

# 정박 선박에서 육상전력 사용 시 대기오염물질 배출 및 비용 절감에 관한 연구

최원삼 · 이준호<sup>†</sup>

국립부경대학교(항해사) · <sup>†</sup>국립부경대학교(교수)

## A Study on Air Pollutant Emissions and Cost Reduction when Using Shore Electric Power in the Berth

Won-Sam CHOI · Jun-Ho LEE<sup>†</sup>

Pukyong National University(officer) · <sup>†</sup>Pukyong National University(professor)

### Abstract


Regulations are being implemented worldwide to reduce emissions of air pollutants from port areas. Accordingly, emission reduction devices for air pollutants discharged from ships are being installed. However, it is necessary to prevent emissions in densely populated port areas. Discussions are underway to establish an eco-friendly port system not only to reduce emissions of greenhouse gases, nitrogen oxides, and sulfur oxides from ships docking in port areas in line with this environmentally friendly trend but also to reduce operating costs. One prominent approach is to use shore power instead of operating generators on ships docked at ports. The purpose of this study is to compare and analyze the emissions and costs when operating generators on ships versus using shore power while docked. The primary air pollutants analyzed are nitrogen oxides and sulfur oxides, and fuel consumption is predicted based on the amount of electricity used when using shore power. Environmental benefits of using shore power were confirmed, and even considering the initial cost of installing shore power supply facilities, there were long-term cost advantages. This study on the use of shore power for ships while docked can serve as a foundational study for establishing an eco-friendly port system in South Korea.

**Key words** : Air pollutant emission, Shore electric power, Cost reduction, Berthed ship

### I. 서론

해양오염사고를 방지하기 위해서 현실적 위험도와 잠재적 위험도를 평가하고 있다(Lee and Jung, 2021). 사고로 인해 발생하는 해양오염 외에 선박에서 배출하는 대기오염물질에 의한 환경오염도 발생하고 있는데 이러한 대기오염물질에 대한 규제와 지속 가능한 저감 방법이 중요한 이

슈로 대두되고 있다(Lee, 2020). 특히 항만 구역 내에서의 대기오염 문제는 급속한 해결이 요구되는 과제 중 하나로 전 세계적으로 항만 구역에서의 대기오염물질 배출을 줄이기 위한 규제가 강화되고 있다(Jeon and Tac, 2019). 이에 대응하여 친환경 항만 체계를 구축하기 위한 노력이 진행되고 있는데 접안중인 선박에서는 육상 전력을 사용하는 방법이 적용되고 있다. 이 연구에서는

<sup>†</sup> Corresponding author : , [leejh@pknu.ac.kr](mailto:leejh@pknu.ac.kr) / [orcid.org/0000-0002-3747-167x](https://orcid.org/0000-0002-3747-167x)

\* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2022년)에 의해 연구되었음.

정박 중인 선박에서 대기오염물질 배출을 줄이고 운항 비용을 절감하기 위한 육상전력의 활용 가능성에 대해 조사하였다. 특히 정박 중인 선박에서 발전기를 운전하는 경우와 육상 전력을 사용하는 경우의 대기오염물질 배출과 비용에 대한 비교를 통해 친환경적인 해결책을 찾고자 하였다.

해양수산부에서는 선박 대기오염물질 관리시스템을 도입하여 국내외 해운에서 발생하는 온실가스 및 대기오염물질 등을 체계적으로 관리하고 있다. 선박에서 사용하는 연료유를 조사, 온실가스 및 에너지의 목표관리제 운영 및 국제해사기구(International maritime organization, IMO)의 선박 연료유 사용 정보 의무 보고제도에 대한 업무를 수행하고 있는데 이를 통해 2030년 국가 온실가스 감축목표를 달성하려는 정책을 진행하고 있다.

선박에서 배출하는 대기오염물질에 대해서 국제해사기구는 황산화물, 질소산화물 등에 대해 규제를 시행하고 있고 이에 따라 스크러버(scrubber), 선택적 촉매 환원(Selective catalytic reduction, SCR) 등을 설치하고 있다. 미세먼지와 관련해서는 디젤분진필터(Diesel particulate filter, DPF)를 설치하고 있으며 이처럼 각 대기오염물질에 적합한 시스템을 사용하여 대기오염물질 배출을 감소시키고 있다(Son and Bae, 2007).

이 연구의 대상인 발전기관은 질소산화물 규제 단계 Tier II가 적용된 기관이다. Tier II는 선박에서 발생하는 질소산화물(NOx) 배출을 제한하기 위해 2011년 이후 신규 건조된 선박이 적용받는 규제이며, 2016년 이후 신규 건조된 선박은 더 높은 수준의 질소산화물 규제인 Tier III를 적용받고 있다. 환경 규제는 점차 강화되고 있으므로 현재 운항 중인 Tier II 적용 선박이 강화된 환경 규제에 대응하기 위해 육상전력을 사용하는 이점에 대해 평가할 필요성이 있다.

선박에서 육상 전력을 사용하는 것과 연료를 사용하는 것에 대한 비용을 비교분석한 결과를

살펴보면 육상전원공급장치(alternative maritime power, AMP)을 통해 공급받는 전력이 연료를 사용하였을 경우 발생하는 비용에 비해 저렴한 것으로 분석되었다. 하지만 육상전원공급장치를 설치하기 위한 비용에 대한 면밀한 추계를 하지 못하는 한계가 있었다(Park and Kang, 2018). 육상전력 사용에 따른 정박 중인 선박에서 이산화탄소 배출 및 운항비용 절감에 관한 연구에서는 육상전력을 사용하였을 경우 이산화탄소 배출을 약 32.5%, 비용을 약 33% 절감하는 결과가 나타났다(Han and Lim, 2010).

육상전력을 사용하였을 경우 저감할 수 있는 선박에서 배출하는 대기오염물질은 대표적으로 질소산화물 및 황산화물이 있다. 이 연구에서는 각 대기오염물질에 대한 분석을 통해 우리나라 항만 구역에서 친환경 항만 체계를 구축하는데 기여하고자 한다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 대상

이 연구에 대상이 된 선박은 전기추진 방식의 해양탐사 실습선이다(Bae et al., 2014). 정박시 선박의 자체적인 전력 공급을 위해서 발전기 1대가 운전되며, Tier II에 해당하는 기관으로 사양을 <Table 1>에 나타냈다(Jung and Lee, 2018). 다른 선박의 경우 정박 시 화물작업 등의 이유로 발전기가 2대 이상 운전되기도 하며, 항만하역 등으로 발전기의 부하도 일정하지 않다. 본 연구의 대상인 해양탐사 실습선은 정박 시 화물작업을 시행하지 않기 때문에 전력 사용량의 큰 변화가 없다. 이와 같은 이유로 편차가 적은 부하 자료를 활용하여 분석할 수 있었다.

선박에서 배출하는 대기오염물질을 분석하기 위해 선박이 운항할 때마다 가스분석기를 활용하여 배기가스의 분석을 시행하기에는 비용적인 한계가 있다. 이러한 제한점을 극복하기 위해 대기

오염물질의 자료는 5년간의 운항자료를 기준으로 하여 분석하였다. 그리고 선박의 시험 운전 시 부하별 가스분석 자료를 기준으로 운항 데이터를 분석하였다.

<Table 1> Principal data for generator engine of the ship

Item	Data
Stroke	4-stroke
Piston	trunk type
Intake air method	turbocharge with inter-cooler
Fuel	marine gas oil
Cylinder configuration	in-line
Number of cylinder	7
Rated speed	900 [rpm]
Power	805 kW
Cylinder bore	170 [mm]
Piston stroke	280 [mm]
Swept volume per cylinder	6.36 [dm <sup>3</sup> ]
Mean effective pressure	24.1 [bar]
Compression Ratio	15:1
Tier level	Tier II

발전기의 운전에 사용되는 연료는 선박용 경유(Marine gas oil, MGO) 단일 유종이 사용되며 연료의 성상을 <Table 2>에 나타냈다.

<Table 2> Property of fuel

Item	Data
Sulfur content	0.04%
Density at 15°C	0.8504
API gravity at 60°F	34.24
Kinematic viscosity at 40°C	2.90
Flash point	65.0°C

## 2. 연구 방법

정박 중인 선박에서 육상전력을 사용하는 경우와 발전기를 운전하는 경우 발생하는 대기오염물질 배출과 비용에 관한 비교 연구를 위해 운항 자료를 수집하여 분석하였다. 비교 대상 중에서 대기오염물질 배출은 육상전력을 사용하는 경우에는 선박에서 발생시키는 대기오염물질 배출이 없는 것으로 간주하여 비교 분석하였다. 대기오염물질 배출은 발전기를 운전하였을 때 현존하는 Tier 2 선박의 대기오염물질 배출이 향후 강화될 항만구역 내의 환경 규제를 만족하는지가 주요 분석 대상이다. 비용적인 이점은 발전기 운전 시 소모되는 연료유의 가격과 육상전력 사용 시 전기 가격의 변동이 있으므로 2019년부터 2023년까지 5년 동안의 운항자료를 이용하여 연구하고자 한다.

연구 대상 선박의 발전기관에서 배출하는 질소산화물과 관련된 국제해사기구의 NOx Technical File의 내용은 다음과 같다. 시험연료유 사양을 Bunker-A(ISO 8217, DMC grade)로 시험하여 배출된 질소산화물의 양은 8.1 g/kWh이다. 선박으로부터의 오염방지를 위한 국제협약 MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)의 부속서 VI 제13.4규칙에 따라서 적용되는 NOx 배출허용 기준은 9.2 g/kWh이다.

황산화물 배출과 관련된 규제는 해양환경관리법 시행령 제42조에 따라 국내에서 항해하는 선박의 경우 2021년부터 0.05% 이하 황 함유량의 경유를 사용하여야 한다. 이 연구 대상 선박의 발전기관에서 사용한 선박용 경유는 황 함유량 0.04%로 규정에 적합하다.

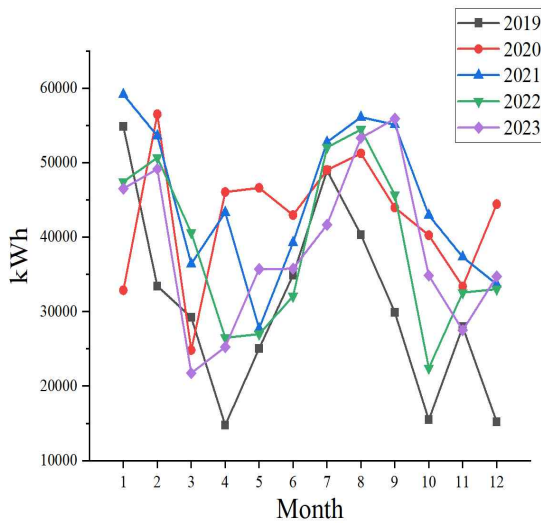
앞서 설명한 질소산화물 및 황산화물은 육상전력을 사용할 경우 선박에서 배출하지 않는 대기오염물질이다. 비용 절감을 비교하기 위한 대상은 연료유와 전기의 가격인데, 이는 가격의 변동이 있으므로 각 연도에 해당하는 가격을 기준으

로 비용 절감에 대해 비교하였다.

### Ⅲ. 연구 결과

#### 1. 육상전력 사용량과 연료소모율

[Fig. 1]은 2019년부터 2023년까지 월별 육상전력 사용량을 나타낸 것이다.



[Fig. 1] Monthly electricity consumption.

선박의 발전기를 운전하지 않고 육상 전력만 사용한 기간은 7월 및 8월이며, 이때 소비한 전력량은 평균 50005 kWh이다.

연구 대상 발전기관의 연료소모율(Specific Fuel Oil Consumption, SFOC)은 ISO 3046/1의 표준 조건을 기준으로 설계되었으며, 회전속도 720 rpm, 연속최대출력(Maximum Continuous Rating, MCR) 상태에서 연료소모율은 186 g/kWh이다.

#### 2. 대기오염물질 배출

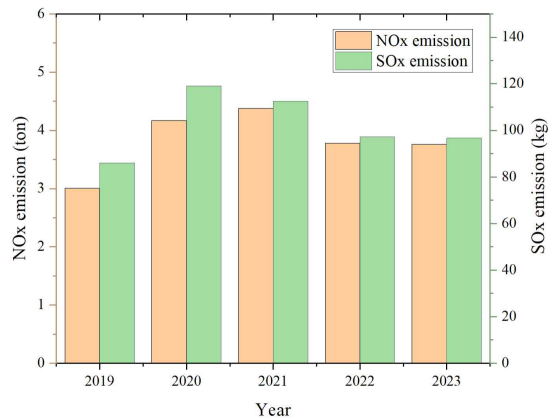
연구 대상 선박이 정박 중에 사용하는 전력은 평균 130 kW이며, 발전기관 1대가 1시간 동안 130 kW의 전력을 생산하기 위해서 소모되는 선박용 경유의 양을 측정된 결과 시간당 평균 80 L

가 소모되었다. 시간당 80 L의 선박용 경유가 연소되면서 발생하는 대기오염물질의 양을 표 3에 나타냈다. 질소산화물은 발전기관의 시운전을 통해 부하에 따라 직접 계측 방식으로 측정하였으며, 황산화물은 연료소모율을 기준으로 배출량을 계산하였다.

<Table 3> Emissions from the ship per 1 hour

Item	Data
NOx	8.14 g/kWh
SOx	27.21 g

[Fig. 2]는 육상전력을 사용하지 않고 발전기관을 운전하였을 경우 발생했을 질소산화물 배출량과 황산화물 배출량을 연도별로 나타낸 것이다.



[Fig. 2] Yearly emissions from operating engines instead of shore electric power.

육상전력을 사용하지 않고 발전기관을 운전했을 경우 매년 평균 3.8 ton의 질소산화물이 배출되었을 것으로 나타났다. 황산화물 배출량은 각 해당 년도에 사용된 연료유의 황 함유량을 기준으로 계산하였다. 2021년부터 연료유의 황 함유량의 기준이 0.05% 이하로 낮아졌지만, 그 이전에도 이미 낮은 황 함유량의 연료유를 사용하였기 때문에 큰 차이가 나타나진 않았다.

전국을 기준으로 연간 884,453 ton의 질소산화물이 배출되고 있는데 본 연구의 결과로 나타난 연평균 3.8 ton의 질소산화물 배출은 약 승용차 1,169대가 연간 배출하는 질소산화물의 양이다.

전국에서 배출되는 황산화물 중에서 비도로이동오염원의 49.8%가 바다에서 배출되고 있으며, 저유황유를 사용하더라도 황산화물이 배출되기 때문에 지리적으로 인구가 밀집한 곳에 위치한 곳에서 배출되는 황산화물은 멀리 떨어진 화력발전소에서 배출하는 황산화물에 비해 환경오염으로 인한 피해가 직접적으로 발생하므로 육상전력을 사용하여 대기오염물질이 발생되지 않도록 하는 것이 중요하다고 생각된다.

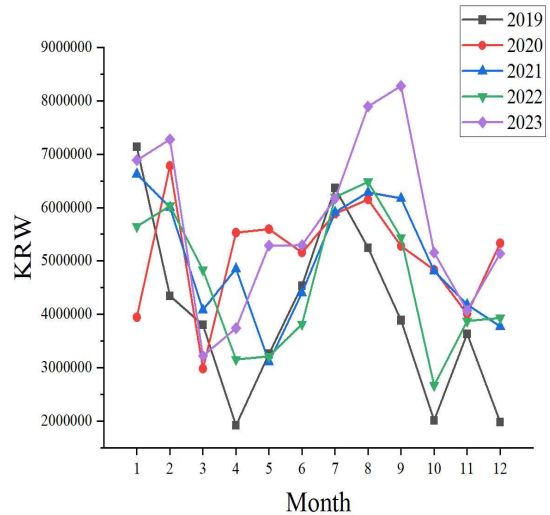
온실가스 중에서 선박의 이산화탄소 배출량은 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 권고한 탄소배출량 계수를 이용한 계산식으로 구할 수 있다 (Han and Lim, 2010). 이 계산식은 선박 운항자료의 오차, 손실 등을 고려하지 않고 평균값 및 대푯값으로 계산하면 상황에 알맞도록 보완해야 하므로 본 연구에서는 정량적인 결과를 분석하기 위해 제외하였다.

### 3. 비용 절감

육상전력을 사용하였을 경우 비용적인 이점을 분석하기 위해 연료유를 사용하였을 때 발생하였을 비용과 비교해보았다. 전기요금은 전기의 원가에 따라 인상 또는 인하될 수 있으며, 전기요금은 매년 분기별로 조정된다. 이 연구의 조사기간인 2019년부터 2023년까지 전기요금 인상폭은 코로나19 팬데믹으로 인해 2019년부터 2021년까지 전기요금이 변동이 작지만, 2022년과 2023년은 전기요금이 인상되어 육상전력의 사용량 대비 비용이 많이 발생하였다.

[Fig. 3]은 육상전기의 사용량에 따른 월별 전기요금을 나타낸 것이다. 전기요금은 육상전력 사용량에 비례하지만 2023년 8월 및 9월이 사용

량에 비해서 전기요금이 높게 나타났다. 이처럼 전기요금이 높게 나타난 이유는 2023년 2분기 전기요금은 2022년 1분기 전기요금에 비해 39.6% 인상되었기 때문이다.



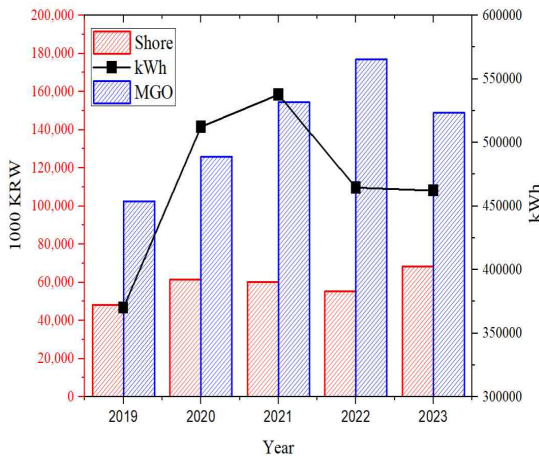
[Fig. 3] Yearly emissions from operating engines instead of shore electric power.

연도별 육상전력 사용량 합계, 전기요금 합계 및 선박용 경유의 평균 가격을 <Table 4>에 나타냈다. 전력 사용량에 따른 전기요금과 선박용 경유의 가격은 시기별로 변동하기 때문에 연평균 가격으로 판단하였다.

<Table 4> Annual shore electric power usage, electricity costs and average price of marine gas oil

Year	Shore electric power (kWh)	Electricity costs (1000 KRW)	Average MGO Price (KRW/L)
2019	370128	48116	1341
2020	512340	61480	1190
2021	537624	60213	1391
2022	464568	55283	1843
2023	462204	68406	1558

육상전력을 사용하였을 경우 비용적인 이점을 분석하기 위해 연도별 육상전력 사용량을 생산해내기 위한 발전기관의 연료소모량을 이용하여 연료 비용을 계산하였다. 연료소모량은 ISO 3046/1을 기준으로 계산한 값을 이용하였으며, 해당 연도의 평균 가격으로 환산하여 [Fig. 4]에 비교하여 나타냈다.



[Fig. 4] Annual comparison of electricity and fuel costs according to onshore electricity usage.

육상전력의 사용량과 전기요금은 비례하지만 연료유를 사용하였을 경우에는 선박용 경유 가격의 영향을 크게 받았다. 발전기관을 사용하여 선박의 전기를 생산해내기 위해 소모되는 연료유는 육상전력을 사용하였을 경우에 비해 평균 2.4배 많은 비용이 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 연료유를 사용하면 육상전력을 사용하는 경우에 비해 연평균 8300만원 상당의 비용이 더 발생하기 때문에 항만시설에 육상전력을 공급하기 위한 시설을 설치하기 위한 초기 비용을 고려하여도 경제적인 이점이 있다고 판단된다. 또한 국제유가가 상승하면 전기요금 및 선박용 경유의 가격이 함께 상승하지만 선박의 운항비용으로 책정해본 결과 선박용 경우의 사용이 변동 폭이 크게 나타났다,

#### IV. 결론

본 연구에서는 정박 중인 선박에서 육상전력을 사용하는 것이 대기오염물질 배출 및 비용 절감 측면에서 발생하는 이점에 대해 분석하였다. 실제 선박의 운항 자료를 이용하여 비교 분석하여 육상전력을 사용하는 것이 대기오염물질 배출 및 비용 절감 측면에서 모두 이로운 결과가 나타났다. 연구 결과에 따르면, 육상 전력을 사용하는 경우 발전기를 운전하는 경우에 비해 질소산화물은 연 평균 3.8 ton, 황산화물 102.3 kg을 절감할 수 있었다. 그리고 육상전력을 사용함으로써 선박용 경유를 사용하여 발생하는 유류비용을 57.63% 절감할 수 있었다. 이러한 결과들은 정박 중인 선박에서 육상전력을 사용하는 것이 선박을 운항하는데 친환경적이며 경제적임을 나타내고 있다.

단기적으로는 육상전력을 공급하기 위한 전원 장치의 비용이 소요되더라도 중장기적으로 육상전력의 적극적인 도입은 항만구역 내의 대기오염을 저감하고 운항 비용을 절감하기 위해 효과적이라 판단된다. 해양수산부에서는 항만 미세먼지 저감을 위한 중기투자계획을 세우고 2030년까지 248개의 선석에 육상전원공급설비를 구축하는 중기 계획을 수립하였다. 이 계획에서 제외된 무역항 및 연안항은 추후 구축시기 및 규모를 검토할 예정인데 본 연구 결과를 활용하여 육상 전력 시설의 보급 및 운영을 지원하기 위한 정책 수립을 강구하고 친환경 항만 체계를 구축하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

Bae DM, Cao B and Chen TH(2014). Vibration analysis of a DWT 1,000-ton ocean-research vessel with electric propulsion, Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 50(1), 75~82.

- <https://doi.org/10.3796/KSFT.2014.50.1.075>  
Han WH and Lim KS(2010). A Study on the Reduction of CO2 Emissions and Operating Costs of the Ship in Port by Shore Electric Power, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 16(2), 229~234.
- Jeon KA and Tac DH(2019). Analysis and Improvements of Numerical Analysis Methods Applied to Marine Environmental Impact Assessment in Harbor Space, *The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 31(4), 1167~1171.  
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.8.31.4.1161>
- Jung BK and Lee JH(2018). A Study on Specific Noise Characteristics of a T/S NARA, *The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 30(5), 1696~1702.  
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.10.30.5.1696>
- Lee JU(2020). Investigation on Environmental Impact of Marine LNG Propulsion Systems through a Life Cycle Assessment, *Journal of Power System Engineering*, 24(3), 75~81.  
<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.3.075>
- Lee TH and Jung BK(2021). A Study on Marine Pollution Accident Risk Evaluation of Each Sea Area and Improvement Plans -Focusing on the Jurisdictions of by the Maritime Pollution Response Bureau of Korea Coast Guard. *The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 31(1), 81~87.  
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.2.33.1.81>
- Park YT and Kang HW(2018). A Study on Cost Comparison between AMP and Bunker fuel, *Korea Trade Research Association*, 43(6), 93~111.
- Son BH and Bae JU(2007). A Study on the Performances of Exhaust Gas Purification at Process on the Development of Corona Discharge Type Electrostatic Precipitator for Diesel Engines. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology* 31(8), 904~910.
- 
- Received : 21 March, 2024
  - Revised : 09 April, 2024
  - Accepted : 19 April, 2024