

활동도를 이용한 2009년도 부산항 선박배출량 산정에 관한 연구

박두열 · 황철원 · 정창훈 · 손장호^{1)*}

(주)코아에프엔티, ¹⁾동의대학교 환경공학과

(2010년 9월 29일 접수; 2011년 2월 17일 수정; 2011년 3월 15일 채택)

Estimate of Ships Emission in Busan Port during 2009 Based on Activity

Doo-Yeol Park, Cheol-Won Hwang, Chang-Hun Jeong, Zang-Ho Shon^{1)*}

COA F&T Corporation, Busan 619-961, Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

(Manuscript received 29 September, 2010; revised 17 February, 2011; accepted 15 March, 2011)

Abstract

Emission of air pollutants such as nitrogen oxides (NO_x), hydrocarbons (HC), SO₂, and particulate matter (PM) and CO₂ from ship during 2009 in Busan port was estimated based on activity-based method. The significant fraction (> 50%) of ship emission resulted from container and general cargo ships. Emission at port operation mode was the most dominant compared to at sea and maneuvering modes. Emission at North port was the largest source of air pollutants among ports. The magnitudes of air pollutants NO_x, SO₂, HC, CO₂, and PM in Busan port were 8.7×10^3 , 8.23×10^3 , 0.35×10^3 , 4.86×10^6 , and 0.67×10^3 ton/yr, respectively. The ratio of NO_x to VOC is about 25. Our ship emission estimate is 2 times higher than that in CAPSS emission inventory.

Key Words : NO_x, Vessel category, Engine power, Actual speed, Emission factor

1. 서론

세계화의 가속화로 늘어가는 인적, 물적 교통량은 선박의 물동량을 증가 시키고 이로 인한 선박의 엔진 배출로부터 발생하는 대기오염은 심각한 수준으로 인식되고 있다. 선박배출은 특히 선박 입·출항이 빈번한 주요 무역항 인접지역의 대기질(NO₂, SO₂, O₃)에 심각한 영향을 주는 것으로 보고되었다(Endresen

등, 2003; Lucialli 등, 2007; Marr 등, 2007; Song 등, 2010; Vutukuru와 Dabdub, 2008). 한편 전 세계적으로 볼 때, 국제적인 선박 운항에 의한 질소 및 황산화물의 배출 추정치는 각각 6.49 Tg S, 6.87 Tg N으로 보고되었다(Corbett와 Koehler, 2003). 선박은 운항 특성상 자동차처럼 하나의 국가에서만 운용되는 것이 아니라 전 세계를 대상으로 운용된다. 국제해사기구(IMO)는 1997년 선박대기 배출량 제어를 위한 “선박으로부터 대기오염 방지협약”(IMO 해양오염방지협약 부속서 VI(MARPOL Annex VI))을 채택하였다. 주요 규제물질은 NO_x, SO₂로 발효 시기는 2005년 5월 19일이나 NO_x 물질은 2000년 1월 1일 소급 적용

*Corresponding author : Zang-Ho Shon, Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea
Phone: +82-51-890-2078
E-mail: zangho@deu.ac.kr

되어, 이후 건조된 대부분의 외항선은 이 협약을 준수하는 디젤엔진과 소각기를 탑재하고 있다. 또한 2008년 개최된 IMO 해양환경보호위원회(MEPC)에서 2011년 1월 1일 이후 건조될 선박에 대해 더욱 강화된(현행 기준 15~20% 저감) NO_x 배출기준을 채택하였다(IMO, 1997; 2008). 그러므로 연도별로 새롭게 건조되는 선박에 대한 고려가 있어야 현실성 있는 선박배출량 산정이 가능할 것으로 판단된다. 2000년 1월 1일 이후 강화된 NO_x 저감 엔진을 장착한 선박이 항해에 참여하고 있지만 선박 대기배출량에 대한 선행 연구방법으로 배출량을 산정할 경우 이 선박들이 항해에 참여함으로써 NO_x 배출의 변화(감소)량을 알 수가 없고 또 과다 산정될 가능성을 내포하고 있다.

대기오염물질의 선박배출량 산정 기법은 넓은 범주로 3 분류인 연료사용량 산출법, 물동화물량 산출법, 개별선박 배출량 산출법으로 분류할 수 있다. 연료사용량에 의한 산출법은 총 사용연료량만을 이용하여 항구에서의 선박의 실제 통행량을 반영하지 못한다. 즉 특정 항구에서 판매된 연료의 양을 기준으로 배출량을 계산하기 때문에 선박의 상당수가 여러 나라의 항구를 운항하고 특정국가 안에서도 특정항구에서 구매된 유류를 그 항구에서만 소비하지 않고 다른 항구나 근해상에서 소비할 가능성이 존재하여 실제 선박배출 산출량과 차이를 나타낼 수 있다. 또한 물동화물량에 따른 산출법은 외국을 항해하는 선박은 통계에 잡힐 수 있다. 그러나 연안을 운항하는 선박은 통계에 반영할 수 있는 방법이 여의치 않아 배출량이 과소평가될 가능성이 많은 방법이다. 개별 선박배출량 산출법은 항구에서의 각각의 선박에서 배출량을 산출하는 방법으로서 특정 지역에 있어서 개별 선박의 실제 오염물질 발생량을 파악할 수 있다는 장점을 가지고 있어 개별 배출량 산출법이 현실적이라고 말할 수 있다. 따라서 본 연구에서의 선박배출량 산정 방법은 개별 선박배출량 산출법으로 선정하였다.

본 연구에서는 우리나라의 대표 무역항인 부산항에서 2009년도 대기오염물질의 선박대기배출량을 개별선박 배출량 산출법을 적용하여 평가하였다. 2000년 1월 1일 이전의 NO_x 배출계수(EF-NO_x 2000)와 이후 NO_x 저감 엔진으로 교체비율과 엔진교체에 따른 NO_x 저감율을 고려한 2009년도의 NO_x 배출계수

(EF-NO_x 2009)로 구분하여 선박으로부터의 2009년도 부산항 배출량을 산정, 저감율을 평가하였다. 그리고 배출량에 영향을 주는 인자인 항로에서의 이동속도 변화에 따른 배출량도 평가하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 개별선박 배출량 산출법

부산항에 입항하는 개별 선박의 배출량을 산정하기 위해서는 선박의 입출항 자료, 선박엔진의 상세 자료(엔진출력, 최고속도), 엔진 가동시간과 배출계수가 필요하다. 즉 배출량 산정은 실제 개별선박의 실제 운항 정보와 엔진출력(kW) 정보를 이용하여 활동도(운항시간) 산출법으로 알려진 기법을 사용하였다. 배출량 산정에 사용된 식은 다음과 같다.

$$E = MCR \times LF \times A \times EF \quad (1)$$

여기서 E는 선박 배출량(g/hr), MCR(Maximum continuous rated engine power)은 엔진 최고출력(kW), LF(Load factor)는 부하량(무차원), A(Activity)는 주엔진 또는 보조엔진 가동시간(hr), EF(Emission factor)는 배출계수(g/kW-hr)를 나타낸다. 선박의 배출량 계산에 있어 개별 선박의 엔진 정보, 즉 선박에 탑재되어 있는 주엔진 디젤기관, 보조엔진 디젤기관, 보조보일러로 되어있는 엔진종류별로 구분하여 산출하였다. 또한 각각의 기관은 선박의 운항이나 정박상황에 따라 달리 가동되므로 항해중(at sea), 정박중(at port), 접·이안(manuevering)으로 나누어 배출량을 산출하였다.

선박의 주엔진 출력(MCR) 및 최고속도(부하량 산출을 위한)는 ISR(Lloyd's Internet Ships Register) 자료를 사용하였다(<http://www.ships-register.com>). ISR은 전세계를 운항중인 87,000여 척의 선박정보를 보유하고 있으며 300톤 이상의 선박에 대해서 엔진상세 자료(주엔진 출력 및 최고속도) 검색이 가능하다. 그러나 2009년도 모든 부산항 입출항 선박의 배출량 산출을 위해 ISR에서 제공하지 못하는 주엔진의 출력 자료 7% 및 최고속도 자료 9%는 다음과 같이 추정하였다. ISR에서 제공하지 못하는 300톤 이상 선박의

엔진상세자료와 300톤 미만 선박의 엔진상세자료는 선박 유형별 톤급과 주엔진 출력의 상관관계를 이용하였다(Entec UK, 2007). 그리고 300톤 미만의 선박 중에서 예인선은 우리나라의 예인선의 특징을 반영하기 위하여 한국예선업협동조합의 2010년도 예선현황 자료를 활용하여 선박의 톤수에 대한 주엔진 출력 상관관계를 이용하였다. 보조엔진의 출력은 ISR에서 제공하지 않기 때문에 Entec UK의 선박종류별 주엔진/보조엔진 출력비율을 이용하여 추정하였다(Entec UK, 2007). 2009년 부산항의 선박 대기배출량 산출에 이용된 선박 총톤수 범위는 8톤에서 131,771톤이다.

주엔진의 부하량(LF)은 Propeller Law(식 2)를 이용하여 산출하였으며 보조엔진의 부하량은 선박종류와 운항모드별로 유도된 ICF Consulting사가 제공한 자료를 활용하였다(ICF Consulting, 2006).

$$LF = (AS/MS)^3 \quad (2)$$

여기서 AS(actual speed)는 실제 운항속도(knot), MS(maximum speed)는 최고속도(knot)를 나타낸다. 엔진 가동시간(A)은 정박시에는 입항시각과 출항시각의 차를 이용하였으며 항내 이동시는 선박의 속도와 거리를 이용하여 계산하였다. 활동도는 부산항만공사에서 제공받은 선박의 입출항 자료를 이용하여 선박의 이동거리, 운항속도, 운항횟수를 이용하여 산출하였다. 또한 부산항만공사에서 제공하는 선박의 입출항 관련자료, 즉 선박 호출부호 및 선박명, 배출량 산정에 사용되는 총톤수, 선박종류, 입항장소, 내외항 구분, 입출항 일시, 입항목적 등의 자료를 이용하여 선박의 특성별 배출량을 조사하였다.

선박 종류별 배출량을 산출하기 위해 본 연구에서는 총 26종의 선박(화학선, 화물선, 컨테이너선, 여객선 등)으로 분류하였다(Table 1). 2009년도 부산항의

Table 1. LMIU Vessel Categories

LMIU Code	Vessel classification	Classification of the Ministry of Land, Transport & Maritime Affairs
A11	Liquefied gas	LPG, LNG Tanker
A12	Chemical	Chemical, Chemical gas Tanker
A13	Oil	Crude oil, Oil products Tanker
A14	Other liquids	Oil-feeding, Water Tanker
A21	Bulk dry	Bulk Carrier
A22	Bulk dry/oil	
A23	Self-discharging bulk	
A24	Other bulk dry	Wood, Ore, Cotton, Coal, Cement, Hot coil, Steel, Sand carrier
A31	General cargo	General cargo
A32	Passenger/general cargo	Dry cargo/Passenger
A33	Container	Container, Semi-container Ship
A34	Refrigerated cargo	Refrigerated cargo Ship
A35	Ro-ro cargo	Car Carrier
A36	Passenger/ro-ro cargo	
A37	Passenger	Passenger, Ro-ro cargo Ship
A38	Other dry cargo	Sand, Steel, Crude oil, Chemical, General cargo, Construction Barge, Other Barge
B11	Fish catching	Near shore fishing, Deep-sea fishing Vessel
B12	Other fishing	
B21	Offshore supply	Delivery, Pilot Boat
B22	Other offshore	
B31	Research	
B32	Towing/pushing	Towing, Pushing, Entry Tug
B33	Dredging	Dredger
B34	Other activities	Waste disposal, Government, Patrol, Military, Other Ship
W11	Other activities	Non-seagoing: Chemical, Chemical gas, Crude oil, Oil products Tanker
W12	Other activities	Non-seagoing: General cargo, Dry cargo/Passenger, Passenger, Excursion Ship

입출항 선박 현황에 관한 자세한 내용은 3장에 서술하였다. 선박의 종류를 분류하는 방법에 있어 우리나라 국토해양부와 본 연구에 사용된 LMIU(Lloyd's Marine Intelligence Unit)의 선박분류 체계가 차이가 있다. 그리고 Entec UK의 선박배출계수는 선박분류 체계를 LMIU의 것을 따르므로 국토해양부의 선박분류체계를 LMIU 분류체계에 대응시켜 활용하였다.

본 연구에 사용된 배출계수는 Entec UK의 연구내용 중 NO_x 배출계수 전체와 SO₂ 배출계수 일부분을 일부 수정하여 사용하였다(Entec UK, 2002). 배출계수에 대한 자세한 내용은 3장에 서술하였다.

2.2. 선박배출량 산정범위(연구대상 지역)

부산항 입·출항 선박으로부터 대기배출량 관련 선행연구의 대부분은 부산항의 항계 내에서 배출량을 산정하였다(Clean Air Policy Support System, CAPSS). 그러나 실제 항만관제는 위치보고선부터 이루어지기 때문에 본 연구에서는 항계선과 위치보고선

사이의 선박 배출량도 포함하여 배출량의 산출하였다. 선박 배출량 산정방식에 있어 선박의 운항 형태를 구별하여 3가지 모드로 분류하여 선박 배출량을 산출하였다. 즉 선박의 관제가 시작되는 지점인 위치보고선에서 항계선까지(at sea 모드), 항계선에서 정박까지(Maneuvering 모드), 정박지(at port 모드)에 대해 선박의 이동경로 및 정박장소를 90여 개 지역으로 나누어 배출량을 산정하였다(Fig. 1).

한편, 부산항에서 장기간 정박하는 선박의 경우 정박하고 있는 동안의 엔진가동 시간은 선박관제사의 경험을 토대로 전체 입출항 선박의 2.8%인 장기간 정박하는 선박에 대해 최대 정박시간을 336시간으로 제한하였다. 선박을 수리할 목적으로 입항한 선박 중에서 조선소, 부두 등에 접안하는 경우는 정박하는 동안 배출량이 없는 것으로 산정하였으며 예선은 한국해양환경공단에 문의한 결과 집단정계지에서 정박 중 엔진을 사용하지 않는 것으로 나타나 집단정계지에서의 예선의 배출량은 산정하지 않았다.

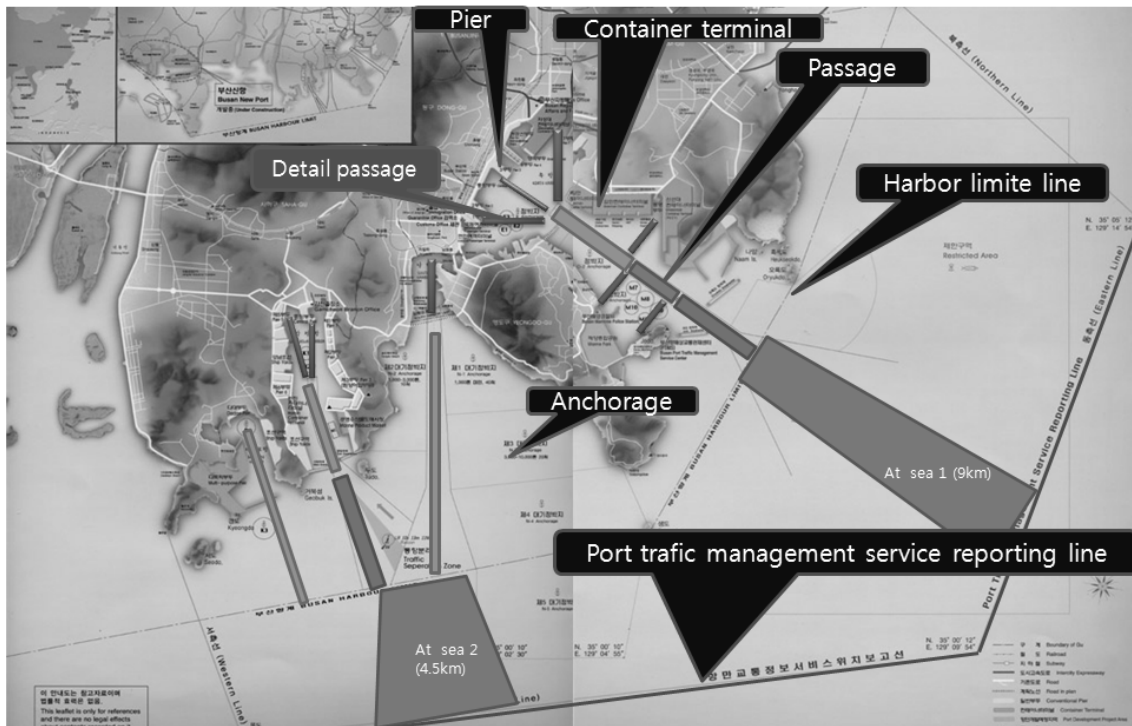


Fig. 1. Study area for estimation of air pollutants from ship in Busan port.

Table 2. Summary of the number of ship at specific mode in Busan port

Mode	Ship type							
	Container		Passenger		General cargo		Other ships	
	< 300 ton	> 300 ton	< 300 ton	> 300 ton	< 300 ton	> 300 ton	< 300 ton	> 300 ton
At sea	-	11,841	1,489	1,254	44	7,069	13,929	11,816
Maneuvering	-	9,230	1,486	1,207	40	2,363	6,676	4,399
At port	-	11,850	1,488	1,252	29	6,088	15,498	13,526

3. 결과 및 고찰

3.1. 2009년도 부산항 입출항 선박 배출량 통계

2009년도 입출항 선박 50,622척 중 866척은 누락 정보가 많아 배출량 산정 대상에서 제외하였다. 배출량 산정 대상 선박 중에서 300톤 이상의 선박 입출항 횟수는 32,719회이며 그 중에서 주엔진 출력을 알 수 없는 자료는 약 7%, 최고속도 자료를 확보할 수 없는 자료는 약 9%였다. 300톤 미만 선박의 전체 입출항 횟수는 17,018회로 전체의 34%를 차지하였지만 엔진 출력은 7.5%로 나타났다. Table 2는 부산항을 입항한 선박 가운데 주엔진의 출력이 큰 선박의 각 운항모드별 배출량 산정에 사용된 선박수를 나타내고 있다. At port 모드는 선박이 부두에 접안하는 경우와 남외항 정박지처럼 해상에 닿을 내리는 경우를 모두 포함하고 있다. Maneuvering 모드는 선박이 부두에 정박을 위해서 속력을 줄여 항로를 이동하는 운항모드이며 대부분 부두에 접안한다고 판단되므로 at sea 모드로 운항하던 선박들 중에서 컨테이너선과 여객선을 제외

하면 60% 이상의 선박이 maneuvering 모드를 거치지 않고 부두가 아닌 해상에 정박하는 것으로 나타났다. 컨테이너선은 대형화 추세로 1,000톤 이하의 선박이 존재하지 않았다.

3.2. 선박 배출량 산정을 위한 배출계수

선박의 대기오염물질 배출량 산정에 사용된 배출계수의 배출물질 종류는 NO_x, SO₂, HC, CO₂, 입자상 물질(Particulate Matter, PM)이다. 대기오염물질 중 NO_x의 배출계수는 두 종류의 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하였다. 즉, 2000년 이전에 건조된 선박을 대표하는 배출계수(EF-NO_x 2000)와 2000년 1월 1일 이후 NO_x 저감엔진으로 연간 교체비용을 고려한 배출계수(EF-NO_x 2009)를 적용하였다. Entec UK의 2000년 SO₂ 배출계수는 IVL 스웨덴 환경연구소에서 제시한 해양 가스유(Marine gas oil, MGO; 등유와 중유의 중간 유분)의 황함량을 0.25%로 간주하고 산출하였으나, 우리나라 해양환경관리법에 의하면 선박용 경유의 황함량 기준이 1% 이하이고 영해 및 배타적

Table 3. Emission factor with different engine/fuel types in three ship operation modes (g/kWh)

Engine type /fuel type	At sea (Main Engine)					Maneuvering (Main Engine)					All mode (Aux. Engine)				
	NO _x	SO ₂	HC	CO ₂	PM	NO _x	SO ₂	HC	CO ₂	PM	NO _x	SO ₂	HC	CO ₂	PM
SSD/MGO	17.0	0.9	0.6	588	0.3	13.6	2.0	1.8	647	0.9					
SSD/MDO	17.0	3.7	0.6	588	0.3	13.6	4.1	1.8	647	0.9					
SSD/RO	18.1	10.5	0.6	620	1.7	14.5	11.6	1.8	682	2.4					
MSD/MGO	13.3	1.0	0.5	645	0.3	10.6	2.2	1.5	710	0.9	12.4	2.2	0.4	690	0.3
MSD/MDO	13.3	4.1	0.5	645	0.3	10.6	4.5	1.5	710	0.9	12.4	4.3	0.4	690	0.3
MSD/RO	14.0	11.5	0.5	677	0.8	11.2	12.7	1.5	745	2.4	13.1	12.3	0.4	722	0.8
HSD/MGO	12.0	1.0	0.2	645	0.3	9.6	2.2	0.6	710	0.9	12.4	2.2	0.4	690	0.3
HSD/MDO	12.0	4.1	0.2	645	0.3	9.6	4.5	0.6	710	0.9	12.4	4.3	0.4	690	0.3
HSD/RO	12.7	11.5	0.2	677	0.8	10.24	12.7	0.6	745	2.4	13.1	12.3	0.4	722	0.8
GT/MGO	5.7	1.5	0.1	922	0	2.9	3.2	0.5	1,014	0.5					
GT/MDO	5.7	5.8	0.1	922	0	2.9	6.4	0.5	1,014	0.5					
GT/RO	6.1	16.5	0.1	970	0.1	3.1	18.1	0.5	1,067	1.5					
ST/MGO	2.0	1.5	0.1	922	0.3	1.7	3.2	0.3	1,014	0.9					
ST/MDO	2.0	5.8	0.1	922	0.3	1.7	6.4	0.3	1,014	0.9					
ST/RO	2.1	16.5	0.1	970	0.8	1.7	18.1	0.3	1,067	2.4					

* MGO(Marine gas oil), MDO(Marine diesel oil), RO(Residual oil)

경제수역을 항해하는 선박의 연료유 황함량은 0.05% 이하이지만 아직 시행 전(2012년 시행)이므로 연료의 황함량 기준을 IMO MEPC(2001)에 제시된 자료(MGO 황함량 0.5%)를 근거로 Entec UK 보고서의 SO₂ 배출계수(MGO 황함량 0.25%)를 수정하여 사용하였다(Entec UK, 2002). 선박에서 사용되는 연료의 황 함유량은 0.5-2.7%, 탄소의 함유량은 약 86.7%이다.

선박에는 주엔진 외에 보조엔진도 장착되어 있고 운항 모드에 따라 오염물질의 배출량도 다르다. 그러므로 배출계수도 선박의 운항 상황에 따라 주엔진에 대해서 “at sea”와 “maneuvering” 운항모드별 각각 2종의 배출계수, 보조엔진에 대해서 “at sea”, “maneuvering” 그리고 “at port” 운항모드 모두에 적용되는 1종의 배출계수로 나누어진다. Entec UK의 배출계수의 엔진분류는 100톤 이상의 30,665척의 선박에 대해서 엔진의 회전속력에 따라 저속디젤(SSD), 중속디젤(MSD), 고속디젤(HSD), 가스터빈(GT), 스팀터빈(ST)의 5종으로 분류되고, 연료구분에 따라 해양 가스유(MGO), 해양디젤유(MDO), 잔류유(RO)의 3종으로 분류하고 있다. Table 3은 주엔진의 두 가지 운항모드(“at sea”와 “maneuvering”)

와 보조엔진의 전체 운항 상태에 따른 2000년 1월 1일 이전에 건조된 선박을 대표하는 엔진종류/연료구분에 따른 배출계수이며 앞에서 언급하였듯이 MGO를 사용하는 엔진의 SO₂ 배출계수는 황함량을 0.5%로 계산한 값이다(Entec UK, 2002).

Table 3은 엔진종류/연료구분에 따른 배출계수이므로 선박종류별(LMIU code)로 배출계수를 유도하기 위해서 선박종류별로 엔진종류/연료구분에 대한 엔진의 출력비율을 적용하였다. 한편 NO_x의 배출량 산정의 경우, NO_x가 저감 선박엔진으로 연간 교체비율, 그에 따른 연간 NO_x 배출 저감율이 고려된 새로운 2009년 NO_x 배출계수를 산출하여 배출량 산정에 사용하였다. Entec UK에 의하면 2000년도 이전 선박에 장착된 엔진의 평균 NO_x 배출량보다 국제해사기구의 NO_x 규제를 만족하는 새로운 엔진의 평균 NO_x 배출량이 대략 17% 낮은 것으로 보고되었고 5년간 새로운 엔진 장착 비율이 평균 4%로 나타났다(Entec UK, 2005).

연구방법에서 2000년도 이전 선박에 장착한 엔진의 평균 NO_x 배출계수보다 IMO NO_x 규제를 만족하는 새로운 엔진의 평균 NO_x 배출계수가 대략 17% 배

Table 4. Summary of emission factors for air pollutants including CO₂ for 3 ship operation modes(g/kWh)

LMIU Code	ME At sea	NO _x			SO ₂			HC			CO ₂			PM	
		Maneuvering	AE All mode	ME At sea	Maneuvering	AE All mode	ME At sea	Maneuvering	AE All mode	ME At sea	Maneuvering	AE All mode			
A11	7.96	6.38	12.29	12.60	13.86	11.33	0.30	0.91	0.40	823	905	719	1.06	2.24	0.75
A12	15.54	12.44	12.35	10.92	12.06	12.30	0.56	1.68	0.40	644	709	722	1.40	2.40	0.80
A13	13.98	11.18	12.35	11.67	12.87	12.30	0.50	1.50	0.40	689	758	722	1.48	2.40	0.80
A14	15.61	12.48	12.35	10.86	12.00	12.30	0.56	1.69	0.40	641	705	722	1.37	2.40	0.80
A21	16.85	13.48	12.35	10.56	11.66	12.30	0.59	1.78	0.40	623	686	722	1.67	2.40	0.80
A22	15.84	12.68	12.35	10.27	11.35	12.30	0.56	1.69	0.40	642	707	722	1.56	2.31	0.80
A23	13.43	10.75	12.35	11.47	12.65	12.30	0.49	1.46	0.40	693	762	722	1.32	2.35	0.80
A24	16.36	13.09	12.35	10.54	11.64	12.30	0.58	1.73	0.40	631	694	722	1.58	2.38	0.80
A31	15.38	12.30	12.35	10.84	11.97	12.27	0.55	1.66	0.40	644	709	722	1.33	2.39	0.80
A32	14.85	11.88	12.35	11.06	12.21	12.30	0.54	1.63	0.40	652	717	722	1.20	2.40	0.80
A33	16.49	13.19	12.35	10.68	11.80	12.30	0.58	1.75	0.40	631	694	722	1.63	2.40	0.80
A34	16.37	13.09	12.35	10.66	11.78	12.30	0.58	1.75	0.40	629	692	722	1.55	2.40	0.80
A35	14.48	11.58	12.35	10.99	12.14	12.30	0.53	1.58	0.40	648	713	722	1.20	2.37	0.80
A36	12.50	9.92	12.35	9.99	11.04	12.30	0.42	1.28	0.40	686	755	722	0.73	2.14	0.80
A37	12.42	9.93	12.35	11.74	12.96	12.23	0.46	1.39	0.40	696	766	722	0.81	2.39	0.80
A38	10.40	8.32	12.35	12.86	14.16	12.30	0.39	1.18	0.40	757	833	722	0.97	2.40	0.80
B11	13.22	10.58	12.35	11.31	12.49	12.23	0.48	1.44	0.40	674	741	722	0.84	2.38	0.80
B12	12.45	9.96	12.35	12.22	13.47	12.30	0.45	1.35	0.40	720	793	722	1.36	2.39	0.80
B21	13.10	10.48	12.32	11.02	12.17	11.83	0.49	1.47	0.40	675	743	721	0.79	2.33	0.78
B22	12.64	10.12	12.35	11.14	12.30	12.30	0.44	1.31	0.40	682	750	722	0.78	2.33	0.80
B31	13.30	10.65	12.35	11.44	12.63	12.30	0.49	1.46	0.40	673	741	722	0.86	2.40	0.80
B32	12.88	10.32	12.35	10.83	11.95	12.30	0.42	1.26	0.40	673	741	722	0.80	2.30	0.80
B33	13.27	10.61	12.35	11.37	12.56	12.30	0.49	1.47	0.40	674	741	722	0.84	2.39	0.80
B34	11.72	9.37	12.27	10.87	11.99	11.02	0.42	1.27	0.40	705	776	718	0.75	2.21	0.74
W11	12.52	10.02	12.35	10.96	12.11	12.30	0.48	1.43	0.40	645	710	722	0.76	2.29	0.80
W12	11.97	9.62	12.35	11.50	12.70	12.30	0.20	0.60	0.40	677	745	722	0.80	2.40	0.80

* Emission was calculated using EF-NO_x 2009.

출저감 효과가 있으며, 2000년에서 2005년까지 새로운 엔진 교체 비율이 평균 4%이므로 이 기간 동안의 NO_x 배출계수 저감율은 3.4%로 나타났다. 따라서 NO_x 물질에 대해서 5년간 3.4%의 저감율을 적용하여 연도별 배출계수를 추론하였다. Table 4는 NO_x 저감 엔진 교체를 고려한 NO_x 외 기타 4종의 2009년 배출계수이다.

3.3. 선박의 배출량 산정을 위한 이동속도

항해중인 선박의 이동속도는 배출량 산정에서 주요 인자인 엔진부하(LF)와 엔진 가동시간(A)을 산출하기 위한 중요 변수이므로 선박의 이동속도는 부산항 해상 교통관제센터 관제화면상의 선박 종류별로 이동속도를 조사하여 평균한 값을 배출량 계산에 사용하였다.

부산항을 입·출항하는 선박의 구간별 이동속도는 선박의 이동속도 측정은 선박이 각 측정구간의 중간 지점을 통과할 때 이루어졌고 부산항의 북내항에서 이동하는 선박들은 항법 등에 관한 규칙을 준수하여 규정속도를 대체로 준수하는 편이었으나 북외항 일부 지역과 북항 출입지역은 대부분의 선박이 8 knot인 최고 항행속도규정을 지키지 않는 것으로 나타났다. 선박의 종류에 따라 이동속도 측정구간은 항로에서 정박지까지(detail passage), 항로(passage), 항계에서 위치보고선(at sea)까지 구분하여 파악하였다(Fig. 1). 해상교통관제센터를 통해서 얻은 선박종류별 실제 평균이동속도는 선박의 최고속도와 함께 주엔진의 부하량 계산(수식2)과 엔진 가동시간 계산에 이용하였다.

부산항 북항 지역을 운항하는 선박을 대상으로 2010년 3월 26일~29일의 4일간 160여 척의 선박을 조사한 결과에 의하면 기상 상황, 선박의 통행량, 예인 선단의 길이, 선박의 적재량, 선박의 항구로 진입하는 방향 등에 따라 선박의 이동속도는 변할 수 있다. 실제 규정속도 규칙을 준수하는 선박은 드물었으며 특히 대마도를 오가는 여객선의 경우 항로에서도 40 knot 이상의 속도를 유지하였다. 최고속도가 30 knot 이상인 고속여객선은 일반여객선과 구분하여 평균 이동속도를 구하고 엔진의 부하량과 가동시간 계산에 이용하였다. 북항의 통항분리대를 기준으로 울산과 일본 방향에서 북항으로 진입하는 선박의 경우 북항 항로 진입시점까지 점차로 속도를 줄였으나 감천항 방향에

서 진입하는 선박의 경우 통항분리대 우현으로 진입해야 하므로 통항분리대에서 이미 속도를 줄인 상태에서 북항으로 진입하는 경향을 보였다. 그래서 “at sea” 운항모드를 대표하는 선박의 이동속도의 측정은 감천항 방향에서 진입하는 경우 통항분리대 진입 전에 측정하였으며 나머지는 부산항 항계선과 위치보고선 중간지점을 측정지점으로 하였다(Table 5).

일반적으로 “at sea” 운항모드에서 선박은 엔진출력의 약 80%를 사용하는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서 정한 “at sea” 운항모드는 항계에서 위치보고선까지 거리여서 선박의 출항할 때는 속력을 충분히 올리기에 짧은 구간이고 입항할 때는 속도를 줄이는 지역이라 최고출력 대비 약 60% 정도 운항하는 것으로 나타났으며 최고속도 30 knot 이상의 고속여객선은 최고출력을 유지하는 것으로 나타났다.

북외항을 이동하는 선박의 대부분은 선박의 이동속도 규정을 준수하지 않으므로 항로 이동속도규정을 준수하면 어느 정도의 배출량 저감이 있는지 계산하였다. 북항의 제 1항로(passage I)를 이동하는 경우만 놓고 배출량을 산정했으며 ‘부산항 항법 등에 관한 규정’의 북항 항계부근 협수로 통과 속도규정인 8 knot를 적용했을 때의 배출량과 실제 측정한 이동속도를 평균하여 선박종류별로 속도 값을 적용했을 때의 배출량을 비교하였다(Table 6). 북항의 제 1항로(약 6.1 km) 구간에서 모든 선박이 8 knot의 속도규정을 유지하면서 항해 한다면 1항로의 NO_x 배출 저감효과는 실제 선박속도 적용 배출량과 비교해서 약 13%로 나타났다. 그리고 SO₂, 탄화수소, CO₂, PM의 배출 저감량은 각각 14, 29, 15, 30%로 나타났다. 그리고 만약 7 knot로 항로에서의 이동속도를 제한하면 배출 저감량이 약 14% 정도로 선박의 이동속도를 계속 낮춘다고 해서 배출량이 적어지는 것은 아니었다. 주엔진의 배출량은 줄어들지만 그에 따라서 선박의 엔진 가동시간이 길어지므로 보조엔진의 배출량이 늘어난 것으로 판단되므로 만일 항구에서 선박의 속도를 규제하더라도 가장 적절한 규정속도를 정해야 효과가 클 것으로 판단된다.

Table 5. Average vessel speed in Busan North Port (in knot)

LMIU Code	Vessel classification	Average speed		
		Detail passage	Passage	At sea
A11	Liquefied gas	6.4	10.9	12.6
A12	Chemical	6.4	10.9	12.6
A13	Oil	7.9	10.3	11.1
A14	Other liquids	6.4	10.9	12.6
A21	Bulk dry	5.4	11.2	10.9
A22	Bulk dry/oil	6.4	10.9	12.6
A23	Self-discharging bulk	6.4	10.9	12.6
A24	Other bulk dry	5.4	11.2	10.9
A31	General cargo	5.2	9.9	10.3
A32	Passenger/general cargo	9.4	16.5	17.2
A33	Container	5.2	9.5	11.8
A34	Refrigerated cargo	6.4	10.9	12.6
A35	Ro-ro cargo	8.0	11.8	12.2
A36	Passenger/ro-ro cargo	6.4	10.9	12.6
A37	Passenger	12.8	17.1	16.7
A37	Ocean greyhound*	11.7	35.1	39.3
A38	Other dry cargo	6.4	10.9	12.6
B11	Fish catching	6.0	8.7	8.0
B12	Other fishing	6.4	10.9	12.6
B21	Offshore supply	6.4	10.9	12.6
B22	Other offshore	6.4	10.9	12.6
B31	Research	6.4	10.9	12.6
B32	Towing/pushing	6.3	7.3	7.5
B33	Dredging	6.4	10.9	12.6
B34	Other activities	6.4	12.3	14.3
W11	Other activities	6.4	10.3	10.2
W12	Other activities	6.4	10.9	12.6

* maximum speed over 30 knot

Table 6. Intercomparison of ship emissions in passage I estimated using two different speeds (actual speed vs. regulation speed) (ton/yr)

Vessel speed	NO _x	SO ₂	HC	CO ₂	PM
Actual speed	523	506	48	30,195	76
Regulation speed	456	437	34	25,744	53
Percent difference (%)	12.8	13.6	29.2	14.7	30.3

3.4. 2009년도 부산항 선박 대기오염 배출량

2009년도 부산항 선박 대기배출량을 선박의 개별 운항특성과 엔진상세 데이터를 이용하여 산정하였으며 본 연구에서는 선박배출량에 있어서 IMO NO_x Technical Code로 인해서 실제 운항하는 선박의 NO_x 배출량 변화(감소) 평가하였다. 선박의 배출량은 NO_x 저감엔진의 교체비용을 고려한 배출계수(EF-2009)를 이용한 배출량과 엔진교체비용이 적용되지 않은 배출계수(EF-2000)을 이용한 배출량을 산정하여 비교하였다. Table 7은 2009년 부산항 선박 대기배출량 산정 값 중에서 배출량이 많은 상위 컨테이너선과 일반화물선의 배출량을 나타낸 값으로 전체의 50% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 또 선박이 항로 등을 이동하는 경우(at sea, maneuvering)는 컨테이너선만으로도 전체 배출량의 약 70% 정도를 차지하였다.

선박의 종류별 배출량은 컨테이너 선박이 전체 NO_x 배출량의 약 47%와 전체 주엔진 출력의 약 73%로 가장 높았으며 평균 1척의 컨테이너 선박이 입항하여 연간 344 kg의 NO_x를 배출하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 항만별 배출량은 북항이 전체의 약 60%, 남항이 18%, 감천항이 11%, 신항이 10% 순이다(Fig. 3). 특히 북항은 컨테이너 선박의 NO_x 배출량이 북항

Table 7. Summary of emissions of air pollutant from ship (10³ton/yr)

Operation mode	NO _x ^a			SO ₂			Hydrocarbon (HC)			CO ₂			PM ^b		
	A33*	A31*	All*	A33	A31	All	A33	A31	All	A33	A31	All	A33	A31	All
At sea	0.96	0.09	1.44	0.64	0.06	1.05	0.03	0.003	0.05	38	3.69	62	0.09	0.007	0.13
Maneuvering	0.7	0.03	0.94	0.66	0.03	0.92	0.07	0.003	0.09	39	2	54	0.1	0.005	0.14
At port	2.43	0.51	6.34	2.41	0.50	6.26	0.08	0.02	0.21	141	30	369	0.16	0.03	0.41
Sum	4.09	0.63	8.71	3.71	0.59	8.23	0.18	0.026	0.35	218	35.69	486	0.35	0.042	0.68

^a NO_x emission was calculated using emission factor of EF-NO_x 2009.^b PM: Particulate Matter

* A33: Container ship, A31: General cargo, All: Total ship emission including 26 ship types.

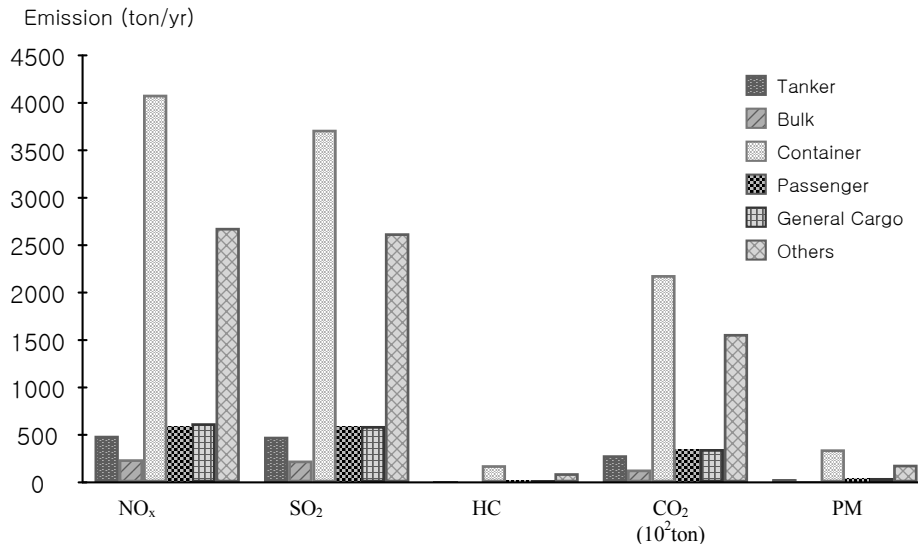


Fig. 2. Emissions of air pollutants from different ship types in Busan port.

전체의 약 59%로 많은 비중을 차지하여 무역항으로서의 성격이 강하게 반영된 것으로 판단된다. 전체 컨테이너 선박의 주엔진 출력은 배출량 계산과정의 주요인자인 주엔진 출력에서 많은 부분을 차지하므로 많은 양의 대기오염 배출 가능성이 있고, 실제 배출량

전체에서 차지하는 비중이 높으므로 부산항의 경우 컨테이너 선박에 대한 규제나 정책만 있어도 많은 배출량 저감효과가 있을 것으로 사료된다.

부산항에서의 선박에 의한 총 NO_x, SO₂, VOC (HC), CO₂, PM의 배출량은 각각 8.7×10^3 , $8.23 \times$

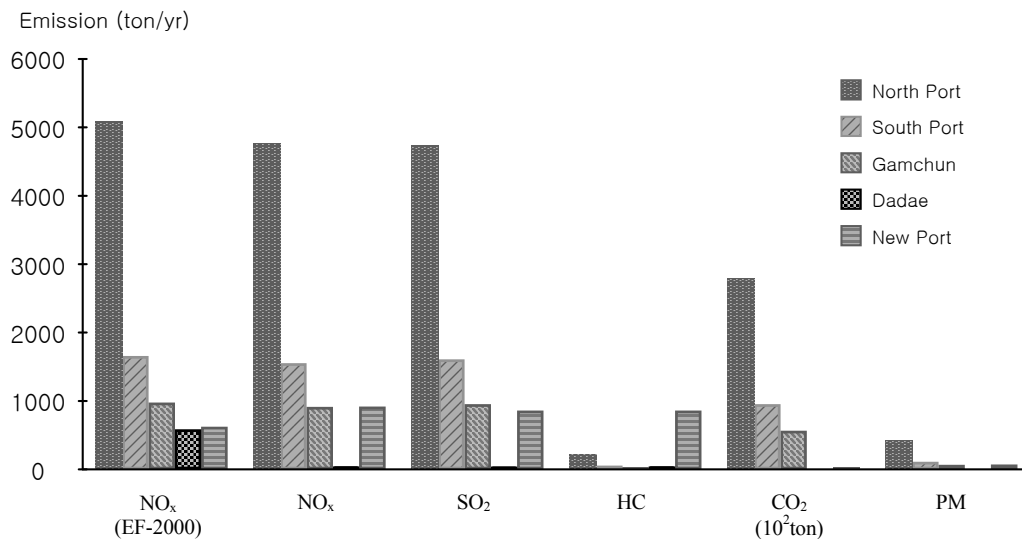


Fig. 3. Emissions of air pollutants from ship with port locations.

10^3 , 0.35×10^3 , 4.86×10^6 , 0.67×10^3 ton/yr로 나타났으며 NO_x/VOC 배출량 비는 25로 나타났다. 본 연구에서 나타난 NO_x/VOC 배출량 비는 미국 캘리포니아 연안의 선박 NO_x/VOC 배출량비(11)보다는 높게 나타났고, 휴스턴 항의 배출비와는 유사하였다 (Starcrest Consulting Group, LLC, 2009; Vutukuru와 Dabdub, 2008). 그리고 국제선박 무역에 의한 전해양의 NO_x/VOC 비 (약 30)와도 유사하였다(Endresen 등, 2003; Skjolsvik 등, 2000).

국립환경과학원에서 발행하는 최근(2007년) CAPSS (대기정책지원시스템)의 부산항 선박배출량과 EF 2009를 적용한 부산항의 2009년도 배출량을 비교하면 CAPSS 배출량이 2007년도 자료인데도 불구하고 본 연구에서 산정한 배출량의 거의 2배 가까이 되는 것을 알 수 있다. 이는 연료사용량을 기반으로 하는 CAPSS와 본 연구의 배출량 산정방법의 차이에서 기인한 것으로 추측되며, 항계범위 내에서만 산정하는 CAPSS의 배출량은 실제 배출량과의 차이는 더 클 것으로 생각된다.

Table 8. Comparison of emissions of air pollutants from ship between CAPSS and this study (ton/yr)

	NO_x	SO_2	HC	CO_2	PM
This study(2009)	8,710	8,232	348	486,280	675
CAPSS(2007)	15,612	14,304	682	-	581*
Percent difference	44%	43%			

*PM₁₀

또한 본 연구에서는 강화된 배출계수가 선박 배출량에 주는 결과를 알아보기 위하여 NO_x 에 한하여 대

기오염방지협약이 고려된 2009년 배출계수(EF- NO_x , 2009)와 반영되지 않은 2000년 배출계수(EF- NO_x , 2000)를 각각 사용하여 2009년 부산항을 입출항한 선박을 대상으로 배출량을 산정하여 그 차이를 비교하였다(Table 9).

출력이 130 kW를 초과하는 선박엔진에 대해서 NO_x 배출규제를 하므로 배출량 산정에 있어서 이 내용을 주엔진과 보조엔진에 각각 고려하여 산정하였다. NO_x 배출량의 경우 IMO의 NO_x 규제와 관련한 배출계수 적용시 NO_x 배출량이 약 6.5% 낮은 것으로 나타났다.

4. 결론

우리나라 선박 산업규모에 비해 선박의 엔진에 대한 대기오염 배출계수, 실제 선박의 운항모드 대한 엔진의 배출 변화, 엔진의 온도에 따른 배출 변화, 사용 연료 등 기초적인 정보가 부족하여 선진국에서 행한 연구 자료를 선박배출량 산정에 이용한 아쉬움이 있지만 선행연구를 바탕으로 우리나라 현실을 고려하고 NO_x 규제 내용을 포함하는 배출계수를 만들었다. 국제적인 선박에 의한 대기배출물질 규제를 적용하여 우리나라의 선박 대기배출량을 산정하여 보다 현실에 가까운 배출량 산정을 하였다고 판단되며 2000년 이전의 선박엔진을 대표하는 배출계수를 적용한 선박 배출량과 비교하여 NO_x 배출량이 6.5% 정도 저감됨을 알 수 있었다. IMO의 선박으로부터의 대기오염물질 규제를 하는 국제 협약을 간과하고 배출량을 산정한다면 그 만큼 배출량은 과다 산정될 것이다. 그 이유는 2000년 1월 1일부터 선박에 장착되는 엔진은 NO_x

Table 9. Comparison of NO_x emission based on two different emission factors (2000 vs 2009) (10^3 ton/y)

Operation Mode	NO_x^a			NO_x^b		
	A33*	A31*	All*	A33*	A31*	All*
At sea	0.96	0.09	1.44	1.01	0.09	1.53
Maneuvering	0.7	0.03	0.94	0.75	0.03	1.04
At port	2.43	0.51	6.34	2.58	0.54	6.73
Sum			8.71			9.30

^a EF- NO_x , 2009 case

^b EF- NO_x , 2000 case

* A33: Container ship, A31: General cargo, All: Total ship emission including 26 ship types.

저감 기술이 적용되었기 때문이다. 앞으로 IMO의 국제협약은 더욱 강화될 것이므로 강화된 국제협약을 만족하는 연구가 계속되어 정확한 선박 배출량 평가가 있어야 하겠으며 선박이 정박하고 있을 때(at port) 엔진을 가동하는지, 가동한다며 얼마의 기간 동안 엔진을 가동하는지 그리고 장기간 정박하는 이유에 대한 선박종류마다의 정보를 항만 종사자나 선장 등을 통한 설문조사가 있었으면 더욱 정확한 배출량 산정이 되었으리라 생각한다.

본 연구에서 선박의 이동속도는 부산항 해상교통관제센터의 VTS 관제화면을 통해 실제 선박의 이동속도를 조사하여 선박종류별로 평균 이동속도를 구하여 배출량 산정에 이용하였다. AIS를 이용하면 실시간으로 선박의 이동속도를 파악하고 더욱 정확한 배출량을 산정하는 것도 가능하다. 장비, 시간, 비용 등의 한계로 AIS를 이용하지는 못하였지만 실제 선박의 이동속도를 평균한 자료를 이용하여도 전체 배출량을 놓고 보면 큰 차이가 없을 것으로 판단되며 앞으로 더욱 많은 선박의 속도 측정자료를 확보한다면 선박종류와 선박의 톤급을 대표하는 속도자료가 될 것으로 생각한다. 선박이 항로에서 8 knot의 속도를 유지하면 항로에서의 배출저감 효과가 13%로 나타났으며 더 이상은 속도를 줄여도 배출저감 효과가 적은 것으로 나타나 속도규제를 하더라도 적절한 속도규제가 있어야 할 것으로 생각된다. 선박에 의한 배출량을 항계 범위 안에서만 놓고 본다면 정박 중 배출량이 많은 부분을 차지하지만 항로에서의 선박 배출량만을 고려하면 선박의 이동속도 규정을 정하고 준수함으로써 배출량 저감 효과가 클 것으로 판단된다. 앞으로 개별 선박의 건조년도를 고려하여 배출계수를 적용하고 정박 중 엔진의 가동유무 등 불확실한 자료에 대한 조사가 더 이루어지면 보다 신뢰성 있는 선박의 대기배출량 산정이 가능할 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원의 차세대 환경기술 개발사업비 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 부산항 입출항 자료를 협조해 주신 부산항만공사와 북항관제센터 직원들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

부산지방해운항만청, 2009, 부산항 항법에 관한 규칙.
 한국예선업협동조합, 2010, 曳船現況.
 해양환경관리법, 시행령 제 42조.
 Corbett, J. J., Koehler, H. W., 2003, Updated emissions from ocean shipping, *J. Geophys. Res.*, 108 (D20), 4650.
 Endresen, Ø., Sørgård, E., Sundet, J. K., Dalsoren, S. B., Isaksen, I. S. A., Berglen, T. F., Gravir, G., 2003, Emission from international sea transportation and environmental impact, *J. Geophys. Res.*, 108 (D17), 4560.
 Entec UK Limited, 2002, Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community, Northwich, England.
 Entec UK Limited, 2005, Service contract on ship emission: assignment and market-based instruments, European Commission Directorate General Environment, London, England.
 Entec UK Limited, 2007, Ship emission inventory-mediterranean sea, London, England.
 ICF Consulting, 2006, Current methodologies and best practices in preparing port emission inventories, Fairfax, USA.
 International Maritime Organization, 1997, MARPOL Annex VI.
 International Maritime Organization, 2008, MARPOL Annex VI.
 Lucialli, P., Ugolini, P., Pollini, E., 2007, Harbour of Ravenna: the contribution of harbour traffic to air quality, *Atmos. Environ.*, 41, 6421-6431.
 Marr, I. L., Rosser, D. P., Meneses, C. A., 2007, An air quality survey and emissions inventory at Aberdeen Harbour, *Atmos. Environ.*, 41, 6379-6395.
 Skjølsvik, K. O., Andersen, A. B., Corbett, J. J., Skjelvik, J. M., 2000, Study on greenhouse gas emissions from ships, MT Report: MT00 A23-038, MARINTEK, Trondheim, Norway.
 Song, S. K., Shon, Z. H., Kim, Y. K., Kang, Y. H., Oh, I. B., Jung, C. H., 2010, Influence of ship emissions on ozone concentrations around coastal areas during summer season, *Atmos. Environ.*, 44, 713-723.
 Starcrest Consulting Group, LLC, 2009, 2007 Goods

Movement Air Emissions Inventory at the Port of Houston, Final Report, January 2009, 34-46.
Vutukuru, S., Dabdub, D., 2008, Modeling the effects of

ship emissions on coastal air quality: a case study of Southern California, *Atmos. Environ.*, 42, 3751-3764.