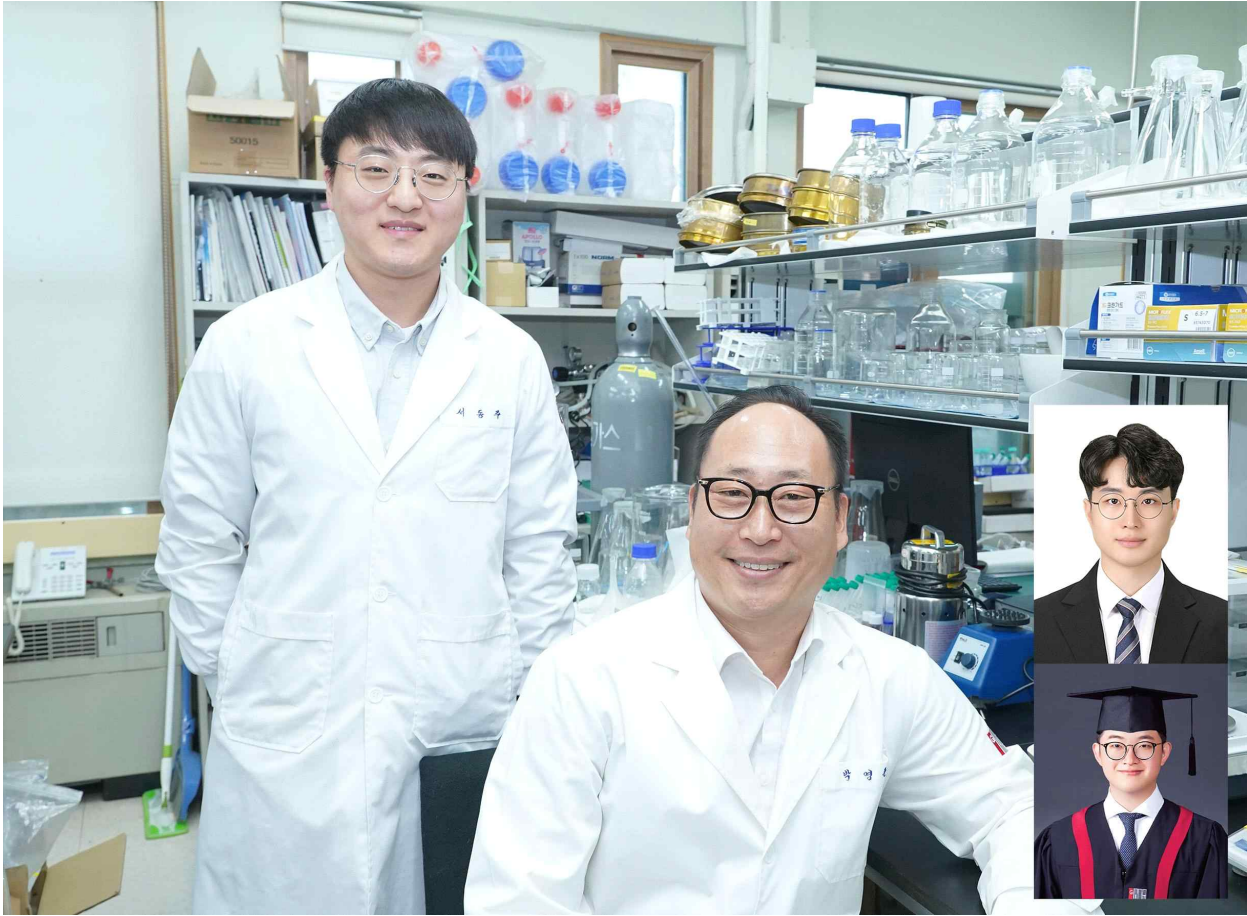


GIST, 친환경 ESS(에너지 저장 시스템) 원천기술 개발...

천연가스·수소 저장량 극대화로 탄소중립 실현

- 박영준 교수 연구팀, 물을 이용해 가스 하이드레이트 기반 에너지 가스 저장량 극대화한 '튜닝 효과' 주요인자 상관관계 발견
- 수소 및 천연가스 등 에너지 가스 저장 위한 친환경 소재로 활용 기대



▲ 서동주 박사과정생, 박영준 교수, (위)이윤석 박사, (아래) 이승인 박사과정생

최근 전 세계적으로 탄소중립 실현을 위한 청정에너지에 대한 관심과 수요가 크게 증가하고 있으며, 특히 대체에너지 자원과 환경 문제 해법으로 '가스 하이드레이트'가 주목받고 있다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 지구.환경공학부 박영준 교수 연구팀이 천연가스 및 수소와 같은 에너지 가스의 저장량을 극대화할 수 있는 가스 하이드레이트 원천기술을 개발했다고 밝혔다.

친환경 소재인 물과 가스로 만들어지는 가스 하이드레이트* 는 가스 저장, 분리 등 산업적으로 활용 범위가 넓으며, 특히 천연가스 저장 매체로 사용될 경우 액화 및 압축 천연가스 기술보다 상온·저압 조건에서 천연가스를 저장할 수 있어 지구 온난화에 대비하는 차세대 에너지 저장 매체로 주목받고 있다.

* 가스 하이드레이트(gas hydrate): 저온 및 고압 조건에서 물 분자들이 수소결합을 통해 만드는 3차원 결정성 격자(crystal lattice) 내부에 기체분자가 물리적으로 포집된 결정성 고체 화합물을 의미한다.

저온·고압 조건의 가스 하이드레이트 형성 조건을 완화하기 위해서 열역학적 형성 촉진제*를 화학 양론적* 농도로 사용할 수 있으나, 이때 에너지 가스가 저장될 수 있는 나노 격자 공간의 일부를 차지해 하이드레이트 내 가스 저장량이 감소하는 문제가 발생한다.

* 열역학적 형성 촉진제: 저온·고압의 가스 하이드레이트 열역학적 형성 조건을 상온·저압으로 완화할 수 있는 형성 촉진제

* 화학 양론적(Stoichiometric): 하이드레이트의 큰 동공 전부(유닛셀 당 16개)를 점유하기 위해 필요한 열역학적 형성 촉진제의 몰수로, 구조 II 하이드레이트의 경우 열역학적 형성 촉진제의 화학 양론적 농도는 5.56 mol%

연구팀은 이를 해결하기 위해 열역학적 형성 촉진제의 농도를 선택적으로 조절해 하이드레이트의 나노 격자 공간 중 일부를 비우고 이를 가스 분자로 채우되, 열역학적 형성조건을 완화하며 가스 저장량을 향상시킬 수 있는 '튜닝 효과(Tuning effect)'가 유용하게 활용될 수 있음을 제안했다.

튜닝 효과는 천연가스 및 차세대 대체에너지원인 수소 에너지를 저장하는 데 있어 매우 효과적인 접근법으로서, 열역학적 형성 촉진제에 의해 점유되는 하이드레이트 격자 내의 큰 동공들 중 일부가 가스 분자에 의해 점유되면서 유도될 수 있는데, 가스 하이드레이트 기술의 문제점인 극한의 형성 조건을 완화시킴과 동시에 제한된 저장량의 한계점을 극복하여 가스의 저장량을 대폭 향상시킬 수 있다.

연구팀은 기존에 확인된 메탄 및 수소와 같은 에너지 가스뿐만 아니라 이산화탄소에 대하여 처음으로 튜닝 효과를 유도했으며, 이산화탄소는 구조 I, II를, 메탄은 구조 H*에서 세계 최초로 튜닝 효과를 발견한 바 있다.

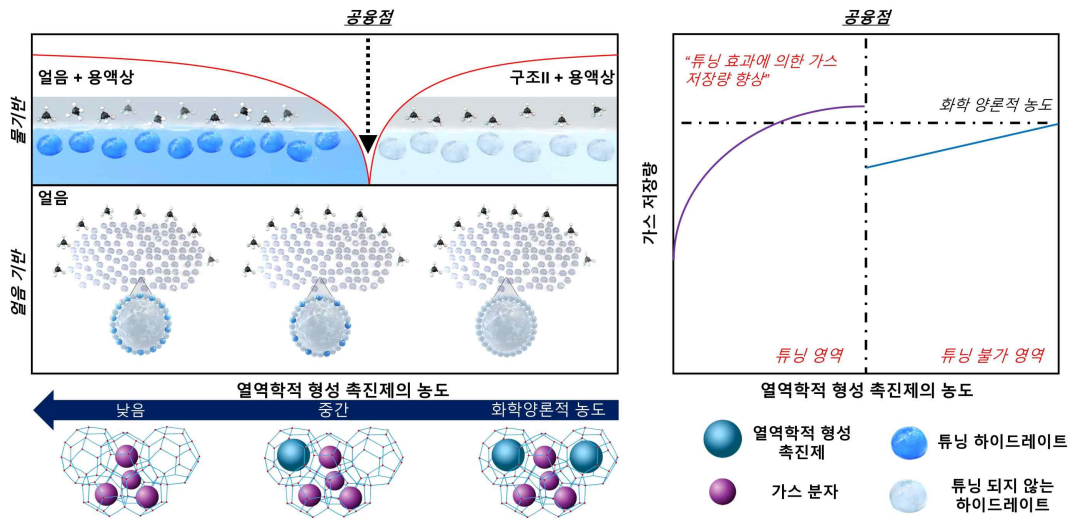
* 구조 I, II, H: 가스 하이드레이트의 동공 내 포집되는 분자의 크기와 모양에 따라 결정되는 가스 하이드레이트의 특징적 결정구조

연구팀은 이러한 튜닝 효과를 산업에 적용하기 위해, 열역학적 형성 촉진제를 활용하여 기존 얼음 기반의 가스 하이드레이트에서 연구된 튜닝 효과의 개념을 대량생산에 유리한 물 기반의 하이드레이트로 확장했으며, 튜닝 효과를 유도하기 위한 공용점* 및 하이드레이트 전환율과 같은 주요 인자들의 상관관계를 규명했다.

* 공용점(Eutectic point): 두 성분 이상의 고체 혼합물이 용융될 때 고용체를 만들지 않고 액체 상태에서 완전히 녹아 섞이는 불변점

그 결과, 얼음 기반으로 형성된 하이드레이트의 경우 열역학적 형성 촉진제를 화학 양론적 농도 이하에서 사용한 모든 경우에서 튜닝 효과가 유도된 반면, 물 기반으로 형성된 하이드레이트는 열역학적 형성 촉진제의 농도가 공용점 이하에서 사용된 경우에만 튜닝 효과가 유도되는 특이점을 확인하였다.

한편, 높은 튜닝 효과를 달성하기 위해 열역학적 형성 촉진제의 농도가 낮아야 하는데 이 경우 하이드레이트의 전환율 또한 낮아져 결과적으로 강한 튜닝 효과를 유도했음에도 불구하고 가스 저장량은 비교적 낮아지게 된다.



▲ 가스 하이드레이트에서의 공용점 및 튜닝 효과에 의한 가스 저장량 향상 메커니즘 모식도: 물 기반의 하이드레이트로부터 튜닝 효과를 유도하기 위해서는 열역학적 형성 촉진제의 농도는 공용점 이하의 조건에서 사용해야 하며, 이를 높은 전환율을 담보할 수 있는 공용점 인근의 높은 농도 영역에서 사용할 때, 실질적으로 튜닝 효과에 의해 향상된 가스 저장량을 확보할 수 있다.

연구팀은 열역학적 형성 촉진제를 공용점 아래의 농도에서 사용하되 공용점과 인접한 농도에서 하이드레이트를 형성할 경우, 튜닝 효과가 유도된 하이드레이트는 **화학양론적 농도로 형성된 하이드레이트 대비 가스 저장량이 대폭 향상됨**을 확인했다.

이를 통해 하이드레이트의 전환율과 튜닝 효과 간의 상충관계를 극복하기 위한 **열역학적 형성 촉진제의 최적 농도는 공용점 아래의 인접한 농도 영역임**을 확인했으며, 높은 전환율도 함께 얻기 위해서는 **높은 공용점을 갖는 열역학적 촉진제를 사용하는 것이 유리함**을 확인하였다.

박영준 교수는 "에너지 가스 저장 매체로 활용될 때 높은 에너지 밀도를 확보할 수 있는 가스 하이드레이트의 **에너지 저장량을 극대화하기 위해 튜닝 효과를 활용해 원천 기술을 확보했다**"면서 "이번 연구 성과는 다가오는 수소 에너지 시대에 **높은 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 기대된다**"고 밝혔다.

GIST 박영준 교수가 지도하고 이윤석 박사, 서동주 박사과정생, 이승인 박사과정생이 수행한 이번 연구는 한국연구재단의 중견 개인기초연구자 지원사업의 지원을 받아 수행되었으며, 화학 분야 상위 5% 이내의 저명 학술지인 'Accounts of Chemical Research'와 화학공학 분야 상위 5% 이내의 저명 학술지인 'Chemical Engineering Journal'에 각각 2023년 11월 7일과 10월 1일 온라인 게재됐다.

용어 설명

1. 블루 수소:

- 천연가스를 개질(reforming)하는 과정에서 발생하는 이산화탄소를 탄소 포집, 활용 및 저장 기술을 활용하여 제거하여 생산한 수소

2. 가스 하이드레이트(Gas hydrate):

- 물 분자가 기체 분자와 저온·고압의 조건에서 형성하는 결정성의 포집 화합물

3. 열역학적 형성 촉진제(Thermodynamic promoter):

- 저온·고압의 가스 하이드레이트 열역학적 형성 조건을 상온·저압으로 완화할 수 있는 형성 촉진제

4. 구조 I, II, H:

- 가스 하이드레이트의 나노 격자 공간 내 포집되는 분자의 크기와 모양에 따라 결정되는 가스 하이드레이트의 특징적 결정구조

5. 공융점(Eutectic point)

- 두 성분 이상의 고체 혼합물이 용융될 때 고용체를 만들지 않고 액체 상태에서 완전히 녹아 섞이는 불변점

6. 수소 혼입(Hydrogen blending)

- 도시가스 공급배관에 수소를 도시가스와 혼입하여 공급하는 것

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Accounts of Chemical Research(2022년 기준 JCR Impact factor: 18.3)
- 논문명 : Advances in Nanomaterials for Sustainable Gas Separation and Storage: Focus on Clathrate Hydrates
- 저자 정보 : 박영준 교수(GIST, 교신저자), 이윤석 박사(GIST, Georgia Tech., 공동 제1저자), 서동주(GIST, 공동 제1저자), 이승인(GIST, 공동저자)

2. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Chemical Engineering Journal(2022년 기준 JCR Impact factor: 15.1)
- 논문명 : Unlocking enhanced gas storage capacity in tuned methane hydrates: Exploring eutectic compositions and water-to-hydrate conversion
- 저자 정보 : 박영준 교수(GIST, 교신저자), 이윤석 박사(GIST, Georgia Tech., 공동 제1저자), 서동주(GIST, 공동 제1저자), 이승인(GIST, 공동저자)