

선박용 디젤엔진의 NO_x를 저감하기 위한 습식 배기가스 처리기술 적용에 관한 실험적 연구

류영현¹ · 김태우² · 김정식³ · 남정길[†]

(Received January 19, 2017 ; Revised February 19, 2017 ; Accepted March 6, 2017)

Experimental study of NO_x reduction in marine diesel engines by using wet-type exhaust gas cleaning system

Younghyun Ryu¹ · Taewoo Kim² · Jungsik Kim³ · Jeonggil Nam[†]

요약: 디젤엔진은 내연기관 중에 제동 열효율이 가장 높은 엔진이기 때문에 큰 동력을 필요로 하는 대형트럭과 같은 중·대형 운송 차량 및 선박 등의 수송분야 및 발전시스템 등의 다양한 분야에서 사용되어지고 있다. 하지만, 디젤엔진은 연소과정에서 질소산화물(이하 NO_x) 발생량이 많은 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 선박용 디젤엔진의 NO_x를 저감하기 위해서 습식 배기가스 처리 기술인 무격막식 해수 전기분해 방식을 이용하여 NO_x 저감을 시도하였다. 실제 해수를 사용하여 디젤엔진에서 배출되는 유해가스에 전기 분해된 해수인 전해수를 분사하여 보았다. 전해수의 pH 농도 및 유효염소농도, 온도에 따른 NO 산화율 및 NO_x 감소량을 조사하였다. 본 실험을 통해서 전해수의 pH가 약산성 영역일 경우가 중성일 경우보다 산화탑에서의 NO 산화율이 상승하였고, 유효염소농도가 높을수록 NO 산화율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 전해수 온도는 NO 산화율에 영향이 없음을 추가적으로 확인할 수 있었으며 디젤엔진에서 생성된 배기배출물에 전해수를 분사함으로써 NO_x가 저감됨을 확인할 수 있었다.

주제어: 디젤엔진, 질소산화물, 습식 배기가스 처리기술, 해수전기분해, NO 산화

Abstract: Diesel engines have the highest brake thermal efficiency among internal combustion engines. Therefore, they are utilized in medium and large transportation vehicles requiring large amounts of power such as heavy trucks, ships, power generation systems, etc. However, diesel engines have a disadvantage of generating large quantities of nitrogen oxides during the combustion process. Therefore, the authors tried to reduce the amount of nitrogen oxides in marine diesel engines using a wet-type exhaust gas cleaning system utilizing the undivided electrolyzed seawater method. In this method, electrolyzed seawater is injected into the harmful gas discharge from the diesel engine using real seawater. The authors investigated the reduction of NO and NO_x from the pH value, available chlorine concentration, and the temperature of electrolyzed seawater. The results of this experiment indicated that when the electrolyzed seawater is acidic, the NO oxidation rate in the oxidation tower is higher than that when the electrolyzed seawater has a neutral pH. Likewise, the NO oxidation rate increased with the increase in concentration of chlorine. Further, it was confirmed that the electrolyzed seawater temperature had no effect on the NO oxidation rate. Thus, the NO_x exhaust emission value produced by the diesel engine was reduced by means of electrolyzed seawater treatment.

Keywords: Diesel engine, Nitrogen oxides (NO_x), Wet-type exhaust gas cleaning system, Seawater electrolysis, NO oxidation

1. 서론

디젤엔진은 가솔린 엔진과 비교했을 때 제동 열효율이 높기 때문에 큰 동력을 필요로 하는 대형트럭과 같은 중·대형 운송 차량 및 선박 등의 수송분야, 발전소, 농기계, 건설장비

등의 산업분야 등과 같은 대출력을 요구하는 다양한 분야에서 사용되어지고 있다. 하지만, 디젤엔진은 연소과정에서 여러 유해 배기물질이 발생하는데 그 중에서 특히 NO_x발생이 가장 문제시 되고 있다. 따라서 세계 각국마다 디젤엔진에

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4453-3971>): Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro 91, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea, E-mail: jgnam@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7220

1 Korea Institute of Machinery & Materials, E-mail: yhyu@kimm.re.kr, Tel: 051-310-8125

2 Techwin Co., Ltd., E-mail: taewoo@techwin.co.kr, Tel: 043-261-8174

3 Techwin Co., Ltd., E-mail: jskim@techwin.co.kr, Tel: 043-261-8150

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.

대한 NOx 배출량 규제가 더욱 엄격해지고 있다[1]-[3].

최근, 자동차 분야에서는 유럽에서 RDE(Real driving emissions)가 기존 배기배출물 규제에 더해져 실제 도로에서 통상 주행시의 배기가스 상태로 측정하는 규정을 추진하고 있다. 이것은 실험실 수치보다 더 많이 배출된다고 알려진 실제 운전시의 배기배출물을 측정함으로써 더욱 강화된 규제이다. RDE 측정방식은 주행환경이 각각 다르기 때문에 상당히 까다로우며 각도와 경사, 하중, 기온, 기압, 습도 등 여러 환경적 변수가 존재한다. 본 규제는 디젤엔진을 사용하는 수송에너지 기관인 선박 및 농기계, 건설장비 등에서도 점차적으로 확대 시행될 것으로 예상된다[3][4].

따라서 디젤엔진을 계속 사용하기 위해서는 NOx를 저감하기 위한 연구를 계속적으로 진행해야 할 것이다. 디젤엔진에서 배출되는 배기 배출물 중에서 NOx를 저감하기 위한 연구는 다양하게 진행되어 오고 있다. Ryu *et al.* [5]-[7]의 연구에서는 연료첨가제를 사용하여 디젤엔진의 연료를 개질한 후, 그 혼합된 연료를 2행정과 4행정 디젤엔진 모두에게 적용해서 엔진의 연소과정을 개선하여 NOx 및 PM을 저감하는 연구를 발표하였다. 디젤엔진의 연료와 연소과정을 개선하는 방법도 배기배출물을 저감할 수 있으나, 각 국가 및 국제기구에서 요구하는 규정을 완전히 만족할 수는 없다. 따라서 배기배출물에 대한 규정을 만족하기 위해서는 배기 후처리 장치가 추가적으로 필요하다. Ryu *et al.* [8]의 연구에서는 SCR(Selective catalytic reduction)을 선박에 적용하기 위해 IMO MEPC Tier 3 규정에서 제시한 NOx 기준을 만족하기 위해서 SCR이 설치되어 있지 않은 기존 선박에 SCR을 설치하는 방법과 설치 후 NOx 저감율을 보여 주었고 추가로 암모니아 슬립을 고려한 기초설계를 제시하였다. SCR 기술은 선박에서 배출되는 NOx를 저감하기 위해서 많이 사용되는 기술이다. 하지만, 요소(Urea) 보관 문제 및 금속촉매의 비싼 단가, 그리고 연료에 포함되어 있는 황성분에 의한 촉매 피독 등과 같은 해결해야 할 문제점들이 있다. 또한, G. Panomsuwan *et al.* [9]의 연구에서는 저온 플라즈마기술을 선박용 디젤엔진에 적용하여 NOx 저감을 시도한 연구결과를 발표했다.

본 연구에서는 NOx를 저감하기 위한 다양한 기술 중에서 배기후처리 기술 중의 한가지인 습식 배기가스 처리 기술을 적용하여 NOx 저감을 시도하였다. 선박용 디젤엔진에서 배출되는 NOx에는 비수용성인 NO가 90%~95% 존재한다. NO의 산화를 통해 생성되는 이산화질소(NO₂)는 일산화질소(NO) 대비 물에 대한 용해도가 20배 이상 높은 것으로 알려져 있다[10][11]. 따라서 전기분해된 해수(전해수)와 배기가스의 기액 접촉을 통해, NO를 NO₂로 산화시켜 NO₂ 용해를 통한 NOx 발생량 감소를 시도하였다. Kim *et al.* [10][11]의 연구에서는 모의 가스 및 모의 해수를 사용한 무격막식 해수 전기분해 방식을 통하여 NOx 저감을 시도하였으나, 본 연구에서는 실제 디젤엔진에서 배출되는 배기가스를 사용하였으며, 실제 해수를 실험에 적용해 보았다. 본 연구를 위해서 실험 장치를 기획 및 설계, 설치하여 실

제 해수를 이용하여 NOx 저감연구를 실시하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 경유(Diesel oil)를 연료로 사용하는 디젤 발전기 엔진에서 생성된 연소가스를 실험에 사용하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 엔진의 사양을 보여준다. 또한, 실제 해수를 실험에 적용하기 위해 해수사용이 용이한 장소에 실험 장치를 설치하여 실험을 실시하였다. Figure 1은 본 연구를 위해 설치한 실험장치의 전체를 보여준 사진이다. 엔진 연소가스 중에 존재하는 여러 유해가스 중에서 NOx를 제거하기 위해 전기 분해조를 거친 해수(전해수)와 전기분해 되지 않은 해수, 일정 농도로 희석된 가성소다(NaOH) 용액을 순차적으로 분사하였다. 하지만 본 논문에서는 전해수를 이용한 NOx 저감에 대해서만 다루기로 한다. 일반적으로 NOx는 NO와 NO₂의 합을 의미한다[1]. NOx 계측은 TESTO사의 350-Maritime을 사용하여 계측하였으며, 해당 모델은 전기화학셀을 이용하여 NO와 NO₂ 농도를 별도로 각각 측정할 수 있다. Shimadzu사의 TOC-TN (Total Organic Compound-Total nitrogen) 분석기 (TOC-V CPH)를 이용하여 연소가스로부터 제거된 NOx가 폐수 속에 고정되어 존재하는 양을 분석하였다. 반응기에서의 NOx 제거율은 아래식을 따라 계산되었다.

$$Y_a = \frac{C_{a,i} - C_{a,o}}{C_{a,i}} \times 100\% \quad (1)$$

여기서, a는 NO, NO₂, NOx 등 화학종을 의미하며, C_i와 C_o는 해당 화학종의 입구측 농도와 출구측 농도를 의미한다. 전해수를 분사함에 따라 각 단에서의 NO/NO₂/NOx 입, 출구 농도를 분석하였다. Figure 2는 전체적인 설비 구성을 보여준다. 전해수의 온도/ pH 등 운전 변수가 NOx 제거 성능에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 전해수 배관 상에 pH/OPR 센서를 설치하였으며, 센서는 Orion사의 VSTAR12 모델을 사용하였다. 또한 전해수의 분사는 마그네틱 방식의 펌프(Yusung, NH-3024PH-CV-5HP)를 사용하였고, 분사되는 전해수의 유량을 측정하기 위한 목적으로 면적식 유량계(COREA flow, HGF-1-P)를 사용하였다.

본 연구의 주 목적 중 하나인 해수 전기분해를 통한 산화제 생산은 T사에서 제작한 1.25 kg Cl₂/day 용량의 무격막식 전기분해조를 통해 이루어졌으며, 정류기(MK power, MK-50200G)를 이용하여 직류 380V, 3상의 전기를 인가하였다. 해당 전해조는 스케일 물질이나 입자상 오염물이 전극 표면에 쌓이는 것을 방지하기 위한 구조로 채택하여, 해수 전기분해 및 전해수 순환에도 적합하도록 제작하였다.

전해수를 분사하는 스크러버는 6.5초의 체류시간을 기준으로 설계된 충전탑 형태로 제작하였으며, 기액 접촉 효율 향상을 위한 충전물은 폴리프로필렌 재질의 1인치 Tripack을 사용하였다. 여기서 6.5초의 체류시간은 다음의 공식에

의해서 설정되었다.

$$\text{체류시간(s)} = \text{충진물 체적(m}^3\text{)} / \text{가스유량(Nm}^3\text{/s)} \quad (2)$$

테스트 설비의 운전 조건은 Table 2와 같다.

Table 1: Test engine specification

Item	Description
Engine type	D4BB-G3, four-stroke diesel engine
Bore×stroke	91.1×100mm
Combustion type	Indirect injection type
No. of cylinders	4-in line
Displacement volume	2,607cc
MCR output	45PS@1800rpm
Compression ratio	22:1
Fuel	Diesel oil (Sulfur : 0.001%)



Figure 1: Test facility

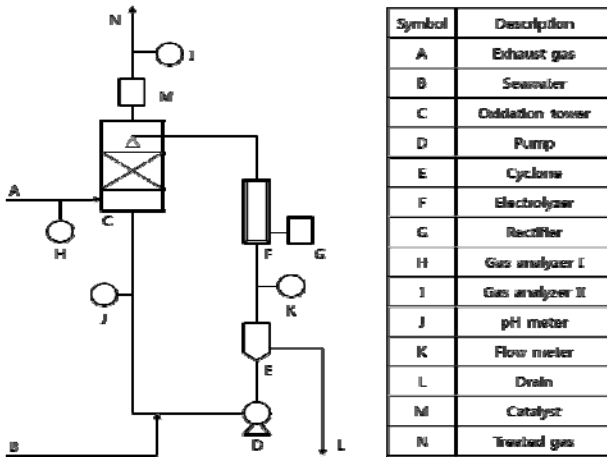


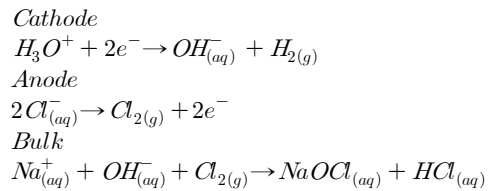
Figure 2: Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2: Test condition

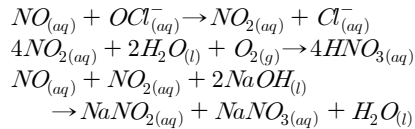
Item	Description
Absorber type	Packed-bed
Packing	1" Tripack (poly propylene)
Exhaust gas flow	130 ± 10 Nm ³ /h
Retention time	6.3 ~ 6.9 s
Liquid-Gas ratio	43 ~ 50 L/m ³
C _{NOx,i}	700 ~ 1,000 ppmv
Cl ₂ concentration	2.5 ~ 5.5 g Cl ₂ /L

본 연구에서는 NOx 제거 성능은 유지하면서, 산화제 생성 시 소모되는 전력량을 감소시키기 위한 수단으로 NOx를 환원시킬 수 있는 촉매의 적용 방안도 검토하였다. 일반적인 선택적 촉매환원(SCR)과 달리 환원제로 요소가 아닌, 수소 가스를 사용하는 반응으로써 산화제 생산 시 부산물로 발생하는 수소 가스를 활용할 수 있다는 장점이 있다. Lab-scale 테스트(Figure 3)에서는 NO 800ppmv(N₂ balance), H₂ 1vol.%(N₂ balance)를 3 LPM를 통과시켜 촉매 전후단에서의 NO 농도 변화를 관찰하였다. Lab-test에서 사용된 촉매를 현장 테스트에서도 재검증하였는데, 스크러버에서 처리된 가스 중 3 LPM만 분기하여 통과시켰다. 이 때 H₂ 농도는 0.18~0.26 vol.% 정도이다. 자체 제작한 알루미늄아이드에 백금코팅 촉매를 사용하였고, 현장 테스트(Figure 4)에서는 Puresphere사의 상용 촉매를 사용하였다. 다음 화학반응식은 본 연구에서 NOx를 감소시키기 위해서 사용했던 기술들에 대한 이론적 반응식이다.

1) 음극(Cathode)과 양극(Anode)에서의 해수 전기분해[12]-[16]



2) 전해수에 의한 NOx 제거 메커니즘[12]-[16]



3) 환원 촉매에 의한 NOx 제거[17][18]

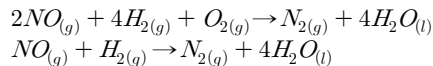


Figure 3: Lab-scale test of reduction catalyst



Figure 4: Reduction catalyst for pilot test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전해수에 의한 NOx 제거

해수를 전기분해하면 pH가 약염기성 영역으로 상승하게 되나, 연소가스와의 접촉 시 산성 가스가 용해되면서 중성 또는 약산성 영역으로 pH가 낮아지게 된다. Figure 5는 산화탑에서 분사되는 전해수의 pH가 NO 산화율 또는 NOx 제거율에 어떤 영향을 미치는지 보여준다. pH가 약산성 영역일 경우가 중성일 경우보다 산화탑에서의 NO 산화율이 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 이런 효과는 산화제인 Cl₂(g)가 pH에 따라 존재하는 형태가 다르기 때문으로 판단된다. Cl₂(g)가스가 물에 녹으면 산성 영역에서는 Cl₂(aq) 형태로 존재하여 몹시 불안정하지만, 약산성 및 중성 영역에서는 차아염소산(HOCl)으로 존재한다. 중성 및 염기성 영역에서는 차아염소산 이온(OCl⁻) 형태로 존재하는데 이 때 산화력이 가장 낮은 것으로 알려져 있다[19]. 여기서, pH 7을 중성, 7 미만을 산성, 그리고 7초과를 염기성이라고 정의하였다. 또한, 5~7 정도를 약산성, 7~9 정도를 약염기성으로 정의하였다.

Figure 6에서는 산화제의 농도(유효염소농도)가 NO 산화 및 NOx 제거에 어떤 영향을 미치는지 살펴보았다. 산화제의 농도가 높을수록 NO 산화율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 NaOCl에 의한 NO 산화 반응이 NaOCl 농도가 높을수록 촉진된다고 판단한 R. T. Guo *et al.* [20]의 연구와 같은 의미로 해석된다. Figure 5와 Figure 6의 그래프에서 NOx reduction rate는 NO와 NO₂ 제거율의 합을 의미한다.

Figure 7을 통해 반응온도가 NO 산화에 영향을 미치는지 확인해 보았다. 산화탑 전해수의 온도를 기준으로 산화탑에서의 NO 산화율을 살펴보면, 온도가 반응속도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다. 이는 NaOCl에 의한 NO 산화 반응이 온도가 높을수록 촉진된다는 Kim *et al.* [11]의 연구결과와 상반된 결과로 해석할 수 있다. 해당 연구는 증류수와 제조된 표준해수, 모사가스를 이용해 실험을 진행한 반면, 실제 해수와 실제 엔진 연소가스를 사용한 본 연구에서는 제어할 수 없는 부반응들이 온도의 영향을 상쇄시킨 것으로 판단된다. 즉, 실제 해수와 엔진 연소에

의한 배기가스에 포함된 다양한 성분들에 의한 영향 때문이라고 생각된다. 모사가스 테스트는 N₂ 발란스에 NO만 가지고 테스트한 것이지만 엔진 배기가스에는 NO, NO₂, SO₂, CO₂ 등 다양한 배기성분이 존재하기 때문에 이러한 것들이 온도의 효과를 상쇄했기 때문이라고 판단된다. 이러한 결과와 기체의 용해도가 온도에 반비례한다는 점을 감안할 때, 전해수의 온도를 낮게 유지하는 것이 유효염소농도 유지 측면에서 유리할 것이다.

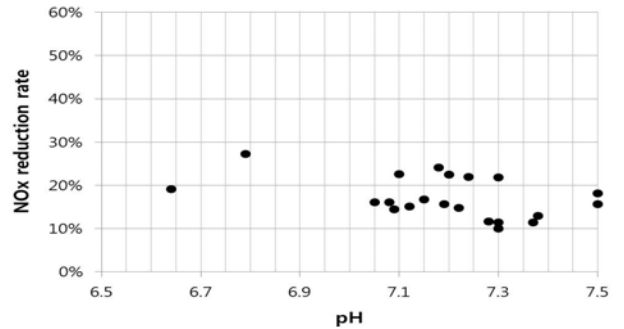
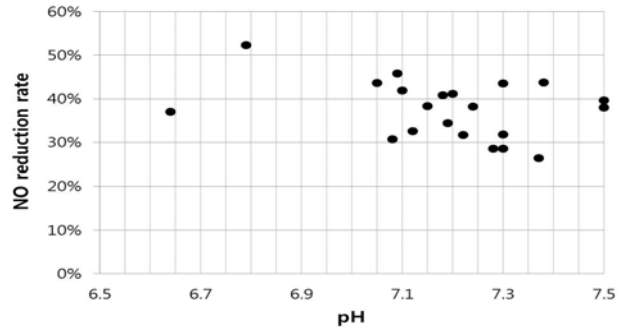


Figure 5: Effect of pH on the NO and NOx removal

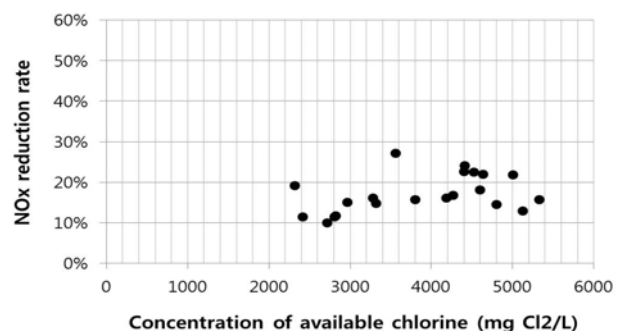
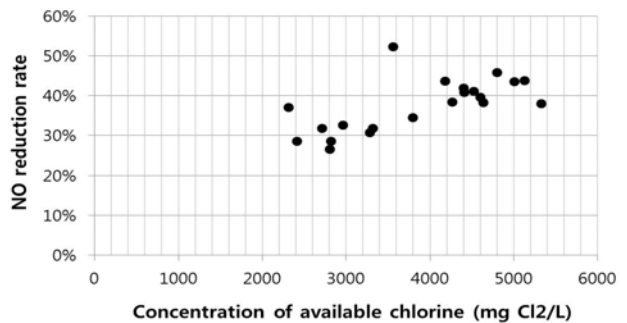


Figure 6: Effect of oxidant concentration on the NO and NOx removal

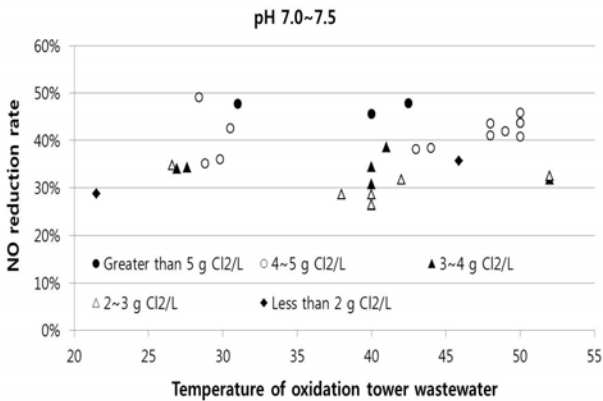


Figure 7: Effect of temperature on the NO removal

3.2 환원 촉매에 의한 NOx 제거

실험실에서 소규모로 성능을 검증한 NOx 환원 촉매와 반응기를 현장 테스트 시 유사한 조건(가스유량 3 LPM)으로 연소가스를 바이패스하여 실험하였다. 실험실에서는 20%의 NOx 제거율을 보였던 것과 달리 현장에서는 NOx 제거 효과를 확인할 수 없었는데, 이는 수소 가스 농도에서 원인을 찾을 수 있다. 실험실에서는 N₂, NO, H₂를 희석해서 촉매를 통과시켰는데, 이 때 H₂와 NO의 몰비는 약 12.5 수준이었다. 그러나 현장 실험에서는 전기분해에 의해 생성된 수소의 양이 목표치에 도달하지 못해 H₂와 NO 몰비가 2.5~3.5에 그쳤다. 촉매 재검증을 위해 구매한 상용 촉매를 스크리버 최후단에 설치하여 운전한 결과, Figure 8에서 보여주는 것과 같이 바이패스 실험과 동일하게 NOx 제거 효과를 확인할 수 없었다. 해당 촉매는 습한 조건에서도 성능을 유지할 수 있도록 소수성 코팅이 이루어진 금속 담체에 코팅한 촉매였으나, 운전 후 확인 결과 Figure 9에서 보는 바와 같이 소수성을 잃고 지지체가 부식되거나 촉매 성분이 소실되어 있었다. 이것은 일반적인 물에 대한 소수성이 가미된 촉매였기 때문에 해수, 연소가스 등에 의해 소수성을 쉽게 잃었기 때문이라고 생각된다.

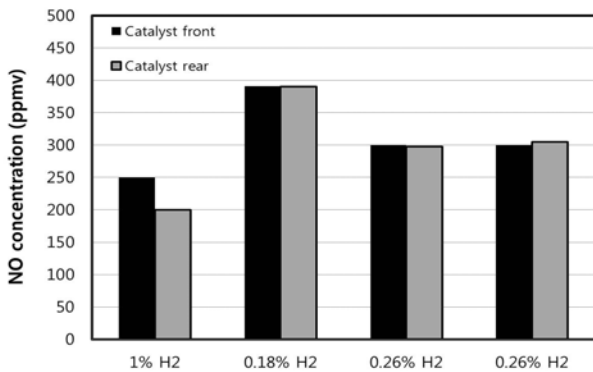


Figure 8: Effect of reduction catalyst

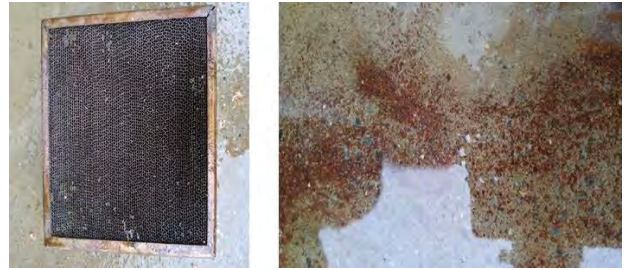


Figure 9: Corrosion of spent catalyst

4. 결론

본 연구에서는 무격막식 해수 전기분해 방식을 이용하여 디젤엔진에서 배출되는 NOx 저감을 시도하였다. NO 산화탑에 전기분해된 해수인 전해수의 pH 농도 및 유효염소농도, 온도 변화에 대한 NO 산화율을 조사하였다. 실험 결과, NO 산화율은 전기 분해된 전해수의 pH가 낮을수록 상승하였고, 유효염소농도가 높을수록 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 NO 산화율은 전해수의 반응온도 변화에는 영향을 받지 않았는데, 이러한 결과를 바탕으로 전해수의 운전 온도를 낮게 유지하는 것이 산화제 농도 유지에 유리하다고 판단된다. 이것은 전해수 온도가 NO 산화율에는 영향이 없기 때문에, 전해수에 용해되어 존재하는 염소 가스의 방출을 억제하는 목적에서 전해수 온도를 낮게 하는 것이 유리하다는 의미이다. 또한 산화탑과 흡수탑의 폐수 내에 NOx가 용해되어 존재하고 있음을 확인하였고, 실질적인 NOx 제거는 반응기에서 활발하게 이루어짐을 알 수 있었다.

전력 사용량 감축 목적으로 NOx 환원 촉매를 적용하였으나, 실험실 결과와 상이하게 현장에서는 효과를 확인할 수 없었다. 낮은 환원제 농도와 촉매 내구성 부족 등이 원인으로 판단된다.

결과적으로, NO는 26.4%~52.3% 감소하였으며, NOx는 10.0%~27.2% 감소하였다. 차후 연구에서는 실제해수와 가성소다를 유해가스에 추가적으로 분사하여 NOx 저감을 및 다른 유해가스 저감율도 추가 조사할 예정이다.

References

- [1] Jo. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York, USA, McGraw-Hill, Inc., 1988.
- [2] W. W. Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2ND Edition, Pearson, 2004.
- [3] <https://www.dieselnet.com>, Accessed January 17 2017.
- [4] D. Blanco-Rodriguez, G. Vagnoni, and B. Holderbaum, "EU6 C-segment diesel vehicles, a challenging segment to meet RDE and WLTP requirements," IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 11, pp.

- 649-656, 2016.
- [5] Y. H. Ryu, Y. S. Lee, and J. G. Nam, "An experimental study of the fuel additive to improve the performance of a 2-stroke large diesel engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 6, pp. 620-625, 2015 (in Korean).
- [6] Y. H. Ryu, Y. S. Lee, and J. G. Nam, "Performance and emission characteristics of additives-enhanced heavy fuel oil in large two-stroke marine diesel engine," *Fuel*, vol. 182, pp. 850-856, 2016.
- [7] Y. H. Ryu, Y. S. Lee, and J. G. Nam, "Improvement of the performance and emission in a four-stroke diesel engine using fuel additive," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 9, pp. 762-767, 2016 (in Korean).
- [8] Y. H. Ryu, H. R. Kim, G. B. Cho, H. S. Kim, and J. G. Nam, "A study on the installation of SCR system for generator diesel engine of existing ship," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 4, pp. 412-417, 2015 (in Korean).
- [9] G. Panomsuwan, R. Rujiravanit, T. Ueno, and N. Saito, "Non-thermal plasma technology for abatement of pollutant emission from marine diesel engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 10, pp. 929-934, 2016.
- [10] T. W. Kim, S. J. Choi, J. H. Kim, and J. Y. Song, "A study on the NOx reduction of flue gas using un-divided electrolysis of seawater," *Korean Chemical Engineering Research*, vol. 50, no. 5, pp. 825-829, 2012 (in Korean).
- [11] T. W. Kim, J. H. Kim, and J. Y. Song, "A study on the NOx reduction of flue gas using seawater electrolysis," *Journal of the Korean Oil Chemist' Society*, vol. 29, no. 4, pp. 570-576, 2012 (in Korean).
- [12] L. Chen, C. H. Hsu, and C. L. Yang, "Oxidation and absorption of nitric oxide in a packed tower with sodium hypochlorite aqueous solutions," *Environmental Progress*, vol. 24, no. 3, pp. 279-288, 2005.
- [13] L. R. Czarnetzki and L. J. J. Janssen, "Formation of hypochlorite, chlorate and oxygen during NaCl electrolysis from alkaline solutions at an RuO₂/TiO₂ anode," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 22, pp. 315-324, 1992.
- [14] J. H. Park and S. H. Paik, "The problems of chemistry teachers' and pre-service teachers' conceptions in the prediction of electrolysis products," *Journal of the Korean Chemical Society*, vol. 48, no. 5, pp. 519-526, 2004 (in Korean).
- [15] H. J. Park, S. W. Lee, M. G. Ku, and J. H. Lim, "Electrochemical treatment of dye wastewater using IrO₂/Ti electrode," *Applied Chemistry*, vol. 14, no. 1, pp. 37-40, 2010.
- [16] S. H. An, "Air pollution protection onboard by seawater and electrolyte," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 93-101, 2006.
- [17] S. S. Kim, H. J. Choi, and S. C. Hong, "A study on reaction characteristics of H₂ SCR using Pt/TiO₂ catalyst," *Applied Chemistry for Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 18-23, 2010.
- [18] Z. Liu, J. Li, and S. I. Woo, "Recent advances in the selective catalytic reduction of NOx by hydrogen in the presence of oxygen," *Energy & Environmental Science*, 5, pp. 8799-8814, 2012.
- [19] M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama, and D. Brdjanovic, *Biological Wastewater Treatment*, IWA Publishing Books, p. 236, 2008.
- [20] R. T. Guo, W. G. Pan, X. B. Zhang, H. J. Xu, Q. Jin, C. G. Ding, and S. Y. Guo, "The absorption kinetics of NO into weakly acidic NaClO solution," *Separation Science and Technology*, vol. 48, no. 18, pp. 2871-2875, 2013.