

산업단지에 적용 가능한 온실가스 감축 기술 개발 동향

이헌 · 정상철 · 박성훈[†]

순천대학교 환경공학과

A Review of Technologies for Green House Gas Reduction Applicable to Industrial Complex Area

Heon Lee, Sang-Chul Jung, Sung-Hoon Park[†]

Department of Environmental Engineering, Sunchon National University

요 약 문

기후변화 협약 및 교토 의정서 채택과 더불어 2013년 제 2차 의무 대상국 지정이 확실시됨에 따라 온실가스 저감을 위한 기술 개발의 필요성이 부각되고 있다. 국내 배출되는 온실가스 중 대부분을 차지하고 있는 이산화탄소는 에너지 발생과 산업공정에서 집중적으로 발생하고 있다. 온실가스 인벤토리 구축, 저탄소형 연료 개발, 에너지 저감 효율 향상 등 온실가스 감축을 위한 기술 개발과 적용이 국가적으로 절실히 요구되는 시점이다. 본 논문에서는 산업단지에 적용 가능한 온실가스 감축 기술 및 에너지 저감 기술들을 소개하고 관련된 국내 · 외 기술 개발 동향을 살펴보았다.

키워드 : 온실가스, 이산화탄소 포집 및 저장, 순 산소 연소, 에너지 효율, 석유화학 신 공정

[†]Corresponding author E-mail: shpark@sunchon.ac.kr

1. 서론

해수면 상승, 이상 기후 발생 등을 일으키는 지구 온난화 현상에 대하여 국제적인 관심이 증가하고 있다. 1992년 6월 브라질의 리우 환경회의에서 지구온난화에 따른 이상 기후현상을 예방하기 위한 목적으로 “기후변화에 관한 국제연합 기본협약(UNFCCC: United National Frame work Convention on Climate Change)”이 채택되었으며, 1997년 제3차 당사국 총회에서 교토 의정서가 채택됨으로써 2012년까지 평균 5.2%의 온실가스를 감축하기로 결의하였다. 이러한 국제적인 정세에 부합하기 위하여 국내에서 온실가스 저감에 대한 노력들이 활발히 진행되고 있다.

우리나라는 에너지 소비량 세계 10위, 석유 소비량 세계 7위, 전력소비량 세계 10위, 석탄 소비량 세계 9위, 온실가스 배출규모 세계 9위로서, 온실가스 배출량은 2006년 기준 599.5 백만 CO₂톤으로 1990년 대비 101% 증가하였다³⁾. 또한, 이산화탄소 농도는 2000년 372 ppm에서 2005년 389 ppm으로 증가하였으며 최근 96년간 (1912-2008년) 연평균 기온이 1.7℃ 상승하였고, 연평균 강수량은 200 mm 이상 증가하였는데 이는 전 지구 평균기온이 1912-2005년 93년간 0.74℃ 상승한 데 비하면 두 배 이상 높은 수치로서 국내 온난화 현상이 심각한 수준임을 보여주고 있다^{1),2),11),14)}. 2010년 현재 우리나라는 비부속서 1국가에 포함되어 2012년까지 감축 의무는 가지고 있지 않지만 OECD 회원국으로서 2013년에 있을 2차 의무대상국으로 지정될 것이 유력하며, 향후 선진국 경제 수준에 도달하기 위해서는 상당기간 제약없는 경제 발전이 필요하기 때문에 온실가스 감축의무 부담 압력에 대한 종합적인 대응전략의 수립이

절실한 실정이다. 특히, 여수국가산업단지와 광양제철소가 자리 잡은 광양만권에서의 높은 온실가스 배출은 가까운 미래에 지속가능한 지역 발전의 발목을 잡을 수 있는 요인으로 꼽히고 있다.

온실가스 감축 의무 부담은 정부뿐만 아니라 지방자치단체, 시민 사회, 기업 등의 자발적 참여를 통하여 해결해야 하며, 이를 위하여 지방자치단체별로 온실가스 배출량과 산업특성의 특수성을 감안하여 지역 환경에 적합한 대응책을 마련해야 한다. 동시에, 기업체의 자발적인 온실가스 감축에 대한 기술개발은 국가적으로 온실가스 감축 대응의 기반이 될 수 있으며, 2013년 2차 의무 대상국 지정 시 경제적, 기술적 위기를 극복하고 도약의 발판이 될 것이다.

온실 효과를 유발하는 온실 가스 중 교토의 정서에서 규제하고 있는 대상은 CO₂, CH₄, N₂O, PFCs, HFCs, SF₆으로 총 여섯 종이 있으며, 이 중 산업공정이나 에너지 생산 과정에서 가장 많이 발생하는 CO₂에 대하여 감축 기술이 집중적으로 연구되고 있다. 세계적인 CO₂ 배출량은 온실가스 전체 대비 72%를 차지하고 있으나, 국내 배출량은 온실가스 총 배출량 대비 88%를 차지하고 있어 온실효과 기여도가 매우 높다¹³⁾.

본고에서는 산업단지에 적용 가능한 이산화탄소 감축 기술들을 분야별로 소개하고 국내외 관련 기술 개발 동향을 살펴봄으로써 향후 인근 여수 국가산업단지 및 광양만권 산업단지의 온실가스 감축 위기에 대한 대처 방안을 구축하기 위한 토대로 삼고자 한다.

2. 이산화탄소 포집 기술

산업 공정이나 에너지 생산 시설에 직접적으로

적용 할 수 있는 이산화탄소 포집 기술은 연소 전 포집(pre-combustion)과 연소 후 포집(post-combustion) 기술로 구분할 수 있다.

2.1. 연소 전 포집(Pre-combustion capture)

연소 전 포집(그림 1)이란 석탄, 중질잔사유 등의 화석 연료를 불완전 연소 및 가스화를 통하여 CO_2 와 H_2 가 주성분인 합성가스를 만든 후 정제 및 분리공정을 거쳐 CO_2 는 분리해내고, H_2 는 연소시켜 에너지를 생산하는 기술을 말한다. 에너지 효율이 높고 SO_x 를 95% 이상, NO_x 를 90% 이상 저감하는 친환경 기술로서, 다양한 저급연료(석탄, 중질잔사유, 폐기물 등)를 활용한 전기 생산이 가능하고 화학플랜트 활용 및 액화연료 생산 등 다양한 형태의 고부가가치의 에너지화가 가능하다. 반면에, 소요 면적이 넓은 대형 장치산업으로 시스템 비용이 고가이므로 초기 투자비용이 높으며, 복합설비로 전체 설비의 구성과 제어가 복잡하여 연계시스템의 최적화와 시스템의 고효율화, 운영 안정화 및 저비용화가 요구된다는 문제점을 가지고 있다. 연소 전 포집기술에서 중요한 요소로는 생성된 합성가스의 고효율 청정 발전이 가능하도록 오염가스와 분진(H_2S , HCl , NH_3 등) 등을 제거하는 정제 기술, 가스화 공정에서 생산된 합성가스 중의 H_2 와 CO_2 의 수율을 높이기 위한 수성가스 변위 기술(WGS: Water Gas Shift) 및 H_2/CO_2 분리 기술 개발이 필수적이다⁶⁾.

2.1.1. 해외 기술 개발 현황

영국을 비롯한 여러 나라에서는 석탄, 갈탄, 바이오매스 등의 연료를 바탕으로 연소 전 포집 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히,

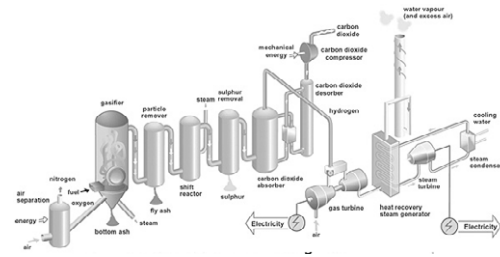


그림 1. 연소 전 포집 기술을 이용한 온실가스 저감 처리 장치⁶⁾.

정부 주도하에 산학연을 통한 연구가 집중적으로 이루어지고 있으며, 연간 수백만톤의 CO_2 를 포집하기 위한 대형 프로젝트가 연구 진행 중이다. 유럽 국가들의 연소 전 회수 기술 개발 현황을 표 1에 요약하여 나타내었다.

2.1.2. 국내 기술 개발 현황

두산중공업은 2014년까지 연소 전 기술 개발 목표로 전력연구원과 ‘석탄 가스화 복합발전(IGCC: Integrated coal Gasification and Combined Cycle) 실용화를 위한 기술개발’ 협약을 체결하였다. IGCC는 석탄을 수소·일산화탄소를 주성분으로 한 합성가스로 전환한 뒤 합성가스 중에 포함된 분진이나 황산화물 등 유해물질을 제거하고 천연가스와 유사한 수준으로 정제해 복합 발전하는 기술이다. 두산바쿠포와 공동으로 캐나다 기술 엔지니어링 회사인 HTC사의 지분 15%를 인수하고, 이 회사의 CCS 원천기술을 사용할 수 있는 기술에 대한 협약을 체결하였다.

2.2. 연소 후 포집 (Post-combustion capture)

화석 연료를 연소시키고 난 이후 여기서 나온 이산화탄소를 여러 용매에 흡수시키거나 반응시켜 제거하는 기술이다. 이 기술은 오래전부터

표 1. 유럽 국가의 연소 전 회수 기술 개발 현황⁷⁾

프로젝트	파트너	국가	연료형태	규모 (MW)	포집CO ₂ (Mt/y)
MARITSA	-	불가리아	갈탄	650	3.43
HUERTHRWE	RWE	독일	갈탄	450	2.80
Eemshaven Nuon	Nuon	네덜란드	석탄, 바이오매스	1,200	4.14
Rotterdam CGEN	CGEN NV	네덜란드	석탄, 바이오매스	450	2.50
Rotterdam Essent	Essent	네덜란드	석탄, 바이오매스	1,000	4.00
Kedzierzyn PKE	PKE/ZAK	폴란드	석탄	480	2.87
Killingholme E.ON.	E.ON UK	영국	석탄	350	2.50
Hatfield P.Fuel Pwr	Powerfuel	영국	석탄	900	4.75
Teesside Prog. EN	Progressive En.	영국	석탄, petcoke	800	4.22
DRYM Prog. EN	CO ₂ STORE	영국	석탄	450	2.40

개발되어 다른 산업에 널리 응용되고 있는 기술로서 신뢰성이 높다. 현재 대형 발전소에 쓸 정도 크기의 장치가 거의 없지만 기술적으로 개발이 어렵지는 않다. 이 방법은 새로운 발전소를 건설할 필요 없이 현재 있는 모든 형태의 발전소에서 포집 장치만 설치하면 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 장치를 유지하는데 소요되는 비용이 문제점이다. 포집 기술로는 흡수분리, 흡착분리, 막분리, 심냉 및 혼성분리 등으로 구분된다⁵⁾.

2.2.1. 흡수분리

물리적 또는 화학적으로 CO₂와 결합력이 있는 흡수제를 이용하여 흡수와 탈거의 공정을 반복적으로 행함으로써 CO₂를 선택적으로 분리하는 방법을 말한다. 그림 2는 흡수 분리 공정을 이용한 연소 후 이산화탄소 포집 장치의 도식도를 보여주고 있다. 흡수제와 분리대상 원료가스가 접촉하여 분리 대상가스만 선택적으로 흡수되고 나머지 가스는 흡수탑의 상부로 배출된다. 분리대상가스를 흡수한 흡수제는

펌프를 이용하여 열교환기를 통과하여 가열된 상태로 분리대상가스를 탈착하기 위한 탈거탑으로 유입되어 분리 대상가스를 탈착한다. 이 때, 탈착된 분리 대상가스는 탈거탑의 상부로 배출되고, 이 과정에서 흡수제는 재생되게 되는데, 탈거탑 하단에는 일부 탈착되지 않은 분리 대상가스를 완전히 탈착하기 위하여 재비기가 설치되어 흡수제를 재생한다. 가열된 재생 흡수제는 열교환기를 통과하여 냉각된 후 다시 흡수탑으로 주입되어 분리 대상가스를 연속적으로 흡수, 분리하게 되어 있다. 흡수공정은 물리 또는 화학 흡수법으로 구분되나 실제적으로 이 두 흡수분리공정의 기본 구성요소는 유사하다. 그러나 원료가스의 특성에 따라서 적용되는 흡수공정이 달라질 수 있으며 일반적으로 연소 배가스와 같이 이산화탄소의 농도가 낮은 경우에는 화학 흡수공정이 유효한 것으로 알려지고 있다.

가. 해외 기술 개발 현황

석유화학공업의 발전과 더불어 1930년대부터 해외에서는 흡수분리에 대한 기술 개발이 활발히

이루어졌으며 전 세계적으로 알카놀 또는 아민과 같은 흡수제를 이용한 분리 공정이 1,000여기 이상 가동 중에 있다. 또한 80년대 초부터 원유 회수 증진 저장(Enhanced Oil Recovery; EOR)용으로 연소 배가스로부터 일일 1,200 톤의 CO_2 를 분리하여 이용하고 있다. 전 세계적으로 에너지 소비 절감과 더불어 흡수 효율 개선을 위한 기술 개발을 활발히 진행하여, Dow chemical 社에서 개발한 FS-1 흡수제는 Flour Daniel 社 Econamine FG 공정에 적용되고 있다. 일본의 경우 1990년대부터 적극적으로 흡수 공정에 대한 기술 개발을 추진한 결과 관서전력과 미쓰비시 중공업에서 개발한 신 흡수제는 국외 상용공정에 적용하고 있으며, 동경전력과 히다찌 제작소에서는 내 SO_x -용 amine계 흡수제 개발을 추진하고 있다.

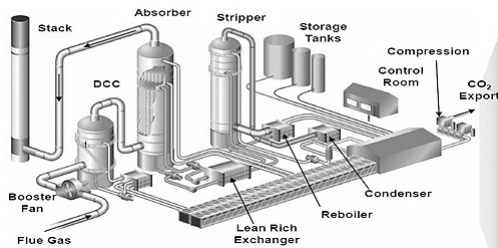


그림 2. 흡수 분리 공정을 이용한 연소 후 이산화탄소 포집 장치⁴⁾.

나. 국내 기술 개발 현황

흡수 분리 공정에 대한 국내 기술 개발은 온실가스의 발생량이 많은 발전소를 중심으로 개발이 진행되고 있다. 남동, 중부, 서부, 남부, 동서 발전(주)는 건식 흡수제를 이용한 발전소 배가스의 CO_2 포집기술을 적용하고 있으며, 현대 ENG(주)와 STX 중공업(주)는 액상의 암모니아수를 이용한 발전소 배가스의 CO_2 포집

기술을 개발하였으며, 제올라이트 막을 이용한 복합 공정을 적용한 CO_2 분리 기술을 개발하였다. 코오롱에서는 이온성 액체를 이용한 CO_2 분리 및 이를 이용한 Hexamethylene Diisocyanate (H-MDI) 합성 기술을 개발하였다.

2.2.2. 흡착분리

흡착분리법은 연소 배가스(CO_2 , N_2 , O_2 등) 중에서 CO_2 를 선택적으로 흡착하는 고체흡착제를 사용하여 CO_2 를 분리하는 방법으로서 흡착제가 충전된 흡착탑을 압력 변동 흡착법(PSA: pressure swing adsorption)으로 운전하여 고순도 CO_2 를 생산하는 방법이다. 연소 배가스 중에서 CO_2 는 강 흡착질이므로 제올라이트, 활성탄 등과 같은 흡착제를 이용하여 CO_2 를 흡착한 후 탈착하여 제품으로 얻으며, PSA의 기본공정은 원료가스 승압 공정, 흡착 공정, 제품가스 세정 공정, 탈착 공정으로 구성된다. PSA는 CO_2 농도에 따라 1단 PSA와 2단 PSA가 구분되어 적용되고 있으며, 현재 CO_2 농도가 25% 이상인 제철소나 석유화학공장 배가스에는 1단 PSA가 일부 적용되고 있으며, 화력발전소나 보일러 배가스 등 15% 이하의 CO_2 가 함유된 연소 배가스에는 2단 PSA를 적용하는 기술 개발이 진행중에 있다. CO_2 PSA는 CO_2 를 흡착하는 흡착제의 성능이 가장 중요하고, 흡착된 CO_2 를 진공펌프를 이용하여 탈착하므로 진공펌프의 성능과 효율적인 공정 구성이 중요하다.

가. 해외 기술 개발 현황

일본 동경 전력, 동북 전력, 북륙 전력 등 전력 회사를 중심으로 흡착 분리 공정에 대한 기술 개발이 이루어졌으며, 시간당 1000 Nm^3 을 처리할 수 있는 온도를 이용한 흡수 공정인

TSA(temperature swing adsorption) 공정과 PSA 공정을 복합화한 2단 공정 pilot plant를 설치하여 99% CO₂, 90% 회수율, 1.01 kWh/Nm³ 효율을 지닌 공정에 대한 연구가 진행되었으며, 신일철 및 NKK는 BFG/LDG를 이용하여 99% CO₂를 2700–3400 Nm³/h 생산할 수 있는 시스템을 적용하여 상업화하였다.

나. 국내 기술 개발 현황

국내의 경우 한국에너지기술연구원에서는 중유를 이용한 화력발전소에서 배출되는 배가스의 CO₂를 처리하기 위하여 2단 PSA 공정실험장치를 제작하여 현장 실증 실험을 완료하였다. 적용 시스템은 110 Nm³/h의 처리 능력으로 99% CO₂를 90% 회수율로 생산할 수 있으며, 전력원 단위는 1.26 kWh/Nm³이다. 이후 지속적인 연구를 통하여 0.6 kWh/Nm³의 처리 능력을 보유한 공정을 개발하였으며, 한국에너지기술연구원과 포항산업과학연구원은 공동으로 제철소에서 발생하는 배가스 처리를 위한 1단 PSA 공정을 개발하여 7.5 Nm³/h, 99% CO₂, 회수율 90%의 처리 능력을 보였다. 또한 포항산업과학연구원은 CO₂ 40 Nm³/h를 생산하는 pilot plant를 개발하였다.

2.2.3. 막분리

막분리법은 연소배가스를 고분자막이나 무기막을 이용하여 선택적으로 CO₂만을 투과시켜 고순도 CO₂를 분리하는 방법이다. CO₂ 투과도와 CO₂/N₂ 분리계수가 크고, 수분 및 산성가스에 영향을 받지 않으며, 내열성과 기계적 강도가 우수한 저가의 분리막을 이용하여 CO₂를 분리하는 방법으로 고분자막, 무기막(Pd, 세라믹, 제올라이트 등), 복합막, 촉진수송막

등이 사용되고 있다. 막분리 공정에서의 성능은 투과도와 선택도에 의해 결정되는데, 두 성질이 상충되는 경우가 많아 소재 개발시 최적의 투과 및 선택도를 결정하는 것이 매우 중요하다. 또한, 막을 이용한 모듈 및 분리 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

가. 해외 기술 개발 현황

Kyosera, Monsanto, Exxon, 우베, 일본 공업기술원 등을 중심으로 Polyimide, Polysulfone을 이용한 고분자 막이나 세라믹 막, 촉진수송막, 금속 막, 실리콘계 복합막 등에 대한 연구를 활발히 진행하여 CO₂ 투과도는 100–260 barrers, CO₂/N₂ 선택도는 10–50 수준의 막에 대한 기술이 개발되었다. 일반적으로 막은 투과도가 높으면 선택도가 낮아지며, 반대로 투과도가 낮아지면 선택도가 높아지는 상반성을 지니고 있다. 막의 상용화를 위해서는 선택도 50 이상, 투과도 100 이상의 제품이 필요하며 막의 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

나. 국내 기술 개발 현황

한국화학연구원에서는 투과도 300 barrers, 선택도 20의 성능을 가진 6FDA–TrMPD 폴리이미드 중공사 막을 제조하여 모듈화하는 기술을 연구하고 있다. 또한 대학 및 출연연을 중심으로 탄소채 복합막 및 액막 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 소재 개발과 더불어 모듈화 기술, 시스템 구축 등의 기술 개발이 병행되고 있다.

2.2.4. 심냉분리

심냉분리법은 연소 배가스를 가압 냉각하여

CO₂를 액화 분리하는 기술로서 고농도의 CO₂ (>90%)를 함유하고 있는 원료가스에서 액화 이산화탄소를 생산하기 위해서 상업적으로 많이 사용되고 있지만 농도가 낮은 경우에 적용하는 데는 한계가 있다. 심냉법을 사용하면 대량생산이 용이하며, 높은 압력에서의 원료가스 공급이 가능하고, 높은 압력의 제품 생산에 적용이 쉬울 뿐만 아니라 액체 상태의 CO₂를 얻을 수 있다. 그러나 냉각에 많은 에너지가 필요하다는 치명적인 단점이 있다. 연소배가스가 대기압으로 배출되고 CO₂의 농도가 낮기 때문에 연소 배가스로부터 심냉법만으로 이산화탄소를 회수하기는 힘들다. 하지만 다른 방법으로 대량 회수된 CO₂를 저장 및 운송하기 위해서는 심냉법이 필요하며, PSA나 흡수법 등과 같은 공정을 연계하여 다른 방법으로 90% 이상의 CO₂를 생산하고 심냉법으로 고순도 액화 탄산을 제조하는 적절한 조합공정 연구를 수행하면 그 응용 범위를 넓힐 수 있는 가능성이 있다.

2.2.5. 혼성 분리

상기 열거한 CO₂ 분리기술들이 가지고 있는 단점을 보완할 수 있도록 두 개 이상의 분리기술을 복합화한 분리시스템으로서 막/흡수, 막/PSA, PSA/심냉분리 등의 조합이 가능하다. 이산화탄소 흡수능력이 우수한 알칼리금속염 또는 아민 수용액 등의 흡수액을 소수성 막을 경계로 하여 이산화탄소/질소 기체혼합물과 접촉시켜 이산화탄소를 선택적으로 흡수 분리하는 막 흡수 접촉기, 2단 PSA 공정, 또는 1단 PSA + 2단 심냉법을 사용하는 PSA/심냉분리법 등의 혼성공정이 연구되고 있다. 1998년 노르웨이 KOG는 85% CO₂를 90 Nm³/h 생산할 수 있는 실험설비를 가동하였으며, 국내에서는

산학연을 중심으로 막/흡수 접촉기(KRICT-충남대), 막/PSA(KIER-KRICT-서울대, 현대중공업)에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

3. 이산화탄소 저장 기술

3.1. 석탄층 저장(ECBM: Enhanced Coal Bed Methane recovery)

지하 석탄층에 흡착되어 있는 다량의 메탄을 이산화탄소와 치환하여 장기간 안정적으로 포집시키는 기술이다. 지하 석탄층은 메탄 보다는 이산화탄소를 상대적으로 강하게 흡착하는 것으로 알려져 있으며, 이 석탄층에 이산화탄소를 주입하면 석탄에 흡착된 메탄은 이산화탄소로 치환되면서 탈착 되고 이산화탄소는 포집된다. 석탄층에 포집된 이산화탄소는 외부적 변화가 없는 한 장기간 안정적으로 포집되며, 메탄 매장량의 두 배까지 이산화탄소 매립이 가능한 것으로 알려져 있다. 이러한 방법은 현재 캐나다, 중국, 일본, 폴란드, 네덜란드 등에서 수행하고 있다.

3.2. 원유 회수 증진 저장 (EOR: Enhanced Oil Recovery)

EOR은 원유에 액체 이산화탄소를 주입하여 원유의 점도를 떨어뜨려 원유의 회수율을 향상시키기 위해 개발된 기술이다. 현재 여러 유정에서 시행되고 있으며 경험 및 데이터의 축적을 바탕으로 실현 가능성이 높은 기술로서 원유가 저장된 지반에 장시간 이산화탄소를 안정적으로 저장시킬 가능성이 높다는 장점을 가지고 있다. 현재 약 73~238 Gt의 이산화탄소를 저장할 수 있는 것으로 추정하고 있으며, 가장 대표적인

연구는 캐나다의 Weyburn CO₂-EOR 사업이다. 이 사업은 미국의 Dakota에서 포집한 이산화탄소를 파이프라인을 통하여 캐나다의 Weyburn에 저장하는 사업으로 18개국의 연구자들이 참여하고 있다.

3.3. 심부 염수층(대수층) 저장 (Deep Saline Formation)

지하의 대수층에 이산화탄소를 저장하는 기술은 크게 두 가지 경로를 통해서 저장된다. 첫번째 경로는 수중에 존재하는 Feldspars, Zeolites, Illites, Chlorites 또는 Smectites 등의 Alumino Silicate의 광물 성분에 의해 포집되는 기술로 광물 성분의 양에 의해 이산화탄소의 포집량이 결정되며, 포집 반응속도는 빠르지 않으나 한번 포집된 경우 이산화탄소의 재방출이 거의 없다는 장점을 가지고 있다.

다른 경로는 대수층의 움직임 변화가 적은 수력학적 포집을 이용한 경로이다. 대수층은 지층의 투과도가 높지 않다면 일년에 거의 10 cm 미만 움직이므로 물에 녹아 있는 이산화탄소가 100 km 이동하는 데는 105-106년 정도 소요되며 장시간 대수층에 머물게 됨으로써 이산화탄소의 저장 효과를 충분히 볼 수 있다. 심부 염수층 저장 기술은 이산화탄소저장 기술 중 가장 경제성 있는 기술로 평가되며, 미국의 Frio, 노르웨이 북해의 Sleipner, 알제리아의 In Salah, 일본의 Nagaoka 등에서 연구가 수행되고 있다. 현재 5 km² 정도의 CO₂ 매장면적이 있는 것으로 추정되고 있으며, 노르웨이에서는 연간 1 Mt의 이산화탄소를 Sleipner 지역의 대수층에 저장하고 있다. 우리나라와 같이 이산화탄소 저장장소로 활용될 만한 유전/가스전이 없는 경우에는 이러한 대수층에 관한 연구가

진행될 필요가 있다.

3.4. 해양 저장 (Ocean Storage)

해양은 대기와 끊임없이 이산화탄소 교환을 하고 있으며 지구상에서 이산화탄소를 가장 많이 저장하고 있는 부분이다. 상평형 이론에 의하면 대기의 이산화탄소 농도가 증가됨에 따라 해양의 이산화탄소 또는 탄산염의 농도는 평형을 이루기 위하여 증가될 가능성이 높으므로 해양의 탄소 저장능력은 더 신장될 수 있어 잠재적인 큰 저장 대상으로 부각되고 있다. 해양 저장 기술은 이산화탄소를 상온에서 50기압으로 액화한 후 해저 500 m 밑으로 파이프를 통하여 작은 액적으로 방출시켜 해수에 용해시키는 방법으로 약 40,000 GtC의 CO₂를 저장할 수 있는 것으로 추정되고 있으며, 해양 심층수를 이용할 경우 추가적인 CO₂ 저장 가능성을 가지고 있다.

부가적으로 연구가 진행되고 있는 기술은 이산화탄소를 CaCO₃로 고정시킨 후 해양에 폐기하여 해저에 침강시키는 방법인데, 이 방법은 이산화탄소를 고정시킬 칼슘 등의 재료가 필요하여 경제적이지 못할 것으로 판단되나 방대한 양의 이산화탄소 수송 문제는 앞의 경우보다 유리할 것이다. 이와 같은 연구는 일본의 히타치제철소, 북해도 대학 등에서 연구를 수행하고 있으나 심해에서 이산화탄소의 농도가 증가하였을 때 그 영향으로 해수의 pH 변화, 생태계 변화 등의 부작용을 검토하여야 할 것이다.

3.5. 국내 이산화탄소 저장 가능성

국내 지층을 이용한 이산화탄소 저장이 가능한 지역은 육상 퇴적 분지 다섯 곳과 해저 퇴적분지 여섯 곳 등 총 열 한 곳이 있다. 육상 퇴적 분지 중

가장 유망한 지역은 경상 분지이며 다섯 곳을 포함한 총 저장 능력은 약 11억 톤 규모로 추정된다. 또한, 국내 지질학적 특성상 지중 저장에 필수적인 대수층이 존재하지 않는 것으로 알려져 있으나 해저 퇴적 분지를 이용한 해양 저장 능력은 약 100억 톤 규모의 저장 능력을 가지고 있는 것으로 예측된다.

4. 순 산소 연소 기술

에너지 생산을 위한 연소 공정 중 산화제로 공기 대신 산소를 이용하여 연료의 연소율을 향상시키는 기술인 순 산소 연소 기술은 약 30% 정도의 에너지를 절감시킬 수 있는 유망한 기술로 부각되고 있다. 특히 CO₂가 대량으로 발생되고 있는 발전용 보일러나 열 효율 및 생산성이 낮은 철강산업용 가열로, 제철소, 비철 금속 가공 업체, 시멘트 업체 등에 유용하게 적용될 수 있는 기술로 연간 300만 톤 이상의 이산화탄소 절감 효과를 기대할 수 있다. 1990년대 후반부터 미국, 일본을 비롯한 여러 국가에서 순 산소 연소 시스템에 대한 기술 개발을 진행하여 2000년대 중후반부터 사용화 시설을 구축하였다. 특히, 화석 연료를 사용하는 발전소에 대하여 에너지 효율 향상과 이산화탄소 발생 및 처리에 따른 부대비용 절감을 위한 다양한 연소 방식 중 하나로 개발하였으며, 순 산소 연소 시스템을 적용한 발전소를 건설하였다. 국내의 경우 순 산소 연소 시스템에 대한 연구는 기초적인 단계로 (주)SAC에서 순 산소 단조 가열로 PDU를 제작하여 시범 적용하였으며, 순 산소/이산화탄소 재순환 연소 가열 시스템을 개발 하였다. (주)대성산업가스는 순 산소 연소 시스템을 위하여 저가 고순도 산소 제조용

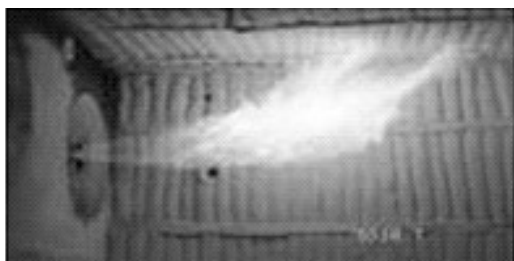
대용량 PVSA 공정을 개발하였으며, 산소 95% 이상, 질소 1% 미만 함유된 pilot 공정을 제작하여 시범운영하였다.

4.1. 순산소 연소 가열로 (Oxyfuel Combustion Furnace)

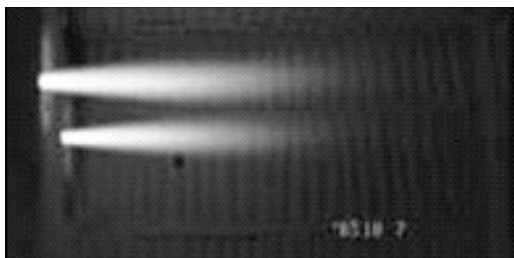
순산소 연소 가열로는 연소용 공기를 산소로 대체하여 연소시키는 가열로로서, 기존 공기를 이용한 가열로 대비 약 30%의 연료절감 효과와 약 20%의 생산성 향상을 볼 수 있으며 사용되는 산소 발생 비용을 감안하더라도 약 15~20%의 경제성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다. 연소 후 배가스는 비교적 단순한 응축과정을 통해 CO₂를 95% 이상의 고농도로 쉽게 분리할 수 있기 때문에 CO₂ 분리 회수 설비비용을 크게 낮출 수 있는 효과도 있다. 고온 내화 단열재로 내부가 처리된 공간에서 화석연료를 연소시켜 그 연소열로 강재, 철강제품 또는 제반 피 가열 물체를 고온으로 승온시키는 열 효율 향상 설비이다. 그림 3은 공기연소 방식과 순산소 연소 방식에 따른 화염 형태를 보여주고 있는데⁸⁾, 이로부터 순산소 연소가 공기연소 방식에 비해 고온의 안정적인 화염을 가짐으로써 연소 효율이 높아짐을 알 수 있다.

4.2. 미분탄 순산소 연소 시스템

순산소 연소 기술을 석탄 화력발전소에 접목한 시스템으로 석탄 화력발전 시 산화 과정에서 순도 95% 이상의 산소를 사용함으로써 열 효율 향상 및 부대 처리 비용의 감소 효과를 볼 수 있다⁹⁾. 발전 시설의 노(furnace) 내에 질소가 유입되면 NOx 발생이 증가하고 공기 이송을 위한 발전소 내의 송풍 전력 향상에 의한 소비 동력이 증가되는 부작용이 발생한다. 또한 CO₂



(a) 공기 연소 화염



(b) 순산소 연소 화염

그림 3. 공기연소 방식과 순산소 연소 방식에 따른 화염 형태⁸⁾.

분리 시 많은 비용이 발생하는 문제점을 안고 있다. 반면, 순산소 연소 기술을 적용할 경우 배가스 중 H_2O 를 응축하면 순도 90% 이상의 CO_2 를 전량 회수할 수 있다. 우리나라는 전력 연구원을 중심으로 순 산소 연소 석탄 화력발전 기술의 상용화를 위해 2007년부터 2015년까지 8년간 총 1,950억 원의 예산을 투입, ‘청정화

력발전과 연계한 온실가스처리시스템’을 개발, 진행 중에 있다⁹⁾. 그림 4는 순산소 연소 시스템을 적용한 해외 발전소들의 예⁸⁾를 보여주고 있다.

5. 에너지 소비 저감을 위한 석유화학 신 공정 기술

온실가스를 직접적으로 처리하는 이산화탄소 포집 및 회수 기술 대신 석유화학 산업단지에 서는 에너지 소비 저감 및 효율 향상을 위하여 기존 공정을 대체할 수 있는 신 공정 개발을 진행하고 있다. 현재 여러 단계로 나누어져 있는 반응 공정 및 분리 공정을 단순화하여 에너지 효율을 향상 시키는 기술로서, 반응 분리 촉매, 불소계 윤활유, 이온성 또는 액체계 분리막을 이용한 연구가 진행되고 있으며, 석유정제산업 이나 석유화학사업, 기타 화학산업의 공정 분야에 적용함으로써 에너지 효율 향상 효과와 연간 약 100만 톤의 이산화탄소 절감 효과를 기대할 수 있다.

5.1. 고효율 Bisphenol-A 신공정

원료 물질인 페놀과 아세톤을 이온교환수지를 이용한 산 촉매 하에서 축합반응을 유도 하여 BPA를 생산할 때 생성되는 부산물인 물이 촉매에 대한 피독 작용을 하기 때문에 촉매 재생을 위한 고가의 비용을 유발한다. 따라서 전체공정을 간략화하고 반응과 탈수를 동시에 수행하는 새로운 개념의 반응기를 도입함으로써 에너지 절약형 신 공정을 개발하였다. 이는 나노 크기 이하의 분자들을 선택적으로 분리하는 고도의 분리공정인 막분리 (Membrane separation) 공정을 반응기와 결합함으로써 달성하였다. 반응기에 탈수용 분리막 공정을

Vattenfall(GER): 30MW₀(Schwarze Pumpe, 2008)CS Energy(AUS, IHI(JPN)): 30MW₀ Retrofit(Callide, 2009)Jupiter Oxygen(USA): 25MW₀(Orville, 2009)Total(FRA): 35MW₀(Lacq, 2008)

그림 4. 순산소 연소 시스템을 적용한 해외 발전소 (안국영 등, 2008).

직접 결합함으로써 반응 시 생성되는 물을 실시간으로 제거하여 촉매의 활성저하를 막을 수 있어 촉매 재생을 위한 반응기의 휴지기를 가질 필요가 없는 단일반응기의 연속 공정으로 전환할 수 있다.

5.2. 분리막/증류 복합시스템을 이용한 C5 유분에서 Isoperne 분리 공정

세계적으로 개발 초기 단계인 축진 수송 기술을 이용한 olefin/paraffine의 선택적 분리막에 의한 에너지 다 소비형 증류 공정을 축진 수송막/증류 hybrid 시스템으로 대체한 기술이다. 개발된 기술로 인하여 향후 hybrid 분리 시스템 공정 및 설계기술 확보에 의한 해외 기술 이전 가능성이 확보 되었으며 C_2-C_4 화합물 등 여타 olefin/paraffin 분리에 활용이 가능하다. Hybrid 시스템에 의한 olefin/paraffin hybrid 분리는 기존 증류기술에 비해 건설비 및 운전비를 30-50% 절감할 수 있어 석유화학 경쟁력 제고 및 발전에 기여할 수 있다.

5.3. Advanced Catalytic Olefines (ACO)

기존 thermal cracking을 이용한 공정 대신 촉매를 이용한 반응기를 통하여 ethylene과 propylene을 생산하는 기술로서, 기존 공정보다 저온(600-700℃) 생산이 가능하며 olefin 생산 효율이 향상되었다. 또한 부산물인 코크스의 생성이 감소되었으며 생산되는 ethylene과 propylene의 비율이 안정화 되었다. 개발된 기술을 응용하여 연속적인 naphtha 공정과 증류 공정 등 다른 액상 분리 공정에 활용이 가능하다.

5.4. 중질 나프타의 유동층 접촉 분해 신 공정

기존 단순 열분해 공정에서 분해용 성형

촉매를 직접적으로 중질 나프타와 접촉시켜 분리 공정에 의해 경질 올레핀을 생산하는 기술로서, 단순 열분해보다 분해온도가 낮은 650℃에서 나프타 분해가 가능하기 때문에 에너지 효율을 크게 향상 시켰으며, 저급 원료인 중질 나프타로부터도 높은 수율로 경질 올레핀인 에틸렌과 프로필렌을 생산할 수 있다. 프로필렌의 선택적 생산이 가능하고 에틸렌/프로필렌 생산비율 조절이 용이한 장점을 가지고 있다. 중질 나프타 접촉분해 기술의 핵심은 유동층에서 촉매와 유동액의 반응 조절 기술과 이에 필요한 분해 촉매의 개발에 있다. 유동층 반응기로 접촉 분해할 경우 나프타 분해효율 향상 및 에틸렌과 프로필렌에 대한 선택도를 높일 수 있다.

5.5. 내수성 DME 촉매 공정

DME (Dimethyl Ether, CH_3OCH_3) 생산을 위한 내수성 촉매의 개발로 물이 함유된 메탄올 사용할 수 있게 됨에 따라 메탄올의 탈수 공정을 생략함으로써 에너지 효율을 향상 시키는 기술이다. 고효성 촉매의 개발로 인하여 반응기의 규모를 기존의 1/2 이하로 줄일 수 있으며, 낮은 온도에서도 전환율을 향상시킴에 따라 에너지 효율이 향상되고 단순한 형태의 공정 개발이 가능하다. 또한, 촉매/공정 분야에서 일본과 미국, 유럽 등의 선진기술을 능가할 수 있는 원천기술을 보유함으로써 향후 촉매 관련 기술 개발에 큰 영향을 주고 있다. 내수성 DME 촉매 및 공정 개발로 연간 13.5만 톤의 이산화탄소 배출량 감소 효과와 연 1억 달러의 에너지 절감 효과가 기대되며, 자동차 연료로 사용할 경우 이산화탄소 배출이 경유차 대비 8%와 LPG 대비 18% 정도 감소하여 매연 배출이 거의 없는 차세대 청정 에너지원으로 부각될 수 있다. 또한 내수성 촉매 공정 기술 개발로 인하여 향후 5-6년

이내에는 하루에 10,000 톤의 DME를 생산할 수 있는 대형화 기술의 보유가 가능할 것으로 예상된다.

이루어진다면 온실가스 감축 의무로 발생하는 경제적인 위기를 슬기롭게 극복할 수 있을 것이다.

6. 결 론

국립환경과학원이 구축한 온실가스 및 대기 오염물질 통합관리시스템(GHG-CAPCC)을 이용한 온실가스 배출량 현황을 살펴보면 전남 지역 전체의 산업부문 온실가스 발생량 중 여수시와 광양시의 배출량이 전체 95%를 차지하고 있다¹²⁾. 에너지경제연구원(KEEI)의 자료를 살펴보면 2008년 국내 에너지 총 사용량의 16%를 여수시와 광양시가 소비하고 있는 실정이다¹⁰⁾. 이는 1967년 중화학육성 정책에 따라 조성된 여수국가산업단지의 석유화학 업체들과 인근에 위치한 포스코 광양제철소가 소비하는 에너지가 많기 때문인 것으로 사료된다. 광양 만권 온실가스 배출량이 전남지역 온실가스 발생량의 대부분을 차지하고 있는 현재, 다가오는 온실가스 감축 의무에 대한 경제적, 기술적 위기를 극복할 수 있는 대책이 시급한 실정이다. 2010년 현재 에너지 목표 절감제 시범 사업장으로 총 아홉 개 업체가 선정되어 있으며, 지역별 탄소배출권 거래제가 시범적으로 시행되고 있는 현실을 감안한다면 기업체의 온실가스 감축에 대한 노력은 더 이상 선택사항이 아닌 필수 조건이다. 온실가스 감축을 위하여 온실가스 배출 인벤토리 작성 및 공정별 에너지 절감에 대한 활동을 일부 기업에서 시행하고 있으며 신기술을 도입한 공정을 개발하는 노력을 진행하고 있다. 저탄소 연료 및 신재생 에너지 개발과 더불어 장기적인 에너지 절감 및 온실가스 감축에 대한 기술 개발 및 투자가 적극적으로

사 사

본 연구는 환경부 지정 전남지역환경기술개발센터의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 구교숙, 백희정, 권원태, 부경은(2005). 온실가스 증가 시나리오(A2, B2)에 따른 미래 연직기온 변화 전망. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science. 41(6). pp.1077-1088.
2. 권원태, 백희정, 최경철, 정효상(2005). 국가 기후변화 적응 전략 수립 방안에 관한 연구. 대기. 15(4). pp.213~227.
3. 기후변화종합대책위원회(2006). 기후변화 협약대응 제3차 종합대책.
4. 문길호(2009). 플랜트공급사의 CCS 기술개발 전략. 제314회 학연산 연구성과교류회 발표 자료. 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발사업단.
5. 민병무(2009). 연소 후 이산화탄소 포집 기술 현황. Korean Industrial Chemistry News. 12. pp.15~29.
6. 박상도(2008). 지구 온난화의 원인 및 대응 방안. 공주대학교 누리사업단 특별강연 발표 자료. 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발사업단.
7. 박정훈, 백일현(2009). Status and

- Prospect of Pre-combustion CO₂ Capture Technology. Korean Industrial Chemistry News. 12. pp.3~14.
8. 안국영, 김한석, 이상민, 이영덕, 유상석, 박무룡, 최범석, 김영철, 김용모, 한국기계연구원 환경기계연구본부, 한양대학교, 한국남부발전(2008). H₂ rich syngas-순산소 고압 연소기술 개발. 교육과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업 보고서.
 9. 엄희문, 김성철(2009). 순산소 연소기술에 의한 CO₂ 회수기술. Korean Industrial Chemistry News. 12. pp.43~49.
 10. 에너지경제연구원(2009). 지역에너지통계 연보. 10. 에너지경제연구원.
 11. 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발사업단 (2009). 더워지는 지구. 2. 교육과학기술부.
 12. 지식경제부(2009). 온실가스 인벤토리 구축 및 작성체계 연구.
 13. IPCC(2007a), Climate change 2007; Mitigation(Pre-copy). Cambridge Univ. Press. Cambridgeshire county.
 14. IPCC(2007b). Climate change 2007; The Physical Science Basis. Cambridge Univ. Press. Cambridgeshire county.

