한국대기환경학회지 제 27 권 제 4 호
J. KOSAE Vol. 27, No. 4 (2011) pp. 460～471
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.4.460

기술자료

인천항 항만시설에서의 대기오염물질 배출량 산정

Estimation of Air Pollutant Emissions from Port-Related Sources in the Port of Incheon

한세현 · 윤종상 · 김우중 · 서윤호 · 정용원*
인하대학교 환경공학과

(2011년 2월 8일 접수, 2011년 5월 20일 수정, 2011년 8월 5일 채택)

Sehyun Han, Jong-Sang Youn, Woo-Jung Kim, Yoon-Ho Seo and Yong-Won Jung*
Department of Environmental Engineering, Inha University

(Received 8 February 2011, revised 20 May 2011, accepted 5 August 2011)

Abstract

A port has been regarded as a significant contributor to air pollution in the surrounding areas. Port-related air pollutants are released from not only marine vessels, but also various land-side sources at ports, which include cargo handling equipment, vehicles, locomotives, and fugitive dust sources by port activities such as bulk handling and vehicle movements. However, most studies in Korea have only focused on vessel emissions and there is a lack of information on the emissions from other sources at port. In this study, in order to establish the port-related emission inventory and evaluate the relative contribution of these sources to air emissions from the Port of Incheon, the emissions from land-side sources were estimated and the CAPSS (Clean Air Policy Support System) data for vessel emissions were used. In particular, the detailed information and activity data for the cargo handling equipment source were collected and the emission factors and emissions by equipment types were calculated using U.S. EPA methodologies. Total HC, CO, NO_x, PM_{10}, and SO_2 emissions from port-related sources including the vessel in 2007 were calculated as 229 ton/year, 638 ton/year, 4,861 ton/year, 307 ton/year, and 3,995 ton/year, respectively. It was found that the vessel was the largest contributor to air pollutant emissions from the port, the cargo handling equipment was responsible for about from 8% to 13% of HC, CO, and NO_x emissions and the resuspended road dust contributed about 39% for PM_{10} emissions. The results of this study will be used to establish the management and reduction strategies of air pollution in the port.

Key words : Port emission inventory, Port of Incheon, Cargo handling equipment, Air pollutant emissions

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-860-7508, E-mail : jungyw@inha.ac.kr

1. 서 론

최근 국제교역이 증가함에 따라 항만에서의 화물처리량이 증가하고 선박 및 항만의 대형화가 추진되고 있으며, 이에 따른 항만의 대기오염에 대한 중요성이 증가하고 있다(Cho, 2010; Bailey and Solomon, 2004).

항만의 대기오염에 대한 영향을 평가하기 위해서는 해상배출원인 선박과 육상배출원인 항만하역장비, 트럭, 기관차 등의 다양한 배출원에 대한 고려가 필요하다. 이들 항만 배출원들은 주로 디젤엔진을 사용하고 있어 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 입자상 물질(particulate matter) 및 유해물질 등을 배출하고 있으며, 항만 노동자뿐만 아니라 지역 주민의 건강에도 상당한 영향을 미치는 것으로 조사되고 있다(Song and Han, 2007; Wu *et al*., 2007; Bailey *et al*., 2004). 한편 분체상 물질을 취급하는 항만의 경우에는 다양한 항만활동과 차량이동에 의해 비산먼지가 발생되며, 항만지역의 대기 중 입자상 물질 농도 증가에 기여하고 있는 것으로 파악된다(Alastuey *et al*., 2007; Artíñano *et al*., 2007).

기존의 항만관련 대기오염물질 배출 및 저감방안에 관한 연구들은 주로 선박을 대상으로 이루어져 왔는데, 이에 대한 국제적인 배출규제가 진행되고 항만 도시지역의 대기질에 대한 관심이 증가하면서 최근에는 항만시설 전체에 대한 포괄적인 연구가 수행되고 있다(Song and Han, 2007). 미국의 대표적인 항만지역인 캘리포니아 산 페드로 만의 LA항(Port of Los Angeles)과 LB항(Port of Long Beach)의 경우에는 각각 2001년과 2002년도부터 선박, 항만하역장비, 트럭, 기관차에 대한 대기오염물질 배출량을 산정해 오고 있으며, 항만 대기오염 관리를 위한 다양한 대책들을 수립하여 시행해 오고 있다(ICF International, 2009; Bailey *et al*., 2004).

국내의 경우에도 친환경적 항만운영을 위해 대기오염관리의 필요성이 지속적으로 제기되어 왔으며(김은수, 2008; 정혜원, 2004; 조경두, 2000), 선박 배출량을 산정하기 위한 연구들이 진행되어 왔다(Song *et al*., 2009; Bong *et al*., 2007; Lee *et al*., 1999). 최근 들어서 항만시설에 대한 대기오염물질 배출량 산정연구가 수행된 바 있으나(조경두와 김정숙, 2009; 환경부, 2009), 항만시설 전반에 걸친 대기환경관련 연구 및 기초자료는 부족한 실정이다. 또한 국가 대기오염물질 배출량을 산정하는 CAPSS(Clean Air Policy Supporting System)에서도 선박과 건설기계로 등록되어 있는 일부 하역장비만을 대상으로 배출량을 산정하고 있어(국립환경과학원, 2007), 항만시설 전체 배출량 및 지역 대기질에 대한 영향 등을 구체적으로 파악하기는 어려운 상황이다. 따라서 항만지역의 대기질을 개선·관리하기 위해서는 우선적으로 하역장비를 비롯한 항만시설 전체에 대한 배출원 목록을 구축하고, 배출량을 산정·평가하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

국내의 주요 수출입항이자 수도권 배후항인 인천항은 중국 교역의 교두보 역할을 하면서 물동량 수요가 꾸준히 증가하고 있는 추세이고, 이에 따라 대기오염물질 배출도 증가할 것으로 예상된다. 또한 인천항은 사료부원료, 곡물, 고철, 모래, 석탄 등 여러 벌크화물을 취급하고 있고, 특히 내항은 주거·상업지역과 인접해 있어 대기오염관련 민원이 지속적으로 발생되고 있는 상황이다.

본 연구에서는 인천항을 대상으로 항만시설에서의 대기오염물질 배출현황을 파악하기 위해 하역장비를 중심으로 배출원 목록을 작성하고, 배출량 산정방법을 검토하였다. 배출량 산정 대상 오염물질은 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 미세먼지(PM_{10}), 이산화황(SO_2)으로 하였으며, 배출량 산정에 필요한 기초자료를 조사하여 인천항 항만시설에서의 2007년도 대기오염물질 배출량을 산정하였다. 특히 항만하역장비의 경우에는 국·내외 배출계수 및 배출량 자료와 비교·검토하였으며, 인천항을 포함한 전국 항만의 배출량을 시범적으로 산정하였다.

2. 항만시설에서의 대기오염물질 배출량 산정방법

항만에서는 선박활동 이외에도 화물을 취급(하역, 선적, 운송, 보관 등)하는 다양한 항만활동이 이뤄지고 있으며, 이 과정에서 대기오염물질을 배출하고 있다. 본 연구에서는 미국 EPA의 보고서(ICF Consulting, 2006) 및 국내 연구자료(조경두와 김정숙, 2009)를 참고하여 선박 이외의 항만시설에 대한 배출원으로

항만하역장비, 차량, 철도기관차로 선정하였으며, 항만활동에 따른 비산먼지를 포함하였다. 항만 내 비산먼지는 현재 배출량 추정이 가능한 하역 및 야적활동, 차량이동에 의한 재비산먼지를 대상으로 하였다. 또한 인천항 항만시설 전반의 배출량 비교를 위해 CAPSS의 선박배출량 자료를 이용하였다.

2.1 항만하역장비

국내 항만하역장비는 전기식을 제외하고 대부분 디젤엔진을 사용하고 있어 비도로 이동오염원과 동일한 방법인 다음의 식(1)을 적용해 배출량을 산정하였다(ICF Consulting, 2006; U.S. EPA, 2004).

$$\text{CHE emissions} = \text{Pop} \times \text{Power} \times \text{LF} \times \text{EF} \times \text{Act} \times \text{CF} \quad (1)$$

여기서, Pop (population)는 하역장비 대수, Power (hp)는 하역장비 엔진의 평균정격출력(engine average rated horsepower), LF는 평균 엔진출력비율(average engine load factor), EF (emission factor, g/hp-hr)는 엔진출력별 배출계수, Act (hr)는 하역장비 가동시간, CF는 배출저감기술 적용 또는 연료전환을 통한 배출저감계수이다.

본 연구에서는 국내 항만하역장비의 종류 및 현황, 미국 EPA의 항만 대기배출량 산정방법론(ICF Consulting, 2006) 등을 참고하여 배출량 산정대상인 항만하역장비를 고무타이어식 갠트리 크레인(rubber tire gantry crane, RTGC), 리치스텍커(reach stacker) 등의 컨테이너 취급장비(container handling equipment, CtHE), 야드 트랙터(yard tractor, Y/T), 지게차(forklift), 크레인(crane), 로우더류(loader), 기중기(excavator), 청소차(sweeper) 등 8종으로 분류하였다. RTGC, CtHE, Y/T는 컨테이너 전용 하역장비이며, 건설기계로 분류되는 지게차, 크레인, 로우더류, 굴삭기는 일반부두에서 하역보조장비로 사용된다. 참고로 항만하역의 주요 장비인 컨테이너 크레인(C/C), 레일식 갠트리 크레인(RMGC), 언로더(U/R), 스택커 리크레이머(S/R) 등은 전기식으로 운영되고 있으며, 도로 트랙터, 탱크로리, 트럭 등은 주로 항만 외부로 화물운송을 담당하는 도로이동오염원이므로 본 연구의 배출목록에서 제외하였다.

2.1.1 항만하역장비 현황 및 제원

항만하역장비의 현황 및 제원은 인천항의 24개 하역업체를 대상으로 2008년에 조사되었으며(환경부, 2009), 상세자료가 없거나 무응답의 경우를 제외하고 입수된 자료의 평균값을 배출량 산정의 입력자료로 적용하였다. 단, 하역장비 대수는 통계자료(한국항만물류협회, 2008)를 기준으로 하였으며, 업체별 조사

Table 1. Characteristics of cargo handling equipments used in the port of Incheon.

Equipment		RTGC	CtHE	Y/T	Forklift	Crane	Loader	Excavator	Sweeper
Total count (2007)		25	30[a)]	31	56	32[b)]	57	52	9
Purchase year	Count	23	29	31	18	11	9	2	9
	Average	1999	2002	2004	1998	1994	1997	1995	2001
	Min	1975	1995	2000	1985	1978	1988	1995	1995
	Max	2006	2007	2007	2006	2007	2003	1995	2007
Engine power (kW)	Count	23	26	15	18	10	9	2	9
	Average	352	218	129	139	287	216	160	138
	Min	131	159	129	59	92	162	99	74
	Max	410	256	129	181	604	235	221	213
Average engine power (hp)		472	292	173	186	385	290	214	185
Annual operating hours (hours/year)	Count	20	23	15	11	8	5	–	8
	Average	3,971	3,112	3,000	1,512	2,269	1,872	2,400[c)]	780[d)]
	Min	350	2,099	3,000	300	1,147	136	–	240[d)]
	Max	4,800	4,210	3,000	2,476	2,928	2,880	–	1,440[d)]

[a)]Reach stacker (R/S)=27, Empty handler (E/H)=2, Top handler (T/H)=1
[b)]Included 5 pieces of harbor crane (H/C)
[c)]Assumption value : 8 hours/day × 300 days/yr=2,400 hours/year
[d)]Daily operation hours (average 3.25 hours) * 6 days/week * 40 weeks/year

자료를 근거로 일부 수정하였다.

2007년도를 기준으로 조사된 디젤엔진을 사용하는 인천항 항만하역장비의 현황 및 제원은 표 1과 같다. 장비대수는 지게차가 가장 많았으며, 평균 엔진 출력은 RTGC가 352 kW로 가장 높고, Y/T가 129 kW로 가장 낮은 것으로 조사되었다. 평균 장비구입년도는 크레인이 가장 오래되었으며, Y/T가 가장 최근에 구입한 것으로 파악된다. 참고로 조사 장비 중 CtHE와 Y/T는 모두 수입장비이며, 나머지는 국산장비와 수입장비가 함께 사용되고 있다.

2.1.2 항만하역장비 배출계수 산출

인천항 항만하역장비의 장비별·오염물질별 배출계수를 산출하기 위해 미국 EPA의 방법론(U.S. EPA, 2004)을 적용하였다. 2005년 이후의 국내 비도로 이동오염원에 대한 배출규제는 미국 Tier 2 규제 수준이며, 인증시험모드인 정상상태 배출계수(EF_{ss})에 과도운전 보정계수(transient adjustment factors: TAF), 열화계수(deterioration factors: DF), PM의 황함량 보정계수(S_{pm}) 등을 적용하여 보정된 배출계수(EF_{adj})를 산출하였다.

Table 2. Emission factors for cargo handling equipment.

Equipment	EF_{adj} (g/kWh)				
	HC	CO	NO_x	PM_{10}	SO_2
RTGC	0.5170	2.9807	6.4076	0.2559	0.0154
CtHE	0.4176	1.0310	5.3758	0.0856	0.0131
Y/T	0.4789	1.8067	5.2288	0.2037	0.0132
Forklift	0.4360	1.5514	5.0992	0.1132	0.0132
Crane	0.2264	1.1699	5.8297	0.0913	0.0131
Loader	0.4386	1.5787	5.1074	0.1313	0.0132
Excavator	0.4411	1.6048	5.1151	0.1486	0.0132
Sweeper	0.4149	1.0118	5.3666	0.0697	0.0131

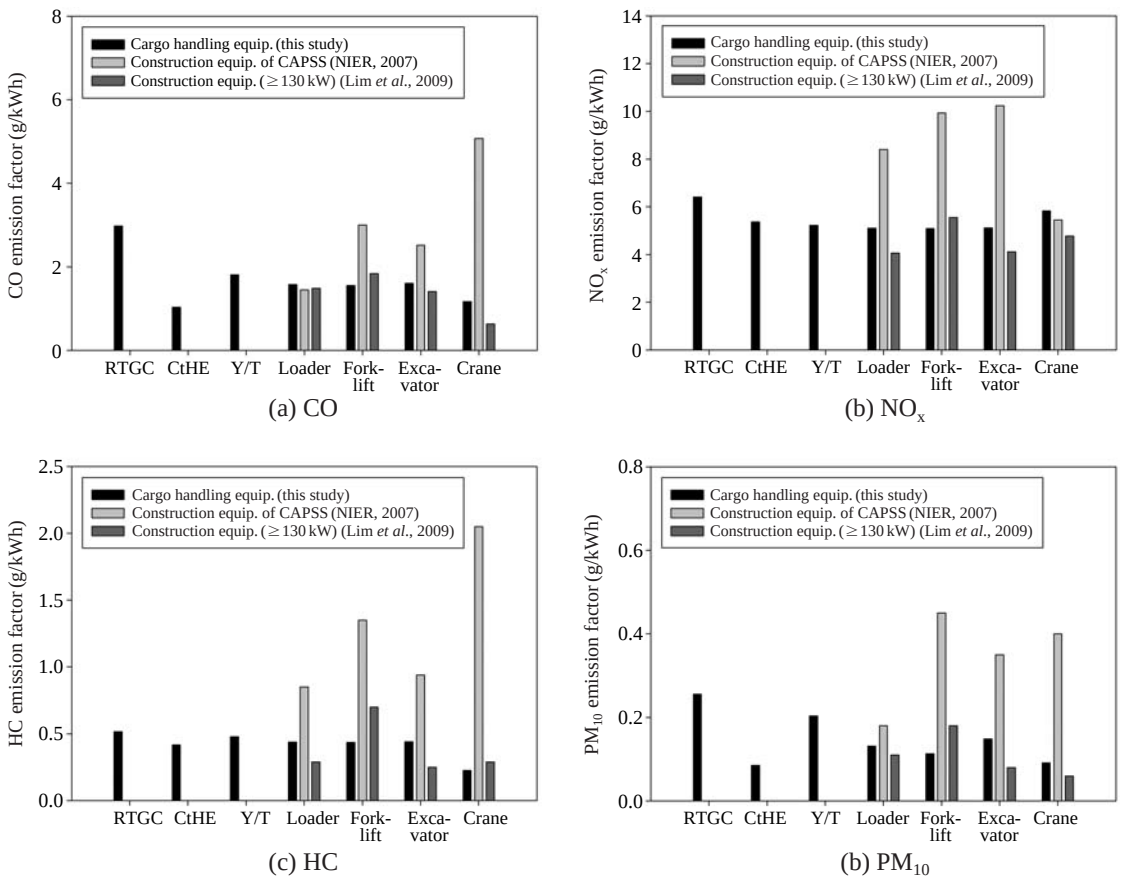

Fig. 1. Comparison of average emission factor (EF_{adj}) by equipments.

출력비율(LF)과 엔진수명(useful life)은 국내자료가 없는 관계로 미국 LA항에서 적용하는 값(Starcrest Consulting Group LCC, 2008)을 사용하였다. 황 함량은 대기환경보전법 시행규칙에 근거해 2006년 이후부터 적용하는 초저황유 기준인 30 ppm을 적용하였다. 인천항 항만하역장비 제원조사 결과, 배출저감기술 등의 적용사례는 없는 것으로 파악되어 배출저감계수(CF)는 적용하지 않았다.

표 2는 본 연구의 인천항 항만하역장비의 제원조사(표 1)를 기초로 산출한 8종의 항만하역장비별 대기오염물질 배출계수 결과이다. 하역장비 중 RTGC의 배출계수가 가장 높은 것으로 나타났는데, 이는 배출계수 산출과정에서 적용한 TAF 값의 영향이 큰 것으로 파악되었다.

그림 1은 본 연구에서 산출한 항만하역장비 배출계수를 국내 비도로 이동오염원의 건설기계 배출계수와 비교하여 나타낸 것이다. 본 연구에서 산출한 로우더, 지게차, 굴삭기, 기중기의 배출계수는 CAPSS 배출계수(국립환경과학원, 2007)보다는 Lim *et al.* (2009)의 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 하역장비별로 살펴보면 Lim *et al.* (2009)에 비해 지게차의 배출계수가 약 8～38% 정도 낮은 반면에 로우더, 굴삭기, 기중기의 배출계수는 기중기의 HC 배출계수를 제외하고 약 5～86% 정도 높은 값을 보였다.

2.1.3 전국 항만하역장비의 대기오염물질 배출량 산정

전국 항만의 하역장비 배출량 현황을 파악하기 위해 인천항 하역장비를 대상으로 산출한 배출계수와 입력자료를 적용하여 항만별 · 하역장비별 대기오염물질 배출량을 시범적으로 산정하였다. 전국 항만의 하역장비 대수는 국내 통계자료(한국컨테이너부두공단 항만운영팀, 2009; 한국항만물류협회, 2008)를 참고하였다. 단, 청소차의 경우는 인천항을 제외하고 관련자료를 입수하기 어려워 인천항만을 대상으로 하였다.

2.2 항만 내 비산먼지

2.2.1 하역 및 야적

항만 내에서 하역 및 야적활동으로 발생하는 비산먼지 배출계수는 식(2)의 미국 EPA AP-42의 실험식(U.S. EPA, 2006a)을 적용하여 산출하였으며, 여기에 활동도인 하역 작업량을 곱하여 배출량을 산정하였다.

$$EF = k\,(0.0016)\,\frac{\left(\frac{U}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1.4}} \quad (2)$$

여기서, EF (kg/Mg)는 하역 및 야적시 발생하는 비산먼지 배출계수, U (m/s)는 평균 풍속, M (%)은 하역 및 야적물질의 수분함량이며, k는 입경에 따른 보정계수(particle size multiplier)로 PM_{10}에 해당하는 0.35를 적용하였다.

인천항에서 취급되는 하역 및 야적물질 중 비산먼지가 발생하고 배출량 산정이 가능한 대상물질로 사료부원료, 광석류, 유연탄(무연탄), 고철, 모래를 선정하였다. 하역 및 야적물질의 연간 작업량은 하역 및 야적 장소를 추정할 수 있는 인천항 항만하역실적자료(한국항만물류협회, 2008)를 기준으로 하였으며, 선내하역과 육상하역 실적을 모두 고려하였다.

평균풍속에는 인천기상대의 2007년 연평균 풍속인 2.6 m/s를 적용하였으며, 사료부원료를 제외한 각 하역 및 야적물질의 수분함량에는 미국 EPA (U.S. EPA, 2006a) 자료를 적용하였다. 사료부원료의 경우에는 본 연구에서 조사한 5종(단백피, 옥배아박, 주정박, 대두박, 팜유박)의 수분함량 평균값인 1.6%를 적용하였다. 인천항에서는 하역 및 야적과정에서 방진막, 호퍼, 살수 등의 방진설비가 일부 적용되고 있으나 구체적인 자료가 미비하여 배출량 산정시 이를 따로 고려하지 않았다.

2.2.2 포장도로 재비산먼지

차량운행으로 포장도로에서 발생하는 비산먼지 배출계수는 식(3)의 미국 EPA AP-42의 산정식(U.S. EPA, 2006b)을 적용하여 산출하였으며, 활동도인 차량의 주행거리(vehicle kilometer traveled: VKT)를 곱하여 배출량을 산정하였다.

$$EF = k \times \left(\frac{sL}{2}\right)^{0.65} \times \left(\frac{W}{3}\right)^{1.5} - C \quad (3)$$

여기서, EF (g/VKT)는 포장도로 재비산먼지 배출계수, sL (g/m^2)은 도로의 먼지부하량(silt loading), W (short-ton)는 통행차량의 평균무게, C (g/VKT)는 배출계수 보정인자이다.

인천항의 포장도로 재비산먼지 배출량은 활동도 및 입력자료 산출이 가능한 인천항 내항만을 대상으

로 하였다. 배출계수 산출을 위해 본 연구에서는 이동먼지측정시스템(Han *et al*., 2007)을 이용하여 2008년 7월과 10월에 인천항 내항도로에서 먼지부하량을 측정하였으며, 측정 평균값인 0.83 g/m^{2}을 적용하였다. 또한 통행차량 평균무게는 내항 출입차량의 구성비 및 차종별 평균무게를 이용하여 추정하였으며, 10.0 short-ton을 적용하였다.

활동도인 연간 주행거리는 인천항 내항의 도로연장을 조사하여 추정한 일일 주행거리 2.4 km에 연간 출입차량 대수를 곱하여 계산하였다. 또한 배출량 산정시 강수와 도로청소에 의한 저감효과를 모두 적용하였는데, 도로청소에 의한 재비산먼지(PM_{10})의 저감효과는 내항 내 도로면적의 1/2이 진공흡입차와 살수차에 의해 청소되는 것으로 가정하여 20%(국립환경과학원, 2008)를 적용하였다.

2. 3 차량

인천항의 차량에 의한 대기오염물질 배출량은 활동도 및 배출계수 산출이 가능한 인천항 내항만을 대상으로 하였으며, 인천항만보안주식회사에서 제공한 차종별 출입차량대수 자료를 근거로 추정하였다(조경두와 김정숙, 2009). CO, HC, NO_x, PM의 배출계수에는 국내 이동오염원의 차종별·연료별 배출계수 식(국립환경과학원, 2007)을 이용하였고, SO_2 배출량 산정의 경우 유럽의 연료소비계수(EEA, 2007)를 이용하였다. 차량속도는 인천항 내의 제한속도인 40 km/h를 적용하였으며, 황 함량은 경유, 휘발유, LPG의 기준치인 30, 50, 100 ppm을 각각 적용하였다.

인천항을 출입하는 차량은 화물차, 승용차, 기타 차량으로만 분류되고 있으며, 화물차의 대부분은 컨테이너 차량이고 기타 차량의 90% 이상은 소형화물차량이다. 배출계수 적용을 위해 화물차의 경우 적재중량 5톤 이상(총 중량 10톤 이상)의 대형화물차, 승용차의 경우 중대형 승용차와 소형승합차, 기타의 경우 적재중량 1톤 이하(총 중량 3톤 이하)인 소형화물차로 가정하였다. 또한 연료별·연식별 차종구분을 위해 인천시 등록 차량의 통계자료를 이용하여 그 비율을 적용하였다. 활동도인 주행거리는 포장도로 재비산먼지 배출량 산정시 적용한 일일주행거리 2.4 km를 동일하게 적용하였다. 그러나 이러한 차종구분에 대한 가정은 제한된 통계자료에 기초해 개략적인 차량 배출량을 추정하기 위한 과정으로 자료해석 시 이점을 유의할 필요가 있다.

2. 4 철도기관차

인천항의 경우 남항 석탄부두에서 하역하는 석탄을 디젤기관차로 인천항을 경유하여 인천역까지 운반하고 있다. 본 연구에서는 철도기관차에 대한 배출량을 산정하기 위해 최근 연구자료(조경두와 김정숙, 2009)의 방법론을 참고하였으며, 미국 EPA의 연료소비계수와 배출계수를 곱하여 산출한 평균 배출율 자료(U.S. EPA, 1998)를 이용하였다. 인천항에서 석탄 입환을 수행하는 기관차는 4400호대로 견인마력은 1,500 hp에 해당하며, 최고속도는 105 km/h이고 평균 속도는 30~40 km/h로 운행되고 있다. 따라서 2,000 hp 미만의 저속, 단거리 화물수송에 사용되는 단거리 모드(switch mode, Tier 0)에 대한 평균 배출율을 적용하였다(Park and Kim, 2004). SO_2 배출량 산정에는 유럽의 기관차 연료소비계수(EEA, 2007)인 254 g/kWh를 이용하였으며, 황 함량은 하역장비와 동일한 30 ppm을 적용하였다.

인천항의 디젤기관차는 인천역에서 석탄부두까지 왕복 2시간씩 일요일과 공휴일을 제외하고 매일 3회 운행되고 있으며, 강우가 많은 날에는 운행을 중지한다. 본 연구에서는 강수량 50 mm 이상인 날을 운행중지일로 가정하고, 디젤기관차의 활동도인 연간운행시간을 추정하여 배출량 산정시 이를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 항만하역장비

인천항의 2007년 항만하역장비 8종의 대기오염물질 배출량 산정결과, HC, CO, NO_x, PM_{10}, SO_2의 배출량은 각각 29.4톤, 120.5톤, 382.0톤, 10.4톤, 0.9톤으로 계산되었으며(표 3), 하역장비별 배출량 구성비를 그림 2에 나타내었다. 모든 대기오염물질 배출량에 대해서 RTGC가 약 25~37%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 그 다음으로 로우더 배출량이 높은 것으로 나타났다. RTGC, CtHE, Y/T가 컨테이너 부두에서 사용되고, 나머지 하역장비가 일반 부두에서 사용된다고 간주할 경우에 오염물질에 따라 다소 차이는 있지만 인천항의 컨테이너 부두와 일반 부두에서의 항만하역장비 배출량은 거의 같은 수준인 것으

Table 3. Cargo handling equipment emissions by equipment type in the port of Incheon.

Equipment	2007 Emissions (ton/year)				
	HC	CO	NO_x	PM_{10}	SO_2
RTGC	7.77	44.80	96.31	3.85	0.23
CtHE	5.01	12.37	64.50	1.03	0.16
Y/T	2.24	8.46	24.48	0.95	0.06
Forklift	1.54	5.47	17.97	0.40	0.05
Crane	2.03	10.49	52.28	0.82	0.12
Loader	5.57	20.04	64.84	1.67	0.17
Excavator	5.01	18.22	58.09	1.69	0.15
Sweeper	0.27	0.67	3.54	0.05	0.01
Total	29.4	120.5	382.0	10.4	0.9

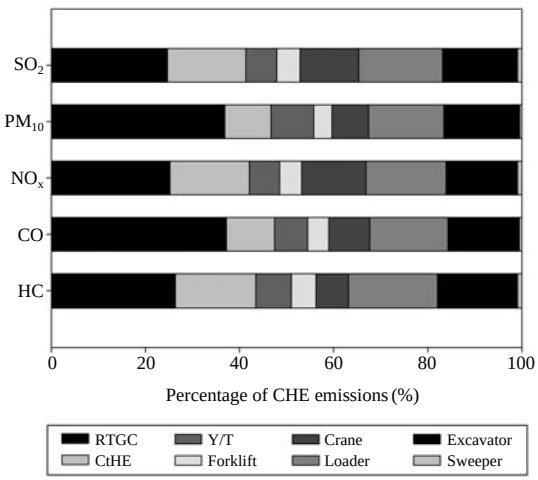

Fig. 2. Percentage of cargo handling equipment emissions by equipment type in the port of Incheon.

로 파악된다. 인천항 항만하역장비의 HC, CO, NO_x, PM_{10} 배출량은 인천시 건설기계에 대한 2007년 CAPSS 배출량의 약 2.5～4.0% 수준이다.

표 4는 전국 항만에 대한 항만하역장비의 대기오염물질 배출량을 시범적으로 산출한 결과이며, 그림 3은 전국 항만의 하역장비별 배출량 구성비를 나타낸 것이다. 참고로 인천항의 청소차 배출량은 다른 항만과의 비교를 위해 제외하였다. 전국 항만하역장비 배출량 중 부산항에서의 배출량이 약 53～58%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 다음으로 인천항에서의 배출량이 약 11～13%를 차지하고 있다. 하역장비별로는 RTGC가 약 38～51%로 가장 큰 비중을

Table 4. Air pollutant emissions of cargo handling equipment (CHE) in Korea's ports.

Port	2007 Emissions (ton/year)				
	HC	CO	NO_x	PM_{10}	SO_2
Busan	120.7	561.9	1,486.9	50.8	3.6
Incheon	29.2	119.9	378.5	10.4	0.9
Yeosu/ Gwangyang	27.0	126.3	326.2	11.5	0.8
Ulsan	11.2	42.1	156.3	3.6	0.4
Mokpo	6.2	24.3	97.8	2.0	0.2
Masan	6.5	24.5	95.8	1.9	0.2
Pyeongtaek/ Dangjin	6.5	28.0	81.9	2.5	0.2
Pohang	4.0	17.6	75.2	1.4	0.2
Gunsan	4.7	17.5	64.2	1.4	0.2
Donghae	2.5	10.3	33.5	0.9	0.1
Jeju	1.8	7.2	28.7	0.6	0.1
Total	220.2	979.6	2,825.0	86.9	6.9

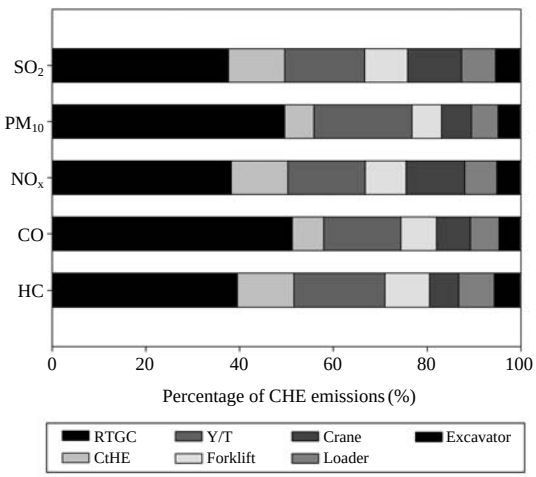

Fig. 3. Percentage of cargo handling equipment emissions by equipment type in Korea's ports.

차지하고 있으며, 다음으로는 인천항과는 달리 Y/T가 약 16～21%의 기여를 보이고 있다. 전국적으로 컨테이너 부두와 일반 부두로 구분하여 살펴보면 컨테이너 부두에서의 하역장비 배출량이 약 70%를 차지하는 것으로 파악된다.

표 5는 인천항 하역장비 배출량 산정 결과를 미국의 LA항과 LB항의 하역장비 배출량(Starcrest Consulting Group LLC, 2009, 2008)과 비교하여 나타낸 것이다. 미국의 LA항과 LB항의 경우 인천항보다 하

Table 5. Comparison between the port of Incheon and the U.S. ports for CHE emissions.

	Count of CHE	Emissions (ton/year)				
		HC	CO	NO_x	PM_{10}	SO_2
Port of Incheon (2007)	292	29	121	382	10	0.9
Port of Los Angeles (2007)	2,014	81	919	1,662	46	2.0
Port of Long Beach (2007)	1,457	46	334	1,339	39	1.4

역장비 대수가 약 5～7배가 많았으며, 그 중에서 Y/T와 지게차 대수가 크게 많은 편이다. 대기오염물질별 배출량은 인천항에 비해 LA항의 CO를 제외하고 약 2～4배 높은 수준으로 장비대수에 비해 차이가 크지 않았다. 이는 미국의 경우 초저황유, 유화연료, 도로엔진 장착, 디젤산화촉매장치 (DOC) 장착 등의 배출저감기술이 많은 하역장비에 적용되고 있기 때문인 것으로 파악된다. 최근 국내에서도 에너지 절감 및 환경개선을 위해 디젤구동식 RTGC를 전기식 (e-RTGC)으로 전환하는 노력을 진행하고 있어 하역장비에서의 배출량 저감이 예상된다.

3. 2 비산먼지

3.2.1 하역 및 야적

인천항의 2007년도 하역실적은 선내하역 기준으로 부산항, 울산항 다음으로 많은 107,120천 톤 규모이며, 지속적인 증가추세에 있다 (한국항만물류협회, 2008). 이중 약 52%가 컨테이너 화물이며, 본 연구에서 선정한 대상물질들의 하역실적은 약 18%를 차지하고 있다.

인천항의 야적 및 하역시 비산먼지 (PM_{10}) 배출량은 약 10톤 정도로 추정되었으며, 사료부원료 (40.8%), 고철 (22.9%), 유연탄 (21.2%), 모래 (11.2%), 광석류 (3.4%), 무연탄 (0.4%)의 순으로 나타났다. 현재 인천항에서는 하역 및 야적과정에서 비산먼지를 저감하기 위한 여러 방지대책들이 시행되고 있는데, 추후 이에 대한 기초자료를 마련하여 배출량 산정시 반영할 필요가 있다.

3.2.2 도로재비산먼지

인천항에서는 화물운송을 위한 대형화물차량의 통행이 많아 주변 대기질에 재비산먼지에 의한 영향이 클 것으로 예상된다. 또한 내항도로의 먼지부하량은 서울과 인천의 포장도로 평균값 (국립환경과학원, 2008)인 0.077 g/m^{2}의 약 11배 수준이다. 본 연구에서 인천항 내항을 대상으로 개략적으로 산정한 도로재비산먼지 (PM_{10})의 배출계수는 14.525 g/VKT이었으며, 배출량은 약 119톤으로 추정되었다. 그러나 입력자료 중 내항 내 먼지부하량은 특정 기간에 측정된 자료이며, 주행거리 및 청소효과 등은 가정을 통해 추정된 것으로 배출량 산정결과의 불확도가 높을 것으로 사료된다. 향후 외항 등을 포함한 인천항 주변의 도로재비산먼지 대책을 위해 도로재비산먼지 측정 및 배출량 자료의 보완이 요구된다.

Table 6. Exhaust emissions from travel vehicles in the inner port of Incheon.

	Emissions (kg/year)				
	HC	CO	NO_x	PM_{10}	SO_2
Heavy trucks	6,173	25,852	77,588	4,006	4,976
Passenger cars	280	3,292	1,611	163	1,164
Others (light trucks)	122	833	884	94	359
Total	6,575	29,976	80,083	4,263	6,500

3. 3 차량

2007년도 인천항 내항의 출입차량은 대형화물차가 약 56%, 승용차가 약 31%, 기타차량 (소형화물차 등)이 약 13%의 구성비를 보이고 있다. 이를 근거로 추정한 내항 내 차량에서의 배출량은 표 6과 같으며, 오염물질별로 대형화물차의 배출량 기여가 약 77～97%를 차지하고 있다. 미국의 LA항과 LB항의 경우 항만을 출입하는 대형화물차의 배출량을 산정하기 위해 항만 내·외부를 포함한 항만권역 내에 있는 도로를 대상으로 하고 있으며, 디젤분진을 저감하기 위한 다양한 정책을 시행하고 있다. 본 연구에서는 개략적 수준에서 인천항 내항만을 대상으로 차량 배출량을 산정하였다. 그러나 항만을 출입하는 대형화물차의 주변 대기질에 대한 영향을 평가하기 위해서는 배출량 산정범위를 항만 외부를 포함한 항만권역으로 확대할 필요가 있는 것으로 사료된다.

3. 4 철도기관차

인천항을 출입하는 철도기관차를 대상으로 산정한 2007년도 HC, CO, NO_x, PM_{10}, SO_2의 배출량은 각각 약 2.7톤, 4.9톤, 46.2톤, 1.2톤, 0.03톤으로 산정되었다. 본 연구에서 산정한 배출량은 SO_2를 제외하고 연료소비량 기준으로 산정한 CAPSS 배출량에 비해 약 1.5～5.8배 높은 것으로 나타났다. SO_2의 경우에는 자동차 연료 기준인 30 ppm을 적용한 것으로 CAPSS 배출량의 약 15% 수준으로 낮게 산정되었다.

3. 5 2007년도 인천항의 대기오염물질 배출량

본 연구에서 적용한 방법론과 입력자료를 이용하

Table 7. 2007 total port-related emissions by source category in the port of Incheon.

Source		Emissions (ton/year)				
		HC	CO	NO_x	PM_{10}	SO_2
Cargo handling equipment		29.4	120.5	382.0	10.4	0.9
Vehicle (inner port)		6.6	30.0	80.1	4.3	6.5
Locomotive (port-related)		2.7	4.9	46.2	1.2	0.03
Fugitive dust	Cargo handling and storage				10.0	
	Resuspended dust (inner port)				119.5	
Vessel		190.0	483.0	4,352.2	162.0	3,987.5
Total		228.7	638.4	4,860.5	307.4	3,995.0

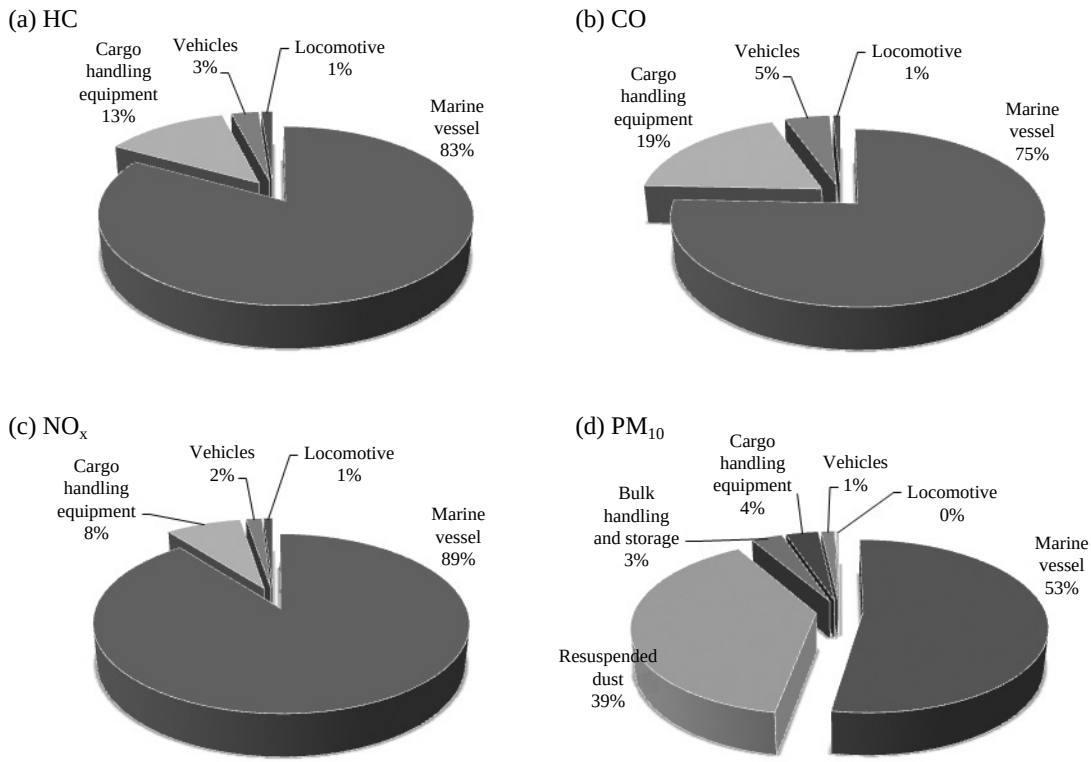

Fig. 4. Distribution of port-related emissions by source category.

여 인천항 항만시설에서의 2007년 대기오염물질 배출량을 추정한 결과를 종합하면 표 7과 같다. 여기서 선박 배출량은 CAPSS 자료를 이용하였으며, 이를 포함한 인천항 배출목록의 전체 배출량은 HC 229톤, CO 638톤, NO_x 4,861톤, PM_{10} 307톤, SO_2 3,995톤으로 산정되었다.

인천항에서 발생하는 대기오염물질 배출량을 CAPSS 자료인 비산먼지를 제외한 인천시 대기오염물질 총 배출량과 비교하여 살펴보면, 인천항의 HC와 CO 배출량은 인천시 배출량의 각각 0.4, 1.1% 수준이며, NO_x, PM_{10}, SO_2 배출량은 각각 7.5, 12.5, 23.0%에 해당된다. PM_{10}의 경우 인천항 비산먼지를 제외하면 인천시 전체 미세먼지 배출량의 약 7.2%에 해당된다.

그림 4는 인천항의 HC, CO, NO_x, PM_{10} 배출량에 대한 배출원 구성비를 나타낸 것이다. HC, CO, NO_x 배출량에 대한 기여는 선박, 하역장비, 차량, 기관차 순으로 높았으며, PM_{10} 배출량은 선박이 52.7%, 도로재비산먼지가 38.9%, 하역장비가 3.4%, 하역 및 야적이 3.3%, 차량이 1.4%, 기관차가 0.4%로 나타났다. SO_2의 경우에는 선박에 의한 기여가 99% 이상인 것으로 나타났는데, 이는 차량과 하역장비의 연료에 대해 초저황유 기준을 적용했기 때문인 것으로 파악된다.

본 연구의 인천항 항만시설에서의 대기오염물질 배출량 산정결과는 현재까지 파악가능한 배출원별 기초자료 및 활동도를 토대로 작성된 것으로 다음과 같이 추후 보완·개선될 사항들이 있다. 우선 해상과 육상배출원을 포함하고 배후시설이 있는 항만의 특수성을 고려할 때 선박과 차량 등의 배출량 산정대상인 공간적 범위는 보다 명확히 규정될 필요가 있다. 그리고 국내 항만하역장비의 경우 배출량 산정을 위한 입력자료의 수집 및 파악이 어렵기 때문에 이에 대한 체계적인 자료 구축 및 관리가 요구된다. 그 외에도 항만 출입차량의 세부적인 교통량 자료, 항만활동에 의한 비산먼지 발생 현황 및 방지효율 자료 등이 보완될 필요가 있다. 추가적으로 지구온난화 및 기후변화 관련해서 미국의 LA항과 LB항의 사례와 같이 항만에서의 온실가스 배출량 자료가 구축될 필요가 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 하역장비를 중심으로 항만시설에서의 대기오염물질 배출량 산정방법을 검토하였으며, 인천항을 대상으로 2007년도 HC, CO, NO_x, PM_{10}, SO_2 등의 대기오염물질 배출량을 산정하였다. 배출원으로 항만하역장비, 비산먼지, 차량, 철도기관차를 대상으로 하였으며, 선박의 경우 CAPSS 배출량을 이용하였다.

인천항 항만하역장비의 배출량 산정결과, HC, CO, NO_x, PM_{10}, SO_2의 2007년 배출량은 각각 약 29.4톤, 120.5톤, 382.0톤, 10.4톤, 0.9톤으로 계산되었으며, 장비별로는 RTGC의 배출량이 약 25～37%로 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 전국 항만의 하역장비 배출량을 비교하면, 하역장비 대수가 가장 많은 부산항에서의 배출량이 각 물질별로 약 53～58%를 차지하고 있으며, 다음으로 인천항에서의 배출량이 약 11～13%를 차지하고 있다. 한편 국내의 주요 항만하역장비는 배출저감기술을 적용하고 있지 않아 미국의 LA항과 LB항과 비교할 때, 장비대수에 비해 배출량이 높게 나타난 것으로 분석된다.

선박을 포함한 인천항 전체 항만시설에서의 HC, CO, NO_x, PM_{10}, SO_2의 배출량은 각각 약 229톤, 638톤, 4,861톤, 3,995톤, 307톤으로 산정되었으며, 이는 비산먼지를 제외한 인천시 CAPSS 배출량에 대해 각각 0.4, 1.1, 7.5, 12.5, 23.0%에 해당되는 수준이다. 즉, 항만에서의 SO_2, PM_{10}, NO_x 배출이 인천시 대기환경에 상당한 기여를 하는 것으로 파악된다. 배출원별로는 선박 배출량이 모든 대기오염물질에 대해 53～99%로 가장 높은 기여를 보였으며, HC, CO, NO_x의 경우 항만하역장비가 약 8～13%, PM_{10}의 경우는 도로재비산먼지가 39%로 선박 다음으로 인천항 배출량에 기여하는 것으로 나타났다.

이상의 인천항을 대상으로 한 항만시설에서의 대기오염물질 배출량 산정자료는 항만지역의 대기환경을 관리하고 저감대책을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 사료되며, 추후 보다 신뢰성 있는 배출량 산정을 위한 기초자료의 보완·개선이 요구된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 “인천지역 항만시설, 선박, 항

공기, 공항시설에서의 배출량 산정과 영향분석 및 저감대책 마련 연구"와 "폐기물 에너지화 · 자원화 전문인력 양성사업"의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

국립환경과학원 (2007) 대기오염물질 배출량 산정방법 편람.

국립환경과학원 (2008) 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산 먼지 실시간 측정방법 개발 II.

김은수 (2008) LA/LB항의 친환경 항만물류정책 동향과 시사점 (SPBP-CAAP 중심으로), 해양수산동향, 한국해양수산개발원, 1273, 1-10.

정혜원 (2004) 주요국의 항만 대기오염 규제 동향과 시사점, 해양수산동향, 한국해양수산개발원, 1150, 1-9.

조경두 (2000) 항만대기오염관리를 위한 기초연구, 인천발전연구원.

조경두, 김정숙 (2009) 인천항 대기환경 현황분석 및 관리방안, 인천발전연구원.

한국컨테이너부두공단 항만운영팀 (2009) 2008년 전국항 컨테이너화물 유통추이 및 분석.

한국항만물류협회 (2008) 항만하역요람 (2007년도).

환경부 (2009) 인천지역 항만시설, 선박, 항공기, 공항시설에서의 배출량 산정과 영향분석 및 저감대책 마련 연구.

Alastuey, A., N. Moreno, X. Querol, M. Viana, B. Artíñano, J.A. Luaces, J. Basora, and A. Guerra (2007) Contribution of harbour activities to levels of particulate matter in a harbour area: HADA Project-Tarragona Spain, Atmospheric Environment, 41, 6366-6378.

Artíñano, B., F.J. Gómez-Moreno, M. Pujadas, N. Moreno, A. Alastuey, X. Querol, F. Martín, A. Guerra, J.A. Luaces, and J. Basora (2007) Measurement of particulate concentrations produced during bulk material handling at the Tarragona Harbor, Atmospheric Environment, 41, 6344-6355.

Bailey, D. and G. Solomon (2004) Pollution prevention at ports: clearing the air, Environmental Impact Assessment Review, 24, 749-774.

Bailey, D., T. Plenys, G.M. Solomon, T.R. Campbell, J. Masters, and B. Tonkonogy (2004) Harboring pollution: Strategies to clean up U.S. ports, Natural Resources Defence Council.

Bong, C. and H. Lee (2007) A development of air pollution management system from marine vessels at port area, Proceeding of the 45th Meeting of KOSAE, Korean Society for Atmospheric Environment, 111-112. (in Korean)

Cho, D.O. (2010) A comparative study on low-carbon port management of Busan and LA/LB-On the basis of port management cost, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 16, 223-228. (in Korean with English abstract)

EEA (2007) EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook -2007, European Environment Agency.

Han, S., K.H. Won, K.W. Jang, Y.M. Son, J.S. Kim, J.H. Hong, and Y.W. Jung (2007) Development and application of real-time measurement system of silt loading for estimating the emission factor of resuspended dust from paved road, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 23, 596-611. (in Korean with English abstract)

ICF Consulting (2006) Current methodologies and best practices in preparing port emission inventories, final report, prepared for U.S. Environmental Protection Agency.

ICF International (2009) Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories, prepared for U.S. Environmental Protection Agency.

Lee, H.W., Y.K. Kim, G.M. Won, and I.S. Cho (1999) An emission estimation of pollutants including ship sources in the Pusan metropolitan area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 15, 587-598. (in Korean with English abstract)

Lim, J.H., S.W. Jung, T.W. Lee, J.C. Kim, C.Y. Seo, J.H. Ryu, J.W. Hwang, S.M. Kim, and D.S. Eom (2009) A study on calculation of air pollutants emission factors for construction equipment, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25, 188-195. (in Korean with English abstract)

Park, D.S. and D.S. Kim (2004) Development of estimation methods of pollutant emissions from railroad diesel rolling stocks, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 20, 539-553. (in Korean with English abstract)

Song, G.E. and C.H. Han (2007) A study on the strategies for the reduction of port pollution, Journal of Korea Port Economic Association, 23, 95-113. (in Korean with English abstract)

Song, J.H., R. Pokhrel, H. Lee, and C. Bong (2009) Study on the analysis of coastal air emission from on-going marine vessels, Proceeding of the 48th meeting of KOSAE, Korean Society for Atmospheric Environment, 122-123. (in Korean)

Starcrest Consulting Group LLC (2008) Port of Los Angeles

inventory of air emissions for calendar year 2007, prepared for the port of Los Angeles.

Starcrest Consulting Group LLC (2009) Port of Long Beach air emissions inventory-2007, prepared for the port of Long Beach.

U.S. EPA (1998) Emission standards for locomotives and locomotive engines: Final rule, within 40 CFR Parts 85, 89 and 92.

U.S. EPA (2004) Exhaust and crankcase emission factors for nonroad engine modeling: Compression-ignition, EPA 420-P-04-009, NR-009C.

U.S. EPA (2006a) Compilation of air pollutant emission factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 13, Section 13.2.4 Aggregate Handling And Storage Piles.

U.S. EPA (2006b) Compilation of air pollutant emission factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 13, Section 13.2.1 Paved Roads.

Wu, J., D. Houston, F. Lurmann, P. Ong, and A. Winer (2007) Exposure of $PM_{2.5}$ and EC from diesel and gasoline vehicles in communities near the ports of Los Angeles and Long Beach, California, Atmospheric Environment, 43, 1962-1971.