



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

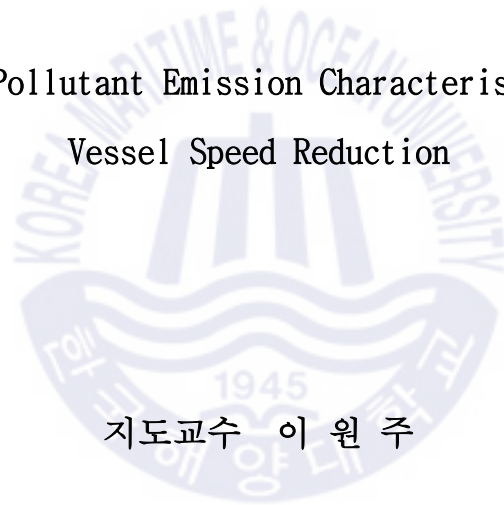
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

선박 저속운항에 따른 선박 대기오염 물질  
배출 영향에 관한 연구

A Study on Air Pollutant Emission Characteristics of Ships by  
Vessel Speed Reduction



지도교수 이원주

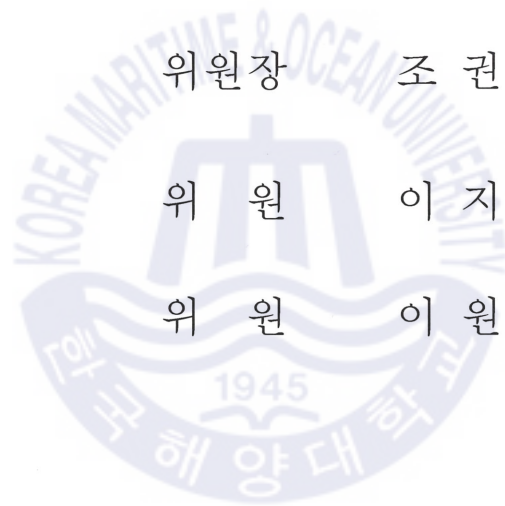
2020년 2월

한국해양대학교 대학원

기관공학과

조성철

본 논문을 조성철의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 조 권 회

위 원 이 지 응

위 원 이 원 주



2019년 12월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

|   |     |
|---|-----|
| List of Tables .....                          | iii |
| List of Figures .....                         | iv  |
| List of Abbreviations .....                   | vi  |
| Abstract .....                                | vii |
| <br>  |     |
| 1. 서 론 .....                                  | 1   |
| 1.1 연구 배경 .....                               | 1   |
| 1.2 연구 목적 .....                               | 3   |
| <br>  |     |
| 2. 선박으로부터의 대기오염물질 배출 규제 동향 및 저감기술 .....       | 4   |
| 2.1 질소산화물(NO <sub>x</sub> ) .....             | 4   |
| 2.1.1 IMO의 NO <sub>x</sub> 배출 규제 .....        | 4   |
| 2.1.2 NO <sub>x</sub> 배출 저감기술 .....           | 6   |
| 2.2 황산화물(SO <sub>x</sub> ) .....              | 9   |
| 2.2.1 IMO의 SO <sub>x</sub> 배출 규제 .....        | 9   |
| 2.2.2 SO <sub>x</sub> 배출 저감기술 .....           | 10  |
| 2.2.3 지역별 SO <sub>x</sub> 배출 규제 .....         | 16  |
| 2.3 온실가스(GHG) .....                           | 21  |
| 2.3.1 IMO의 CO <sub>2</sub> 배출 규제 .....        | 21  |
| 2.3.2 GHG 저감을 위한 후보조치 .....                   | 23  |
| 2.4 미세먼지(PM) .....                            | 24  |
| 2.4.1 미세먼지 배출 규제 .....                        | 24  |
| 2.4.2 PM 저감기술 .....                           | 25  |
| 2.5 선박 저속운항을 포함한 대기오염물질 배출 저감을 위한 기타 방안 ..... | 26  |
| 2.5.1 선박 저속운항을 통한 배출물 저감 .....                | 26  |
| 2.5.2 운항개선 방안 등 기타방안 .....                    | 27  |
| 2.5.3 대한민국 정부의 항만 대기질 개선을 위한 특별법 .....        | 27  |

|   |    |
|---|----|
| <b>3. 선박 대기오염물질 배출 저감을 위한 인센티브 제도 및 선박 저속운항 해외 사례</b> ..... | 29 |
| 3.1 인센티브 제도 .....   | 30 |
| 3.1.1 친환경선박지표(ESI) .....                                    | 30 |
| 3.1.2 저유황유 사용 .....   | 33 |
| 3.1.3 선박 저속운항(Vessel Speed Reduction) .....                 | 35 |
| 3.1.4 데이터 보고 .....  | 36 |
| 3.2 선박 저속운항 관련 해외사례 분석 .....                                | 37 |
| 3.2.1 미국 로스엔젤레스항 및 롱비치 항 .....                              | 37 |
| 3.2.2 뉴욕/뉴저지 항 .....  | 38 |
| 3.2.3 샌디에고항 .....   | 40 |
| 3.2.4 샌프란시스코 및 산타바바라 해협 .....                               | 41 |
| <b>4. 선박 저속운항을 통한 선박 배출가스 영향성 분석</b> .....                  | 42 |
| 4.1 선박 저속운항을 통한 선박별 특성 연구 .....                             | 42 |
| 4.1.1 대기오염물질 배출계수 .....                                     | 42 |
| 4.1.2 실선 VSR 실증 연구 .....                                    | 45 |
| 4.2 대기오염 물질 저감 영향성 분석 .....                                 | 49 |
| 4.2.1 6단계 5해리 구분방법(컨테이너선) .....                             | 49 |
| 4.2.2 4단계 20해리 구분방법(오일탱커선) .....                            | 52 |
| 4.2.3 부산항 선박 데이터 연구 .....                                   | 54 |
| 4.3 결과 및 고찰 .....   | 61 |
| <b>5. 결    론</b> .....                                      | 62 |
| <b>참고문헌</b> .....   | 64 |

## List of Tables

|  |    |
|--|----|
| Table 1.1 Comparison of air pollutant emissions in main port area(2015) .. | 2  |
| Table 2.1 IMO NOx requirement .....  | 5  |
| Table 2.2 IMO SOx requirement .....  | 9  |
| Table 2.3 Ports of prohibited from discharge scrubber cleaning water ....  | 19 |
| Table 3.1 Research method .....  | 29 |
| Table 3.2 ESI participated ports and their incentives .....                | 31 |
| Table 3.3 Tax incentive for data reporting .....                           | 36 |
| Table 3.4 CVI incentives .....   | 39 |
| Table 4.1 Emission factor for non-road transport .....                     | 42 |
| Table 4.2 Emission factor for non-road transport 2 .....                   | 43 |
| Table 4.3 Emission factor for air pollutant .....                          | 44 |
| Table 4.4 Emission factor for air pollutant 2 .....                        | 45 |
| Table 4.5 Fuel consumption and air pollutant emissions .....               | 49 |
| Table 4.6 Fuel consumption and air pollutant emissions 2 .....             | 53 |
| Table 4.7 Ships operating in Busan port .....                              | 55 |
| Table 4.8 EPA emission factors for diesel engines .....                    | 57 |
| Table 4.9 Estimated emission for each ship types .....                     | 57 |
| Table 4.10 Estimated emission for each ship types with VSR program ....    | 58 |
| Table 4.11 Comparison table with or without VSR .....                      | 59 |
| Table 4.12 Emissions by operating time in 20 miles VSR zone .....          | 60 |

## List of Figures

|   |    |
|---|----|
| Fig. 2.1 NO <sub>x</sub> emission control area .....  | 5  |
| Fig. 2.2 Installation example of M/E SCR .....  | 6  |
| Fig. 2.3 Installation example of G/E SCR .....  | 7  |
| Fig. 2.4 Principles of EGR .....  | 7  |
| Fig. 2.5 SO <sub>x</sub> emission control area .....  | 10 |
| Fig. 2.6 Expectation of bunker price change .....   | 11 |
| Fig. 2.7 Available options to meet 2020 sulphur limit .....   | 11 |
| Fig. 2.8 Open loop scrubber system .....  | 12 |
| Fig. 2.9 Arrangement of open loop scrubber system .....   | 13 |
| Fig. 2.10 Closed loop scrubber system .....   | 13 |
| Fig. 2.11 Arrangement of closed loop scrubber system .....  | 14 |
| Fig. 2.12 Hybrid scrubber system .....  | 14 |
| Fig. 2.13 Arrangement of hybrid scrubber system .....   | 15 |
| Fig. 2.14 California low sulphur regulation affected area .....   | 16 |
| Fig. 2.15 Hong Kong waters .....  | 17 |
| Fig. 2.16 China ECA .....   | 18 |
| Fig. 2.17 Report of black carbon measurement methods and emission factors from ships (ICCT, 2017) ..... | 24 |
| Fig. 2.18 The relationships between fuel consumption and ship speed ..                                  | 27 |
| Fig. 3.1 Singapore PAN program .....  | 34 |
| Fig. 3.2 Active VSR incentives by ports .....   | 35 |
| Fig. 3.3 LA & LB VSR zone .....   | 37 |
| Fig. 3.4 LA VSR summary report 2018 .....   | 38 |
| Fig. 3.5 NY/NJ CVI zone .....   | 39 |
| Fig. 3.6 San Diego VSR zone .....   | 40 |

|   |    |
|---|----|
| Fig. 3.7 San Francisco VSR zone .....                             | 41 |
| Fig. 3.8 Santa Barbara chanel VSR zone .....                      | 41 |
| Fig. 4.1 6 Step 5 miles speed change method .....                 | 46 |
| Fig. 4.2 Trial location for the container vessel .....            | 47 |
| Fig. 4.3 4 Step 20 miles speed change method .....                | 48 |
| Fig. 4.4 Trial location for the oil tanker .....                  | 48 |
| Fig. 4.5 Fuel consumption by consumer .....                       | 50 |
| Fig. 4.6 Air pollutant emissions for 1 <sup>st</sup> voyage ..... | 51 |
| Fig. 4.7 Air pollutant emissions for 2 <sup>nd</sup> voyage ..... | 51 |
| Fig. 4.8 Air pollutant emissions for 3 <sup>rd</sup> voyage ..... | 51 |
| Fig. 4.9 Air pollutant emissions for 4 <sup>th</sup> voyage ..... | 52 |
| Fig. 4.10 Fuel consumption by consumer .....                      | 53 |
| Fig. 4.11 Air pollutant emissions (kg/h) .....                    | 54 |
| Fig. 4.12 Average speed of each ship types .....                  | 56 |
| Fig. 4.13 Propeller speed performance .....                       | 58 |



## List of Abbreviations

|                 |   |
|-----------------|---|
| AIS             | Automatic Identification System                                     |
| CCAC            | Climate & Clean Air Coalition                                       |
| CMS             | Continuous Monitoring System  |
| CVI             | Clean Vessel Incentive program                                      |
| DCS             | Data Collection System  |
| ECA             | Emission Control Area   |
| EEDI            | Energy Efficiency Design Index                                      |
| EGCS            | Exhaust Gas Cleaning System   |
| EGR             | Exhaust Gas Recirculation   |
| ESI             | Environmental Ship Index  |
| GHG             | Green House Gas   |
| GPP             | Green Port Program  |
| IAPH            | International Association of Ports and Harbors                      |
| ICCT            | International Council on Clean Transportation                       |
| IMO             | International Maritime Organization                                 |
| MARPOL          | International Convention for the Prevention of Pollution from ships |
| MBM             | Market Based Measure  |
| MEPC            | Marine Environmental Protection Committee                           |
| MGO             | Marine Gas Oil  |
| MGO             | Marine Diesel Oil   |
| NO <sub>x</sub> | Nitrogen Oxides   |
| OPS             | Onshore Power Supply  |
| PM              | Particulate Matter  |
| SCR             | Selective Catalytic Reduction                                       |
| SEEMP           | Ship Energy Efficiency Management Plan                              |
| SFC             | Specific Fuel Consumption   |
| SO <sub>x</sub> | Sulphur Oxides  |
| UNFCCC          | United Nations Framework Convention on Climate Change               |
| VSR             | Vessel Speed Reduction  |
| Wet-ESP         | Wet electrostatic precipitator                                      |

# A Study on Air Pollutant Emission Characteristics of Ships by Vessel Speed Reduction

Sungchul Jo

*Department of Marine Engineering  
Graduate School of  
Korea Maritime and Ocean University*

## Abstract

Recently, with increasing interest in environmental, human and social hazards caused by air pollution, regulations are being strengthened to prevent air pollution, and IMO is also working to reduce air pollutants from ships.

Efforts to reduce air pollutant emissions from ships include not only tightening regulations, but also countries and ports implementing incentives based on voluntary participation of ships, such as use of onshore power supply, vessel speed reduction or use of low sulfur fuel oil.

Recently, air pollutants generated from ships are attracting attention as a major cause of national air pollution as well as in ports and communities near the ports where ships enter and leave frequently. The "special act on air quality improvement, including

port areas" was enacted and is expected to be implemented on January 1, 2020.

It is important to reinforce regulations of ships, but also I think it is necessary to study and review incentive system based on overseas cases.

This study examines international and regional air pollution regulations for NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, GHG, PM, etc and national incentive systems. And examines changes in ship emissions through Vessel Speed Reduction among incentives to reduce air pollutants. The actual cases were examined and their impact was evaluated.

The ultimate goal of this study is to look at ways to minimize and effectively manage errors prior to decision making and enforcement of these management systems by focusing on emission reductions at vessel speed reduction.

First, the types of incentive schemes implemented by ports and their benefits were examined. Environmental Ship Index implemented by the International Association of ports and harbors applied to over 70 ports worldwide, Greenport Program in Singapore, Vessel Speed Reduction Program in various US ports, and Eco-ship in Panama.

For the sake of confirmation the effectiveness of VSR among several incentive schemes, the speed reduction operation of case vessels was conducted arbitrarily on the actual operating vessel, and the data was reviewed on a case-by-case basis. However, the case-by-case analysis was different. In the case of relatively short distances, it was not possible to confirm the change in fuel consumption according to the change of ship speed. On the other hand, in the case of relatively long distances, constant changes in fuel consumption and air pollutant

emissions were observed while the ship speed was changing. In light of this, the actual effect of VSR needs to be measured over a distance of 20 nautical miles.

In addition, the ship's automatic identification system (AIS) data was obtained for vessels entering and leaving Busan port from February to May 2019 to examine the characteristics of each vessel. In order to analyze the air pollutant emission pattern, the fuel consumption was estimated and the emission was calculated when operating at the average speed of each ship type and reduced speed of the ship with Busan port data. As a result, the emission reduction efficiency according to the low speed operation of the ship was confirmed on the all vessels and the largest reduction effect in the container ship, and relatively small in the general cargo ship.

However, when the ship's speed reduction program is applied, the operation time is extended due to the limitation of the ship's speed. The results showed little change. This seems to be because the ship's emissions are compared with the estimated value proportionally, and therefore, it is necessary to collect and review the data of the actual operating ship.

In addition, it is necessary for the government who make the policy decision about the VSR management system to conduct vessel speed reduction at sufficient distance from the land in consideration of the results of this study.

**KEY WORDS:** NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, GHG, PM, Incentive, Vessel Speed Reduction

# 선박 저속운항에 따른 선박 대기오염 물질 배출 영향에 관한 연구

조 성 철

한국해양대학교 대학원  
기관공학과

## 초록

최근 전 세계적으로 대기오염으로 인한 환경, 인체 및 사회적 유해성에 대한 관심이 증가되면서 대기오염 방지를 위한 규정들이 강화되고 있으며, IMO 에서도 선박으로부터의 대기오염물질 저감을 위해 노력하고 있다.

선박으로부터의 대기오염물질 배출 저감을 위한 노력에는 규정 강화뿐 아니라 육상전력 사용, 선박 저속운항 또는 저유황유 사용 등 선박의 자발적 참여를 기반으로 하는 인센티브 제도를 시행하는 국가·항만들도 있다.

최근 국내에서도 선박으로부터 발생하는 대기오염물질이 선박의 입출항이 잦은 항만과 항만 인근 지역사회는 물론 국가 대기오염의 주요 원인으로 주목되고 있다. 이에 「항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법」이 제정되어 2020년 1월 1일 시행을 앞두고 있다.

법을 통한 선박 규제 강화도 좋지만 해외 사례 등을 면밀히 검토 후 이에 따른 인센티브 제공 방안들에 대한 연구가 이루어질 필요성이 있다고 본다.

본 연구에서는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, GHG, PM 등에 대한 국제·지역별 대기오염 규정

및 국가별 인센티브 제도를 고찰해보고 대기오염물질 저감을 위한 인센티브 제도 중 선박 저속운항(Vessel Speed Reduction)을 통한 선박의 배출량 변화를 실제 사례를 통해 살펴보고 이에 대한 영향성을 평가하였다.

저속운항에 따른 배출가스 저감에 초점을 맞추므로서 이러한 관리체계 정책 결정 및 집행 이전에 오류를 최소화하고 효과적으로 관리하기 위한 방안을 살펴보는 것이 본 연구의 궁극적 목적이다.

우선 항만별로 시행하고 있는 인센티브 제도의 종류와 그 혜택들을 살펴보았다. 국제항만협회에서 시행하고 전 세계 70개 이상 항만에서 적용하고 있는 친환경선박지표, 싱가포르에서 시행하고 있는 그린포트 프로그램, 미국 여러 항구에서 시행하고 있는 선박 저속운항 프로그램 및 파나마의 Eco-ship 제도 등이 있다.

여러 인센티브 제도 중 선박 저속운항의 효과성을 확인하고자 실제 운항 선박에서 임의로 선박 저속운항을 시행하고 케이스별로 데이터를 검토 하였다. 케이스 별 분석 결과는 상이했다. 비교적 단거리로 나눠 시행한 케이스에서는 선속 변화에 따라 특정할만한 연료소모량 변화 추이를 확인할 수 없었던 반면, 상대적으로 장거리로 나눠 시행한 케이스에서는 선속이 변하는 동안 연료소모량 및 대기오염물질 배출량이 줄어드는 일정한 변화가 관찰됐다. 이를 감안할 때 VSR의 실제적인 효과에 대해서는 20해리 정도의 긴 거리를 두고 측정할 필요가 있다고 보여 진다.

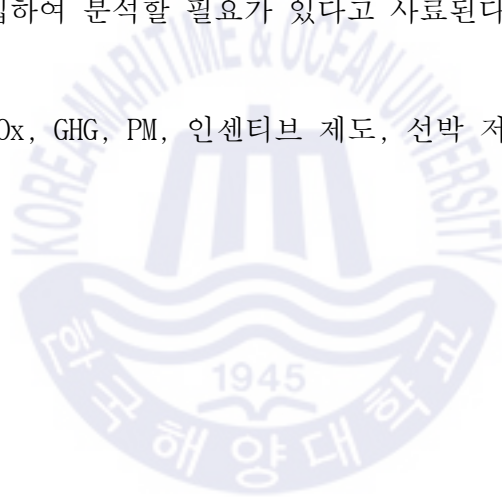
추가적으로 2019년 2월부터 5월까지 부산항을 입·출항한 선박에 대한 선박 자동식별장치(AIS) 데이터를 확보해 선박별 운항 특성을 살펴보았다. 선박 저속운항에 따른 대기오염물질 배출 패턴을 분석해 보고자 선종별 평균속도로 운항할 때 그리고 선박 저속운항 시의 선종별 연료소모량 및 배출량을 산정하였다. 그 결과 선박 저속운항에 따른 배출량 저감은 모든 선박에서 확인되었으며, 저감 효율은 컨테이너선에서 가장 컸고, 상대적으로 일반화물선에서 저감 효과가 적음을 확인하였다.

하지만 선박 저속운항 프로그램 적용 시에는 운항속도 제한에 따라 운항

시간이 연장되므로 운항 시간에 따른 배출량을 산정해 본 결과 변화가 거의 없어 보였다. 이는 선박 배출량을 비례적으로 산정된 추정 값으로 비교하였기 때문이라고 보여지며, 따라서 실제 운항 선박의 연료소모량과 운항지연 시간, 부하별 배출량 변화 등을 종합적으로 수집하여야만 보다 정확한 배출량 산정이 가능할 것이다.

선박 저속운항 관리체계 정책 결정을 하는 정부 입장이라면 이 연구의 결과를 고려하여 육지로부터 충분한 거리를 두고 저속운항을 시행하는 것이 필요해 보이며, 컨테이너선은 반드시 포함하여 시행 및 독려가 필요하다고 보여진다. 또한 효과적인 관리를 위해서는 향후 실제 운항 선박의 데이터를 종합적으로 수집하여 분석할 필요가 있다고 사료된다.

**KEY WORDS:** NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, GHG, PM, 인센티브 제도, 선박 저속운항



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

20세기 후반부터 전 세계적으로 대기오염으로 인한 환경, 인체 및 사회적 유해성에 대한 관심이 증가되면서 모든 분야에서 대기오염을 방지하기 위한 규정들을 강화해 왔다.

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서도 선박으로부터 배출되는 대기오염물질 저감을 위해 해양환경보호위원회(MEPC)에서 ‘선박으로부터의 대기오염 방지를 위한 규정’인 1997 의정서(MARPOL 부속서 6)를 결의하였으며 비준 및 발효 절차에 따라 2005년 9월 발효되었다.

선박으로부터 배출되는 대기오염물질의 영향성이 큰 일부 지역은 배출통제구역(Emission Control Area, ECA)으로 지정하여 강화된 배출 기준을 적용하고 있다. 또한 일부 국가 또는 항만별로 별도의 규정을 시행하는 국가들도 있으며 최근에는 이런 별도의 배출규제를 시행하는 국가항만들이 늘어나고 있는 추세이다.

하지만 선박으로부터의 대기오염물질 배출 저감을 위한 노력에는 규정 강화만 있는 것이 아니라 육상전력 사용, 선박 저속운항 또는 저유황유 사용 등 선박의 자발적 참여를 기반으로 하는 인센티브 제도를 시행하는 국가항만들도 있다.

최근 국내에서도 선박으로부터 발생하는 대기오염물질이 선박의 입출항이 잦은 항만과 항만 인근 지역사회는 물론 국가 대기오염의 주요 원인으로 주목되고 있다.



Table 1.1에서 보여 주듯이, 주요 항만을 포함하는 부산, 인천, 울산 등에서 대기오염물질 배출이 두드러지게 나타나고 있으며, 특히 부산의 경우 전체 배출량 대비 선박의 684 배출량 비중이 질소산화물 41.1%, 황산화물 70.2%, 미세먼지 15.5%, 초미세먼지 37.8%로 나타난다[1].

Table 1.1 Comparison of air pollutant emissions in main port area (2015)

|                             |      | (단위 : 1,000 kg) |         |                  |                   |           |
|-----------------------------|------|-----------------|---------|------------------|-------------------|-----------|
| 구분                          |      | NOx             | SOx     | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | VOC       |
| 전체 배출량                      | 부산시  | 43,755          | 10,659  | 6,607            | 2,458             | 42,207    |
|                             | 인천시  | 49,460          | 12,854  | 8,292            | 2,730             | 54,211    |
|                             | 울산시  | 47,506          | 47,979  | 5,910            | 2,987             | 98,781    |
|                             | 전라남도 | 104,037         | 64,649  | 33,854           | 16,140            | 85,226    |
|                             | 전국   | 1,157,728       | 352,292 | 233,177          | 98,806            | 1,010,771 |
| 선박 배출량                      | 부산시  | 17,997          | 7,487   | 1,022            | 928               | 854       |
|                             | 인천시  | 3,873           | 1,584   | 237              | 217               | 544       |
|                             | 울산시  | 8,147           | 3,468   | 464              | 421               | 288       |
|                             | 전라남도 | 15,225          | 6,172   | 875              | 797               | 1,196     |
|                             | 전국   | 151,735         | 38,467  | 7,091            | 6,539             | 20,970    |
| 전체 배출량 대비<br>선박 배출비중<br>(%) | 부산시  | 41.1            | 70.2    | 15.5             | 37.8              | 2.0       |
|                             | 인천시  | 7.8             | 12.3    | 2.9              | 7.9               | 1.0       |
|                             | 울산시  | 17.2            | 7.2     | 7.9              | 14.1              | 0.3       |
|                             | 전라남도 | 14.6            | 9.5     | 2.6              | 4.9               | 1.4       |
|                             | 전국   | 13.1            | 10.9    | 3.0              | 6.6               | 2.1       |

이에 「항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법안」이 2019년 4월 2일 국회 본회의를 통과하여 제정되었으며 2020년 1월 1일 시행을 앞두고 있다.

특별법의 적용 범위는 「항만법」에 따른 항만구역, 「어촌·어항법」에 따른 어항구역, 「영해 및 접속 수역법」에 따른 영해·내수·접속수역이며, 선박의 운항과 하역·내륙운송 과정의 주요 배출원인 선박, 하역장비, 자동차 등에 대한 엄격하고 체계적인 관리 및 규제사항을 규정하고 있다.

특히, 대기오염이 심한 지역 등을 ‘항만 대기질 관리구역’으로 지정하고, 배출규제해역, 선박 저속운항에 따른 인센티브 제도 도입, 환경 친화적 선박 조달 의무, 경유 자동차 운행제한 등 보다 강화된 기준을 적용하도록 하였다.

그 중에서도 선박 저속운항을 통한 인센티브 제도의 도입과 관련하여 우리나라는 선박 저속운항 관련 경험이 아직 없으며, 전 세계적으로도 강제 규정이

아닌 선박의 자발적 참여를 기반으로 시행하고 있기 때문에, 다소 생소한 선박 저속운항 프로그램을 본 연구를 통해 좀 더 깊이 있게 들여다보고자 한다. 인센티브 제도 또한 여러 인센티브 제도를 시행하고 있는 해외 사례 등을 면밀히 검토 후 이에 따른 인센티브 제공 방안들에 대한 연구가 이루어질 필요성이 있다.

현재 우리나라를 포함한 많은 국가들에서는 별도의 항만 대기오염규제 또는 인센티브 제도를 시행하고 있지 않은 상태이다. 따라서 지역별 대기오염물질 규정 또는 인센티브 제도를 검토하는 작업은 향후 유사 정책 개발 시 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 1.2 연구 목적

본 연구에서는 국제·지역별 대기오염 규정 및 국가별 인센티브 제도를 고찰해보고 대기오염물질 저감을 위한 인센티브 제도 중 선박 저속운항(VSR, Vessel Speed Reduction)을 통한 선박의 배출량 변화를 실제 사례를 통해 살펴보고 이에 대한 영향성을 평가하고자 한다.

이를 위해 선박 활동 자료 수집 및 분석, 선박 저속운항 프로그램 관련 해외 사례 분석 그리고 최종적으로 선박 저속운항을 통한 실제 배출가스 영향성을 연구하고자 한다.

그 동안의 연구는 주로 선박 저속운항으로 인한 운항비 절감, 효율 향상에 포커스가 맞춰졌다면, 이 연구는 저속운항에 따른 배출가스 저감에 초점을 맞추므로써 이러한 관리체계 정책 결정 및 집행 이전에 오류를 최소화하고 효과적으로 관리하기 위한 방안을 살펴보는 것이 본 연구의 궁극적 목적이다.

## 제 2 장 선박으로부터의 대기오염물질 배출 규제 동향 및 저감 기술

### 2.1 질소산화물(NOx)

#### 2.1.1 IMO의 NOx 배출 규제

국제해사기구 해양환경보호위원회(MEPC)가 1997년 MARPOL 97 의정서를 채택함으로써 MARPOL 부속서 6이 신설되었다. 이후 2008년에 NOx 및 SOx 배출 요건을 강화하는 MARPOL 부속서 6 개정 및 NOx 코드를 제정하기로 결정 하였다[2].

2008년 강화된 NOx 배출 요건에는 다음과 같은 것들이 있다.

- NOx 배출 기준 Tier II 및 III 가 새롭게 추가
- 현존 디젤엔진의 NOx Tier I 소급적용 기준 마련(출력 5,000 kW 및 실린더 용적 90리터 이상 엔진에 적용)
- 주요개조 시 적용 기준 세분화
  - 동일하지 않은 엔진으로 교체 혹은 추가 설치 시 : 당시 NOx 배출 기준
  - 실질적인 변경 혹은 MCR 10% 이상 증가 시
    - : 2000.1.1. 전 건조선 - Tier I
    - : 2000.1.1. 이후 건조선 - 건조 당시 기준

#### (1) 협약 규정

- MARPOL의 질소산화물 배출 규정은 선박 건조일자를 기준으로 총 3단계로 나누어 적용된다. 선박 건조일자는 선박의 용골 거치일을 의미하며 각 단계별로 Tier I, II 및 III 이라고 부른다.
- 적용대상은 출력 130 kW를 초과하는 디젤엔진이며, 엔진의 분당회전속도 (rpm, rated engine speed)에 따라 기준이 세분된다.
- 자세한 단계별, 분당회전속도별 배출 제한치는 Table 2.1과 같다.

Table 2.1 IMO NOx requirement

| RPM<br>(n=Rated engine speed) | Tier I<br>1.1.2000 ≤ K/L<br>< 1.1.2011 | Tier II<br>1.1.2011 ≤ K/L<br>< 1.1.2016 | Tier III<br>1.1.2016 ≤ K/L; or<br>1.1.2021 ≤ K/L |
|-------------------------------|--|---|--|
| n < 130 rpm                   | 17.0 g/kWh                             | 14.4 g/kWh                              | 3.4 g/kWh  |
| 130 rpm ≤ n<br>< 2000 rpm     | 45.0.n <sup>(-0.2)</sup> g/kWh         | 44.0.n <sup>(-0.23)</sup> g/kWh         | g.n <sup>(-0.2)</sup> g/kWh                      |
| 2000 rpm ≤ n                  | 9.8 g/kWh                              | 7.7 g/kWh                               | 2.0 g/kWh  |

- 단, Tier III 의 경우 배출통제해역(ECA, Emission Control Area) 운항 시에만 적용된다.
- 배출통제해역(ECA)은 Fig. 2.1의 지도에 색으로 표시된 지역이며, 이 지역들의 Tier III 적용 기준일자는 다음과 같다.
  - : 북아메리카, 푸에르토리코 지역 - 2016년 1월 1일 이후 건조된 선박
  - : 북해, 발틱해 - 2021년 1월 1일 이후 건조된 선박

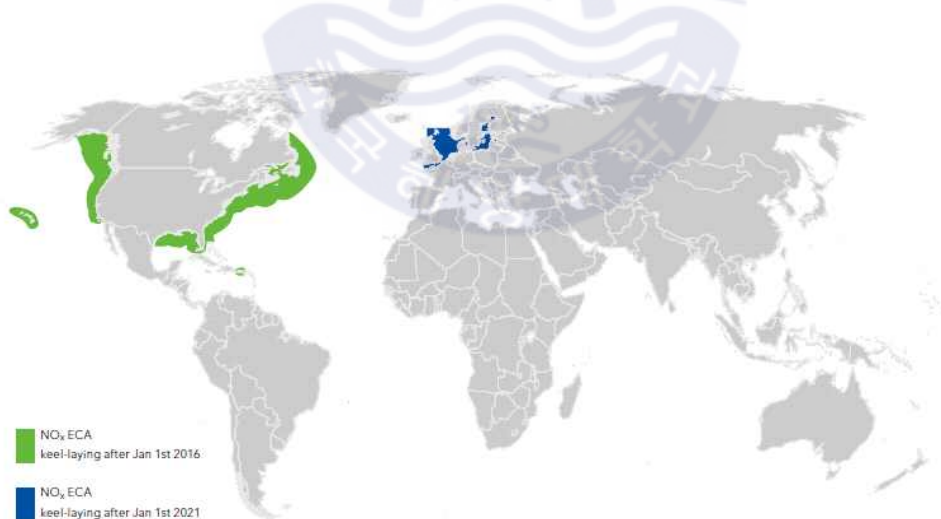


Fig. 2.1 NOx emission control area

\* IACCSEA, IMO NOx regulation, <https://www.iaccsea.com/nox/imo-nox-regulation/>

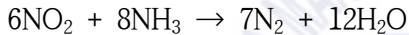
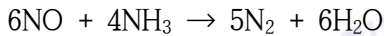
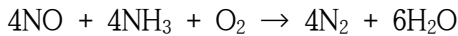
- IMO MARPOL 질소산화물 규정 전체 내용은 부록 1에서 확인할 수 있다.

## 2.1.2 NOx 배출 저감 기술

(1) SCR (Selective Catalytic Reduction) : 선택적 환원 촉매 장치

SCR은 육상에서는 육상 운송 및 산업계 전반에서 이미 사용하고 있는 검증된 기술이며, NOx 발생량의 약 80%~90% 정도를 저감하는 효과가 있다.

SCR 장치는 주입되는 환원제에 의해 질소산화물을 질소와 물로 분리하며 환원제로는 주로 요소수(urea)가 사용된다. 요소는 촉매에 흡수되기 전 활발한 환원 작용을 위해 암모니아 형태로 분해되며 기본적인 화학작용은 다음과 같다.



300℃ ~ 400℃ 사이에서 화학반응이 일어나며 온도가 너무 높을 경우 NH<sub>3</sub>는 NO 혹은 NO<sub>2</sub>와 반응하기보다는 타버릴 것이다. 온도가 너무 낮을 경우 반응이 거의 일어나지 않게 되며 암모니아 황산염의 응축으로 촉매가 손상된다. 배기가스 측에 주입되는 요소수(urea) 주입량은 엔진 부하에 따른 NOx 생성비율에 따라 전자화 되어 조절된다.

Fig. 2.2 및 Fig. 2.3은 각각 주 기관 및 발전기 엔진에 SCR를 설치한 예를 그림으로 보여준다.

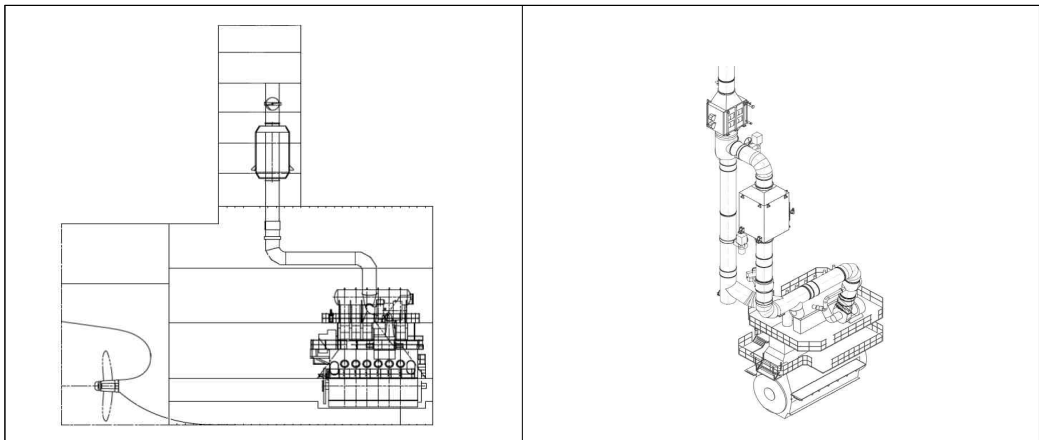


Fig. 2.2 Installation example of M/E SCR



Fig. 2.3 Installation example of G/E SCR

(2) EGR (Exhaust Gas Recirculation) : 배기가스 순환장치

Fig. 2.4는 기본적인 EGR 의 원리를 보여준다.

배기가스 순환장치(EGR)는 흡기 측으로 배기가스를 재순환 시켜 소기 내 산소포화도를 낮춰 연소실 내 최고 연소 온도를 낮춰줌으로서 NOx 발생량을 저감시키는 장치이다. NOx 발생은 연소실이 고온일 때 발생하며 온도가 높아질수록 기하급수적으로 증가한다.

EGR 시스템은 자동차 엔진에 이미 상용화 되어 쓰여지고 있지만 선박용 엔진에는 아직 개발 초기 단계이며, EGR만으로 NOx 발생량을 Tier III 기준 까지 저감할 수 있는지에 대해서는 추가적인 검증이 필요하다.

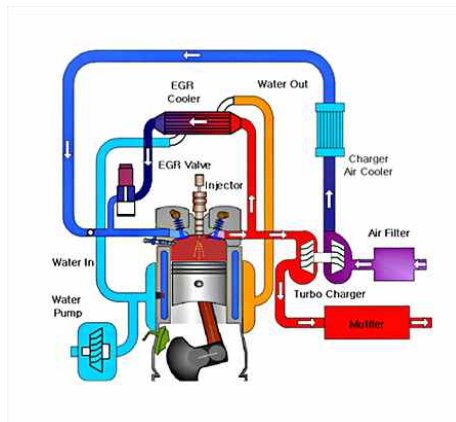


Fig. 2.4 Principles of EGR



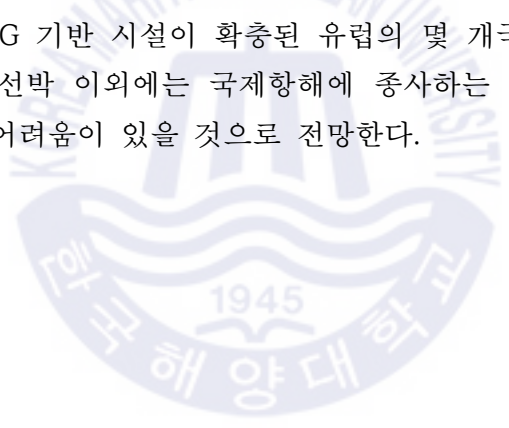
### (3) 가스연료 엔진 (Gas fuelled engine)

가스 연료 엔진의 사용은 선박으로부터의 환경 영향을 현저히 줄여준다. NOx, SOx, PM의 저감 뿐 아니라 온실가스도 약 20% 저감시키는 효과가 있다.

LNG를 선박 연료로 사용 시 장점은 첫째, 장기 공급이 가능하고 둘째, -162℃까지 냉각 시 체적이 600분의 1로 작아지며 셋째, LNG 연료는 가격 면에서도 경쟁력이 있다.

반면, LNG의 밀도와 부피당 발열량이 석유제품보다는 작아서 같은 양이라도 에너지가 작을 수 있으며, 안전문제가 우려된다. 또한 아직까지 전 세계적으로 기반시설 구축이 되어있지 않아 가스연료 수급에 한계가 있다는 점 또한 단점으로 볼 수 있다.

가스연료 엔진의 사용은 향후 전 세계 연료유 가격변동 및 각국의 LNG 병커링 시설 확충 속도에 따라 얼마나 확대 될지 예측할 수 있겠다. 하지만 현재로서는 이미 LNG 기반 시설이 확충된 유럽의 몇 개국 내에서만 운항하는 여객선이나 일부 선박 이외에는 국제항해에 종사하는 화물선에서 사용하기에는 현실적으로 어려움이 있을 것으로 전망한다.



## 2.2 황산화물(SOx)

### 2.2.1 IMO SOx 배출 규제

1997년 MARPOL 97 의정서 채택 당시, 부속서 6에서 규정하는 연료유 내 황 함유량 기준은 전 세계 4.5 % m/m 및 ECA 지역 1.5 % m/m 이었다. 이후 2008년에 NOx 및 SOx 배출 요건을 강화하는 MARPOL 부속서 6 개정을 결정하였다[3].

2008년 강화된 SOx 배출 요건에는 다음과 같은 것들이 있다

- SOx 배출 기준이 새롭게 추가됨
- 전 세계 : 4.5 % m/m → 3.5 % m/m (2012년) → 0.5 % m/m (2020년)
- ECA : 1.5 % m/m → 1.0 % m/m (2010년) → 0.1 % m/m (2015년)
- 전 세계 2020년 0.5 % m/m 황함유량 규정의 재검토조항
  - 전문가 그룹에서 검토 후 보고서 제출, 위원회에서 보고서를 바탕으로 시행이 어렵다고 판단될 시 시행일을 2025년으로 변경 가능

#### (1) 협약 규정

- 연료유 내 황함유량 기준을 간단하게 표로 정리하면 Table 2.2와 같음

Table 2.2 IMO SOx requirement

| Area   |                                   | SOx limit on fuel oil |                    |
|--------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Global |                                   | 2012.1.1.~            | 2020.1.1.~         |
|        |                                   | less than 3.5 %m/m    | less than 0.5 %m/m |
| SECA   | North sea & Baltic Sea            | 2010.7.1.~            | 2015.1.1.~         |
|        |                                   | less than 1.0 %m/m    | less than 0.1 %m/m |
|        | North American & US Caribbean sea | 2012.8.1.~            | 2015.1.1.~         |
|        |                                   | less than 1.0 %m/m    | less than 0.1 %m/m |

- 전 세계 연료유 내 황함유량 평균을 IMO 사무국에서 매년 해양환경보호위원회(MEPC)로 보고 할 것
- SOx ECA 지역(Fig. 2.5 참조) 운항 선박의 추가 요건
  - : 연료유 전환 절차서 비치



: 로그북 기재 : ECA 진입 전 연료유 전환 완료시점 및 ECA에서 나온 후 연료유 전환 시작 시점에서의 선박의 위치, 날짜, 시간 및 각 탱크의 용량



Fig. 2.5 SOx emission control area

- IMO MARPOL 황산화물 규정 전체 내용은 부록 2에서 확인할 수 있다.

## 2.2.2 SOx 배출 저감 기술

### (1) 저유황 연료유

2020년 전 세계 선박 사용 연료유 규정이 황함유량의 질량분률 0.5%로 강화되면서 규제 만족을 위한 다양한 방안들이 검토 및 논의되고 있다. 그 중 가장 대표적인 규제 만족 방법은 황함유량의 질량분률이 0.5% 이하인 저유황 연료유를 사용하는 것이다.

하지만 저유황유 사용에는 아직도 불확실성 및 잠재적 위험성이 존재하는 것이 사실이다. 이는 선박 사용 연료유 국제 기준인 ISO 8217에 황함유량 질량분률 0.5% 이하 연료유에 대한 기준이 마련되어 있지 않기 때문이다. 현재 국제표준화기구(ISO)에서는 현재 ISO 8217 최신화 작업이 진행 중에 있으며, 완료되기 전까지는 각 정유사별로 생산해 내는 저유황 연료유의 성상의 차이점이 생길 수밖에 없어 잠재적 위험성이 존재할 수밖에 없다.

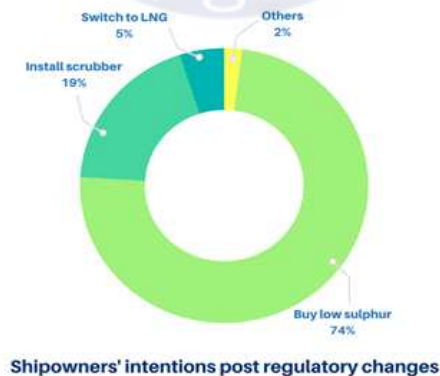
저유황유 사용에 따른 잠재적 위험성에는 혼합 연료유의 안전성, 호환성, 저온 유동성, 산도, 인화점, 발화성, 촉매분말(cat. fine) 등과 같은 사항들이 있다.

저유황 연료유의 가격 전망은 불확실 하나 전문가들은 3.5 % m/m 황함유량 연료유 가격보다 적게는 50 % 많게는 70 % 이상 높은 가격대가 형성될 것이라고 전망하고 있다. Fig. 2.6은 국제빙커업협회에서 예상한 연료유 가격변동 그래프이다.



Fig. 2.6 Expectation of bunker price change

높은 연료유 가격에도 불구하고 대다수 선주들은 저유황연료유 사용을 통해 2020년 0.5 % m/m 연료유 황함유량 규정을 만족할 것으로 예상된다. UBS 증권에서는 2018년 Fig. 2.7와 같이 2020 연료유 황함유량 규정 만족을 위한 선주의 의향을 예측.발표한 바 있다.



Source: UBS

Fig. 2.7 Available options to meet 2020 sulphur limit

## (2) 배기가스 세정장치 (EGCS, Exhaust Gas Cleaning System)

### 1) EGCS 원리 및 방식별 구분

EGCS는 배기가스 내 SOx를 포집하여 배출을 억제하는 장치로 방식에 따라 크게 건식과 습식으로 나뉠 수 있다.

건식의 경우 수산화칼슘( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )을 배기가스 내에 노출시켜 SOx와 반응, 물과 황산칼슘을 만들어 낸다. 습식 EGCS와는 달리 배기가스의 온도를 떨어뜨리지 않아 NOx 저감장치인 SCR과 함께 사용하는 것이 수월할 수 있고, 세정수를 생성하지 않는다는 장점이 있다. 하지만, 수산화칼슘과 반응의 결과물인 황산칼슘을 선내 보관하기 위한 커다란 저장소가 필요하고, 다량의 수산화칼슘을 소비하여 운영비가 비싸다는 단점이 있다.

습식은 배기가스를 물( $\text{H}_2\text{O}$ )과 반응시키는 방식이고, 이는 물의 순환방식에 따라 개방형과 폐쇄형, 이 두 방식을 접목시킨 하이브리드 방식으로 나뉜다.

개방형 EGCS(Open loop system)는 해수와 수용성인 SOx가스를 접촉시켜 화학작용을 통해 SOx를 황산으로 변환시키고, 뿌려지는 해수로 기타 오염물질을 씻어내는 방식이다. 자연적으로 알칼리성을 띠는 해수를 이용해 황산의 산성을 중화시킬 수 있고, 선내 특별한 저장고나 추가의 화학 약품이 필요치 않다는 장점이 있는 반면, EGC 장비를 빠져나온 해수는 해양오염 방지를 위해 산성도, 탁도, PAHs(다환 방향족 탄화수소), 질산염농도 등 다량의 오염물질이 포함되어 있다는 단점이 있다. Fig. 2.8은 개방형 배기가스 세정장치 시스템 개요를 그리고 Fig. 2.9는 장치의 설치 상세를 보여준다.

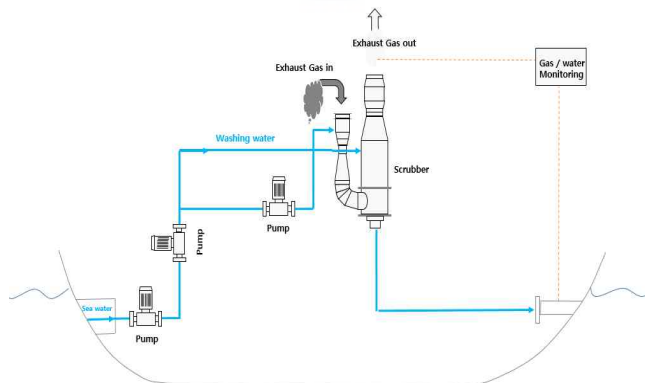


Fig. 2.8 Open loop scrubber system

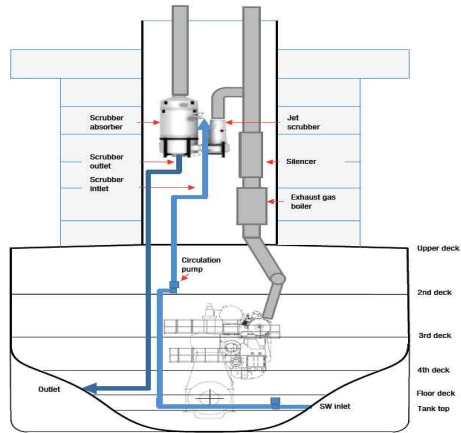


Fig. 2.9 Arrangement of open loop scrubber system

폐쇄형 EGCS (Closed loop system)는 선외의 해수를 배기가스에 접촉시키는 것이 아니라, 폐쇄형 루프안의 해수 혹은 청수를 계속해서 순환시켜 배기가스와 접촉하는 방식이다. 배기가스와 접촉 후 높아진 산성도는 별도의 화학품(수산화나트륨(NaOH))을 첨가하여 낮추고, 이로 인해 생성된 물질과 배기가스에서 나온 오염물질은 별도의 처리장치를 통해 저장소에 보관 후 육상시설로 처리된다. 그리고 뜨거운 배기가스와 접촉 후 높아진 온도는 해수와 열 교환을 통해 온도를 낮춘다. 냉각된 순환수는 대부분 배기가스 세정을 위해 순환 하지만, 일부는 원심분리 및 pH레벨의 조정과정을 거쳐서 선외로 배출시킨다. Fig. 2.10은 폐쇄형 배기가스 세정장치 시스템 개요를 그리고 Fig. 2.11은 장치의 설치 상세를 보여준다.

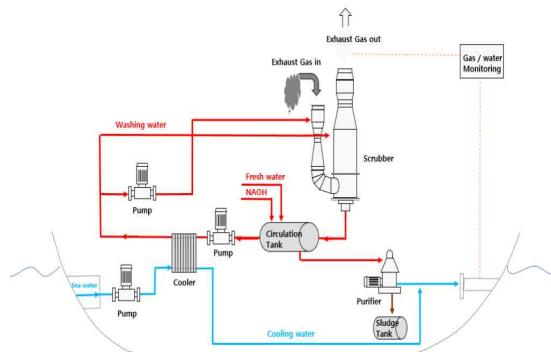


Fig. 2.10 Closed loop Scrubber System

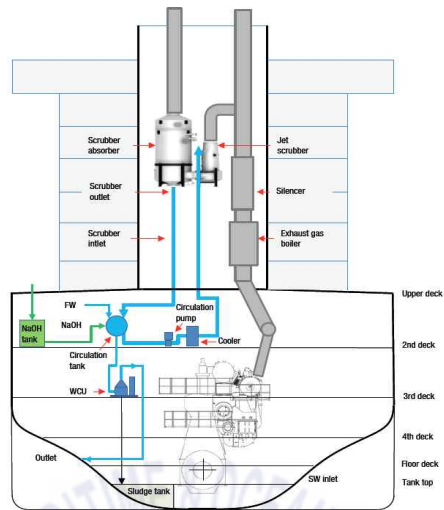


Fig. 2.11 Arrangement of closed loop scrubber system

하이브리드 방식은 대양에서 항해 할 경우에는 개방형으로 사용하다가, 연안 항해나 세정수 배출물의 규제가 강화된 지역을 항해할 경우에는 폐쇄형으로 전환하는 방식으로, EGCS의 보다 유연한 운영이 가능하다. Fig. 2.12는 하이브리드 배기가스 세정장치 시스템 개요를 그리고 Fig. 2.13은 장치의 설치 상세를 보여준다.

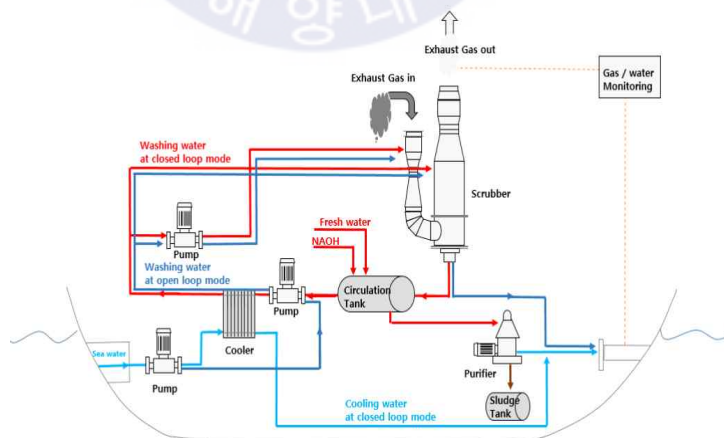


Fig. 2.12 Hybrid scrubber system

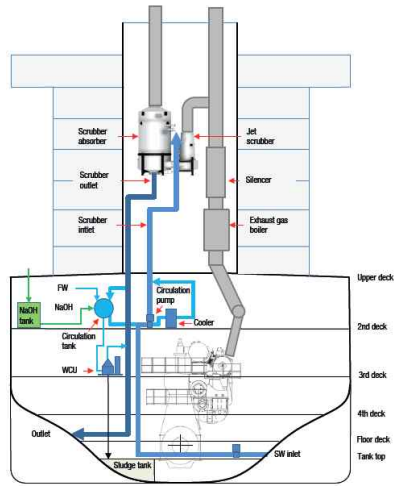


Fig. 2.13 Arrangement of hybrid scrubber system

## 2) 장치의 설치 및 성능 검사 (Scheme A 및 B)

IMO에서 개발한 EGCS 지침서(Res.MEPC.259(68))에 따르면 EGCS 승인방법에는 2가지가 있다. 배기가스 배출기기(엔진, 보일러 등)와 결합한 상태에서 성능을 검증(증서 필요)하고 운항 중에는 몇 가지 매개변수만 모니터링 하는 Scheme A와, 선박에 설치 후 운항 중 계속해서 배기가스내의 SOx량을 측정하는 Scheme B가 있다.

선사입장에서 볼 때 이 두 방법의 가장 큰 차이는 바로 배기가스 내 SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>의 비율을 검출하는 검출기기(CMS, Continuous Monitoring System)의 필요 유무이다. Scheme B는 검출기기를 반드시 설치, 지속적인 측정이 이루어져야 하고, Scheme A는 검출기 없이 관련 매개변수들을 모니터링 해야 한다는 것이다. 그 매개변수란, EGC 장비 입구 측 세정수 압력과 유량, EGC 장비 전방의 배기가스 압력, 장비 전반에 걸친 압력강하, 연료유 연소 장비 부하, EGC 장비 입/출구 측 배기가스 온도 등을 말한다.

또한 Scheme A는 NO<sub>x</sub> Code의 매개변수 점검방식과 마찬가지로, 동일한 성능의 엔진에 부착하는 동일한 EGC 장비의 경우 당사국의 승인 하에 기 승인된 자료에 기초하여 현장 성능검증이 면제될 수 있다. 동일한 EGC 장비지만 배기가스 배출량이 다른 엔진에 탑재하는 경우 검사를 간소화 할 수도 있다.



### (3) 가스연료 엔진 (Gas fueled engine)

가스 연료 엔진은 황산화물 배출량을 거의 100 % 제거할 수 있으며, 질소산화물, 미세먼지 및 이산화탄소 배출량이 현저히 적다. 또한 LNG 연료는 기존 HFO 에 비해 발열량이 20 % 이상 높기 때문에, 연료 소모량이 적으며 연료유를 정화하기 위한 장치도 불필요하므로 선박 운용비도 감소시킬 수 있다.

## 2.2.3 지역별 SOx 배출 규제

### (1) 선박 연료유 황함유량 규제

#### 1) 캘리포니아 연료유 규정(California ocean-going vessel fuel regulation)

캘리포니아 대기자원 위원회는 2014년 1월 1일부터 Fig. 2.14에 표시된 규정 적용 해역인 캘리포니아 주 해역 및 기선으로부터 24해리 이내에서 운항하는 국제항해 선박에서 0.1 % m/m 이하의 황함유량을 가지는 MDO(Marine Diesel Oil) 또는 MGO(Marine Gas Oil)만을 사용하도록 규제해 오고 있다.

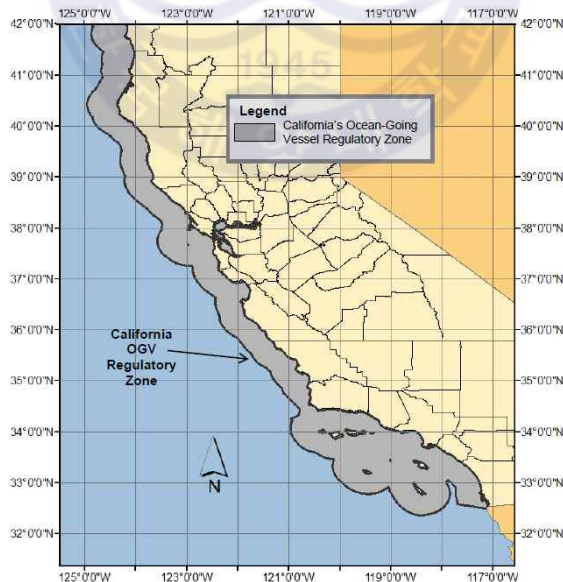


Fig. 2.14 California low sulphur regulation affected area

## 2) EU 연료유 규정

유럽연합(EU)은 2010년 1월 1일부터 EU 회원국 항내 정박 시 및 내륙수로 전용 선박에서 0.1% m/m 이하의 황함유량을 가지는 연료유를 사용하도록 규제해 오고 있다. 항내 정박이란 묘박, 계선(on buoy) 또는 하역작업에 관계 없이 접안하고 있는 모든 상태를 포함한다.

## 3) 터키 연료유 규정

터키는 2012년 1월 1일부터 유럽연합의 규정과 동일하게 터키 항내 정박 시 선박에서 0.1% m/m 이하의 황함유량을 가지는 연료유를 사용하도록 규제해 오고 있다. 항내 정박의 의미도 동일하게 묘박, 계선(on buoy) 또는 하역작업에 관계없이 접안하고 있는 모든 상태를 포함한다.

## 4) 홍콩 연료유 규정

홍콩은 2015년 7월 1일부터 Fig. 2.15의 점선으로 표시된 홍콩수역 내 정박 시 선박에서 0.5% m/m 이하의 황함유량을 가지는 연료유를 사용하도록 규제해 오고 있다. 항내 정박의 의미는 유럽연합의 규정과 동일하게 묘박, 계선(on buoy) 또는 하역작업에 관계없이 접안하고 있는 모든 상태를 포함한다. 적용시간은 접안 후 1시간 후부터 출항 1시간 전까지 이다.



Fig. 2.15 Hong Kong waters



5) 중국 연료유 규정

중국은 Fig. 2.16의 주강삼각주, 양자강삼각주 및 발해만 세 곳을 자체 배출규제해역(ECA)으로 지정하고 2017년부터 규정을 단계적으로 강화해오고 있다. 2017년 1월 1일부터 중국 ECA 내 11개 주요항만을 지정하여 해당 항내 정박 시 적용, 2018년 1월 1일부터는 중국 ECA 내 모든 항만에서 정박 시 적용, 그리고 2019년 1월 1일부터는 중국 ECA 진입 시부터 0.5 % m/m 이하의 황함유량을 가지는 연료유를 사용하도록 규제해 오고 있다.

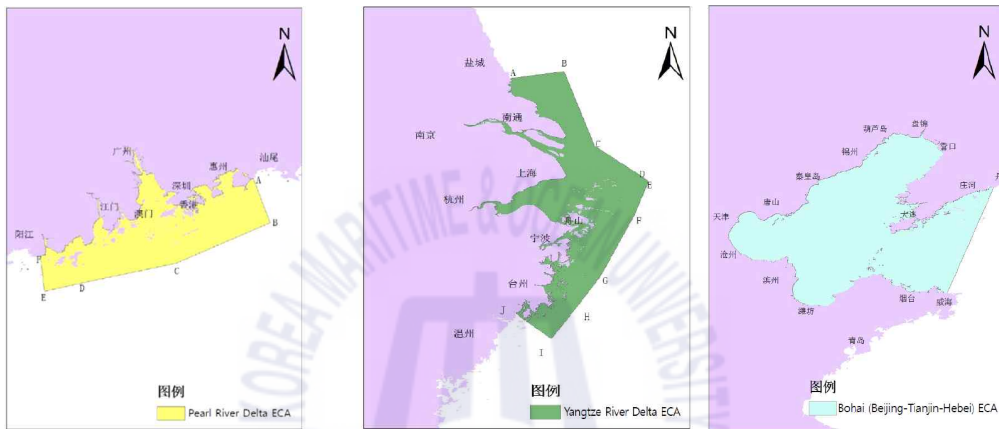


Fig. 2.16 China ECA

6) 대만 연료유 규정

대만은 국제항만으로 지정된 항구에서 2019년 1월 1일부터 0.5 % m/m 이하의 황함유량을 가지는 연료유를 사용하도록 규제해 오고 있다.

(2) 개방형 배기가스세정장치(EGCS) 세정수 배출 규제

최근 개방형 EGCS로부터 배출되는 세정수의 해양 유해성에 대한 우려가 증가되고 있다.

이는 대기 중으로 방출되는 SOx 성분을 해양으로 배출하였을 경우 해양 생태계 또는 환경에 미치는 영향성이 고려되지 않았거나 피해가 있을 수 있다는 우려이다.

현재 IMO의 EGCS 지침(Res.MEPC.259(68))에서는 산도, PAH, 탁도 및 질산염의 세정수 내 배출 기준을 규정하고 있다. 하지만 상기 언급한 우려는 해당 기

준을 만족한다고 하더라도 해양 유해성이 있을 수 있다는 것이며, 이러한 우려는 지금까지 시행된 여러 연구 결과가 서로 상반된 결론을 내리고 있다는 점을 들어 객관적 검증 필요성이 IMO에서 제기되어 왔다.

이러한 우려를 고려하여 최근 개최된 IMO MEPC 74차 회의(2019년 5월)에서는 향후 2년간에 걸쳐 개방형 EGCS 세정수의 해양 유해성에 대해 평가해 보기로 결의한 바 있다.

하지만 이런 국제해사기구의 움직임에 앞서 세정수의 해양 유해성을 우려한 여러 국가들에서는 자체적인 배출 규제 또는 금지 규정을 마련하여 시행하고 있다. 각 국가·항만별 규제 현황은 Table 2.3과 같다.

**Table 2.3 Ports of prohibited from discharge scrubber cleaning water**

| Nations     | Ports/Area                  | Remarks                 |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|
| Belgium     | All ports                   |                         |
| China       | All ports and inland waters |                         |
| Estonia     | Sillamae                    |                         |
| Finland     | Porvoo                      |                         |
| France      | Port Jerome                 |                         |
|             | Seine River                 |                         |
|             | Le Havre                    |                         |
|             | Ambes                       |                         |
|             | Montoir                     |                         |
|             | Bordeaux                    |                         |
| Germany     | Weser ports                 |                         |
|             | Elbe ports                  |                         |
|             | Kiel canal ports            |                         |
|             | Rostock                     |                         |
| Gibraltar   | Gibraltar                   |                         |
| Ireland     | Dublin                      | Notice To Mariner No.37 |
| Italia      | Ravenna                     |                         |
| Latvia      | Ventspils                   |                         |
| Lithuania   | Klaipeda                    |                         |
| Netherlands | Temeuzen                    |                         |
| Norway      | Glomfjord                   |                         |
|             | Heroya                      |                         |

|                |                |                          |
|----------------|----------------|--------------------------|
| Portugal       | Lisbon         |                          |
|                | Sines          |                          |
|                | Leixoes        |                          |
|                | Aveiro         |                          |
| Russia         | Primorsk       |                          |
|                | St. Petersburg |                          |
| Singapore      | Singapore      | from 2020.1.1.           |
| Sweden         | Brofjorden     |                          |
|                | Gavle          |                          |
|                | Norrkoping     |                          |
|                | Umea           |                          |
|                | Sundsvall      |                          |
|                | Skelleftehamn  |                          |
| UAE            | Fujairah       | Notice To Mariner No.252 |
| United Kingdom | Finnart        |                          |
|                | Hull           |                          |
|                | Immingham      |                          |
|                | Avonmouth      |                          |
|                | Cardiff        |                          |
| USA            | California     |                          |
|                | Connecticut    |                          |
|                | Hawaii         |                          |

## 2.3 온실가스(GHG)

### 2.3.1 IMO의 CO<sub>2</sub> 배출 규제

지구는 태양으로부터 받은 에너지를 장파의 적외선으로 방출하는데, 대기 중의 온실가스가 이를 흡수하여 지구표면의 온도가 일정하게 유지되도록 하고 있으며, 이러한 온실효과가 없다면 지구의 평균 온도는 -18℃까지 내려가서 생명체가 살 수 없게 된다. 하지만 이러한 긍정적인 영향을 가진 온실가스가 지난 100년에 걸쳐 산업화·도시화의 결과로 급격히 증가하였고, 지표로부터 방출되는 적외선을 적정수준 이상으로 흡수하여 지구온난화를 유발하게 되었다.

교토의정서에서 규정한 온실가스는 총 6개 가스로서 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>가 있으며, 이 중에서 CO<sub>2</sub>는 다른 온실가스에 비해 발생하는 양이 98%에 이를 정도로 많기 때문에 지구 온난화에 미치는 영향이 가장 크다.

기후변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 조사에 따르면 가장 중요한 온실가스인 CO<sub>2</sub>는 1970년과 2004년 사이에 약 80% 증가하였고, 온실가스 배출량의 증가 속도 또한 과거(1970~1994년)보다 최근(1995~2004년) 2배 이상 더 높았다.

1994년 3월 발효된 기후변화에 관한 UN 협약(United Nations Framework Convention on Climate Change : UNFCCC)은 온실가스 농도를 충분한 시간 안에 안전한 수준으로 안정화시키는 것을 궁극적인 목표로 한다는 정성적인 의미로 제시되고 있고 참여국의 온실가스 감축의무에 대한 법적 구속력이 없다. 이에 따라 국제사회는 “공통의 그러나 차별화된 책임(Common but differentiated responsibility)” 원칙에 따라 온실가스의 양적 감축의무를 명문화 한 교토의정서(Kyoto Protocol)를 채택하였다.

이런 환경에서 국제해사기구(IMO)에서는 선박에서 배출되는 온실가스를 저감하기 위한 규제를 제정하였으며, 이 중 에너지효율설계지수 (EEDI, Energy Efficiency Design Index)는 가장 강력한 규제로서 2013년 1월 1일부터 건조 계약되는 선박은 EEDI요건을 만족하여야 인도 및 취항이 가능하다.

IMO에서는 각 선종별로 이산화탄소 배출 감축량 기준을 설정하고, 설정된 기

준은 2025년까지 단계적 30 % 감축을 목표로 설정하고 있으며, 동 요건에 대비하여 전 세계적으로 다양한 연구개발이 활발하게 이뤄지고 있다.

## (1) 협약 규정

### 1) 에너지효율설계지수(EEDI)

2013년 1월 1일 이후 건조계약 된 모든 신조선은 에너지효율설계지수 (Attained EEDI)를 계산하여야 하고 이 결과 값은 에너지효율설계지수 허용 값 (Required EEDI)를 만족하여야 한다. Attained EEDI를 계산해야 하는 선종은 벌크선, 탱커선, 컨테이너선, 일반화물선, 냉동물운반선, 겸용선, LNG선, 여객선, 로로화물선, 로로화물선(자동차운반선), 로로여객선 및 크루즈선이며 Required EEDI가 적용되는 선박은 Attained EEDI가 적용되는 선박과 동일하나 여객선은 제외된다.

Required EEDI 는 협약 규정 21규칙과 같이 약 5년 단위로 10 % 정도씩 강화되어간다.

선박 건조를 담당하는 조선소는 모형시험 및 시운전을 통해 Attained EEDI 를 계산하고 이러한 계산 과정을 담은 에너지효율 설계지수 기술파일 (EEDI technical file)을 작성하여 주관청의 승인을 받아야 한다.

### 2) 선박 에너지효율 관리계획서(SEEMP, Ship Energy Efficiency Management Plan)

모든 선박은 선박에너지효율 관리계획서는 선내 비치하여야 한다. SEEMP 는 선박 에너지효율 관리를 위한 제1부(Part I)와 선박 연료유 사용량 데이터 수집을 위한 제2부(Part II)로 나뉘며, 이 중 Part I 은 그 내용과 이행이 선박 자발적 시행에 맡기고 있으며, Part II는 승인 및 이행검증이 기국을 통해 이루어진다.

### 3) 선박 연료유 사용량 데이터 수집 보고 시스템(DCS, Data Collection System)

모든 선박은 매년 선박에서 사용하는 유종별 연료유의 사용량을 수집하고 이를 기국에 보고해야 하며, 기국은 보고된 데이터를 검증하고 이상이 없을 경우 선박에 적합확인서(SOC, Statement of Compliance)를 매년 발행한다.

DCS 는 제도의 시행 그 자체가 갖는 의미보다 향후 IMO 가 선박으로부터 발생하는 온실가스 저감을 위해 취할 정책적 방향(조치)들을 결정하는 기반 자료로 활용하기 위함이다.

- IMO MARPOL 선박에너지효율 규정 전체 내용은 부록3에서 확인할 수 있다.

### 2.3.2 GHG 저감을 위한 후보조치

IMO 에서는 2018년 선박으로부터의 GHG 감소를 위한 초기 전략을 수립하면서 향후 시행 가능한 조치들을 검토하였다. IMO는 이 초기 전략을 통해 향후 IMO DCS를 통해 수집된 자료를 토대로 2023년에 최종 전략을 수립할 계획이다. 감축 조치들과 관련해서는 현재 IMO 에서 어떤 조치를 시행될 지 논의 중에 있으며, 그 후보들은 다음과 같다.

#### 1) EEDI 및 SEEMP 개선 및 강화

- EEDI 개선·강화·신설(EEDI Phase IV)과 SEEMP Part I의 강화 또는 강제화

#### 2) 선속 감소 및 최적화

현재 기술을 기반으로 온실가스를 줄일 수 있는 대표적인 단기 후보조치이나, 단일 조치로서 고려될 경우 시장왜곡, 운송비용 상승, 불필요한 추가선박 건조 등의 영향성이 있을 수 있음.

#### 3) 항로 최적화

#### 4) 연료생애주기 평가

선박에서의 GHG를 줄이기 위한 방안이 오히려 선박으로 공급되는 연료유의 생산·공급 과정에서 더 많은 GHG를 발생할 수 있다는 우려를 바탕으로 원전에서부터 최종 사용처까지의 모든 과정에서 GHG 발생을 평가하기로 함

#### 5) 시장기반 조치 (MBM, Market Based Measure)

펀드, 유류세, 배출권거래제, 인센티브 제도 등이 있음

#### 6) 대체연료 및 LNG 연료

대체연료를 위한 연구개발, LNG 병커링 과정 및 메탄슬립에 의한 메탄 오염의 감축 수단에 관한 논의 필요

## 2.4 미세먼지(PM)

### 2.4.1 미세먼지 배출 규제

IMO에서는 미세먼지(PM)에 관한 규제가 없으나 최근 국제사회는 선박 배출 미세먼지를 지구 온난화 및 기후변화를 유발하는 원인중 하나로 인식, 파악하고 이에 대응하기 위한 각종 조치 및 전략을 수립 중에 있다. 그 중에서도 블랙카본의 위험에 대응하기 위해 극지방에 대한 블랙카본의 유해성을 과학·기술적으로 파악하고 규명 중에 있다.

기후 및 청정대기 협력체인 CCAC는 2016년 UN 기후변화협약 당사국 총회에서 미라케시 선언을 채택한 바 있다. 블랙카본, 메탄, 수소불화탄소 등이 인간의 건강, 농업, 생태계에 악영향을 미치고 지구온난화와 기후변화에도 영향을 미치므로 이의 저감을 위해 블랙카본배출 저감, 인벤토리 개발 및 메탄배출 저감 노력에 참여할 것을 촉구하였다.

이후 국제청정운송협의회(ICCT)에서는 선박의 블랙카본 배출 저감을 위한 효과적인 방향을 제시하는 Fig. 2.17의 ‘선박배출 블랙카본 측정방법 및 배출계수 연구 보고서’를 2017년 4월 발간하였다.

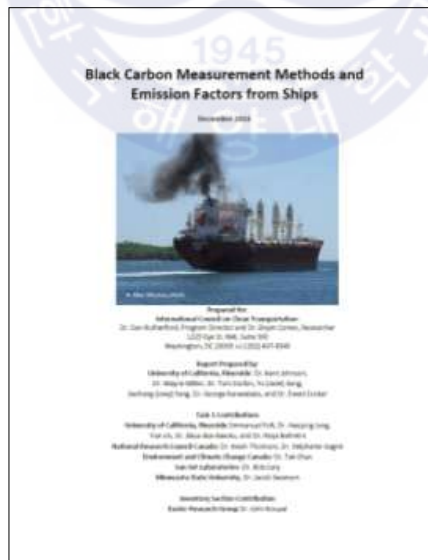


Fig. 2.17 Report of black carbon measurement methods and emission factors from ships (ICCT, 2017)



대기오염원 중 가장 주목받고 있는 PM은 국민의 안전과 건강을 위협하는 물질로 여겨지면서 대한민국은 이의 해결을 위해 2016년 미세먼지 관리 특별대책을 마련한 바 있다.

해당 대책의 내용 중 선박의 경우 배출허용기준을 강화하도록 하였으며, 구체적으로는 2016년부터는 IMO NOx Tier II 기준을 적용, 2019년 이후에는 Tier III로 단계적으로 강화하기로 하였다. 또한, 운항 선박 배출가스 관리 강화를 위해 국립환경과학원과 해양수산부 공동으로 연구를 수행하기로 하였다.

중앙정부의 대책과는 별도로 주요 항만도시인 인천과 부산에서는 별도의 미세먼지 저감 종합대책을 시행하고 있다. 인천의 경우 선박 기인 배출가스를 저감하기 위해 저감장치 개발완료 시 부착사업을 2018년부터 수행해오고 있으며, 부산의 경우 황함유량 배출규제해역 지정, 연료유 가격차 보전방안, 육상전력 공급 확대, 관공선 LNG 연료추진선 전환, 항만 대기측정소 신규 설치 등을 시행해 오고 있다.

## 2.4.2 PM 저감기술

### - 배기가스 후처리 기술

#### 1) 스크러버

선박 배기가스 내에는 미세먼지 및 2차 화학반응을 통해 미세먼지가 되는 SOx, NOx가 존재한다. 스크러버는 주로 SOx 저감을 위한 장치로 사용되나 이 장치를 통해 PM 저감 또한 가능하다.

#### 2) 습식 전기집진(Wet-ESP, Wet electrostatic precipitator) 기술

습식 전기집진 시스템은 배기가스 중 미세먼지를 제거하기 위해 설계된 시스템이며, 현재 발전소, 터널 등에서 운용되고 있다.



## 2.5 선박 저속운항을 포함한 대기오염물질 배출 저감을 위한 기타 방안

### 2.5.1 선박 저속운항을 통한 배출물 저감

#### - 선박 저속운항

선박 저속운항(Vessel Speed Reduction, VSR) 프로그램은 몇몇 항구들에서 자발적으로 시행하고 있는 조치로서 해안으로부터 거리에 따라 지정된 선속 이하로 감속 운항하는 조치이다.

항구 근처에서 선박의 속도를 저감함으로써 대기오염물질 배출을 줄이기 위한 것으로 자발적으로 참여한 선박에 부두사용료를 인하해 주는 등 인센티브를 제공한다.

#### - 선박 저속운항을 통한 배출물 저감의 이론적 근거

엔진의 출력은 속도의 3승에 비례하고 출력은 연료의 소모량에 비례하므로 배의 속도와 연료소모량과의 관계는  $FOC \propto V^3$  과 같이 나타낸다. 연료소모량이 선속의 3승에 비례하는 이 관계를 프로펠러특성이라 하고 모든 선박에 성립되는 중요한 식으로 감속 항해에 의한 연비 저감의 근거가 된다. 때문에 선속을 조금만 낮추어도 연료소모량이 급격히 감소한다.

이와 관련하여 선속과 연료소모량과의 관계를 나타내는 Fig.2.18을 참고할 수 있겠다[16].

현재 IMO에서나 국내/외 학계 및 산업계에서도 실제 선박의 연료소모량에 배출계수를 곱해서 배출량을 산정하기 때문에 수치적으로 볼 때는 VSR에 의한 배출량 감소 효과는 매우 큰 것으로 나타난다. 뒤에서 살펴볼 미국 일부 항만에서 시행하고 있는 선박 저속운항 프로그램은 이를 근거로 시행해 오고 있는 것이다.

하지만 공학적으로 접근해 보자면 다양한 종류의 엔진들의 에미션 특성이 반영되지 못할 뿐만 아니라, 저부하 운전 시 불완전 연소에 기인하는 PM 배출량 증가 현상과 같이 엔진의 부하마다 에미션 특성이 달라지는 부분을 반영하지 못하는 한계점이 있다.

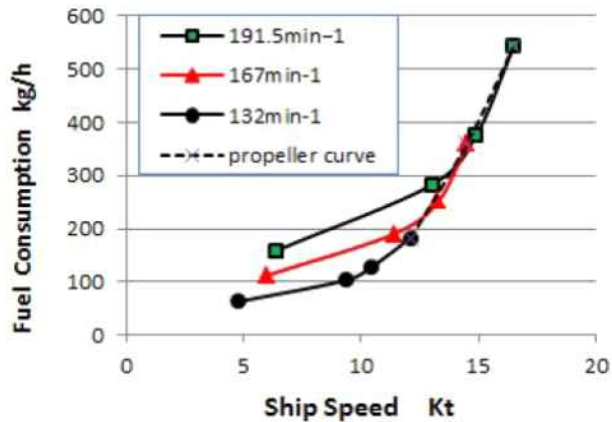


Fig.2.18 The relationships between fuel consumption and ship speed

## 2.5.2 운항 개선 방안 등 기타 방안

### 1) 육상전원공급

이 기술은 육상 전력 공급 장치가 설치된 항구에 입항한 선박이 선박의 연결 장치를 통해 정박 기간 동안 전력을 공급받는 기술로 일부 항만들에서는 강제로 시행 하고 있기도 하다.

### 2) 주기관, 보조기관 및 보조보일러 연료 개선

디젤엔진에서 발생하는 배출량을 저감하기 위해 연소실 내 물 직분사 기술(Direct Water Injection, DWT), 연료-물 유화연료(Fuel Water Emulsion), 공기 내 습도 제어기술(Humid Air Motor), 물연속 주입(Continuous Water Injection), 슬라이드 밸브(Slide Valve) 등이 존재한다.

대표적인 선박 엔진 제조사인 MAN B&W 에 따르면 슬라이드밸브를 적용할 경우 질소산화물 30%, 미세먼지 25% 저감 효과가 있다고 한다.

## 2.5.3 대한민국 정부의 항만 대기질 개선을 위한 특별법

국내에서도 항만지역의 대기질 개선을 위한 법안 마련의 필요성을 인지하고 2018년 강병원 의원의 대표발의로 제안된 「항만지역 등 대기질 개선에 관한

특별법안」이 2019년 3월 13일 국회 본회의를 통과하고 4월 2일 제정되어 2020년 1월1일 시행을 앞두고 있다.

(1) 법안 내용

- 1) 항만지역 등 안에서 항해 또는 정박하고 있는 모든 선박에 적용
  - 2) 해양수산부는 5년마다 항만지역 등의 대기질 개선을 위한 종합적인 시책을 수립·시행하고 지방자치단체 항만지역 등의 대기질 개선을 위한 세부 시책을 수립·시행
  - 3) 해양수산부는 황산화물 선박 배출 규제해역을 지정할 수 있음
  - 4) 해양수산부는 저속 운항해역을 지정하고 저속운항을 권고할 수 있으며, 권고에 따른 선박에 대하여 인센티브를 제공할 수 있음.
  - 5) 비산먼지 발생 억제를 위한 항만 시설 설치 및 조치
  - 6) 배출가스 허용기준에 맞는 하역장비 운영 및 친환경 하역장비로 전환 권고, 정부의 지원을 받을 수 있음
  - 7) 일정 등급 이하인 항만 출입 자동차에 대하여 출입을 제한
  - 8) 항만시설에 육상전원공급설비를 설치, 설치된 항만시설을 이용하는 선박 내 육상전원공급설비에서 공급되는 전력을 수급할 수 있는 장치 설치 권고. 국가는 수전장치의 설치에 대하여 재정적 지원 가능.
- 항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법 전체 내용은 부록 4에서 확인할 수 있다.

### 제 3 장 선박 대기오염물질 배출 저감을 위한 인센티브 제도 및 선박 저속운항 해외 사례

전 세계적으로 항만 지역의 선박으로부터 발생하는 대기오염물질 저감을 위한 인센티브 제도들이 다양화되고 늘어나고 있는 추세이며, 최근 국내에서도 선박으로부터 발생하는 대기오염물질이 선박의 입출항이 잦은 항만과 항만 인근 지역사회는 물론 국가 대기오염의 주요 원인으로 주목되고 있다.

항만 또는 지역을 대상으로 대기오염물질 저감을 위한 인센티브 제도 및 선박 저속운항 사례에 대해 살펴보고, 이 중 선박 저속운항을 통한 선박의 배출량 변화를 실증해보고, 아울러 부산항 데이터를 바탕으로 추가적인 분석을 통해 선박 대기오염물질 배출 영향에 대해 아래 Table 3.1과 같은 방법으로 평가해 보고자 한다.

Table 3.1 Research method

| 주요 항목         | 내용                        |
|---------------|---------------------------|
| 1. 리서치        | 1.1 항만별 인센티브 제도           |
|               | 1.2 선박 저속운항 사례            |
| 2. 선박 저속운항 실증 | 2.1 VSR 실증 데이터 확보 및 분석    |
|               | 1) 6단계 5해리 구분 방법          |
|               | 2) 4단계 20해리 구분 방법         |
| 3. 부산항 데이터 검증 | 3.1 부산항 운항선박 데이터 분석       |
|               | 1) AIS 기반 데이터 확보          |
|               | 2) IHS Fairplay 데이터 비교 분석 |

### 3.1 인센티브 제도

인센티브 제도란 국가 또는 항만별로 마련한 프로그램을 통해 선박의 자발적 참여를 유도하고 참여한 선박에 항세를 할인해준다든지 하는 인센티브를 제공하는 제도를 얘기한다.

대기질 개선을 위한 항만별 인센티브 제도의 종류에는 국제항만협회에서 시행하고 있는 친환경선박지표(Environmental Ship Index, ESI), 싱가포르에서 시행하고 있는 저유황유 사용, 롱비치항 등에서 시행하고 있는 선박 저속운항(Vessel Speed Reduction, VSR), 파나마 등에서 시행하고 있는 데이터 보고 등이 있다.

이 장에서는 각 인센티브 제도들에 대한 개략적인 부분을 살펴보고, 본 연구에서 검토할 선박 저속운항에 대해서 좀 더 구체적으로 살펴볼 예정이다.

#### 3.1.1 친환경선박지표 (Environmental Ship Index, ESI)

국제항만협회(International Association of Ports and Harbors, IAPH)는 2008년 온실가스 저감을 목적으로 친환경선박지표(ESI)를 마련하였다.

자발적 참여 프로그램으로 IMO 배기가스배출 기준을 상회하는 퍼포먼스에 대해서 친환경선박지표 점수(ESI Score)로 계산한다. 평가항목은 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> 및 OPS(Onshore Power Supply)로 ESI 점수에 따라 전 세계 50여개 항만에서 혜택을 제공받을 수 있다.

##### 1) ESI Score 계산

- 친환경선박지표는 ESI 점수로 계산되어 나타나며, 평가항목인 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> 및 OPS 별로 아래와 같은 계산식에 의해 계산하여 합산된다.

$$\text{ESI Score} = \text{ESI NO}_x + \text{ESI SO}_x + \text{ESI CO}_2 + \text{OPS}$$

$$\begin{aligned} \text{ESI NO}_x &= (2 \times \text{NO}_x \text{ sub points}) / 3 \\ \text{ESI SO}_x &= \text{SO}_x \text{ sub points} / 3 \\ \text{ESI CO}_2 &= 5\sim 15 \\ \text{OPS} &= \text{설치 시 } 10 \end{aligned}$$

- NOx Sub points

- EIAPP 증서 상 데이터(NOx 배출량) 사용
- NOx Tier I 기준
- EIAPP 증서가 없는 선박은 '0'점 부여, 단, 이런 선박에 NOx Tier I 만족을 증명할 승인된 문서가 있을 시 적용 가능

$$ESI\ NO_x = \frac{100}{\text{Rated Power } \Sigma \text{ of all Engines}} \times \frac{(\text{NO}_x \text{ limit value} - \text{NO}_x \text{ rating}) \times \text{Rated Power}}{\text{NO}_x \text{ limit value}} \Sigma \text{ of all Engines}$$

- SOx Sub points

- 연료유 내 황함량에 따라 다음 3가지 기준으로 등급분류 : High (0.5% ~ 3.5%), Mid (0.1% ~ 0.5%), Low (0.1% 이하)
- 입력된 선박들 년 2회 계산
- EGCS 설치 선박의 경우 동등물 인정되는 황함량 사용 가능
- 입력 시 6개월간 발행된 BDN 같이 입력 요함

$$SO_x \text{ sub points} = x * 30 + y * 35 + z * 35 \text{ where:}$$

- **x** = the relative reduction of the average sulphur content of HIGH
- **y** = the relative reduction of the average sulphur content of MID
- **z** = the relative reduction of the average sulphur content of LOW

- ESI CO<sub>2</sub>

- 년 2회 선박의 EEOI 데이터 보고 시 기본 5점 부여
- 3년간의 데이터는 해당 선박의 기준치 산정, 매년 보고데이터와 비교
- 기준치에서 향상되는 에너지효율치는 ESI CO<sub>2</sub> 점수로 가산
- 보고 시행하지 않을 시 0점
- 최고점수 15점으로 한정

2) 참여 항만 및 인센티브

- 친환경선박지표(ESI) 프로그램에 참여하고 있는 항만은 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 ESI participated ports and their incentives

| Nations   | Ports                     | Incentives   |
|-----------|---------------------------|--|
| Argentina | Buenos Aires              | 30~50 5 %, above 50 10 % ship rates discount                       |
| Australia | Port Botany & Port Kembla | 20~35 \$1,000, 35~50 \$1,500, above 50 \$2,500 ship rates discount |
| Belgium   | Antwerp                   | 30~50 5 %, 50~70 10 %, above 70 15 % ship rates discount           |
|           | Zeebrugge                 | above 30 10% ship rates discount                                   |
|           | Ghent                     | 20~30 10 %, 30~50 20 %, above 50 50 % ship                         |



|               |                     |  |
|---------------|---------------------|--|
|               |                     | rates discount   |
| Canada        | Vancouver           | 20~30 23 %, 30~50 35 %, above 50 47 % ship rates discount                    |
| Estonia       | Tallinn             | 65~80 3 %, above 80 8 % ship rates discount                                  |
| Finland       | Helsinki            | above 80 3 %, above 60 2 % ship rates discount                               |
| France        | Le Havre            | above 34 cruise, above 40 container/ ro-ro maximum 10 % ship rates discount  |
|               | Paris               | maximum 10 % ship rates discount   |
|               | La Rochelle Cedex   | 30~35 10 %, 36~45 13 %, above 46 15 % ship rates discount                    |
|               | Rouen               | above 31 maximum 10 % ship rates discount                                    |
|               | Marseille           | above 35 maximum 10 % ship rates discount                                    |
|               | Le Port Cedex       | above 31 maximum 10 % ship rates discount                                    |
|               | Bordeaux Cedex      | 30~35 10 %, 36~45 12 %, above 46 15 % ship rates discount                    |
| Germany       | Hamburg             | above 20 10 % ship rates discount  |
|               | Bremerhaven         | above 40 15 % ship rates discount  |
|               | Kiel                | above 30 5 % ship rates discount   |
|               | Brunsbüttel         | 20~30 5 %, above 30 10 % ship rates discount                                 |
|               | Rostock             | 40~50 5 %, 50~60 7.5 %, above 60 10 % ship rates discount                    |
|               | Oldenburg           | 20~30 2.5 %, 30~50 5 %, above 50 10 % ship rates discount                    |
|               | Hamburg ECO insight | DNVGL Eco Insight program installed ship 50 % ship rates discount            |
| Israel        | Ashdod              | above 31 benefit given   |
| Italia        | Civitavecchia       | 0~10 6 %, 11~20 8 %, 21~30 11 %, above 31 15% ship rates discount            |
| Japan         | Tokyo               | 20~30 30 %, 30~40 40 %, above 40 50 % ship rates discount                    |
|               | Yokohama            | above 31 15 % ship rates discount  |
| Korea (South) | Busan               | above 31 15 % ship rates discount  |
|               | Ulsan               | above 31 10 % ship rates discount  |
| Netherlands   | Amsterdam           | above 20 benefit given, above 30 additional benefit                          |
|               | Rotterdam           | above 31 10 % ship rates discount, ESI NOx above 31 10 % additional discount |
|               | Delfzijl            | above 20 5 % ship rates discount   |
|               | Velsen Noord        | above 20 benefit given   |



|             |   |  |
|-------------|---|--|
|             | Terneuzen                                     | above 30 15 % ship rates discount                          |
| New Zealand | Nelson  | 20~30 5 %, above 30 10 % ship rates discount               |
| Norway      | Oslo  | 25~50 20 %, above 50 40 % ship rates discount              |
|             | Kristiansand                                  | 25~50 20 %, above 50 30 % ship rates discount              |
|             | Alesund                                       | above 50 100% ship rates refund                            |
|             | Stavanger                                     | 25~50 30 %, above 50 50 % ship rates discount              |
|             | Alesund                                       | above 50 30% ship rates discount                           |
|             | Bergen  | 30~50 20 %, above 50 50 % ship rates discount              |
|             | Flam  | ESI Score % refundable                                     |
|             | Floro   | 25~50 10 %, 50~75 20 %, 75~100 40 % ship rates discount    |
|             | GamleFredrikstad                              | 15~60 (ESI -15)x30/45 %, above 60 30 % ship rates discount |
|             | Haugesund                                     | 30~50 25 %, above 50 50 % ship rates discount              |
|             | Drammen                                       | above 25 30 % ship rates discount                          |
| Trondheim   | 30~50 20 %, above 50 30 % ship rates discount |  |
| Oman        | Sohar   | above 20 5 % ship rates discount                           |
| Panama      | Panama  | 35~80 10 %, above 80 20 % ship rates discount              |
| Portugal    | Setubal                                       | above 30 3 % ship rates discount                           |
| Spain       | Barcelona                                     | above 20 5 % ship rates discount                           |
| Sweden      | Goteborg                                      | above 30 10 % ship rates discount                          |
| UK          | Gravesend                                     | above 30 5 % ship rates discount                           |
| USA         | Los Angeles                                   | 40~50 \$750, above 50 \$2,500 discount                     |
|             | New York                                      | 40~55 \$1,000, 55~65 \$2,000, above 65 \$3,000 discount    |

### 3.1.2 저유황유 사용

#### (1) 싱가포르 그린포트 프로그램

싱가폴은 2011년부터 2016년까지 5년간 그린포트 프로그램(Green Port Program, GPP) 시행을 통해 항내 입출항 선박에서 EGCS를 사용하거나 황 함유량 1.0 % m/m 미만 연료유 사용 시 (2020년까지 3.5 % m/m가 국제 기준임) 항비 15 %를 감면하는 정책을 시행해 왔다.

2016년 싱가포르 정부는 GPP를 강화하여 LNG 연료 선박, 황함유량 0.5 % m/m 이하 저유황유 사용 또는 EGCS 사용 선박에 25 % 항비를 감면하는 정책을 시행해 오고 있다[6].

1) GPP 제도

- 25 % 항비 감면

: LNG 연료 사용, 황함유량 0.5 % m/m 이하 저유황유 사용, EGCS 사용  
: 항내 체류 5일동안 적용, 5일 초과일부터 감면 불가

- 등록

: Marinet 가입을 통해 선박 등록 (1회 등록)  
: EGCS 사용 선박은 등록 시 관련 증빙자료 제출 필요

- 매번 기항 시 신고

: 매번 기항시마다 사전 신고 필요  
: 사전신고는 PAN (Pre-Arrival Notification) 활용 또는 수기로 입항신고  
: 사전 미등록 선박과 매입항 사전신고 되지 않을 경우 혜택 불가

- 자료 보관

: EGCS 사용 선박은 신고 시점 기준 1년간 관련자료 보관  
: 저유황유 사용 선박은 신고시점 기준 1년간 모든 정보 보관

2) 프로그램 실례

- 싱가포르 사전신고 프로그램은 Fig. 3.1과 같음

1 Particulars of ship and contact details

1.1 \* IMO number :

1.2 \* Name of ship:

1.3 \* Port of registry :

1.4 \* Flag State :

1.5 \* Type of ship :

1.6 \* Call sign :

1.7 \* Length Overall (LOA) :  metres (e.g. 115)

1.8 \* Arrival Drafts : Fwd  metres Mid  metres Aft  metres (e.g. 10.5)

1.9 \* Air Draft :  metres (e.g. 42)

1.10 \* INMARSAT number :  \* MMSI number :

1.11 \* Gross Tonnage :

4.4 Maritime Singapore Green Initiatives

4.4.1 Will the vessel be using type-approved abatement/ scrubber technology, clean fuel, or LNG, to ensure that the sulphur emissions remains at <=0.5% m/m throughout the stay within Singapore Port Limits?

1. No, not using

2. Yes, using. If vessel uses LNG dual-fuel propulsion system, please proceed to 3 below.

3. Please indicate which of the following applies to the LNG-dual fuel vessel:

Vessel will be burning LNG

Vessel will be burning clean fuel

Fig. 3.1 Singapore PAN program

### 3.1.3 선박 저속운항 (Vessel Speed Reduction)

선박 저속운항(Vessel Speed Reduction, VSR) 프로그램은 몇몇 항구들에서 자발적으로 시행하고 있는 조치로서 해안으로부터 거리에 따라 지정된 선속 이하로 감속 운항하는 조치이다.

항구 근처에서 선박의 속도를 저감함으로써 대기오염물질 배출을 줄이기 위한 것으로 자발적으로 참여한 선박에 부두사용료를 인하해 주는 등 인센티브를 제공한다[12].

현재 선박 저속운항 프로그램을 시행하는 항구는 Fig. 3.2에서 볼 수 있듯이 미국의 로스엔젤레스항, 롱비치항, 뉴욕/뉴저지항 및 샌디에고항이며 자세한 사항은 다음 절에서 살펴보도록 하겠다[5].

앞서 언급했던 항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법안 11조에서 해양수산부는 저속 운항해역을 지정하고 저속운항을 권고할 수 있으며, 권고에 따른 선박에 대하여 인센티브를 제공할 수 있도록 하고 있기 때문에 우리나라에도 선박 저속운항 프로그램이 조만간 도입될 가능성이 높다.

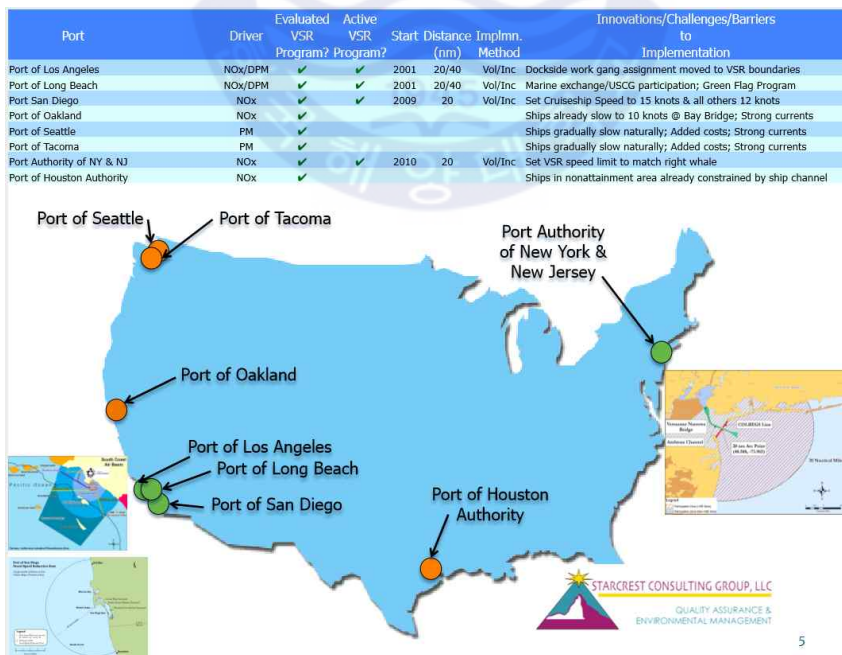


Fig. 3.2 Active VSR program by ports

### 3.1.4 데이터 보고

#### (1) 파나마 Eco-Ship 인센티브 제도

파나마 해사청에서는 파나마 국적선의 온실가스 감축에 대해 세금을 감면해주는 Eco-Ship 인센티브 제도를 2016년 1월부터 시행하고 있다.

#### 1) 온실가스 감축 방안별 인센티브 신청

- Attained EEDI가 Required EEDI 대비 60 % 이상인 경우, IEE 증서 또는 요건 만족에 대한 RO 성명서를 제출함으로써 인센티브 신청 가능
- LNG 만을 연료로 사용
- EEDI를 산정하고, IMO EEOI 지침서에 따라 EEOI를 계산하고 이를 RO로부터 검증한 결과를 제출함으로써 인센티브 신청 가능

#### 2) 세금 감면 항목

- 세금 감면 항목 및 할인율은 Table 3.3을 참조 바람

Table 3.3 Tax incentive for data reporting

| Kinds of Tax                                    | New registered ship | Existing registered ship |
|---|---------------------|--------------------------|
| Annual Tax                                      | 50 % discount       | -                        |
| Annual Consular Fee                             | 50 % discount       | 50% discount             |
| Registration Fee                                | 50 % discount       | -                        |
| Annual Inspection Fee                           | 50 % discount       | 50% discount             |
| Casualty Investigation and IMO Contribution Fee | 50 % discount       | 50% discount             |
| 3% Per Net Tonnage                              | 50 % discount       | 50% discount             |

## 3.2 선박 저속운항 관련 해외사례 분석

### 3.2.1 미국 로스엔젤레스항 및 롱비치 항

로스엔젤레스항의 선박 저속운항 인센티브 프로그램, 롱비치항의 그린플래그 인센티브 프로그램은 퍼민등대(Point Fermin Light)로부터 40해리(nm) 내에서 12노트 이하로 감속한 선박 운영자에게 보상을 해주는 자발적인 선박 속도 감소 프로그램이며 1년 동안 90 % 이상 준수 시 보상을 해준다. 40해리에서 12노트로 속도를 늦추면 부두요금을 로스엔젤레스항의 경우 30 %, 롱비치항의 경우 25 %를 할인받을 수 있고, 20해리에서 속도를 늦출 경우 두 항구 모두 15%를 할인받을 수 있다. 속도 감소 구역 안에서 선박의 속도는 시스템에 의해 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40해리마다 기록되고 측정된다. 각 5마일 구간 내에서 측정된 속도와 운항 거리의 평균 운항 속도로 결정한다.

2015년 입출항한 선박 3,728척 중 92 %가 20해리 안에서 12노트로 감속, 80 %가 20~40해리 사이에서 감속을 시행 할 만큼 참여율이 높다. 제도 시행을 통해 2005년부터 근 10년 동안 디젤입자상 물질(PM) 87 %, 황산화물 97 %, GHG 배출 25 %, 그리고 NOx 31 %를 감소시켰다[8].

Fig. 3.3은 로스엔젤레스항 및 롱비치항의 VSR 구역을 나타내는 지도이며, Fig. 3.4는 로스엔젤레스항의 VSR 연간 요약보고서 일부를 발췌한 것이다. 요약 보고서를 보면 40마일에서부터 VSR을 시행하는 선박은 84.88 %이며, 20마일에서부터 VSR을 시행하는 선박은 91.25 %임을 확인할 수 있다[7].

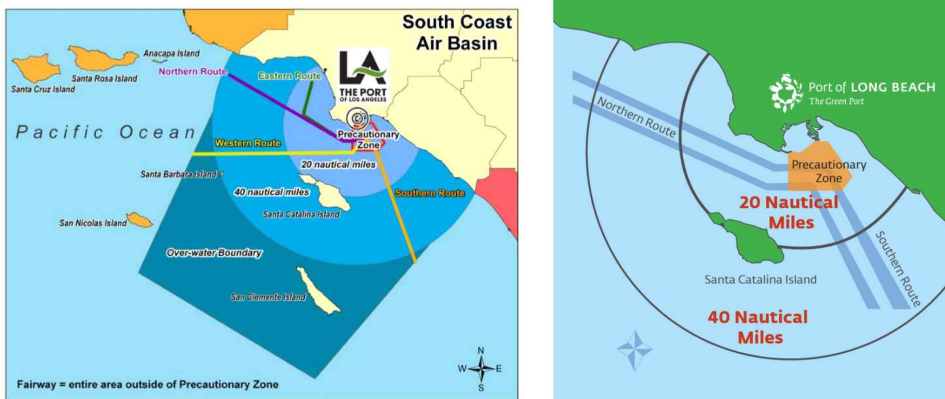


Fig. 3.3 LA & LB VSR zone





Vessel Speed Reduction Program  
Operator Summary Report  
Port of Los Angeles - 2018

03/11/19  
09:29 AM

| Operator Name                  | Compliant   | Non        | Pct          | Compliant   | Non        | Pct          | Total       |
|--------------------------------|-------------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|-------------|
|                                | 20          | Compliant  |              | 20          | Compliant  |              |             |
| Seatrade Reefer Chartering NV  | 14          | 0          | 100.00       | 11          | 3          | 78.57        | 14          |
| Shanghai Zhenhua Shipping Co   | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Shoei Kisen Kaisha Ltd         | 1           | 1          | 50.00        | 1           | 1          | 50.00        | 2           |
| Silversea Cruises Ltd          | 1           | 1          | 50.00        | 1           | 1          | 50.00        | 2           |
| Sinokor Merchant Marine Co Ltd | 6           | 0          | 100.00       | 6           | 0          | 100.00       | 6           |
| Sinokor Petrochemical Co Ltd   | 1           | 0          | 100.00       | 1           | 0          | 100.00       | 1           |
| Soki Kisen Kk                  | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Songa Shipmanagement Ltd       | 5           | 0          | 100.00       | 5           | 0          | 100.00       | 5           |
| St Shipping & Transport Pte    | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Stad Amsterdam Bv              | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Star Tankers Inc               | 2           | 0          | 100.00       | 1           | 1          | 50.00        | 2           |
| Stasco                         | 3           | 0          | 100.00       | 3           | 0          | 100.00       | 3           |
| Stealth Maritime Corp Sa       | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Stolt Tankers BV               | 9           | 1          | 90.00        | 8           | 2          | 80.00        | 10          |
| Straits Tankers Pte Ltd        | 6           | 0          | 100.00       | 6           | 0          | 100.00       | 6           |
| Super- Eco Bulkers Management  | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Tachibana Kaiun Yk             | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Thorco Shipping A/ S           | 1           | 0          | 100.00       | 1           | 0          | 100.00       | 1           |
| Tokyo Marine Asia Pte Ltd      | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Toner Technical & Marine Ltd   | 8           | 0          | 100.00       | 8           | 0          | 100.00       | 8           |
| Torm A/ S                      | 21          | 0          | 100.00       | 21          | 0          | 100.00       | 21          |
| Transatlantic Lines Llc        | 1           | 0          | 100.00       | 1           | 0          | 100.00       | 1           |
| Tsakos Shipping & Trading Sa   | 2           | 0          | 100.00       | 1           | 1          | 50.00        | 2           |
| Tsurumi Kisen Co Ltd           | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Ultrabulk Shipping A/ S        | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Uni Ships & Management Ltd     | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Union Commercial Inc           | 1           | 1          | 50.00        | 1           | 1          | 50.00        | 2           |
| Unison Marine Corp             | 2           | 0          | 100.00       | 1           | 1          | 50.00        | 2           |
| USCG                           | 1           | 0          | 100.00       | 0           | 1          | 0.00         | 1           |
| USNS                           | 1           | 0          | 100.00       | 1           | 0          | 100.00       | 1           |
| V Ships UK Ltd                 | 1           | 0          | 100.00       | 1           | 0          | 100.00       | 1           |
| Valero Energy Corporation      | 107         | 2          | 98.17        | 106         | 3          | 97.25        | 109         |
| Vane Line Bunkering            | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Viking Ocean Cruises Ltd       | 4           | 0          | 100.00       | 3           | 1          | 75.00        | 4           |
| Wah Kwong Ship Management HK   | 1           | 0          | 100.00       | 1           | 0          | 100.00       | 1           |
| Wan Hai Lines Ltd              | 26          | 0          | 100.00       | 26          | 0          | 100.00       | 26          |
| Watanabe Print Co Ltd/ Wpsd Sa | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| World Logistics Service (USA)  | 52          | 0          | 100.00       | 50          | 2          | 96.15        | 52          |
| World Tankers Uk Ltd           | 4           | 0          | 100.00       | 4           | 0          | 100.00       | 4           |
| Wyzsza Szkola Morska           | 2           | 0          | 100.00       | 2           | 0          | 100.00       | 2           |
| Yang Ming Marine Transport     | 183         | 6          | 96.83        | 170         | 19         | 89.95        | 189         |
| <b>Grand Totals:</b>           | <b>3066</b> | <b>294</b> | <b>91.25</b> | <b>2852</b> | <b>508</b> | <b>84.88</b> | <b>3360</b> |

Fig. 3.4 LA VSR summary report 2018

### 3.2.2 뉴욕/뉴저지 항

뉴욕/뉴저지항 에서는 2009년부터 청정 대기 전략의 일환으로 Clean Vessel Incentive(CVI) Program을 시행하고 있다. CVI 는 현존선에 적용되며 영해선 (Territorial Sea Line)을 기준을 20해리 밖에서 10노트 이하로 운항 시 인센티브 를 받을 수 있다. 또한 ESI 프로그램을 통한 지표를 바탕으로 추가 보상이 가 능하다[9].

동 인센티브 제도의 특이점은 선착순으로 지급한다는데 있으며, 이는 선사, 관리자, 화주사, 에이전트 등등의 프로그램 참여를 독려하기 위한 조치이다.

Fig. 3.5는 뉴욕/뉴저지 항의 VSR 구역을 나타내는 지도이다.



Fig. 3.5 NY/NJ CVI zone

(1) CVI 인센티브

1) CVI Score

$$\text{CVI Score} = \text{ESI Score}^* + \text{VSR Points}^{**}$$

\* ESI Score : 국제항만협회(WPCI)에서 시행하는 ESI 지표

\*\* VSR Points : 별도의 기준에 따른 20~40점 부여

2) VSR points 산정 기준

- CVI 프로그램 참여구역에서 AIS를 통해 5해리마다 측정된 선속에 따라 평균속도를 산정
- 입항과 출항 시 각각 프로그램 기준 만족 여부에 따라 20포인트 씩 가산된다. 즉 입항 시에만 규정을 따를 경우 20점, 입/출항 시 만족할 경우 40점을 획득할 수 있음

3) 인센티브

$$\text{CVI Incentive} = \text{CVI Score Incentive} + \text{Engine Tier Incentive}$$

- CVI Score Incentive : Table 3.4의 CVI 점수별 인센티브 참조

Table 3.4 CVI incentives

|                                 |                                 |                            |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| $40 \leq \text{CVI Score} < 55$ | $55 \leq \text{CVI Score} < 65$ | $\text{CVI Score} \leq 65$ |
| \$1,000 per voyage              | \$2,000 per voyage              | \$3,000 per voyage         |



- Engine Tier Incentive

EIAPP 증서 상 IMO NOx 배출량 Tier III 기준 만족이 증명될 경우  
: 항차당 \$5,000

### 3.2.3 샌디에고항

샌디에고항에서 시행하고 있는 VSR 프로그램은 샌디에고만 인근 지역의 속도를 줄임으로써 화물선과 크루즈선에서 발생하는 대기오염물질과 온실가스 배출량을 줄이려는 자발적인 프로그램이다.

샌디에고만을 출입하는 화물선의 경우 12노트, 크루즈선의 경우 15노트의 제한속도를 준수할 것을 요청한다. 선박 감속 구역은 로마 등대(Point Loma)로부터 20해리 떨어진 해역으로 한다.

선박의 속도는 AIS 시스템을 이용하여 항만당국에 의해 모니터링 될 것이며 선주는 별도의 조치가 필요치 않고 자발적으로 참여만 하면 된다. 연속된 12개월 동안 90% 이상 프로그램에 참여한 선박의 경우 항만당국에서 분기별 보고서를 통해 선주, 대중 및 미디어에 공개를 한다[10].

Fig. 3.6은 샌디에고항의 VSR 구역을 나타내는 지도이다.

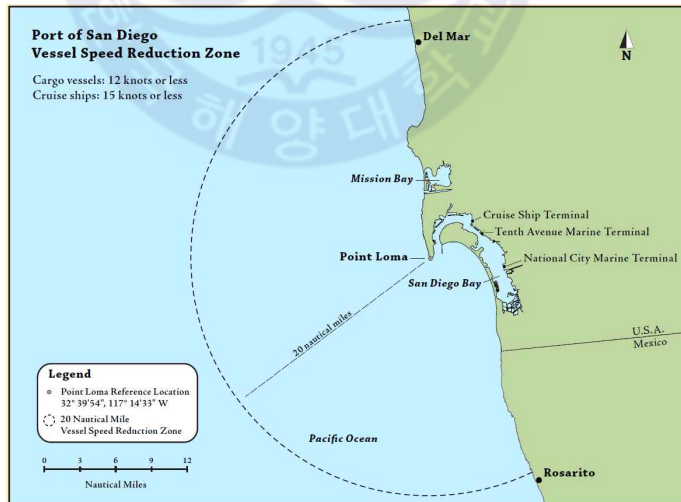


Fig. 3.6 San Diego VSR zone

### 3.2.4 샌프란시스코 및 산타바바라 해협

2018년 11월부터 시작된 자발적 참여 프로그램으로 선박과 충돌로부터 고래를 보호하기 위한 목적으로 시행되었다. 적용 구역에서 내에서 평균속도 12노트를 넘기지 않은 선박이 10노트 이하로 운항한 거리별로 인센티브를 제공받는 제도로, 상금은 총 4가지로 청동, 은, 금, 사파이어로 구성된다. 2018년 프로그램에는 총 30만 달러가 상금으로 지급되었다. 상금은 회사당 약 1,000달러에서 35,000달러(또는 특별한 상황의 경우 그 이상)까지 다양하다[11].

선박의 속도는 AIS 데이터를 바탕으로 측정되며 프로그램의 적용 구역은 산타바바라 해협 및 샌프란시스코만 지역으로 국한한다. 참여를 희망하는 선사는 의향서(Letter of understanding)을 작성하여 제출해야 한다[4].

Fig. 3.7 및 Fig. 3.8은 각각 샌프란시스코 및 산타바바라해협의 VSR 구역을 나타내는 지도이다.

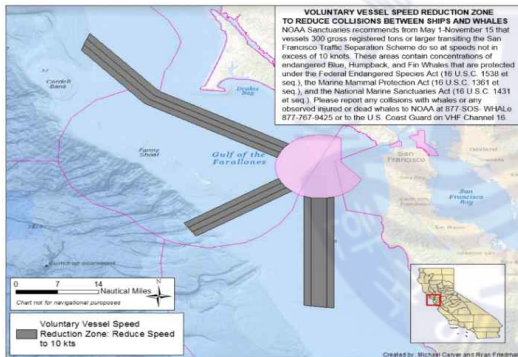


Fig. 3.7 San Francisco VSR zone

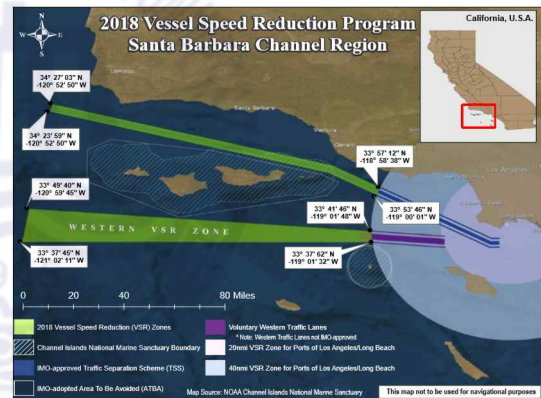


Fig. 3.8 Santa Barbara channel VSR zone

## 제 4 장 선박 저속운항을 통한 선박 배출가스 영향성 분석

### 4.1 선박 저속운항을 통한 선박별 특성 연구

#### 4.1.1 대기오염물질 배출계수

선박 저속운항을 통해 배기가스에 포함된 대기오염물질이 얼마나 저감될 수 있는지를 확인하기 위해서는 대기오염물질 배출계수를 활용할 수 있다. 선박 실증 데이터를 통해 확인 가능한 자료는 선속 변화 구간별 연료소모량 변화이다. 연료소모량 변화만 가지고 선박 저속운항이 배출가스에 미치는 영향을 확인하기 위해서는 이를 가지고 배출되는 대기 오염물질들을 환산해 내는 방법이 적절하다.

이를 위해 국내자료로는 국립환경과학원에서 2015년 발행한 대기오염물질 배출계수라는 발간물을 참고 하였으며, 해외자료로는 IMO GHG Study에서 내용을 확인할 수 있다.

Table 4.1 Emission factor for non-road transport

| 분류                |            | SCC       | 연료        | 단위         |
|-------------------|------------|-----------|-----------|------------|
| 철도                | 기관차        | 디젤기관차     | 08020101  | 경유         |
|                   | 동차         | 새마을형 열동차  | 08020201  | 경유         |
|                   |            | 무궁화형 열동차  | 08020202  | 경유         |
| 선박 <sup>a</sup>   | 해상<br>선박운송 | 외항선       | 08030201  | B-C유(4.0%) |
|                   |            | 연안선       | 08030202  | B-C유(4.0%) |
| 농업기계 <sup>e</sup> | 경운기        | 08050100  | 경유(0.05%) | kg/hr      |
|                   | 콤바인        | 08050200  | 경유(0.05%) |            |
|                   | 분무기류       | 08050300  | 경유(0.05%) |            |
|                   | 양수기        | 08050400  | 경유(0.05%) |            |
|                   | 밭갈기        | 08050500  | 경유(0.05%) |            |
|                   | 파종기        | 08050600  | 경유(0.05%) |            |
|                   | 트랙터        | 08050700  | 경유(0.05%) |            |
| 이앙기               | 08050800   | 경유(0.05%) |           |            |

<sup>a</sup> 출처 : 한국철도기술연구원, 디젤기관의 배출가스 대기오염현황 및 저감방안에 관한 연구(1997)  
<sup>b</sup> 출처 : US EPA Development and selection of ammonia emission factor(1994)  
<sup>c</sup> 출처 : EEA EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook(2006)  
<sup>d</sup> 출처 : 국립환경연구원, 강유연선에 의한 대기오염물질 저감대책에 관한 연구(Ⅲ)(1999)  
<sup>e</sup> 출처 : EEA EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook(1999)  
<sup>f</sup> 출처 : US EPA PM Overview and Sources Westar PM 2.5 Workshop(2004)

국립환경과학원에서 발간한 대기오염물질 배출계수에서는 선박에서 사용하는 연료유를 B-C 유 한가지로 한정하고 이에 관한 kg/kl 단위로 환산할 수 있도록 배출계수를 마련하였다. Table 4.1 및 Table 4.2에서는 비도로이동오염원의 배출계수를 나타내고 있으며 별도로 적색으로 표기한 부분이 선박의 배출계수이다[13].

Table 4.2 Emission factor for non-road transport 2

| CO      | NO <sub>x</sub> | SO <sub>x</sub>       | TSP     | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub>     | VOC     | NH <sub>3a</sub> |
|---------|-----------------|-----------------------|---------|------------------|-----------------------|---------|------------------|
| 0.02836 | 0.06436         | 0.00164               | 0.00416 | 0.00416          | 0.003827 <sup>a</sup> | 0.01066 | 0.00011          |
| 0.01507 | 0.03775         | 0.00108               | 0.00268 | 0.00268          | 0.002466 <sup>a</sup> | 0.0062  | 0.00011          |
| 0.00587 | 0.01569         | 0.00043               | 0.00114 | 0.00114          | 0.001049 <sup>a</sup> | 0.00122 | 0.00011          |
| 7.4     | 87              | 20S                   | 6.7     | 6.7              | 6.164000 <sup>a</sup> | 2.4     | 0.11             |
| 7.4     | 87              | 20S                   | 6.7     | 6.7              | 6.164000 <sup>a</sup> | 2.4     | 0.11             |
| 0.0068  | 0.0136          | 0.00541S <sup>d</sup> | 0.00136 | 0.00136          | 0.001251 <sup>a</sup> | 0.00204 | 0.00004          |
| 0.00344 | 0.00636         | 0.00535S <sup>d</sup> | 0.00077 | 0.00077          | 0.000708 <sup>a</sup> | 0.00075 | 0.00003          |
| 0.0068  | 0.0136          | 0.00541S <sup>d</sup> | 0.00136 | 0.00136          | 0.001251 <sup>a</sup> | 0.00204 | 0.00004          |
| 0.0068  | 0.0136          | 0.00541S <sup>d</sup> | 0.00136 | 0.00136          | 0.001251 <sup>a</sup> | 0.00204 | 0.00004          |
| 0.0068  | 0.0136          | 0.00541S <sup>d</sup> | 0.00136 | 0.00136          | 0.001251 <sup>a</sup> | 0.00204 | 0.00004          |
| 0.0068  | 0.0136          | 0.00541S <sup>d</sup> | 0.00136 | 0.00136          | 0.001251 <sup>a</sup> | 0.00204 | 0.00004          |
| 0.00248 | 0.00784         | 0.00535S <sup>d</sup> | 0.00039 | 0.00039          | 0.000359 <sup>a</sup> | 0.00048 | 0.00003          |
| 0.0068  | 0.0136          | 0.00541S <sup>d</sup> | 0.00136 | 0.00136          | 0.001251 <sup>a</sup> | 0.00204 | 0.00004          |

IMO GHG Study 2009 및 2014 에서는 엔진유형(메인, 보조, 보일러), 엔진등급(저속, 중속, 고속) 및 연료유형(HFO, MDO, MGO 및 LNG)에 따라 추정되었다. 연료유별 배출계수들을 대기오염물질별로 정리하였다[14&15].

Table 4.3은 IMO GHG Study 2009 및 2014 의 대기오염물질 배출계수를 비교해 놓은 표이며, 빨간 글씨로 표기된 값들은 2009년과 비교했을 때 2014년에 상당한 변화를 보인 값들을 나타낸다.

Table에서 반복적으로 언급되는 SSD 와 MSD는 각각 저속디젤엔진(Slow speed diesel engine) 및 중속디젤엔진 (Medium speed diesel engine) 의 약자이다.

Table 4.3 Emission factor for air pollutant

| Pollutant        | IMO   |             |      |           | EF <sup>1</sup> | Correlation   |                        |      |
|------------------|-------|-------------|------|-----------|-----------------|---------------|------------------------|------|
|                  | Study | Engine type | Tier | Fuel type |                 | 2014/2009 EFs | Correlation            |      |
| CO <sub>2</sub>  | 2009  | unk         | unk  | HFO       | 3130            |               |                        |      |
|                  | 2014  | all         | all  | HFO       | 3114            | 0.99          | good                   |      |
|                  | 2009  | unk         | unk  | MDO       | 3190            |               |                        |      |
|                  | 2014  | all         | all  | MDO       | 3206            | 1.01          | good                   |      |
| NO <sub>x</sub>  | 2009  | SSD         | 0    | ?         | 90              |               |                        |      |
|                  | 2014  | SSD         | 0    | HFO       | 92.82           | 1.03          | good                   |      |
|                  | 2009  | SSD         | 1    | ?         | 78              |               |                        |      |
|                  | 2014  | SSD         | 1    | HFO       | 87.18           | 1.12          | good                   |      |
|                  | 2009  | MSD         | 0    | ?         | 60              |               |                        |      |
|                  | 2014  | MSD         | 0    | HFO       | 65.12           | 1.09          | good                   |      |
|                  | 2009  | MSD         | 1    | ?         | 51              |               |                        |      |
|                  | 2014  | MSD         | 1    | HFO       | 60.47           | 1.19          | moderate difference    |      |
| SO <sub>x</sub>  | 2009  | unk         | unk  | HFO 2.7%  | 54              |               |                        |      |
|                  | 2014  | SSD         | 0    | HFO 2.7%  | 52.77           | 0.98          | good                   |      |
|                  | 2014  | SSD         | 0    | HFO 2.42% | 47.49           | 0.88          | as modelled for 2007   |      |
|                  | 2009  | unk         | unk  | MDO 0.5%  | 10              |               |                        |      |
|                  | 2014  | SSD         | 0    | MDO 0.5%  | 9.76            | 0.98          | good                   |      |
|                  | 2014  | SSD         | 0    | MDO 0.15% | 2.64            | 0.26          | as modelled for 2007   |      |
|                  | PM    | 2009        | unk  | unk       | HFO 2.7%        | 6.7           |                        |      |
|                  |       | 2014        | SSD  | 0         | HFO 2.7%        | 7.28          | 1.09                   | good |
| 2014             |       | SSD         | 0    | HFO 2.42% | 6.84            | 1.02          | as modelled for 2007   |      |
| 2009             |       | unk         | unk  | MDO 0.5%  | 1.1             |               |                        |      |
| 2014             |       | SSD         | 0    | MDO 0.5%  | 1.82            | 1.65          | significant difference |      |
| 2014             |       | SSD         | 0    | MDO 0.1%  | 1.24            | 1.13          | as modelled for 2007   |      |
| CO               | 2009  | unk         | unk  | unk       | 7.4             |               |                        |      |
|                  | 2014  | SSD         | 0    | HFO       | 2.77            | 0.37          | significant difference |      |
| CH <sub>4</sub>  | 2009  | unk         | unk  | unk       | 0.3             |               |                        |      |
|                  | 2014  | SSD         | 0    | HFO       | 0.06            | 0.20          | significant difference |      |
| N <sub>2</sub> O | 2009  | unk         | unk  | unk       | 0.08            |               |                        |      |
|                  | 2014  | SSD         | 0    | HFO       | 0.16            | 2.00          | significant difference |      |
| NMVOC            | 2009  | unk         | unk  | unk       | 2.4             |               |                        |      |
|                  | 2014  | SSD         | 0    | HFO       | 3.08            | 1.28          | significant difference |      |

Notes : <sup>1</sup>kg 오염물질/연료의 톤; unk=모름; 중간 차이 10-25%; 중대한 차이 >25%



국립환경과학원에서 발간한 대기오염물질 배출계수와 IMO GHG Study의 배출계수를 비교해보면 NOx와 같이 거의 유사한 값을 보이는 항목들이 있으나, 다른 항목들은 사용 연료유 및 엔진의 차이 등으로 그 값들이 달랐다.

본 연구에서는 실제 선박 운항 조건을 반영한 IMO Green House Gas study 2014 저속디젤엔진의 대기오염 배출물질 계수를 대기오염물질 배출 환산에 사용하였다. Table 4.4는 본 연구에서 사용한 환산계수만을 별도로 정리한 표이다.

Table 4.4 Emission factor for air pollutant 2

| Air pollutant    | Emission factor (kg/ton-fuel) | Remark           |
|------------------|-------------------------------|------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 3,114                         | HFO              |
| NO <sub>x</sub>  | 87.18                         | SSD, Tier I, HFO |
| SO <sub>x</sub>  | 52.77                         | SSD, HFO(2.7 %S) |
| PM               | 7.28                          | SSD, HFO(2.7 %S) |
| CO               | 2.77                          | SSD, HFO         |
| CH <sub>4</sub>  | 0.06                          | SSD, HFO         |
| N <sub>2</sub> O | 0.16                          | SSD, HFO         |

source : IMO green house study 2014

#### 4.1.2 실선 VSR 실증 연구

선박 저속운항을 시행하는 항만은 앞서 설명한 몇 개 항 뿐이며, 그마저도 자발적 시행을 바탕으로 한 것이기 때문에, 실질적인 선박 데이터 수집이 쉽지 않다.

하지만 선박 속도 변화에 따른 실제적인 배출가스 내 오염물질의 변화를 검증하고자 하는 연구의 목적 상 연구 대상 선박의 운항패턴의 변경을 통해 실제 데이터를 확보하고 분석을 시행하기로 한다.

본 실증테스트는 두 가지 방법으로 분리해서 시행되었다. 첫 번째는 도선사 승선 전/후 단계를 5해리 단위로 6단계로 구분해서 짧은 구간에서의 단계적 속도 변화를 통해 영향성을 보고자 한다. 두 번째는 도선사 승선 전/후 단계를 20마일 단위로 4단계로 구분해서 비교적 긴 구간에서의 단계적 속도 변화를 살펴보는 것이다.

(1) 6단계 5해리 구분 방법

Fig. 4.1과 같이 1단계부터 3단계는 입항 시의 단계적 속도 변화, 4단계부터 6단계는 출항 시의 단계적 속도 변화를 통한 선박의 데이터를 수집하였다.

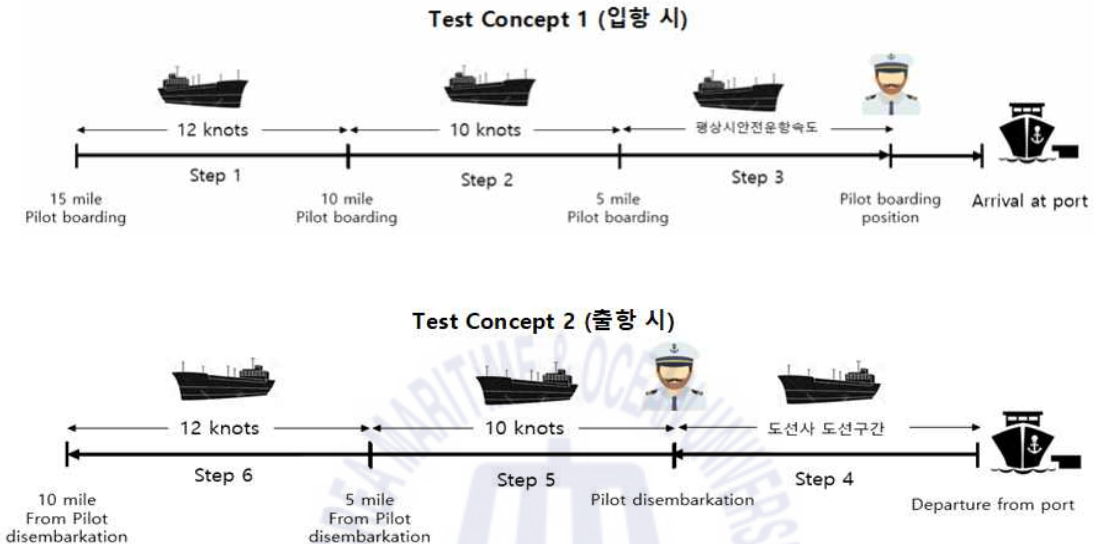


Fig. 4.1 6 Step 5 miles speed change method

입항 시 도선사 승선 전 구간별(1~3 step), 출항 시 도선사 승선 후 구간별 (4~6 step) 선속을 감속하여 정보를 수집하였으며, 총 4항차에 걸쳐 입항과 출항 시 데이터를 수집하였다.

1) 연구 대상선박 제원

- 선종 : 컨테이너
- GT : 7,500 M/T
- 평균 항해 속도 : 14 ~ 15 Knot
- 연료유 Consumer : M/E 1 EA, Generator Engine 3 EA, Aux Boiler 1 EA

2) 사용 연료유 Spec.

- H.F.O : 비중 0.9631 / 사용온도 135~140 °C

해당 컨테이너 선박의 실증 구역 위치는 Fig. 4.2와 같다.



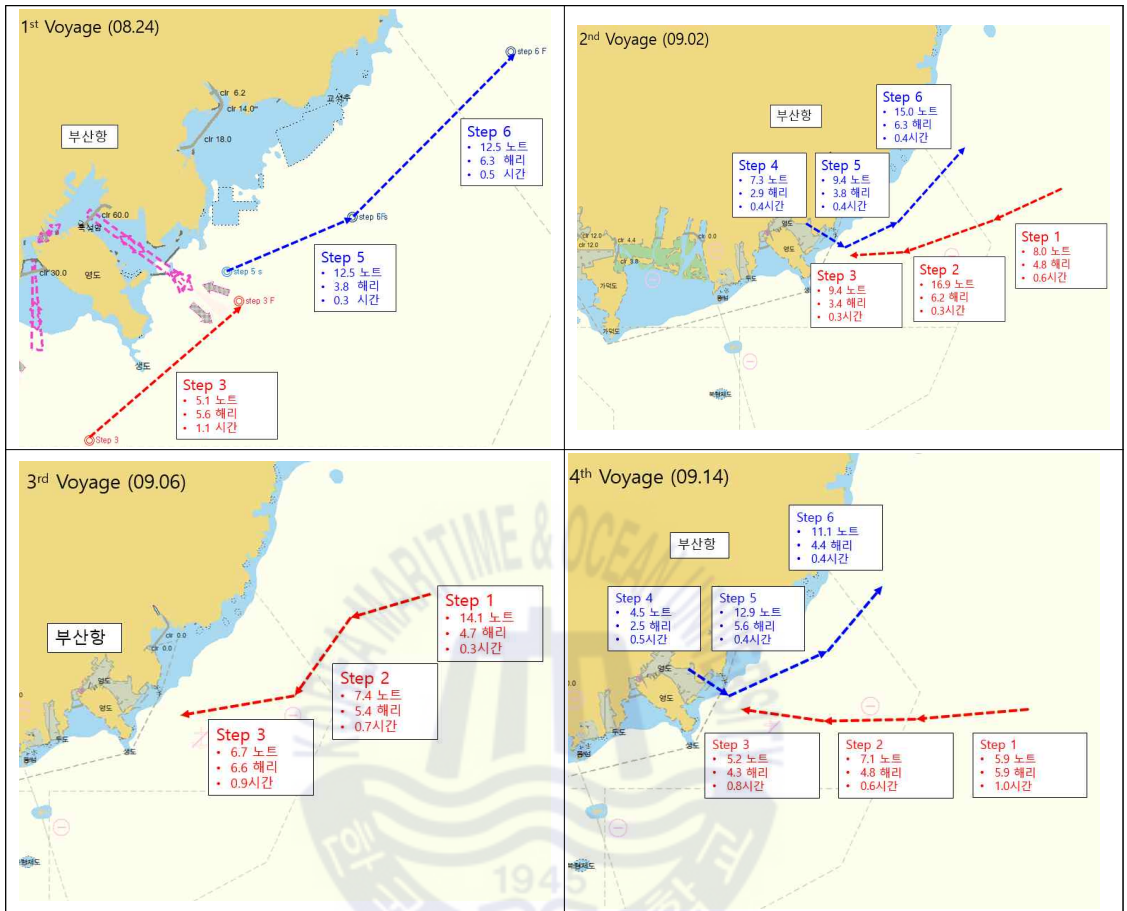
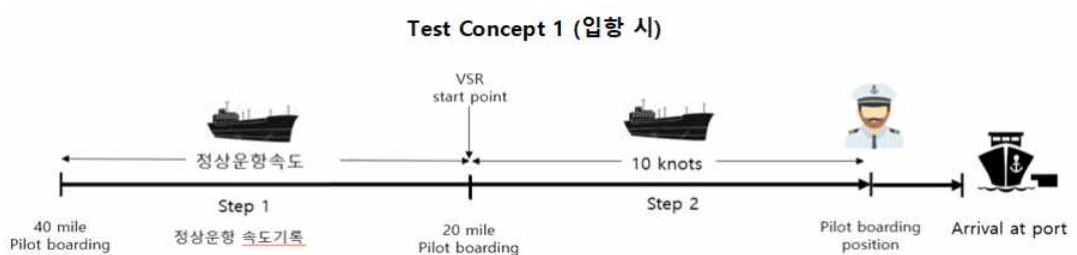


Fig. 4.2 Trial location for the container vessel

(2) 4단계 20해리 구분 방법

Fig. 4.3과 같이 1, 2 단계는 입항 시의 단계적 속도 변화, 3, 4단계는 출항 시의 단계적 속도 변화를 통한 선박의 데이터를 수집하였다.



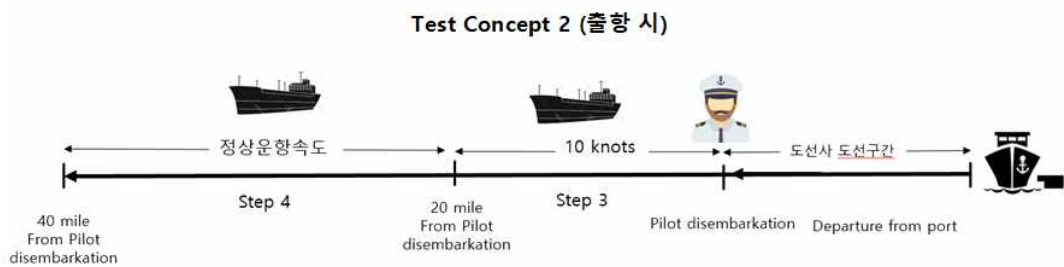


Fig. 4.3 4 Step 20 miles speed change method

입항 시 도선사 승선 전 구간별(1, 2 step), 출항 시 도선사 하선 후 구간별(3, 4 step) 선속을 감속하여 정보를 수집하였다.

1) 연구 대상선박 제원

- 선종 : 오일탱커
- GT : 156,331 M/T
- 평균 항해 속도 : 13 ~ 14 Knot
- 연료유 Consumer : M/E 1 EA, Generator Engine 3 EA, Aux Boiler 1EA

2) 사용 연료유 Spec

- H.F.O : 비중 0.9613 / 사용온도 135~140 °C

해당 탱커선박의 실증 구역 위치는 Fig. 4.4과 같다.



Fig. 4.4 Trial location for the oil tanker

## 4.2 대기오염 물질 저감 영향성 분석

### 4.2.1 6단계 5해리 구분방법(컨테이너선)

#### (1) 취득한 데이터 검토

실증 데이터를 바탕으로 취득한 데이터를 바탕으로 구간별 거리, 시간, 평균 속도, 연료 소비량을 계산 후 각 단계별 대기오염물질 배출을 배출계수를 사용하여 환산해 내고자 한다.

우선 대상선박의 단계별 Flowmeter 값을 확인하고 이를 바탕으로 연료유 사용량을 계산하였다. 선박 대기오염물질 배출의 대부분을 차지하는 주기판의 시간당 연료 소모량을 환산하여 연료 소모량 추이를 살펴볼 수 있겠다.

컨테이너 선박의 항차별 데이터를 바탕으로 상기 4.1.1항의 Table 4.4에서 살펴본 대기오염물질 환산계수를 적용하여 대기오염물질 배출량을 환산하면 Table 4.5와 같이 정리된다.

Table 4.5 Fuel consumption & air pollutant emissions

| Test step  | ship speed (Knots) | distance (mile) | time (hr) | Fuel consumption (M/T) | M/E SFC (kg/h) | Emissions (kg/h) |                 |                 |       |       |                 |     |         |
|------------|--------------------|-----------------|-----------|------------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-----------------|-----|---------|
|            |                    |                 |           |                        |                | CO <sub>2</sub>  | NO <sub>x</sub> | SO <sub>x</sub> | PM    | CO    | CH <sub>4</sub> | NO  | SUM     |
| 1st voyage |                    |                 |           |                        |                |                  |                 |                 |       |       |                 |     |         |
| Step 1     | -                  | -               | -         | -                      | -              | -                | -               | -               | -     | -     | -               | -   | -       |
| Step 2     | -                  | -               | -         | -                      | -              | -                | -               | -               | -     | -     | -               | -   | -       |
| Step 3     | 5.08               | 5.59            | 1.10      | 0.53                   | 402.75         | 1,254            | 26,227          | 21,253          | 2,992 | 1,116 | 24              | 64  | 53,286  |
| Step 4     | -                  | -               | -         | 0.45                   | -              | -                | -               | -               | -     | -     | -               | -   | -       |
| Step 5     | 12.52              | 3.75            | 0.30      | 0.257                  | 802.58         | 2,499            | 52,264          | 42,352          | 5,843 | 2,223 | 48              | 128 | 106,178 |
| Step 6     | 12.51              | 6.25            | 0.50      | 0.36                   | 693.43         | 2,159            | 45,156          | 36,592          | 5,048 | 1,921 | 42              | 111 | 91,743  |
| 2nd voyage |                    |                 |           |                        |                |                  |                 |                 |       |       |                 |     |         |
| Step 1     | 8.03               | 4.82            | 0.60      | 0.31                   | 449.45         | 1,400            | 29,268          | 23,717          | 3,272 | 1,245 | 27              | 72  | 59,464  |
| Step 2     | 16.91              | 6.20            | 0.37      | 0.41                   | 945.59         | 2,945            | 61,577          | 49,899          | 6,884 | 2,439 | 57              | 151 | 125,101 |
| Step 3     | 9.40               | 3.45            | 0.37      | 0.26                   | 604.13         | 1,991            | 39,341          | 31,880          | 4,398 | 1,673 | 36              | 97  | 79,924  |
| Step 4     | 7.25               | 2.90            | 0.40      | 0.49                   | 1083.49        | 3,374            | 70,557          | 57,176          | 7,888 | 3,001 | 65              | 173 | 143,328 |

|            |       |      |      |      |        |       |        |        |       |       |    |     |        |
|------------|-------|------|------|------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|----|-----|--------|
| Step 5     | 9.39  | 3.75 | 0.40 | 0.28 | 650.09 | 2,204 | 42,334 | 34,305 | 4,733 | 1,801 | 39 | 104 | 86,004 |
| Step 6     | 15.01 | 6.26 | 0.42 | 0.26 | 600.97 | 1,871 | 39,135 | 31,713 | 4,375 | 1,665 | 36 | 96  | 79,515 |
| 3rd voyage |       |      |      |      |        |       |        |        |       |       |    |     |        |
| Step 1     | 14.07 | 4.69 | 0.33 | 0.15 | 404.50 | 1,260 | 26,341 | 21,346 | 2,945 | 1,120 | 24 | 64  | 53,524 |
| Step 2     | 7.42  | 5.44 | 0.73 | 0.35 | 380.86 | 1,186 | 24,802 | 20,098 | 2,773 | 1,055 | 23 | 61  | 50,392 |
| Step 3     | 6.68  | 6.57 | 0.98 | 0.50 | 421.15 | 1,311 | 27,425 | 22,224 | 3,066 | 1,167 | 25 | 67  | 55,722 |
| Step 4     | -     | -    | -    | -    | -      | -     | -      | -      | -     | -     | -  | -   | -      |
| Step 5     | -     | -    | -    | -    | -      | -     | -      | -      | -     | -     | -  | -   | -      |
| Step 6     | -     | -    | -    | -    | -      | -     | -      | -      | -     | -     | -  | -   | -      |
| 4th voyage |       |      |      |      |        |       |        |        |       |       |    |     |        |
| Step 1     | 5.92  | 5.92 | 1.00 | 0.56 | 471.92 | 1,470 | 30,731 | 24,903 | 3,436 | 1,307 | 28 | 74  | 62,436 |
| Step 2     | 7.13  | 4.75 | 0.67 | 0.32 | 390.06 | 1,215 | 25,400 | 20,583 | 2,840 | 1,080 | 23 | 62  | 51,607 |
| Step 3     | 5.16  | 4.30 | 0.83 | 0.45 | 427.62 | 1,332 | 27,846 | 22,565 | 3,113 | 1,184 | 24 | 68  | 56,573 |
| Step 4     | 4.50  | 2.55 | 0.57 | 0.45 | 662.84 | 2,064 | 43,164 | 34,978 | 4,825 | 1,836 | 40 | 106 | 87,684 |
| Step 5     | 12.87 | 5.58 | 0.43 | 0.32 | 711.21 | 2,215 | 46,314 | 37,531 | 5,178 | 1,970 | 43 | 114 | 94,094 |
| Step 6     | 11.12 | 4.45 | 0.40 | 0.29 | 698.25 | 2,174 | 45,470 | 36,847 | 5,083 | 1,934 | 42 | 112 | 92,376 |

## (2) 대기오염물질 배출 분석

Table 4.5 에서 살펴본 데이터를 기반으로 전체 연료 소모량을 각 단계별 그리고 연료 소비자별로 구분하여 그래프로 나타내면 Fig. 4.5와 같다.

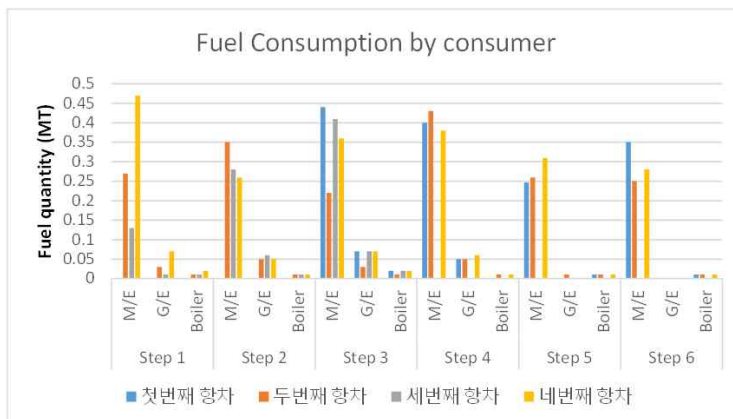


Fig. 4.5 Fuel consumption by consumer

연료유 소모량에 따른 대기오염물질 배출량을 각 항차별 누적 그래프로 나타내 보면 Fig. 4.6 ~ Fig. 4.9과 같다.

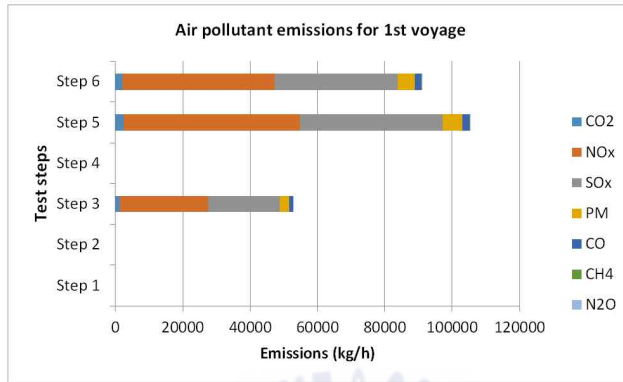


Fig.4.6 Air pollutant emissions for 1st voyage

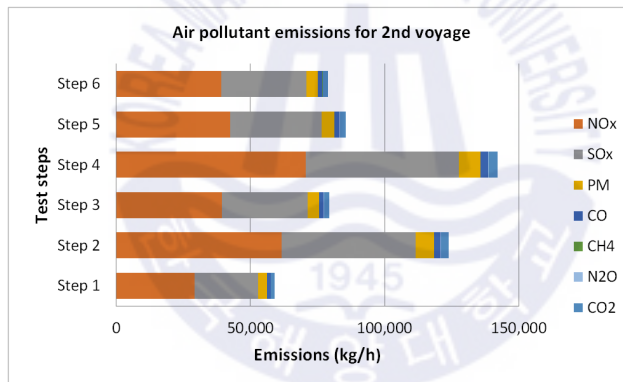


Fig.4.7 Air pollutant emissions for 2nd voyage

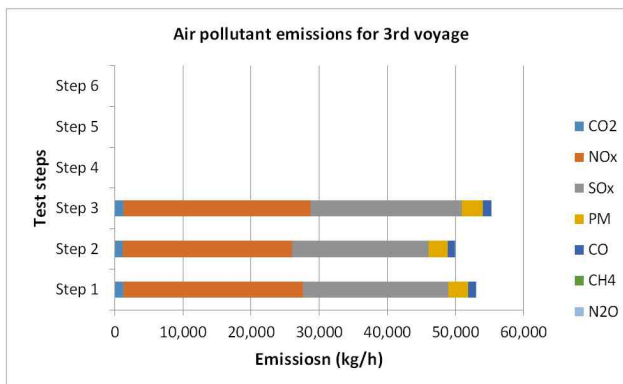


Fig.4.8 Air pollutant emissions for 3rd voyage

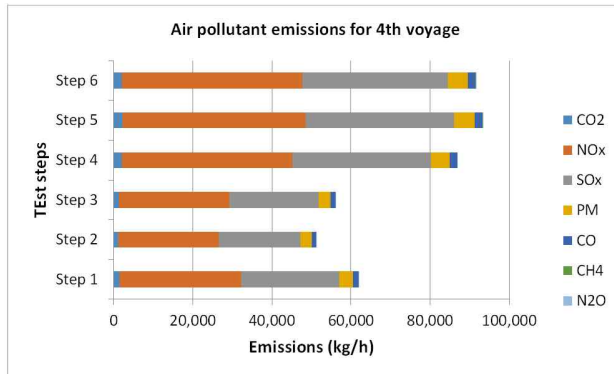


Fig.4.9 Air pollutant emissions for 4th voyage

- 5해리 6단계로 나눈 케이스에서는 선속이 변하는 동안 특정할만한 연료소모량 변화 추이를 확인할 수 없었음
- 첫 번째 항차 Step 1, 2, 4 및 세 번째 항차 Step 4~6와 같이 데이터 누락으로 확인할 수 없는 부분도 있었음
- 두 번째 항차 Step 4와 5, 그리고 네 번째 항차의 Step 4~6을 보면 속도가 낮음에도 더 많은 배출량을 보이고 있음. 이는 출항 직후 선박이 추진력이 생기기 전까지 프로펠러축에 다량의 구동토크가 발생하였고, 이후 추진력이 생성되어 토크가 점점 감소하여 배출량이 감소하는 것으로 보임
- 두 번째 항차의 Step 1~3은 속도와 배출량의 변화가 드러나나 세 번째 항차의 Step 1~3은 속도 변화에 따른 배출량 변화가 없음

#### 4.2.2 4단계 20해리 구분방법(오일탱커선)

##### (1) 취득한 데이터 검토

컨테이너선으로 실증 시행한 6단계 5해리 구분방법과 마찬가지로 오일탱커선의 실증 데이터를 바탕으로 취득한 데이터를 바탕으로 구간별 거리, 시간, 평균속도, 연료 소비량을 계산 후 각 단계별 대기오염물질 배출을 배출계수를 사용하여 환산하였다.

대상선박의 단계별 Flowmeter 값을 확인하고 이를 바탕으로 연료유 사용량

을 계산하였다. 선박 대기오염물질 배출의 대부분을 차지하는 주기관의 시간 당 연료 소모량을 환산하여 연료 소모량 추이를 살펴보았다.

대상 선박의 데이터를 바탕으로 상기 4.1.1항의 Table 4.4에서 살펴본 대기 오염물질 환산계수를 적용하여 대기오염물질 배출량을 환산하면 Table 4.6과 같다.

Table 4.6 Fuel consumption & air pollutant emissions 2

| Test step | ship speed (knots) | distance (mile) | time (hr) | Fuel consumption (M/T) | M/E SFC (kg/h) | Emissions (kg/h) |                 |                 |        |       |                 |     |         |
|-----------|--------------------|-----------------|-----------|------------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|--------|-------|-----------------|-----|---------|
|           |                    |                 |           |                        |                | CO <sub>2</sub>  | NO <sub>x</sub> | SO <sub>x</sub> | PM     | CO    | CH <sub>4</sub> | NO  | SUM     |
| Step 1    | 10.20              | 20.2            | 2.00      | 3.12                   | 1,364.9        | 4,250            | 88,882          | 72,026          | 9,936  | 3,781 | 82              | 218 | 179,176 |
| Step 2    | 10.0               | 14.80           | 1.50      | 2.19                   | 1,248.8        | 3,889            | 81,322          | 65,899          | 9,091  | 3,459 | 75              | 200 | 163,935 |
| Step 3    | 9.60               | 18.90           | 2.00      | 1.79                   | 642.2          | 2,012            | 42,081          | 34,100          | 4,704  | 1,790 | 39              | 103 | 84,829  |
| Step 4    | 14.60              | 19.80           | 1.40      | 3.55                   | 2,285.8        | 7,118            | 143,351         | 120,622         | 16,641 | 6,332 | 137             | 366 | 300,066 |

(2) 대기오염물질 배출 분석

Table 4.6에서 살펴본 데이터를 기반으로 전체 연료유 소모를 그래프로 나타내면 Fig. 4.10과 같다.

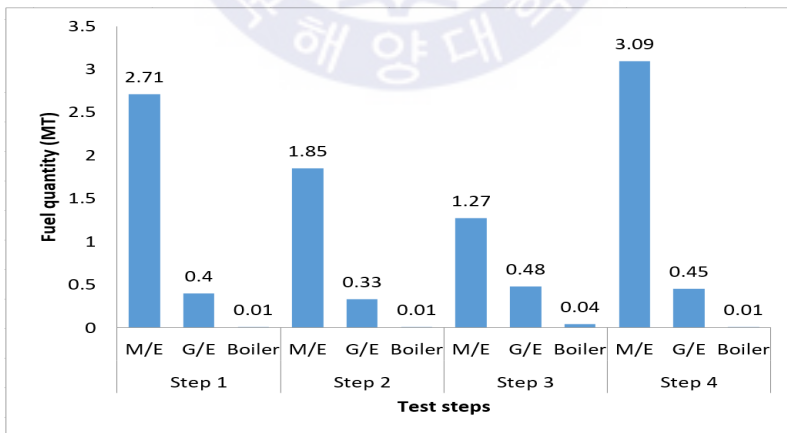


Fig. 4.10 Fuel consumption by consumer



연료유 소모량에 따른 대기오염물질 배출량을 누적 그래프로 나타내 보면 Fig. 4.11과 같다.

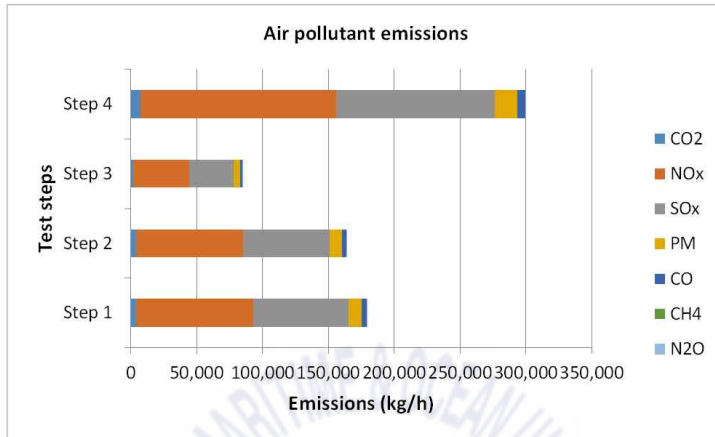


Fig. 4.11 Air pollutant emission (kg/hr)

일정한 패턴이나 유의미한 변화를 보이지 않은 첫 번째 케이스에 비해 두 번째 케이스는 일정한 추이가 관찰된다. 특히 정상운항속도로 운항한 Step 4와 비교해보면 Step 2 및 Step 3 단계에서 연료유 사용량 및 대기오염물질 배출이 대폭 줄어드는 경향을 확인할 수 있다.

점선으로 표시된 선속과 대기오염물질 배출량을 비교해보면 선박 속도가 배출량 변화에 직접적인 상관관계가 있음을 알 수 있다.

#### 4.2.3 부산항 선박 데이터 연구

##### (1) 부산항 입출항 선박 자료 수집

부산항의 입출항 선박 운항 자료를 AIS (Automatic Identification System) 데이터를 통해 확보하였으며, IHS Fairplay 의 데이터베이스에서 선박 정보를 수집하였다.

AIS는 국제항해에 종사하는 총톤수 300톤 이상 모든 선박에 탑재하고 있다. 국내법에 따라 국제항해에 종사하지 않더라도 총톤수 500톤 이상 선박에도 탑

재하도록 요구하고 있다.

IHS Fairplay 의 데이터베이스에서 수집한 데이터를 통해 선박의 국적, 선종, 총톤수(GT), 건조일자 등을 확인하고 AIS 선박 IMO 정보와 비교하여 대기오염 물질 배출량 산정에 활용하였다. 확보한 데이터는 2019년 2월부터 5월까지 부산항을 입출항한 선박에 대한 데이터이다.

(2) 부산항 입출항 선박 자료 분석

부산항 AIS 데이터를 바탕으로 선종별 입출항 정보를 **Table 4.7**와 같이 파악하였으며 선종별로 분석해 보면 터그(36.2%) 및 컨테이너선(34.8%)이 가장 많았다.

**Table 4.7 Ships operating in Busan port**

| Ship type     | No.   | (%)  |
|---------------|-------|------|
| Bulk          | 45    | 0.5  |
| Tanker        | 534   | 6.4  |
| Container     | 2,905 | 34.8 |
| General cargo | 406   | 4.9  |
| Ro-Ro cargo   | 405   | 4.9  |
| Passenger     | 553   | 6.6  |
| Fishing       | 168   | 2.0  |
| Tug           | 3,020 | 36.2 |
| Other         | 311   | 3.7  |
| Total         | 8,347 | 100  |

부산항 운항 전체 선박의 평균 속도는 18.1 노트이며, 선종별로는 여객선 평균 24.3 노트, 컨테이너 22.2 노트, 로로선 19.36 노트 순으로 높게 나타났다. 각 선종별 평균 운항 속도는 **Fig. 4.12**와 같다.

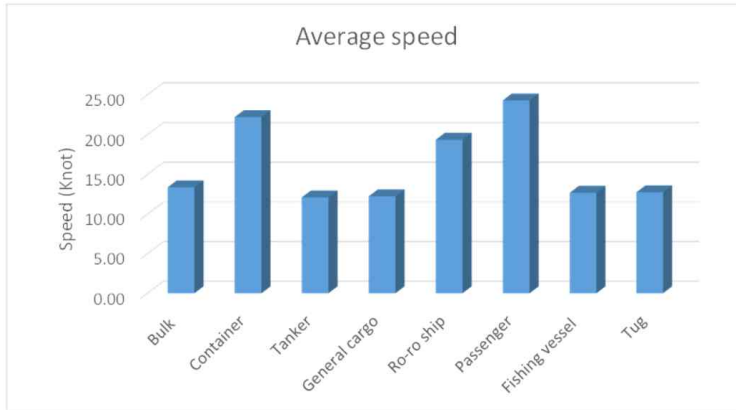


Fig. 4.12 Average speed of each ship types

### (3) 운항 속도에 따른 선박 배출량 산정

선박 저속운항에 따른 대기오염물질 배출 패턴을 분석해 보고자 한다. 이를 위해 부산항을 운항한 선박의 선종별 평균 속도로 운항할 때 연료소모량 추정 및 배출량을 산정하고, 선박 저속운항을 통한 선종별 연료소모량 추정 및 배출량을 산정하였다.

선박 연료유의 주 사용처는 주기관, 보조기관 및 보일러이며, 이 중 선속 변화 시 배출량이 변화하는 주기관에 대해서만 살펴보도록 하겠다.

AIS 선박 데이터 및 IHS Fairplay 자료를 비교 분석하여 선박별 출력(kW)를 추산하였으며, 추산된 출력을 기반으로 배출계수를 곱하여 시간당 대기오염물질 배출량을 산정하였다.

선박별 출력을 가지고 대기오염물질 배출량을 산정하기 위해 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency)에서 1996년에 개발한 Table 4.8의 디젤엔진 배출계수를 활용하였다. 파운드를 킬로그램 단위로 환산 후 마력을 킬로와트로 환산하여 각 배출물질 별 시간당 배출량을 산정하였다.

Table 4.8 EPA emission factors for diesel engines

| Pollutant                    | Gasoline Fuel<br>(SCC 2-02-003-01, 2-03-003-01) |   | Diesel Fuel<br>(SCC 2-02-001-02, 2-03-001-01)   |   | EMISSION<br>FACTOR<br>RATING |
|------------------------------|---|---|---|---|------------------------------|
|                              | Emission Factor<br>(lb/hp-hr)<br>(power output) | Emission Factor<br>(lb/MMBtu)<br>(fuel input) | Emission Factor<br>(lb/hp-hr)<br>(power output) | Emission Factor<br>(lb/MMBtu)<br>(fuel input) |                              |
| NO <sub>x</sub>              | 0.011   | 1.63  | 0.031   | 4.41  | D                            |
| CO                           | 6.96 E-03 <sup>d</sup>                          | 0.99 <sup>d</sup>                             | 6.68 E-03                                       | 0.95  | D                            |
| SO <sub>x</sub>              | 5.91 E-04                                       | 0.084   | 2.05 E-03                                       | 0.29  | D                            |
| PM-10 <sup>b</sup>           | 7.21 E-04                                       | 0.10  | 2.20 E-03                                       | 0.31  | D                            |
| CO <sub>2</sub> <sup>c</sup> | 1.08  | 154   | 1.15  | 164   | B                            |
| Aldehydes                    | 4.85 E-04                                       | 0.07  | 4.63 E-04                                       | 0.07  | D                            |
| TOC                          |   |   |   |   |                              |
| Exhaust                      | 0.015   | 2.10  | 2.47 E-03                                       | 0.35  | D                            |
| Evaporative                  | 6.61 E-04                                       | 0.09  | 0.00  | 0.00  | E                            |
| Crankcase                    | 4.85 E-03                                       | 0.69  | 4.41 E-05                                       | 0.01  | E                            |
| Refueling                    | 1.08 E-03                                       | 0.15  | 0.00  | 0.00  | E                            |

1) 평균속도 운항 시

각 선종별 평균 크기의 선박이 평균속도(MCR의 70%)로 운항할 시 시간당 배출하는 오염물질의 양은 Table 4.9와 같다.

Table 4.9 Estimated emission for each ship types

| Ship type     | Size (M/T) | Speed (knot) | Power (kW) at 70% | Emissions (kg/h) |                 |                 |      |       |
|---------------|------------|--------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|------|-------|
|               |            |              |                   | CO <sub>2</sub>  | NO <sub>x</sub> | SO <sub>x</sub> | PM   | CO    |
| Container     | 68,687     | 22.2         | 33,841            | 23,682.9         | 638.3           | 42.2            | 45.4 | 137.6 |
| Tanker        | 4,042      | 12.0         | 1,596             | 116.2            | 30.1            | 2.0             | 2.1  | 6.3   |
| LPG           | 3,180      | 12.0         | 1,902             | 1,330.5          | 35.9            | 2.47            | 2.6  | 7.7   |
| General cargo | 12,614     | 12.5         | 4,500             | 3,144.0          | 84.7            | 5.6             | 6.1  | 18.6  |
| Car carrier   | 50,562     | 19.4         | 7,584             | 5,305.1          | 143.0           | 9.5             | 10.2 | 30.8  |
| Passenger     | 56,139     | 24.3         | 25,759            | 17,969.6         | 484.4           | 32.0            | 34.4 | 104.4 |
| Fishery       | 2,771      | 12.5         | 2,787             | 1,955.5          | 52.7            | 3.5             | 3.7  | 11.4  |
| Tug           | 115        | 12.5         | 956               | 672.3            | 18.1            | 1.2             | 1.3  | 3.9   |

2) VSR 적용 시

선박 저속운항 프로그램 도입 시 배출량 저감효과를 분석하기 위해 VSR 제한속도를 적용한 주기관 배출량을 추정하였다. 이를 위해 엔진 제조사 중 하나인 MAN B&W사의 프로펠러 퍼포먼스 데이터인 Fig. 4.13을 참고하였으며, VSR 속도에서의 엔진 출력 값을 비례식으로 추산하였다.

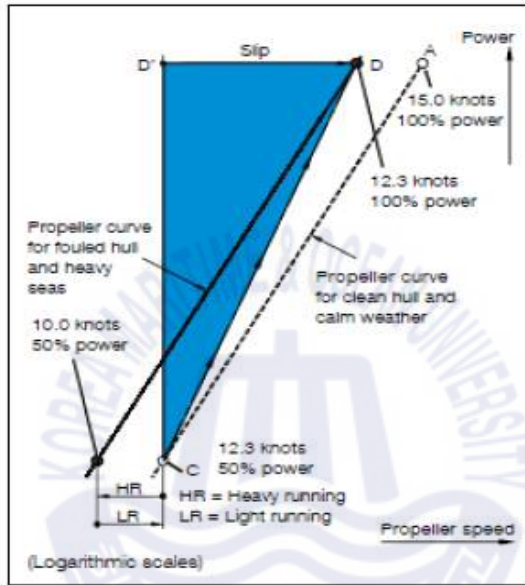


Fig. 4.13 Propeller speed performance

VSR 적용 시 추정된 배출량 값은 Table 4.10와 같다.

Table 4.10 Estimated emission for each ship types with VSR program

| Ship type | Size (M/T) | Speed (knot) | Power (kW) at 70% | Emissions (kg/h) |                 |                 |      |      |
|-----------|------------|--------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|------|------|
|           |            |              |                   | CO <sub>2</sub>  | NO <sub>x</sub> | SO <sub>x</sub> | PM   | CO   |
| Container | 68,687     | 12           | 18,292            | 12,795.6         | 344.9           | 22.8            | 24.5 | 74.3 |
| Tanker    | 4,042      | 10           | 1,330             | 93.0             | 25.1            | 1.7             | 1.8  | 5.4  |
| LPG       | 3,180      | 10           | 1,585             | 1,108.7          | 29.9            | 2.0             | 2.1  | 6.4  |

|               |        |    |        |         |       |      |      |      |
|---------------|--------|----|--------|---------|-------|------|------|------|
| General cargo | 12,614 | 10 | 3,750  | 2,623.2 | 70.7  | 4.7  | 5.0  | 15.2 |
| Car carrier   | 50,562 | 12 | 4,691  | 3,281.4 | 88.4  | 5.9  | 6.3  | 19.1 |
| Passenger     | 56,139 | 12 | 12,720 | 8,897.9 | 239.8 | 15.9 | 17.1 | 51.7 |
| Fishery       | 2,771  | 10 | 2,229  | 1,559.2 | 42.0  | 2.8  | 3.0  | 9.1  |
| Tug           | 115    | 10 | 765    | 535.1   | 14.4  | 1.0  | 1.0  | 3.1  |

### 3) 속도 변화에 따른 배출량 비교

평균속도 운항 시와 VSR 적용 시의 대기오염물질 배출량의 차이를 보면 Table 4.11과 같다.

Table 4.11 Comparison table with or without VSR

| Ship type  | Container | Tanker | LPG     | General Cargo | Car Carrier | Passenger | Fishery | Tug   |
|------------|-----------|--------|---------|---------------|-------------|-----------|---------|-------|
| 평균속도 운항 시  |           |        |         |               |             |           |         |       |
| 배출량 (kg/h) | 24,546.4  | 156.7  | 1,379.2 | 3,259.0       | 5,498.6     | 18,624.8  | 2,026.8 | 696.8 |
| VSR 적용 시   |           |        |         |               |             |           |         |       |
| 배출량 (kg/h) | 13,262.1  | 127    | 1,149.1 | 2,718.8       | 3,401.1     | 9,222.4   | 1,616.1 | 554.6 |
| 감소량 결과     |           |        |         |               |             |           |         |       |
| 감소량        | 11,284.3  | 29.7   | 230.07  | 540.2         | 2,097.5     | 9,402.4   | 410.7   | 142.2 |
| △%         | 46        | 19     | 17      | 16            | 38          | 50        | 20      | 20    |

위 결과는 시간당 배출량의 감소폭 만을 확인할 수 있으므로 VSR 적용 구간을 20해리로 지정하고 평균속도 운항 시와 VSR 적용 시 총 운항시간당 배출량을 Table 4.12와 같이 산정해 보았다.



Table 4.12 Emissions by operating time in 20 miles VSR zone

| Ship type  | Container | Tanker  | LPG     | General Cargo | Car Carrier | Passenger | Fishery | Tug     |
|------------|-----------|---------|---------|---------------|-------------|-----------|---------|---------|
| 평균속도 운항 시  |           |         |         |               |             |           |         |         |
| 운항시간       | 54분       | 1시간 40분 | 1시간 40분 | 1시간 36분       | 1시간 2분      | 49분       | 1시간 36분 | 1시간 36분 |
| 배출량 (kg/h) | 22,113.9  | 261.2   | 2,298.6 | 5,214.4       | 5,668.7     | 15,329.1  | 3,242.9 | 114.9   |
| VSR 적용 시   |           |         |         |               |             |           |         |         |
| 운항시간       | 1시간 40분   | 2시간     | 2시간     | 2시간           | 1시간 40분     | 1시간 40분   | 2시간     | 2시간     |
| 배출량 (kg/h) | 22,103.5  | 254.0   | 2,298.2 | 5,437.6       | 5,668.5     | 15,370.7  | 3,232.2 | 1,109.2 |
| 감소량 결과     |           |         |         |               |             |           |         |         |
| 감소량        | 10.4      | 7.2     | 0.4     | -223.2        | 0.2         | 41.6      | 10.7    | 5.7     |
| △%         | 0.04      | 4.57    | 0.03    | -6.84         | 0.01        | -0.22     | 0.53    | 0.82    |

실제 운항시간당 배출량 산정결과 선박 저속운항으로 인해 시간당 배출량은 줄어들었지만 운항시간이 늘어나게 됨으로써 운항시간당 배출량 감소량은 거의 미미한 것으로 확인되었다. 가장 큰 감소폭을 보인 것은 탱커선이며 일반화물선의 경우 오히려 배출량이 줄어들었다.

이러한 결과는 선박 배출량 산정을 단순히 비례적인 산정 값으로만 비교하였기 때문이며 엔진 로드별 연료소모량의 변화를 반영하지 못하였기 때문이라고 추정된다.

### 4.3 결과 및 고찰

출항 후 선박의 속도를 지속 증가시키기 위해 축토크가 크게 나오는 구간에서는 속도는 낮아도 배출량이 크게나오고 있음을 알 수 있었다. 선박의 속도가 충분히 일정해질 수 있는 타력(관성)이 붙을 수 있도록 저속운항해역의 거리는 최소 5 mile 이상은 적용할 필요가 있음을 알 수 있었다.

선박 저속운항 프로그램의 적용으로 운항속도 제한에 따른 배출량 저감 효과는 여객선 50%, 컨테이너선 46% 및 자동차운반선 38% 이었다. VSR 적용에 따른 배출량 저감효율은 컨테이너선에서 가장 컸으며, 상대적으로 일반화물선에서 저감 효과가 적음을 확인하였다.

하지만 선박 저속운항 프로그램 적용 시에는 운항속도 제한에 따라 운항시간이 연장되므로 운항 시간에 따른 배출량을 산정해 본 결과 변화가 거의 없어 보였다. 이는 선박 배출량을 비례적으로 산정된 추정 값으로 비교하였기 때문이라고 보여지며, 따라서 실제 운항 선박의 데이터를 종합적으로 수집하여 검토할 필요성을 느낀다.

본 연구를 포함한 많은 기존의 연구에서도 보여주듯이 선박 운항속도는 연료소모량에 직접적인 영향을 끼치는 중요한 인자로 분류된다. 항만에서 선박으로부터의 대기오염물질 배출 저감을 위해서 국내 주요 항구에서 VSR 프로그램을 도입하는 것은 바람직하며, 항만지역 대기환경개선 효과도 기대할 수 있겠다.

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 선박에서 대기로 배출되는 유해물질에 대한 국·내외 대기오염 규정 및 국가별 인센티브 제도를 고찰해 보았으며, 그 중 대기오염물질 저감을 위한 인센티브 제도 중 미국 4개 항만에서 도입하여 운영 중인 선박 저속운항 프로그램의 사례를 조사하고 분석하였다. 그리고 선박 저속운항 프로그램의 국내 도입에 대한 검토의 관점에서 선박 저속운항이 대기오염물질 배출량에 미치는 영향을 검증하기 위해 실제 운항 선박을 활용하여 선박 저속운항을 시행하고 케이스별로 데이터를 분석 하였다. 또한, 부산항 선박 입출항 데이터를 활용하여 선박 저속운항에 따른 대기오염물질 배출 패턴을 분석하였으며 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 첫 번째 5해리로 분할하여 실험한 케이스에서 특정할만한 변화가 관찰되지 않았지만, 20해리로 분할하여 비교적 장거리를 기준으로 측정한 두 번째 케이스에서는 다양한 변화 인자들이 동일하게 존재하였음에도 불구하고 속도가 줄어들수록 연료소모량은 감소하고 대기오염물질 배출량도 줄어드는 형태로 선속에 따른 에미션 배출량이 일정한 경향성을 보였다. 이를 감안할 때 VSR의 실제적인 효과에 대해서는 20해리 정도의 긴 거리를 두고 측정할 필요가 있다고 보여 진다.
- 2) 부산항 선박 운항 데이터를 통한 대기오염물질 배출량 산정의 결과를 보면 부산항에서 선박 기인 오염물질 배출의 가장 큰 부분을 차지하는 선종은 컨테이너 및 일반화물선으로 확인되었으며, 특히 감속에 따른 연료소비량 저감이 상관관계가 있다는 점을 감안한다면 컨테이너선의 VSR 도입으로도 부산항에서 상당한 대기오염물질 배출을 저감할 수 있을 것으로 예상된다.

3) 선박 저속운항 프로그램 적용 시에는 운항속도 제한에 따라 운항시간이 연장되므로 운항지연에 따른 배출량을 산정해 본 결과 배출량의 감소가 미미한 것으로 나타났다. 이는 선박 배출량을 연료 소모량에 비례적으로 산정된 추정 값으로 비교하였고 엔진 로드별 연료소모량 변화를 제대로 반영하지 못하였기 때문이라고 보여 진다.

위와 같이 현재 시행중인 대부분 VSR 제도는 육지로부터 20~40해리 지점부터 저속운항을 시행하도록 하고 있다. 이는 본 연구를 통해 확인된 것처럼 짧은 구간에서의 VSR 시행의 효과성 확인이 쉽지 않을 수 있다는 점을 고려한 결정이었을 것이라 판단된다. VSR 관리체계 정책 결정을 하는 정부의 입장이라면 육지로부터 충분한 거리를 두고 저속운항을 시행하는 것이 필요해 보인다. 선박 저속운항을 통해 대기오염물질 배출이 줄어들 것이라는 점은 분명하나 운항시간의 증가로 총 배출량이 얼마나 줄어드는지에 대해서는 더 많은 실선 데이터와 사례를 바탕으로 한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, VSR의 효과적인 관리를 위해서는 실제 운항 선박 및 엔진의 배출 특성 데이터를 종합적으로 수집하여 분석할 필요가 있는 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] KMI 동향분석, Vol.111, March 2019.
- [2] IMO(2016), 「Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, As modified by the protocol of 1978 relating thereto (Data Collection System for Fuel Oil consumption)」, Resolution.MEPC.278(70).
- [3] IMO(2011), 「Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, As modified by the protocol of 1978 relating thereto (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships)」, Resolution.MEPC.203(62).
- [4] Freedman Ryan, Herron Sean, Byrd Mary, Birney Kristi, Morten Jessica, Shafritz Brian, Caldow Chris, Hastings Sean(2017), 「The effectiveness of incentivized and non-incentivized vessel speed reduction programs: Case study in the Santa Barbara channel」, Ocean & Coastal Management 2017-148, pp.31-39.
- [5] James J. Corbett, Haifeng Wang, James J. Winebrake(2009), 「The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping」, Transport Research Part D Volume 14, issue 8, pp.593-598.

- [6] MPA Singapore(2016), 「Enhancements to Maritime Singapore Green Initiative-Green Port Programme」, Port Marine Circular No.11 of 2016.
- [7] The Port of Los Angeles, 「Vessel Speed Reduction Incentive Program Guidelines」, September 29, 2009.
- [8] Port of Long Beach, “Green port program“, <http://www.polb.com/environment/air/greenflag.asp>, (Aug. 25, 2019).
- [9] The Port Authority of New York & New Jersey, 「Clean Vessel Incentive Program Terms and Conditions」, November 19, 2015.
- [10] The Port of San Diego, 「Vessel Speed Reduction Program」, 2009.
- [11] The Partners in the VSR Incentive Program for 2018 in the Santa Barbara Channel and San Francisco Bay Area regions, 「2018 voluntary Vessel Speed Reduction(VSR) incentive program for the Santa Barbara Channel and San Francisco Bay Area regions off California」, June 19, 2018.
- [12] 정태원(2017), 「미국 서부 주요항만의 그린항만 정책과 시사점」, 해운물류연구, 97권 0호, pp.729-747.
- [13] 국립환경과학원, 「대기오염물질 배출계수 관리위원회 배출계수 자료집」, 2012년 4월, pp.30-33, 145.
- [14] IMO(2009), 「Second IMO GHG Study 2009」.
- [15] IMO(2014), 「Third IMO GHG Study 2014」.

[16] Kazuyuki Maeda, Young-un Kim(2013), 「The study on reduction method of CO2 emissions from ships」, JFMSE, 25(3), pp.705-715.

