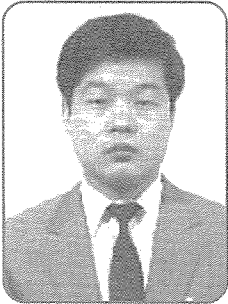


소형 열병합 발전소 탈질설비 적용 검토 (Ⅱ-1)



한국전력기술(주)
전력기술개발연구소
환경·에너지연구그룹
그룹장/공학박사 홍성호
Tel : (031) 289-4305

1. 서론

소형 열병합 발전은 주로 천연가스(LNG)를 연료로 사용하며, 발전용량이 10 MW 이하인 엔진 또는 터빈을 이용하여 열과 전기를 동시에 생산·이용하는 고효율 종합에너지시스템으로 하절기 피크부하 감소로 신규발전소 건설비용 저감 및 하절기 전력수요(夏高冬低)를 가스수요(冬高夏低)로 전환하여 계절별 수요관리 개선, 분산형 전원으로 안정적인 전력 공급, 기후변화협약 등의 국제적 환경규제(CO₂ 30~40% 배출 감소)에 효과적으로 대응할 수 있는 수단이다. 열병합 발전은 공업 단지와 산업체 및 아파트 단지 등을 중심으로 근래에 많이 건설되고 있는데, 분당이나 평촌 등의 신도시, 서울 신정·목동·노원 열병합 발전소에서 전기와 열을 생산한다. 특히, 최근에는 에너지 소비가 많은 섬유·제철·시멘트·석유화학업체들이 에너지 이용을 극대화할 수 있는 열병합 발전을 선호하면서 그 비중이 높아지고 있다. 국내의 경우 소형 가스 열병합발전 설비의 도입은 정부의 에너지 이용합리화 정책에 힘입어 80년대 들어 도입되기 시작하여 2003년말 현재 32개소 60대, 99,800 kW가 설치되어 국내 총 발전용량의 0.2%로 일본의 가스 열병합 발전 보급률에 4%에 불과하다. 최근에 설치되고 있는 가스 열병합발전설비의 용량 추세를 보면 500 kW급 미만의 작은 용량의 보급이 늘어가고 있고, 2000년

이후 아파트를 중심으로 보급이 확대되고 있는 추세이다.

그러나 소형 열병합 발전 설비는 화석연료를 사용함에 따라 유해 배기 가스의 배출은 불가피하다. 국내에서는 선진국의 환경오염 방지 대책에 대응하여, 대기 환경보전법을 제정하는 등 여러 노력에도 불구하고 생활수준 향상에 따른 석탄과 석유와 같은 에너지사용량이 급격히 증가하여 수많은 대기오염물질이 생성되어 대기오염물질이 심각하게 방출되고 있다. 현재 대기오염물질 중 가장 많은 비율을 차지하고 있는 것이 CO, NO_x, SO_x, dioxine, VOC, 분진 등이다. 이중 NO_x, SO_x, 분진 등은 현재 가장 중요한 제거 대상 물질로 생각되어지고 있고, 양적으로 가장 많이 생성된다.

소형 열병합 발전 설비의 연소에 의해서 발생하는 NO_x는 생성원에 따라, 연소시 1200°C 이상의 고온에서 연소 공기 중의 산소와 질소가 반응하여 생성되는 Thermal NO_x와 연료 중에 존재하는 질소성분이 연소과정에서 산화되어 생성되는 Fuel NO_x로 구분된다. 이외에도 Prompt NO_x가 있는데 이는 연소공기 중의 분자상 질소와 탄화수소 라디칼과의 반응으로부터 생성된 중간생성물들의 산화반응에 의해 생성되는 것으로 그 양은 매우 적다. 이러한 NO_x는 대도시나 공장지대의 공해를 유발시키는 가스성분으로서, 대기 중에 50 ppm 정도 존재하면 생체의 치명적인 영향을 미친다. 질소산화물에는 NO, NO₂, NO₃, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅ 등이 존재하는 것으로 알려져 있으나 대기 중에서 검출되는 것은 N₂O(nitrous oxide), NO(nitric oxide), NO₂(nitrogen dioxide) 등이다. 이중 NO나 NO₂는 독성이 있고 대기 중에서 광화학반응을 일으키지만 N₂O는 독성이 없고 광화학반응과 무관하기 때문에 N₂O가 대기 중에 상당한 양이 존재하지만 대기오염물질로 간주하지 않는다. 따라서 질소산화물이라고 할 때에는 NO와 NO₂를 뜻하며 통상 NO_x라고 표기한다. NO_x의 전형적인 구성은 95% NO와 5% NO₂이다. NO는 무색·무취의 기체로서 대기 중

에서 쉽게 황갈색의 NO₂로 전환된다. 또한 산성비의 원인이 되기도 하며, O₃, HCHO, PAN 등의 각종 산화제를 생성하여 2차오염을 유발시키고, 광화학 smog를 유발시킨다.

이와 같은 대기환경에 미치는 질소산화물의 심각성으로 인해 세계 각국의 환경당국은 NO_x에 대해 엄격한 배출규제를 시행하고 있으며, 국내의 경우 [표 1], [표 2]와 같이 대기환경보전법 및 경기도 조례상 배출허용기준을 강화(2005. 1. 1시행), 2000. 7월 이후 설립된 발전소를 신규 발전소로 지정하여 질소산화물 배출에 대한 규제를 점점 강화하고 있다. 또한 질소산화물에 대한 배출부과금, 초과부과금 제도 및 총량 규제, 배출권 거래제 시행(NO_x : 4,620원/kg) 등을 포함하는 수도권 대기보전특별대책법을 제정하여 2007년부터 시행할 계획으로 질소산화물의 처리는 단순히

[표 1] 세계 각국의 NO_x 규제치

	고 체	액 체	기 체	
미 국	450	260	170	
일 본	200~450	130~250	60~150	
독 일	신규:100~195 기존:100~315	신규:70~140 기존:70~220	신규:50~100 기존:50~170	
대 만	신규:250 기존:300	신규:180 기존:200	신규:100 기존:120	
한 국	1999	350(6)	250(4)	400~500(13)
	2005	신규:80(6) 기존:150~350(6)	신규:70(4) 기존:250~600(4)	신규:50(13) 기존:150(13)
경기도조례 (2005년이후)	50(6)	50(4)	50(13)	

※ 서울:기존/신규 50ppm, 인천:기존/신규 50~80ppm 기 시행중

[표 2] 국내 발전설비의 NO_x 배출 규제치

배 출 시 설	적용기간 및 배출허용기준	
	2004.12.31.까지	2005.1.1.이후
(1) 액체연료사용시설 (가) 발전용내연기관 1) 가스터빈 가) 기존시설 나) 신규시설 2) 디젤기관 가) 기존시설 나) 신규시설 (나) 기타 발전시설 1) 설비용량 100mw 이상 가) 기존시설 나) 신규시설 2) 설비용량 100mw 미만 가) 기존시설 나) 신규시설	950(13)ppm이하	250(13)ppm이하 70(13)ppm이하 600(13)ppm이하 300(13)ppm이하 250(4)ppm이하
(2) 고체연료사용시설 (가) 기존시설 1) 1989년 12월 31일 이전에 설치된 시설 2) 1990년 1월 1일 이후 설치된 시설 (나) 신규시설	350(6)ppm이하	250(4)ppm이하 70(4)ppm이하 350(6)ppm이하 150(6)ppm이하 80(6)ppm이하
(3) 기체연료사용시설 (가) 발전용 내연기관 1) 기존시설 2) 신규시설 (나) 기타 발전시설 1) 기존시설 2) 신규시설	500(13)ppm이하 400ppm이하	150(13)ppm이하 50(13)ppm이하 150(4)ppm이하 50(4)ppm이하

그 배출 규제에만 국한되지 않고 처리 사업으로도 중요한 issue가 되고 있다. 이에 따라 질소산화물을 배출하는 소형열병합발전설비 및 고정배출원에서는 한층 강화된 환경법규에 능동적으로 대처하기 위하여 환경친화적이고, 경제적인 질소산화물 제거 기술에 대한 요구가 높아지고 있다. 주거 및 도심지역에 설치될 중소형 열병합 발전기의 보급정책과 병행하여 수도권 대기환경개선에 관한 특별법이 제정 및 공포('03. 12. 31)됨에 따라 이들 소형 열병합 발전설비에 대한 탈질설비기술개발의 필요성이 대두되고 있다.

NOx의 저감 방법으로는 저 NOx burner가 적용될 수 있는데, 저 NOx burner는 전량 수입해야 하고, 유지보수 기술이 국내에는 없으며, burner nozzle 노후화로 인하여 주기적인 수리 및 이에 따른 유지보수비가 증가한다. 또한 저 NOx burner는 다량의 CO가 발생하므로 2007년 7월 총량 규제시 추가로 저 NOx burner의 보완공사가 필요하다. 이러한 점을 고려할 때에 NOx 배출에 능동적으로 대처하기 위해서는 SCR의 도입이 필요하다. 그러나 현재 설치되고 있는 엔진 및 터빈의 250 kW급 경우 다량의 3원 촉매를 장착하면 질소산화물을 최대 50 ppm(O₂ 13% 기준)이하로 배출시킬 수 있으나, 처리에 한계가 있으며, 아직 SCR 설비가 설치되어 있지 않으며, 250 kW급 이상의 경우는 lean-burn 연소로 인해 50 ppm 이하 배출은 불가능한 실정이므로 2005년 이후 적용되는 대기 환경 보전법의 배출 허용 기준이 적용될 경우 신규 설비 신설이 불가피한 상황이다.

SCR이 고가설비이기는 하나 강화되는 법규를 고려하면 맹목적인 투자는 아니다. 즉, 75 MW급 복합화력발전설비를 기준으로 경제성을 평가하면 다음과 같다. SCR 설치비는 시공비, 촉매비 등이 소요되어 1,981 백만원이 필요하다. 운영비는 암모니아 구입비와 촉매교체비인데, 암모니아 구입비는 가스터빈가동율 55% 기준으로 연간 143 백만원이 소요되며, 촉매 교체비는 촉매의 수명을 5년으로 하였을 때 연간 120 백만원이 필요하여 운영비 합계 263 백만원이 소요된다. 그러나 2007년 7월 시행예정인 배출총량제에 의하면 배출허용총량의 50% 이내에서 NOx 거래가 가능하다. 배출총량제 시행 1년차에 부여되는 NOx 배출허용총량이 631 ton이라고 했을 때에, 년평균 551 백만원의 경제적 이익이 있다. 이를 계산하였을 때 SCR 설치 6년이 손익분기점이 되며, 10년 후에는 +9,173

백만원의 배출권 거래 이익이 발생한다. 따라서 강화되는 법규에 대응하고, 경제적인 운영을 위하여 SCR의 도입은 매우 타당할 것으로 판단된다.

2. NOx 제거 방법

NOx를 저감 또는 제거하는 방법으로는 크게 3가지, 즉 저질소 함유 연료를 사용하는 방법(연소전 대책), 공연비, 체류시간, 연소온도, 재연소, 다단계 연소 등 연소조건 및 버너 개선에 의한 방법(연소기술개선), 배연탈질에 의한 방법(연소후 대책)등으로 나눌 수 있다.

연소전 탈질법은 경제성과 탈질효율에 한계를 지니고 있다. 연소조건개선법은 기존 연소로의 가동조건을 변경함으로써 NOx 생성량을 감소시키는 방법으로서 그 원리에 따라 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

- ① 저과잉공기 연소법(low excess air firing, LEA)
- ② 다단계 연소법(=비양론적 연소법) (staged combustion(=off-stoichiometric combustion, OSC))
- ③ 배연가스 재순환법(flue gas recirculation, FGR)
- ④ 공기에열 감축법(reduction of the air preheat temperature, RAPH)
- ⑤ 물 또는 수증기 주입법(water or steam injection, W/SI)
- ⑥ 저농도 NOx 장치(low NOx burner, LNB)

이 방법은 기존 연소로에 경제적이며 간단하게 적용할 수 있다는 장점이 있으나 운전효율에 악영향을 끼칠 우려가 크므로 발전설비의 경우 NOx의 제어는 주로 1차적으로는 연소조건 개선법을 적용하고 2차적으로 배연 탈질법을 사용한다.

배연 탈질법은 상기의 연소조건의 제어방법보다 더 높은 제거효율이 요구되는 경우에 유용하며, 특히 NOx 제거효율이 높아 최근 강화되고 있는 배출규제에 적극적으로 대응할 수 있는 방법으로서 용액의 사용 여부에 따라 크게 건식법(dry method)과 습식법(wet method)으로 구분된다. 습식법은 NOx와 SOx를 동시에 제거할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 소량의 NOx가 발생하는 공정에 적용되어 왔으나, NO의 물에 대한 용해성이 낮기 때문에 수용액상에서 NO를 흡수시키기 전에 NO₂로 산화시켜야 하며 이 과정에서 비용이 많이 들며, NO₂로 산화시키는 과정에서 부산물

로 NO₃와 N₂O₄가 형성되어 수질오염을 야기시킨다.

이와는 달리 건식법은 촉매를 사용하지 않고 850~1050°C의 고온에서 NO_x를 NH₃분사만으로 선택적으로 N₂와 H₂O로 환원시키는 SNCR(Selective NonCatalytic Reduction)법과 저온(300~400°C)에서 촉매를 이용하여 NO_x를 N₂와 H₂O로 환원시키는 SCR(Selective Catalytic Reduction)방법이 이용되고 있다. SNCR법은 적은 비용으로 50%이상의 NO_x를 제거할 수 있다는 장점이 있지만, 배출되는 미반응 암모니아가 암모늄염을 형성하여 반응기 후단에 있는 장치를 plugging하거나 부식 문제를 일으킬 수 있으며 조업온도 범위도 좁아 상용화에 어려움이 있다.

따라서 현재 고정원에서 발생하는 NO_x를 제거하는 기술로써 가장 진보적이며 안전하고 경제적인 기술은 SCR법이며, 90%이상의 NO_x제거율을 보임으로 인하여 추가적인 후처리 공정이 필요하지 않다는 장점을 가지고 있으므로 현재 이를 채용하는 국가가 증가되고 있으며 대부분의 연구가 이 방법에 집중되고 있다.

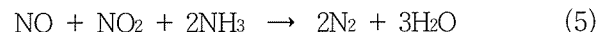
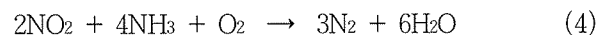
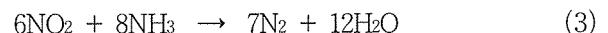
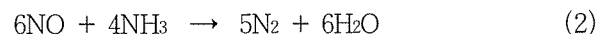
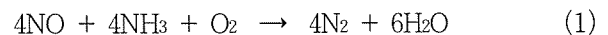
3. 선택적촉매환원법 (SCR, Selective Catalytic Reduction)

SCR은 미국의 U.S. Petroleum사에서 정유공장의 배가스를 처리하기 위해 처음 개발된 이래로 1970년대 초부터 일본을 중심으로 활발한 연구가 진행되었으며, 기술의 핵심은 촉매의 개발에 있으며 촉매에 대한 연구는 초기 귀금속 촉매(Pt, Pd, Rh)에서 V계, W계, Fe계 등의 전이금속 산화물로 전환되었고 이들 전이금속촉매에 대한 활성향상과 SO_x에 대한 내피독성 향상이 현저히 이루어져 현재 일본에서는 대부분의 NO_x 배출 공정이 이들 촉매를 사용하여 운전 중에 있다. 그 외에 미국과 독일에서도 NO_x의 오염도에 대한 인식이 커져 일본에서 기술을 도입하거나 자체기술 개발로 NO_x를 저감시키고 있다.

현재 고정원에서 발생하는 NO_x 처리방법으로는 V₂O₅/TiO₂촉매상에서 NH₃를 환원제로 하는 NH₃-SCR법이 널리 사용되고 있다. 이러한 상용화 V₂O₅/TiO₂ 촉매의 경우 온도범위 300~400°C의 고온에서 높은 NO_x 제거활성을 보이며, 활성온도범위가 고온이기 때문에 암모니아가 산화되어 NO를 증가시킬 뿐만 아니라 SO₂를 산화시켜 발생된 SO₃와 미반응 NH₃, H₂O의 반응으로 ammonium bisulfate

(NH₄HSO₄) 및 ammonium sulfate((NH₄)₂SO₄)를 생성시키게 되므로 이러한 황산암모늄염은 촉매피독 및 반응기 하부의 장치를 부식시키거나 scale을 형성하여 전체공정에 악영향을 주게 된다. 그러므로 NH₃의 산화반응 및 SO₂의 산화반응을 줄이고 높은 NO_x 저감활성을 가지는 저온 활성 촉매개발과 최적의 운전조건을 선정하는 것은 경제성 확보 및 미반응 환원제에 의한 2차공해의 방지라는 점에서 매우 중요하다.

SCR은 배가스 내에 포함된 NO_x의 95%를 차지하고 있는 NO 및 5%를 차지하는 NO₂와 환원제로 첨가되는 NH₃ 사이의 반응을 주반응으로 하고, NH₃와 산소와의 반응에 의해 암모니아가 소모되는 산화반응과 배가스에 함유된 SO₂, O₂, PCDD, PCDF, CO, H₂O 등의 반응에 의한 다양한 부반응으로 이루어져 있다. SCR의 주요 반응은 다음과 같다.



최근에는 NH₃ SCR에서 환원제로 사용되고 있는 NH₃의 독성, 폭발성, slip등이 문제시되면서 CH₄, C₃H₆, C₃H₈, C₄H₁₀ 등과 같은 탄화수소를 환원제로 하는 촉매의 개발이 진행되고 있다. 결국 CH₄, C₃H₈은 각각 LNG 및 LPG를 환원제로 이용하기 위한 시도로 보이나 현재까지는 활성이 높지 못한 실정이며, 탄화수소를 환원제로 사용할 경우 열수현상, SO₂에 의한 피독 및 부생되는 CO 등에 대한 문제가 해결되어야 한다. 또한 일련의 연구들은 과잉 O₂ 농도(5~10%) 및 반응온도 400°C 이상의 반응온도에 집중되고 있다.

그러나, LNG 및 LPG를 환원제로 사용하는 비암모니아계 촉매를 개발할 경우, 현재 무수 암모니아를 사용하므로 인해 발생하는 고압의 암모니아 저장 시설이 불필요하게 되며, 이로 인해 고압가스 안전법 적용에 따른 고가의 재질 및 운영의 편의성으로 인해 발전소뿐만 아니라 일반 대형 건물 보일러에 이르기까지 폭넓은 적용이 가능하며, 환원제 가격 측면에서도 현재 사용되는 암모니아가 500원/㎥ 이며, LNG의 경우 환원제와 NO_x가 1:1로 반응한다는 가정하에서 LNG가격이 450원/㎥ 이므로 운영비에 있어서도 10% 이상 절감이 가능하다.

[표 3] 주요 SCR 공급 업체의 촉매 특성

Company	형식	촉매재질	촉매표면적 m ² /m ³	사용온도(°C)
Babcock-Hitachi	Plate	Ti, W, V	300-500	240-415
Camet Company	Metal Honeycomb	Ti, V and Zeolite Dual Function	1000-1500	225-275
Cormetech	Ceramic Extrudate	Ti, V, W	400-900	200-450
Engelhard Company	Monolith Ceramic	Ti+V	700-1200	300-440
		Zeolite		440-590
		Precious metal		175-320
W.R Grace & Co.	Ceramic Extrudate	Ti, V, W, Mo, Si	400-900	-
Haldor Topsoe	Ceramic	Ti	400-600	-
Hitachi Zosen	Metal Mesh Plate	Ti, V, W	300-600	330-420
	Extrudate	Ti, V		330-420
Ishikawajima-Harima Heavy Industries	Ceramic Extrudate	Ti, V, W	400-900	200-400
Johnson Matthey	Metal Honeycomb	Al, Ti, V, W	1500-2000	340-425
Kawasaki Heavy Industries	Ceramic Extrudate	Ti, V, W	400-800	300-400
Mitsubishi Heavy Industries	Ceramic Extrudate	Ti, V, W	400-900	200-400
Nippon Shokubai	Ceramic Extrudate	Ti, V, Zr, Si	400-850	
Siemens	Plate	V, W, Ti	330-550	
Steuler	Ceramic Block	Zeolite	400-800	300-520
UBE	Extrudate	Ti, V		250-400

* By Advanced Industrial NOx Control by Environex.(1993)

4. SCR 촉매

SCR에 사용되는 촉매는 높은 촉매 활성, 질소로의 높은 선택성, 배가스 중에 포함되어 있는 H₂O, SO₂, CO, 분진, 다이옥신류 등의 물질에 대한 우수한 내구성을 가지고 있어야 한다. 이러한 요구사항을 충족시키기 위하여 현재 SCR 촉매로써 연구되어지는 촉매는 금속산화물 촉매에서 Zeolite촉매에 이르기 까지 다양하게 제시되고 있으며 각 촉매에 대한 반응조건의 영향에 관하여 집중적인 연구가 수행되고 있다.

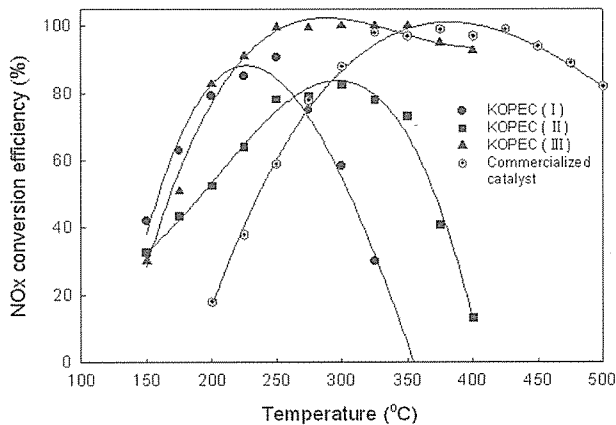
SCR 반응에 사용되는 촉매는 크게 활성성분과 담체, 보조재료로 구성되어 있다. 활성성분으로는 V, W, Mo, Cu, Ni, Fe, Cr, Mn, Sn 등의 산화물, 황산염, 희토류 산화물, 귀금속 등이 사용되며, 담체로는 TiO₂,

Al₂O₃, SiO₂, 활성탄, 제올라이트 등이 연구되고 있다. [표 3]에는 현재 상용화되고 있는 SCR 촉매의 공급 업체별 촉매특성이 나타나 있는데 대부분의 경우 TiO₂를 담체로 한 V₂O₅, WO₃, MoO₃계 촉매이다. 이러한 촉매는 실제 공정시 honeycomb 및 plate형태로써 사용되며 촉매의 기계적 강도를 유지하기 위해 유리섬유, silicoaluminate, 강판, 금망 등의 보조재료가 사용된다.

SCR 촉매는 질소산화물에 대한 선택도가 높은 장점이 있으나, V₂O₅/TiO₂ 촉매의 경우 운전온도가 300~400°C로 비교적 고온인 단점이 있다. 한국전력기술(주)의 KoNOx™ 촉매는 170~450°C의 넓은 운전온도영역에서 운전이 가능한 장점을 가지고 있어 이를 해결할 수 있다. [그림 1]에는 기존의 상용 SCR 촉매와 KoNOx™ 촉매의 SCR 성능을 비교하여 도시하였

다. 그림과 같이 상용촉매는 350°C 부근에서 활성을 보이고 있으나, 개발된 촉매(symbol : ▲)는 그보다 100°C 정도 낮은 온도인 250°C에서도 높은 활성을 보인다. KoNOx™ 촉매는 저온에서뿐만 아니라 고온에서도 높은 활성을 갖고 있어 기존의 고온 촉매의 교체시 대안으로 제시될 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 저온 활성으로 인하여, 반드시 고온 영역에만 설치되어야 했던 SCR 공정이 고온 혹은 저온의 다양한 영역에서 설치되므로 경제성을 고려할 수 있으며, duct-burner가 운전되는 공정에 있어서는, 기존 고온 촉매와 같이 350°C 이상까지 가열함에 따른 높은 운전비를 절감할 수 있다.

SCR 촉매는 배가스 내에 수분이 존재할 경우 NH3와의 흡착경쟁이 일어나 활성을 저하시키기도 하며, SO2의 SO3로의 산화가 진행되어 미반응 암모니아와 수분이 반응하여 황산암모늄염을 형성하기도 한다. 이 황산암모늄염은 촉매의 활성점을 차단하고, 허니컴 촉매의 경우 plugging 현상을 유발하여 SCR 설비의 압력손실을 증가시키고, 후단 설비의 부식을 유발하기도 한다. 따라서 내황산성 촉매의 개발이 요구된다. 소형열병합발전설비는 대개 LNG를 사용하므로 SO2에 대한 문제는 없다. 수분과 CO에 대한 문제가 있어 이를 해결할 수 있는 기술이 필요하다.



[그림 1] KoNOx 촉매와 상용촉매의 SCR 성능 비교

5. 탈질 촉매 적용 사례

소형 열병합 발전설비에 SCR을 적용하는 사례는 그다지 많지 않다. 본 절에서는 소형열병합발전설비의 SCR 적용 타당성을 평가하기 위해 기존의 중대형 보일러 및 소각설비에 대한 SCR 적용 사례 소개하고자 한다.

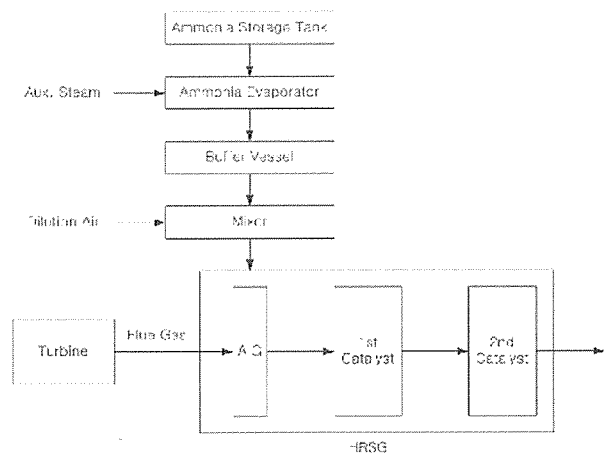
5.1. 분당복합화력발전소

분당 복합화력발전소는 LNG를 연료로 하고 있어 소형 열병합 발전설비와 배출가스 특성과 유사하다. 상기 적용처에서는 기존의 탈질촉매에 망간산화물을 첨가함으로써 저온 활성을 증대시켰는데, 이때에 촉매 제조의 경제성을 높이기 위하여 망간산화물로서 천연 망간광석(NMO, Natural Manganese Ore)을 사용하였다. NMO와 TiO2계 촉매의 혼합에 의해 저온활성이 강화되어 개발된 한국전력기술(주)의 저온탈질촉매(상표 : KoNOx™)는 실험실 규모와 파일럿 규모의 실험 검증을 거쳐 실제 플랜트에 실증 적용하였으며, 그 대상은 분당 복합화력발전소 제6호기의 HRSG이다.

1) 실증 탈질설비의 공정 및 운전방법

실증탈질설비의 평가대상시설 공정도는 [그림 2]에 나타낸 바와 같고 실제 형태는 [그림 3]과 같다. 실증 시설은 암모니아 하역 및 저장계통, 환원제 주입계통, SCR 반응단 및 보조계통으로 구성된다. NOx 저감설비는 가스터빈으로부터 배출되는 배가스와 암모니아가 HRSG에서 혼합되어 KoNOx™ 촉매층을 통과함으로써 처리한다.

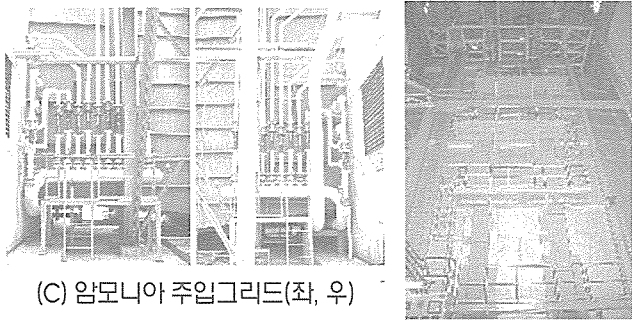
KoNOx™ 촉매는 2단으로 설치되었으며 각 단계에 22 m3와 44 m3씩 설치되었다. 분당복합화력발전소 제 6호기에서 배출되는 배가스의 유량은 960,000 Nm3/hr로서 공간속도는 13,500~14,500hr-1이다. 촉매는 차압을 측정함으로써 막힘 진행정도를 확인하였으며, 실험 전과 실험 후에 NOx의 제거효율로 촉매 이상여부 상태를 확인하였다. 또한 각 촉매층 통과 전후의 NOx 농도와 온도를 동시에 측정하였다. 실험은 총 15회에 걸쳐 실시하였다. 적용된 KoNOx™촉매는 단면이 정



[그림 2] 평가대상시설의 공정구성도



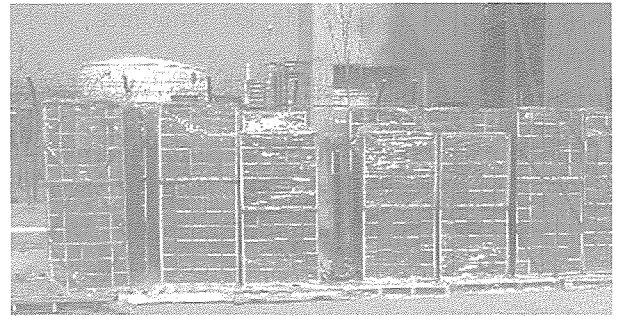
(A) 암모니아 하역, 주입 시설 (B) 희석공기 송풍기 및 혼합기



(C) 암모니아 주입그리드(좌, 우)

(D) KoNOx™ 촉매가 장착된 HRSG의 외관

[그림 3] 실증탈질설비의 구성 요소의 실제 형태



[그림 4] 압출 성형 KoNOx™ 하니컴 촉매 및 모듈

사각형으로서 150×150이고, cell density는 35 cpsi이다. 촉매의 형태는 [그림 4]와 같이 honeycomb 형태이다.

2) 실증설비 탈질 결과

○ NOx 제거율

실증설비의 배가스 유량은 연돌에서 측정하였다. LNG 사용량(평균 17.36 톤/hr)을 기준으로 연소이론

[표 4] LNG 조성별 함량

함량	메탄	에탄	프로판	부탄	질소	계
%	89.006	8.735	1.665	0.586	0.008	100

[표 5] 분당복합화력발전소 탈질실증설비의 NOx 제거 성능

횟 수	SCR 전단 (ppm)			SCR 후단 (ppm)			제거효율 (%)		
	NO	NO2	NOx	NO	NO2	NOx	NO	NO2	NOx
1	68.1	13.9	82.1	13.8	0	13.9	79.7	100	83.1
2	77.6	17.1	94.7	17.4	0	17.4	77.6	100	81.7
3	60.1	17.5	77.6	14.9	0	14.9	75.2	100	80.8
4	77.9	20.2	98.1	18.7	0	18.7	76.0	100	80.9
5	73.8	20.3	94.1	18.5	0	18.5	74.9	100	80.3
6	95.4	11.0	106.4	17.0	0	17.0	82.1	100	83.9
7	90.4	15.6	106.0	20.0	0	20.0	77.9	100	81.1
8	79.8	15.5	95.3	18.5	0	18.5	76.8	100	80.6
9	74.4	17.0	91.5	22.0	0	22.0	70.5	100	76.0
10	64.4	12.9	77.3	24.7	0	24.7	61.7	100	68.1
11	66.2	19.6	85.8	25.0	0	25.0	62.2	100	70.8
12	67.7	18.8	86.5	18.6	0	18.6	72.5	100	78.5
13	66.2	15.7	81.9	21.1	0	21.1	68.1	100	74.2
14	80.8	8.1	88.8	19.7	0	19.7	75.6	100	77.8
15	81.3	8.0	89.3	23.0	0	23.0	71.1	100	74.2
평균	74.9	15.4	90.4	19.5	0	19.5	74.0	100	78.4

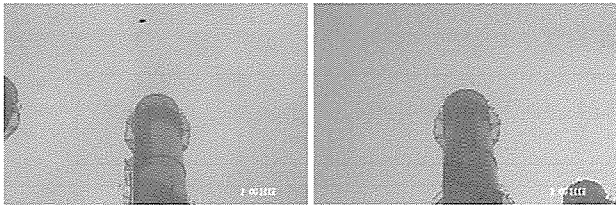
에 따른 이론 가스유량은 936,482 Nm³/hr로 계산되었으며, 측정결과 961,322~883,622 Nm³/hr로 평균 915,356 Nm³/hr이었다. 연소계산은 LNG의 원소성분 함량과 굴뚝에서의 산소농도(평균 16.0%)를 측정하여 이론 연소 배가스량을 산정하였다. [표 4]는 LNG의 조성별 함량이다. 실제 운전에 의한 NO_x 제거 능력은 SCR 반응기 전단인 배열회수보일러 전단과 후단인 연돌에서 동시에 NO_x 농도를 측정하여 계산하였으며 NO_x의 제거 성능은 [표 5]와 같다. 실험결과 유입되는 NO_x의 농도는 평균 90.4 ppm으로 이중 NO는 74.9 ppm이고 가시매연을 유발하는 NO₂가 15.4 ppm 발생된다. KoNO_xTM 촉매 장착 후 배출되는 NO_x는 평균 19.5 ppm으로 제거율이 80% 수준이다. 측정횟수에 따라 약간의 차이는 있으나 최대 83%까지도 제거가 가능하였다. NO₂의 경우 모든 실험에서 100% 제거됨을 확인하였다. 따라서 가시매연 제거에 탁월한 특성이 있다고 할 수 있다. 이는

KoNO_xTM 촉매를 장착한 설비와 그렇지 않은 설비간의 배가스 색도로부터 확인할 수 있다. [그림 5]는 저온탈질촉매가 설치된 HRSG의 연돌과 그렇지 않은 연돌에서의 배연가스의 비교이다. 그림과 같이 KoNO_xTM 적용시 가시매연이 확연히 감소함을 확인할 수 있다.

○ 암모니아 사용량

실증 탈질설비는 PLC제어를 이용 SCR 전단에 유입되는 NO_x의 농도를 측정 당량비 1~1.15로 투입하였으며 암모니아는 순도 98.7%의 액화암모니아를 발전소의 잉여 증기로 간접 가열하여 암모니아 기화기에서 기화시키고, 기화된 암모니아는 완충기에서 3 kg/cm²의 압력으로 회석공기와 5 : 95의 비로 혼합하여 SCR 전단으로 공급하였으며 이때 사용된 암모니아 사용량은 [표 6]과 같다. 실증 기간 중 암모니아 사용량은 31.9~48.9 kg/hr로 평균 43 kg/hr가 투입되었다. 고순도의 암모니아를 사용할 때에 소요되는 금액은 26,895원/hr로 계산되었다. LNG 복합화력발전소가 장기간 중단 후 재 가동 시 암모니아를 기화시키기 위한 잉여 증기의 열원이 부족하여 발전소 가동과 동시에 가동이 불가능하며 향후 기화기의 열원은 전기 전열기 등으로 대체되어야 될 것이다.

SCR은 NO_x 제거에 효과적인 기술이지만 당량비



(A) KoNO_x 미적용 (B) KoNO_x 적용

[그림 5] 연돌에서의 가시매연 배출 비교

[표 6] 분당복합화력발전소 탈질실증설비에서 암모니아 사용량

회 차	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회
사용량 (kg/hr)	31.9	45.7	38.2	39.7	43.3	41.4	48.5	45.9
회 차	9회	10회	11회	12회	13회	14회	15회	평균
사용량 (kg/hr)	48.9	34.4	43.5	47.1	43.6	47.0	45.6	43.0

[표 7] 분당복합화력발전소 탈질실증설비 전·후단 암모니아 농도

(단위:ppm)

회 차	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회
전단농도	0.387	0.335	0.213	0.251	0.225	0.182	0.314	0.182
후단농도	3.744	3.308	4.963	3.158	4.688	3.634	2.702	3.710
회 차	9회	10회	11회	12회	13회	14회	15회	평균
전단농도	0.021	0.056	0.055	0.046	0.071	0.070	0.068	0.165
후단농도	4.465	4.518	4.652	4.056	4.013	3.919	3.823	3.957

보다 과다하게 암모니아를 공급하거나 정상운전 온도 이하 등 비정상운전 조건상태에서 운전시 미반응된 암모니아가 대기 중으로 배출되어 제2의 오염원을 배출할 우려가 있다. 따라서 SCR 운전시 정상운전을 유지되도록 각별한 주의가 요구된다. 암모니아 slip을 확인하기 위해 SCR 전·후단에서 동시에 암모니아 농도를 측정하였다. 측정결과 전단의 평균농도는 0.165 ppm이고 후단의 평균농도는 3.957 ppm으로 측정되었다. 전단의 암모니아가 검출된 이유는 촉매 1단에 설치된 암모니아 공급 장치에 공급된 암모니아의 와류 현상으로 전단에서 검출된 것으로 평가되며 이는 본 기술에 설치된 암모니아 공급 장치를 와류가 발생하지 않고 촉매와 완전 혼합될 수 있도록 개선이 필요하며 암모니아 공급 장치를 개선될 경우 NOx 제거 성능은 향상될 것으로 사료된다.

암모니아는 자체가 유독성이 있으므로 안전을 요하는 물질이다. 순도 99.7%의 액화 암모니아를 기화

시켜 NOx의 환원제로 사용하므로 항상 암모니아의 누출에 대한 대책이 필요하며 탈질 시설 주변에 암모니아 센서를 부착하여 대기 농도 중 암모니아 농도가 10 ppm을 초과하면 시설 상부에 있는 살수시스템이 작동되어 대기 중 암모니아를 용해시켜 제거하는 시스템으로 구성되어 있었다. [그림 6]



[그림 6] 암모니아 누출 감지 센서

18MW Cogeneration System

※본 자료는 일본 열병합발전센터 자료에서 발췌·번역한 것임

1. 머리말

근래, 지구환경보전과 온난화와 관련하여 CO2삭감 문제와 에너지 유효이용의 관점에서 전기를 필요로 하는 장소에서 필요한 양을 발전하는 분산형 에너지 시스템의 보급이 급속히 진행되고 있다. 이와같은것을 배경으로 당사에서는 20MW급 가스터빈 L20A를 2000년에 개발하였다. L20A는 자사의 개발제품으로 당사가 오랫동안 가꾸어온 산업용 중 소형 가스터빈의 개발기술을 기초로 설계하였다.

.. 1년 후인 2001년 10월, L20A 상용 1호기를 장착한 열병합발전 발전설비를 당사 明石공장에 건설하였다.

2. 건설의 목적

川崎重工業(株) 明石工場은 5000명의 -인원으로 2륜차, 산업용 로봇, 항공선박발전용 가스터빈 등을 개발하여 생산하는 주력공장이다.

공장의 조업에는 3만5천kW의 전력과 매시 40톤의 증기가 필요하다.

열병합발전 발전설비는 공장의 Peak전력수요의 50%와 증기수요의 대부분을 공급한다.

공장의 건설목적은 다음과 같다.

- ① 공장의 전력과 증기의 에너지비용 삭감 및 종합적인 환경보전.