

항만에서의 액체화물 선적 및 하역에 따른 VOCs 증발 배출량 산정에 관한 연구

임준현* , 김필수 , 한용희 , 김정 , 최상진 

(주)이아이랩

Estimation of VOC Evaporative Emissions from Liquid Cargo Loading and Unloading at Ports

Jun-Hyun Lim*, Pil-Su Kim, Yong-Hee Han, Jeong Kim, and Sang-Jin Choi

EILAP Co., Ltd.

ABSTRACT

Background: CAPSS missing evaporate emissions of volatile organic compounds (VOCs) from liquid cargo loading and unloading at ports. It needs to be supplemented to improve air quality management and allow more effective policy formulation.

Objectives: In this study, the VOC emissions from the loading and unloading of liquid cargo at ports, which are not included in CAPSS, were estimated. The results of this study were compared and analyzed with the emission levels as described by CAPSS, confirming the need for managing VOC emissions from the loading and unloading of liquid cargo.

Methods: Methodology provided by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) was applied to estimate the VOC emissions from the loading and unloading of liquid cargo at ports. The types of liquid cargo loaded at unloaded at ports are diverse, but for this study emissions were estimated for 37 VOCs designated by the Ministry of Environment.

Results: The estimated results for VOC emissions from liquid cargo loading and unloading at domestic ports was 112,079 tons/yr, which was confirmed to be 11% of the known CAPSS emissions. The highest emissions were found from the loading and unloading of naptha, and the port with the highest emissions was Ulsan Port.

Conclusions: The results of the estimated VOC emissions from liquid cargo loading and unloading at ports confirmed the high emission levels. To protect the health of port workers and nearby residents, it is essential to manage the emission sources and undertake continuous research.

Key words: Evaporative emissions, liquid cargo, loading and unloading, port, VOCs

Received April 30, 2024

Revised June 17, 2024

Accepted June 21, 2024

Highlights:

- Estimation evaporate emissions of VOCs according to liquid cargo loading and unloading in ports.
- Comparison of emission Estimation results and CAPSS emissions and confirmation of emission levels.

*Corresponding author:

EILAP Co., Ltd., 166 Gosan-ro, Gunpo
15850, Republic of Korea
Tel: +82-31-429-7334
Fax: +82-0503-8379-3261
E-mail: junya1114@naver.com

I. 서 론

환경부 국가미세먼지정보센터에서는 국가 또는 지역의 대기 질 관리 및 개선을 위한 정책 수립의 기초자료로 활용되고 있는 국가 대기오염 배출통계 작성을 위해 대기정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System, CAPSS)을 개발하여 운영 중에 있으며, 매년 주요 오염물질에 대한 배출 수준을 공표하고 있다.

CAPSS에서는 주요 배출원의 배출 형태나 특성을 고려하여

13개 대분류, 64개 중분류, 355개 소분류 등으로 분류체계를 구성하고,¹⁾ 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 및 미세먼지(Particulate Matter of which diameter is than 10 μm , PM_{10}) 등을 포함한 9종의 대기오염물질 배출량을 공표하고 있다.

특히, 일반대기오염물질 중 VOCs는 인체 보건학적으로 노출 시 코, 목, 눈의 자극 등 급성 증세를 유발시키며, 두통, 메스꺼움, 어지럼증, 알레르기성 피부 반응을 일으키고 간, 신장 등의 내장기관에도 손상을 입힐 수 있다.²⁾ 또한, 대기공학적 측면에

서는 오존 및 2차 유기에어로졸 형성에 영향을 주기 때문에 반드시 관리가 필요한 대표적인 오염물질이다.³⁾

이와 관련하여 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 「선박으로부터의 오염방지를 위한 국제협약(International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships, MARPOL)」을 발표하였으며, MARPOL 제6부속서 내 「선박으로부터의 대기오염 방지를 위한 규칙(Prevention of Air Pollution from Ships)」을 마련하여 VOCs 배출 규제사항 등을 규정하고 있다.

또한, 국내의 항만에서는 「해양환경관리법」 내 VOCs의 배출 자체를 관리하기 위해 「선박에서의 오염방지에 관한 규칙」을 제정하고, 동 규칙 내 항만에서의 주요 활동에 대한 관리 기준을 명시하고 있다.

일반적으로 항만에서는 선박으로 액체화물을 싣기 위한 선적 공정과 선박으로부터 액체화물을 내리기 위한 하역 공정이 함께 운영된다. 하지만 아직까지 상기 법령과 규칙에선 선적 공정만으로 한정하여 규제를 시행하고, 3종(휘발유, 나프타, 원유)의 액체화물만을 규제대상 물질로 지정하여 증발 배출되는 VOCs를 처리할 수 있도록 유증기배출제어장치를 설치 및 운영하도록 명시되어 있다.^{4,5)}

국가 공식통계로 활용되는 CAPSS에서도 VOCs 배출량을 관리하기 위해 유류 및 석유화학제품의 생산공정이나 에너지를 저장하거나 수송하는 부분을 주요 배출원으로 포함하고 있으나,⁶⁾ 항만에서 액체화물이 선적되거나 하역되는 공정 중 VOCs가 증발 배출되는 부분은 포함하지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 CAPSS에 누락되어 있는 항만에서의 액체화물 선적 및 하역 공정 중 증발 배출되는 VOCs 배출량을 산정하고자 하였다. 또한, 본 연구의 분석 결과가 국가 전체 VOCs 배출통계에 비해 어느 정도 수준인지 확인하고, 항만을

중심으로 액체화물의 선적 및 하역에 따른 VOCs 증발 배출의 관리 필요성을 검토할 수 있는 기초자료를 마련하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 범위

국내 항만에서 선적 및 하역되는 액체화물의 종류는 다양하지만 본 연구에서는 Table 1과 같이 현재 환경부 「대기환경보전법」에서 지정 고시하고 있는 VOCs 물질들을 고려하여 37가지의 액체화물을 설정하고 연구를 진행하였다.⁷⁾

또한, 배출량 산정을 위한 대상 항만으로는 14개 국가관리무역항과 17개 지방관리무역항으로 이루어진 국내 31개 무역항 중 액체화물 물동량이 존재하는 8개 항만(부산항, 인천항, 평택·당진항, 대산항, 여수항, 광양항, 마산항, 울산항)을 대상으로 설정하였다.

본 연구에서 VOCs 배출 수준을 비교하기 위해 활용한 CAPSS 배출량 통계는 최근 2021년까지 배출량이 공표되어 있어 2021년을 기준으로 배출량 산정 및 비교가 가능하다. 하지만 2020년 전세계적으로 COVID-19가 발생함에 따라 국내도 전반위적인 무역업에 영향이 있음을 감안하여 COVID-19 발생 전인 2019년을 대상으로 항만에서의 선적 및 하역 공정에 따른 VOCs 증발 배출량을 산정하였다.

2. 연구 방법

항만 내에서 액체화물의 선적 및 하역 공정 중 VOCs가 증발 배출되는 것으로 알려져 있으며, 해당 공정은 화물을 싣는 선적 공정과 선박으로부터 화물을 내리는 하역 공정으로 구분할 수 있다.

상기 공정 중 증발 배출되는 VOCs 수준을 산정하기 위해서

Table 1. 37 Species VOCs notified by the Ministry of Environment

ID	Species	ID	Species	ID	Species
1	Acetaldehyde	14	Diethylamine	27	Trichloroethylene
2	Acetylene	15	Dimethylamine	28	Gasoline
3	Acetylene dichloride	16	Ethylene	29	Naphtha
4	Acrolein	17	Formaldehyde	30	Crude oil
5	Acrylonitrile	18	n-Hexane	31	Acetic acid
6	Benzene	19	Isopropyl alcohol	32	Ethylbenzene
7	1,3-Butadiene	20	Methanol	33	Nitrobenzene
8	Butane	21	Methyl ethyl ketone	34	Toluene
9	1-Butene, 2-Butene	22	Methylene chloride	35	Tetrachloroethylene
10	Carbon tetrachloride	23	Methyl tertiary butyl ether	36	Xylene(o-, m-, p-)
11	Chloroform	24	Propylene	37	Styrene
12	Cyclohexane	25	Propylene oxide		
13	1,2-Dichloroethane	26	1,1,1-Trichloroethane		

Table 2. Export and import cargo volume by product (unit: ton-cargo/yr, (%))

Liquid cargo	Export/Import	Export	Import
Total	178,275,034 (100)	30,384,947 (100)	147,890,087 (100)
Crude oil	117,096,333 (66)	0 (0)	117,096,333 (79)
Naphtha	30,814,527 (17)	5,104,379 (17)	25,710,148 (17)
Motor gasoline	10,682,395 (6)	10,378,393 (34)	304,001 (0)
Xylene(p-)	7,052,499 (4)	7,032,497 (23)	20,002 (0)
Benzene	2,650,812 (1)	2,627,360 (9)	23,453 (0)
Methanol	1,795,643 (1)	20,276 (0)	1,775,367 (1)
Propylene	1,786,169 (1)	1,654,111 (5)	132,058 (0)
Ethylene	1,200,030 (1)	1,091,131 (4)	108,899 (0)
Styrene	1,159,154 (1)	669,699 (2)	489,455 (0)
Toluene	1,090,287 (1)	460,274 (2)	630,013 (0)
1,3-Butadiene	504,517 (0)	98,268 (0)	406,249 (0)
1,2-Dichloroethane	440,773 (0)	281,004 (1)	159,769 (0)
Acrylonitrile	414,542 (0)	248,913 (1)	165,629 (0)
Butane	330,658 (0)	292 (0)	330,366 (0)
Acetic acid	251,609 (0)	182,214 (1)	69,395 (0)
Propylene oxide	215,442 (0)	143,666 (0)	71,776 (0)
Methyl tertiary butyl ether	188,192 (0)	49,225 (0)	138,966 (0)
Butene	102,288 (0)	102,277 (0)	11 (0)
Methyl ethyl ketone	98,715 (0)	1,847 (0)	96,868 (0)
Xylene(o-)	76,069 (0)	71,037 (0)	5,032 (0)
Xylene(m-)	71,620 (0)	3,781 (0)	67,839 (0)
Cyclohexane	55,736 (0)	7,849 (0)	47,886 (0)
Methylene chloride	48,583 (0)	21,662 (0)	26,921 (0)
Aviation gasoline	43,959 (0)	43,201 (0)	758 (0)
n-Hexane	43,838 (0)	41,469 (0)	2,369 (0)
Nitrobenzene	25,916 (0)	25,904 (0)	12 (0)
Dimethylamine	12,910 (0)	12,163 (0)	747 (0)
Chloroform	12,375 (0)	11,686 (0)	689 (0)
Trichloroethylene	6,193 (0)	98 (0)	6,095 (0)
Tetrachloroethylene	1,885 (0)	59 (0)	1,826 (0)
Formaldehyde	749 (0)	156 (0)	593 (0)
Diethylamine	529 (0)	0 (0)	529 (0)
Ethylbenzene	55 (0)	54 (0)	1 (0)
Acetaldehyde	33 (0)	0 (0)	33 (0)
Acetylene	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Acetylene dichloride	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Acrolein	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Carbon tetrachloride	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Isopropyl alcohol	0 (0)	0 (0)	0 (0)
1,1,1-Trichloroethane	0 (0)	0 (0)	0 (0)

는 논리적이고, 과학적으로 정량화된 수준의 방법론이 반영되어야 하며, 이에 따라 국내·외 방법론을 검토하였다.

미국 환경청에서는 항만 내에서 액체화물을 선적하거나 하

역할 때, 증발 배출되는 VOCs 배출 수준을 산정하기 위한 방법론을 마련하여 산정체계를 갖추고 있다. 미국뿐만 아니라 유럽에서도 해당 공정을 주요 배출원으로 포함하고, 액체화물 증

원유를 대상으로 미국 환경청의 방법론을 적용하여 VOCs 증발 배출을 산정하고 있다.

국내 「선박에서의 오염방지에 관한 규칙」에서도 미국 환경청의 방법론을 준용하여 산정방법을 고시하고 있으나, 액체화물을 선적하는 공정에 대해서만 방법론을 고시하고, 하역 시는 별도의 기준이 수립되어 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 미국 환경청에서 제공하고 있는 선적 및 하역 공정에 대한 방법론을 기준으로 VOCs 증발 배출량을 산정하였다.

2.1. 액체화물 선적 및 하역에 따른 배출량 산정방법

선적 및 하역에 따른 VOCs 증발 배출량 산정은 액체화물 종류별 물동량 정보와 선적 및 하역 공정에 따른 액체화물별 손실률(LL, LUL)을 적용하여 산정한다.

$$E_{i,L \text{ or } UL} = Q_{i,L \text{ or } UL} \times L_{i,L \text{ or } UL}$$

$E_{i,L \text{ or } UL}$: 액체화물 i의 선적(L) 또는 하역(UL)에 따른 VOCs 배출량(kg-VOCs/yr)

$Q_{i,L \text{ or } UL}$: 액체화물 i의 선적(L) 또는 하역(UL)에 따른 물동량 (ton-cargo/yr)

$L_{i,L \text{ or } UL}$: 액체화물 i의 선적(L) 또는 하역(UL)에 따른 손실률 (kg-VOCs/ton-cargo)

i: 액체화물의 종류

L: 선적 (Loading)

UL: 하역 (Unloading)

2.2. 물동량 정보

물동량 정보는 액체화물별 선적 물동량과 하역 물동량으로 구분하여 적용이 필요하다. 액체화물별 물동량 정보는 한국무역협회와 한국무역정보포털에서 수출과 수입 물동량 확인이 가능하여 본 연구에서 수출 물동량을 선적 물동량, 수입 물동량은 하역 물동량으로 반영하여 적용하였다.

2019년 액체화물별, 항만별 물동량 정보를 확인하여 VOCs 증발 배출량을 산정하고,^{8,9)} 물동량 수준과 VOCs 증발 배출량 수준 비교·분석하는데 활용하였다.

2.2.1. 수출 및 수입 전체 물동량

2019년 수출 및 수입 전체 물동량(Table 2, Fig. 1)은 178,275,034 ton/yr로 수출 및 수입 전체 물동량 중 수입이 83%, 수출이 17%의 비율을 나타냈다. 수출 및 수입 전체 물동량 중 원유의 물동량이 66%, 다음으로 나프타와 자동차 휘발유가 각각 17%와 6%로 국내 수출 및 수입 전체 물동량 상위 세 가지 물질 모두 유류로 분석되었다.

항만별 물동량(Table 3, Fig. 1)은 울산항이 수출 및 수입 전체 물동량의 44%의 비율을 나타냈으며, 상위 4개 항만(울산항, 여수항, 대산항, 인천항)의 물동량이 국내 전체 물동량의

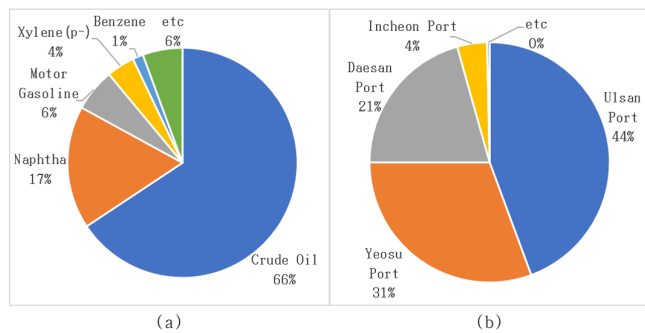


Fig. 1. Export and import cargo ratio by product (a) and ports (b)

Table 3. Liquid cargo export and import volume by port (unit: ton-cargo/yr, (%))

Port	Export/Import	Export	Import
Total	178,275,034 (100)	30,384,947 (100)	147,890,087 (100)
Ulsan port	79,108,378 (44)	12,804,146 (42)	66,304,231 (45)
Yeosu port	54,600,550 (31)	5,758,962 (19)	48,841,588 (33)
Daesan port	36,802,078 (21)	7,829,250 (26)	28,972,828 (20)
Incheon port	7,144,688 (4)	3,819,567 (13)	3,325,121 (2)
Pyeongtaek Dangjin port	450,597 (0)	26,818 (0)	423,779 (0)
Busan port	142,375 (0)	120,022 (0)	22,353 (0)
Gwangyang port	26,368 (0)	26,180 (0)	187 (0)
Masan port	1 (0)	1 (0)	

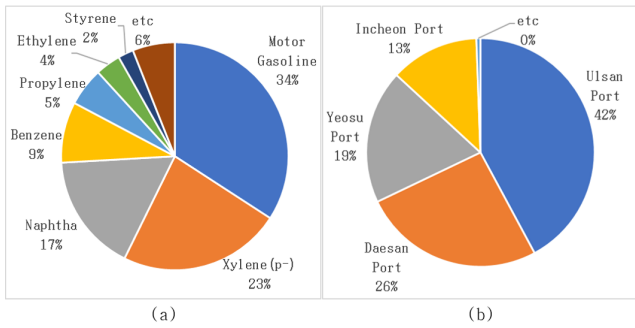


Fig. 2. Export cargo ratio by product (a) and ports (b)

99% 이상을 차지하는 것으로 분석되었다.

2.2.2. 수출 물동량

수출 물동량(Table 2, Fig. 2)은 30,384,947 ton/yr로 자동차 휘발유가 34%, 자일렌(p-)과 나프타가 각각 23%, 17%의 비율로 분석되었다. 항만별 수출 물동량(Table 3, Fig. 2)은 울산항이 42%, 다음으로 대산항이 26%, 여수항이 19%로 분석되었다.

2.2.3. 수입 물동량

수입 물동량(Table 2, Fig. 3)은 147,890,087 ton/yr로 그중 원유가 전체의 79%로 가장 높은 비율을 차지하고, 원유 다음으로 나프타와 메탄올이 각각 17%와 1%의 비율로 분석되었다. 나머지 액체화물의 물동량은 존재하나 1% 미만의 비율로 분석되었다.

항만별 수입 물동량(Table 3, Fig. 3)은 수출 물동량과 동일하게 울산항이 45%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 여수항이 33%, 대산항이 20%, 인천항이 2%의 비율로 수출과 다르게 여수항의 물동량이 울산항 다음으로 높게 분석되었다.

2.3. 액체화물 선적 및 하역에 따른 손실률

액체화물의 선적 및 하역에 따른 VOCs 증발 배출량 산정을 위해 액체화물별 손실률(LL, LUL)을 산정하였다. 본 연구에 적용한 미국 환경청의 방법론은 lb와 gal과 같은 미국 단위계가 적용되고 있어, 국제 표준 단위로 수정 적용하였다.

2.3.1. 액체화물 선적에 따른 손실률

액체화물의 선적에 따른 손실률(L_L)을 구하기 위해서는 다음 수식과 같은 방법에 따라 산정할 수 있으며,¹⁰⁾ 액체화물별 포화계수(S)와 진증기압(P), 분자량(M), 밀도(D), 온도(T)와 같은 인자(Table 4)가 필요하다.

포화계수(S)는 선적 공정에서 증발 배출되는 VOCs 배출률의 변화를 나타내며, 미국 환경청의 방법론에서 제공하고 있는 포

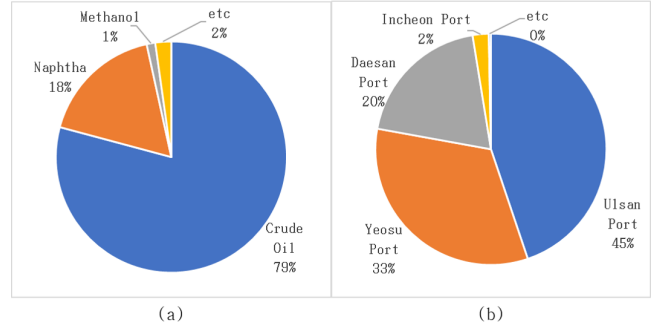


Fig. 3. Import cargo ratio by product (a) and ports (b)

화계수를 적용하였다. 진증기압(P)은 온도에 따른 액체화물별 증기압을 나타내며, 액체화물별 온도를 고려한 값을 계산하여 적용하였다.

증기 분자량(M)은 액체화물별 분자량을 의미하며, 각각의 분자량을 확인하여 적용하였다. 밀도(D)는 액체화물별 밀도를 의미하며, 미국 환경청의 방법론은 액체화물의 부피에 따른 VOCs 증발 배출을 제공하고 있어 무게에 따른 배출량 산정을 위해 미국 환경청 방법론 내 물질별 밀도를 확인하여 적용하였다.

온도(T)는 액체화물별 온도를 의미하며, 상온에서 기체상태로 존재하는 물질들이 있기 때문에 액체화물별 온도 정보는 한국산업안전보건공단의 화학물질정보를 바탕으로 끓는점 및 점도, 증기압 등 관리온도를 기준으로 적용하였다.¹¹⁾

$$L_L = 12.46 \frac{SPM}{DT}$$

L_L : 선적(L)에 따른 손실률(kg-VOCs/ton-cargo)

12.46: 상수(lb/gal)

S: 포화계수(무차원)

P: 액체 화물의 실제 증기압(psia)

M: 증기 분자량(kg/kg-mole)

D: 액체 화물의 밀도 (lb/gal)

T: 액체 화물의 온도(°R (°C×1.8+32+460))

선적에 따른 손실률(LL)을 산정한 결과 Table 4와 같이 액체화물 중 부탄이 8.1170 kg-VOCs/ton-cargo으로 가장 높았으며, 니트로벤젠이 0.0003 kg-VOCs/ton-cargo로 가장 낮게 확인되었다.

2.3.2. 액체화물 하역에 따른 손실률

선박에서 항만으로 액체화물을 하역 시 배출되는 VOCs 배출량 산정방법은 현재 별도로 존재하지 않으며, 미국 환경청에서 제시하고 있는 액체화물을 저장탱크에 작업 시 배출량 산정

Table 4. Estimation factor and loading loss rate

Liquid cargo	S	P	M	D	T	L _L
Acrylonitrile	1.8	2.129	53.06	6.73	537 R	0.7012
Benzene	1.8	1.843	78.11	7.32	537 R	0.8212
1,3-Butadiene	1.8	14.762	54.09	5.13	484 R	7.2112
Butane	1.8	14.618	58.12	4.78	491 R	8.1170
Butene	1.8	14.540	56.11	4.91	481 R	7.7445
Chloroform	1.8	3.020	119.38	12.38	528 R	1.2370
Cyclohexane	1.8	1.887	84.16	6.46	537 R	1.0269
1,2-Dichloroethane	0.2	1.197	98.96	10.40	528 R	0.0538
Dimethylamine	1.8	20.439	45.08	5.5914	504 R	7.3295
Ethylene	1.8	14.524	28.05	4.74	305 R	6.3242
Formaldehyde	0.2	0.203	30.03	6.802	528 R	0.0042
n-Hexane	1.8	2.347	86.18	5.47	528 R	1.5704
Methanol	1.8	2.457	32.04	6.61	537 R	0.4973
Methyl ethyl ketone	1.8	1.739	72.11	6.69	537 R	0.7830
Methylene chloride	1.8	8.308	84.93	11.07	537 R	2.6622
Methyl tertiary butyl ether	1.8	3.918	88.15	6.18	528 R	2.3737
Propylene	1.8	14.546	42.08	4.22	406 R	8.0206
Propylene oxide	1.8	10.397	58.08	7.17	537 R	3.5174
Trichloroethylene	0.2	1.036	131.39	12.22	528 R	0.0526
Motor gasoline	1.8	6.079	66	5.6	528 R	3.0434
Aviation gasoline	1.8	5.049	66	5.6	528 R	2.5278
Naphtha	1.8	4.580	80	6.4	564 R	2.2768
Acetic acid	0.2	0.307	60.05	8.72	537 R	0.0098
Ethylbenzene	0.2	0.183	106.17	7.24	537 R	0.0125
Nitrobenzene	0.2	0.005	123.11	10.05	537 R	0.0003
Toluene	0.2	0.550	92.14	7.24	537 R	0.0325
Tetrachloroethylene	0.2	0.359	165.83	13.54	537 R	0.0204
o-Xylene	0.2	0.128	106.17	7.35	537 R	0.0086
m-Xylene	0.2	0.160	106.17	7.21	537 R	0.0110
p-Xylene	0.2	0.171	106.17	7.19	537 R	0.0117
Styrene	0.2	0.118	104.15	7.56	537 R	0.0076

S: saturation factor (dimensionless).

P: true vapor pressure of liquid loaded (psia).

M: molecular weight of vapors (kg/kg-mole).

D: density of liquid cargo (lb/gal).

T: temperature of bulk liquid loaded (°R (°C×1.8+32+460)).

L_L: loss rate by loading (kg-VOCs/ton-cargo).

방법을 적용하여 하역 시 배출량을 산정하였다.¹²⁾

하역에 따른 손실률(LUL)을 산정하기 위해서는 전환계수(K_N), 제품손실계수(K_p), 증기밀도(W_v), 환기보정계수(K_B), 밀도(D)와 같은 인자(Table 5)가 필요하다.

전환계수(K_N)는 항만의 저장능력에 따라 결정되며, 연간 저장능력의 36배 이상의 물동량을 하역하는 경우 계산에 의한 값을 적용하고 아닐 경우 단일 계수를 적용하도록 되어있어 물

동량이 가장 많은 울산항을 기준으로 저장능력과 물동량을 고려하여 전환계수를 적용하였다.

제품 손실계수(K_p)는 원유를 제외한 모든 액체화물에 단일 계수를 적용하고 원유에 대해서만 별도의 계수를 제공하고 있어 원유와 나머지 액체화물들의 제품 손실계수를 확인하여 적용하였다.

증기밀도(W_v)는 액체화물별 증기의 밀도를 의미하며, 액체

Table 5. Estimation factor and unloading loss rate

Liquid cargo	K_N	K_P	W_V	K_B	D	L_{UL}
Acetaldehyde	1	1	1.800	1	6.54	2.2969
Acrylonitrile	1	1	0.314	1	6.73	0.3895
Benzene	1	1	0.400	1	7.32	0.4561
1,3-Butadiene	1	1	2.462	1	5.13	4.0054
Butane	1	1	2.582	1	4.78	4.5085
Butene	1	1	2.531	1	4.91	4.3016
Chloroform	1	1	1.019	1	12.38	0.6871
Cyclohexane	1	1	0.442	1	6.46	0.5704
1,2-Dichloroethane	1	1	0.335	1	10.40	0.2688
Diethylamine	1	1	0.885	1	5.89	1.2534
Dimethylamine	1	1	2.728	1	5.5914	4.0711
Ethylene	1	1	1.995	1	4.74	3.5127
Formaldehyde	1	1	0.017	1	6.802	0.0212
n-Hexane	1	1	0.572	1	5.47	0.8723
Methanol	1	1	0.219	1	6.61	0.2762
Methyl ethyl ketone	1	1	0.349	1	6.69	0.4349
Methylene chloride	1	1	1.961	1	11.07	1.4787
Methyl tertiary butyl ether	1	1	0.976	1	6.18	1.3185
Propylene	1	1	2.253	1	4.22	4.4550
Propylene oxide	1	1	1.679	1	7.17	1.9537
Trichloroethylene	1	1	0.385	1	12.22	0.2628
Motor gasoline	1	1	1.134	1	5.6	1.6904
Aviation gasoline	1	1	0.942	1	5.6	1.4040
Naphtha	1	1	0.970	1	6.4	1.2646
Crude oil	1	0.75	0.053	1	7.1	0.0466
Acetic acid	1	1	0.051	1	8.72	0.0490
Ethylbenzene	1	1	0.054	1	7.24	0.0624
Nitrobenzene	1	1	0.002	1	10.05	0.0014
Toluene	1	1	0.141	1	7.24	0.1624
Tetrachloroethylene	1	1	0.166	1	13.54	0.1021
o-Xylene	1	1	0.038	1	7.35	0.0429
m-Xylene	1	1	0.047	1	7.21	0.0548
p-Xylene	1	1	0.051	1	7.19	0.0587
Styrene	1	1	0.034	1	7.56	0.0378

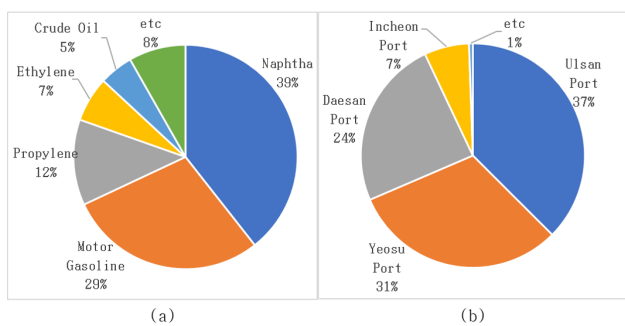
K_N : working loss turnover factor (dimensionless).
 K_P : working loss product factor (dimensionless).
 W_V : vapor density (kg/m^3).
 K_B : vent setting correction factor (dimensionless).
D: density of liquid cargo (lb/gal).
 L_{UL} : loss rate by unloading (kg-VOCs/ton-cargo).

화물별 증기압과 온도에 따른 계산값을 적용하도록 되어있어 액체화물별 증기압과 온도를 고려한 값을 계산하여 적용하였다. 환기보정계수(K_B)는 작업 시 환기에 대한 계수로 미국 환경청의 방법론에서 제공하고 있는 계수를 적용하였다.

마지막으로 밀도(D)는 선적과 동일하게 무게에 따른 배출량 산정을 위해 미국 환경청 방법론 내 물질별 밀도를 확인하여 적용하였다.

Table 6. VOCs emissions by product according to liquid cargo loading and unloading (2019) (unit: ton-VOCs/yr, (%))

Liquid cargo	Loading /Unloading	Loading	Unloading
Total	112,079 (100)	68,307 (100)	43,772 (100)
Naphtha	44,151 (39)	11,622 (17)	32,529 (74)
Motor gasoline	32,100 (29)	31,586 (46)	514 (1)
Propylene	13,856 (12)	13,267 (19)	589 (1)
Ethylene	7,283 (6)	6,901 (10)	383 (1)
Crude oil	5,459 (5)	0 (0)	5,459 (12)
1,3-Butadiene	2,337 (2)	709 (1)	1,628 (4)
Benzene	2,168 (2)	2,157 (3)	11 (0)
Butane	1,493 (1)	2 (0)	1,490 (3)
Butene	792 (1)	792 (1)	0 (0)
Propylene oxide	646 (1)	505 (1)	140 (0)
Methanol	501 (0)	10 (0)	491 (1)
Methyl tertiary butyl ether	300 (0)	117 (0)	183 (0)
Acrylonitrile	239 (0)	175 (0)	65 (0)
Toluene	117 (0)	15 (0)	102 (0)
Aviation gasoline	110 (0)	109 (0)	1 (0)
Methylene chloride	97 (0)	58 (0)	40 (0)
Dimethylamine	92 (0)	89 (0)	3 (0)
Xylene(p-)	84 (0)	83 (0)	1 (0)
n-Hexane	67 (0)	65 (0)	2 (0)
1,2-Dichloroethane	58 (0)	15 (0)	43 (0)
Methyl ethyl ketone	44 (0)	1 (0)	42 (0)
Cyclohexane	35 (0)	8 (0)	27 (0)
Styrene	24 (0)	5 (0)	19 (0)
Chloroform	15 (0)	14 (0)	0 (0)
Acetic acid	5 (0)	2 (0)	3 (0)
Xylene(m-)	4 (0)	0 (0)	4 (0)
Trichloroethylene	2 (0)	0 (0)	2 (0)
Xylene(o-)	1 (0)	1 (0)	0 (0)
Diethylamine	1 (0)	0 (0)	1 (0)
Tetrachloroethylene	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Acetaldehyde	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Formaldehyde	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Nitrobenzene	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Ethylbenzene	0 (0)	0 (0)	0 (0)



$$L_{UL} = 0.0083454 \frac{K_N \times K_p \times W_v \times K_B}{D}$$

L_{UL} : 하역(UL)에 따른 손실률(kg-VOCs/ton-cargo)
 0.0083454: 단위 환산계수($lb \cdot m^3/kg \cdot gal$)
 K_N : 전환계수(무차원)
 K_p : 제품손실계수(무차원)
 W_v : 증기밀도(kg/m^3)
 K_B : 환기보정계수(무차원)
 D : 액체 화물의 밀도(lb/gal)

Fig. 4. VOCs emissions ratio by product (a) and ports (b) according to liquid cargo loading and unloading

Table 7. VOCs emissions by port according to liquid cargo loading and unloading (2019) (unit: ton-VOCs/yr, (%))

Port	Loading/Unloading	Loading	Unloading
Total	112,079 (100)	68,307 (100)	43,772 (100)
Ulsan port	42,002 (37)	31,551 (46)	18,805 (43)
Yeosu port	34,839 (31)	16,034 (24)	10,451 (24)
Daesan port	27,357 (24)	15,870 (23)	11,488 (26)
Incheon port	7,263 (6)	4,608 (7)	2,656 (6)
Pyeongtaek Dangjin port	382 (0)	32 (0)	350 (1)
Busan port	215 (0)	195 (0)	20 (0)
Gwangyang port	20 (0)	19 (0)	1 (0)
Masan port	0 (0)	0 (0)	0 (0)

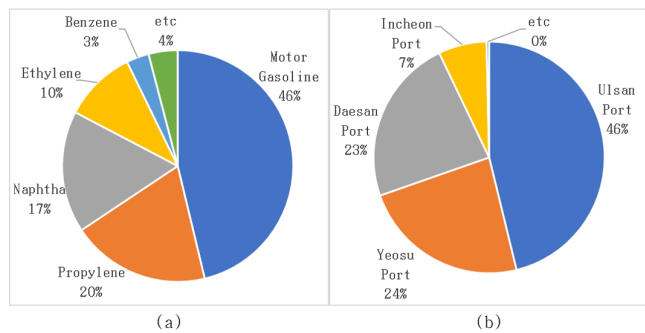


Fig. 5. VOCs emissions ratio by product (a) and ports (b) according to liquid cargo loading

하역에 따른 손실률(LUL)은 Table 5와 같이 산정되었으며, 선적과 동일하게 부탄이 4.5085 kg-VOCs/ton-cargo으로 가장 높고, 니트로벤젠이 0.0014 kg-VOCs/ton-cargo로 가장 낮게 확인되었다.

III. 결 과

2019년 국내 항만에서 37가지 액체화물의 물동량과 손실률(LL, LUL)을 적용하여 선적 및 하역에 따른 VOCs 배출량을 산정하였다. 배출량은 선적과 하역으로 구분하여 산정하였으며, 최종적으로 CAPSS 배출량과 비교를 통해 선적 및 하역에 따른 VOCs 배출량 수준을 확인하였다.

1. 배출량 산정 결과

1.1. 액체화물 선적 및 하역에 따른 VOCs 배출량 산정 결과

2019년 국내 항만에서 37가지 액체화물의 선적 및 하역에 따른 VOCs 배출량 산정 결과 112,079 ton/yr로 산정되었으며, 전체 배출량 중 선적이 61%, 하역이 39%의 비율로 분석되었다. 액체화물별 배출량(Table 6, Fig. 4)을 살펴보면 나프

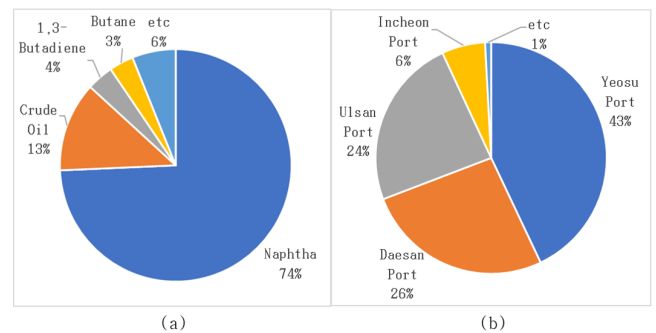


Fig. 6. VOCs emissions ratio by product (a) and ports (b) according to liquid cargo unloading

타를 선적 및 하역 시 44,151 ton/yr로 전체 배출량의 39%로 가장 높은 배출 수준으로 분석되었다. 그 뒤로 자동차 휘발유(32,100 ton/yr, 29%), 프로필렌(13,856 ton/yr, 12%), 에틸렌(7,283 ton/yr, 6%), 원유(5,459 ton/yr, 5%) 순으로 분석되었다.

항만별 배출량(Table 7, Fig. 4)은 울산항이 42,002 ton/yr로 전체 배출량의 37%로 가장 높았으며, 그 뒤로 여수항(34,839 ton/yr, 31%), 대산항(27,357 ton/yr, 24%) 순으로 분석되었다.

1.2. 액체화물 선적에 따른 VOCs 배출량 산정 결과

선적에 따른 VOCs 배출량 산정 결과(Table 6, Fig. 5) 68,307 ton/yr로 산정 되었으며, 자동차 휘발유(31,586 ton/yr, 46%)를 선적하는 경우 VOCs 배출 수준이 가장 높았다. 물동량 정보와 배출량 산정 결과를 함께 살펴보면 자동차 휘발유, 나프타와 같이 물동량이 많은 물질이 배출량도 높게 산정된 것을 확인할 수 있지만 자일렌(p-), 스틸렌과 같이 물동량은 많지만 상대적으로 낮은 수준의 배출량이 산정된 액체화물들도 확인되었다.

항만별 배출량(Table 7, Fig. 5)의 경우 물동량이 가장 많은 울산항(31,551 ton/yr, 46%)의 배출 수준이 가장 높았으며, 대산항의 물동량이 여수항 보다 많지만 배출량은 대산항(15,870

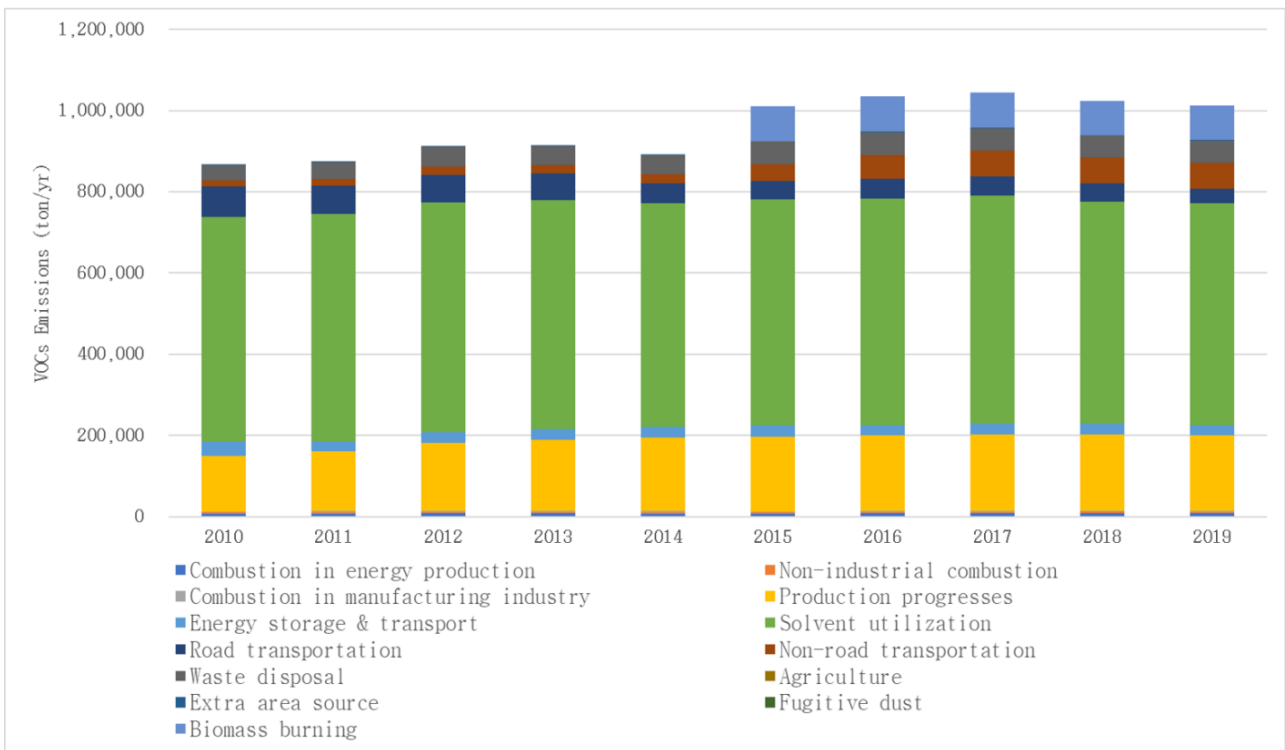


Fig. 7. VOCs emissions trends

Table 8. Comparison of VOCs emission estimates between this study and CAPSS (2019) (unit: ton-VOCs/yr, (%P))

Source	Emissions	Ratio
CAPSS	1,011,352	
VOCs emissions from liquid cargo loading and unloading in ports	112,079	(11)

Ratio: emissions ratio compared to CAPSS.

ton/yr, 23%)보다 여수항(16,034 ton/yr, 24%)이 더 높게 분석되었다.

1.3. 액체화물 하역에 따른 VOCs 배출량 산정 결과

하역에 따른 VOCs 배출량 산정 결과(Table 6, Fig. 6) 43,772 ton/yr로 산정 되었으며, 나프타(32,529 ton/yr, 74%)를 하역하는 경우 VOCs 배출 수준이 가장 높았다. 원유의 배출량은 5,459 ton/yr로 물동량이 79%로 가장 많았지만 물동량이 17%인 나프타 보다 배출 수준이 낮은 것으로 분석되었다.

항만별 배출량(Table 7, Fig. 6)의 경우 물동량이 가장 많은 울산항(18,805 ton/yr, 43%)의 배출량이 가장 높았으며, 선적과 다르게 물동량은 여수항이 더 많지만 배출량은 여수항(10,451 ton/yr, 24%)보다 대산항(11,488 ton/yr, 26%)이 더 높게 분석되었다.

2. CAPSS 배출량과 배출 수준 비교

CAPSS의 최근 10년간 VOCs 배출량 추세를 살펴보면 Fig. 7과 같이 2014년까지 소폭 증감을 보이다가 2015년 새로운 배출원의 추가로 배출량이 증가하였다. 하지만 그 이후 큰 변화 없이 매년 유사한 수준의 배출량 추이를 나타내고 있다.¹³⁾

2019년 CAPSS의 VOCs 배출량은 1,011,352 ton/yr로 확인되며, 본 연구의 VOCs 배출량과 비교한 결과(Table 8) 전체 CAPSS 배출량 대비 약 11% 수준으로 나타나 액체화물의 선적 및 하역 공정에 따른 VOCs 배출 수준이 높은 것으로 분석되었다.

IV. 고 찰

1. 방법론에 대한 고찰

실효성 있는 대기질 관리를 위해서는 과학적이고 정확도 높은 배출량을 확인하고, 이를 통한 대기질 관리가 이루어져야 한다. 하지만 본 연구의 배출량 산정 결과는 실측에 의한 결과가 아닌 미국 환경청에서 제공하고 있는 산정식이 적용되었고, 해당 방법론은 1990년 이전에 연구된 내용이기 때문에 자체적으로도 배출량 산정 시 약 30% 내외의 오차가 발생할 수 있을 것으로 판단하고 있다. 따라서, 보다 신뢰성을 갖는 배출 수준을 확인하기 위해 국내 실정이 고려된 방법론의 마련이 필요하다.

다고 판단된다.

또한, 국내에서 선적 및 하역에 따른 VOCs 배출량 산정에 있어 항만에서 액체화물을 선적하는 경우 유증기배출제어장치를 설치·운영하도록 되어 있고, 「대기환경보전법 시행규칙」에서는 저감효율을 95% 이상으로 규정하고 있지만¹⁴⁾ 각 항만의 유증기배출제어장치 설치 여부와 종류, 효율 등 현황 파악에 한계가 있어 본 연구에서 유증기배출제어장치의 운영 현황이 고려되지 않았고, 이에 과다 추정되었을 가능성이 있다. 추후 이러한 저감기술의 적용 현황이 반영된다면 더욱 신뢰성 있는 배출량을 산정할 수 있을 것으로 보인다.

2. 결과에 대한 고찰

국내 항만에서 액체화물 선적 및 하역에 따른 VOCs 증발 배출량 산정 결과, 전체 공정에서는 나프타, 선적 공정은 자동차 휘발유, 하역 공정은 나프타의 배출 수준이 가장 높았다.

또한, 액체화물별 물동량과 VOCs 증발 배출량을 함께 살펴보면 원유와 같이 물동량 비율은 높지만 VOCs 배출 수준이 낮은 액체화물들을 확인할 수 있었고, 물동량과 VOCs가 증발 배출되는 특성이 단순 상관관계가 아님을 확인하였다. 이는 액체화물 선적 및 하역에 따른 VOCs 배출량 자체가 Table 4, Table 5와 같이 물질별 온도와 진증기압 등 여러 인자들이 복합적으로 고려되어 산정되기 때문으로 추정된다.

2019년을 기준으로 한 본 연구의 배출량 산정 결과를 국가 전체 VOCs 배출 수준과 비교한 결과, 약 11% 수준으로 분석되어 높은 배출 수준을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 액체화물의 선적 및 하역 공정이 이루어지는 항만을 포함하고 있는 지역의 대기질 해석 시 배출원 누락에 따른 오류가 발생할 가능성이 있다고 판단된다.

3. 후속 연구 필요성에 대한 고찰

본 연구의 대상 액체화물 37가지 중에는 벤젠과 같은 특정 대기유해물질이 포함되어 있고, 해당 화물을 선적 및 하역하는 경우 배출될 가능성이 있다. 이러한 특정대기유해물질은 장기적 섭취나 노출에 의해 직간접적으로 위해를 끼칠 수 있는 물질로 항만 내 작업자와 인근 주민에게 노출 가능성이 있어 작업자와 주민 건강 보호를 위해 지속적인 관리가 필수적이다. 따라서 배출 공정뿐만 아니라 주요 배출물질에 대한 현황 및 특성 파악 등 추가적으로 다양한 연구가 필요하다.

V. 결 론

본 연구에서는 CAPSS 배출원으로 누락되어 있는 항만에서 액체화물의 선적 및 하역 공정에 대한 VOCs 증발 배출량을 산정하였다. 또한, 본 연구의 결과와 CAPSS 배출량 통계를 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

2019년을 기준으로 VOCs 증발 배출량 산정 결과와 물동량 정보를 비교한 결과 배출량과 물동량이 단순한 상관관계가 있지 않다는 점을 확인하였으며, 현재 규제 대상 물질 외 추가 선적에 있어 액체화물별 물동량 수준과 증발 배출 수준, 단위 물동량 당 배출 수준 등 다양한 요소의 고려가 필요하다. 또한, 본 연구의 배출량 산정 결과는 국가 전체 배출량 대비 약 11% 수준으로 분석되어, 단일 배출원임을 감안할 때 배출 수준이 높은 것으로 판단할 수 있다.

다만, VOCs 배출량 산정에 있어 2020년 COVID-19의 발생에 따른 영향을 고려하여 2019년을 기준으로 배출량을 산정하였지만, 보다 정확한 VOCs 배출 수준 파악을 위해 COVID-19가 종료된 2024년 시점에서 지속적 연구가 필요하다. 또한, 본 연구는 실측에 의한 결과가 아닌 미국 환경청의 배출량 산정식을 적용하고 있어 국내 실정에 맞는 방법론 마련이 중요할 것으로 판단된다.

추가적으로 VOCs의 경우 인체의 위해성과 밀접한 관련이 있는 특정대기유해물질과도 연관이 있으며, 항만 내에서 업무를 수행하는 작업자뿐만 아니라 항만지역 인근 주민에게도 노출 피해나 건강에 영향을 줄 수 있다. 따라서 환경적 또는 인체보건학적 영향을 줄 수 있는 주요 배출원으로 파악하고, 체계적 관리와 지속적인 연구가 필요하다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Jang YK, Kim ST, Woo JH. Review of emission inventory in Korea and direction for improvement. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2023; 39(5): 775-795.
2. Kim DG, Woo JS, Han HS, Kim YJ, Kim WS, Hong SM, et al. Distribution characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in an industrial complex and in affected areas in Siheung and Ansan. *J Environ Health Sci.* 2020; 46(3): 256-266.
3. Kim MJ, Park OH, Yang YC, Park JH, Yu JY, Jung HY, et al. Distribution characteristics and source estimation of volatile organic compounds in the ambient air of industrial complex in Gwangju. *J Environ Sci Int.* 2023; 32(6): 403-417.
4. Korean Law Information Center. Marine environment management act. Available: <https://www.law.go.kr/LSW/lsc.do?section=&menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81&eventGubun=060101&query=%ED%95%B4%EC%96%91%ED%99%98%EA%B2%BD%EA%B4%80%EB%A6%AC%EB%B2%95#undefined> [accessed 16 November 2023].
5. Korean Law Information Center. Rules on prevention of pollution on ships. Available: <https://www.law.go.kr/LSW/lsc.do?section=&>

- menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81&eventGubun=060101&query=%EC%84%A0%EB%B0%95%EC%97%90%EC%84%9C%EC%9D%98+%EC%98%A4%EC%97%BC%EB%B0%A9%EC%A7%80%EC%97%90+%EA%B4%80%ED%95%9C+%EA%B7%9C%EC%B9%99#undefined [accessed 16 November 2023].
6. Park SH, Kim SC. A study on the comparison of areas near Gunsan according to the revision of the National Air Pollutant Emissions (CAPSS) in 2020. *J Environ Health Sci.* 2023; 49(4): 190-200.
 7. Korean Law Information Center. Clean air conservation act. Available: <https://www.law.go.kr/LSW/lsSc.do?section=&menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81&eventGubun=060101&query=%EB%8C%80%EA%B8%B0%ED%99%98%EA%B2%BD%EB%B3%B4%EC%A0%84%EB%B2%95#undefined> [accessed 14 November 2023].
 8. Korea International Trade Association (KITA). Available: <https://stat.kita.net/main.screen> [accessed 18 January 2024].
 9. Korea Trade Statistics Service (TRASS). Available: <https://www.bandtrass.or.kr/index.do> [accessed 23 January 2024].
 10. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Chapter 5: petroleum industry; 5.2 transportation and marketing of petroleum liquids. In: U.S. Environmental Protection Agency. editor. AP-42: compilation of air emissions factors, 5th ed. Research Triangle Park: EPA; 2008.
 11. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA). Material safety data sheets (MSDS). Available: <https://msds.kosha.or.kr/MSDSInfo/kcic/msdssearchMsds.do> [accessed 30 January 2024].
 12. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Chapter 7: liquid storage tanks; 7.1 organic liquid storage tanks. In: U.S. Environmental Protection Agency. editor. AP-42: compilation of air emissions factors, 5th ed. Research Triangle Park: EPA; 2020.
 13. National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR). Available: <https://www.air.go.kr/article/list.do?boardId=10&menuId=32> [accessed 14 May 2024].
 14. Korean Law Information Center. Enforcement rules of clean air conservation act. Available: <https://www.law.go.kr/lsSc.do?menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81&query=%EB%8C%80%EA%B8%B0%ED%99%98%EA%B2%BD%EB%B3%B4%EC%A0%84%EB%B2%95%20%EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99#undefined> [accessed 9 May 2024].

〈저자정보〉

임준현(주임연구원), 김필수(책임연구원), 한용희(선임연구원), 김정(수석연구원), 최상진(대표이사)