

## 항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법 도입에 따른 대기오염물질 배출량 변화 분석 -인천항을 중심으로

이민우\* · 이향숙\*\* · 이정욱\*\*\*

### An Analysis of Changes in Air Pollutant Emissions Due to the Introduction of the Special Act on the Improvement of Air Quality in Port Areas -Focusing on Incheon Port

Lee, Min-Woo · Lee, Hyang-Sook · Lee, Jung-Wook

#### Abstract

This study aims to analyze the effect of reducing air pollutant emissions of the ship fuel oil sulfur content regulation policy, which has been gradually introduced for three years. In addition, the emission reduction effect of VSR and AMP was also analyzed. The analysis was conducted on NOx, CO, VOC, SOx, TSP, PM10, and PM2.5, which are provided by EEA, and the spatial scope of the analysis was conducted on Incheon Port, which is located in the metropolitan area of Korea and has a large ripple effect on air pollution.

Three scenarios were constructed for analysis. Scenario 1: If there is no policy, Scenario 2: If only fuel oil sulfur content regulation was implemented, Scenario 3: The analysis was conducted by reflecting fuel oil sulfur content regulation, VSR, and AMP.

As a result of the analysis, in the case of scenario 1, 4,801 tons, 4,932 tons, and 5,144 tons of air pollutants were emitted during the three-year period. In Scenario 2, 4,219 tons, 4,152 tons, and 3,989 tons were discharged, and in Scenario 3, 4,198 tons, 4,138 tons, and 3,973 tons were discharged.

The findings of this study are anticipated to be applied as fundamental research in port air environment management and Incheon Metropolitan City air management.

*Key words* : Port of Incheon, Air pollutants, Port emissions, Particulate matter

▷ 논문접수: 2023. 09. 06.      ▷ 심사완료: 2023. 09. 24.      ▷ 게재확정: 2023. 09. 30.

\* 인천대학교 동북아물류대학원, 박사과정, 제1저자, lmw520@naver.com

\*\* 인천대학교 동북아물류대학원, 교수, 공동저자, hslee14@inu.ac.kr

\*\*\* 인천대학교 동북아물류대학원, 연구원, 교신저자, jw34668811@daum.net

## I. 서론

세계적으로 항만에서 발생하는 대기오염에 대한 심각성을 인지하며, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO), 국제연합환경계획(United Nations Environment Programme, UNEP) 등 주요 국제기구와 미국, 네덜란드, 독일 등 선진국가를 중심으로 항만의 환경오염 저감정책을 빠르게 도입하고 있다(Zhao Tingting et al, 2019). 이러한 국제적인 흐름에 맞추어 우리나라에서도 「항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법」(이하 항만대기질법)을 시행(2020년 9월 1일)하며 항만배출원을 체계적으로 관리하려는 노력을 시도하고 있다. 항만대기질법에서는 선박, 하역기계, 자동차 등 항만에서 대기오염물질을 배출하는 주요 오염원에 대해 전 범위적인 규제를 포함하고 있다. 특히 항만 대기오염물질 배출량의 가장 큰 비율을 차지하는 선박에서의 배출량을 감소시키기 위해 배출규제해역(Emission Control Area, ECA), 선박속도감소 프로그램(Vessel Speed Reduction Program, VSR), 육상전원장치(Alternative Maritime Power, AMP) 등의 친환경 정책을 시행하고 있다. ECA내부에서 시행하고 있는 선박연료유 황함유량 규제는 2020년부터 2022년까지 총 3년에 걸쳐 점진적으로 강화된 정책이며, 항계 내로 진입하는 3천 톤 이상 모든 선박에 대해 적용하는 강제적 규제이다(해양수산부, 2019). 또한 VSR은 순항 중인 선박의 속도를 감소시켜 배출량 감소를 도모하며, AMP는 접안 중인 선박의 엔진을 정지하고 육상의 전기를 공급함으로써 배출량 감소를 유도하는 장치이다.

현재 항만대기질법이 시행된 지 약 3년이 지난 시점에서 규제정책의 효과를 진단할 필요가 있는 시점으로 볼 수 있다. 이에 본 연구는 3년 동안 점진적으로 도입된 선박연료유 황함유량 규제정책의 대기오염물질 배출저감 효과에 대해 분석하고자 한다. 추가적으로 VSR과 AMP에 의한 배출저감 효과도 분석하

였다. 분석 대상 물질은 EEA에서 분석계수를 제공하고 있는 NO<sub>x</sub>, CO, VOC, SO<sub>x</sub>, TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>를 대상으로 분석을 시행하였으며, 분석의 공간적 범위는 우리나라의 수도권에 위치하여 대기오염에 대한 과급효과가 큰 인천항을 대상으로 연구를 시행하였다.

## II. 선행연구 검토

### 1. 항만(선박)의 대기오염물질 배출량 분석

한세현 외(2011)는 항만 배출량 인벤토리 구축을 위해 선박을 포함한 하역장비, 차량, 기관차, 벌크 하역, 차량 이동과 같은 전체 항만활동에 대한 배출원 간 상대적인 기여도를 평가하였다. 분석을 위해 CAPSS(Clean Air Policy Support System) 데이터를 사용하여 2007년 인천항의 연간 선박 대기오염 배출량을 분석한 결과, 배출원 별로는 선박이 모든 대기오염물질에 대해 53~99%로 가장 높은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 항만하역장비에서는 질소산화물, 일산화탄소, 탄화수소가 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 대기오염원 별로는 질소산화물이 4,861톤으로 가장 많은 비중을 차지하고, 뒤를 이어 황산화물 3,995톤, 일산화탄소 638톤, 미세먼지 307톤, 탄화수소 229톤 순으로 대기오염 기여도가 높은 것으로 추정하였다.

조정정 외(2019)는 국내 항만 중 상대적으로 관련 연구와 정책 도입이 미미한 국내 광양항과 울산항을 대상으로 선박이 정박하는 동안 발생하는 대기오염물질의 배출량을 추정하였다. 2017년 기준 연간 배출량 분석 결과, 광양항에서 CO 253톤, NO<sub>x</sub> 1,987톤, SO<sub>x</sub> 684톤, PM<sub>10</sub> 48톤, PM<sub>2.5</sub> 45톤, VOC 62톤, NH<sub>3</sub> 0.2톤, 울산항에서 CO 212톤, NO<sub>x</sub> 1,713톤, SO<sub>x</sub> 574톤, PM<sub>10</sub> 40톤, PM<sub>2.5</sub> 37톤이 추정되었다. 두 항만 모두 대기오염물질 별로는 NO<sub>x</sub>가 가장 많은 비중을 차지했고, 선종별로는 유조선에서 가장 많은 배

출량이 발생하는 것으로 분석되었다.

Ernestos Tzannatos(2010)는 그리스 해역 내에서 발생하는 선박 배기가스의 주 오염물질 4종(CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM)에 대해 배출량과 이로 인한 외부효과를 추정하였다. 분석을 위해 국내 해운에 대해서는 연료 판매 기반의 접근 방식, 국제 해운에 대해서는 선박 교통량 기반의 접근 방식을 활용하였다. 2008년 그리스 해역의 배출량 산출 결과, 총 약 740만 톤이 발생한 것으로 나타났다. 세부 오염원 별로는 이산화탄소가 가장 많은 약 700만 톤이며, 뒤를 이어 질소산화물 25만 톤, 황산화물 13만 톤, 미세먼지 2만 톤 순으로 분석되었다. 또한 선박 배기가스로 인한 외부 효과를 비용으로 환산하면 약 29.5억 유로이며, 이로 인해 여객운임과 화물운임이 각각 13유로/인, 3유로/톤 증가하는 결과를 초래할 수 있음을 제시하였다.

Berechman, J. et al(2012)의 연구에서는 대만의 대표항인 가오슝항을 대상으로 정박하는 선박과 이와 연계된 트럭운송에서 발생하는 대기오염 배출량 기여도 및 사회적 비용을 추정하였다. 2010년 16,042척의 선박 입항으로부터 유발되는 대기오염 기여도 분석 결과, 정박하는 선박에서 발생하는 대기오염은 유조선에서 가장 많고 컨테이너선, 벌크선, 작업선 등이 그 뒤를 이었다. 특히 가오슝항에서 상위 3개 선종(유조선, 컨테이너선, 작업선)은 전체 비중의 92%를 차지하였다. 대기오염물질별로는 이산화탄소가 가장 높고, 뒤를 이어 황산화물, 질소산화물, 초미세먼지, 미세먼지, 탄화수소, 일산화탄소, 휘발성 유기화합물 순으로 분석되었다. 또한 이로 인한 항만 내 선박과 트럭의 사회적 비용은 각각 1억 1,920만 달러와 420만 달러로 환산되었고, 대기오염원의 배출량은 이산화탄소가 가장 많았지만 환경 비용 측면에서 상위 3개 오염원은 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, VOCs로 분석되었다.

## 2. ECA의 도입효과 분석

Matthias, V. et al(2010)의 연구에서는 세계에서 선박 교통량이 가장 많은 지역 중 하나인 로테르담과 함부르크 인근의 북해 연안지역을 대상으로 선박 대기오염물질 배출로 인한 2차 에어로졸의 대기 영향을 분석하였다. 선박에 의한 2차 에어로졸인 황산염, 질산염, 암모늄의 에어로졸은 특히 여름에 덴마크 전역, 독일 북부의 대부분, 네덜란드, 벨기에 및 프랑스에서 농도가 50% 이상 증가할 수 있는 것으로 분석되었다. 2007년 말에 시행되어 선박 연료의 황 함량을 1.5%로 규제하는 북해의 황배출규제해역(SECA) 시행은 직접적으로 이산화황, 황산염 에어로졸, 암모늄 에어로졸의 농도를 각각 42%, 38%, 20%를 감소시키는 반면, 질산염 에어로졸의 농도는 오히려 7% 증가시킨 것으로 분석되었다.

Viana, M. et al(2015)의 연구에서는 유럽의 주요 선박통행로 중 가장 인구 밀도가 높은 마르마라해와 터키해에 ECA를 지정함으로써 얻을 수 있는 환경 및 건강상의 이점을 평가하였다. ECA 표준 지침에서 요구하는 0.1% 이하의 저황함량 연료 사용을 시나리오로 설정하여 현재 수준 대비 배출량과 대기 중 확산을 CALPUFF 대기확산 모델을 통해 시뮬레이션 하였다. 분석결과 PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>는 67%, SO<sub>2</sub>는 90%까지 배출량이 저감될 수 있다는 것을 분석하였다. 또한 ECA 지정으로 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> 노출로 인한 입원 환자 중 각 205명, 3460명, 390명의 환자와 연간 최대 30명의 조기 사망을 피할 수 있는 것을 보건상의 이점으로 평가하였다.

Karl, M. et al(2019)의 연구에서는 2021년 북해와 발트해가 질소배출통제구역(NECA)으로 지정됨에 따라 장기적인 질소산화물 저감 목표에 따른 대기질 영향을 시뮬레이션하였다. NECA의 도입으로 2040년 발트해의 선박 질소산화물 배출량은 BAU 대비 80%, 미세먼지 배출량은 35~37%, 오존 온도는 6% 감소했으나 황산화물 수준은 거의 영향을 받지 않는 것으로 시뮬레이션 결과 분석되었다.

Shi, K. et al(2020)의 연구에서는 선박 황함유량 규제와 관련된 단계별 ECA 정책이 상하이항 인근 6개 해역에 미치는 효과를 검토하였다. 단계별로 2.7%에서 0.1% 이하까지 5가지의 다양한 황함유량 규제에 따른 시나리오 별 배출량과 영향 범위를 분석하였다. 선박 AIS 데이터 기반의 상향식 방법을 적용하여 선박 유형에 따른 4개 오염물질(NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>)의 정책 적용 단계 별 배출량을 산출하였고, 분석 기준년도인 2017년의 오염원 별 연간 배출량은 NO<sub>x</sub> 34,029톤, SO<sub>2</sub> 21,037톤, PM<sub>2.5</sub> 2,291톤, PM<sub>10</sub> 2,291톤으로 분석되었다. 기준년도의 배출량에 단계 별 ECA 정책을 시뮬레이션 한 결과, 화물선에서 배출되는 SO<sub>2</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>의 배출량이 정책의 영향을 가장 많이 받고, NO<sub>x</sub>의 배출량은 상대적으로 영향을 덜 받는 등 ECA 정책의 효과가 선박의 유형과 공간에 따라 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

Zhang, Q. et al(2021)의 연구에서는 세계 최대 컨테이너항만인 상하이항에서 이산화황을 대상으로 ECA 정책 도입에 따른 농도 감소 효과를 분석하였다. 정책의 인과효과 추정을 위해 회귀불연속(Regression Discontinuity) 접근 방식을 이용하여 ECA 시행 전/후의 효과를 평가하였다. 추정 결과에 따르면, ECA 정책 시행을 통해 상하이의 이산화황 농도가 일 평균 최소 0.229 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 약 1.5%가 감소한 것으로 나타나 ECA 정책이 실제로 상하이의 이산화황 농도를 줄이는데 긍정적인 효과를 가져왔다는 결론을 제시하였다.

### 3. 시사점 및 연구의 차별성

세계적으로 항만해운 분야의 환경규제가 지속적으로 강화되면서 주요 도시들이 위치한 항만들을 대상으로 배출량 인벤토리를 구축하고, 인접지역에 미치는 영향을 모니터링하기 위한 연구들이 다양하게 진행되었다. 또한 친환경항만 정책의 효과분석에 대해 수행한 다수의 연구가 존재하였다. 다만 국내

의 주요 항만을 대상으로 진행한 연구는 아직 제한적인 것으로 파악되었다. 특히 산출된 대기오염물질 배출량을 토대로 대기오염물질 확산 정도까지 연구한 문헌은 매우 제한적인 것으로 나타났다. 본 연구에서는 국내 수도권에 위치한 항만인 인천항을 대상으로 항만대기질법에 따른 대기오염물질 배출량 저감량을 분석하였다는 점에 연구의 의의와 차별성이 있다.

## III. 인천항 기본현황 및 선박활동 분석

### 1. 인천항 개요

인천항은 대한민국 인천광역시에 위치한 국제무역항으로 우리나라의 주요 관문이자 서울의 외항 기능을 수행하고 있다. 지리적으로 서해안에 위치함으로써 중국 및 동남아와의 교역에서 중요한 전진기지 역할을 담당하고 있으며, 인천국제공항과의 연계, 대중국 카페리 서비스 등의 물류 인프라 활용 면에서도 다양한 이점을 가지고 있다. 또한 최근에는 항만 물류 정체 상황에서 국제여객터미널을 활용한 복합 운송모형을 제공하는 등 코로나19의 장기화로 경제 불확실성이 가중된 상황에서도 역대 최대 컨테이너 물동량을 달성하고 성장세를 이어나가고 있다.

표 1. 인천항 시설 현황

안벽 (m)	방파제 (m)	잔교 (기)	소형선부두 (m)	접안능력 (척)
26,736	2,423	27	1,443	125

출처 : 통계청(kosis), 항만시설현황, 2020년 기준

### 2. 물동량 현황

인천항은 국내 2위의 컨테이너 항만이자 물류항으로써 2017년 처음으로 300만 TEU를 처리한 이래로

2021년에는 코로나19에도 불구하고 역대 최고 물동량인 335만 TEU를 넘어서며 지속적인 성장세를 나타내고 있다. 인천항의 최근 6년 간 컨테이너 물동량 실적은 다음의 표 2와 같다.

표 2. 인천항 컨테이너 물동량

년도	TEU	전년대비 증감율(%)
2018	3,121,368	2.40%
2019	3,091,955	-0.94%
2020	3,271,604	5.81%
2021	3,353,606	2.51%
2022	3,192,344	-4.81%

자료 : Port-mis

화물물동량의 경우 2017년부터 2020년까지 지속적으로 하락하는 추세를 나타내다 2021년에는 코로나19에서 불구하고 전년대비 4% 수준의 성장세를 보이며 반등하는 모습을 나타냈다. 인천항의 최근 5년 간 화물물동량 실적은 다음 표 3과 같다.

표 3. 인천항 화물 물동량

년도	화물물동량 (톤/RT)	전년대비 증감율(%)
2018	163,863,679	-1.21%
2019	157,736,921	-3.74%
2020	152,228,208	-3.49%
2021	158,291,195	3.98%
2022	150,620,261	-4.85%

자료 : Port-mis

### 3. 입출항 선박 수 분석

인천항에 입출항한 선박은 크게 여객선, 석유정제품 운반선, 일반화물선, 컨테이너선 등 총 15개 선종으로 분류될 수 있다. 최근 3년 간 인천항에 입출항한 선박 수는 다음의 표 4와 같다. 입출항 횟수를 기준으로 모든 기간에서 일반화물선이 가장 많은 비중

을 차지하였고, 뒤를 이어 풀 컨테이너선, 석유정제품 운반선, 여객선, 산물선 순으로 높은 횟수를 기록하였다. 해당 기간 별 변화로는 코로나19로 인해 정확한 패턴을 파악하기에 어려움이 있으나 그럼에도 불구하고 원유 운반선, 케미칼 운반선, 시멘트 운반선은 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 여객선, 자동차 운반선, 세미 컨테이너선은 감소하는 경향을 보였다.

표 4. 인천항 입출항 선박 수

(단위 : 척)

선종 구분	2020	2021	2022
일반화물선	5,991	6,182	5,658
풀 컨테이너선	5,332	5,063	5,133
석유정제품 운반선	4,218	4,115	4,205
여객선	2,340	2,291	2,249
산물선	2,257	2,617	2,132
자동차 운반선	1,037	905	661
LPG/LNG 운반선	970	807	860
시멘트 운반선	899	1,060	1,154
세미 컨테이너선	560	534	511
케미칼 운반선	548	643	655
원유 운반선	150	188	311
어선	-	4	6
냉동냉장선	3	-	-
원목 운반선	2	-	-
기타선	6,787	6,869	6,154
Total	31,130	31,278	29,689

자료 : Port-mis

### 4. 선박 활동 시간 분석

항만 입출항 선박 수 분석에 이어 배출량 산출의 근거가 되는 선박의 활동 시간을 분석하였다. 선종별 점안시간의 경우 2022년 기준 여객선(53.4시간)이 가장 긴 것으로 나타났으며, 컨테이너선(14.7시간)이 가장 짧은 것으로 나타났다.

표 5. 선종별 평균 접안시간

(단위: 시)

선종 구분	2020	2021	2022
벌크선	85	48	52
컨테이너선	14	15	14
여객선	105	53	33
일반화물선	36	42	41
RoRo선	23	23	20
유조선	25	25	23
잠역선	72	59	85

자료 : Port-mis

또한 항만별 평균 순항은 다음 표 6과 같이 내항이 가장 오래걸리는 것으로 나타났다. 이는 갑문을 통해 선박의 통행이 이루어지기 때문인 것으로 판단된다.

표 6. 항만별 평균 순항 시간

(단위 : 시)

선종 구분	2020	2021	2022
북항	2.2	2.2	2.2
내항	2.9	2.8	3.0
연안항	1.7	1.7	1.6
남항	1.7	1.7	1.7
신항	1.5	1.5	1.5
송도항	1.4	1.4	1.3
거침도	2.5	1.1	1.5

자료 : Port-mis

## IV. 배출량 분석 방법론

### 1. 배출량 분석 방법론 검토

분석을 위해 IMO, 유럽환경청(European Environment Agency, EEA), 미국환경보호국(U.S. Environmental

Protection Agency, EPA)과 같은 공신력있는 기관에서 제시하는 방법론을 검토하였다.

우선 IMO에서 가장 최근에 발표한 보고서인 ‘Fourth IMO GHG Study 2020’을 토대로 대기오염물질 배출량 산정 방법론을 검토하였다. 본 방법론에서는 국제 및 국내 항해에 참여하는 100GT (Gross Tonnes) 이상인 선박을 대상으로 대기오염물질의 배출량을 산정하며, 대기오염물질의 종류는 기후변화협약(UNFCCC)<sup>1)</sup>에서 규정하는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O와 기타 규정 대기오염물질인 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO, NMVOC, BC 등을 포함한다. 해당 방법론은 가장 최근에 제시된 방법론이긴 하나, 실시간 자료를 통해 배출량을 산출하는 방식이므로 데이터 수집에 한계가 존재하여 본 연구에는 적용하지 못하였다.

EPA는 2009년 4월 ‘Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories’ 보고서를 발표하면서 항만 내 장비(선박, 차량, 철도, 하역장비)에서 발생하는 대기오염물질을 산정하기 위한 방법론을 제시하였다. 7가지 대기오염물질(SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO, HC, BC) 및 3가지 온실가스(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)에 대한 산정 방법론을 제시하였으며, 선박에서의 배출은 원양선과 harbor craft로 구분하였다.

또한 EEA의 배출량 산정 가이드북에서도 분석을 위한 방법론을 설명하고 있으며, 분석의 정교함과 자료수집의 여부 따라 Tier1~Tier3의 방법을 설명하고 있다. Tier1의 경우 가장 정확성이 떨어지며 선박에 대한 자료를 확보하기 어려운 경우 연료소비량에 기초하여 배출량을 산정한다. Tier2의 경우 엔진 제원에 대한 데이터가 있을 경우 연료소비량 및 엔진유형에 따라 배출량을 산정한다. Tier 2 방법론은 Tier 1 방법론과 달리 연료 유형과 엔진 유형의 정보가 필요하며, 엔진 유형은 HSD, MSD, SSD, GT, ST로

1) United Nations Framework Convention on Climate Change

구분된다. Tier3는 엔진 제원과 선박의 이동과 관련된 데이터가 있을 경우 대기오염 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하는 것으로, 3가지 방법 중 가장 정교한 방법이다.

본 연구에서는 EPA와 EEA의 방법론 모두 사용이 가능하나, 비교적 최근에 발표된 EEA의 방법론을 이용하였다. 선박별 입항횟수, 선박의 크기, 각 선종별 부두에서의 정박시간과 함께 선종별 보조엔진의 출력, 선종별 보조엔진의 부하계수, 배기가스별 배출계수 등을 종합적으로 고려하는 EEA의 Tier3 방법을 적용하여 배기가스 산출량을 산정하였으며, 이를위해 선박의 활동 시간을 이용하여 연료 소비량을 추정한 후 분석에 반영하였다. 배출량 산정에 중요한 기초자료 중 하나인 선박의 엔진출력(제원)자료는 한국해양교통안전공단, 한국선급에서 제공받은 선박 제원자료를 분석에 활용하였다.

이 후, EEA에서 제시하는 선박 엔진유형별 연료 소비계수를 적용하여 최종적으로 대기오염물질 배출량을 산출하였다. 배출량 산정식은 다음 (식1)과 같다.

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p [T_p \sum_c (P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p})] \quad (식1)$$

- $E_{Trip}$  : 선박의 모든 활동 단계에서의 대기오염 물질 배출량(tonnes)
- $EF$ : 대기오염물질 배출계수(g/kWh)
- $LF$ : 엔진부하계수(%)
- $P$ : 엔진출력(kW)
- $T$ : 시간(hours)
- $e$ : 엔진 구분(주엔진, 보조엔진)
- $m$ : 연료 유형(BFO, MDO, MGO, gasoline)
- $j$ : 엔진 유형(HSD, MSD, SSDI, GT, ST)
- $p$ : 선박 활동 단계(cruise, hotelling, manoeuvring)
- $i$ : 대기오염물질 유형

## 2. 분석 시나리오 구성

배출량 분석은 ECA정책의 효과를 파악하기 위해 각 3개의 시나리오를 구성하여 분석을 시행하였다. 시나리오 1은 항만대기질법이 도입되기 이전을 가정한 것으로 연료유 황함유량 규제, AMP, VSR 정책이 없음을 가정한 시나리오이다.

시나리오 2는 연료유 황함유량 규제정책을 반영한 것으로 2020년 9월부터 2022년까지 점진적으로 규제가 강화되었으며, 이를 반영하여 분석을 시행하였다. 규제 내용은 표 7과 같다.

표 7. 연료유 황함유량 규제 내용

구분	일반해역		ECA해역
	외항선	내항선	외항선, 내항선 동일 적용
2020.01~2020.08	0.5%	1%	0.5%
2020.09~2020.12	0.5%	1%	0.5% (순항) 0.1% (정박, 접안)
2021.01~2021.12	0.5%	0.5%	0.5% (순항) 0.1% (정박, 접안)
2022.01~2022.12	0.5%	0.5%	0.1%

시나리오 1과 2는 현실의 배출량은 아니지만 환경 규제가 없는 시점을 가정하였을때의 배출량 비교를 하기 위해 분석을 시행하였다. 시나리오 3은 시나리오 2와 더불어 AMP이용 및 VSR참여실적을 반영한

현실의 배출량이다. AMP이용 및 VSR참여실적은 인천항만공사로부터 제공받아 분석에 반영하였다. 각 시나리오의 구성은 다음 표 8과 같다.

표 8. 분석 시나리오 구성

분석 시나리오 구성	
1	정책 없음 가정
2	연료유 황함유량 규제 반영
3	연료유 황함유량 규제 및 VSR, AMP 반영 (현실과 동일)

## V. 분석결과

### 1. ECA 도입 1년차(2020년도)

친환경정책이 반영되지 않았을 때를 가정한 시나

리오 1의 경우 발생한 대기오염물질은 약 4,801톤으로 분석되었으며, 물질별로는 NOx와 SOx가 각각 약 3,060톤, 약 1,033톤이 발생한 것으로 나타나 가장 많은 비중을 차지하였다. 각 시나리오별 배출량 분석 결과는 다음 표 9와 같다.

표 9. 2020년 기준 배출량 분석결과 (항만대기질법 도입 1년차)

		단위 : 톤/년						
		CO	NOx	SOx	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	VOC
Scenario 1	정박	31.7	241.1	85.8	6.0	6.0	5.6	7.7
	순항	155.6	1,290.6	420.4	31.4	31.4	29.3	44.8
	접안	196.8	1,528.0	531.8	37.2	37.2	34.7	47.9
	합계	384.1	3,059.7	1,038.0	74.6	74.6	69.6	100.3
Scenario 2	정박	31.7	241.1	31.3	3.3	3.3	3.1	7.7
	순항	155.6	1,290.6	300.4	25.3	25.3	23.6	44.8
	접안	196.8	1,528.0	198.5	20.7	20.7	19.4	47.9
	합계	384.1	3,059.7	530.2	49.4	49.4	46.1	100.3
Scenario 3	정박	31.7	241.1	31.3	3.3	3.3	3.1	7.7
	순항	154.6	1,282.6	298.1	25.1	25.1	23.5	44.4
	접안	196.2	1,523.1	198.3	20.7	20.7	19.3	47.7
	합계	382.5	3,046.8	527.8	49.1	45.9	45.9	99.9



(Unit: Ton/Year)

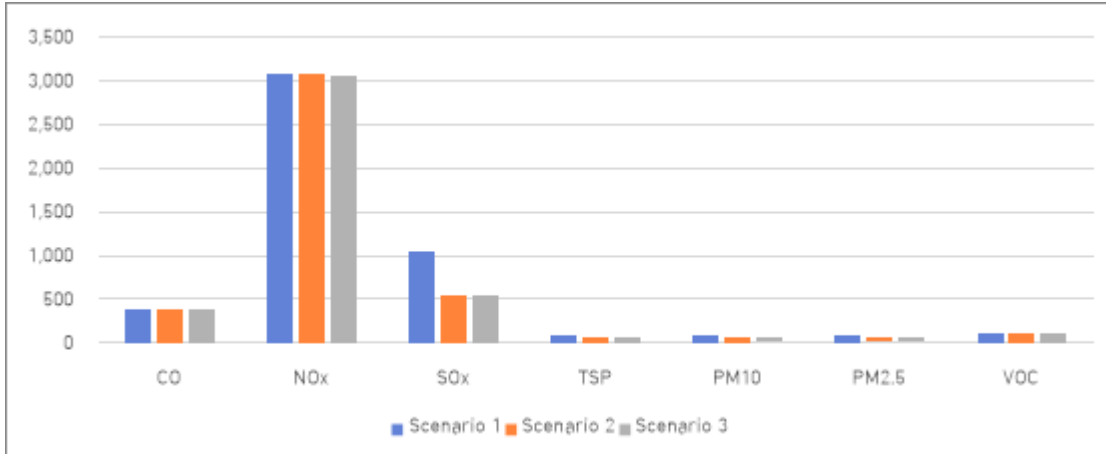


그림 1. 2020년 기준 배출량 분석결과 (항만대기질법 도입 1년차)

연료유 황함유량 규제가 반영된 시나리오 2의 경우 SOx, TSP, PM10, PM2.5에서 배출저감 효과가 두드러지게 발생하였으며 총 4,219톤의 대기오염물질이 발생한 것으로 나타났다. 이는 시나리오1 대비 약 12%의 배출저감이 발생한 결과이다. SOx, TSP, PM10, PM2.5 에서 배출저감효과가 발생하는 원인은 연료유 황함유량 감소 시 해당 물질에서만 배출이 감소하기 때문이다(EEA, 2019.; Browning, 2009).

VSR참여실적과 AMP이용실적을 반영한 시나리오 3에서는 약 4,198톤의 대기오염물질이 배출된 것으로 파악되어 시나리오 2와 비교하였을 때 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한대로 VSR과 AMP의 경우 자율적인 참여로 운영되고 있기 때문에 참가율이 저조한 것이 주원인인 것으로 파악된다. 하지만 VSR과 AMP의 경우 엔진의 부하를 줄이거나 가동을 정지하기 때문에 전체 물질에서 배출 감소효과가 발생한 것으로 분석되었다.

## 2. ECA 도입 2년차(2021년도)

도입 2년차인 2021년도의 경우 2021년 1월부터 12월까지 전체 기간에 대해 규제가 적용되었으며, 규제 내용은 2020년 9월~12월과 동일하게 정박 및 접안 선박에 대해 규제가 적용되었다.

규제가 없는 경우를 가정하여 분석한 시나리오 1의 경우 배출량 합계는 약 4,932톤으로 2020년도보다 소폭 증가한 수치를 보이고 있으며, 이는 증가한 선박통행량에 기인한다. 반면 시나리오 2의 경우 배출량이 약 3,989톤으로 시나리오 1과 비교하여 약 16% 감소한 것으로 나타났다. 이는 2020년도 보다 규제기간이 늘어난 효과로 판단된다. 시나리오3의 경우 배출량이 약 4,318톤으로써 시나리오2와 비교하여 배출량 감소가 미미한 것으로 나타났다. 이는 역시 저조한 VSR 참여율 및 AMP 이용율에 기인한 것으로 판단된다. 2021년도 기준 대기오염물질 배출량 분석 결과는 다음 표 10과 같다.

표 10. 2021년 기준 배출량 분석결과 (항만대기질법 도입 2년차)

단위 : 톤/년

		CO	NOx	SOx	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	VOC
Scenario 1	정박	26.7	214.7	72.3	5.1	5.1	4.7	6.5
	순항	185.2	1,604.5	500.5	38.1	38.1	35.6	61.9
	접안	170.1	1,368.6	459.6	31.8	31.8	30.0	41.4
	합계	382.0	3,187.8	1,032.4	75.0	75.0	70.3	109.8
Scenario 2	정박	26.7	214.7	15.4	2.2	2.2	2.1	6.5
	순항	185.2	1,604.5	250.3	25.3	25.3	23.6	61.9
	접안	170.1	1,368.6	85.9	13.6	13.6	12.8	41.4
	합계	382.0	3,187.8	351.6	41.1	41.1	38.5	109.8
Scenario 3	정박	26.7	214.7	15.4	2.2	2.2	2.1	6.5
	순항	185.0	1,602.6	250.0	25.2	25.2	23.5	61.8
	접안	168.9	1,359.1	85.6	13.5	13.5	12.7	41.1
	합계	380.6	3,176.4	351.0	40.9	40.9	38.3	109.4

(Unit: Ton/Year)

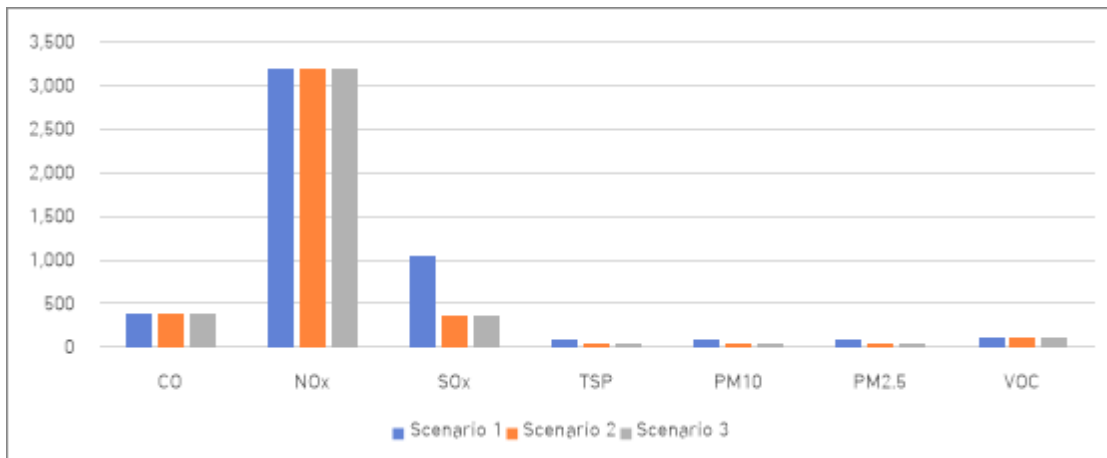


그림 2. 2021년 기준 배출량 분석결과 (항만대기질법 도입 2년차)

### 3. ECA 도입 3년차(2022년도)

2022년 1월부터는 순항선박에 대해서도 연료유의 황함유량 제한을 0.1%이하로 제한하였다.

규제가 없는 경우를 가정하여 분석한 시나리오1의 경우 배출량 합계는 약 5,144톤으로 지속적으로 증

가하는 추세를 보이고 있다. 입항 선박 수는 소폭 감소하였으나, 크루즈 선 등 대형선박의 증가함에 기인한다.

반면 시나리오 2의 경우 배출량이 약 3,989톤으로 시나리오 1과 비교하여 약 22%의 배출저감율을 보이고 있다.

표 11. 2022년 기준 배출량 분석결과 (항만대기질법 도입 3년차)

단위 : 톤/년

		CO	NOx	SOx	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	VOC
Scenario 1	정박	27.9	223.4	75.3	5.3	5.3	4.9	6.8
	순항	174.9	1,448.3	472.8	35.7	35.7	33.3	56.3
	접안	210.3	1,590.9	568.5	39.8	39.8	37.1	51.2
	합계	413.1	3,262.6	1,116.6	80.8	80.8	75.4	114.3
Scenario 2	정박	27.9	223.4	7.5	1.9	1.8	1.8	6.8
	순항	174.9	1,448.3	47.3	13.9	13.0	13.0	56.3
	접안	210.3	1,590.9	56.8	14.5	13.5	13.5	51.2
	합계	413.1	3,262.6	111.7	30.3	28.3	28.3	114.3
Scenario 3	정박	27.9	223.4	7.5	1.9	1.8	1.8	6.8
	순항	174.6	1,445.6	47.2	13.9	12.9	12.9	56.2
	접안	209.1	1,580.8	56.5	14.4	13.4	13.4	50.9
	합계	411.6	3,249.8	111.2	30.2	28.2	28.2	113.9

(Unit: Ton/Year)

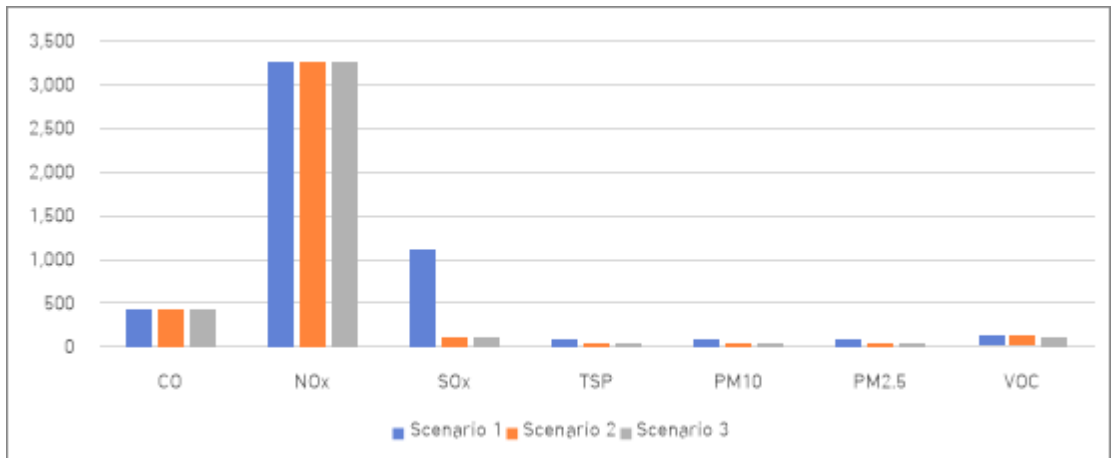


그림 3. 2022년 기준 배출량 분석결과 (항만대기질법 도입 3년차)

시나리오 3의 경우 배출량이 약 3,973톤으로 이는 더욱 강화된 규제의 효과로 볼 수 있다. 2022년도 기준 대기오염물질 배출량 분석 결과는 표 11과 같다.

시나리오2의 약 3,989톤에 비해 배출량 감소가 미미한 것으로 나타났다. 이는 2020년 및 2021년도와 동일하게 저조한 VSR 참여율 및 AMP 이용율에 기인

한 것으로 판단된다.

## VI. 결 론

본 연구는 국내 주요 항만 중 수도권에 위치하고 있는 인천항을 대상으로 항만대기질법 도입에 따른 대기오염물질 배출량 분석을 시행하였다. 우선 연료유 황산화물 규제정책이 도입되기 시작한 2020년부터 2022년까지 3개년도 동안 7종의 대기오염물질(NOx, CO, VOC, SOx, TSP, PM10, PM2.5)배출량이 변화하는 양을 분석하고, 부가적으로 VSR과 AMP의 효과에 대해서도 분석하였다. 분석은 시나리오를 설정하여 시나리오1: 정책이 없는 경우, 시나리오2: 연료유 황함유량 규제만 시행한 경우, 시나리오3: 연료유 황함유량 규제 및 VSR, AMP를 반영하여 분석을 진행하였다.

분석결과 시나리오1의 경우 3개년도 동안 각 4,801톤, 4,932톤, 5,144톤의 대기오염물질이 배출된 것으로 나타났다. 시나리오1의 경우 외부요인(환경규제)을 제외하고, 순수히 선박의 배출량 변화만을 파악하기 위한 분석이다. 입출항 하는 선종, 규모 등의 변화로 인해 정박, 순항, 접안 모두 배출량이 늘고 있는 것으로 분석되었다.

시나리오2의 경우 각 4,219톤, 4,152톤, 3,989톤이 배출된 것으로 나타났다. 연료유 황함유량 규제에 의해 SOx, TSP, PM10, PM2.5 물질의 배출량 감소가 두드러지게 나타나 규제의 효과가 충분히 나타나고 있는 것으로 판단된다.

시나리오3의 경우 각 4,198톤, 4,138톤, 3,973톤이 배출된 것으로 나타났다. SOx, TSP, PM10, PM2.5 이외의 물질에는 큰 저감효과를 보이지 못하고 있는데 이들 물질을 배출저감하기 위해서는 VSR, AMP의 이용확대와 함께 다른 정책 및 규제도 시행되어야 할 것으로 판단된다.

또한 VSR, AMP의 경우 엔진의 부하를 줄이거나 엔진을 정지하는 정책인만큼 모든 물질에서 저감효과를 보이긴 하나, 아직 자율적 참여에 의존하고 있

어 큰 효과를 보지 못하고 있다. 대기오염물질 배출 저감을 위해서는 추후 지속적으로 적용 대상을 늘려 나갈 필요성이 있다. 각 물질별 3년간 배출량 변화는 다음 그림 4와 같다.

본 연구는 국내에서 그 동안 연구되지 못하였던 항만대기질법 도입에 따른 대기오염물질 배출저감 효과분석을 시행하였다. 특히 현재 보유자료를 고려할 때, 적용 가능한 방법 중 가장 정교한 방법을 통해 배출량을 분석함으로써 실무적·학문적인 의미가 있다.

인천항은 타 항만과 달리 우리나라의 수도권에 위치하고 있으며, 인천광역시 또한 우리나라의 광역시 중 인구증가가 예상되는 지역인만큼 대기오염물질의 배출량을 분석하는 것이 더욱 중요하다고 볼 수 있다. 본 연구의 결과는 항만의 대기환경관리와 인천광역시의 대기관리에 있어 기초연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

다만 본 연구에서 수행한 분석을 보다 발전시키기 위해서는 다음과 같은 사항이 보완되어야 될 것으로 판단된다.

첫째, 선박에서 발생한 대기오염물질의 양을 분석하기 위해서 해양수산부 Port-mis, 한국선급 등으로부터 기초자료를 제공받아 분석에 활용하였다. 다만 배출량의 분석에 있어 중요한 자료 중 하나인 선박의 엔진제원자료를 확보할 수 없는 경우가 존재하였다. 이를 해결하기 위해 획득한 자료를 이용하여 선박의 크기를 고려하여 결측치를 추정하였으나 보다 정교한 분석을 위해서는 선박의 제원자료를 확보할 필요가 있다.

둘째, 배출량 산정 방법에 있어 IMO에서 제시하는 방법이 더욱 정교한 방법으로 볼 수 있으나, 자료획득의 한계로 인해 본 분석에는 적용하지 못하였다. 추후 선박의 실시간 이동 자료를 획득한다면 IMO에서 제시하는 방법론을 통해 분석을 시행할 수 있을 것이다.

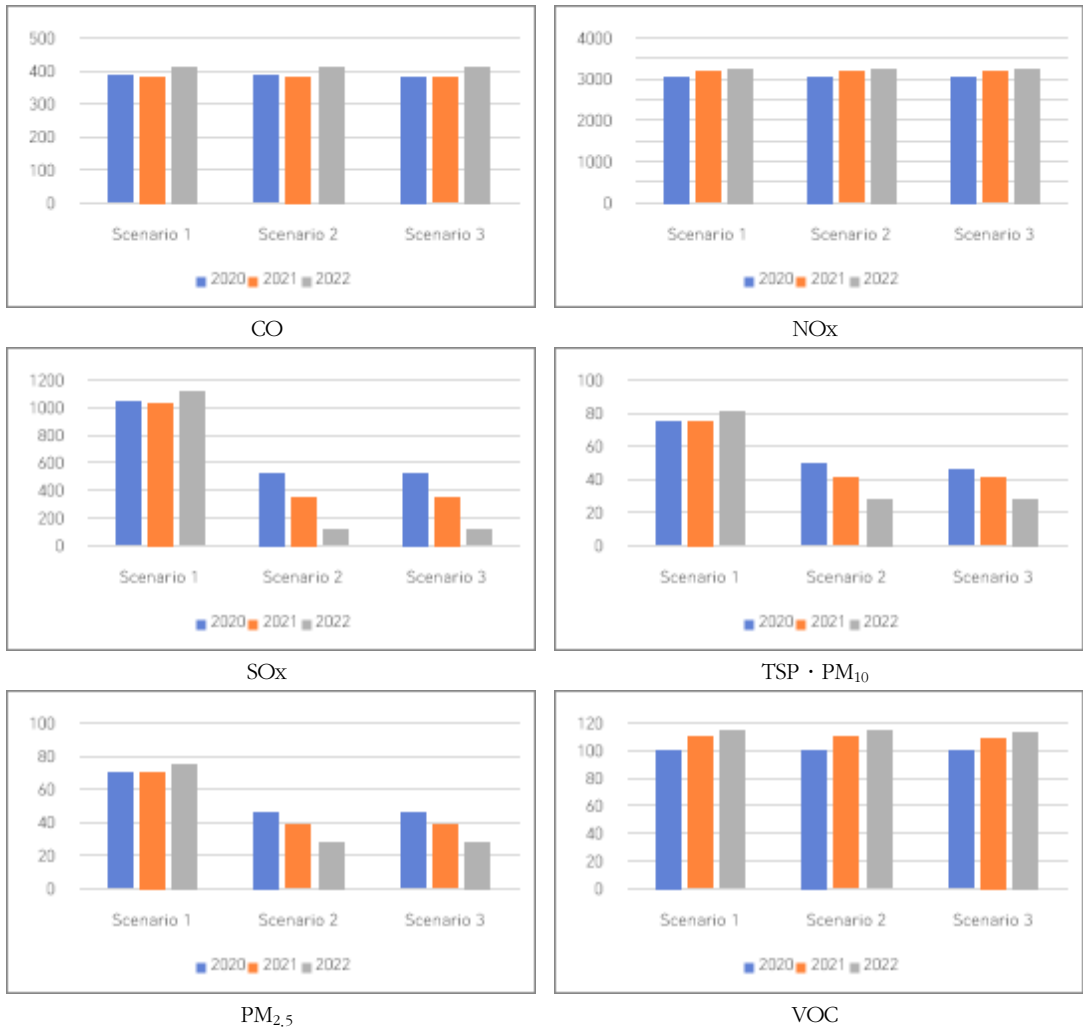


그림 4. 각 물질별 분석 결과

### 참고문헌

- 국립환경과학원(2013), 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람Ⅲ.
- 국립환경과학원(2016), 국내 연근해 선박에 의한 대기오염물질 및 온실가스 배출계수 개발과 배출량 산정Ⅲ, 2016.
- 김대진·배윤경·김상록(2022), 국내 도로부문 오염물질의 공간적 확산을 고려한 대기오염농도 분석방법론 연구, 대한교통학회지, 40(3), 380-399.
- 김소영·권혜옥(2018), 대기확산시뮬레이션 중첩분석을 통한 부산·울산 악취피해영향범위 연구, 한국방재학회 논문집, 18, 83-91.
- 김환성·조민지(2008), 항만의 CO<sub>2</sub> 배출량 산정에 관한 연구, 국항해양만학회 학술대회논문집, 137-139.
- 이민우·이향숙(2016), 선박 배기가스 배출량 및 환경비용 산출에 관한 연구: 부산항을 중심으로, 한국항만경제학회지, 32(4), 15-28.
- 이민우·이향숙(2018), 선박 배기가스의 대기확산 패턴에 관한 연구: 부산항을 중심으로, 한국항만경제학회지, 34(1), 35-49.
- 이정욱·이향숙(2021), 인천항의 대기오염물질 배출량 산정 연구. 한국항만경제학회지, 37(1), 143-157.
- 조정정·법태황·이향숙(2020), An Study on Estimating Cargo Handling Equipment Emission in the Port of Incheon. 한국항만경제학회지, 36(3), 21-38.
- 조정정·윤경준·이향숙(2019), 선박에 기인한 대기오염물질 배출량 산정 연구-광양항과 울산항을 중심으로. 한국항만경제학회지, 35(2), 93-107.
- 한세현·윤종상·김우중·서유희·정용원(2011), 인천항 항만시설에서의 대기오염물질 배출량 산정, 한국 대기환경학회지, 27(4), 460-471.
- 해양수산부(2019), 항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법
- Bai, S., Wen, Y., He, L., Liu, Y., Zhang, Y., Yu, Q., and Ma, W(2020), Single-vessel plume dispersion simulation: Method and a case study using CALPUFF in the Yantian port area, Shenzhen (China). International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(21), 7831.
- Berechman, J., and Tseng, P. H(2012), Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaohsiung. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 17(1), 35-38.
- Chang, C. C., and Wang, C. M(2012), Evaluating the effects of green port policy: Case study of Kaohsiung harbor in Taiwan, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 17(3), 185-189.
- Deniz, C., Kilic, A., and C ivkaroglu, G(2010), Estimation of shipping emissions in Candarli Gulf, Turkey. Environmental monitoring and assessment, 171, 219-228.
- EEA(2016), EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016.
- Ernestos Tzannatos(2010), Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus e Greece, Atmospheric Environment 44, 400-407.
- Fiadomor, R(2009), Assessment of alternative maritime power (cold ironing) and its impact on port management and operations.
- Kalli, J., Jalkanen, J. P., Johansson, L., and Repka, S(2013), Atmospheric emissions of European SECA shipping: long-term projections. WMU Journal of Maritime Affairs, 12(2), 129-145.
- Karl, M., Bieser, J., Geyer, B., Matthias, V., Jalkanen, J. P., Johansson, L., and Fridell, E(2019), Impact of a nitrogen emission control area (NECA) on the future air quality and nitrogen deposition to seawater in the Baltic Sea region. Atmospheric Chemistry and Physics, 19(3), 1721-1752.
- Kim, K., Roh, G., and Chun, K(2019), Analysis of the Emission Benefits of Using Alternative Maritime Power (AMP) for Ships. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 25(3), 381-394.3
- Matthias, V., Bewersdorff, I., Aulinger, A., and Quante, M(2010), The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions. Environmental Pollution, 158(6), 2241-2250.
- Shi, K., Weng, J. and Li, G(2020), Exploring the effectiveness of ECA policies in reducing pollutant emissions from merchant ships in Shanghai port waters, Marine pollution bulletin, 155, 111164.
- U.S. EPA(2009), Current methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories. ICF International Final report to

Environmental Protection Agency.

- Viana, M., Fann, N., Tobias, A., Querol, X., Rojas-Rueda, D., Plaza, A. and Fernández, C(2015), Environmental and health benefits from designating the marmara sea and the Turkish straits as an emission control area (ECA). *Environmental science & technology*, 49(6), 3304-3313.
- Wu, Z., Zhang, Y., He, J., Chen, H., Huang, X., Wang, Y., Yu, X., Yang, W., Zhang, R., Zhu, M., Li, S., Fang, H., Zhang, Z., and Wang, X(2020), Dramatic increase in reactive volatile organic compound (VOC) emissions from ships at berth after implementing the fuel switch policy in the Pearl River Delta Emission Control Area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(4), 1887-1900.
- Yim, S. H., Fung, J. C., and Lau, A. K(2010), Use of high-resolution MM5/CALMET/CALPUFF system: SO<sub>2</sub> apportionment to air quality in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 44(38), 4850-4858.
- Zhang, Q., Zheng, Z., Wan, Z., and Zheng, S(2020), Does emission control area policy reduce sulfur dioxides concentration in Shanghai?, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 81, 102289.
- Zhang, Y., Fung, J. C., Chan, J. W., and Lau, A. K(2019), The significance of incorporating unidentified vessels into AIS-based ship emission inventory. *Atmospheric Environment*, 203, 102-113.
- Zhao, Tingting., Pham, Thaihoang., and Lee, Hyangsook(2020), 인천항 하역장비 대기오염물질 배출량 산정 연구, 한국항만경제학회지, 제36집 제3호, 21-38.

## 향만지역등 대기질 개선에 관한 특별법 도입에 따른대기오염물질 배출량 변화 분석-인천항을 중심으로

이민우 · 이향숙 · 이정욱

### 국문요약

본 연구는 3년간 단계적으로 도입되고 있는 선박 연료유 황 함유량 규제정책의 대기오염물질 배출저감 효과를 분석하고자 한다. 부가적으로 VSR과 AMP의 배출저감 효과도 분석하였다. 분석은 EEA에서 제공하고 있는 NO<sub>x</sub>, CO, VOC, SO<sub>x</sub>, TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>를 대상으로 하였으며, 분석의 공간적 범위는 우리나라 수도권에 위치하여 대기오염에 대한 파급효과가 큰 인천항을 대상으로 하였다. 분석은 다음과 같이 시나리오 1: 정책이 없는 경우 시나리오 2: 연료유 황 함량 규제만 시행하는 경우 시나리오 3: 연료유 황 함량 규제, VSR, AMP를 반영하여 분석하였다.

분석 결과 시나리오 1의 경우 3년의 기간 동안 4,801톤, 4,932톤, 5,144톤의 대기오염물질이 배출된 것으로 나타났다. 시나리오 2는 4,219톤, 4,152톤, 3,989톤이 배출되었고, 시나리오 3은 4,198톤, 4,138톤, 3,973톤이 배출된 것으로 나타났다.

본 연구결과는 향만 대기환경관리와 인천광역시 대기관리의 기초연구로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 인천항, 대기오염물질, 선박 배출량, 미세먼지