



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0106582
(43) 공개일자 2019년09월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

B01D 59/26 (2006.01)

(52) CPC특허분류

B01D 59/26 (2013.01)

B01D 2253/204 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2018-0028277

(22) 출원일자 2018년03월09일

심사청구일자 2018년03월09일

(71) 출원인

울산과학기술원

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

경남과학기술대학교 산학협력단

경상남도 진주시 동진로 33 (칠암동)

(72) 발명자

문희리

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

오현철

경상남도 진주시 동진로 33 (칠암동, 경남과학기술대학교)

김진영

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

(74) 대리인

특허법인 무한

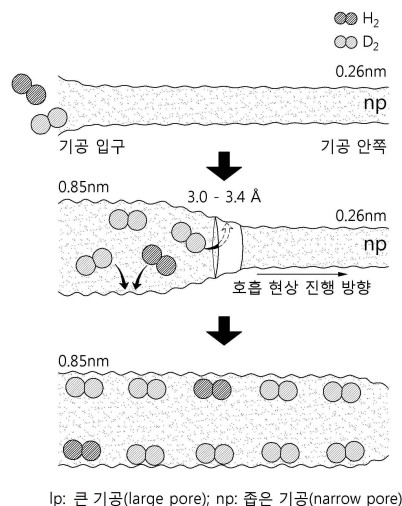
전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발명의 명칭 플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 혼합물의 분리 방법

(57) 요약

본 발명은 동위원소 혼합물의 효율적인 분리 방법에 대한 것으로, 보다 구체적으로는 플렉시블 금속 유기 골격체의 상기 기공 크기가 좁은 기공에서 큰 기공으로 변화하는 호흡 과정 중에 운동 양자체 효과를 효율적으로 일으키는 기공 크기를 제공할 수 있는 것을 이용하여 동위 원소 혼합물을 효율적으로 분리하는 방법에 관한 것으로서, 본 발명의 일 측면에 따르는 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법은, 다공성 플렉시블 금속 유기 골격체에 두 종류 이상의 동위원소 분자들을 주입하는 단계; 및 상기 금속 유기 골격체의 기공 크기를 변화시켜 상기 동위원소 분자 중 일부 분자를 선택적으로 포집하는 단계;를 포함한다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711050010
 부처명 과학기술정보통신부
 연구관리전문기관 한국연구재단
 연구사업명 개인기초연구(미래부)
 연구과제명 다양한 자극 및 반응을 통한 MOF 개조 연구
 기 여 율 1/3
 주관기관 울산과학기술원
 연구기간 2017.03.01 ~ 2018.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711053205
 부처명 과학기술정보통신부
 연구관리전문기관 한국연구재단
 연구사업명 개인기초연구
 연구과제명 나노세공체를 이용한 가벼운 기체 동위원소 분리 연구
 기 여 율 1/3
 주관기관 경남과학기술대학교
 연구기간 2016.06.01 ~ 2019.05.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711048392
 부처명 과학기술정보통신부
 연구관리전문기관 한국연구재단
 연구사업명 핵융합기초연구
 연구과제명 비용 효율적 수소 동위원소 분리 연구
 기 여 율 1/3
 주관기관 경남과학기술대학교
 연구기간 2016.03.04 ~ 2018.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

다공성 플렉시블 금속 유기 골격체에 두 종류 이상의 동위원소 분자들을 주입하는 단계; 및
상기 금속 유기 골격체의 기공 크기를 변화시켜 상기 동위원소 분자 중 일부 기체 분자를 선택적으로 포집하는 단계;를 포함하는,
플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
상기 금속 유기 골격체는, 외부 자극이 가해지면 기공 구조가 변화되는 것인,
플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,
상기 금속 유기 골격체는, Zn, Fe, Cu, Mg, V, Ni, Mn, Co, Ti, Zr, Cr, Mo 및 Al으로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상을 포함하는 것인,
플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,
상기 금속 유기 골격체는, MIL-53, MIL-47, MIL-88 및 MIL-101로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상을 포함하는 것인,
플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,
상기 금속 유기 골격체의 기공 크기는 외부 자극을 가하여 변화시키는 것인,
플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,
상기 외부 자극은, 주입하는 상기 동위원소 주위의 온도, 압력 또는 이 둘인 것인,

플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 7

제5항에 있어서,

상기 외부 자극은, 상기 금속 유기 골격체를 20 K 내지 100 K의 극저온 환경에 노출시키는 것인,

플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 8

제5항에 있어서,

상기 외부 자극은, 5 mbar 내지 1000 mbar 압력 조건인 것인,

플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 기공 크기는 최소일 때 0.25 nm 내지 0.60 nm 이고, 최대일 때 0.70 nm 내지 2.0 nm 인 것인,

플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 선택적으로 포집되는 일부 기체 분자는, 상기 동위원소 분자들 중 무거운 분자인 것인,

플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 금속 유기 골격체의 상기 기공 크기의 변화는, 운동 양자체 효과를 이용한 것인,

플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 두 종류 이상의 동위원소 분자들은, 중수소와 수소; 헬륨의 동위 원소; 질소의 동위 원소; 산소의 동위 원소; 및 탄소의 동위원소; 로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상인 것인,

플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

청구항 13

제1항에 있어서,
상기 동위원소 분리 방법은,
포집되는 특정 동위원소 분자 수 : 포집되지 않는 특정 동위원소 분자 수의 비(분리 효율)가 10 이상인 것인,
플렉시블 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 동위원소 혼합물의 효율적인 분리 방법에 대한 것으로, 보다 구체적으로는 플렉시블 금속 유기 골격체의 상기 기공 크기가 좁은 기공에서 큰 기공으로 변화하는 호흡 과정 중에 운동 양자체 효과를 효율적으로 일으키는 기공 크기를 제공할 수 있는 것을 이용하여, 동위원소 혼합물을 효율적으로 분리하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 동위원소의 존재가 발견된 후로부터, 혼재되어 있는 동위원소 입자 중 일부만을 효과적으로 분리할 수 있는 방법에 대한 다양한 시도가 있어왔다.

[0004] 특히, 이러한 동위원소의 분리 방법에 대한 시도는 수소와 중수소의 동위원소에 대하여 시도되어 왔다. 그 중 하나인 극저온증류(cryogenic distillation) 분리 방법은 분리에 많은 에너지가 필요할 뿐만 아니라 분리 효율($S_{D_2/H_2} < 1.5$) 이 매우 낮은 문제가 있었다.

[0006] 이와 같이 종래의 방식들에 따르면 높은 에너지를 들였음에도 분리 효율이 우수하게 구현되지 않았기 때문에 완전히 새로운 방식으로, 낮은 에너지를 이용하더라도 가능하고, 간단하면서도 높은 효율로 동위원소를 분리하기 위한 접근 방식이 필요한 상황이었다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명의 목적은, 종래의 동위원소 분리 방법과는 다른 방식을 이용하여 그 방법이 간단하고 낮은 에너지를 이용하더라도 높은 효율로 동위원소 입자들의 혼합물에서, 특정한 원자량을 가지는 동위원소 입자만을 높은 효율로 분리해내는 방법을 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명의 일 측면에 따르는 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법은, 플렉시블 금속 유기 골격체에 두 종류 이상의 동위원소 분자들을 주입하는 단계; 및 상기 금속 유기 골격체의 기공 크기를 변화시켜 상기 동위원소 분자 중 일부 분자를 선택적으로 포집하는 단계;를 포함한다.

[0011] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체는, 외부 자극이 가해지면 기공 구조가 변화되는 것일 수 있다.

[0012] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체는, Zn, Fe, Cu, Mg, V, Ni, Mn, Co, Ti, Zr, Cr, Mo 및 Al으로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상을 포함할 수 있다.

[0013] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체는, MIL-53, MIL-47, MIL-88 및 MIL-101로 이루어진 군에

서 선택되는 하나 이상을 포함하는 것일 수 있다.

- [0014] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체의 기공 크기는 외부 자극을 가하여 변화시키는 것일 수 있다.
- [0015] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 외부 자극은, 주입하는 상기 동위원소 주위의 온도, 압력 또는 이 둘인 것일 수 있다.
- [0016] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 외부 자극은, 상기 금속 유기 골격체를 20 K 내지 100 K의 극저온 환경에 노출시키는 것일 수 있다.
- [0017] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 외부 자극은, 5 mbar 내지 1000 mbar 압력 조건인 것일 수 있다.
- [0018] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 기공 크기는 최소일 때 0.25 nm 내지 0.60 nm 이고, 최대일 때 0.70 nm 내지 2.0 nm 인 것일 수 있다.
- [0019] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 선택적으로 포집되는 일부 분자는, 상기 동위원소 분자들 중 무거운 분자인 것일 수 있다.
- [0020] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체의 상기 기공 크기의 변화는, 운동 양자체(Kinetic Quantum Sieving) 효과를 이용한 것일 수 있다.
- [0021] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 두 종류 이상의 동위원소 분자들은, 중수소와 수소; 헬륨의 동위 원소; 질소의 동위 원소; 산소의 동위 원소; 및 탄소의 동위 원소; 로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상인 것일 수 있다.
- [0022] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 동위원소 분리 방법은, 포집되는 특정 동위원소 분자 수 : 포집되지 않는 특정 동위원소 분자 수의 비(분리 효율)가 10 이상인 것일 수 있다.

발명의 효과

- [0024] 본 발명의 일 측면에 따르면, 복잡하거나 높은 에너지를 소모함 없이도 기존의 방식과는 다른 방식의 접근법인 외부 자극에 의해 금속 유기 골격체의 기공 구조가 바뀌는 호흡 현상 동안에는 연속적으로 기공 크기가 바뀌는 것을 이용하여, 동위원소를 분리할 수 있는 최적의 기공 크기를 손쉽게 얻어냄으로써 동위원소 혼합물에서 특정 원자량을 가지는 입자들을 효율적으로 분리할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0026] 도 1은, 본 발명의 일 실시예에 따라 금속 유기 골격체가 호흡 현상에 의해 기공 크기가 변화하면서 수소와 중수소의 동위원소 혼합물 중 중수소 입자들을 높은 비율로 포집하여 중수소가 분리되는 과정을 나타내고 있다.
- 도 2는, 다양한 금속 유기 골격체 중, 운동양자체 효과(KQS)가 구현되는 금속유기 골격체들을 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0027] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 실시예들을 상세하게 설명한다. 다른 설명이 없는 한, 각 도면에 제시된 동일한 부호는 동일한 부재를 나타낸다.
- [0028] 아래 설명하는 실시예들에는 다양한 변경이 가해질 수 있다. 아래 설명하는 실시예들은 발명의 범위를 설명된 실시 형태로 한정하려는 것이 아니며, 본 출원을 통해 권리로서 청구하고자 하는 범위는 이들에 대한 모든 변경, 균등 물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.
- [0029] 실시예에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 실시예를 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소,

부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

- [0030] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 실시예가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0031] 또한, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면 부호에 관계없이 동일한 구성 요소는 동일한 참조부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 실시예를 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 실시예의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0033] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 실시예들을 상세하게 설명한다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.
- [0034] 아래 설명하는 실시예들에는 다양한 변경이 가해질 수 있다. 아래 설명하는 실시예들은 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 이들에 대한 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.
- [0035] 실시예에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 실시예를 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0036] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 실시예가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0037] 또한, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면 부호에 관계없이 동일한 구성 요소는 동일한 참조 부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 실시예를 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 실시예의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0039] 본 발명에서는 동위원소의 분리 방법과 관련하여, 다공성 물질의 양자체(Quantum Sieving) 효과를 이용한다.
- [0040] 특히 본 발명에서는 운동 양자체 효과(Kinetic Quantum Sieving Effect)를 이용하여 동위원소 중 상대적으로 무거운 입자를 효율적으로 분리 및 저장할 수 있는 기술을 이용한다.
- [0041] 운동 양자체 효과는 '극저온 환경의 크기가 한정된 기공에서는 수소(H_2)보다 중수소(D_2)가 더 빠르게 확산될 수 있다'는 내용이다. 이는 중수소의 드 브로이 파장이 수소보다 짧은 이유에서 기인하는 현상이다.
- [0042] 구체적으로, 본 발명의 일 실시예에서는 기공의 크기가 변화하면서 무거운 동위원소 분자가 상기 금속 유기 골격체의 내부로 더 빨리 확산되는 효과인 운동 양자체 효과를 이용할 수 있다.
- [0043] 이와 같은 운동 양자체 효과는, 일 예로서 수소와 중수소 동위원소의 혼합물에 적용하였을 경우 77 K(-196 °C) 이하 정도의 극저온 조건에서 0.6 nm(1 nm=십억분의 1 m)보다 작은 수준의 기공 크기를 가지는 구조에서 일어날 수 있는 것으로 파악되었다. 본 발명의 일 실시예에서는 이를 이용하여 동위원소 혼합물을 분리할 수 있다.
- [0045] 본 발명에서는 상기 다공성 물질로서 플렉시블한 금속 유기 골격체를 이용할 수 있다. 이러한 플렉시블한 금속 유기 골격체를 이용할 경우 외부 자극에 의해 미세한 기공(細孔)이 팽창되는 효과를 기대할 수 있다. 본 발명에서는 이와 같이 금속 유기 골격체의 미세 기공의 크기를 변화시키는 과정에서 동위원소 입자의 혼합물 중 특정한 입자들만을 선별적으로 분리해낼 수 있다.

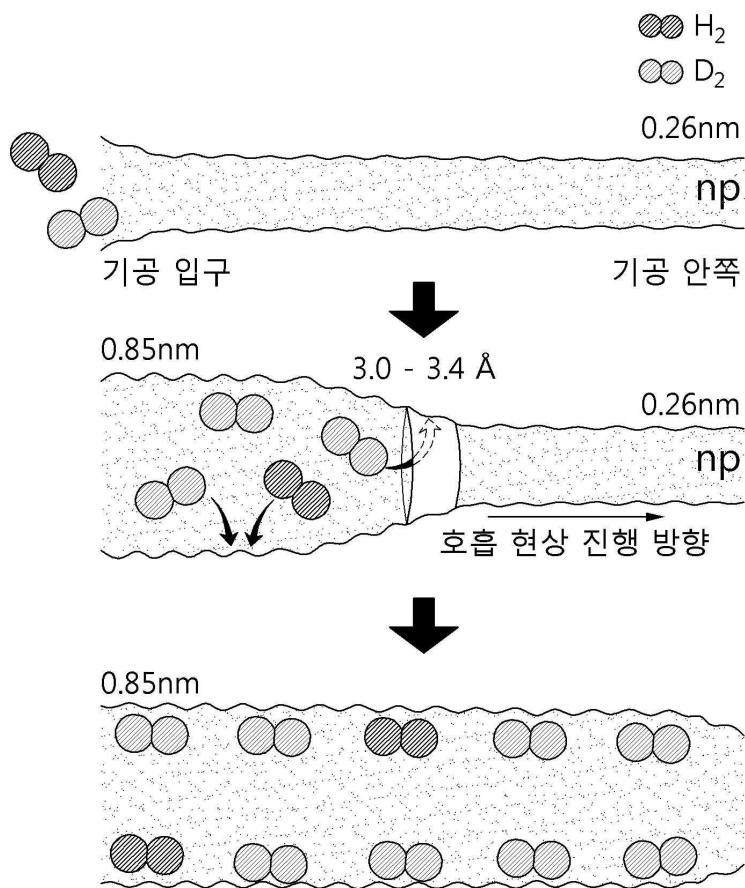
- [0047] 도 1은, 본 발명의 일 실시예에 따라 금속 유기 골격체가 호흡 현상에 의해 기공 크기가 변화하면서 수소와 중수소의 동위원소 혼합물 중 중수소 입자들을 높은 비율로 포집하여 중수소가 분리되는 과정을 나타내고 있다.
- [0048] 도 1은 동위원소 혼합물 중 일 예로서 수소 분자와 중수소 분자가 혼재된 혼합물을 예로 들었으나, 본 발명의 사상은 이에 한정되지 않는다. 아래에서는 도 1을 참고하여, 본 발명의 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법에 대하여 상세히 설명한다.
- [0050] 본 발명의 일 측에 따르는 금속 유기 골격체를 이용한 동위원소 분리 방법은, 다공성 플렉시블 금속 유기 골격체에 두 종류 이상의 동위원소 분자들을 주입하는 단계; 및 상기 금속 유기 골격체의 기공 크기를 변화시켜 상기 동위원소 분자 중 일부 분자를 선택적으로 포집하는 단계;를 포함한다.
- [0051] 일 예로서, 상기 금속 유기 골격체는 플렉시블한 것일 수 있다.
- [0052] 본 발명에 적용 가능한 플렉시블 금속 유기 골격체는 유기 리간드와 금속 빌딩 블록으로 구성된 배위결합물 중 외부자극에 의해 기공 구조가 변할 수 있는 다공성 물질을 의미하는 것일 수 있다. 이 때, 금속 유기 골격체를 구성하는 성분을 적절한 유기 리간드와 금속 빌딩 블록으로 조합하면 원하는 외부의 자극에 선택적으로 반응하여 기공의 크기나 구조가 바뀔 수 있게 설계할 수 있다.
- [0053] 본 발명에 적용되는 플렉시블 금속 유기 골격체의 일 예에 따르면 특정한 환경 하에서 기체를 주입할 경우, 기체의 온도와 압력에 따라 기공 크기가 달라지는 현상이 나타날 수 있다. 즉, 숨을 들이쉬고 내쉴 때 폐가 커지고 작아지는 것과 비슷하게, 호흡 현상이라고 부르는 현상이 발생할 수 있다.
- [0054] 일 예로서, 상기 동위원소 분자들은 두 종류일 수 있으나, 다른 일 예로서 세 종류 이상의 동위원소 분자들의 혼합물일 수 있다.
- [0055] 일 예로서, 상기 동위원소 분자들의 혼합물은, 동위원소를 포함하는 기체 분자들의 혼합물일 수 있다.
- [0056] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체는, 외부 자극이 가해지면 기공 구조가 변화되는 것일 수 있다.
- [0058] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체는, Zn, Fe, Cu, Mg, V, Ni, Mn, Co, Ti, Zr, Cr, Mo 및 Al으로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상을 포함하는 것일 수 있다.
- [0060] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체는, MIL-53, MIL-47, MIL-88 및 MIL-101로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상을 포함하는 것일 수 있다.
- [0061] 본 발명에 적용가능한 금속 유기 골격체는 미세 기공이 형성되어 있으면서, 기공의 크기가 변화하는 것일 수 있다. 또한, 본 발명에 적용가능한 금속 유기 골격체는 운동양자체 효과가 구현되는 것일 수 있다.
- [0062] 도 2는, 다양한 금속 유기 골격체를 이용하여 수소 동위원소를 분리한 결과 중에서, 운동양자체 효과(KQS)가 구현되는 금속유기 골격체들을 파란색으로 나타낸 그래프이다.
- [0064] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체의 기공 크기는 외부 자극을 가하여 변화시키는 것일 수 있다.
- [0065] 본 발명의 일 실시예에 따르면 금속 유기 골격체의 기공이 변화하는 순간을 이용하여 특정한 동위원소를 포집하는 방법을 제공하는 것이고, 이러한 금속 유기 골격체의 기공 크기의 변화는 다양한 외부 자극에 의하여 유발되는 것일 수 있다.
- [0066] 기공 크기가 변화하면서 금속 유기 골격체는 특정한 동위원소 입자에 대한 선택적인 선호도를 가지게 될 수 있다.

- [0068] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 외부 자극은, 주입하는 상기 동위원소 주위의 온도, 압력 또는 이 둘인 것일 수 있다.
- [0069] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 외부 자극은, 상기 금속 유기 골격체를 20 K 내지 100 K의 극저온 환경에 노출시키는 것일 수 있다.
- [0070] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 외부 자극은, 5 mbar 내지 1000 mbar 압력 조건인 것일 수 있다.
- [0072] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 기공 크기는 최소일 때 0.25 nm 내지 0.60 nm 이고, 최대일 때 0.70 nm 내지 2.0 nm 인 것일 수 있다.
- [0074] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 선택적으로 포집되는 일부 분자는, 상기 동위원소 분자들 중 무거운 분자인 것일 수 있다.
- [0075] 이는 본 발명에서 금속 유기 골격체의 기공 내부에서 상대적으로 더 무거운 분자들의 드브로이 파장이 더 짧기 때문에, 확산 속도가 더 빨라지기 때문이다. 가벼운 원소는 더 큰 드브로이 파장을 가지기 때문에 무거운 원소에 비해 좁은 공간 내에서 확산이 어려워지게 된다. 이러한 내용은 운동 양자체 효과에 대한 발생 원리로서, 1995년 네덜란드 라이덴대의 빈아커 교수 이후로 연구되어온 개념이다.
- [0077] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체의 상기 기공 크기가 변화하면서 운동 양자체(Kinetic Quantum Sieving) 효과가 발생하는 것일 수 있다.
- [0079] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 금속 유기 골격체의 상기 기공 크기가 좁은 기공에서 큰 기공으로 변화하는 호흡 과정 중에 운동 양자체 효과를 효율적으로 일으키는 기공 크기를 제공함으로써 무거운 동위원소 분자가 상기 금속 유기 골격체의 내부로 더 빨리 확산되는 것일 수 있다.
- [0081] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 두 종류 이상의 동위원소 분자들은, 중수소와 수소; 헬륨의 동위 원소; 질소의 동위 원소; 산소의 동위 원소; 및 탄소의 동위원소; 로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상인 것일 수 있다.
- [0083] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 동위원소 분리 방법은, 포집되는 특정 동위원소 분자 수 : 포집되지 않는 특정 동위원소 분자 수의 비(분리 효율)가 10 이상인 것일 수 있다.
- [0084] 상기 분리 효율은 중수소와 수소의 혼합물을 예로 들면, 포집하여 분리된 기체에 존재하는 중수소의 분자 수 / 수소 분자 수를 의미하는 것일 수 있다.
- [0085] 종래의 기술에 따르면 중수소 분자와 수소 분자 간의 상기 동위원소의 분리 효율은 1.5 미만 정도로 알려진 바 있다. 이와 비교하면, 본 발명의 분리 방법은 획기적인 효율의 동위원소 분리 기술임을 확인할 수 있다.
- [0087] **실시예**
- [0088] 본 발명의 실시예로서 플렉시블한 금속 유기 골격체로서 MIL-53(A1)을 사용하고, 상기 금속 유기 골격체에 상술한 방법에 의해 중수소와 수소 기체의 혼합물을 극저온 환경에서 주입하였다.
- [0089] 구체적으로는 상기 금속 유기 골격체에 동위원소인 수소, 중수소가 1:1로 혼합된 기체를 10밀리바(mbar)압력 조건, 40 K의 극저온 온도조건에서 120분 동안 노출시켰다.
- [0090] 상기 금속 유기 골격체에서 호흡 현상이 관찰되었으며, 이러한 호흡 현상은 기공 입구로부터 중심부 방향으로 발생되었다. 그 과정에서 기공의 평균 크기는 0.30 nm 에서 0.60 nm까지 변화하였다.

- [0091] 이 때, 높은 분리 효율 $S_{D_2/H_2}=13.6$ 을 나타내는 것으로 확인되었고, 많은 양의 중수소 2.9 mmol/g 를 한번에 분리하는 결과를 확보하였다.
- [0093] 이상으로 본 발명 내용의 특정한 부분을 상세히 기술하였는바, 당업계의 통상의 지식을 가진 자에게 있어서 이러한 구체적 기술은 단지 바람직한 실시예일 뿐이며, 이에 의해 본 발명의 범위가 제한되는 것이 아닌 점은 명백할 것이다. 따라서, 본 발명의 실질적인 범위는 첨부된 청구항들과 그것들의 등가물에 의하여 정의된다고 할 것이다.
- [0095] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.
- [0096] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

도면1



lp: 큰 기공(large pore); np: 좁은 기공(narrow pore)

도면2

