

4. 기술동향

질소산화물 제거기술 Technology Trend of NOx Removal



정경열
K-Y Chung

• 한국기계연구원



류길수
K-S Rhyu

• 한국해양대학교

1. 서 론

오늘날 우리가 살아가고 있는 자연환경은 각종 오염 물질에 의해 파괴되고 있으며, 이제는 환경오염의 피해가 한 국가만의 문제가 아니라 국제적인 지구환경 문제로서 전 세계의 관심사가 되고 있다. 이러한 문제에 대응하기 위하여 1992년 유엔환경개발회의에서는 환경관련 국제협약을 체결하였다. 이와 같은 환경오염 방지를 위한 국제적인 압력의 강화는 우리나라와 같이 에너지 다소비형 산업구조의 국가들에게 막대한 지장을 초래하게 된다. 따라서 지구환경보전기술, 청정기술 등의 새로운 환경영역의 개척이나 환경친화경영을 위한 연구개발이 조속히 이루어져야 할 것이다.

최근 대기환경은 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx)에 의한 산성비 및 산림파괴, 프레온 가스에 의한 오존층 파괴, 이산화탄소, 메탄 및 아산화 질소 등에 의한 지구온난화 현상 등의 문제를 야기시키고 있으며, 지구환경에 커다란 위협이 되고 있다. 이중 황산화물과 질소산화물은 전체의 90% 이상이 화석연료를 사용하는 화력발전소 및 산업시설 등의 고정발생원과 자동차, 선박 등 이동발생원에서 생성되고 있다. 황산화물(SOx)은 연료중의 유황분제거, 배연탈황시설 설치, 대체청정연료의 사용 등에 의해 매년 감소 경향에 있지만, 질소산

화물은 그 제거 방법이 쉽지 않으며, 특히 도시지역에서는 차량의 증가 및 정체 등에 의해 질소산화물의 배출량이 증가하여 대기환경은 개선되지 않고 있다. 이로 인해 대기환경의 유해물질인 질소산화물을 제거하는 것이 중요한 당면과제가 되고 있으며, 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 질소산화물의 저감을 위해 질소산화물 제거기술의 개발과 함께 질소산화물 배출규제를 한층 강화해 나가는 노력을 기울이고 있다. 본 논고에서는 대기오염의 중요한 원인 물질인 질소산화물을 제거하기 위한 기술에 대하여 설명하고, 향후 기술개발의 방향에 대하여 논하고자 한다.

2. 질소산화물의 발생원

일반적으로 일산화질소(NO), 이산화질소(NO₂), 아산화질소(N₂O) 등을 총칭하여 질소산화물(NOx)이라고 말한다. 그림 1은 대기중의 질소산화물의 변화과정을 보여주고 있다. NO와 NO₂의 발생에 있어서 자연적 발생원은 토양과 수중 미생물의 단백질 분해작용, 바이오매스 연소, 번개, 화산활동 등을 들 수 있으며, 특히 N₂O는 토양에 공급되는 과잉 비료의 사용에 의한 것이 문제가 되고 있다. 인위적 발생원에는 화석연료의 연소에 의한

것으로 자동차, 항공기와 같은 이동발생원과, 화석 연료를 사용하는 발전소, 보일러, 소각로와 같은 고정발생원이 있다. 기타 발생원으로는 성층권으로부터의 직접 유입이나 암모니아의 산화 등이 있다. 이러한 대기중의 질소산화물 발생원 중 화석 연료의 연소에 의한 배출량이 전체 배출량의 약 절반 이상을 차지하고 있다.

각종 연소장치의 연소에 의해 발생하는 질소산화물은 주로 NO이며, NO는 연소시 고온(1,200°C 이상)에서 연소공기 중의 산소와 질소가 반응하여 생성되는 "Thermal NO"와 연료중에 존재하는 질소성분이 연소과정에서 산화되어 생성되는 "Fuel NO"로 구별된다. "Thermal NO"는 연소온도가 높고, 반응시간이 길고, 연소영역의 산소농도가 높을 때 생성되며, "Fuel NO"는 연소영역의 산소농도가 높고, 연료중의 질소화합물이 많을 때 생성된다. 이외에도 연소공기중의 분자상 질소와 탄화수소 라디칼과의 반응으로부터 생성된 중간생성물들의 산화반응에 의해 생성되는 것으로 "Prompt NOx"가 있다. Thermal NOx의 생성은 연소장치에서의 산소량, 온도, 압력, 체류시간에 의해 영향을 받으며, Fuel NOx의 생성은 연료의 질소함량, 전체 과잉공기량, 1단계 및 2단계의 연소공기의 상대적 분배 등의 요인에 의존한다. NO는 무색무취의 독성기체로서 연소중 또는 배기중에 산화되어 갈색 악취성의 유독기체인 NO₂로 되며, 일반적으로 대형 석탄 화력발전소 등으로부터 배출되는 NOx의 농도 범위는 300~1200ppm이고, NOx중에는 90~95%의 NO와 5~10%의 NO₂가 포함되

어 있다. 또한 N₂O는 대류권에서는 온실가스로 알려져 있으며, 성층권에서는 오존과 반응하여 NO를 생성하는 등 오존층 파괴물질로 알려져 있다.

3. 질소산화물 규제동향

화석연료의 연소 후 대기중에 배출되는 SO_x, NO_x, CO, CO₂, HC, PM 등의 대기오염 물질은 전세계적으로 매년 규제가 더욱 심하게 강화되고 있다. 지금까지 연소 배기가스에 대한 세계 각국의 대책을 살펴보면 우선적으로 배출량이 큰 고정발생원(화력발전소, 산업용 보일러)과 차량용 엔진에서의 대기오염물질 저감을 위한 연구가 있었으며, 이들 발생원에 대한 대책이 어느 정도 자리잡게 됨에 따라 근래에 이르러서는 지금까지 규제가 심하지 않았던 선박용 엔진의 배기가스에도 규제가 강화되기 시작하였다. 예를 들면 미국 환경국인 EPA에서 제안하고 있는 선박엔진의 NO_x 규제방안에 따르면 고효율 탈질설비를 설치하지 않는 한 NO_x 배출에 따른 부담금을 피할 수 없도록 하고 있으며, 향후 고효율 탈질설비가 선박에 필수적으로 부착될 상황에 있다.¹¹⁾

우리 나라의 경우는 SO₂, 먼지 등을 많이 배출하고 있는 발전소, 산업시설, 난방시설 등 고정발생원에 대한 청정연료보급 정책의 추진에 따라 사용 연료를 고황유에서 저황유 또는 청정연료로 대체하였다. 그러나 최근 자동차가 폭발적으로 증가하면서 질소산화물 및 휘발성유기화합물, 그리고 미세먼지의 배출량이 대폭 증가하여 도시지역의 O₃ 오염과 시정장애 문제가 심화되고 있어서, 이에 대한 저감기술 및 정책의 체계적인 대책 마련에 고심하고 있다. 이외에도 새로운 합성화합물질의 사용 증가에 따라 발암물질 등 인체에 유해한 미량의 유해화합물질의 대기중 농도가 증가하고 있으며, 이들 물질에 대한 관심이 점차 고조되고 있다.

이러한 이유로 매년 국립환경연구원에서는 각 부분별 주요 대기오염물질에 대한 배출량을 산정하고 있으며, '98년 대기오염물질 배출량에 대한 통계 자료에 따르면 황산화물과 질소산화물의 배출량이 215만톤 정도로 전체 대기오염 물질의 약 60% 이상을 차지하고 있는 것으로 보고되고 있다.

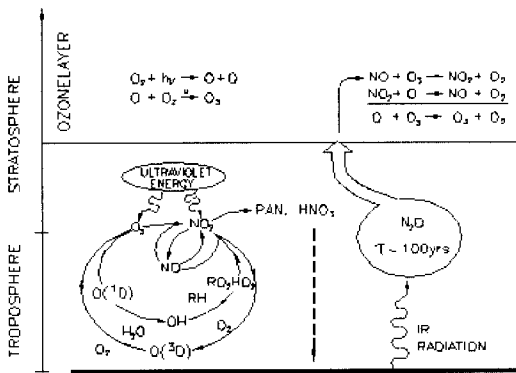


그림 1 대기중의 질소산화물의 변화과정

표1 2005년 질소산화물 배출허용기준 개정(안)

배출시간	적용기간 및 배출허용기준	
	2004년 12월 31일까지	2005년 1월 1일 이후
가. 일반보일러		
(1) 액체연료사용시설	250(4)pp.이하	
(가)배출가스량 100,000m ³ /시간 이상인 시설		250(4)ppm 이하 70(4) ppm 이하
1) 기존시설		
2) 신규시설		
(나) 배출가스량 100,000m ³ /시간 이상 100,000m ³ /시간 미만인 시설		250(4)ppm 이하 200(4)ppm 이하
1) 기존시설		
2) 신규시설		
(다) 배출가스량 100,000m ³ /시간 미만인 시설		250(4)ppm 이하
(2) 고체연료사용시설		
(가) 기존시설	350(6)ppm 이하	
1) 배출가스량 100,000m ³ /시간이상 100,000m ³ /시간		250(6)ppm이하
2) 배출가스량 100,000m ³ /시간 미만 100,000m ³ /시간	250(6)ppm이하	
(나) 신규시설		150(6)ppm이하
(3) 국내에서 생산되는 석유코크스 사용시설	200(6)ppm이하	200(6)ppm이하
(4) 기타시설	250ppm	250ppm 이하
나. 발전시설		
(1) 액체연료사용시설		
(가) 발전용 내연기관	950(13)ppm이하	
1) 가스터빈		
가) 가스시설		250(13)ppm이하
나) 신규시설		70(13)ppm이하
다) 제주도지역		400(13)ppm이하
2) 디젤기관		
가) 기존시설		600(13)ppm이하
나) 신규시설		300(13)ppm이하
(나) 기타발전시설	250(4)ppm이하	
1) 설비용량 100MW 이상		
가) 기존시설		250(4)ppm이하
나) 신규시설		70(4)ppm이하
2) 설비용량 100MW 미만		
가) 기존시설		250(4)ppm이하
나) 신규시설		70(4)ppm이하
(2) 고체연료사용시설		
(가) 기존시설		
1) '89. 12. 31 이전시설	350(6)ppm이하	350(6)ppm이하
2) '90. 1. 1 이후시설	350(6)ppm이하	150(6)ppm이하
(나) 신규시설	350(6)ppm이하	80(6)ppm이하
(3) 기체연료사용시설		
(가) 발전용 내연기관중 가스터빈	500(13)ppm이하	
1) 기존시설		150(13)ppm이하
2) 신규시설		50(13)ppm이하
(나) 기타발전시설	400ppm이하	
1) 기존시설		150(4)ppm이하
2) 신규시설		50(4)ppm이하
다. 소각시설 또는 소각보일러	200ppm이하	
(1) 소각용량 2톤/시간 이상인 시설		50(12)ppm이하
(2) 소각용량 200kg/시간 이상 2톤/ 시간 미만인 시설		150(12)ppm이하
(3) 소각용량 200kg/시간 미만인 시설		150(12)ppm이하

황산화물의 배출량은 실제 발전소의 배연탈황 시설의 가동과 청정연료의 보급으로 2000년 초반에는 대략 연간 50만톤 이하로 배출될 것으로 예상되나 질소산화물의 경우는 변동이 없거나 오히려 증가할 것으로 예상된다.

또한 환경부에서는 2005년에 적용할 새로운 대기오염물질 배출허용기준을 표1과 같이 확정하고 있으며, 여기에서는 질소산화물 배출허용기준의 적용 대상시설 세분화 및 기준조정, 소각시설에 대한 기준강화 등이 포함되어 있다. 이외에도 2010년까지 적용할 배출기준에 대한 방향이 제시되어 있다.

한편 국제해사기구(IMO)에서는 세계적 환경오염방지정책의 일환으로 선박으로부터 대기오염방지를 위한 규칙(MARPOL 73/78 해양오염방지협약 부속서⁶⁾을 채택함에 따라 비상 디젤기관, 구멍정기관 및 비상시에만 사용되는 일체의 장치 또는 설비를 제외하고, 2001년 이후 새로 제작하거나 건조되는 130kW 이상 디젤기관에 대하여는 동 협약에 따라 질소산화물 배출량 등에 대한 검사를 받도록 하고 있다. 이에 국내에서도 선박용 디젤기관의 질소산화물 배출제어를 위한 기준(해양수산부 고시 제 1999-98호)을 제정 고시하여 국내항간을 운항하는 연안선에 대해서까지도 주관청이 정한 대체의 NOx제어를 위한 장치 요건을 적용토록 하고 있다.

이와 같이 질소산화물 배출규제에 대응키 위한 연소 조정 및 배기가스 후처리 등의 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 국내에서는 촉매 및 NOx 저감 기술의 연구가 실험실 수준이거나 실험 테스트 단계에 있으며, 이를 제어하는 장치 및 기술은 현재 외국 기술에만 전적으로 의존하고 있는 실정이다. 그러므로 질소산화물 배출 규제에 따른 질소산화물 저감 설비와 제어장치의 국산화를 위한 연구가 조속히 이루어져야 할 것이다.

4. 질소산화물 제거기술

질소산화물의 생성을 억제하고 배출을 저감하기 위한 기술에 대한 연구는 1970년경 자동차로부터 나오는 질소산화물과 산업용 보일러나 발전소에서 나오는 질소산화물에 대한 심각성이 제시되고, 깨끗한 대기환경을 보존하기 위한 배출규제 정책수립과 함께 시작되었다. 이에 질소산화물 제거기술은 그림 2와 같이 여러 방면으로 진행되었으며, 연소전제어와 연소과정제어로서는 충분한 제거가 힘들게 되자 배출가스에 대한 질소산화물 제거기술인 연소후 제어가 연구되었다.

질소산화물 제거를 위한 제어기술을 세분화하면 다음과 같다. 첫째로, 연소전의 제어는 석탄을 연료로 사용하는 경우 NOx 발생의 60~80%가 연

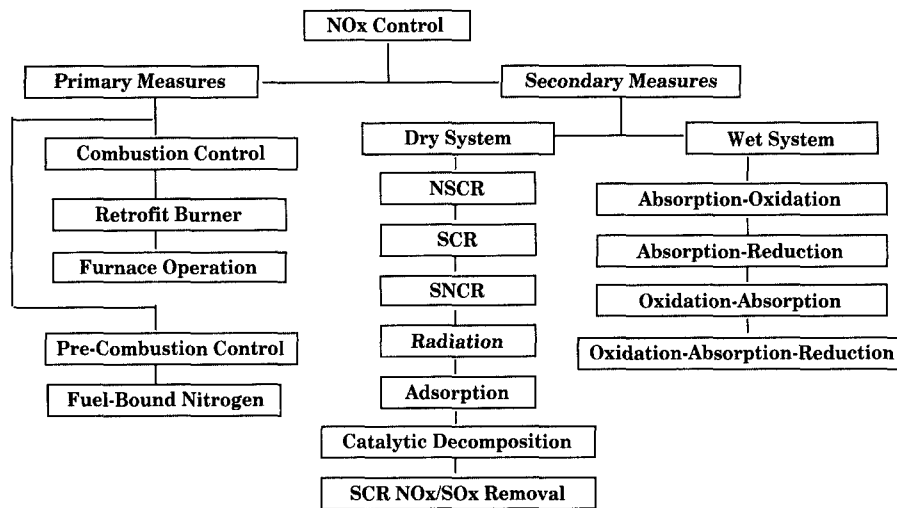


그림 2 질소산화물 제거기술의 분류

료에 포함된 질소산화물의 연소에 의한 것으로 알려져 있으며 최근에는 미생물을 이용한 석탄의 탈황, 탈질이 연구되고 있으나 아직도 연구단계에 불과하다. 석유의 경우 탈질화 반응은 수소를 이용한 탈질 방법이 가장 보편적인 것으로 알려져 있다. 이러한 연료 개선방법은 경제성 및 기술적인 문제가 있고, 고온 연소 공정에서 생성되는 Thermal NOx를 제거할 수 없기 때문에 환경규제치 강화에 능동적으로 대처하기에는 미흡하다.

둘째로, 연소과정에서의 제어는 질소산화물을 줄이기 위한 가장 간단한 방법으로 연소 화염으로부터 발생하는 Thermal NOx를 줄이기 위해 연소 최고 온도를 줄이고 연소영역에서의 체류시간을 줄이거나, 연소영역에서의 산소 농도를 줄이는 방법과 생성된 질소산화물을 로내에서 유효하게 환원분해하는 방법, 배기가스의 재순환 방법 등이 있다. 이들은 운전조건 변경과 연소방법 개선등으로 어느정도 가능하며 상당부분 실용화되어 있다. 가장 적용도가 높은 방법으로는 과잉공기를 축소, 다단 연소, 및 공기 연소온도 저감 등이 있다. 이러한 방법은 저감 비용이 적게 드는 장점이 있으나 질소산화물 제거효율의 한계가 있어 엄격한 배출 허용기준에 대해서는 추가적인 배연처리 기술이 필요하게 된다.

셋째로, 연소후 제어는 NOx 제거를 위한 산화, 흡수, 환원 등의 공정에서 용액을 사용하는 습식법과, 용액을 사용하지 않는 건식법으로 나눌 수 있다. 습식법은 NOx와 SOx를 동시에 처리하는 공정으로 SOx 제거 효율은 높지만, NOx 제거에는 비능률적이며 장치비가 많이 들고 장치 개선에 문제점이 많아 연구 개발이 요망된다. 건식법은 습식법에 비해 투자비, 유지비가 저렴하고 공정이 단순하며 폐수 처리가 필요없지만 유입되는 분진의 양에 매우 큰 영향을 받고 부산물인 NH₄HSO₄과 (NH₄)₂HSO₄, Slip NH₃ 등이 유출될 수 있다. 건식법 중 대표적인 방법으로는 선택적 촉매 환원법(SCR : Selective Catalytic Reduction)과 선택적 무촉매 환원법(SNCR : Selective Non-Catalytic Reduction)이 잘 알려져 있다.

SCR 기술은 과잉 산소 존재하에 촉매상에서 NOx와 NH₃의 반응을 150~450°C의 온도범위

에서 진행시키는 것이며, SNCR은 고온에서 기상 반응을 일으키는 것이다. SCR을 이용한 상용화 공정은 1978년 일본에서 처음으로 설치되었으며, 그 후 독일, 미국, 네덜란드 등에서 새로운 시설이 건설되었다. SCR 공정의 문제점은 촉매의 활성이 산성유안이나 배기가스에 존재하는 먼지에 의하여 감소하므로 먼지가 과량 존재하는 공정의 경우, 전기 집진 시설이나 탈황설비가 질소산화물 제거 공정 이전에 설치되어야 한다는 단점이 있다. 그러나 초기의 많은 문제점은 대부분 해결되어 실제의 공정에 적용되고 있다.

SNCR 공정은 환원제로서 암모니아, 요소용액, 시안산, NH₂ 라디칼 등을 사용하며, 기존 설비의 큰 수정없이 적용할 수 있다는 장점으로 인하여 많은 공정에 적용되고 있다. SNCR 공정은 1974년 암모니아를 환원제로 사용하여 처음으로 실제 공정에 적용되었다. SNCR 공정은 가장 경제적인 면을 보이지만 반응온도 범위가 850~950°C로 매우 좁으며, 주입된 암모니아나 요소와 같은 환원제의 미반응 배출과 배기가스에 존재하는 아황산가스와 암모니아의 기상반응에 의한 산성유안의 생성이 문제가 된다. 하지만 좁은 반응온도의 문제는 적절한 첨가제 주입에 의하여 넓은 온도범위에서도 반응이 가능하며, 아황산 가스에 의한 산성유안의 생성은 탈황제 주입에 의하여 억제할 수 있다. 주목할 것은 건식법이 습식법에 비해 경제성이 우수하고, 촉매를 사용한 SCR공정이 높은 질소산화물 제거 효율을 보여준다는 것이다.

한편 20여년간 선박용 탈질공정을 개발해온 일본에서는 현 시점에서 이동 배출원에 적용될 수 있는 탈질공정은 암모니아 SCR이 유일한 것으로 평가하고 있으며, 장기적으로는 내구성이 보완된 HC SCR 기술이 이용될 것으로 전망하고 있다.¹²⁾

이 SCR공정의 제어장치는 배기가스 분석계, 환원제 유량조절 및 제어장치 등으로 구성되며, 기본적인 제어기능은 배기가스의 조성에 대하여 탈질 반응로 출구의 NOx농도와 반응로 입구의 NOx농도에 대응해서 환원제를 주입하는 것에 있다. 여기서 반응로 입구의 NOx에 대해 암모니아 몰비와 탈질 반응율의 관계에는 비선형성이 있으며, 가스 온도에 의해 특성이 변화하므로, 대상기기의 NOx

발생특성 및 배기가스 상태 등에 의해 주입량을 보정하지 않으면 안된다. 따라서 탈질장치의 제어제는 기동시에 있어서 배기가스 유량, NOx농도, 온도 등의 급격한 변화에 대응하기 위한 보정회로가 필요하다.¹³⁾

또한 환원제 주입량 제어의 최적화를 위해서는 배기가스 조건이 급격히 변하는 경우에도 대응할 수 있고, 촉매의 특성을 살린 새로운 제어 알고리즘의 개발이 요구된다. 과거에는 탈질반응 제어를 위해 반응기의 출구 혹은 입구의 구성, 온도, 가스 유량 등을 실측하여 이것들을 일정범위에서 이루어지도록 반응 조건을 제어하였지만, 과도상태에서는 각 시점에서의 상황을 보완하면서 반응조건을 제어할 필요가 있다.¹⁴⁾ 따라서 비정상 요소를 포함한 과도상태에서도 적용 가능한 탈질 반응 공정의 동특성을 파악하여 최적화를 이루어야 할 것이다.

5. 질소산화물 제거기술 개발 현황

세계적인 양대 선박엔진 설계회사인 MAN B&W 및 Sulzer에서는 질소산화물 배출규제에 대응하기 위해 지난 수십 년간 선박용 디젤엔진에서의 NOx 저감기술을 개발하여 왔다. 이들 외국 선박엔진 회사에서는 NOx 배출저감을 위한 1차적인 대책으로서 엔진연소조건을 개선하는 기술인 EGR, 연소실의 water injection, 연료분사 노즐 개선 등을 개발하였으나, 이들 기술 모두 엔진성능을 저하시키거나, 낮은 NOx 저감율로 인해 향후 강화될 규제에 대한 충분한 대책으로는 미흡한 것으로 평가하고, NOx 배출저감을 위한 2차적인 대책으로서 선박용 엔진의 후처리 설비인 암모니아 SCR 공정을 개발하였다.[5] 표 2는 선박엔진에 대한 질소산화물의 저감방법을 도입한 외국 엔진제작사의 현황을 보여주고 있다.

우리나라의 경우 80년대 중반에 이들 회사로부터 엔진 가격보다 높은 가격으로 공정을 도입하여 선박에 장착한 사례가 있다. 또한 NOx를 배출하고 있는 대형 사업장인 화력발전소는 99년도 이후부터 규제가 강화됨에 따라 현재 우리나라 대부분의 중공업 회사는 암모니아 SCR의 기술을 외국으

로부터 도입하여 보유 중에 있다. 특히 금년에는 제주도에 소재한 소규모 디젤발전소에 암모니아 SCR을 설치하여 실제 운전을 통한 경제성 및 성능 평가를 수행할 예정에 있다. 이 밖에도 국내의 소각로에도 암모니아 SCR 설비가 설치되고 있으나, 전부 외국에서 촉매를 수입하고 있는 실정에 있다. 이와 같이 암모니아 SCR의 설치사례가 국내에서도 점차 증가함에 따라 P대학, S사, H사 등에서 암모니아 SCR용 촉매를 개발하고 있으며, 이를 보일러에 장착하여 실증실험 중에 있다.

한편 90년대초부터 여러 기관에서 플라즈마를 이용한 산업용 보일러에서의 탈황탈질 연구를 수행하여 플라즈마 기술에 대한 경험을 쌓고 있으며, 이외에도 대기오염 방지 기술을 수행하였거나 수행중에 있다. 외국의 경우 선박용 암모니아 SCR 기술은 이미 상용화되어 있으며, 플라즈마/촉매 기술을 이용한 탈질공정은 개발과정에 있는 기술로 평가되고 있다. 플라즈마/촉매 공정은 독일, 미국, 일본 등에서 수행하고 있으며, 대부분 기초연구를 마치고 엔진 테스트를 수행하는 수준에 이르고 있다. 외국의 연구기관에서는 플라즈마/촉매 공정기술에 대해서는 어느정도 개발되어 있으나, 아직까지는 하드웨어의 내구성, 크기, 그리고 경제성에 대해 고심하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이와 같은 하드웨어의 문제는 시스템의 용량이 자동차보다 큰 선박의 경우 대부분 극복될 수 있는 문제로 파악되고 있다.

이상에서 설명한 암모니아 SCR 기술을 비롯한 후처리 기술은 저 NOx 연소 대책에 비해 상대적으로 설치비 및 운전비용이 고가이나, 90% 이상의 탈질 성능이 이미 입증되어 있어서 선박엔진에 대한 향후 강화될 NOx 배출 규제를 궁극적으로 만족시키는 기술로 알려져 있다.

또한, 선박용 디젤엔진의 배가스 처리기술은 기술개발에 따른 타 분야로의 파급효과도 매우 클 것으로 예상되고 있다. 우리나라는 현재 국제사회로부터 CO₂ 배출량의 감축을 강력히 요구받고 있으며, 이에 따라 우리나라 정부도 향후 10년동안 산업활동에 지장을 주지 않으면서, 현재의 배출량 대비 10% 이상의 CO₂ 배출량 감축을 목표로 많은 기술대책을 추진하고 있다. CO₂ 감축의 효과적인 대

표 2 각종 질소산화물 제거방법을 도입한 외국 엔진제작사의 현황

NOx 저감방법		MBD	WNSD	MHI
엔진 자체	연료분사밸브 노즐변경	●	●	●
	연료 분사 시기 조정	×	●	●
	물-연료 혼합	■	■	○
	소기 공기 온도와 습도	○	×	×
	소기공기 압력 또는 공기량 변경(과급기변경)	●	●	●
	밸기밸브 개폐 조정	×	●	●
	EGR(Exhaust Gas Recirculation)	○	○	○
	직접 물 분사	×	■	○
	충상 물-연료 분사	×	×	■
	직접 암모니아 분사 (연소실 내)	○	×	×
	IMO-OPTIMIZED VIT	×	●	×
	압축비 증가	○	●	●
	후처리	SCR	■	■

- : IMO NOx 규제 대비 적용방안
 - : 현재 이미 개발 또는 연구/개발 중이나 IMO NOx 규제에 대한 대책으로는 사용하지 않음
 - × : 고려하지 않음
 - : 대폭적인 NOx 저감을 필요로 하는 지역 규제를 받는 엔진에 적용
- 주) 실제 엔진에 대한 대책은 Case by Case로 결정

책 가운데 하나는 기존 가솔린엔진 대비 동일 출력 조건에서 CO₂ 배출량이 적고, 연비가 좋은 디젤 혹은 린번(Lean burn) 엔진의 이용 확대를 들 수 있으며, 실제로 자동차 업계에서는 90년대 중반부터 기존의 가솔린 엔진을 디젤 및 린번 엔진으로 대체하기 위한 기술개발에 총력을 기울이고 있다. 이와 같은 CO₂ 배출저감을 위한 린번 엔진 개발에서 가장 어려운 문제점 중의 하나는 기존의 3원 촉매기술이 가솔린 엔진과 같이 산소농도가 1% 미만인 조건에서만 사용 가능하다는 것이다. 따라서 산소농도가 5~10% 이상 존재하는 디젤엔진에서의 NOx 저감기술개발은 CO₂ 저감을 위한 차량용 엔진 기술개발에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대되고 있다.

6. 향후 질소산화물 제거기술 전망

국제해사기구에서는 매년 5년마다 선박용 디젤

엔진에서 배출되는 NOx, SO₂, VOCs, Soot 등에 대한 규제를 강화하고 있으며, 북미 및 북유럽 연안국가에서는 자국내 영해를 항해하는 선박에 대해 IMO의 기준보다 더욱 강화된 배출규제를 시행하고 있다. 이와 같은 배출규제에 대응하기 위해 현재 가장 연구개발이 활발한 분야는 탈질공정들을 수 있으며, 이에 따라 각국의 선박엔진 제작사는 NOx 배출 저감을 위한 엔진 연소의 조정 및 연소후 처리설비인 암모니아 SCR 또는 HC SCR 장치를 선박용으로 개발하고 있다. 실제로 80년대 중반 우리 나라에서 건조된 선박에는 암모니아 SCR 설비를 외국으로부터 도입하여 장착한 사례가 있으며, 향후 강화될 IMO 규제동향에 따라 전세계를 운항하는 대부분의 선박에 암모니아 SCR과 같은 후처리용 탈질설비가 장착될 전망이다.

지금까지 전세계적으로 해상 및 육상의 수송용 디젤엔진에 적용하고자 개발되고 있는 후처리용 탈질공정은 암모니아 SCR, HC SCR 또는 NOx adsorption & HC SCR, plasma/촉매 공정 등으로 구분될 수 있다. 당초 육상의 고정배출원에 적용하고자 개발되었던 암모니아 SCR은 근래 강화된 환경규제로 인해 육상 및 해상 수송용 기계에 장착이 심각히 고려되기는 하지만, 유독물질인 암모니아의 저장 및 공급설비 가격이 수송기계의 경우 고정배출원보다 대폭 상승하는 단점이 있어 전면적인 장착이 지연되고 있다. 이에 따라 환원제로서 HC를 사용하는 SCR 공정기술이 지난 10년간 주목을 받아왔으나, 배연가스에 포함된 수분 및 황에 강한 촉매개발에 어려움이 있어 아직까지 HC SCR은 실 적용기술로서 자리잡지 못하고 있다.

플라즈마/촉매 공정은 디젤 자동차에 적용하는 HC SCR 기술의 내구성능을 보완하려는 목적으로 개발되고 있는 기술이며, 엔진을 구동하는 연료에서 공급받는 HC를 환원제로 사용하기 때문에 수송용 기계에 적합하고, 수분 및 황에 강한 촉매를 사용할 수 있어 촉매의 선택이 넓어지며, 부하변동이 심한 엔진의 동적 특성에 대응하는 운전이 가능하다는 것이다.^{[6],[7],[8]} 일반적으로 플라즈마/촉매 탈질공정은 2단계 공정을 거치는데, 화학적으로 반응이 어려운 NO를 우선 저온 플라즈마 반응을 통해 NO₂로 산화시킨 후 NO₂를 흡착/촉매 공정을

통해 N_2 로 환원시켜 NO_x 를 제거하고 있다. 여기서 HC 의 역할은 NO 를 NO_2 로 산화시키는데 필요한 HO_2 radical을 공급하고 NO_2 를 N_2 로 환원시키는 환원제로서 작용하고 있다.

지금까지 국내에서는 주로 육상의 고정된 배출원에 적용시킬 목적으로 암모니아 SCR 및 플라즈마 탈질공정을 개발하여 왔다. 이러한 기술들이 선박용 엔진에 적용될 경우, 운전부하 변동에 따른 촉매의 성능 운전의 동적 특성에 대응하는 내구성이나 엔진과 후처리 설비가 시스템으로서 연계된 운전기술 등에 대한 기초적인 자료조차 마련되고 있지 않다. 따라서 선박엔진/동력계가 설치된 성능평가 설비를 구축하고, 엔진의 부하 변동에 대응하는 운전기술을 개발(환원제 Slip 방지, 저온 영역에서의 성능유지, 동적 특성에 따른 운전 Logic 개발 등)하여 실제 선박용 엔진에 암모니아 SCR 또는 플라즈마/촉매 장치를 장착할 수 있도록 개발하여야 할 것이다.

7. 결 론

현재 우리나라에서 대형 선박엔진을 생산하는 업체는 H사를 비롯하여 3개의 대형중공업을 들 수 있으며, 이들 업체에서 연간 800대의 대형 선박엔진을 생산하고 있는데 이들 물량은 전세계 선박엔진 생산량의 50%이상을 점하고 있을 뿐만 아니라 향후 점유율이 더욱 늘어날 것으로 예상되고 있다. 이에 따라 우리나라에서 신규로 제작되고 있는 선박엔진의 시장규모는 연간 수 천억원 이상으로 추정되고 있으며, 선박엔진의 경우 신규생산 뿐만 아니라 개조 및 수리도 커다란 시장을 형성하고 있어서 이들 물량을 합칠 경우 선박엔진의 시장규모는 더욱 늘어나게 된다.

지금까지 국내에서 개발되어온 대부분의 탈질

촉매공정 기술은 단위기술로서는 성과를 얻고 있으나, 실제로 부하변동이 심하고 Full scale과 가까운 운전조건에서 개발된 기술을 평가하고 실증한 사례는 거의 없었다.

따라서 배출원의 동적특성 및 이에 따른 배기가스의 조건을 명확히 하고, 이를 토대로 지금까지 단위기술로서 개발되어온 암모니아 SCR 기술, 플라즈마기술, 플라즈마 촉매기술을 운전조건이 열악한 상태에서도 적용할 수 있는 상용화 기술로서 개발을 추진하여 탈질공정의 성능평가를 통한 기술의 신뢰도를 확보하고, 이를 토대로 상용화 할 수 있는 공정기술을 개발하는 것이 당면과제라고 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] MAN B&W technical report, "Emission Control for Two Stroke Low-Speed Diesel Engines"
- [2] V.I. Parvulescu, P. Grang, B. Delmon, "Catalytic Removal of NO", Catalysis Today, 46, pp. 233 ~ 316, 1998.
- [3] 井上敏男 外, "脱硝装置の働特性の解析", 石川島播磨技術 第35卷 第5號, pp. 351 ~ 357.
- [4] 近藤一博 外, "NH₃注入量制御法の検討", 日本造船技報 第58卷 第1號, pp. 37 ~ 42.
- [5] Sulzer technical report, "Emissions Technology".
- [6] B.M. Pentranter, et al., "Plasma-Assisted Catalytic Reduction of NO_x", SAE paper, NO. 982508, 1998.
- [7] T. Hammer, et al., "Plasma Enhanced Selective Catalytic Reduction of NO_x for Diesel Cars", SAE paper, No. 982428, 1998.
- [8] F. Luck, J. Roiron, "Selective Catalytic Reduction of NO_x Emitted by Nitric Acid Plants", Catalysis Today, 4, pp. 205 ~ 218, 1989.