

## 선박 적용을 위한 소형 이산화탄소 포집 및 전환 시스템

고동연(한국과학기술원)

### 1. 서론

미래의 지속가능한 발전을 위해 탄소 배출량을 줄이고자 하는 노력이 현재 산업계에 큰 영향을 주고 있다. 선박에서 배출되는 이산화탄소의 발생량은 육상 화력발전소에서 배출량의 1/10 이하 수준이지만 전 지구적인 탄소 배출량을 줄이기 위해 선박 유래 이산화탄소 저감이 매우 시급한 과제로 부각되고 있다. 특히 국제해사기구 (International Maritime Organization, IMO)에서 의무화한 선박 유래 이산화탄소 감축량 계획에 따르면 단계에 따라 모든 선박은 2025년까지 현행 배출량 대비 30% 감축된 배출량을 달성해야 하며 그 이후에는 상향된 감축량을 목표로 하고 있다. 이처럼 시급한 이산화탄소 감축 목표에 따라 다양한 이산화탄소 저감 방법론을 선박에 적용하고자 많은 노력들이 이루어지고 있다.

탄소 포집, 활용 및 저장을 통틀어 일컫는 CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) 방법론은 육상에서 장기간 연구되어 왔으며 지난 20년간 기술 발전을 거쳐 화력발전소 및 석유화학 플랜트에서 배출되는 이산화탄소를 처리하는데 부분적으로 성공적인 운영사례를 보이고 있다. 육상의 발전소나 플랜트에는 공간적인 제약이 없기 때문에 대량의 배기가스 처리에 적용할 수 있는 CCUS 기술 개발에 대한 부담이 적다. 따라서 10MW 급 발전소부터 100 MW 급 화력발전소에서 배출하는 대용량의 배기가스까지 처리할 수 있는 수준으로 파일럿 플랜트 연구들이 진행되어 왔다.

하지만 기존의 육상의 CCUS 기술을 선박에 바로 적용하는 데는 많은 한계점이 존재한다. 가장 큰 문제점으로는 이산화탄소 포집 유닛의 설치를 위해서 선상의 공간적인 제약이 존재한다는 점이다. 가장 널리 이용되는 이산화탄소 포집공정에서는 아민 수용액을 흘려주는 흡수탑의 설계가 필수적인데, 흡수탑은 보통 높이가 20~40미터에 달하기 때문에 초대형 선박에도 쉽게 적용하기 어렵다는 문제점이 있다. 또한 이산화탄소 포집 공정 자체의 에너지 요구량이 높기 때문에 일정 거리를 이동해야 하는 선박에서는 연료 소모량이 증가하는 문제점 등을 야기한다. 최근 대형 선박에서 발생하는 이산화탄소를 포집하여 저장하는 공정의 개념설계가 이루어져 왔지만 위와 같은 실질적인 문제점을 극복할 수 있는 새로운 개념의 CCUS 방법론이 필요한 실정이다. 더 나아가 선박은 운항시

필수불가결한 6자 운동 등의 움직임을 동반하기 때문에 육상의 CCUS 설비를 직접 적용하는데 그 한계점이 있다. 이와 같은 설비의 안정성뿐만 아니라 이산화탄소 포집 유닛의 높은 설치 투자비도 그 문제점으로 지적되고 있다.

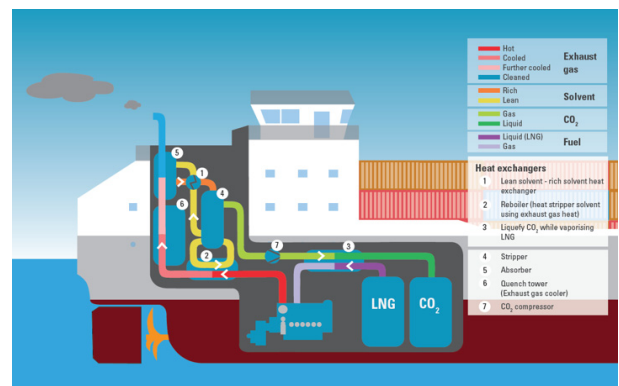


그림 1 Conoship社의 아민 수용액 기반 선상 이산화탄소 포집 시스템 개략도

따라서 선상에 CCUS 방법론을 적용하고자 하면 육상에 적용된 기술을 토대로 선상에 최적화된 설비 및 공정의 설계가 필요하다. 본 기고문에서는 선박에 적용 가능할 것으로 예상되는 소형 이산화탄소 포집 및 전환 시스템에 대해 다루고자 한다.

### 2. 소형 이산화탄소 처리 시스템의 요구조건

아민 수용액을 이용하는 전통적인 화학적 흡수제 공정은 많은 양의 이산화탄소를 처리할 수 있다는 장점이 있지만, 높은 효율의 이산화탄소 처리를 위해서는 흡수탑의 면적 및 높이를 충분히 크게 설계해야 한다는 단점이 있다. 반면에 분리막을 이용하거나 고체 흡착제를 이용하는 비교적 최신의 공정들은 흡수제 공정 대비 낮은 에너지 사용량 및 작은 설비 등의 장점이 있다.

분리막을 이용한 이산화탄소 포집 공정은 장치가 간단하고, 설비 내 가동부 (moving part)가 없어 공정의 운전이 용이하

다는 장점이 있다. 고분자 분리막은 다른 무기 재료에 대비하여 상대적으로 스케일업이 용이하다는 장점을 가지고 있어 차세대 분리공정으로 일컬어지고 있다. 분리막은 넓은 비표면적을 토대로 작은 부피로 모듈화하기 쉽기 때문에 다단계 분리공정을 통해 아민 흡수 공정 대비 낮은 에너지 비용으로 이산화탄소를 처리할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 이산화탄소 투과도가 1000 GPU (Gas Permeation Unit) 이상이며, 이산화탄소/질소 선택도가 45 이상인 분리막 모듈을 사용하면 기존 아민 흡수법 대비 50% 이상 향상된 에너지 비용의 공정을 제시할 수 있다고 알려져 있다.

하지만 아민 흡수법 및 분리막 등을 통해 포집된 이산화탄소는 그 처리 과정에서 포집된 이산화탄소를 선박에 어떤 방식으로든 저장해야 한다. 이산화탄소는 온도 및 압력 조건에 따라 여러 가지 상태 (액상, 기상 및 고상)로 저장될 수 있으나 연속적인 운항이 필수적인 선박 내에서 이를 항시 저장하는 설비를 마련하는 데는 큰 부담이 될 수밖에 없다. 이와 같은 추가적인 설비는 CCUS 비용의 증가를 야기할 수밖에 없기 때문에 선박 CCUS 공정의 운영 및 설치비를 높이는 요인으로 작용하게 된다. 하지만 이산화탄소를 단순히 포집만 하는 공정이 아니라 적은 에너지로 유용한 산물로 전환할 수 있는 공정(예: 고체 탄산화)이 있다면 추가적인 경제성을 확보할 수 있어 충분히 선박 적용을 검토해볼 수 있을 것이다. 따라서 본 기고문에서는 이산화탄소를 분리할 수 있는 분리막 설비에서 직접적으로 이산화탄소의 전환까지 이를 수 있는 소형화된 통합 기술에 대해서 3절에서 다루고자 한다.

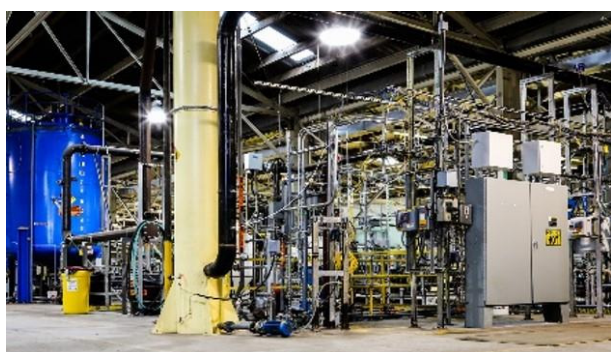


그림 2 Calera社의 일산 2톤 규모의 고체 탄산화 (탄산 칼슘 제조) 설비

반면에 고체 흡착제를 이용한 이산화탄소 포집 공정은 이산화탄소와 다공성 고체 소재의 표면에서 분자사이의 친화력에 의해 선택적으로 이산화탄소가 포집되는 공정으로 일반적으로 활성탄 또는 제올라이트 분자체와 같은 다공성 입자를

충전탑에 충전하여 운전하는 기술이다. 이와 같은 공정 또한 아민 수용액 공정 대비 장치의 운전이 훨씬 간단하고, 특히 흡착탑 재생 시 에너지 효율이 매우 우수하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 고체 흡착제는 일반적으로 이산화탄소 흡착 용량이 크지 않기 때문에 평면상으로 적층된 흡착베드를 구성할 때 매우 많은 양의 흡착제 입자를 촘촘하게 적층해서 흡착 성능을 보완해야 한다는 단점이 있다. 더 나아가 이와 같은 입자 적층 형태 (packed bed)의 흡착층은 유체의 흐름 특성을 제한하여 흡착층의 실제 흡착 효율 (= 흡착제 이용률)을 저하시키고, 배기가스 흐름 저항을 증가시킨다. 결국 흡착제가 충전 되어 있는 충전탑의 파과 시간 단축을 야기하게 되어 충전탑의 크기를 크게 설계하는 기술적 원인이 된다.

아무리 뛰어난 흡착 성능을 지닌 재료라도 실제 설비에서 높은 효율로 사용되기 위해서는 입자 적층 형태와 같은 비구조화된 흡착층 (unstructured sorbent)보다 실용적인 모듈 디자인이 필요하다. 이에 구조화된 흡착제 (structured sorbent)는 흡착재료의 구조적 계층화를 통해 흡착 표면 고유의 성능을 심분 발휘하며, 기존의 흡착 베드 대비 실용적 성능을 갖는 (예: 낮은 압력 강하, 높은 흡착 효율 등) 설비를 제조할 수 있는 구조체이다. 흡착제를 적절히 구조화 한다면 작은 크기로도 대용량의 흡수탑과 비슷한 성능을 낼 수 있는 이산화탄소 처리 시스템을 개발할 수 있다. 본 기고문의 4절에서는 구조화된 흡착제 중 파이버 흡착제에 대해 소개하고자 한다.

### 3. 분리막 기반 고체 탄산화 기술

탄소계 물질이 산화될 때 발생하는 이산화탄소는 일반적으로 매우 안정적인 물질로 알려져 있지만, 자연계에서 이산화탄소는 고체 무기 탄산염 (탄산칼슘, 탄산마그네슘 등)으로 전환될 수 있다. 최종 산물인 고체 탄산염은 에너지 준위상 매우 안정하며 대부분의 용매에 녹지 않기 때문에 이산화탄소를 영구적으로 전환하여 고정할 수 있다는 큰 장점을 가진다. 하지만 자연계에서 일어나는 고체 탄산화 과정은 그 반응속도가 매우 느려 실제 이산화탄소 전환 및 저장의 용도로 사용하는데 제약이 있다. 고체 탄산화 혹은 광물 탄산화 기술은 이와 같은 반응속도를 가속화하여 이산화탄소를 고체 탄산염으로 전환하여 산업에 이용할 수 있는 최종 산물을 만들 수 있는 기술을 지칭한다. 고체 탄산화에 필요한 칼슘 또는 마그네슘 등의 알칼리 토금속은 자연계에 존재하는 규산염 광물 또는 알칼리성 산업 부산물 (폐 콘크리트, 시멘트, 철강 슬래그, 폐 석면 등)로부터 추출할 수 있으며, 최종 산물인 탄산칼슘 ( $\text{CaCO}_3$ ) 또는 탄산마그네슘 ( $\text{MgCO}_3$ )은 순도 및 물성에 따라

건설용 응집제, 제지 산업용 코팅제, 플라스틱, 페인트, 식품 첨가물 등 매우 다양한 분야에 활용 가능하기 때문에 이산화탄소 처리 기술 전반에 소요되는 에너지 비용뿐만 아니라 설비의 일부를 저감할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

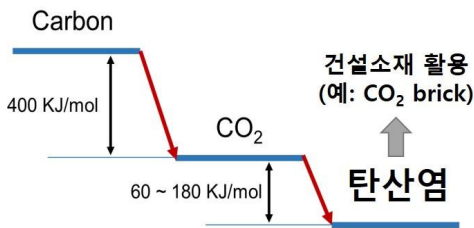


그림 3 고체 탄산화 과정의 에너지 준위

위와 같은 고체 탄산화 반응을 효율적으로 진행시키기 위해서는 이산화탄소가 포함된 배기가스를 금속 이온이 녹아있는 용액과 효율적으로 접촉시켜줄 수 있는 기체-액체 접촉기 (gas-liquid contactor)의 이용이 필요하다. 일반적으로 배치형 반응기 (batch-type reactor)는 용액을 일정 속도로 교반시키며 이산화탄소와 같은 기체를 버블링하여 기체-액체간의 물질 교환을 일으켜 탄산화 반응을 유도할 수 있는 기술로 알려져 있다. 반면에 중공사 형태의 분리막을 이용하여 동일한 기체-액체 접촉 반응을 유도할 수 있는 분리막 접촉기 (membrane contactor)에서는 중공사의 내부와 외부를 통해 각각 기체와 액체를 독립적으로 흘려줄 수 있어 매우 효율적인 기-액 접촉기로 각광받고 있다.

기체-액체상의 반응이 일어날 때 반응기의 효율을 결정하는 중요한 인자는 얼마나 높은 효율로 이산화탄소가 수용액으로 전달되어 녹아들어가갈 수 있는 지에 따라 결정되며, 보통 물질전달계수 ( $k_g$ , m/s)와 단위부피당 표면적 ( $a$ ,  $m^2/m^3$ )을 곱한 값( $k_g a$ , 1/s)으로 표현된다. 하지만 일반적인 배치 반응기의 경우 액체 내부의 기체 방울을 통해서 물질전달이 이루어지 때문에 매우 낮은 기체-액체 접촉 면적으로 인해 물질 전달효율이 낮은 편이다. 동일한 유속을 가정할 때 중공사 분리막 접촉기가 배치형 반응기 대비 약 5-10배 이상 높은 물질 전달 효율을 보인다. 이와 같은 물질 전달효율은 기체-액체 접촉기 설비의 크기를 결정하는 매우 중요한 요인으로, 중공사 분리막 모듈은 보통 충전탑 대비 5배 이상 작은 설비 사이드로 설계할 수 있다는 연구 결과가 있다.

따라서 기존 배치형 고체 탄산화 반응기는 낮은 고체 탄산화 효율로 큰 설비 부피를 차지하며 높은 설치비용이 요구된다는 단점이 존재한다. 또한 가동부가 존재하기 때문에 설비

조작이 복잡하여 높은 운영비용이 요구된다. 이와 같은 공정상 단점은 배치형 고체 탄산화 공정의 선상 적용을 어렵게 하는 요인으로 작용할 수 있다. 또한 배치형 반응기로는 고체 탄산염으로 얻을 수 있는 추가적인 경제성 확보가 쉽지 않을 것으로 예상된다. 하지만 앞서 언급한 중공사 분리막 설비를 이용한다면 위와 같은 단점들을 극복할 수 있는 소형 이산화탄소 전환 설비를 디자인 할 수 있을 것으로 예상된다.

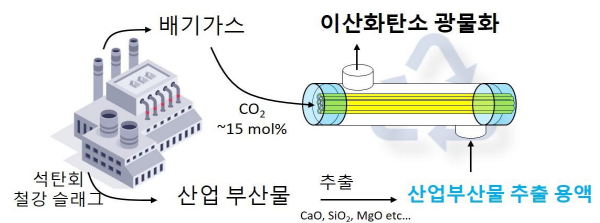


그림 4 분리막 기반 고체 탄산화 (이산화탄소 광물화) 과정의 개략도

중공사 분리막 모듈은 보통 다공성 고분자 분리막의 계층적인 구조를 통해 “분리막을 이용한 배기가스 내 이산화탄소의 분리”와 동시에 “저항이 최소화된 이산화탄소 전달-결정화”를 이룬다. 중공사 분리막은 구조적으로 속이 비어있는 가느다란 실과 같은 형태의 분리막으로 투관형 모듈에 매우 많은 양의 분리막을 충전할 수 있다. 따라서 기존의 평면화된 분리막 시스템과 비교 시 부피 대비 표면적이 수 배 높다는 장점이 있다. 또한 고분자의 높은 가공성을 바탕으로 손쉽게 대량 생산이 가능하다는 장점이 있어 초기 투자비용 및 운영 경비에 이점이 있다. 앞서 설명한 물질전달계수의 측면에서의 장점과 모듈의 부피당 비표면적의 장점을 합치게 되면 실제로 배치형 반응기 대비 수배 적은 공간을 활용하는 이산화탄소 전환 설비를 제작할 수 있다. 더 나아가 가스 및 용액의 독립적인 유량 제어를 통해 선상에서도 손쉬운 공정이 가능하며, 고체 탄산화를 통해 얻어진 산물은 앞서 언급된 여러 산업 분야에서 재사용되어 CCUS 기술의 경제성을 높일 수 있는 새로운 기술 후보군이 될 것이다.

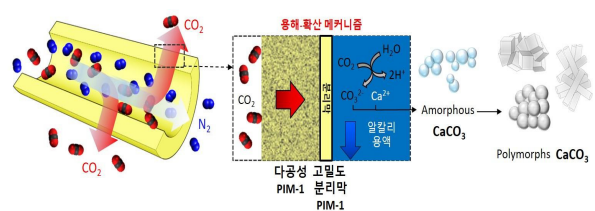


그림 5 분리막 내 고체탄산화 과정

현재 랩스케일에서 구현된 분리막 기반 고체 탄산화 모듈은 초투과성 고분자를 이용하여 물질 전달저항이 최소화된 중공사 분리막 접촉기를 제작한 첫 사례다. 연구팀이 발표한 초투과성 고분자는 미세기공을 가지고 있으며 분리막 자체로도 이산화탄소/질소 선택도가 25 이상으로 높은 분리 성능을 가지고 있다. 이에 알칼리 금속이 용해되어 있는 수용액을 분리막 접촉기 주입하여 배기가스 조성의 기체가 직접적으로 분리막을 통과하여 수용액으로 전달되는 과정을 구현하였으며, 순간적인 고체 탄산화 반응을 유도하여 연속적으로 고순도의 탄산칼슘 및 탄산마그네슘을 얻어내는데 성공하였다. 이와 같은 분리막 시스템은 배기가스 (이산화탄소의 분압이 약 5~15%)를 별도의 분리공정 없이 직접 고체 탄산화에 사용하여 공정 비용을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 앞서 설명된 바와 같이 기존의 배치형 반응기 대비 설비 크기 및 에너지 비용을 최대 90%까지 저감 가능하다는 장점을 지니고 있다.

고체 탄산화와 같은 탄소 자원화 기술은 선박의 이산화탄소 배출량을 감축할 뿐만 아니라 이를 고체 탄산염으로 자원화 할 수 있는 접근법으로 기후변화 대응과 CCUS 비용 문제를 동시에 극복할 수 있는 방식으로 평가된다. 따라서 이산화탄소 저감에 대한 난제에 봉착한 여러 선박회사의 문제를 해결할 수 있는 미래 기술 중 하나로 손꼽힌다. 하지만 이를 실제로 선박에 적용하기 위해서는 원료로 사용되는 알칼리 물질이나 생산물인 탄산염을 선상에서 어떤 방식으로 저장할 수 있을 지에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

### 4. 파이버 흡착제 기반 소형 이산화탄소 포집 시스템

파이버 흡착제 (fiber sorbent)는 앞서 언급된 중공사 분리막에서 기인한 개념으로, 직물을 만드는 방사공정과 비슷한 고분자 방사공정을 통해 머리카락 보다 조금 두꺼운 두께의 고분자 섬유에 여러 가지 고체 흡착제를 높은 밀도로 함유시킨 차세대 흡착 시스템을 뜻한다. 일정한 실과 같은 형태를 가지고 있기 때문에 구조화된 형태로 흡착 모듈을 제작할 수 있으며, 다른 형태의 구조화된 흡착층 (예시: 위시코트 모노리스) 대비 높은 흡착 성능 및 효율을 유지하며 동시에 저비용 대량생산이 가능한 플랫폼으로 주목을 받는 시스템이다. 특히 흡착제가 무질서하게 충전 되어 있는 적층식 충전탑 대비 매우 낮은 배기가스 압력 저항을 가지는 설비를 제작할 수 있어 높은 유량의 배기가스를 처리할 수 있는 차세대 흡착제 구조로 제안되고 있다.

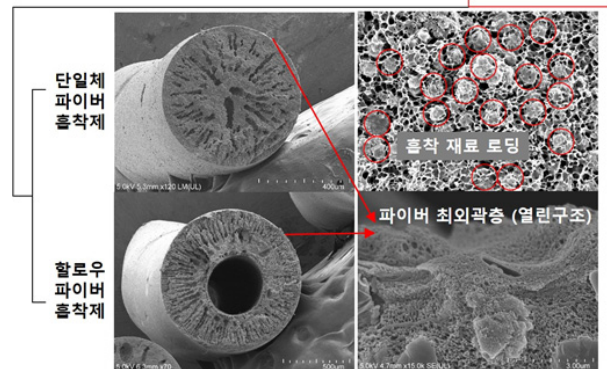
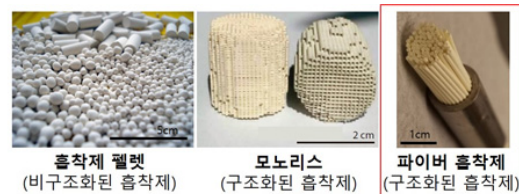


그림 6 파이버 흡착제의 개념 및 비구조화된 흡착제와의 비교

파이버 흡착제는 동일 조건에서 비교하였을 때 충전탑 대비하여 높은 흡착제 이용률을 토대로 매우 급격한 파과 곡선을 보이는 효율적인 시스템으로 평가받고 있다. 이와 같은 다양한 장점들을 종합하여 대용량의 배기가스를 처리하는 시스템을 제안할 수 있다. 예를 들어 육상의 645 MW급 석탄화력 발전소의 배기가스 처리 설비를 비교한 연구에서 충전탑의 경우 약 9,000m<sup>3</sup>의 설비 크기를 필요로 하지만, 파이버 흡착제 모듈로 교체 시 단 750m<sup>3</sup>크기의 모듈로 같은 양을 처리할 수 있다는 연구 사례가 있다.

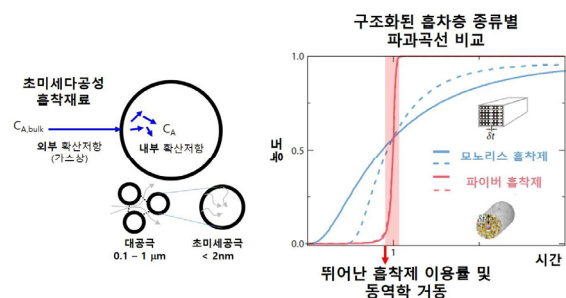


그림 7 파이버 흡착제의 물질전달 효율 개략도

하지만 고체 흡착제를 이용하는 이산화탄소 포집 공정은 앞서 언급된 포집 후 이산화탄소 처리의 문제가 있으며, 고체 흡착제 입자의 제작 단가가 아직은 아민 수용액 대비 비싸다는 단점이 있다. 이와 같은 포집 기술을 적절한 이산화탄소 전환 시스템과 결합하여 선상 CCUS 기술의 경제성을 높일 수 있는 연구가 계속 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

선박에 적용되는 CCUS 기술들은 육상의 기술 대비 많은 제약을 갖고 있는 것은 분명하다. 하지만 기존에 개발된 많은 육상 CCUS 기술들을 잘 발전시켜 소형화 할 수 있다면 선박의 특성을 살리며 동시에 탄소 배출량을 줄일 수 있는 시스템을 선박에 적용할 수 있을 것이다. IMO의 배출량 규제에 발빠르게 대응하기 위해서는 현재 선박회사의 R&D 기술력에 총력을 기울인 1세대 선박 CCUS 시스템의 개발이 시급하다. 이를 통해 일차적인 이산화탄소 감축량 목표를 달성하고, 향후 5~10년간 장기적인 관점에서 좀 더 미래지향적이며 지속가능한 이산화탄소 포집 및 전환 기술을 적용하는 방향이 타당하다. 탄소 저감의 문제는 선박 산업계로서는 하나의 위기처럼 여겨질 수도 있지만 새로운 사업의 장을 열고 세계 시장을 선도해 나갈 수 있는 기회가 될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

진윤정, 김성제 [기후변화의 주범 이산화탄소, 미래 자원으로 가능성은?, POSRI 이슈리포트] (2019).

박영준 [광물탄산화를 통한 이산화탄소 저장 및 활용, NICE 신진연구자 칼럼] (2016).

이지현, 이동욱, 심재구 [이산화탄소 활용: 광물화 기술개요 및 동향, 공업화학 전망] (2015).

Gabrielli, Paolo, Matteo Gazzani, and Marco Mazzotti, 2020. "The Role of Carbon Capture and Utilization, Carbon Capture and Storage, and Biomass to Enable a Net-Zero-CO2 Emissions Chemical Industry." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 59 (15): 7033.

Davis, Steven J., Nathan S. Lewis, Matthew Shaner, Sonia Aggarwal, Doug Arent, Inês L. Azevedo, Sally M. Benson, et al., 2018. "Net-Zero Emissions Energy Systems." *Science* 360 (6396).

Kätelhön, Arne, Raoul Meys, Sarah Deutz, Sangwon, Suh, and André Bardow, 2019. Climate Change Mitigation Potential of Carbon Capture and Utilization in the Chemical Industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 116 (23): 11187-94.

Y.-E. Hwang, H. Seo, K. Kim, D.-Y. Koh, Solid Carbonation via Ultraporous PIM-1 Hollow Fiber Membranes for Scalable CO2 Utilization, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 8(41) 15620-15629 (2020).

Mineral Carbonation Systems and Mineral Carbonation Methods Using the Same (광물 탄산화 시스템 및 이를 이용한 광물 탄산화 방법), KR 10-2171098-0000).

Y. H. Lee, J. Jeong, K. Kim, T. Hyun, A. Jamal, D.-Y. Koh, Microporous Materials in Scalable Shapes: Fiber Sorbents, *Chem. Mater.* 32(17) 7081 - 7104 (2020).



고 동 연

- KAIST 생명화학공학과 박사
- 현 재 : KAIST 생명화학공학과 교수
- 관심분야 : 분리막 및 흡착제
- E-mail : dongyeunkoh@kaist.ac.kr