



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0031294  
(43) 공개일자 2022년03월11일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G21F 9/12 (2006.01) C02F 1/28 (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
G21F 9/12 (2013.01)  
C02F 1/281 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2020-0113051
- (22) 출원일자 2020년09월04일  
심사청구일자 2020년09월04일

- (71) 출원인  
연세대학교 산학협력단  
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
- (72) 발명자  
한원식  
서울특별시 서대문구 연세로 50, 과학원 s211 (신촌동)  
박종길  
서울특별시 서대문구 연세로 50, 과학원 s211 (신촌동)  
황정환  
서울특별시 서대문구 연세로 50, 과학원 s211 (신촌동)
- (74) 대리인  
특허법인(유한)아이시스

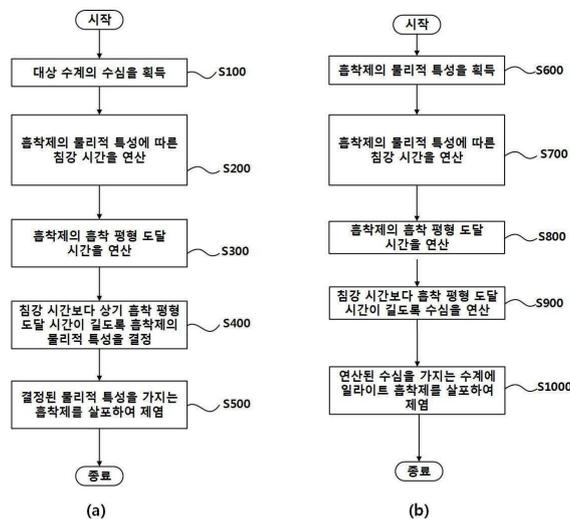
전체 청구항 수 : 총 14 항

(54) 발명의 명칭 수계의 방사성 물질을 제염하는 방법

(57) 요약

본 실시예에 의한 수중 방사성 세슘을 제염하는 방법은: 제염 대상 수계의 수심을 획득하는 단계와, 흡착제의 물리적 특성에 따른 침강 시간을 연산하는 단계와, 흡착제의 흡착 평형 도달 시간을 연산하는 단계와, 침강 시간보다 흡착 평형 도달 시간이 길도록 흡착제의 물리적 특성을 결정하는 단계 및 결정된 특성에 따른 흡착제를 살포하여 수중 방사성 세슘을 제염하는 단계를 포함한다.

대표도



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711102057
과제번호	T39150
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국기초과학지원연구원
연구사업명	창의형 융합연구사업(CAP)
연구과제명	하천·댐 중심으로 수중 방사능의 검측과 제염을 위한 기초 분석 및 표준화
기여율	1/1
과제수행기관명	한국기초과학지원연구원
연구기간	2020.01.01 ~ 2020.12.31

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

수중 방사성 세슘을 제염하는 방법으로, 상기 방법은:

제염 대상 수계의 수심을 획득하는 단계;

흡착제의 물리적 특성에 따른 침강 시간을 연산하는 단계;

상기 흡착제의 흡착 평형 도달 시간을 연산하는 단계;

상기 침강 시간보다 상기 흡착 평형 도달 시간이 길도록 흡착제의 물리적 특성을 결정하는 단계 및

상기 결정된 특성에 따른 흡착제를 살포하여 상기 수중 방사성 세슘을 제염하는 단계를 포함하는 수중 방사성 세슘 제염 방법.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 침강 시간을 연산하는 단계는,

상기 일라이트 흡착제의 상기 물리적 특성에 의한 침강 속도와,

상기 수계의 수심을 이용하여 연산되는 세슘 흡착제의 물리적 특성 산출 방법.

#### 청구항 3

제2항에 있어서,

상기 일라이트 흡착제의 상기 물리적 특성은,

상기 일라이트 흡착제의 크기, 코레이 모양 요인(Corey shape factor) 및 표면 거칠기를 포함하는 세슘 흡착제의 물리적 특성 산출 방법.

#### 청구항 4

제2항에 있어서,

상기 일라이트 흡착제의 상기 물리적 특성은,

상기 일라이트 흡착제의 크기를 포함하는 세슘 흡착제의 물리적 특성 산출 방법.

#### 청구항 5

제1항에 있어서,

상기 흡착 평형 도달 시간은,

상기 대상 수계의 상기 방사성 세슘의 농도로부터 결정되는 세슘 흡착제의 물리적 특성 산출 방법.

#### 청구항 6

제5항에 있어서,

상기 흡착 평형 도달 시간은,

상기 대상 수계의 상기 방사성 세슘 농도가 증가할수록 증가하는 세슘 흡착제의 물리적 특성 산출 방법.

#### 청구항 7

제1항에 있어서,

상기 흡착 평형 도달 시간은,

상기 대상 수계의 방사성 세슘 농도가 1000배 증가할 때 상기 흡착 평형 도달 시간은 3.3배 증가하도록 결정되는 세슘 흡착제의 물리적 특성 산출 방법.

#### 청구항 8

흡착제를 살포하여 방사성 세슘을 제염하는 제염 방법으로,

상기 흡착제의 물리적 특성을 획득하는 단계와,

상기 흡착제의 물리적 특성에 따른 침강 시간을 연산하는 단계와,

상기 흡착제의 흡착 평형 도달 시간을 연산하는 단계 및

상기 침강 시간보다 상기 흡착 평형 도달 시간이 길도록 상기 수심을 연산하는 단계 및

상기 수심을 가지는 수계에 상기 물리적 특성을 가지는 흡착제를 살포하여 제염하는 단계를 포함하는 방사성 세슘을 제염하는 제염 방법.

#### 청구항 9

제8항에 있어서,

상기 침강 시간은,

상기 흡착제의 상기 물리적 특성에 의한 침강 속도로부터 연산되는 제염 방법.

#### 청구항 10

제9항에 있어서,

상기 일라이트 흡착제의 상기 물리적 특성은,

상기 일라이트 흡착제의 크기, 코레이 모양 요인(Corey shape factor) 및 표면 거칠기를 포함하는 제염 방법.

#### 청구항 11

제9항에 있어서,

상기 일라이트 흡착제의 상기 물리적 특성은,

상기 일라이트 흡착제의 크기를 포함하는 제염 방법.

#### 청구항 12

제8항에 있어서,

상기 흡착 평형 도달 시간은,

상기 대상 수계의 상기 방사성 세슘의 농도로부터 결정되는 제염 방법.

#### 청구항 13

제12항에 있어서,

상기 흡착 평형 도달 시간은,

상기 대상 수계의 상기 방사성 세슘 농도가 증가할수록 증가하는 제염 방법.

#### 청구항 14

제8항에 있어서,

상기 흡착 평형 도달 시간은,

상기 대상 수계의 방사성 세슘 농도가 1000배 증가할 때 상기 흡착 평형 도달 시간은 3.3배 증가하도록 결정되는 제염 방법.

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 기술은 수계의 방사성 물질을 제염하는 방법과 관련된다.

**배경 기술**

[0002] 체르노빌 사고, 후쿠시마 원전사고 등과 같이 예기치 못한 사고로 의하여 방사능 누출이 발생할 수 있다. 특히 핵분열시 발생하는 주요 방사성 동위 원소 중 하나인 세슘-137(Cs-137)은 반감기가 30년을 초과하여 매우 위험하다. 세슘-137은 수용성의 물질로, 상수원 등의 수계가 오염되는 경우 큰 위험이 될 수 있다.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0003] 일본은 후쿠시마에서 원전 사고가 발생하여 방사능 물질을 배출하였으며, 중국은 동쪽 연안인 황해의 서쪽에 원전을 건설하고 있다. 한편, 우리나라는 남동 지역에 원전이 위치하고 있으나, 최근 지진이 발생하여 우리나라도 더 이상 원전의 안전을 낙관할 수 없는 상황이다.

[0004] 본 기술로 해결하고자 하는 과제 중 하나는, 예기치 못한 방사능 누출에 의한 수계 오염시 흡착제로 방사성 오염 물질을 제염할 수 있는 흡착제의 물리적 특성을 산출하여 방사성 물질을 제염하는 방법을 제공하기 위한 것이다.

**과제의 해결 수단**

[0005] 본 실시예에 의한 수중 방사성 세슘을 제염하는 방법은: 제염 대상 수계의 수심을 획득하는 단계와, 흡착제의 물리적 특성에 따른 침강 시간을 연산하는 단계와, 흡착제의 흡착 평형 도달 시간을 연산하는 단계와, 침강 시간보다 흡착 평형 도달 시간이 길도록 흡착제의 물리적 특성을 결정하는 단계 및 결정된 특성에 따른 흡착제를 살포하여 수중 방사성 세슘을 제염하는 단계를 포함한다.

[0006] 또한, 본 실시예에 의한 흡방사성 세슘을 제염하는 제염 방법은: 흡착제의 물리적 특성을 획득하는 단계와, 흡착제의 물리적 특성에 따른 침강 시간을 연산하는 단계와, 흡착제의 흡착 평형 도달 시간을 연산하는 단계와, 침강 시간보다 흡착 평형 도달 시간이 길도록 수심을 연산하는 단계 및 수심을 가지는 수계에 물리적 특성을 가지는 흡착제를 살포하여 제염하는 단계를 포함한다.

**발명의 효과**

[0007] 본 실시예에 의하면 제염 대상 수계의 수심에 따라 적합한 물리적 특성을 가지는 흡착제를 살포하여 제염을 수행함으로써 높은 효율로 제염을 수행할 수 있다는 장점이 제공되며, 흡착제의 물리적 특성에 따라 적합한 수심을 가지는 수계에 살포하여 제염을 수행함으로써 높은 효율로 제염을 수행할 수 있다는 장점이 제공된다.

**도면의 간단한 설명**

[0008] 도 1(a) 및 도 1(b)는 본 실시예에 의한 제염 방법의 개요를 도시하는 순서도이다.

도 2(a)는 흡착제의 크기와 모양에 따른 침강 속도를 도시한 도면이고, 도 2(b)는 흡착제의 크기와 거칠기에 따른 침강 속도를 도시한 도면이며, 도 2(c)는 흡착제의 모양과 거칠기에 따른 침강 속도를 도시한 도면이다.

도 3은 대표 모양값과 대표 거칠기를 가지며 크기에 대한 좌측 옆로 표시된 침강 깊이에 도달하는 침강 시간을 도시한다.

도 4(a)는 쿠블러 지수(Kubler index)가 1.22인 일라이트 결정을 촬영한 현미경 사진이고, 도 4(b)는 쿠블러 지수가 0.64인 일라이트 결정을 촬영한 현미경 사진이며, 도 4(c)는 쿠블러 지수가 0.20인 일라이트 결정을 촬

영한 현미경 사진이고, 도 4(d)는 쿠블러 지수가 0.15인 일라이트 결정을 촬영한 현미경 사진이다.

도 5는 수중 세습 농도가 100 µg/L 일 때의 시료별 시간에 따른 흡착량을 도시한 도면이다.

도 6은 수중 세습 농도가 100,000 µg/L 일 때 시료별 시간에 따른 흡착량을 도시한 도면이다.

도 7(a)는 수중 세습 농도가 100 µg/L 일 때, 흡착제의 크기에 대한 침강 시간과 흡착 시간을 도시한 도면이고, 도 7(b)는 수중 세습 농도가 100,000 µg/L 일 때, 흡착제의 크기에 대한 침강 시간과 흡착 시간을 도시한 도면이다.

도 8(a)는 수중 세습 농도가 100 µg/L 일 때, 흡착제의 크기에 대한 흡착제 살포를 위한 적정 수심을 도시한 도면이고, 도 8(b)는 수중 세습 농도가 100,000 µg/L 일 때, 흡착제의 크기에 대한 흡착제 살포를 위한 적정 수심을 도시한 도면이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0009] 이하에서는 첨부된 도면들을 참조하여 본 실시예에 의한 제염 방법의 개요를 도시한다. 도 1(a) 및 도 1(b)는 본 실시예에 의한 제염 방법의 개요를 도시하는 순서도이다. 본 실시예에 의한 수중 방사성 세습을 제염하는 방법은: 제염 대상 수계의 수심을 획득하는 단계(S100)와, 흡착제의 물리적 특성에 따른 침강 시간을 연산하는 단계(S200)와, 흡착제의 흡착 평형 도달 시간을 연산하는 단계(S300)와, 침강 시간보다 흡착 평형 도달 시간이 길도록 흡착제의 물리적 특성을 결정하는 단계(S400) 및 결정된 특성에 따른 흡착제를 살포하여 수중 방사성 세습을 제염하는 단계(S500)를 포함한다.
- [0010] 또한, 본 실시예에 의한 방사성 세습을 제염하는 제염 방법은: 흡착제의 물리적 특성을 획득하는 단계(S600)와, 흡착제의 물리적 특성에 따른 침강 시간을 연산하는 단계(S700)와, 흡착제의 흡착 평형 도달 시간을 연산하는 단계(S800)와, 침강 시간보다 흡착 평형 도달 시간이 길도록 수심을 연산하는 단계(S900) 및 수심을 가지는 수계에 물리적 특성을 가지는 흡착제를 살포하여 제염하는 단계(S1000)를 포함한다.
- [0011] 흡착제는 흡착성을 가지는 물체를 가루의 형태로 분쇄하여 대상 지역에 살포하는 것이 일반적이며, 수계에 살포하는 경우에는 방사성 물질을 가능한 많이 흡착한 후, 침강하는 것이 바람직하다. 수계에서 일라이트 흡착제의 침강 속도는 여러 가지 요인들에 의하여 영향을 받을 수 있다.
- [0012] 흡착제의 침강 속도에 영향을 미치는 요인들은 흡착제의 크기와, 모양 및 표면 거칠기가 있을 수 있다. 크기는 살포되는 흡착물이 분쇄된 흡착제가 구형인 경우를 가정하였을 때, 구의 직경(diameter)을 의미한다. 흡착제의 모양은 코레이 형태 요인(Corey shape factor)을 의미한다. 코레이 형태 요인의 값은 분쇄된 흡착제가 이상적인 구형에 가까울수록 1에 근접하고, 타원형이 될수록 값은 작아지며 평면 형태가 되었을 때에는 0에 근접한 값을 가진다. 또한, 표면 거칠기는 선행 연구에서 흡착물질을 분쇄하였을 때의 거칠기에 따라 분류한 값을 기준으로 하였다. 거칠기 값은 0에서 6까지의 값을 가질 수 있으며, 값이 클수록 표면이 부드러워진다.
- [0013] 침강 속도에 영향을 미치는 요인들을 크기와 모양, 크기와 거칠기 및 모양과 거칠기와 같이 두 개씩 비교하여 따라 침강 속도에 미치는 영향을 검출하였다. 도 2(a)는 흡착제의 크기와 모양에 따른 침강 속도를 도시한 도면이고, 도 2(b)는 흡착제의 크기와 거칠기에 따른 침강 속도를 도시한 도면이며, 도 2(c)는 흡착제의 모양과 거칠기에 따른 침강 속도를 도시한 도면이다. 도 2(a)를 참조하면, 코레이 형태 요인값이 증가할 때 침강 속도의 증가율에 비하여 흡착제의 크기가 증가할 때 침강 속도의 증가율이 더 큰 것을 알 수 있다. 흡착제의 크기가 50 µm 에서 100 µm로 두 배 증가하였을 때 침강 속도는 0.0042 m/sec 증가하였으나, 코레이 형태 요인 값이 0.4 에서 0.8로 두 배 증가하였을 때 침강 속도는 0.0004 m/sec 증가하는 것에 그쳤다.
- [0014] 도 2(b)를 참조하면, 표면 거칠기 값이 증가할 때의 침강 속도의 증가율에 비하여 흡착제의 크기가 증가할 때 침강 속도의 증가율이 더 큰 것을 알 수 있다. 표면 거칠기가 1에서 5로 증가할 때 침강 속도는 0.0001 m/sec 증가하는 것에 그쳤으나, 크기가 50 µm 에서 150 µm로 증가하였을 때 침강 속도는 0.0114 m/sec 증가하였다.
- [0015] 도 2(c)를 참조하면, 거칠기 값이 증가할 때의 침강 속도의 증가율에 비하여 코레이 형태 요인값이 증가할 때 침강 속도의 증가율이 더 큰 것을 알 수 있다. 표면 거칠기 값이 1에서 5로 증가할 때 침강 속도는 0.0002 m/sec 증가하는 것에 그쳤으나, 코레이 형태 요인값이 0.4m 에서 0.8m로 증가하였을 때 침강 속도는 0.0005 m/sec 증가하였다.
- [0016] 도 2(a) 내지 도 2(c)로 도시된 결과에 따르면 흡착제의 크기가 침강 속도에 가장 큰 영향을 미치며, 코레이 형태 요인으로 표현되는 흡착제의 모양과 흡착제의 거칠기 순으로 침강 속도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

이들 요인으로 연산된 흡착제의 침강 속도는 아래의 수학적 식 1로 표시될 수 있다.

**수학적 식 1**

$$W_* = R_3 10^{R1+R2}$$

$$\log R_1 = -3.76715 + 1.92944(\log D_*) + 0.09815(\log D_*)^{2.0} - 0.00575(\log D_*)^{3.0} + 0.00056(\log D_*)^{4.0}$$

$$R_2 = \log\left(1 - \frac{1-csf}{0.85}\right) - (1-csf)^{2.3} \tanh(\log D_* - 4.6) + 0.3(0.5-csf)^2 (\log D_* - 4.6)$$

$$R_3 = \left[0.65 - \left(\frac{csf}{2.83} \tanh(\log D_* - 4.6)\right)^{\frac{1+(3.5-P)}{2.5}}\right]$$

[0017]

[0018]

W\* : 무차원화된 침강 속도, D\* : 무차원화된 흡착제 직경, R1 : 직경이 흡착 속도에 미치는 영향을 나타내는 인자, R2 : 흡착제 입자 형태가 흡착 속도에 미치는 영향을 나타내는 인자, R3 : 흡착제 표면 거칠기가 흡착 속도에 미치는 영향을 나타내는 인자, csf : 흡착제 입자 형태를 나타내는 코레이 모양 인자(Corey shape factor), P : 흡착제 표면 거칠기를 나타내는 파워 거칠기 인자(Power roughness)를 의미한다.

[0019]

W\*는 실제 침강 속도(w<sub>s</sub>)를 액체의 밀도(ρ<sub>f</sub>)와 점성도(ν), 입자의 밀도(ρ<sub>s</sub>), 중력 가속도(g) 값을 이용하여 무차원화 시켜 나타낸 침강속도로, 아래의 수학적 식 2와 같이 표시될 수 있다.

**수학적 식 2**

$$W_* = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)g\nu} W_s^3$$

[0020]

[0021]

D\*는 입자의 직경(D<sub>n</sub>)을 액체의 밀도(ρ<sub>f</sub>)와 점성도(ν), 입자의 밀도(ρ<sub>s</sub>), 중력 가속도(g)로 무차원화 시킨 직경을 나타내며 아래의 수학적 식 3으로 표시될 수 있다.

**수학적 식 3**

$$D_* = \frac{(\rho_s - \rho_f)g}{\rho_f \nu^2} D_n^3$$

[0022]

$$csf = \frac{c}{\sqrt{ab}}$$

[0023]

csf는 코레이 모양 인자를 나타내며, 3차원의 입자가 a>b>c의 장축을 가질 때, 로 표현된다. 입자가 구형에 가까울수록 1.0의 값에 가깝고, 입자가 납작해질수록 0.0의 값에 가까워진다.

[0024]

P는 파워 거칠기 인자를 나타내며, 입자의 표면이 거칠수록 0.0의 값에 가깝고, 매끈할수록 6.0의 값에 가까워

$$csf=3.5$$

$$csf=2.0$$

진다. 일 예로, 자연 상태의 모래는 , 파쇄된 상태의 모래는 의 값을 가진다.

[0025] 이러한 요인으로부터, 흡착제의 밀도값이 주어지면 침강시간을 도출할 수 있다.

[0026] 표 1은 흡착제의 대표 모양값과 대표 거칠기에 대하여 50 μm와 150 μm의 크기를 가지는 흡착제가 6.5m의 수심을 가지는 수계에서의 침강 시간과 25.5m 수심에서의 침강 시간을 나타낸다.

표 1

	50μm	150μm
6.5m	0.841	0.132
25.5m	3.3	0.518

[0027]

[0028] 6.5 m는 서울의 상수원인 팔당호의 평균 수심이고, 25.5 m는 팔당호의 최대 수심이다. 표 1로 예시된 것과 같이 수심이 증가함에 따라 침강 시간은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 흡착제의 크기가 증가함에 따라 침강 시간은 감소하는 것으로 파악된다. 이러한 실험 결과를 도 3으로 예시하였다. 도 3은 대표 모양값과 대표 거칠기를 가지며 크기에 대한 좌측 옆로 표시된 침강 깊이에 도달하는 침강 시간을 도시한다. 이는 정적인 수계에서 얻어진 값이나, 방사능 오염이 발생하면 해당 수계의 흐름을 차단하여 제염을 수행하므로, 상기한 도 3으로 예시된 값들을 사용할 수 있다.

[0029] 도 4(a) 내지 도 4(d)는 흡착제를 형성하는 일라이트 샘플의 현미경 사진들이다. 도 4(a)는 쿠블러 지수(Kubler index)가 1.22인 일라이트 결정(이하, 시료 1)을 촬영한 현미경 사진이고, 도 4(b)는 쿠블러 지수가 0.64인 일라이트 결정(이하, 시료 2)을 촬영한 현미경 사진이며, 도 4(c)는 쿠블러 지수가 0.20인 일라이트 결정(이하, 시료 3)을 촬영한 현미경 사진이고, 도 4(d)는 쿠블러 지수가 0.15인 일라이트 결정(이하, 시료 4)을 촬영한 현미경 사진이다.

[0030] 천연 점토 광물인 일라이트는 생성 환경 및 풍화 정도에 따라 상이한 광물학적 특성을 나타내며 이는 세습 흡착 성능에도 영향을 미친다. 따라서 광물학적 결정성 지수인 쿠블러 지수(Kubler index)를 사용하여 일라이트 시료를 분류하였다. 쿠블러 지수는 X-선 회절 분석을 이용하여 측정할 수 있으며, 일라이트 메인 피크(≈10Å)의 반치폭 (최고점 기준 중간 지점의 피크 폭, Full width at half maximum)을 측정하여, 쿠블러 지수를 구하였다.

[0031] 도 5는 수중 세습 농도가 100 μg/L 일 때의 시료별 시간에 따른 흡착량을 도시한 도면이고, 도 5에서 적색은 도 4(a)로 도시된 시료 1로 제조된 흡착제의 실험결과이며, 녹색은 도 4(b)로 도시된 시료 2로 제조된 흡착제의 실험결과이고, 짙은 청색은 도 4(c)로 도시된 시료 3으로 제조된 흡착제의 실험결과이며, 밝은 청색은 도 4(d)로 도시된 시료 4로 제조된 흡착제의 실험결과이다.

[0032] 도 5를 참조하면, 수중 세습 농도가 100 μg/L 일 때, 쿠블러 지수가 높은 두 개의 샘플들이 쿠블러 지수가 낮은 두 개의 샘플들에 비하여 방사성 세습을 흡착하는 흡착량이 더 많은 것을 알 수 있다. 시간이 경과함에 따라 모든 흡착제들이 방사성 세습을 흡착하는 흡착량이 증가하나, 더욱 시간이 경과함에 따라 흡착량이 증가하지 않는 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다.

[0033] 흡착제들의 흡착속도가 최대흡착 속도의 0.1%에 도달하는 시간을 흡착 평형 도달 시간으로 설정하였다. 흡착 평형 도달 시간은 각각 0.262 시간(시료 1), 0.249 시간(시료 2), 0.388 시간(시료 3) 및 0.577 시간(시료 4)으로 확인할 수 있었다. 시료 1과 시료 2를 큰 흡착량을 가지고 빠른 흡착시간의 특성을 가지는 높은 쿠블러 지수 일라이트 그룹이라 묶어 취급할 때, 쿠블러 지수가 감소함에 따라 흡착 평형 도달 시간이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 수중 세습 농도가 100 μg/L 일 때, 쿠블러 지수가 높을수록 방사성 세습을 흡착하는 흡착량이

더 많고, 더 빨리 흡착 평형 시간에 도달한다.

- [0034] 도 6은 수중 세슘 농도가 100,000  $\mu\text{g/L}$  일 때 시료별 시간에 따른 흡착량을 도시한 도면이다. 도 6을 참조하면, 수중 세슘 농도가 100,000  $\mu\text{g/L}$  일 때, 쿠블러 지수가 큰 일라이트일수록 방사성 세슘을 흡착하는 흡착량이 많은 것을 알 수 있다.
- [0035] 또한, 쿠블러 지수가 감소함에 따라 최대 평형 도달 시간이 각각 1.168 시간(시료 1), 0.783 시간(시료 2), 2.383 시간(시료 3) 및 0.500 시간(시료 4)으로 흡착 평형 도달 시간이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 다만, 쿠블러 지수가 1.22인 일라이트는 흡착 평형 도달 시간이 1.168시간이고, 쿠블러 지수가 0.64인 일라이트는 흡착 평형 도달 시간이 0.783시간이며, 쿠블러 지수가 0.2인 일라이트는 흡착 평형 도달 시간이 2.348시간이고, 쿠블러 지수가 0.15인 일라이트는 흡착 평형 도달 시간이 0.5시간으로 측정되었다.
- [0036] 도 5와 도 6으로 도시된 결과를 참조하면 네 개 시료의 쿠블러 지수가 0.15, 0.2, 0.64, 1.22 와 같이 증가함에 따라 네 개 시료의 흡착량도 증가하는 경향을 보이며, 흡착량이 증가하는 정도는 쿠블러 지수에 비선형으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다.
- [0037] 또한, 수중 세슘 농도가 100  $\mu\text{g/L}$ , 100,000  $\mu\text{g/L}$  일 때 모두 시료 2, 시료 1 및 시료 3의 순서대로 흡착시간이 증가하는 경향을 확인할 수 있으나, 시료 4의 경우는 농도별 흡착 매커니즘(Frayed edge site, planar site)의 변화로 인해 농도별로 상이한 결과가 나타난 것으로 파악된다. 이러한 결과는 흡착제 시료의 쿠블러 지수 이외에도 시료의 화학구성과 시료의 흡착 사이트 별 흡착 매커니즘이 상이한 것으로부터 기인되는 것으로 파악된다.
- [0038] 결과적으로, 수중 세슘 농도가 100  $\mu\text{g/L}$  일 때 최장 흡착 평형 도달 시간은 가장 낮은 쿠블러 지수에 있어서도 0.577 시간이었고, 평균 흡착 평형 도달 시간은 0.369 시간이었다. 또한, 수중 세슘 농도가 1,000배 증가한 100,000  $\mu\text{g/L}$  일 때 최장 흡착 평형 도달 시간은 2.348시간이었으며, 의외로 가장 낮은 쿠블러 지수에서 가장 짧은 0.500 시간이었다. 즉, 수중 세슘 농도가 100  $\mu\text{g/L}$ 에서 100,000  $\mu\text{g/L}$ 으로 1,000배 증가하는 동안 평균 흡착 평형 도달 시간은 대략 3.3배 증가하는 것을 알 수 있다.
- [0039] 이러한 시료별 흡착 시간 변화 경향으로부터 수계의 수중 세슘 농도를 파악하면 최장 흡착 평형 도달 시간을 연산할 수 있다. 일 예로, 수중 세슘 농도가 100  $\mu\text{g/L}$ 에서 100,000  $\mu\text{g/L}$ 으로 1,000배 증가하는 동안 시료 1의 흡착 평형 도달 시간은 4.5배, 시료 2의 흡착 평형 도달 시간은 3.1배, 시료 2의 흡착 평형 도달 시간은 6.1배 증가하였으며, 시료 4의 흡착 평형 도달 시간은 0.9배 증가하였다.
- [0040] 도 7(a)는 수중 세슘 농도가 100  $\mu\text{g/L}$  일 때, 흡착제의 크기에 대한 침강 시간과 흡착 시간을 도시한 도면이고, 도 7(b)는 수중 세슘 농도가 100,000  $\mu\text{g/L}$  일 때, 흡착제의 크기에 대한 침강 시간과 흡착 시간을 도시한 도면이다. 도 7(a) 내지 도 7(b)에서 각 수심별 침강 시간은 실선으로 도시되었으며, 흡착 평형 도달 시간은 회색의 점선으로 도시되었다. 또한, 검정색 실선은 시료의 쿠블러 지수와 무관한 최장 흡착 평형 도달 시간을 도시한다.
- [0041] 살포된 흡착제는 수중 방사성 세슘을 흡착하여 흡착 평형에 도달한 후 정해진 수계의 바닥까지 침강하여야 한다. 따라서, 주어진 수계의 수심에 대하여 침강 시간이 흡착 평형 도달 시간보다 큰 흡착제의 크기를 연산하여야 한다. 도 7(a) 및 도 7(b)에서, 시료 1 내지 시료 4에 대하여 주어진 수계의 수심에 대하여 침강 시간이 흡착 평형 도달 시간보다 큰 경우를 음영으로 도시하였다.
- [0042] 도 7(a)를 참조하면, 수중 세슘 농도가 100  $\mu\text{g/L}$  이면, 시료 1 및 시료 2의 최대 크기가 대략 100  $\mu\text{m}$  일때 팔당호 평균 수심인 6.5m에 대하여 흡착 평형 도달 시간보다 침강 시간이 큰 것으로 연산된다. 동일한 수심에 대하여 시료 3의 최대 크기는 80  $\mu\text{m}$ , 시료 4의 최대 크기는 60  $\mu\text{m}$ 로 연산된다.
- [0043] 도 7(a)에서 굵은 직선은 시료 1, 시료 2, 시료 3 및 시료 4의 흡착 평형 도달 시간 중 최대 흡착 평형 도달 시간을 도시한다. 따라서, 시료 1, 시료 2, 시료 3 및 시료 4에 무관하게 최대 60  $\mu\text{m}$ 의 크기를 가지는 일라이트 흡착제를 수심 6.5m의 수계에 살포하여 방사성 세슘을 제염할 수 있다. 또한, 10m의 수심은 80  $\mu\text{m}$ , 15m의 수심은 100  $\mu\text{m}$ , 20m의 수심은 120  $\mu\text{m}$ 의 일라이트 흡착제를 살포하여 방사성 세슘을 제염할 수 있다.
- [0044] 일라이트 흡착제는 원재료인 일라이트 광물을 분쇄하여 얻어진다. 따라서, 요청되는 흡착제의 크기가 작으면 작을수록 일라이트 광물을 더욱 작은 크기로 분쇄하여야 하므로 공정 비용이 증가한다. 따라서, 흡착제의 크기를 크게 형성할 수 있는 시료일수록 경제적인 것을 알 수 있으며, 도 7(a)로 예시된 경우에서 수계 6.5m의 수심에서 시료 1 및 시료 2가 가장 경제적인 것으로 파악할 수 있다.
- [0045] 도 7(b)를 참조하면, 수중 세슘 농도가 100,000  $\mu\text{g/L}$  이면, 시료 4의 최대 크기가 대략 65  $\mu\text{m}$ 일 때 팔당호 평균

수심인 6.5m에 대하여 흡착 평형 도달 시간보다 침강 시간이 큰 것으로 연산된다. 이어서 시료 2의 최대 크기로 대략 50 $\mu$ m, 시료 1의 최대 크기로 대략 40 $\mu$ m, 시료 3의 최대 크기가 대략 30 $\mu$ m 일때 팔당호 평균 수심인 6.5m에 대하여 흡착 평형 도달 시간보다 침강 시간이 큰 것으로 연산된다.

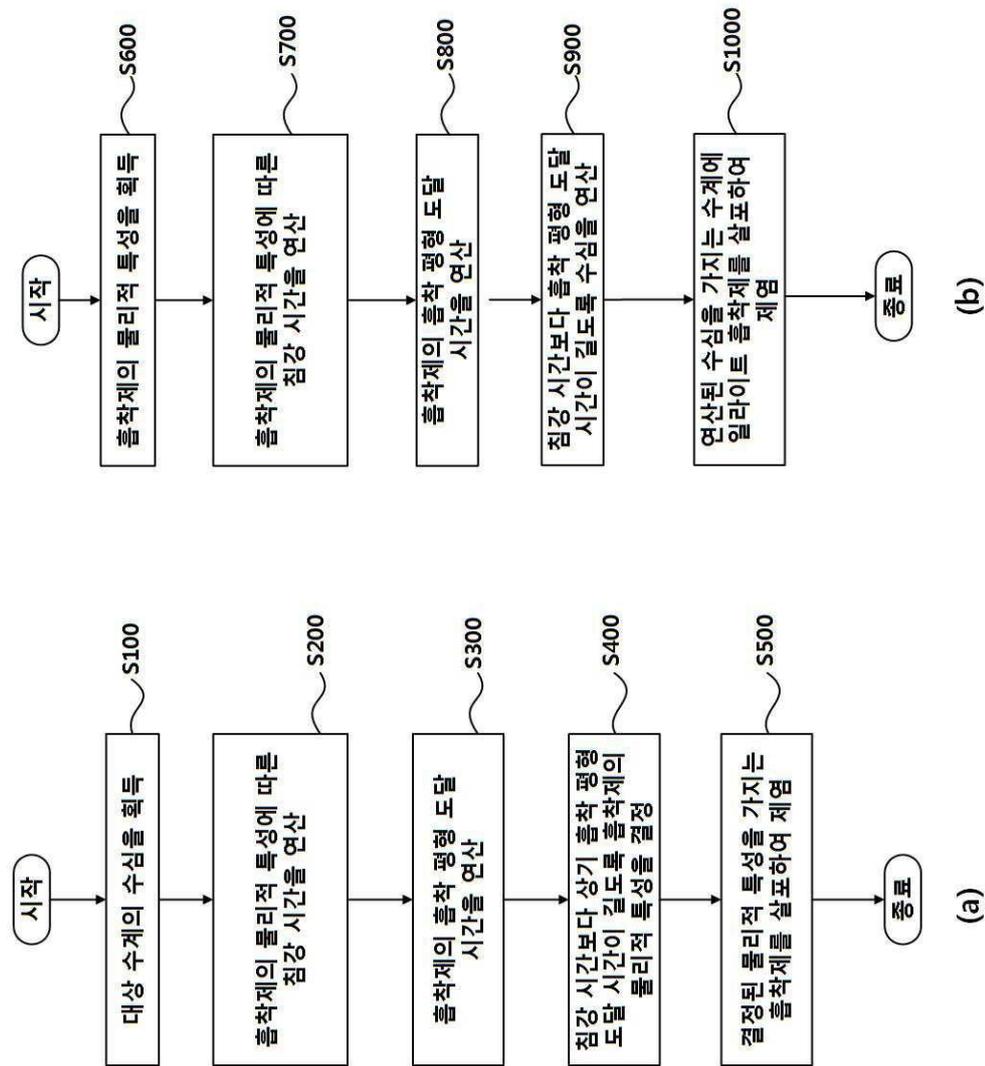
- [0046] 도 7(b)에서 굵은 직선은 시료 3의 흡착 평형 도달 시간으로 네 개의 시료 중 최대 흡착 평형 도달 시간을 도시한다. 따라서, 시료 1, 시료 2, 시료 3 및 시료 4에 무관하게 최대 30 $\mu$ m의 크기를 가지는 일라이트 흡착제를 수심 6.5m의 수계에 살포하여 방사성 세슘을 제염할 수 있다. 또한, 10m의 수심은 35 $\mu$ m, 15m의 수심은 45 $\mu$ m, 20m의 수심은 50 $\mu$ m의 일라이트 흡착제를 살포하여 방사성 세슘을 제염할 수 있다.
- [0047] 상술한 바와 마찬가지로, 도 7(b)로 예시된 경우에서 수계 6.5m의 수심에서는 시료 4 및 시료 2가 가장 경제적인 것으로 파악할 수 있다.
- [0048] 도 8(a)는 수중 세슘 농도가 100 $\mu$ g/L 일 때, 흡착제의 크기에 대한 흡착제 살포를 위한 적정 수심을 도시한 도면이고, 도 8(b)는 수중 세슘 농도가 100,000 $\mu$ g/L 일 때, 흡착제의 크기에 대한 흡착제 살포를 위한 적정 수심을 도시한 도면이다.
- [0049] 도 8(a)를 참조하면, 실선은 흡착제의 크기에 대한 침강 시간을 도시한 선도이고, 회색 점선은 흡착 평형도달 시간을 도시한다. 수중 세슘 농도가 100 $\mu$ g/L 이고 흡착제의 크기가 모두 50 $\mu$ m로 동일할 때, 시료 4의 흡착제는 최소 수계의 수심 4.5m 일 때 흡착 평형 도달 시간보다 침강 시간이 큰 것으로 연산된다. 따라서, 50 $\mu$ m의 동일한 크기의 시료 4 흡착제를 사용할 수 있는 최소 수심은 4.5m이고, 시료 3 흡착제는 최소 수심 3.1m, 시료 2 및 시료 1의 흡착제는 대략 2.1m와 2.0m의 최소 수심에서 사용가능한 것으로 파악된다. 또한, 100 $\mu$ m의 동일한 크기의 흡착제를 사용하는 경우, 시료 3의 흡착제를 사용할 수 있는 최소 수심은 10m 이고, 시료 2 및 시료 1의 흡착제를 사용할 수 있는 최소 수심은 대략 **6.9m 와 6.5m** 인 것으로 파악된다.
- [0050] 도 8(b)를 참조하면, 흡착제의 크기가 모두 50 $\mu$ m로 동일하고, 수중 세슘 농도가 100,000 $\mu$ g/L 일 때, 시료 3 흡착제를 사용할 수 있는 최소 수심은 18.2m이고, 시료 1 흡착제는 최소 수심 9.1m, 시료 2를 사용할 수 있는 최소 수심은 6.3m, 시료 4의 흡착제는 대략 3.9m의 최소 수심에서 사용가능한 것으로 파악된다.
- [0051] 본 발명에 의하면 상술한 바와 같이, 흡착제 크기 등의 물리적 요인으로부터 높은 효율로 방사성 물질을 제염할 수 있는 수심을 결정할 수 있으며, 나아가 제염될 수계의 수심으로부터 높은 효율로 제염을 수행하기 위하여 살포될 흡착제의 크기를 연산할 수 있다는 장점이 제공된다.
- [0052] 본 발명에 대한 이해를 돕기 위하여 도면에 도시된 실시 예를 참고로 설명되었으나, 이는 실시를 위한 실시예로, 예시적인 것에 불과하며, 당해 분야에서 통상적 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시 예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 첨부된 특허청구범위에 의해 정해져야 할 것이다.

**부호의 설명**

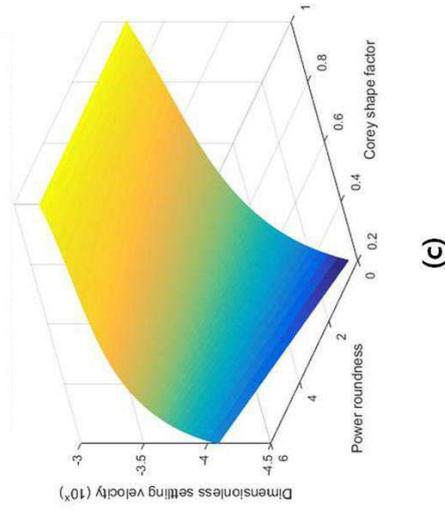
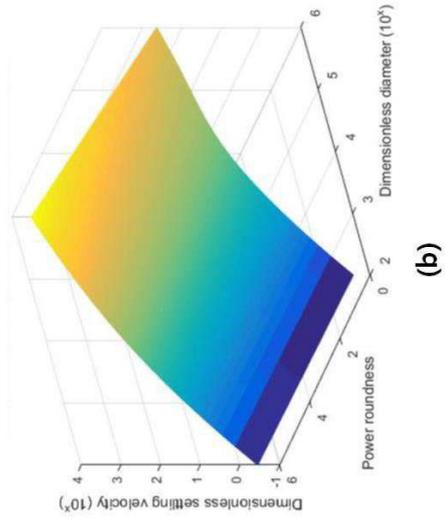
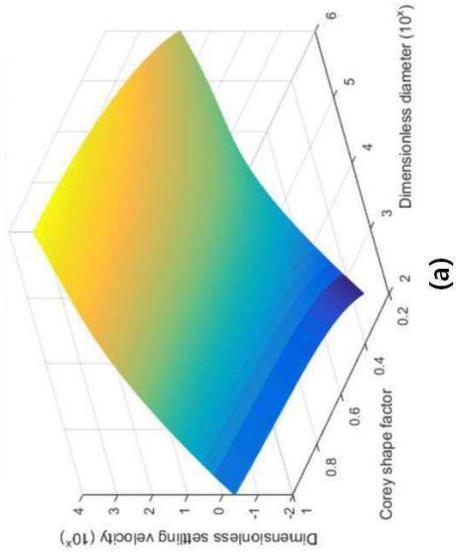
- [0053] S100~S500: 일 실시예에 의한 제염 방법의 각 단계
- S600~S1000: 다른 실시예에 의한 제염 방법의 각 단계

도면

도면1



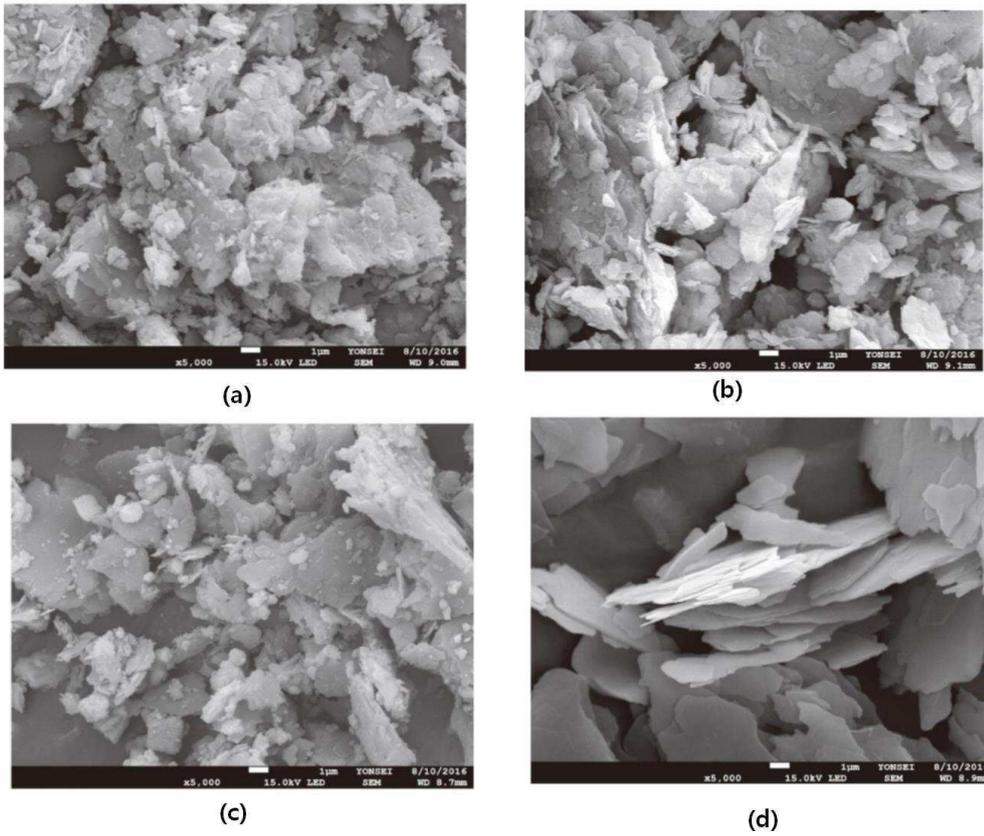
도면2



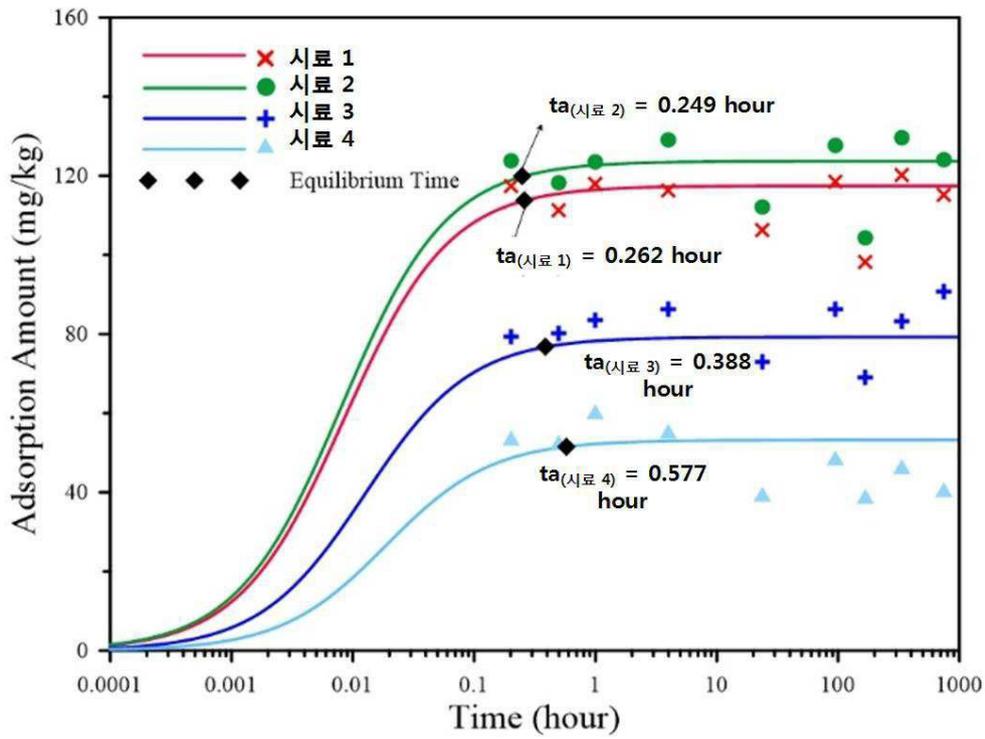
도면3

Residence Time (hour)	Diameter (m)																		
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
1	7.81E-01	3.44E-01	1.97E-01	1.29E-01	9.29E-02	7.07E-02	5.61E-02	4.95E-02	0.038569	0.0328721	0.0283516	0.0252564	0.0225664	0.0203804	0.01842	0.016831	0.015475	0.014307	0.013202
2	1.56E+00	6.87E-01	3.93E-01	2.59E-01	1.98E-01	1.41E-01	1.12E-01	9.19E-02	0.077139	0.066037	0.057442	0.0506317	0.045129	0.040608	0.03684	0.033661	0.03095	0.028614	0.026585
3	2.342988	1.031186	0.586977	0.389282	0.278651	0.210332	0.168273	0.137834	0.115708	0.099055	0.081657	0.0725947	0.0659492	0.060912	0.0563261	0.052164	0.048424	0.045221	0.042337
4	3.123984	1.374915	0.766355	0.517771	0.371534	0.282709	0.224365	0.183779	0.154277	0.130273	0.114864	0.101263	0.0902357	0.081216	0.073681	0.067333	0.061899	0.057238	0.053117
5	3.904931	1.719644	0.983234	0.647137	0.464418	0.353396	0.280456	0.230724	0.192647	0.165091	0.143604	0.126579	0.112832	0.10182	0.0921101	0.084153	0.077374	0.071535	0.066482
6	4.685977	2.062373	1.179553	0.776594	0.557302	0.424063	0.336547	0.275669	0.231416	0.198611	0.172323	0.151894	0.135866	0.121824	0.110521	0.100984	0.092849	0.085842	0.079755
7	5.466973	2.406102	1.378672	0.905992	0.650185	0.49474	0.392638	0.321614	0.269896	0.231128	0.201046	0.177271	0.157995	0.142127	0.128841	0.117815	0.108323	0.100149	0.093047
8	6.247969	2.74983	1.573271	1.035419	0.743009	0.563417	0.448729	0.367559	0.308555	0.261446	0.229767	0.202526	0.180515	0.162481	0.147361	0.134645	0.123798	0.114436	0.10634
9	7.028965	3.093559	1.76993	1.164847	0.835952	0.636095	0.504827	0.403503	0.347124	0.297165	0.256486	0.227942	0.203079	0.182735	0.165782	0.151476	0.139273	0.128673	0.119632
10	7.809951	3.472788	1.965589	1.294274	0.928836	0.700772	0.560911	0.459448	0.395694	0.339188	0.287208	0.251157	0.226543	0.203039	0.184202	0.168307	0.154748	0.143089	0.132935
11	8.590957	3.781017	2.163247	1.423701	1.021719	0.777449	0.617002	0.505393	0.424263	0.363201	0.311593	0.278473	0.248268	0.223343	0.202622	0.185137	0.170222	0.157376	0.146217
12	9.371953	4.124746	2.359006	1.553129	1.114603	0.848126	0.673094	0.551338	0.462832	0.396219	0.344451	0.303769	0.270772	0.243647	0.221042	0.201968	0.185697	0.171683	0.15911
13	10.15205	4.468474	2.556565	1.682536	1.207487	0.918803	0.729185	0.597283	0.501402	0.429238	0.373372	0.329704	0.293336	0.263951	0.239462	0.218799	0.201172	0.185099	0.172802
14	10.93395	4.812203	2.753224	1.811984	1.30037	0.989481	0.783276	0.643227	0.539977	0.462256	0.402093	0.35442	0.315901	0.282355	0.257882	0.235629	0.216647	0.200297	0.188095
15	11.71494	5.155952	2.949883	1.941411	1.392324	1.060158	0.841367	0.689172	0.578541	0.495274	0.430813	0.379736	0.338465	0.304599	0.276803	0.252426	0.232122	0.214604	0.199887
16	12.49594	5.499661	3.146542	2.070838	1.486137	1.130835	0.897458	0.735117	0.61711	0.528293	0.459534	0.405052	0.361029	0.324863	0.294723	0.268291	0.247596	0.228911	0.21268
17	13.27693	5.84339	3.3432	2.200266	1.579021	1.201512	0.956549	0.781062	0.655679	0.561311	0.488255	0.430367	0.383593	0.345167	0.313143	0.286121	0.263071	0.243218	0.225972
18	14.05793	6.187119	3.539859	2.328693	1.671805	1.27188	1.00864	0.827007	0.694249	0.584329	0.516678	0.455663	0.406158	0.365471	0.331563	0.302852	0.278546	0.257535	0.239255
19	14.83893	6.530847	3.738518	2.45912	1.764788	1.342866	1.067332	0.872951	0.732818	0.627548	0.546697	0.480998	0.428722	0.385775	0.349983	0.319783	0.294402	0.271852	0.252557
20	15.61992	6.874576	3.933177	2.589548	1.857672	1.413544	1.121823	0.918896	0.771387	0.660366	0.574418	0.506315	0.451286	0.406078	0.368403	0.336613	0.309495	0.286139	0.265849
21	16.40092	7.218305	4.129836	2.717975	1.950555	1.484221	1.177914	0.964841	0.809577	0.693384	0.603189	0.53163	0.473851	0.426382	0.386824	0.353444	0.324497	0.300446	0.279142
22	17.18191	7.562034	4.326495	2.847403	2.045439	1.554898	1.234005	1.010786	0.848526	0.726402	0.63186	0.556946	0.496415	0.446686	0.405244	0.370275	0.340445	0.314753	0.292434
23	17.96291	7.905763	4.523154	2.97603	2.136322	1.623575	1.290096	1.06731	0.887096	0.759421	0.660581	0.582262	0.518979	0.466989	0.423664	0.387105	0.35592	0.32906	0.305727
24	18.74391	8.249491	4.719812	3.106237	2.229206	1.692252	1.346187	1.102676	0.925655	0.792439	0.6899302	0.607377	0.541544	0.487294	0.442084	0.403936	0.371394	0.343367	0.319019
25	19.5249	8.59322	4.916471	3.233695	2.32209	1.76693	1.402278	1.14862	0.964234	0.835457	0.718022	0.632893	0.564108	0.507598	0.460504	0.420767	0.388869	0.357674	0.332312
26	20.3059	8.936949	5.11313	3.365112	2.414073	1.837607	1.459369	1.194565	1.002604	0.865476	0.745743	0.655009	0.586672	0.527502	0.478924	0.437597	0.402344	0.371981	0.345604
27	21.08689	9.280678	5.309789	3.49434	2.507837	1.908284	1.514465	1.24051	1.041373	0.891494	0.775464	0.683325	0.609237	0.548206	0.497345	0.454428	0.417819	0.386288	0.358897
28	21.86789	9.624407	5.506448	3.629967	2.60074	1.978962	1.570552	1.268455	1.079942	0.924512	0.804185	0.70884	0.631801	0.56851	0.513765	0.471259	0.438294	0.400595	0.372169
29	22.64889	9.968135	5.703107	3.753394	2.693624	2.049638	1.626643	1.3324	1.118512	0.95759	0.828206	0.724156	0.645465	0.588814	0.534185	0.488089	0.448768	0.414902	0.385482
30	23.42988	10.31186	5.899766	3.880222	2.786508	2.120316	1.682734	1.378434	1.157081	0.990549	0.861627	0.759472	0.67693	0.609118	0.552605	0.50492	0.464243	0.428208	0.396774
31	24.21088	10.65556	6.096424	4.012249	2.879391	1.738825	1.424289	1.195651	1.023567	0.890348	0.784768	0.699484	0.629422	0.571025	0.521751	0.479716	0.443515	0.412087	0.380577
32	24.99188	10.99582	6.293083	4.141677	2.972275	2.28167	1.494916	1.470234	1.23422	0.956595	0.919069	0.810103	0.722058	0.649726	0.589445	0.538581	0.495193	0.457822	0.425359
33	25.77287	11.34305	6.489742	4.271104	3.065198	2.332347	1.551007	1.516179	1.272789	1.069604	0.94779	0.835451	0.744623	0.670033	0.626286	0.572243	0.526142	0.486436	0.451944
34	26.55387	11.69678	6.686401	4.400531	3.158042	2.403024	1.607099	1.562124	1.311359	1.126222	0.976511	0.860735	0.767187	0.690333	0.646286	0.592243	0.546142	0.496436	0.451944
35	27.33486	12.03051	6.88306	4.529959	3.250926	2.472701	1.69319	1.608069	1.15564	1.005231	0.888095	0.789751	0.710637	0.644706	0.589073	0.541617	0.500743	0.465237	0.429527

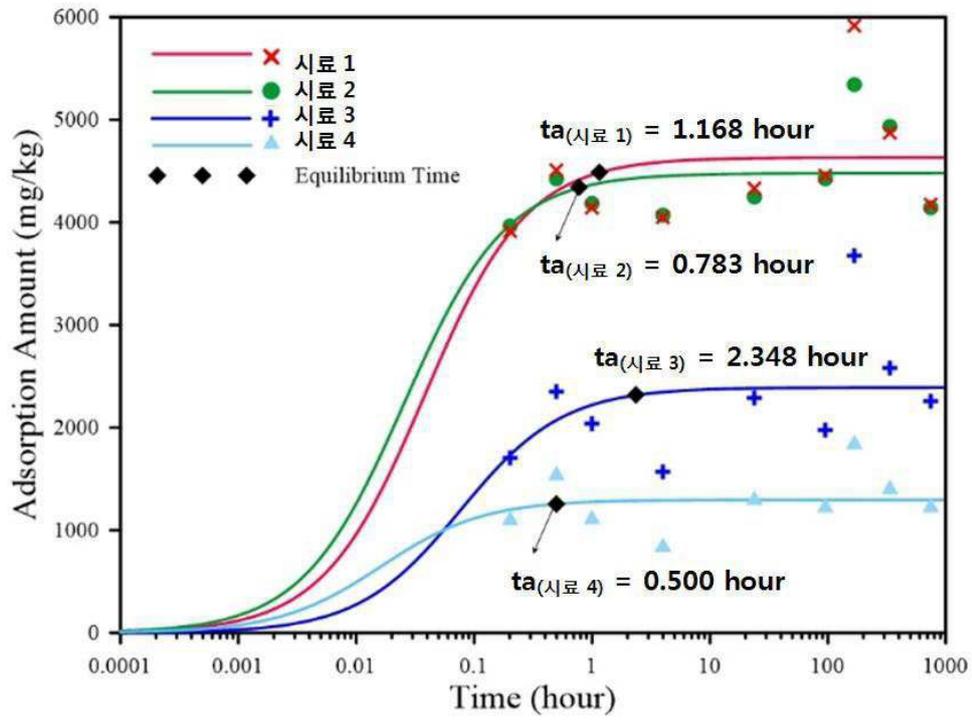
도면4



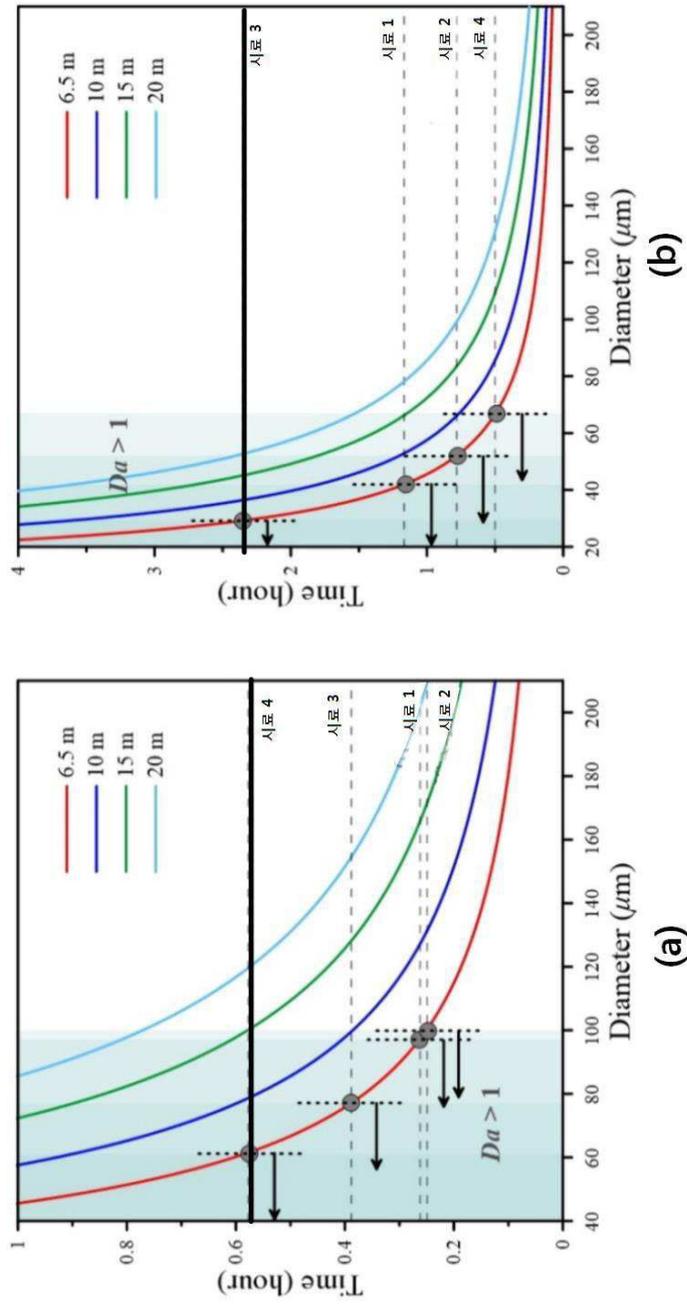
도면5



도면6



도면7



도면8

