

기획특집 - Non-CO₂ 기술 전망

N₂O 저감기술과 관련 CDM 사업 현황

조 성 수[†] · 강 경 훈 · 서 민 혜 · 윤 용 승
고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

N₂O Reduction Technologies and Current Status of Related CDM Projects

Sungsu Cho[†], Kyounghoon Kang, Minhye Seo, and Yongseung Yun
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

Abstract: 온실가스에 의한 지구의 기후변화현상은 날로 심각해지고 있으며, 온실가스의 감축은 전세계적인 관심이 되고 있다. 교토의정서에서 규정한 6대 온실가스 중의 하나인 N₂O는 지구온난화지수(GWP : Global Warming Potential)가 CO₂에 비해 310배에 해당한다. N₂O는 유동층 연소공정과 암모니아를 산화하는 산업공정에서 발생하는데, 산업공정에서 발생하는 고농도의 N₂O는 CDM 사업으로의 가치가 크다. 국내의 질산 및 아디핀산 제조사업장은 이미 외국의 기술로 CDM 사업이 완료된 상태이다. 그러나 중국, 러시아, 인도 등의 질산제조사업장은 아직 우리가 도전에 불만한 곳이 남아 있으며, 국내의 CDM 사업이 완료된 사업장의 촉매 교체 주기가 다가오는 것으로 예상되므로 N₂O 저감기술의 개발은 필수적이라 판단된다. 또한 2013년 이후 온실가스의 의무감축에 대비하여 병원에서 배출되는 마취가스, NH₃-SCR 등의 저농도 N₂O 배출가스에 대해서도 저감기술의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

Keywords: climate change, non-CO₂, N₂O, CDM

1. 서 론

세계 각국에 온실가스 감축의무를 부과하는 교토의정서가 2005년 2월 16일에 공식 발효되었다. 우리나라는 교토의정서 체결 당시 개발도상국으로 분류되어 직접적인 감축의무에서는 제외되었지만, 향후 2013년 이후 감축의무 이행이 불가피할 전망이 예측되고 있는 실정이다. 이로써 온실가스 규제사회의 도래는 거부할 수 없는 대세이며, 정부와 기업의 선제적 대응이 필요한 시점에 이르렀다. 교토의정서에서 규정한 6대 온실 가스는 CO₂ (이산화탄소), CH₄ (메탄), N₂O (아산화질소), HFC (Hydro Fluoro Carbon: 수소불화탄소), PFC (Per Fluoro Carbon: 과불화탄소), SF₆ (육불화황)이며, 각각의 GWP (Global Warming Potential: 지구온난화지수)가 다르다. 온실가스 중에서 N₂O는 지구

온난화지수 CO₂의 310배에 해당하며, 유동층 연소공정, 질산제조공정, 아디핀산 제조공정 및 카프로락탐 제조 공정에서 주로 발생된다. Table 1에 나타난 것과 같이 N₂O는 우리나라 온실가스 배출량의 약 3.5%를 차지하고 있고, '90년대비 약 7% 정도 배출량이 증가한 것으로 조사되었다.

그동안 우리나라는 비교적 배출량이 많고, 기술개발이 많이 진행되어 온 CO₂의 감축노력에 주로 매진해 왔다. 이는 국내의 non-CO₂ 분야를 위축시킨 동시에 non-CO₂ CDM (Clean Development Mechanism: 청정개발체제) 사업을 국외기술을 통해 실행해야 했던 문제점을 낳게 되었다. Non-CO₂ 분야의 가스는 CO₂에 비해 지구온난화지수가 높아 온실효과에 미치는 영향이 크기 때문에 적은 양을 감축시켜도 큰 저감효과를 나타낼 수 있다는 특징이 있다. 따라서 현재 국내의 국가기관 뿐 아니라 많은 연구소 및 기업체에서 non-CO₂ 분야의 지구

[†] 주저자 (E-mail: sungsu@iae.re.kr)

Table 1. 국내 온실가스 배출 추이

온실가스	1990	1994	1995	1996	2000	2003	2004	'90~'04 증가율(%)
CO ₂	258.3 (83.2)	369.5 (87.5)	401.0 (88.6)	438.3 (86.8)	464.9 (87.9)	510.7 (87.7)	517.9 (87.7)	5.1
CH ₄	43.2 (13.9)	32.6 (7.7)	28.5 (6.3)	30.6 (6.1)	26.4 (5.0)	25.8 (4.4)	25.7 (4.3)	-3.7
N ₂ O	8.0 (2.6)	11.0 (2.6)	11.9 (2.6)	12.6 (2.5)	14.9 (2.8)	18.2 (3.1)	20.9 (3.5)	7.1
HFCs	1.0 (0.3)	3.8 (0.9)	5.1 (1.1)	5.7 (1.1)	8.3 (1.6)	7.7 (1.3)	7.1 (1.2)	15.2
PFCs	n.a.	n.a.	n.a.	1.0 (0.2)	2.3 (0.4)	2.5 (0.4)	3.1 (0.5)	15.4
SF ₆	n.a.	5.1 (1.2)	6.3 (1.4)	17.0 (3.4)	11.7 (2.2)	17.4 (3.0)	15.9 (2.7)	12.1
합 계	310.6 (100.0)	422.1 (100.0)	452.8 (100.0)	505.2 (100.0)	528.6 (100.0)	582.3 (100.0)	590.6 (100.0)	4.7

주) 1. n.a. : not available

2. 자료 : 에너지경제연구원, 2006. 8

온난화지수가 높은 가스를 감축시키려는 연구 개발이 점차 확대되고 있다[1].

N₂O 저감기술은 발생원에 따라 유동층연소 공정에서 발생하는 N₂O의 저감기술과 산업공정에서 발생하는 N₂O의 저감기술로 크게 나눌 수 있다. 유동층 연소공정에서의 N₂O 저감 기술에는 연소로 내에서 연소온도를 조절하여 N₂O의 발생을 억제하는 기술과 기능성 유동매체를 사용하는 기술이 있다. N₂O는 약 850℃에서 발생되므로 그 이상의 온도 영역에서 연소로를 운전함으로써 발생을 억제하고, 특수한 유동 매체를 사용함으로써 연소로 외부로의 N₂O 유출을 막을 수 있다. 산업공정에서 발생하는 N₂O 저감기술은 발생원 후단에서 N₂O를 저감하는 기술로서, 대표적으로 N₂O 고온 분해(열분해), 고온 촉매 분해, 중온 촉매분해 및 SCR (Selective Catalytic Reduction) 기술이 많이 사용되고 있으며, 현재 CDM 사업의 일환으로 N₂O의 발생원인 질산제조공장, 아디핀산 제조공장, 카프로락탐 제조공장 등에 적용되고 있다.

2. N₂O 저감기술

2.1. 유동층 연소공정에서의 N₂O 저감기술

유동층 연소 공정에서 발생하는 N₂O의 저감기술은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 연소로의 제어에 의한 N₂O 저감기술과 N₂O 분해기능 등의 다양한 기능을 가지는 유동매체를 사용하는 것이다. 연소로 제어에 의한 기술에는 기존의 기포형 유동상로를 순환유동상로를 이용하여 균일한 온도분포를 갖도록 연소장을 형성하여 N₂O의 배출을 저감시킬 수 있는 기술과 다단연소를 이용하여 온도별 저온부에서 NO_x를 제거한 후 고온부 영역에서 N₂O를 분해하는 기술 및 순환 유동층로 내부에서는 입자와 가스의 접촉시간이 길기 때문에 Ca나 Fe 등의 첨가제 주입을 통한 N₂O 분해기술이 있다.

폐기물 소각로나 석탄연소 보일러에 이용되는 유동층연소 공정의 연소온도는 850℃ 정도이기 때문에 로 내에서 N₂O가 생성되고, 생성된 N₂O는 그대로 배출된다. 다기능의 유동매체에 의한 N₂O 저감 기술은 유동층 내에 유동매체로서 공급되는 규사나 석회석의 일부

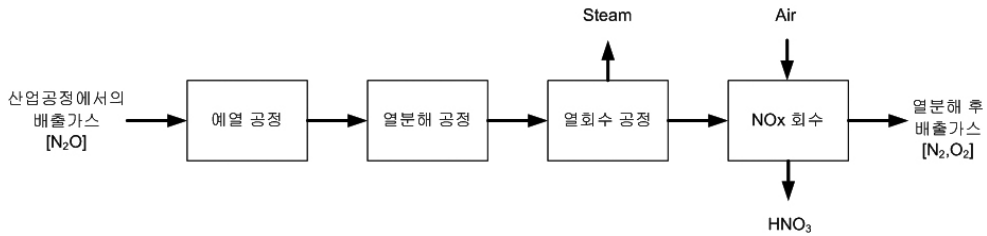


Figure 1. N₂O 열분해 공정도.

를 고온촉매로 대체하고, 유동매체로서 로 내에서 유동하면서 N₂O를 접촉 분해하는 방식이다. N₂O를 유동층 연소장에서 분해하는 촉매로는 활성 알루미나를 중심으로 한 고온 접촉분해 촉매가 이미 개발되어 있고, 석탄 유동층 연소 공정용은 개발단계에 있다. 현재 N₂O를 발생하고 있는 기존의 유동층연소 프로세스에 대폭적인 개선 등을 필요로 하지 않고 적용할 수 있다는 점, 이미 실용화가 가능한 분해촉매가 개발되어 있는 점 등에서 아산화질소의 저감기술로서는 비교적 실효성이 높은 기술이라 할 수 있다[2].

2.2. 산업공정에서 발생하는 N₂O 저감기술

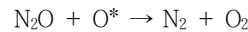
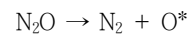
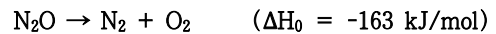
산업공정에서 발생하는 N₂O 저감 기술은 반응 온도별로 나뉘는데, 가장 손쉬운 방법이 고온에서 열분해(소각)하는 방법이다. N₂O는 매우 안정한 물질이기 때문에 대기 중에서는 120년 이상의 잔류기간을 갖지만, 1,000 °C 이상의 고온에서는 손쉽게 N₂와 O₂로 분해된다.

산업공정에서 N₂O를 고농도로 발생시키는 아디핀산 제조공정에서는 보통 고온에서 N₂O를 분해시키는 열분해공정을 적용하고 있다. Figure 1에 N₂O 열분해 공정구성을 간단하게 도시하였다. N₂O 함유 배가스를 1,000 °C 이상의 온도에서 소각하는 열분해방법으로서, 이때 발생된 NO_x는 회수하여 HNO₃를 제조하는데 이용이 가능하다.

N₂O의 열분해는 공정이 간단하고, 촉매라는 매개체 없이 분해되는 장점이 있는 반면, 고온의 온도조건이 필요하기 때문에 고에너지 및 고비용을 필요로 한다는 문제점이 있다. 효율

적인 N₂O 저감을 위해 중온영역에서 분해시킬 수 있는 촉매를 이용하는 기술은 촉매분해 기술과 환원제를 이용한 SCR 기술이 있다[3].

촉매분해는 연료의 연소 및 폐기물소각에 이용하는 연소장치 가운데 N₂O 배출농도가 높은 유동층 연소장치 및 가솔린 자동차 등의 이동발생원뿐 아니라 산업공정을 대상으로 촉매를 이용해 N₂O를 직접 N₂와 O₂로 분해하는 기술이다.



현재 몇몇 귀금속계 촉매 등으로 산소만이 공존하는 깨끗한 조건에서는 N₂O의 분해효율이 높은 직접 분해촉매가 개발된 바 있다. 그러나 연소장치로부터 배출되는 배가스에 일반적으로 포함되어 있는 H₂O 및 NO₂ 등에 의해 그 활성은 현저하게 저하하기 때문에 그러한 장애를 받지 않는 촉매의 개발이 필요하다.

지금까지 보고되고 있는 촉매 중에서 N₂O 직접분해에 높은 활성을 보이는 것은 Rh, Ru 등 몇 가지 귀금속 재료로 좁혀져 있고, 주로 기존의 함침 담지법에 의해 제조된다. 이 촉매의 내구성과 내피독성을 높이기 위한 적극적인 대책은 그다지 많이 연구되지 않았다. 또한 함침법을 이용하여 촉매를 제조할 경우에는 분산이 잘 된 균일한 입자를 얻기 어렵다는 단점이 있기 때문에 귀금속의 분산이 잘 되어 소량의 금속으로도 높은 활성과 내구성을 갖는 촉매개발이 필요할 것으로 판단된다.

SCR 기술은 환원제의 종류에 따라 NH_3 -SCR과 HC (hydrocarbon)-SCR로 나눌 수 있다. NH_3 -SCR 시스템은 NO_x 제거를 위해 이미 갖추고 있거나 혹은 갖출 수 있는 400 °C 전후의 연소 배가스를 배출하는 FCC (Fluid Catalytic Cracking), 화력발전 등에 적용할 수 있다.

NH_3 -SCR은 NO_x 제거를 위한 NH_3 -SCR 시스템을 그대로 이용할 수 있기 때문에 기술 전환에 걸리는 시간 및 비용을 최소한으로 저감할 수 있으므로 단기간에 N_2O 배출량 저감이 가능하다. 뿐만 아니라 암모니아를 환원제로 이용할 경우 NO_x 와 N_2O 의 동시저감이 가능하다. 그러나 아산화질소 제거활성 질대치의 향상, 사용 온도영역의 최적화, 내구성의 향상 등 촉매의 개량이 불가피하고 또 분위기가스에 의한 N_2O 제거 성능에의 영향, N_2O 제거 성능향상에 따른 NO_x 제거성능 저하의 우려 등 검토해야 할 과제도 많이 남아있다. SCR 기술에서 암모니아를 환원제로 사용하는 것은 검증된 기술임에 틀림없지만, 암모니아의 이송 및 저장문제와 그 위험성에 대한 잠재력을 고려하지 않을 수는 없다. 따라서 많은 연구자들은 그동안 암모니아를 대체할 수 있는 환원제를 찾기 위한 연구를 진행해왔으며, 그 중 하나가 탄화수소계 환원제이다.

탄화수소계 환원제는 암모니아에 비해 이송, 저장에 용이할 뿐 아니라 경제적으로도 우수하다는 장점이 있다. 특히 배가스 중의 메탄과 같은 미연소 탄화수소가 존재할 경우 추가적인 환원제 주입 없이도 N_2O 를 환원시켜 저감할 수 있다. 이 기술은 각종 산업공정뿐 아니라 연료의 연소 및 폐기물 소각에 이용하는 연소장치 가운데 N_2O 배출농도가 높은 유동층연소장치, 코제너레이션용 디젤엔진, 복합발전용 터빈, 디젤 자동차, 가솔린 자동차, 그 밖의 N_2O 를 함유하는 배가스를 대상으로 적용이 가능하다.

현재까지는 이온 교환법으로 제조한 제올라이트계 철 촉매(Fe-BEA 등)를 이용해 과잉 산소 공존하(10%)에서 배출되는 미량의 N_2O (~1,000 ppm)는 탄화수소(~500 ppm, CH_4

등)를 이용해서 비교적 저온(> 250 °C)에서 고효율로 제거할 수 있는 촉매 개발이 이루어지고 있다. 그리고 기존 촉매활성의 저하를 일으키는 SO_2 (~50 ppm)나 H_2O (~1%)가 공존해도 거의 활성저하를 일으키지 않는다는 장점이 있다. 또한 보통 때에는 반응성이 낮아 제거가 곤란한 CH_4 도 환원제로써 이 반응에 사용할 경우 저온에서도 간단하게 산화시킬 수 있기 때문에 지구온난화 가스인 N_2O 와 CH_4 의 동시제거도 가능하다.

저온 N_2O 분해 기술은 상온의 온도조건에서 N_2O 를 분해하는 기술이며, N_2O 함유량이 적은 농도이거나, 또는 N_2O 이외의 다른 불순물(SO_x , 미세먼지 등)이 없는 조건일 경우에 적용이 가능하며, 대표적인 기술은 전기화학 반응을 이용한 N_2O 분해기술이 있다. 마취약으로 사용한 후의 환기 배가스 중의 N_2O 는 전기화학 반응을 이용해 상온에서 N_2O 를 효율적, 선택적으로 분해한다. Figure 2는 전기화학반응을 이용하여 Ce 전극으로 N_2O 를 분해시키는 반응공정을 보여주고 있다.

마취약의 환기 배가스의 특징은 공기에 의해 희석되기 때문에 N_2O 농도가 낮은 반면, 고농도의 O_2 가 공존하며, 배출온도는 상온이다. 통상의 N_2O 분해촉매는 300 °C 이상에서 성능을 나타내기 때문에 촉매반응을 통해 상온에서 배출되는 마취약의 배가스를 처리하는 것은 불가능하다. 이를 가열하여 처리하는 것은 고에너지의 비용이 소요된다는 단점이 있기 때문에 상온에서 N_2O 를 처리하는 전기화학적 분해기술을 적용해야 한다. 전기화학적 N_2O 분해를 하기 위해서는 환기가스 중 공존하는 고농도 O_2 에 의해 방해받지 않고 저농도 N_2O 를 고효율·선택적으로 환원할 수 있는 전극재료 및 전해질의 개발, 설정전위 등 최적의 전극계 제어방법의 개발, O_2 의 산화작용에 의한 성능저하를 극복할 수 있는 전극시스템의 개발, 비교적 저온에서 작동하는 고체 전해질의 이용 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

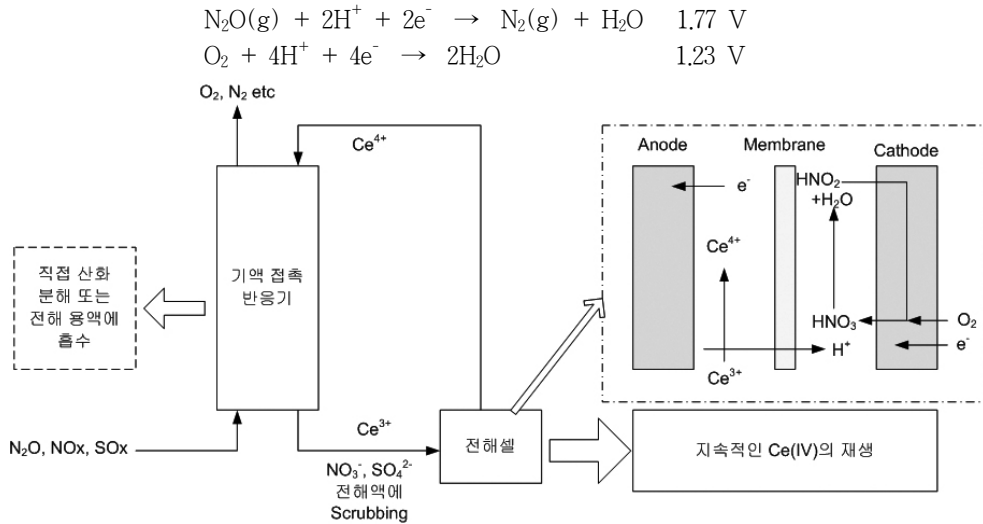


Figure 2. 전기화학적 방법을 이용한 상온에서의 N₂O 분해.

3. 국내·외 CDM 사업 현황

3.1. UNFCCC에 등록된 CDM 사업 현황

CDM 방법론의 구성은 감축량을 정량적으로 계산할 수 있는 공학적 논리와 절차를 배경으로 전개한 베이스라인 방법론(baseline methodology)과 실제 제조사업장에서 감축활동으로 그 실체를 확인할 수 있는 구체적 방법을 제시한 모니터링 방법론(monitoring methodology)으로 구성되어 있다. CDM 사업은 소규모 CDM 사업과 일반 CDM 사업이 있는데 이들의 사업은 승인된 대규모 방법론(AM, Approved Large Scale Methodologies)과 통합 방법론(ACM, Approved Consolidated Methodologies)을 사용한다[4].

Figure 3은 UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change: 유엔기후변화협약)에 등록된('09. 3 기준) CDM 사업현황을 나타낸 그래프로써, 총 신청된 건수에서 수력(1,195건), 바이오메스에너지(688건), 풍력(661건)이 전체의 60% 이상 높은 비율로 나타나지만 실제 모든 사업이 등록된 후 CERs (CER, Certified Emission Reduction: 배출권) 발행으로 바로 직결되는 것이 아니라 인증기

관의 심화된 검증단계를 거쳐 최종 등록과 동시에 CERs이 발행된다[5].

Figure 3(b)에서 보듯이 CDM사업 중에서 가장 많이 CERs이 발행된 사업은 HFCs 사업으로서 142,337 CERs로 전체의 55%를 차지하고 다음으로 N₂O CDM사업이 56,523 CERs로 22%이다. HFCs와 N₂O CDM 사업 등록건수는 각 23건과 66건으로 다른 CDM 사업에 비해서 적게 등록이 되었지만, HFCs와 N₂O CDM 사업에서 CERs이 발행된 실적은 전체의 77%로 사업성 및 경제성 관점에서 보면 매력적인 사업이라고 볼 수 있다.

Figure 4의 2009년 3월 발행된 CERs 현황과 2012년 예상 발행량 현황을 비교해 보면 매립가스(landfill gas), 에너지효율 자가발전(energy efficiency own generation), hydro, wind, biomass energy CDM 분야가 크게 발전할 가능성이 있으며, 이 분야는 신재생 분야로 기업단독으로 CERs를 확보하기 위한 민간 주도형 사업이 아니라 국가차원에서 수행하는 것이다. 특히, hydro 분야는 경제대국에서 지향하는 수소경제에 부합하고 또한 발행되는 CERs은 해외 판매용이 아니라 국가별 온실가스 할당량에 대한 저축성 CERs로 국가차원에

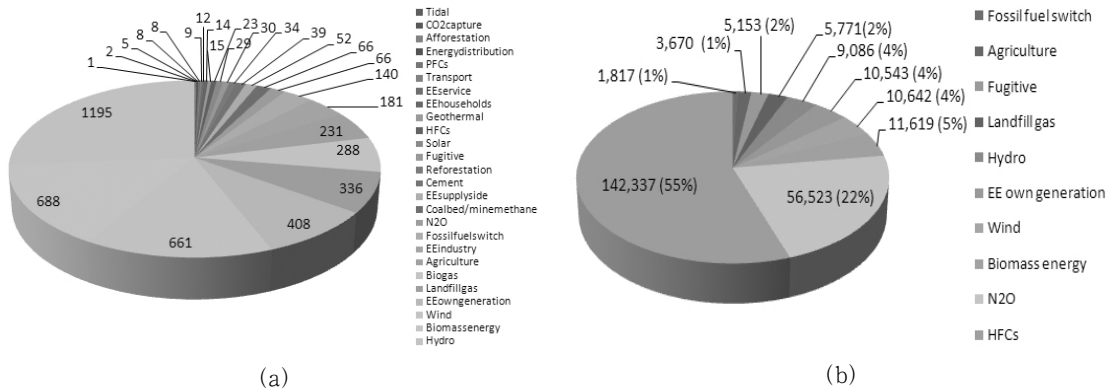


Figure 3. UNFCCC에 등록된 온실가스 CDM 현황 (a) CDM 사업별 사업 신청 건수, (b) CDM 사업별 CERs 발행량(2009년 3월).

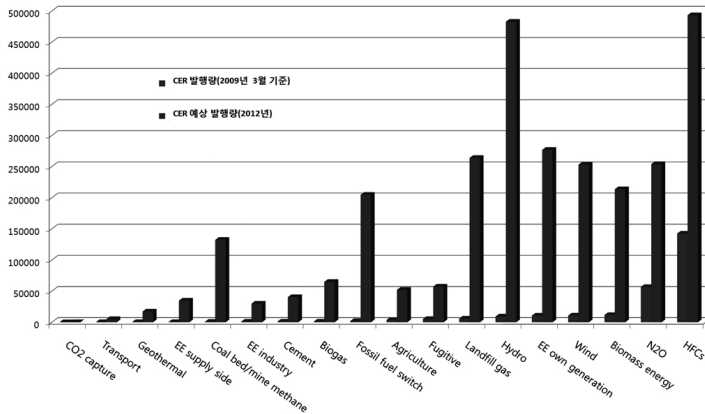


Figure 4. CDM 사업종류별 CERs 발행량과 2012년 CERs 발행량 비교(2009년 3월).

서 매우 절실한 CDM 사업으로 볼 수 있다.

전 세계적으로 분야별 CDM 등록현황에서 가장 활발하게 접수되고 있는 상위 3개의 사업은 Table 2에서 보는 바와 같이 수력(hydro), 바이오매스에너지, 풍력인데 이들 사업에서 발행되는 2012년도 예상 CERs 발생량을 보면 수력의 경우 482,633 CERs, 바이오매스에너지 213,611 CERs, 풍력 253,115 CERs이다. 그러나 2012년도 CDM 사업별 예상 CERs 상위 3개 사업 중에서 가장 높은 비중을 차지하는 사업은 HFCs, 수력, 에너지효율 자가발전 순이다. 풍력과 바이오매스 에너지 CDM 사업 순위는 각각 6, 7번째를 기록하고 있다.

UNFCCC 등록된 CDM 사업건수와 2012년 예상 CERs 발행량과의 관계를 보면 HFCs CDM 사업의 경우 등록건수가 23건인데 2012년도에 1건의 CDM 사업에서 예상 CERs은 무려 21,434로 단위 사업당 가장 높고, 2위는 N₂O CDM 사업으로서 3,845 CERs, 3위는 석탄층 메탄회수 2,005 CERs이다. HFCs과 N₂O CDM의 등록신청이 타 사업에 비해 적으면서 예상 CERs가 높게 나타나는 이유는 GWP와 배출가스 유량에 차이가 있기 때문인데, N₂O의 경우 GWP가 310이고, HFC-23의 경우 12,000으로 HFCs 종류 중에서 가장 높다. 반면에 신청건수가 가장 많은 수력, 바이오매스

Table 2. CDM 사업별 사업 신청 건수 및 단위 사업당 감축 순위

2009년 CDM 사업별 신청건수 순위		2012년 CDM 사업별 예상 감축 총량 순위		2012년 단위 CDM 사업당 감축 총량 순위	
사업종류	신청건수	사업종류	감축량	사업종류	감축량
Hydro	1,195	HFCs	492,986	HFCs	21,434
Biomass energy	688	Hydro	482,633	N ₂ O	3,845
Wind	661	EE own generation	276,790	Coal bed/mine methane	2,005
EE own generation	408	Landfill gas	263,827	Fugitive	1,906
Landfill gas	336	N ₂ O	253,765	Fossil Fuel switch	1,462
Biogas	288	Wind	253,115	Energy distribution	1,236
Agriculture	231	Biomass energy	213,611	Geothermal	1,145
EE industry	181	Fossil Fuel switch	204,642	Tidal	1,104
Fossil fuel switch	140	Coal bed/mine methane	132,298	Cement	1,036
Coal bed/mine methane	66	Biogas	64,734	Landfill gas	785
N ₂ O	66	Fugitive	57,193	EE Own Generation	678
EE supply side	52	Agriculture	51,925	EE supply side	667
Cement	39	Cement	40,393	PFCs	594

에너지, 풍력은 단위 사업당 예상 CERs이 평균 600 CERs 이하로 경쟁력은 없지만 국가차원에서 온실가스 감축에 대한 이미지 제고 및 자국의 온실가스 감축 관점에서 보면 바람직한 방향이라 판단된다.

기후변화 정책이 세계적으로 강화되고 있는 상황에서 유럽의 영국, 독일, 네덜란드, 스위스 등의 국가에서는 온실가스 감축에 많은 노력을 기울여 왔고 아시아에서는 Annex 1 그룹에 속한 일본이 non-Annex 1 그룹을 대상으로 가장 많은 CDM 실적을 보유하고 있다. Figure 5는 현재까지 발행된 CERs의 대륙별, 국가별 현황을 나타내었다. 전체의 82%가 아시아에서 발행되었고, 그 뒤를 이어 라틴아메리카(13%), 아프리카(3%)의 순으로 나타났으며, 국가별로 보면 아시아에서는 중국의 CERs 발행량은 전체의 56%, 인도 16%, 브라질 5%, 대한민국 3%의 순이다.

Table 3은 온실가스 N₂O 발생 사업장을 대상으로 CERs 발행된 현황을 보여주고 있다 [6]. N₂O 발생사업장은 질산, 아디핀산, 카프로락탐 제조사업장이 가장 대표적인데 사업장

의 종류에 따라 제거하는 방법 및 방법론이 다르다. 질산 제조사업장에서는 방법론 AM0028과 AM0034가 적용되는데 방법론 AM0034는 암모니아 반응기 내부에 기존의 암모니아 산화 촉매 하단에 설치하여 N₂O를 제거하는 방법이고, 방법론 AM0028은 흡수탑과 터빈 사이 또는 터빈 후단에 촉매층을 설치하여 제거하는 방법이다.

아디핀산 제조사업장의 경우 농도가 매우 높기 때문에 촉매를 이용한 방법은 사실상 불가능하고 분해온도 1,000 °C 이상에서 연소시켜 제거하는 방법론 AM0021이 사용된다. 또한 방법론 AM0034를 질산제조사업장에 적용하여 등록된 실적은 다수 있으나, CERs 발생 실적은 전무한 것으로 조사되었다. 그리고 카프로락탐 제조사업장에 대한 CERs 발행 실적은 아직 전무한 상황이며, 이는 카프로락탐 공정 중에 발생하는 SO_x가 촉매독으로 작용하기 때문에 CDM 사업에 기술적 어려움이 있는 것으로 판단된다.

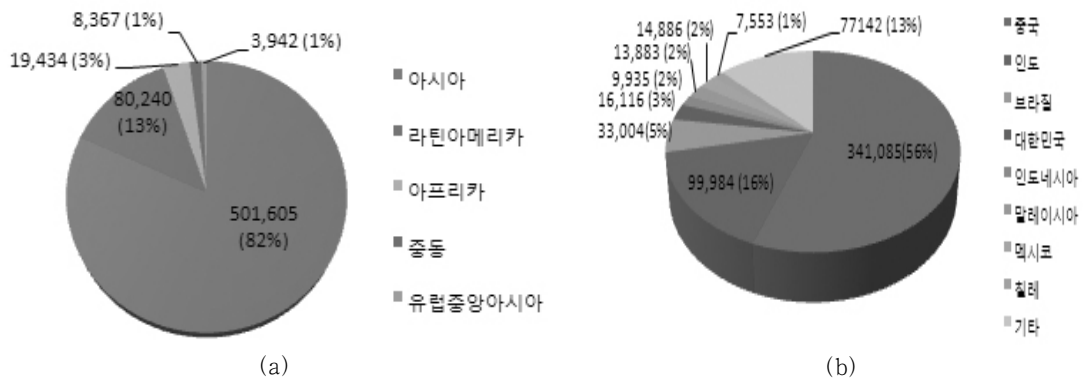


Figure 5. 전 세계 CDM 사업에 의한 CERs 발행 (a) 대륙별 CERs 발행 비교, (b) 국가별 CERs 발행 비교.

Table 3. UNFCCC등록 후 CERs 발행한 N₂O 감축 사업 현황

CDM 사업명	CERs 발행일	CERs 수량	설치국가 (방법론)	배출구매자
Catalytic N ₂ O destruction project in the tail gas of the Nitric Acid Plant of Abu Qir Fertilizer Co.	'09. 3. 18	401,339	이집트 (AM0028)	오스트리아 독일
N ₂ O Emission Reduction in Paulnia, SP, Brazil	'09. 3. 5	478,394	브라질 (AM0021)	스위스 일본 네덜란드
Kaifeng Jinkai N ₂ O Abatement Project	'09. 3. 4	46,262	중국 (AM0028)	일본
N ₂ O Emission Reduction in Onsan, Republic of Korea	'09. 3. 4	1,139,532	대한민국 (AM0021)	스위스 일본
N ₂ O decomposition project of PetroChina Company Limited Liaoyang Petrochemical Company	'09. 2. 18	2,200,584	중국 (AM0021)	캐나다 스위스
N ₂ O decomposition project of Henan Shenma Nylon Chemical Co., Ltd	'09. 2. 4	430,514	중국 (AM0028)	캐나다 스위스
Omnia Fertilizer Limited Nitrous Oxide (N ₂ O) Reduction Project	'09. 1. 19	157,352	남아프리카 (AM0028)	네덜란드
Catalytic N ₂ O destruction project in the tail gas of three Nitric Acid Plants at Hu-Chems Fine Chemical Corp.	'09. 1. 16	380,859	대한민국 (AM0028)	독일
Catalytic N ₂ O Abatement Project in the Tail Gas of the Nitric Acid Plant of the Hanwha Corporation (HWC) in Ulsan, Republic of Korea	'08. 9. 26	123,273	대한민국 (AM0028)	스위스 일본
Catalytic N ₂ O Abatement Project in the Tail Gas of the Nitric Acid Plant of the Pakarab Fertilizer Ltd (PVT) in Multan, Pakistan	'08. 5. 21	218,705	파키스탄 (AM0028)	일본

3.2. 국내 N₂O 감축 CDM 사업

국내 산업현장에서 비교적 규모가 있는 N₂O 발생원은 크게 질산, 카프로락탐, 아디핀산 제조 사업장인데, 현재 카프로락탐 제조 회사를 제외

하고 모두 CDM 사업이 완료되었다. Table 4는 국내에서의 N₂O 감축 현황을 나타내었다. 산업현장에서 N₂O 감축을 위해 가장 많이 사용되는 방법으로는 환원제(탄화수소 계열: CH₄,

Table 4. 국내 온실가스 N₂O 감축 CDM 사업 현황

업 체	생산품목	N ₂ O발생량 (N ₂ O kg/ton 제품)	처리방법/ 방법론	제거효율 (%)	운전조건 및 특징
휴켄스(주)	질산	4~9	축매환원/ AM0028	94	- 환원제: 프로판 - 반응온도: 360~400 °C - 질산생산량: 700 kt/yr
(주)한화	질산	4~9	축매분해/ AM0028	90	- 반응온도: 450~500 °C - 질산생산량: 97 kt/yr
로디아 폴리아마이드(주)	아디핀산	20~250	열분해/ AM0021	99	- 반응온도: 950 °C - 아디핀산 생산량: 151 kt/yr

C₃H₈ 등)를 이용한 축매환원법인 SCR 방법, 환원제 없이 축매만으로 감축 가능한 축매분해 방법, 그리고 발생하는 N₂O의 농도가 높을 경우 적용이 가능한 열분해법이 있다. 국내에서는 이들 3가지 방법이 모두 사용하고 있으며 사업장의 온도, 압력, 유량 등을 고려하여 감축 방법을 선택하고 있다. 방법론 AM0028을 살펴보면 휴켄스(주)와 (주)한화의 경우 동일한 방법이지만 처리방법에 있어서 휴켄스(주)는 축매환원법을 적용하여 N₂O 감축을 위한 반응온도가 400 °C 이하로 낮지만, (주)한화의 경우 축매분해 방법으로 축매환원법에 비해 반응온도가 50~100 °C 높은 특징이 있다.

질산 제조사업장 및 아디핀산 제조사업장에서 N₂O 감축을 위하여 적용된 방법은 각각 Figures 6~7과 같다. 일반적으로 질산 제조사업장에서는 축매 반응기를 가스터빈 전·후단에 설치하여 감축하는데 가스터빈 전단에 반응기를 설치할 경우에는 질산 생산방법에 따라 차이가 있지만 평균 5~9 kg/cm²로 압력이 높기 때문에 반응기의 크기가 작아지며, 가스터빈 후단에 축매 반응기를 설치할 경우에는 공정 내부의 압력 낮아 축매 반응기 크기가 커지고, 온도가 낮아 후단에서 N₂O 감축에 필요한 적정한 온도로 올려야 하기 때문에 또 다른 에너지를 필요로 한다.

아디핀산 제조사업장에서 발생하는 N₂O의 농도는 매우 높기 때문에 연소에 의한 방법이

많이 사용되는데, 사용되는 연료는 주변에서 쉽게 확보 가능한 LNG가 보편적으로 가장 많이 사용된다. 최근 국내에서 온실가스 N₂O를 대상으로 CERs 발행 현황을 보면 로디아 폴리아마이드(주)의 아디핀산 제조사업장에서 CO₂ 113.9만톤, 휴켄스(주)의 질산 제조사업장에서 CO₂ 3.8만톤, 그리고 (주)한화의 질산 제조사업장에서 CO₂ 12.3만톤을 감축한 실적이 있다.

3.3. 해외 N₂O 감축 CDM 사업

해외에서 온실가스 N₂O 감축을 위한 CDM 사업으로 가장 활발하게 진행되고 있는 곳은 중국이다(Table 5 참조). 중국에서는 질산, 아디핀산 제조사업장 일부에서 이미 CERs가 발행되었다. 한편, 영국의 EcoSecurities사는 중국에서 축매환원법을 적용하여 카프로락탐 제조사업장에 CDM 사업을 Figure 8과 같이 기존 공정인 흡수탑 → NO_x SCR → 배출에서 흡수탑 → NO_x SCR → N₂O SCR 장치 → 배출로 시스템을 구축하여 UN 등록을 마친 상태에 있다.

카프로락탐 제조공정에서 발생하는 SO_x는 축매독으로 작용하기 때문에 이를 극복하고 사업에 성공한다면 큰 의미가 있을 것으로 기대된다.

세계적으로 질산 제조사업장은 700여 곳으로 알려져 있으며, 중국에 10% 이상 질산 제조사업장이 있는 것으로 추정되고 있다. N₂O 감축사업은 현재 66개의 사업이 등록되었고

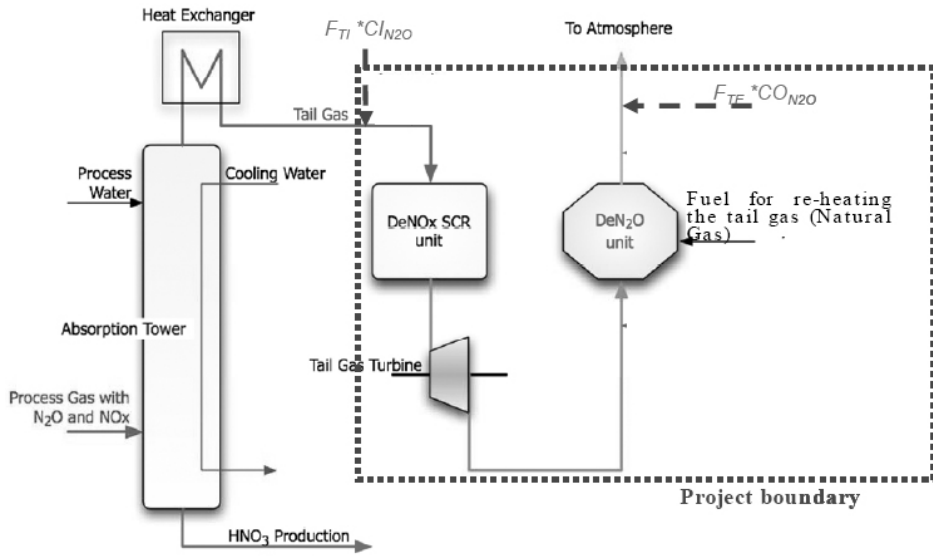


Figure 6. 질산 제조사업장에서 Tertiary 방식에 의한 N₂O 감축을 위한 공정도[7].

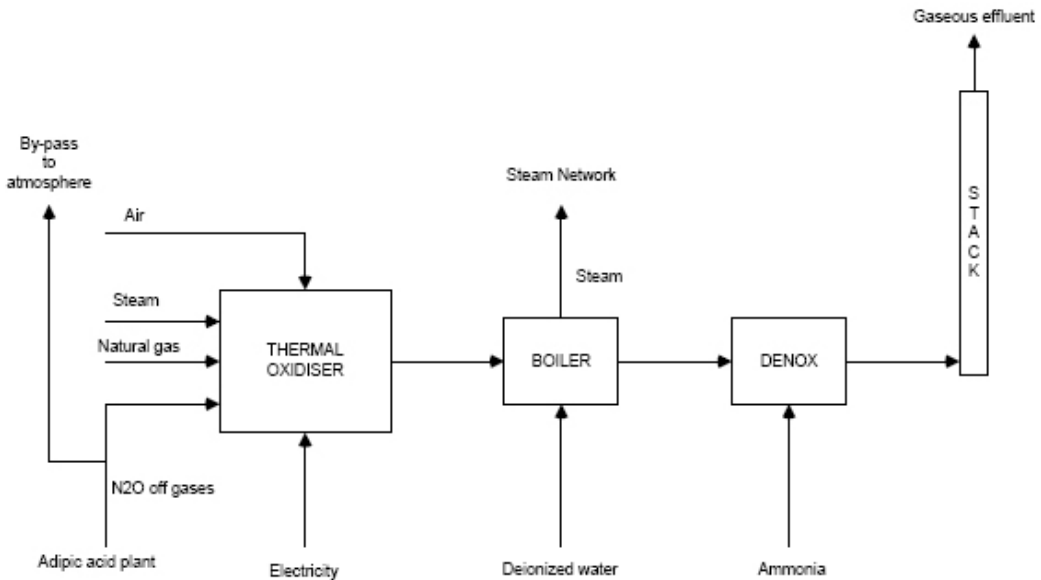


Figure 7. 아디핀산 제조사업장에서 열분해 방식을 이용한 N₂O 감축 공정도[8].

여기에서 발생하는 온실가스 감축량이 HFCs에 이어 두 번째로 단위 사업당 감축량이 크기 때문에 non-Annex 1 국가를 중심으로 꾸준히 UNFCCC의 CDM 사업 등록 건수가 증가하고 있다.

4. 맺음말

교토의정서에서 규제한 온실가스 중 하나인 N₂O는 CO₂에 비해 기후변화에 미치는 영향이 310배 크기 때문에 감축이 불가피한 실정이다. N₂O 저감방법으로는 유동층 연소공정의 유동매체 및 연소조건 조절을 통해 배출량을 감소시키는

Table 5. 해외 온실가스 N₂O 감축 위한 대표적 CDM 사업 현황

업체	생산품목	생산량 (kt/yr)	처리방법/ 방법론	제거효율 (%)	운전조건 및 특징
Abu Qir Fertilizer Co. (이집트)	질산	700	축매환원/ AM0028	98	- 환원제: 메탄(54 kg/h) - 반응온도: 414 °C - N ₂ O농도: 1,020 ppm - 가스배출량: 260,000 Nm ³ /h
Paulinia Rhodia (브라질)	아디핀산	94	열분해/ AM0021	99	- 연료: 메탄 - 반응온도: 950 °C - 열회수 장치 있음(스팀) - DeNO _x 설치 있음
PetroChina Company Limited Liaoyang Petrochemical Company(중국)	아디핀산	140	열분해/ AM0021	99	- 반응온도: 1,200 °C - 가스배출량: 19,883 Nm ³ /h
Kaifeng Jinkai Chemical Industry Co., Ltd (중국, 하남성)	질산	120	축매분해/ AM0028	90	- 예열용: LNG (55 Nm ³ /h) - 가스배출량: 35,200 Nm ³ /h
Pakarab Fertilizer, Ltd. (파키스탄)	질산	413	축매분해/ AM0028	90	- 반응온도: 475 °C - 배출농도: 1,400 ppm - 가스배출량: 287,800 Nm ³ /h

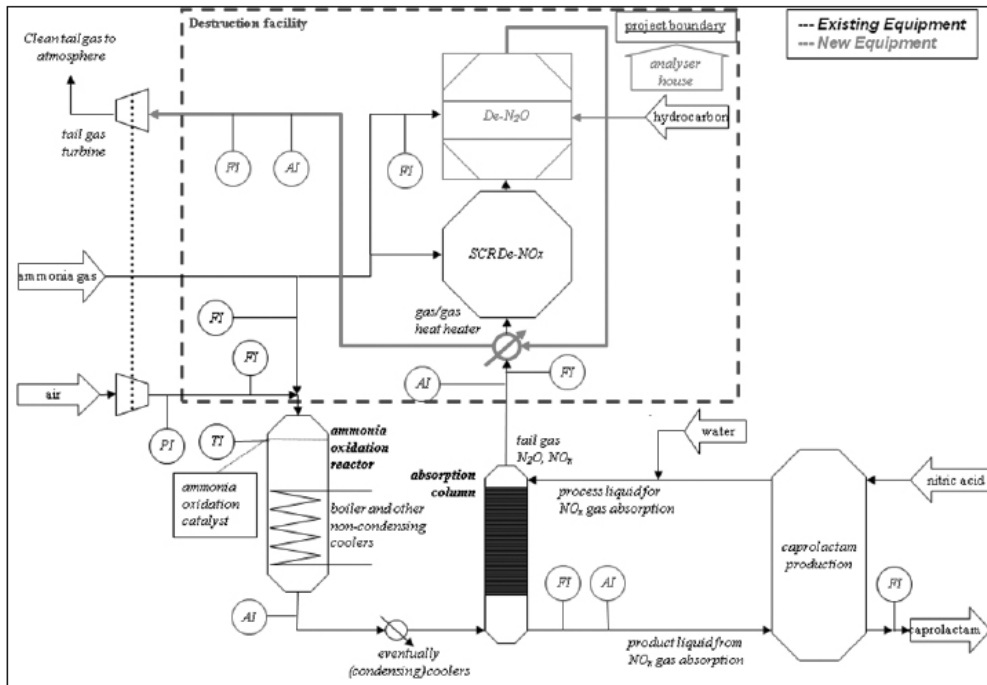


Figure 8. 카프로락탐 제조사업장에서 N₂O 감축을 위한 공정도[9].

기술과 각종 산업공정인 고정오염원에서 열분해 및 촉매분해, 전기분해로 저감하는 기술이 있다.

국내 대부분의 N_2O 발생 사업장에서는 열분해와 촉매분해 방법을 통해 CDM 사업이 완료되어 CERs를 발행되고 있으며, 카프로락탐 제조사업장만이 N_2O 저감 시스템을 도입하지 않고 있어 추가적인 CDM 사업이 곧 실행될 것이라 예상된다. 다만 카프로락탐 제조사업장의 배가스 중 SO_2 에 대한 촉매의 비활성 정도를 감소시킬 수 있는 기술 개발이 필요할 것으로 판단된다. 또한 국내에 적용된 N_2O CDM은 모두 유럽, 일본 등의 국외 기술을 통해 실행되었지만, 국내에서 개발된 N_2O 저감기술을 통해 중국, 인도 등의 개발도상국을 상대로 CDM 사업을 시도할 수 있을 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 국내 연소로나 병원의 마취가스 등에서 배출되는 저농도의 N_2O 저감기술의 개발은 추후 소규모 CDM에 적용될 수 있으므로 지속적인 N_2O 저감 연구개발이 필요할 것으로 보인다.

기후변화협약은 국제법적 강제이행 조건인 교토의정서가 발효되어 선진국의 경우 제1차 의무이행기간인 2008년부터 2012년까지 1990년 대비 평균 5.2%의 높은 온실가스를 감축해야 하는 상황에서 국가적으로 CDM 사업을 추진하고 있다. 만약 의무 가입국에서 이를 달성하지 못할 경우 1차 의무이행기간에 감축하지 못한 양에 penalty가 부과되어 2차 의무이행기간에 추가적으로 감축해야 한다. 우리나라의 경우 2007년 기준 경제규모가 세계 13위, 에너지 소비 세계 10위, 온실가스 배출량도 세계 10위로 2013년부터 시작되는 제2차 의무국 가입이 확실시 되고 있는 실정으로 국내 온실가스 대책이 시급하며, 향후 기후변화협약에 대한 대응책으로 발전소의 연료대체, 에너지 효율화 기술개발, 신재생 및 대체 에너지 개발, 산업현장에서의 CDM 사업 등이 부각될 것으로 예상된다.

국내외적으로 온실가스 N_2O CDM 감축사업을 주도하고 있는 일본, 영국, 독일 등은 자국이 보유한 우수한 촉매제조 및 공정기술을 이용하

여 non-Annex 1 국가를 상대로 N_2O 감축사업을 선점하고 있다. 이러한 몇몇 선진국은 이미 국내시장에 진입하여 N_2O 감축사업을 시작하여 CERs를 주기적으로 발행하고 있다. N_2O CDM 감축사업은 단위 사업당 CERs이 다른 CDM 사업보다 높기 때문에 꾸준히 증가 추세에 있는데 최근에 국내에서도 N_2O CDM 감축사업을 추진하기 위해 민관합동으로 중국시장을 공략하여 좋은 성과를 올린 모범 사례도 있다. 따라서 향후 국내 원천기술로 N_2O CDM 감축사업과 관련하여 해외 틈새시장을 공략하기 위해서 무엇보다 중요한 것은 탄탄한 기술력 확보, 해당 공정에 대한 정확한 판단을 할 수 있는 공정 전문가 인력확보, 시스템 구축 및 운전과 관련한 현지 업체 확보, 사업성 평가 능력 등이다. 이들 요소들을 사전에 충분히 검토 후 추진해야 성공적인 N_2O CDM 감축사업이 가능할 것으로 판단된다.



참 고 문 헌

1. R. W. van den Brink, S. Boomeveld, J. R. Pels, F. A. de Bruijn, M. M. C. Gent, A. W. Smit, ECN Final Report (2002).
2. 아산화질소저감 대책기술개발(II), NEDO 성과 보고서
3. M. Schwefer, R. Maurer and M. Groves, (Krupp Uhde), Nitrogen 2000, Reduction of Nitrous Oxide Emissions from Nitric Acid Plants, Vienna, March 12~14 (2000)
4. 에너지관리공단, 2007년 CDM방법론 맵 작성 (2007).
5. 기후변화홍보포털 CDM 사업현황(www.gihoo.or.kr).
6. 유엔기후변화협약(www.cdm.unfccc.int).
7. Catalytic N_2O Abatement Project in the Tail Gas of the Nitric Acid Plant of the Hanwha Corporation(HWC)in Ulsan, Republic of

- Korea, CDM Project Report (2006).
 8. N₂O Emission Reduction in Onsan, Republic of Korea, CDM Project Report (2004).

9. Catalytic N₂O abatement in the tail gas stream from the HPO Carprolactam production facility, CDM Project Report (2009).

※ 저자 소개



조 성 수

2002. 2 경기대학교 환경공학 학사
 2007. 2 아주대학교 에너지 시스템공학 석사
 1996. 2~현재 고등기술연구원 선임연구원



서 민 혜

2003. 2 서울여자대학교 환경학 학사
 2005. 2 아주대학교 환경공학과 석사
 2004. 12~현재 고등기술연구원 연구원



강 경 훈

1999. 2 영남대학교 화학공학부 학사
 2002. 2 한양대학교 화학공학과 석사
 2003. 9~현재 고등기술연구원 선임연구원



윤 용 승

1979. 2 연세대학교 화공과 학사
 1981. 2 KAIST 화공과 석사
 1981. KIST 고온공정/반응공학 연구실 연구원
 1990. 6 University of Utah 화공과 박사
 1991~1992 Brown University, Research Associate
 1993. 4~현재 고등기술연구원 센터장