

저온 플라즈마와 NH₃ SCR 복합공정을 이용한 디젤엔진 배기가스의 NO_x 저감 기술

차민석[†] · 이새옥 · 김용호 · 송영훈

Non-thermal Plasma and NH₃ SCR Hybrid Process for Treating Diesel Engine Exhaust

Min Suk Cha, Jae-Ok Lee, Yongho Kim, and Young-Hoon Song

ABSTRACT

A hybrid De-NO_x technique of non-thermal plasma and NH₃ SCR process has been investigated to remove NO_x from 300 hp marine engine exhaust under the low temperature conditions, i.e. 100-200°C. Fundamental investigation with Diesel-like simulant gas was also conducted. The performance of the present technique has been demonstrated by treating real diesel exhaust gases, in which high contents of soot, water vapor, SO₂, NO_x, and unburned HC are included. Detailed engineering data for evaluating the feasibility of the technique are provided in the present investigation.

Key Words : non-thermal plasma, NH₃ SCR(Selective Catalytic reduction), NO_x

기 호 설 명

SV : space velocity, 1/hr

SED : Specific Energy Density, J/L

P : power delivered to the reactor, kW

Q : flow-rate [Nm³/hr]

1. 서 론

동력, 발전 및 열원용 연소기기의 주요 배출 오염물질 중 하나인 질소산화물(NO_x)은 광 스모그, 산성비 및 호흡기 질환의 원인물질로 알려져 있어 국내외 환경당국에 의한 NO_x에 대한 배출 규제가 지속적으로 강화되고 있다. 현재 이용 가능한 대표적인 연소후처리용 탈질기술로는 자동차와 같은 이동 배출원의 경우 삼원촉매, 그리고 보일러와 같은 고정 배출원에는 암모니아를 환원제로 하는 선택적 환원법(NH₃ SCR)을 들 수 있다. 이들 기술은 각기 지난 수 십 년간 산업에 이용되어온 기술이나 디젤 또는 희박연소(lean burn) 가솔린 엔진을 이용하는 선박이나

자동차에는 적용될 수 없는 기술적인 한계점을 갖고 있다. 즉, 삼원촉매는 디젤엔진과 같이 배가스 중의 산소농도가 5% 이상인 경우 효과적인 성능을 기대할 수 없으며, NH₃ SCR은 작동 온도의 한계성으로 인하여 이동 배출원과 같이 부하변동이 심한 시스템에 적용이 어려우며, 취급이 까다로운 암모니아를 이동원에 탑재하는 것도 현실적이지 않다. 한편, 이와 같은 기술적인 어려움에도 불구하고 자동차 및 선박 등에 대한 탈질규제는 강화되고 있어 이에 대한 기술개발이 요구되고 있으며, 저온 플라즈마와 촉매의 복합공정에 대한 연구들이 활발히 진행중에 있다 [1-5].

본 연구에서는 연료 희박 연소 조건에서 저온 플라즈마가 배가스 조성에 미치는 영향을 파악하고, 플라즈마 반응기와 촉매 반응기를 동시에 사용하는 공정에 대한 검토가 이루어졌다. 모사가

한국기계연구원

[†] mscha@kimm.re.kr

스를 대상으로 한 기초연구와 300 마력급 선박용 디젤엔진 배기가스에 대한 연구가 이루어 졌으며, 그 결과로 암모니아 SCR 공정의 반응온도를 현저히 낮출 수 있었고 NOx 의 제거 성능 또한 20%에서 80% 정도로 향상시킬 수 있었다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 기초실험 장치의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다. 질량유량계(MFC)를 이용한 공기, 질소, 이산화탄소, NO, C₃H₈ 등의 유량 공급을 통하여 처리가스의 산소비율, 산화질소물의 포함량, 미연탄화수소 비율 등을 조절, 디젤엔진의 배기 가스를 모사하여 실험하였다. 이와 같은 엔진 배기가스의 상태는 엔진 부하(load)에 따라 달라질 수 있으므로 이의 영향을 파악하기 위하여 네 가지 다른 부하조건에 배기 가스 상태를 고려하였으며, 각각의 경우에 따른 가스조성비를 표 1 에 나타내었다. 온도의 차이가 NOx 제거에 미치는 영향을 파악하기 위하여 모사 가스는 혼합 및 예열 장치를 통하여 원하는 온도까지 가열되며, 이어 플라즈마 반응기 및 촉매 반응기가 있는 항온로를 통과하게 된다[5].

저온 플라즈마 반응기는 자체 개발 제작된 다중 평판형 DBD(Dielectric Barrier Discharge) 반응기를 사용하였으며 (Fig. 2), 플라즈마 전력공급장치는 필요한 전력량에 따라 60 Hz 또는 10 kHz 교류 전원장치를 사용하였으며, Q-V plot을 이용한 자체 제작된 자동 전력 측정장치를 통하여 소모 전력을 측정하였다. 처리가스의 성분 분석을 위하여 FTIR 분광계 (Fourier Transform InfraRed Spectrometer)를 사용하였으며, 플라즈마 반응기 전단 및 후단 (즉, SCR 반응기 전단) 그리고 SCR 반응기 후단에서 측정이 이루어졌다. 촉매 반응기를 사용할 경우 암모니아는 플라즈마 반응기 전단에서 주입되었다. SCR 촉매로는 SK에서 개발한 촉매를 이용하였다.

Table 1 Exhaust composition with engine load.

Load [%]	Exhaust composition			
	O ₂ [%]	CO ₂ [%]	NOx [ppm]	HC [ppm]
25	17.6	4.35	550	116
50	15.4	5.77	628	114
75	14.0	6.82	853	117
100	12.9	7.55	966	77

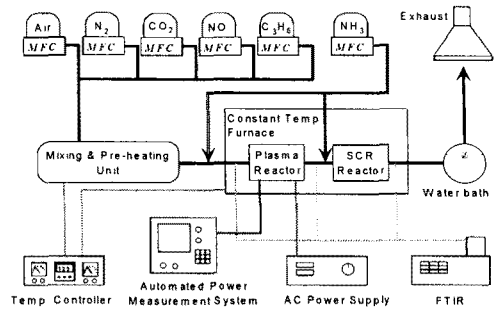


Fig. 1 Schematic of experimental setup for Diesel-like simulant gases.

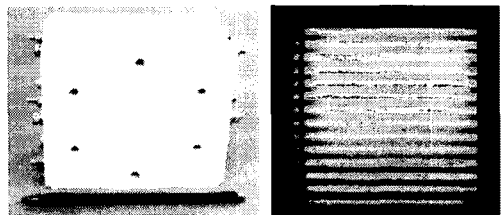


Fig. 2 Plate type DBD reactor and discharge image (reactor size=4.5cm × 7cm × 7cm).

실제 엔진 테스트를 위하여 300 마력급 선박용 디젤 엔진(YANMAR)을 사용하였으며, 전체유량의 일부분인 50 - 200 Nm³/hr을 분기하여 실험하였다. 이때 사용된 플라즈마 반응기는 기초실험과 동일하며, 유량에 비례하여 투입 전력을 높여 운전하였고 반응기에 투입된 전력은 700 - 1,500 watt 수준이다. SCR 촉매의 공간속도, SV (space velocity)는 2000/hr - 9000/hr 이고, 플라즈마 반응기의 SV는 촉매의 100배에 해당하며, 전체 시스템의 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

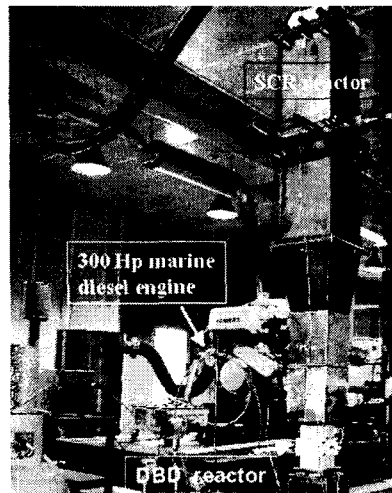
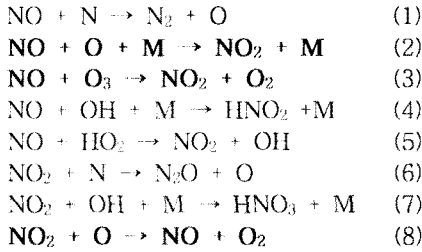


Fig. 4 Plasma/SCR hybrid system.

3. 결과 및 토의

3.1 NOx 에 미치는 저온플라즈마의 영향

일반적으로 공기중에서 다른 첨가물이 없는 경우에는 NO, NO₂ 와 관련된 다음의 화학 반응식들이 중요한 것으로 알려져 있다.



1 - 8 의 화학식에서 알 수 있듯이 이들 반응은 일반 배기 가스 상태에서는 일어나기 어려운 화학 반응으로 각각의 경우에 O, O₃, OH, N, HO₂ 등 배기 가스 성분으로부터 파생된 원자나 라디칼 등이 있어야 가능하게 되며, 본 연구에서는 이들 원자나 라디칼을 발생시키는 근원으로 저온 플라즈마 반응을 고려하게 된 것이다.

산소가 있는 분위기에서는 전자들의 에너지가 충분히 높지 못하기 때문에 N 원자의 발생은 극히 미미하게 된다. 그리고 본 기초 실험에서는 수분의 영향을 고려하지 않았기 때문에 탄화수소를 첨가하지 않은 경우에는 수소원자를 포함하는 OH, HO₂ 등의 영향 또한 무시할 수 있다. 따라서 화학식 2, 3, 8 이 주 고려 대상이 될 것으로 판단된다. 이를 통하여 주 반응은 NO 가 NO₂ 로 산화되는 반응과 NO₂ 가 NO 로 환원되는 반응이 됨을 알 수 있으며, 50% 부하, 100°C 조건에서 탄화수소로 프로필렌(C₃H₆)을 첨가한 경우와 비교하여 Fig. 5 에 NO₂ 전환 특성을 나타내었다.

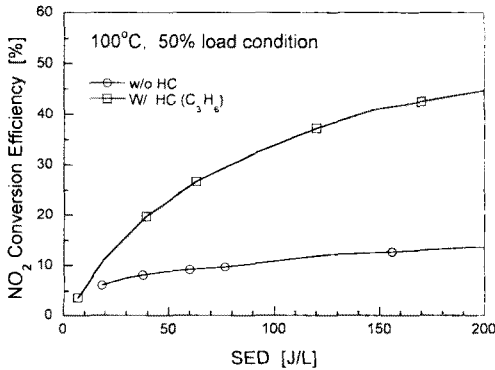
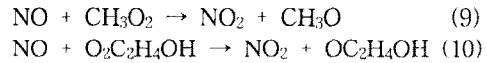


Fig. 5 NO₂ conversion rate with SED

그래프에서 볼 수 있듯이 프로필렌이 첨가되지 않은 경우에는 투입 전력에 비교적 둔감하며 전환 효율 약 13% 근처에서 평형상태가 됨을 알 수 있으며, 프로필렌의 첨가에 따라 NO₂ 전환은 급속히 진행되어 에너지 밀도가 200 J/L 인 경우에는 45% 정도의 NO가 NO₂로 전환되었음을 알 수 있다.

이때 탄화수소의 첨가로 인하여 NO₂ 로의 전환효율이 높아진 것은 크게 두 가지 이유로 생각할 수 있다. 탄화수소의 경우 O 와의 반응이 매우 활발한 것으로 알려져 있어 화학식 2 와 8에서 필요한 O 가 부족하게 된다. 따라서 대부분의 NO₂ 는 오존과 반응하여 생성되는 식 3에 따라 생성되게 되며 NO₂가 NO로 환원되는 반응이 줄어들기 때문에 전체적으로 NO₂ 로의 전환 효율이 향상되게 된다. 다른 한편으로는 탄화수소의 첨가에 따라 생성되는 라디칼 등이 있는데 이들은 다음과 같은 경로를 통하여 NO를 NO₂로 전환하게 되며 이들의 반응은 식 2 나 3 반응보다 우세한



화학반응이 되기 때문에 전체적으로 높은 NO₂ 전환효율을 보인다고 생각할 수 있다[6]. 참고로 앞에서 언급하였듯이 공기 분위기에서는 플라즈마 반응에 의하여 NO가 완전 환원되는 반응은 기대하기 어려우므로 본 기초실험의 경우에도 전체 NOx 의 양은 거의 변하지 않고 NO와 NO₂의 비율만이 달라지는 결과를 나타내었다.

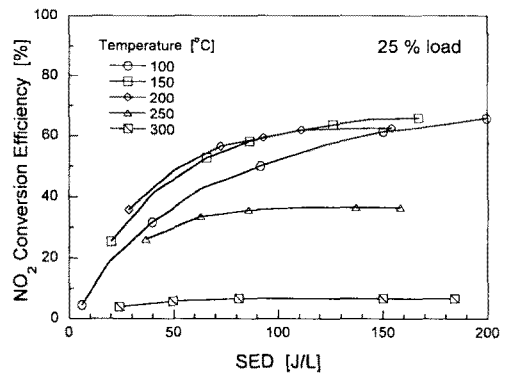


Fig. 6 NO₂ conversion rate with various operating temperature

실제 연소기기의 경우에는 불완전 연소에 따른 미연탄화수소 (UHC) 가 항상 존재하게 되므로 플라즈마 반응기의 영향을 파악하기 위하여 표 1

에 나타난 조성비중 25% 부하조건에 해당하는 경우에 온도를 100, 150, 200, 250, 300 °C로 변화시켜가며 저온 플라즈마가 NO → NO₂ 전환에 미치는 특성을 고찰하였다. Fig. 6에 온도와 투입 전력에 따른 25% 부하조건 NO₂ 전환율을 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 주로 고온 영역에서는 전환이 불리해 짐을 알 수 있으며, 최적의 전환효율을 나타내는 온도가 존재함을 알 수 있는데, 이는 위에서 열거한 주요 화학반응 상수들이 온도에 따라 비 선형적으로 변하게 되고 이에 따라 화학평형을 이루는 농도 조건이 달라지기 때문이라고 사료된다. 특히, 화학식 8의 경우가 2나 3 반응보다 온도에 민감하기 때문에 활발한 역반응으로 인하여 NO₂ 전환효율이 고온에서 급격히 감소하는 것으로 판단된다.

3.2 플라즈마/NH₃ SCR 복합공정의 특성

3.1에서 언급된 바와 같이 산소가 존재하는 배기 가스에서는 저온 플라즈마 공정만을 이용하여 NO를 완전 환원시켜 질소로 전환시키기가 어려우며 제거된 NO는 NO₂로 대부분 산화되었음을 알 수 있는데, NO의 완전 환원을 위하여 저온 플라즈마/촉매 복합공정을 고려하였다. 촉매 공정으로는 암모니아 SCR을 대상으로 하였다.

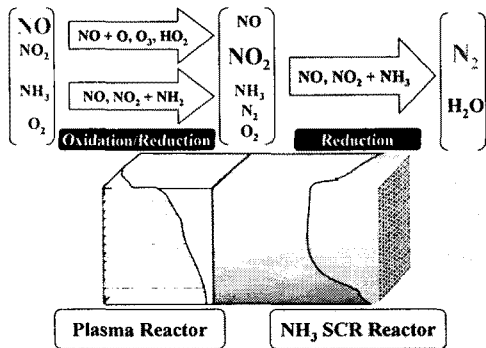
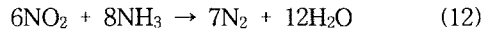
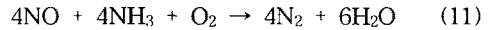


Fig. 7 Physical concept of hybride system

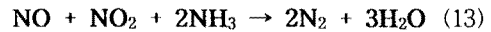
Fig. 7에 플라즈마/촉매 복합 탈질공정의 개념도를 나타내었는데, 그림에서 볼 수 있듯이 DBD 반응기에서는 주로 NO의 산화와 암모니아를 이용한 부분적인 NO의 환원반응이 일어나게 되며 촉매 반응기에서는 NO와 NO₂의 완전 환원반응이 일어나게 된다. 뒤에서 자세히 다루겠지만 촉매 반응기에서 NO와 NO₂의 온도에 따른 제거 반응 속도가 서로 다르기 때문에 플라즈마와 암모니아를 이용한 1차적인 NO의 환원반응 이외에 NO₂로 전환된 부분이 실제로 촉매 반응기에서 전체적인 질소산화물의 환원에 도움이 되게되며,

이에 따라 플라즈마와 촉매 반응기를 서로 단독으로 사용할 때에 비하여 복합공정을 이용할 경우 그 제거율이 산술적인 합보다 크게되는 시너지 효과가 나타나게 된다.

일반적으로 암모니아 SCR 촉매 공정은 저온에서 취약한 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 암모니아를 환원제로 하여 NO를 환원시키는 촉매는 보통 250°C 이상에서 활성화되며, 이 이하의 온도에서는 효율이 급격히 떨어지는 것이 보통이다. 이와 같은 촉매에서의 화학반응은 크게 다음과 같이 나타낼 수 있다

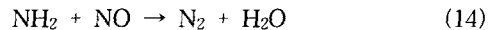


그러나 NO와 NO₂가 혼합되어 있는 경우에는 총체적인 화학반응식



을 통하여 주로 일어나는 것으로 알려져 있다[1].

한편 암모니아가 플라즈마 반응기를 거치며 직접 질소산화물의 환원제로 작용하게 되는데 그 반응은 다음과 같다.



암모니아 SCR 공정은 250 °C 이상에서 90 % 이상의 NO_x 제거성능을 나타내는 것으로 알려져 있고, 본 연구의 목적이 플라즈마를 이용한 저온 영역의 활성화에 있으므로 처리가스의 온도를 200 °C 까지 변화시켜가며 플라즈마 공정, SCR 공정, 그리고 플라즈마/촉매의 복합 공정에 따른 NO_x의 제거 특성을 Fig. 8에 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 플라즈마 단독 공정, 투입전력 84 J/L의 경우 온도에 따라 큰 차이 없이 약 30 % 근처의 NO 제거 특성을 나타내고 있으며, 이와는 반대로 SCR 단독 공정의 경우 100 °C에서 약 20 %의 제거율을 200 °C에서는 약 85 % 정도의 제거율을 보이며, 온도가 증가함에 따라 그 제거 성능이 급격히 향상되고 있음을 알 수 있다. 한편 복합 공정의 경우 저온 영역에서 약 80 % 정도의 NO_x 제거율을 나타내고 있어 플라즈마/촉매 복합 공정의 시너지 효과를 나타내고 있다. 플라즈마 반응기 후단의 결과를 보면 전체적으로 20% 정도의 NO_x가 환원 제거된 것을 알 수 있다. 이는 3.1의 플라즈마 단독공정 결과와 다른 것으로 식 14와 15에 따라 플라즈마에 의하여 생성된 NH₂ 라디칼이 질소산화물의 환원에 기여한 부분으로 판단된다.

또한 비교적 저온인 100 °C 분위기에서 촉매공정만으로는 아직 활성화 온도에 다다르지 못한 이유로 약 20 % 정도의 제거 성능을 나타내고 있으나 플라즈마와 복합공정을 이룰 경우 플라즈마와 촉매 각각의 환원성능의 합인 약 36 % = 20%(plasma) + 20%(SCR) × 0.8(plasma에 의하여 제거되고 남은 부분, 즉, 전체의 80%가 SCR로 공급되고 이것의 20%가 SCR에 의하여 제거된다는 가정) 보다 훨씬 높은 전체 80 % 정도의 제거율을 보이고 있어, 이와 같은 부분이 플라즈마/촉매 복합 공정의 시너지 효과로 판단된다.

그러나 상대적 고온 영역에서 그 성능이 약 65 % 정도로 감소하여 오히려 SCR 촉매 단독공정에 비하여 그 제거 성능이 저하되고 있음을 알 수 있다.

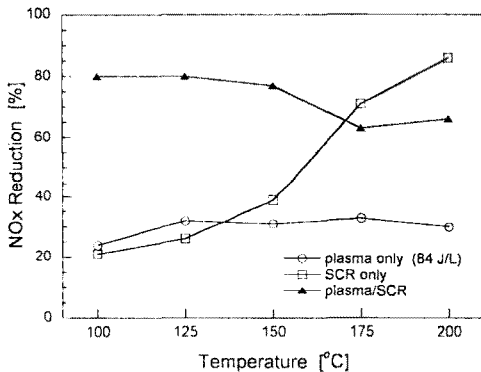


Fig. 8 NOx reduction efficiencies for various processes.

이와 같이 저온 영역에서 시너지 효과가 나타나게 된 이유와 고온 영역에서 성능저하를 보이는 이유를 파악하기 위하여 몇 가지 보충 실험을 수행하였으며, 우선 시너지 효과를 확인하기 위하여 NO와 NO₂의 비율과 가스의 온도를 조절하여 플라즈마 반응이 없는 상태에서 촉매에 의한 NO와 NO₂의 제거 성능을 비교 검토하여 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

그래프에 100, 150, 200 °C 조건에서 500 ppm NO와 500 ppm NO₂의 촉매에 의한 환원 비율을 나타내었는데, 저온 영역에서 NO₂의 전환 효율이 NO에 비하여 매우 높기 때문에 플라즈마에 의하여 전환된 NO₂가 후단의 촉매 반응기에서 쉽게 NO로 환원되는 것으로 판단된다. 이에 따라 각각의 단독 공정에서는 얻을 수 없었던 높은 제거율을 플라즈마에 의한 NO₂ 전환으로 달성할 수 있었으며, 이에 따라 플라즈마 공정을 통하여 다량의 NO를 NO₂로 전환할 경우 저온에서도 일정수준 이상의 NOx 제거율을 보일 것

으로 생각할 수 있다. 그러나 Fig. 8에도 나타내었듯이 온도가 상승하여 촉매에 의한 NO의 제거 효율이 상승하게 되면 오히려 복합공정의 성능이 나빠지게 되는데 이를 확인하기 위하여 모사가스에 포함되어있는 각각의 화학종이 촉매 반응에 미치는 영향을 검토하였다.

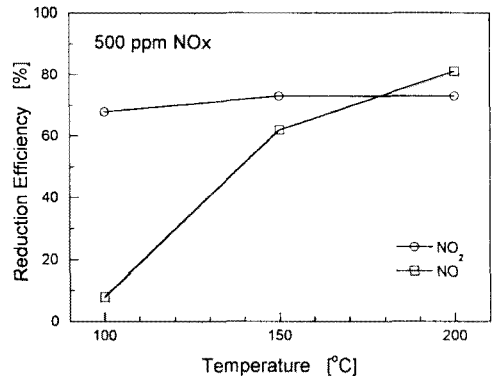


Fig. 9 Removal characteristics for 100% NO and 100% NO₂.

그 결과로 연소 배가스 중에 포함되어 있는 미연 탄화수소가 SCR 촉매내에서 암모니아를 대신하여 환원작용을 일으키게 됨을 알 수 있었다. 350 ppm의 NO₂를 질소, 산소와 함께 촉매 반응기로 유입시킬 경우 NO는 거의 검출되지 않게 된다. 그러나 촉매 반응기 앞 단에서 HC인 프로펠렌 주입을 시작하게 되면 NO₂는 약 75 ppm으로 감소하게 되나, 역으로 약 200 ppm 정도의 NO가 생성되게 된다. 여기서 생각할 수 있는 HC의 영향은 암모니아 대신에 촉매 내에서 환원제로 작용하게 되어 NO₂에서 산소원자 하나를 취하여 NO로 환원시키는 것으로 판단할 수 있으며, 전체 NOx 양을 볼 때 없어진 75 ppm (= 350 - (200 + 75))의 NO₂는 완전 환원되어 질소로 된 것으로 사료된다. 암모니아의 경우는 NO, NO₂ 모든 경우에 완전 환원제로 작용하여 질소로 환원시키는 반면 HC의 경우에는 불완전 환원제로 작용하기 때문에 이와 같은 결과가 나오게 된 것이며, 이에 따라 저온에서 플라즈마 반응에 의하여 NO를 모두 NO₂로 산화시켜 촉매 반응기에 넘겨 주더라도 NO₂에서 NO로 불완전 환원되는 반응에 의하여 전체적인 제거 성능은 기대에 미치지 못하게 되는 것이다.

식 13을 고려할 때, 최적의 제거 성능은 50% 정도의 NO가 NO₂로 전환되어 서로 1:1의 비율로 섞여있을 때 얻을 수 있을 것으로 기대가 되나, 이와 같이 HC에 의하여 부분환원되는 부분을 고려할 때 최적의 NO₂ 전환 비율이 존재할

것으로 생각되며, NO와 NO₂의 비율을 조절한 기초실험 결과 약 50-60%의 NO가 NO₂로 전환되었을 때 SCR 반응기에서 최상의 제거 성능을 얻을 수 있었다.

3.3 실제 엔진 배기가스 처리 특성

위와 같은 기초 결과를 바탕으로 실제 선박용 디젤 엔진의 배기가스를 처리해 보았다. 300 마력급 전체 엔진의 배기가스를 처리하는 전 단계로 최대부하 유량의 1/10 수준인 100 Nm³/hr의 유량을 주로 실험하였으며, 25% 부하조건을 기준으로 하였다. 플라즈마 반응기는 별도의 전처리 장치 없이도 매연과 수분이 많은 상황에서 매우 우수하게 작동하였다.

실제 엔진에서 HC의 첨가에 따른 NO₂의 전환 효율과 전체 복합 공정의 NO_x 제거율을 파악하기 위하여 각기 다른 유량과 투입에너지에 따른 특성을 검토하였다. 100°C를 기본 온도조건으로 하여 Fig. 10에는 전체 NO_x중의 NO₂의 비율을 나타내었으며, 전체 복합공정의 성능을 Fig. 11에 나타내었다. 각 그래프의 x 축은 NO_x 량에 대한 프로필렌 첨가 비율을 나타낸다.

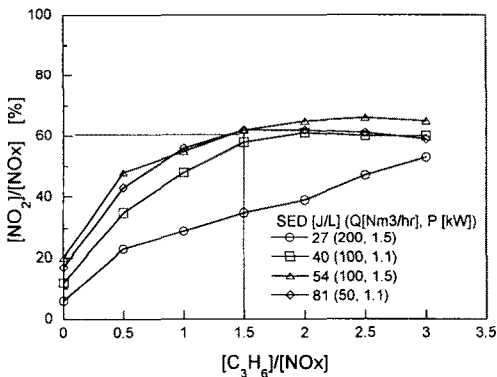


Fig. 10 NO₂ conversion rate for various operating conditions.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 HC의 첨가에 따라 NO₂로의 전환이 활발히 진행됨을 알 수 있으며, 일정량 이상의 HC 첨가에 대해서는 그 전환율도 둔감해짐을 알 수 있다. 또한 투입되는 에너지량에 대해서도 비슷한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 이와 관련되어 NO_x의 제거량을 보면 다양한 SED와 HC 첨가량에 대하여 대략 80% 정도 제거율에서 그 제거 성능이 포화됨을 알 수 있으며, 경제적인 운전조건을 선택하기 위해서 투입되는 전력량과 첨가되는 HC 양을 조절할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 자료

를 토대로 약 60% 정도의 NO₂ 전환성능을 보이는 SED = 40 J/L (100 Nm³/hr, 1.1 kW) 에 HC를 NO_x 양의 1.5배로 첨가한 경우를 대상으로 하여 온도에 따른 NO_x 제거특성을 고찰하였다.

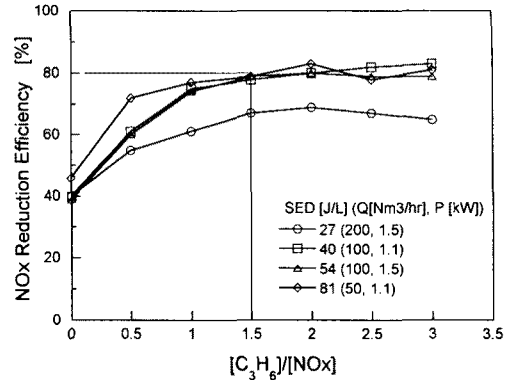


Fig. 11 NO_x reduction efficiencies for various operating conditions.

Fig. 12는 온도에 따른 SCR 단독 공정과 플라즈마 복합공정의 NO_x 제거 특성을 나타낸다. 100°C의 경우 SCR 단독 공정으로 20% 정도의 제거율을 얻을 수 있는데 비하여 복합공정을 통하여 약 80%의 성능향상을 얻을 수 있었으며, 55% 정도의 제거율을 보이는 200°C 조건에서는 90%에 달하는 제거성능을 얻을 수 있었다. 참고로, NO₂를 환원제로 하는 매연의 산화특성이 본 공정에 부정적으로 작용할 것을 우려했었지만 상기의 반응이 약 250°C 이상에서 활발히 일어나게 되므로 본 실험의 영역에서는 매연과 NO₂의 상호작용은 미미하다고 할 수 있다.

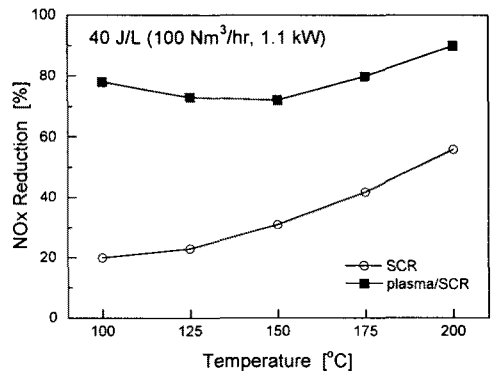


Fig. 12 NO_x reduction characteristics for SCR and plasma/SCR hybrid processes

이상과 같이 기존의 암모니아 SCR 공정을 통

하여 처리 불가능했던 저온영역을 플라즈마와의 복합공정을 통하여 전체적으로 70% 이상의 NOx 제거 성능을 얻을 수 있었으며, 실험에 사용한 반응기가 모듈화 되어있으므로 여러대의 플라즈마 반응기를 병렬로 연결하여 사용하면 전체 엔진 유량을 처리하는 데도 문제가 없을 것으로 판단된다. 실제로 SCR 공정으로 처리가 불가능한 저온 조건은 저부하 상태에서 형성되므로 엔진 운전의 전체 유량을 담당하는데 약 5-6 kW의 전력이 필요할 것으로 예상되며 이는 엔진 동력의 약 2% 수준으로 그리 우려할 만한 에너지 소모량은 아니라고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 산화반응이 주로 일어나는 플라즈마 반응과 저온에서 취약한 특성을 가지는 암모니아 SCR 공정이 서로 복합되어 사용될 때 얻을 수 있는 시너지 효과에 대하여 검토해 보았다. 암모니아 SCR 공정이 플라즈마 반응에 의하여 생성되는 NO₂에 대하여 선택적인 우수성이 있음을 확인하였으며, 이를 통하여 실제 선박용 디젤 엔진 배기가스 조건에 대하여 탈질공정이 불가능한 저온지역(100 -200°C)에서 70 - 90%의 탈질율을 얻을 수 있었다. 이를 통하여, 저온 플라즈마/암모니아 SCR 촉매의 복합공정이 자동차 및 선박 엔진과 같이 부하 변동이 심하고 냉시동 과정을 거쳐야 하는 시스템이나, 열 회수율이 높아 서온의 배출 가스를 방출하는 시스템 등에 적

용가능성을 시사하고 있음을 알 수 있으며, 앞으로 실용화 와 사용 에너지 절감에 초점을 맞추어 연구해 나갈 계획을 가지고 있다.

후 기

본 연구는 과기부 국가지정연구실사업 및 산자부/에너지관리공단 에너지/자원 기술개발사업의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Bröer, S and Hammer, T, *Appl. Catalysis B* 28, pp.101-111, 2000.
- [2] Hoard, J and Balmer, M. L., *SAE paper* 982429, 1998.
- [3] Hammer T., *SAE paper* 2000-01-2894, 2000.
- [4] Hoard, J., Laing, P., Balmer, M. L., and Tonkyn, R., *SAE paper* 2000-01-2895, 2000
- [5] 이재욱, 임선화, 한의주, 차민석, 송영훈, 대한 환경공학회 2001 추계학술연구발표회 논문집 (II), pp.19-20, 2001.
- [6] Filimonova, E. A., Kim, Y., Hong, S. H., and Song, Y.-H., *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35, pp.2795-2807, 2002.