

인천항의 선박오염원에서 배출된 대기오염물질의 확산

김광호* · 권병혁**† · 김민성*** · 이돈출****

*, *** 부경대학교 지구과학연구소, ** 부경대학교 환경대기과학과, **** 목포해양대학교 기관시스템공학부

Dispersion of Air Pollutants from Ship Based Sources in Incheon Port

Kwang-Ho Kim* · Byung Hyuk Kwon**† · Min-Seong Kim*** · Don-Chool Lee****

*, *** Geo-Sciences Institute, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

** Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

**** Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 선박의 오염물질 배출에 대한 규제는 최근 IMO/MEPC(국제해사기구/해양환경보호위원회)를 통해서 진행 중이다. 선박오염원에서 배출된 오염물질은 국지적인 요인에 의해서 연안지역을 비롯하여 육지로 확산될 수 있다. 인천과 같이 선박 배출 오염물질에 노출되어 있는 항구 도시에서 선박오염원 조절은 연안지역의 대기질 관리정책을 효율적으로 고안하기 위해서 반드시 필요하다. 연안지역의 대기오염물질 중 선박에 의한 NO_x와 SO_x의 농도는 전체 NO_x와 SO_x 농도의 각각 14%와 10%를 차지한다(NIER, 2008). 연안도시지역의 대기질은 국지적인 순환에 의존하는 오염물질의 확산 경향과 선박의 수에 영향을 받는다. 선박오염원으로부터 배출된 오염물질의 확산을 WRF(Weather Research and Forecasting model)의 기상장을 기초로 CALPUFF(California Puff model)를 사용하여 분석하였다. 그리고 연안도시지역의 대기확산모델은 정박한 선박과 임·출항하는 선박으로 나누어 각각 점오염원과 선오염원으로 구분하여 모의하였다. 선박척수 82~84척을 기준으로 NO_x의 총 평균 배출량은 입·출항시 각각 6.2 g/s, 6.8 g/s이었고, SO_x의 총 평균 배출량은 입·출항시 각각 3.6 g/s, 5.1 g/s이었다. 정박 중인 선박의 NO_x와 SO_x에 대한 총 평균 배출량은 각각 0.77 g/s, 1.93 g/s이었다. 육풍의 영향으로 인하여 인천항으로부터 내륙으로 진행되는 오염물질의 수송이 억제되었고, 내륙의 SO_x와 NO_x 농도가 일시적으로 감소하는 원인이 되었다. 해풍에 의해 NO_x와 SO_x가 내륙으로 확산되었고, 내륙의 NO_x와 SO_x의 농도가 점차 증가하였다. 인천항과 인접한 지역의 오염물질의 농도는 해륙풍의 영향보다 인천항에 정박 중인 선박오염원에 의한 영향이 더욱 크게 반영되었다. 본 연구는 연안도시지역의 대기질 정책고안과 배출기준을 정하는 것에 유용할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 선박오염원, WRF, CALPUFF, 확산모델, 연안도시지역

Abstract : Emissions of pollutants from ship-based sources are controlled by the International Maritime Organization (IMO). Since pollutants emitted from ship may be dispersed to the land, controlling emissions from ships is necessary for efficient air quality management in Incheon, where exposure to ship-based pollution is frequent. It has been noted that the ratios of air pollutant emissions from coastal areas to inland areas are about 14% for NO_x and 10% for SO_x. The air quality of coastal urban areas is influenced by the number of ships present and the dispersion pattern of the pollutants released depending on the local circulation system. In this study, the dispersion of pollutants from ship-based sources was analyzed using the numerical California Puff Model (CALPUFF) based on a meteorological field established using the Weather Research and Forecasting Model (WRF). Air pollutant dispersion modeling around coastal urban regions such as Incheon should consider point and line sources emitted from both anchored and running ships, respectively. The total average NO_x emissions from 82-84 ships were 6.2 g/s and 6.8 g/s, entering and leaving, respectively. The total average SO_x emissions from 82-84 ships, entering and leaving, were 3.6 g/s and 5.1 g/s, respectively. The total average emissions for NO_x and SO_x from anchored ships were 0.77 g/s and 1.93 g/s, respectively. Due to the influence of breezes from over land, the transport of pollutants from Incheon Port to inland areas was suppressed, and the concentration of NO_x and SO_x inland were temporarily reduced. NO_x and SO_x were diffused inland by the sea breeze, and the concentration of NO_x and SO_x gradually increased inland. The concentration of pollutants in the area adjacent to Incheon Port was more influenced by anchored ship in the port than sea breezes. We expect this study to be useful for setting emission standards and devising air quality policies in coastal urban regions.

Key Words : Ship's source, WRF, CALPUFF, Dispersion model, Coastal urban area

* First Author : goodss777@naver.com, 051-629-6644

† Corresponding Author : bhkwon@pknu.ac.kr, 051-629-6644

1. 서론

산업혁명 이후 급속한 경제성장은 수많은 환경문제를 일으켰다. 경제발전과 더불어 공장과 같은 먼·점오염원과 운송차량과 같은 선오염원의 증가는 육상의 환경문제를 일으키는 주요 원인으로 작용하였다. 한편 전 세계적인 산업발전에 의한 무역량의 증가에 따라 해상의 선박 수요와 규모는 크게 증가하게 된다. 동시에 선박에 의한 환경오염문제도 점차 부각되었다. 화석연료의 연소에 의해 선박에서 발생하는 이산화탄소(CO₂)는 지구 온난화를 유발하는 주요 물질이고, 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx)은 대기질을 악화시키는 주요 물질로써 이에 대한 환경문제의 대책이 시급한 실정이다. 최근 지구온난화와 더불어 대기오염물질 배출문제가 전 지구적으로 중대한 현안으로 등장하고 있는 가운데 날로 심각해지고 있는 해상 선박의 배출오염문제의 관심도 더욱 확대되고 있다. IMO/MEPC(국제해사기구/해양환경보호위원회)는 1997년 9월 26일 MEPC37차 회의에서 MARPOL 부속서 6 [선박으로부터의 대기 오염 방지를 위한 규칙]을 제정·채택하였고, 2005년 5월 19일에 발효되었다. 이 규칙에서 질소산화물 배출과 연료 중 황함량 등에 대한 규제 기준을 마련하였고 향후 5년마다 규제 기준을 강화하는 등의 논의를 계속하고 있다.

우리나라는 급격한 산업 발전에 따른 수출, 수입의 증가로 항만과 무역 산업이 크게 발전하였고, 전국의 항만에 입·출항하는 선박의 수는 최근 수 년 사이에 급격하게 증가하였다. Kawamura(1985)는 연안 도시에서 오염물질의 분포는 해풍과 같은 국지풍에 의해 복잡한 양상을 띤다고 하였다. Lee et al.(1997)은 해륙풍의 순환과 같은 국지풍의 영향으로 연안지역 선박으로부터 발생한 대기오염물질이 내륙지역으로 수송된다고 하였다. 연안지역은 복잡한 지형과 더불어 바다와 인접해 있는 지리적 특성 때문에 국지적인 기상현상에 대한 영향을 크게 받는다. 연안지역의 대표적인 국지적 기상현상 중 하나인 해륙풍 순환은 오염물질을 연안에서 내륙으로 무려 20 km~60 km까지 넓게 수송시킬 수 있다(Cheng, 2002). 해풍이 발생할 때는 기압경도가 완만하여 대기가 안정하고 역전층 고도가 낮으며, 약한 풍속과 낮은 혼합고로 인해 대기의 확산 능력이 저하된다(Mantis et al., 1992). 특히, 해풍전선이 존재하는 경우에는 대기의 수렴과 연직 혼합이 활발하게 발생하기 때문에 대기오염농도가 급격하게 상승하는 현상이 나타난다(Lalas et al., 1983). 따라서 연안지역에서 대기오염물질의 수송을 고려하는데 있어 국지적으로 형성되는 기상현상과 해륙풍의 영향에 대한 연구는 매우 중요하다(Rhomb et al., 2003).

우리나라의 연안지역에 위치한 도시는 해륙풍과 같은 국지적 영향에 의하여 내륙지역에 비하여 최근 급격히 증가된 선박에 의해 배출된 오염물질의 영향을 더욱 크게 받게 될 것이다. 즉, 선박의 대기오염물질 배출에 대한 영향 평가와 더불어 정량적인 규제가 필요하다. 최근 세계적으로 IMO/MEPC를 통해서 선박의 오염물질 배출에 대한 규제가 진행 중이다. 그러나 현재 우리나라는 이에 대한 연구가 부족한 실정이므로 선박의 오염물질 배출에 대한 환경문제의 개선과 더불어 국제적인 오염물질 배출의 규제 기준에 따른 적극적인 대응을 위해서라도 전문적인 조사 및 연구를 진행하여야 한다.

본 연구에서는 선박엔진출력에 따른 배출량 산정을 통하여 선박오염원으로부터 오염물질의 확산이 연안도시지역에 미치는 영향을 분석하였다. 선박오염원의 배출량은 정박한 배와 입·출항하는 배로 나누어 각각 점오염원과 선오염원으로 구분하여 산출된다. 항구를 포함한 연안도시지역의 기상장은 AWS(Automatic Weather System)의 지상기상 관측자료와 WRF(Weather Research and Forecasting model)로부터 추출한 기상장을 CALMET(a diagnostic 3-dimensional meteorological model)에 적용하여 새롭게 구축하였다. 그리고 오염원의 정보와 CALMET에 의해 구축된 기상장을 공기질 확산모델인 CALPUFF(An air quality dispersion model)에 적용하여 오염물질의 농도장을 모의하였다. 최종적으로 모의된 농도장의 변화를 통하여 연안도시지역에 오염물질이 미치는 영향을 평가하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구는 연안지역의 오염물질 확산을 분석하기 위하여 인천항과 인천시를 포함한 131 km×131 km의 분석 영역을 Fig. 1과 같이 설정하였다. 인천항의 경계를 인천항 내의 주요 접안부두에서 약 80 km로 설정하였고, 선박오염원은 정박한 배와 입·출항하는 배로 나누어 확산 평가에 반영되기 때문에 육지로부터 약 80 km의 영역을 고려하였다. 입항과 출항은 인천항 내에서 항행 중인 상태를 의미하며, 정박은 항구에서 하역 혹은 비하역시 선박의 계류 상태를 의미한다. 연구 기간은 선박안전기술공단의 2007년 조사결과에 따라 선박 입·출항 및 연료 소비가 가장 많았던 2007년 5월 9일로 선정하였다. 이 날 입·출항 선박의 수는 166척이었고, 총 422톤의 연료를 소비하였다.

2.1 관측 자료

본 연구에 이용된 자료는 기상 자료, 인천항에 입·출항 및

정박하는 선박의 정보, 그리고 인천항 주변의 NO_x와 SO_x 농도이다. 기상 자료는 Fig. 1의 세모 지점과 같이 인천의 연안 지역에 설치된 13곳의 기상청 AWS의 기온, 습도, 풍향, 그리고 풍속이다. 기상 자료는 CALMET의 입력 자료로 이용되었고, 13곳 중 4곳은 연안 지역의 기상 특성을 파악하는데 활용되었다. 인천항에 입·출항 및 정박하는 선박의 정보는 선박안전기술공단에서 제공한 선박의 종류별 엔진 출력 및 화물총량이다. 선박의 정보는 선박에서 배출되는 NO_x와 SO_x의 배출량을 계산하는데 이용되었다. 인천항 주변의 NO_x와 SO_x 농도는 보건환경연구원에서 운영하고 있는 대기질 측정소에서 관측된 결과이며, CALPUFF에서 모의된 NO_x와 SO_x 농도를 비교하기 위하여 총 6곳의 자료를 수집하였다. Fig. 1의 네모 지점에 해당된다.

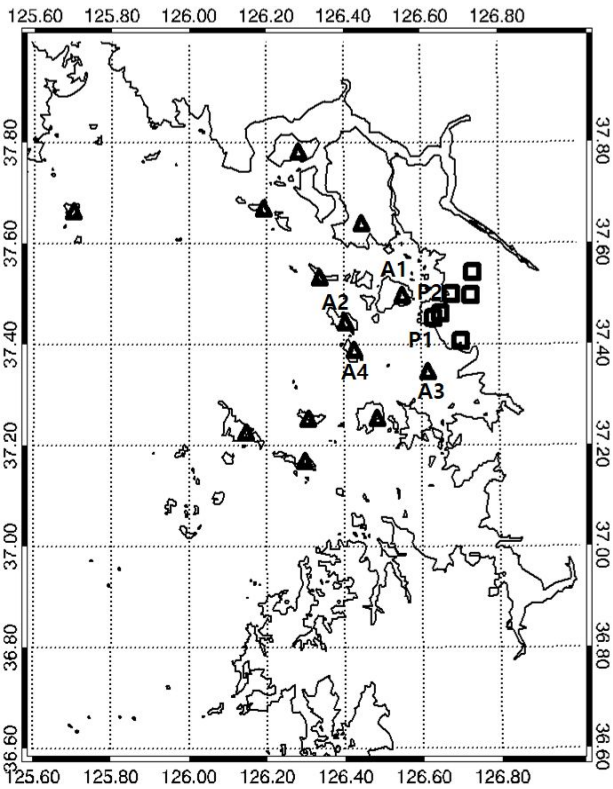


Fig. 1. AWS sites (triangles) and air quality observation sites (squares).

2.2 CALMET/CALPUFF 모델링

연안지역의 국지적인 기상특성을 반영한 대기오염물질의 확산 평가를 위하여 CALPUFF를 이용하였다. CALPUFF는 시간 및 공간에 따른 바람장의 변화를 연기덩어리의 이동에 적용시킨 비정상상태 모델이다. 가우시안 퍼프 (Puff) 모델로

미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 권장 모델 중 하나이다. CALPUFF는 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기가 잘게 나누어진 각각의 연기덩어리로 배출된다고 가정하고, 이 배출된 퍼프가 공간적 해상도를 갖는 바람장을 따라서 이동 및 확산이 될 때 퍼프가 미치는 영향을 종합하여 농도를 계산한다.

CALPUFF는 시스템의 기본적 특징은 다음과 같다. 첫째, 점, 면, 선오염원에 대한 시간적인 농도변화 계산이 가능하다. 둘째, 오염원으로부터 수십 미터에서 수백 킬로미터까지 모델링이 가능하다. 셋째, 한 시간에서 일 년까지의 평균시간에 대한 농도 예측이 가능하다. 넷째, 비활성 오염물질은 물론 화학변화를 일으키는 오염물질에 대해서도 예측이 가능하다. 마지막으로 거칠고 복잡한 지형에서도 모델링이 가능하다. CALPUFF는 기상관측자료 및 중규모 기상모델의 수행 결과를 처리하는 CALMET과 오염물질 확산과 농도를 계산하는 CALPUFF, 후처리 프로그램인 CALPOST로 구성되어 있다. 특히, CALMET은 지상 및 상층 기상자료 뿐만 아니라 중규모 기상예측 모델(WRF, MM5)로부터 비정역학적인 중규모 흐름 결과를 입력받아 계산 영역 내의 바람장을 생성하기 때문에 확산장 산출에 매우 중요하다.

본 연구에서는 Table 1과 같이 CALPUFF V5.8.4를 이용하였다. 수평 격자 간격은 1 km이고, 131 × 131개의 격자로 설정하였고, 총 12개의 연직 층(20 m, 40 m, 80 m, 160 m, 300 m, 600 m, 1000 m, 1500 m, 2200 m, 3000 m, 4000 m, 5200 m)을 설정하였다. CALMET 바람장을 바탕으로 2007년 5월 9일부터 24시간을 모의하였다. CALMET의 입력 자료는 미국 NCAR에서 개발한 Weather Research and Forecasting(WRF-V3.4.1) 모델의 결과이다(Table 2). WRF는 비정역학 모형으로 미규모, 중규모 기상 현상을 모의하기에 적합하다(Byon et al., 2010). 초기 입력 자료와 경계 자료로 NCEP/NCAR에서 6시간 간격으로 제공되는 수평 간격이 1.0° × 1.0° GDAS FNL 자료를 사용하였다. 인천 지역의 국지 순환을 모사하기 위하여 4중 등지격자 체계를 사용하였고, 4개 영역 모두 121 × 121의 수평 격자수를 갖는다. 대기경계층 모의를 위해 꼭대기에서 유입층을 고려하는 YSU(Yonsei University scheme) PBL 기법(Hong and Lim, 2006)을 사용하였고, 장파복사 과정을 계산하기 위해 RRTM(Rapid Radiative Transfer Model) 장파복사 기법(Mlawer et al., 1997)과 청정 대기에서의 단파복사의 산란, 수증기에 의한 흡수를 단순하게 계산하는 Dudhia 기법(Dudhia, 1989)을 설정하였다. WRF는 스핀업 시간을 고려하여 2007년 5월 8일 00LST부터 2007년 5월 11일 00LST까지 72시간을 모의하였다.

인천항의 선박오염원에서 배출된 대기오염물질의 확산

Table 1. Summary of the CALPUFF model configuration

Model	CALPUFF V5.8.4
Horizontal grid spacing	1 km
Dimension	131 × 131 × 12
Height (m)	20, 40, 80, 160, 300, 600, 1000, 1500, 2200, 3000, 4000, 5200
Projection	Lambert Conformal Conic (LCC)
Modeling period	00LST 09 ~ 00LST 10 May 2007

Table 2. Summary of WRF model configuration

Model	WRF V3.4.1			
Domains	1	2	3	4
Horizontal grid spacing	30 km	10 km	3.3 km	1.1 km
Dimension	121 × 121 × 28	121 × 121 × 28	121 × 121 × 28	121 × 121 × 28
Time step	60 s			
Vertical layers/ Model top	31 n vertical layers / 50 hPa			
Grid nesting	One-way			
Initial condition	NCEP/NCAR GDAS(F NL) analysis (6-hourly 1° × 1°)			
Microphysics	WDM 6 scheme			
Planetary Boundary Layer	YSU PBL			
Land-Surface Model	Thermal diffusion			
Longwave radiation scheme	RRTM			
Shortwave radiation scheme	Dunhia shortwave			
Integration period	00LTC 08 ~ 00LTC 11 May 2007			

2.3 선박오염원의 배출량 산정 방법

선박오염원의 NOx와 SOx에 대한 배출량은 Table 3에 제시된 기관 출력에 의해 Table 4의 방법을 통해서 산출되었다. Table 4의 선박오염원의 오염물질 배출량은 선박의 종류와 기관의 종류에 의해 결정된다(MESJ, 1995). 배출량 산출에 포함되는 선박은 크게 견인용예선(Tug), 탱커(Tanker), 건화물운반선, 일반화물선, 컨테이너선, 로로(RORO)선, 기타선으로 구분하였고, 선박이 정박했을 경우(점오염원)와 입·출항(선오염원)하는 경우로 구분하였다. 정박 중 선박이 가동하는 기관은 보조 엔진 디젤기관과 보조 보일러이고, 입·출

항 중 가동하는 기관은 주 엔진 디젤기관, 보조 엔진 디젤기관, 그리고 보조 보일러를 가동한다. NOx는 기관 출력에 의해 결정되고, SOx는 기관 출력과 연료내의 유황성분에 의해 결정된다. NOx 배출량은 기관에 따라 다르고 같은 기관이라도 연소상태에 따라 달라지며, 연료에 따라서도 변화하므로 정확한 추정은 힘들다. NOx 배출량 추정은 기관 출력과의 상관관계를 정의하거나 연료소비량과의 상관관계를 정의하는데, 대체로 기관출력과 상관식을 사용하고 있다. 반면에 SOx 배출량은 연료소비량에 비례하는 연료중의 유황성분에 의해 결정된다. 유황성분은 연료소비량에 비례하는 추정식에 의해 결정된다(Cheong et al., 2005).

3. 결 과

3.1 기상 조건

Fig. 2는 인천항 주변의 A1부터 A4까지 네 곳의 AWS에서 측정된 풍향과 풍속이다. 5월 9일 00LST부터 06LST까지 지속적으로 약한 남동풍에 의한 육풍이었고, 07LST부터 10LST까지 같은 풍향에 풍속이 점차 강해졌다. 이후, 15LST까지 남서풍에 의한 해풍이 뚜렷하게 나타났으며 15LST 이후에는 북동풍에 의한 육풍이 우세하였다. 00LST부터 06LST까지 평균 2 m/s의 비교적 약한 육풍이 나타났는데, 이는 비교적 안정한 야간 대기 상태를 의미한다. 선박으로부터 배출된 오염물질의 연직 및 수평확산이 약해져서 오염원 주변의 연안지역으로 급격한 고농도 오염을 야기시킬 수 있다. 또한 16LST는 풍향이 남서풍에서 북동풍으로 급변하는 시각으로, 이때 풍속은 2 m/s 이하로 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 육풍으로 인하여 육상으로 활발하게 확산되어야 할 오염물질의 진행이 억제될 수 있다.

3.2 선박오염원의 배출량

Table 4의 NOx와 SOx의 선박오염원의 배출량 산정식으로 2007년 5월 9일의 선박 종류에 따른 기관별 평균 배출량을 산정하였다. Table 5는 입·출항시 선박오염원의 배출량을 나타낸다. NOx의 총 평균 배출량은 입·출항시 각각 6.2 g/s, 6.8 g/s이었고, SOx의 총 평균 배출량은 입·출항시 각각 3.6 g/s, 5.1 g/s이었다. NOx와 SOx의 총 평균 배출량은 입항시보다 출항시에 높게 나타났다. 선박별 배출량은 대형선이 높은 엔진 출력에 의해 소형선보다 높았다. 입·출항시 주 엔진 디젤기관에 의한 배출량이 가장 높았으며, 보조 보일러에 의해 발생하는 배출량이 가장 낮았다. Table 6는 정박한 선박오염원의 배출량이다. 정박한 선박은 보조 엔진 디젤기관과 보조 보일러에 의해서 배출량이 결정되고, NOx와 SOx에 대한 총 평균 배출량은 각각 0.77 g/s, 1.93 g/s이었다.

Table 3. Mean engine power according to type of ship

Ship type	Mean power (ps)				
	arrival		departure		anchoring
	main diesel engine	auxiliary diesel engine	main diesel engine	auxiliary diesel engine	auxiliary diesel engine
Tug	2,627	394	2,746	412	-
Etc.	2,523	325	2,741	334	-
Dry cargo ship	7,165	680	3,539	343	182
Tanker	5,818	578	5,954	695	254
General cargo ship	3,661	695	3,358	332	140
Container ship	10,862	696	10,964	952	523
RORO ship	20,995	2,039	20,995	2,039	591

Table 4. Empirical Formulae of NOx and SOx emission (MESJ, 1995)

Parameter	Empirical Formulae		
	NOx (N)	SOx (S)	
Unit emission (kg h ⁻¹)	main diesel engine	$N = 1.49 \times P^{1.14} \times 10^{-3} \times (46/22.4)$	$S = W \times s \times 0.01 \times 2$
	auxiliary diesel engine	$N = 1.49 \times P^{1.14} \times 10^{-3} \times (46/22.4)$	$S = W \times s \times 0.01 \times 2$
	boiler	$N = W \times n$	$S = W \times s \times 0.01 \times (22.4/32) \times (64/22.4)$
Fuel consumption (W, kg h ⁻¹)	main diesel engine	-	$W = 0.21 \times P^{0.95}$
	auxiliary diesel engine	-	$W = 0.21 \times P^{0.98}$
	boiler	$W = 73.48 \times B^{0.41}$	$W = 73.48 \times B^{0.41}$
Boiler capacity (B, T h ⁻¹)	$B = 0.0267 \times X^{0.48} \times 2$	$B = 0.0267 \times X^{0.48} \times 2$	

P : rated generation power (ps unit), X : amount of cargo, n : NOx emission factor (n=0.008), s : sulfur content in fuel (w/t %)

Table 5. Mean emission of NOx and SOx from ship sources during the entry and the departure

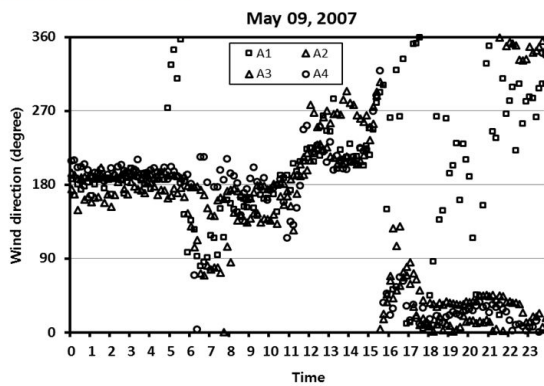
Ship source (the number of ship arrival/departure)	arrival						departure					
	NOx unit emission (g/s)			SOx unit emission (g/s)			NOx unit emission (g/s)			SOx unit emission (g/s)		
	Main diesel engine	Aux. diesel engine	Boiler	Main diesel engine	Aux. diesel engine	Boiler	Main diesel engine	Aux. diesel engine	Boiler	Main diesel engine	Aux. diesel engine	Boiler
Tug (23/23)	5.3	0.6	0.1	3.3	0.5	0.7	5.6	0.6	0.1	3.5	0.6	0.7
Etc. (6/5)	3.2	0.4	0.2	2.2	0.3	0.8	3.6	0.4	0.1	2.4	0.3	0.7
Dry cargo ship (2/7)	7.5	1.8	0.3	4.5	1.3	1.5	3.4	0.8	0.2	2.3	0.7	1.2
Tanker (15/12)	6.9	1.2	0.2	3.6	0.8	1.1	7.1	1.5	0.2	3.7	1.0	1.1
General cargo ship (25/29)	3.6	1.0	0.2	2.4	0.8	1.2	3.3	0.4	0.2	2.2	0.4	1.2
Container ship (8/5)	10.5	1.2	0.3	5.8	0.9	1.5	10.6	1.7	0.3	5.9	1.3	1.5
RORO ship (3/3)	25.6	3.4	0.3	12.4	2.3	1.7	25.6	3.4	0.3	12.4	2.3	1.7

인천항의 선박오염원에서 배출된 대기오염물질의 확산

Table 6. Mean emission of NO_x and SO_x from anchoring ship source

Ship source (the number of anchoring ship)	NO _x unit emission (g/s)		SO _x unit emission (g/s)	
	Aux. diesel engine	Boiler	Aux. diesel engine	Boiler
Tanker (8)	0.33	0.28	0.32	1.41
Dry cargo ship (3)	0.23	0.30	0.24	1.53
General cargo ship (15)	0.17	0.27	0.22	1.38
Container ship (5)	0.75	0.31	0.65	1.52
RORO ship (4)	0.87	0.33	0.74	1.68

(a) Wind direction



(b) Wind speed

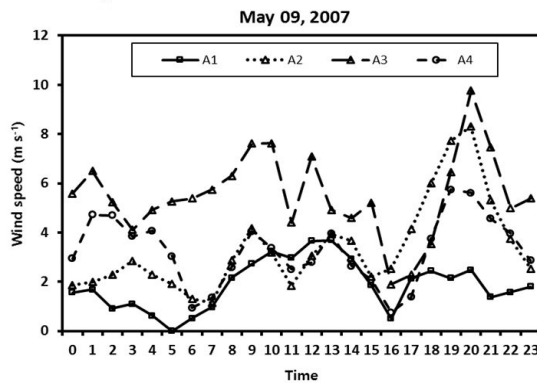


Fig. 2. Variation of the wind direction and the wind speed at four sites near the Incheon port.

3.3 선박오염원의 확산 모의 및 검증

입·출항하는 선박과 정박 중인 선박은 각각 선오염원과 점오염원으로 구분하여 CALPUFF에 적용하였다. 입·출항시 선오염원의 좌표는 항구에서 80 km의 범위 내에서 적용하였다. 점오염원은 2007년 5월 9일에 정박하였던 총 35척의 선박을 탱커, 건화물운반선, 일반화물선, 컨테이너선, 로로선으로 구분하여 적용하였다.

Fig. 3은 2007년 5월 9일의 선박오염원에서 배출된 NO_x의 확산을 CALPUFF로 모의한 결과이다. 선박으로부터 배출된 NO_x는 00LST부터 14LST까지 남서풍의 영향에 의해 북동쪽에 위치한 내륙으로 확산되었다. 15LST 이후 북동풍에 의해 육풍으로 전환되면서 인천항으로부터 내륙으로 진행되던 확산이 남서쪽 해상으로 진행되었다. Fig. 4는 같은 기간 동안 선박오염원에서 배출된 SO_x의 확산을 모의한 결과이다. 확산되는 경향은 전체적으로 NO_x와 유사하였고, 인천항 주변의 SO_x 농도는 NO_x보다 높은 경향을 보였다.

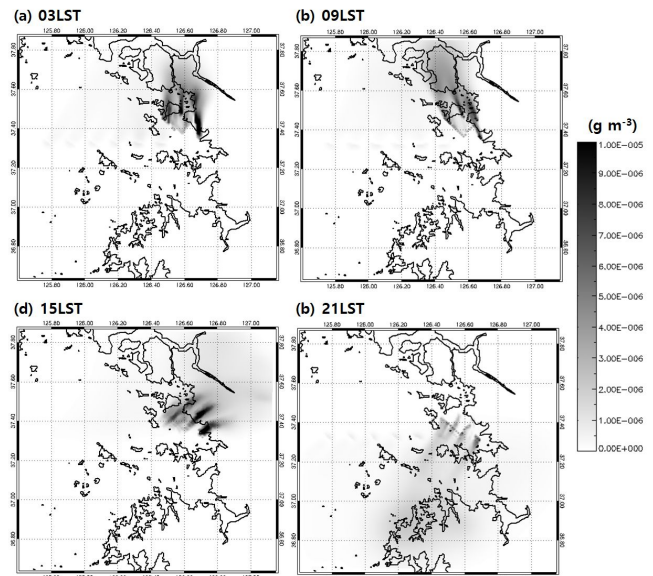


Fig. 3. NO_x dispersion field simulated with around Incheon port.

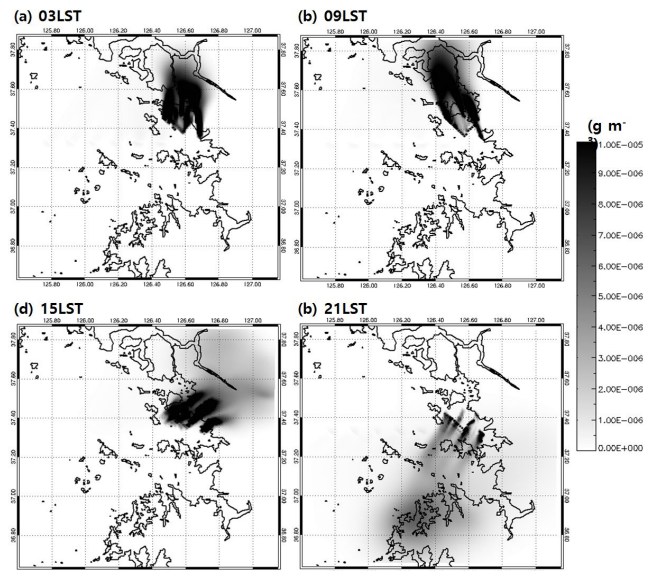


Fig. 4. SO_x dispersion field simulated with around Incheon port.

CALPUFF에서 모의된 선박오염물질의 확산을 검증하기 위하여 인천항 주변의 대기질 측정소에서 수집된 NOx, SOx와 비교하였다. Fig. 5는 6곳의 대기질 측정소와 그 지점에 대응되는 CALPUFF의 NOx와 SOx의 평균 시계열이다. 6곳의 대기질 측정소에서 관측된 NOx의 평균 농도는 1.0×10^{-4} g/s 이었고, CALPUFF로 모의된 선박오염원에서 배출된 NOx의 평균 농도는 관측값의 약 1/10로써 1.0×10^{-5} g/s이었다. 2006년 전국의 NOx 배출량 중 선박으로부터 발생하는 오염원을 포함한 비도로 이동오염원의 배출량은 전체 NOx 배출량의 약 1/10이었고, 인천시 NOx 배출량의 약 1/10 역시 비도로 이동오염원이 차지하였다(NIER, 2008). 즉, CALPUFF에서 모의된 NOx의 농도가 유의한 것으로 판단된다.

관측된 NOx 농도는 07LST부터 10LST까지 일시적으로 감소하는 경향을 보였고, CALPUFF의 NOx의 농도 역시 소폭으로 감소하는 경향이 나타났다. 또한 지점별 NOx 농도의 편차가 다소 컸다. 인천항 주변의 AWS로부터 수집된 바람 자료에서 07LST부터 강한 풍속의 남동풍이 일시적으로 발생하였다. 이 현상으로 인천항으로부터 내륙으로 진행되는 오염물질의 수송이 억제되었고, 내륙의 NOx 농도가 일시적으로 감소하는 원인이 되었다. 11LST 이후에 NOx의 농도가 다시 증가하였는데, 10LST 이후부터 남서풍에 의한 해풍에 의해 NOx가 육지로 유입되었기 때문이다.

관측된 SOx의 평균 농도는 2.0×10^{-5} g/s이었고, CALPUFF로 모의된 선박오염원에서 배출된 SOx의 평균 농도는 약 1/5로써 0.4×10^{-5} g/s이었다. NOx와 마찬가지로 2006년 인천시의 SOx 배출량의 약 1/10은 비도로 이동오염원이었다(NIER, 2008). NOx에 비해 CALPUFF로 모의된 SOx의 평균 농도는 다소 높았다. 이는 정박 중인 선박오염원의 SOx 배출량이 다소 높았기 때문이다. 관측된 SOx 농도는 NOx와 다르게 해륙풍에 의한 영향이 뚜렷하지 않았고, 시간에 따라 일정하게 감소하는 경향을 보였다. 반면에 CALPUFF의 SOx 농도는 NOx의 변화 경향과 유사하게 해륙풍의 영향이 반영되었으며, 선박오염원에서 NOx보다 높은 배출량에 의해 NOx의 농도보다 높게 모의되었다.

Fig. 6은 P1과 P2지점(Fig. 1)에서 수집한 대기질 측정소와 CALPUFF의 NOx, SOx 농도의 시계열이다. NOx와 SOx의 평균 농도는 07LST부터 10LST까지 육풍에 의해 감소하였지만, P1과 P2 지점에서 CALPUFF로 모의된 NOx, SOx의 농도는 오히려 증가하였다. 인천항과 인접한 P1과 P2 지점의 CALPUFF 모의 결과는 해륙풍의 영향보다 인천항에 정박 중인 선박오염원에 의한 영향이 크게 반영되었기 때문이다. P1과 P2 지점에서 관측된 NOx와 SOx 농도 역시 해륙풍의 영향이 뚜렷하지 않았다. Fig. 5에서 07LST부터 10LST까지 오염물질 농도의 편차가 증가한 이유도 P1과 P2 지점의 이와 같은 특징에 의한 농도가 반영되었기 때문이다.

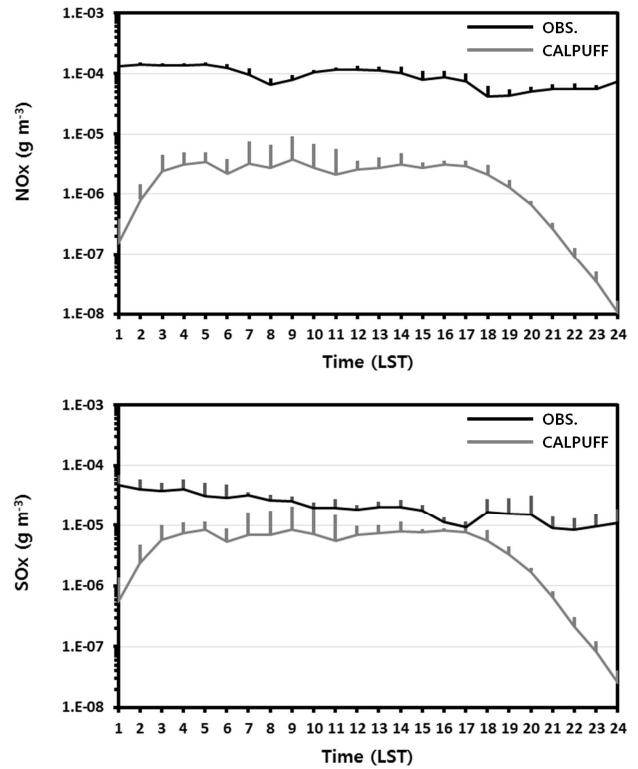


Fig. 5. Mean emission of NOx and SOx measured at six air quality observations and simulated with CALPUFF.

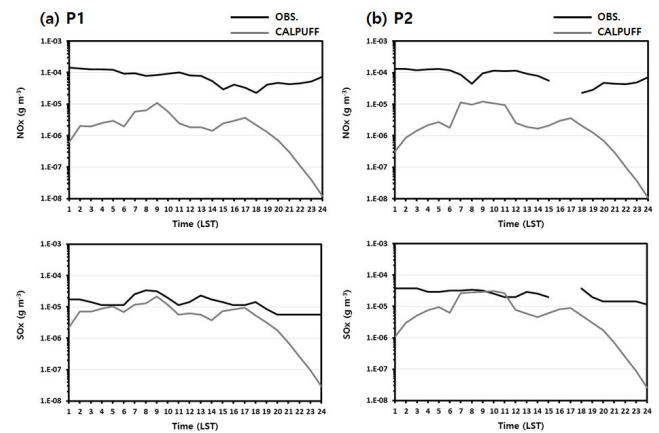


Fig. 6. Emission variation of NOx and SOx measured at P1 and P2, and simulated with CALPUFF.

4. 결론

본 연구에서는 선박의 종류와 엔진 기관의 종류에 따라 NOx와 SOx의 배출량을 정량적으로 산출하였고, CALPUFF를 이용하여 선박오염원으로부터 배출되는 오염물질의 확산을 모의하였다. 특히, 인천항에 입·출항 및 정박하는 선박이 가장

인천항의 선박오염원에서 배출된 대기오염물질의 확산

많았던 2007년 5월 9일을 선정하여 연안도시지역의 기상학적 인 특성을 반영한 오염물질의 확산을 모의 및 검증하였다.

CALPUFF로 확산장을 모의하기 위하여 선박오염원의 NOx와 SOx에 대한 배출량을 선박의 종류에 따른 엔진 출력 및 화물총량을 통해서 산출하였다. 배출량 산출에 포함되는 선박은 크게 견인용예선(Tug), 탱커(Tanker), 건화물운반선, 일반화물선, 컨테이너선, 로로(RORO)선, 기타선으로 구분하였다. 총 선박척수 82~84척을 기준으로 NOx의 총 평균 배출량은 입·출항시 각각 6.2 g/s, 6.8 g/s이었고, SOx의 총 평균 배출량은 입·출항시 각각 3.6 g/s, 5.1 g/s이었다. 정박 중인 선박의 NOx와 SOx에 대한 총 평균 배출량은 각각 0.77 g/s, 1.93 g/s이었다. 입항시보다 출항시의 배출량이 높게 나타난 원인은 출항시 출력이 높은 대형선(건화물운반선, 일반화물선)의 수가 입항시보다 높았기 때문으로 판단된다.

선박오염원의 배출량을 CALPUFF에 적용하여 인천의 연안지역에 대한 NOx와 SOx의 확산을 모의하였다. 인천항에서부터 배출된 NOx와 SOx는 해륙풍에 의한 영향이 뚜렷하게 반영되었다. CALPUFF에서 모의된 선박오염물질의 확산을 인천항 주변의 대기질 측정소에서 수집된 NOx, SOx와 비교한 결과, 관측값과 CALPUFF 모의값 사이에 약 1/10 정도의 비율이 발생하였고, 2006년 인천시 NOx 배출량의 약 1/10 역시 비도로 이동오염원이라는 통계적 집계에 따라 CALPUFF로 모의된 선박오염원에서 배출된 NOx와 SOx의 농도가 유의함을 알 수 있었다. 관측된 NOx와 SOx의 시계열과 인천항 부근의 AWS 기상정보를 통해서 해륙풍에 따른 오염물질의 확산에 대해 파악할 수 있었다. 육풍의 영향으로 인하여 인천항으로부터 내륙으로 진행되는 오염물질의 수송이 억제되었고, 내륙의 SOx와 NOx 농도가 일시적으로 감소하는 원인이 되었다. 해풍에 의해 NOx와 SOx가 육지로 유입되면서 농도가 점차 증가하였다. 인천항과 인접한 지점은 해륙풍의 영향보다 인천항에 정박 중인 선박오염원에 의한 영향이 더욱 크게 반영되었다.

우리나라의 연안지역에 위치한 도시는 내륙지역에 비하여 해륙풍과 같은 국지적 영향에 의하여 최근 급격히 증가된 선박에 의해 배출된 오염물질의 영향을 더욱 크게 받기 때문에 선박 오염물질 배출에 대한 영향 평가 및 정량적 규제가 요구된다. 인천은 항구도시이므로 선박으로부터 배출되는 배기가스 중 SOx와 NOx의 배출 규제를 강화할 수 있도록 철저한 준비가 필요하다. 본 연구의 결과를 통해 선박에 의한 오염물질 배출량은 상당히 크다고 볼 수 있으며, 특히 항구에 인접한 선박의 배출량은 내륙에 직접적인 영향을 미쳤다. 즉, 인천 지역의 효과적인 대기오염물질의 저감과 대기질 수치 모델링을 위해서는 선박오염원에 대한 정량적인 고려가 반드시 필요하다. 본 연구에서 제안된 선박오염

원의 정량적 배출량 자료와 수치 모델링 결과는 선박의 오염물질 배출에 대한 저감 대책과 더불어 국제적인 오염물질 배출의 규제 기준에 따른 적극적인 대응을 위한 전문적인 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Byon, J. Y., Y. J. Choi and B. K. Seo(2010), Characteristics of a Wind Map over the Korean Peninsula Based on Mesoscale Model WRF, Atmosphere, Vol. 20, No. 2, pp. 195-210.
- [2] Cheng, W. L.(2002), Ozone distribution in coastal central Taiwan under sea-breeze conditions, Atmos, Environ., Vol. 36, pp. 3445-3459
- [3] Cheong, K. H., S. J. Kim and H. S. Park(2005), A studies on the Air Pollutant Emission Rate calculation from vessels in the Ulsan Port, 2005 Spring Conference of The journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, pp. 111-118.
- [4] Dudhia, J.(1989), Numerical Study of Convection Observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, Journal of the atmospheric sciences, Vol. 46, No. 20, pp. 3077-3107.
- [5] Hong, S. Y. and J. O. J. Lim(2006), The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6), Journal of the Korean meteorological society, Vol. 42, No. 2, pp. 129-151.
- [6] Kawamura, T.(1985), Recent changes of atmospheric environment in Tokyo and its surrounding area, Geographical Review of Japan, Vol. 58, No. 1, pp. 83-94.
- [7] Lalas, D. P., D. N. Asimakopoulous, D. G. Deligiorgi and C. G. Helmis (1983), Sea breeze circulation and photochemical pollution in Athens, Greece, Atmos. Environ., Vol. 17, pp. 1621-1632.
- [8] Lee, H. -W., Y. -K. Kim, G. -M. Won and E. -J. Oh(1997), Numerical Simulation for Diffusion and Movement of Air Pollutants in Atmospheric Flow Field of Coastal Urban Region, J. of the Korean Environmental Sciences Society, Vol. 6, No. 5, pp. 437-449.
- [9] Mantis, H. T., C. C. Repapis, C. S. Zerefos and J. C. Ziomas

(1992), Assessment of the potential for photochemical air pollution in Athens: A comparison of emissions and air pollutant levels in Athens with those in Los Angeles, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 31, pp. 1467-1476.

- [10] MESJ(1995), Marine Engineering Society of Japan, Technical review report on reduction of air pollutants emitted from ship.
- [11] Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono and S. A. Clough(1997), Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-K model for the longwave, *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, No. D14, pp. 16663-16682.
- [12] Rhome, J., D. Niyogi and S. Raman(2003), Assessing seasonal transport and deposition of agricultural emissions in eastern North Carolina, USA, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 160, pp. 117-141.

Received : 2017. 04. 05.

Revised : 2017. 06. 27. (1st)

: 2017. 07. 17. (2nd)

Accepted : 2017. 08. 28.