



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

북미 배출통제해역(ECA)의 규제를
만족시키기 위한 SCR의 요소 요구량 산정에
관한 연구

A Study for the Prediction of Urea Amount for SCR in Northern
American ECA

지도교수 이 강 기

2018 年 8 月

한국해양대학교 대학원

해양플랜트운영학과

송 지 경

본 논문을 송지경의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 조권희 (印)

위원 이강기 (印)

위원 예병덕 (印)

2018년 06월 18일

한국해양대학교 대학원

목 차

Nomenclature	iii
List of Tables	v
List of Figures	vi
Abstract	vii
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적	7
제 2 장 배출규제해역 운항 자료와 배출물 분석	8
2.1 SCR을 활용한 선박배출가스 제거기술	8
2.2 대상선박의 선정과 제원	12
제 3 장 요소(urea)요구량 예측과 공급체인망 시뮬레이션	16
3.1 SCR을 활용한 NO _x 제거반응에 필요한 요소 요구량 산정배경 이론	19
3.1.1 NH ₃ 분해과정	19
3.1.2 NO _x 저감 주요 반응식	20
3.2 북미 배출통제해역 항행 패턴분석을 통한 부하별 배기가스량 계산	24
3.2.1 선박 A호/B호의 운항 자료 및 기관부하자료 분석	24
3.2.2 운항자료 분석과 배기가스산출 결과에 따른 NO _x 발생량 산정	26
3.3 NO _x 제거반응을 위한 요소(urea) 요구량 추정 계산	29
3.4 배출통제해역 운항선박의 원활한 SCR 운전을 위한 요소 물류 고찰	34
제 4 장 결론	37

Nomenclature

Acronyms and Abbreviations

CEAS	Computerized Engine Application System
DWT	Dead Weight Tonnage
ECA	Emission Control Area
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ELA	Electricity Load Analysis
GHG	Green House Gas
HFO	Heavy Fuel Oil
IGC	International Gas Carrier
IMO	International Maritime Organization
LNG	Liquefied Natural Gas
LP	Low Pressure
LPG	Liquefied Petroleum Gas
LSFO	Low Sulphur Fuel Oil
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MCR	Maximum Continuous Rating
MDT	MAN Diesel & Turbo
MEPC	Maritime Environment Protection Committee
NECA	NO _x Emission Control Area
NO _x	Nitrogen Oxides
SAM	Scavenging Air Moistening
SCR	Selective Catalytic Reduction
SECA	SO _x Emission Control Area
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SFOC	Specified Fuel Oil Consumption

SMCR	Specified Maximum Continuous Rating
SO _x	Sulphur Oxides
TEU	Twenty-foot Equivalent Units
WFE	Water Fuel Emulsion



List of Tables

Table 1-1 Shipping CO ₂ emissions compared to global CO ₂ emissions	2
Table 2-1 DeNO _x technology	10
Table 2-2 Ship's particulars	12
Table 2-3 Specification of standard vessel, Clarkson	15
Table 3-1 Sailing table of A vessel	25
Table 3-2 Sailing table of B vessel	26
Table 3-3 SCR calculated summary of SCR urea consumption - Tier-III ..	31
Table 3-4 Urea requirement of A vessel	32
Table 3-5 Urea requirement of B vessel	32
Table 3-6 Urea requirement at SMCR	33



List of Figures

Fig. 1-1 CO ₂ -Emission Changes 1991-2016	2
Fig. 1-2 SO _x emission control plan	3
Fig. 1-3 Environmental restrictions: SO _x & NO _x	4
Fig. 1-4 Emission control area	5
Fig. 2-1 The SCR system	9
Fig. 2-2 The World 1st SCR equipped ship, MV “Pacific Success“	11
Fig. 2-3 General view of the North American Emission Control Area	13
Fig. 2-4 Fuel cost per ship type	14
Fig. 2-5 Annual fuel saving	14
Fig. 3-1 SCR catalyst surface reaction with NH ₃	21
Fig. 3-2 Reaction mechanism of selective catalytic reduction for NO _x	22
Fig. 3-3 NO _x emission limits according to MARPOL Annex VI	28
Fig. 3-4 Urea consumption per section for vessel A	34
Fig. 3-5 Engine load per section for vessel A	34
Fig. 3-6 Urea consumption per section for vessel B	35
Fig. 3-7 Engine load per section for vessel B	35
Fig. 3-8 NO _x care 40 urea	36

북미 배출통제해역(ECA)의 규제를 만족시키기 위한 SCR의 요소 요구량 산정에 관한 연구

송 지 경

해양플랜트운영학과
한국해양대학교 대학원

지도교수 이 강 기

논문요지

IMO NO_x Tier-III에서 디젤 기관의 질소산화물 규제가 더 강화되었다. IMO MEPC70차 회의에서 MARPOL Annex VI의 Regulation 13.6에 대한 개정 초안이 채택됨에 따라 2021년 1월 1일부터 북해 및 발틱해를 질소산화물 통제해역(NECA)으로 지정하고 해당 규제가 발효 되도록 합의했다. 또 본 회의에서는 원양선박의 온실 가스 배출량과 에너지 효율 관리 (EEDI) 및 선박 에너지 효율 관리 계획 (SEEMP)를 운영하여 2050년까지 온실가스 연간 총 배출량을 2008년 대비 최소 50% 줄이겠다는 목표를 설정하고 이에 대한 대응책이 결의되었다. 강화된 규제에 따르면 미세먼지의 주요 원인으로 알려진 질소산화물의 저감 기술을 포함한 이산화탄소 배출량을 획기적으로 줄일 것을 요구하고 있어 종합적인 배기가스 저감 기술 개발이 요구된다.

1989년 MV “Pacific Success“와 MV “Hanjin Pittsburgh“를 시작으로 M/V “New Horizon“과 MV “Delta Pride“ 4척의 핫 코일 운반선의 상업 운전을 통해 SCR기

술을 이용한 NO_x저감기술의 실질적인 효과가 입증되었다.

본 연구는 북아메리카 서부 해안의 배출통제해역을 항해하는 대형 컨테이너 선박의 운항 패턴을 분석하여 배출통제해역 내에서 발생하는 기관 부하별 배기가스량을 분석하고 이때 발생하는 NO_x를 감소시키기 위해 SCR기술을 활용할 경우 NO_x저감반응에 필요한 요소의 양을 산출한다.

본 연구 결과를 토대로 해운선사는 질소산화물 규제 강화에 따라 SCR이 장착된 선박이 배출통제해역에서 원활한 운항을 위하여 산정된 요소요구량에 따라 물류체계를 구축하고, 선박의 신조 및 개조 시 기관실 에너지 최적화에 도움을 줄 수 있는 기초 데이터로서 활용할 수 있다.

주제어 : 국제해사기구; 배출통제해역; 선택적 촉매 반응기; 질소산화물; 요소



A Study for the Prediction of Urea Amount for SCR in Northern American ECA

Song, Ji Kyoung

Department of Offshore Plant Management
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Supervisor Lee, Kang Ki

Abstract

Ever strengthened emission regulations resulted NO_x Tier-III standard of IMO which is more stringent emission limit for diesel engine technology. At IMO MEPC 70th session upon the adoption of the draft amendments to Regulation 13.6 of MARPOL Annex VI, the Committee agreed to designate the North Sea and the Baltic Sea as NECA with an effective date of 1 January 2021. Furthermore, countermeasures against GHG emissions from international shipping have been deliberated at the MEPC 72nd session IMO and the Energy Efficiency Management (EEDI) and the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) aiming for the ambitious target of “to reduce the total annual GHG emissions by at least 50% by 2050 compared to 2008”. And these strengthened regulations demand further innovative technology development of marine prime movers inclusive NO_x reduction technology which is known as the major cause of fine dust as well as the requirement technology of the

significant reduction of CO₂ emission.

The practical effectiveness of NO_x reduction through the method of SCR technology has been proven through the commercial operation of 4(four) series hot coil carriers being commenced by MV “Pacific Success” and MV “Hanjin Pittsburgh” since 1989 and followed by M/V “New Horizon” and MV “Delta Pride”.

This study examines the required amount of urea to generate NH₃ calculated from exhaust gas amounts which are derived from the analysis of engine loads on operational patterns of large container ships sailing in the ECA waters of North American West Coast.

The results of this study would provide the basic data for the shipping company in order to establish the logistics system of urea for the efficient service of ships in ECA waters. Furthermore it would also be used for engine room resource optimization such as ELA(Electricity Load Analysis) and fresh water amount etc. for new building stage as well as modification of ships to be equipped with SCR.

KEY WORDS : IMO; NECA; SCR; NO_x; Urea



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

클락슨 자료에 따르면 세계 교역의 주요 운송수단인 선박에 의한 교역은 약 85%로 추정되며, 2017년 기준 해상교역량 규모는 전년대비 3.7%증가하여 11.5 bt(인당 1.54톤)이다. 선박과 같은 규모의 대량수송 수단이 대체되지 않는 한 경제 성장과 함께 동반되는 글로벌 해상 교역 증가는 선박의 증가로 이어질 것이다^[1]. 해상 물동량은 2005년 76.41억 톤에서 2015년 기준 107.18억 톤으로 약 1.4배 증가하였으나 선복량은 2005년 9.214억 DWT에서 2015년 기준 17.464억 DWT로 약 1.9배로 급속히 증가하여 선복량 과잉을 초래하였다^[2].

해상 화물의 컨테이너화는 증가 일로에 있어 2017년에 5.1% (191M TEU)증가율을 보였으며 2018년 증가율은 5.3%로 더 늘어날 것으로 예측하고 있다. 컨테이너선의 선복량 증가와 함께 2만 TEU급 초대형 컨테이너선을 발주할 만큼 선박의 대형화도 급속히 진행 중에 있기 때문이다. 선복량 증가와 선박의 대형화로 해상 운송에 따른 배출가스 총량은 계속 증가 추세에 있어 이에 대한 대책이 긴급히 요구 되고 있는 실정이다. Fig. 1-1에서 보여 진 바와 같이 쉘의 자료에 의하면 독일은 지난 25년(1991년에서 2016년까지) 동안 이산화탄소 (CO₂)가 전 산업 평균 31%가량 감소한데 반해 해운이 주를 이루는 수송 분야는 오히려 1.5%가량 증가 한 것으로 보고되었다. 이와 같은 선박의 배출가스 규제에 대한 국제사회의 요구에 부응하기 위해 2018년 4월에 개최된 MEPC 72차 회의에서 배출가스 규제는 더욱 강화되었고 이에 따른 혁신적인 기술 개발이 요구되는 상황이다.

2013년부터 2015년까지 전체 해양 연료 소비량은 2.91 억 톤에서 2.98 억 톤 (+2.4%)으로 증가했다. 이는 운송 사업 증가가 7%정도 인 것과 대비된다. 이 차이는 선박의 추진효율 개선과 선복량 증가와 선박의 저속운항에 따른 엔진의 저 부하 운전에 기인 한 것으로 사료된다. 표 1-1에서 보는 바와 같이 전 세계 해상 운송 (원양 선박, 국내선 및 어선)의 이산화탄소 배출량은 같은 기간 9.1

CO₂-EMISSIONS CHANGES BY SECTORS 2016/1991, GERMANY

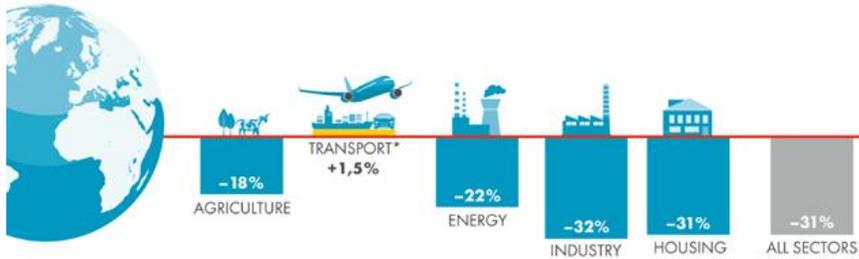


Fig. 1-1 CO₂ -Emission Changes 1991-2016^[6]

억 톤에서 9.32 억 톤으로 증가했다.

Table 1-1과 같이 전 세계 이산화탄소 배출량은 2015년을 기준으로 3.6 억 톤이었고, 그 중 2.6%인 9.32 억 톤이 선박에 의해 발생되었다.^[2]

Table 1-1 Shipping CO₂ emissions compared to global CO₂ emissions^[2]

	Third IMO GHG Study (million tonnes)						ICCT (million tonnes)		
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Global CO ₂ Emissions	31,959	32,133	31,822	33,661	34,726	34,968	35,672	36,084	36,062
International Shipping	881	916	858	773	853	805	801	813	812
Domestic Shipping	133	139	75	83	110	87	73	78	78
Fishing	86	80	44	58	58	51	36	39	42
Total Shipping	1,100	1,135	977	914	1,021	942	910	930	932
% of global	3.50	3.50	3.10	2.70	2.90	2.60	2.50	2.60	2.60

이와 같이 선박에 의한 탄소배출량은 전 세계 탄소배출량의 3% 이하로 총 탄소 배출량에 비하면 비교적 미미한 수준이지만, 선박용 디젤엔진은 연소과정에서 유해 배기가스인 질소산화물 (NO_x, Nitrogen Oxides) 을 다량 발생시키는

문제점을 가지고 있어 국제사회의 관심과 대응책 마련이 요구되고 있다.

국제해사기구 (IMO)의 환경보호위원회(MEPC)에서는 황산화물, 질소산화물, 미립자 등 선박에서 배출되는 대기오염관련 물질을 규제하고 있다.

2005년 3월 19일 MARPOL 부속서 VI가 발효됨에 따라, MEPC는 기술적 진보와 구현 경험을 바탕으로 배출 제한을 강화하기 위해 2005년 7월, 부속서 VI를 개정하기로 합의 하였다. 2008년 10월에 개최된 MEPC에서는 지난 3년 동안의 적용결과를 바탕으로 수정된 부속서 VI와 질소산화물 기술코드를 적용하기로 결정하였고 발효 시점은 2010년 1월 1일로 결의하였다. 수정된 MARPOL 부속서 VI의 가장 큰 변화는 황산화물, 질소산화물, 미립자의 점진적 감축과 설정된 해역에서 이러한 오염 물질을 더욱 감축하기 위한 배출규제해역의 도입이다^[3].

Fig. 1-2에서 도식화 된 내용은 SO_x에 대한 IMO MEPC의 규제 적용과정을 단계별로 보여준다. 2012년부터 전 해역에서 운항하는 선박 연료유의 황 함유량을 3.5% m/m으로 제한하고, 2015년부터 배출규제해역을 운항하는 선박연료유의 황 함유량의 배출량을 0.1% m/m으로 강화하였다. MEPC 68차 회의는 범세계적으로 적용할 황 함유량 0.5% m/m 이하 연료유의 이용 가능성을 평가하기 위해 운영위원회를 설립하는 것에 동의하였다. MEPC 69차는 운영위원회의 경과보고서에 따라 황 함유량 요건의 이행시기를 MEPC 70차에 결정할 것에 동의하였다. 2016년 10월에 개최된 MEPC 70차에서는 “MARPOL 조약 부속서 VI 제13.6규칙 개정서”로서 0.5% m/m 황 함유 연료유의 이행시기를 2020년 1월 1일로 결정하게 되었다. 이와 관련하여 MEPC는 0.5% m/m 황 함유량 요건을 만족시키기 위해 중유 혼합(blending)이 연료유의 안전성, 점도 및 적합성 등에 관한 기술적인 문제가 있을 수 있음에 주목하고, 0.5% m/m 황 함유량 요건의 원활한 이행계획을 개발할 것을 결의하였다^[4].

IMO NO_x Tier-I 규제에서 선박의 Keel Laying날짜 기준으로 2011년 1월 1일 이후 건조되는 신조선박은 Fig. 1-3과 같이 Tier-II의 조건을 맞추도록 강화되었으며, 2016년부터 배출통제해역을 통항하는 신조선박의 경우는 Tier-I 대비 질소산화물의 배출량을 80% 저감한 Tier-III를 만족하도록 규제를 더욱 강화하

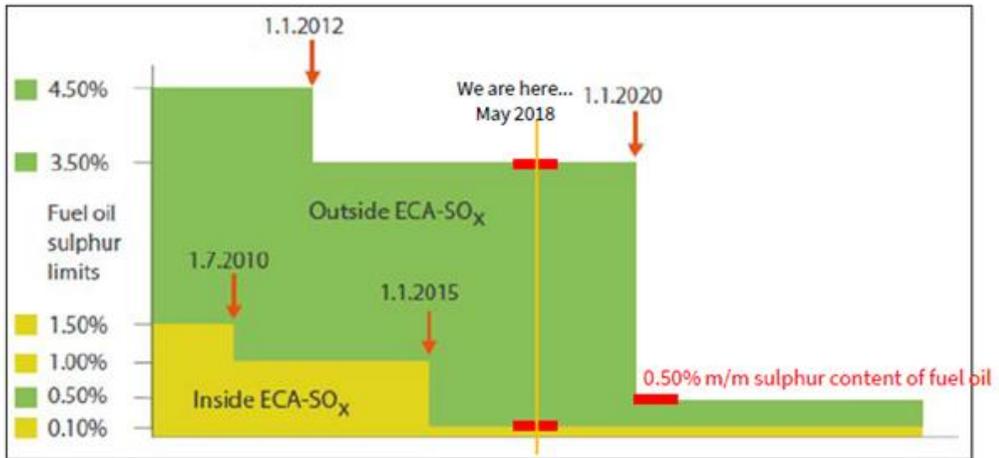


Fig. 1-2 SO_x emission control plan^[5]

였다. 또한 2018년 4월 개최된 MEPC72차 회의에서 발트해와 북해를 새로이 질소산화물 배출통제해역(NECA)으로 추가 지정하는 MARPOL 조약 부속서 VI 제 13.6규칙 개정서가 발효되었다. 따라서 2021년 1월 1일 이후 해당 해역은 배출통제해역로 선포되며 이 곳을 항해하는 선박에 NO_x Tier-III가 적용된다.

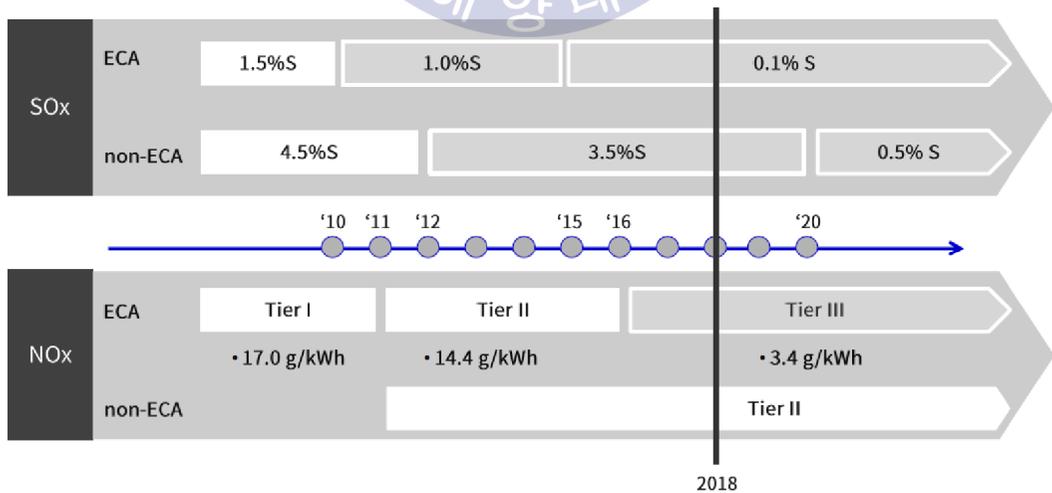


Fig. 1-3 Environmental restrictions: SO_x & NO_x^[7]

Fig. 1-4와 같이 MEPC 70차 회의에서는 영국 해협(English channel)을 포함한 발틱해 및 북해해역의 배출규제해역 지정에 관한 제안사항을 검토하였고, 배출규제해역 지정 요건에 절차적 우려가 있음에도 불구하고 발틱해 및 북해지역을 NECA로 지정하고 2021년 1월 1일부터 요건의 발효일로 설정함에 동의하였다. 또한, 질소산화물 배출통제해역 내에 위치한 조선소에서 건조, 개조 및 수리되는 선박들이 Tier-II만 만족하거나, 만족할 수 있는 가스연료의 사용이 불가능한 이중연료기관이 설치되어도 이를 허용하는 면제조항에도 의결하였다.

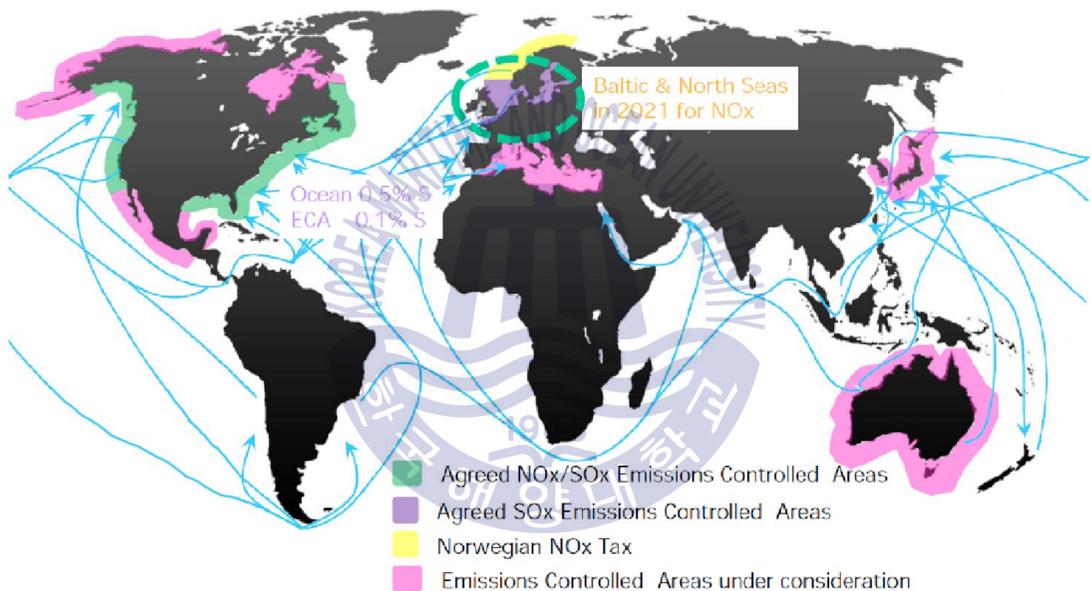


Fig. 1-4 Emission control area^[8]

한편 국제해사기구(IMO)는 선박에서 배출되는 온실가스(CO₂)를 감축하기 위해 에너지 효율 설계 지표(EEDI)를 신조 선박의 설계 시부터 적용 할 것과 모든 운항 선박에 에너지 효율 관리 계획(SEEMP)을 세우도록 의무화하였다. 에너지 효율 설계 지표는 1톤의 화물을 해상에서 1마일 수송할 때 발생하는 이산화탄소의 배출량을 의미하며 400톤급 이상의 모든 선박에 적용된다. 2013년 1월 1일부터 발효되었으며, 2015년까지 10%, 2020년 20%, 2025년 30%의 감축을 의무화하고 있다. 이 규정을 충족하지 못할 경우 선박의 운항이 전면 금지된다^[9].

2018년 MEPC 72차 회의 결과에 따르면, 2030년까지 이산화탄소의 배출량을 40%, 2050년까지 70%를 감소시킴으로써 GHG를 2050년까지 50% 줄일 것을 목표로 하므로 선박용기관은 물론 선박 추진에 대한 모든 솔루션을 혁신적으로 재검토해야 할 상황이다.

대기오염에 관한 국제사회의 규제가 강화됨에 따라 배기가스 배출을 줄이기 위한 기술개발이 선박기관 자체의 기술개발뿐 아니라 선박 연료, 연소 전처리 및 연소 후처리 기술 등 연소 전 과정에서 다양하게 진행되고 있다. 선박연료는 점차 디젤유(diesel oil) 또는 HFO와 같은 액체연료(liquid fuel)에서 유황을 거의 함유하고 있지 않는 천연액화가스(LNG)로 점차 진화하는 등, SCR, EGR 등의 후처리설비와 함께 모든 종류의 배기가스규제에 대한 종합적인 대책이 연구, 개발되고 있다.

특히 질소산화물에 대책으로 채택되는 선택적 촉매 환원법인 SCR은 배기가스의 2차 처리기술로, 질소산화물을 90% 이상 줄일 수 있는 기술로 검증된 바 있다. 반응제로서 개발초기에는 암모니아(NH_3)를 사용하였다. 하지만 암모니아는 특성상 유독하고 폭발위험 때문에 엄격한 IGC규정을 따라야 하므로 선박 건조 시부터 설계가 복잡해지고 건조 원가가 상승함은 물론 선박 해기사들이 운영하는 데 있어서 어려움이 대두되었다. 이에 따라 최근 개발된 SCR은 암모니아의 고형체인 요소에 물을 혼합하여 암모니아를 생성케 하는 방법을 쓰고 있다. 이때 요소수용액은 신속하게 암모니아로 변환되어야 효율적이다. 고형물인 요소를 사용하면 해기사의 안전뿐 아니라 선박회사의 물류 흐름이 편하게 되어 선박의 운항효율도 향상시킬 수 있다.

1.2 연구 목적

본 연구에서는 선박기관의 고 효율화 및 고 출력화로 야기되는 질소산화물을 제거하는 기술로서 천연가스나 여타의 방안 대신 SCR 기술을 적용하는 경우로 본 연구의 범위를 한정한다. 또 암모니아의 유독성과 취급문제로 대두되는 물류문제를 해결하기 위해 요소를 사용한다고 가정한다. 이를 위해 북미 배출통제해역에 실제 운항하고 있는 대형 컨테이너선의 운항실례를 분석하여 기관부하(engine load) 분석과 이에 따른 질소산화물 발생량을 산정하여 제거 반응에 필요한 요소의 요구량을 추정하였다.

배출통제해역을 항해해야 하는 선박의 운항 패턴과 기관 부하분석에 따라 SCR의 소요 암모니아를 계산하고 이를 요소 요구량으로 산정이 가능한 모델을 개발하면 규제를 따르기 위한 선박의 신조 및 개조 시 요소공급의 최적화는 물론 반응청수의 양과 이에 따른 조수기 용량 조정으로 전력부하 분석(Electricity Load Analysis)의 최적화로 이어지게 된다.

본 연구의 목적은 배출통제해역을 항해하는 SCR 설치선박의 합리적이고 경제적인 운항 기반을 구축하기 위해 유독한 암모니아 대신 취급이 비교적 안전한 요소의 최적요구량 추정으로 요소 공급체계를 구축하기 위한 기초 데이터를 제공하는데 있다. 부가적으로 SCR 설치 선박의 기관실 자원최적화에도 도움을 주기 위함이다.

제 2 장 배출규제해역 운항 자료와 배출물 분석

2.1 SCR을 활용한 선박배출가스 제거기술

연소가스 중의 질소산화물을 제거하는 저감기술로는 연료 중 질소 성분을 제거하는 연료개질 (Fuel denitrification)법, 연소방법의 개량 및 연소장치의 개조를 통하여 질소산화물 발생을 억제하는 연소 중 탈질법 그리고 배연탈질에 의해 생성된 질소산화물 배기가스를 처리하는 연소 후 탈질법으로 나눌 수 있다. 선박용 엔진에서의 연소방법 개량이란 고온 고압의 연소 과정에서 형성되는 고온 및 산소 농도에 의존하기 때문에 엔진 내에서 분자상태의 질소(N_2)와 산소가 화합하는 조건 즉 연소온도 또는 산소농도를 저감시킴으로써 질소산화물 결합을 감량하는 방법을 쓴다. 이와 같은 연소 중 탈질법은 운전비용이 저렴하고 간단하게 적용할 수 있다는 장점은 있으나 운전효율 문제와 낮은 탈질효율로 인해 질소산화물 결합을 일정 수준까지 저감할 수 밖에 없기 때문에 다음 단계인 Tier-III의 대기환경 규정을 만족하기에는 한계가 있다.

질소산화물 저감 설비를 별도로 설치하지 않고 연소 공정 개선을 통하여 질소산화물을 제거하는 기술로는 증진장치(further equipment)와 엔진튜닝(engine tuning)이 있는데 Tier-II 단계까지 구현할 수 있다. 그 외에 물 분사 노즐을 추가로 장착하여 연소 시 발생하는 열과 온도의 급격한 상승을 제어하는 방법이 있는데 일부 엔진 메이커에서 질소산화물 제거 주요 방안으로 채택하기도 한다. 엔진자체의 개조를 통한 여타의 질소산화물 저감방법으로 Low NO_x Fuel Nozzle, EGR(Exhaust Gas Recirculation), SAM(Scavenge Air Moistening), WFE(Water Fuel Emulsion) 등이 있는데 이들 방법들은 연료 분사시기를 늦추어 연소온도를 저감하는 연료분사시기 지연, 실린더에 공급되는 공기의 절대습도를 높여 연소온도를 낮추는 실린더 급기 가습, 다수의 미세한 연료 분사구로부터 연료를 분사하여 분무 내의 공기도입을 촉진시킴으로써 연소 온도를 낮추는 연료 다 분사 기법 등을 사용한다.

선택적 촉매 반응기(SCR: Selective Catalytic Reduction, 이 후 SCR)법은 탈질 촉매와 환원제를 이용하여 질소산화물을 질소와 수증기로 전환하는 방법으로, 타 건식법에 비해 고정자산 투자와 운전비가 저렴하고, NH₃ 공급기와 반응기만이 필요한 단순공정이며, 높은 질소산화물 제거효율과 폐수 등의 부산물이 없어 현재 발전소, 소각로 등의 고정식 배연탈질 기술로 가장 많이 사용되고 있다^[10].

Fig. 2-1은 선박에서 보편적으로 채택되고 있는 선택적 촉매 반응기의 구조와 질소산화물이 질소와 수증기로 환원되는 원리를 보여주고 있다.

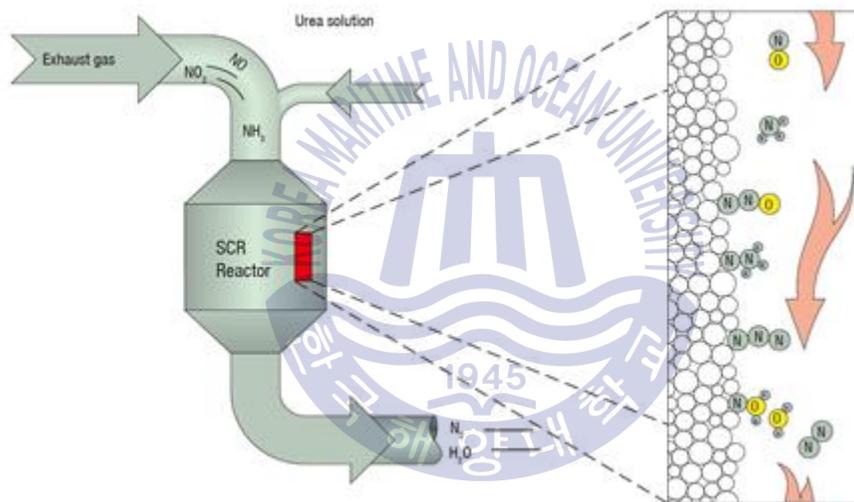


Fig. 2-1 The SCR system^[11]

Table 2-1 는 현재 시행중인 다섯 가지 기술들의 특성을 비교한 자료이다. 비교 대상이 된 기술들은 배출규제에 대한 질소산화물 배출 저감을 완전히 구현하기에 전부 무리가 있다. SCR은 저감 효율이 매우 뛰어나고 연료 효율 등 안정적 설비 운용이 유리하기 때문에 차후 대안으로 주목하고 있다, 대용량 운송을 주 목적으로 하는 선박의 경우 공간 효율이 주요한 과제이므로 기관실 체적의 25%~30% 수준을 차지하는 탈질촉매 반응기의 체적을 최소화하는 것이 난제로 되어 있다^[10].

이에 대해 SCR 시스템 설비의 경량화 및 최적화 또는 EGR과의 hybrid 병합 기술 시스템 개발에 대한 연구 등이 활발히 진행되고 있다.

Table 2-1 DeNO_x technology^[10]

Technology	Reduction Capability	Fuel Economy	Applicability	Running Cost	Remark
WFE (WaterFuelEmulsion)	△	△	○	○	Primary method low efficiency
EGR (ExhaustGasRecirculation)	○	△	○	○	
SAM (ScavengeAirMoistening)	△	△	△	○	
SCR (SelectiveCatalyticReduction)	◎	◎	○	△	High efficiency
Plasma	○	○	X	-	Pilot step

SCR을 활용한 질소산화물 제거법은 1989년 현대상선이 현대중공업(주)에 발주한 Hot Coil 운반선인 MV“Pacific Success“호에 최초로 설치된 후 구 한진해운(주)가 동일 목적의 후속선 MV “Hanjin Pittsburgh“호를 발주하고 이 후 대한해운에서 2척 (MV” New Horizon’, MV “Delta Pride“)이 추가되어 수년간의 상업 운항을 통해 그 성능이 입증 되었다. Fig. 2-2는 MV“Pacific Success“호의 실제 사진이다.



Fig. 2-2 The World 1st SCR equipped ship, MV “Pacific Success”^[12]



2.2 대상선박의 선정과 제원

현재 질소산화물 배출규제해역으로 지정되어 있는 북아메리카 서부해역을 운항하는 선박의 연료소모량, 운항 자료 등을 분석하기 위한 표본 선박의 명세는 Table 2-2와 같다.

Table 2-2 Ship's particulars^[13]

		A vessel	B vessel
D/L		08.2.4	08.3.20
LOA		339.62	339.62
Breath Moulded(m)		45.6	45.6
Depth Moulded(m)		24.6	24.6
DWT(MT)		99,052	99,043
G/T(ton)		94,511	94,511
N/T(ton)		51,638	51,638
M/E	Cylinder × Bore	14 × 96	14 × 96
	MCR×RPM	108,920 BHP × 102	108,920 BHP × 102
	NCR×RPM	98,030 × 98.5	98,030 × 98.5
G/E	Type	7L 32/40H	7L 32/40H
Service Speed(knots)		27.00	27.00

표본 선박은 부산 신항을 출항하여 북아메리카 서부해역을 통과하기 위해 배출규제해역에 진입하기 전에 중유(H.F.O., Heavy Fuel Oil)에서 황함유량이 0.1% m/m를 초과하지 않는 저유황유로 연료유를 전환(bunker change) 한다. 그 후 미국의 타코마항, 시애틀항, 캐나다 밴쿠버항 등을 운항하고 캐나다 밴쿠버항을 출항한 뒤 배출규제해역을 벗어나게 되면 저유황유에서 다시 황 함유량이 3.5% m/m 이하인 중유로 연료유를 전환하고 있다^[13].

Fig. 2-3과 같이 표본 선박은 북아메리카 해역의 경우 미국과 캐나다 동·서부 영해기선으로부터 200 nm 떨어진 거리이기에 EAST BOUND 시 미국 타코마항을 입항하기 위해 북아메리카 해역 통과 전부터 미국 타코마항 입항까지 가장 많은 저유황유를 소모한다^[13].

이와 같이 배출규제해역을 운항하는 선박의 경우 협약에 따라 연료유 수급 시 유종, 수급량, 연료유 수급 항구, 황 함유량 및 비중 등의 정보가 포함된 연료유



Fig. 2-3 General view of the North American Emission Control Area^[13]

공급서(Bunker delivery note)를 3년 동안 본선에 보관하여야 하며 연료유 공급서는 인도되는 연료유의 대표 샘플과 함께 제공되어야 한다.

제공된 샘플은 연료유 공급작업 완료 후 연료유 공급자의 대리인과 책임사관이나 선장에 의해 밀봉이 되고 서명이 되어야 한다. 그리고 해당 연료유가 다 소모될 때까지 본선에 보관되어야 하지만, 어떤 경우든 공급 후 12개월 이상 보관되어야 한다. 또한 황산화물 배출규제해역에 들어가거나 나오는 선박들은 배출규제해역에 들어가기 전 0.1% m/m를 초과하는 연료유를 완전히 씻어낼 수 있도록 충분한 시간 동안 연료 교환이 수행되었다는 것을 증명하는 문서화된 절차가 수립되어야 한다^[13].

아울러 황산화물 배출규제해역에 들어가기 전 완료된 연료유 전환작업, 또는 그러한 해역으로부터 나온 후 개시된 연료유 전환작업이 실행된 선박의 위치, 날짜, 시간뿐만 아니라 각 탱크의 저유량 용량을 기재하여야 한다^[13].

선박의 연료소모량은 선종 및 크기와 운항 속도 등에 따라 다르게 나타난다. 선종별 운항비용을 보여주는 한 일레인 Fig. 2-4는 선박 운항 비용 중 가장 큰 비중을 차지하는 연료비는 컨테이너선에서 가장 크다는 것을 알 수 있다.



Fig. 2-4 Fuel cost per ship type^[14]

Fig. 2-5는 연료가 10% 절감되었을 경우 연간 연료비 절감액을 선종 별로 보여 준다. 연료소모량 비중이 가장 큰 대형 컨테이너선(7,500 TEU)의 경우 연료 절감액은 가장 크게 나타나고, 연료유 가격이 톤당 300달러인 경우 1,770,000달러이다. 연료유 가격이 700달러인 경우 연 4,130,000달러를 절감함을 알 수 있고, 동 가격에서 MR(Medium Range) 탱커와 수프라막스(Supramax) 벌크선의 연간 절감액은 약 600,000달러 내외에 그침을 알 수 있다^[15].

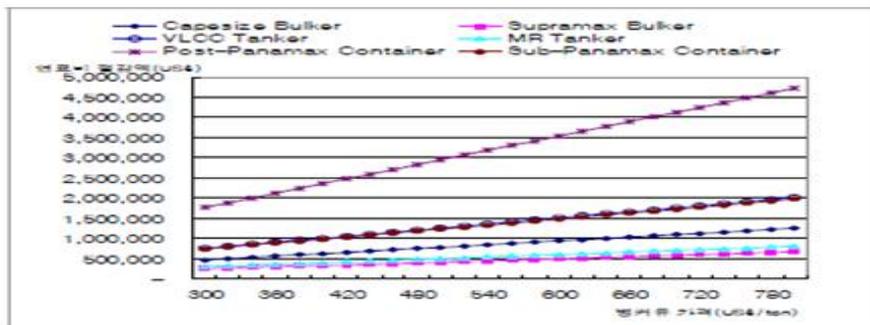


Fig. 2-5 Annual fuel saving^[16]

이와 같이 운항 최적화로 연료소비를 줄이는 것은 현재 해운 시황에 중요한 사안이고, 이는 표본 선박의 운항 패턴에서도 알 수 있다. 또한 선박연료비는 선박운항비 전체에 차지하는 비중이 워낙 크기 때문에 국제 유가의 변화에 관계없이 연료비 절감 대책을 세우는 것은 매우 중요하다.

Table 2-3에 따른 데이터를 기초로 살펴보면 일일 연료소모율은 탱커나 벌크선에 비해 컨테이너선이 압도적으로 큰 것을 알 수 있다. 그러나 이 데이터는 선박 운항 저속화(Slow Steaming) 이전의 데이터를 사용하고 있어 최근 운항 실태보다 연료 소모율이 과도하게 사용되고 있다^[15].

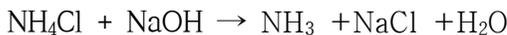
Table 2-3 Specification of standard vessel, Clarkson^[16]

Kind of vessel	Type	DWT or TEU	Average speed(kts)	Average F.O. consumptions(ton/day)
Bulk	Capesize	172,000	14.75	56
	Supramax	52,454	14.25	30
Tanker	VLCC	300,00	14.5	90
	MR	47,000	14.5	36
Container	post-panamax	7,500	24.2	210.6
	Sub-panamax	2,500	22.1	88.2

제 3 장 요소(urea)요구량 예측과 공급체인망 시뮬레이션

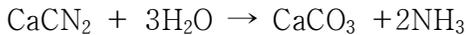
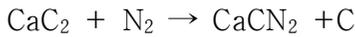
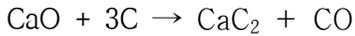
디젤 기관의 연소가스에 포함된 질소산화물은 주로 엔진의 고효율화가 원인이며 이를 제거하는 질소산화물 저감기술 중 본 논문에서 다루는 기술은 기관 연소 시 배연탈질에 의해 생성된 배기가스 속에 포함된 NO_x 를 SCR로 통하게 하여 반응판에 암모니아를 주입하여 질소(N₂)와 수증기로 분해하는 탈질법이다. 선택적 촉매 반응기(reactor)와 촉매장치(catalyst)는 기관 최고 출력점에 맞게 설계하여 제작되는 고정 변수이며 기관 부하의 변동에 따라 주입되어야 할 암모니아는 부하에 따른 정량 변수이다. 따라서 암모니아는 주입량이 수시로 변하게 된다. 암모니아의 생산 방법에는 여러 가지가 있다.

그 첫 번째 방법으로 제철소에서 철을 만드는 공정에서 질소산화물이 부산물로 생성이 된다. 철광석 용융 연료로 사용되는 코크스는 석탄을 공기가 없는 용광로에서 높은 온도로 가열 증류하여 생산되는 연료이다. 증류과정에서 생성되는 가스에는 휘발성 성분이 포함되어 있고, 그 중에는 석탄에 포함되어 있던 질소성분도 들어 있다. 즉 석탄을 태우고 열처리하는 공정이 필요한 제철 산업의 부산물로 얻어진 염화암모늄(NH₄Cl)을 적절하게 반응하거나 분해시켜 암모니아를 얻는 방법이나 암모니아의 생산량은 그리 많지 않다.

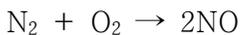


두 번째 방법으로 칼슘 카바이드는 물과 반응하면 아세틸렌 [CaC₂ + 2H₂O → C₂H₂ + Ca(OH)₂] 이 발생된다. 칼슘 카바이드를 제조하는 데 에너지가 너무 많이 소모되어서 경제성은 없다. 코크스(C)를 생산할 때도 높은 온도가 필요하고, 코크스와 산화칼슘을 반응시킬 때에도 거의 2,000°C 에 근접하는 온도를 유지해

야 되기에 많은 에너지를 필요로 하는 공정이다. 아세틸렌에 물과 반응시켜 암모니아를 생산하는 방법이나 경제성이 낮다.

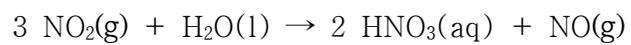
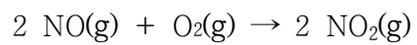
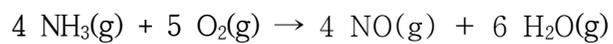


질소산화물을 얻는 세 번째 방법은 산화질소(NO)를 대량으로 생산하는 것이다. 이 방법 역시 전기 아아크를 이용하여 반응을 진행한다.



화학반응이 산화질소가 생성되는 방향으로 잘 진행이 되려면 이 반응도 약 3,000°C의 온도가 필요하다. 이 반응은 일단 산화질소가 형성되어 반응이 평형에 도달하면 역 반응도 잘 진행 된다. 산화질소가 형성이 되면 산화질소가 생성되는 반응속도와 산화질소가 소멸되는 반응 속도가 같아져서 다른 조치를 취하지 않으면 산화질소를 얻으려는 목적을 달성할 수가 없다. 그러므로 공기 중에 풍부한 질소와 공업적으로 생산되는 수소를 반응시켜서 암모니아를 얻는데 수확량(yield)이 매우 낮다.

1900년 초에 Wilhelm Ostwald 교수는 암모니아 생산에 관한 특허를 등록하였으나 BASF(1865년 설립된 독일의 다국적 화학기업: Badische Anilin-und Soda Fabrik(영어: Baden Aniline and Soda Factory) 연구자들은 Ostwald 실험을 반복해서 암모니아 형성에 공급된 질소는 공기 중에 있는 질소가 아니라 반응용기의 제작에 사용했던 철에 불순물로 남아 있던 질소라는 것을 확인했다.^[17]



3.1 SCR을 활용한 NO_x 제거반응에 필요한 요소 요구량 산정배경 이론

3.1.1 NH₃ 분해과정

요소는 고형분으로서 (NH₂)₂CO을 화학식으로 가지는 유기화합물이다. 요소를 처음 NH₄OCN → H₂NCONH₂ 으로 합성한 사람은 프리드리히 뵐러이다. 그는 무기화합물인 시안산 암모늄의 수용액을 가열하여 요소를 합성하는데 성공하였다.

인간이 처음으로 무기화합물로부터 요소를 합성했기 때문에, 유기화학 역사상 중요한 물질이다. 포름알데히드(HCHO)와 반응하여 요소 수지를 만드는데 사용할 수 있다. 또한 고농도의 수용액은 단백질과 핵산을 변형시키는데 사용된다.

물과 혼합하면 흡열반응이 일어난다. 질산암모늄과 요소가 혼합된 분말과 물이 들어가 있는 팩을 같이 넣어 냉각팩을 만드는 데 사용할 수 있다^[18].

요소의 특징은 무색이며 암모니아 냄새가 나고 PH 8~10 이다. 비중은 1.09이며 점도는 1.0 cP/20℃ 이하이다. 상온 및 상압에서 안정하고 보관 시 산, 염기, 산화제, 금속염, 가연성 물질 등은 피해야 한다^[19].

요소 용액 분해의 첫 번째 단계는 식(3-1)과 같이 물 분자의 증발이다. 증발에 필요한 열은 요소 용액(urea solution) 방울이 포함된 고온의 배기가스에 의해 공급된다.



식(3-2)와 같이 액체 요소는 추가로 가열되고 기화 되어 기체 상태가 된다.



기화 반응의 속도는 기화 에너지(h_{vap})가 87.4 kJ/mol 일 때 다음 식(3-3)에 의해 주어진다.

$$k_{urea,vap} = (1.0 \times 10^{12}) \times e^{\left(\frac{h_{vap}}{R \times T}\right)} \quad (3-3)$$

기화된 요소 분자는 열분해 또는 가수 분해의 두 가지 메커니즘 중 하나에 의해 분해된다. 열분해반응은 하기 식(3-4)의 반응에 따라 요소 분자가 암모니아 및 이소시아산으로 분해되는 것을 포함한다.



아래 식(3-5)와 같이 가수 분해 반응은 이소시아산 분자를 암모니아와 CO_2 로 더 분해하기 위해 물을 사용한다.



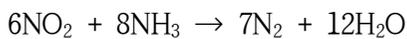
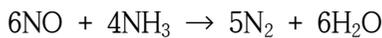
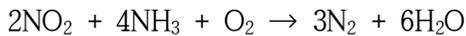
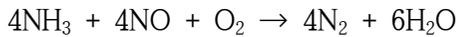
열역학적으로 가수 분해 반응은 약 200°C의 온도가 선호되지만, 배기가스의 온도에 가까운 400°C에서도 열분해 및 가수분해 메커니즘의 반응속도는 거의 동일하다. 이러한 반응을 통해 생성된 NH_3 는 NO와 반응하여 N_2 와 수증기(H_2O)로 환원된다^[20].

3.1.2 NO_x 저감 주요 반응식

요소에서 발생된 NH_3 를 환원제로 사용하는 SCR 반응은 첨가된 NH_3 가 NO와 NO_2 를 환원시키는 반응에 참여하는 주반응인 NO_x의 환원반응과 산소 존재 하

에서 NH₃의 산화반응 그리고 미 반응 NH₃와 배기가스 중에 존재하는 SO₂ 등의 가스와 반응하여 암모늄염을 생성하는 부가적인 반응으로 나눌 수 있다^[21].

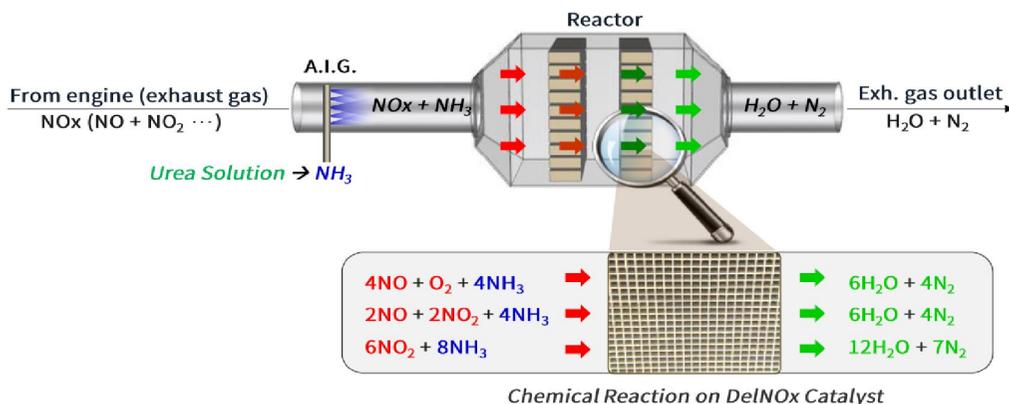
NO_x 저감 주요 반응식은 다음과 같다.



SCR 촉매는 배기가스와 환원제인 NH₃가 촉매표면에서 만나 상기 환원 과정과 같은 표면 반응(surface reaction)이 일어나게 된다. Fig. 3-1과 같이 1차적으로 배기가스에 NH₃가 확산되어 혼합된 상태에서 촉매 표면에 도달하게 되면, 반응면(reaction site)의 세공(pore)내로 암모니아가 확산되어 흡착된다. 이후 NO는 NH₃가 흡착된 세공 반응면 내로 확산되고 화학 반응을 거쳐 NH₃와 NO는 N₂ 및 H₂O로 환원되어 배출 가스로 탈착 확산되는 원리이다^[22].

SCR
truly eco-friendly
technology

• Nitrogen oxides (NO_x) with ammonia gas (NH₃) are converted into pure water (H₂O) and nitrogen (N₂) by chemical reaction in a DeNO_x reactor



이와 같은 표면 반응은 암모니아에 NO의 선택적 환원 반응의 해석에 있어서 대표적인 메커니즘으로 Fig. 3-2에 나타난 이중점 (dual-site) Eley-Rideal 형태의 메커니즘을 들 수 있다. 이는 V₂O₅ 상에서 NO-NH₃-O₂에 의한 SCR 반응 메커니즘으로 반응 경로는 아래와 같다.

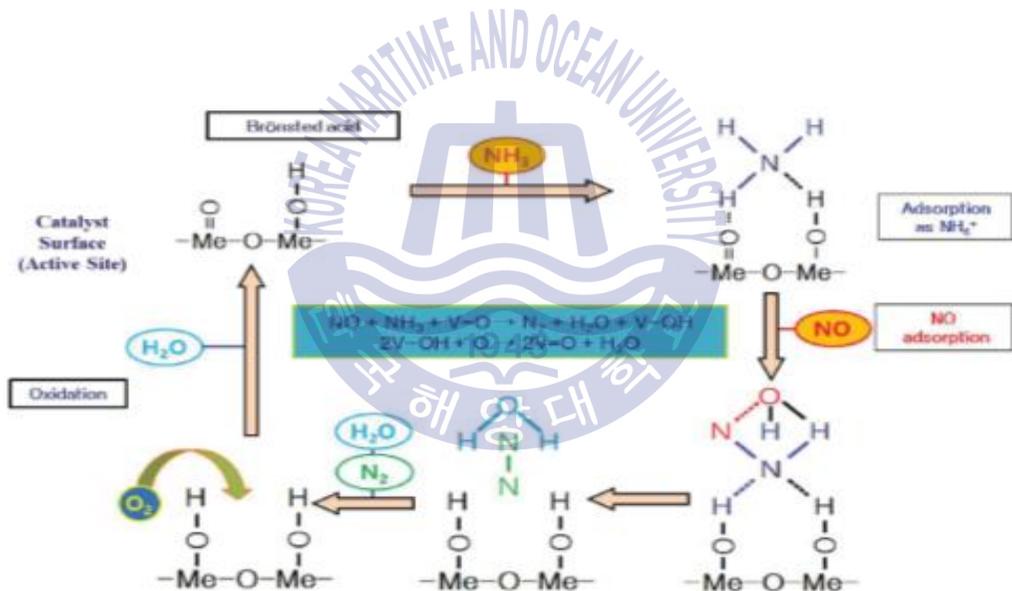
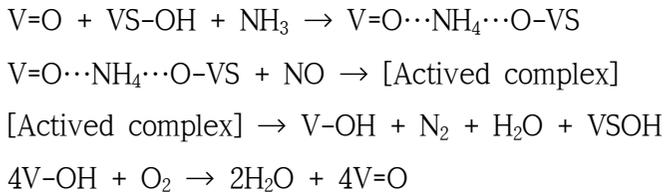


Fig. 3-2 Reaction mechanism of selective catalytic reduction for NO_x (Dual sites Eley-Rideal)^[26]

이 메커니즘은 산소로 인한 산화 반응을 통한 재순환이 가능하다는 전제하에 성립이 된다. 암모니아가 Bronsted 산¹⁾점에 강하게 흡착되어 NH_4^+ 를 형성하고 여기에 NO가 약한 상호작용을 하여 활성 complex를 형성한 다음 N_2 와 H_2O 를 생성하고 환원된 표면을 만든다. V-OH는 기상의 산소나 bulk 산소에 의해 재산화된다. 반면에 암모니아 흡착에서 Bronsted 산점으로 작용하던 VS-OH는 V_2O_5 의 결정 구조로 인해 산화되지 않는다. 상기 메커니즘은 V=O와 V-OH의 명확한 구분이 있으며 특히 Bronsted 산점의 주 역할이 명시된다.^[24,25]



1) 산을 프로톤 공여체(protondonor), 염기를 프로톤 수용체(protonacceptor)로 하는 정의에 따르는 산, 염기를 브뢴스테트 산, 브뢴스테트 염기라고 한다. 1923년에 J. N. Bronsted와 T. M. Lowry가 각각 독자적으로 이 정의를 제출하였다. 예를 들면 $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$ 에 있어 NH_4^+ 은 산이고 NH_3 은 염기이다. 또한 HCl은 수중에서 다음과 같이 해리한다. $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-$ 여기서 HCl은 산이고 H_2O 는 염기이다. 또 H_3O^+ 를 H_2O 의 공역산, Cl^- 를 HCl의 공역 염기라 한다. 이 정의는 수용액 중에 한하지 않고 비수용액 중에 있어서도 통용된다 (화학용어사전, 2011. 1. 15., 일진사)

3.2. 북미 배출통제해역 항행 패턴분석을 통한 부하별 배기가스량 계산

3.2.1 선박 A호/B호의 연료소모량 및 운항 자료 등의 분석

선행연구 「선박운항패턴 분석을 통한 배기가스 후처리 장치 설치 용량에 관한 연구」를 인용하여 Table 3-1은 표본 선박 A호의 3항차(East & west bound) 운항기록을 요약하였다.

실제 A호의 경우 항차별 평균속력(sea voyage)은 16.5 노트~18.8 노트로 운항하는 것을 알 수 있다. 이에 따라 중유의 경우 1,316.1 M/T~1,675.4 M/T을 사용하고, 저유황유는 129.6 M/T~265.6 M/T을 사용하고 있음을 알 수 있다.

또한 2016년 4월 1일 이후 중국의 상하이 등 장강 삼각주(Yangtze River Delta) 핵심 항구들에 접안하는 모든 선박들은 접안기간동안 0.5% 이하의 황함유량을 만족하는 연료유를 사용하도록 함에 따라 부두 접안 중 사용된 저유황유의 소모량은 52E 항차의 경우 지난 항차 대비 2배 이상 증가하였음을 알 수 있다.

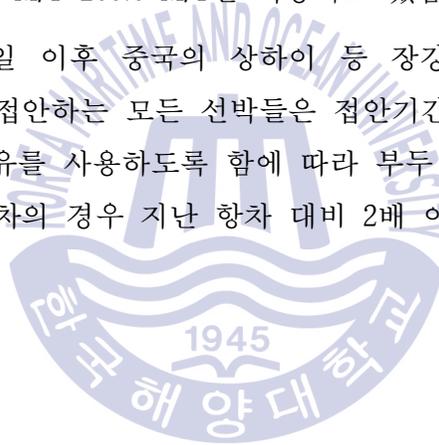


Table 3-1 Sailing table of A vessel

		50E (HKHKG~USTIW)	51E (HKHKG~USTIW)	52E (HKHKG~USTIW)
PERIOD		16.1.30~16.2.19	16.3.11~16.3.30	16.4.22~16.5.12
VOYAGE TOTAL HOURS	HARBOUR	1D 08H 54M	1D 13H 00M	1D 07H 30M
	SEA	14D 06H 18M	12D 22H 12M	13D 13H 48M
	TOTAL	15D 15H 12M	14D 11H 12M	14D 21H 18M
DISTANCE (SM)	HARBOUR	345	365	351
	SEA	5,923	5,833	5,872
	TOTAL	6,268	6,198	6,223
AVG. SPEED(SEA VOYAGE) knots		17.3	18.8	18.0
		50W (USTIW~HKHKG)	51W (USTIW~HKHKG)	52W (USTIW~HKHKG)
PERIOD		16.2.18~16.3.12	16.3.29~16.4.23	16.5.10~16.6.4
VOYAGE TOTAL HOURS	HARBOUR	1D 09H 30M	1D 16H 54M	1D 15H 18M
	SEA	14D 02H 24M	15D 06H 42M	15D 17H 24M
	TOTAL	15D 11H 54M	16D 23H 36M	17D 08H 42M
DISTANCE	HARBOUR	392	437	408
	SEA	6,218	6,200	6,214
	TOTAL	6,610	6,637	6,622
AVG.SPEED(SEA VOYAGE) knots		18.4	16.9	16.5

선행연구인 참고문헌 27을 인용하여 Table 3-2는 표본 선박 B호의 3항차 (EAST & WEST BOUND) 운항기록을 바탕으로 작성하였다. 실제 B호의 경우 항차별 평균속력은 16.4 노트~18.1 노트로 운항하는 것을 알 수 있다.

또한 중유의 경우 1,285.0 M/T~1,507.2 M/T을 사용하고, 저유황유는 122.9 M/T~289.2 M/T을 사용하고 있음을 알 수 있다^[27].

Table 3-2 Sailing table of B vessel

		48E (HKHKG-USTIW)	49E (HKHKG-USTIW)	50E (HKHKG-USTIW)
PERIOD		16.2.19.~16.3.10.	16.4.1.~16.4.21.	16.5.13.~16.6.2.
VOYAGE TOTAL HOURS	HARBOUR	1D 05H 36M	0D 19H 18M	1D 06H 48M
	SEA	14D 10H 18M	13D 21H 18M	13D 22H 18M
	TOTAL	15D 15H 54M	14D 16H 36M	15D 05H 06M
DISTANCE	HARBOUR	282	213	278
	SEA	5,958	5,968	6,042
	TOTAL	6,240	6,181	6,320
AVG. SPEED(SEA VOYAGE) knots		17.2	17.9	18.1
		48W (USTIW-HKHKG)	49W (USTIW-HKHKG)	50W (USTIW-HKHKG)
PERIOD		16.3.8~16.4.2	16.4.19~16.5.14	16.5.31~16.6.25
VOYAGE TOTAL HOURS	HARBOUR	1D 08H 18M	1D 10H 48M	1D 10H 06M
	SEA	15D 13H 30M	15D 20H 00M	15D 17H 54M
	TOTAL	16D 21H 48M	17D 06H 48M	17D 04H 00M
DISTANCE	HARBOUR	381	383	418
	SEA	6,256	6,257	6,216
	TOTAL	6,637	6,640	6,634
AVG. SPEED(SEA VOYAGE) knots		16.7	16.5	16.4

3.2.2 운항자료 분석과 배기가스산출 결과에 따른 NO_x 발생량 산정

알보그 대학 (Aalborg University)의 2010년에 진행된 선행연구 참고문헌 28의 논문에 따르면 배기가스 분자량은 30.03g/kW·h로 정의 되며 이에 따른 NO_x 발생량을 추정할 양은 아래 식과 같다.

IMO Tier-III 규정을 준수하는 최대 허용 NO_x 배출량은 3.4 g/kW·h이다. IMO Tier-I 규정은 2000년 이후 생산된 모든 엔진에 대해 적용되었으며 최대 NO_x

배출량을 17 g/kW·h로 명시하고 있다. 이 값은 현재의 NO_x 배출을 결정하기 위한 시작점으로 간주된다. Tier-I을 준수하는 엔진에서 나오는 NO_x의 질량 흐름은 식(3-6)과 같다.

$$\dot{m}_{NOx Tier I} = \frac{NOx_{Tier I} kW \times Load}{3600 \times 1000} \quad (3-6)$$

$\dot{m}_{NOx Tier I}$ = Mass flow of NO_x in kg/s

$NOx_{Tier I}$ = Specific emission rate of NO_x in g/kW·h

Tier-III 규정을 준수하는 최대 허용 NO_x 유량은 식(3-7)과 같이 구한다.

$$\dot{m}_{NOx Tier III} = \frac{NOx_{Tier III} kW \times Load}{3600 \times 1000} \quad (3-7)$$

$\dot{m}_{NOx Tier III}$ = Mass flow of NO_x in kg/s

$NOx_{Tier III}$ = Specific emission rate of NO_x in g/kW·h

IMO Tier-I 규정의 도입 기준이 기관 회전수 130rpm이하의 2행정 저속 기관의 경우 최대 NO_x 배출량의 기관 제작사들의 평균치인 17 g/kW·h로 가정하고 이를 상기 식에 대입하면 NO_x 유량은 17 x Load in KW/(1000x3600)이다. 이를 최대 기관부하가 80,110.66 kW인 모델선박의 SMCR에 대해 계산해보면 0.3783 kg/s의 NO_x mass flow가 구해진다. 같은 방법으로 표본 선박의 부하별 NO_x 발생량을 산정하고 이를 제거하기 위한 NH₃의 필요한 질량과 유량을 구한다.

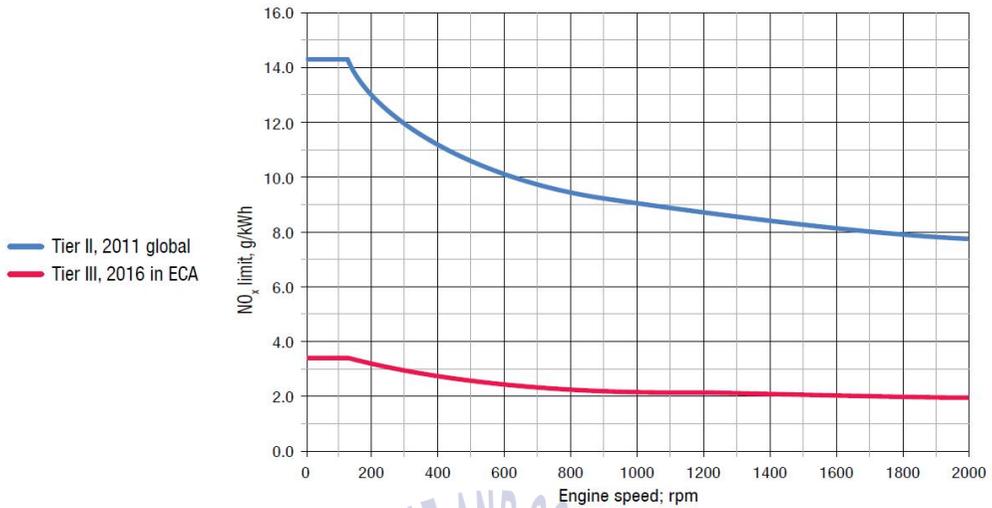


Fig 3-3 NO_x emission limits according to MARPOL Annex VI^[11]

NO_x 배출량은 시간 당 배출되는 NO_x의 값을 의미한다. 엔진에서 실제로 배출되는 NO_x 량은 배기가스 용적 유량 비율에 비례하여 커지며, 배기가스의 온도 및 압력 조건에 맞게 보정되어야 한다. 체적 유량은 식(3-8)과 같이 결정 된다.

$$V_{calc,corr} = \frac{\dot{M}_{exh}RT}{P} \quad (3-8)$$

$V_{calc,corr}$ = Corrected volumetric flow rate from Module 1 in m³/s

\dot{M}_{exh} = Molar flow of exhaust as determined in module 1 in mol/sec

3.3. NO_x 제거반응을 위한 요소(urea) 요구량 추정 계산

3.2의 SCR 기술을 활용한 NO_x 반응을 위한 NH₃ 요구량 산정 배경 이론에 따라 V=O + VS-OH + NH₃ 반응에 요구되는 암모니아량을 추정할 수 있다. 암모니아는 IGC규정을 따라함은 물론 유독하고 폭발성 가스이므로 고형체인 요소를 쓰는 것이 최근 동향이므로 본 논문에서는 암모니아의 고형분인 요소의 양을 산출한다.

청수를 사용하여 고형분인 요소에서 암모니아를 기체화 하므로 요소는 기체 발생 시의 손실을 감안하여 식(3-9)와 같이 특정 조건하의 NH₃의 소비량을 구한다.

$$\dot{m}_{NH_3} = \dot{m}_{exh,hr} \times \left(\frac{ppm_{mass, Tier I}}{1 \times 10^6} \right) \times \left(\frac{MW_{NH_3}}{MW_{NO}} \right) \times R_{NO-NH_3} \quad (3-9)$$

\dot{m}_{NH_3} = Mass flow rate of NH₃ in kg/h

$ppm_{mass, Tier I}$ = Concentration of NO in parts per million by mass

MW_{NH_3} = Molecular weight of ammonia in g/mol

R_{NO-NH_3} = Ratio of NH₃ to NO

NO_x 반응에 요구되는 NH₃의 투여 비율은 SCR 장치의 출구단(outlet)에서 암모니아의 허용 슬립과 필요한 감소를 식(3-10)과 같이 고려해야 한다. 슬립은 SCR 장치에서 반응하지 않았고 장치에서 미 반응된 암모니아를 말한다.

$$R_{NO-NH_3} = \left(\varepsilon + \frac{Slip \times \left(\frac{MW_{exh}}{MW_{NO}} \right)}{ppm_{mass, Tier I}} \right) \quad (3-10)$$

ε = Effectiveness

Slip = Maximum allowable NOx at reactor outlet in ppm by vol

NH_3 의 필요한 질량과 유량이 알려지면 요소 용액의 질량과 유량을 식(3-11)에서 결정할 수 있다.

$$\dot{m}_{Urea} = \frac{\dot{m}_{NH_3}}{urea} \frac{MW_{urea}}{MW_{NO}} \frac{100}{2} \quad (3-11)$$

\dot{m}_{Urea} = Mass flow of urea in kg/h

MW_{urea} = Molecular weight of urea in g/mol

urea = Percent of urea in solution by weight

그리고 요소 수용액의 비중은 요소 수용액의 부피 유량을 결정하는 데 사용되며 식(3-12)와 같다.

$$\dot{V}_{Urea} = \frac{\dot{m}_{Urea}}{SG_{urea} \times 1000} \quad (3-12)$$

\dot{V}_{Urea} = Volumetric flow rate of urea solution in m^3/h

SG_{urea} = Specific gravity of urea^[28]

북미 배출통제해역에서 운항되는 표본 선박 A호가 미국의 타코마항, 시애틀

항 및 캐나다 밴쿠버항을 운항할 때 각 구간에서의 기관 부하를 분석하여 배기 가스량을 MDT사의 CEAS 프로그램을 활용하여 계산하였다.

표본 선박의 항차별 각 구간을 향해 시 실제기관 부하를 분석하여 각 구간의 평균치를 구하고 SMCR이 82,440 kW 인 기관의 부하별 요소 요구량은 Table 3-3과 같이 구할 수 있다. 이를 기준으로 표본 선박별 요소 요구량을 비례 계산 한 결과는 Table 3-4(표본 선박 A), Table 3-5(표본 선박 B)과 같다.

Table 3-3 SCR calculated summary for SCR urea consumption
- Tier-III

Load %SMCR	ISO (L/h)	Tropical (L/h)	Specified (L/h)
100	1150	970	1170
95	1160	970	1190
90	1170	960	1190
85	1170	960	1190
80	1160	950	1180
75	1150	940	1170
70	1120	910	1150
65	1090	880	1110
60	1050	840	1070
55	1010	790	1020
50	950	740	970
45	910	690	920
40	850	630	860
35	780	480	790
30	700	430	700
25	600	370	610

Table 3-4 Urea requirement of A vessel

Section	VOYAGE 50			VOYAGE 51			VOYAGE 52		
	Engine Load (kW)	%	Urea (L/h)	Engine Load (kW)	%	Urea (L/h)	Engine Load (kW)	%	Urea (L/h)
~USTIW	21694.49	27.08	614.02	20966.6	26.17	593.43	19808.46	24.73	576.67
USTIW~USSEA	10515.00	13.13	306.11	9310.00	11.62	271.03	8705.00	10.87	253.42
USSEA~CAVAN	19580.00	24.44	570.02	17696.4	22.09	515.18	21714.0	27.11	614.58
CAVAN~	22110.23	27.60	625.8	23115.7	28.86	654.25	20860.23	26.04	590.42
TOTAL			2115.95			2012.05			2035.09

Table 3-5 Urea requirement of B vessel

Section	VOYAGE 48			VOYAGE 49			VOYAGE 50		
	Engine Load (kW)	%	Urea (L/h)	Engine Load (kW)	%	Urea (L/h)	Engine Load (kW)	%	Urea (L/h)
~USTIW	15654.62	19.54	455.74	19091.58	23.83	555.80	24079.74	30.06	701.01
USTIW~USSEA	6600.00	8.24	192.14	10850.00	13.54	315.87	9710.00	12.12	282.68
USSEA~CAVAN	16372.73	20.44	476.64	10848.46	13.54	315.82	19107.27	23.85	556.25
CAVAN~	8379.52	10.46	243.95	19900.00	24.84	579.33	19476.59	24.31	567.00
TOTAL			1368.47			1766.82			2106.94

최대 기관부하가 80,110.66 kW인 표본 선박의 SMCR 대비 각 부하별 요소 값을 비례 계산한 결과는 Table 3-6과 같다.

Table 3-6 Urea requirement at SMCR

Load SMCR(%)	Engine Load (kW)	Exh.gas (kg/s)	Urea (L/h)
100	80,110.66	169.86	1117.51
90	72,099.59	159.66	1136.94
75	60,083.00	156.55	1117.51
50	40,055.33	91.54	923.16
25	20,027.67	48.00	583.05



3.4 배출통제해역 운항선박의 원활한 SCR 운전을 위한 요소 물류 고찰

두 표본 선박의 항차별 배출통제해역에서의 기관 부하변동과 이에 따른 요소 소모량을 Fig 3-4, Fig 3-5에서 표본 선박 A의 결과를 알 수 있으며 Fig 3-6, Fig 3-7에서 표본 선박 B의 결과를 알 수 있다.

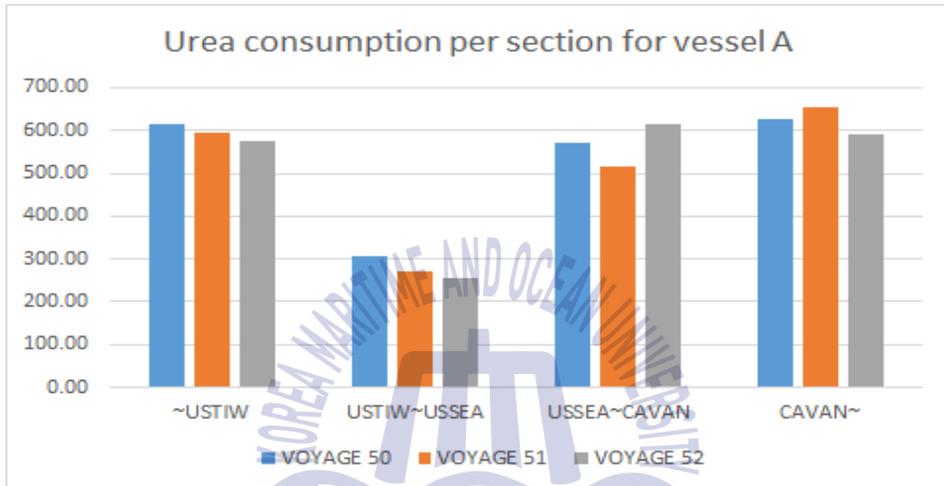


Fig 3-4 Urea Consumption per section for vessel A

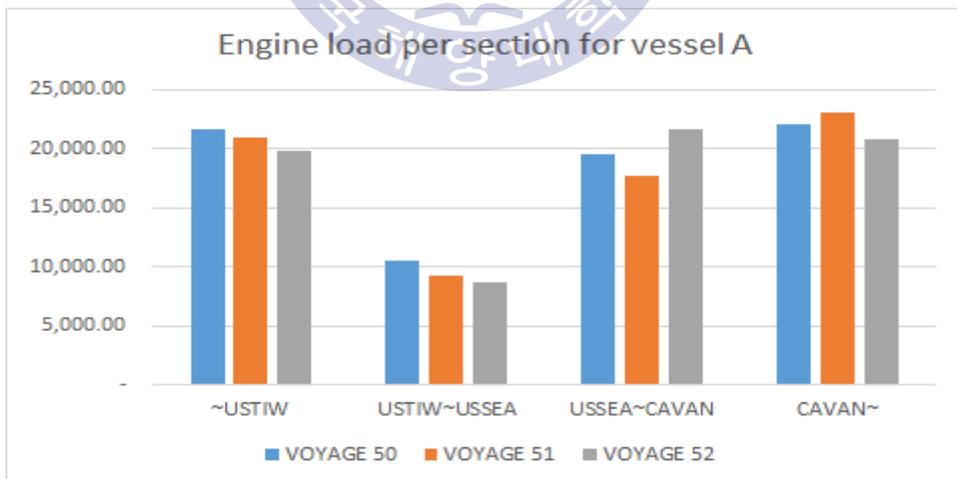


Fig 3-5 Engine load per section for vessel A

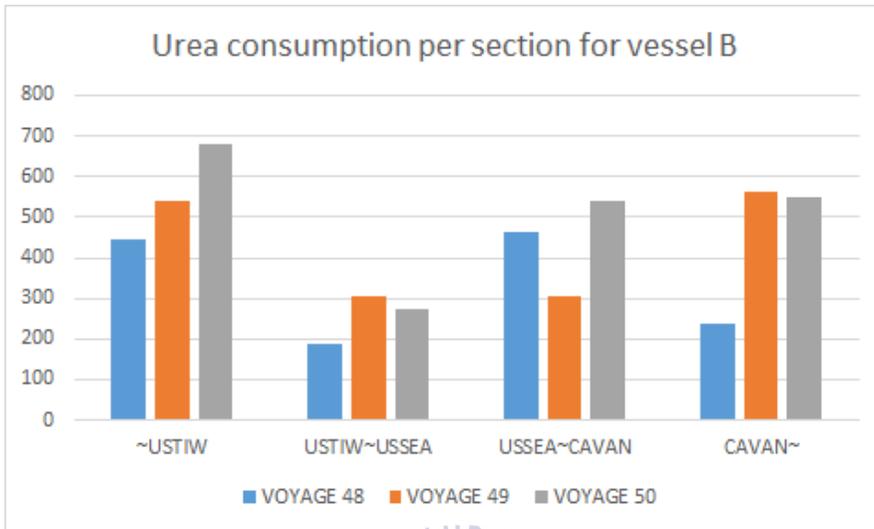


Fig 3-6 Urea Consumption per section for vessel B

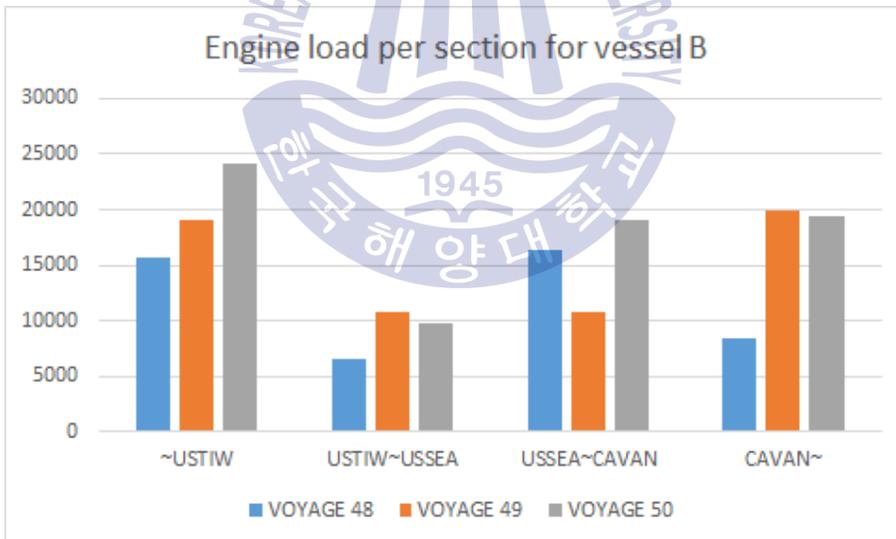


Fig 3-7 Engine load per section for vessel B

표본선박 A와 표본선박 B는 일부 구간을 제외하고 패턴이 비교적 일정하다. 또한 기관 부하가 증가함에 요소요구량도 일정하게 증가하며 항차별 패턴도 일정함을 알 수 있다. 결론적으로 배출통제해역에서의 기관 부하 예측과 이에 따

른 SCR에서 요구되는 요소의 요구량 예측이 가능하며 이를 기준으로 선박의 항차별 요소 물류 망 구축이 가능하다.

환경관련법이 계속 강화되면서 질소산화물 제거기술과 관련한 원자재 수급관리가 함께 중요한 문제로 새롭게 대두되었다. 선박 운항비 절약을 위해 연료비와 함께 친환경 자원물류비를 절감하고 정확한 원자재 수급을 위해서 각 선사는 적시 정량의 자재를 정 위치에 보관하는 것이 중요하다. 요소 요구량이 추정 가능함으로써 선박의 운항 패턴에 따라 각 지역별로 친환경 자원재고를 위치하게 하여 원활한 공급 망을 구축하는 것이 가능하다.

아래 Fig. 3-8은 글로벌 선사인 W사의 요소 공급체계 구축의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

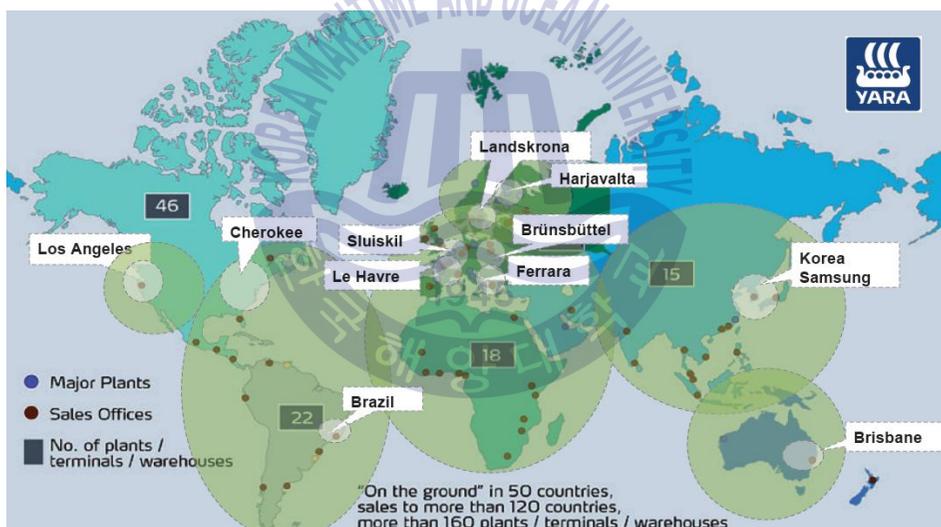


Fig. 3-8 NO_x Care 40 urea^[29].

본 연구에 표본선박을 제공한 선사도 배출통제해역을 향해해야 하는 선박의 운항 패턴과 기관 부하분석에 따라 유사한 요소 물류 대책 수립이 요구된다.

제 4 장 결 론

MEPC72차 회의에서 결의된 “CO₂ Zero“ 목표설정은 미세먼지의 주범으로 지목된 질소산화물에 규제를 더 강화할 것으로 예상되는 상황이다. 본 논문에서는 배출통제해역인 북미 서해안을 항해하는 대형 컨테이너선박의 배출통제해역 내 운항 패턴에 따른 기관부하 변화를 분석하고 발생하는 배기가스량을 산정하였다. 기관 부하별 생성되는 질소산화물을 감소시키기 위해 SCR을 통한 질소산화물 제거 기술을 활용한다는 전제하에 이때 요구되는 요소의 량을 산출 하였다.

본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 배출통제해역을 운항패턴을 분석하였다.
2. 기관부하와 배기가스 발생량에 따라 생성되는 질소산화물의 제거에 필요한 요소 요구량 산정이 가능하였다.
3. 본 연구를 위한 자료 조사 과정에서 SCR기술을 활용한 질소산화물 제거 법은 실선운항으로 그 효과가 증명되었다.

본 연구의 결과를 토대로 해운선사는 배출통제해역 운항 시 필요한 요소에 대한 물류체계를 구축할 수 있는 기초 데이터로 활용할 수 있다.

향 후 SCR 기술을 적용한 선박에서 실제 측정을 통해 질소산화물 반응 산정을 위한 요소 추정 요구치와 비교분석함으로써 질소산화물 발생과 요소산정 모델의 정확성을 높일 것이 요구된다. 질소산화물 규제 강화에 따른 선박의 신조 및 개조 시 요소반응 청수의 양과 조수기 용량 증대에 따른 전력부하분석(Electricity Load Analysis)으로 기관실 에너지 최적화에 도움을 주도록 하는 실증 연구를 제안한다.

참 고 문 헌

- [1] Clarksons Research, 2017. *SHIPPING REVIEW & OUTLOOK*, p.10.
- [2] ICCT, 2017. *Global shipping emissions rise as IMO meets to discuss climate action*, p.13.
- [3] 한국해양수산개발원, 2015. *LNG 추진선 도입에 따른 항만의 대응전략*, pp.11~12.
- [4] Korean Register, 2016. *Briefings of IMO Meeting MEPC 70*, p.5.
- [5] Lloyd's Register, 2018. *Future IMO & local regulations*, p.12.
- [6] Shall AVL Large Engines Conference, 2018. *Fuels Options for Large Engines - Today & Tomorrow*, p.8.
- [7] Doosan Engine, 2018. *Technical Trend of 2-stroke diesel engine*, p.17.
- [8] Doosan Engine, 2018. *Introduction of DelNO_x*, p.3.
- [9] 한국해양수산개발원, 2015. *LNG 추진선 도입에 따른 항만의 대응전략*, pp.13~14.
- [10] 박진우, 2015. *SCR 촉매의 셀 밀도에 따른 질소산화물 제거효율에 관한 실험적 연구*. 경북대학교대학원, pp.18~23.
- [11] MAN B&W Two-stroke Marine Engines, 2016. *Emission Project Guide*, p.9, p.43.
- [12] image, accessed at
<https://www.vesseltracker.com/en/ShipPhotos/936898-Pacific-Success-8821656.html>, 20180524, 10:25
- [13] 여실중, 2017. *선박운항패턴 분석을 통한 배기가스 후처리 장치 설치 용량에 관한 연구*. 한국해양대학교대학원, pp.27~28.
- [14] DNV-GL Seminar 자료, 원출처: PwC
- [15] 여실중, 2017. *선박운항패턴 분석을 통한 배기가스 후처리 장치 설치 용량에 관한 연구*. 한국해양대학교대학원, pp.29~30.
- [16] 한국수출입은행, 2012. *그린쉽 조선산업의 새로운 도전과 기회*, p.41,p.43.

- [17] 사단법인 한국과학문화진흥회,
<http://www.nobel.or.kr/nobel-story/chemistry-story/1939.htm>, 20180604,
 15:54
- [18] 위키피디아
[https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%9A%94%EC%86%8C_\(%ED%99%94%ED%95%99\)](https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%9A%94%EC%86%8C_(%ED%99%94%ED%95%99))
- [19] 롯데정밀화학, 2016. 액상요소(요소수) 32.5% Urea 32.5% solution, p.5.
- [20] Aalborg University, 2010. *Evaluation of Selective Catalytic Reduction for Marine Two-Stroke Diesel Engines*, p.17.
- [21] J. A. Miller & G. A. Fisk, 1987. *Combustion Chemistry. Feature Article for Chem. Eng. News*, p.65.
- [22] 박진우, 2015. SCR 촉매의 셀 밀도에 따른 질소산화물 제거효율에 관한 실험적 연구. 경북대학교대학원, p.26.
- [23] Doosan Engine, 2018. *Introduction of DelNO_x 2018*, p.8.
- [24] H. topsøe, 1994. *Mechanism of the selective catalytic reduction of nitric oxide by ammonia elucidated by in situ on-line fourier transform infrared spectroscopy*. Science 265(5176), pp.1217-1219.
- [25] J. M. G. Amores, V. S. Escibano & G. Ramis and G. Busca, 1997. *An FT-IR study of ammonia adsorption and oxidation over anatase-supported metal oxides*. Appl, Catal. 13(1), pp.45-58.
- [26] 박진우, 2015. SCR 촉매의 셀 밀도에 따른 질소산화물 제거효율에 관한 실험적 연구. 경북대학교대학원, p.29.
- [27] 여실중, 2017. 선박운항패턴 분석을 통한 배기가스 후처리 장치 설치 용량에 관한 연구. 한국해양대학교대학원, pp.30~35.
- [28] Aalborg University, 2010. *Evaluation of Selective Catalytic Reduction for Marine Two-Stroke Diesel Engines*, pp.45~49.
- [29] Wilhelmsen Technical Solutions, *SCR-walking on the talk*, p.6.