



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0039199
(43) 공개일자 2025년03월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 15/02 (2024.01) G01N 15/00 (2025.01)
G01N 15/10 (2024.01)
(52) CPC특허분류
G01N 15/0266 (2013.01)
G01N 15/0255 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0122029
(22) 출원일자 2023년09월13일
심사청구일자 2023년09월13일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
장재성
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
넌 딘 응오
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(74) 대리인
특허법인 무한

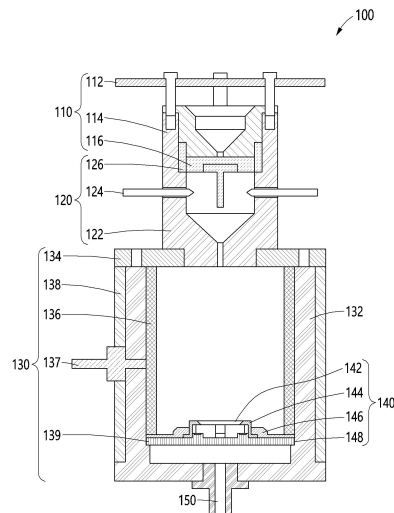
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 공기중 입자 농도 측정 센서

(57) 요약

본 발명은, 공기중 입자 농도 측정 센서에 관한 것으로, 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서는, 공기 역학적 입경 $2.5 \mu\text{m}$ 초과와 공기중 입자는 걸러주면서 입경 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 공기중 입자를 유입하는 관성 임팩터 모듈(inertial impactor module); 상기 관성 임팩터 모듈로부터 유입된 입경 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 공기중 입자를 전기적으로 하전시키는 코로나 방전 모듈(corona charging module); 및 상기 하전된 입자를 포집하고 동시에 입자의 농도를 측정하는 감지 모듈(sensing module);을 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G01N 15/1031 (2024.01)
G01N 2015/0096 (2013.01)
G01N 2015/1021 (2024.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345366496
과제번호	2020R1A6A1A03040570
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공학학술연구기반구축
연구과제명	환경감시 자율무인시스템 연구센터
기 여 율	1/2
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711189774
과제번호	2020R1A2C1011583
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	대용량 바이러스 에어로졸의 실시간 정량화를 위한 미세 액막 기반의 면역 센서 시
시스템에 관한 연구	
기 여 율	1/2
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

공기 역학적 입경 $2.5\ \mu\text{m}$ 초과와 공기중 입자는 걸러주면서 입경 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 공기중 입자를 유입하는 관성 임팩터 모듈(inertial impactor module);

상기 관성 임팩터 모듈로부터 유입된 입경 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 공기중 입자를 전기적으로 하전시키는 코로나 방전 모듈(corona charging module); 및

상기 하전된 입자를 포집하고 동시에 입자의 농도를 측정하는 감지 모듈(sensing module);

을 포함하는,

공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 공기중 입자 농도 측정 센서는,

내부를 관통하는 캐비티를 가지는 원통형 몸체를 가지는 것인,

공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 관성 임팩터 모듈은,

중력에 의해 떨어지는 공기 중 입자를 걸러주는 돔;

공기 중 입자가 유입되고 가속되는 노즐부; 및

상기 입경 $2.5\ \mu\text{m}$ 를 초과하는 공기 중 입자만을 걸러주는 수집부;

를 포함하는 것인,

공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 돔, 노즐부 및 수집부는 각각, 알루미늄으로 이루어진 것인,

공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 코로나 방전 모듈은,

서로 이격되어 상호 마주하는 니들(needle) 형상의 한 쌍의 제1 전극; 및
원통 형상의 제2 전극;
을 포함하는 것인,
공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 6

제5항에 있어서,
상기 한 쌍의 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에 코로나 방전을 형성시켜 상기 공기 중 입자를 하전시키는
것인,
공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 7

제6항에 있어서,
상기 공기 중 입자는,
양(positive) 전하로 하전되는 것인,
공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 8

제5항에 있어서,
상기 제1 전극은 SUS(Steel Use Stainless), 금(Au), 백금(Pt), 니켈(Ni), 알루미늄(Al), 몰리브덴(Mo), 탄소
(C), 은(Ag), 인듐(In) 및 주석(Sn)으로 이루어진 군으로부터 선택되는 적어도 어느 하나를 포함하는 것이고,
상기 제2 전극은 알루미늄인 것인,
공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 9

제1항에 있어서,
상기 감지 모듈은,
내부 벽면을 둘러싸는 집진 전극;
상기 집진 전극 외부로 전계를 차폐하는 쉴드; 및
하단에 장착되며, 하전된 입자를 포집하고 동시에 포집된 입자를 측정할 수 있는 석영 결정 미세저울(Quartz
Crystal Microbalance; QCM);
을 포함하는 것인,
공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 10

제9항에 있어서,
 상기 석영 결정 미세저울은,
 QCM 크리스탈;
 상기 QCM 크리스탈을 고정하는 QCM 홀더; 및
 상기 QCM 홀더가 상기 감지 모듈 중앙에 있도록 고정하는 QCM 지지체;
 를 포함하는,
 공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 11

제10항에 있어서,
 상기 코로나 방전 모듈로부터 유입된 하전된 입자는,
 상기 집진 전극에 고전압을 인가하고, 상기 QCM 크리스탈의 윗면을 접지함으로써,
 전기장에 의해 상기 QCM 크리스탈에 수집되고, 수집된 입자의 양을 실시간으로 측정하는 것인,
 공기중 입자 농도 측정 센서.

청구항 12

제11항에 있어서,
 상기 하전된 입자는 하기 수학적 식 1로 표시되는 힘에 의해 상기 QCM 크리스탈에 수집되는 것인,
 [수학적 식 1]

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_{Drag} + F_{Gravity} + F_{Brownian} + F_{Electrical}$$

(여기서, $F_{Brownian}$ 는 브라운력(Brownian force), $F_{Electrical}$ 는 전기력(electrical force), $F_{Gravity}$ 는 중력(gravitational force), F_{Drag} 는 항력(drag force)임)

공기중 입자 농도 측정 센서.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 공기중 입자 농도 측정 센서에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 최근 미세먼지/초미세먼지와 각종 유해물질들이 만연하여 호흡기질환 등을 유발하는 문제점이 있었다.

[0004] 미세먼지는 겨울부터 봄 사이에 특히 심하다. 급속히 산업화되고 있는 중국 지역의 황사 속에 포함된 규소, 납, 카드뮴, 니켈, 크롬 등의 중금속 농도가 갈수록 증가하고 이 같은 물질이 편서풍을 타고 국내로 유입되면서 피해와 고통을 호소하는 사례도 늘어난다.

[0005] 폐와 기도에 달라붙어 건강에 영향을 주는 미세먼지는 입자 지름이 $10 \mu m$ 보다 작아 PM_{10} 이라고 부른다. 초미세먼지($PM_{2.5}$)는 공기 역학적 직경이 $2.5 \mu m$ 보다 작은 데다 대기 중에 머무르는 시간이 길어 우리 몸에 더 많은

해를 끼친다.

- [0006] 미세먼지가 건강에 주는 영향을 살펴보면, 호흡기 질환 사망률, 호흡기 질환 이환율, 폐암, 폐렴, 만성 폐쇄성 폐질환, 천식, 제1형 당뇨병, 제2형 당뇨병, 고혈압, 심부정맥혈전증, 뇌졸중, 신경퇴행성질환, 심혈관 질환 사망률, 심혈관 질환, 이환율, 심근경색증, 부정맥, 심부전, 조산, 저체중, 피부 노화에 영향을 준다.
- [0007] 따라서, 위와 같은 미세먼지, 초미세먼지의 농도를 모니터링하는 것은 매우 중요하다. 지면 측정 (지상에서 1~3 m) 외에도 다양한 고도 측정을 통해 대기 질 평가에 대한 보다 포괄적인 정보가 필요하다. 이 중에서 무인 항공기(unmanned aerial vehicles; UAV) 기반 측정은 특히 사람이 접근할 수 없는 위험 지역에서 더욱 효과적이고 실용적이다.
- [0008] 그러나, UAV에 장착된 PM_{2.5} 센서는 주로 광산란 방식에 의존한다. 저렴한 비용, 휴대성 및 사용 용이성으로 인해 종종 선호된다. 하지만, 광산란 기반 센서는 원리적으로 입자의 질량을 측정하는 것이 아니기 때문에, 수농도에서 질량농도로 전환시 심각한 오류가 발생하는 경향이 있다.
- [0009] 따라서, 현재 드론 탑재형 PM_{2.5} 센서의 한계를 극복할 수 있는 새로운 형태의 센서 개발이 필요하다.
- [0010] 전술한 배경기술은 발명자가 본 발명의 개시 내용을 도출하는 과정에서 보유하거나 습득한 것으로서, 반드시 본 출원 전에 일반 공중에 공개된 공지기술이라고 할 수는 없다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0012] 본 발명은 상술한 문제점을 해결하기 위한 것으로, 본 발명의 목적은, 소형화 및 저가화가 가능하고, 실시간 현장 미세먼지/초미세먼지의 질량 농도 모니터링이 가능한 공기중 입자 농도 측정 센서를 제공하는 것이다.
- [0013] 그러나, 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 이상에서 언급한 것들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제들은 아래의 기재로부터 해당 분야 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0015] 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서는, 공기 역학적 입경 2.5 μm 초과와 공기중 입자는 걸러지면서 입경 2.5 μm 이하의 공기중 입자를 유입하는 관성 임팩터 모듈(inertial impactor module); 상기 관성 임팩터 모듈로부터 유입된 입경 2.5 μm 이하의 공기중 입자를 전기적으로 하전시키는 코로나 방전 모듈(corona charging module); 및 상기 하전된 입자를 포집하고, 동시에 질량 농도를 측정하는 감지 모듈(sensing module);을 포함한다.
- [0016] 일 실시형태에 있어서, 상기 공기중 입자 농도 측정 센서는, 내부를 관통하는 캐비티를 가지는 원통형 몸체를 가지는 것일 수 있다.
- [0017] 일 실시형태에 있어서, 상기 관성 임팩터 모듈은, 중력에 의해 떨어지는 공기 중 입자를 걸러주는 돔; 공기 중 입자가 유입되고 가속되는 노즐부; 및 상기 입경 2.5 μm 를 초과하는 공기 중 입자만을 걸러주는 수집부;를 포함하는 것일 수 있다.
- [0018] 일 실시형태에 있어서, 상기 돔, 노즐부 및 수집부는 각각, 알루미늄으로 이루어진 것일 수 있다.
- [0019] 일 실시형태에 있어서, 상기 코로나 방전 모듈은, 서로 이격되어 상호 마주하는 니들(needle) 형상의 한 쌍의 제1 전극; 및 원통 형상의 제2 전극;을 포함하는 것일 수 있다.
- [0020] 일 실시형태에 있어서, 상기 한 쌍의 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에 코로나 방전을 형성시켜 상기 공기 중 입자를 하전시키는 것일 수 있다.
- [0021] 일 실시형태에 있어서, 상기 공기 중 입자는, 양(positive) 전하로 하전되는 것일 수 있다.
- [0022] 일 실시형태에 있어서, 상기 제1 전극은 SUS(Steel Use Stainless), 금(Au), 백금(Pt), 니켈(Ni), 알루미늄(Al), 몰리브덴(Mo), 탄소(C), 은(Ag), 인듐(In) 및 주석(Sn)으로 이루어진 군으로부터 선택되는 적어도 어느

하나를 포함하는 것일 수 있다.

[0023] 일 실시형태에 있어서, 상기 제2 전극은 알루미늄인 것일 수 있다.

[0024] 일 실시형태에 있어서, 상기 감지 모듈은, 내부 벽면을 둘러싸는 집진 전극; 상기 집진 전극 외부로 전계를 차폐하는 쉴드; 및 하단에 장착되며, 하전된 입자를 포집하고 동시에 포집된 입자를 측정할 수 있는 석영 결정 미세저울(Quartz Crystal Microbalance; QCM);을 포함하는 것일 수 있다.

[0025] 일 실시형태에 있어서, 상기 석영 결정 미세저울은, QCM 크리스탈; 상기 QCM 크리스탈을 고정하는 QCM 홀더; 및 상기 QCM 홀더가 상기 감지 모듈 중앙에 있도록 고정하는 QCM 지지체;를 포함하는 것일 수 있다.

[0026] 일 실시형태에 있어서, 상기 코로나 방전 모듈로부터 유입된 하전된 입자는, 상기 집진 전극에 고전압을 인가하고, 상기 QCM 크리스탈의 윗면을 접지함으로써, 전기장에 의해 상기 QCM 크리스탈에 수집되고, 수집된 입자의 양을 실시간으로 측정하는 것일 수 있다.

[0027] 일 실시형태에 있어서, 상기 하전된 입자는 하기 수학적 식 1로 표시되는 힘에 의해 상기 QCM 크리스탈에 수집되는 것일 수 있다:

[0028] [수학적 식 1]

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_{Drag} + F_{Gravity} + F_{Brownian} + F_{Electrical}$$

[0029]

[0030] (여기서, $F_{Brownian}$ 는 브라운력(Brownian force), $F_{Electrical}$ 는 전기력(electrical force), $F_{Gravity}$ 는 중력(gravitational force), F_{Drag} 는 항력(drag force)임).

발명의 효과

[0032] 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서는, 공기중 미세한 입자, 특히, $PM_{2.5}$ 초미세먼지의 질량 농도를 실시간으로 정확하게 측정할 수 있다. 또한, 소형으로 제조할 수 있어 휴대성이 향상되고, 무인 항공기(unmanned aerial vehicles; UAV) 기반 측정이 가능하여 사람이 접근할 수 없는 위험 지역에서 효과적이고 실용적으로 미세먼지의 질량 농도를 측정할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0034] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 단면도를 나타낸다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서 내의 전기장 인가 영역을 나타낸 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서 내의 공기의 유동 방향을 나타낸 도면이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 작동을 설명하기 위한 개략적인 도면이다.

도 5는 도 4의 제어 모듈(II)의 세부 다이어그램을 나타낸 도면이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 이미지이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 입자 수집 및 입자 손실 특성을 평가하기 위한 실험 셋업을 나타낸 도면이다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 관성 임팩터 모듈의 포집 효율을 나타낸 그래프이다.

도 9는 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서 전체의 포집 효율과 입자 손실을 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0035] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 실시예들을 상세하게 설명한다. 그러나, 실시예들에는 다양한 변경이 가해질 수 있어서 특허출원의 권리 범위가 이러한 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 실시예들에 대한 모든 변경, 균등물 내지 대체물이 권리 범위에 포함되는 것으로 이해되어야 한다.
- [0036] 실시예에서 사용한 용어는 단지 설명을 목적으로 사용된 것으로, 한정하려는 의도로 해석되어서는 안된다. 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 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0037] 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.
- [0039] 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.
- [0040] 또한, 실시 예의 구성 요소를 설명하는 데 있어서, 제 1, 제 2, A, B, (a), (b) 등의 용어를 사용할 수 있다. 이러한 용어는 그 구성 요소를 다른 구성 요소와 구별하기 위한 것일 뿐, 그 용어에 의해 해당 구성 요소의 본질이나 차례 또는 순서 등이 한정되지 않는다.
- [0041] 어느 하나의 실시 예에 포함된 구성요소와, 공통적인 기능을 포함하는 구성요소는, 다른 실시 예에서 동일한 명칭을 사용하여 설명하기로 한다. 반대되는 기재가 없는 이상, 어느 하나의 실시 예에 기재한 설명은 다른 실시 예에도 적용될 수 있으며, 중복되는 범위에서 구체적인 설명은 생략하기로 한다.
- [0043] 이하, 본 발명의 공기중 입자 농도 측정 센서에 대하여 실시예 및 도면을 참조하여 구체적으로 설명하도록 한다. 그러나, 본 발명이 이러한 실시예 및 도면에 제한되는 것은 아니다.
- [0045] 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서는, 공기 역학적 입경 2.5 μm 초과인 공기중 입자는 걸러주면서 입경 2.5 μm 이하의 공기중 입자를 유입하는 관성 임팩터 모듈(inertial impactor module); 상기 관성 임팩터 모듈로부터 유입된 입경 2.5 μm 이하의 공기중 입자를 전기적으로 하전시키는 코로나 방전 모듈(corona charging module); 및 상기 하전된 입자를 포집하고, 동시에 질량 농도를 측정하는 감지 모듈(sensing module);을 포함한다.
- [0046] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 단면도를 나타낸다.
- [0047] 도 1을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서(100)는, 관성 임팩터 모듈(110), 코로나 방전 모듈(120) 및 감지 모듈(130)을 포함한다.
- [0048] 일 실시형태에 있어서, 상기 공기중 입자 농도 측정 센서(100)는, 내부를 관통하는 캐비티를 가지는 원통형 몸체를 가지는 것일 수 있다.
- [0049] 예를 들어, 상기 공기중 입자 농도 측정 센서(100)는, 관성 임팩터 모듈(110), 코로나 방전 모듈(120) 및 감지 모듈(130) 전체 몸체가 일체형으로 형성된 상면과, 측면으로 구성된 원통형 몸체를 가지는 것일 수 있다. 특히, 관성 임팩터 모듈(110) 및 코로나 방전 모듈(120)은 동일한 원통형 몸체를 가지고, 감지 모듈(130)은 관성 임팩터 모듈(110) 및 코로나 방전 모듈(120)보다 더 큰 원통형 몸체를 가지며, 내부 캐비티도 더 큰 공간을 가지는 것일 수 있다.
- [0050] 상기 관성 임팩터 모듈(110)은, 공기 역학적 직경 (관성)에 따라 공기 중 입자를 관성적으로 분리하는데 사용되는 것으로서, 공기 역학적 입경 2.5 μm 초과인 공기중 입자는 걸러주면서 입경 2.5 μm 이하의 공기중 입자를 유

입한다.

- [0051] 상기 공기 중 입자는, 미세먼지, 초미세먼지, 바이러스, 박테리아, 진균, 포자 및 기타 유래의 병원균으로 이루어진 군으로부터 선택되는 적어도 어느 하나를 포함하는 것일 수 있다.
- [0052] 바람직하게는, 상기 공기 중 입자는 미세먼지, 초미세먼지인 것일 수 있다.
- [0053] 일 실시형태에 있어서, 상기 관성 임팩터 모듈(110)은, 돔(112), 노즐부(114) 및 수집부(116)를 포함한다.
- [0054] 상기 돔(112)은, 중력에 의해 떨어져 임팩터 작동을 방해할 수 있는 임팩터 내부의 거시적인 입자나 물방울의 도착을 방지하기 위한 것이다.
- [0055] 상기 노즐부(114)는, 유입된 공기 중 입자가 가속되는 곳이다.
- [0056] 상기 수집부(116)는, 가속된 입자 중, 임팩터의 컷-오프 크기인 $2.5\ \mu\text{m}$ 보다 큰 공기 역학적 직경 (또는 관성)을 가진 입자는 유선(streamlines)에서 분리되어 수집부의 충돌판(impaction plate)에 충돌하여 걸러지는 반면, 공기 역학적 직경이 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하인 입자는 충돌하지 않고 유선에 남아 코로나 방전 모듈(120)로 유입된다.
- [0057] 일 실시형태에 있어서, 상기 돔(112), 노즐부(114) 및 수집부(116)는 각각, 알루미늄으로 이루어진 것일 수 있다.
- [0058] 상기 코로나 방전 모듈(120)은, 상기 관성 임팩터 모듈로부터 유입된 입경 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 공기중 입자의 입자를 전기적으로 하전시킨다.
- [0059] 일 실시형태에 있어서, 상기 코로나 방전 모듈은(120), 제1 전극(124) 및 제2 전극(122)을 포함한다.
- [0060] 상기 코로나 방전 모듈 몸체(122)는, 관성 임팩터 모듈(110)의 몸체 (114)의 연장선에 있는 것으로 알루미늄으로 이루어진 것일 수 있다.
- [0061] 상기 제1 전극(124)은, 원통형 몸체에서 서로 이격되어 상호 마주하는 니들(needle) 형상의 한 쌍의 전극이다.
- [0062] 상기 제2 전극(122)은, 원통 형상의 전극이다.
- [0063] 일 실시형태에 있어서, 상기 한 쌍의 제1 전극(124) 및 상기 제2 전극(122) 사이에 코로나 방전(corona discharge)을 형성시켜 상기 공기 중 입자를 하전시키는 것일 수 있다. 즉, 한 쌍의 제1 전극(124) 및 제2 전극(122)을 활용하여 입자를 하전시키기 위한 "점-평면" 구성을 생성한다.
- [0064] 코로나 방전은 에어로졸 방전에 유용한 고농도의 단극 이온을 생성할 수 있는 방전 방법 중 하나이다. 코로나 방전을 생성하려면 불균일한 정전기장(electrostatic field)을 설정해야 한다. 공기는 일반적으로 우수한 절연체이지만 정전기장의 강도가 충분히 높은 영역에서는 공기가 전기적 파괴를 겪고 코로나 방전 영역을 형성한다.
- [0065] 일 실시형태에 있어서, 상기 공기 중 입자는, 양(positive) 전하로 하전되는 것일 수 있다. 공기 중 입자는 음(negative)의 성질을 띌 수 있는데, 상기 한 쌍의 제1 전극(124)에 양의 고전압의 직류(DC) 전압이 인가될 경우 코로나 방전에 의해 유입된 공기 중 입자를 양으로 하전시킨다.
- [0066] 일 실시형태에 있어서, 상기 제1 전극(124)은 SUS(Steel Use Stainless), 금(Au), 백금(Pt), 니켈(Ni), 알루미늄(Al), 몰리브덴(Mo), 탄소(C), 은(Ag), 인듐(In) 및 주석(Sn)으로 이루어진 군으로부터 선택되는 적어도 어느 하나를 포함하는 것일 수 있다.
- [0067] 상기 탄소(C)는, 카본블랙(carbon black), 탄소나노튜브, 탄소나노섬유, 탄소나노로드 및 그래핀으로 이루어진 군으로부터 선택되는 적어도 어느 하나를 포함하는 것일 수 있다.
- [0068] 일 실시형태에 있어서, 상기 제2 전극(122)은 알루미늄 및 금속성 물질로 이루어진 군으로부터 선택되는 적어도 어느 하나를 포함하는 것일 수 있다.
- [0069] 상기 감지 모듈(130)은 하전된 입자를 포집하고 동시에 입자의 농도를 측정한다.
- [0070] 상기 감지 모듈(130)은, 감지 모듈 몸체(132), 감지 모듈 캡(134), 집진 전극(136), 전기적 커넥터(137), 셸드(138), 감지 모듈 지지체(139), 석영 결정 미세저울(Quartz Crystal Microbalance; QCM, 140) 및 출구(150)를 포함한다.
- [0071] 상기 감지 모듈 몸체(132)는, 원통형 형상인 것일 수 있다.
- [0072] 상기 감지 모듈 캡(134)은, 상기 코로나 방전 모듈(120)과 감지 모듈(130)의 몸체 차이가 나기 때문에 공기 중

입자가 빠져나가지 않도록 형성된 것일 수 있다.

[0073] 상기 감지 모듈 몸체(132) 및 감지 모듈 캡(134)은, 아크릴로니트릴-부타디엔-스타이렌(acrylonitrile-butadiene-styrene; ABS) 또는 전기적 절연 소재로 이루어진 것일 수 있다.

[0074] 상기 집진 전극(136)은, 감지 모듈(130) 내부 벽면을 둘러싸는 전극인 것일 수 있다.

[0075] 상기 전기적 커넥터(137)는, 상기 집진 전극(136)으로 고전압을 공급하도록 설치된 것일 수 있다.

[0076] 상기 셸드(138)는, 상기 집진 전극(136) 외부로 전계를 차폐하는 것일 수 있다.

[0077] 상기 감지 모듈 지지체(139)는, 상기 감지 모듈 하부에 형성되어 석영 결정 미세저울(QCM, 140)을 잘 고정해주는 것일 수 있다.

[0078] 상기 석영 결정 미세저울(QCM, 140)은, 상기 감지 모듈(130) 하단에 장착된 것일 수 있다.

[0079] 일 실시형태에 있어서, 상기 석영 결정 미세저울(140)은, QCM 크리스탈(142), QCM 홀더(144) 및 QCM 지지체(146)를 포함하는 것일 수 있다.

[0080] 상기 QCM 크리스탈(142)은, 각 면에 금 전극이 증착된 얇은 석영 크리스탈 플레이트로 구성되는 것일 수 있다.

[0081] 상기 QCM 홀더(144)는 상기 QCM 크리스탈을 고정하는 것으로서 아크릴로니트릴-부타디엔-스타이렌(acrylonitrile-butadiene-styrene; ABS) 또는 전기적 절연 소재로 이루어진 것일 수 있다.

[0082] 상기 QCM 지지체(146)는, 상기 QCM 홀더가 상기 감지 모듈 중앙에 있도록 고정하는 것으로서, 알루미늄(Al), 금(Au), 백금(Pt), 니켈(Ni), 알루미늄(Al), 몰리브덴(Mo), 은(Ag), 인듐(In) 및 주석(Sn)으로 이루어진 군으로부터 선택되는 적어도 어느 하나로 이루어진 것일 수 있다.

[0083] 일 실시형태에 있어서, 상기 코로나 방전 모듈로부터 유입된 하전된 입자는, 상기 집진 전극에 고전압을 인가하고, 상기 QCM 크리스탈을 접지함으로써 형성된 전기장에 의해 상기 QCM 크리스탈에 수집되고, 수집된 입자의 양을 실시간으로 측정하는 것일 수 있다.

[0084] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서 내의 전기장 인가 영역을 나타낸 도면이다.

[0085] 도 2를 참조하면, 상기 전기적 커넥터(137)의 고전압 인가 및 QCM 크리스탈의 접지에 의해, 상기 감지 모듈(130) 내에서 감지 모듈 캡(134)을 제외하고, 벽면을 둘러싼 집진 전극(136) 전체와 석영 결정 미세저울(QCM, 140) 부분을 제외한 바닥 부분(146)이 고전압에 의한 전기장이 형성되는 것일 수 있다.

[0086] 일 실시형태에 있어서, 상기 하전된 입자는 하기 수학식 1로 표시되는 힘에 의해 공기 흐름과 정전기장에 의해 지배되는 힘에 의해 상기 QCM 크리스탈에 수집되는 것일 수 있다:

[0087] [수학식 1]

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_{Drag} + F_{Gravity} + F_{Brownian} + F_{Electrical}$$

[0088]

[0089] (여기서, $F_{Brownian}$ 는 브라운력(Brownian force), $F_{Electrical}$ 는 전기력(electrical force), $F_{Gravity}$ 는 중력(gravitational force), F_{Drag} 는 항력(drag force)임).

[0090] 브라운력은 대체로 입자 크기가 작을때 중요하다. 전기력은 전하 수준과 전기장의 강도에 따라 비례하며 항력은 입자 크기와 공기 흐름 속도의 영향을 받는다. 공기중 입자 농도 측정 센서 내부의 다른 힘보다 전기력만 지배적이어야 한다. 따라서 공기중 입자 농도 측정 센서는 정전기력에 의해 하전 입자를 QCM 크리스탈 전극에 수집할 수 있다.

[0091] QCM 결정의 질량 측정 원리는 하기 수학식 2로 표시되는 Sauerbrey 방정식에 의존한다. 간단히 말해서, 방정식은 QCM의 공진 주파수 이동과 전극 표면에 증착된 질량 사이의 선형 응답을 제공한다.

[0092] [수학식 2]

$$\Delta f = -C_m \cdot \Delta m$$

[0093]

- [0094] 여기서 Δf 와 Δm 은 각각 기본 주파수 이동과 질량 변화이다. C_m 는 질량에 민감한 상수이다.
- [0095] 이러한 기능의 조합으로 공기 중 입자, 특히, $PM_{2.5}$ 초미세먼지의 질량 농도를 측정할 수 있다. 샘플링 및 측정 과정에서 정전기력을 활용하면 포집 효율이 향상될 뿐만 아니라 전극 표면에서 입자가 공기 중으로 튀는 것을 방지할 수 있다. 공기중 입자 농도 측정 센서 내부에 대칭적으로 분포된 전기장은 QCM 크리스탈에 전하된 입자를 포집할 수 있다. 또한, 본 발명의 공기중 입자 농도 측정 센서는 포집 및 측정 프로세스가 동시에 발생할 수 있다.
- [0096] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서 내의 공기의 유동 방향을 나타낸 도면이다.
- [0097] 도 3을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서 내에서 공기 중 입자는 돔을 통과하고, $PM_{2.5}$ 입자만이 코로나 방전 모듈에서 양전하로 하전되어 석영 결정 미세저울(QCM, 140)에서 포집되고 동시에 입자의 질량 농도를 측정되고, 출구(150)를 통해 빨아들인 공기가 배출되는 것을 알 수 있다.
- [0098] 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서는, 공기중 미세한 입자, 특히, $PM_{2.5}$ 초미세먼지의 질량 농도를 실시간으로 정확하게 측정할 수 있다. 또한, 소형으로 제조할 수 있어 휴대성이 향상되고, 무인 항공기(unmanned aerial vehicles; UAV) 기반 측정이 가능하여 사람이 접근할 수 없는 위험 지역에서 효과적이고 실용적으로 미세먼지의 질량 농도를 측정할 수 있다.
- [0100] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 작동을 설명하기 위한 개략적인 도면이다.
- [0101] 도 4를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 작동은, 모니터 모듈(I), 제어 모듈(II) 및 샘플링 및 감지 모듈(III)을 포함하여 이루어진다.
- [0102] 모니터 모듈(I)은 개인용 노트북 등으로 지상국에 설치되고, 제어 모듈(II)과 샘플링 및 감지 모듈(III)은 드론 등 이동국에 설치되는 것일 수 있다. 특히, 모니터 모듈(I)은 처음에 고전압(H.V) 값을 시작하고 제어하기 위한 명령 (1)을 제어 모듈(II)로 보낼 수 있다. 그런 다음, 제어 모듈(II)은 에어로졸 입자를 하전하고 이를 QCM 크리스탈에 수집하기 위해 샘플링 및 감지 모듈(III)에 해당 고전압(H.V) 값을 결정하고 공급하는 것일 수 있다 (2). 다음으로, 샘플링 및 감지 모듈(III)은 추가 신호 처리를 위해 측정된 주파수 신호를 제어 모듈(II)로 반환하는 것일 수 있다 (3). 마지막으로, 모니터 모듈(I)은 제어 모듈(II)로부터 주파수 신호 및 고전압(H.V) 값 (예: 코로나 전압, 샘플링 전압)과 같은 매개변수에 대해 (4)를 획득하고 측정된 주파수 신호를 $PM_{2.5}$ 질량 농도 신호로 변환시킬 수 있다.
- [0104] 도 5는 도 4의 제어 모듈(II)의 세부 다이어그램을 나타낸 도면이다.
- [0105] 도 5를 참조하면, PCB-1부터 PCB-5까지 5개의 인쇄 회로 기판(PCB)으로 구성된 제어 모듈(II)의 세부 다이어그램을 보여준다. PCB-1은 +13.5 V 휴대용 배터리로 구동되는 전원 공급 보드이다. 이 보드는 +13.5 V를 ± 5 V로 변환하여 PCB-2에서 PCB-5까지 다른 보드의 전원 공급 장치로 사용된다. PCB-2는 SPI(Serial Peripheral Interface) 통신 프로토콜을 통해 다른 모든 보드와 통신하고 무선 프로토콜을 통해 모니터 모듈(I) (도 2 참조)과 통신하는 메인 보드이다. PCB-3는 2개의 DC-DC 컨버터(HVM-SMHV0550)를 이용하여 +5 V를 +4 kV, +5 kV로 변환하는 고전압(H.V) 공급 보드이다. 이러한 고전압은 에어로졸 입자를 방전하고 수집하기 위해 수집 및 감지 모듈(III)에 연결된다. PCB-4는 수집 및 감지 모듈(III) 내부에 내장된 QCM 수정의 진동을 구동하고 해당 수정의 주파수 신호를 측정하는데 사용된다. PCB-5는 공기 펌프를 구동하여 분당 0.5리터(LPM)로 에어로졸을 샘플링 및 감지 모듈(III)로 수집하기 위한 것이다.
- [0107] 이하, 실시예 및 비교예에 의하여 본 발명을 더욱 상세히 설명하고자 한다.
- [0108] 단, 하기 실시예는 본 발명을 예시하기 위한 것일 뿐, 본 발명의 내용이 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다.
- [0110] [실시예]

- [0111] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 이미지이다.
- [0112] 도 6의 공기중 입자 농도 측정 센서는 전체 길이가 130 mm이고, 감지 모듈 몸체 기준 직경은 65 mm으로 제조하였다. 임팩터 모듈은 돔, 노즐부, 수집부로 구성되며 모두 알루미늄 재질로 제조하였다. 노즐 직경은 1.1 mm로 임팩터의 컷오프 직경(d_{50}), $d_{50}=2.5 \mu\text{m}$ 을 기준으로 결정되었다. 수집판의 직경은 10 mm이고 노즐 팁과 수집판 사이의 거리는 2 mm로 제조하였다. 이들 형상의 전극은 직경 2 mm, 길이 25 mm이며 스테인레스 스틸 재질로 만들었다. 하전 입자는 감지 모듈 상단에 있는 입구 포트 (직경 2 mm)를 통해 감지 모듈로 들어가게 된다. 전극에 고전압 (+5 kV)을 인가하고 QCM 크리스탈 (QCM5140CrAu120-050-Q, Quartz Pro AB, 스웨덴)을 접지함으로써 전기적으로 하전된 입자가 정전기력에 의해 QCM 크리스탈에 수집되도록 하였다. 모든 PCB와 수집 및 감지 모듈(III)을 제작한 후 M3 볼트를 사용하여 모든 부품을 조립하여 도 6과 같이 완전한 장치를 형성했다.
- [0114] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 입자 수집 및 입자 손실 특성을 평가하기 위한 실험 셋업을 나타낸 도면이다.
- [0115] 도 7을 참조하면, 샘플링, 고전압 전력 및 측정 시스템의 세 가지 주요 섹션으로 구성하였다. 샘플링 시스템에는 청정 공기 공급 장치, 질량 흐름 컨트롤러 3개, 3-제트 콜리슨 네블라이저(three-jet Collision nebulizer), 확산 건조기 및 중화기(neutralizer)가 포함된다. 고전압 전원장치는 한국 세진전자의 SJ-2000S라는 상용제품이다. 측정 섹션에는 입자 크기 분포 특성화를 위한 입자 계수기(Particle Counter; OPC) 또는 스캐닝 이동도 입자 크기 측정기(Scanning Mobility Particle Sizer; SMPS)가 포함된다.
- [0116] 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 평가를 위해 PSL 입자 (직경: $0.05 \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$, $0.3 \mu\text{m}$, $0.38 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$ 및 $2 \mu\text{m}$)를 탈이온수 (농도: 0.01 중량%)에서 준비한 다음 깨끗한 공기 스트림의 유량 3.0 LPM (약 7 psi)에서 3-제트 콜리슨 네블라이저 (Mesa Laboratories, Denver, CO)로 분무했다. 청정 공기 공급기 (Dekati, Finland)를 이용하여 압축공기를 여과 및 건조하여 청정 공기를 공급하였으며, 유량은 질량 유량 제어기(model 5850E, Brooks Instrument, PA)를 이용하여 정밀하게 제어하였다. 분무기에서 생성된 입자를 확산 건조기 (HCT, South Korea)에서 건조시킨 후 Am-241 방사성 물질이 장착된 확산 중화기 (model 5.622, GRIMM, Germany)에서 전하 중화시켰다. 추가의 깨끗한 공기 흐름을 첨가하여 질량 유량 컨트롤러(mass flow rate controller) (모델 5850E, Brooks Instrument, PA)에 의해 제어되는 13.0 LPM의 희석된 에어로졸을 얻었다. 0.78 LPM의 또 다른 깨끗한 공기 흐름이 입자 계수기(OPC) 입구에 추가되었다. 입자 계수기(OPC)의 샘플링 유량은 1.2 LPM이므로 0.78 LPM이 추가된 공기 흐름은 S-qEPC 입구에서 0.48 LPM의 유량을 생성한다. S-qEPC 장치의 출구와 입구에서 입자 수 농도를 결정하기 위해 3방향 밸브가 사용되었다. 특히, 밸브는 S- 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 출구에서 에어로졸 농도를 측정하기 위해 "Pos 1" 위치로 전환되고, S-qEPC 입구에서 농도를 측정하기 위해 "Pos 2" 위치로 전환된다. 직경 $0.05 - 0.1 \mu\text{m}$ 및 $0.3-2 \mu\text{m}$ 의 PSL 입자의 수 농도는 스캐닝 이동도 입자 계수기(Scanning Mobility Particle Sizer) (모델 5.416, GRIMM, Germany) 및 광학입자계수기(Optical Particle Sizer) (모델 1.109, GRIMM, Germany)로 각각 측정되었다. 코로나 방전을 위해 니들에 +2 kV의 인가 전압을 적용하고 입자 수집을 위해 +5 kV를 인가하였다.
- [0118] 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서를 평가하기 위해 두 가지 테스트가 수행되었다.
- [0119] 모든 테스트에 대한 실험 매개변수는 다음과 같다:
- [0120] 1. 공기중 입자 농도 측정 센서 입구의 유속: 0.42 L/min
- [0121] 2. 입자 크기: PSL 적색 형광 입자. 크기 범위는 $0.05 \sim 2 \mu\text{m}$
- [0123] 첫 번째 테스트는 관성 임팩터 모듈의 포집 효율을 확인하는 것이다.
- [0124] 도 8은 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서의 관성 임팩터 모듈의 포집 효율을 나타낸 그래프이다.
- [0125] 도 8을 참조하면, 공기 역학적 직경이 대략 $2.5 \mu\text{m}$ 일때 유입된 입자의 약 50% 가 충돌판에서 걸러지는 것을 알 수 있다. 이를 통해 컷오프 직경(d_{50}) d_{50} 이 $2.5 \mu\text{m}$ 가 됨을 확인하였다.

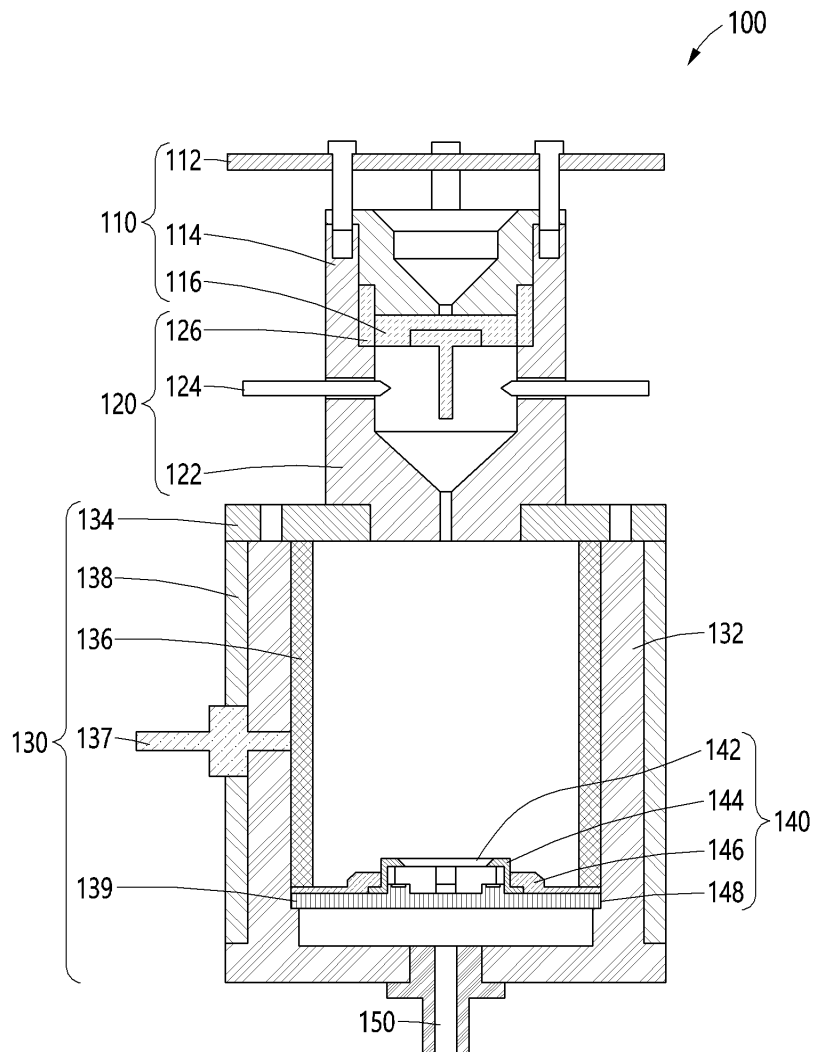
- [0127] 두 번째 테스트는 관성 임팩터 모듈을 통과한 공기중 입자의 농도 측정 센서 전체의 포집 효율과 입자 손실을 확인하는 것이다.
- [0128] 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 공기중 입자 농도 측정 센서 전체의 포집 효율과 입자 손실을 나타낸 그래프이다.
- [0129] 도 9를 참조하면, 적절한 전압을 사용하면 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하 영역의 입자를 센서에서 모두 채집 가능함을 알 수 있다.
- [0131] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기를 기초로 다양한 기술적 수정 및 변형을 적용할 수 있다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.
- [0132] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 청구범위의 범위에 속한다.

부호의 설명

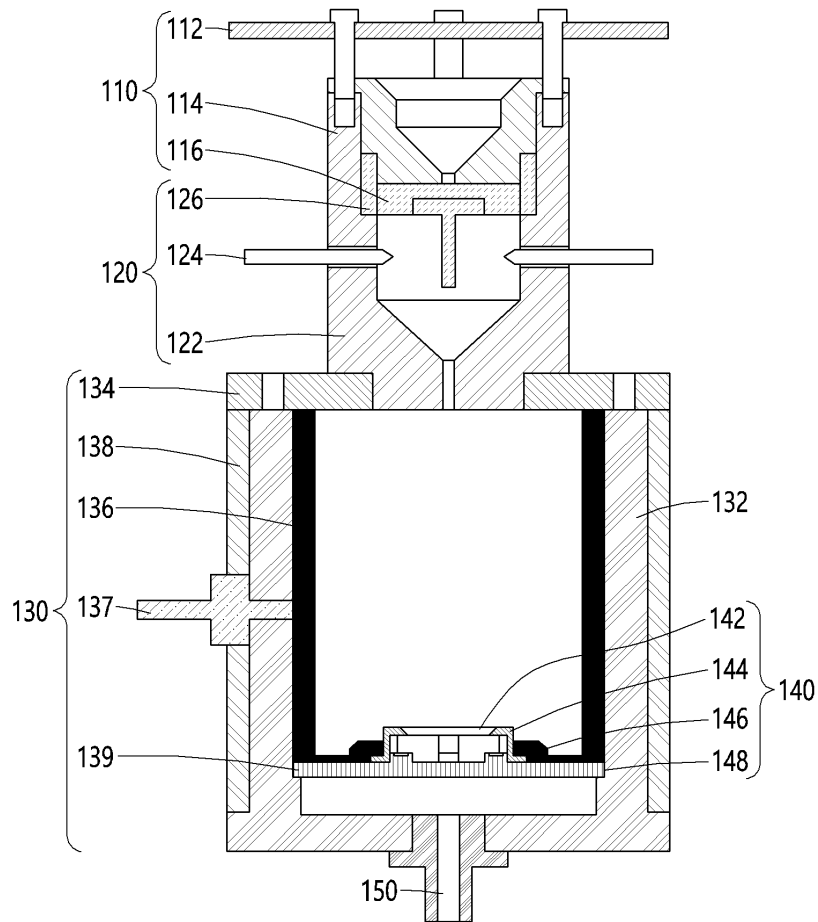
- [0134] 100: 공기중 입자 농도 측정 센서 110: 관성 임팩터 모듈
- 112: 돔 114: 노즐부
- 116: 수집부 120: 코로나 방전 모듈
- 122: 제2 전극 124: 제1 전극
- 130: 감지 모듈 132: 감지 모듈 몸체
- 134: 감지 모듈 캡 136: 집진 전극
- 137: 전기적 커넥터 138: 쉘드
- 139: 감지 모듈 지지체 140: 석영 결정 미세저울(QCM)
- 142: QCM 크리스탈 144: QCM 홀더
- 146: QCM 지지체 150: 출구

도면

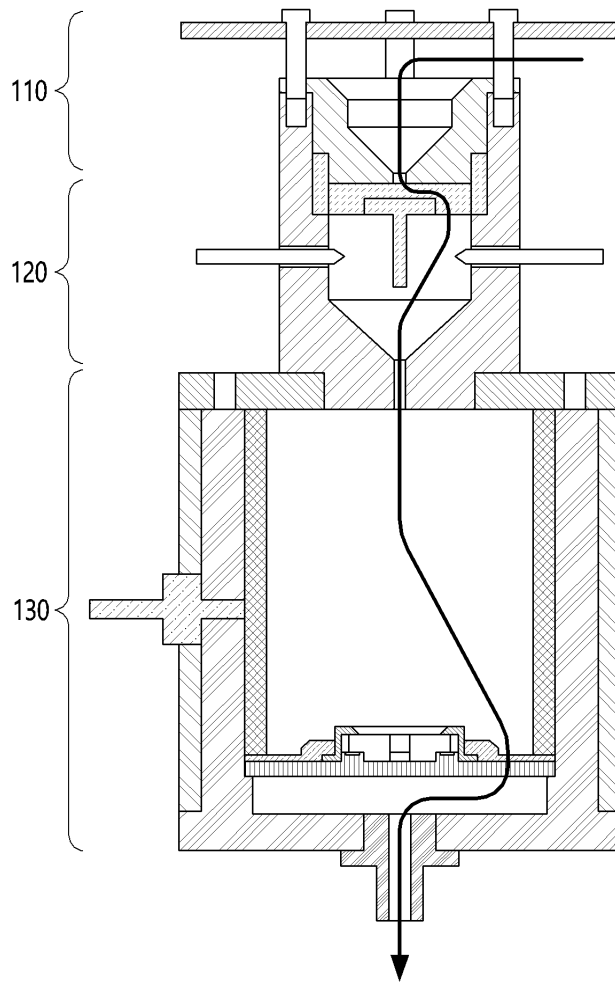
도면1



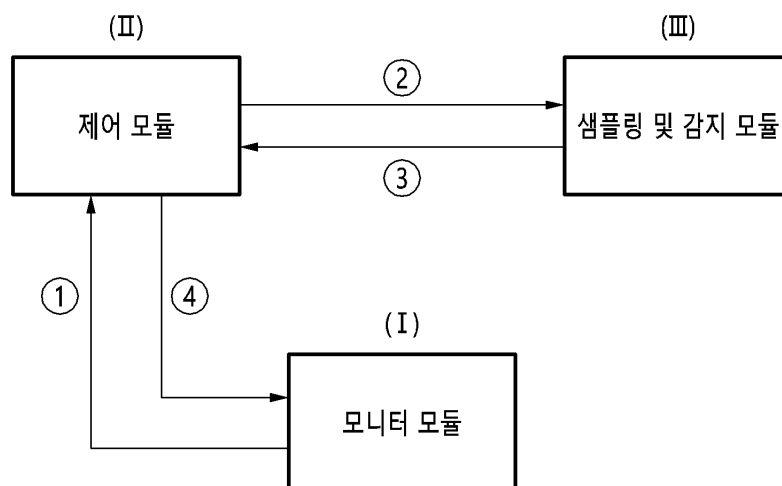
도면2



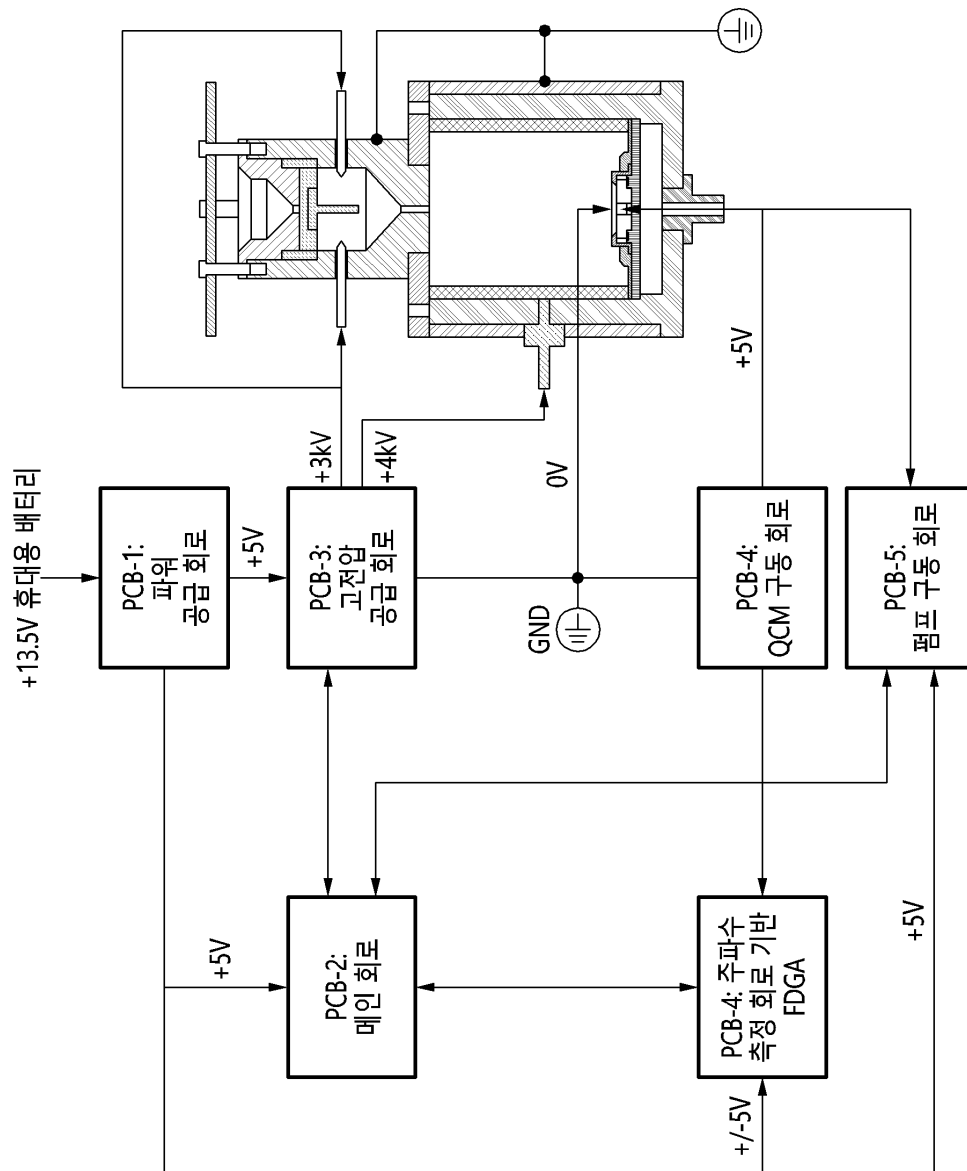
도면3



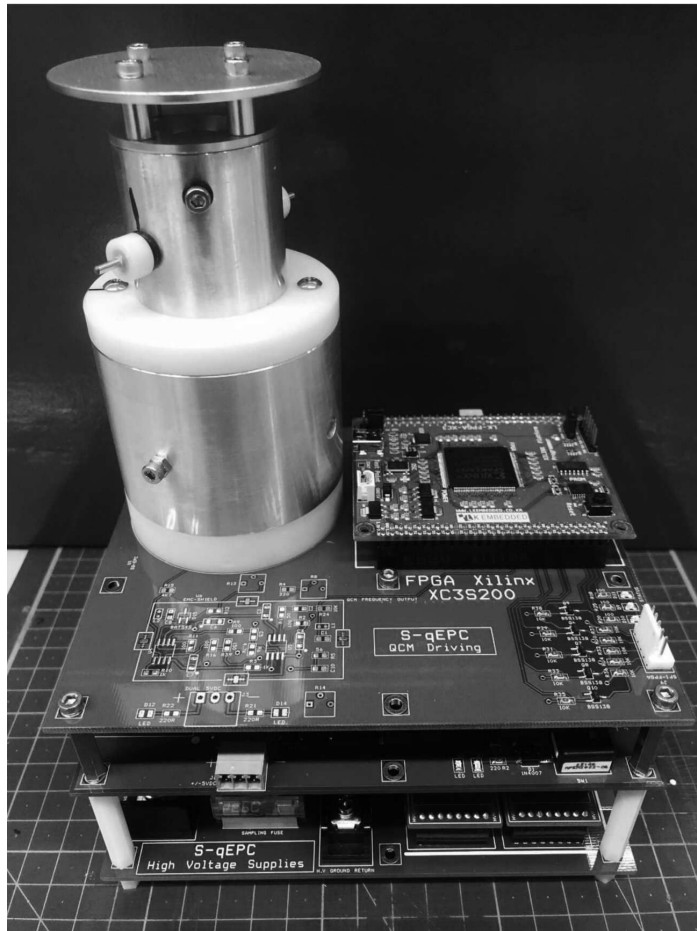
도면4



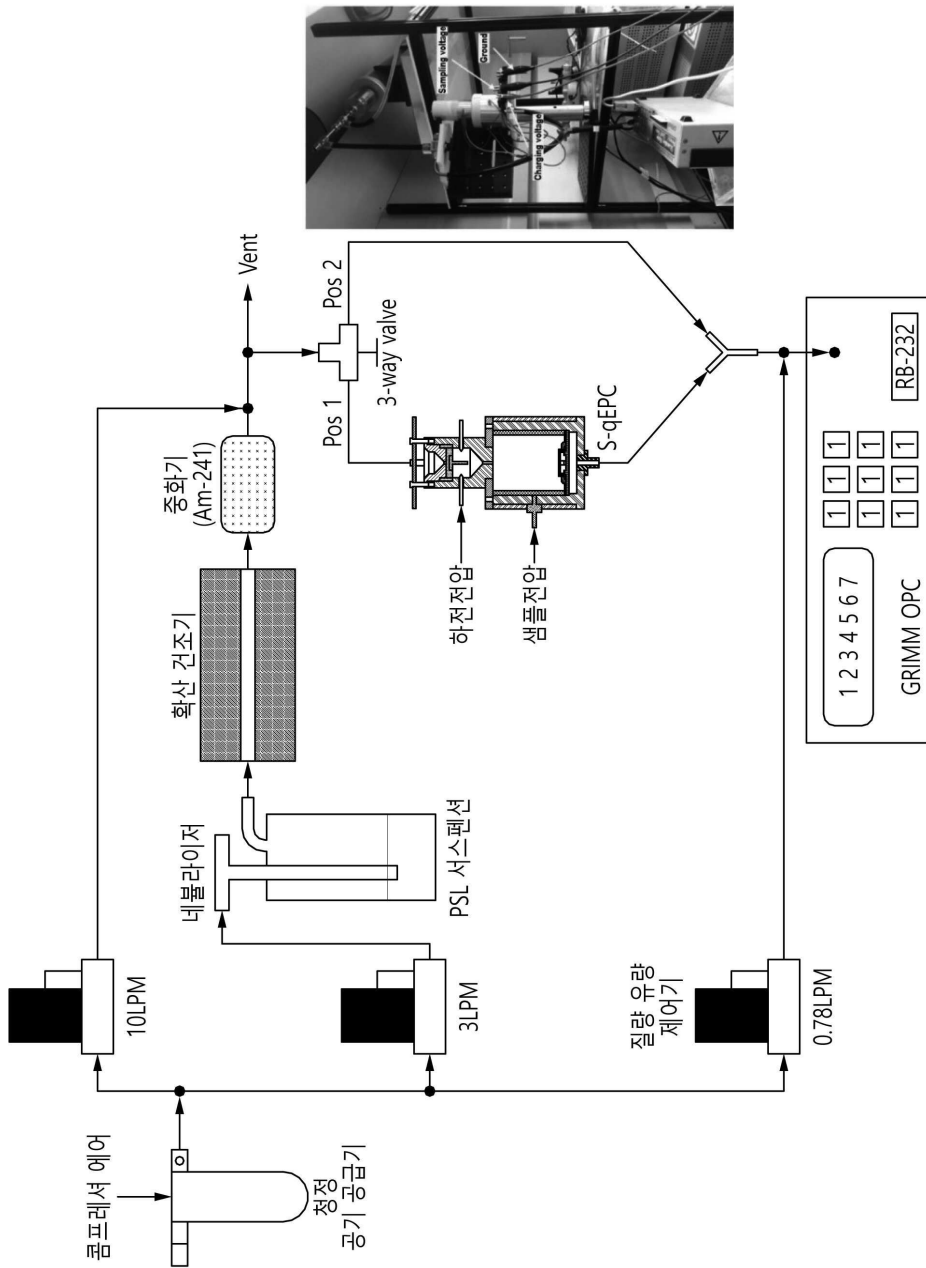
도면5



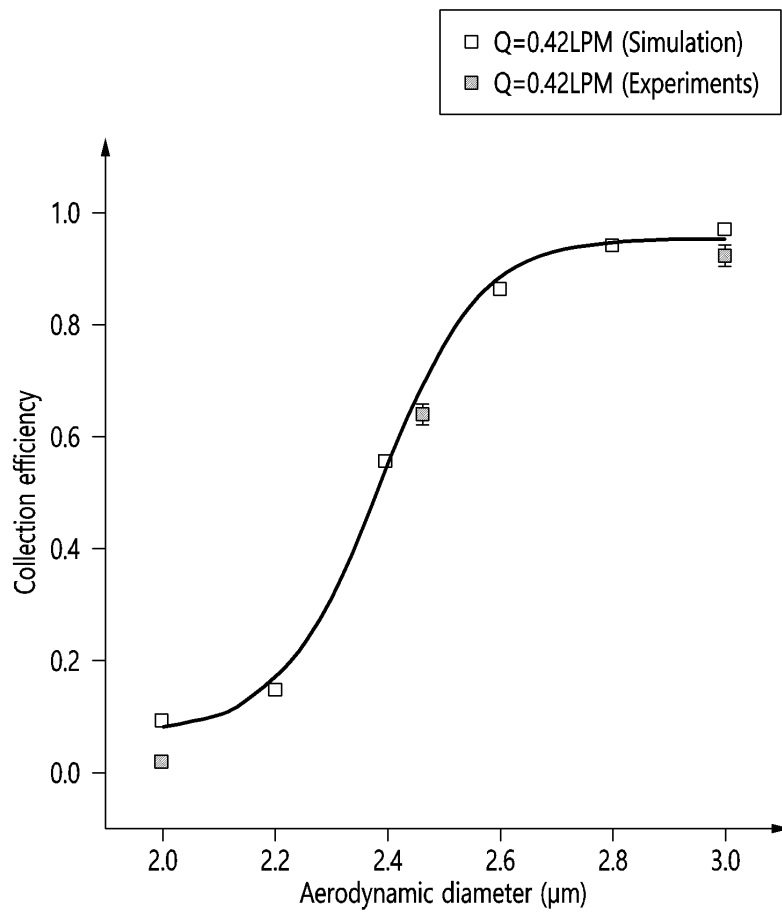
도면6



도면7



도면8



도면9

