geq 0 \quad \forall i \in CT, t \in (1, 2, \dots, T) \tag{2}$$

$$0 \leq w_{it} \leq \sum_{\tau=1}^t G_{i\tau} \quad \forall i \in CT, t \in (1, 2, \dots, T) \tag{3}$$

$$0 \leq z_t \leq Q^{max} \quad \forall t \in (1, 2, \dots, T) \tag{4}$$

$$0 \leq u_t \leq \bar{U}_t \quad \forall t \in (1, 2, \dots, T) \tag{5}$$

제약식 (1), (2)는 한 주에 수행되는 계획정비와 고장정비 건수의 비음 제약조건이다. 제약식 (3)은 특정 시점  $t$ 에 고장난 터빈의 대수는 그때까지 누적된 고장 터빈의 수보다 적다는 것을 나타낸다. 본 모형에서는 대략적으로 각 시점  $t$ 에 고장이 몇 번 정도 발생하는지는 과거 이력을 바탕으로 사전에 주어진 것으로 가정한 것이다. 제약식 (4)는 한 주에 가동되는 선박의 대수는 최대 가용 선박보다 적음을 의미한다. 이번 연구에서는 선박 종류는 고려하지 않고 CTV만 도입한 것으로 가정한다. 제약식 (5)는 한 주에 가용 기술자 팀의 수가 그 주에 최대 가용 팀 수보다 적다는 것을 의미한다.

$$\sum_{i \in PT} x_{it} N_i + \sum_{i \in CT} y_{it} N_i \leq W_t W^{max} u_t \quad \forall t \in (1, 2, \dots, 52) \tag{6}$$

$$\sum_{i \in PT} x_{it} N + \sum_{i \in TC} y_{it} N_i + u_t W_t T^R \leq u_t \times W^L \quad \forall t \in (1, 2, \dots, 52) \tag{7}$$

$$\frac{u_t}{V^{\max}} \leq z_t \tag{8}$$

$$w_{it} = w_{i(t-1)} - y_{i(t-1)} + G_{it} \tag{9}$$

$$\forall i \in TC, t \in (2, 3, \dots, 52)$$

$$y_{it} \leq G_{it} + w_{i(t-1)} \quad \forall i \in TC, t \in (1, 2, \dots, 52) \tag{10}$$

$$\sum_{t=1}^{52} x_{it} = PP_i \quad \forall i \in PT \tag{11}$$

$$\sum_{t=10}^{40} x_{it} \geq \alpha PP_i \quad \forall i \in PT, t \in (1, 2, \dots, 30) \tag{12}$$

제약식 (6)은 일주일 동안 수행하는 정비작업의 총 소요 시간은 그 주에 가용된 팀들이 최대로 일할 수 있는 시간 보다 같거나 작음을 의미한다. 제약식 (7)은 국내 기술자들의 근무 여건을 고려하여 주별로 최대 40시간까지 투입할 수 있음을 의미한다. 실 정비작업 수행시간 뿐만 아니라 CTV 이동 시간도 근무시간에 포함되어 있다. 제약식 (8)은 가용 팀수가 가용 선박의 최대 용량을 초과하면 선박을 추가적으로 한 대씩 더 가용하여 작업자들을 효율적으로 운송하기 위하여 추가하였다. 제약식 (9)는 고장이 났으나 고치지 못한 터빈의 수를 세주기 위한 식으로, t 시점에서 고치지 못한 고장정비의 수는 (t-1) 시점에서 고치지 못한 고장정비 수에서 t 시점에 발생하는 고장정비 수를 더한 것에서 t 시점에서 고친 고장정비 수를 빼준 것과 같음을 나타낸다. 제약식 (10)은 각 주 t에 진행되는 고장정비 작업 건수는 그 주에 필요한 고장정비 작업 수보다 같거나 작음을 나타낸다. t 시점에서 아직 고장나지 않은 터빈을 미리 고칠 수는 없기 때문이며 재고관리에서 쓰이는 개념을 도입한 것이다 [26]. 제약식 (11)은 계획된 예방정비를 모두 완료하는 것을 나타낸다. 제약식 (12)를 통하여 계획정비의 경우, 필요시 파고와 풍속이 상대적으로 낮은 3월~10월 사이에 집중적으로 수행하도록 풍력사업자들의 요구사항을 반영하였다.

### V. Computational Illustration

본 MILP 모델을 활용한 사례 연구는 다음의 조건으로 수행하였다. 연간 계획정비는 터빈당 3일 정도의 물량으로 정비팀 투입이 필요한 것으로 간주해 총 300일 분량의 정비작업이 있는 것으로 가정하였고 고장정비는 건당 평균 18시간이 소요되는 것으로 반영하였다. 정비팀은 매일 베이스를 출발하여 정비작업을 수행하고 베이스로 복귀하는

데, 베이스, 풍력단지 위치와 CTV 속도를 고려한 왕복 이동시간은 3시간이 소요되는 것으로 가정하였다.

이번 사례 연구에서는 선박과 기술자 투입의 변화에 따른 유지보수 비용의 변화를 파악하기 위해 2가지 시나리오를 설정하였다. 시나리오 1(S1, Table1)은 정비활동에 가용할 수 있는 CTV를 최대 3척, 정비팀은 최대 10팀으로 설정하였고, 시나리오 2(S2, Table2)는 CTV가 4척, 정비팀은 14팀까지 투입할 수 있는 것으로 하였다. 시나리오 3(S3, Table3)의 경우 CTV와 정비팀은 S1과 같지만 기상 데이터를 변동을 반영하지 않고, 풍속과 풍향을 전체 시간 구간동안 평균값으로 동일한 것으로 가정하였다. 시나리오 별 주요 변수와 계산된 비용을 Table 1로 요약하였다. MILP 정비계획 모형으로 최적 조합을 찾기 위해 GUROBI 패키지를 사용하였다 [27].

Table 1. Scenario Comparison

Scenario	S1	S2	S3
Number of Teams	10	14	10
Number of Vessels	3	4	3
Metocean Data Usage	0	0	x
O&M Cost (won)	1,275M	1,255M	1,482M

시나리오 S1, S2, S3 각각에 대한 정비계획 도출 결과는 Table 2와 같으며 상세한 분석내용은 아래와 같다.

Fig 4와 같이 각 시나리오별 계획정비 수행방안을 살펴보면 S1과 S2는 20~40 주차, 즉 5~10월 사이에 대부분의 계획정비를 수행한 것을 확인할 수 있다. 이는 동절기에 풍속이 강해 정비 비가동에 따른 발전량 손실이 다른 시기 보다 크고, 파고가 높아 터빈에 접근 가능한 일자 또한 작기 때문일 것으로 보인다. 해상풍력단지 운영자 입장에서 결과를 고찰하자면 동절기에는 인력을 최소한으로 사용하여 고장정비 활동은 수행하되 계획정비는 반드시 점검이 필요한 경우 등이 아니면 수행하지 않는 것이 경제성 측면에서 유리하다고 볼 수 있을 것이다.

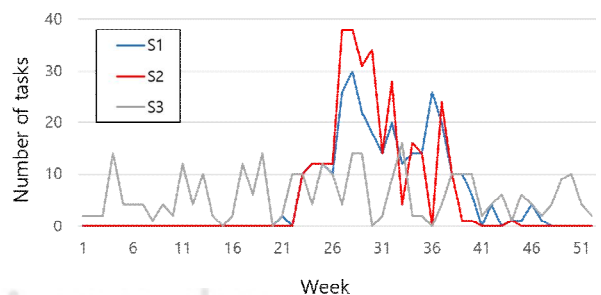


Fig. 4. Performance of Preventive task in one year

S3에서는 기상 데이터를 정비계획에 반영하지 않기 때문에 비가동 비용에 대한 고려가 없이 정비계획을 수립하기 때문에 S1, S2와 다르게 겨울철에도 계획정비를 수행한다. 결과적으로 S3는 S1과 동일한 CTV와 정비팀이 가용했음에도 불구하고 Table 1과 같이 유지보수 비용이 2억 원 이상 더 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 기상 데이터를 정비계획에 반영하지 않음에 따라 유지정비 비용에 비가동 비용이 추가로 반영된 영향으로 파악된다. S1과 S2를 비교해 보면 S2에서 전체 비용이 2천만원 가량 감소한 것을 확인할 수 있는데 이는 가용 가능한 CTV와 정비팀이 늘어남에 따라 비가동 비용이 낮은 시간대에 다수의 정비를 집중적으로 해결할 수 있어 나타난 결과로 보인다. 즉, 선박과 투입 인력에 대한 투자가 고정비 관점에서는 부담이 될 수 있으나 생애주기 전체를 놓고 장기적으로 보았을 때는 유지보수 비용을 절감할 수 있는 기회가 있음을 제시하고 있다.

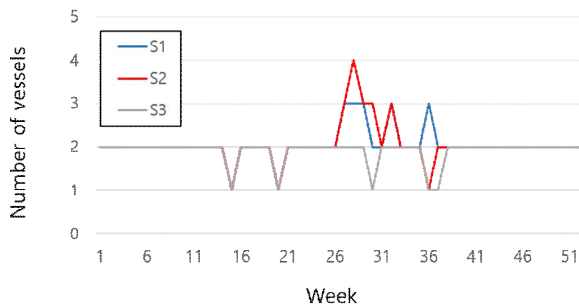


Fig. 5. Vessel operations in one year

또한 Fig 5와 같이 S1에서는 평소에는 CTV가 2대 수준으로 운용되지만 계획정비를 집중적으로 수행하는 하절기에는 최대 투입량인 3대까지 운용이 됨을 알 수 있다. S2의 CTV 투입량을 분석해보면 26-33 주차에는 CTV가 평균 3대 이상 운용되어야 하는 것으로 나타난다. 15, 20주차와 같이 비교적 적은 수의 CTV가 필요한 시기에는 CTV 등 선박을 점검하는 계획을 수립할 수 있을 것이다. 이는 MILP 기반 정비계획을 미리 CTV 조달을 추진할 수 있는 정보원으로 활용할 수 있음을 제시하는 것이다.

## VI. Conclusion

본 논문에서는 해상풍력발전 유지보수 최적화 계획 및 스케줄링 문제를 풀기 위한 2-Stage 접근법으로서 MILP 기반의 선박/인력/작업 할당 모델을 개발하였다. 동해 부유식 해상풍력발전 시나리오를 바탕으로 국내의 정비사업 수행의 관례와 터빈 정비 매뉴얼을 참고하여 현실적인 제약조건들을 반영하였으며, 최적화 계산 모델을 활용한 사례연구로 정비계획이 할당된 결과를 고찰하였다. 본 연구처럼 주간 단위로 작업수와 가용선박 및 인력 수를 우선적으로 지정해 놓으면, 미리 기술자들의 근무 스케줄을 수립할 수 있고, 날씨의 변동 등 부득이한 사정으로 인해 유지보수 계획에 차질이 생기더라도 유연하게 대처할 수 있는 기반을 제공한다. 본 연구는 국내에 대규모 해상풍력단지가 조성된 상황을 가정한 것으로서 발전사업자 관점과 국내 현장의 일반적인 요구사항을 제약 조건으로 반영한 모형이기 때문에 특정 운영 규칙(대형 작업선 도입, 교대근무, 정비 물량 등)을 추가로 반영함으로써 모형을 유연하게 활용할 수 있다. 아직 국내는 해상풍력이 태동기에 있어 배후항만, 대형 크레인 등의 유지정비 인프라가 미흡한 상황이지만 본 연구는 향후 국내 해상풍력단지 유지정비를 위한 선박/인력/작업 배치 계획의 기초적인 가이드라인 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 다소 부족했던 점들을 보완하기 위해 향후 연구 사항 두 가지를 제시하고자 한다. 현재 연구에서는 고정비용은 고려하지 않고 변동비 위주의 목적식을 사용했는데, 향후에는 선박의 고정비용을 추가하여 최대 선박수와 기술자 수를 바꿔가면서 민감도 분석을 진행하여 선박 투자에 대한 경제성 분석을 해 볼 수 있다. 두번째는 이번 모델로 얻어진 정보를 바탕으로 Stage 2 연구를 통해 하루 단위 상세 유지정비 스케줄링 문제를 풀어볼 수 있다. 즉, 몇 번째 주에 몇 명의 기술자 팀이 선박 몇 대를 활용하여 유지보수 작업을 몇 회 진행하여야 한다는 것을 알고 있다는 조건을 바탕으로 매일 정비팀마다 어떤 운송 수단으로 어떤 터빈을 어떠한 경로로 정비할 것인지 구체적인 스케줄을 탐색하는 연구로 발전시킬 수 있을 것이다.

Table 2. Case Study Result for Scenario 1, 2 and 3

S1 / Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Preventive Task	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corrective Task	7	7	7	7	8	8	8	9	8	7	8	8	7
Number of Vessels	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Number of Teams	5	5	5	5	6	6	6	6	6	5	6	6	5
S1 / Week	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Preventive Task	0	0	0	0	0	0	0	2	0	10	12	12	10
Corrective Task	7	6	7	8	9	7	6	7	9	9	8	8	9
Number of Vessels	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
Number of Teams	5	4	5	6	6	5	4	5	6	8	8	8	8
S1 / Week	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Preventive Task	26	30	22	18	14	20	12	14	14	26	20	10	10
Corrective Task	8	7	7	6	7	8	8	7	7	6	5	9	9
Number of Vessels	3	3	3	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2
Number of Teams	10	10	10	8	8	10	8	8	8	10	8	8	8
S1 / Week	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Preventive Task	6	0	4	0	1	1	4	1	0	0	0	0	0
Corrective Task	9	7	8	9	9	9	8	7	8	9	9	8	7
Number of Vessels	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Number of Teams	7	5	6	6	6	6	6	5	6	6	6	6	5

S2 / Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Preventive Task	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corrective Task	7	7	7	7	8	8	8	9	8	7	8	8	7
Number of Vessels	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Number of Teams	5	5	5	5	6	6	6	6	6	5	6	6	5
S2 / Week	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Preventive Task	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	12	12	12
Corrective Task	7	6	7	8	9	7	6	7	9	9	8	8	9
Number of Vessels	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
Number of Teams	5	4	5	6	6	5	4	5	6	8	8	8	8
S2 / Week	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Preventive Task	38	38	31	34	14	28	4	16	14	0	24	10	1
Corrective Task	8	7	7	6	7	8	8	7	7	6	5	9	9
Number of Vessels	3	4	3	3	2	3	2	2	2	1	2	2	2
Number of Teams	12	14	12	12	8	12	6	8	8	4	8	8	6
S2 / Week	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Preventive Task	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Corrective Task	9	7	8	9	9	9	8	7	8	9	9	8	7
Number of Vessels	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Number of Teams	6	5	6	6	6	6	6	5	6	6	6	6	5

S3 / Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Preventive Task	2	2	2	14	4	4	4	1	4	2	12	4	10
Corrective Task	7	7	7	7	8	8	8	9	8	7	8	8	7
Number of Vessels	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Number of Teams	5	5	5	8	6	6	6	6	6	5	8	6	7
S3 / Week	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Preventive Task	2	0	2	12	6	14	0	2	10	10	4	12	10
Corrective Task	7	6	7	8	9	7	6	7	9	9	8	8	9
Number of Vessels	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
Number of Teams	5	4	5	8	7	8	4	5	6	8	6	8	8
S3 / Week	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Preventive Task	4	14	14	0	2	9	16	2	2	0	4	10	10
Corrective Task	8	7	7	6	7	8	8	7	7	6	5	9	9
Number of Vessels	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2
Number of Teams	6	8	8	4	5	7	8	5	5	4	4	8	8
S3 / Week	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Preventive Task	10	2	4	6	1	6	4	2	4	9	10	4	2
Corrective Task	9	7	8	9	9	9	8	7	8	9	9	8	7
Number of Vessels	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Number of Teams	8	5	6	7	6	7	6	5	6	8	8	6	5

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (Grant Number: 20203010020050).

## REFERENCES

- [1] Jae-Kyeong Jang, Mi-Ho Park & Jong-Po Park, Comparison of O&M Performance of Offshore Wind Farms Based on Improved Accessibility and Reliability of Large Parts, *Journal of Wind Energy*, 11(3), 40-51, 2020. DOI: 10.33519/kwea.2020.11.3.005
- [2] *Offshore Wind Farm in Asia*, POSRI Issue Report, 1-18, 2018.
- [3] Walford, C. A., Wind turbine reliability: understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs (No. SAND2006-1100), Sandia National Laboratories, 2006.
- [4] Dinwoodie, I., McMillan, D., Revie, M., Lazakis, I., & Dalgic, Y., Development of a combined operational and strategic decision support model for offshore wind, *Energy Procedia*, 35, 157-166, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.169
- [5] Dalgic, Y., Lazakis, I., Dinwoodie, I., McMillan, D., & Revie, M., Advanced logistics planning for offshore wind farm operation and maintenance activities, *Ocean Engineering*, 101, 211-226, 2015. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.040
- [6] Kaldellis, J. K., & Apostolou, D., Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart, *Renewable Energy*, 108, 72-84, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.02.039
- [7] G.Rinaldi, P.R Thies, R.Walker & L.Johanning, A decision support model to optimise the operation and maintenance strategies of an offshore renewable energy farm, *Ocean Engineering*, 145, 250-262, 2013. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.08.019
- [8] A.Gutierrez-Alcoba, E.M.T.Hendrix, G.Ortega, E.E.Halvorsen-Weare & D.Hauglandc, On offshore wind farm maintenance scheduling for decision support on vessel fleet composition, *European Journal of Operational Research*, 279, 124-131, 2019. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.04.020
- [9] Besnard, F., On optimal maintenance management for wind power systems (Doctoral dissertation, KTH), 2009.
- [10] Rademakers, L. W. M. M., Braam, H., Obdam, T. S., & vd Pieterman, R. P., Operation and maintenance cost estimator (OMCE) to estimate the future O&M costs of offshore wind farms, *European Offshore Wind 2009 Conference* (Vol. 1, pp. 14-16), 2009.
- [11] *The European terminology standard*, SS-EN 13306, p.36, 2001.
- [12] Sankaranarayanan, V., *Maintenance-Wind Energy Production*, 2015.
- [13] Suryadarma, E. H. E., Ai, T. J., Bawono, B., & Siswanto, A. T., Improving Bimetal Bond Quality Between Cast Steel and Aluminum Alloys Using Response Surface Methodology, *International Journal of Metalcasting*, 1-10, 2021. DOI: 10.1007/s40962-021-00687-4
- [14] González-Longatt, F., Wall, P., & Terzija, V., Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior, *Renewable Energy*, 39(1), 329-338, 2012. DOI: 10.1016/j.renene.2011.08.053
- [15] Jensen, N.O., "A Note on Wind Generator Interaction", RISØ-M-2411, Risø National Lab, 1983.
- [16] Zhang, Z., Multi-ACO Application in Routing and Scheduling Optimization of Maintenance Fleet (RSOMF) Based on Conditions for Offshore Wind Farms, *Journal of Power and Energy Engineering*, 6(10), 20, 2018. DOI: 10.4236/jpee.2018.610002
- [17] Parashar, A. and Swankar, K.K., A Genetic Algorithm Approach to Solve Unit Commitment Problem, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 7, 60-64, 2013. DOI: 10.9790/1676-0736064
- [18] Irawan, C. A., Eskandarpour, M., Ouelhadj, D., & Jones, D., Simulation-based optimisation for stochastic maintenance routing in an offshore wind farm, *European Journal of Operational Research*, 289(3), 912-926, 2021. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.08.032
- [19] Stock-Williams, C., & Swamy, S. K., Automated daily maintenance planning for offshore wind farms, *Renewable Energy*, 133, 1393-1403, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.112
- [20] Halvorsen-Weare, E. E., Norstad, I., Stålhane, M., & Nonås, L. M., A metaheuristic solution method for optimizing vessel fleet size and mix for maintenance operations at offshore wind farms under uncertainty, *Energy Procedia*, 137, 531-538, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.382
- [21] Stålhane, M., Bolstad, K. H., Joshi, M., & Hvattum, L. M., A dual-level stochastic fleet size and mix problem for offshore wind farm maintenance operations, *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 59(2), 257-289, 2021. DOI: 10.1080/03155986.2020.1857629
- [22] Halvorsen-Weare, E. E., Gundegjerde, C., Halvorsen, I. B., Hvattum, L. M., & Nonås, L. M., Vessel fleet analysis for maintenance operations at offshore wind farms, *Energy Procedia*, 35, 167-176, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.170
- [23] Stålhane, M., Vefsnmo, H., Halvorsen-Weare, E. E., Hvattum, L. M., & Nonås, L. M., Vessel fleet optimization for maintenance operations at offshore wind farms under uncertainty, *Energy*

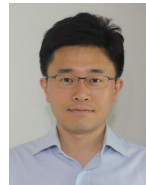
- Procedia, 94, 357-366, 2016. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.195
- [24] Elkinton, C., Manwell, J., & McGowan, J., Offshore wind farm layout optimization (OWFLO) project: Preliminary results, 44th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-998
- [25] The DTU 10MW Reference Wind Turbine Project Site, <https://rwt.windenergy.dtu.dk/dtu10mw/dtu-10mw-rwt>
- [26] Ilkyeong Moon, Byungsoo Kim, Hoontae Kim, Yongwon Seo, & Chulung Lee, *Operations Management*, Life and Power Press, 2016.
- [27] Gurobi Optimizer. Available at: <https://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer>. [Accessed: 1 November 2021].

## Authors



Min-Gyu Sang received the B.S. degree in Business Administration from Ulsan National Institute of Science and Technology. He is currently an Integrated M.S./Ph.D. Candidate in School of Industrial Management and

Engineering at Korea University, South Korea. He is interested in optimization, supply chain management and logistics/transportation engineering.

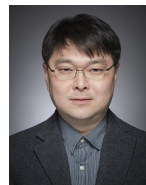


Nam-Kyoung Lee received the B.S. degree in Industrial Systems and Information Engineering from Korea University, South Korea in 2005 and the M.A. degree in Future Strategy from Korea Advanced

Institute of Science and Technology in 2018. He joined KEPCO Engineering & Construction Co., Inc. (KEPCO E&C) in 2010. He is currently the Senior Manager at Smart Convergence Department and interested in system modelling and time series research.



Yong-Hyuk Shin is currently in degree of B.S. in Industrial Engineering and Economics at Konkuk University, South Korea. He is interested in supply chain management and operations research.



Chulung Lee received the B.S. and M.S. degrees in Industrial Engineering from Seoul National University in 1992 and 1994, respectively, and the Ph.D. degree in Industrial Engineering from Pennsylvania

State University in 2000. He is currently a professor in School of Industrial and Engineering at Korea University. He is interested in transportation/logistics engineering, supply chain management, and revenue management.



Young-Jin Oh received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Nuclear Engineering from Seoul National University in 1998, 2000 and 2006, respectively. He joined KEPCO E&C in 2006. He is currently the General Manager

at Smart Convergence Department and interested in power plant engineering using data science, artificial intelligence and multi-physics simulations.