

이산화탄소 저감 세라믹스 소재

글 _ 황광택, 김진호
한국세라믹기술원 이천분원

1. 서론

지구 온난화로 인한 기후변화 발생에 따라 기후 변화 대응이 국제 및 국내의 최우선 과제로 주목받고 있다. 1992년 브라질 리우환경회의에서의 유엔기후변화협약 및 2004년 교토의정서 채택으로 지구온난화는 단순한 환경문제에서 향후 세계 신경제 질서를 예고하는 경제문제 로 부각되고 있다. 지난해 덴마크 코펜하겐에서 개최 된 회의에서 온실가스 감축안에 대한 각국의 합의에는 이르지 못했지만 우리나라는 2020년까지 중장기 온실가 스 감축 목표량을 배출전망치(BAU, Business As Usual) 대비 30%를 감축하는 목표를 제시하였다. BAU란 경제 발전에 따라 온실가스 배출량이 계속 늘어나는 개도국에 서 감축량을 크게 보이게 하기 위해 주로 쓰는 기준으로 우리가 제시한 목표량을 절대량으로 환산하면 2020년까 지 2005년 배출량 대비 4% 감소에 해당한다. 1990년 이 후 우리나라의 온실가스 배출량은 86% 이상 증가하였으 며, 증가율은 경제협력개발기구(OECD) 국가 중에 가장 높다. 이는 철강, 석유화학 등 온실가스를 다량 배출하는 산업 비중이 큰 이유이며 총량 기준으로 세계 10위의 온 실가스 배출국(2005년 기준, 5억9400만tCO₂)이다. 이러 한 목표치를 달성하기 위해서는 화석연료의 사용을 억제 하고 상대적으로 발전단가가 비싼 신재생에너지 비중을 획기적으로 높여야 한다. 선진국들은 기술개발을 통해 자국의 온실가스를 감축하는 방안을 확보하고, 신성장 동력 창출 및 세계시장 선점의 노력을 기울이고 있다.

기후변화를 대응하는 기술적 방안으로는 첫째, 이산화

탄소 배출량을 줄일 수 있는 에너지 절약 및 에너지 효율 향상, 둘째 신재생 에너지나 원자력의 저탄소 연료로의 전환, 셋째 발생한 이산화탄소의 포집저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 기술, 산림이나 바다 흡수원 등의 생태 또는 생물학적 처리 기술 등이 있다. 이산화탄소 감 축 목표치를 달성하기 위하여서는 동원할 수 있는 모든 기술이 사용되어야 한다.

여기서는 이산화탄소 저감 기술 분야에 대해 언급하고 특히 세라믹스 소재가 사용되는 기술에 관해 기술하고자 한다.

2. 이산화탄소 저감 세라믹 소재

2.1. 에너지 절감 및 효율 향상 관련 기술

에너지 절감에 의한 이산화탄소의 저감관련 세라믹스 로 단열재가 있으며 크게 건축용과 산업용으로 구분하고 있다. 단열소재로서 사용하기 위해서는 폐기공(closed pore)이나 개기공(open pore)의 형상 제어, 기공의 크기 및 분포의 최적화가 필요하다. 이들 기공에 의해 열전도 도가 0.04 kcal/m · h · K 이하로 유지되며 방음 및 흡음 의 기능을 가지게 된다. 산업재에 사용되는 단열재는 1200℃ 이상의 내열성을 가지게 된다. 기공의 존재에 의 해 응용시에 강도저하를 해결해야 하며 이를 위해 표면 개질이나 코팅 기술들이 접목되고 있다. 소재, 밀도 및 구조제어가 단열재의 핵심개발 요소이며 50% 이상 에너 지를 절감하여 이산화탄소를 줄이는데 기여한다.

고온에서 열차폐 성능을 가지는 코팅소재 및 공정개발 이 진행되고 있으며, 내열 작동온도는 1400℃ 이상이며

열전도도는 $1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이하의 특성을 가진다. 코팅막의 제어를 위해 마이크로/나노 복합구조의 막이 연구되고 있으며 치밀화 억제 기술, 부착성 강화, 산화막 제어가 요구된다. 고효율 엔진 및 발전용 기능성 코팅은 연간 7000억원의 시장을 형성하고 있으며, 이들 코팅막에 의해 에너지 효율 10~20% 향상, 내구수명 향상의 특성을 보인다.

이외에 이산화탄소의 발생을 억제하는 기술로 태양광, 풍력 등의 신재생에너지 분야, LED 등의 에너지 효율 향상 소재, 화학분야의 신반응, 신분리, 촉매의 소재, 미활용 에너지 활용기술로 열교환기, 열 저장/수송 등의 기술분야가 있다.

2.2. 탄소포집 및 저장(CCS) 관련 기술

이산화탄소 포집저장기술의 기본적인 개념은 이산화탄소를 포집(capture)하여 이를 대기 중으로 방출시키지 않고 처리하는 방법인 격리(sequestration) 또는 저장(Storage)하는 기술을 총칭하는 것으로 일반적으로 CCS (Carbon Capture and Storage)라고 한다. 일반적으로 포집분야는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 연소 후(post-combustion), 연소 전(pre-combustion), 순산소 연소(oxfuel combustion) 기술로 분류하고, 저장분야는 지중, 해양 기술로 분류한다. 이전에 건설된 발전소에는 연소후 포집 기술이 적용 가능하므로 단기시장은 연소후 기술 시장이

나 장기적으로는 경제성이 높은 연소 전, 순산소 연소 기술 시장도 성장할 것이다.¹⁾ IEA(International Energy Agency)에서는 발전 및 산업부분에 CCS를 적용함으로써 전체 감축 목표량의 19%를 달성할 것으로 예상하고 있다. 주요시장이 될 산업분야는 대규모 CO₂ 고정 배출 원인 화력발전소에 우선 적용될 것이며 점차 시멘트산업, 철강산업, 정유산업, 석유화학산업, 석유 및 가스산업 등으로 시장이 확대될 것이다. 온실가스의 감축 필요성에 따라 CCS 세계 시장규모는 2030년에 4,500억불로 성장할 것으로 예상되고 있다.

연소 후 포집은 기존의 발전소 중에서 발생하는 배기가스의 일부에서 이산화탄소를 회수하는데 사용한다. 연소 전 포집에 필요한 기술은 비료생산과 수소생산에 많이 사용되고 있다. 비록 연소전의 초기 연료전환과정이 더 복잡하고 비용이 더 들지만 가스기류 중에 이산화탄소 농도와 압력이 높기 때문에 분리하는 더 쉽다. 순산소 연소는 pilot plant 규모로 실증되는 시범화 단계에 있으며 공기 대신 고순도 산소를 사용한다. 그 결과 가스기류 즉 배가스 중의 이산화탄소 농도가 높아지므로 이산화탄소의 분리는 더 쉬워지지만 공기로부터 산소를 분리하는데에 더 많은 에너지를 소모한다.

2.2.1. 연소 후 기술

연소 후 포집기술은 연료를 연소시킨 후 발생하는 혼

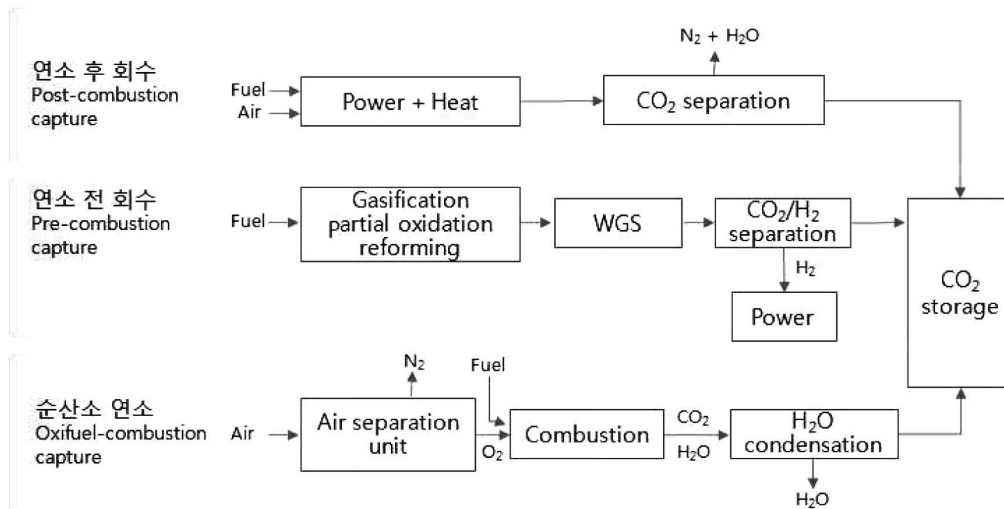


Fig. 1. Classification of CO₂ capture method.

합 배기가스 중에서 이산화탄소만을 포집하는 기술로 이산화탄소의 농도가 적게 포함된 경우에 효과적이다. 연소 후 기술에는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 분리/포집 공정에 따라 흡수법(absorption), 흡착법(adsorption), 막분리법(membrane), 침냉법(cryogenics) 등의 기술이 있다. 연소 후 기술에 대한 연구는 오랜 시간 동안 진행되어 왔으며 amine계 용매를 이용한 이산화탄소의 화학흡수 기술은 전 세계적으로 pilot plant 규모의 장치가 가동 중에 있다. 이 기술은 기존의 이산화탄소 배출 공정을 변경하지 않고 처리할 수 있는 장점이 있으나 고비용, 고에너지 소비 공정으로 대규모 장치가 필요한 단점이 있다. Amine을 이용한 화학 흡수법의 비용은 \$40~60/tCO₂로 여러 가지 CCS 기술 중에서 가장 저렴한 것으로 인식되고 있다.

이산화탄소와 화학반응이 가능한 흡수제를 이용하여 이산화탄소를 화학 흡수 시킨 후 탈기 과정을 거쳐 회수하는 공정이다. 사용되는 흡수제로는 MEA(Monoethanolamine), DEA(Diethanolamine)가 15~30% 농도로 물 등에 희석하여 사용된다. 일반적으로 이산화탄소가 20% 이하인 경우에 경제적이며 흡수력이 강한 대신 이산화탄소를 탈기하기 위한 에너지 소모가 크다. 또한 탈기시 발생하는 탈기열에 의한 흡수제의 열화가 일어나며, 반응 부산물에 의한 장치 부식, 흡수제의 증발 등의 단점이 있으나 현재 가장 경제적으로 적용 가능한 기술이다.

Amine계 흡수제를 이용한 화학흡수법 이외에 물리 흡수법이나 분리막을 이용한 방법이 고압공정에서 상업화의 가능성이 있어 연구가 진행 중이다. 물리 흡수(physical absorption)법은 약 산성인 이산화탄소를 염기성 유기용매인 sulfolane, propylene carbonate, methanol 등을 이용, 물리적으로 용해하여 흡수하는 방법으로 최신의 용매제가 개발되고 있다. 용매의 재생공정이 필요하며 높은 이산화탄소 부분압, 고온, 고산성도 조건에서 유리하며 화학 흡수법보다 에너지 소모가 적으나 고가인 단점이 있다.

암모니아를 기본 물질로 한 습식포집기술은 아민법과 비슷하며, 암모니아와 중간생성물인 ammonium carbonate가 CO₂, H₂O와 반응하여 ammonium bicarbonate를 만든다. 이 반응열은 아민 시스템보다 훨씬 작다. 또 다른 장점은 이산화탄소 흡수능이 높고, 흡수/재생시 성능 저하가 작고, 배가스의 산소에 저항이 강하며, 저렴, 고압 재생 가능을 들 수 있다. 단점은 높은 휘발성으로 인해 15~27°C로 냉각하여야 하며, 흡수보다 높은 재생온도의 휘발을 줄여야 한다.

흡수된 용매제에서 이산화탄소를 탈기하는데 비용 절감과 유기 흡수제의 재생열, 부식 등의 문제를 극복하기 위하여 KHCO₃를 세라믹에 결합시킨 건식 흡수제가 개발되었다. 이들은 고흡수성, 고강도, 고밀도를 가지며 흡수공정의 우수성을 보이고 있어 잠재력이 있는 방법으로

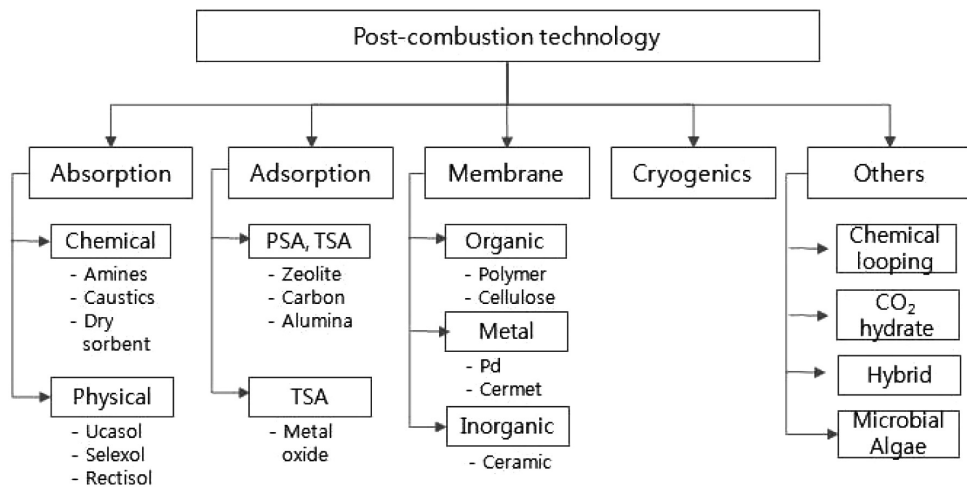


Fig. 2. Classification of post-combustion technology for CO₂ capture.

평가되고 있다.²⁾

고체 입자를 사용하여 이산화탄소와 반응하여 안정된 화합물로 변환하고 다른 조건에서 이산화탄소를 배출하여 원래의 화합물로 재생되는 건식흡수제 기술이 개발되고 있다. 흡착제인 탄소계 물질인 활성탄이나 제올라이트, 세라믹에서 이산화탄소 혼합가스를 가압하여 선택적으로 흡착시킨 뒤 흡착층을 감압하거나 가열 또는 전기 에너지를 이용하여 흡착제를 재생하는 방법이 개발되고 있다. 이 공정은 가압, 흡착, 감압 및 탈착의 단계를 가지며, 탈착가스의 온도가 높고 진공압력비가 클수록 가스의 회수율과 순도가 증가하지만 에너지 소비가 증가하는 단점이 있다. 건식흡수제의 개발은 1990년대 후반에 시작되었으며, 건식, 재생 가능하며, 지지체를 갖는 값싼 탄산나트륨(소다회)을 사용하였다. 이 물질이 CO₂, H₂O와 반응하여 중탄산나트륨을 생성한다. 재생 반응기에서 온도를 올려 원래의 상태로 재생하며, 여기서 물을 응축하면 이산화탄소는 다른 분야로 응용하거나 저장할 수 있게 된다.

탄소계 흡착제로는 활성탄이 많이 사용되고 있다. 활성탄은 유기성 물질을 탄화하여 고정탄소를 얻고 생성된 기공을 활성화 과정을 통하여 보다 확대시킨 다공성 탄소소재로서 입자의 크기 및 성상에 따라 입상, 분말, 성형, 활성성유 등으로 구분할 수 있다.³⁾ 활성탄이 높은 흡착력을 가지기 위해 넓은 비표면적과 미세기공이 잘 발달된 구조가 필요하다. 활성탄 출발물질로는 무연탄, 왕겨, 참나무, 아자껍질 등의 다양한 물질이 사용되고 있다. 탄화공정 이후에 활성화 공정에 의해 제조되는데 활성화 방법으로는 수증기나 이산화탄소를 이용한 기체활성화법과 KOH, ZnCl₂, H₃PO₄ 등을 사용하는 활성화법이 있다.⁴⁾

막분리법은 이산화탄소가 포함된 배기가스를 유기막(고분자 소재)이나 세라믹막 또는 액막으로 통과시켜 고순도 이산화탄소만을 선택적으로 분리하는 방법이다. 핵심기술은 막 소재의 개발로 기존의 화학 및 물리 흡착법보다 설치비용 및 운전비용이 저렴한 공정이다. 이산화탄소는 분리시 상변화를 동반하지 않아 에너지 효율이 높고 유해물질 배출이 없는 환경친화형 기술이다. 막의

투과 속도 향상과 모듈화에 의해 설비의 규모를 줄일 수 있고 설비 조작성이 용이한 장점이 있으나 연구 초기 단계에 있다. 가공성의 세라믹 소재인 제올라이트, 알루미늄, 탄소 분리막의 경우 분리 성능이 개선되어 선택도 50, 투과도 10⁻⁶ mol/m² · sec · Pa의 분리 성능을 가지게 되었다. 그러나 다공성 세라믹막의 경우 온도 증가 시에 급격한 선택도 감소가 발생되며, 대면적 막 제조가 어려운 단점을 가지고 있다.

심냉법은 90% 이상의 고농도 이산화탄소를 포함하는 가스를 가압, 냉각하여 CO₂를 액화, 분리하는 기술로 많은 에너지가 필요하나 이산화탄소의 저장 운송을 위해서 필요한 공정이다.

이 밖에 금속 산화 환원연소(chemical-looping combustion), CO₂ hydrate 및 혼성분리(hybrid separation) 공정 등에 대해서 초기 연구 단계에 있다.

2.2.2. 연소 전 기술

연소 전 기술은 석탄, 천연가스 등의 연료를 직접 연소하기 전에 연료 중에 있는 탄소성분을 수증기 개질(steam reforming), 부분산화(partial oxidation) 또는 자열개질반응(autothermal reforming) 등을 통해 가스화(gasification) 시킨 후 최종 수성가스 전환반응(WGS, water gas shift)을 통해 고온, 고압의 CO₂/H₂ 혼합가스를 생산하여 이들을 분리하거나 또는 연료로서 연소시켜 물과 이산화탄소로 전환하여 CO₂를 용이하게 분리하는 공정이다.

주로 수소 생산을 위해 기존에 이용되어 왔던 공정을 이산화탄소 포집에 응용하기 위해 연구가 진행 중에 있다. 석탄이나 천연가스 등을 연료로 사용하는 미분탄(pulverized coal) 화력발전소, 가스화 복합발전소(IGCC, Integrated gasification combined cycle)에 효율적으로 응용가능하다.

이 기술의 장점으로는 연소 후 기술보다 배출되는 이산화탄소의 농도가 높아 흡수제를 이용한 효율이 높으며 수소에너지 시대에 대비한 적응기술로 전기 생산용 수소 이외에 이용 가능한 수소를 얻을 수 있다. 단점으로는 연료개질이 필요하며, 불순물 제거 및 WGS 반응이 필요하

다. 또한 수소를 주 연료로 하는 터빈 개발이 필요하며 고온의 이산화탄소가 생성되어 compact한 장치를 필요로 한다.

고온에서 이산화탄소를 흡수할 수 있는 세라믹 소재에 대한 관심이 높아지고 있다. 고온에서 이용할 수 있는 흡착제에는 CaO계(dolomite, limestone, CaO에 다른 성분이 첨가된 $\text{CaO}/\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ 와 $\text{CaO}/\text{Y-Al}_2\text{O}_3$), Li_2ZrO_3 와 같은 alkali metal 합성물질계(Li_2ZrO_3 , Na_2ZrO_3 , Li_4SiO_4), hydrotalcite계의 세가지로 분류될 수 있다.^{5,6)} Li_4SiO_4 혼합산화물은 250~550°C의 온도, CO_2 농도가 2~20%에서 효과적인 습수제로 H_2S 가 있는 조건에서도 성능을 나타내고 있다. 초기의 Li계의 Li_2ZrO_3 흡수제는 500°C 흡수, 700°C 재생이 가능하며, CaO 흡수제(800°C 흡수, 950°C 재생) 보다 낮은 온도에서 CO_2 를 흡수/재생할 수 있었다.⁷⁾ Lithium orthosilicate 흡수제는 lithium zirconate보다 CO_2 흡수능(22 wt%)과 속도(60 mg of CO_2/min)가 우수하다고 보고되었다. Hydrotalcite계 흡착제는 촉매 및 촉매의 지지체로 이용되어 오다가 최근들어 고온에서의 이산화탄소 흡착능에 의해 주목받고 있다. 이산화탄소의 흡착능은 크지 않지만 안정성과 kinetic 측면에서 우수하다. 또한 재생온도가 상대적으로 낮고(~550°C), K_2CO_3 와 같은 alkali metal을 첨가하여 흡착능을 증가시킬 수 있다.⁸⁾

연소전 이산화탄소 분리막에 대한 관심이 높아지면서

여러 나라에서 분리막의 소재 및 공정기술을 개발 중에 있다. 우리나라의 경우 최근 한국에너지기술연구원을 중심으로 연소전 이산화탄소 분리 연구단이 조직되어 고압 공정의 H_2/CO_2 혼합가스에서 이산화탄소를 분리하는 연구가 진행 중에 있다. 분리막의 재질은 Pd계인 금속, 고분자, cermet, proton 전도체의 세라믹이 있으며 이들 개발되는 분리막을 적용한 통합공정이 연구 중이다.⁹⁾ 세라믹 분리막의 경우 수소와 이산화탄소 혼합기체에서 수소를 분리하는 것으로 기존의 다공성 분리막이 연구되었으나 최근에는 치밀질의 분리막이 개발되고 있다. Fig. 3은 다공성 지지체(support) 위에 perovskite 구조를 가지는 $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_3$ 분리막을 코팅하는 방법으로 AD(Aerosol Deposition)의 모식도와 코팅된 분리막의 SEM 관찰사진을 나타내었다. AD는 저온에서 코팅이 이루어지며, substrate와 코팅층 사이의 열팽창계수 차이에 의한 균열이 적고 화학반응 없이 균일한 코팅이 가능한 장점을 가진다. 치밀질 분리막은 다공성의 기공에 의한 분리가 아닌 분리막을 수소의 proton이 이동해서 분리되는 mechanism으로 고순도의 수소 분리가 가능하다.¹⁰⁾

2.2.3. 순산소 연소 기술

순산소 연소는 연료를 공기로 연소하기 전에 공기 분리장치를 이용하여 산소만을 분리 생산하여 순산소(95% 이상)로 연료를 연소시킴으로써 배출되는 이산화탄소의

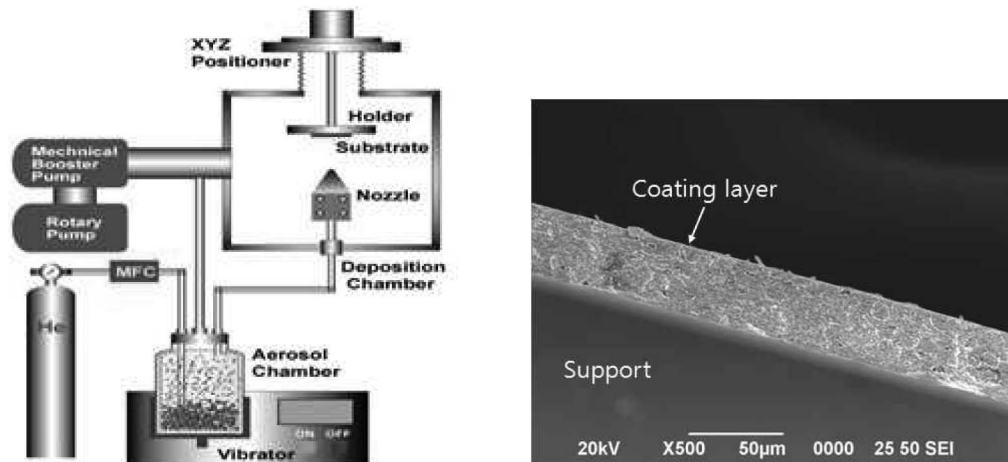


Fig. 3. Schematic diagram of aerosol deposition method and SEM micrograph of ceramic membrane for CO_2 separation.

농도를 극대화하여 이산화탄소 포집 효율을 높이는 기술이다. 이 기술은 오래 전부터 유리공업이나 철강공업에서 사용되어 왔으며 최근에 석탄 발전에 응용하는 연구로 이산화탄소 포집에 의한 IGCC에 적용하는 공정이 개발되고 있다.

이 기술의 장점은 100%에 가까운 이산화탄소 회수가 가능하며 이산화탄소의 농도가 높아 저장이 용이하다. 배출가스의 부피를 줄일 수 있어 배출가스로 인한 에너지 소모를 줄이고 가스의 세척과 분리에 소용되는 에너지 소모를 줄이며 기존 발전소에 공정을 추가하여 적용할 수 있다. 이에 비해 산소 제조 비용이 비싸며 CO₂/O₂의 혼합가스로 가동되는 가스터빈이 개발되어야 하는 단점이 있다.¹¹⁾

현재 순산소 연소 기술은 전 세계적으로 활발히 연구되고 있으나 이산화탄소 포집을 위해 적용된 사례가 없다. 미국, 캐나다, 일본을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 우리나라에서도 철강산업과 화력발전소에 적용하는 연구가 진행되고 있다.

2.3. 기타 이산화탄소 저감 기술

습식흡수법에서 흡수용액의 주기적 보충, 설비부식 방지, 이차생성물 방지 등의 보완방법으로 Li₄SiO₄가 담지된 하니컴 휠을 사용한 회전식 이산화탄소 건식흡수 방법이 연구되고 있다.¹²⁾ 하니컴은 표면적이 넓기 때문에 배가스와 흡수제의 반응성이 우수하다. 또한 유체의 압력손실이 적으며 장치를 compact하게 구성할 수 있기 때문에 경제적인 이산화탄소 회수공정이 실현될 수 있다.

대규모 수소생산의 하나로 매장량이 풍부한 석탄을 이용하는 가스화 발전에서 석탄을 가스화하여 생성된 합성가스에서 이산화탄소와 수소를 분리하여 사용하게 된다. 하지만 이때 열역학적 평형의 한계 때문에 높은 전환율 달성이 어렵고 생성가스에 수소 이외의 다른 가스성분이 포함되어 에너지가 많이 필요하다. 반응부산물로 생성되는 이산화탄소를 반응과 동시에 흡착에 의해 제거하게 되면 반응은 수소를 포함하는 생성물로 치우치게 되어 정반응의 속도가 빨라진다. 하나의 반응기 내에서 반응과 분리가 동시에 이루어 지게 되어 시스템의 크기를 줄

일 수 있으며 이산화탄소를 효과적으로 회수할 수 있다. 최근에 반응/분리 동시공정에 대한 관심이 높아지는데 분리 공정에 세라믹 소재의 분리막을 적용하는 기술이 연구되고 있다. 반응의 촉진을 위해 촉매가 코팅된 분리막을 제조하고 반응이 이루어진 기체는 분리막을 통해 분리되어 공정이 간단해지는 장점이 있다.

3. 결론

기후변화에 대응하기 위해 전 세계가 다양한 방법으로 이산화탄소를 회수, 저장, 이용하기 위한 기술개발에 나서고 있다. 이산화탄소를 저감하기 위한 기술로는 발생량을 줄일 수 있는 에너지효율 향상 소재, 신재생에너지 등과 같은 감축기술과 여러 분야에서 이미 발생한 이산화탄소를 포집 및 저장하는 기술, 이산화탄소를 메탄올, 폴리머 원료와 같이 변환하는 기술들이 있다. 지구온난화를 억제하기 위해서는 이러한 다양한 기술이 함께 개발되어야 한다.

현재의 이산화탄소 저감기술은 상용화를 위해 공정비 저감이 필수적이다. 이산화탄소 발생을 줄이거나 에너지 효율 향상, 발생한 이산화탄소의 포집 및 저장, 이산화탄소의 전환응용기술 등에서 많은 혁신이 필요하다. 기존의 이산화탄소 저감 소재들이 액상이나, 고분자가 대부분이었으나 고온/고압에서의 적용성, 장수명의 특징을 가지는 세라믹스의 응용가능성이 높아지고 있다. 기존의 소재를 대체할 수 있는 혁신기술로서 세라믹스 개발이 기대된다.

이산화탄소 포집/저장기술(CCS)은 신재생에너지가 상용화하기 전 이산화탄소를 저감할 수 있는 대안으로서 개발되고 있으며 이산화탄소 저감분야의 19%를 담당할 것으로 예상되고 있다. 이 기술은 초기에 석탄이나 IGCC 등의 발전분야에서 먼저 적용될 것이다.

이산화탄소 저감 산업은 이제 시작되는 분야로 산학연관의 협력이 필요하며 신기술의 개발에 의해 신성장 동력 창출 및 세계시장 선점을 위한 노력이 있어야 한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(2008-C-CD11-P-10-0-0000)으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. C. K. Yi, "Advances of Carbon Capture Technology", *KIC News*, **12** [1] 30-42 (2009).
2. S. Lee, H. Chae, S. Lee, B. Choi, C. Yi, J. Lee, C. Ryu, and J. Kim, "Development of Regenerable MgO-based Sorbent Promoted with K₂CO₃ for CO₂ Capture at Low Temperatures", *Environ. Sci. Technol.*, **42** 2736-40 (2008).
3. Y. C. Bak, K. J. Cho and J. H. Choi, "Production and CO₂ Adsorption Characteristics of Activated Carbon from Bamboo by CO₂ Activation Method", *Korean Chem. Eng. Res.*, **43** [1] 146-52 (2005).
4. G. Vicente, S. Francisco, and V. Cristobal, "Penetration of Sodium Catalysts in Activated Carbon", *Fuel*, **70** [9] 1083-90 (1991).
5. K. Nakagawa and T. Ohashi, "A novel Method of CO₂ Capture from High Temperature Gases", *J. Electrochem. Soc.*, **145** 1344-49 (1998).
6. R. Xiong, J. Ida, and Y. Lin, "Kinetics of Carbon Dioxide Sorption on Potassium-doped Lithium Zirconate", *Chem. Eng. Sci.*, **58** 4377-80 (2003).
7. A. Iwan, H. Stephenson, W. C. Ketchie, and A. A. Lapkin, "High Temperature Sequestration of CO₂ Using Lithium Zirconates", *Chem. Eng. J.*, **146** 249-58 (2009).
8. K. B. Lee, "Sorption Enhanced Reaction Process", *NICE*, **27** [4] 454-58 (2009).
9. Precombustion Membrane Research Center homepage, www.pcm.re.kr
10. Y. S. Park, J. H. Kim, J. H. Kim, M. S. Byoun, and K. T. Hwang, "Synthesis of BCY Ceramic Membrane for Hydrogen Separation by Aerosol Deposition Method", *Abstract of The Kor. Hydrogen and New Energy Soc.*, 231-34 (2009).
11. J. Figueroa, T. Fout, S. Plasynski, H. McIlvried, and R. Srivastava, "Advances in CO₂ Capture Technology", *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **2** 9-14 (2008)
12. Y. J. Yoo, H. S. Kim, J. H. Park, S. S. Han, and S. H. Cho, "Preparation of Honeycomb Adsorbent for Carbon Dioxide Adsorption and Its Characteristics", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **18** [3] 273-78 (2007).

●● 황광택



- 1997년 한양대학교 무기재료공학과 박사
- 1998년 산업기술시험원 Post-Doc.
- 1999년 Lawrence Berkeley Lab. Post-Doc.
- 2000년 한국세라믹기술원 책임연구원

●● 김진호



- 2004년 KAIST 신소재공학과 박사
- 2004년 삼성종합기술원 책임연구원
- 2009년 한국세라믹기술원 선임연구원