



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년11월11일
(11) 등록번호 10-2177448
(24) 등록일자 2020년11월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 30/00 (2020.01) G06T 17/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G06F 30/20 (2020.01)
G06T 17/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0098876
(22) 출원일자 2019년08월13일
심사청구일자 2019년08월13일
(56) 선행기술조사문헌
KR101525512 B1
KR101370496 B1
KR101110787 B1
“공극 스케일에서 이방성을 가진 다공성 암석의 유체 투과율에 관한 수치적 연구”, 2013 한국암반공학회 춘계 총회 및 학술발표회 논문집(pp. 29-35), 2013년 3월

(73) 특허권자
연세대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
(72) 발명자
윤대섭
서울특별시 서초구 서초대로65길 13-10, 107동 502호 (서초동, 서초래미안아파트)
강동훈
경상남도 진주시 축석로 141번길 9
(74) 대리인
김인철

전체 청구항 수 : 총 14 항

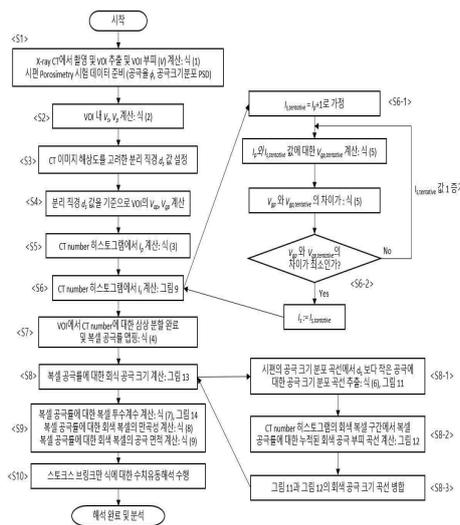
심사관 : 박승철

(54) 발명의 명칭 X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법

(57) 요약

본 발명은 컴퓨터를 포함하는 연산처리수단에 의하여 실행되는 프로그램 형태로 이루어지는 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법에 관한 것으로서, X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법이다. 본 발명은 재료의 내부구조 정보인 X-선 CT 이미지와 시편의 공극 크기 정보를 결합하여 정확하고 일관적인 삼상 분할 결과를 제공하는 효과가 있다.

대표도 - 도16



(52) CPC특허분류

G06T 2200/04 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711085404
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	이산화탄소를 이용한 암석 공압파쇄 최적화 기술개발
기여율	1/1
과제수행기관명	연세대학교
연구기간	2019.03.01 ~ 2020.02.29

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

컴퓨터를 포함하는 연산처리수단에 의하여 실행되는 프로그램 형태로 이루어지는 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법에 있어서,

데이터 준비부(10)에서, 대상 재료의 X-선 CT 이미지를 확보하고, 관심체적(VOI)을 추출하고, 관심체적(VOI)의 부피(V)를 계산하고, 시편 기공 측정의 시험 데이터를 준비하는 S1 단계;

제1 부피 계산부(20)에서, 관심체적 내의 공극의 부피(Vp)와, 고체의 부피(Vs)를 계산하는 S2 단계;

분리직경값 설정부(30)에서, CT 이미지 해상도를 고려한 분리 직경(ds) 값을 설정하는 S3 단계;

제2 부피 계산부(40)에서, 상기 분리 직경(ds) 값을 기준으로 관심체적의 명확한 공극의 부피(Vap)와 회색 공극의 부피(Vgp)를 산출하는 S4 단계;

제1 X-선 흡수계수 산출부(50)에서, X-선 흡수계수 히스토그램에서 낮은 X-선 흡수계수를 갖는 복셀들의 부피들을 더해가며, 명확한 공극의 부피(Vap)와 가장 근접한 X-선 흡수계수(Ip)를 구하는 S5 단계;

제2 X-선 흡수계수 산출부(60)에서, X-선 흡수계수 히스토그램에서 명확한 고체 복셀의 가장 작은 X-선 흡수계수(Is)를 산출하는 S6 단계;

맵핑부(70)에서, 관심체적(VOI)에서 X-선 흡수계수에 대한 공극복셀, 회색복셀 및 명확한 고체복셀의 삼상 분할을 완료하고, 복셀 공극률을 맵핑하는 S7 단계;

공극크기 계산부(80)에서, 복셀 공극률에 대한 회색 공극 크기를 계산하는 S8 단계;

공극면적 계산부(90)에서, 복셀 공극률에 대한 복셀 투수계수를 계산하고, 복셀 공극률에 대한 회색 복셀의 만곡성을 계산하고, 복셀 공극률에 대한 회색 복셀의 공극 면적을 계산하는 S9 단계; 및

수치해석부(100)에서, 스토크스 브링크만 식에 대한 수치유동해석을 수행하는 S10 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서, S1 단계에서는

대상 재료의 X-선 CT 이미지들을 3차원으로 중첩하고 시편 바깥과 시편의 일부 외각을 제외한 나머지 내부를 관심 체적(VOI)으로 선택하며,

관심체적의 부피(V)는 다음 수학식으로 산출되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

$$V = \sum_{x \in VOI} dx^3$$

[수학식 1]

(여기서, dx 는 CT 이미지의 해상도 (즉 1 pixel의 길이)이다.)

청구항 3

청구항 1에 있어서, S2 단계에서는

기공측정법으로 측정된 시편의 공극률(ϕ)을 곱하는 다음 수학식으로, 관심체적 내의 공극의 부피(Vp)와, 고체의 부피(Vs)가 산출되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

[수학식 2] $V_p = \phi V$ and $V_s = (1-\phi)V$

청구항 4

청구항 1에 있어서, S3 단계에서는

분리 직경(ds) 값은 $1dx \sim 8dx$ 인 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

청구항 5

청구항 1에 있어서, S4 단계에서는

누적 공극 크기 분포 곡선에서 상기 분리 직경(ds) 미만의 공극은 회색 공극이며, 상기 분리 직경(ds)을 초과하는 공극은 명확한 공극인 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

청구항 6

청구항 1에 있어서, S5 단계에서는

상기 X-선 흡수계수(I_p)는 다음 수학식으로 산출되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

[수학식 3]

$$\text{find } I_p \text{ for minimum} \left(\text{abs} \left(V_{ap} - dx^3 \sum_{I \leq I_p} N_I \right) \right)$$

(여기서, N_I 는 관심체적에서 X-선 흡수계수가 I 인 복셀들의 개수임)

청구항 7

청구항 1에 있어서, S6 단계에서는

회색 복셀들의 각각의 공극률인 복셀 공극률(ϕ_v)은 X-선 흡수계수와 비례한다고 가정되며, 관심체적 내의 위치(x)에서의 복셀 공극률(ϕ_v)은 다음 수학식으로 산출되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

[수학식 4]

$$\phi_v(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & I(\mathbf{x}) \leq I_p \quad (\text{apparent pore voxel}) \\ (I_s - I(\mathbf{x})) / (I_s - I_p) & \text{for } I_p < I(\mathbf{x}) < I_s \quad (\text{gray voxel}) \\ 0 & I_s \leq I(\mathbf{x}) \quad (\text{apparent solid voxel}) \end{cases}$$

(여기서, $I(\mathbf{x})$ 는 x지점에서의 X-선 흡수계수이고, I_p 와 I_s 는 각각 명확한 공극 복셀의 가장 큰 X-선 흡수계수와 명확한 고체 복셀의 가장 작은 X-선 흡수계수임)

청구항 8

청구항 7에 있어서,

회색 공극들의 공극 부피(V_{gp})는 다음 수학식으로 산출되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

[수학식 5]

$$V_{gp}(I_p, I_s) = dx^3 \sum_{I_p < I < I_s} N_I \phi_v(I)$$

(여기서, N_I 는 I의 X-선 감쇠계수를 가지는 복셀들의 수, $\phi_v(I)$ 는 I의 X-선 감쇠계수를 가지는 회색복셀의 복셀 공극률임)

청구항 9

청구항 8에 있어서,

I_s 값을 (I_p+1)에서부터 1씩 더하면서, 회색 공극의 부피(V_{gp})와, 관심체적 내의 공극의 부피(V_p)를 계산하여, 잠정적인 공극률(tentative porosity)과 잠정적인 회색 공극률 (tentative gray porosity)를 계산하며,

잠정적인 공극률이 실험으로 측정된 시편의 공극률과 일치하게 되는 X-선 흡수계수(I_s) 값을 구하는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

청구항 10

청구항 1에 있어서, S7 단계에서는

X-선 흡수계수가 I_p 값보다 작거나 같은 복셀을 명확한 공극 복셀로 정의하고,

I_p 값을 초과하고, I_s 값 미만인 복셀을 회색 복셀로 정의하고,

I_s 값보다 크거나 같은 복셀을 명확한 고체 복셀로 정의하여,

삼상 분할이 되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

청구항 11

청구항 1에 있어서, S8 단계에서는

누적 공극 크기 분포 곡선에서 분리 직경(d_s) 미만의 공극은 회색 공극이며,

회색 공극의 공극 크기 분포를 작은 공극에서부터 누적시키고, 관심체적 내의 회색 공극 부피에 대해 다음 수학식으로 나타내는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

$$C_{gp}(d_{gp}) = \frac{1 - CF(d_{gp})}{1 - CF(d_s)} V_{gp}$$

[수학식 6]

(여기서, $C_{gp}(d_{gp})$ 는 C_{gp} 이하의 크기를 가지는 회색 공극들의 누적 부피이며, $CF(d_{gp})$ 는 공극 크기 분포 곡선에서 전체 공극 부피에 대한 d_{gp} 보다 큰 공극들의 누적 부피 비율이고, $CF(d_s)$ 는 공극 크기 분포 곡선에서 전체 공극 부피에 대한 d_s 보다 큰 공극들의 누적 부피 비율이다. V_{gp} 는 회색 공극의 전체 부피임)

청구항 12

청구항 11에 있어서,

회색 복셀의 공극 크기(d_{gp})를 추정하기 위해서,

낮은 복셀 공극률을 가지는 회색 복셀은 작은 공극 크기를 가지고, 높은 복셀 공극률을 가지는 회색 복셀은 큰 공극을 가진다고 가정되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

청구항 13

청구항 1에 있어서, S9 단계에서는

복셀 투수계수(k_v)는 다음 수학적 식 7로 산출되며, 상기 회색 복셀의 만곡성(τ_v)은 다음 수학적 식 8로 산출되며, 상기 회색 복셀의 공극 면적(A_{gp})은 다음 수학적 식 9로 산출되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

$$k_v = \frac{\phi_v d_{gp}^2}{12\tau_v^2}$$

[수학적 식 7]

$$\tau_v = 1 - 0.49 \ln(\phi_v)$$

[수학적 식 8]

$$A_{gp}(\mathbf{x}) = \frac{\tau_v(\mathbf{x}) V_{gp}(\mathbf{x})}{d_{gp}(\mathbf{x})}$$

[수학적 식 9]

청구항 14

하드웨어와 결합되어, 청구항 1에 따른 X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법을 실행시키기 위하여, 컴퓨터가 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법에 관한 것이다. 구체적으로는 X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 다공성 재료와 균열 재료는 대부분 연결된 공극 구조로 포함하고 있으며 이로 인해 여러 가지 유동 현상들을 야기하게 된다.

[0003] 전산 유체 역학 방법과 CT 장비들의 발달로 최근 다공성 재료 및 균열 재료에서의 유동을 공극 규모(pore scale)에서 수치적으로 해석하여 평가하는 방법들이 제안되고 있다(도 1 참조).

[0004] 일반적으로 다공성 재료 또는 균열 재료를 대상으로 X-선(X-ray) CT 이미징을 사용한다. X-선 CT 이미징으로부터 재료 내부의 이미지를 획득할 수 있으며, 이때 각 픽셀(pixel)이 가지는 밝기 값(또는 CT number)는 해당 지점에서의 밀도와 유효 원자 번호의 함수로 표현된다.

[0005] 일반적으로 매질이 비슷한 유효 원자 번호들을 가지는 경우 X-선 흡수계수(CT number)와 밀도를 비례관계로 근사(approximate)할 수 있다.

[0006] 따라서, 많은 경우 이진 분할(Binary segmentation) 방법을 통해 재료 내부의 X-ray CT 이미지를 고체와 공극 이미지로 분할한다. 그리고 해당 공극 이미지로부터 유동 해석에 필요한 도메인 메쉬를 생성하여 전통적인 전산 유체 역학 방법들(유한 요소 해석, 유한 차분 해석, 유한 체적 해석 등) 또는 격자 볼츠만 방법을 이용하여 편미분 방정식인 나비에 스토크스 방정식 (Navier-Stokes equation) 또는 스토크스 방정식 (Stokes equation)을

풀게 된다. 그 결과로서 재료 내부에서 발생하는 유동을 예측하게 되는 것이다.

[0007] 참고로, 도 2는 X-선 CT 이미지를 통한 일반적인 유동 해석 과정으로서의 격자 볼츠만 방법을 나타낸다.

[0008] 한편, 연속방정식, 나비에-스토크스 방정식 및 스토크스 방정식의 예시는 다음과 같다.

[0009] [연속방정식]
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

[0010] [나비에-스토크스 방정식]
$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u})$$

[0011] [스토크스 방정식]
$$-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = 0$$

[0012] 여기서 \mathbf{u} 는 국부유속(local velocity), ρ 는 밀도(density), μ 는 절대점성계수(absolute viscosity), 그리고 p 는 국부압력(local pressure)이다.

[0014] 그리고 이때 이진 분할은 X-선 CT 이미지에서 밝기 값이 특정임계값(threshold value)보다 작은 픽셀들을 공극으로 큰 픽셀들을 고체로 보는 전역 문턱치 처리 방법이 대표적이다(도 3 참조).

[0016] 하지만 X-선 CT의 해상도와 비슷하거나 작은 공극들은 고체와 공극이 하나의 픽셀 위에 혼재하게 되어, X-선 흡수계수(CT number)가 X-선 CT 이미지의 밝기 값 히스토그램에서 명확하게 기대되는 공극과 고체 사이의 애매한 위치에 존재하게 된다.

[0017] 이진 분할 방법 종류와 히스토그램의 형태에 따라 해당 픽셀이 공극 또는 고체로 평가되어 공극 또는 고체를 과평가 하게 되는 문제점이 발생된다.

[0018] 이러한 픽셀을 회색 픽셀 또는 회색 복셀이라 칭하며, 종래의 이진 분할과 이를 이용한 유동해석의 한계점은 명확한 것이다.

[0019] 그리고 CT 해상도가 감소하여 회색 복셀이 증가할수록 계산되는 유동의 결과는 실제 실험 값과 맞지 않게 되는 문제점이 있다(도 4 참조).

[0020] 따라서, 이러한 한계점을 극복하기 위해 회색 복셀을 고려하는 유동 해석이 필요하게 되었고, 스토크스-브링크만 방정식(Stokes-Brinkman equation)을 이용한 해석 방법이 제안되었다(도 5 참조).

[0021] 스토크스-브링크만 방정식에서는 해석시 회색 복셀을 지나게 되는 유체에 일정한 저항력을 부여하는 것이 가능하다.

[0022]
$$-\nabla p + \mu_e \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{\mu}{k_m} \mathbf{u} = 0$$

[0023] 위 식에서, 두 번째 항의 μ_e 는 유효점성계수이고, 세 번째 항이 회색 복셀에서의 점성 저항력을 나타내며 분모의 k_m 는 미시투수계수이며 기존 연구들(Soulaine et al., 2016)에서는 일반적으로 다음과 같은 Kozeny-Carman 식을 사용하였다.

[0024]
$$k_m = \frac{d^2}{180} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}$$

[0025] 여기서 d 는 특성 길이이고 ϕ 은 공극률이다. 위의 Kozeny-Carman 식에서 특성 길이는 원래 흡 입자들의 입경이나 회색 복셀을 구성하는 입자들의 입경은 구할 수 없으므로, 기존의 연구들에서는 CT 이미지의 해상도 즉 복셀의 한 변의 길이인 dx 값을 사용해 왔다.

[0026] 하지만 이 방법은 점성 저항력 항의 계수인 미시투수계수가 dx 값에 의존하게 되어 일관성과 정확성에 큰 문제점을 야기하였다.

[0027] 예를 들어, 미시투수계수는 해당 지점을 구성하는 매질의 특성 계수로 동일한 구조를 가진다면 복셀의 크기와

관계없이 일정해야 한다. 하지만 CT 해상도에 따라 일정하지 않은 문제점이 있는 것이다.

[0029] 따라서 스토크스-브링크만 방정식을 사용하더라도 여전히 (1)공극 복셀, 회색 복셀, 고체 복셀을 분할하는 방법과 (2)회색 복셀에서의 저항력 계산에 필요한 미시투수계수(micro permeability)를 추정하는 방법이 부정확하고 일관적이지 못한 문제점이 제기되었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0030] (특허문헌 0001) (문헌 1) 대한민국 공개특허공보 제10-2016-0069379호(2016.06.16)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0031] 본 발명에 따른 X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법은 다음과 같은 해결과제를 가진다.

[0032] 첫째, 본 발명은 X-선 CT 이미지와 공극 크기 분포 정보를 결합하여 명확한 공극 복셀, 회색 복셀, 명확한 고체 복셀의 3상 분리 방법(ternary segmentation)을 제안하고자 한다.

[0033] 둘째, 회색 복셀에서의 투수계수(voxel permeability)의 계산에서 필요한 특성길이인 공극 크기를 시편의 공극 크기 분포로부터 계산하는 방법을 제안하고자 한다.

[0034] 본 발명의 해결과제는 이상에서 언급한 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 해결과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해되어질 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0035] 본 발명은 컴퓨터를 포함하는 연산처리수단에 의하여 실행되는 프로그램 형태로 이루어지는 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법에 관한 것으로서, X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법이다.

[0036] 본 발명은 데이터 준비부(10)에서, 대상 재료의 X-선 CT 이미지를 확보하고, 관심체적(VOI)을 추출하고, 관심체적(VOI)의 부피(V)를 계산하고, 시편 기공 측정의 시험 데이터를 준비하는 S1 단계; 제1 부피 계산부(20)에서, 관심체적 내의 공극의 부피(Vp)와, 고체의 부피(Vs)를 계산하는 S2 단계; 분리직경값 설정부(30)에서, CT 이미지 해상도를 고려한 분리 직경(ds) 값을 설정하는 S3 단계; 제2 부피 계산부(40)에서, 상기 분리 직경(ds) 값을 기준으로 관심체적의 명확한 공극의 부피(Vap)와 회색 공극의 부피(Vgp)를 산출하는 S4 단계; 제1 X-선 흡수계수 산출부(50)에서, X-선 흡수계수 히스토그램에서 낮은 X-선 흡수계수를 갖는 복셀들의 부피들을 더해가며, 명확한 공극의 부피(Vap)와 가장 근접한 X-선 흡수계수(Ip)를 구하는 S5 단계; 제2 X-선 흡수계수 산출부(60)에서, X-선 흡수계수 히스토그램에서 명확한 고체 복셀의 가장 작은 X-선 흡수계수(Is)를 산출하는 S6 단계; 맵핑부(70)에서, 관심체적(VOI)에서 X-선 흡수계수에 대한 공극복셀, 회색복셀 및 명확한 고체복셀의 삼상 분할을 완료하고, 복셀 공극률을 맵핑하는 S7 단계; 공극크기 계산부(80)에서, 복셀 공극률에 대한 회색 공극 크기를 계산하는 S8 단계; 공극면적 계산부(90)에서, 복셀 공극률에 대한 복셀 투수계수를 계산하고, 복셀 공극률에 대한 회색 복셀의 만곡성을 계산하고, 복셀 공극률에 대한 회색 복셀의 공극 면적을 계산하는 S9 단계; 및 수치해석부(100)에서, 스토크스 브링크만 식에 대한 수치유동해석을 수행하는 S10 단계를 포함할 수 있다.

[0037] 본 발명에 있어서, S1 단계에서는 대상 재료의 X-선 CT 이미지들을 3차원으로 중첩하고 시편 바깥과 시편의 일부 외각을 제외한 나머지 내부를 관심 체적(VOI)으로 선택하며, 관심체적의 부피(V)는 다음 수학식으로 산출될 수 있다.

$$V = \sum_{\mathbf{x} \in \text{VOI}} dx^3$$

[0038] [수학식 1]

[0039] (여기서, dx 는 CT 이미지의 해상도 (즉 1 pixel의 길이)이다.)

[0040] 본 발명에 있어서, S2 단계에서는 기공측정법으로 측정된 시편의 공극률(ϕ)을 곱하는 다음 수학식으로, 관심체적 내의 공극의 부피(V_p)와, 고체의 부피(V_s)가 산출될 수 있다.

[0041] [수학식 2] $V_p = \phi V$ and $V_s = (1-\phi)V$

[0042] 본 발명에 있어서, S3 단계에서는 분리 직경(ds) 값은 $1dx \sim 8dx$ 인 것이 바람직하다.

[0043] 본 발명에 있어서, S4 단계에서는 누적 공극 크기 분포 곡선에서 상기 분리 직경(ds) 미만의 공극은 회색 공극이며, 상기 분리 직경(ds)을 초과하는 공극은 명확한 공극인 것이 바람직하다.

[0044] 본 발명에 있어서, S5 단계에서는 X-선 흡수계수(I_p)는 다음 수학식으로 산출될 수 있다.

[0045] [수학식 3]

$$\text{find } I_p \text{ for minimum}(abs(V_{ap} - dx^3 \sum_{I \leq I_p} N_I))$$

[0046] .

[0047] (여기서, N_I 는 관심체적에서 X-선 흡수계수가 I 인 복셀들의 개수임)

[0048] 본 발명에 있어서, S6 단계에서는 회색 복셀들의 각각의 공극률인 복셀 공극률(ϕ_v)는 X-선 흡수계수와 비례한다고 가정되며, 관심체적 내의 위치(x)에서의 복셀 공극률(ϕ_v)은 다음 수학식으로 산출될 수 있다.

[0049] [수학식 4]

$$\phi_v(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & I(\mathbf{x}) \leq I_p \quad (\text{apparent pore voxel}) \\ (I_s - I(\mathbf{x})) / (I_s - I_p) & \text{for } I_p < I(\mathbf{x}) < I_s \quad (\text{gray voxel}) \\ 0 & I_s \leq I(\mathbf{x}) \quad (\text{apparent solid voxel}) \end{cases}$$

[0050] .

[0051] (여기서, $I(x)$ 는 x지점에서의 X-선 흡수계수이고, I_p 와 I_s 는 각각 명확한 공극 복셀의 가장 큰 X-선 흡수계수와 명확한 고체 복셀의 가장 작은 X-선 흡수계수임)

[0052] 본 발명에 있어서, 회색 공극들의 공극 부피(V_{gp})는 다음 수학식으로 산출될 수 있다.

[0053] [수학식 5]

$$V_{gp}(I_p, I_s) = dx^3 \sum_{I_p < I < I_s} N_I \phi_v(I)$$

[0054] .

[0055] (여기서, N_I 는 I의 X-선 감쇠계수를 가지는 복셀들의 수, $\phi_v(I)$ 는 I의 X-선 감쇠계수를 가지는 회색복셀의 복셀 공극률임)

[0056] 본 발명에 있어서, I_s 값을 (I_p+1)에서부터 1씩 더하면서, 회색 공극의 부피(V_{gp})와, 관심체적 내의 공극의 부피(V_p)를 계산하여, 잠정적인 공극률(tentative porosity)과 잠정적인 회색 공극률(tentative gray porosity)를 계산하며, 잠정적인 공극률이 실험으로 측정된 시편의 공극률과 일치하게 되는 X-선 흡수계수(I_s) 값을 구할 수 있다.

[0057] 본 발명에 있어서, S7 단계에서는 X-선 흡수계수가 I_p 값보다 작거나 같은 복셀을 명확한 공극 복셀로 정의하고, I_p 값을 초과하고, I_s 값 미만인 복셀을 회색 복셀로 정의하고, I_s 값보다 크거나 같은 복셀을 명확한 고체 복셀로 정의하여, 삼상 분할이 될 수 있다.

[0058] 본 발명에 있어서, S8 단계에서는 누적 공극 크기 분포 곡선에서 분리 직경(d_s) 미만의 공극은 회색 공극이며, 회색 공극의 공극 크기 분포를 작은 공극에서부터 누적시키고, 관심체적 내의 회색 공극 부피에 대해 다음 수학적 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{gp}(d_{gp}) = \frac{1 - CF(d_{gp})}{1 - CF(d_s)} V_{gp}$$

[0059] [수학적 식 6]

[0060] (여기서, $C_{gp}(d_{gp})$ 는 C_{gp} 이하의 크기를 가지는 회색 공극들의 누적 부피이며, $CF(d_{gp})$ 는 공극 크기 분포 곡선에서 전체 공극 부피에 대한 d_{gp} 보다 큰 공극들의 누적 부피 비율이고, $CF(d_s)$ 는 공극 크기 분포 곡선에서 전체 공극 부피에 대한 d_s 보다 큰 공극들의 누적 부피 비율이다. V_{gp} 는 회색 공극의 전체 부피임)

[0061] 본 발명에 있어서, 회색 복셀의 공극 크기(d_{gp})를 추정하기 위해서, 낮은 복셀 공극률을 가지는 회색 복셀은 작은 공극 크기를 가지고, 높은 복셀 공극을 가지는 회색 복셀은 큰 공극을 가진다고 가정될 수 있다.

[0062] 본 발명에 있어서, S9 단계에서는 상기 복셀 투수계수(k_v)는 다음 수학적 식 7로 산출되며, 상기 회색 복셀의 만곡성(τ_v)은 다음 수학적 식 8로 산출되며, 상기 회색 복셀의 공극 면적(A_{gp})은 다음 수학적 식 9로 산출될 수 있다.

$$k_v = \frac{\phi_v d_{gp}^2}{12\tau_v^2}$$

[0063] [수학적 식 7]

$$\tau_v = 1 - 0.49 \ln(\phi_v)$$

[0064] [수학적 식 8]

$$A_{gp}(x) = \frac{\tau_v(x) V_{gp}(x)}{d_{gp}(x)}$$

[0065] [수학적 식 9]

[0066] 본 발명은 하드웨어와 결합되어, 본 발명에 따른 X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법을 실행시키기 위하여, 컴퓨터가 관독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램인 것이 가능하다.

발명의 효과

[0067] 본 발명에 따른 X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법은 다음과 같은 효과를 가진다.

[0068] 첫째, 종래 기술은 일반적으로 이미지 내의 정보만을 사용하여 이상 (공극, 고체) 또는 삼상 (공극, 회색, 고체)을 분할하여 사용하였기 때문에, 이미지의 해상도 및 상태에 따라 그 결과의 일관성이 보장되지 못하였다. 하지만, 본 발명은 재료의 내부구조 정보인 X-선 CT 이미지와 시편의 공극 크기 정보를 결합하여 정확하고 일관적인 삼상 분할 결과를 제공하는 효과가 있다.

[0069] 둘째, 삼상 분할로부터 얻어진 명확한 공극과 회색 복셀들을 이용하여 스토크스-브링크만 방정식 기반의 유동 해석을 수행하기 위해서는 회색 복셀들의 미시투수계수를 추정해야 한다. 이때 특성 길이가 필요한데, 종래 기술에서는 이 특성길이를 타당성 있게 추정하는 방법이 없었다. 하지만, 본 발명은 전체 시편의 공극 크기 분포로부터 회색 복셀들의 공극 크기 (회색 공극 크기)를 추정하는 방법을 제공하는 효과가 있다.

[0070] 셋째, 추정된 회색 공극 크기를 이용하여 각 회색 복셀에서의 비 표면적(specific surface area)을 추정할 수 있는 효과가 있다. 각 회색 복셀에서의 비 표면적은 반응 유동 (reactive flow) 해석 시 반응 속도와 관계된 중요한 물성이다. 본 발명에서 계산된 전체 비 표면적은 실험으로 측정되는 비 표면적에 가까운 결과를 제공하여 높은 정확도를 제공하는 효과가 있다.

[0071] 넷째, 도메인 생성에서 명확한 공극과 회색 공극의 비율이 유일하게 결정되는 종래 기술들과는 다르게, 본 발명에서는 분리 직경(separating diameter)이 명확한 공극과 회색 공극의 비율을 결정한다. 이로써, 동일한 CT 이미지에 대해 분리 직경을 달리하여 도메인을 구성할 수 있으며, 이에 따른 회색 공극의 밀도 및 투수 계수, 비표면적 등이 연동되어 계산되어 정확하고 일관된 결과를 제공하는 효과가 있다.

[0072] 본 발명의 효과는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 효과들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해되어 질 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

- [0073] 도 1은 다공성 재료와 균열 재료들에서의 유동 해석 결과를 나타낸다.
- 도 2는 X-선 CT 이미지를 통한 일반적인 유동 해석 과정으로서의 격자 볼츠만 방법을 나타낸다.
- 도 3은 전역 문턱치 처리를 통한 이진 분할을 나타낸다.
- 도 4는 Berea 사암을 대상으로 한 투수 계수 실험 및 해석들의 결과를 나타낸다.
- 도 5는 전역적인 삼상 분할을 통한 명확한 공극, 회색, 명확한 고체 복셀들의 분할을 나타낸다.
- 도 6은 Berea 사암의 누적 공극 크기 분포 곡선을 나타낸다.
- 도 7은 분리 직경에 따른 명확한 공극의 부피 계산을 나타낸다.
- 도 8은 관심체적(VOI)의 CT number 히스토그램을 나타낸다.
- 도 9는 임의로 선택한 Is 값에 따른 공극률 및 정확한 Is 값을 추정하는 것을 나타낸다.
- 도 10은 삼상 분할된 관심체적(VOI) 내 복셀들의 CT number 히스토그램을 나타낸다.
- 도 11은 시편의 공극 크기 분포 곡선에서 추출된 회색 공극의 누적 부피 및 해당 공극 크기를 나타낸다.
- 도 12는 낮은 복셀 공극률을 가지는 복셀들에서부터 누적된 회색 공극 부피를 나타낸다.
- 도 13은 복셀 공극률에 대한 회색 공극 크기 곡선을 나타낸다.
- 도 14는 복셀 공극률에 대한 복셀 투수계수 곡선을 나타낸다.
- 도 15는 격자 볼츠만 방법에 대한 전체 해석 과정을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0074] 이하, 첨부한 도면을 참조하여, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 실시예를 설명한다. 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 이해할 수 있는 바와 같이, 후술하는 실시예는 본 발명의 개념과 범위를 벗어나지 않는 한도 내에서 다양한 형태로 변형될 수 있다. 가능한 한 동일하거나 유사한 부분은 도면에서 동일한 도면부호를 사용하여 나타낸다.
- [0075] 본 명세서에서 사용되는 전문용어는 단지 특정 실시예를 언급하기 위한 것이며, 본 발명을 한정하는 것을 의도하지는 않는다. 여기서 사용되는 단수 형태들은 문구들이 이와 명백히 반대의 의미를 나타내지 않는 한 복수 형태들도 포함한다.
- [0076] 본 명세서에서 사용되는 "포함하는"의 의미는 특정 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소 및/또는 성분을 구체화하며, 다른 특정 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소, 성분 및/또는 군의 존재나 부가를 제외시키는 것은 아니다.
- [0077] 본 명세서에서 사용되는 기술용어 및 과학용어를 포함하는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 일반적으로 이해하는 의미와 동일한 의미를 가진다. 사전에 정의된 용어들은 관련기술문헌과 현재 개시된 내용에 부합하는 의미를 가지는 것으로 추가 해석되고, 정의되지 않는 한 이상적이거나 매우 공식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0079] 본 발명은 컴퓨터를 포함하는 연산처리수단에 의하여 실행되는 프로그램 형태로 이루어진다. 컴퓨터는 적어도 하나의 프로세서, 송수신 장치, 및 메모리 등을 포함할 수 있다. 또한, 컴퓨터는 저장 장치, 입력 인터페이스 장치, 출력 인터페이스 장치 등을 더 포함할 수 있다. 컴퓨터에 포함된 구성 요소들은 버스(bus)에 의해 상호

연결되어 서로 통신을 수행할 수 있다.

- [0081] 본 발명은 컴퓨터를 포함하는 연산처리수단에 의하여 실행되는 프로그램 형태로 이루어지는 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법에 관한 것이다.
- [0082] 본 발명은 X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법로서, 데이터 준비부(10)에서, 대상 재료의 X-선 CT 이미지를 확보하고, 관심체적(VOI)을 추출하고, 관심체적(VOI)의 부피(V)를 계산하고, 시편 기공 측정의 시험 데이터를 준비하는 S1 단계;
- [0083] 제1 부피 계산부(20)에서, 관심체적 내의 공극의 부피(V_p)와, 고체의 부피(V_s)를 계산하는 S2 단계; 분리직경값 설정부(30)에서, CT 이미지 해상도를 고려한 분리 직경(ds) 값을 설정하는 S3 단계;
- [0084] 제2 부피 계산부(40)에서, 상기 분리 직경(ds) 값을 기준으로 관심체적의 명확한 공극의 부피(V_{ap})와 회색 공극의 부피(V_{gp})를 산출하는 S4 단계;
- [0085] 제1 X-선 흡수계수 산출부(50)에서, X-선 흡수계수 히스토그램에서 낮은 X-선 흡수계수를 갖는 복셀들의 부피들을 더해가며, 명확한 공극의 부피(V_{ap})와 가장 근접한 X-선 흡수계수(I_p)를 구하는 S5 단계;
- [0086] 제2 X-선 흡수계수 산출부(60)에서, X-선 흡수계수 히스토그램에서 명확한 고체 복셀의 가장 작은 X-선 흡수계수(I_s)를 산출하는 S6 단계;
- [0087] 맵핑부(70)에서, 관심체적(VOI)에서 X-선 흡수계수에 대한 공극복셀, 회색복셀 및 명확한 고체복셀의 삼상 분할을 완료하고, 복셀 공극률을 맵핑하는 S7 단계;
- [0088] 공극크기 계산부(80)에서, 복셀 공극률에 대한 회색 공극 크기를 계산하는 S8 단계;
- [0089] 공극면적 계산부(90)에서, 복셀 공극률에 대한 복셀 투수계수를 계산하고, 복셀 공극률에 대한 회색 복셀의 만곡성을 계산하고, 복셀 공극률에 대한 회색 복셀의 공극 면적을 계산하는 S9 단계; 및
- [0090] 수치해석부(100)에서, 스토크스 브링크만 식에 대한 수치유동해석을 수행하는 S10 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0092] 본 발명에 필요한 기본 정보는 다음을 포함한다.
- [0093] 1) 다공성 재료 및 균열 재료의 X-선 CT 이미지 및 기본정보(예, 해상도)
- [0094] 2) 기공 측정법(Porosimetry)으로 측정된 시편의 공극 크기 분포 곡선
- [0095] 3) 시편의 공극률 ϕ
- [0097] 본 발명에 따른 S1 단계는 데이터 준비부(10)에서, 대상 재료의 X-선 CT 이미지를 확보하고, 관심체적(VOI)을 추출하고, 관심체적(VOI; Volume Of Interest)의 부피(V)를 계산하고, 시편 기공 측정의 시험 데이터를 준비할 수 있다.
- [0099] 본 발명에 따른 S1 단계에서는 대상 재료의 X-선 CT 이미지들을 3차원으로 중첩하고 시편 바깥과 시편의 일부 외각을 제외한 나머지 내부를 관심 체적(VOI)으로 선택하며, 관심체적의 부피(V)는 다음 수학식으로 산출될 수 있다.

수학식 1

$$V = \sum_{x \in VOI} dx^3$$

[0100]

여기서, dx 는 CT 이미지의 해상도 (즉 1 pixel의 길이)이다.

[0101]

본 발명에 따른 S2 단계는 제1 부피 계산부(20)에서, 관심체적 내의 공극의 부피(V_p)와, 고체의 부피(V_s)를 계산할 수 있다.

[0102]

본 발명에 따른 S2 단계에서는 기공측정법으로 측정된 시편의 공극률(ϕ)을 곱하는 다음 수학식으로, 관심체적

[0104]

내의 공극의 부피(V_p)와, 고체의 부피(V_s)가 산출될 수 있다.

수학식 2

$$V_p = \phi V \text{ and } V_s = (1 - \phi) V$$

[0105]

[0106] 공극 크기 분포 곡선을 큰 공극에서부터 누적하여 전체 공극 부피로 정규화한 누적 공극 크기 분포 곡선을 준비할 수 있다(도 6 참조). 도 6은 Berea 사암에 대한 누적 공극 크기 분포 곡선을 나타낸다.

[0108]

[0108] 본 발명에 따른 S3 단계는 분리직경값 설정부(30)에서, CT 이미지 해상도를 고려한 분리 직경(d_s) 값을 설정할 수 있다.

[0109]

[0109] 본 발명에 따른 S3 단계에서는 분리 직경(d_s) 값은 $1dx \sim 8dx$ 인이 바람직하다. 여기서, $1dx$ 는 CT 이미지의 해상도 즉 복셀의 한 변의 길이를 의미한다.

[0111]

[0111] 본 발명에 따른 S4 단계는 제2 부피 계산부(40)에서, 상기 분리 직경(d_s) 값을 기준으로 관심체적의 명확한 공극의 부피(V_{ap})와 회색 공극의 부피(V_{gp})를 산출할 수 있다.

[0113]

[0113] 본 발명에 따른 S4 단계의 경우, 누적 공극 크기 분포 곡선에서 상기 분리 직경(d_s) 미만의 공극은 회색 공극이며, 상기 분리 직경(d_s)을 초과하는 공극은 명확한 공극인 것이 바람직하다.

[0115]

[0115] 만약 Berea 사암을 X-선 CT 촬영시 이미지의 해상도가 $dx = 2.43 \mu m$ 이고 분리 직경 d_s 를 $4dx (=9.72 \mu m)$ 로 사용한다면, 명확한 공극의 부피 V_{ap} 는 전체 공극 부피의 66.24%가 되고, 회색 공극의 부피 V_{gp} 는 전체 공극 부피의 33.76%가 된다. 즉 $V_{ap} = 0.6624V_p$ 이고 $V_{gp} = 0.3376V_p$ 이다(도 7 참조).

[0116]

[0116] 또한, 관심체적(VOI)의 X-선 흡수계수(CT number)의 히스토그램은 도 8과 같이 나타낼 수 있다.

[0118]

[0118] 본 발명에 따른 S5 단계는 제1 X-선 흡수계수 산출부(50)에서, X-선 흡수계수 히스토그램에서 낮은 X-선 흡수계수를 갖는 복셀들의 부피들을 더해가며, 명확한 공극의 부피(V_{ap})와 가장 근접한 X-선 흡수계수(I_p)를 구할 수 있다.

[0120]

[0120] 본 발명에 따른 S5 단계에서 X-선 흡수계수(I_p)는 다음 수학식으로 산출될 수 있다.

수학식 3

$$\text{find } I_p \text{ for minimum} \left(\text{abs} \left(V_{ap} - dx^3 \sum_{I \leq I_p} N_I \right) \right)$$

[0121]

[0122] (여기서, N_I 는 관심체적에서 X-선 흡수계수가 I 인 복셀들의 개수임)

[0124]

[0124] 본 발명에 따른 S6 단계는 제2 X-선 흡수계수 산출부(60)에서, X-선 흡수계수 히스토그램에서 명확한 고체 복셀의 가장 작은 X-선 흡수계수(I_s)를 산출할 수 있다.

[0126]

[0126] 본 발명에 따른 S6 단계에서는 회색 복셀들의 각각의 공극률인 복셀 공극률(ϕ_v)는 X-선 흡수계수와 비례한다고 가정되며, 관심체적 내의 위치(x)에서의 복셀 공극률(ϕ_v)은 다음 수학식으로 산출될 수 있다.

수학식 4

$$\phi_v(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & I(\mathbf{x}) \leq I_p \quad (\text{apparent pore voxel}) \\ (I_s - I(\mathbf{x})) / (I_s - I_p) & \text{for } I_p < I(\mathbf{x}) < I_s \quad (\text{gray voxel}) \\ 0 & I_s \leq I(\mathbf{x}) \quad (\text{apparent solid voxel}) \end{cases}$$

[0127]

[0128] (여기서, $I(x)$ 는 x 지점에서의 X-선 흡수계수이고, I_p 와 I_s 는 각각 명확한 공극 복셀의 가장 큰 X-선 흡수계수와

[0128]

명확한 고체 복셀의 가장 작은 X-선 흡수계수임)

[0130] (여기서, I_s 는 명확한 고체 복셀의 가장 작은 X-선 흡수계수임)

[0132] 또한, 회색 공극들의 공극 부피(V_{gp})는 다음 수학적식으로 산출될 수 있다.

수학적식 5

$$V_{gp}(I_p, I_s) = dx^3 \sum_{I_p < I < I_s} N_I \phi_v(I)$$

[0133]

[0134] 여기서, N_I 는 I의 X-선 감쇠계수를 가지는 복셀들의 수, $\phi_v(I)$ 는 I의 X-선 감쇠계수를 가지는 회색복셀의 복셀 공극률이다.

[0136] 본 발명에 따른 S6 단계에서는 I_s 값을 (I_p+1)에서부터 1씩 더하면서, 회색 공극의 부피(V_{gp})와, 관심체적 내의 공극의 부피(V_p)를 계산하여, 잠정적인 공극률(tentative porosity)과 잠정적인 회색 공극률 (tentative gray porosity)를 계산하며, 잠정적인 공극률이 실험으로 측정된 시편의 공극률과 일치하게 되는 X-선 흡수계수(I_s) 값을 구할 수 있다(도 9 참조).

[0138] 본 발명에 따른 S7 단계는 맵핑부(70)에서, 관심체적(VOI)에서 X-선 흡수계수에 대한 공극복셀, 회색복셀 및 명확한 고체복셀의 삼상 분할을 완료하고, 복셀 공극률을 맵핑할 수 있다.

[0140] 본 발명에 따른 S7 단계에서는 X-선 흡수계수가 I_p 값보다 작거나 같은 복셀을 명확한 공극 복셀로 정의하고, I_p 값을 초과하고, I_s 값 미만인 복셀을 회색 복셀로 정의하고, I_s 값보다 크거나 같은 복셀을 명확한 고체 복셀로 정의하여, 삼상(3상) 분할이 되는 것이 가능하다.

[0142] 본 발명에 따른 S8 단계는 공극크기 계산부(80)에서, 복셀 공극률에 대한 회색 공극 크기를 계산할 수 있다.

[0144] 본 발명에 따른 S8 단계에서는 누적 공극 크기 분포 곡선에서 분리 직경(d_s) 미만의 공극은 회색 공극이며, 회색 공극의 공극 크기 분포를 작은 공극에서부터 누적시키고, 관심체적 내의 회색 공극 부피에 대해 다음 수학적식으로 나타낼 수 있다.

수학적식 6

$$C_{gp}(d_{gp}) = \frac{1 - CF(d_{gp})}{1 - CF(d_s)} V_{gp}$$

[0145]

[0146] 여기서, $C_{gp}(d_{gp})$ 는 C_{gp} 이하의 크기를 가지는 회색 공극들의 누적 부피이며, $CF(d_{gp})$ 는 공극 크기 분포 곡선에서 전체 공극 부피에 대한 d_{gp} 보다 큰 공극들의 누적 부피 비율이고, $CF(d_s)$ 는 공극 크기 분포 곡선에서 전체 공극 부피에 대한 d_s 보다 큰 공극들의 누적 부피 비율이다. V_{gp} 는 수학적식 5에서 구한 회색 공극의 전체 부피이다.

[0148] 본 발명에 따른 S8 단계에 있어서, x축을 작은 공극에서부터 누적된 VOI내의 회색 공극의 부피(C_{gp})로 나타내고, y축을 회색 공극의 크기(d_{gp})로 나타내면, 도 11과 같다.

[0149] 본 발명에 따른 S8 단계에 있어서, 회색 복셀의 공극 크기(d_{gp})를 추정하기 위해서, 낮은 복셀 공극률을 가지는 회색 복셀은 작은 공극 크기를 가지고, 높은 복셀 공극을 가지는 회색 복셀은 큰 공극을 가진다고 가정할 수 있다.

[0150] 따라서, $0 < \Phi_i < \Phi_j < 1$ 이면, $0 < d_{gp}(\Phi_i) \leq d_{gp}(\Phi_j) < d_s$ 가 될 수 있다.

[0152] 앞의 가정을 통해, 낮은 복셀 공극률을 가지는 복셀들의 공극 부피를 계산하고, 낮은 공극률을 가지는 복셀들에서부터 회색 공극 부피를 누적하면 도 12와 같다.

[0153] 앞의 두 곡선인 도 11과 도 12는 누적 회색 공극 부피를 각각 x축과 y축으로 공유하므로, 서로 누적 회색 공극 부피를 기준으로 두 곡선을 하나의 곡선으로 만들 수 있다. 도 13은 복셀 공극률에 대한 회색 공극 크기 곡선을 나타낸다.

[0155] 본 발명에 따른 S8 단계는 공극면적 계산부(90)에서, 복셀 공극률에 대한 복셀 투수계수를 계산하고, 복셀 공극률에 대한 회색 복셀의 만족성을 계산하고, 복셀 공극률에 대한 회색 복셀의 공극 면적을 계산할 수 있다.

[0157] 본 발명에 따른 S8 단계에 있어서, 회색 공극의 크기가 알게 되므로, 일반적인 공극률과 공극의 크기를 사용하는 공극률-투수계수 관계에 대한 경험식들을 이용하여 회색 공극들의 미시투수계수 즉 복셀 투수계수 (voxel permeability, k_v)를 추정할 수 있다.

[0158] 예를 들어, 휘어있는 두 면 사이의 기하구조를 가정한 공극률-투수계수 관계식으로 다음 수학적식을 사용할 수 있다.

수학식 7

$$k_v = \frac{\phi_v d_{gp}^2}{12\tau_v^2}$$

[0159]

[0161] 여기서 τ_v 는 회색 공극의 만족성 (tortuosity) 이고, 이를 구하기 위하여, 다음과 같은 공극률-만족성 관계에 대한 경험식을 사용할 수 있다.

수학식 8

$$\tau_v = 1 - 0.49 \ln(\phi_v)$$

[0162]

[0164] 최종적으로 도 14와 같이 복셀 공극률에 대한 복셀 투수계수 곡선을 얻을 수 있다.

[0166] 반응 유동 (reactive flow) 해석 시, 고체에서의 반응 속도는 비 표면적의 함수이므로 각 회색 복셀의 비 표면적 계산이 필요하다. 전술한 복셀 투수계수 계산에서 사용한 공극률-투수계수 관계식에서 가정하는 공극의 형상을 사용하거나 단순한 공극 형상들을 사용할 있다.

[0167] 예를 들어, 휘어있는 두 면 사이의 기하구조를 가정하면, x지점에 있는 회색 복셀 하나의 공극의 면적은 다음 수학적식과 같이 계산될 수 있다.

수학식 9

$$A_{gp}(\mathbf{x}) = \frac{\tau_v(\mathbf{x}) V_{gp}(\mathbf{x})}{d_{gp}(\mathbf{x})}$$

[0168]

[0170] 한편, 본 발명은 컴퓨터 프로그램으로 구현될 수도 있다. 구체적으로 본 발명은 하드웨어와 결합되어, 본 발명에 따른 X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법을 실

행시킴을 위하여, 컴퓨터가 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램인 것이 바람직하다.

[0171] 본 발명에 따른 장치는 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체에 컴퓨터가 읽을 수 있는 코드로서 구현하는 것이 가능하다. 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록매체는 컴퓨터 시스템에 의하여 읽힐 수 있는 데이터가 저장되는 모든 종류의 기록장치를 포함한다. 기록매체의 예로는 ROM, RAM, 광학 디스크, 자기 테이프, 플로피 디스크, 하드 디스크, 비휘발성 메모리 등을 포함한다. 또한 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록매체는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템에 분산되어 분산방식으로 컴퓨터가 읽을 수 있는 코드가 저장되고 실행될 수 있다.

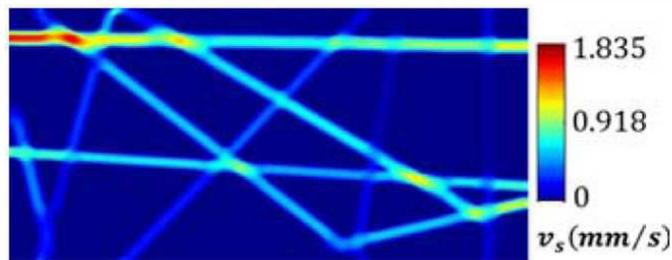
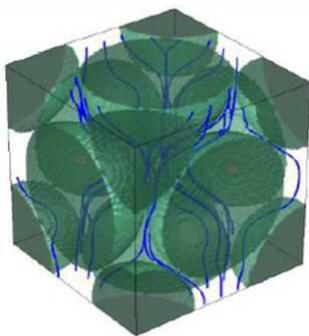
[0173] 본 명세서에서 설명되는 실시예와 첨부된 도면은 본 발명에 포함되는 기술적 사상의 일부를 예시적으로 설명하는 것에 불과하다. 따라서, 본 명세서에 개시된 실시예들은 본 발명의 기술적 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이므로, 이러한 실시예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아님은 자명하다. 본 발명의 명세서 및 도면에 포함된 기술적 사상의 범위 내에서 당업자가 용이하게 유추할 수 있는 변형예와 구체적인 실시 예는 모두 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

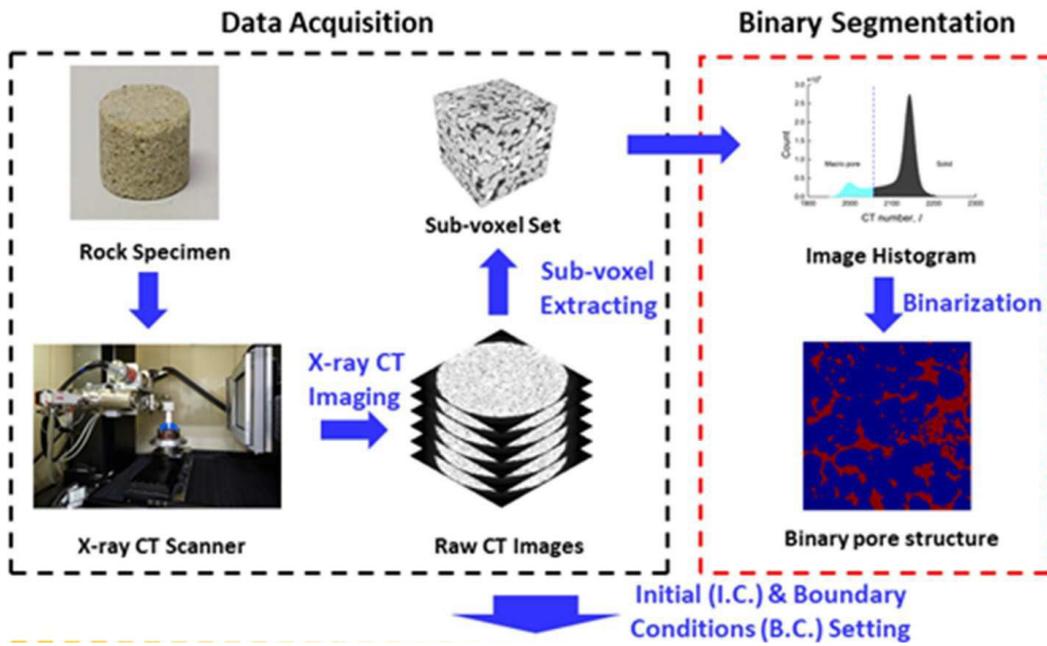
- [0174] 10 : 데이터 준비부
- 20 : 제1 부피 계산부
- 30 : 분리직경값 설정부
- 40 : 제2 부피 계산부
- 50 : 제1 X-선 흡수계수 산출부
- 60 : 제2 X-선 흡수계수 산출부
- 70 : 맵핑부
- 80 : 공극크기 계산부
- 90 : 공극면적 계산부
- 100 : 수치해석부

도면

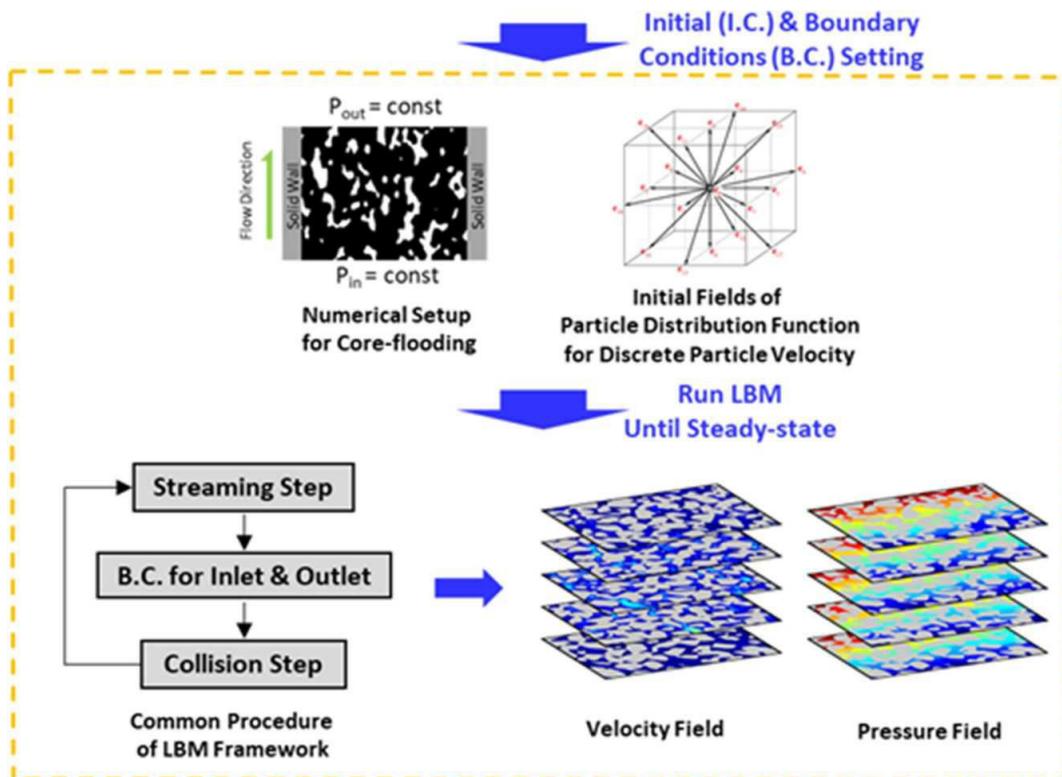
도면1



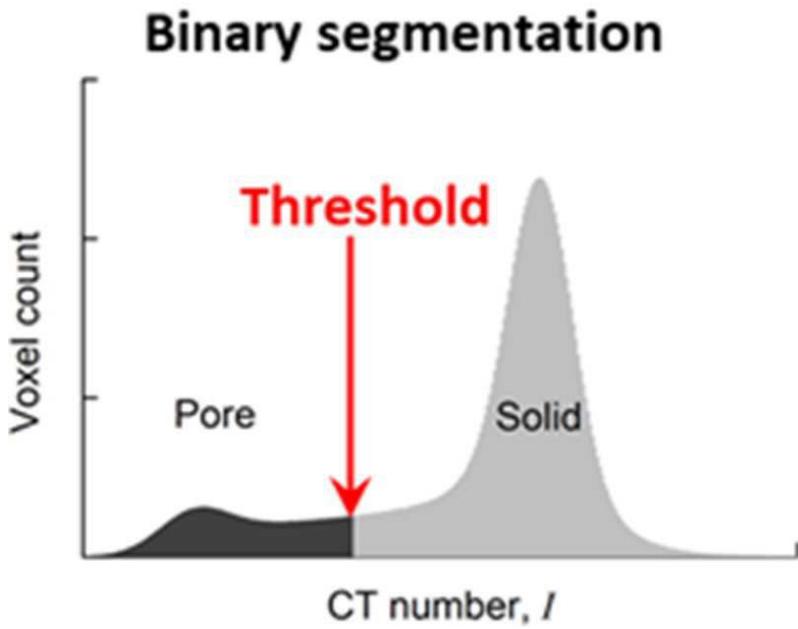
도면2a



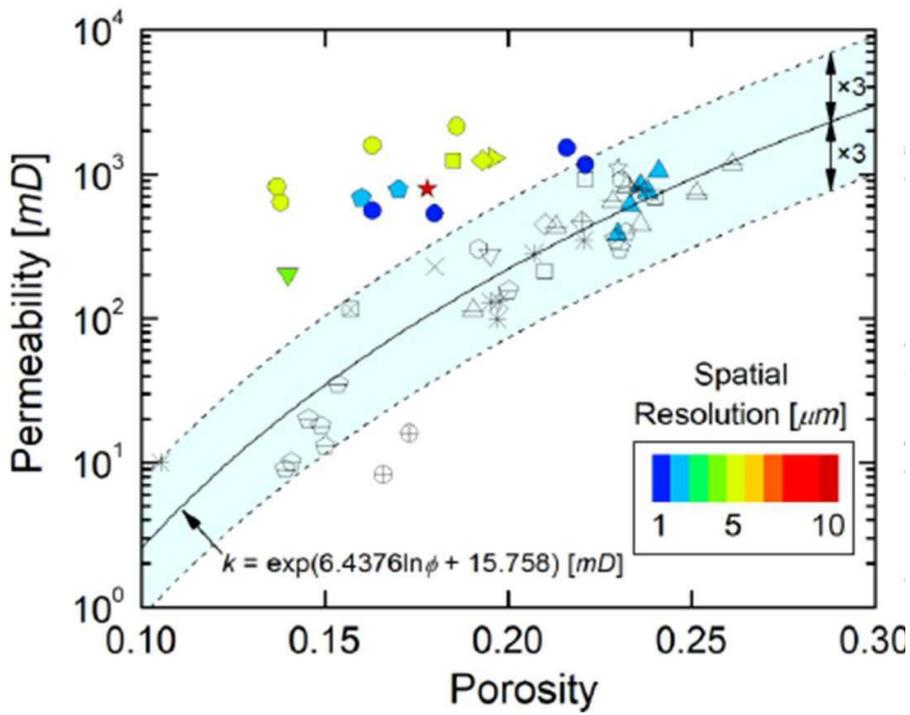
도면2b



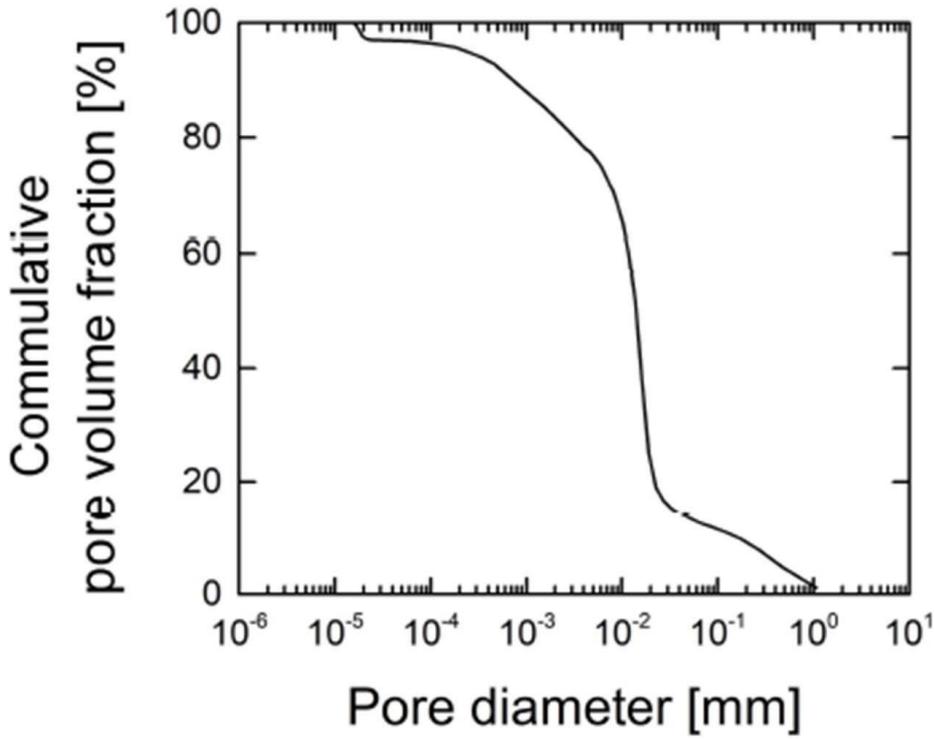
도면3



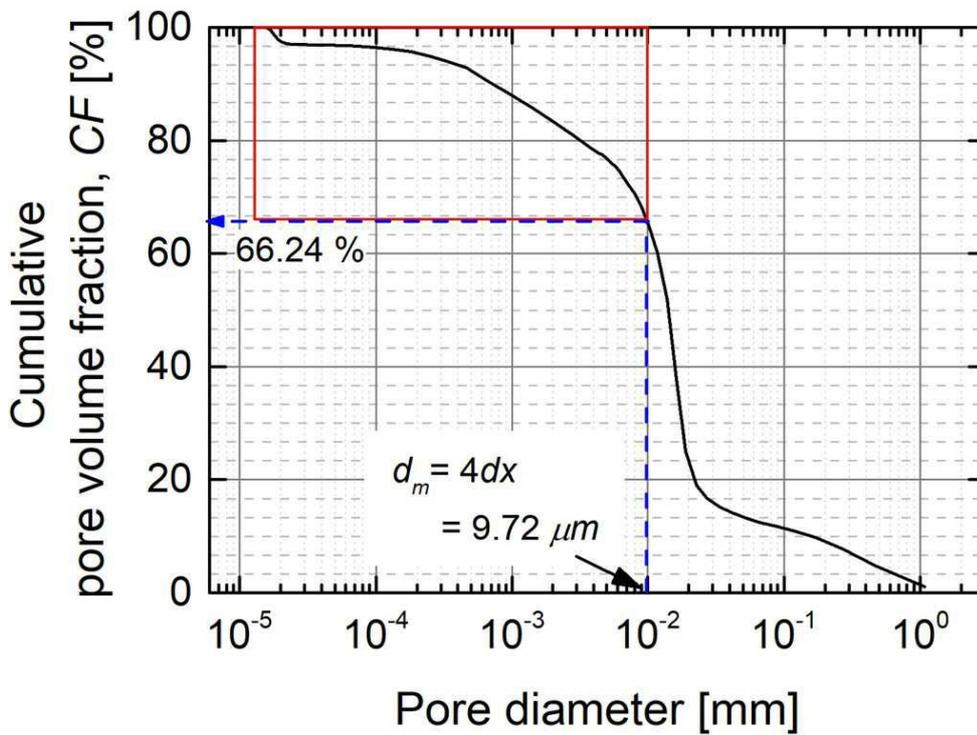
도면4a



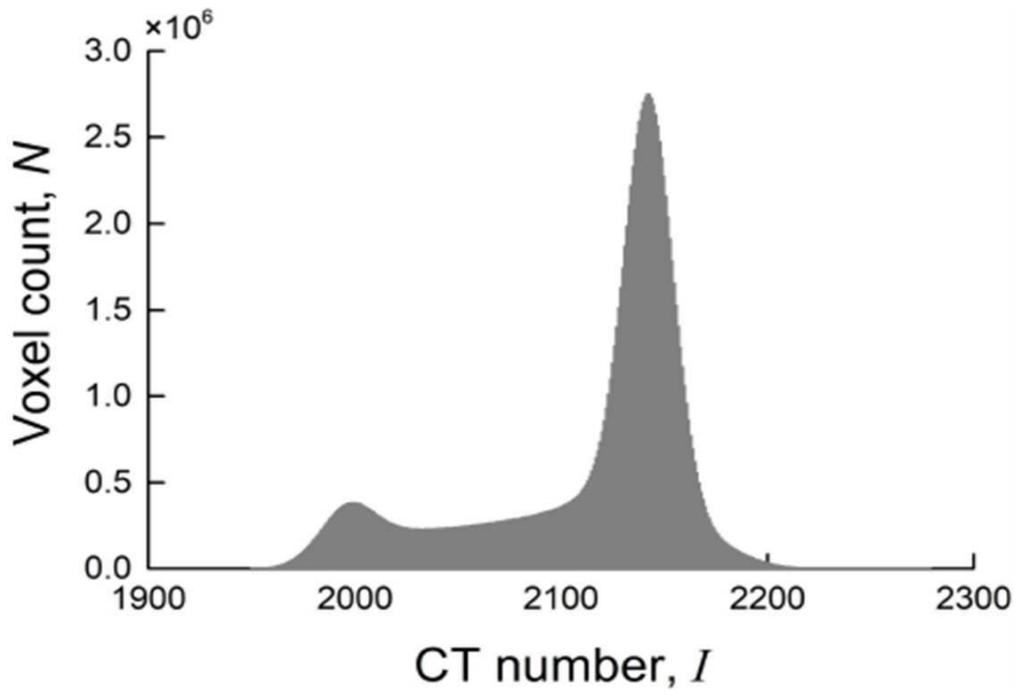
도면6



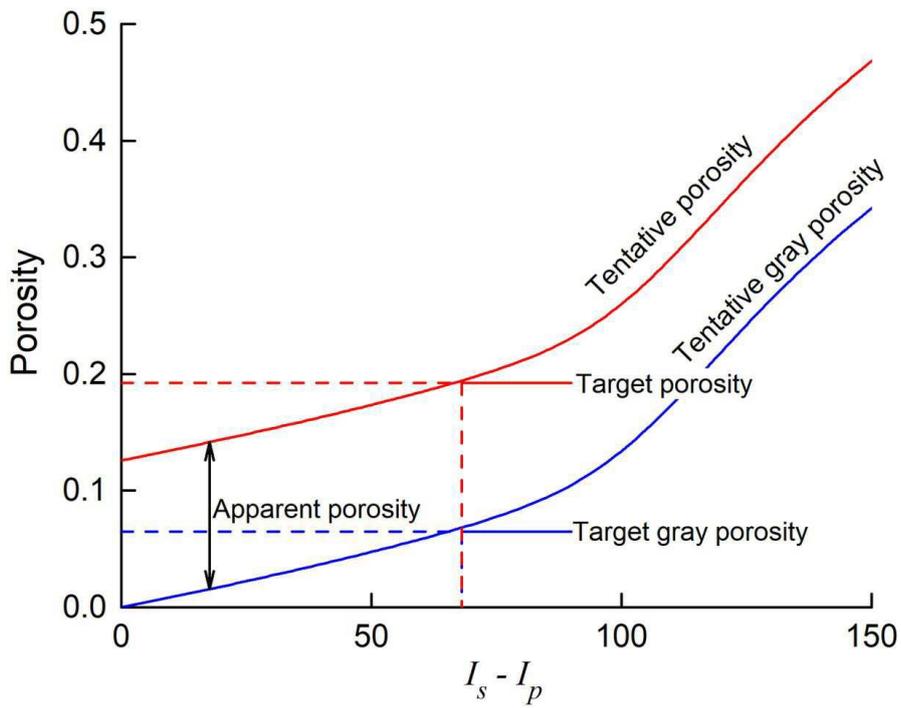
도면7



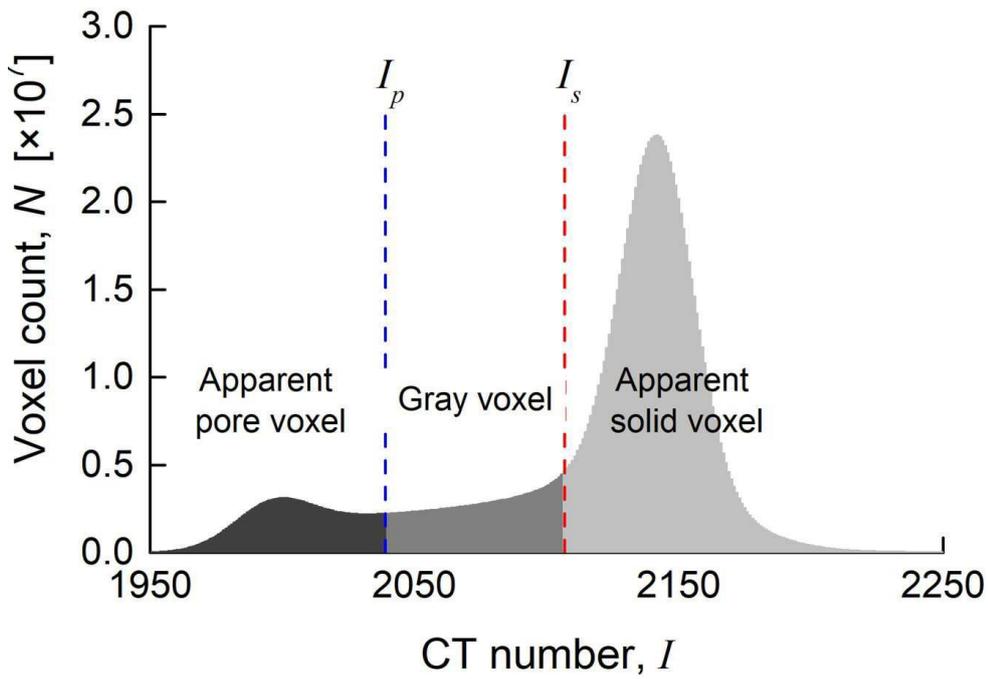
도면8



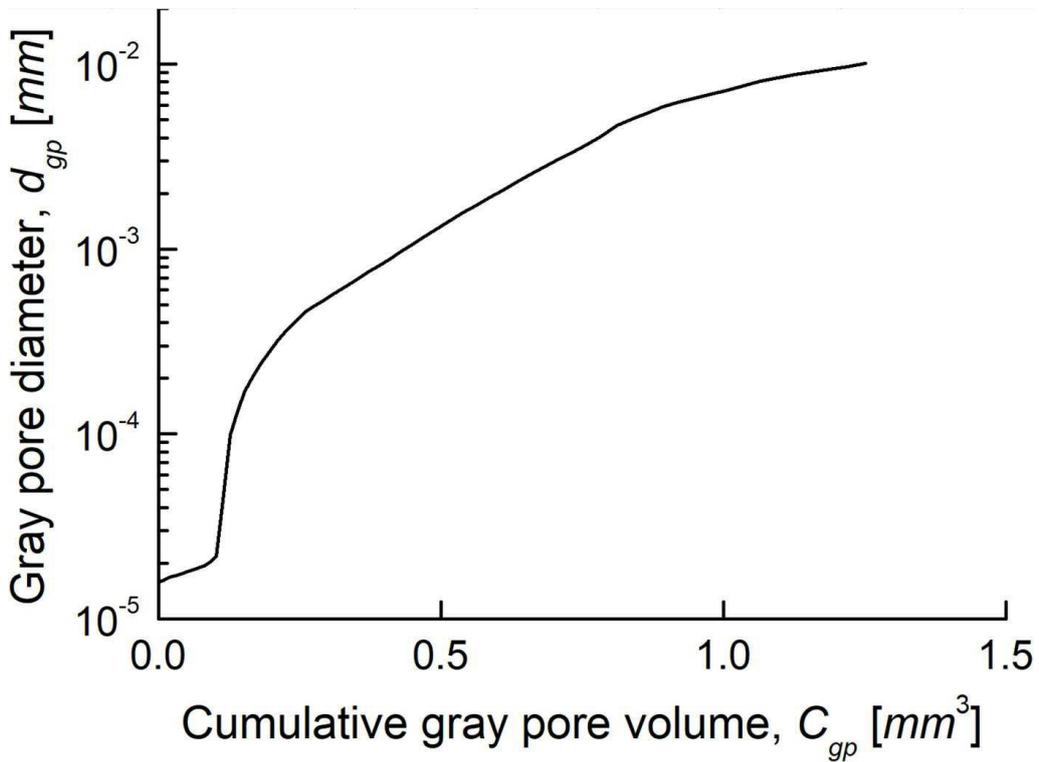
도면9



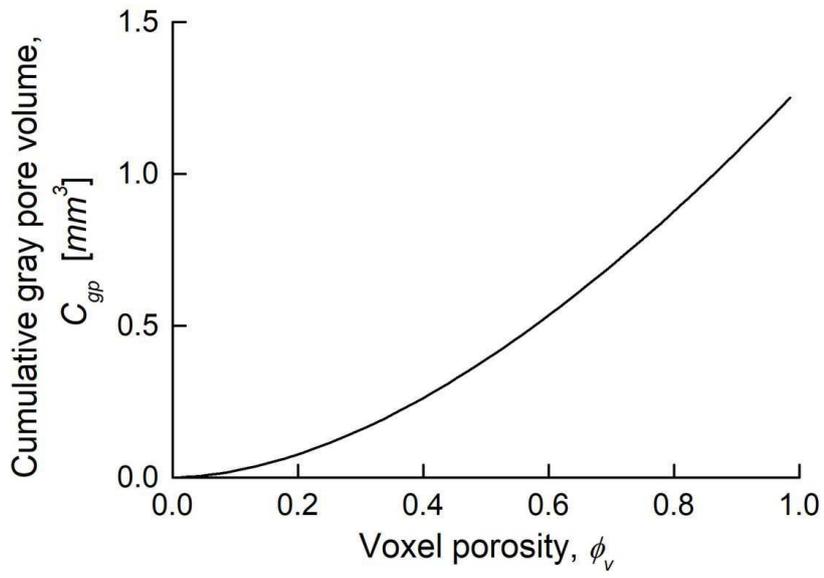
도면10



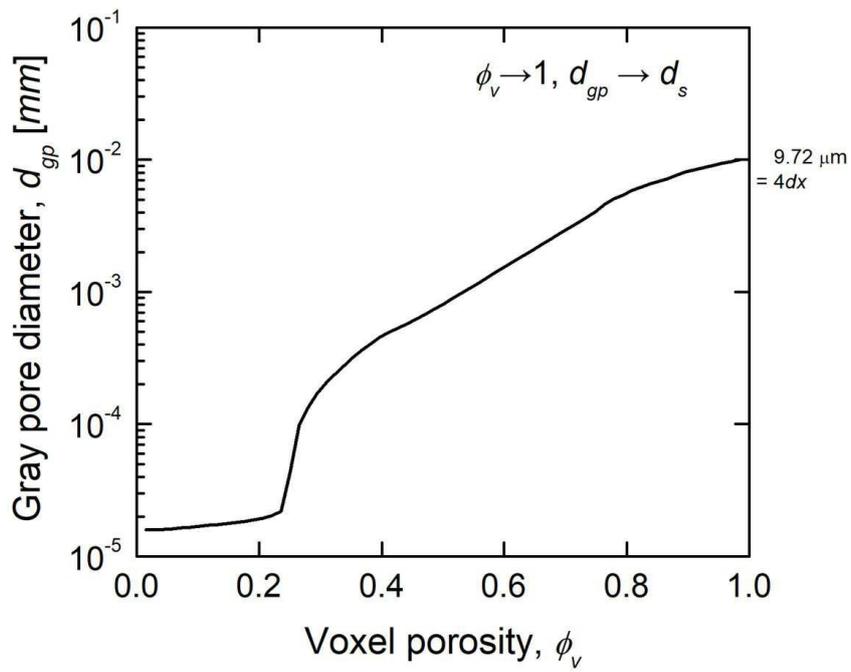
도면11



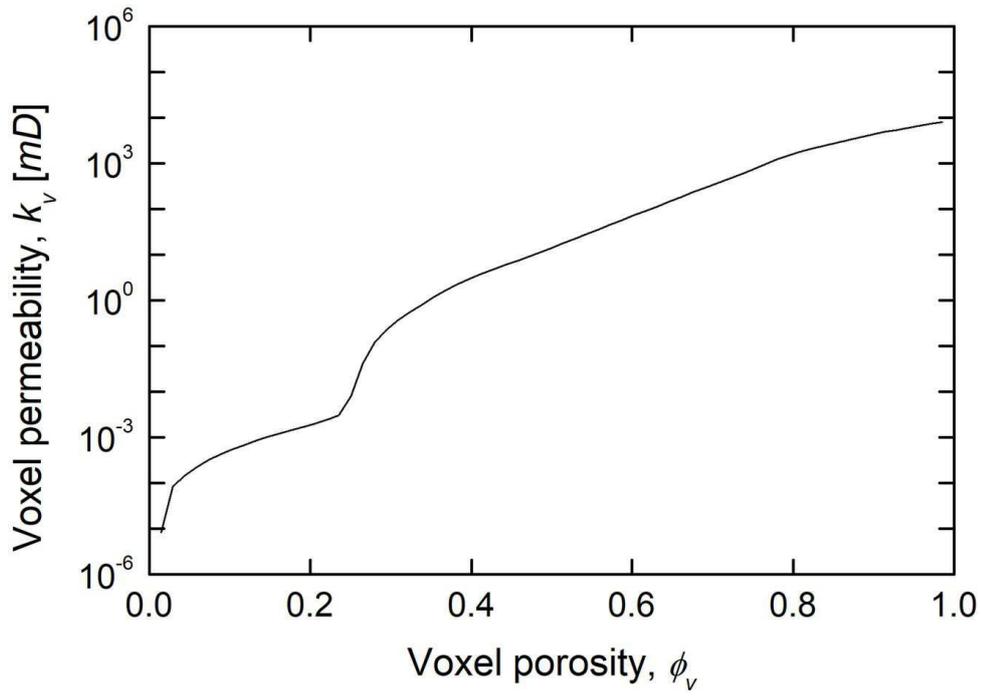
도면12



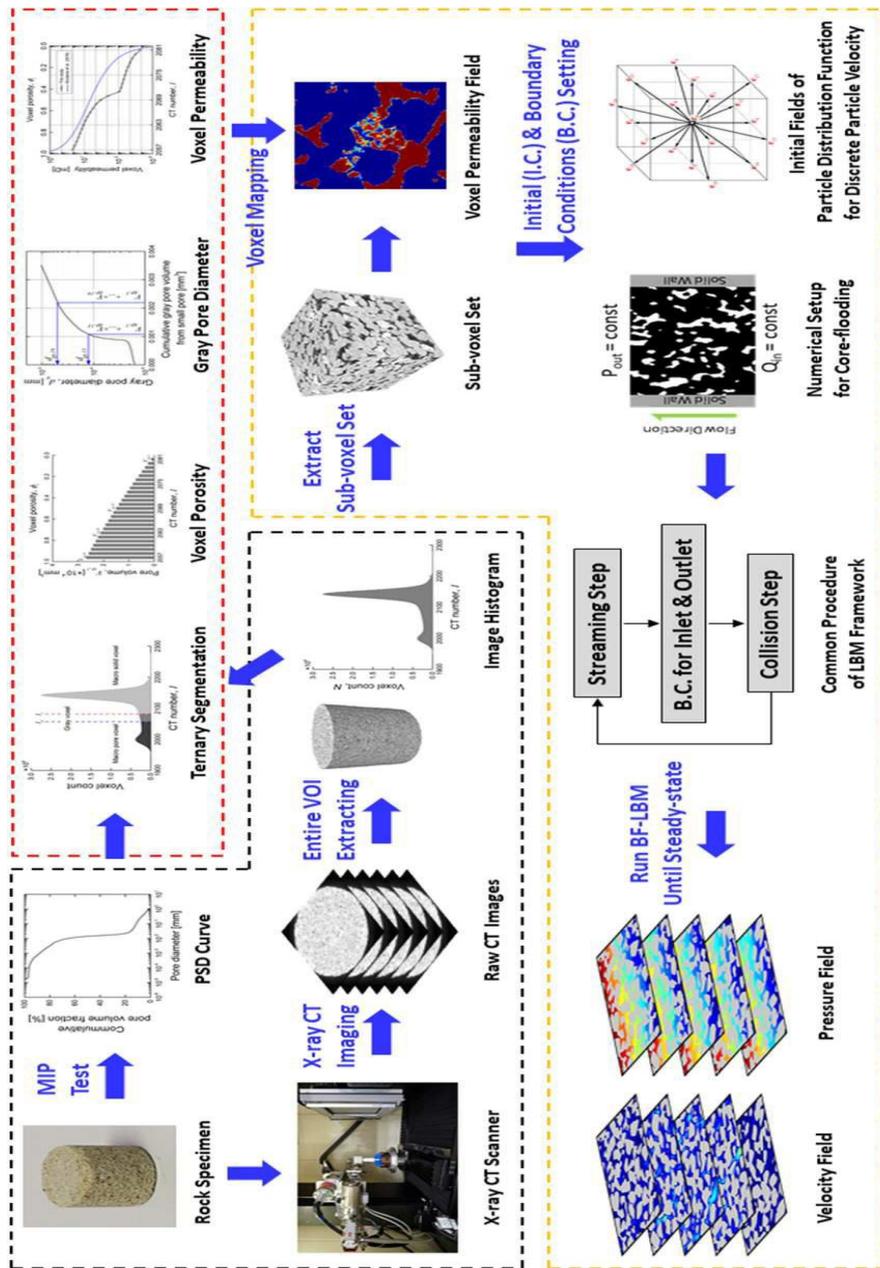
도면13



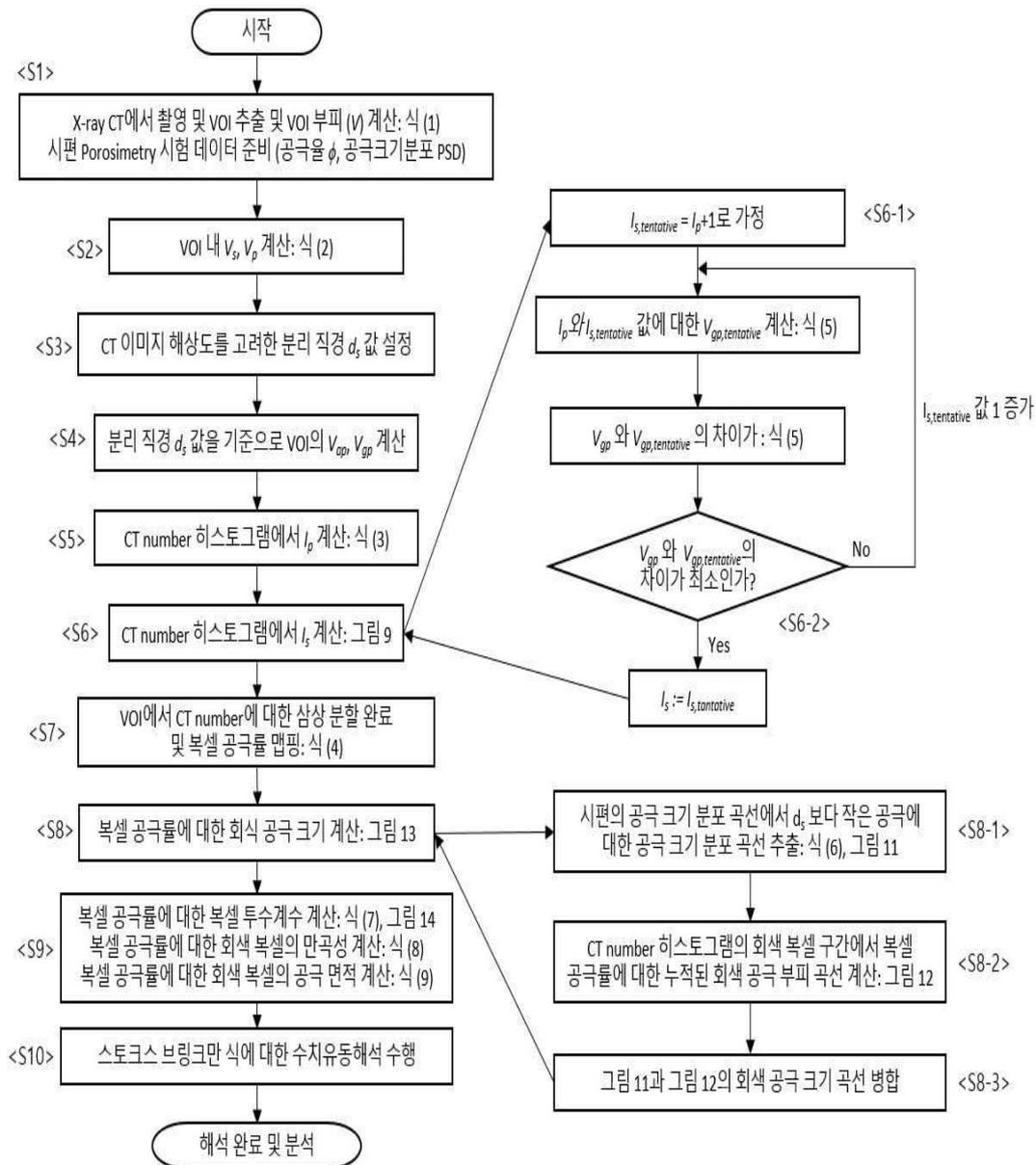
도면14



도면15



도면16



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 13

【변경전】

청구항 1에 있어서, S9 단계에서는

상기 복셀 투수계수(kv)는 다음 수학식 7로 산출되며, 상기 회색 복셀의 만곡성(τv)은 다음 수학식 8로 산출되며, 상기 회색 복셀의 공극 면적(Agp)은 다음 수학식 9로 산출되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

$$k_v = \frac{\phi_v d_{gp}^2}{12\tau_v^2}$$

[수학식 7]

$$\tau_v = 1 - 0.49 \ln(\phi_v)$$

[수학식 8]

$$A_{gp}(\mathbf{x}) = \frac{\tau_v(\mathbf{x}) V_{gp}(\mathbf{x})}{d_{gp}(\mathbf{x})}$$

[수학식 9]

【변경후】

청구항 1에 있어서, S9 단계에서는

복셀 투수계수(k_v)는 다음 수학식 7로 산출되며, 상기 회색 복셀의 만곡성(τ_v)은 다음 수학식 8로 산출되며, 상기 회색 복셀의 공극 면적(A_{gp})은 다음 수학식 9로 산출되는 것을 특징으로 하는

X-선 CT 이미지 및 공극 크기 분포를 이용한 다공성 재료 또는 균열 재료의 3차원 유동 평가 방법.

$$k_v = \frac{\phi_v d_{gp}^2}{12\tau_v^2}$$

[수학식 7]

$$\tau_v = 1 - 0.49 \ln(\phi_v)$$

[수학식 8]

$$A_{gp}(\mathbf{x}) = \frac{\tau_v(\mathbf{x}) V_{gp}(\mathbf{x})}{d_{gp}(\mathbf{x})}$$

[수학식 9]