



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년01월27일

(11) 등록번호 10-2492772

(24) 등록일자 2023년01월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01N 15/02 (2006.01) G06F 17/10 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G01N 15/02 (2020.05)

G06F 17/10 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2021-0121403

(22) 출원일자 2021년09월13일

심사청구일자 2021년09월13일

(56) 선행기술조사문헌

Particle number concentrations and size distribution in a polluted megacity(Shahzad, Atmospheric Chemistry and Physics, 2020)

(뒷면에 계속)

(73) 특허권자

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자

최정일

경기도 고양시 일산서구 대산로 142, 307동 1302호(주엽동, 문촌마을3단지아파트)

현예솔

경기도 고양시 일산서구 일현로 97-11, 107동 1201호(탄현동, 일산 위브더제니스)

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

민영준

전체 청구항 수 : 총 16 항

심사관 : 인치현

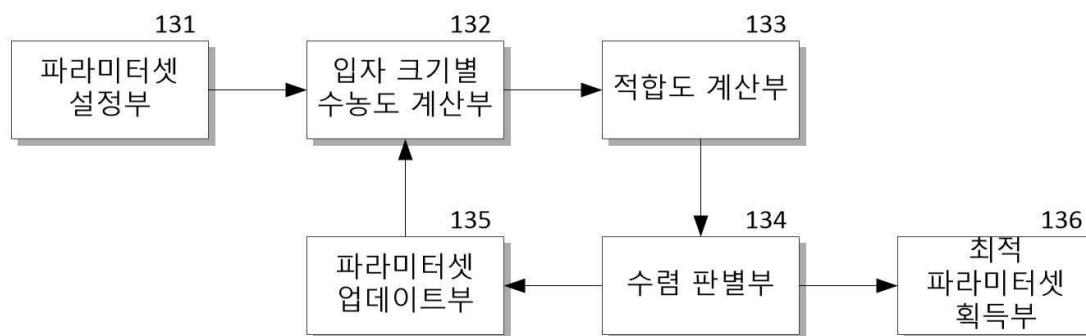
(54) 발명의 명칭 미세입자 분포 추정 장치 및 방법

## (57) 요약

본 발명은 측정 대상 공간에서 측정 가능한 크기 범위의 입자들에 대한 크기별 입자 수농도를 측정하여 획득하는 입자 수농도 측정부, 기지정된 입자상 물질의 질량보존 모델에 요구되는 파라미터들을 각각 포함하는 다수의 파라미터셋을 설정하고, 설정된 다수의 파라미터셋 각각을 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 크기별 입자

(뒷면에 계속)

대표도 - 도2



수농도에 대응하는 크기 범위에서의 입자 크기별 수농도 추정값을 획득하며, 크기별 입자 수농도와 대응하는 입자 크기별 수농도 추정값의 차이로 나타나는 적합도에 따라 파라미터셋을 반복 업데이트하여 최적 파라미터셋을 획득하는 파라미터 최적화부 및 최적 파라미터셋을 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 측정되지 않은 크기 범위의 입자들에 대한 시간에 따른 입자 크기별 수농도를 계산하는 미세입자 분포 계산부를 포함하여, 측정할 수 없는 크기 범위에서의 입자 크기별 수농도를 추정할 수 있어 저비용 및 휴대 가능한 수준으로 소형으로 제조할 수 있는 미세입자 분포 추정 장치 및 방법을 제공한다.

(52) CPC특허분류

G01N 2015/0277 (2013.01)

G01N 2015/0288 (2013.01)

(72) 발명자

**최윤영**

대전광역시 유성구

**오근우**

서울특별시 서대문구 연희로14길 45, 화이트빌  
C-204호(연희동, 화이트빌)

(56) 선행기술조사문헌

JP2020079768 A

KR1020210049651 A

KR102118280 B1

KR1020190091730 A

Evolution of Ultrafine Particle Size  
Distributions Following Indoor Episodic  
Releases(Donghyun Rim, Aerosol Science and  
Technology, 2011)

공지예외적용 : 있음

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

측정 대상 공간에서 측정 가능한 크기 범위의 입자들에 대한 크기별 입자 수농도를 측정하여 획득하는 입자 수농도 측정부;

기지정된 입자상 물질의 질량보존 모델에 요구되는 파라미터들을 각각 포함하는 다수의 파라미터셋을 설정하고, 설정된 다수의 파라미터셋 각각을 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 상기 크기별 입자 수농도에 대응하는 크기 범위에서의 입자 크기별 수농도 추정값을 획득하며, 상기 크기별 입자 수농도와 대응하는 상기 입자 크기별 수농도 추정값의 차이로 나타나는 적합도에 따라 상기 파라미터셋을 반복 업데이트하여 최적 파라미터셋을 획득하는 파라미터 최적화부; 및

상기 최적 파라미터셋을 상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 측정되지 않은 크기 범위의 입자들에 대한 시간에 따른 입자 크기별 수농도를 계산하는 미세입자 분포 계산부를 포함하는 미세입자 분포 추정 장치.

#### 청구항 2

제1항에 있어서, 상기 파라미터 최적화부는

상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 대한 다수의 파라미터로 구성되는 파라미터셋을 초기화하여 다수의 초기 파라미터셋을 획득하는 파라미터셋 설정부;

상기 다수의 초기 파라미터셋 또는 다수의 업데이트 파라미터셋을 상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 대입하여 각 파라미터셋에 따른 입자 크기별 수농도 추정값을 계산하는 입자 크기별 수농도 계산부;

각 파라미터셋에 따른 상기 입자 크기별 수농도 추정값과 측정된 상기 크기별 입자 수농도 사이의 오차를 나타내는 적합도를 계산하고, 계산된 적합도가 기지정된 기준 적합도 이내로 나타나는 파라미터셋을 후보 파라미터셋으로 설정하는 적합도 계산부;

상기 후보 파라미터셋에 대한 적합도가 기지정된 최소 진화 횟수 동안 기지정된 수렴 오차 이내로 수렴되는지 판별하여, 수렴 오차 이내로 수렴하는 것으로 판별된 적합도에 대한 후보 파라미터셋을 최적 파라미터셋으로 선택하는 수렴 판별부; 및

적합도가 수렴되지 않는 것으로 판별된 상기 후보 파라미터셋을 유전 알고리즘에 따라 업데이트하여 상기 다수의 업데이트 파라미터셋을 획득하는 파라미터셋 업데이트부를 포함하는 미세입자 분포 추정 장치.

#### 청구항 3

제2항에 있어서, 상기 입자상 물질의 질량보존 모델은

시간(t)의 변화에 따른 입자 수농도( $n(v, t)$ )의 변화를 부피가 ( $v - \bar{v}$ )인 입자와 부피가 ( $\bar{v}$ )인 입자가 결합되어 새로이 생성되는 부피(v)의 입자 수농도를 나타내는 응집 이득과 부피(v)의 입자가 다른 입자와 응집되어 소실되는 입자 수로서 응집 손실, 부피(v)의 입자가 물체에 점착되거나 통풍, 환기로 인해 소실되는 접촉 및 환기 손실 및 입자 소스에 의해 부피(V)의 공간에 방출되는 부피(v)와 부피( $v + dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자 방출율에 따라 나타내는 입자상 물질의 질량보존 모델에 따라 수학식

$$\begin{aligned} \frac{dn(v, t)}{dt} = & \frac{1}{2} \int_0^v K_{v-\bar{v}, \bar{v}} n(v - \bar{v}, t) n(\bar{v}, t) d\bar{v} - n(v, t) \int_0^\infty K_{v, \bar{v}} n(\bar{v}, t) d\bar{v} \\ & - (k + ac)n(v, t) + S(v, t)/V \end{aligned}$$

(여기서  $n(v, t)$ 는 시간(t)에서 부피(v)와 부피( $v + dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자 수농도이고,  $v - \bar{v}$  와  $\bar{v}$ 는 서로 응집되는 두 입자의 부피를 나타내며,  $K_{i, j}$ 는 부피(i)의 입자와 부피(j)의 입자의 충돌 커널, k는 입자 점착률, a는 공기 변화율, S(v, t)는 입자를 공급하는 소스가 부피(v)와 부피( $v + dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자를 방출하는

입자 방출율,  $V$ 는 모델링하는 공간의 부피를 나타낸다.)

으로 설정되는 미세입자 분포 추정 장치.

#### 청구항 4

제3항에 있어서, 상기 입자 방출율( $S(v,t)$ )은

수학식

$$S(v,t) = S_e \left[ \int_v^{v+dv} \frac{1}{3\sqrt{2\pi} v \ln \sigma_s} \exp \left[ -\frac{(\ln v - \ln v_s)^2}{18 \ln \sigma_s} \right] dv \right] \times f^*(t; T_d, T_s, T_o)$$

(여기서  $S_e$  는 단위 시간당 방출된 입자의 총 수농도로서 점착과 환기만을 고려한 기존의 소스 강도( $S_e$ )와 입자 방출율에 관련한 모델 파라미터( $f$ )의 곱( $S_e = S_e \times f$ )으로 계산되고,  $v_s$  는 전체 입자에 대한 기하 평균 부피 (geometric mean volume),  $\sigma_s$  는 기하 평균 부피( $v_s$ )에 따른 로그노멀 분포의 표준편차(standard deviation of log-normal distribution)를 나타내며,  $f^*(t, T_d, T_s, T_o)$  는 소스별 입자 방출 지연 특성을 나타내기 위한 부분 선형 활성화 함수로서,  $T_d$  는 지연되어 방출되는 입자의 방출 지연 시간이고,  $T_s$  는 균일하게 입자 방출이 시작 되는 균일 방출 시작 시간이며,  $T_o$  입자의 균일 방출이 종료되는 균일 방출 종료 시간이다.)에 따라 계산되며, 부분 선형 활성화 함수(piecewise linear activation function)( $f^*(t, T_d, T_s, T_o)$ )는 소스별로 입자 방출 시, 서로 다른 시간 지연이 있는 특성을 갖는 점을 반영하여 수학식

$$f^*(t; T_d, T_s, T_o) = \begin{cases} 0 & (t < T_d) \\ \frac{x-T_d}{T_s-T_d} & (T_d \leq t < T_s) \\ 1 & (T_s \leq t < T_o + T_d) \\ \frac{x-(T_o+T_s)}{T_s-T_d} & (T_o + T_d \leq t < T_o + T_s) \\ 0 & (t \geq T_o + T_s) \end{cases}$$

으로 모델링되는 미세입자 분포 추정 장치.

#### 청구항 5

제4항에 있어서, 상기 적합도 계산부는

파라미터셋( $x_m^{(k)}$ ,  $k$ 는 유전 알고리즘에 따른 파라미터셋( $x^{(k)}$ )의 세대 수,  $m$ 은  $k$ 번째 세대의 다수의 파라미터셋에 대한 식별자)에 대한 적합도( $F(x_m^{(k)}); C_{exp,t}$ )를 수학식

$$F(x_m^{(k)}; C_{exp,t}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{\frac{1}{N - N_{exp.min} + 1} \sum_{n=N_{exp.min}}^N \left\{ (C_{exp,t}^n - C_{est,t}^n(x_m^{(k)}))^2 \right\}}$$

(여기서  $C_{exp,t}^n$  는 시간( $t$ )에 따라 측정된 크기별 입자 수농도,  $T$ 는 타임 스텝 수를 나타내고,  $N_{exp.min}$ 은 측정하는 최소 입자 크기에 대응하는 사이즈빈,  $C_{est,t}^n(x_m^{(k)})$ 는  $N$ 개의 사이즈 빈 중  $n$ 번째 사이즈빈의 입자 크기에서 추정된 입자 크기별 수농도 추정값)

에 따라 계산하는 미세입자 분포 추정 장치.

#### 청구항 6

제5항에 있어서, 상기 수렴 판별부는

후보 파라미터셋에 대한 적합도( $F(x_m^{(k)}); C_{exp}$ )가 기지정된 최소 진화 횟수( $k_s$ ) 동안 기지정된 수렴 오차( $\epsilon_{tor}$ ) 이

내로 수렴되는지 수학적

$$\frac{1}{k_s} \frac{|\min(F(x_m^{(k)}; C_{\text{exp},t})) - \min(F(x_m^{(k-k_s)}; C_{\text{exp},t}))|}{\min_{k' \in [k-k_s]} (\min(F(x_m^{(k-k_s)}; C_{\text{exp},t})))} \rightarrow \epsilon_{\text{tor}}$$

에 따라 판별하는 미세입자 분포 추정 장치.

#### 청구항 7

제4항에 있어서, 상기 파라미터셋 설정부는

입자 직경(d)에 따른 입자 점착률(k)을 계산하기 위한 선형 함수식( $\ln(k(d)) = a \ln(d) + b$ )의 파라미터(a, b)와 점착 및 환기만을 고려한 소스 강도에 따른 입자 방출률에 관한 모델 파라미터(f), 기하 평균 지름( $d_s$ ), 표준 편차( $\sigma_s$ ), 방출 지연 시간( $T_d$ ), 균일 방출 시작 시간( $T_s$ ), 균일 방출 종료 시간( $T_o$ ) 및 충돌 커널( $K_{i,j}$ )을 계산하기 위한 하마커 상수( $A_H$ )를 입자 크기별( $v_k$ ) 수농도 변화를 해석하기 위한 파라미터셋( $x^{(k)}$ )의 파라미터(a, b, f,  $d_s$ ,  $\sigma_s$ ,  $T_d$ ,  $T_s$ ,  $T_o$ ,  $A_H$ )로 선택하여 초기화하는 미세입자 분포 추정 장치.

#### 청구항 8

제2항에 있어서, 상기 파라미터셋 업데이트부는

유전 알고리즘에 따라 상기 후보 파라미터셋의 파라미터들을 재조합 및 변이시켜, 다음 세대의 다수의 업데이트 파라미터셋을 획득하는 미세입자 분포 추정 장치.

#### 청구항 9

측정 대상 공간에서 측정 가능한 크기 범위의 입자들에 대한 크기별 입자 수농도를 측정하여 획득하는 단계;

기지정된 입자상 물질의 질량보존 모델에 요구되는 파라미터들을 각각 포함하는 다수의 파라미터셋을 설정하고, 설정된 다수의 파라미터셋 각각을 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 상기 크기별 입자 수농도에 대응하는 크기 범위에서의 입자 크기별 수농도 추정값을 획득하며, 상기 크기별 입자 수농도와 대응하는 상기 입자 크기별 수농도 추정값의 차이로 나타나는 적합도에 따라 상기 파라미터셋을 반복 업데이트하여 최적 파라미터셋을 획득하는 단계; 및

상기 최적 파라미터셋을 상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 측정되지 않은 크기 범위의 입자들에 대한 시간에 따른 입자 크기별 수농도를 계산하는 단계를 포함하는 미세입자 분포 추정 방법.

#### 청구항 10

제9항에 있어서, 상기 최적 파라미터셋을 획득하는 단계는

상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 대한 다수의 파라미터로 구성되는 파라미터셋을 설정하고, 설정된 다수의 파라미터 셋을 초기화하여 다수의 초기 파라미터 셋을 획득하는 단계;

상기 다수의 초기 파라미터 셋 또는 다수의 업데이트 파라미터셋을 상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 대입하여 각 파라미터 셋에 따른 입자 크기별 수농도 추정값을 계산하는 단계;

각 파라미터 셋에 따른 상기 입자 크기별 수농도 추정값과 측정된 상기 크기별 입자 수농도 사이의 오차를 나타내는 적합도를 계산하고, 계산된 적합도가 기지정된 기준 적합도 이내로 나타나는 파라미터셋을 후보 파라미터 셋으로 설정하는 단계;

상기 후보 파라미터셋에 대한 적합도가 기지정된 최소 진화 횟수 동안 기지정된 수렴 오차 이내로 수렴되는지 판별하여, 수렴 오차 이내로 수렴하는 것으로 판별된 적합도에 대한 후보 파라미터 셋을 최적 파라미터 셋으로 선택하는 단계; 및

적합도가 수렴되지 않는 것으로 판별된 상기 후보 파라미터 셋을 유전 알고리즘에 따라 업데이트하여 상기 다수의 업데이트 파라미터셋을 획득하는 단계를 포함하는 미세입자 분포 추정 방법.

### 청구항 11

제10항에 있어서, 상기 입자상 물질의 질량보존 모델은

시간(t)의 변화에 따른 입자 수농도( $n(v,t)$ )의 변화를 부피가 ( $v-\bar{v}$ )인 입자와 부피가 ( $\bar{v}$ )인 입자가 결합되어 새로이 생성되는 부피(v)의 입자 수농도를 나타내는 응집 이득과 부피(v)의 입자가 다른 입자와 응집되어 소실되는 입자 수로서 응집 손실, 부피(v)의 입자가 물체에 점착되거나 통풍, 환기로 인해 소실되는 점착 및 환기 손실 및 입자 소스에 의해 부피(V)의 공간에 방출되는 부피(v)와 부피( $v+dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자 방출율에 따라 나타내는 입자상 물질의 질량보존 모델에 따라 수학식

$$\frac{dn(v,t)}{dt} = \frac{1}{2} \int_0^v K_{v-\bar{v},\bar{v}} n(v-\bar{v},t) n(\bar{v},t) d\bar{v} - n(v,t) \int_0^\infty K_{v,\bar{v}} n(\bar{v},t) d\bar{v} - (k+ac)n(v,t) + S(v,t)/V$$

(여기서  $n(v,t)$ 는 시간(t)에서 부피(v)와 부피( $v+dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자 수농도이고,  $v-\bar{v}$  와  $\bar{v}$ 는 서로 응집되는 두 입자의 부피를 나타내며,  $K_{i,j}$ 는 부피(i)의 입자와 부피(j)의 입자의 충돌 커널, k는 입자 점착률, a는 공기 변화율,  $S(v,t)$ 는 입자를 공급하는 소스가 부피(v)와 부피( $v+dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자를 방출하는 입자 방출율, V는 모델링하는 공간의 부피를 나타낸다.)

으로 설정되는 미세입자 분포 추정 방법.

### 청구항 12

제11항에 있어서, 상기 입자 방출율( $S(v,t)$ )은

수학식

$$S(v,t) = S_e \left[ \int_v^{v+dv} \frac{1}{3\sqrt{2\pi} v \ln \sigma_s} \exp \left[ -\frac{(\ln v - \ln v_s)^2}{18 \ln \sigma_s} \right] dv \right] \times f^*(t; T_d, T_s, T_o)$$

(여기서  $S_e$ 는 단위 시간당 방출된 입자의 총 수농도로서 점착과 환기만을 고려한 기존의 소스 강도( $S_c$ )와 입자 방출율에 관련한 모델 파라미터(f)의 곱( $S_e = S_c \times f$ )으로 계산되고,  $v_s$ 는 전체 입자에 대한 기하 평균 부피,  $\sigma_s$ 는 기하 평균 부피( $v_s$ )에 따른 로그노멀 분포의 표준편차를 나타내며,  $f^*(t, T_d, T_s, T_o)$ 는 소스별 입자 방출 지연 특성을 나타내기 위한 부분 선형 활성화 함수로서,  $T_d$ 는 지연되어 방출되는 입자의 방출 지연 시간이고,  $T_s$ 는 균일하게 입자 방출이 시작되는 균일 방출 시작 시간이며,  $T_o$  입자의 균일 방출이 종료되는 균일 방출 종료 시간이다.)에 따라 계산되며, 부분 선형 활성화 함수(piecewise linear activation function)( $f^*(t, T_d, T_s, T_o)$ )는 소스별로 입자 방출 시, 서로 다른 시간 지연이 있는 특성을 갖는 점을 반영하여 수학식

$$f^*(t; T_d, T_s, T_o) = \begin{cases} 0 & (t < T_d) \\ \frac{x-T_d}{T_s-T_d} & (T_d \leq t < T_s) \\ 1 & (T_s \leq t < T_o + T_d) \\ \frac{x-(T_o+T_s)}{T_s-T_d} & (T_o + T_d \leq t < T_o + T_s) \\ 0 & (t \geq T_o + T_s) \end{cases}$$

으로 모델링되는 미세입자 분포 추정 방법.

### 청구항 13

제12항에 있어서, 상기 후보 파라미터셋으로 설정하는 단계는

파라미터셋( $x_m^{(k)}$ ), k는 유전 알고리즘에 따른 파라미터셋( $x^{(k)}$ )의 세대 수, m은 k번째 세대의 다수의 파라미터셋에

대한 식별자)에 대한 적합도( $F(x_m^{(k)}); C_{exp,t}$ )를 수학식

$$F(x_m^{(k)}; C_{exp,t}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{\frac{1}{N - N_{exp,min} + 1} \sum_{n=N_{exp,min}}^N \{(C_{exp,t}^n - C_{est,t}^n(x_m^{(k)}))^2\}}$$

(여기서  $C_{exp,t}^n$ 는 시간(t)에 따라 측정된 크기별 입자 수농도, T는 타임 스텝 수를 나타내고,  $N_{exp,min}$ 은 측정하는 최소 입자 크기에 대응하는 사이즈빈,  $C_{est,t}^n(x_m^{(k)})$ 는 N개의 사이즈 빈 중 n번째 사이즈빈의 입자 크기에서 추정된 입자 크기별 수농도 추정값)

에 따라 계산하는 미세입자 분포 추정 방법.

#### 청구항 14

제13항에 있어서, 상기 최적 파라미터셋으로 선택하는 단계는

후보 파라미터셋에 대한 적합도( $F(x_m^{(k)}); C_{exp}$ )가 기지정된 최소 진화 횟수( $k_s$ ) 동안 기지정된 수렴 오차( $\varepsilon_{tor}$ ) 이내로 수렴되는지 수학식

$$\frac{1}{k_s} \frac{|\min(F(x_m^{(k)}; C_{exp})) - \min(F(x_m^{(k-k_s)}; C_{exp}))|}{\min_{k' \in [k-k_s]} (\min(F(x_m^{(k-k_s)}; C_{exp})))} \rightarrow \varepsilon$$

에 따라 판별하는 미세입자 분포 추정 방법.

#### 청구항 15

제12항에 있어서, 상기 다수의 초기 파라미터 셋을 획득하는 단계는

입자 직경(d)에 따른 입자 점착률(k)을 계산하기 위한 선형 함수식( $\ln(k(d)) = a \ln(d) + b$ )의 파라미터(a, b)와 점착 및 환기만을 고려한 소스 강도에 따른 입자 방출률에 관한 모델 파라미터(f), 기하 평균 지름( $d_s$ ), 표준 편차( $\sigma_s$ ), 방출 지연 시간( $T_d$ ), 균일 방출 시작 시간( $T_s$ ), 균일 방출 종료 시간( $T_o$ ) 및 충돌 커널( $K_{i,j}$ )을 계산하기 위한 하마커 상수( $A_H$ )를 입자 크기별( $v_k$ ) 수농도 변화를 해석하기 위한 파라미터셋( $x^{(k)}$ )의 파라미터(a, b, f,  $d_s$ ,  $\sigma_s$ ,  $T_d$ ,  $T_s$ ,  $T_o$ ,  $A_H$ )로 선택하여 초기화하는 미세입자 분포 추정 방법.

#### 청구항 16

제10항에 있어서, 상기 업데이트 파라미터셋을 획득하는 단계는

유전 알고리즘에 따라 상기 후보 파라미터셋의 파라미터들을 재조합 및 변이시켜, 다음 세대의 다수의 업데이트 파라미터셋을 획득하는 미세입자 분포 추정 방법.

### 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본 발명은 미세입자 분포 추정 장치 및 방법에 관한 것으로, 휴대용 기기로 측정 가능한 크기의 입자들의 시간에 따른 크기별 입자 수농도로부터 측정할 수 없는 크기의 미세입자의 크기별 수농도 분포를 추정할 수 있는 미세입자 분포 추정 장치 및 방법에 관한 것이다.

### 배경 기술

[0002] 최근 미세먼지 등으로 인해 환경 및 건강 문제가 대두되고 있으며, 이로 인한 공기 품질에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 실내에서도 일상 생활에서 자주 이용되는 전기 스토브나 가스 스토브 및 촛불 등에서 발생하는 입자들에 의해 실내 공기의 질이 변화하기 때문에 공기 중의 미세입자 분포를 분석하는 것이 중요하다.



[0003] 미세입자의 분포를 추정하는 장치 및 기법은 기존에도 다양하게 연구되었으나, 기존의 기법에서는 미세입자를 크기별로 분류하고, 분류된 크기별 입자의 수농도를 개별 측정 및 합산하여 미세입자 크기 분포를 획득하는 방식을 이용하였다. 이와 같이 각 크기별 미세입자를 별도로 측정하는 방식으로 기존의 미세입자 분포 추정 장치는 고가일 뿐만 아니라 부피가 커서 휴대용으로 제조가 어렵다는 한계가 있다.

## 선행기술문헌

### 특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 한국 공개 특허 제10-2017-011796호 (2017.10.24 공개)

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0005] 본 발명의 목적은 휴대용 기기로 측정할 수 있는 크기의 입자의 크기별 수농도로부터 휴대용 기기로 측정할 수 없는 크기의 미세입자의 크기별 수농도 분포를 추정할 수 있는 미세입자 분포 추정 장치 및 방법을 제공하는데 있다.

[0006] 본 발명의 다른 목적은 저비용 및 소형으로 제작 가능한 미세입자 분포 추정 장치 및 방법을 제공하는데 있다.

### 과제의 해결 수단

[0007] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 장치는 측정 대상 공간에서 측정 가능한 크기 범위의 입자들에 대한 크기별 입자 수농도를 측정하여 획득하는 입자 수농도 측정부; 기지정된 입자상 물질의 질량보존 모델에 요구되는 파라미터들을 각각 포함하는 다수의 파라미터셋을 설정하고, 설정된 다수의 파라미터셋 각각을 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 상기 크기별 입자 수농도에 대응하는 크기 범위에서의 입자 크기별 수농도 추정값을 획득하며, 상기 크기별 입자 수농도와 대응하는 상기 입자 크기별 수농도 추정값의 차이로 나타나는 적합도에 따라 상기 파라미터셋을 반복 업데이트하여 최적 파라미터셋을 획득하는 파라미터 최적화부; 및 상기 최적 파라미터셋을 상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 측정되지 않은 크기 범위의 입자들에 대한 시간에 따른 입자 크기별 수농도를 계산하는 미세입자 분포 계산부를 포함한다.

[0008] 상기 파라미터 최적화부는 상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 대한 다수의 파라미터로 구성되는 파라미터셋을 초기화하여 다수의 초기 파라미터셋을 획득하는 파라미터셋 설정부; 상기 다수의 초기 파라미터셋 또는 다수의 업데이트 파라미터셋을 상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 대입하여 각 파라미터셋에 따른 입자 크기별 수농도 추정값을 계산하는 입자 크기별 수농도 계산부; 각 파라미터셋에 따른 상기 입자 크기별 수농도 추정값과 측정된 상기 크기별 입자 수농도 사이의 오차를 나타내는 적합도를 계산하고, 계산된 적합도가 기지정된 기준 적합도 이내로 나타나는 파라미터셋을 후보 파라미터셋으로 설정하는 적합도 계산부; 상기 후보 파라미터셋에 대한 적합도가 기지정된 최소 진화 횟수 동안 기지정된 수렴 오차 이내로 수렴되는지 판별하여, 수렴 오차 이내로 수렴하는 것으로 판별된 적합도에 대한 후보 파라미터셋을 최적 파라미터셋으로 선택하는 수렴 판별부; 및 적합도가 수렴되지 않는 것으로 판별된 상기 후보 파라미터셋을 유전 알고리즘에 따라 업데이트하여 상기 다수의 업데이트 파라미터셋을 획득하는 파라미터셋 업데이트부를 포함할 수 있다.

[0009] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 다른 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 방법은 측정 대상 공간에서 측정 가능한 크기 범위의 입자들에 대한 크기별 입자 수농도를 측정하여 획득하는 단계; 기지정된 입자상 물질의 질량보존 모델에 요구되는 파라미터들을 각각 포함하는 다수의 파라미터셋을 설정하고, 설정된 다수의 파라미터셋 각각을 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 상기 크기별 입자 수농도에 대응하는 크기 범위에서의 입자 크기별 수농도 추정값을 획득하며, 상기 크기별 입자 수농도와 대응하는 상기 입자 크기별 수농도 추정값의 차이로 나타나는 적합도에 따라 상기 파라미터셋을 반복 업데이트하여 최적 파라미터셋을 획득하는 단계; 및 상기 최적 파라미터셋을 상기 입자상 물질의 질량보존 모델에 적용하여 측정되지 않은 크기 범위의 입자들에 대한 시간에 따른 입자 크기별 수농도를 계산하는 단계를 포함한다.

### 발명의 효과

[0010] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 장치 및 방법은 휴대용 기기로 측정 가능한 크기의 입자



들의 시간에 따른 크기별 입자 수농도로부터 측정할 수 없는 크기의 미세입자의 크기별 수농도를 추정할 수 있어 저비용 및 휴대 가능한 수준으로 소형으로 제조할 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

- [0011] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 장치의 개략적 구조를 나타낸다.
- 도 2는 도 1의 파라미터 최적화부의 상세 구성의 일 예를 나타낸다.
- 도 3은 입자 공급원에 따른 시간별 미세입자 총 수농도 변화를 나타낸다.
- 도 4는 입자 공급원에 따라 공급된 크기별 입자의 수농도 분포를 나타낸다.
- 도 5는 입자 공급원에 따라 추정되는 시간별 입자 크기별 수농도 변화를 나타낸다.
- 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 방법을 나타낸다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0012] 본 발명과 본 발명의 동작상의 이점 및 본 발명의 실시예에 의하여 달성되는 목적을 충분히 이해하기 위해서는 본 발명의 바람직한 실시예를 예시하는 첨부 도면 및 첨부 도면에 기재된 내용을 참조하여야만 한다.
- [0013] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 설명함으로써, 본 발명을 상세히 설명한다. 그러나, 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며, 설명하는 실시예에 한정되는 것이 아니다. 그리고, 본 발명을 명확하게 설명하기 위하여 설명과 관계없는 부분은 생략되며, 도면의 동일한 참조부호는 동일한 부재임을 나타낸다.
- [0014] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라, 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다. 또한, 명세서에 기재된 "...부", "...기", "모듈", "블록" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어나 소프트웨어 또는 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.
- [0015] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 장치의 개략적 구조를 나타내고, 도 2는 도 1의 파라미터 최적화부의 상세 구성의 일 예를 나타낸다.
- [0016] 도 1을 참조하면, 본 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 장치는 입자 수농도 측정부(110), 모델 저장부(120), 파라미터 최적화부(130) 및 미세입자 분포 계산부(140)를 포함한다.
- [0017] 본 실시예에서 미세입자 분포 추정 장치는 수농도를 확인하고자 하는 전체 입자 크기(예를 들면 2 nm ~ 100 nm)가 미리 설정될 수 있으며, 설정된 전체 입자 크기를 기지정된 방식으로 N개의 사이즈빈(size bin)으로 분할하고, 분할된 N개의 사이즈빈 각각에 따른 크기의 입자의 수농도를 획득한다.
- [0018] 이때, 입자 수농도 측정부(110)는 측정 대상이 되는 현재 공간 상에서 측정 가능한 크기(예를 들면 10nm 이상)의 입자들의 시간에 따른 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )를 측정한다. 본 실시예의 미세입자 분포 추정 장치는 저비용 및 소형의 휴대용 기기로 구현되는 것으로 가정하며, 이에 고가의 대형 기기와 달리 입자 수농도 측정부(110)에서 측정 가능한 입자의 크기가 한정된다.
- [0019] 이에 입자 수농도 측정부(110)는 미리 분할된 N개의 사이즈빈(size bin)에서 측정 가능한 범위에 대응하는 사이즈빈 각각의 시간에 따른 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )를 측정하여 획득한다. 즉 입자 수농도 측정부(110)는 측정 가능한 최소 크기의 입자에 대응하는 측정 최소 사이즈빈부터 최대 크기의 입자에 대응하는 N번째 사이즈빈까지 시간에 따른 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )를 시간에 따라 측정하여 획득할 수 있다.
- [0020] 입자 수농도 측정부(110)는 광학 방식 또는 하전 방식 등과 같은 다양한 방법으로 시간에 따른 측정 가능한 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )를 직접 측정하여 획득할 수 있다. 입자 수농도 측정부(110)는 경우에 따라서 별도의 입자 수농도 측정 장치가 측정하여 획득한 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )를 전송받는 통신 모듈로 구현될 수도 있다.
- [0021] 모델 저장부(120)는 입자상 물질의 질량보존 모델이 미리 저장된다. 입자상 물질의 질량보존 모델은 환경 요인에 따른 크기별 입자의 입자 변화를 모델링한 것으로서, 입자상 물질의 질량보존 모델에 따르면 시간(t)에 따른

크기별 입자 수농도의 변화는 수학식 1과 같이 나타낸다.

### 수학식 1

$$\frac{dn(v,t)}{dt} = \frac{1}{2} \int_0^v K_{v-\bar{v},\bar{v}} n(v-\bar{v},t) n(\bar{v},t) d\bar{v} - n(v,t) \int_0^\infty K_{v,\bar{v}} n(\bar{v},t) d\bar{v} - (k+ac)n(v,t) + S(v,t)/V$$

[0022]

[0023]

$n(v,t)$ 는 시간( $t$ )에서 부피( $v$ )와 부피( $v+dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자의 수농도로서, 대응하는 사이즈 빈에 따라 결정될 수 있다. 그리고  $v-\bar{v}$  와  $\bar{v}$  는 서로 응집되는 두 입자의 부피를 나타내고,  $K_{v-\bar{v},\bar{v}}$  는 부피( $v-\bar{v}$ )의 입자와 부피( $\bar{v}$ )의 입자의 충돌 확률 계수(collison rate coefficient)로서 응집 커널(coagulation kernel 또는 충돌 커널(kernel)이라 함),  $k$ 는 입자 점착률(deposition rate),  $ac$ 는 공기 변화율(air change rate),  $S(v,t)$ 는 입자를 공급하는 소스가 부피( $v$ )와 부피( $v+dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자를 방출하는 입자 방출율(particle emission rate),  $V$ 는 모델링하는 공간의 부피를 나타낸다.

[0024]

수학식 1에서 왼쪽항은 시간( $t$ )의 변화에 따른 입자 수농도( $n(v,t)$ )의 변화를 나타낸다. 그리고 오른쪽에서 첫 번째 항목은 응집 이득(coagulation gain)으로서, 부피가 ( $v-\bar{v}$ )인 입자와 부피가 ( $\bar{v}$ )인 입자가 결합되어 새로이 생성되는 부피( $v$ )의 입자 수농도를 나타내고, 두 번째 항목은 부피( $v$ )의 입자가 다른 입자와 응집되어 소실되는 입자 수로서 응집 손실(coagulation loss)을 나타낸다. 세 번째 항목은 부피( $v$ )의 입자가 물체에 점착되거나 통풍, 환기로 인해 소실되는 점착 및 환기 손실을 나타내고, 네 번째 항목은 입자 소스에 의해 부피( $V$ )의 공간에 방출되는 부피( $v$ )와 부피( $v+dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자 방출율을 나타낸다.

[0025]

즉 수학식 1은 부피( $V$ )의 공간 상에서 사이즈 빈에 대응하는 부피( $v$ )와 부피( $v+dv$ ) 사이의 크기를 갖는 입자들에 대한 입자 수농도( $n(v,t)$ )의 시간에 따른 변화를 입자상 물질의 질량보존 법칙에 기반하여 입자의 추가 및 소실 원인별로 구분하여 모델링한 것으로, 본 발명의 미세입자 분포 추정 기법에서 지배 방정식으로 이용된다.

[0026]

그리고 수학식 1에서 입자 방출율( $S(v,t)$ )은 로그노멀 분포(Log-normal Distribution)로 모델링될 수 있으며, 이에 수학식 2에 따라 계산될 수 있다.

### 수학식 2

$$S(v,t) = S_e \left[ \int_v^{v+dv} \frac{1}{3\sqrt{2\pi} v \ln \sigma_s} \exp \left[ -\frac{(\ln v - \ln v_s)^2}{18 \ln \sigma_s} \right] dv \right] \times f^*(t; T_d, T_s, T_o)$$

[0027]

[0028]

여기서  $S_e$  는 단위 시간당 방출된 입자의 총 수농도로서 점착과 환기만을 고려한 기존의 소스 강도( $S_c$ )와 입자 방출율에 관련한 모델 파라미터( $f$ )의 곱( $S_e = S_c \times f$ )으로 계산된다. 여기서 입자 방출율에 관련한 모델 파라미터( $f$ )는 입자 크기에 무관하게 상수 값으로 설정되는 파라미터로서 후술하는 파라미터 최적화부(130)에 의해 결정될 수 있다.

[0029]

그리고  $v_s$  는 전체 입자에 대한 기하 평균 부피(geometric mean volume)( $v_s = \frac{4}{3}\pi r^3$ ),  $\sigma_s$  는 기하 평균 부피( $v_s$ )에 따른 로그노멀 분포의 표준편차(standard deviation of log-normal distribution)를 나타내며,  $f^*(t, T_d, T_s, T_o)$  는 시간( $t$ )에 따른 소스별 입자 방출 지연 특성을 나타내기 위한 부분 선형 활성화 함수로서,  $T_d$  는 지연되어 방출되는 입자의 방출 지연 시간이고,  $T_s$  는 균일하게 입자 방출이 시작되는 균일 방출 시작 시간이며,  $T_o$  입자의 균일 방출이 종료되는 균일 방출 종료 시간이다.

[0030]

수학식 2에서 부분 선형 활성화 함수(piecewise linear activation function)( $f^*(t, T_d, T_s, T_o)$ )는 소스별로 입자 방출 시, 서로 다른 시간 지연이 있는 특성을 갖는 점을 반영하여 수학식 3으로 모델링될 수 있다.

### 수학식 3

$$f^*(t; T_d, T_s, T_o) = \begin{cases} 0 & (t < T_d) \\ \frac{x-T_d}{T_s-T_d} & (T_d \leq t < T_s) \\ 1 & (T_s \leq t < T_o + T_d) \\ \frac{x-(T_o+T_s)}{T_s-T_d} & (T_o + T_d \leq t < T_o + T_s) \\ 0 & (t \geq T_o + T_s) \end{cases}$$

[0031]

[0032] 수학식 3에 따르면, 시간(t)이 방출 지연 시간( $T_d$ ) 이전이면, 부분 선형 활성화 함수( $f^*(t, T_d, T_s, T_o)$ )가 0으로 입자 방출율( $S(v, t)$ )이 0이 되도록 하고, 시간(t)이 방출 지연 시간( $T_d$ ) 이후이고 균일 방출 시작 시간( $T_s$ )

이전이면, 입자 방출율( $S(v, t)$ )이 시간( $x = t$ )에 따라  $\frac{x-T_d}{T_s-T_d}$ 의 비로 점차로 증가되도록 하며, 시간(t)이 균일 방출 시간( $T_s$ ) 이후이고 균일 방출 종료 시간( $T_o$ )과 방출 지연 시간( $T_d$ )의 합 이전이면, 입자 방출율( $S(v, t)$ )이 그대로 유지되도록 한다. 또한 시간(t)이 균일 방출 종료 시간( $T_o$ )과 방출 지연 시간( $T_d$ )의 합 이후이고 균일

방출 종료 시간( $T_o$ )과 균일 방출 시작 시간( $T_s$ )의 합 이전이면, 입자 방출율( $S(v, t)$ )이  $\frac{x-(T_o+T_s)}{T_s-T_d}$ 의 비로 점차 감소되도록 하고, 시간(t)이 균일 방출 종료 시간( $T_o$ )과 균일 방출 시작 시간( $T_s$ )의 합 이후이면, 다시 입자 방출율( $S(v, t)$ )이 0이 되도록 한다. 따라서 부분 선형 활성화 함수( $f^*(t, T_d, T_s, T_o)$ )는 입자를 발생시켜 공급하는 입자 공급원의 특성을 고려하여 입자 방출율( $S(v, t)$ )이 시간에 따라 증감되되는 변화를 모델링한 결과이다.

[0033] 여기서 기하 평균 부피( $v_s$ )와 로그노멀 분포의 표준편차( $\sigma_s$ ), 방출 지연 시간( $T_d$ ), 균일 방출 시작 시간( $T_s$ ) 및 균일 방출 종료 시간( $T_o$ )은 입자 공급원의 특성에 따른 값으로, 입자 크기에 무관한 상수 값이며, 후술하는 파라미터 최적화부(130)에 의해 획득될 수 있다.

[0034] 한편, 수학식 1에서 입자 점착률(k)은 입자 직경(d)에 따라 상이하하며, 이에  $\ln(k(d)) = a \ln(d) + b$ 와 같이 입자 직경(d)에 따라 가변되는 선형 함수식으로 변환될 수 있다. 다만 입자 점착률(k)을 계산하기 위한 선형 함수식의 파라미터 a와 b 또한 입자 직경(d)에 무관한 상수 값으로, 파라미터 최적화부(130)에 의해 획득될 수 있다.

[0035] 또한 수학식 1에서 충돌 커널(K)은 입자의 브라운 확산(Brownian diffusion)과 반데르발스 힘(Van der Waals force)을 고려한 입자의 충돌율을 계산하기 위한 충돌율 계수(collision rate coefficient)로서, 반지름( $r_i$ )인 i 입자와 반지름( $r_j$ )인 j 입자의 확산( $D_{p,i}$ ,  $D_{p,j}$ )에 따른 충돌율 계수인 브라운 확산 커널( $K_{i,j}^B$ )은 수학식 4로 계산될 수 있다.

### 수학식 4

$$K_{i,j}^B = \frac{4\pi(r_i + r_j)(D_{p,i} + D_{p,j})}{\frac{r_i + r_j}{r_i + r_j + \sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2}} + \frac{4(D_{p,i} + D_{p,j})}{\sqrt{\bar{v}_{p,i}^2 + \bar{v}_{p,j}^2}(r_i + r_j)}}$$

[0036]

[0037] 수학식 4에서  $\delta_i$ 는 수학식 5와 같이 계산되며,  $\delta_j$  또한 동일한 방식으로 계산될 수 있다.

### 수학식 5

$$\delta_i = \frac{(2r_i + \lambda_{p,i})^3 - (4r_i^2 + \lambda_{p,i}^2)^{3/2}}{6r_i \lambda_{p,i}} - 2r_i$$

[0038]

여기서  $\lambda_{p,i}$  는 i 입자의 평균 자유 경로로  $\lambda_{p,i} = \frac{8D_{p,i}}{\pi \bar{v}_{p,i}}$  이다.

[0039]

그리고 입자 간의 쌍극자 인력(dipole-dipole attraction)에 의해 발생하는 힘에 의한 충돌을 고려한 반데르발스 충돌 커널( $K_{i,j}^V$ )은 브라운 확산 커널( $K_{i,j}^B$ )을 기반으로 수학식 6과 같이 표현될 수 있다.

[0040]

### 수학식 6

$$K_{i,j}^V = K_{i,j}^B (V_{E,i,j} - 1) = K_{i,j}^B \left\{ \frac{W_{c,i,j} \left[ 1 + \frac{4(D_{p,i} + D_{p,j})}{\sqrt{\bar{v}_{p,i}^2 + \bar{v}_{p,j}^2}(r_i + r_j)} \right]}{1 + \frac{W_{c,i,j}}{W_{k,i,j}} \frac{4(D_{p,i} + D_{p,j})}{\sqrt{\bar{v}_{p,i}^2 + \bar{v}_{p,j}^2}(r_i + r_j)}} - 1 \right\}$$

[0041]

여기서  $V_{E,i,j}$  는 반데르발스/점성 충돌 보정 계수(Van der Waals/viscous collision correction factor)이다.

[0042]

수학식 6에서  $W_{k,i,j}$  는 수학식 7로 계산되고,  $W_{c,i,j}$  는 수학식 8로 계산될 수 있다.

[0043]

### 수학식 7

$$W_{k,i,j} = \frac{-1}{2(r_i + r_j)^2 k_B T} \int_{r_i+r_j}^{\infty} \times \left( \frac{dE_{p,i,j}(r)}{dr} + r \frac{d^2 E_{p,i,j}(r)}{dr^2} \right) \exp \left[ \frac{-1}{k_B T} \left( \frac{r}{2} \frac{dE_{p,i,j}(r)}{dr} + E_{p,i,j}(r) \right) \right] r^2 dr$$

[0044]

### 수학식 8

$$W_{c,i,j} = \frac{1}{(r_i + r_j) \int_{r_i+r_j}^{\infty} \frac{D_{i,j}^{\infty}}{D_{r,i,j}}(r) \exp \left[ \frac{E_{p,i,j}(r)}{k_B T} \right] \frac{dr}{r^2}}$$

[0045]

그리고 수학식 7 및 8에서  $k_B$ 는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant)이고, T는 절대 온도이며,  $E_{p,i,j}(r)$  은 수학

[0046]

식 9로 계산되는 반데르발스 상호 포텐셜이고,  $\frac{D_{i,j}^{\infty}}{D_{r,i,j}}(r)$  는 연속체 영역에서 확산 계수에 대한 점성력 보정 계수(viscous force correction factor to the diffusion coefficient in the continuum regime)로서 수학식 10에 따라 계산된다.

## 수학식 9

$$E_{P,i,j}(r) = -\frac{A_H}{6} \left[ \frac{2r_i r_j}{r^2 - (r_i + r_j)^2} + \frac{2r_i r_j}{r^2 - (r_i - r_j)^2} + \ln \frac{r^2 - (r_i + r_j)^2}{r^2 - (r_i - r_j)^2} \right]$$

여기서  $A_H$  는 상호 작용하는 입자의 편극도와 이온화 에너지에 의존하는 물질 고유의 매개 변수를 나타내는 하마커(Hamaker) 상수이다.

## 수학식 10

$$\frac{D_{i,j}^\infty}{D_{r,i,j}}(r) = 1 + \frac{2.6r_i r_j}{(r_i + r_j)^2} \sqrt{\frac{r_i r_j}{(r_i + r_j)(r - r_i - r_j)}} + \frac{r_i r_j}{(r_i + r_j)(r - r_i - r_j)}$$

파라미터 최적화부(130)는 모델 저장부(120)에 저장된 입자상 물질의 질량보존 모델을 해석하기 위한 파라미터셋을 설정하고, 설정된 파라미터셋을 최적화하여 최적 파라미터셋을 획득한다. 파라미터 최적화부(130)는 유전 알고리즘, 파티클 스웜 방법 등을 이용하여 최적 파라미터셋을 획득할 수 있으며, 여기서는 일 예로 유전 알고리즘 기법에 따라 최적 파라미터셋을 획득하는 것으로 가정하여 설명한다.

도 2를 참조하면, 파라미터 최적화부(130)는 파라미터셋 설정부(131), 입자 크기별 수농도 계산부(132), 적합도 계산부(133), 수렴 판별부(134), 파라미터셋 업데이트부(135) 및 최적 파라미터셋 획득부(136)를 포함할 수 있다.

파라미터셋 설정부(131)는 수학식 1의 시간(t)에 따른 입자의 부피( $v_k$ ), 즉 입자 크기별 시간에 따른 수농도의 변화에 대한 입자상 물질의 질량보존 모델을 해석하기 위한 파라미터셋( $x^{(k)}$ )에 포함될 파라미터들을 설정하고, 파라미터셋( $x^{(k)}$ )에 포함되는 파라미터들의 초기값을 설정하여 초기 파라미터셋( $x^{(0)}$ )을 획득한다. 본 실시예에서 파라미터셋 설정부(131)는 입자 크기별( $v_k$ ) 수농도 변화를 해석하기 위한 파라미터셋( $x^{(k)}$ )에 포함되는 파라미터로서, 상기한 입자 점착률(k)을 계산하기 위한 선형 함수식의 파라미터(a, b)와 점착 및 환기만을 고려한 소스 강도에 따른 입자 방출률에 관한 모델 파라미터(f), 전체 입자의 기하 평균 지름( $d_s$ ), 전체 입자의 기하 평균 부피( $v_s$ )에 따른 로그노멀 분포의 표준편차( $\sigma_s$ ), 방출 지연 시간( $T_d$ ), 균일 방출 시작 시간( $T_s$ ), 균일 방출 종료 시간( $T_o$ ) 및 하마커 상수( $A_H$ )를 설정할 수 있다.

파라미터셋( $x^{(k)}$ )에 포함되는 파라미터(a, b, f,  $d_s$ ,  $\sigma_s$ ,  $T_d$ ,  $T_s$ ,  $T_o$ ,  $A_H$ ) 중 공기 변화율(a)과 (b)는 수학식 1에서 세번째 항목인 점착 및 환기 손실을 계산하기 위한 파라미터이고, 기하 평균 지름( $d_s$ )과 로그노멀 분포의 표준 편차( $\sigma_s$ ), 방출 지연 시간( $T_d$ ), 균일 방출 시작 시간( $T_s$ ), 균일 방출 종료 시간( $T_o$ )은 수학식 1에서 세번째 항목인 네번째 항목인 입자 방출률( $S(v, t)$ )을 계산하기 위한 파라미터이며, 하마커 상수( $A_H$ )는 수학식 1에서 첫 번째와 두번째 항목인 응집 이득과 응집 손실을 계산하기 위한 파라미터이다.

여기서 파라미터셋( $x^{(k)}$ )에 포함되는 파라미터(a, b, f,  $d_s$ ,  $\sigma_s$ ,  $T_d$ ,  $T_s$ ,  $T_o$ ,  $A_H$ )는 사이즈 빈에 따른 입자 크기에 무관한 값으로, 모든 사이즈빈에 대한 입자 수농도 추정 시에 공통으로 이용되는 파라미터이다.

그리고 파라미터셋 설정부(131)는 파라미터셋( $x^{(k)}$ )에 포함되는 파라미터(a, b, f,  $d_s$ ,  $\sigma_s$ ,  $T_d$ ,  $T_s$ ,  $T_o$ ,  $A_H$ )들 각각에 대해 초기값을 부여하여 초기 파라미터셋( $x^{(0)}$ )을 획득한다. 이때, 파라미터셋( $x^{(k)}$ )의 파라미터들에 대한 초기값은 확률적 균일 생산 방식(stochastic uniform production)으로 생성되어 할당될 수 있으며, 파라미터셋 설정부(131)는 입자 크기별 파라미터셋( $x^{(k)}$ ) 각각에 대해  $N_p$ 개의 초기값을 할당할 수 있다. 즉  $N_p$ 개의 초기 파

라미터셋( $x_m^{(0)}$ ,  $m = 1, \dots, N_p$ )을 획득할 수 있다. 여기서  $k$ 는 유전 알고리즘에 따른 파라미터셋( $x^{(k)}$ )의 세대 수(generation number)를 나타내고,  $m$ 은  $k$ 번째 세대에 생성되는 다수의 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ ) 각각을 구별하기 위한 식별자이다.

[0056] 입자 크기별 수농도 계산부(132)는 파라미터셋 설정부(131)에서 획득된 다수의 초기 파라미터셋( $x_m^{(0)}$ ) 또는 파라미터셋 업데이트부(135)에서 획득된 다수의 입자 크기별 업데이트 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )을 인가받고, 인가된 초기 파라미터셋( $x_m^{(0)}$ ) 또는 이후 업데이트되어 획득된 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )을 이용하여 수학적 식 1을 계산함으로써  $N$ 개의 사이즈빈 각각에 대한 시간에 따른 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n = n(v,t)$ )을 획득할 수 있다. 다만 수학적 식 1의 입자상 물질의 질량보존 모델은 시간( $t$ )에 따른 크기별 입자 수농도의 변화, 즉 시간( $t$ )에 대한 미분값을 나타내므로, 입자 크기별 수농도 계산부(132)는 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )을 이용하여 수학적 식 1을 계산함으로써 시간( $t$ )에 따른 크기별 입자 수농도의 변화가 획득되면, 이를 시간축에서 누적하여 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )을 계산할 수 있다.

[0057] 여기서 파라미터 최적화부(130)는 최적의 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )을 획득하기 위한 구성이므로, 입자 크기별 수농도 계산부(132)는  $N$ 개의 사이즈빈 모두에 대한 시간에 따른 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )을 획득하지 않아도 무방하다. 즉 입자 크기별 수농도 계산부(132)는  $N$ 개의 사이즈빈 중 입자 수농도 측정부(110)에서 측정된 시간에 따른 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )에 대응하는 사이즈빈에 대해서만 시간에 따른 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )을 획득하도록 구성될 수도 있다.

[0058] 적합도 계산부(133)는 입자 크기별 수농도 계산부(132)에서 다수개의 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )에 기반하여 획득된 시간에 따른 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )이 계산되면, 입자 수농도 측정부(110)에서 측정된 시간에 따른 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )와 각 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )을 적용하여 계산된 시간에 따른 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )사이의 차이의 평균값을 나타내는 적합도( $F(x_m^{(k)}; C_{exp,t})$ )를 수학적 식 11에 따라 계산한다.

## 수학적 식 11

$$F(x_m^{(k)}; C_{exp,t}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{\frac{1}{N - N_{exp,min} + 1} \sum_{n=N_{exp,min}}^N \{(C_{exp,t}^n - C_{est,t}^n(x_m^{(k)}))^2\}}$$

[0059]

[0060] 여기서  $T$ 는 타임 스텝 수를 나타내고,  $N_{exp,min}$ 은 입자 수농도 측정부(110)가 측정하는 최소 입자 크기에 대응하는 사이즈빈을 나타낸다.

[0061] 즉 수학적 식 11은 실제 측정된 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )와 추정된 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ ) 사이의 차이에 대한 평균 제곱근(root mean square: rms)의 타임 스텝( $t$ )에 따른 시간적 평균값을 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )에 대한 적합도( $F(x_m^{(k)}; C_{exp,t})$ )로 계산한다.

[0062] 그리고 적합도 계산부(133)는 각 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )을 기반으로 계산된 적합도( $F(x_m^{(k)}; C_{exp,t})$ )가 기지정된 기준 적합도 이하인지 판별하고, 기준 적합도 이하인 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )을 후보 파라미터셋으로 설정한다.

[0063] 수렴 판별부(134)는 설정된 후보 파라미터셋에 대한 적합도( $F(x_m^{(k)}; C_{exp,t})$ )가 기지정된 최소 진화 횟수( $k_s$ ) 동안 기지정된 수렴 오차( $\varepsilon_{tor}$ ) 이내로 수렴되는지 여부를 수학적 식 12에 따라 판별한다.



## 수학식 12

$$\frac{1}{k_s} \left| \min(F(x_m^{(k)}; C_{\text{exp},t})) - \min(F(x_m^{(k-k_s)}; C_{\text{exp},t})) \right| \rightarrow \epsilon_{\text{tor}}$$

$$\min_{k' \in [k-k_s]} (\min(F(x_m^{(k-k_s)}; C_{\text{exp},t})))$$

[0064]

[0065]

만일 적합도( $F(x_m^{(k)}; C_{\text{exp},t})$ )가 수렴되는 것으로 판별되면, 대응하는 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )을 최적 파라미터셋( $x_{\text{opt}}^{(k)}$ )으로 선택하여 최적 파라미터셋 획득부(136)로 전달한다.

[0066]

그러나 최소 진화 횟수( $k_s$ ) 동안 적합도( $F(x_m^{(k)}; C_{\text{exp},t})$ )가 수렴되지 않는 것으로 판별되면, 파라미터셋 업데이트부(135)가 설정된 후보 파라미터셋들을 기지정된 방식으로 업데이트하여 업데이트 파라미터셋( $x_m^{(k+1)}$ )을 획득한다. 이때 파라미터셋 업데이트부(135)는 유전 알고리즘에 따라 설정된 후보 파라미터셋을 선택하고, 선택된 후보 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )의 파라미터들을 재조합(recombine) 및 변이(mutation)시켜, 다음 세대의 업데이트 파라미터셋( $x_m^{(k+1)}$ )을 획득한다. 그리고 획득된 업데이트 파라미터셋( $x_m^{(k+1)}$ )을 입자 크기별 수농도 계산부(132)로 전달한다.

[0067]

미세입자 분포 계산부(140)는 파라미터 최적화부(130)가 최적 파라미터셋 획득부(136)에 획득한 최적 파라미터셋( $x_{\text{opt}}^{(k)}$ )을 인가받아, 최적 파라미터셋( $x_{\text{opt}}^{(k)}$ )의 파라미터들을 기반으로 수학식 1에 계산하여 시간에 따른 입자 크기별 수농도( $n(v,t)$ )를 계산한다. 이때 이미 측정으로 획득된 크기별 입자 수농도( $C_{\text{exp},t}^n$ )는 다시 계산할 필요가 없으므로, 미세입자 분포 계산부(140)는 입자 수농도 측정부(110)에서 측정되지 않는 사이즈빈에 해당하는 크기별 미세입자 수농도( $n(v,t) = C_{\text{est},t}^n$ )를 계산을 통해 획득한다.

[0068]

결과적으로 본 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 장치는 측정 가능한 수준에서 시간에 따른 크기별 입자 수농도( $C_{\text{exp},t}^n$ )를 획득하고, 획득된 시간에 따른 크기별 입자 수농도( $C_{\text{exp},t}^n$ )를 기반으로 추정되는 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{\text{est},t}^n$ )가 획득된 크기별 입자 수농도( $C_{\text{exp},t}^n$ )와 유사해지도록 하는 최적 파라미터셋( $x^{(k)}$ )을 도출한다. 최적 파라미터셋( $x^{(k)}$ )이 도출되면, 이를 기반으로 측정되지 않은 크기에 대한 시간에 따른 입자 크기별 수농도( $n(v,t) = C_{\text{est},t}^n$ )를 계산하여 획득할 수 있다.

[0069]

도 3은 입자 공급원에 따른 시간별 미세입자 총 수농도 변화를 나타내고, 도 4는 입자 공급원에 따라 공급된 크기별 입자의 수농도 분포를 나타내며, 도 5는 입자 공급원에 따라 추정되는 시간별 입자 크기별 수농도 변화를 나타낸다.

[0070]

도 3에서 (a) 및 (b)는 각각 촛불과 가스 스토브에서 미세입자가 발생되어 공급되는 경우에 시간에 따른 미세입자의 총 수농도 변화를 나타낸다. 도 3에서 ??는 측정된 총 수농도( $C_{\text{exp}}$ )를 나타내고, 실선은 본 실시예에 따라 추정된 총 수농도 추정값( $C_{\text{est}}(x_m^{(k)})$ )을 나타낸다. 또한 빨간색은 전체 입자의 총 수농도를 나타내고, 파란색은 측정 가능한 크기(여기서는 일 예로 10nm 이상)의 입자의 총 수농도를 나타낸다.

[0071]

도 3에 도시된 바와 같이, 본 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 장치는 측정 가능한 크기의 입자에 대해 측정 총 수농도가 추정 총 수농도와 유사하게 계산되도록 최적 파라미터셋( $x^{(k)}$ )이 획득되면, 측정할 수 없는 크기의 입자의 수농도를 추정하여 포함되는 경우의 총 수농도 또한 기존의 다른 기법에 비해 실제와 매우 유사하게 획득할 수 있음을 알 수 있다.

[0072]

그리고 도 4의 (a) 및 (b)에서도 도 3과 마찬가지로 촛불과 가스 스토브가 미세 입자 공급원인 경우로, 미세 입자 공급원에서 입자 방출이 종료된 직후의 크기별 입자의 수농도 분포를 나타낸다. 본 발명에서는 입자의 크기별 수농도 분포가 로그노멀 분포를 따르는 것으로 고려하였으며, 이는 도 4에 도시된 바와 같이, 실제 측정된 입자 크기별 수농도 분포와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 측정 가능한 범위에서 입자 크기별 수농도를



측정하여 로그노멀 분포에 대응하도록 파라미터셋( $x^{(k)}$ )을 획득하면 나머지 크기의 입자의 수농도는 로그노멀 분포를 따르도록 추정하여 획득할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

[0073] 도 5에서 (a)와 (b)는 각각 촛불이 미세 입자 공급원인 경우 측정 및 추정된 미세입자의 크기별 수농도 분포를 나타내고, (c)와 (d)는 각각 가스 스토브가 미세 입자 공급원인 경우 측정 및 추정된 미세입자의 크기별 수농도 분포를 나타낸다.

[0074] 도 5의 (a) 및 (c)를 (b) 및 (d)와 비교하면, 본 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 장치는 입자 크기별 수농도를 실제 측정되는 입자 크기별 수농도와 유사하게 추정할 수 있음을 확인할 수 있다.

[0075] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 방법을 나타낸다.

[0076] 도 1 및 도 2를 참조하여, 도 6의 본 실시예에 따른 미세입자 분포 추정 방법을 설명하면, 우선 측정 대상이 되는 현재 공간 상에서 측정 가능한 크기의 입자들에 대한 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )를 측정하여 획득한다(S10). 이때 크기별 입자 수농도는 기지정된 타임 스텝에 따라 반복 측정될 수 있다.

[0077] 그리고 측정할 수 없는 크기의 입자들에 대한 크기별 입자 수농도( $C_{est,t}^n$ )를 추정하기 위해 수학적 1과 같이 미리 지정된 입자상 물질의 질량보존 모델을 해석하기 위해 요구되는 파라미터(a, b, f,  $d_s$ ,  $\sigma_s$ ,  $T_d$ ,  $T_s$ ,  $T_o$ ,  $A_H$ )로 파라미터셋( $x^{(k)}$ )을 설정하고, 파라미터셋( $x^{(k)}$ )의 파라미터(a, b, f,  $d_s$ ,  $\sigma_s$ ,  $T_d$ ,  $T_s$ ,  $T_o$ ,  $A_H$ )를 초기화한다(S20). 이때 초기화되는 초기 파라미터셋( $x^{(0)}$ )은 서로 다른 값을 갖는 파라미터들로 다수개로 초기 파라미터셋( $x_m^{(0)}$ ,  $m = 1, \dots, N_p$ )으로 획득될 수 있다. 여기서 다수개의 초기 파라미터셋( $x_m^{(0)}$ )의 파라미터들의 값은 임의로 지정될 수 있다.

[0078] 그리고 다수개의 초기 파라미터셋( $x_m^{(0)}$ )을 각각 적용하여 수학적 1의 입자상 물질의 질량보존 모델을 해석함으로써, 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )을 계산한다(S30). 다만 다수개의 초기 파라미터셋( $x_m^{(0)}$ )의 값이 임의로 지정됨에 따라 계산된 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )에 대한 신뢰도는 매우 낮다. 이에 다수개의 초기 파라미터셋( $x_m^{(0)}$ ) 각각에 따른 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )이 계산되면, 계산된 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )과 대응하는 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ ) 사이의 차이의 누적 평균을 나타내는 적합도( $F(x_m^{(0)}); C_{exp,t}$ )를 수학적 11에 따라 계산한다(S40). 그리고 다수개의 초기 파라미터셋( $x_m^{(0)}$ ) 각각에 대해 계산된 적합도( $F(x_m^{(0)}); C_{exp,t}$ ) 중 기지정된 기준 적합도 이상인 적합도( $F(x_m^{(0)}); C_{exp,t}$ )를 나타내는 파라미터셋을 선별하여 후보 파라미터셋으로 설정한다(S40).

[0079] 이후 설정된 후보 파라미터셋의 적합도( $F(x_m^{(0)}); C_{exp}$ )가 기지정된 최소 진화 횟수( $k_s$ ) 동안 기지정된 수렴 오차( $\epsilon_{tor}$ ) 이내로 수렴되는지 수학적 12에 따라 판별한다(S60).

[0080] 만일 수렴되지 않는 것으로 판별되면, 후보 파라미터셋을 기지정된 방식으로 업데이트하여 새로운 업데이트 파라미터셋( $x_m^{(k+1)}$ )을 획득한다(S70). 이때 업데이트 파라미터셋( $x_m^{(k+1)}$ )은 유전 알고리즘에 따라 후보 파라미터셋을 선택하고, 선택된 후보 파라미터셋의 파라미터들을 재조합 및 변이시켜 획득될 수 있다. 그리고 획득된 업데이트 파라미터셋( $x_m^{(k+1)}$ )에 대한 총 수농도 추정값( $C_{est}$ )과 적합도( $F(x_m^{(k+1)}); C_{exp}$ )를 다시 계산하여(S30, S40), 적합도( $F(x_m^{(k+1)}); C_{exp}$ )가 기준 적합도 이내인 후보 파라미터셋을 선택하고 선택된 후보 파라미터셋에 대한 적합도가 수렴하는지 다시 판별한다(S50, S60).

[0081] 한편 수렴되는 것으로 판별되면, 대응하는 파라미터셋( $x_m^{(k)}$ )을 최적 파라미터셋( $x_{opt}^{(k)}$ )으로 선택하여 수학적 1의 입자상 물질의 질량보존 모델을 기반으로 각 입자 크기별 수농도( $n(v,t)$ )를 계산한다(S90). 특히 크기별 입자 수농도 측정 단계(S10)에서 측정할 수 없는 미세 입자들에 대한 입자 크기별 수농도( $n(v,t)$ )를 계산하여 획득한

다. 여기서 계산된 입자 크기별 수농도( $n(v,t)$ )는 측정된 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )와 이에 대응하여 추정된 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ ) 사이의 오차가 적합도에 부합하고 수렴하도록 검증된 최적 파라미터셋( $x_{opt}^{(k)}$ )을 기반으로 추정된 입자 크기별 수농도 추정값( $C_{est,t}^n$ )이므로, 신뢰할 수 있는 입자 크기별 수농도( $n(v,t)$ ) 값으로 볼 수 있다. 따라서 측정 가능한 범위에서는 측정된 크기별 입자 수농도( $C_{exp,t}^n$ )를 이용하고, 측정이 불가능한 범위에서는 계산된 입자 크기별 수농도( $n(v,t)$ )를 이용하여 요구되는 전체 입자 크기 범위에서의 시간에 따른 크기별 입자 분포를 획득할 수 있다.

[0082] 본 발명에 따른 방법은 컴퓨터에서 실행시키기 위한 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램으로 구현될 수 있다. 여기서 컴퓨터 판독가능 매체는 컴퓨터에 의해 액세스 될 수 있는 임의의 가용 매체일 수 있고, 또한 컴퓨터 저장 매체를 모두 포함할 수 있다. 컴퓨터 저장 매체는 컴퓨터 판독가능 명령어, 데이터 구조, 프로그램 모듈 또는 기타 데이터와 같은 정보의 저장을 위한 임의의 방법 또는 기술로 구현된 휘발성 및 비휘발성, 분리형 및 비분리형 매체를 모두 포함하며, ROM(판독 전용 메모리), RAM(랜덤 액세스 메모리), CD(컴팩트 디스크)-ROM, DVD(디지털 비디오 디스크)-ROM, 자기 테이프, 플로피 디스크, 광데이터 저장장치 등을 포함할 수 있다.

[0083] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다.

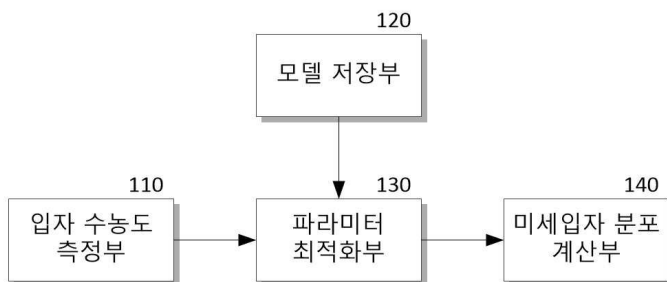
[0084] 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 청구범위의 기술적 사상에 의해 정해져야 할 것이다.

## 부호의 설명

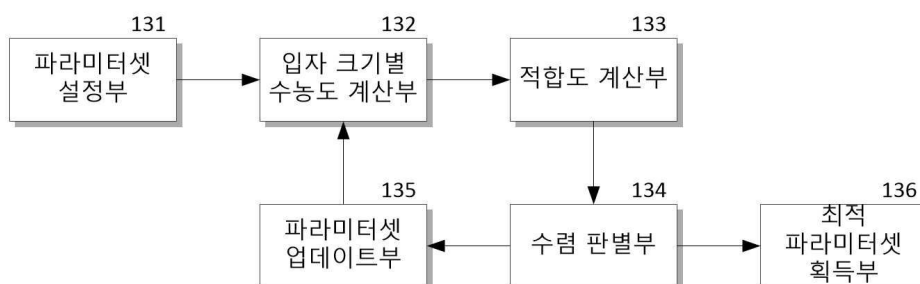
- [0085]
- |                     |                  |
|---------------------|------------------|
| 110: 입자 수농도 측정부     | 120: 모델 저장부      |
| 130: 파라미터 최적화부      | 131: 파라미터셋 설정부   |
| 132: 입자 크기별 수농도 계산부 | 133: 적합도 계산부     |
| 134: 수렴 판별부         | 135: 파라미터셋 업데이트부 |
| 136: 최적 파라미터셋 획득부   | 140: 미세입자 분포 계산부 |

## 도면

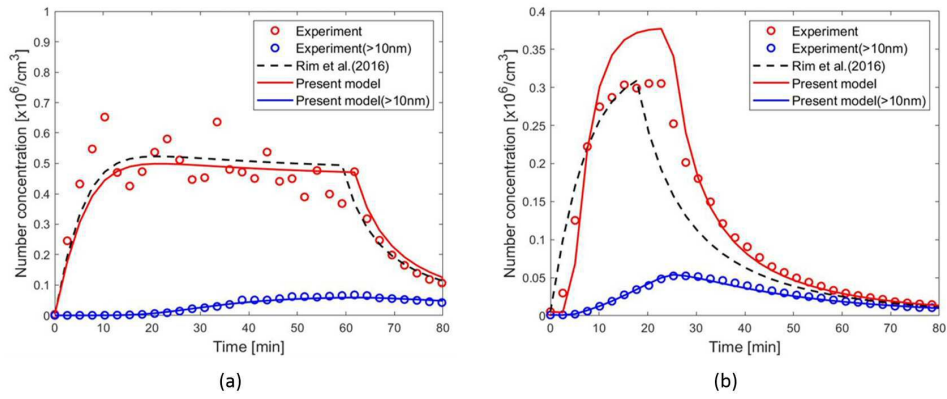
### 도면1



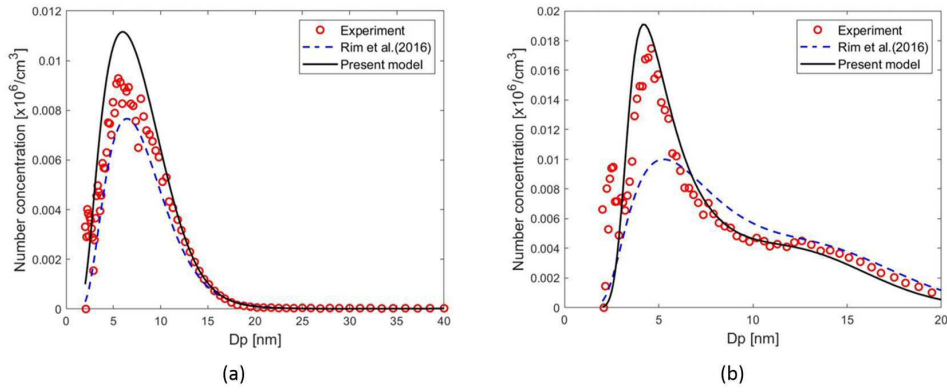
### 도면2



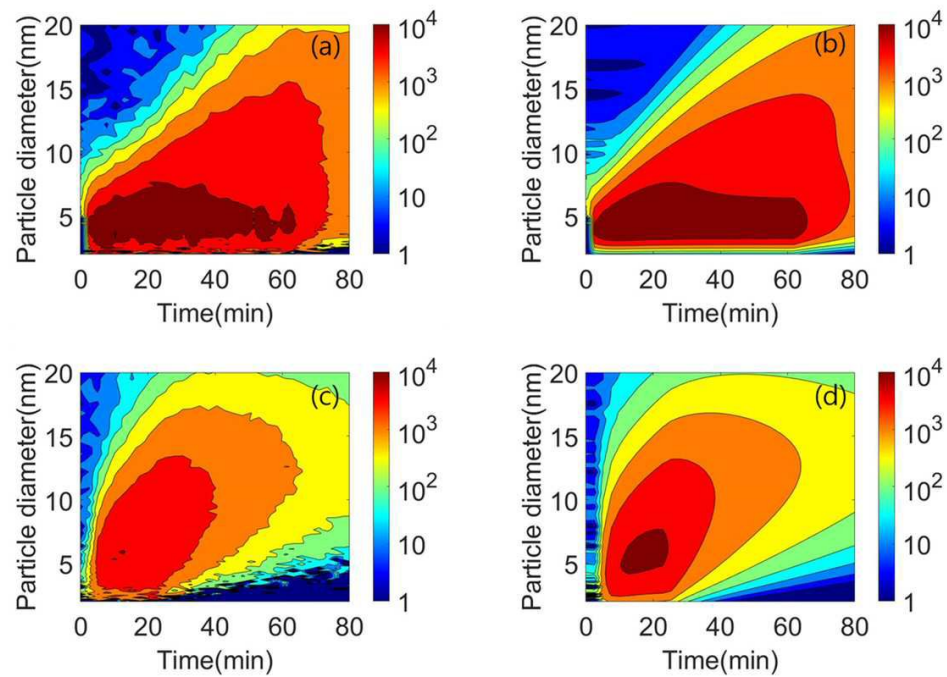
도면3



도면4



도면5



도면6

