

## 분리막을 이용한 공기 중 이산화탄소 제거 기술

유 승 연 · 박 호 범<sup>†</sup>

한양대학교 에너지공학과

(2020년 6월 11일 접수, 2020년 6월 18일 수정, 2020년 6월 18일 채택)

### Membrane-based Direct Air Capture Technologies

Seung Yeon Yoo and Ho Bum Park<sup>†</sup>

Department of Energy Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received June 11, 2020, Revised June 18, 2020, Accepted June 18, 2020)

**요 약:** 전 세계 화석 연료 사용이 지속적으로 증가함에 따라 공기 중 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도가 수 세기에 걸쳐 증가하고 있다. 대기로의 CO<sub>2</sub> 배출을 줄이기 위한 방법으로, 주요 배출원인 발전소와 공장에 적용할 수 있는 이산화탄소 포집 및 저장(carbon capture and sequestration, CCS) 기술이 개발되고 있다. 기후 변화 완화 정책에 따라 negative emission 기술로 언급되는 공기 중 CO<sub>2</sub> 직접 포집 기술(direct air capture, DAC)은 CO<sub>2</sub> 농도가 0.04%로 매우 낮기 때문에 기존의 CCS 기술에 적용된 기술과 달리 흡착제를 이용한 저농도 CO<sub>2</sub> 포집 연구에 집중되어 있다. DAC 분야는 주로 CO<sub>2</sub>의 흡착을 이용한 습식 흡착제, 건식 흡착제, 아민 기능화된 소재, 이온교환 수지 등이 연구되었다. 흡착제 기반 기술은 흡착제 재생에 따른 고온 열처리 공정이 필요하기 때문에 추가적인 에너지 소모가 없는 분리막 기반의 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 기술의 잠재력이 크다. 분리막은 특히 실내 공기 CO<sub>2</sub> 저감 환기 시스템 및 실내용 스마트팜(smart farm) 시스템의 연속적인 CO<sub>2</sub> 공급에 사용될 수 있을 것으로 기대된다. CO<sub>2</sub> 처리 기술은 기후 변화를 완화하기 위한 수단으로 개발이 지속되어야 하며 효율적인 공정 설계와 소재 성능 향상을 통해 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집의 효율을 높일 수 있을 것이다.

**Abstract:** As the demand for fossil fuels continues to increase worldwide, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration in the air has increased over the centuries. The way to reduce CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere, carbon capture and sequestration (CCS) technology have been developed that can be applied to power plants and factories, which are primary emission sources. According to the climate change mitigation policy, direct air capture (DAC) in air, referred to as “negative emission” technology, has a low CO<sub>2</sub> concentration of 0.04%, so it is focused on adsorbent research, unlike conventional CCS technology. In the DAC field, chemical adsorbents using CO<sub>2</sub> absorption, solid adsorbents, amine-functionalized materials, and ion exchange resins have been studied. Since the adsorbent-based technology requires a high-temperature heat treatment process according to the adsorbent regeneration, the membrane-based CO<sub>2</sub> capture system has a great potential. Membrane-based system is also expected for indoor CO<sub>2</sub> ventilation systems and immediate CO<sub>2</sub> supply to smart farming systems. CO<sub>2</sub> capture efficiency should be improved through efficient process design and material performance improvement.

**Keywords:** carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), direct air capture (DAC), negative emission technology (NET), membrane-based CO<sub>2</sub> capture

#### 1. 서 론

현재의 산업구조는 주로 화석 연료의 사용에 의존하고 있으며 이러한 화석 연료의 연소는 자연의 탄소 순

환을 증가하는 수준의 온실가스(greenhouse gases)를 배출한다. 이로 인해 해수면 상승, 표면 온도 상승 등의 기후 변화가 발생하였고 이를 억제하기 위한 노력이 지속되고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(The inter-

<sup>†</sup>Corresponding author(e-mail: [badtzhb@hanyang.ac.kr](mailto:badtzhb@hanyang.ac.kr), <http://orcid.org/0000-0002-8003-9698>)

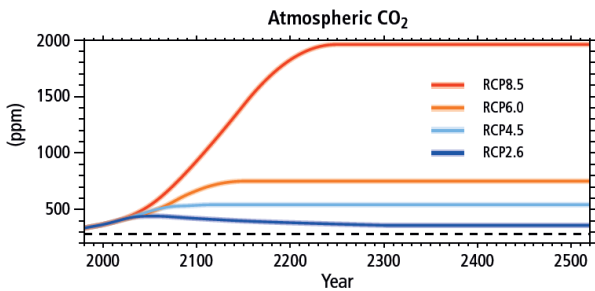


Fig. 1. Atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration for four representative concentration pathways (RCPs) up to 2300[1] (Copyright 2014, IPCC).

governmental panel on climate change, IPCC) 보고자료에 따르면, 온실 가스 중 이산화탄소 배출량은 매년 꾸준히 증가하여 공기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 산업화 이전보다 130 ppm 이상, 10년 전보다 25 ppm 이상 증가하여 2020년 현재에는 417 ppm에 도달했다(Fig. 1)[1-3].

CO<sub>2</sub> 배출을 억제하려는 노력으로 화석 연료 기반의 발전소, 시멘트 공장, 정유 공장과 같은 대형 공장에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 제거를 위해 이산화탄소 포집 및 저장(carbon capture and sequestration, CCS)이 제안되고 있다. CCS 기술은 연소 가스로부터의 CO<sub>2</sub> 포집, 파이프라인으로의 CO<sub>2</sub> 수송, 그리고 CO<sub>2</sub> 저장의 단계로 나눌 수 있다. CCS 기술 중 CO<sub>2</sub> 포집 기술은 전체 비용의 70% 이상을 차지하고 연소 전 포집(pre-combustion capture), 순산소 포집(oxy-fuel), 연소 후 포집(post-combustion capture)로 분류된다.

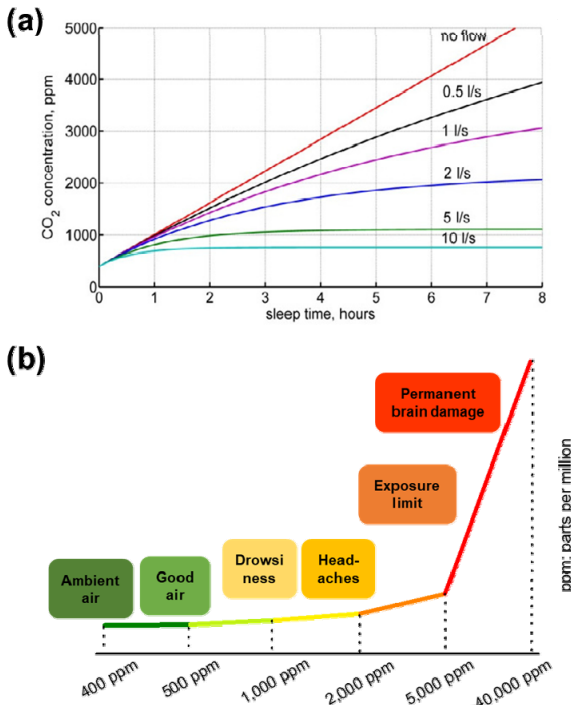
연소 전 포집 공정은 석탄을 천연가스 또는 합성가스로 변환해 수증기 개질, 수성가스 전이 반응을 이용한다. CO<sub>2</sub>를 제거하며 생산된 H<sub>2</sub>를 통해 전기를 생산할 수 있고 주입 CO<sub>2</sub> 농도가 높아 포집이 비교적 쉬우나, 수증기 개질 등 공정비용이 높은 측면이 있다. 순산소 연소법은 공기 대신 순수한 산소를 연료를 연소하기 때문에 수증기 응축 뒤 CO<sub>2</sub> 포집 농도를 최대 90%까지 증가시킬 수 있다. 그러나 순수한 산소를 얻기 위해 공기 중 질소를 분리하는 전력비용이 크다는 단점이 있다.

연소 후 포집 기술은 기존 발전소의 연소 배가스에서 CO<sub>2</sub>를 분리하는 방법으로 흡수법, 흡착법, 분리막 등이 사용된다[4]. 주입 CO<sub>2</sub> 농도가 14% 이내의 범위로 낮고 SO<sub>x</sub> 및 NO<sub>x</sub>와 같은 불순물 제거 단계가 필요하지만 기존 연소 가스 배출 공정에 적용하기 가장 용이한 기술이다. 주로 사용되는 MEA (mono-ethanol amine), DEA (di-ethanol amine) 기반의 아민 흡수 기술은 CO<sub>2</sub> 포집

효율이 높지만 액체 아민의 부식성, 아민 흡수제 소실 등에 따라 재생 공정에서 추가적인 에너지가 소비되는 문제가 있다[5]. 건식 흡착제는 제올라이트, 다공성 실리카, 금속유기구조체(metal organic framework, MOF)을 이용해 CO<sub>2</sub>를 흡착하고 재생 공정에서의 에너지 효율이 높지만, 흡착제의 성능에 의존하여 흡착 효율이 낮다. 분리막은 연소가스에 포함된 수분, 산성 물질에 의해 적용이 쉽지 않으나 재생 공정이 필요하지 않아 에너지 효율적이며 폐수 등 유해 물질의 배출이 없는 친환경적인 공정이다[6]. 또한 흡착제, 흡수제 공정에 비해 분리막 설비 규모가 작기 때문에 기존 연소 가스 배출 공정에 적용될 수 있는 가능성이 높아 다양한 막소재를 이용한 분리막 공정이 연구되고 있다[7,8].

## 2. 공기 중 CO<sub>2</sub> 직접 포집 기술(Direct air capture technology)

IPCC는 공기 중으로의 온실 가스의 과도한 배출이 기후 변화의 주요 원인이며 현재 인류는 연간 15 Gt의 CO<sub>2</sub>를 추가적으로 배출한다고 보고하고 있다[1]. 또한 파리 협정에 따라 지구온도 상승의 폭을 1.5°C로 제한하기 위해서는 “net-zero emission” 정책이 필요하며 이를 위해서는 배출 흡수(negative emission)를 해야 한다고 강조한다[9]. 배출 흡수 기술로 공기 중 CO<sub>2</sub> 직접 포집, 알칼리도 상승을 위한 구름 처리, 풍화작용 촉진 등이 언급되고 있다. 공기 중 CO<sub>2</sub> 직접 포집 기술은 CCS 기술에 비해 포집 CO<sub>2</sub>의 순도와 회수율이 낮을 수 있지만, 연소 가스에 비해 공기 중 SO<sub>x</sub> 및 NO<sub>x</sub>와 같은 오염물질의 농도가 낮기 때문에 불순물 제거 단계가 필요하지 않다. 공기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 전 세계적으로 평균을 유지함에 따라 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 시설은 어느 곳이나 배치할 수 있어 위치의 제한이 없다. 따라서 CCS 기술이 적용되는 대규모 배출원인 발전소 및 시멘트 공장뿐만 아니라 가정 및 사무실, 운송 부분 등 소규모로 분산되어 있는 배출원의 CO<sub>2</sub>를 포집할 수 있는 시스템으로의 잠재성이 크다[10]. 또한, 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 시스템은 자동차, 비행기와 같은 분산된 이동수단의 CO<sub>2</sub> 배출을 억제하기 위한 다양한 선택지를 제공할 수 있다[11]. 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 기술은 친환경적일 뿐만 아니라 잠재적인 탄소 공급원으로써의 이점을 갖고 있다. 장기적으로 CO<sub>2</sub>를 저장하고 저장하여 기후 변화에 대응할 수 있으며, 단기적으로는 포집한 CO<sub>2</sub>를 온실이나 비닐



**Fig. 2.** (a) CO<sub>2</sub> concentration in a room (V = 21 m<sup>3</sup>) during 8-hour sleep of one person[13], (b) Effect of CO<sub>2</sub> on the human body (Copyright 2013, Elsevier).

하우스로의 공급을 통한 식물 성장 향상, 바이오연료 생산 및 화학제품 생산 공정에 활용될 수 있다[12].

한편 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 기술은 실내 공기 질 제어 시스템에 활용될 수 있다. 도시화로 인한 생활양식의 변화로 실내 생활 비율이 증가함에 따라 실내 공기 질 관련 문제가 부각되고 있다. 인간은 숨을 들이마실 때 500 mL의 공기를 마시고 내쉬는 숨의 3~5% 정도인 27 mL의 CO<sub>2</sub>를 배출한다. 인간은 1분에 12번 숨을 쉬어 1시간에 19 L의 CO<sub>2</sub>를 배출하며 하루에 1 kg, 연간 340 kg의 CO<sub>2</sub>를 배출한다. 미세먼지, 바이러스 등 실외의 유해 물질 문제에 따라 실내 공기의 환기를 자유롭게 할 수 없는 상황에서, 쾌적한 주거 및 근무환경을 위한 실내 CO<sub>2</sub> 제어에 대한 요구가 증가하고 있다. 실내 공기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 인체에 미치는 영향으로는 1,000 ppm 이상에서는 불쾌감을 느끼며, CO<sub>2</sub> 농도 2,000 ppm 이상에서는 졸음 및 두통을 느끼게 된다. CO<sub>2</sub> 5,000 ppm은 인간의 건강에 영향을 직접적으로 줄 수 있는 노출 한계의 수치이며 40,000 ppm을 넘어가면 날숨의 농도와 같게 되어 폐에서 산소와 이산화탄소의 교환이 정지하게 된다[Fig. 2(b)]. Batog은 21 m<sup>3</sup>의 공간에서 수면시간

및 환기량에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 계산하였고, 환기가 없을 경우 수면시간 증가에 따라 CO<sub>2</sub> 농도가 5,000 ppm까지 증가할 수 있다고 보고하고 있다[Fig. 2(a)][13].

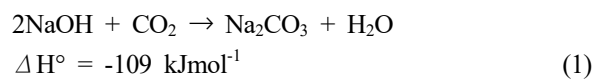
실내 면적이 40 m<sup>3</sup>인 방에서 4인 가족이 특별한 환기장치 없이 재실하고 있을 경우 실내 이산화탄소 농도는 3시간 후 5,000 ppm을 초과하고 5시간 후 10,000 ppm에 도달하게 된다. 집뿐만 아니라 지하철, 학교 등 좁은 공간에 사람이 많이 모일 경우 또는 환기가 어려운 잠수함, 우주선 등에서 이산화탄소 농도가 급격히 증가하기 때문에 실내 CO<sub>2</sub>를 저감할 수 있는 환기 시설이 필요하다.

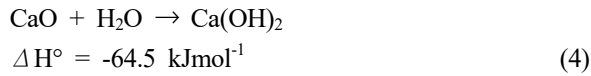
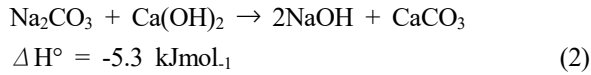
### 3. 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 기술 소재

#### 3.1. 흡착제 기반 CO<sub>2</sub> 포집

연소 가스 포집 CCS 기술에서 연구된 소재들이 DAC 분야에 적용될 수 있지만 공기 중 CO<sub>2</sub>의 농도가 0.04%로 매우 낮기 때문에 CO<sub>2</sub>와 친화력이 강한 화학적 흡착제가 일반적으로 CO<sub>2</sub> 포집에 사용된다. 제올라이트, 활성탄, 금속유기구조체 등의 물리적 흡착제는 대기압의 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집에서 낮은 흡착 성능을 보인다. MEA 기반 아민 흡수법은 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집에서도 효율적으로 작용하지만 아민 누출, 아민 흡수제 증발 등의 문제를 해결해야 한다.

공기 중 CO<sub>2</sub> 포집을 위한 흡착 기술은 주로 알칼리 및 알칼리 토금속 수산화물의 가성화 반응을 이용한 흡착 사이클로 진행된다. 공기 중 CO<sub>2</sub>와 높은 결합 에너지를 갖는 강염기로는 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)을 형성하는 수산화칼슘[Ca(OH)<sub>2</sub>], 탄산칼륨(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)을 형성하는 수산화칼륨(KOH), 탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)을 형성하는 수산화나트륨(NaOH)가 있다[14]. 수산화나트륨이 공기 중 CO<sub>2</sub>와 만나 탄산나트륨을 형성한다. 탄산나트륨과 수산화칼슘이 가성화(causticization) 과정을 거친 후 탄산칼슘이 침전되며 수산화나트륨이 재생된다. 700°C 이상의 온도에서 탄산칼슘을 하소시키면(calcination) 산화칼슘(CaO)과 CO<sub>2</sub>가 방출된다. 마지막으로 슬래킹 과정(sla-king)에서 산화칼슘의 수화를 통해 수산화칼슘을 재생한다[15].



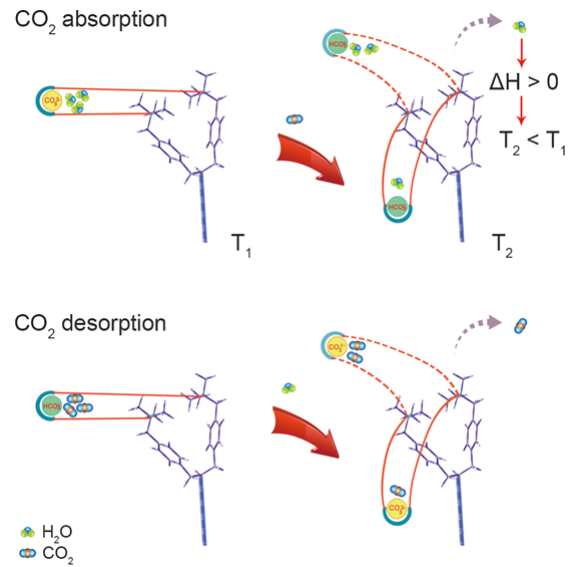


수산화나트륨 1M 용액의 CO<sub>2</sub> 흡착 엔탈피는 109.4 kJmol<sup>-1</sup>로, CO<sub>2</sub> 포집에 필요한 열역학적 최소 에너지 요구량도 109.4 kJmol<sup>-1</sup>이다. 하지만 탄산칼슘의 하소 공정에 179.5 kJmol<sup>-1</sup>이 필요하기 때문에 전체 프로세스 특히나 하소 공정의 에너지 요구량이 크다. 알칼리 수산화물 기반 CO<sub>2</sub> 포집 공정은 흡수탑의 바닥에서 기체를 분사하고 아래로 용액을 떨어뜨리는 공정이며, 에너지 효율을 높이기 위해 packed tower, spray tower 공정이 제안되고 있다[14].

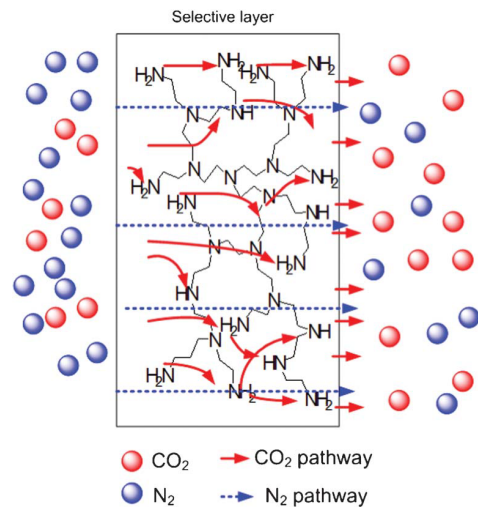
공기 중 CO<sub>2</sub> 포집을 위한 물리적 흡착 기반 기술은 CCS 공정의 흡착제와 비교하여 더 높은 표면적을 갖는 흡착제가 요구된다. 물리적 흡착제, 즉 제올라이트, 활성탄은 공기 중 CO<sub>2</sub> 흡착능력이 낮아 흡착제 기능화 및 고정화 연구가 보고되었다. 아민기 기능화된 다공성 실리카[16], K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 복합 무기 흡착제[17]가 우수한 공기 중 CO<sub>2</sub> 흡착 성능과 안정성을 향상시켰다. Gebald는 아민계 흡착제를 셀룰로오스 나노섬유 지지체에 고정하여 아민의 휘발성 문제 감소와, 화합물의 고정화를 통해 성능 저하를 방지하였다[18]. Wang은 공기 중에서 CO<sub>2</sub>를 포집하고 농축하기 위한 수분 스윙 공정을 처음으로 보고하였다(Fig. 3)[19]. 얇은 폴리프로필렌 필름에 아민계 음이온 교환 수지가 분산된 형태로 건조 시 CO<sub>2</sub>를 흡착하고, 수분이 있을 때 CO<sub>2</sub>를 탈착하며, 수분 스윙을 사용하면 에너지 소비를 줄일 수 있다고 보고하였다. 또한 고분자 이온성 액체(polymeric ion liquids)가 CO<sub>2</sub> 흡수 메커니즘에서 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>에서 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>로 변환하며 친수성이 감소될 때 물을 배출시켜, 열을 제거할 수 있는 에너지 효율이 높은 흡착제를 설계하였다[20].

### 3.2. 분리막 기반 CO<sub>2</sub> 포집

물리적 화학적 흡착제는 CO<sub>2</sub> 흡착 후 재생 과정에 따른 열처리 공정이 필요하여 에너지 소모적 문제를 수반한다. 그러나 분리막은 CO<sub>2</sub> 분리 과정에 상변이가 필



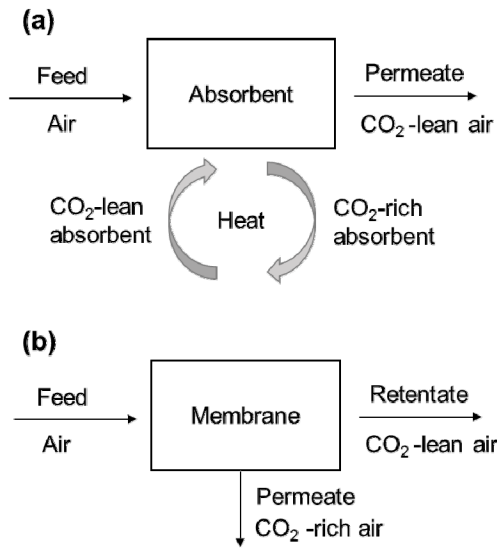
**Fig. 3.** (a) Moisture swing absorption for direct air capture of CO<sub>2</sub>[20] (Copyright 2017, American Chemical Society).



**Fig. 4.** (a) CO<sub>2</sub> transport mechanism in a PEI-facilitated membrane[21] (Copyright 2012, The Royal Society of Chemistry).

요하지 않아 에너지 효율적이며 유해 물질의 배출이 없는 친환경적인 공정이다. 분리막은 연소 배출 가스에서의 CO<sub>2</sub> 포집에 적용되었으며, 저농도 CO<sub>2</sub> 포집에 대한 연구도 보고되었으나, 분리막을 이용한 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집에 대한 연구는 드물다.

Rahaman은 최대 6% PEI를 함유한 중공사 복합막에서 촉진 수송을 이용하여 1 bar에서 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 선택도 300을 얻었고 압력을 3 bar까지 증가시켰을 때, CO<sub>2</sub> 농도를 0.80%까지 증가시켰다(Fig. 4)[21]. Zhang은 고정화

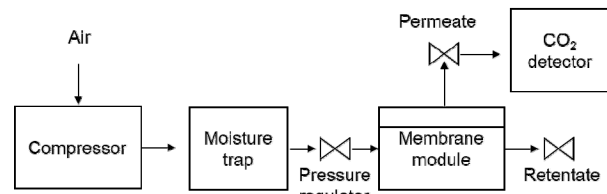


**Fig. 5.** Direct CO<sub>2</sub> capture process using (a) absorbent and (b) membrane.

된 carbonic anhydrase 효소를 함유한 중공사막 반응기 (hollow fiber membrane reactor)를 이용해 0.1%의 저농도 CO<sub>2</sub>를 포함하는 물에서 800 이상의 매우 높은 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 선택도를 달성하였다[22]. Eisaman은 양극성막 전기투석(bipolar membrane electrodialysis)은 음이온과 양이온 교환막으로 구성되어 탄산칼륨 수용액 및 중탄산염(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)에서의 CO<sub>2</sub> 포집 방법을 제시했다. 이 시스템에서 CO<sub>2</sub> 재생에 필요한 에너지가 CO<sub>2</sub> 몰당 100 kJ로 낮은 에너지 소비량을 달성하였다[23].

분리막 기반의 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 기술은 CO<sub>2</sub>의 영구적인 포집 및 저장을 위해 다른 공정과의 통합 공정이 필요하다. Wright는 아민 기반 음이온 교환 물질을 포함한 셀룰로오스 막으로 CO<sub>2</sub> 포집 및 영구적인 제거를 위해 농축된 CO<sub>2</sub>를 메탄, 물, 탄산수소나트륨 등으로 변환하는 클로르-알칼리 공정과 사바티어(Sabatier) 환원 공정으로의 통합공정의 가능성을 제시하고 있다 [24]. 반면 분리막은 실내 공기 질 제어 측면에서 즉각적인 실내 CO<sub>2</sub> 농도 저감 효과와 공기에서 CO<sub>2</sub>를 직접 포집하고 농업이나 바이오연료 생산을 위한 온실에 즉각적인 공급을 할 수 있다는 장점을 갖는다(Fig. 5).

적절한 CO<sub>2</sub> 농도는 농업 생산성에 긍정적인 영향을 주어 고품질 작물 재배를 위해 하우스 내에 제공될 수 있다. 식물의 광합성으로 인해 하우스 내의 CO<sub>2</sub> 농도는 100 ppm 이하까지 감소하기 때문에 인위적인 CO<sub>2</sub> 공급 없이는 생산량 및 품질이 크게 감소한다. 파프리카,



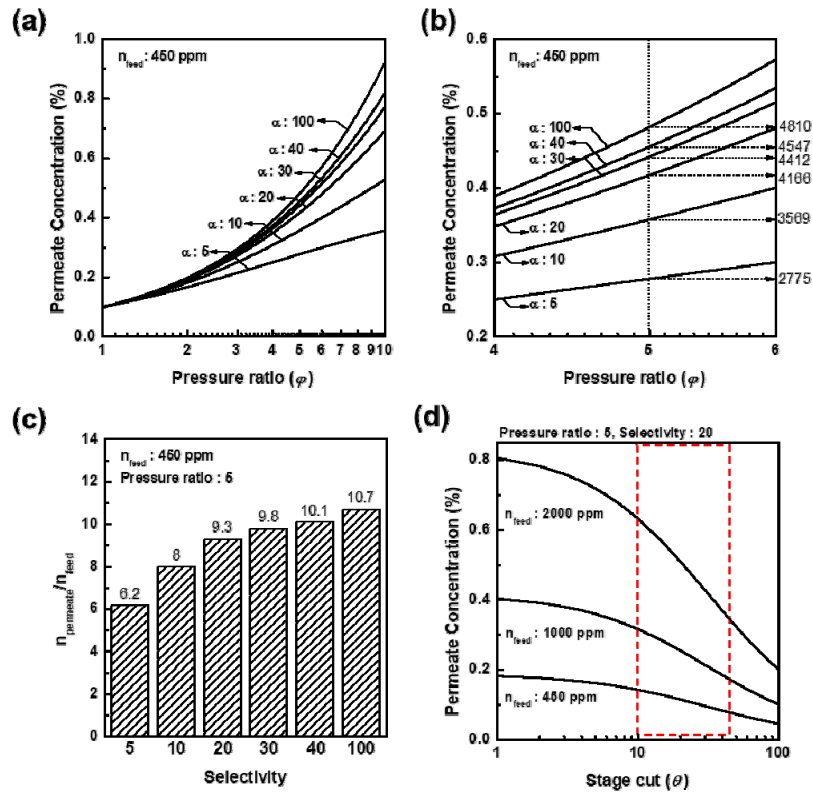
**Fig. 6.** Schematic diagram of the membrane-based CO<sub>2</sub> separation system.

버섯, 토마토 등 재배 농기는 인위적으로 CO<sub>2</sub>를 700~1,000 ppm까지 공급하며 작물을 재배하고 있으며, 지속적인 공급을 위해 저렴한 가격의 CO<sub>2</sub> 공급이 필요하다[25]. 분리막 기반의 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 공정에서 농축된 CO<sub>2</sub>를 적절한 농도로 하우스 내에 공급하여 고품질의 작물을 재배할 수 있다.

분리막은 즉각적인 실내 CO<sub>2</sub> 농도 저감을 위한 환기 시스템으로 적용될 수 있다. 에어 컴프레서 또는 팬(fan)으로 분리막에 공기를 주입하면 permeate에서 이산화탄소 농축된 공기가 배출되고 retentate에서 CO<sub>2</sub> 저감된(< 400 ppm) 공기가 다시 실내로 순환할 수 있다. 분리막의 CO<sub>2</sub> 선택도와 투과도, 공정변수인 pressure ratio, stage cut 등의 최적 조건에서 에너지 효율적으로 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 감소시킬 수 있다[26].

#### 4. 분리막 기반 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 시스템

분리막 기반 시스템은 컴프레서로 분리막에 일정 압력으로 공기를 주입하고 permeate와 retentate에서 각각 CO<sub>2</sub> 농축된 공기와 CO<sub>2</sub> 저감된 공기를 배출한다(Fig. 6). Permeate 내의 CO<sub>2</sub> 농도의 pressure ratio에 대한 영향을 식 (5)의 물질수지식을 이용하여 계산할 수 있다 [Fig. 7(a),(b)]. 일반적으로 pressure ratio의 공정 한계 이하이며 경제적인 pressure ratio가 5에서 분리막의 선택도가 10일 경우 0.35%까지 CO<sub>2</sub>를 농축할 수 있으며 선택도가 20일 경우 0.4%까지 약 9배 농축할 수 있다 [Fig. 7(c)]. 하지만 선택도 30일 때 공기 중 CO<sub>2</sub> 농축 비율이 9.8, 선택도 40일 때 농축 비율 10.1로 선택도 증가에 따른 농축 비율 증가량이 크지 않기 때문에 선택도가 20~30이고 CO<sub>2</sub> 투과도가 높은 분리막이 선호된다.



**Fig. 7.** Effect of pressure ratio on permeate CO<sub>2</sub> concentration at (a) pressure ratio of 1~10, (b) pressure ratio 5, and (c) normalized permeate CO<sub>2</sub> concentration. (d) Effect of stage cut on permeate CO<sub>2</sub> concentration.

$$n_p = \frac{\phi}{2} \left[ n_f + \frac{1}{\phi} + \frac{1}{\alpha - 1} - \sqrt{\left( n_f + \frac{1}{\phi} + \frac{1}{\alpha - 1} \right)^2 - \frac{4\alpha n_f}{(\alpha - 1)\phi}} \right] \quad (5)$$

$n_p$ 와  $n_f$ 는 각각 permeate와 feed의 이산화탄소의 농도,  $\phi$ 는 pressure ratio ( $P_f/P_p$ ),  $\alpha$ 는 분리막의 선택도이다.

또한 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 공정의 분리막 선택도 20, pressure ratio 5의 조건 하에서 stage cut의 영향을 연구하였다[Fig. 7(d)]. Stage cut이 낮을수록 농축되는 CO<sub>2</sub> 농도가 높아지겠지만, stage cut 10% 이하의 공정은 처리 유량이 매우 높아 분리막 모듈로의 적용이 어렵다. 또한 10% 이하의 stage cut에서 retentate를 통해 배출되는 공기 중 CO<sub>2</sub> 농도도 stage cut 30% 이상에서 100 ppm 이하로 배출되기 때문에 stage cut 10~50%로 가동되는 것이 적절하다. 분리막은 에어컴프레서 대신 팬(fan)을 사용해 공기를 주입하는 분리막 기반 시스템 개발을 통해 실내 공기 질 제어 시스템으로 적용될 수 있다.

### 5. 상업용 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 기술의 동향

CCS 기술에서 CO<sub>2</sub>를 제거하는 비용인 톤당 \$30~100인 반면 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 공정은 보고된 포집 비용의 톤당 \$20~1000 정도로 차이가 매우 크다[27,28]. Lackner은 음이온 교환 수지 기반의 수분 스윙 공정에서 컴프레서, 펌프 및 재료비용 등을 고려하여 에너지 비용을 톤당 \$16로 계산하였다[10]. 하지만 장기적으로 에너지 소비가 증가할 가능성이 있어 CO<sub>2</sub> 포집 비용을 톤당 \$30으로 보고하였다.

Carbon engineering은 KOH/Ca carbonation을 이용해 파일럿 스케일의 연속 공정을 수행하였으며, CO<sub>2</sub> 포집, 정제 및 150 bar에서의 압축비용은 톤당 \$94~232로 보고하였다[29]. Climeworks는 공기 중 80%의 CO<sub>2</sub>를 포집하여 합성 디젤로 전환하는 파일럿 공정을 진행하였고, Global thermostat은 상업용 규모의 온실 CO<sub>2</sub> 공급 시스템을 구축하였다. Infinitree는 이온교환 흡착제 기반의 수분 스윙 공정을 통해 포집한 CO<sub>2</sub>를 농작물에 공급하는 도시 농업 프로젝트를 진행하였다(Table 1).

**Table 1.** Companies Developing Direct Air Capture Systems

Company	Technology	Regeneration	Application
Carbon engineering	KOH/Ca carbonation	900°C	Synthetic fuel
Climeworks	Amine-functionalized filter	100°C	Synthetic fuel
Global thermostat	Amine-modified sorbent	90°C	Greenhouses
Infinitree	Ion-exchange sorbent	Moisture	Greenhouses

CO<sub>2</sub> 포집 기술은 아직 초기 단계이므로 상업용 플랜트의 포집 비용은 재료 및 에너지 비용 등에 의해 크게 달라질 있으며, 기술 및 공정 최적화를 통해 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 비용 절감이 필요할 것으로 예상된다.

## 6. 결 론

오늘날까지 100년이 넘는 CO<sub>2</sub>의 배출로 인해 공기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 100 ppm 이상 증가하였다. 410 ppm의 농도에도 불구하고 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집 기술의 필요성이 강조되고 있다. 또한 미세먼지, 바이러스 등 실외의 유해 물질 문제에 따라 실내 공기의 환기를 자유롭게 할 수 없는 상황에서, 실내 공기질 개선에 대한 요구가 증가하고 있다. 공기와 같은 낮은 농도의 CO<sub>2</sub> 포집 기술로 강알칼리 기반 액체 및 고체 흡착제, 아민 기반 흡착제 및 금속-유기골격체 등의 장기 안정성이 높고 비교적 낮은 온도에서 재생 가능한 흡착제가 연구되고 있다. 분리막은 연소 후 배출가스 포집 기술에서 활발하게 연구되고 있지만, 저농도 CO<sub>2</sub> 포집 관련하여 촉진 수송 기반의 연구만이 보고되었을 뿐 아직 연구가 활발하지 않다. 반면 실내 공기 질 개선 측면에서 분리막은 즉각적인 실내 CO<sub>2</sub> 농도 저감 효과의 이점이 있고, 포집한 CO<sub>2</sub>를 농업이나 바이오연료 생산을 위한 온실에 즉각 공급할 수 있다는 장점을 갖는다. 효율적인 공정 설계와 분리막 투과도 향상을 통해 공기 중 CO<sub>2</sub> 포집의 효율을 높일 수 있을 것이다.

## Acknowledgements

This work was supported by the Korea CCS R&D Center (Korea CCS 2020 Project) grant funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT) in 2020 (2014M1A8A1049307).

## Reference

1. Core Writing Team, R. K. Pachauri, and L. A. Meyer (eds.), "Climate change 2014 synthesis report; contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change", Geneva, Switzerland (2014).
2. "https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html", June 7 (2020).
3. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, and X. Zhou (eds.), "Global warming of 1.5°C. An ipcc special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty" (2018).
4. C. W. Jones, "CO<sub>2</sub> capture from dilute gases as a component of modern global carbon management", *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, **2**, 31 (2011).
5. B. A. Oyenekan and G. T. Rochelle, "Alternative stripper configurations for CO<sub>2</sub> capture by aqueous amines", *AIChE J.*, **53**, 3144 (2007).
6. T. C. Merkel, H. Lin, X. Wei, and R. Baker, "Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes", *J. Membr. Sci.*, **359**, 126 (2010).
7. D. J. Kim and S. Y. Nam, "Research and development trends of polyimide based material for gas separation", *Membr. J.*, **23**, 393 (2013).

8. S. J. Jeong, J.-g. Yeo, M. H. Han, and C. H. Cho, "A study on permeation of CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixed gases through a nay zeolite membrane under permeate evacuation mode", *Membr. J.*, **23**, 352 (2013).
9. The National Academies of Sciences, and Medicine, "Negative emissions technologies and reliable sequestration: A research agenda", The National Academies Press, Washington DC (2018).
10. K. S. Lackner, "Capture of carbon dioxide from ambient air", *Eur. Phys. J. Special Topics.*, **176**, 93 (2009).
11. D. W. Keith, "Why capture CO<sub>2</sub> from the atmosphere?", *Science*, **325**, 1654 (2009).
12. J. Bao, W.-H. Lu, J. Zhao, and X. T. Bi, "Greenhouses for CO<sub>2</sub> sequestration from atmosphere", *Carbon Resour. Convers.*, **1**, 183 (2018).
13. P. Batog and M. Badura, "Dynamic of changes in carbon dioxide concentration in bedrooms", *Procedia Eng.*, **57**, 175 (2013).
14. F. Zeman, "Energy and material balance of CO<sub>2</sub> capture from ambient air", *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 7558 (2007).
15. F. S. Zeman and K. S. Lackner, "Capturing carbon dioxide directly from the atmosphere", *World Resour. Rev.*, **16**, 157 (2004).
16. N. R. Stuckert and R. T. Yang, "CO<sub>2</sub> capture from the atmosphere and simultaneous concentration using zeolites and amine-grafted SBA-15", *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 10257 (2011).
17. J. V. Veselovskaya, V. S. Derevschikov, T. Y. Kardash, O. A. Stonkus, T. A. Trubitsina, and A. G. Okunev, "Direct CO<sub>2</sub> capture from ambient air using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite sorbent", *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **17**, 332 (2013).
18. C. Gebald, J. A. Wurzbacher, P. Tingaut, T. Zimmermann, and A. Steinfeld, "Amine-based nanofibrillated cellulose as adsorbent for CO<sub>2</sub> capture from air", *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 9101 (2011).
19. T. Wang, K. S. Lackner, and A. Wright, "Moisture swing sorbent for carbon dioxide capture from ambient air", *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 6670 (2011).
20. T. Wang, C. Hou, K. Ge, K. S. Lackner, X. Shi, J. Liu, M. Fang, and Z. Luo, "Spontaneous cooling absorption of CO<sub>2</sub> by a polymeric ionic liquid for direct air capture", *J. Phys. Chem. Lett.*, **8**, 3986 (2017).
21. M. S. A. Rahaman, L. Zhang, L.-H. Cheng, X.-H. Xu, and H.-L. Chen, "Capturing carbon dioxide from air using a fixed carrier facilitated transport membrane", *RSC Adv.*, **2** (2012).
22. Y.-T. Zhang, L. Zhang, H.-L. Chen, and H.-M. Zhang, "Selective separation of low concentration CO<sub>2</sub> using hydrogel immobilized ca enzyme based hollow fiber membrane reactors", *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 3199 (2010).
23. M. D. Eisaman, L. Alvarado, D. Larner, P. Wang, B. Garg, and K. A. Littau, "CO<sub>2</sub> separation using bipolar membrane electrodialysis", *Energy Environ. Sci.*, **4**, 1319 (2011).
24. A. B. Wright and E. J. Peters, "Air collector with functionalized ion exchange membrane for capturing ambient CO<sub>2</sub>", *US Patent 7,993,432 B2*, August 9 (2011).
25. A. B. Wright, K. S. Lackner, and U. Ginster, "Method and apparatus for extracting carbon dioxide from air", *US 8,337,589 B2*, December 25 (2012).
26. J. H. Lim, C. S. Lee, H. E. Kim, M. W. Bae, Y. G. Mo, and S. Y. Ha, "Separation and simulation for carbon dioxide from flaring gas using polysulfone hollow fiber membrane", *Membr. J.*, **25**, 99 (2015).
27. A. Goeppert, M. Czaun, G. K. Surya Prakash, and G. A. Olah, "Air as the renewable carbon source of the future: An overview of CO<sub>2</sub> capture from the atmosphere", *Energy Environ. Sci.*, **5** (2012).
28. R. B. Polak and M. Steinberg, "Carbon dioxide removal systems", *US Patent 13/256,831*, January 5 (2012).
29. D. W. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo, and K. Heidel, "A process for capturing CO<sub>2</sub> from the atmosphere", *Joule.*, **2**, 1573 (2018).