2018년 한국항해항만학회 추계학술대회
2018년 11월 8일(목)~9일(금) 경주 더케이호텔

미세먼지와 항만, 4차산업시대의 대응전략

† 이중우

† 한국해양대학교 교수, 한국항해항만학회장

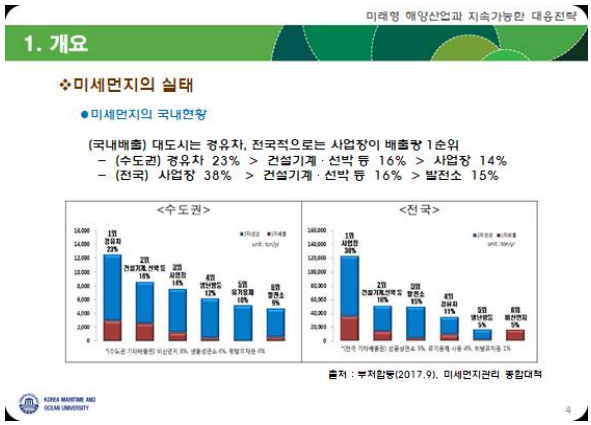
PM and Port, Counter Strategy in the Era of the Forth Industrial Revolution

† Joong-Woo Lee

† Department of Civil Engineering, National Korea Maritime University, Busan 49112, Korea

요 약 : 최근 전 세계적으로 수송수단과 산업시설에서의 배출로 인한 대기오염의 심각성을 강조하고 있다. 특히 항만과 공항에서도 대기오염의 중요성을 인지하고 있고 지역별 대기오염물질 배출 및 대기오염도 현황을 분석하여 각 시설에서의 종합관리방안을 도출하고 있다. 2020년부터 시행되는 국제해사기구(IMO)의 선박에서 배출되는 온실가스 즉, 황성분을 포함한 연소배기가스 중 CO2, SOX,NOX, PM2.5의 배출규제에의 대응과 배출규제해역(ECA)제도 도입에 따른 업계와 정부, 학회의 대비도 빠르게 진행되고 있다. 부산항에서도 항내계류선박과 하역장비에서의 오염물질 배출을 억제하기 위한 대체전력공급(AMP, Cold Ironing)에 대해 대응하고 있다. 본 연구는 도시주민의 건강을 위협하는 미세먼지(PM2.5)의 심각성과 배출가스의 저감을 위한 방안을 소개하고 오히려 이를 해운항만에서의 4차산업 발전의 계기로 대응하도록 하는 방향을 제시하고자 하였다. 산업화 과정에서 필연적인 대기오염을 저감시키는 방안이 새로운 해양산업으로 전환하기를 기대한다.

핵심용어 : 미세먼지, IMO, 대체전력공급, 스크러버, 저황선박연료, 배출규제해역, MARPOL Annex VI, 인류건강



† 교신저자 : 종신회원, jwlee@kmou.ac.kr 051)410-4461

1. 개요

❖항내 대기 오염 실태 •Source : SustainableShipping.com

➢해운산업으로부터 배출
•CO_2 항공산업보다 2배수준 배출
•SOx 전세계자동차 1950억 배출 (크루저선박 1척당 경유차 350~500만대 배출수준)
•IMO : 해운분야 11억톤 CO_2, 1600만톤 SOx → 현재도 증가추세
•12,000TEU Container → 350MT/일 중유사용(2.7%황함유) → SOx 19톤/일 발생
(300일/년 가동시 SOx 5,700톤/년)
→ 영국에서 3,500만대 차량 1만마일/년운행 기준(년평균/대 118g 황 4,130톤/년)

➢근본적 차이 (사용연료)
저황선박연료 – 1,000ppm황 (0.1%황)
차량연료 – 30ppm황

➢IMO 권고 – Shore power
Hamburg – LNG fueled Barge power supply
Antwerp – 항세 30% 감면 (보기연료 Cold ironing으로 선택)
상해–AMP 적용(크루저선배출 상해 8~10% of PM2.5차지)
오염물질 크루저선 : 차량=1:3,000~5,000대 (?)

➢배출가스 저감장치 사례
Scrubbers세정집진장치
EGCS(Exhaust gas clearing systems)배출가스소진장치

2. 항만개발에 따른 환경영향

❖항만에서의 환경영향

●항만환경시설에서의 영향
●항만건설과정에서의 영향
●항만운영으로 인한 영향

① 선박 통항 및 오염물 배출 :
선박의 빌지 및 평형수(ballast water), 폐유, 하수, 기타 쓰레기의 해상투기
연료유, 윤활유, 유성 액체의 누출
선박의 연소가스, 연기의 배출
→ 해양수질, 해양 및 연안생태계, 대기 오염에 영향
→ 해양레저활동과 관광산업에 부정적 영향

② 화물취급 및 연안 산업활동 :
저장된 원자재의 유실
산적화물 처리시의 유출
바람에 의한 먼지 발생
사고에 의한 각종 유해.유독 물질의 유출

→ 수질 악화, 해저오염, 해양 및 연안 생태계에 악영향, 대기질 변화, 소음 및 진동의 발생

2. 항만개발에 따른 환경영향

❖ 개발 · 이용 행위별 환경영향 검토 대상

2. 항만개발에 따른 환경영향

❖항만에서의 환경영향

• 항만에서의 행위와 환경에 미치는 장단기적 영향

구분		대기질		수질		토질	폐기물	지하수질		남조경관계		해양생태계	
		단기영향	장기영향	단기	장기	단기	장기	단기영향	장기영향	단기	장기	단기	장기
차량수송	이동	상	중	중	미	미	미	미	미	중	미	중	미
	보관	중	미	중	미	중	미	미	미	중	미	중	미
지반 유지보수		미	미	중	중	중	중	중	중	중	중	중	중
화물 취급	산화물	상	중	미	미	중	미	미	미	중	중	중	중
	탄화물	중	중	중	미	중	중	중	중	중	중	중	중
	탄화물	미	미	중	미	미	미	미	미	미	미	미	미
	테라이트	미	미	미	미	미	미	미	미	미	미	미	미
	보크사이트분말	중	미	중	미	미	미	미	미	중	중	중	중
화학제품 보관 및 취급		중	중	중	미	중	미	중	미	중	중	중	미
연료	선박	상	중	중	미	중	미	중	미	중	중	중	중
	보관	중	중	중	미	중	중	중	미	미	미	미	미
	항만	중	중	중	미	중	미	중	미	중	중	중	중
페인트 작업	가를	상	미	미	미	미	미	미	미	미	미	미	미
	항공	상	미	미	미	미	미	미	미	중	중	중	중
	서비스항만	상	미	미	미	미	미	미	미	미	미	미	미
항만 제거		상	미	중	미	미	미	미	미	중	미	중	미
공공이용 및 레크리에이션	크루즈선박접안	중	중	중	미	미	미	미	미	중	미	중	미
	어선 이용	미	미	중	미	미	미	미	미	중	미	중	미
	요트정박	미	미	중	중	미	미	미	미	중	미	중	미
	공공 레크리에이션	중	중	중	미	미	미	미	미	중	미	중	미
물도 유지보수		미	미	중	미	중	미	미	미	중	미	중	미
선박폐수 배출	물환수를 필터	미	미	상	미	미	미	미	미	중	중	중	중
	평형장소	중	미	상	미	미	미	미	미	중	미	중	미
	빌지필터	미	미	상	미	미	미	미	미	중	미	중	미
	하수	미	미	중	미	미	미	미	미	중	미	중	미
고형 폐기물	선박폐기물	미	미	중	미	미	미	미	미	중	미	중	미
	화재폐기물	미	미	중	미	미	미	미	미	중	미	중	미
장비 유지보수		상	미	중	미	중	미	미	미	중	미	중	미
선박 유지보수		중	중	중	미	중	미	미	미	중	미	중	미
사업계획		중	중	중	미	중	미	미	미	중	미	중	미
선박배기가스		중	중	미	미	미	미	미	미	미	미	미	미

2. 항만개발에 따른 환경영향

❖항만내 오염환경인자의 특성

➢항내 환경오염 3요소

1. 대기오염
•사람의 건강에 매우 위험하게 작용하는 부유물질형태의 먼지와 가스입자요소
•항내 먼지 : 벌크운반선에서 적양하작업
•선박의 디젤엔진 배출가스, 항만 및 인근역에서 하역 및 수송기계 배출가스
•NOx, SOx, CO, CO_2, PM(PM_{10})
•VOCs(휘발성유기화합물, 벤젠, 포름알데히드, 톨루엔)
VOCs, NOx + 태양광 광합성 → O_3, SOx + 수증기 → 산성비
2차반응 (초미세먼지, PM2.5)생성, 심한 손상초래

2. 수오염
•항내 유류 및 유류쓰레기 배출, 유조선 충돌 유출사고 및 유류하역유출 사고
•선박유지보수관리: 페인팅, 방오도료에 의한 해양환경에 부정적 영향

3. 소음 및 진동
•선박 및 항내 일상 하역수송장비활동에 의해 발생 → 거주지역에 영향

2. 항만개발에 따른 환경영향

➢해양활동 중 항만운영으로 인한 극적인 환경영향요소

✓물류, 에너지공급, 교통체증

•인구밀도가 높은 항만도시에서 거주하고 있는 시민의 건강과 직결됨
•항만활동으로 인한 유해한 영향을 저감시키기 위해 규정이 도입됨
•해양분야는 상대적으로 환경영향문제에 대해 별로 다루지 않았던 것은 유해한 엔진배기가스가 거주지역으로부터 떨어져 있고 산업체, 서비스, 도로교통 등의 활동보다 덜 위험한 것으로 간주되었기 때문 (항만크레인 작업자-선박배기가스노출)
•해양/항만도시 – 대규모선박 및 다수의 선박이 동시에 운영시 보다 심한 환경적 영향을 나타내며 결과적으로 지역주민의 건강에 심각한 손상을 가져오는 주요 위험군으로 작용함.

→ 항만운영분석을 통해 현행 선박연소가스배출기준을 준수하면서 물류 및 경제적으로 지속가능한 상태 유지 목표

2. 항만개발에 따른 환경영향

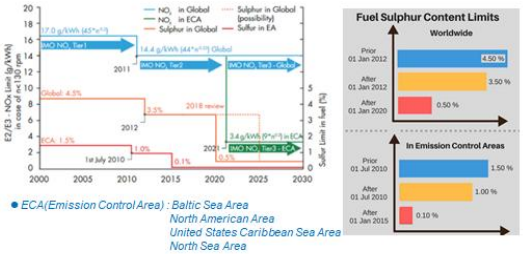
❖항내활동의 환경적 영향, 문제분석과 가능한 해법

•환경문제는 인간활동의 모든 부분과 관련되어 있고 인류보건에 극적인 결과를 피하기 위해서는 엄격한 결정을 필요로 함
•특히, 해양분야에서 주로 항만과 가까운 큰 해양도시는 근래 미세기후영향으로 위험에 노출되어 있음을 인지함
•해양활동으로 인한 환경영향문제에 대응하기 위한 지속가능한 항만운영 및 대응책이 필요함.

3. 대기오염 국제규제와 대응 방안

❖선박배기가스배출 국제기준

➢*IMO* 2020 규제 *MARPOL ANNEX VI*



● *ECA(Emission Control Area) : Baltic Sea Area*
North American Area
United States Caribbean Sea Area
North Sea Area

3. 대기오염 국제규제와 대응 방안

❖ 선박연료의 적용기준과 대기오염 대응 방안

➢적용 규정

- 환경문제관련 규정 : MARPOL 73/78 ANNEX VI 부속서 및 개정
- 황배출규제구역 SECA(2006발효), 영국해협, 발틱해 (ECA)대도시 항만구역내 업격한 연료의 황함유(SECA 0.1%이내),기타 0.5%
- 엔진의 NOx 규제-연소온도에 좌우 (컴프,터보기기,점화시간 조정), RPM조정
- NOx, SOx, PM(PM_{10}), CO_2, 관측(측정)시행 130~2,000
- 황은 전세계 많은 지역에서 0.1%로 감축 (저황연료공급이 불가능한 경우 ANNEX VI에 SOx 최대 6g/kWh로 줄이는 설비를 사용토록 함) (연료소비계수, SFOC)

➢대응 방안 : 항내 연소 연료의 질과 배출 제어

- 연료소모량의 절감으로 엔진배기가스량 감축
- 저급연료를 사용하는 재래엔진 → 신세대엔진으로 교체
- 연료특성을 변화시켜 청결한 사용에 적응시킴 → 엔진배기개선, 연료유개선
- 연료유 선택 : 대양(F/O), 항내 (D/O) → 선내 혼크분리
- 저황연료 보급이 범용화 되어 있지 않음 → 대체 수소첨가 메탄 연료로 디젤엔진에서 NOx 배출 저감가능하나 엔진배치 등 실용화에 장기간 소요됨 (배기가스내 질산저감을 위한 시스템을 엔진에 장착 적정제어-scrubbers)
- 저황연료로 SOx 배출 저감 (벙커C유보다 1.5배 비쌈)

3. 대기오염 국제규제와 대응 방안

❖대기오염과 건강

➢배기가스 인류건강 및 생태계 영향

● 세계보건기구 WHO 분류

- SOx에 노출로 제한적 상해
  - 0.06mg/m³ 기관지, 폐렴
  - 0.3mg/m³ 노소약자 호흡기손상
  - 0.8~2.6mg/m³ 신경세포영향(가스마스크착용, 대비)

- SOx에 노출로 중증 상해
  - 3mg/m³ 호흡 및 심장박동 상승
  - 25mg/m³ 눈, 코, 목, 심장 자극
  - 5,000mg/m³ 산유독가스 질식, 심혈관계 동괴

- NOx에 노출
  - 50~150mg/m³ 단시간내 폐를 위협
  - 100mg/m³ 호흡기관에 심각한 손상
  - 300~400mg/m³ 치사량

4. 항내 선박누적량으로 인한 영향

❖많은 선박이 동시에 재항하는 경우 – 문제가 되나?

➢누적량으로 인한 영향

1. 유럽항만

- 많은 선박이 동시에 계류하면서 작업에 종사하는 경우 (크루저선 – 승객, 식사, 오락 및 유한에 대규모 전기 사용) → 전기, 냉온방시스템, 복잡한 제어시스템 등 에너지 사용
- 선박관리 및 선체시스템(밸지, 발라스트, 평형수 유지), 안전시스템, 엔진콤장비, 화물 및 여객 운반 등에 전력 소요
- 발전 : 재래선박(본선엔진가동, 디젤엔진), 크루저선(추진력+보기 디젤엔진)
- 본선소요 전기에너지 → 정박기간 중 전력소모량 (LF하중계수 사용) → LF = (평균사용출력/총본선출력용량)
- 항내에서 과도한 전력사용: 크루저선, 평카

※Load Factors (LF)

Car carrier	0.24	Ocean tug/tow	0.22
Bulk carrier	0.22	Reefer	0.30
Container	0.17	RoRo	0.34
Cruise	0.64	Tanker	0.67
General cargo	0.22	Others	0.22

4. 항내 선박누적량으로 인한 영향

❖많은 선박이 동시에 재항하는 경우 – 문제가 되나?

➢누적량으로 인한 영향

2. 계산 예 (대형 크루저선 6척이 동시 계류한 상태)

- 선내 서비스 제공 : 선박 당 10~15MW (하중계수 0.64, 11MW)
- 발전기 총 공급전력 45MW (LF 하중계수 사용)

- NOx (발전기 가동 @900RPM) → 9.2g/kWh
- SOx 최대 6g/kWh (저황연료에 대한 대체기준)

→ 크루저선박은 비교적 가까이에 정박하므로 배출유해물질농도가 매우 높음

- 총 공급전력 45MW인 경우의 배출가스
  - NOx (0.41t/h)
  - SOx (0.27t/h)

- WHO PM2.5 권고기준 10㎍
  - 부산→ 2017.9~2018.8 부산항내 PM2.5 초과일 64일: 평균 27.6㎍
  - 부산시내 41일: 평균 24㎍

5. 항만 미세먼지와 4차산업 대응

❖ 4차산업 대응 : 무엇을 하여야 하는가?

➢문제해결이 쉽지 않음

대규모 항만에서 배출가스의 제한을 위한 분명한 해법은 정치가, 기술자, 부두 및 선박 운항자와 긴밀한 협조체제가 필요함

➢부분적이나 중간단계 해법

- 대규모 항만에서는 장기간 소요되는 법세계적 해법의 적용은 불가능하며 기다리기 곤란함. → 즉각 해운부분에서 개선을 필요로 하며 어떤 비용을 들여서라도 해결하여야 함.
- 유일한 해법 선택 육상전원사용(Cold Ironing, AMP): 육상에너지원 → 풍력, 태양력, LNG, 바이오매스

➢항만계획단계 해법

1) 가능하면 대형선박을 분리하여 계류
2) 계류부두를 외해측으로 이동
3) 육상전원공급시설확충 (7~8MW급 트레일러크기 발전기-LNG, 저황연료사용, 고도청정연료 사용-수소, 메탄, 수소메탄화합물)
4) 해안부근 선속 감속
5) 항만내 육상수송차량 속도 감속

5. 항만 미세먼지와 4차산업 대응

❖ 4차산업 대응 : 무엇을 하여야 하는가?

➢가능한 해법

1) 저황연료, 생태연료 사용 (벙커C유보다 1.5배 비쌈, 엔진고장 잦음)
2) 저연료소비계수를 가진, 청정연료 사용에 적합한 새로운 엔진의 사용
3) NOx 저감장치 장착 (SCR, Selective Catalytic Reduction, 환원법, N_2,H_2O) (광간, 비용10~60억,도청) (EGR, Exhaust Gas Recirculation, 배출가스재순환) SOx, PM 저감장치 장착 (Scrubbers) EGCS(SCR+Scrubber)
4) Cold Ironing
5) 노후장비의 항내반입 제한
6) 선속, 장비속도의 제한
7) 생태연료를 사용한 모바일장비로 계류선박에 전력의 공급

➢생태적 지속가능과정

- 육상전원사용(Cold Ironing, AMP): plug-in mode
  디젤발전기를 끄고 육상전력공급지점에서 계류선박에 전력을 공급하는 시스템으로 정박기간 중 배출가스가 없음 (전력네트워크 구축)
  → (+과거 80년대) 여객선에 적용됨, (현대) 대형크루저선에 적합

- 문제점
  1) 육상전원연결의 표준화 (항만의 특정환경, 상업적특성, 투입선박종류)
  2) 평가방법(중장기기간 해상교통, 특정항만에서의 환경오염 등)
  3) 항의 부두배치(항내 기존전력망과 본선전력망과의 연결)경제적, 규모의 문제 (MV flexible cable, 6~20kV)

5. 항만 미세먼지와 4차산업 대응

❖ 4차산업 대응 : 무엇을 하여야 하는가?

➢가능한 해법 : 조선산업

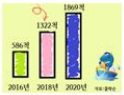
○ Scrubbers - Global Marine Scrubber

개방형 스크러버(Open Loop Scrubbers)
폐쇄형 스크러버(Closed Loop Scrubbers)
하이브리드형 스크러버(Hybrid Scrubbers)

- 국내 SK해운 VLCC 1척에 장착
- 이탈리아 핀칸티에리(Fincantieri)사: Viking시리즈에 장착 2019-2027 크루저선 10척 장착

탈황장치를 탑재하고 운항하는 선박만이 0.5%m/m 이상의 황 함량의 연료유를 선박에 탑재할 수 있다.

- 해외 – Wartsila, Alfa Laval, Yara Marine Technologies
- 시장 – 2017년 9억 2749만 달러에서 2022년 61억 369만 달러로 연평균 45.8% 성장할 것으로 전망



(신규선박발주예상)

➢클락슨리서치(Clarksons Research) :
- 2017년 기준으로 스크러버를 장착한 선박은 300여척으로 추정
- 대형 선박 특히 크루즈선을 중심으로 빠르게 확산되고 있음
- 2020년까지 대략 6만에서 9만 척의 선박이 잠재적으로 스크러버 설치 대상 선박으로 추산됨
- 제한된 제조 및 작업 능력을 고려할 때 2020년까지는 최대 2,000척, 2025년까지는 7,000~10,000척 까지 설치가 가능할 것

6. 요약 및 결론

❖요약

➢ 무엇을 하여야 하는가? (대응전략)

▪ 가능한 해법 – 생태적 지속가능한 과정

- 육상전원사용(Cold Ironing, AMP): plug-in mode
- 전력공급방법 – ICT 기술접목
  1) 태양광, 풍력, 바이오매스, 축전지, 에너지 저장혁신시스템
  2) 전력/통신 병행 – 스마트그리드 (마이크로 그리드) 시스템

❖결론

➢많은 선박이 동시에 부두계류로 엔진사용 → 제한구역내 대규모 유해물질 배출 (보건, 안전에 위협)

➢대형크루저선의 경우 지명적 → 기술적 진보에도 고출력엔진/고출력전력 공급으로부터 대규모배출가스 발생

➢청정연료사용하는 신규엔진개발, 외부발전기 대체, 배기가스감축을 위한 장비장착

➢가장효율적인 방법 : 육상전원사용(Cold Ironing, AMP): plug-in mode → R&D 통한 평가, ICT기술접목 필요

1. 인류의 건강에 필연적 2. 효율적운영 및 경제적 편의성 고려