

Tier 1과 Tier 3 방법론에 따른 선박 온실가스 배출량 산정에 관한 고찰 황대중[†]

(Received January 4, 2019 ; Revised March 18, 2019 ; Accepted April 10, 2019)

A study on the estimation of greenhouse gas emissions from ships according to the Tier 1 and Tier 3 methodology

Dae-Jung Hwang[†]

요약: 지구온난화를 유발하는 온실가스 저감을 위해 국제적으로 다양한 정책이 시행되고 있다. 국제 해운에서도 선박으로부터 발생하는 온실가스를 감축하기 위해 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 시작은 정확한 온실가스 배출량 산정이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 Matlab/Simulink (v.2016a)를 활용하여 Capesize Bulk Carrier 크기의 선박을 대상으로 Tier 1과 Tier 3 방법론에 따른 온실가스 배출량 산정 모델링을 구성하였으며, 각각의 방법론에 따른 결과 비교를 통해 온실가스 배출량 산정에 영향을 미치는 요인에 관한 분석을 수행하였다. 그 결과, 본 해석대상과 계산 조건 및 범위 내에서 Tier 3 방법론에 따라 산정된 온실가스 총배출량은 90,399 tonCO_{2e}으로 Tier 1 방법론에 의한 결과보다 약 25% 높게 나타났으며, Cruising mode에서 주기관 부하가 온실가스 배출량 산정에 많은 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 따라서, 향후 선박 부문의 좀 더 정확한 온실가스 배출량 산정을 위해 선박 운항 상태에 따른 주기관 부하 변동에 관한 정확한 자료가 확보되도록 체계적인 시스템이 구축될 필요성이 있다고 사료된다.

주제어: 온실가스, Matlab/Simulink, Tier 3 방법론, Tier 1 방법론

Abstract: Various policies are being implemented internationally to reduce greenhouse gases that cause global warming. A lot of studies have been actively conducted to reduce greenhouse gas emissions from ships in international shipping. Accurate estimation of greenhouse gas emissions is the initial approach to reduce greenhouse gases. In this study, greenhouse gas emissions from a ship, according to Tier 1 and Tier 3 methodology, were modeled using Matlab/Simulink (v.2016a). Based on the results of each method, the factors affecting the estimation of greenhouse gas emissions were analyzed. The total greenhouse gas emissions by the Tier 3 methodology, within the scope of this analysis and calculation conditions, were 90,399 tonCO_{2e}, which was approximately 25% higher than that of the Tier 1 methodology. The load of the main engine in the cruising mode was found to have a significant effect on the estimation of greenhouse gas emissions. Therefore, it is necessary to establish a systematic system to obtain more precise data on the main engine load fluctuation based on the ship operation status to estimate more accurate greenhouse gas emissions in the international shipping industry.

Keywords: Greenhouse gas, Matlab/Simulink, Tier 3 methodology, Tier 1 methodology

1. 서 론

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 제72차 해양환경보호위원회(MEPC, Maritime Environment Protection Committee)에서 국제 해운의 온실가스(GHG, Greenhouse Gas) 저감을 위한 온실가스 감축 초기전략을 채택하였다[1]. 동 전략은 온실가스 감축 방안을 단기, 중기, 장기로 구분하는 등 세부적인 저감 조치를 통해 국제 해운에 실질적인 온실가스 감축 노력을 촉구하고 있다. 우리나라도 “저탄소 녹색성장 기본법”에 따라 2009년부터 산업

부문별 온실가스-에너지 목표관리제를 시행하고 있으며 추가로 2015년부터는 온실가스 배출권 거래제를 통해 민간사업장의 온실가스 감축 활동을 유도하고 있다[2]. 이처럼 국내·외적으로 온실가스 감축을 위한 다양한 활동이 전개되고 있으며 그 시작은 정확한 온실가스 배출량 산정이라고 할 수 있다. 이와 관련하여 최근까지 산업 부문별 온실가스 배출량 산정과 방법론에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 2010년 T. H. Kim *et al.* [3]은 국내·외 도로교통부문의 온실가스 배출량 산정 방법론을 검토하였다. 그 결과, 더욱 정

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9213-4783>): Researcher, Korea Center for International Maritime Safety Cooperation, 492, Hannuri-daero, Sejong-si, 30103, Republic of Korea, E-mail: hdaejung@naver.com, Tel: 070-4923-4533

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

확한 온실가스 배출량 산정을 위해 Tier 2, 3과 같은 높은 수준의 방법론 적용이 필요함을 제시하였다. 2011년 C. K. Bong *et al.* [4]은 국내의 선박등록 검사기관에 등록된 선박 8,000여 척을 대상으로 Tier 1과 Tier 3의 방법으로 온실가스 배출량을 산정하여 비교 분석한 결과 Tier 3 방법론에 따라 산정된 배출량이 Tier 1보다 평균적으로 약 9%가량 많게 나타남을 보여주었다. 2014년 S. D. Lee *et al.* [5]는 한국해양대학교 실습선 한바다호를 이용하여 연료소모량과 육상전기 사용량을 분석한 결과 학생 1명을 1년간 실습시키는데 발생하는 온실가스가 34.1 tonCO_{2e}이라는 결론을 얻었다. 전술의 연구 결과들로부터 여러 부문에서 다양한 방법과 목적을 가지고 온실가스 배출량을 산정한다는 것을 알 수 있다.

선박의 경우 운항 특성상 정지상태에서도 발전기를 운전하여 전기를 생산하는 등 온실가스 배출 측면에서 여러 특성이 산재한다. 따라서 이를 고려하여 선박에 적합한 온실가스 배출량 산정방법이 필요하다[6]. 본 연구는 범용 수치해석 프로그램인 Matlab/Simulink (v.2016a)를 활용하여 온실가스 배출량 산정 모델링을 구성하였으며, 기후변화에 대한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) Guideline 2006[7]에서 제시하는 온실가스 배출량 산정 방법론인 Tier 1과 Tier 3을 적용하였다. 이 방법론은 특정 선박을 대상으로 일반적으로 적용되는 온실가스 배출량 산정 방법이 아닌, 국가 및 부문별 배출량 통계를 위한 수단으로써 주로 사용된다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서 동일한 하나의 선박에 Tier 1과 Tier 3을 방법론을 각각 적용하여 그 결과를 비교·분석한 이유는 첫째, 개별선박에 Tier 3을 방법론을 적용해봄으로써 각각의 세부적인 요소가 온실가스 배출량 산정에 미치는 영향성을 보다 정량적으로 파악할 수 있고, 이는 추후 Tier 3의 본래 목적에 맞게 선박 부문의 온실가스 배출량을 산정할 때, 산정된 배출량 증감 원인을 쉽게 추정할 수 있기 때문이다. 둘째, 선박 운항에 따른 연료소모량은 쉽게 파악할 수 있으나, Tier 3 방법론의 일괄적 적용을 위한 선박들의 세부적인 운항자료는 해운선사에서 운용하는 선박 운항 관리시스템이 각기 달라 현행 상 국제항해에 종사하는 다수 선박을 대상으로 Tier 3 방법론을 적용한 온실가스 배출량 산정이 어렵기 때문이다. 이에 우선적으로 하나의 선박을 대상으로 Tier 3 방법론에 따른 온실가스 배출량을 산정해 보았다.

2. 온실가스 배출량 산정

2.1 온실가스 배출량 산정 대상 선박

Rumesh *et al.* [8]는 실제 운항자료와 상향식 접근방법(Bottom-up Approach) 계산을 통해 선박의 연료소모량을 비교·분석하였다. 본 연구에서는 온실가스 배출량 산정을 위한 대상으로 Rumesh *et al.*의 연구에 사용된 Capesize Bulk Carrier 선박을 선정하였다. 그 이유는 Tier 1 방법론 적용을

위해 필요한 일정 기간 사용된 유종별 연료소모량과 Tier 3 방법론 적용을 위해 필요한 온실가스 주요 배출 기기의 제원 및 운항상태별 자료가 Rumesh *et al.*의 연구에 모두 나타나 있기 때문이다. 대상 선박의 개략적인 제원과 30개월간 수집된 연료소모량 자료를 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

2.2 온실가스 배출량 산정 대상 물질

1997년 채택된 교토의정서에 따르면 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs) 그리고 육불화황(SF₆)이 6대 온실가스로 지정되었다[9]. 본 연구에서는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄) 그리고 아산화질소(N₂O)를 온실가스 배출량 산정 대상 물질로 선정하고 나머지 3개의 물질은 무시할 정도로 배출량이 적기 때문에 제외하였다.

2.3 온실가스 배출량 계산 조건

본 연구에서는 Third IMO GHG Study 2014 [10]에 나타난 온실가스 배출계수를 배출량 산정에 사용하였으며 Table 3은 본 연구에 사용된 배출계수를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1: Specification of subject vessel for calculating greenhouse gas emissions from ship [8]

Description		Specification
Ship Type		Capesize Bulk Carrier
Dead weight		181.381 tonnes
Dimensions	Length Over	291.98 m
	Breadth	45.0 m
	Depth	24.7 m
Speed	Laden	15 Knots (NCR)
	Ballast	16 Knots (NCR)
Main Engine	MCR	16,700 kW (100% load)
	NCR	14,195 kW (85% load)
	Slow-steaming	8,517 kW (51% load)
	SFOC	168.7 g/kWh (MCR)
Generator Engine	MCR	600 kW × 3 sets
	SFOC	216.7 g/kWh at 360 kW
Oil Fired Boiler		1,300 kW at 0.6 MPa

Table 2: Fuel consumption data for 30 months for calculating greenhouse gas emissions from ship [8]

Description		Fuel Consumption
HFO	Main Engine	19.156 tonnes
	Generator Engine	2.417 tonnes
	Boiler	497 tonnes
MDO	Main Engine	N/A
	Generator Engine	89 tonnes
	Boiler	3 tonnes

Table 3: Greenhouse Gas Emission Factor [g/gfuel] for calculating greenhouse gas emissions from ship

Greenhouse Gas	Fuel	Emission Factor
Carbon dioxide (CO ₂)	HFO	3.11400
	MDO	3.20600
Methane (CH ₄)	HFO	0.00006
	MDO	
Nitrous oxide (N ₂ O)	HFO	0.00016
	MDO	0.00015

Table 4: Global Warming Potential

Greenhouse Gas	GWP values
Carbon dioxide (CO ₂)	1
Methane (CH ₄)	21
Nitrous oxide (N ₂ O)	310

온실가스 배출량 단위는 이산화탄소환산톤 tonCO_{2e}(Ton of Carbon Dioxide Equivalent)이다. 이는 여러 종류의 온실가스가 지구온난화에 기여하는 정도를 정량적으로 비교하기 위해 지구온난화지수(GWP: Global Warming Potential)를 이용하여 이산화탄소를 기준으로 환산한 값이다. 2006 IPCC Guideline에 제시된 주요 온실가스의 지구온난화지수를 Table 4에 나타내었다.

2.4 온실가스 배출량 계산식

2006 IPCC Guideline의 효율적인 이행을 위해 유럽환경청(EEA, European Environment Agency)에서 발간한 EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 [11]은 Tier 1, Tier 2 그리고 Tier 3 방법론에 따른 선박 부문 온실가스 배출량 계산법을 제시하고 있다. 본 연구에서는 Tier 1과 Tier 3 두 가지 방법론을 대상 선박에 적용하여 온실가스 배출량을 계산하였다.

Tier 1은 단순히 유종만 구분하여 선박 운항의 총 연료소모량에 온실가스 배출계수를 곱하여 산정하는 방법론이고, Tier 3 방법론은 유종, 엔진 종류, 출력, 연료소비계수 (SFOC, Specific Fuel Oil Consumption) 그리고 운항상태 등 세분화된 선박 운항자료를 고려하여 온실가스 배출량을 산정한다.

2.4.1 Tier 1 계산식

Tier 1 방법론에 따른 온실가스 배출량은 식 (1)과 같은 방법으로 계산된다.

$$E_i = \sum_m (FC_m \times EF_{i,m}) \quad (1)$$

여기서, E_i 는 대상 온실가스 i 의 배출량(ton), FC_m 은 사용된 유종 m 의 연료소모량(ton), $EF_{i,m}$ 는 대상 온실가스 i 와 유종 m 에 해당하는 온실가스 배출계수이다.

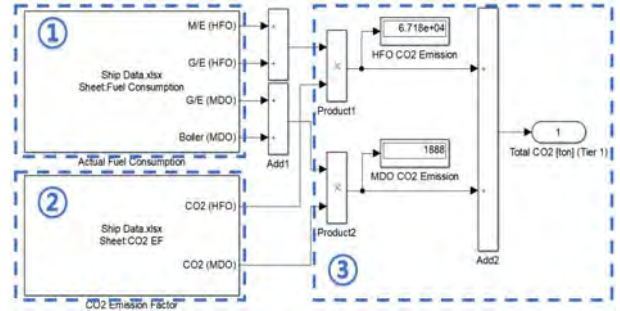


Figure 1: Calculation of GHG emissions by Tier 1 methodology

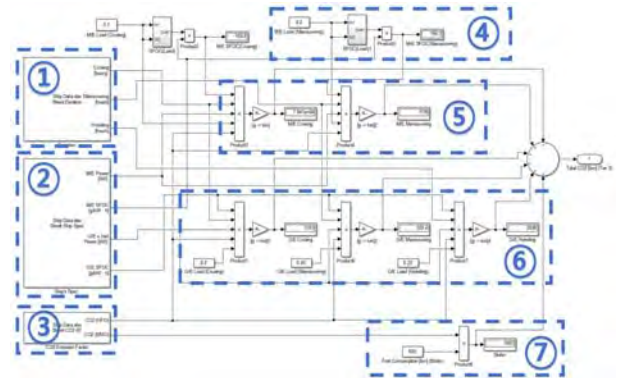


Figure 2: Calculation of GHG emissions by Tier 3 methodology

Figure 1은 Matlab/Simulink (v.2016a)를 이용하여 구성된 Tier 1 방법론에 따른 이산화탄소(CO₂) 배출량 계산 모델을 나타낸다. ①블록과 ②블록은 계산 조건으로써 각각 유종에 따른 총 연료소모량과 온실가스 배출계수이다. ③블록에서 연료소모량과 해당 유종의 배출계수가 곱해져 온실가스 배출량이 계산된다.

2.4.2 Tier 3 계산식

Tier 3 방법론에 의한 온실가스 배출량은 선박 운항을 정박상태인 Hotelling mode, 입·출항 상태인 Maneuvering mode 그리고 정속 운항상태인 Cruising mode 3가지로 나누어 각각의 배출량 합으로 산정되며 각 운항상태에서는 운항시간, 출력 등을 고려하여 식 (2)와 같은 방법으로 온실가스 배출량이 계산된다.

$$E_{Trip} = E_{Hotelling} + E_{Maneuvering} + E_{Cruising}$$

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p \left[T_p \sum_e (P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p}) \right] \quad (2)$$

여기서, E_{Trip} 는 Tier 3 방법론에 따른 온실가스 총배출량을 나타낸다. $E_{Trip,i,j,m}$ 은 각 운항 상태에서의 대상 온실가스 i 와 엔진 종류 j 그리고 유종 m 에 해당하는 온실가스 배출량이며 T_p 는 운항시간, P_e 는 MCR 상태의 엔진 출력, LF_e 는 운항 상태에 해당하는 엔진 부하, $EF_{e,i,j,m,p}$ 는 온실

Table 5: Time and Load according to ship operation mode

Ship operation mode	Time [hr]	Load [%]	
Cruising mode	12,894	M/E	70
		G/E	17
Maneuvering mode	551	M/E	20
		G/E	40
Hotelling mode	8,481	G/E	22

가스 배출계수이다.

본 연구에서는 Rumesh *et al.* [8]의 논문에 따라 선박 운항 상태에 해당하는 운항시간 및 엔진 부하를 온실가스 배출량 계산에 적용하였으며, **Table 5**는 본 연구에 사용된 운항시간 및 엔진 부하를 정리하여 나타낸 것이다. Hotelling mode에서 주기관은 운전되지 않기 때문에 계산에서 제외하였고 보일러의 경우는 운전 부하에 관한 자료가 나타나 있지 않아 보일러 운전 시 사용된 총연료량에 배출계수를 곱하여 온실가스 배출량을 산정하였다.

Figure 2는 Tier 3 방법론에 따른 이산화탄소(CO₂) 배출량 계산 모델을 나타내고 있다. ①블록은 계산 조건으로써 각 운항 상태에 따른 운항시간을 나타내며 ②블록은 주기관과 발전기의 출력 및 MCR 상태의 SFOC 그리고 ③블록은 유종에 따른 온실가스 배출계수를 나타낸다. 먼저 출력 및 MCR 상태의 SFOC 값은 ④블록으로 들어가 J. P. Jalkanen *et al.* [12]의 연구에 따른 식 (3)과 같은 방법으로 0에서 1 범위의 주기관 부하(Load)에 따른 변동 SFOC 값으로 추산된다. 이와 같은 계산을 적용하는 이유는 엔진 부하 변동에 따른 SFOC 변화율을 반영하여 온실가스 배출량 계산의 정확성을 높이기 위함이다.

$$SFOC(load) = SFOC_{MCR} \times (0.455 \times load^2 - 0.71 \times load + 1.28) \quad (3)$$

추산된 변동 SFOC 값을 사용하여 ⑤블록에서 운항 상태에 따른 주기관의 온실가스 배출량이 계산되고, 동시에 ⑥블록과 ⑦블록에서 각각 계산된 운항 상태에 따른 발전기와 보일러의 배출량이 합산되어 Tier 3 방법론에 따른 이산화탄소(CO₂) 총배출량이 계산된다.

3. 계산 결과

3.1 Tier 1과 Tier 3에 따른 온실가스 배출량

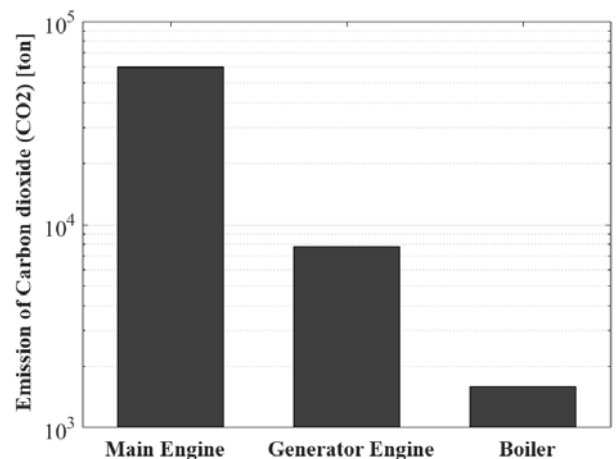
본 연구에서는 Tier 1과 Tier 3 두 가지 방법론을 동일한 하나의 선박에 적용하여 온실가스 배출량을 산정하였으며 **Table 6**은 계산 결과를 정리하여 나타낸 것이다. Tier 1 방법론은 단순히 소모된 연료량에 배출계수를 곱하여 배출량을 산정하고 Tier 3 방법론은 선박의 상세 운항자료를 기반으로 연료소모량을 추정하여 해당하는 배출계수를 고려하여 배출량을 산정한다. 그 결과, Tier 1 방법론에 의한 온실

가스 배출량은 총 70,195 tonCO₂e이며 그 중 이산화탄소(CO₂) 배출량이 69,070 tonCO₂e으로 총배출량의 약 98%를 차지한다. Tier 3 방법론에 의한 온실가스 배출량은 총 90,399 tonCO₂e으로 Tier 1 방법론에 의한 결과보다 약 25% 가량 높게 나타났다. Tier 1과 Tier 3 두 가지 방법론에 의한 결과의 가장 큰 차이는 이산화탄소(CO₂) 배출량에 있으며 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)는 이산화탄소(CO₂)와 비교하면 상대적으로 배출량이 적어 온실가스 총배출량에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

Figure 3과 **Figure 4**는 각각 Tier 1과 Tier 3 방법론에 따른 이산화탄소(CO₂) 총배출량을 세부적으로 보여준다. Tier 1 방법론은 선박의 운항 특성을 고려하지 않고 단지 기기 운전 시 소모되는 연료량을 바탕으로 온실가스 배출량을 산정하며, 그 결과 현 분석대상의 범위에서는 주기관 운전 시에 따른 이산화탄소(CO₂) 배출량이 온실가스 총배출량에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. **Figure 4**를 통해 Tier 3 방법론에 따른 온실가스 배출량을 세부적으로 살펴보면 주기관의 경우 Cruising mode에서 이산화탄소(CO₂) 배출량이 가장 크게 나타났으며 발전기는 Cruising mode와 Hotelling mode에서 비슷한 양의 이산화탄소(CO₂)가 배출되는 것을 알 수 있다. 이는 Cruising mode 운항시간이 12,894시간으로 Hotelling mode 8,481시간에 비해 65%가량 길다는 점과 Hotelling mode에서 주기관이 운전되지 않는다는 점을 고려하면, 선박 정지상태에서 발전기로부터 배출되는 온실가스 양이 상당히 많다는 것을 의미한다.

Table 6: Emissions of GHGs by Tier 1 & 3 [tonCO₂e]

Greenhouse Gas	Tier 1	Tier 3
Carbon dioxide (CO ₂)	69,070	88,950
Methane (CH ₄)	28	35
Nitrous oxide (N ₂ O)	1,097	1,414
Total	70,195	90,399

**Figure 3:** CO₂ emissions by Tier 1 methodology

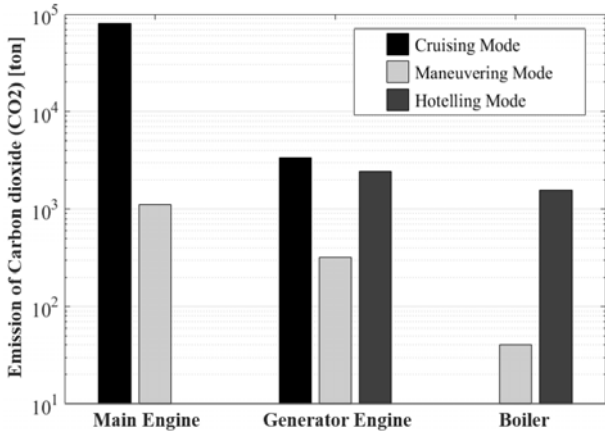


Figure 4: CO₂ emissions by Tier 3 methodology

3.2 주기관 부하 변동에 따른 온실가스 배출량

Figure 5는 Cruising mode에서 주기관의 부하 변동에 따른 Tier 1과 Tier 3 방법론에 의한 이산화탄소(CO₂) 총배출량을 나타낸 것이다. Tier 1 방법론은 주기관의 부하 변동을 고려하지 않기 때문에 배출량이 일정하며 Tier 3 방법론은 주기관 부하 변동에 따라 산정되는 온실가스량이 달라지기 때문에 부하가 높아질수록 이산화탄소(CO₂) 배출량이 증가하는 것을 알 수 있다. Figure 6은 Maneuvering mode에서 주기관의 부하 변동에 따른 이산화탄소(CO₂) 배출량을 나타낸 것으로 Figure 5와 비교하면 그 차이가 미미하다는 것을 알 수 있다. 다만, 이와 같은 결과 분석에 있어 중요하게 고려되어야 할 점은 선박 운항 상태에 따라 주기관이 항상 일정한 부하로 운전되지 않는다는 것이다. 실제 선박은 기상상태와 기관의 성능 등 다양한 조건에 따라 부하를 가감한다. 본 연구에서는 이러한 모든 조건을 고려하여 온실가스 배출량을 계산할 수 없으므로 운항 상태에 따른 고정 부하로서 배출량을 산정하였다.

Cruising mode에서 주기관 부하 변동이 온실가스 배출량에 많은 영향을 미치는 이유는 Cruising mode 운항시간이

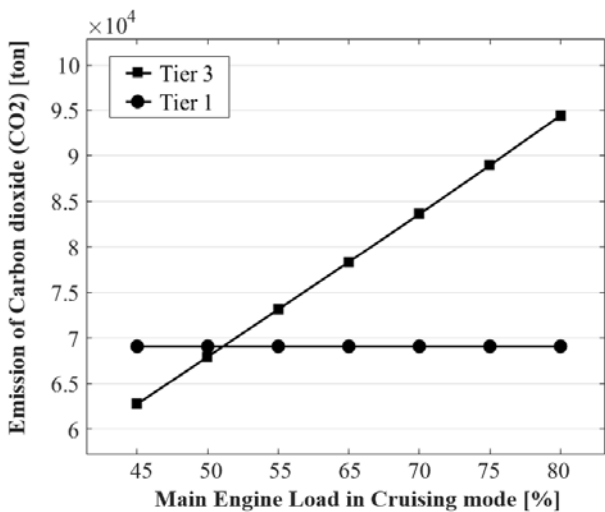


Figure 5: CO₂ emissions of main engine in cruising mode

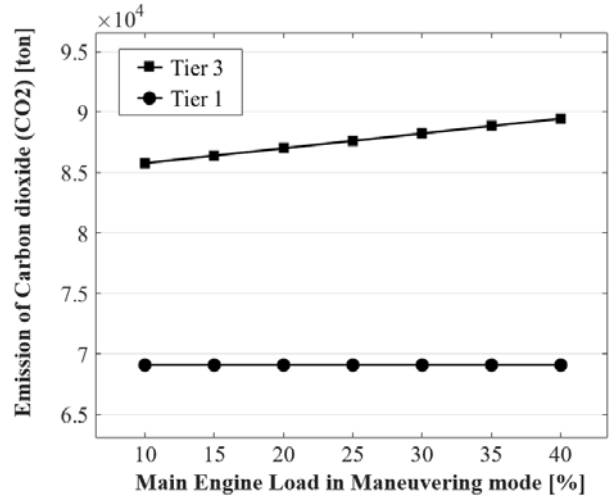


Figure 6: CO₂ emissions of main engine in maneuvering mode

다른 운항 상태와 비교하여 상대적으로 길고 주기관의 정격출력 자체가 다른 기기보다 크기 때문이다. 따라서, Tier 3 방법론에 따른 온실가스 배출량을 산정할 때 주기관의 부하 변동이 막대한 영향을 미치므로 이에 관한 정확한 자료 조사가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

3.3 발전기 부하 변동에 따른 온실가스 배출량

Figure 7은 Tier 1과 Tier 3 방법론에 의한 선박의 각 운항상태에서 발전기 부하 증가에 따라 선박으로부터 발생하는 이산화탄소(CO₂) 총배출량을 나타낸 것이다. 그 결과로 Cruising mode와 Hotelling mode에서 발전기의 운전 부하가 높아질수록 온실가스 배출량이 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 Maneuvering mode에서는 발전기의 부하 변동에 따른 영향이 크지 않음을 보인다. 이러한 결과는 각 운항상태의 운항시간과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 운항시간이 가장 긴 Cruising mode에서 발전기의 부하

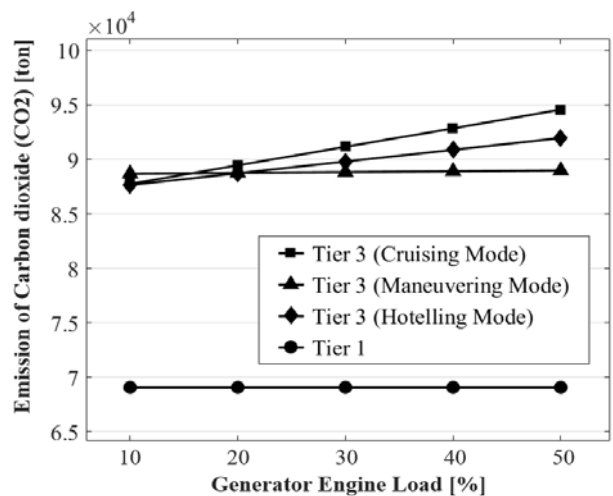


Figure 7: CO₂ emissions according to the change of generator engine load in each ship operation mode

가 높아질수록 온실가스 배출량이 증가하고 Hotelling mode와 Maneuvering mode 순으로 배출량의 증가 폭이 감소한다.

발전기의 정격출력은 주기관과 비교하여 약 10% 정도로 작으므로 발전기 부하 변동이 온실가스 총배출량에 미치는 영향은 미미하다. 또한, 앞서 언급한 주기관 부하 변동에 따른 결과 분석에서와같이 선박 운항상태에 따라 발전기 역시 항상 일정한 부하로 운전되지 않는다는 사실을 고려해야 한다. 하지만 온실가스 배출량 산정에 있어 기기 성능 및 운항 조건에 따라 상시 변동하는 발전기 운전 부하를 모두 고려할 수 없으므로 본 계산에서는 운항상태에 따른 고정 부하를 적용하였다.

4. 결론

본 연구는 동일한 하나의 선박을 대상으로 Tier 1과 Tier 3 방법론에 따른 선박 부문의 온실가스 배출량을 산정하기 위해 Matlab/Simulink (v.2016a) 프로그램을 활용하여 모델링을 구성하였으며, 이를 통해 Tier 3 방법론의 구성 요인 중, 주기관과 발전기의 부하율 변화에 따른 온실가스 배출량 결과를 비교 분석하였다. 그 결과, 본 해석대상과 계산 조건 및 범위 내에서 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 선박의 상세 운항자료를 기반으로 배출량을 산정하는 Tier 3 방법론에 따른 온실가스 배출량이 90,399 tonCO_{2e}으로써 단순히 소모된 연료량과 배출계수만을 바탕으로 산정하는 Tier 1 방법론에 의한 결과인 70,195 tonCO_{2e} 보다 약 25% 높게 나타났다. 이러한 차이의 가장 큰 요인은 Tier 3 방법론에 따른 계산 시 적용된 Cruising mode의 주기관 부하인 것으로 확인되었다.
- (2) Tier 3 방법론에 따른 각 운항상태에서의 이산화탄소(CO₂) 총배출량을 분석한 결과, 선박이 정지상태인 Hotelling mode에서 발전기 운전으로 인한 온실가스가 향해 증인 Cruising mode에서 발생하는 온실가스 못지 않게 배출되는 것으로 확인되었다. 따라서 선박 부문 온실가스 저감을 위해 항만에 계류중인 선박의 발전기로부터 발생하는 온실가스 배출량 관리가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) Tier 3 방법론에 의한 온실가스 배출량 산정에서 주기관 및 발전기 부하 변동에 따른 이산화탄소(CO₂) 총배출량을 분석한 결과, 주기관 부하 변동이 총배출량에 많은 영향을 미쳤으며, 상대적으로 발전기 부하의 영향은 미미한 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 온실가스 배출량 산정 시 운항상태에 따라 주기관과 발전기의 고정 부하를 계산에 적용하였지만, 실제 선박 운항에서 운항상태에 따라 주기관과 발전기가 항상 일정한 부하로 운전되지 않는다는 사실을 고려하면, 좀 더 정확한 온실가스 배출량 산정을 위해 주기관 부하

변동에 관한 정확한 자료가 확보되도록 체계적인 시스템이 구축될 필요성이 있다고 생각된다.

(4) 선박은 자동차와는 달리 정지한 상태에서도 전기를 생산하기 위해 발전기를 운전하며 온실가스를 배출하게 된다. 이처럼 선박 고유의 여러 운항 특성을 기반으로 선박 부문의 정확한 온실가스 배출량 산정방법이 필요하다. 본 연구는 하나의 선박을 대상으로 Tier 1과 Tier 3 방법론에 따라 산정된 온실가스 배출량을 분석하였지만, 좀 더 정확한 계산을 위해서는 다양한 선종 및 크기에 따른 충분한 자료를 바탕으로 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Author Contributions

Conceptualization, D. J. Hwang; Methodology, D. J. Hwang; Software, D. J. Hwang; Validation, D. J. Hwang; Formal Analysis, D. J. Hwang; Investigation, D. J. Hwang; Resources, D. J. Hwang; Data Curation, D. J. Hwang; Writing—Original Draft Preparation, D. J. Hwang; Writing—Review & Editing, D. J. Hwang; Visualization, D. J. Hwang; Supervision, D. J. Hwang; Project Administration, D. J. Hwang; Funding Acquisition, D. J. Hwang.

References

- [1] Resolution MEPC.304(72) INITIAL IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, <http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-%28MEPC%29/Documents/MEPC.304%2872%29.pdf>, Accessed December 17, 2018.
- [2] Main Business Content on Korea Environment Corporation Homepage, <http://www.keco.or.kr/kr/business/climate/contentsid/1520/index.do>, Accessed December 17, 2018.
- [3] T. H. Kim, S. I. Lee, Y. I. Kim, and J. H. Rho, "Comparison study of generated greenhouse gas (GHG) amount estimation from road transportation," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 58, no 9, pp. 67-73, 2010 (in Korean).
- [4] C. K. Bong, S. J. Park, Y. G. Kim, I. H. Lee, H. K. Lee, and U. H. Hwang, "A study on the calculation of GHG emissions from general ships by tier 3 method," *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, vol. 33, no 10, pp. 701-708, 2011 (in Korean).
- [5] S. D. Lee, D. K. Koh, and S. H. Jung, "A study on the greenhouse gas emission from ships with training ship HANBADA," *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, vol. 38, no 3, pp. 240-245, 2014

(in Korean).

- [6] J. S. Kim, Calculation method of pollutant emissions from domestic ships, Technical Report 11-1480523-002494-01, Department of Traffic Environment Institute, National Institute of Environmental Research, 2015 (in Korean).
- [7] Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, and Kiyoto Tanabe, Chapter 3. Mobile Combustion, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, ISBN 4-88788-032-4, The Institute for Global Environmental Strategies (IGES), The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006.
- [8] Rumesh H. Merien-Paul, Hossein Enshaei, and Shantha Gamini Jayasinghe, “In-situ data vs. bottom-up approaches in estimations of marine fuel consumptions and emissions,” *Transportation Research Part D*, vol. 62, pp. 619-632, 2018.
- [9] The Kyoto Protocol, <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol>, Accessed December 20, 2018.
- [10] IMO Document MEPC 67/INF.3 Third IMO GHG Study 2014 - Final Report, <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC%2067-INF.3%20-%20Third%20IMO%20GHG%20Study%202014%20-%20Final%20Report%20%28Secretariat%29.pdf>, Accessed December 20, 2018.
- [11] Carlo Trozzi and Riccardo De Lauretis, EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016 (Technical guidance to prepare national emission inventory), ISBN 978-92-9213-806-6, European Environment Agency, 2016.
- [12] J. P. Jalkanen, L. Johansson, J. Kukkonen, A. Brink, J. Kalli, and T. Stipa, “Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide,” *Journal of Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 12, pp. 2641-2659, 2012.