질소산화물과 관련한 환경기계기술

안국영*† · 김한석* · 차민석* · 이진욱*

Eco-machinery Engineering Technology for Reducing NOx Emission

Kook-Young Ahn*†, Han-Seok Kim, Min-Seok Cha, Jin-Wook Lee

ABSTRACT

Eco-Machinery engineering technologies in KIMM for reducing NOx emission were introduced. Combustion technologies such as reburning and fuel staged or air staged combustion have been applied to reduce NOx emission in the field of boiler furnaces. Lean premixed combustion method have been studied in gas turbine combustor. Hybrid system with plasma and SCR being considered as prospective method of De-NOx has been developed. Also, low NOx technologies including common rail system, EGR and DPF in diesel engine have been investigated.

Key Words : Low NOx, PM, Lean Burn, Reburning, Fuel Staged, Air Staged, Burner, Combustor, Gas Turbine, Plasma, SCR, Common Rail, EGR, DPF

1. 서 론

환경부에서는 국민의 삶의 질 향상과 지속가능한 발전을 위하여 범정부적 환경기술개발사업의 효율적 추진 필요에 따라 환경기술개발 종합계획(2003-2007)을 수립하였다. 국제경쟁력을 갖춘 첨단 환경기술개발 및 수출산업화라는 중점개발계획에 따라 중점추진과제는 다음 세가지로 분류되었다. 첫째는 실용화·상용화 기술 및 수출을 위한 미래핵심기술의 개발로 이 중 대기오염방지기술에 분류된 오존 및 스모그 원인물질인 질소산화물 배출량을 저감하는 기술개발이 포함되어 있다. 둘째는 공공복지 향상을 위한 공공기술 개발확대이며, 셋째는 환경관련기술과의 공동개발체제 구축으로 이 중 에너지-환경기술에 질소산화물 등에 대한 국제환경규제 대응기술 확보가 포함되어 있다. 이와 같이 질소산화물은 화석연료를 연소시키면 배출되는 오염물질로서 최근 중요하게 인식되어 이에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 질소산화물을 저감하는 방법은 연소기술을 이용하여 원천적으로 배출량을 감소하는 방법과 배출된 질소산화물을 처리하는 방법으로 나눌 수 있다. 본 고에서는 이 두 가지 질소산화물 저감 및 처리기술 중 한국기계연구원에서 수행하였거나 수행하고 있는 연구를 소개하기로 한다.

* 한국기계연구원 환경기계기술연구부
† 연락저자, kyahn@kimm.re.kr

2. 저 NOx 연소기술

2.1 산업용 버너에서의 저 NOx 연소기술

2.1.1 재연소 기술

산업용 보일러에 적용되는 NOx 저감 방법 중의 하나로 재연소 기술이 있다. 이 기술에서는 연소영역을 Fig.1에서 보는 바와 같이 연료 노즐로부터 일차연소영역(Primary Combustion Zone), 재연소영역(Reburn Zone), 연소완료영역(Burnout Zone)으로 나누어, 일차연소영역에서 발생한 NO를 재연소영역에서 재연소 연료와 반

응시켜 N_2로 환원시키므로서 NO를 저감하며, 연소완료영역에서는 나머지 공기를 공급시켜 재연소영역로부터 배출된 미연연료가 완전 연소되도록 한다[1-2].

재연소 특성 실험에는 236 kW의 용량을 갖는 LPG용 연소기를 Fig.2와 같이 제작하였는데 일차연소용 공기는 날개각이 45°, 날개수 12개, 외경이 50mm로 제작된 선회기를 통하여 주연소영역에 공급되게 하였으며, 이차 공기 공급은 선회강도를 조절(S=0~0.8)할 수 있는 Movable block swirl generator를 통하여 연소완료 영역에 공급되도록 하였다. 일차 연료는 6개의 노즐을 이용하였으며, 재연소 연료는 연소기 중심축에 설치된 단공노즐을 이용하였다. 그리고 재연소 연료의 공급 위치에 대한 영향을 예측하기 위하여 축중심의 여러 위치에 재연소 연료를 공급할 수 있도록 하였다.

Fig.3은 재연소 연료비에 따른 NO 발생량을 나타낸 것으로, 재연소 연료량이 증가함에 따라 재연소 반응에 의하여 NO가 감소하고 있다.

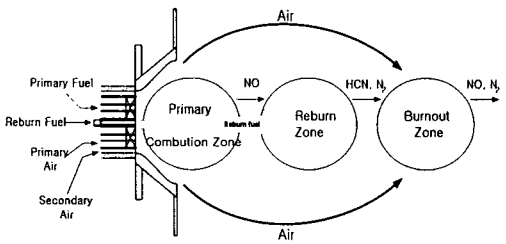


Fig.1 Schematic diagram of reburning process

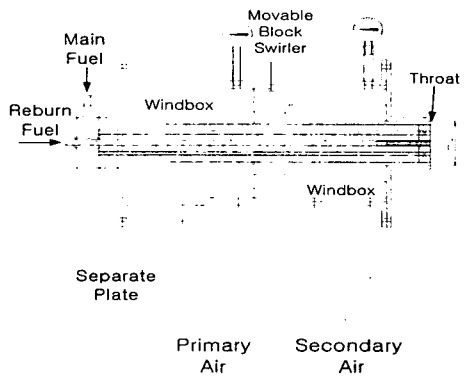


Fig.2 Experimental reburning burner

Fig.4는 재연소 연료 공급비에 대한 화염형상을 가시화한 결과이다. 재연소 연료비가 20%이상인 경우, 연료는 일차연소영역에 존재하는 재

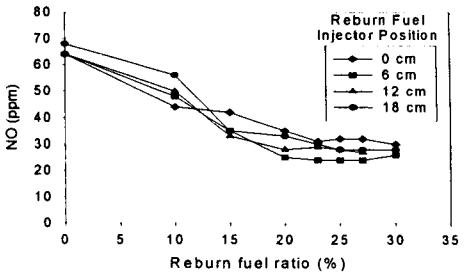


Fig.3 Effect of reburn fuel ratio on NO emission

순환영역을 관통하여 재연소 영역을 형성하는 것을 알 수 있다

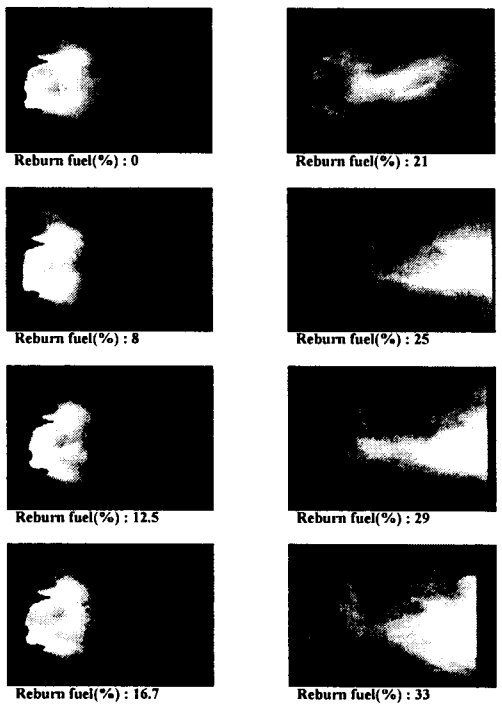


Fig.4 Photographs of flame on reburn fuel ratio (reburn fuel nozzle injection position : 0cm)

2.1.2 공기/연료 다단 연소기술

공기/연료다단 연소기의 화염구조는 Fig.5와 같이 주연소 영역은 주로 화염의 안정화에 기여하고, 후연소 영역에서 대부분의 연료가 연소된다. 즉 주연소 영역은 고온 영역이지만 화염대의 크기가 작기 때문에 NOx 발생량이 크지 않으며 대부분의 연료가 연소되는 후연소 영역은 주연소 영역에서 생성된 연소생성물이 연소영역을 회석

시키기 때문에 화염온도와 산소의 농도를 낮출 수 있어 NOx의 발생은 일반 연소기에 비하여 낮게 된다[3].

공기/연료 다단연소실험에는 236 kW의 용량을 갖는 LPG용 연소기를 Fig.6과 같이 제작하였다.

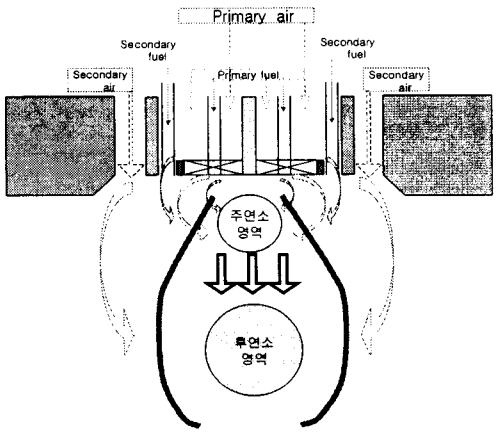


Fig.5 Schematics of air/fuel staged flame

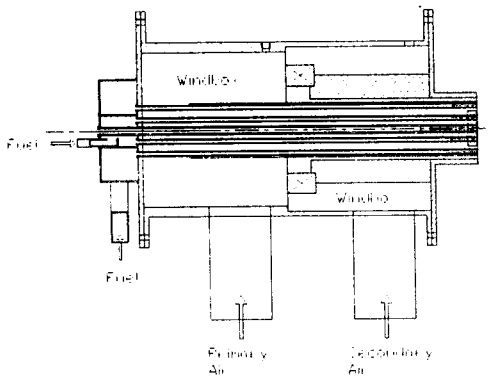


Fig.6 Experimental air/fuel staged LPG burner

Fig.7은 후연소 공기의 swirl수를 0.8 그리고 총 연료량의 23%를 주연소 연료공급단에 공급한 경우 주연소 공기의 공기비와 선회강도에 대하여 NOx의 발생특성을 나타낸 결과이다.

Fig.8은 주연소 선회각을 45°, 후연소 선회기의 swirl수를 0과 0.8로 후연소 공기비에 대한 NOx의 발생분포를 나타낸 결과이다.

Fig.9은 주연소 연료공급비를 20%로 하는 경우 각 공기공급량에 대한 화염의 형상을 가시화한 결과이다. 주연소 공기공급비가 증가할수록 화염대의 폭이 감소하고 연소영역이 후류로 진행되는 것을 알 수 있다.

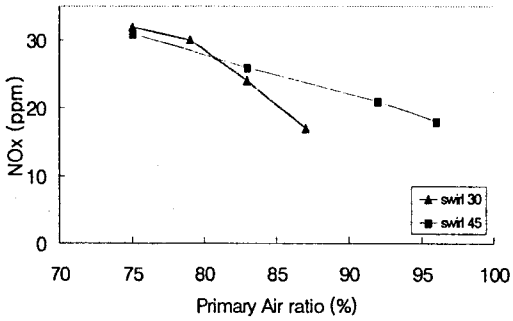


Fig.7 NOx emissions with primary air ratios

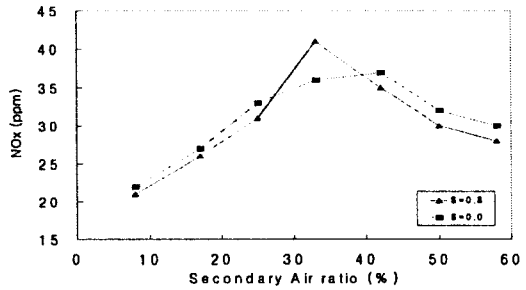


Fig.8 NOx emissions with secondary air ratios

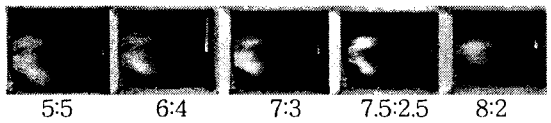


Fig.9 Photographs of flames(fuel ratio 2:8)

2.1.3 공기 다단 연소기술

공기 다단 연소 방식은 그림 Fig.10과 같이 노즐 선단에서 공기의 공급을 억제하여 연료 과농영역을 형성하며 하류에서 연소가 완료되는 형식을 취하고 있다. 이렇게 연소반응을 억제시켜 연소영역을 저온화 하여 Thermal NOx 발생을 저감할 수 있다[4-5].

설계된 공기 다단형 연소기는 LNG 236 kW의 용량을 갖는 연소기로 중심축에 연료 노즐과 동축으로 공기 공급단이 3단으로 Fig.11와 같이 구성되어 있다.

한 예로, Fig.12에는 1단 공기비를 기준으로 연료 분사각에 대한 NOx 배출 특성을 나타내었다.

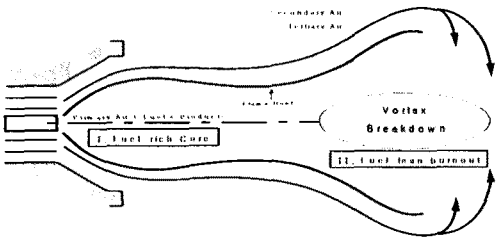


Fig.10 Schematics of air staged flame

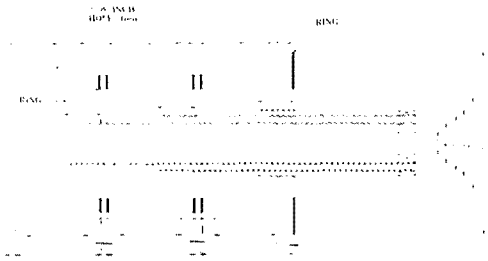


Fig.11 Experimental air/fuel staged LPG burner

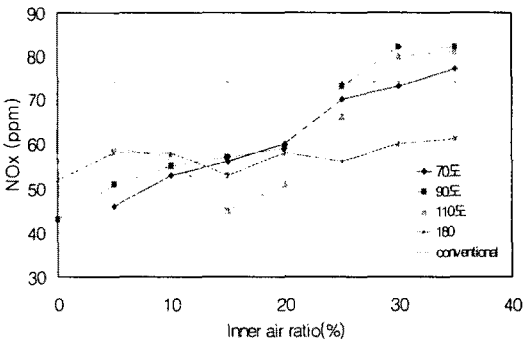


Fig.12 NOx emission for fuel injection angles

2.2 가스터빈 연소기에서의 저 NOx 연소 기술 (희박 예혼합 연소)

가스터빈 연소기에 가장 널리 사용되고 있는 저 NOx 연소기술은 예혼합 희박연소로 초기에 연료와 공기를 미리 예혼합 시킴으로서 혼합특성을 향상시키는 동시에 연소용 공기를 다량 공급하여 희박 연소함으로서 화염온도를 저하시켜 Thermal NOx를 저감시킨다[6].

Fig.13에는 희박 예혼합 연소기술을 이용한 20kW급 마이크로 가스터빈 연소기를 나타내었으며, 사용연료는 경유이다.

Fig.14는 기존 연소기와 저 NOx 연소기의 화염 사진으로, 저 NOx 연소기의 경우 내부에서 연료가 연소용 공기의 강한 선회력에 의해서 혼합되고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig.15와 Fig.16은 기존 연소기와 희박 예혼합 저 NOx 연소기의 NO 발생량을 비교한 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 저 NOx 연소기의 경우가 NO의 발생량이 적게 됨을 알 수 있으며 공기량을 감소시키면 화염대의 온도가 상승되어 NOx의 발생이 증가됨을 알 수 있다.

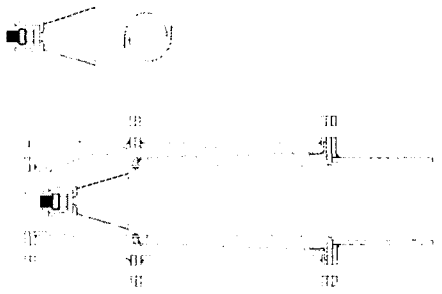
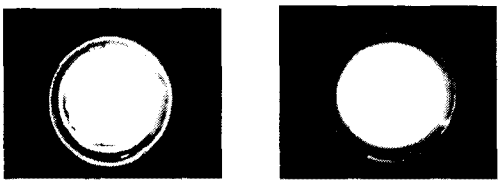


Fig.13 Lean premixed low NOx combustor



(a)conventional (b) low-NOx

Fig.14 Comparison of flame shape in conventional and low NOx combustor

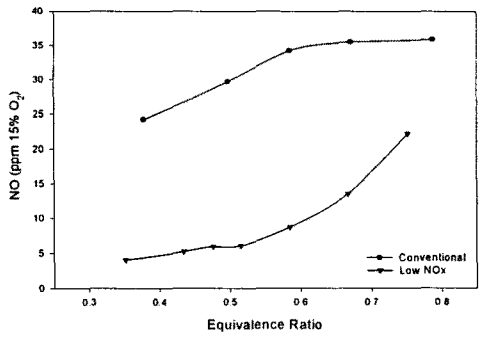


Fig.15 NO emissions for equivalence ratio in conventional and low NOx combustor

3. 플라즈마 탈질 기술

3.1 적용기술의 개요

동력, 발전 및 열원용 연소기기의 주요 배출 오염물질 중 하나인 질소산화물(NOx)의 저감을 위해 현재 이용 가능한 대표적인 연소후처리용 탈질기술로는 자동차와 같은 이동 배출원의 경우 삼원촉매, 그리고 보일러와 같은 고정 배출원에는 암모니아를 환원제로 하는 선택적 환원법(NH_3 SCR)을 들 수 있다. 이들 기술은 각기 지난 수 십 년간 산업에 이용되어온 기술이지만, 디젤 또는 희박연소(lean burn) 가솔린 엔진을 이용하는 선박이나 자동차에는 직접적으로 적용될 수 없는 기술적인 한계점을 갖고 있다. 즉, 삼원촉매는 디젤엔진과 같이 배가스 중의 산소농도가 5 % 이상인 경우 효과적인 성능을 기대할 수 없으며, NH_3 SCR은 작동 온도의 한계성으로 인하여 기존의 발전소, 소각로 등과 같은 저온의 배출원은 물론이고 이동 배출원과 같이 부하변동이 심한 시스템에 적용이 어려우며, 취급이 까다로운 암모니아를 이동원에 탑재하는 것 또한 현실적이지 않다. 한편, 이와 같은 기술적인 어려움에도 불구하고 각종 NOx 배출원에 대한 NOx 거래제가 시행 예고되고 있는 등 탈질규제는 강화되고 있어 이에 대한 기술개발이 요구되고 있으며, 저온 플라즈마와 촉매의 복합공정에 대한 연구들이 활발히 진행중에 있다[7-11].

한국기계연구원에서도 1994년부터 저온 플라즈마를 활용한 탈질기술에 대한 연구를 수행중에 있으며, 특히 2000년부터는 저온 플라즈마와 암모니아 SCR 촉매 공정을 복합한 공정을 300마력급 선박용 디젤엔진에 적용하는 연구를 수행해 온바 있어, 플라즈마/SCR 복합공정에 대한 기술적 특성과 적용결과에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

3.2 플라즈마 발생장치 및 작용

저온 플라즈마 반응기는 자체 개발 제작된 다중 평판형 DBD(Dielectric Barrier Discharge) 반응기를 사용하였으며(Fig.16), 교류 전원공급장치

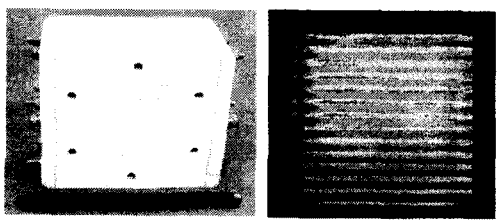


Fig.16 평판형 반응기와 방전이미지 (reactor size=4.5cm×7cm×7cm)

를 통하여 약 200 cm^3 의 반응기에 2kW 까지 전력을 공급할 수 있다. 일반적으로 산소가 포함된 배기가스의 경우에는 NOx의 대부분을 NO가 차지하게 되는데, 저온 플라즈마 공정만을 고려한다면, 거의 대부분의 NO가 NO_2 로 산화되게 되며 실질적인 전체 NOx의 양은 거의 변화가 없게 된다. 즉, 산소가 포함된 경우의 플라즈마에 의한 NOx의 반응은 다음과 같이 개념적으로 표현될 수 있다.

$$NO + plasma \rightarrow NO_2 \quad (1)$$

이와 같은 NO의 NO_2로의 전환은 탄화수소류의 첨가로 증대될 수 있으나 플라즈마에 의한 NO의 환원은 기대하기 힘들다.

그러나 SCR공정에 필요한 암모니아를 플라즈마 전단에 투입할 경우에는 플라즈마에 의하여 생성된 NH_2 라디칼에 의한 NO의 환원반응을 일부 기대할 수 있다.

3.3 암모니아 SCR 기술

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 보통이며, 300°C 이상에서는 99% 이상의 제거성능을 나타낸다. 이와 같은 촉매에서의 화학반응은 크게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (2)$$
$$6NO_2 + 8NH_3 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O \quad (3)$$

그러나 NO 와 NO_2가 혼합되어 있는 경우에는 총체적인 화학반응식

$$NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O \quad (4)$$

을 통하여 주로 일어나는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 NO와 NO_2가 혼재하는 경우에는 반응 온도가 달라질 수 있으며, 기초실험결과 NO의 경우에는 저온인 100°C 근처에서 20% 정도 제거가 가능하지만 NO_2의 경우에는 80% 정도 제거되는 것으로 확인되었다.

3.4 플라즈마/SCR 복합공정의 적용 예

이상에서 언급한 바와 같이 NO에서 NO_2로 산화반응 만이 일어나는 플라즈마 반응과 NO보다는 NO_2의 제거성능이 우수한 암모니아 SCR 공

정의 플라즈마/촉매 복합 탈질공정에 대한 개념도를 Fig.17에 나타내었다.

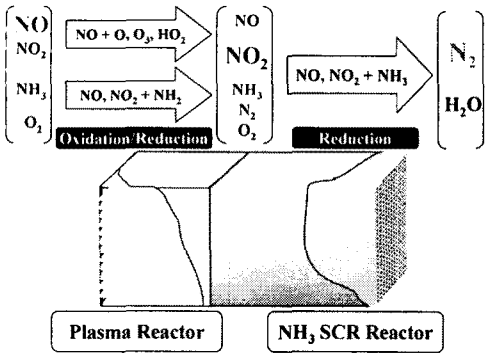


Fig.17 Physical concept of hybrid system

그림에서 볼 수 있듯이 플라즈마 반응기에서는 주로 NO의 산화와 암모니아를 이용한 부분적인 NO의 환원반응이 일어나게 되며 촉매 반응기에서는 NO 와 NO_2의 완전 환원반응이 일어나게 된다. 촉매 반응기에서는 NO 와 NO_2 의 온도에 따른 제거 반응 속도가 서로 다르기 때문에 플라즈마 와 암모니아를 이용한 1차적인 NO의 환원반응 이외에 NO_2 로 전환된 부분이 실제로 촉매 반응기에서 전체적인 질소산화물의 환원에 도움이 되게 되며, 이에 따라 플라즈마 와 촉매 반응기를 서로 단독으로 사용할 때에 비하여 복합공정을 이용할 경우 그 제거율이 산술적인 합보다 크게 되는 시너지 효과가 나타나게 된다.

Fig.18에는 300마력급 디젤엔진의 실제 배기가스를 처리하기 위한 pilot 시스템의 사진을 나타내었다. 300 마력급 전체 엔진의 배기가스를 처리하는 전 단계로 최대부하 유량의 1/10 수준인 100 Nm^3/hr 의 유량을 주로 실험하였으며, 25% 부하조건을 기준으로 하였다(NOx=550ppm) [11]. 플라즈마 반응기는 별도의 전처리 장치 없이도 매연과 수분이 많은 상황에서 매우 우수하게 작동하였다.

Fig.19는 온도에 따른 SCR 단독 공정과 플라즈마 복합공정의 NOx 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. 100°C의 경우에 플라즈마와 SCR 공정에 의하여 각각 처리된 NOx 양의 산술적인 합은 36% 수준이지만 서로의 시너지 효과로 인하여 80%에 달하는 탈질율을 얻을 수 있었다.

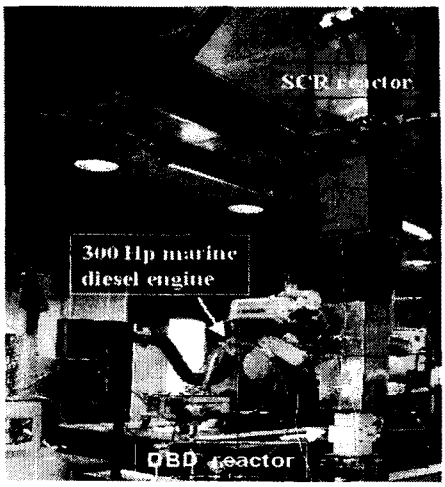


Fig.18 Plasma/SCR hybrid system.

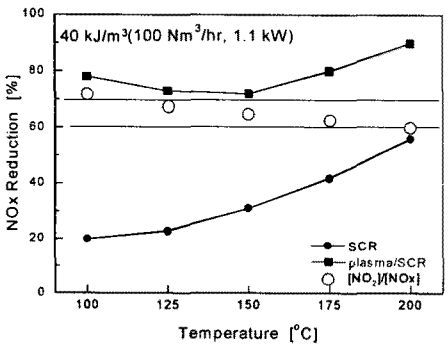


Fig.19 실제 엔진배기가스에서의 NOx 제거 특성

3.5 향후계획

이상과 같이 기존의 암모니아 SCR 공정을 통하여 처리 불가능했던 저온영역을 플라즈마 공정과의 복합공정을 통하여 전체적으로 70% 이상의 NOx 제거 성능을 얻을 수 있었으며, 1,000 Nm^3/hr 급 플라즈마 반응기도 제작하여(Fig.20) 엔진 전체유량에서도 복합공정이 성공적으로 검증된 상황이며, 이 경우에 필요한 전력은 5-6 kW 정도의 전력이 필요할 것으로 예상되며 이는 엔진 동력의 약 2% 수준으로 그리 우려할 만한 에너지 소모량은 아니라고 사료된다.

한편, 본 플라즈마/SCR 복합공정은 저온의 배가스 배출원인 20,000 Nm^3/hr급 이상의 소각로 등에 시범 적용될 예정에 있다.

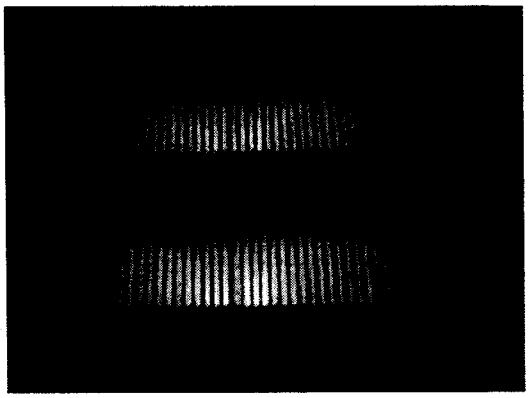


Fig.20 1,000 Nm^3/hr 급 플라즈마 반응기.

4. 디젤엔진에서의 NOx 저감 기술

4.1 서론

산업구조의 고도화와 경제 성장에 결정적인 역할을 하여 국민경제의 주도적인 산업으로 인식된 20세기 대표산업인 자동차 산업은 21세기에 접어들어 IT 산업의 주요한 수요산업으로 디지털을 이용한 연구개발비(R&D)투자 확대와 제품의 디지털화에 박차를 가하고 있는 등의 긍정적인 평가에도 불구하고, 최근 들어 자동차에서 배출되는 유해가스에 의한 공해문제가 사회적인 문제로 대두되면서 자동차의 가치에 대한 부정적 요인들의 돌출과 자동차정책에 대한 새로운 각도에서의 재평가 필요성이 제기되고 있다.

본 장에서는 이러한 시대적 변화요구에 대응하기위해, 현재 한국기계연구원에서 수행중인 연구과제중에서, 대기오염의 주범으로 인식되는 디젤엔진의 유해배출물의 저감기술을 위주로 하여 간략히 요약·서술하고자 한다. 아울러 본 장에서 언급되지 않는 다양한 대응기술 및 방법들이 기획 또는 수행되고 있지만, 본 논문의 전체적인 맥락을 고려하여 이에 국한하고자 함을 우선 밝혀두고자 한다.

본 장에 기술되는 연구과제의 주된 특징는 관련 산업체와 공동으로 연구개발하여 실제 상용화를 목표로 하여 수행중이라는 점과 개발기술의 난이도에 따라 역할분담에 대한 유연성을 가지고 있어 보다 효율적으로 수행할 수 있다는 점이다.

현재까지 세계 주요 선진기술국 및 주요 자동차 회사에서는 지구 온난화규제가 본격화되면서 자동차 CO_2 규제에 유리한 가장 적합한 대상기술로서, 직분식(direct injection)디젤엔진과 관련된 기술을 선정하여 이에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

따라서 본 장에서는 가솔린엔진에 비해 연료절감 및 열효율이 우수한 직분식 디젤엔진의 핵심기술인 고압 커먼레일(common-rail) 시스템과 EGR(exhaust gas recirculation) 시스템 그리고 디젤후처리시스템들에 의한 NOx저감에 대하여 중점적으로 살펴 보고자 한다.

4.2 디젤엔진에서의 유해배출물

디젤엔진에서는 공기를 엔진 실린더내에 흡입, 압축시키고 연료를 분사펌프로 분사하여 자연착화를 일으켜 연소시키는 압축 착화연소 방식을 이용한다. 이 때의 공연비는 보통 17:1 이상의 희박 연소이므로, 산소가 충분한 상태에서 연소가 일어나 CO 및 HC의 배출은 가솔린 기관에서보다 적지만, NOx의 배출은 상대적으로 많다. 또한 연료로 사용하는 경유는 가솔린보다 고비등점 탄화수소성분이 많고 황 화합물도 약 10배 이상이다. 이러한 이유로 입자상 물질의 배출이 많고, 또한 벤조피렌(benzopyrene)과 같은 발암성 물질을 다량 함유하고 있다.

CO의 생성은 주로 연소시에 산소의 부족으로 인한 불완전 연소에 의해 발생하며, HC는 연료가 연소실 내부에서 저온 영역과 접촉하여 연소가 진행하지 않는 미연 HC, 혼합기가 농후 또는 희박 영역에서 소염에 의한 미연 HC 및 분사말기의 노즐에 의한 HC등 크게 3가지 원인으로 분석된다.

NOx는 고온의 연소가스 영역에서 형성되며 형성속도는 이론공연비에 가깝게 될 때 최고로 되며, 연소실의 연소온도가 높을수록, 연소시 산소농도가 높을수록 NOx의 생성은 많아지게 된다.

PM은 연료 탄화수소계의 불완전연소에 기인하여 발생되고, 일부는 기관의 윤활유에서 발생하며 스모크는 분사된 연료의 농후한 미연 연료에 들어있는 핵에서 형성 및 응집되어 발생한다. 자동차별로 비교하면 CO, HC는 가솔린자동차와 디젤자동차가 비슷하나 NOx와 PM은 경유자동차가 대부분을 차지하고 있다.

4.3 NOx저감기술

미국, 유럽 등의 선진국에서는 배출규제에 대비하여 디젤엔진의 NOx(PM포함)를 줄이기 위한 다양한 기술을 개발·적용하고 있다. 종래에는 연료분사시기조정, 공기과잉율 조정, 흡기온도 최적화, 압축비 최적화 등의 방법이 주로 사용되었으나, 현재에는 엔진의 전자제어화에 따른 연료분사압력 1400~1800bar의 고압분사기술 및 EGR등이 사용되고 있다. 2005년에 적용이 예상되는 EURO-Ⅳ 규제에 대응하기 위한 기술로는

DPF, De-NOx 등의 후처리기술 도입이 확실시 되고 있다.[12-16]

4.3.1 고압 커먼레일시스템

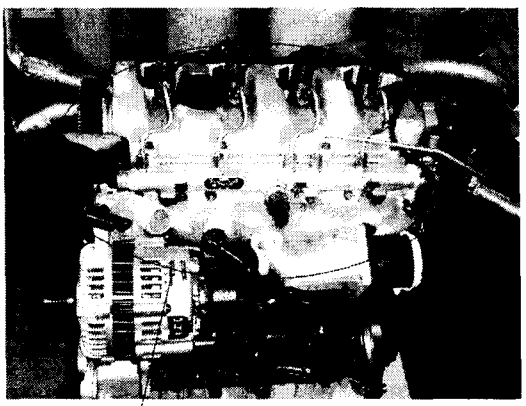
엔진녹킹한계가 없어서 고압축비에 따른 높은 효율을 가지며 또한 부분 부하 시에 펌핑 손실이 없고 항상 희박한 상태로 운전되기 때문에 직접 분사식 디젤엔진 기술이 고연비 엔진기술로 각광을 받고 있다. 유럽 및 일본의 자동차제작사에서는 커먼레일 엔진을 현재 기술로서 저공해 규제와 연비를 함께 만족시킬 수 있는 유일한 대안으로 여기고 있으며, 차세대 연료분사시스템으로 연료압력을 저장하여 사용하는 축압식 커먼레일(CR; common rail)시스템을 개발하여 거의 실용화 단계에 와 있다. 특히 독일의 보쉬사가 가장 앞서 있으며 일본 니폰덴소(Nippondenso)사의 ECD-U2 시스템도 우수한 결과를 보이고 있어, 승용차와 중형화물차용 디젤엔진 사용에 장점이 많은 것으로 분석하고 있다. 이러한 세계적인 기술력의 확보 및 개발을 위해 국내에서는 관련업계를 중심으로 이미 일부기술의 실용화 완료 및 보다 향상된 초고압 실현을 위한 연구·개발중이기에**(산자부 부품소재기술개발사업)**, 조만간 초고압 CR 시스템의 실용화가 가능할 것으로 예상하고 있다.

직접분사식 디젤 엔진에서 배출되는 입자상 물질을 저감하고 연소 효율을 향상시킴으로써 연비를 개선하기 위하여 연료를 초고압(1000~2000bar이상)으로 분사하는 방법이 적용되고 있다. 이를 위한 연료분사의 제어가 자유로운 커먼레일 시스템은 분사시기, 분사압력, 분사율의 제어가 엔진의 운전조건과 무관하며 기계식 펌프시스템에 비하여 엔진에 적은 부하를 주면서 1000bar 이상의 고압분사를 가능하게 해 준다.

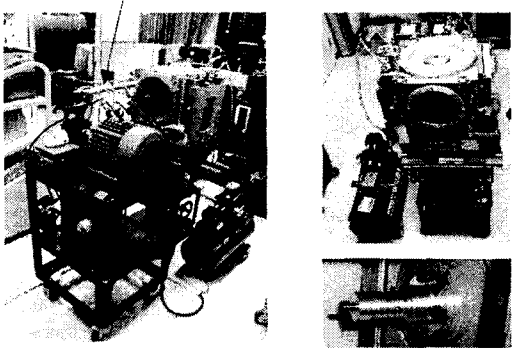
아래 그림은 고압펌프에서 발생된 고압연료를 커먼레일에 저장시켜 솔레노이드방식 인젝터를 통해 분사되는 고압분무 해석을 위해 수행중인 KIMM내 실험장치이다. 커먼레일에 연료가 저장되어 공급되므로 분사기간 동안 엔진 회전속도에 관계없이 적은 압력변동과 최적압력 제어가 가능하며, 분사율, 분사량, 분사시기 등의 전자제어 구현이 가능하다. 3방향밸브(three-way valve)를 이용하여 커먼레일의 압력을 분사 종료 시에 역으로 작동시켜 노즐의 니들을 막아줌으로써 급속한 Cut-off 가능하여 엔진회전수에 관계없이 분사량 및 분사시기 제어가 용이하고 Pliot 분사 가능하다. 반면에 저속에서 고압 형성이 곤란하며, 고압의 상시 충진으로 System 안정성이 요구되며, 고압 연료의 By-pass에 따른 구동 손실과 같은 단점이 있다.

4.3.2 EGR 시스템

EGR(배기가스재순환)은 디젤엔진에서 발생되는 NOx를 저감시키기에 가장 유효한 방법으로써 현재 가솔린 및 소형디젤차량에 적용되어지고 있다. 흡기의 일부분을 재순환된 배기가스로 대치시키면 실린더내의 산소의 양이 감소하고 연소과정에서 실린더내 흡기공기중 질소의 산화를 지연시킨다. 그리고 배기가스의 비열은 공기의 비열보다 커서 EGR로 인한 연소온도도 감소하게 된다. 하지만 EGR율의 증가에 따라 고부하 영역에서는 NO_X이외의 배출물이 상당히 증가하고 연료소비율도 증가할 뿐만 아니라 soot 및 SO_X 배출물의 순환으로 엔진의 내부의 마모나 침식이 발생할 수 있으며, 윤활유의 열화가 빠르게 진전된다.



(a) Base Engine



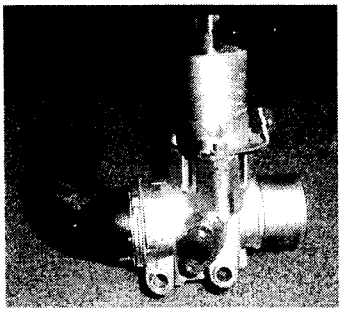
(b) Experimental setup for spray analysis

Fig.21 High pressure common-rail system

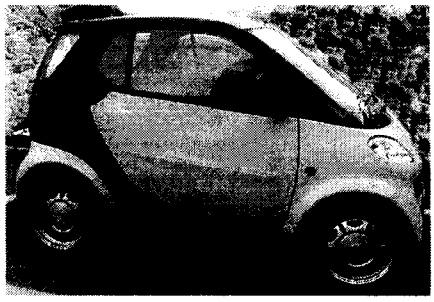
또한 배기규제가 계속 엄격해 지면서 현재 사용되고 있는 기계식 EGR 밸브로는 정밀하고 신속한 작동이 어려워 전자제어식 EGR(E-EGR) 밸브의 사용이 증가되고 있다. E-EGR 시스템은

기관회전수와 부하, 냉각수 온도 등을 감지하여 기관작동 상태를 파악하여 전자식 모터나 전자식 밸브로서 EGR 밸브를 구동하여 재순환 가스량을 제어하므로, 엔진운전 조건에 최적인 EGR 유량을 제어할 수 있다. 그러나 EGR율과 연료분사시기 등을 ECU에 입력하여야 하기 때문에 엔진과의 매칭기술이 매우 중요하다.

따라서 수행중인 본 연구의 목적은 국내 EGR 밸브개발업체인 UNICK사의 E-EGR 밸브를 터보과급식 소형디젤 엔진에 장착하여 E-EGR 밸브의 특성을 분석하고 차량적용의 가능성을 파악하고자 하였다**(산자부 G7과제)**. 이를 위하여 실험차량인 Smart car에 장착되어진 base E-EGR 밸브를 분석하고 시제품 E-EGR 밸브를 차량에 설치하여 CVS-75모드 실험을 통하여 배출가스 및 EGR 유량을 확인하였으며, 엔진부하 및 회전수에 따른 EGR 양의 상관관계를 확보하여 이러한 자료들을 바탕으로 향후 EGR 밸브의 엔진 적용시에 설계자료와 방향을 제시하고자 하였다.



(a) Prototype E-EGR valve



(b) Test Diesel Vehicle

Fig.22 Electric EGR development

4.3.3 디젤후처리기술

디젤후처리기술로써는 NOx 및 PM의 저감기술로 대별할 수 있다.

현재까지의 NOx 저감 기술로서는 lean NOx catalyst 연구가 활발하며, HC를 사용하여 NOx 성분을 환원시키는 방법이다. Lean NOx catalyst 중 피동형(passive type)은 배기가스 중에 포함된 HC를 이용하여 NOx를 환원시키며, 능동형(active type)의 경우에는 외부 장치(post injection 혹은 직접 배기관에 연료를 분사하는 방법)에 의해 HC를 배기가스에 직접 공급한다. 디젤엔진에 있어서는 공기가 대부분의 운전 조건에서 충분한 상태로 연소되기 때문에 HC의 양은 미소하므로 피동형 촉매의 전환 효율이 능동형에 비하여 떨어지는 단점이 있다. 또한 NOx 저감 후처리 기술로 실용 가능성이 있는 기술은 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 NOx 흡장형촉매(absorber catalysts)를 들 수 있다. 주로 대형 발전기 등에 사용되어온 SCR 기술은 촉매 물질로써 암모니아 혹은 요소(urea)를 사용한다. 요소를 물에 용해시켜 차량에 적용하였을 경우 질소 산화물 정화율이 65% 이상의 저감 효과가 있다. 현재 유럽지역의 상용차 제작사들은 독일의 지멘스사와 합작하여 SCR 기술을 실제 차량에 적용하여 시험중이며 가까운 시일내에 실용화될 가능성이 높다고 보고되어 지고 있다. 또한 NOx 흡장형촉매의 경우는 황산염의 형성이 문제점으로 나타나고 있으며 이는 연료의 황 함유량을 저감시키는 것으로 대책을 세울 수 있다.

PM저감을 위한 후처리적인 방법으로써 매연여과장치를 들 수 있다. 이는 입자상 물질 여과장치라고도 불리며 DPF(Diesel Particulate Filter trap)로 통칭한다. DPF는 경유엔진에서 배출되는 PM을 필터로 포집한 후, 이것을 태운 후, 다시 PM을 포집하여 연속적으로 사용하는 기술로서 PM 저감 성능은 아주 우수하다. 그러나 DPF는 가격이 높고 내구성이 부족한 것이 실용화에 장해요인이 되고 있다. 또한 필터에 PM이 포집됨에 따라 엔진의 배압이 증가하며 이에 따른 출력과 연료소비율이 다소 악화되며 이를 최소화하는 기술의 보완이 시급한 실정이다.

한국기계연구원에서는 1980년대 후반부터 경유자동차 후처리 관련 기술을 연구해왔으며, 서울시 DPF 보급프로그램의 인증기관으로서 장치의 성능을 평가하였고, 정부 및 산업체로부터 DPF 관련 기술개발 과제를 수행해왔을 뿐만 아니라 핵심 요소인 금속분말필터, 금속 파이브 필터 등의 필터류 개발, 첨가제의 특성 평가, 보조열원장치 개발 등 관련 과제를 지속으로 수행하고 있다. 그리고 국내외 기술의 현황 파악과 보급 계획을 수립하기 위해 국내 개발장치를 비롯해서 해외에서 개발된 매연여과장치 등을 입수하여 평가하고 있는 중이다. 특히 2002년도에는 국가지정연구실(NRL)로 선정이 되어 이에 대한 연

구에 더욱 더 매진할 수 있어, 향후 좋은 연구 성과가 기대된다.

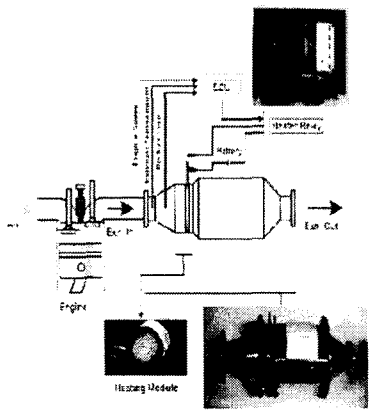


Fig.23 Experimental setup for DPF

6. 결론

한국기계연구원에서 수행하고 있는 질소산화물 저감 및 처리기술에 대하여 소개하였다. 최근 한국기계연구원에서는 "제로에미션 환경기계기술개발"과제를 연구원 중장기 발전계획에 따라 2003년부터 10년을 목표로 수행하고 있으며, 환경기계기술의 세계일류화를 목표로 신형식 연소기술, 순환 재생형 환경기계 기술, 미량 유해물질 안정화 처리 기술 및 도시공해 저감 대체형 차량 요소기술 개발과제를 수행하고 있다. 질소산화물 저감 및 처리기술을 포함하여 국가 환경기술을 발전시켜 국민의 삶의 질 향상은 물론 환경산업을 차세대 국가전략산업으로 육성하는 데 한국기계연구원이 일익이 담당할 것을 기대한다.

참고문헌

[1] A. Kicherer, H. Spliethoff, H. Maier, K.R.G. Hein, (1994) "The effect of different reburning fuels on NO-reduction", *Fuel*, 73, pp. 1443-1446

[2] J. P. Smart, D. J. Morgan, (199) "The effectiveness of multi-fuel reburning in an internally fuel-staged burner for NOx reduction", *Fuel*, pp. 1437-1442

[3] J. P. Smart, R. Weber (1989) "Reduction of NOx and optimisation of burnout with an aerodynamically air-staged burner and an air-staged precombustor burner", *Journal of the Institute of Energy*, pp. 237-245.

[4] M.A. Toqan, and J. M. Beer, and P. Jansohn. and N. Sun. and A. Testa. and J. D. Teare, (1992) "Low NOx Emission from Radially Stratified Natural Gas-Air Turbulent Diffusion Flames", *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute*, pp. 1391-1397.

[5] Beer. J. M.(1996) "Low NOx Burners for Boilers, Furnaces and Gas Turbines; Drive Towards the Lower Bounds of NOx Emissions", *Combust. Sci. Tech.*, **121**, pp. 169-173.

[6] Woburn. (1980) "The Design and Development of Gas Turbine Combustors", Northern Research and Engineering Corporation. Massachusetts, U.S.A

[7] Bröer, S and Hammer, T, *Appl. Catalysis B* 28, pp.101-111, 2000.

[8] Hoard, J and Balmer, M. L., *SAE paper* 982429, 1998.

[9] Hammer T., *SAE paper* 2000-01-2894, 2000.

[10] Hoard, J., Laing, P., Balmer, M. L., and Tonkyn, R., *SAE paper* 2000-01-2895, 2000

[11] 차민석, 이재옥, 김용호, 송영훈, 25회 KOSCO 심포지움 논문집, pp.89-95, 2002.3. 플라즈마 탈황·탈질 기술

[12] M. A. Ganser, "Common Rail Injectors for 2000bar and Beyond", SAE paper 2000-01-0706, 2000.

[13] K. Huhtala, M. Vilenius, "Study of a common rail fuel injection system", SAE paper 2001-01-3184, 2001.

[14] R. S. G. Baert, D.E. Beckman and A. Veen, "Efficient EGR technology for future HD diesel engine emission targets", SAE paper 1999-01-0837, 1999.

[15] A. J. Dennis, C. P. Garner, D. H. C. Taylor, "Effect of EGR on diesel engine wear", SAE paper 1999-01-0839, 1999.

[16] 정용일, 윤재건, "자동차와 환경", 한성대학교 출판부, 2000.