

기존 선박의 디젤발전기용 SCR 시스템 설치에 관한 연구

류영현¹ · 김홍렬² · 조규백³ · 김홍석⁴ · 남정길[†]

(Received January 8, 2015 ; Revised February 9, 2015 ; Accepted February 13, 2015)

A Study on the Installation of SCR System for Generator Diesel Engine of Existing Ship

Younghyun Ryu¹ · Hongryeol Kim² · Gyubaek Cho³ · Hongsuk Kim⁴ · Jeonggil Nam[†]

요약: IMO MEPC에서는 해양환경 보호를 위해서 선박으로부터 배출되는 배기가스 규제를 날로 점점 강화하고 있다. 특히, 2016년부터 건조되어 국제항해를 하는 모든 신조 선박에 대한 질소산화물(NOx) 배출량은 Tier-III 규제를 만족하게 되어 있다. 본 연구에서는 선박용으로 개발된 NOx 저감용 SCR(선택적 환원 촉매) 시스템을 기존 선박의 디젤발전기에 설치하여 NOx 저감성을 파악하고자 하였다. 본 연구를 위하여 목포해양대학교 실습선 새누리호 디젤발전기의 배기 파이프라인을 개조 공사하여 요소 SCR 시스템을 설치하였으며, 요소 용액(40%) 분사 방법은 수동 모드와 PLC를 통한 자동 모드로 나누어 두 가지 방법으로 실험을 하였다. 수동 모드 방법을 통하여 암모니아 슬립 발생구간을 찾을 수 있었으며, 엔진부하별(25, 35 및 50%)로 최적의 요소 분사량을 조절할 수 있었다. 부하를 Down-Up(25%에서 50%로 올리면서) 시보다도 Up-Down(50%에서 25%로 내리면서) 시에 NOx 저감성이 더 좋을 수 있었으며, 본 바나뉘계 촉매가 사용된 SCR 시스템을 기존 선박의 디젤발전기에 설치하여 질소산화물이 80% 이상 절감됨을 확인할 수 있었다.

주제어: IMO MEPC, 질소산화물, 선택적 환원 촉매, 프로그램 로직 제어, 바나뉘계 촉매

Abstract: The IMO MEPC has been increasingly strengthening the emission standard for marine environment protection. In particular, nitrogen oxide (NOx) emissions of all ocean-going ships built from 2016 will be required to comply with the Tier-III regulation. In this study, a vanadia based SCR (Selective Catalytic Reduction) system developed for ship application was installed on a diesel engine for power generation of the training ship T/S SAENURI in Mokpo National Maritime University. For the present study, the exhaust pipeline of the generator diesel engine was modified to fit the urea SCR system. This study investigated the NOx reduction performance according to the two kind of injection method of urea solution (40%): Auto mode through the PLC (Programable Logic Control) and Manual mode. We were able to find the ammonia slip conditions when in manual mode method. So, the optimal urea injection quantity can be controlled at each engine load (25, 35, 50%) condition. It was achieved 80% reduction on nitrogen oxide. Furthermore, we found that the NOx reduction performance was better with the load up-down (while down to 25% from 50%) than the load down-up (while up to 50% from 25%) test.

Keywords: IMO MEPC, NOx, Selected catalytic reduction, Programable Logic Control, Vanadia based catalyst

1. 서론

IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구) MEPC(Marine Environment Protection Committee, 해양환경 보호 위원회) 에서는 해양대기오염 규제 관련해서 매년 한

두차례씩 런던에서 회의를 개최해 오고 있다.

지난 65차 IMO MEPC 회의에서 미국은 NOx 배출규제 Tier III를 만족하는 기술현황에 대한 최종보고서를 제출하였으며, 2016년 규제 발효에 문제없음을 언급하였으나[1],

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4453-3971>): Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do 530-729, Korea, E-mail: jgnam@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7220

1 Busan Technical Center of Automotive Parts, Korea Institute of Machinery & Materials, E-mail: yhyu@kimm.re.kr, Tel: 051-974-9241

2 Training Ship, Mokpo National Maritime University, E-mail: kimhy@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7460

3 Department of Engine Research Environmental and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials, E-mail: gybcho@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7385

4 Department of Engine Research Environmental and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials, E-mail: hongsuk@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7367

러시아 등은 이에 동의하지 않고 2021년으로 발효시점을 5년 연장하는 개정안이 제출되었다. 그러나 2014년 3월 말에 진행된 IMO MEPC 66차에서 이에 대한 관련문서가 많이 제출되었으며[2]-[4], 회의결과 미국 및 캐나다령 ECAs(Emission Control Areas)에 2016년 1월 1일부터 NOx Tier III 요건을 채택하기로 하였다. 또한 현재 논의되고 있거나 향후 지정될 ECAs에 대해서는 IMO 승인후 채택된 날부터 적용하기로 하였다.

2016년부터 건조되고 국제항해를 하는 신조선에 적용될 Tier III 규제를 만족하기 위해서는 이중연료 (액체-가스연료) 엔진을 탑재하거나, 디젤 엔진에 SCR(Selective Catalytic Reduction, 선택적 촉매 환원법) 시스템을 탑재하는 방법이 주로 거론 되고 있다. 질소산화물 감소를 위한 SCR 시스템에 관한 많은 연구 및 실증이 이루어져 왔으며[5]-[10], 본 연구에서는 선박용으로 개발된 SCR 시스템을 기존 선박의 디젤발전기용으로 탑재하여 SCR 시스템의 성능을 확인하고자 하였다. 본 연구를 위해서 목포해양대학교 실습선 새누리호의 디젤발전기에 SCR 시스템을 장착하였으며, 관련 배기파이프라인의 개조공사를 시행하였다.

그런 후에, 요소 환원제를 투입하여 엔진부하별 NOx 변화량을 계측, 분석하였다. 엔진 부하는 25, 35, 50%의 세가지의 부하로 적용하여 보았으며, 80% 이상의 NOx 저감율을 확인할 수 있었다. 엔진의 부하는 발전기를 두 대 병렬 운전하여 실험대상 엔진의 부하를 조정하였다.

Table 1은 목포해양대학교 실습선 새누리호의 제원을 보여주고 있으며, Figure 1은 새누리호의 사진이다.

Table 1: Ship's particulars

| Item | Description |
|-------------------|------------------------|
| Name of vessel | T/S SAENURI |
| Length | 103.0 m |
| Breadth | 15.60 m |
| Depth | 7.30 m |
| L.B.P | 94.17 m |
| Displacement | 4626.7 tons |
| Light ship | 2821.0 tons |
| Main engine | MCR 6060 bhp × 173 rpm |
| Generator engine | 660 kW × 3 set |
| Bow thruster | 310 kW |
| Service speed | 17.8 kts |
| Air draft | 27.0 m |
| Vessel complement | 208 Person |



Figure 1: Photograph of T/S SAENURI

2. 디젤발전기에 SCR 설치

목포해양대학교 새누리호 NO. 2 발전기의 배기 파이프 라인에 SCR 시스템을 설치하기 위해서 기존의 과급기 이후의 배기 직관 파이프를 탈거하고 배기가 SCR을 통과할 수 있는 파이프 라인과 SCR을 통과할 수 없는 바이패스 라인의 두가지 파이프 라인을 설치 하였다. Figure 2는 배기파이프라인 개조공사전의 모습이다.

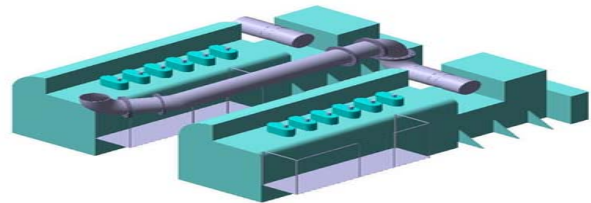


Figure 2: Before modifying the exhaust gas pipe

Figure 3에서는 배기파이프라인 개조 공사후의 모습을 보이고 있으며, 바나듐계 촉매를 삽입한 SCR 시스템을 배기 파이프에 설치하였다. 또한, 요소 환원제를 요소 주입 펌프를 이용하여 4bar의 압축공기와 예혼합하여, 반응기 입구에 공급하였다. Table 2는 실험 엔진의 제원을 보여준다. 이 엔진은 과급기와 에어쿨러를 탑재한 수직형 4행정 디젤엔진이다. 직접분사식 연소타입이며 6기통을 가진 엔진이다. 또한, 0.3%의 황을 함유한 MDO (Marine Diesel Oil)을 연료로 사용 하였다. Figure 4는 디젤발전기의 배기파이프라인에 설치된 SCR 시스템의 레이아웃을 보여준다. 그리고, Figure 5는 본 연구에서 사용된 SCR 반응기의 형상을 보여준다. 반응기의 총 중량은 촉매를 포함하여 200kgf이다. 본 연구에서 설계하여 사용한 촉매의 제원은 셀밀도가 100[cpai]이고, 공간 속도가 28517[h⁻¹], 면속도는 18.52[m/h], 체적 0.0759[m³]이다. Figure 6은 SCR 시스템에 대한 PLC 판넬이며, SCR 시스템 모니터링 장치이다. 이 판넬의 스크린은 터치방식 스크린이며, 수동, 자동모드를 선택할 수 있고, 각종 계측값을 확인할 수 있다. 또한, Figure 7은 NOx 계측기를 보여준다. NOx 계측기는 Continental의 Uninox 24V 모델이며, CAN통신 방식을 사용하였다. 또한, NOx 농도 측정 범위는 0 ~ 1500ppm 이고 허용 작동 온도는 20 ~ 800 °C, 24V의 전원을 사용한다. 본 NOx 계측기는 반응기 입구와 출구에 각각 설치하여 각각의 NOx 배출량을 측정하였으며, NOx의 감소율을 비교분석하였다. 반응기 전, 후단의 온도 및 배압도 측정하였다.

반응기 설치

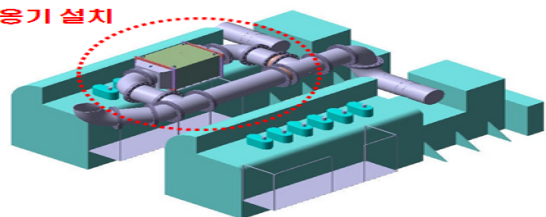


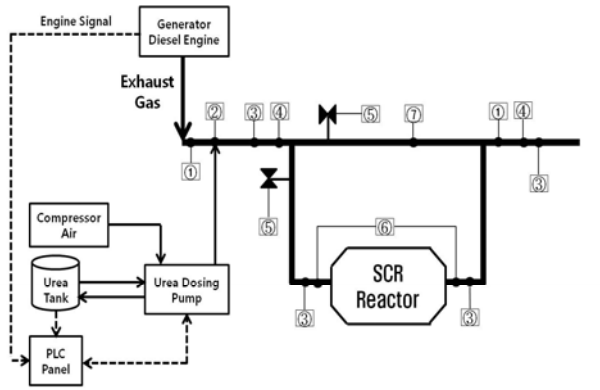
Figure 3: After modifying the exhaust gas pipe

Table 2: Test engine specifications

| Item | Description |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Engine type | Vertical, water cooled diesel engine with turbo-charger and air cooler 4-stroke diesel engine |
| Bore × Stroke | 210 × 290mm |
| Total cylinder displacement | 60.27liter |
| Combustion type | Direct injection type |
| No. of cylinders | 6 (In-Line) |
| Rated output | 660kW (897ps)@720rpm |
| Fuel | MDO, (Sulfur: 0.3%) |
| Mean effective press. | 1.824MPa (18.60kgf/cm ²) |
| Mean piston speed | 6.96m/s |
| Max. combustion press. | 18.13MPa (185kgf/cm ²) |
| Direction of rotation | Counter clock wise (as viewed from flywheel side) |
| Firing order | 1-4-2-6-3-5-1 (Interval: 120°), Flywheel side |



Figure 6: A PLC panel for the SCR system



| No | Description | No | Description |
|----|----------------------------------------------|----|------------------------------------------------|
| 1 | NOx of the reactor forward/ back end | 5 | By-pass valve |
| 2 | Urea injection | 6 | Back pressure of the reactor forward/ back end |
| 3 | Temperature of the reactor forward/ back end | 7 | Exhaust flow measurement |
| 4 | Pressure of the reactor forward/ back end | | |

Figure 4: A schematic diagram of the SCR system



Figure 5: The SCR reactor



Figure 7: A NOx analysis equipment

3. 요소 환원제를 이용한 실험장치 및 방법

3.1 요소 환원제를 이용한 실험장치

요소와 압축공기를 예혼합하여 반응기에 환원제로 공급하기 위해서 요소 주입 펌프를 설치하여 사용하였으며, 펌프의 제원은 다음과 같다. 펌프는 UDA2 7.5 모델을 사용하였으며, 외관 사이즈는 185 × 145 × 247mm이다. 또한, 요소 유량은 40 ~ 7500ml/h 이며, 공기 분사량은 최대 20 L/min 이다. 공기 분사압력은 4bar 이며, 전원은 24V를 사용하였다. **Figure 8**은 본 실험에서 사용한 요소 주입 펌프의 개략도를 보여준다. 펌프에 4bar의 압축공기를 공급하여 요소 탱크로부터 흡입한 요소를 압축공기와 혼합하여 분사 노즐을 통해서 반응기에 혼합된 환원제를 분사한다. 환원제 유량은 에어 솔레노이드 밸브를 통해서 조절할 수 있었으며, 분사되고 남은 요소는 다시 요소 탱크로 리턴된다. **Figure 9**는 요소 탱크의 실제 사진을 보여주고 있다.

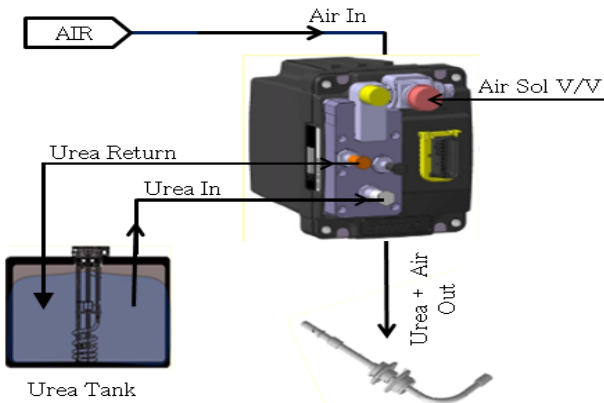


Figure 8: A schematic diagram of the urea dosing pump



Figure 9: A urea tank

3.2 요소 환원제를 이용한 실험방법

요소 환원제를 이용하여 엔진 부하 25, 35, 50% 구간에서 요소 40% 용액을 배기라인에 분사함으로써 NOx 저감효율을 측정하였다. 엔진 부하가 커질수록 반응기 크기를 키워야 하는데, 설치장소가 협소하여 본 연구에서는 50% 부하까지만 실험할 수 있었다. 실험은 크게 수동 모드 및 자동 모드, 이렇게 두가지 모드로 실험하였다. 또한, 엔진 부하 25%에서 50%로 상승 및 하강하며, 자동 모드로 NOx 저감효율을 계측, 분석하였다. 수동과 자동 모드의 차이점은 다음과 같다. 수동 모드는 원하는 NOx 저감률을 얻기 위해서 수동으로 요소 환원제의 분사량을 조절하는 모드이고, 반면에 자동 모드는 NOx 저감률을 설정하면 반응기 입·출구의 NOx를 계측하여 설정된 저감률에 도달하기 위하여 요소 환원제의 분사량을 자동으로 조절하는 시스템이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 수동 모드 시험

엔진 부하 25, 35, 50%의 세 구간에서 선박에서 주로 사용하는 요소 40% 용액을 분사하여 NOx 저감효율을 계측하였다. Table 3은 수동 모드에서 SCR 반응기 입·출구 온도, 입·출구 NOx 발생량 및 NOx 저감율을 보여준다. 엔진 부하 35% 에서 NOx 저감 최고 효율 85%가 나타났으며,

25, 50% 에서는 81%의 저감효율이 나타났다. 이는 35%에서 최대 성능이 가장 우수하다고 생각할 수 있다. NOx 저감효율 결과를 보면, 전 부하영역에서 요소가 암모니아로의 변환이 충분히 된 것으로 판단된다.

Table 3: Results of manual mode test

| Load (%) | Temperature of Reactor (°C) | | NOx (ppm) | | De-NOx (%) |
|----------|-----------------------------|--------|-----------|--------|------------|
| | Inlet | Outlet | Inlet | Outlet | |
| 25 | 319 | 321 | 788 | 153 | 81 |
| 35 | 344 | 344 | 1002 | 148 | 85 |
| 50 | 352 | 347 | 1098 | 210 | 81 |

4.2 자동 모드 시험

자동 모드에서는 두 가지 경우를 대상으로 실험하였다. 첫 번째는 엔진 부하 25%에서 50%로 상승하면서, NOx를 계측하였고, 두 번째는 엔진 부하 50%에서 25%로 하강하면서, NOx를 계측하였다. 엔진 부하를 상승시키며 계측한 경우에는 엔진 부하 35%에서 82%의 NOx 저감률을 보였으며, 엔진 부하를 하강시키며 계측한 경우에는 엔진 부하 35%에서 88%의 NOx 저감률을 보였다. 엔진 부하를 상승시킨 경우 보다도 하강시키면서 실험하는 경우에 NOx 저감률이 더 크게 나타났으며, 이는 엔진 부하를 상승시킨 경우보다 하강시킨 경우의 최대 성능이 더 우수함을 알 수 있었다. Table 4와 5는 각각 요소 환원제가 자동 모드일 경우에 엔진 부하를 상승시킨 경우와 하강시킨 경우의 반응기 온도와 NOx 저감률을 보여준다.

Table 4: Results of auto mode test: Engine load increase test

| Load (%) | Temperature of Reactor (°C) | | NOx (ppm) | | De-NOx (%) |
|----------|-----------------------------|--------|-----------|--------|------------|
| | Inlet | Outlet | Inlet | Outlet | |
| 25 | 301 | 317 | 862 | 241 | 81 |
| 35 | 317 | 316 | 1051 | 181 | 82 |
| 50 | 342 | 341 | 1118 | 222 | 80 |

Table 5: Results of auto mode test: Engine load decrease test

| Load (%) | Temperature of Reactor (°C) | | NOx (ppm) | | De-NOx (%) |
|----------|-----------------------------|--------|-----------|--------|------------|
| | Inlet | Outlet | Inlet | Outlet | |
| 50 | 346 | 344 | 1091 | 179 | 83 |
| 35 | 339 | 348 | 1016 | 119 | 88 |
| 25 | 323 | 334 | 839 | 116 | 86 |

4.3 수동 모드에서의 암모니아 슬립 발생 구간

요소 환원제를 수동 모드로 운전하였을 경우 암모니아 슬립 구간이 발생하였으며, 암모니아 슬립 구간에서는 암모니아 분사량을 늘려도 오히려 NOx 저감률이 낮아짐을 알 수 있다. 이 실험을 통해서 각 엔진 부하별 최적의 요소 분사량을 알 수 있었다. Figures 10, 11 및 12에서는 각각의

엔진 부하별 암모니아 분사량에 따른 NOx 감소량과 암모니아 슬립 발생 구간을 보여준다.

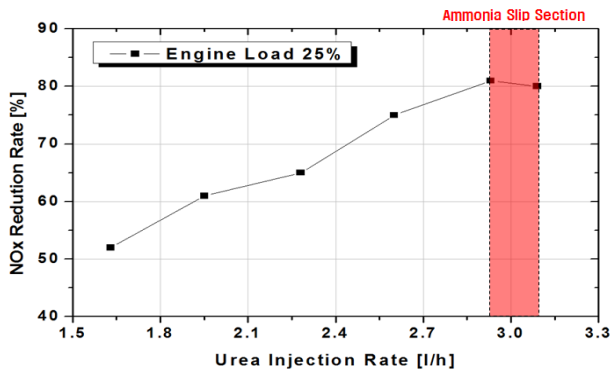


Figure 10: De-NOx efficiency according to urea injection rate at engine load 25%

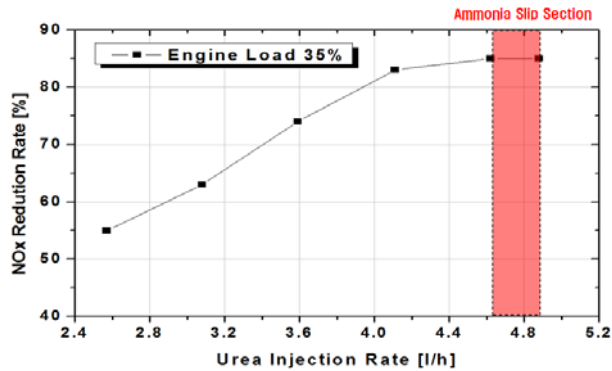


Figure 11: De-NOx efficiency according to urea injection rate at engine load 35%

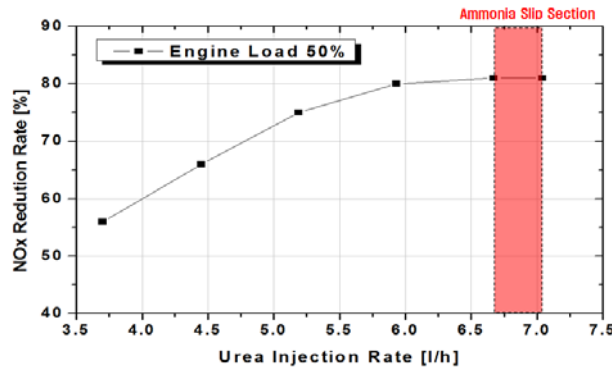


Figure 12: De-NOx efficiency according to urea injection rate at engine load 50%

5. 결 론

본 연구에서는 현재, 운행되고 있는 기존 선박의 디젤발전기에 SCR 시스템을 추가로 설치하여, NOx를 저감시키기 위한 실험을 하였다. 실제 선박을 대상으로 실험을 하기 위해서, 목포해양대학교 실습선 새누리호 디젤발전기의 기존 배기 파이프라인 개조공사를 통하여 SCR 반응기를 설치하였으며, 선박에서 주로 사용하는 요소 40% 용액의 분사 방법을 수동과 자동 모드로 나누어서 각각에 대해서 실험해보았다.

본 연구를 통해서, 현재 운항하고 있는 기존 선박에 배기 파이프 라인 개조 및 변경 공사를 통해 SCR 시스템의 설치 및 운영 가능성을 확인하였다. 또한, 바나듐계 촉매를 탑재한 SCR 시스템을 설치한 후, 요소 환원제를 분사하였을 때, NOx가 80% 이상 절감될 수 있음을 확인하였다. 또한, 암모니아 슬립 발생 구간을 알 수 있게 되어, 최적의 요소를 분사할 수 있게 되었다. 또한, 자동 모드 상태에서 엔진 로드 Up & Down (or Down & Up) 평가 시 엔진 부하 50%에서 25%로 변경 시 NOx 저감 효율이 상대적으로 우수함을 확인하였다. 이것은 엔진부하 50%에서 발생하는 온도가 촉매 반응을 활성화 시키는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 요소 40% 용액의 환원제만으로 실험을 하였으나, 차후에는 암모니아 가스 및 고체암모늄을 환원제로 사용하는 실험을 추가로 진행할 계획이다. 고체암모늄을 환원제로 사용하면 액체 요소 환원제보다 암모니아 함유 비율이 높고, 가스 상태로 공급되기 때문에 분산이 쉽고 반응거리가 짧은 장점을 가지고 있다. 특히, 선박에서는 황천향해 등의 열악한 환경이 있음을 고려하면, 액체 및 기체형태의 환원제는 누설의 위험이 있다고 볼 수 있다. 그렇기 때문에 고체 형태의 환원제 연구가 추가로 필요하다고 판단된다.

또한, 본 연구에서는 신품의 SCR 반응기를 사용하여 실험을 실시하였으나, 차후에는 SCR 반응기를 장시간 사용한 후에 추가 실험을 통하여 황 피독 현상에 따른 NOx 저감율 비교 연구가 추가로 필요하다고 판단된다.

References

- [1] MEPC 65/4/3; Air Pollution and Energy Efficiency. "Report of the Correspondence Group," Japan, 2013.
- [2] MEPC 66/6/6; Consideration and Adoption of Amendments to Mandatory Instruments, "Comments to the approval at MEPC 65 of amendments to the effective date of the NOx Tier III standards," Canada, Denmark, Germany, Japan and the United States, 2014.
- [3] MEPC 66/6/8; Consideration and Adoption of Amendments to Mandatory Instruments, "Tier III NOx emission standards under MARPOL Annex VI: date of entry into force," Russian Federation, 2014.
- [4] MEPC 66/6/10; Consideration and Adoption of Amendments to Mandatory Instruments, "Comments to the approval at MEPC 65 of amendments to the effective date of the NOx Tier III standards," Marshall Islands and Norway, 2014.
- [5] J. G. Nam and J. S. Choi, "Dynamic characteristics of a urea SCR system for NOx reduction in diesel engine," Journal of the Korean Society of Marine

- Engineering, vol. 31, no. 3, pp. 235-242, 2007.
- [6] J. G. Nam, "Static characteristics of a urea-SCR system for NO_x reduction in diesel engines," International Journal of Automotive Technology, vol. 8, no. 3, pp. 283-288, 2007.
- [7] J. G. Nam, "Water injection/urea SCR system experimental results for NO_x reduction on a light duty diesel engine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 3, pp. 394-403, 2008.
- [8] B. K. Yun, C. M. Kim, M. Y. Kim, G. B. Cho, H. S. Kim, and Y. I. Jeong, "Numerical modeling of vanadia-based commercial urea-SCR plus DOC systems for heavy-duty diesel exhaust aftertreatment systems," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, vol. 18, no. 2, pp. 24-30, 2010.
- [9] J. G. Nam, "A study of NO_x performance for Cu-chabazite SCR catalysts by Sulfur poisoning and desulfation," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 8, pp. 855-861, 2013.
- [10] B. Guan, R. Zhan, H. Lin, and Z. Huang, "Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NO_x from diesel engine exhaust," Applied Thermal Engineering, vol. 66, no. 1-2, pp. 395-414, 2014.