

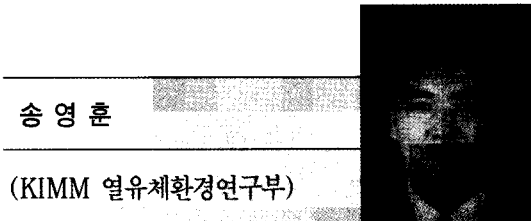
박용 디젤엔진의 De-NOx 시스템 개발



정경열

(KIMM 환경설비연구부)

- '78 - '81 한국해양대학교 기관학(학사)
- '81 - '83 한국해양대학교 제어공학(석사)
- '83 - '86 승선근무(기관사)
- '94 - '00 한국해양대학교 제어공학(박사)
- '87 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



송영훈

(KIMM 열유체환경연구부)

- '78 - '83 한양대학교 공과대학 기계공학과(학사)
- '84 - '86 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '89 - '94 미국 Pennsylvania State Univ. 기계공학(박사)
- '86 - '89 한국기계연구소 연구원
- '94 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



오상훈

(KIMM 환경설비연구부)

- '88 - '98 대전산업대 기계설계공학과(학사)
- '98 - '00 충남대학교 기계공학과(석사)
- '99 - 현재 한국기계연구원 연구생

1. 서론

현재 전 세계적으로 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx)에 의한 산성비 및 산림파괴, 프레온 가스에 의한 오존층 파괴, 이산화탄소, 메탄 및 아산화 질소 등에 의한 지구온난화 현상이 지속적으로 증가하여 대기오염은 날로 심각해지고 있으며, 이러한 대기오염의 문제들은 지구환경 보전을 위한 중요한 당면과제로서 제기되고 있다.

황산화물과 질소산화물은 전체의 90% 이상이 화석연료를 사용하는 화력발전소 및 산업시설 등의 고정발생원과 자동차, 선박 등의 이동발생원에서 생성되고 있다. 황산화물(SOx)은 연료중의 유황분제거, 배연탈황시설 설치, 대체청정연료의 사용 등에 의해 매년 감소하는 경향이지만, 질소산화물은 그 제거 방법이 쉽지 않으며, 특히 도시지역에서는 차량의 증가 및 정체 등에 의해 질소산화물의 배출량이 증가하여 대기환경은 개선되지 않고 있다. 이에 대하여 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 질소산화물의 저감을 위해 질소산화물 제거기술의 개발과 함께 질소산화물 배출규제를 한층 강화해 나아가고 있다. 그리고 IMO에서는 매년 선박용 디젤엔진에서 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 탈질공정을 들 수 있으며, 이에 따라 각 국의 선박엔진 제작사는 NOx 배출 저감을 위한 엔진 연소의 조정 및 연

소후 처리설비인 암모니아 SCR 또는 HC SCR 장치를 선박용으로 개발하고 있다. 실제로 80년대 중반 우리 나라에서 건조된 선박에는 암모니아 SCR 공정이 외국으로부터 기술을 도입하여 장착한 사례가 있으며, 향후 강화될 IMO 규제동향에 따라 전세계를 운항하는 대부분의 선박에 암모니아 SCR과 같은 후처리용 탈질설비가 장착될 전망이다.

2. 선택적 촉매 환원법(SCR : Selective Catalytic Reduction)

SCR 기술은 150~450℃의 촉매상에서 과잉 산소 존재하에 NOx 와 NH₃의 반응을 진행시키는 것이며, SNCR은 고온에서 기상반응을 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. 암모니아를 환원제로 사용하는 SNCR 공정은 1974년 처음으로 실제 공정에 적용되었다. SNCR 공정은 가장 경제적인 면을 보이지만 반응온도 범위가 850~950℃로 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.^[1-4]

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.

질소산화물 제거를 위한 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, 가스온도에 의해 특성이 변화하므로, 필요한 암모니아 유량을 구할 대상기기의 NOx발생특성 및 배기가스 상태 등에 의해 주입량을 보정하지 않으면 안된다. 따라서 탈질장치의 제어계는 기동시에 있어서 배기가스 유량, NOx농도, 온도 등의 급격한 변화에 대응하기 위한 보정회로가 필요하다. 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, 가스유량 등을 실측하여 이것들을 일정범위에서 이루어지도록 반응 조건을 제어하는 것이었지만, 과도상태에서는 각 시점에서의 상황을 보완하면서 반응조건을 제어할 필요가 있다. 따라서 비정상 요소를 포함한 과도상태에도 적용가능한 탈질 반응 속도식을 구축할 필요가 있다.^[5-6]

따라서 지금까지 연구에 의해 보편화된 탈질반응 모델을 기초로 하여 탈질반응과 암모니아의 흡탈착 같은 물리 화학적 현상이 서로 관련되는

NOx 저감방법		A사	B사	C사
엔진자체	연료분사밸브 노즐 변경	●	●	●
	연료 분사 시기 조정	×	●	●
	물-연료 혼합	■	■	○
	소기 공기 온도와 습도	○	×	×
	소기공기 압력 또는 공기량 변경(과급기변경)	●	●	●
	배기밸브 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 NOx규제에 대한 대책으로는 사용하지 않음
- ×
- : 대폭적인 NOx 저감을 필요로 하는 지역 규제를 받는 엔진에 적용

그림 1. 국외 엔진 제작사의 질소산화물 제거 방법

비정상상태를 고려한 탈질반응 속도 식을 구축하고, 배기가스 온도나 유량이 크게 변화하는 경우를 고려하여 탈질 반응 공정의 동특성을 계산하고, 탈질 장치의 최적화를 이루어야 할 것이다.

3. SCR 기술 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 엔진의 연소조건을 개선하는 기술인 EGR, 연소실내의 Water injection, 연료분사 노즐 개선 등을 개발하였으나, 이들 기술 모두 엔진성능을 저하시키거나, 낮은 NOx 저감율로

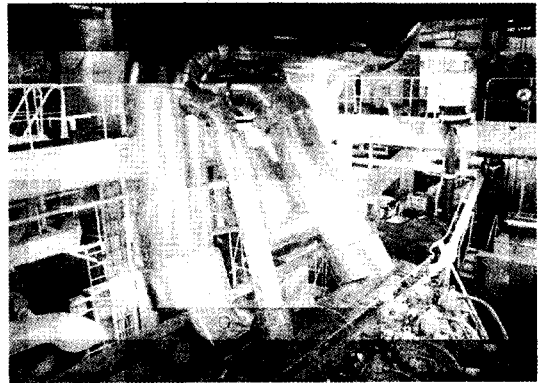


그림 2. 선박용 디젤엔진에 장착한 NH₃ SCR 설비

인해 향후 강화될 규제에 대한 충분한 대책으로는 미흡한 것으로 평가하고 있으며, NOx 배출저감을 위한 2차적인 대책으로서 선박용 엔진의 후처리 설비인 암모니아 SCR 공정을 개발하였다.^[7-8]

우리나라의 경우 80년대 중반에 이들 회사로부터 엔진 가격보다 높은 가격으로 공정을 도입하여 선박에 장착한 사례가 있다. 또한 99년도 이후부터 NOx를 배출하고 있는 대형 사업장인 화력발전소에 대한 규제가 강화됨에 따라 현재 우리나라 대부분의 중공업 회사는 암모니아 SCR의 기술을 외국으로부터 도입하여 보유 중에 있다. 특히 금년에는 제주도에 소재한 소규모 디젤발전소에 암모니아 SCR을 설치하여 실제 운전을 통한 경제성 및 성능평가를 수행할 예정이다. 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.

이들 개발기관의 어려움 가운데 하나는 개발된 촉매를 실제 시스템에 장착하여 성능을 실증할 수 있는 기회가 적다는데 있다. 잘 알려져 있듯이 발전소 또는 소각로는 민원에 대단히 민감한 곳이어서 실증실험이 어려우며, 이들 실증실험을 거치지 않은 상황에서는 개발된 기술을 실제 사업소에 제안하기가 어려운 여건에 있다.

또한 90년대초부터 여러 기관에서 플라즈마를 이용한 산업용 보일러에서의 탈황탈질 연구를 수행하여 플라즈마 기술에 대한 경험을 쌓고 있으며, 이외에도 대기오염 방지 기술을 수행하였거나 수행중에 있으며 이를 기존의 SCR 기술과 결합하여 효율을 높이려는 연구가 진행중이다.

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 공정 기술을 어느 정도 개발하고 있으나, 아직까지는 하드웨어의 내구성, 크기, 그리고 경제성에 대해 고심

하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이와 같은 하드웨어의 문제는 시스템의 용량이 자동차보다 큰 선박의 경우 대부분 극복될 수 있는 문제로 파악되고 있다.^[9-10]

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.

지금까지 국내에서는 암모니아 SCR 및 플라즈마 탈질공정이 주로 육상의 고정된 배출원에 적용시킬 목적으로 개발되어 왔으며, 이들 기술은 Pilot test까지 수행되고 있다. 그러나 당초 고정된 배출원에 적용시키기 위해 개발된 기술들이 선박용 엔진에 장착될 경우, 운전부하 변동에 따른 촉매의 성능 운전의 동적 특성에 대응하는 내구성이나 엔진과 후처리 설비가 시스템으로서 연계된 운전기술 등에 대한 기초적인 자료조차 마련되고 있지 않아 지금까지 국내에서 개발된 탈질기술을 보다 다양한 산업분야에 적용하는데 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 선박엔진/동력계가 설치된 성능평가 설비를 구축하고, 엔진의 부하 변동에 대응하는 운전기술을 개발하여 실제 선박용 엔진에 암모니아 SCR 또는 플라즈마/촉매 장치를 장착할 수 있도록 장치의 효율향상 및 신뢰성 평가를 위한 성능실험을 하였다.

4. 박용 디젤엔진용 SCR 실험장치

4.1 전체구성도

일반적으로 De-NOx 시스템의 구성은 디젤엔진과 배기가스 중의 질소산화물 저감을 위한 SCR 시스템, SCR 공정을 계측하고, 제어하기 위한 계장제어 설비로 이루어지며, 본 연구에서는 그림 3과 같이 De-NOx 시스템을 구성하였다.

표 1. YANMAR 디젤엔진 사양

모델명	6HA-HTE
형식	입형 4행정 터보 차저 디젤엔진
실린더 수	6
실린더경×행정	130×150mm
실용 최대 출력	270Hp/2100rpm
회전방향	선미에서 볼 때 반시계
연소 방식	직접 분사식
냉각 방식	원심펌프를 사용할 청수 냉각
운행 방식	기어펌프에 의한 강제 유회
시동 방식	전동 DC24V 6kW
건조중량	1,160kg

표 2. 가스유량 및 질소산화물 농도

560A(1800rpm)기준					
% (부하)	kW	CO (ppm)	NO _x (ppm)	AIR (LPM)	배기 온도
25	54.6	113	424	9750	240
50	105.2	64	602	12400	302
75	163.7	71	823	15000	350
100	218.2	103	924	18500	392
580A(1800rpm)기준					
% (부하)	kW	CO (ppm)	NO _x (ppm)	AIR (LPM)	배기 온도
25	62.4	88	478	10250	250
50	115.0	70	599	12400	302
75	172.6	78	859	15250	360
100	226.0	105	937	18750	402

위의 시스템은 시동 후 예열 과정을 거쳐 배기가스 온도가 일정온도 이상으로 올라가서 반응기로 암모니아 주입이 가능하게 되면 반응기쪽의 밸브를 개방하여 배기가스를 반응기 쪽으로 보내고, 부하량을 변경하면서 배기가스 유량에 따라 암모니아를 주입하도록 구성하였다. 이러한 과정은 엔진 컨트롤러, 질소산화물 및 암모니아 분석기, 반응기 입·출구, 중간의 온도, 압력센서 등으로 구성된 콘솔로부터 모니터링 하여 기기의 고장이나 측정 오차를 최대한 줄일 수 있도록 하였으며, 샘플링 라인은 전열기로 피복하여 측정의 정확성을 확보하였다.

4.2 엔진 및 배기가스

De-NO_x 시스템의 성능 및 내구성 평가를 위하여 부하변동이 심하고, 탈질 운전 여건이 열악한 환경을 조성할 수 있도록 표 1과 같은 사양의 선택용 디젤엔진을 선정하여 시스템에 장착하였다.

또한 반응기 최적설계 및 촉매의 부피계산을 위해서는 디젤엔진의 부하량 변화에 따른 배기가스 유량과 질소산화물 농도 및 온도분포 등이 필요하기 때

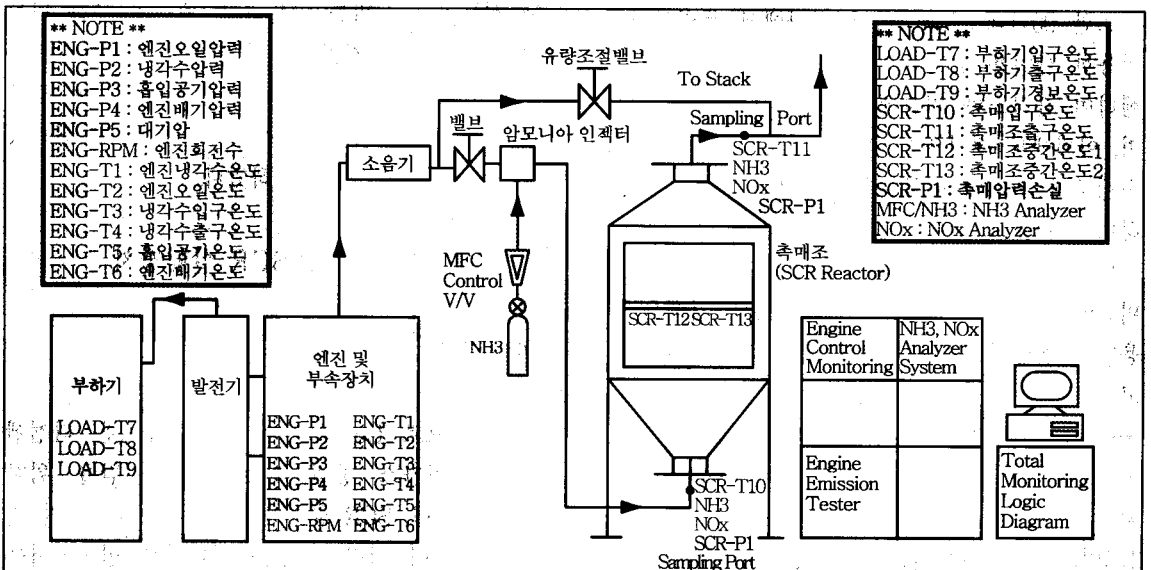


그림 3. SCR De-NO_x 시스템 구성도

문에 시스템을 구성하기 전에 엔진을 테스트하여 시스템의 최적 설계에 필요한 데이터를 측정하였으며, 측정 데이터의 일부를 표 2에 나타내었다.

이외에도 실제 선박에 De-NOx 시스템을 적용하기 위해서는 대상 엔진마다 배기가스 유량 및 성분을 측정하여 반응기 설계 및 촉매의 부피 계산을 반복적으로 수행하여야 하기 때문에 기존의 De-NOx 시스템 설계 및 제작 기술을 기반으로 엔진이머링 소프트웨어를 개발하였으며, 가스유량, 질소산화물 농도 및 반응기 설계용 데이터를 입력하면 반응기 도면, 시스템 성능, 자재 물량 계산 등의 결과를 얻을 수 있도록 하였다.

4.3 반응기 설계

선박용 De-NOx 시스템은 육상의 시스템과 비교하여 설치공간이 협소하고, 시스템 구동 환경이 열악하기 때문에 De-NOx 시스템의 엔진이머링 기술은 시스템의 설계에 있어 매우 중요한 부분을 차지한다.

또한 SCR 반응기는 시스템의 핵심으로서 촉매를 안정하게 유지하고 촉매의 성능을 효과적으로 발휘시키도록 열팽창 대책, 가스흐름의 균일화 및 먼지의 퇴적을 방지하는 설비가 요구되며, 한번 설치하면 수리나 교환이 어렵기 때문에 내구성도 요구된다.

SCR 반응기의 성능은 촉매의 비표면적에 크게 의존하며, 비표면적이 크면 클수록 SCR 성능은 향상된다. 비표면적은 모든 세공의 표면을 포함한 촉매의 가스확산 면적으로서 촉매의 특성을 나타내지만 그 값을 구하기 어렵기 때문에, 보다 실용적인 반응기의 설계를 위하여 비표면적과 촉매층을 통과하는 가스의 체류시간을 조합한 변수를 이용하고 있으며, SCR 반응기 디자인과 성능평가를 위해 공간속도(SV)가 주로 사용되고 있다.

반응기의 크기는 NOx 제거효율과 NH₃/NOx의 몰비를 이용하여 결정하며, 촉매의 겉보기 체적은 가스유량/요구공간속도에 의해 결정한다.

SCR 반응기의 설계는 가스 압력강하에 대해서 특히 유의해야 하며, 가장 경제적인 시스템을 구성하기 위해서는 최적의 선속도와 촉매층의 길이가 결정되어야 한다.

촉매를 담고있는 용기는 균질 세라믹 하니콤 촉매 셀로 구성되는 단위 촉매를 사용하며, 촉매의 반입 및 교환 등의 작업을 용이하게 하고, 일상의 보수점검의 편이를 고려하여 관련 기기와의 배치에 따라 반응기 형식이 결정된다. 자주 사용되는 반응기의 형식은 가스가 수직으로 흐르는 수직 하향식과 수평으로 흐르는 수평식이 있다.

본 연구에서 제작한 반응기는 수직하향식으로써 엔진이머링 소프트웨어를 이용하여 가스 유량, 예상 NOx 농도 등의 가스 조건과 Case 개수, 외

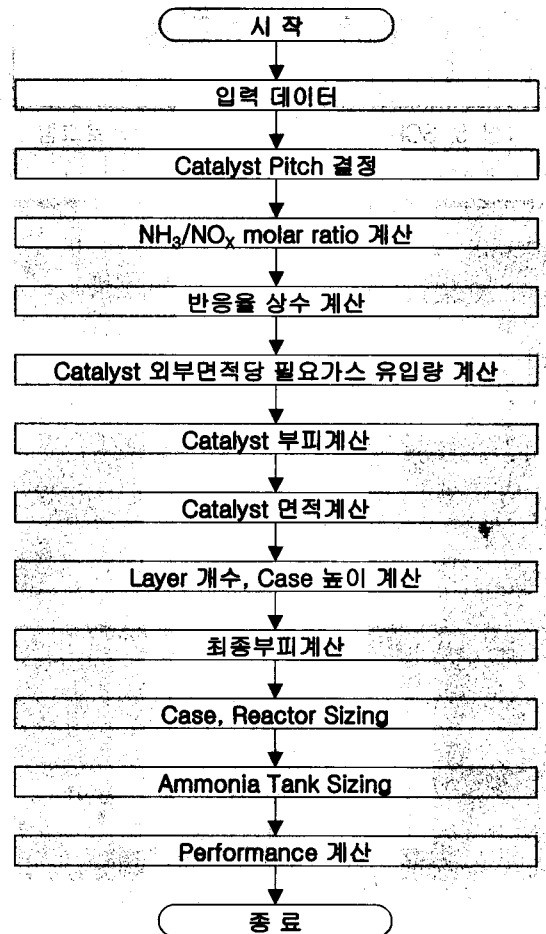


그림 4. 반응기 설계 플로우차트

Performance Data		
Heat_Mass Part	Design Part	Performance Part
표준상태 가스속도 UGS(Nm/sec, 1.5~4)		3.5
촉 반응 Case 개수(3 or 4)		4
깊이 방향 Case 개수(1 or 2)		2
촉매 Element의 Case Frame사이 두께(5~10mm)		10
반응기 외벽 Plate 두께(mm)		5
NH3 투입 주기		7
SCR 반응기 개수		1
대기온도(C)		20
표면온도(C)		95
보온재(1.Rock Wool, 2.Ceramic, 3.Silica Boos)		1

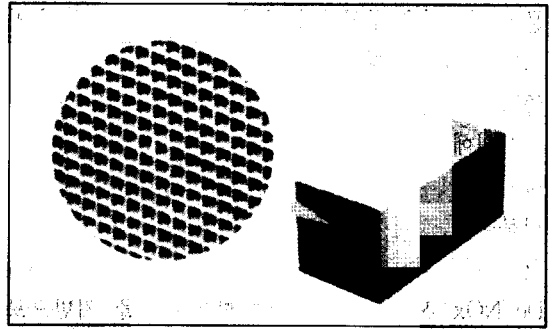


그림 7. 허니콤 촉매

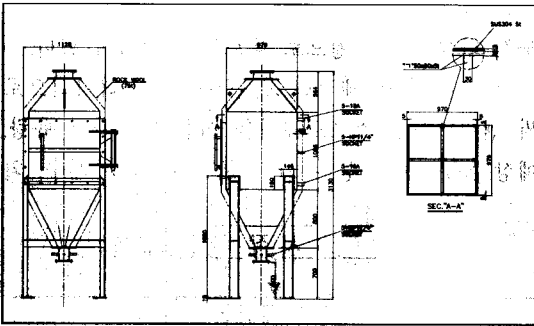


그림 5. SCR De-NOx 시스템 설계 프로그램

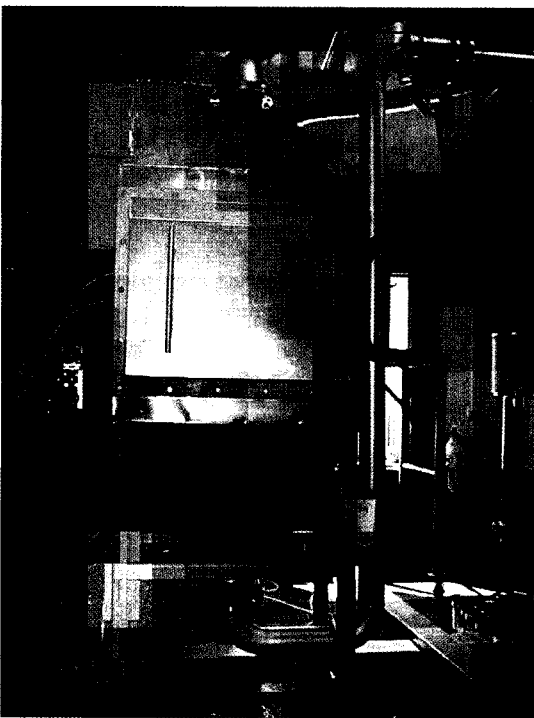


그림 6. 반응기 장착사진

벽두께, 보온조건 등의 설계용 데이터를 입력하고, 반응기의 도면을 작성하였으며, 치수결정이 끝난 반응기의 가스조건 변화에 따른 성능계산을 통하여 반응기의 재설계가 가능토록 하였다. 이에 대한 설계 플로우차트는 그림 4와 같다.

엔지니어링 결과값은 상용 소프트웨어인 엑셀에서 확인 가능하며, 반응기 각 지점에서의 가스 성분 및 유량, Case, Reactor, 암모니아 분사장치, Soot blower 설계 및 Case의 자동작동 도면, 수치결정 후 가스조건 변화에 따른 성능계산, 보온재 계산, 자재 물량 계산, Reactor 도면 등의 정보를 얻을 수 있다.

이에 대하여 그림 5와 같이 각 부분에 대한 데이터 값을 입력하여 반응기의 설제도면과 각종 계산치를 획득하였으며, 그림 6의 실제 반응기를 제작하고 시스템에 장착하였다.

4.4 촉매

촉매는 탈질 장치의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로서 보통 티타늄과 바나듐 산화물의 혼합물로 구성된다. 촉매의 형태를 결정하는 주요 요인은 가스온도, 황함량, 먼지량 등이며, 분진을 유발하는 화석연료의 연소장치에서는 주로 그림 7과 같은 허니콤 상의 촉매가 적용된다.

NOx 제거효율은 촉매의 유형, 암모니아 주입량, 초기 NOx 농도 및 촉매의 수명에 따라 다르지만, 최적 운전 조건에서 80~90% 제거효율을

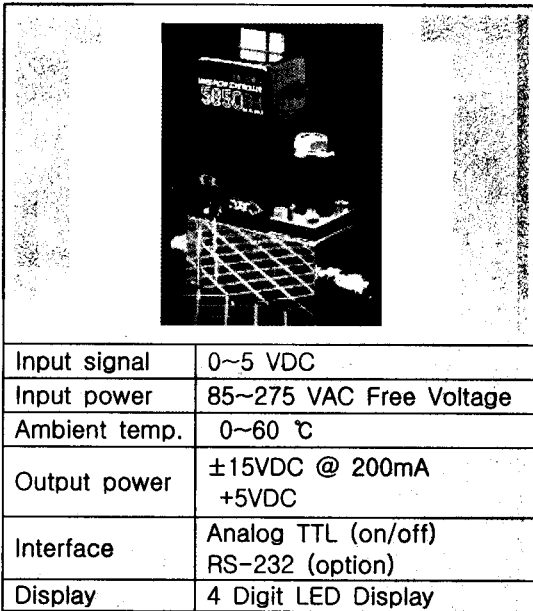


그림 8. MFC 성능사양

유지하여야 하며, 미반응 암모니아양은 국제 규정치 이하로 배출하여야 한다. 이러한 조건에 의하여 SK사에서 제작된 하니콤 촉매를 탑재하였다.

4.5 암모니아 주입 및 제어장치

암모니아는 독성이 강한 물질로서 인체에 유해하며 부식성이 강하므로 배관이나 저장에 많은 주의를 기울여야 한다. 따라서 MFC를 이용하여 콘솔로부터 원격제어가 가능하도록 암모니아주입장치를 구성하였으며, 운전 중간에 암모니아 주입부와 반응기, 계측기 및 샘플링 라인을 무해한 질소가스로 세척하여 촉매 반응 및 질소산화물 제거효율을 최적으로 유지할 수 있도록 하고, 샘플링 라인에 존재할 수 있는 암모니아 및 질소산화물을 제거하여 계측기의 신뢰성을 확보하였다. 그림 8에 사용된 MFC의 사양을 나타내었다.

4.6 계측 및 모니터링 시스템

De-NOx 시스템의 모니터링은 엔진 제어실의

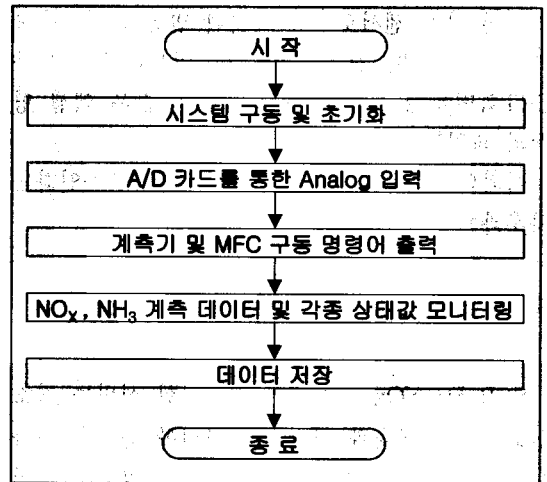


그림 9. SCR De-NOx 모니터링 플로우차트

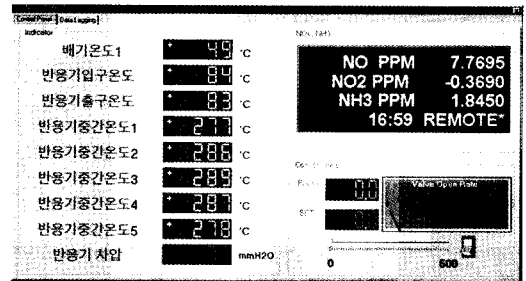


그림 10. De-NOx 시스템 모니터링 화면

콘솔에서 이루어지고, 모니터링 데이터는 엔진의 상태값, 부하량, 반응기 입·출구 및 중간온도, 촉매압력 배기가스 유량 및 질소산화물 농도 등이며, 이들 데이터를 모니터링 하여 최적의 운전조건으로 De-NOx 시스템을 제어한다.

모니터링 데이터의 입·출력은 PC의 시리얼 포트를 통해서 디지털 신호로 변환하여 처리가 가능하도록 하였으며, 모니터링 프로그램은 시스템 타이머를 이용하여 주기적으로 통신포트를 스캔하여 각 모듈로부터 시리얼 통신으로 입출력이 가능하도록 하였다. 이들 데이터 값은 화면표시와 동시에 데이터 저장이 가능하도록 하였다.^[11]

모니터링 플로우차트는 De-NOx 시스템을 구동하고, 모니터링 소프트웨어를 실행하면 그림 9와 같이 각종 데이터의 계측 및 저장을 위한 초기화가 이루어지고, 입·출력 카드를 통한 각종 아날로그 및 디지털 값이 PC상에서 연산 및 처

리되어 각종 센서로부터 입력된 반응기 입·출구의 온도, 압력, 질소산화물 및 암모니아 농도를 CRT화면에 표시하고, 이들 처리된 값은 엑셀 형식의 파일로 저장된다.

이외의 Trend기능, 부하 변동량의 온라인화는 차후과제로 구현하도록 할 예정이다.

5. 실험 및 고찰

SCR De-NOx 시스템의 성능실험 설비는 질소산화물의 제거율과 미반응 암모니아 유량을 원하는 값으로 유지하는지를 측정할 수 있도록 하였다.

성능실험시 고려사항으로는 De-NOx 시스템을 270℃ 이상에서 운전하도록 하여야 하며, 선박엔진의 부하에 따라 적정 촉매온도가 유지될 때 암모니아를 주입하도록 하여야 한다. 이러한 이유는 H₂O, SO₃의 존재하에서 노출된 암모니아는 부식성 및 접착성이 있는 황산암모늄(NH₄)HSO₄을 합성하게 되며, 이는 시스템의 부식촉진과 함께 촉매의 성능저하의 원인이 되므로 이에 대한 문제를 해결해야 한다.

또한 420℃ 이상에서의 운전은 촉매 공극의 구조적 변형 및 촉매의 소결에 의해 정상운전 온도로 복귀 후에도 촉매 활성이 회복되지 않고, 활성이 저하되는 원인이 되므로 이를 피하여야 한다.

이와 같이 촉매의 성능향상과 수명연장을 고려한 제어 알고리즘의 개발은 차후의 연구과제로 수행 될 것이다.

SCR 공정의 평가를 위한 몇 가지 기준들 중 가장 중요한 것들은 단계적인 환원과정과 미반응 암모니아를 들 수 있다.

미반응 암모니아는 배출가스 내에서 암모니아의 체적 농도로 주어지며, 대기중에서 매우 유해하기 때문에 배출가스 내의 농도는 국제 규정치를 초과하지 않도록 해야한다. 따라서 고효율의 환원반응과 낮은 암모니아 배출이 SCR 과정에서 요구된다.

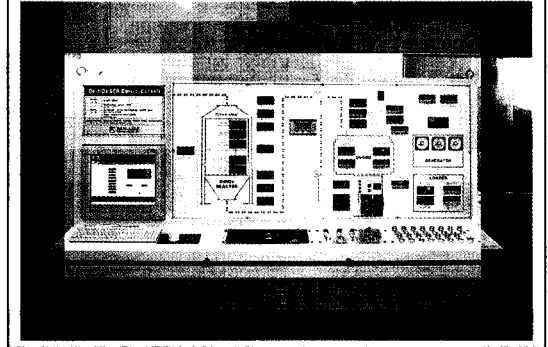
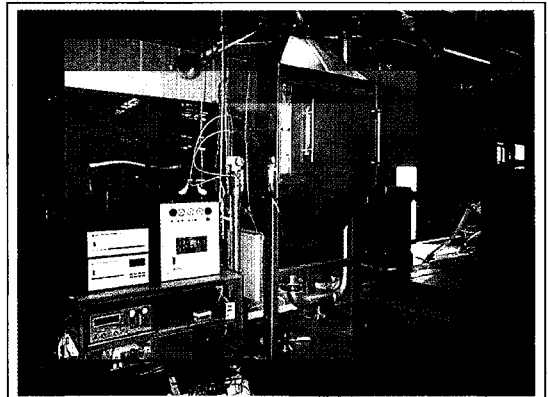


그림 11. De-NOx 시스템 성능실험 장치

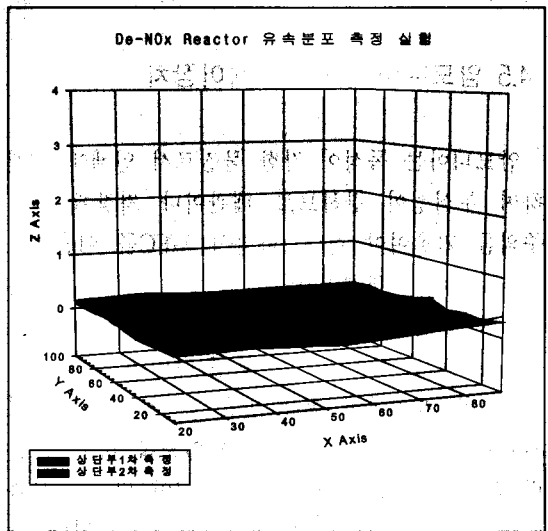


그림 12. 반응기내의 유속분포

본 연구의 De-NOx 시스템에 대한 성능실험은 그림 11과 같이 실험장치를 구성하고, 반응기 내의 유속분포 측정과, Load 25, 50, 75, 100% Scan Test, SCR 반응기의 NOx 제거율, 미반응 암모니아

아량의 제촉으로 이루어졌다.

그림 12는 반응기 내의 유속분포를 측정 한 그래프로서 촉매층을 통과한 후의 유속은 전 구간에서 균일하게 나타나고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 배기가스가 촉매층에 균일하게 유입되어 촉매의 수명유지와 최적의 성능을 나타낼 수 있도록 촉매의 구조와 반응기가 본 시스템에 적합하게 설계 제작된 것을 알 수 있다.

또한 그림 13은 75% load 운전에서 De-NOx 시스템의 질소산화물 제거율과 미반응 암모니아량을 NH₃/NOx 비율에 따라 측정 한 결과로서 De-NOx 시스템의 성능은 NH₃/NOx 몰비가 0.8~1.1일 때 90%이상의 질소산화물 제거율을 나타내고 있으나, 미반응 암모니아의 양도 NH₃/NOx 몰비가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 질소산화물 제거율과 미반응 암모니아 양에 대한 기준을 만족하는 최적 NH₃/NOx 몰비가 존재함을 알 수 있었다. 또한 이러한 최적 조건으로 운전을 하기 위한 암모니아 주입량에 대한 제어기술이 필요하다.

그림 14는 NH₃/NO 몰비가 0.8일때의 부하량 변화에 대한 NOx 제거율과 NH₃ Slip량을 비교한 결과이다. Load가 증가할수록 배기가스의 온도가 높아져서 제거율이 향상되고 있으며, 25% load 근방 즉, 선박의 입·출항시에는 효율이 낮음을 알 수 있다. 따라서 배기가스온도가 충분히 예열되기 전에는 일정한 효율을 얻기 위해서 보조 역할을 하는 기술이 필요하며, 이를 위하여 본 과제에서는 플라즈마를 통해 저온에서도 NOx의 제거율을 높이는 연구도 병행하고 있다.

그림 15는 load 75%에서의 시간에 따른 성능평가를 수행한 결과이다. 암모니아를 주입하고 안정적인 촉매반응을 통하여 설계 성능을 나타내는데까지는 약 10여분의 시간 지연이 있었으며 그 이후에는 제거율 95%, 미반응 암모니아 약 5ppm의 성능을 유지하고 있음을 알 수 있다.

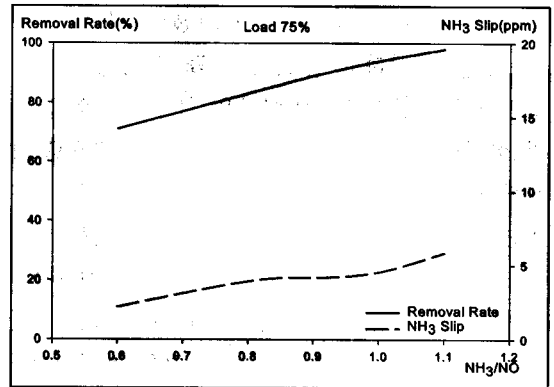


그림 13. NH₃/NO 몰비에 대한 질소산화물 제거율과 미반응 암모니아량

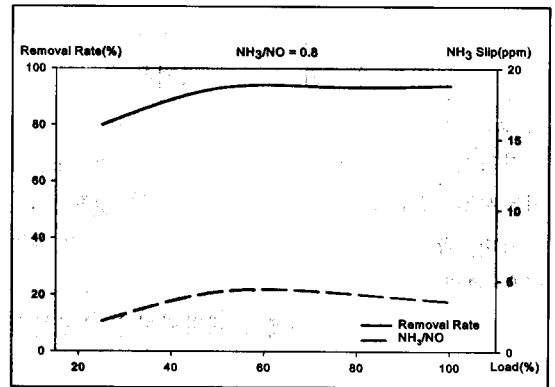


그림 14. 부하량 변화에 대한 질소산화물 제거율과 미반응 암모니아량(NH₃/NO=0.8)

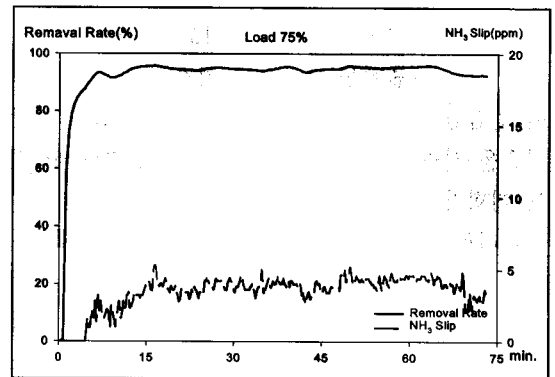


그림 15. 시간변화에 대한 질소산화물 제거율과 미반응 암모니아량

6. 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 점유하고 있을 뿐만 아니라 향후 점유율이 더욱 늘어날 것으로 예상되고 있다. 또한 우리나라에서 신규로 제작되고 있는 선박엔진의 시장규모는 연간 수천억원 이상으로 추정되고 있으며, 선박엔진의 경우 신규생산 뿐만 아니라 개조 및 수리도 커다란 시장을 형성하고 있어서 이들 물량을 합칠 경우 선박엔진의 시장규모는 더욱 늘어나게 된다. 한편, 80년도 중반에 우리나라의 H중공업이 선박엔진용 후처리 설비를 도입했을 때 엔진가격의 약 1.5배를 지불했으며, 현재도 후처리 설비의 가격은 엔진 가격의 0.7~1배를 유지하고 있다.

따라서 향후 선박엔진의 후처리 설비의 시장도 엔진시장 규모 못지 않게 크게 형성될 것으로 예측되며, 후처리 설비 기술개발의 경제적 효과는 매우 크다고 판단된다.

그러나 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. 그리고 탈질공정이 필요한 대형 배출처는 대부분이 기간산업 또는 민원에 민감한 지방자치사업에 속해 있어 개발된 단위 기술을 시스템과 연계하여 평가하고 실증할 수 있는 기회가 많지 않았다.

이러한 상황에서 선박용 De-NOx 시스템을 개발하고, 탈질운전 여건이 열악한 환경을 조성하여 실제 운전 조건과 유사하게 부하변동에 따른 성능 및 내구성 실험을 수행한 것은 단위기술로서 개발되어온 암모니아 SCR 기술을 실제 현장에 적용할 수 있는 기틀을 마련하였다고 판단된다.

향후에는 배출원의 동적특성 및 이에 따른 배기가스의 조건과 NH₃ Slip 제어기술 연구와 시스템의 성능향상과 수명연장을 위한 제어 알고리즘 개발을 수행할 예정이며, 이를 토대로 암모니아 SCR 기술, 플라즈마기술, 플라즈마 촉매기술을

탈질시스템과 연계하여 보다 효율적인 De-NOx 시스템을 개발하여 나아갈 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Nitrogen Oxides (NOx) Reduction Program, <http://www.epa.gov/airmarkets/arp/nox/index.html>
- [2] V.I. Parvulescu, P. Grang, B. Delmon, "Catalytic Removal of NO", *Catalysis Today*, 46, pp. 233-316, 1998.
- [3] F. Luck, J. Roiron, "Selective Catalytic Reduction of NOx Emitted by Nitric Acid Plants", *Catalysis Today*, 4, pp. 205-218, 1989.
- [4] Guido Busca, Luca Lietti, "Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NOx by ammonia over oxide catalysts", *Applied Catalysis B : Environmental* 18, pp. 1-36, 1998
- [5] 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号, pp. 37-42.
- [6] 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号, pp. 351-357.
- [7] Sulzer technical report, "Emissions Technology".
- [8] MAN B&W technical report, "Emission Control for Two Stoke Low-Speed Diesel Engines"
- [9] B.M. Pentrante, et al., "Plasma - Assisted Catalytic Reduction of NOx", SAE paper, NO. 982508, 1998.
- [10] T. Hammer, et al., "Plasma Enhanced Selective Catalytic Reduction of NOx for Diesel Cars, SAE paper, No. 982428, 1998.
- [11] 주삼식 저, Delphi 4, 삼각형, 1998