



선박 기인 대기오염물질 현황 및 저감 기술 소개

박준성¹·함승호^{1,†}·강다영²·박희연²·박종관²
창원대학교 조선해양공학과¹
창원대학교 환경에너지공학과²

Current Status of Air Pollutants from Ships and Reduction Technologies

Jun-Seong Park¹·Seung-Ho Ham^{1,†}·Da-yeong Kang²·Hee-Yeon Park²·Jongkwan Park²
Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Changwon National University¹
Department of Environmental Energy Engineering, Changwon National University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

There is a lot of concern around the world about air pollution from ships. The majority of air pollution from ships comes from fuel combustion. The combustion process produces various air pollutants such as carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxides (NO_x), sulfur oxides (SO_x), and particulate matter (PM), each of which has adverse effects on people and is a major environmental problem. To prevent this, the International Maritime Organization (IMO) has strengthened the regulation of pollutant emissions through the Convention for the Prevention of Marine Pollution. This paper discusses the types of air pollutants emitted by ships, their current status, and the latest technologies to reduce emissions of NO_x and SO_x.

Keywords : Air pollution(대기오염), Reduction technology(저감 기술), Nitrogen oxide(질소산화물), Sulfur oxide(황산화물)

1. 서론

최근 전지구적인 기후 변화의 원인으로 환경 오염에 대한 관심이 증가하면서, 선박의 운항 중 발생하는 대기오염에도 많은 관심을 보이고 있다. 선박에서 배출하는 대부분의 대기오염물질은 연료유 연소과정에서 나타나게 된다. 선박이 연간 소비하는 연료유는 약 350만 BD(Barrel/day)로 추정되는데, 이 중 약 80%가 벙커C유이다. 선박 운항 중 사용할 전기를 생산하거나 동력 생성을 위해 기존 선박은 벙커C유를 연료로 사용해왔다. 최근에는

용도에 따라 경유와 중유를 혼합시켜 선박용 연료로 사용한다.

하지만 연료유 연소과정에서 이들 연료는 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 미세먼지(Particulate Matter) 등의 유해물질을 배출한다. 국가 미세먼지 정보센터의 자료에 따르면 우리나라 선박이 일산화탄소 11만 6,243톤, 질소산화물 15만 4,404톤, 황산화물 1만 5,439톤, 미세먼지 1만 6,762톤을 배출하고 있다고 밝혔다 (Lee et al., 2019). 이러한 유해 물질은 호흡기 질환을 유발하고, 산성비의 원인이 되어 환경 오염에 많은 영향을 끼치게 되며, 지구 온난화의 주범으로 인식되고 있다. 이러한 원인 때문에 IMO는 해양오염 방지 협약을 통해 오염물질 배출규제를 강화했다. IMO 2020을 통해 선박 연료의 황산화물(SO_x) 함유량 기준을 기존 3.5%에서 0.5%로 낮췄다. IMO 2020에서 SO_x 규제 대상으로 지정한 선박은 전 세계 공해상에 있는 모든 선박이다. 우리나라도 IMO 규제를 반영해 2020년 1월에 [항만 지역 등 대기질 개선에 관한 특별법]을 시행해 배출규제해역에서 선박 배출 때문에 일어나는 대기오염을 관리하기 위해 일반해역의 0.5%였던 선박 연료 황 함유 기준을 0.1%로 낮췄다. 하지만, 이러한 규제에도 불구하고 전 세계 선박 이산화탄소의 배출량은 오히려 4.9% 증가한 것으로 나타났다 (EDGAR, 2022). 이는 선박의 항해 거리와 항해 속도 증가 및 항구 혼잡이 원인으로 파악되고 있다. 가스선의 배출



Fig. 1 LNG carrier
(URL : <https://www.hanwhaocean.com/pub/business/business010201.do>)

량이 가장 많이 증가하였고, 컨테이너선과 벌크선 배출량이 그 뒤를 따랐다. 전 세계 석유 수요가 회복됨에 따라 유조선 선단도 CO₂ 배출량을 증가시켰다 (Marinebenchmark, 2020).

한편, 유럽의 27개국을 대상으로 한 조사에 따르면 자동차에서 배출되는 대기오염물질의 배출량은 감소하는 추세를 보이고 있지만, 선박에서 배출되는 대기오염물질의 양은 증가하는 추세를 나타내고 있다. 또한 자동차나 선박 등에 의해 배출되는 대기오염물질 중 NO_x와 SO_x는 높은 비율을 차지하고 있으며 2000년부터 2020년까지의 기간 동안 NO_x와 SO_x의 배출량은 약 40% 정도 증가하였다.

따라서 본 논문에서는 선박에서 배출되는 대기오염물질 종류 및 배출 현황과 선종, 유종별 배출하는 오염물질에 대해 다루고, NO_x와 SO_x 배출량을 감소시키기 위해 현재까지 개발된 저감 기술에 대해 살펴보려고 한다.

2. 선박 대기오염물질

2.1 선박 대기오염물질 종류

국내에서는 1999년부터 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), TSP(total suspended particles), 10µm 이하 크기 입자의 물질을 말하는 PM10, VOCs, NH₃ 7개의 대기오염물질을 선정하여 배출량을 산정하기 시작하였으며, 2011년에는 PM2.5, 2014년에는 BC(Black Carbon)이 추가되어 2015년부터 9종의 물질을 국가통계로 공표하고 있다 (Lee et al., 2020).

일산화탄소는 무색, 무취의 유독성 가스로서 주로 연료가 불완전하게 연소할 때 생성된다. 이 가스의 주요 원천은 수송 부문인데, 이때의 일산화탄소는 인체에 부정적 영향을 미친다. 혈액 순환 시 산소를 운반하는 중요한 역할을 하는 헤모글로빈을 카르복시헤모글로빈으로 변성시켜 산소 운반 능력을 저하한다.

질소산화물은 고온에서 연료가 연소 될 때 산소와 반응하여 생성되는 질소와 산소의 화합물 또는 혼합물을 말한다. 유해성이 드러난 NO(Nitric Oxide), NO₂(Nitrogen Dioxide), N₂O(Nitrous Oxide)를 NO_x라고 일컫는다. 연소 온도가 높을수록 다량 생성되며, 주로 NO와 NO₂가 생성되는데 이 중 NO의 발생량이 90% 이상을 차지한다.



Fig. 2 Ships emitting air pollutants
(URL : <https://safety4sea.com/governing-pollution-from-ships/>)

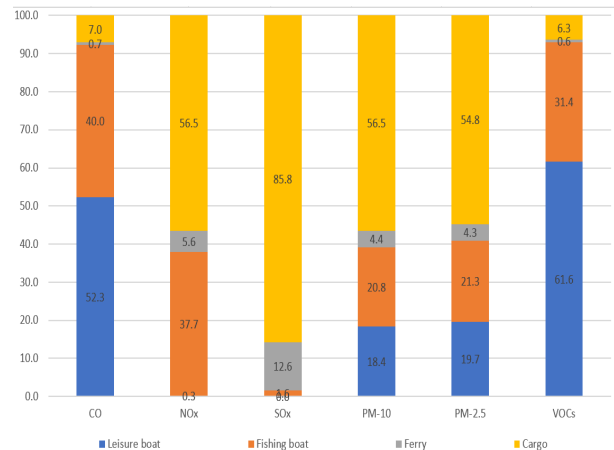
황산화물은 질소산화물과 같이 연료가 연소 될 때 발생한다. 유황 성분을 포함하고 있는 석유나 석탄 등과 같은 화석연료가 연소 될 때 발생하며, SO, SO₂, SO₃, SO₄, S₂O₃ 등의 형태로 존재한다. 이들 중 SO₂가 약 95%를 구성하고 SO₃가 나머지 대부분을 구성하고 있는데, SO₂와 SO₃가 대기 중에 존재하게 되면 산성비를 발생시키며, 건축물의 부식을 가속할 수 있다.

PM10은 미세먼지 입자의 직경이 10 마이크로미터 이하인 입자를 의미하며, PM2.5는 미세먼지 입자의 직경이 2.5 마이크로미터 이하인 입자를 나타낸다. 미세먼지의 크기가 작을수록 몸속 더 깊숙이 파고들게 되어 호흡기계 질병을 일으킨다.

2.2 선박 대기오염물질 배출 현황

국내 대기오염물질 발생량 중 선박에서 발생한 대기오염물질 총량은 116,528ton으로 국내 대기오염물질 전체 배출량의 16.4%로 나타났다. 물질별 발생량은 NO_x > CO > VOCs > SO_x 순이다. NO_x의 경우에는 전체 배출량 대비 16.4%, SO_x는 8.8%, 미세먼지(PM10/PM2.5)는 20.0%를 차지하고 있다.

또한 Table 2에서 2020년 비도로 이동오염원 부문의 대기오염 배출량을 나타내었는데, 비도로이동 오염원 중, 선박은 59.0%를



*출처: National Fine Dust Information Center, 2020. Statistics on air pollutant emissions
Fig. 3. Ratio of total air pollutant emissions by ship type

Table 1. Amount of air pollutant emission from vessel (단위 : ton / yr)

	CO	NO _x	SO _x	TSP	PM10	PM2.5	BC	VOCs	NH ₃	Sum
Total	711,399	929,227	180,157	392,351	146,733	58,558	990,629	261,207	11,945	368,2205
Non-road mobile source	184,386	295,606	16,468	16,706	16,703	15,493	6,736	65,486	120	617,706
Vessel	116,528	157,448	15,774	8,834	8,834	8,254	1,153	47,912	14	364,751
Compared with total (%)	16.4	16.9	8.8	2.3	6.0	14.0	0.1	18.3	0.1	9.9
Compared with non-road (%)	63.2	53.3	95.8	52.9	52.9	53.3	17.1	73.2	11.6	59.0

*출처: National Fine Dust Information Center, 2020. Statistics on air pollutant emissions

Table 2. Non-road mobile pollutant management
(단위 : ton/yr)

	Railway	Ship	Aviation	agricultural machine	Construction Equipment	Sum
CO	1,945	116,528	5,504	6,608	53,801	184,386
NOx	4,757	157,448	5,647	15,135	112,618	295,606
SOx	121	15,774	503	4	66	16,468
TSP	308	8,834	64	1,253	6,246	16,706
PM10	308	8,834	62	1,253	6,246	16,703
PM2.5	284	8,254	57	1,153	5,746	15,493
BC	219	1,153	44	889	4,432	6,736
VOCs	780	47,912	403	1,795	14,595	65,486
NH ₃	9	14	-	50	48	120
Sum	8,731	364,751	12,284	28,140	203,797	

차지하며, 특히 SOx의 경우에는 전체 SOx 합계 대비 95.8%로 비도라이딩 오염원 대부분을 차지하여 IMO 2020 황 함유량 규제가 필요함을 명확히 알 수 있다. 그 외에 다른 물질도 대부분 50% 이상의 점유율을 차지하고 있어, 이들 물질의 배출 규제가 필요함을 나타낸다. 또한 선박에서 배출되는 대기오염물질의 배출량이 건설기계 배출량과 비슷한 수준을 보여 선박이 주요 배출원임을 확인할 수 있다.

2.3 선종 별(유종 별) 배출하는 오염물질

선종별 대기오염물질 발생량 현황(Table 3)을 살펴보면, 발생량은 화물선>여객선>레저선 순으로 나타났다. 국내 및 국제 입출항 화물선은 일반적으로 대형선박 중심으로 운영되며, 주로 bunker C유 같은 중질유를 연료로 사용한다. 대형선박은 고출력 엔진을 갖추고 있어, 대기 오염 물질 배출량이 가장 많은 편이다. 여객선과 레저선의 경우에는 전체 선박 대비 34.8%, 26.5%의 점유율을 보이며 화물선에 못지않은 발생량을 나타낸다 (Lee et al., 2019).

2020년을 기준으로 선박 배출량을 산정한 결과 CO 116,243ton/yr, NOx 154,404ton/yr, SOx 15,439ton/yr, PM10 8,663ton/yr, PM2.5 8,099ton/yr, VOCs 47,807ton/yr로 분석되었다. Table 3

Table 3. Pollutants emitted by vessel type (단위 : ton/yr)

	CO	NOx	SOx	PM10	PM2.5	VOCs	합계
Leisure ship	60,799 (52.3%)	413 (0.3%)	2 (0.0%)	1,593 (18.4%)	1,593 (19.7%)	29,451 (61.6%)	95,523 (26.5%)
Fishing	46,465 (40.0%)	58,153 (37.7%)	247 (1.6%)	1,799 (20.8%)	1,724 (21.3%)	15,031 (31.4%)	125,574 (34.8%)
Passenger ship	805 (0.7%)	8,578 (5.6%)	1,949 (12.6%)	379 (4.4%)	346 (4.3%)	300 (0.6%)	12,795 (3.5%)
Cargo ship	8,174 (7.0%)	87,260 (56.5%)	13,242 (85.8%)	4,892 (56.5%)	4,437 (54.8%)	3,024 (6.3%)	126,572 (35.1%)
Sum	116,243 (100%)	154,404 (100%)	15,439 (100%)	8,663 (100%)	8,099 (100%)	47,807 (100%)	360,464 (100%)

*출처: National Fine Dust Information Center, 2020. Statistics on air pollutant emissions

을 살펴보면 선박 배출 오염물질 중 CO와 VOCs는 레저선에서 각 60,799ton/yr와 29,451ton/yr의 배출량을 차지하고 있는 것으로 나타났고, NOx, SOx, PM10, PM2.5의 경우에는 화물선에서 높은 배출량을 나타내었다. Fig. 3을 살펴보면 총배출량 중 레저선은 CO 52.3%, VOCs 61.6%를 차지하며, 화물선은 NOx 56.5%, SOx 85.8%, PM10 56.5%, PM2.5 54.8%를 차지한 것을 알 수 있다.

3. 배출 저감 기술 현황

배출 저감 기술이란 대기오염의 원인이 되는 가스 또는 입자상 물질의 배출 자체를 억제시키거나 대기오염물질이 배출된 후에 제거하는 기술을 모두 일컫는다. 최종적인 목적은 사람의 건강 또는 환경에 미치는 위험과 재해를 최소화하는 데에 있다.

기존 관련 보고서와 연구 결과를 종합하여 보면 대기오염물질 배출 저감 기술 분류 기준으로 제시한 것과 마찬가지로, 선박 배출 대기오염물질 저감 기술 또한 처리 공정을 기준으로 하여 Table 4와 같이 전처리 기술과 후처리 기술로 분류할 수 있다. 전처리 기술은 연료 내 황 함유량을 낮추거나 청정 연료를 사용하는 등으로 하여 대기오염물질의 배출을 줄이는 기술이며, 엔진으로부터 배출되는 오염물질들의 제거 기술들은 후처리 기술로 분류한다.

3.1 황산화물(SOx) 저감 기술 현황

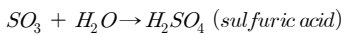
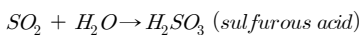
황산화물은 연료에 포함되어 있는 황성분과 산소가 연료의 연소과정에서 반응하여 생성되기 때문에 연료의 성분 중 황을 제거하는 전처리 방법과 수분과 황의 반응성을 응용하여 해수를 이용한 습식 스크러버를 이용한 후처리 방법이 선박에서 주로 사용되고 있는 기술이다. 전처리 방법은 선박의 연료유를 중유에서 저유황유로 전환하는 방식인데, 이는 저유황유의 상대적으로 높은 단가로 인해 선박 운용 비용이 증가하는 단점이 있으며, 선박의 연료 공급 시스템과 엔진을 저유황 연료에 맞도록 개조해야 하는 추가적인 요구사항이 발생하게 된다. 따라서 조선 분야와 해운

Table 4. Classification of ship air pollutant emission reduction technology

	Reduction technology	Method
Pre-processing	Low sulfur oil	·Desulfurization technology ·Blend low-sulfur oils
	Clean fuel technology	·Use alternative fuels with clean concepts (LNG, LPG)
	Reduction of energy usage or improve efficiency	·Optimal design of hullform ·Hullform improvement
	Improved combustion conditions	·Two-stage combustion ·EGR
post-processing	SOx	·Emission Control
	NOx	·SCR ·DPF
	PM-10	·Electrostatic Precipitation Combined Unit
	VOCs	·Emission control equipment
	Simultaneous SOx and NOx reduction technology	·Simultaneous reduction scrubber

분야에서는 기존의 중유를 사용하되, 중유를 사용할 시 배출되는 배기가스 내의 황산화물을 처리하기 위하여 선박 운항 시 쉽게 구할 수 있는 해수를 이용한 후처리 방법인 습식 스크러버 기술을 사용한다.

습식 스크러버는 노즐에서 흡수제를 분사시킴으로 흡수제와 배기가스의 접촉이 이루어지고 배기가스 내에 포함된 수용성 가스를 용해 시킨다. 여기서 흡수제로 해수 또는 화학세정수가 사용되며, 산성인 황산화물을 중화시키는 역할을 한다. 황산화물이 용해되면 해수 또는 화학세정수에 포함된 알칼리성 물질과 반응하여 용해성 황산염을 형성한다.



습식 스크러버 방식은 해수를 사용하는 개방형(open loop) 스크러버, 화학세정수를 사용하는 폐쇄형(closed loop) 스크러버, 해수와 화학세정수를 모두 사용할 수 있는 하이브리드형(hybrid) 스크러버의 3가지 형식으로 구분할 수 있다.

3.1.1 개방형(Open Loop) 스크러버

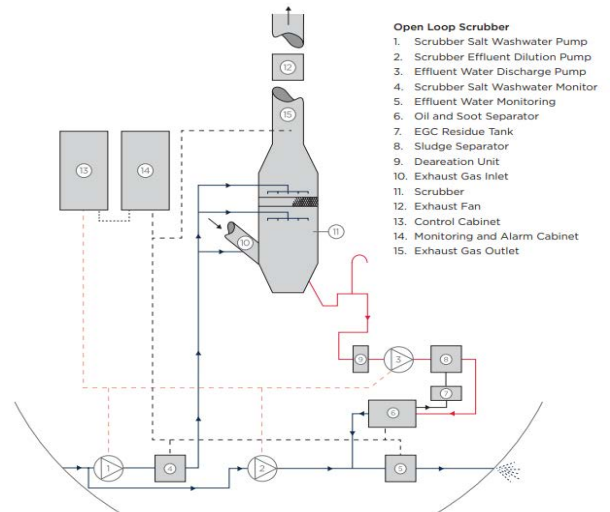
개방형 스크러버는 해수를 사용하여 배기가스 내 오염물질을 제거한다. 일반적으로 해수는 펌프에 의해 공급되며, 해수의 화학적 특성에 따라 스크러버 효율에 영향을 미친다. 개방형 스크러버의 경우 해수의 염분이 높을수록 SOx의 용해도가 증가하여 SOx의 제거효율 또한 높게 나타난다. Karatuđ et al. (2022)에 따르면, 개방형 스크러버의 효율은 93-99%로 조사되었으나 사

용하는 해수의 염분, pH 달라질 수 있다.

개방형 스크러버는 해수를 흡수제로 활용하기 때문에, 흡수제 소비량에 따른 스크러버 운영 비용을 절감할 수 있는 이점이 있다. 다만, 처리 후 해수를 바다로 버려야하는데 이 과정에서 해상 오염이 발생하므로, 처리수에 대한 규제 해역에서는 사용이 불가능하다는 단점이 존재한다. 실제로 개방형 스크러버의 가동 금지국 이 늘어나고 있는 추세이다.

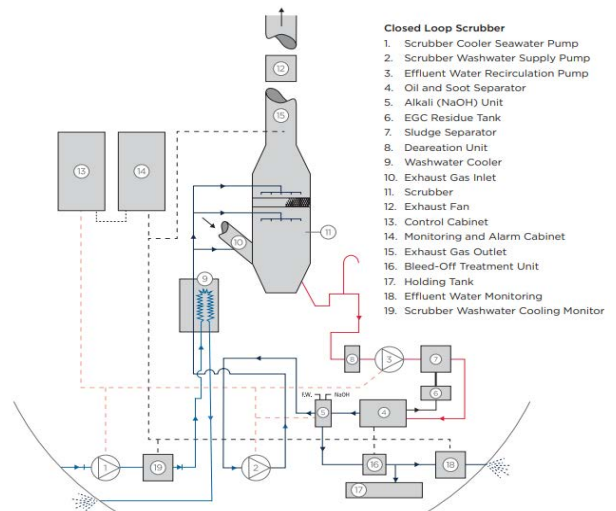
3.1.2 폐쇄형(Closed Loop) 스크러버

Eom et al. 2019는 폐쇄형 스크러버는 개방형 스크러버와 다르게 해수가 아닌 알칼리성 화학 세정수를 사용하는 방법을 연구했다. 선박의 위치와 관계없이 개방형 스크러버와 동등한 탈황 성능을 나타낸다. 일반적으로 화학 세정 용액으로는 수산화나트륨을 사용하며, 황산화물은 천연 중탄산염과 반응하지 않고, 수산화나트륨과 반응하여, 이산화탄소가 방출되지 않는다. Jee



*출처: ABS Advisory on exhaust gas scrubber systems (2018)

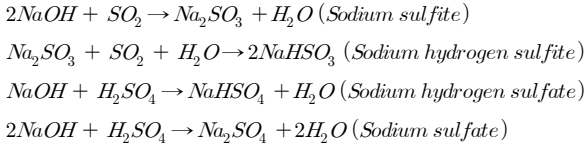
Fig. 4. Open loop scrubber system



*출처: ABS Advisory on exhaust gas scrubber systems (2018)

Fig. 5. Closed loop scrubber system

(2022)의 연구에서는 폐쇄형 스크러버의 SOx 처리효율을 98%로 제시하였다. 하지만 폐쇄형 스크러버는 오염물질 제거 후 발생 되는 세척수를 별도로 처리해야 하며, 세정수의 성능이 저하되면 별도로 폐수 처리를 필요로 하게 된다. 또한 세정수를 저장할 별도의 공간이 필요로 하므로 선박 화물 공간이 줄어드는 단점이 있다.

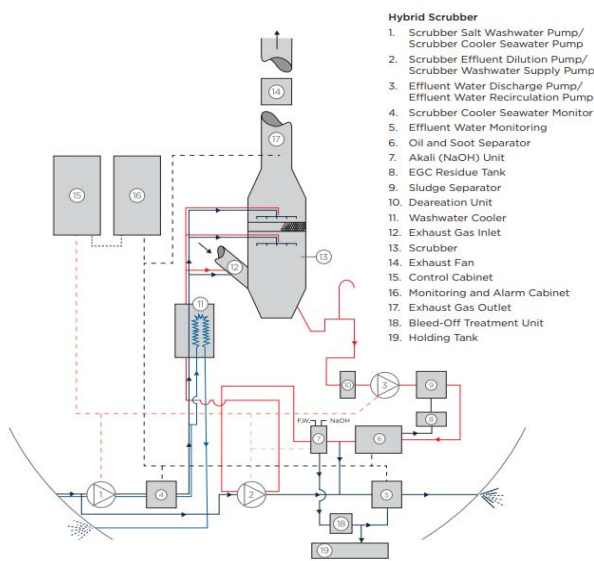


3.1.3 하이브리드형(Hybrid) 스크러버

하이브리드형 스크러버는 개방형 스크러버와 폐쇄형 스크러버의 장점을 활용하기 위하여 제안된 시스템이다. 흡수제로 해수 공급 시스템과 화학 세정수 공급 시스템이 동시에 설계되어 있는 구조이다. 배출규제해역에서는 폐쇄형 스크러버를 가동하고 세척수는 저장한다. 그리고 선박이 비규제지역 해상으로 진입하면 개방형 스크러버로 전환하여 세척수를 배출시킬 수 있다. 또한 기존의 개방형 및 폐쇄형 스크러버의 SOx 처리 효율을 유지한다. 이러한 하이브리드형 스크러버는 황산화물 배출과 반응 후 세척수 배출 기준을 동시에 만족할 수 있기 때문에 최근 많이 사용되고 있는 스크러버 유형이다.

3.2 질소산화물(NOx) 저감 기술 현황

질소산화물의 저감 방법으로 질소산화물의 발생 자체를 줄이는 전처리 기술과 발생한 질소산화물을 화학적으로 분리하는 후처리 방법이 있다. 본 절에서는 각각의 기술에 대해 기술한다.



*출처: ABS Advisory on exhaust gas scrubber systems (2018)

Fig. 6. Hybrid scrubber system

3.2.1 전처리 기술

질소산화물 배출을 저감 하기 위해 가장 많이 적용하는 기술은 연소조건 개선을 통해 Thermal NOx 형성을 억제하는 것이다. 연소조건 개선은 엔진의 연소조건을 조절하여 질소산화물의 발생량을 낮추는 기계적 처리에 의한 전처리 기술로, 2단 연소법(Two Stage Combustion), 배기가스 재순환법(EGR; Exhaust Gas Recirculation), 연료 유화 기술, 연료 및 물 분사 시스템, 이중 연료 엔진 (Dual Fuel Engine), 연료유 Heavy Fuel Oil(HFO)을 Marine Diesel Oil(MDO)로 전환하는 방법이 있다.

(1) 2단 연소법

먼저 2단 연소법은 단계적 연소법이다. 1차 연소영역에서 연소에 사용되는 공기를 둘로 나누어 전반부에 공기량의 80% ~ 100%를 공급하고 후반부에 나머지 과잉 공기를 공급하여 1차 연소공급 영역에서 질소산화물의 배출을 저감시킨 후, 2차 연소영역에서는 1차 연소영역에서 넘어온 과잉 상태의 연소가스를 완전 연소시킨다. 2단 연소법의 구현하는 데에 비용이 저렴하여 육상 보일러에서 흔히 사용하는 방법이지만, 저감 효율이 30% ~ 50% 정도로 선박 배출 허용기준인 Tier III 수준에 맞추기에는 적합하지 않다 (Ahn et al., 2019).

(2)배기가스 재순환법(EGR)

배기가스 재순환법(EGR)은 연료의 연소과정에서 발생된 배기가스 일부를 냉각시킨 후 연료와 혼합하여 엔진 내부로 재투입시켜 연소 되게 하고 연소 엔진의 배기가스를 재순환시키는 방식으로 배기가스에 포함된 질소산화물을 저감시킨다. Kumar et al. (2022)에 따르면, 논문에서는 EGR 비율이 10%, 20%, 30%일 때 NO2의 감소율이 각각 32.9%, 50.63%, 54.43%로 보고되었다.

배기가스 재순환 시스템의 기본 원리는 재순환되는 배기가스의 낮은 산소 함량과 높은 열용량이 연소실의 최고 온도를 낮춰줌으로 Thermal NOx의 형성을 제한하는 것이다. 그러나 배기가스 재순환 시스템은 질소산화물의 배출량은 줄어드는 장점이 있지만 연료 소비율이 증가하여 전체적인 효율이 감소한다는 단점이 있다.

(3) 연료 유화 기술

연료 유화 기술은 물과 연료유를 혼합해 유화유를 미리 형성시키고, 이후 노즐 연소를 통해 실린더를 분사하는 방식이다. 유화유는 원래 기름보다 발열량이 적고, 물을 첨가함으로써, 유화유의 잠열이 기름보다 커지면서 실린더 내 온도가 크게 떨어진다. 유화유를 태우면 실린더 내 탄소 및 탄소 입자를 줄일 수 있어 연소실 내 hot point를 효과적으로 제거할 수 있다. 2차 분무는 유화유의 미세 폭발 효과로 인해 혼합물을 더욱 균질화하여 실린더 내 국부적인 고온 영역 형성을 억제한다. 연소 후 유화유에 의해 생성된 과열 증기는 연소실에 분포하는데, 이는 실린더 내의 산소 희석 효과와 동일하며, 실린더 내의 국부적인 산소 풍부 구역 형성을 억제할 수 있다. 이를 통해 연료 소비량과 NOx 배출량을 동시에 줄일 수 있다. 또한, 이러한 가연물을 유화 수

성 에멀전으로 태우면 비유화 가연성에 비해 불꽃 길이가 줄어들 수 있다. 화염 길이가 짧으면 연소가 효율적이며 균질화되어 국소 고온 영역 형성과 NOx 배출량이 감소한다. 이 기술은 연료 분무 장치가 필요하고, 연료 분무로 인해 연소 효율이 떨어지고, 연료 소모량 증가로 인해 비용 증가의 단점이 있다.

(4) 연료 및 물 분사 시스템

주로 내연기관에서 사용되는 연료 유화 기술과는 반대로 연료 및 물 분사 시스템은 가스터빈 엔진과 일부 디젤 엔진에서 사용되어 엔진의 성능과 열효율을 증가시킨다. 연료 분사 시스템은 연료가 적당히 높은 수준에 도달하도록 만든다. 엔진 작동 조건에 따른 압력, 특정 규칙 및 엔진 연소실의 적절한 위치에 대한 특정 양의 연료 분사가 엔진 연소 프로세스를 최적화할 수 있다. 분사 시스템의 성능은 디젤 엔진의 연소에 직접적인 영향을 미친다. 분사 계통의 운전을 개선하면 디젤 엔진 운전의 효율을 향상하게 시키고, 연료 소비를 줄이며, 오염 물질 배출량을 제어할 수 있다. 연료 분사 시스템은 유지 보수 비용이 많이 들지만, 최적화하면 해양 디젤 엔진의 NOx 배출량을 감소할 수 있다.

물 분사 시스템은 낮은 열량과 증발, 흡열 특성으로 인해 오염 물질 배출량을 줄일 수 효과적인 방법으로 제안되었다. 연소 혼합물에 물을 사용하면 단위 부피 또는 전하 질량 당 산소 농도가 감소하게 된다. 또한 실린더에 물을 주입하면 피크 압력과 온도를 낮출 수 있어 NOx 발생을 억제할 수 있다. 하지만 이런 물 분사 시스템은 많은 양의 물을 소비해야 하고, 퍼니스 내 체류 시간을 감소시켜 보일러 효율이 저하될 수 있다. 마지막으로 물방울의 크기가 균일하지 않으면, 물방울이 완전히 증발하지 않을 수 있고, 이로 인해 열분해가 충분하지 않을 수 있다는 단점이 있다.

(5) 이중 연료 엔진 (Dual Fuel Engine)

이중 연료 엔진은 천연가스가 상대적으로 낮은 NOx, SOx, PM, CO2의 원인이 되는 청정연료이기 때문에 요구조건을 충족시킬 수 있는 잠재력이 있다. 최근 몇 년간 비효율을 향상과 환경규제의 충족을 위한 해결책으로 이중연료 엔진을 사용해왔다. 일본에서는 LNG를 탑재한 고운전이 가능한 해양 이중 연료 엔진이 적용되었으며, 실험 결과 NOx, SOx, CO2 각각 43%, 100%, 25% 절감할 수 있는 것으로 나타났다 (Watanabe, 2015). 이중 연료 엔진의 열효율을 감소시키지 않고 매우 낮은 NOx 및 플루 가스 배출량을 낮춰주는 방법을 연구 또한 진행되었다. (Ishida et al., 2010) 최소의 디젤 주입과 높은 EGR 비로 천연가스나 메탄올을 미리 혼합함으로써 낮은 부하와 높은 부하에서 NOx와 플루 가스의 균형이 크게 향상될 수 있다는 것을 발견했다. NOx 배출량 제어와 관련하여, 이중 연료 엔진은 디젤 모드에서 IMO Tier II NOx 배출량 규제와 가스모드에서 Tier II 배출량 규제를 충족한다 (Okubo and Kuwahara, 2020).

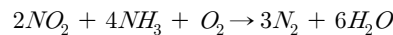
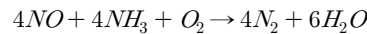
(6) 연료 전환

이 외에 선박에 사용되는 연료유를 전환하는 방법이 있는데 중유(HFO)에서 Marine Diesel Oil(MDO)로 전환 사용하는 방법이

있다. HFO를 연료유로 사용하면 Thermal NOx의 발생을 가중시켜 질소산화물의 발생량이 증가하므로, 따라서 연료유를 HFO에서 MDO로 바꾸어 사용하게 되면 질소산화물의 발생량을 감소시킬 수 있다.

3.2.2 후처리기술

후처리 기술은 생성된 질소산화물을 분리하는 방법이다. 환원제와 촉매의 화학적 반응으로 배기가스 내의 질소산화물 배출을 저감하는 기술로 주로 선택적 촉매 환원(SCR; Selective Catalytic Reduction) 시스템이 사용된다. 선택적 촉매 환원 시스템은 배기가스에 포함되어 있는 질소산화물을 암모니아(NH3), 촉매 등을 사용하여 질소(N), 물(H2O)로 환원 및 분리하는 방법으로 질소산화물을 저감시킨다. 선택적 촉매 환원 시스템에서 연소 후 배출 가스에 포함된 질소산화물은 촉매를 통과하기 전에 요소(urea), 암모니아(NH3), 알코올 또는 탄화수소 화합물 등 환원제와 반응하여 환경에 유해하지 않은 질소와 물로 전환하게 되며, 암모니아를 적용한 반응식은 다음과 같다.



선박용 디젤기관의 출력방식은 연소실에 공기를 과잉으로 공급하여 사용하는데 공기를 과잉으로 공급해주는 과급기를 사용하기 위한 동력은 선박의 실린더에서 생성된 배기가스의 열을 활용한다. 추진력을 생산하는 엔진은 load가 상승할수록 실린더에서 배출되는 배기가스 온도는 상승하지만 과급기를 통과한 배출 가스의 온도는 공기를 과잉으로 공급함에 따라 낮아지는 현상이 발생하게 된다. 이런 현상으로 과급기 후단에 설치되는 SCR은 배기가스 온도가 낮아 요소를 완전히 암모니아로 전환할 수 없어서 질소산화물의 저감을 저해하는 요인이며, 생성된 암모늄염 역시 저온에 의한 응축으로 촉매의 기공을 막거나 반응기 후단의 공기 예열기의 표면을 오염시켜 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 SCR 시스템 적용 시 중요하게 확인해야하는 부분은 배출되는 배기가스의 온도 조건에서 요소가 암모니아로 완전히 전환될 수 있는지 여부이다. SCR 시스템은 과급기 전단에 설치하는 HP (High Pressure) SCR 방식과 과급기 후단에 설치하는 LP(Low Pressure) SCR 방식으로 나누어진다.

질소산화물을 더욱 더 효과적인 제거방법에 대한 개발 과정의 선형연구들이 이어져 왔다. Okada et al. (2001)은 man b&w 4t50mx 연구 엔진에 7의 분사 타이밍 지연을 적용하였고, 약 30%의 NOx 감소와 약 7%의 소비 증가를 달성하였다. Li et al. (2010)은 또한 질소산화물 배출에 대한 연료 분사 전진각의 영향을 분석하였다. Al-Sened and Karini (2001)는 사전 주입을 사용하여 지연 기간을 단축하고 연소 초기 단계에서 온도와 압력을 감소시켜 NOx를 감소시킬 수 있음과 미립자 배출의 감소를 발견했다. Fankhauser and Heim (2001)은 사전 주입이 연료 소비량

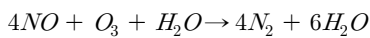
이 약간 증가하여 NOx를 감소시킨다는 것을 발견했고, Sulzer RT-Flex 커먼 레일 엔진 (삼중 분사를 통해 연료 전하가 연속적으로 짧은 개별 분무 방식)을 연구했다. 순차적 주입을 통해 실린더의 3개 노즐 각각이 서로 다른 타이밍으로 작동되며, 그 결과 약 30%의 NOx 감소와 약 8%의 연료 소비 증가를 보였다. Lamas and Rodríguez (2012)는 해양 엔진에서 NOx를 줄이기 위한 다양한 방법에 대해서 기술하였다. 적절한 타이밍에 파일럿 분사를 추가함으로써 NOx 배출량을 줄이고 동시에 연료를 절약할 수 있으며, 물 분사 (water injection), Exhaust gas recirculation (EGR) 등 다양한 방법에서의 NOx 감소를 언급하였다.

3.3 동시저감기술

선박에서 배출되는 오염물질을 저감 하기 위해 앞서 언급한 여러 가지 방법들이 있지만, 현재의 기술 수준에서 가장 효율적인 방법은 SCR 시스템과 스크러버 장치를 함께 장착하는 방법이다. 선박 엔진 후단에 SCR 시스템을 장착하여 요소를 암모니아로 분해 후 촉매와 반응시켜 NOx 및 PM을 먼저 1차 저감 한다. 이어 스크러버 장치를 통해 SOx와 PM을 2차 저감 하는 방법이다.

그러나 SCR 시스템과 스크러버 장치를 선박 엔진 후단에 장착해야 하므로 선박 내 화물을 적재할 수 있는 공간 손실과 상당한 무게의 구조물과 기계 등으로 인해 기관실 내부 공간 손실 및 무게에 따른 연료비용이 증가 된다. 이는 기존 선박을 개조 및 설치 하는 경우에도 동일한 문제로 인해 설치의 제한이 발생하게 되는 단점이 된다.

현재 가능한 동시 저감 기술은 두 가지로 나뉠 수 있다. 첫 번째 방식은 NO2와 SOx가 해수와 반응하는 특성을 이용한 방식이다. NO와 O3를 반응시켜 NO2로 전환 시킨 후 NOx와 SOx를 동시에 저감 하는 방식이다. SOx는 스크러버를 통해 해수를 분사하여 반응시켜 제거하고, SOx 저감 스크러버에 O3를 공급하여 NO와의 반응시키고, 촉매를 사용하여 NO2로 전환 시켜 해수를 이용하여 NOx와 SOx를 동시에 저감 할 수 있는 기술이다.



두 번째는 물리·화학적 연속공정으로 구성하여 NOx, SOx, PM을 저감 하는 방식이다. 이는 선박 엔진 배압 특성을 감안 하여 구성하여야 한다. SOx 스크러버를 통해 해상 엔진의 유황 산화물 배출량을 줄일 수 있고, DPF (Diesel Particulate Filter) 사용을 통해 디젤 엔진에서 발생하는 입자 물질 배출을 감소시킬 수 있다. 저온 플라즈마 기술을 사용해 주로 대기 중 유기 화합물 및 VOCs를 처리하여 대기 오염물질을 감소시킬 수 있다. 전기 집진 복합 시스템을 통해 입자 물질을 전기적으로 제어하여 입자 물질 배출을 감소시킬 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 선박으로부터 발생하는 대기오염물질의 종류와

배출량에 대해서 살펴보았다. 화물선에서는 NOx, SOx, PM10, PM2.5가, 레저선에서는 CO, VOCs의 배출량이 높은 것으로 파악되었다. 대기오염물질의 배출 저감 기술은 전처리와 후처리 기술로 구분되며, 본 논문에서는 인체와 환경에 가장 심각한 영향을 미치는 NOx와 SOx의 처리 기술에 초점을 맞추어 현황을 분석하였다. SOx는 황산화물로 Scrubber의 흡수제에 용해시키는 방식으로 제거한다. NOx의 경우 엔진 내 연소 방식에 따라 발생을 저감시키는 전처리 방식과 배기가스 내 NOx를 화학 반응을 통해 제거하는 후처리 방식으로 구분된다. 동시저감 기술은 제한된 선박의 공간 내에서 SOx와 NOx를 동시에 제거할 수 있는 기술이나 아직은 실효성이 낮다.

향후 환경오염에 대한 규제가 더욱 강화되면서 친환경 선박에 대한 기술 수요는 증가할 것으로 예상된다. 사전에 대비하고 시장을 개척하기 위해서는 현황을 정확히 파악하고 조선소, 기자재 업체, 선급, 연구소 등이 협력할 필요가 있다. 전처리된 연료를 사용하는 것이 바람직하지만, 비용 등을 고려할 때 현실적으로 쉽지 않은 방법이므로, 향후 지속적으로 후처리 기술에 대한 수요는 증가할 것으로 판단된다. 이 경우, SOx와 NOx를 동시에 처리하면서 보다 친환경적인 기술의 상용화가 예상된다.

후기

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0017006, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)을 밝히며 감사를 드립니다.

References

- ABS, 2018. ABS Advisory on exhaust gas scrubber systems.
- Ahn, Y.S., Kim, K.S., Jeong S.M., Jeong, B.U., Oh, D.H., Lee, Y.W., Nam, T., Kwon, B.J. and Yun, G.J., 2019. *A study on assessment and certification system for reduction technology of emission from ships*, Korea Maritime Institute.
- Al-Sened, A. and Karimi, E., 2001. Strategies for NOx reduction in heavy duty engines. *Proceedings of the 23rd CIMAC Congress*, Hamburg, Germany, 7–10 May 2001.
- EDGAR. 2022. CO₂ emissions of all world countries: 2022 report.
- Eom, H.K., Park, B.H., Jeong, S.K. and Kim, S.S., 2019. Trend and prospect of scrubber technology for regulatory on sulfur content in marine fuel oil. *Korean Industrial Chemistry News*, 22(5), pp.1–13.
- Fankhauser, S. and Heim, K., 2001. The Sulzer RT-flex launching the era of common rail on low speed engines. *Proceedings of the 23rd CIMAC Congress*, Hamburg, Germany, 7–10 May 2001.
- Jee, J., 2022. Hybrid multi-criteria decision-making for marin

the SOx scrubber systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1599.

Karatuğ, Ç., Arslanoğlu, Y. and Soares, C.G., 2022. Feasibility analysis of the effects of scrubber installation on ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1838.

Kumar, P., Parwani, A.K. and Rashidi, M.M., 2022. Mitigation of NOx and CO₂ from diesel engine with EGR and carbon capture unit. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, pp.8791–8802.

Lamas, M.I. and Rodríguez, C.G., 2012. Emissions from Marine Engines and NOx Reduction Methods. *Journal of Maritime Research*, 6(1), pp.77–82.

Lee, H.K., Yeo, S.Y., Choi, S.W., Seol, S.H., Jin, H.A., Yoo, C., Lim, J.Y. and Kim, J.S., 2019. Analysis of the National Air Pollutant Emission Inventory (CAPSS 2015) and the Major Cause of Change in Republic of Korea. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 13(3), pp.212–231.

Lee, S.H., Kang, B.Y., Jeong, B.H. and Gu, J.Y., 2020. National management measures for reducing air pollutant emissions from vessels focusing on KCG services. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 26(2), pp.163–174.

Li, K., Li, B. and Sun, P., 2010. Influence of fuel injection advance angle on nitrogen oxide emission from marine diesel engine. *Journal of Dalian Maritime University*, 36(3), pp.87–89.

Marinebenchmark. 2020. Maritime CO₂ Emissions.

National Fine Dust Information Center, 2020. Statistics on air pollutant emissions, URL: <https://www.air.go.kr/article/list.do?boardId=10&menuId=32>. [Accessed 31 March 2024]

Okada, S., Hamaoka, S., Akimoto, S., Masakawa, S., Takahita, K., Seki, M., Yoshikawa, S. and Yonezawa, T., 2001. The development of very low fuel consumption medium speed diesel engine. *Proceedings of the 23rd CIMAC Congress*, Hamburg, Germany, 7–10 May 2001.

Okubo, M. and Kuwahara, T., 2020. New technologies for emission control in marine diesel engines – Ch5. Prospects for Marine Diesel Engine Emission Control. Elsevier.

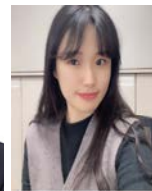
Watanabe, K., 2015. High operation capable marine dual fuel engine with LNG. *The Japan Institute of Maritime Engineering*, 50(6), 738–743.



박준성



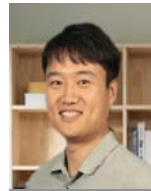
함승호



강다영



박희연



박종관