

1. Requirement

Case 1.

부산항에 저장탱크가 있다는 가정

$i \in I$: 벙커링 셔틀의 종류 (총 10종, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, **4500, 5000**)

Case 2.

부산항에 저장탱크가 없고 셔틀이 임시저장탱크의 역할 제공

$i \in I$: 벙커링 셔틀의 종류 (총 10종, **5000 x n (n=1, 2, 3, ..., 10)**)

출발항구, 여수 또는 울산

| 여수-부산 | 울산-부산 |
|-------------------------|-------------------------|
| 86해리 (편도) | 25해리 (편도) |
| $86 \div 15 =$ 약 5.73시간 | $25 \div 15 =$ 약 1.67시간 |

$j \in J$: 벙커링 펌프 유속 (총 9종, 400, 600, 800, 1,000, 1,200, 1,400, 1,600, 1,800, 2,000 m³/hr)

항만 저장탱크에서 셔틀로 벙커링시에는 1500 m³/hr 고정

$t \in T$: 기간, (총 21개년, 2030년부터 2050년까지 1년단위)

x_{ijt} : 기간 t 에 i 종류 셔틀에 j 종류 펌프를 가진 벙커링 셔틀 선박을 새로 도입하는 수

N_{ijt} : 기간 t 에 i 종류 셔틀에 j 종류 펌프를 가진 벙커링 셔틀의 총 보유대수

y_{ijt} : 기간 t 에 i 종류 셔틀에 j 종류 펌프를 가진 벙커링 셔틀의 연간 총 벙커링 사이클 횟수

z_t : 기간 t 에 항만 터미널에 새로 증설하는 **35,000** 톤 크기의 저장 탱크 수

Z_t : 기간 t 에 항만 터미널에 운영하는 **35,000** 톤 크기의 저장 탱크 총 수

D_t : 기간 t 에 연간 벙커링 수요량 (m³)

$V_{ij}^{shuttle}$: j 종류 펌프를 가진 i 종류 셔틀의 1회 벙커링 최대 공급량 (m³)

V^{tank_vol} : 항만 터미널 저장 탱크 1기의 저장 용량 (m^3)

V^{tank_kg} : 항만 터미널 저장 탱크 1기의 저장 중량 (kg), **35,000** ton 가정

ρ_{NH_3} : 병킹시 암모니아 밀도 (0.681 ton/ m^3 at bunkering)

$\rho_{NH_3_s}$: 저장시 암모니아 밀도 (0.680 ton/ m^3 at storage)

H_{max} : 병킹 셔틀 1대의 연간 최대 운용 가능 시간 (연간 8000시간)

T_{ij}^{cycle} : i 종류 셔틀에 j 종류 펌프를 가진 병킹 셔틀의 1회 병킹작업 소요 시간 (시간)

Q_j : j 종류 병킹 펌프의 시간당 유량 (Hourly Flow Rate) (m^3/hr)

MCR_i : i 종류 셔틀일 때 최대연속출력(Maximum Continuous Rating)

$SFOC_{NH_3}$: Specific fuel consumption (g/kWh) (MCR의 75%일 때 수치로 가정) (379 g/kWh)

P^{fuel} : fuel(암모니아)의 가격

P^{elec} : electricity의 가격

F^{peak} : 일일 피크 수요 대응을 위한 하루 최대 병킹 수요 보정 계수 (1.5)

γ : 할인율 (0.07)

β : 항만 터미널 저장 탱크 용량 여유 계수 (2)

2. Design

| | CAPEX | | OPEX | |
|------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Total | Annualized | Fixed OPEX | Variable OPEX |
| Shuttle | $C_i^{shuttle}$ | $C_i^{shuttle_a}$ | $O_i^{shuttle_f}$ | $O_i^{shuttle_v}$ |
| Bunkering System | C_j^{pump} | $C_j^{pump_a}$ | $O_j^{pump_f}$ | $O_j^{pump_v}$ |
| | C_i^{equip} | $C_i^{equip_a}$ | $O_i^{equip_f}$ | $O_i^{equip_v}$ |
| | $C_{ij}^{bunkering}$ | $C_{ij}^{bunkering_a}$ | $O_{ij}^{bunkering_f}$ | $O_{ij}^{bunkering_v}$ |
| Storage Tank | C^{tank} | C^{tank_a} | O^{tank_f} | O^{tank_v} |

| Shuttle (m ³) | MCR (kW) |
|---------------------------|----------|
| 500 | 1,296 |
| 1000 | 1,341 |
| 1500 | 1,385 |
| 2000 | 1,429 |
| 2500 | 1,473 |
| 3000 | 1,517 |
| 3500 | 1,562 |
| 4000 | 1,606 |
| 4500 | ? |
| 5000 | ? |

For D_t (Fuel demand)

1 대의 8000 TEU 선박 녹색해운항로 1 회 왕복시 요구되는 연료량 2,158,995 kg, 또는 3,175 m³

| 8000 TEU 선박 | 1회 왕복 기준 (m ³) | 년간 12회 왕복 기준 (m ³) |
|---------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 대 | 3,175 (= D_{voyage}) | 38,100 |
| 50 대 (2030년) | 158,750 | 1,904,996 |
| 500 대 (2050년) | 1,587,496 | 19,049,957 |

1 대의 9000 TEU 선박 녹색해운항로 1 회 급유량 5,000 m³

(-33.4 °C, 0 barg, 680 kg/m³)

밀도

-33.4 °C, 0 barg: 680 kg/m³

-33.4 °C, 4 barg: 681 kg/m³

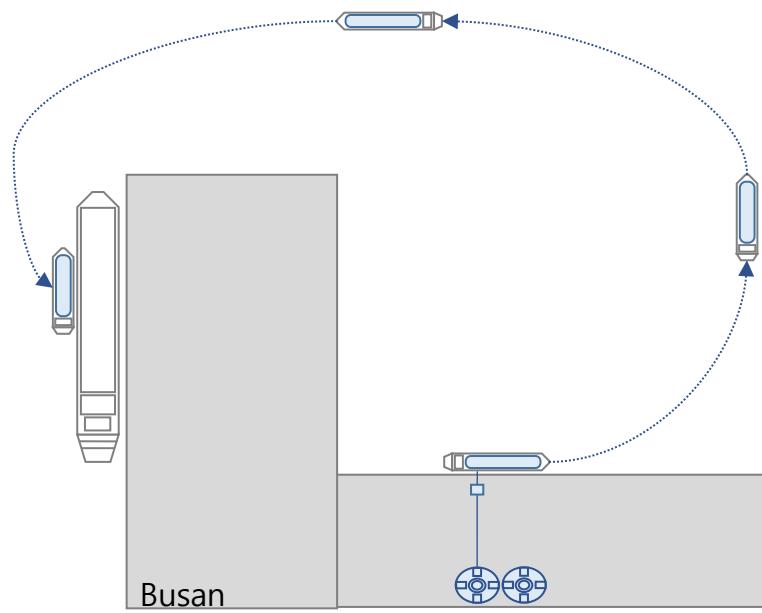
Bunkering shuttle 시간

~~Bunkering 연결 분리 시간: 0.5 시간 (x 2, loading, unloading 모두 고려)~~

~~Shuttle 항만 내 이동시간: 2 시간~~

~~Pumping 시간 (x 2, loading, unloading 모두 고려)~~

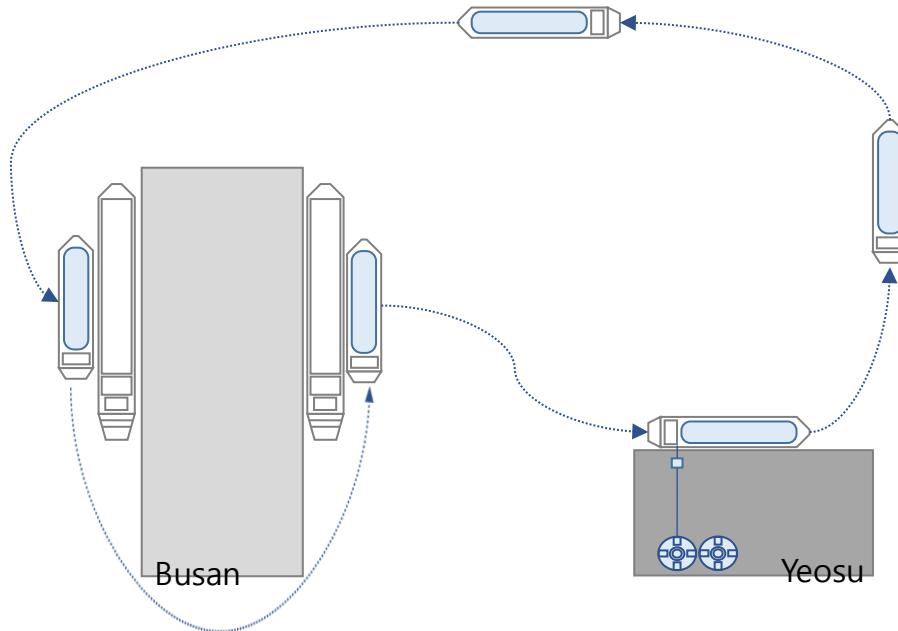
Case 1.



| Parameter | Value |
|---|--|
| 항내 계류&항내 이동 | 1 hr (0.5 + 0.5) |
| 호스 연결 및 안전 체크 | 0.5 hr |
| 퍼지 (연결시&분리시) | 1 hr (0.5 + 0.5) |
| 호스 분리 및 안전 체크 | 0.5 hr |
| Shuttle bunkering pump (m ³ /hr) | 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 |

Pump at port (m³/hr) 1500

Case 2.



| Parameter | Value |
|---|--|
| 항내 계류&항내 이동 | 1 hr (0.5 + 0.5) |
| 호스 연결 및 안전 체크 | 0.5 hr |
| 퍼지 (연결시&분리시) | 1 hr (0.5 + 0.5) |
| 호스 분리 및 안전 체크 | 0.5 hr |
| Shuttle bunkering pump (m ³ /hr) | 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 |
| Pump at port (m ³ /hr) | 1500 |

$$C_i^{shuttle} = C_{ref}^{shuttle} \cdot \left(\frac{V_i^{shuttle}}{V_{ref}^{shuttle}} \right)^\alpha$$

where $\alpha = 0,75$, $C_{ref}^{shuttle} = 61,500,000$ USD, $V_{ref}^{shuttle} = 40,000$ m³ vessel.

$$O_i^{shuttle_f} = C_i^{shuttle} \cdot 0.05$$

$$O_i^{shuttle_v} = \left(\frac{MCR_i \cdot SFOC_{NH3} \cdot T^{travel}}{1,000,000} \right) \cdot P_{fuel}$$

Where $P_{fuel} = 600$ USD/ton for green ammonia.

$$T_{ij}^{cycle} = T^{travel} + 2 \cdot \left(T^{setup} + \frac{V_i^{shuttle}}{Q_f} \right)$$

Where $T^{travel} = 2$, $T^{setup} = 0.5$. (수정필요)

$$P_j^{pump} = \frac{\Delta P \cdot \left(\frac{Q_j}{3600} \right)}{\eta_{pump} \cdot 1000}$$

Where ΔP is 400,000 Pa, η_{pump} is 0.7.

$$C_j^{pump} = P_j^{pump} \cdot C^{kW}$$

Where C^{kW} is 2,000 USD/kW.

$$C_i^{equip} = C_i^{shuttle} \cdot 0.03$$

$$C_{ij}^{bunkering} = C_j^{pump} + C_i^{equip}$$

$$O_{ij}^{bunkering_f} = (C_i^{equip} + C_j^{pump}) \cdot 0.05$$

$$O_{ij}^{bunkering_v} = O_{ij}^{pump_v} = \left(\frac{P_j^{pump} \cdot \left(\frac{V_i^{shuttle}}{Q_j} \right) \cdot SFOC_{NH3}}{1,000,000} \cdot 2 \right) \cdot P_{fuel}$$

$$C^{tank} = C^{kg} \times V^{tank_kg}$$

$$O^{tank_f} = (C^{tank} \cdot 0.03)$$

$$O^{tank_v} = V^{tank_kg} \cdot E^{kwh} \cdot P_{elec}$$

Where $C^{kg} = 1.215$ USD/kg, $V^{tank_kg} = 35,000,000$ kg, $P_{elec} = 0.0769$ USD/kWh.

$E^{kwh} = 0.0378$ kWh/kg 암모니아 1kg을 1년간 저온으로 유지하는 데 필요한 전력량.

$$\text{Minimize} \sum_{t \in T} \frac{1}{(1+r)^{t-2030}} (CAPEX_t + OPEX_t)$$

$$CAPEX_t = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (C_{ij}^{shuttle} \cdot x_{ijt}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (C_{ij}^{bunkering} \cdot x_{ijt}) + (C^{tank} \cdot Z_t)$$

$$OPEX_t = O_t^{shuttle} + O_t^{bunkering} + O_t^{tank}$$

$$O_t^{shuttle} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (O_i^{shuttle_f} \cdot N_{ijt} + O_i^{shuttle_v} \cdot y_{ijt})$$

$$O_t^{bunkering} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (O_{ij}^{bunkering_f} \cdot N_{ijt} + O_{ij}^{bunkering_v} \cdot y_{ijt})$$

$$O_t^{tank} = (O^{tank_f} + O^{tank_v}) \cdot Z_t$$

$$N_{ijt} = N_{ij,t-1} + x_{ijt} (\forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T)$$

$$N_{ij,2030} = x_{ij,2030} (\forall i \in I, \forall j \in J)$$

$$Z_t = Z_{t-1} + z_t (\forall t \in T, t > 2030)$$

$$Z_{2030} = z_{2030}$$

$$\sum_{i \in I} (V_i^{shuttle} \cdot N_{ijt}) \cdot \beta \leq V^{tank_vol} \cdot Z_t (\forall t \in T)$$

$$V^{tank_vol} = V^{tank_kg} / 680$$

$$\frac{D_{voyage}}{V_i^{shuttle}} \cdot T_{ij}^{cycle} \leq 72 (\forall i \in I, \forall j \in J)$$

Where D_{voyage} 수요 선박 1척이 1회 왕복 운항에 필요한 총 연료량 (m^3).

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (T_{ij}^{cycle} \cdot y_{ijt}) \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (N_{ijt} \cdot H_{max})$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (V_i^{shuttle} \cdot y_{ijt}) \geq D_t (\forall t \in T)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (N_{ijt} \cdot \frac{H_{max}}{T_{ij}^{cycle} \cdot 365} \cdot V_{ij}^{shuttle}) \geq \frac{D_t}{365} \cdot F^{peak} (\forall t \in T)$$

$$x_{ijt}, N_{ijt}, Z_t, z_t \in \mathbb{Z}^+ (\forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T)$$

$$y_{ijt} \geq 0 (\forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T)$$