



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년05월12일
(11) 등록번호 10-1734984
(24) 등록일자 2017년05월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
A61B 8/00 (2006.01) A61B 5/00 (2006.01)
A61B 8/08 (2006.01) G01N 21/17 (2006.01)
(52) CPC특허분류
A61B 8/4272 (2013.01)
A61B 5/0095 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0176203
(22) 출원일자 2015년12월10일
심사청구일자 2015년12월10일
(56) 선행기술조사문헌
JP2004506467 A*
JP2012239715 A*
WO2004086965 A1
JP2010504791 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
한밭대학교 산학협력단
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
(72) 발명자
강동열
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
(74) 대리인
특허법인 플러스

전체 청구항 수 : 총 10 항

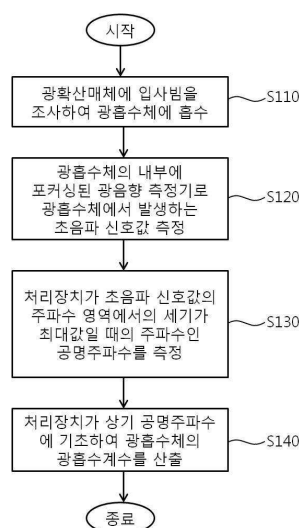
심사관 : 한재균

(54) 발명의 명칭 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법

(57) 요약

본 발명에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법은, 광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계; 상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계; 상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 최대값일 때의 주파수인 공명주파수를 측정하는 단계; 및 상기 처리장치가 측정된 상기 공명주파수에 기초하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함하여 이루어질 수 있다. 이러한 본 발명에 의하면, 비록 광확산매체의 유효산란계수를 알지 못하더라도 광확산매체 내부에 위치하는 광흡수체의 광흡수계수를 정량적으로 산출해낼 수 있게 된다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

A61B 8/5292 (2013.01)

G01N 21/1702 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2014R1A1A2057982

부처명 교육부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 일반연구자지원사업

연구과제명 주파수 영역 광음향 방법에 의한 생체 광 흡수계수의 정량적 측정

기 여 율 1/1

주관기관 한밭대학교

연구기간 2014.11.01 ~ 2017.04.30

명세서

청구범위

청구항 1

광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계;

상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계;

상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 광음향 측정기의 개구수에 의해 나타나는, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 최대값일 때의 주파수인 공명주파수를 측정하는 단계; 및

상기 처리장치가 측정된 상기 공명주파수와, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함하는, 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는,

상기 처리장치가 상기 공명주파수 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블을 포함하고, 상기 룩업 테이블을 통해 상기 공명주파수에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 하는, 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 4

광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계;

상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계;

상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 광음향 측정기의 개구수에 의해 나타나는, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 동일한 주파수들 사이의 차이에 해당하는 주파수 폭을 측정하는 단계; 및

상기 처리장치가 측정된 상기 주파수 폭과, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함하는, 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 5

삭제

청구항 6

제 4 항에 있어서,

상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는,

상기 처리장치가 상기 주파수 폭 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 특업 테이블을 포함하고, 상기 특업 테이블을 통해 상기 주파수 폭에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 하는, 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 7

광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계;

상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계;

상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 광음향 측정기의 개구수에 의해 나타나는, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 최대값일 때의 주파수인 공명주파수를 측정하는 단계; 및

상기 처리장치가 측정된 상기 공명주파수와, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함하는, 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 8

삭제

청구항 9

제 7 항에 있어서,

상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는,

상기 처리장치가 상기 공명주파수 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 특업 테이블을 포함하고, 상기 특업 테이블을 통해 상기 공명주파수에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 하는, 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 10

광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계;

상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계;

상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 광음향 측정기의 개구수에 의해 나타나는, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 동일한 주파수들 사이의 차이에 해당하는 주파수 폭을 측정하는 단계; 및

상기 처리장치가 측정된 상기 주파수 폭과, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함하는, 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 11

삭제

청구항 12

제 10 항에 있어서,

상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는,

상기 처리장치가 상기 주파수 폭 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 특업 테이블을 포함하고, 상기 특업 테이블을 통해 상기 주파수 폭에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 하는, 광음향 측정기

를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 13

광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계;

상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계;

상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 광음향 측정기의 개구수에 의해 나타나는, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 허수부의 크기가 0일 때의 주파수인 공명주파수를 측정하는 단계; 및

상기 처리장치가 측정된 상기 공명주파수와, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함하는, 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 14

삭제

청구항 15

제 13 항에 있어서,

상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는,

상기 처리장치가 상기 공명주파수 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 특업 테이블을 포함하고, 상기 특업 테이블을 통해 상기 공명주파수에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 하는, 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 광확산매체 내부에 위치하는 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 방법에 관한 것으로, 보다 구체적으로는 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정된 뒤, 처리장치가 상기 초음파 신호값을 주파수 영역에서 처리함으로써 상기 광흡수체의 광흡수계수를 정량적으로 산출하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적으로 X선, 초음파 또는 MRI를 이용한 광음향 이미징(photoacoustic imaging) 장치가 의료분야에서 널리 사용되고 있으며, 특히 광원으로부터 방출된 입사빔을 광확산매체(예를 들어, 생체조직)에 조사시켜, 상기 광확산매체 내의 정보를 얻는 광음향 이미징 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

[0003] 이러한 광음향 이미징 기술에 의하면, 광원으로부터 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사할 경우 그 입사빔은 광확산매체 내에서 전파되고, 그 전파된 입사빔은 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체(예를 들어, 혈관, 암 세포, 뼈 등)에 흡수되게 된다. 그리고 이에 따라 광흡수체에서는 열팽창 현상으로 인해 초음파가 발생하게 되며, 이 초음파는 광확산매체 내에서 산란이 거의 일어나지 않기 때문에 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기를 이용하여 높은 해상도로 상기 초음파의 신호값을 측정하게 된다.

[0004] 이 때, 광확산매체 내부에 위치하는 광흡수체의 광흡수계수를 정량적으로 산출해냄으로써 광흡수체의 성질과 관련된 다양한 정보를 획득할 수 있다. 예를 들어, 생체조직(광확산매체) 내부에 위치하는 종양(광흡수체)의 광흡수계수를 산출함으로써 종양의 특성을 파악할 수 있으며, 생체조직 내부에 위치하는 뼈(광흡수체)의 광흡수계수를 산출함으로써 골다공증의 진행 상황과 같은 의학적 정보를 비침습적으로 파악할 수 있는 것이다.

[0005] 하지만 광음향 이미징 기술에 있어서 광확산매체 내부에 위치하는 광흡수체의 광흡수계수를 정량적으로 산출하는 것은, 광확산매체의 광 특성이 광확산매체의 유형마다 랜덤하고, 동일한 유형이라 하더라도 개체마다 다르기

때문에(예를 들어, 사람의 피부조직마다 광확산매체의 광 특성이 상이함) 결코 쉬운 일이 아니다.

[0006] 한편, 종래부터 광음향 이미징 기술 중 하나인 광음향 토모그래피(PAT: Photoacoustic Tomography) 기술을 이용하여 광흡수계수를 정량적으로 측정하려는 시도가 행해지고 있었다. 하지만 광음향 토모그래피 기술을 이용하더라도 광확산매체 내의 광 에너지 밀도분포(광량분포)를 정확하게 측정해내기 어려워 광흡수체의 광흡수계수 역시 정확하게 측정할 수 없었으며, 이에 따라 광량분포를 정확하게 측정하기 위하여 확산 광학 토모그래피(DOT: Diffuse Optical Tomography)와의 결합을 시도하기도 하였다.

[0007] 한편, 다음의 수학적 식 1은 기존 문헌들에 개시되어 있는, 광흡수로 인해 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값($g_{PA}(t)$)을 나타낸 것이다.

[0008] [수학적 식 1]

[0009]
$$g_{PA}(t) = I_0 \exp(-\mu_{eff}L) \Gamma \mu_a \exp(-\mu_a v_s t)$$

[0010] 여기서, I_0 는 광원에서 방출되는 입사빔의 세기, μ_{eff} 는 광확산매체의 유효산란계수, L 은 광확산매체의 두께, Γ 는 그뤼나이젠(Grüneisen)계수, v_s 는 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도, t 는 시간이며, μ_a 는 산출하고자 하는 광흡수체의 광흡수계수이다.

[0011] 입사빔이 광확산매체의 표면에 균일하게 조사될 경우 그 입사빔의 조도는 수학적 식 1의 $\exp(-\mu_{eff}L)$ 및 $\exp(-\mu_a v_s t)$ 에서 알 수 있는 바와 같이, 광확산매체와 광흡수체 내에서 지수적으로(exponentially) 감쇄된다.

[0012] 상기 수학적 식 1에서 $I_0 \exp(-\mu_{eff}L)$ 는 광흡수체 표면에서의 입사빔의 조도를 나타내며, 이와 같은 광흡수체 표면에서의 입사빔의 조도는 광확산매체의 알려지지 않은 광 특성(즉, μ_{eff})으로 인해 랜덤 변수에 해당하게 된다. 이에 따라, 어떤 광확산매체로 입사되는 입사빔의 세기를 알고 있고, 광음향 측정기로 광흡수체에서 발생하는 초음파의 신호값을 측정한다 하더라도 광흡수체의 광흡수계수(μ_a)를 정량적으로 산출해내기 어렵다는 문제점이 있다.

[0013] 한편, 다음의 수학적 식 2는 상기 수학적 식 1을 푸리에 변환한 결과로서, 광흡수체가 입사빔을 흡수함에 따라 그 광흡수체로부터 발생하는 초음파의 스펙트럼($\tilde{G}_{PA}(\omega)$)을 나타낸 것이다.

[0014] [수학적 식 2]

[0015]
$$\tilde{G}_{PA}(\omega) = \frac{\Gamma}{2} \mu_a \exp(-\mu_{eff}L) \tilde{I}(\omega) \left(\frac{1}{i\omega + \mu_a v_s} \right)$$

[0016] 여기서, $I(\omega)$ 는 입사빔의 주파수 성분으로서, 수학적 식 2도 상기 수학적 식 1과 마찬가지로 광확산매체의 유효산란계수(μ_{eff})는 광확산매체마다 서로 다른 값을 나타내기 때문에 광흡수체의 광흡수계수(μ_a)를 정량적으로 산출해내기 어렵다는 문제점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0017] (특허문헌 0001) 미국 등록특허 제5713356호(1998.02.03)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0018] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해 안출된 것으로서, 비록 광확산매체의 유효산란계수(μ_{eff})를 알지 못하더라도, 광확산매체 내부에 위치하는 광흡수체의 광흡수계수(μ_a)를 정량적으로 산출해낼 수 있는 방안을 제공하는 것에 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0019] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 제 1 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법은, 광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계; 상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계; 상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 최대값일 때의 주파수인 공명주파수를 측정하는 단계; 및 상기 처리장치가 측정된 상기 공명주파수에 기초하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함한다.
- [0020] 여기서, 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는, 상기 처리장치가 상기 공명주파수와, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0021] 또는, 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는, 상기 처리장치가 상기 공명주파수 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블을 포함하고, 상기 룩업 테이블을 통해 상기 공명주파수에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0022] 본 발명의 제 2 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법은, 광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계; 상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계; 상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 동일한 주파수들 사이의 차이에 해당하는 주파수 폭을 측정하는 단계; 및 상기 처리장치가 측정된 상기 주파수 폭에 기초하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함한다.
- [0023] 여기서, 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는, 상기 처리장치가 상기 주파수 폭과, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0024] 또는, 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는, 상기 처리장치가 상기 주파수 폭 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블을 포함하고, 상기 룩업 테이블을 통해 상기 주파수 폭에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0025] 본 발명의 제 3 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법은, 광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계; 상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계; 상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 최대값일 때의 주파수인 공명주파수를 측정하는 단계; 및 상기 처리장치가 측정된 상기 공명주파수에 기초하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함한다.
- [0026] 여기서, 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는, 상기 처리장치가 상기 공명주파수와, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0027] 또는, 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는, 상기 처리장치가 상기 공명주파수 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블을 포함하고, 상기 룩업 테이블을 통해 상기 공명주파수에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0028] 본 발명의 제 4 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법은, 광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계; 상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계; 상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 동일한 주파수들 사이의 차이에 해당하는 주파수 폭을 측정하는 단계; 및 상기 처리장치가 측정된 상기 주파수 폭에 기초하여 상기

광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함한다.

- [0029] 여기서, 상기 처리장치가 상기 주파수 폭과, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0030] 또는, 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는, 상기 처리장치가 상기 주파수 폭 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블을 포함하고, 상기 룩업 테이블을 통해 상기 주파수 폭에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0031] 본 발명의 제 5 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법은, 광원을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계; 상기 광확산매체 상에 위치하여, 상기 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 단계; 상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 허수부의 크기가 0일 때의 주파수인 공명주파수를 측정하는 단계; 및 상기 처리장치가 측정된 상기 공명주파수에 기초하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함한다.
- [0032] 여기서, 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는, 상기 처리장치가 상기 공명주파수와, 상기 처리장치 내에 미리 저장해놓은 상기 광흡수체에서 발생하는 초음파의 속도 및 상기 광음향 측정기의 개구수를 이용하여 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0033] 또는, 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계는, 상기 처리장치가 상기 공명주파수 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블을 포함하고, 상기 룩업 테이블을 통해 상기 공명주파수에 대응하는 상기 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

- [0034] 본 발명에 의하면, 광확산매체의 내부에 포커싱된 광음향 측정기로 광흡수체에서 발생하는 초음파 신호값을 측정 후, 처리장치에서 상기 초음파 신호값을 입력받아 공명주파수 또는 주파수 폭을 측정하는 방법을 통해, 비록 광확산매체의 유효산란계수(μ_{eff})를 알지 못하더라도 광확산매체 내부에 위치하는 광흡수체의 광흡수계수(μ_a)를 정량적으로 산출해낼 수 있게 된다.

도면의 간단한 설명

- [0035] 도 1은 본 발명에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법의 개략도이다.
- 도 2는 광흡수체로부터 발생하는 초음파의 스펙트럼을 시뮬레이션을 통해 나타낸 결과이다.
- 도 3은 본 발명의 제 1 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도이다.
- 도 4는 본 발명의 제 2 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도이다.
- 도 5는 광흡수체로부터 발생하는 초음파 스펙트럼의 실수부를 시뮬레이션을 통해 나타낸 결과이다.
- 도 6은 본 발명의 제 3 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도이다.
- 도 7은 본 발명의 제 4 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도이다.
- 도 8은 광흡수체로부터 발생하는 초음파 스펙트럼의 허수부를 시뮬레이션을 통해 나타낸 결과이다.
- 도 9는 본 발명의 제 5 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0036] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법에 대해 상세하게 설명한다. 첨부한 도면들은 통상의 기술자에게 본 발명의 기술적 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것으로서, 본 발명은 첨부한 도면들만으로 한정되는 것이 아니라, 본 발명의 기술적 사상을 변경시키지 않는 범위 내에서 얼마든지 다른 형태로 구체화될 수 있다. 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대해서는 그 상세한 설명을 생략하기로 한다.
- [0037] 도 1은 본 발명에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 구현하는 장치의 개략도로서, 상기 장치는 광원(100), 광음향 측정기(200) 및 처리장치(300)를 포함하여 구성될 수 있다.
- [0038] 광원(100)에서는 입사빔을 방출시키며, 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔은 광확산매체(10)에 조사된다. 광확산매체(10)에 조사되는 입사빔은 광확산매체(10) 내에서 전파 및 확산되며, 광확산매체(10)의 유효산란계수(μ_{eff})에 의해 그 세기가 지수적으로 감쇄되면서 광흡수체(20)의 표면에 도달하게 된다. 여기서, 광원(100)에서 방출되는 입사빔은 광흡수체(20)에 흡수됨에 따라 열팽창 현상에 의해 초음파를 발생시키도록 하는 빔으로서, 예를 들어 특정 파장의 광변조 빔 또는 펄스 레이저 빔일 수 있다.
- [0039] 광흡수체(20)는 그 표면에 도달한 입사빔을 흡수하게 되며 그에 따른 열팽창 현상으로 인해 초음파를 발생시키게 된다. 이 때, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 속도는 광확산매체(10)에 따라 일정한 값으로 정해져 있기 때문에(예를 들어, 생체조직 내에서 초음파의 속도는 일반적으로 1500m/s임), 초음파의 속도는 후술하는 수학적식들에서 상수로서 취급할 수 있는 값이다.
- [0040] 광음향 측정기(200)는 광확산매체(10) 상에 위치하며, 광확산매체(10)의 내부에 포커스를 맞춘 뒤 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 역할을 한다. 이 때, 광음향 측정기(200)로는, 예를 들어 초음파 트랜스듀서를 사용할 수 있다. 비록 도 1에는 광음향 측정기(200)의 포커스가 광흡수체(20)의 표면에 정확하게 맞춰진 것으로 나타냈지만, 광음향 측정기(200)의 포커스는 광흡수체(20)의 표면으로부터 위쪽이나 아래쪽으로 소정 거리 이격된 위치에 맞춰질 수도 있다.
- [0041] 광음향 측정기(200)는 기기마다 초점거리와 측정기의 반지름으로 특징지어지는 개구수(NA: Numerical Aperture)가 미리 설정되어 있으며, 광음향 측정기(200)를 광확산매체(10) 상에 위치시킴에 따라, 광음향 측정기(200)의 일측과 중심축 사이에는 θ_{NA} (개구수의 각도)가 존재하게 된다. 만일 θ_{NA} 가 90° 일 경우에는 광음향 측정기(200)가 광흡수체(20)의 전 영역에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 것이 되지만, 실제 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)로 측정되는 초음파 신호값은 도 1에 나타난 바와 같이 광음향 측정기(200)의 일측과 타측에 의해 설정되는 가상의 검출지점(virtual detector point)을 통과하는 광흡수체(20)의 영역(이하, '측정영역'이라 함)에 대해서만 초음파의 측정이 이루어지는 것이다. 만일 이 측정영역에서 발생하는 초음파가 가상의 검출지점을 통과하지 않고 광음향 측정기(200)에 도달하게 되면, 이 초음파는 광음향 측정기(200)의 포커싱에 대해 위상이 맞지 않으므로 유의미한 신호값으로 측정되지 않게 된다. 그리고 상기 측정영역 이외에서 발생한 초음파는 가상의 검출지점을 통과하는지 여부에 관계없이 광음향 측정기(200)의 포커싱에 대해 위상이 맞지 않으므로 이 또한 유의미한 신호값으로 측정되지 않게 된다.
- [0042] 상기 수학적식 1 및 수학적식 2는 광음향 측정기(200)가 광흡수체(20)의 전 영역에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 경우를 가정하여 세워진 식으로서, 실제 광음향 측정기(200)의 사용 태양을 고려하는 경우(즉, 광음향 측정기(200)의 포커싱이 광확산매체(10)의 내부에 맞춰짐에 따라, 측정영역에 대해서만 초음파 신호값이 측정되는 실정을 고려하는 경우) 상기 수학적식 1 및 수학적식 2는 수정될 필요가 있다. 다만, 상기 수학적식 1 및 수학적식 2는 광확산매체(10) 내부에 위치하는 광흡수체(20)의 전 영역에서 발생하는 초음파 신호값을 각각 시간 영역 및 주파수 영역으로 나타낸 것으로서, 이하에서는 수학적식 2만을 실제 광음향 측정기(200)의 사용 태양을 고려하여 수정하기로 한다.
- [0043] 수학적식 2의 수정은 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)에 의한 측정영역을, 가상의 검출지점을 원점($r=0$)으로 하는 구면좌표계 상에서의 적분을 수행함으로써 이루어질 수 있다.
- [0044] 상기 측정영역에서 발생하는 초음파 신호값은 광확산매체(10) 내에서 광음향 측정기(200)의 초점거리인 $L(=f_L = |\vec{r} - \vec{r}_0|)$ 만큼 전파되므로, 수학적식 2의 결과에 상수 위상 인자(constant phase factor)인 $\exp(-ikf_L)$ 이 추가되어야 한다.
- [0045] 이에 따라, 광음향의 Helmholtz 방정식에 대한 솔루션(Green function)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[0046] (i)
$$\tilde{G}_{PA}(\vec{r}, \omega) = \frac{i\omega\beta}{4\pi C_P} \int_V \frac{\exp[ik|\vec{r}-\vec{r}_0|]}{|\vec{r}-\vec{r}_0|} \tilde{H}(\vec{r}_0, \omega) dV$$

[0047] 도 1에 나타난 구면좌표계의 r=0, 즉 가상의 검출지점에서 초음파의 스펙트럼은 다음과 같다.

[0048] (ii)
$$\tilde{G}_{PA}(r=0, \omega) = \frac{i\omega\beta}{4\pi C_P} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=\pi-\theta_{NA}}^{\pi} \int_{r=0}^{\infty} \frac{\exp[-ikr]}{r} \tilde{H}(\vec{r}, \omega) r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$$

[0049] 식(ii)에서 광음향 소스(photoacoustic source) $\tilde{H}(\vec{r}, \omega)$ 는 입사빔이 광흡수체(20) 내에 입사될 때의 열분포를 나타내며, 상기 $\tilde{H}(\vec{r}, \omega)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

[0050] (iii)
$$\tilde{H}(\vec{r}, \omega) = \mu_a \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \exp[-\mu_a r \cos(\pi - \theta)]$$

[0051] 여기서, $\tilde{I}(\omega)$ 는 r=0 및 $\theta=\pi/2$ 평면에서 입사빔 세기의 스펙트럼을 나타내며, 광흡수체(20) 상에 있는 광확산 매체(10)의 광 특성(즉, 유효산란계수인 μ_{eff})은 입사빔의 세기를 $\tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L)$ 로 만든다.

[0052] 식(iii)을 고려하면, 식(ii)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[0053]
$$\tilde{G}_{PA}(r=0, \omega) = \frac{i\omega\beta}{2C_P} \mu_a \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \int_{\theta=\pi-\theta_{NA}}^{\pi} \int_{r=0}^{\infty} r \exp[-ikr] \exp[-\mu_a r \cos(\pi - \theta)] \sin\theta dr d\theta$$

[0054] 다음으로 위의 식을 θ 로 적분하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[0055]
$$\begin{aligned} \tilde{G}_{PA}(r=0, \omega) &= \frac{i\omega\beta}{2C_P} \mu_a \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \int_{r=0}^{\infty} r \exp[-ikr] \left[\frac{-\exp[-\mu_a r] + \exp[-\mu_a r \cos\theta_{NA}]}{\mu_a r} \right] dr \\ &= \frac{i\omega\beta}{2C_P} \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \int_{r=0}^{\infty} \exp[-ikr] [-\exp[-\mu_a r] + \exp[-\mu_a r \cos\theta_{NA}]] dr \end{aligned}$$

[0056] 다음으로 위의 식을 변수 r로 적분하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[0057]
$$\begin{aligned} \tilde{G}_{PA}(r=0, \omega) &= \frac{i\omega\beta}{2C_P} \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \left[-\frac{1}{ik + \mu_a} + \frac{1}{ik + \mu_a \cos\theta_{NA}} \right] \\ &= \frac{\beta v_s^2}{2C_P} \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \frac{i\omega}{v_s^2} \left[-\frac{1}{ik + \mu_a} + \frac{1}{ik + \mu_a \cos\theta_{NA}} \right] \\ &= \frac{\Gamma}{2} \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \frac{\omega}{v_s} \left[\frac{1}{i\mu_a v_s - \omega} - \frac{1}{i\mu_a v_s \cos\theta_{NA} - \omega} \right] \end{aligned}$$

[0058] 따라서, 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔이 광확산매체(10)에 조사된 후, 상기 입사빔의 전파 및 확산을 통해 광흡수체(20)에 흡수될 때, 상기 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 스펙트럼은 다음의 수학적 식 3과 같음을 알 수 있다.

[0059] [수학적 식 3]

[0060]
$$G_{PA}(\omega) = \frac{\Gamma}{2} \tilde{I}(\omega) \exp[-\mu_{eff}L] \frac{\omega}{v_s} \left[\frac{1}{i\mu_a v_s - \omega} - \frac{1}{i\mu_a v_s \cos\theta_{NA} - \omega} \right]$$

[0061] 여기서, $\Gamma = \frac{\beta v_s^2}{C_P}$, $\omega = v_s k$ 이다. 만일 $\cos\theta_{NA}=0$ (즉, $\theta_{NA}=\pi/2$ 또는 $NA=1$)일 경우에는 수학적 식 3은 상기 수학적 식 2와 동일해진다는 것을 알 수 있다. 상술한 바와 같이, $\theta_{NA}=\pi/2$ (즉, $NA=1$)는 광음향 측정기(200)가 광흡수체(20)의 전 영역에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 경우를 가리키는 것이지만, 광음향 측정기(200)의 실제 사용 태양에서 θ_{NA} 는 $0 < \theta_{NA} < \pi/2$ (즉, $0 < NA < 1$)의 범위를 가지므로, 상기 수학적 식 2는 상기 수학적 식 3과 같이 수정될 것이 요구된다.

[0062] 상기 수학적 식 3에 대해 대수 처리를 거치면, 다음의 수학적 식 4와 같이 나타낼 수 있으며, 이 때 공명주파수(ω_0) 및 주파수 폭(γ)은 각각 수학적 식 5와 수학적 식 6으로 정의될 수 있다.

[0063] [수학식 4]

[0064]
$$G_{PA}(\omega) = \frac{\Gamma}{2} \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \frac{\omega}{v_s} \left[\frac{i\mu_a v_s (\cos\theta_{NA} - 1)}{\omega^2 - \omega_0^2 - i\gamma\omega} \right]$$

[0065] [수학식 5]

[0066]
$$\omega_0 = \mu_a v_s \sqrt{\cos\theta_{NA}}$$

[0067] [수학식 6]

[0068]
$$\gamma = \mu_a v_s (1 + \cos\theta_{NA})$$

[0069] 수학식 4 내지 수학식 6에 의하면 수학식 2와는 달리, 초음파 스펙트럼이 공명주파수(ω_0)와 주파수 폭(γ)을 갖는다는 것을 알 수 있다. 즉, 광음향 측정기(200)가 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 경우에는, 그 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 초음파의 스펙트럼에는 항상 공명주파수(ω_0)와 주파수 폭(γ)이 존재한다는 것을 알 수 있으며, 특히 수학식 5에 의하면 $\cos\theta_{NA}=0$ (즉, $\theta_{NA}=\pi/2$ 또는 $NA=1$)일 경우(즉, 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)가 광흡수체(20)의 전 영역에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 것으로 가정할 경우)에는 공명주파수가 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다.

[0070] 처리장치(300)는 광원(100)과 연결되어 있어, 광원(100)에서 방출되는 입사빔의 방출시간과 파형을 조정할 수 있다. 또한, 처리장치(300)는 광음향 측정기(200)와도 연결되어 있어, 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 초음파 신호값을 입력받을 수 있다.

[0071] 처리장치(300) 내에는 광음향 측정기(200)로부터 입력받는 초음파 신호값을 처리하여 공명주파수 또는 주파수 폭을 측정할 수 있는 프로그램 및, 상기 측정된 공명주파수 또는 주파수 폭에 기초하여 광흡수체(20)의 광흡수 계수를 산출할 수 있는 프로그램이 구비되어 있다. 이에 따라, 처리장치(300)는 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔에 따라 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값을 주파수 영역에서 처리하여 광흡수체(20)의 광흡수 계수를 정량적으로 산출할 수 있으며, 이에 대한 보다 구체적인 설명은 이하에서 설명하기로 한다.

[0072] 도 2는 광흡수체로부터 발생하는 초음파의 스펙트럼을 시뮬레이션을 통해 나타낸 결과이다.

[0073] 구체적으로, 도 2(a)는 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)가 1일 때, 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 정규화된 세기(y축)를 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수(x축)에 따라 나타낸 그래프이다. 그리고 도 2(b)는 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)가 각각 0.6, 0.8일 때, 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 정규화된 세기(y축)를 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수(x축)에 따라 나타낸 그래프이다.

[0074] 도 2(a)에 의하면 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수가 0일 때 최대값을 갖는 것으로 나타났지만, 도 2(b)에 의하면 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수가 0보다 큰 주파수에서 최대값을 갖는다는 것을 알 수 있으며, 이와 같은 시뮬레이션 결과의 차이는 광음향 측정기(200)의 실제 사용 태양에 있어서 그 개구수가 1($NA=1$)이 아닌데서 기인한다는 것을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션 수행 결과, 도 2(b)에서 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 최대값일 때의 주파수는 상기 수학식 5에 따른 공명주파수(ω_0)와 일치한다는 점을 확인하였으며, 이 때 광확산매체(10)의 유효산란계수(μ_{eff})는 공명주파수에 유효한 영향을 미치지 않는다는 점도 확인하였다.

[0075] 도 3은 본 발명의 제 1 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수 계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도로서, 본 발명의 제 1 실시예에서는 상기 수학식 5 및 도 2(b)의 시뮬레이션 결과를 토대로 광확산매체(20)의 광흡수 계수를 산출하는 방법을 제공한다.

[0076] 본 발명의 제 1 실시예에 따른 광흡수 계수를 산출하는 방법은, 우선 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체(10)에 조사하여 상기 광확산매체(10)의 내부에 위치하는 광흡수체(20)에 흡수시킨다(S110). 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔은 광확산매체(10) 내에서 전파 및 확산되면서 광흡수체(20)에 도달하게 되며, 광흡수체(20)는 입사빔을 흡수하여 초음파를 발생시키게 된다.

[0077] 다음으로, 광확산매체(10) 상에 위치하여, 상기 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)로, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값(보다 구체적으로는, 도 1에 나타낸 바와 같이 광흡수체(20)의 측정영역에

서 발생하는 초음파 신호값)을 측정한다(S120).

- [0078] 다음으로, 광원(100) 및 광음향 측정기(200)와 연결되는 처리장치(300)가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 최대값일 때의 주파수인 공명주파수를 측정한다(S130). 즉, 처리장치(300)는 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 최대값일 때의 주파수를 공명주파수로서 측정한다.
- [0079] 마지막으로, 처리장치(300)가 측정된 상기 공명주파수에 기초하여 상기 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출한다(S140).
- [0080] 보다 구체적으로, 처리장치(300)는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출하기 위해, 처리장치(300) 내에 상기 수학식 5에 대응하는 프로그램을 구비할 수 있다. 즉, 처리장치(300)는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 속도 및 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)를 미리 저장해 놓은 뒤, 측정되는 공명주파수를 수학식 5에 대입하는 연산 처리를 수행함으로써 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수 있다.
- [0081] 또는, 처리장치(300)는 도 2(b)에 나타난 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이, 공명주파수 및 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블(LUT)을 미리 구비해 놓을 수 있으며, 이와 같은 룩업 테이블을 통해 상기 공명주파수에 대응하는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수도 있다.
- [0082] 한편, 도 2(b)에 의하면 도 2(a)와는 달리, 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 서로 동일한 주파수들이 존재하며(예를 들어, 광흡수체(20)의 광흡수계수가 600m^{-1} 이고, 광음향 측정기(200)의 개구수가 0.8일 경우, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값의 정규화된 세기가 0.6을 갖는 주파수들이 2개 존재함), 이에 따라 그 주파수들 간의 차이에 해당하는 주파수 폭이 존재한다는 것을 알 수 있다. 그리고 이와 같은 시뮬레이션 결과의 차이 역시 광음향 측정기(200)의 실제 사용 태양에서는 그 개구수가 1(NA=1)이 아닌데서 기인하는 것임을 알 수 있다.
- [0083] 도 4는 본 발명의 제 2 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도로서, 본 발명의 제 2 실시예에서는 상기 수학식 6 및 도 2(b)의 시뮬레이션 결과를 토대로 광확산매체(20)의 광흡수계수를 산출하는 방법을 제공한다.
- [0084] 본 발명의 제 2 실시예에 따른 광흡수계수를 산출하는 방법은, 우선 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체(10)에 조사하여 상기 광확산매체(10)의 내부에 위치하는 광흡수체(20)에 흡수시킨다(S210). 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔은 광확산매체(10) 내에서 전파 및 확산되면서 광흡수체(20)에 도달하게 되며, 광흡수체(20)는 입사빔을 흡수하여 초음파를 발생시키게 된다.
- [0085] 다음으로, 광확산매체(10) 상에 위치하여, 상기 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)로, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값(보다 구체적으로는, 도 1에 나타난 바와 같이 광흡수체(20)의 측정영역에서 발생하는 초음파 신호값)을 측정한다(S220).
- [0086] 다음으로, 광원(100) 및 광음향 측정기(200)와 연결되는 처리장치(300)가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 동일한 주파수들 사이의 차이에 해당하는 주파수 폭을 측정한다(S230). 즉, 처리장치(300)는 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 세기가 동일한 주파수들 사이의 차이를 주파수 폭으로서 측정한다.
- [0087] 마지막으로, 처리장치(300)가 측정된 상기 주파수 폭에 기초하여 상기 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출한다(S240).
- [0088] 보다 구체적으로, 처리장치(300)는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출하기 위해, 처리장치(300) 내에 상기 수학식 6에 대응하는 프로그램을 구비할 수 있다. 즉, 처리장치(300)는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 속도 및 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)를 미리 저장해 놓은 뒤, 측정되는 주파수 폭을 수학식 6에 대입하는 연산 처리를 수행함으로써 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수 있다. 다만, 상기 수학식 6에서 도출된 주파수 폭(γ)은 상수(constant)값에 따라 달라질 수 있으므로, 처리장치(300)에서는 상기 수학식 6에 따라 연산 처리를 수행할 때 이와 같은 상수값을 고려하여 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수 있다.
- [0089] 또는, 처리장치(300)는 도 2(b)에 나타난 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이, 주파수 폭 및 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블(LUT)을 미리 구비해 놓을 수 있으며, 이와 같은 룩업 테이블을 통해 상기 주파수

폭에 대응하는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수도 있다.

[0090] 한편, 상기 수학적 식 4로 나타낸 초음파 스펙트럼은, 대수 처리를 통해 다음의 수학적 식 7과 같이 실수부(real part)와 허수부(imaginary part)로 구분하여 나타낼 수 있으며, 이 때 공명주파수(ω_0) 및 주파수 폭(γ)은 각각 수학적 식 8 및 수학적 식 9로 정의될 수 있다.

[0091] [수학적 식 7]

$$G_{PA}(\omega) = \frac{\Gamma}{2} \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \frac{\omega}{v_s} \left[\frac{i\mu_a v_s (\cos\theta_{NA} - 1)}{\omega^2 - \omega_0^2 - i\gamma\omega} \right]$$

$$= \frac{\Gamma}{2} \tilde{I}(\omega) \exp(-\mu_{eff}L) \frac{\omega}{v_s} \left[\frac{\gamma\omega\mu_a v_s (1 - \cos\theta_{NA})}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \gamma^2\omega^2} - i \frac{(\omega^2 - \omega_0^2)\mu_a v_s (1 - \cos\theta_{NA})}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \right]$$

[0093] [수학적 식 8]

$$\omega_0 = \mu_a v_s \sqrt{\cos\theta_{NA}}$$

[0095] [수학적 식 9]

$$\gamma = \mu_a v_s (1 + \cos\theta_{NA})$$

[0097] 우선, 수학적 식 7 내지 수학적 식 9에 의하면 상기 수학적 식 2와는 달리, 초음파 스펙트럼의 실수부가 공명주파수(ω_0)와 주파수 폭(γ)을 갖는다는 것을 알 수 있다. 즉, 광음향 측정기(200)가 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 경우에는, 그 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 초음파 스펙트럼의 실수부에는 항상 공명주파수(ω_0)와 주파수 폭(γ)이 존재한다는 것을 알 수 있으며, 특히 수학적 식 8에 의하면 $\cos\theta_{NA}=0$ (즉, $\theta_{NA}=\pi/2$ 또는 $NA=1$)일 경우(즉, 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)가 광흡수체(20)의 전 영역에서 발생하는 초음파 신호값을 측정하는 것으로 가정할 경우)에는 공명주파수가 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다.

[0098] 도 5는 광흡수체로부터 발생하는 초음파 스펙트럼의 실수부를 시뮬레이션을 통해 나타낸 결과이다.

[0099] 구체적으로, 도 5(a)는 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)가 1일 때, 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기(y축)를 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수(x축)에 따라 나타낸 그래프이다. 그리고 도 5(b)는 광음향 측정기(200)의 개구수가 0.6일 때, 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기(y축)를 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수(x축)에 따라 나타낸 그래프이다.

[0100] 도 5(a)에 의하면 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수가 0일 때 최대값을 갖는 것으로 나타났지만, 도 5(b)에 의하면 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수가 0보다 큰 주파수에서 최대값을 갖는다는 것을 알 수 있으며, 이와 같은 시뮬레이션 결과의 차이는 광음향 측정기(200)의 실제 사용 태양에 있어서 그 개구수가 1($NA=1$)이 아닌데서 기인한다는 것을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션 수행 결과, 도 5(b)에서 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 최대값일 때의 주파수는 상기 수학적 식 8에 따른 공명주파수(ω_0)와 일치한다는 점을 확인하였으며, 이 때 광확산매체(100)의 유효산란계수(μ_{eff})는 공명주파수에 유효한 영향을 미치지 않는다는 점도 확인하였다.

[0101] 도 6은 본 발명의 제 3 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도로서, 본 발명의 제 3 실시예에서는 상기 수학적 식 8 및 도 5(b)의 시뮬레이션 결과를 토대로 광확산매체(20)의 광흡수계수를 산출하는 방법을 제공한다.

[0102] 본 발명의 제 3 실시예에 따른 광흡수계수를 산출하는 방법은, 우선 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체(10)에 조사하여 상기 광확산매체(10)의 내부에 위치하는 광흡수체(20)에 흡수시킨다(S310). 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔은 광확산매체(10) 내에서 전파 및 확산되면서 광흡수체(20)에 도달하게 되며, 광흡수체(20)는 입사빔을 흡수하여 초음파를 발생시키게 된다.

[0103] 다음으로, 광확산매체(10) 상에 위치하여, 상기 광확산매체(10) 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)로, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값(보다 구체적으로는, 도 1에 나타낸 바와 같이 광흡수체(20)의 측정영역에서

발생하는 초음파 신호값)을 측정한다(S320).

- [0104] 다음으로, 광원(100) 및 광음향 측정기(200)와 연결되는 처리장치(300)가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 최대값일 때의 주파수인 공명주파수를 측정한다(S330). 즉, 처리장치(300)는 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 최대값일 때의 주파수를 공명주파수로서 측정한다.
- [0105] 마지막으로, 처리장치(300)가 측정된 상기 공명주파수에 기초하여 상기 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출한다(S340).
- [0106] 보다 구체적으로, 처리장치(300)는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출하기 위해, 처리장치(300) 내에 상기 수학식 8에 대응하는 프로그램을 구비할 수 있다. 즉, 처리장치(300)는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 속도 및 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)를 미리 저장해 놓은 뒤, 측정되는 공명주파수를 수학식 8에 대입하는 연산 처리를 수행함으로써 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수 있다.
- [0107] 또는, 처리장치(300)는 도 5(b)에 나타난 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이, 공명주파수 및 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블(LUT)을 미리 구비해 놓을 수 있으며, 이와 같은 룩업 테이블을 통해 상기 공명주파수에 대응하는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수도 있다.
- [0108] 한편, 도 5(b)에 의하면 도 5(a)와는 달리, 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 서로 동일한 주파수들이 존재하며(예를 들어, 광흡수체(20)의 광흡수계수가 600m^{-1} 이고, 광음향 측정기(200)의 개구수가 0.6일 경우, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값의 정규화된 실수부의 크기가 0.6을 갖는 주파수들이 2개 존재함), 이에 따라 그 주파수들 간의 차이에 해당하는 주파수 폭(γ)이 존재한다는 것을 알 수 있다. 그리고 이와 같은 시뮬레이션 결과의 차이 역시 광음향 측정기(200)의 실제 사용 태양에서는 그 개구수가 1(NA=1)이 아닌 데서 기인하는 것임을 알 수 있다.
- [0109] 도 7은 본 발명의 제 4 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도로서, 본 발명의 제 4 실시예에서는 상기 수학식 9 및 도 5(b)의 시뮬레이션 결과를 토대로 광확산매체(20)의 광흡수계수를 산출하는 방법을 제공한다.
- [0110] 본 발명의 제 4 실시예에 따른 광흡수계수를 산출하는 방법은, 우선 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체(10)에 조사하여 상기 광확산매체(10)의 내부에 위치하는 광흡수체(20)에 흡수시킨다(S410). 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔은 광확산매체(10) 내에서 전파 및 확산되면서 광흡수체(20)에 도달하게 되며, 광흡수체(20)는 입사빔을 흡수하여 초음파를 발생시키게 된다.
- [0111] 다음으로, 광확산매체(10) 상에 위치하여, 상기 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)로, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값(보다 구체적으로는, 도 1에 나타난 바와 같이 광흡수체(20)의 측정영역에서 발생하는 초음파 신호값)을 측정한다(S420).
- [0112] 다음으로, 광원(100) 및 광음향 측정기(200)와 연결되는 처리장치(300)가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 동일한 주파수들 사이의 차이에 해당하는 주파수 폭을 측정한다(S430). 즉, 처리장치(300)는 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 실수부의 크기가 동일한 주파수들 사이의 차이를 주파수 폭으로서 측정한다.
- [0113] 마지막으로, 처리장치(300)가 측정된 상기 주파수 폭에 기초하여 상기 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출한다(S440).
- [0114] 보다 구체적으로, 처리장치(300)는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출하기 위해, 처리장치(300) 내에 상기 수학식 9에 대응하는 프로그램을 구비할 수 있다. 즉, 처리장치(300)는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 속도 및 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)를 미리 저장해 놓은 뒤, 측정되는 주파수 폭을 수학식 9에 대입하는 연산 처리를 수행함으로써 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수 있다. 다만, 상기 수학식 9에서 도출된 주파수 폭(γ)은 상수값에 따라 달라질 수 있으므로, 처리장치(300)에서는 상기 수학식 9에 따라 연산 처리를 수행할 때 이와 같은 상수값을 고려하여 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수 있다.
- [0115] 또는, 처리장치(300)는 도 5(b)에 나타난 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이, 주파수 폭 및 광흡수계수가 서로

대응하여 기록된 룩업 테이블(LUT)을 미리 구비해 놓을 수 있으며, 이와 같은 룩업 테이블을 통해 상기 주파수 폭에 대응하는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수도 있다.

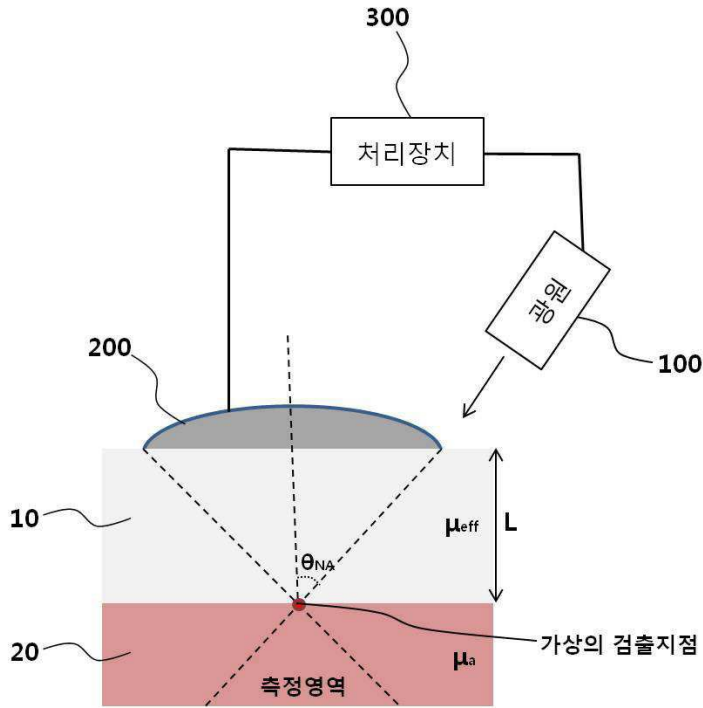
- [0116] 도 8은 광흡수체로부터 발생하는 초음파 스펙트럼의 허수부를 시뮬레이션을 통해 나타낸 결과이다.
- [0117] 구체적으로, 도 8(a)는 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)가 1일 때, 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 허수부의 크기(y축)를 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수(x축)에 따라 나타낸 그래프이다. 그리고 도 8(b)는 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)가 0.6일 때, 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 허수부의 크기(y축)를 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수(x축)에 따라 나타낸 그래프이다.
- [0118] 도 8(a)에 의하면 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값을 주파수 영역에서 나타낸 스펙트럼의 허수부는 주파수 전 영역에서 0이 되는 값이 존재하지 않는 것으로 나타났지만, 도 8(b)에 의하면 초음파 스펙트럼의 허수부의 크기는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 주파수가 어느 특정 주파수일 때에는 0이 된다는 것을 알 수 있으며, 이와 같은 시뮬레이션 결과의 차이는 광음향 측정기(200)의 실제 사용 태양에 있어서 그 개구수가 1(NA=1)이 아닌데서 기인한다는 것을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션 수행 결과 및 상기 수학식 7로부터, 도 8(b)에서 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 허수부 크기가 0일 때의 주파수는 상기 수학식 8에 따른 공명주파수(ω_0)와 일치한다는 점을 확인하였으며, 이 때 광확산매체(100)의 유효산란계수(μ_{eff})는 공명주파수에 유효한 영향을 미치지 않는다는 점도 확인하였다.
- [0119] 도 9는 본 발명의 제 5 실시예에 따른 광음향 측정기를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도로서, 본 발명의 제 5 실시예에서는 상기 수학식 8 및 도 8(b)의 시뮬레이션 결과를 토대로 광확산매체(20)의 광흡수계수를 산출하는 방법을 제공한다.
- [0120] 본 발명의 제 5 실시예에 따른 광흡수계수를 산출하는 방법은, 우선 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔을 광확산매체(10)에 조사하여 상기 광확산매체(10)의 내부에 위치하는 광흡수체(20)에 흡수시킨다(S510). 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔은 광확산매체(10) 내에서 전파 및 확산되면서 광흡수체(20)에 도달하게 되며, 광흡수체(20)는 입사빔을 흡수하여 초음파를 발생시키게 된다.
- [0121] 다음으로, 광확산매체(10) 상에 위치하여, 상기 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)로, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값(보다 구체적으로는, 도 1에 나타낸 바와 같이 광흡수체(20)의 측정영역에서 발생하는 초음파 신호값)을 측정한다(S520).
- [0122] 다음으로, 광원(100) 및 광음향 측정기(200)와 연결되는 처리장치(300)가 측정된 상기 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 허수부의 크기가 0일 때의 주파수인 공명주파수를 측정한다(S530). 즉, 처리장치(300)는 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 초음파 신호값을 입력받아, 상기 초음파 신호값의 주파수 영역에서의 허수부의 크기가 0일 때의 주파수를 공명주파수로서 측정한다.
- [0123] 마지막으로, 처리장치(300)가 측정된 상기 공명주파수에 기초하여 상기 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출한다(S540).
- [0124] 보다 구체적으로, 처리장치(300)는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출하기 위해, 처리장치(300) 내에 상기 수학식 8에 대응하는 프로그램을 구비할 수 있다. 즉, 처리장치(300)는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 속도 및 광음향 측정기(200)의 개구수(NA)를 미리 저장해 놓은 뒤, 측정되는 공명주파수를 수학식 8에 대입하는 연산 처리를 수행함으로써 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수 있다.
- [0125] 또는, 처리장치(300)는 도 8(b)에 나타낸 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이, 공명주파수 및 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블(LUT)을 미리 구비해 놓을 수 있으며, 이와 같은 룩업 테이블을 통해 상기 공명주파수에 대응하는 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수도 있다.
- [0126] 이상에서 살펴본 바와 같이, 본 발명에 의하면 광확산매체(10)의 내부에 포커싱된 광음향 측정기(200)로 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값을 측정한 뒤, 처리장치(300)에서 상기 초음파 신호값을 입력받아 공명주파수 또는 주파수 폭을 측정하는 방법을 통해, 비록 광확산매체(10)의 유효산란계수(μ_{eff})를 알지 못하더라도 광확산매체(10) 내부에 위치하는 광흡수체(20)의 광흡수계수(μ_a)를 정량적으로 산출해낼 수 있게 된다.

부호의 설명

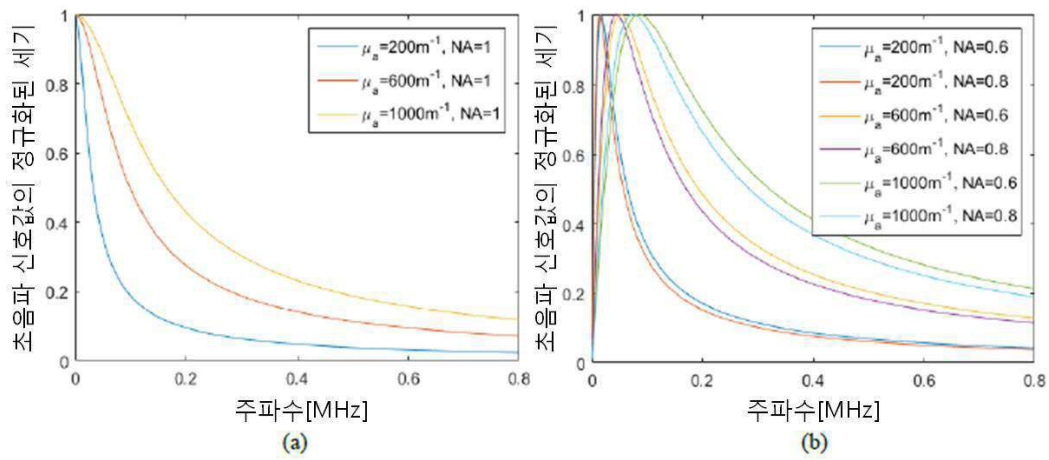
- [0127] 10: 광확산매체
- 20: 광흡수체
- 100: 광원
- 200: 광음향 측정기
- 300: 처리장치

도면

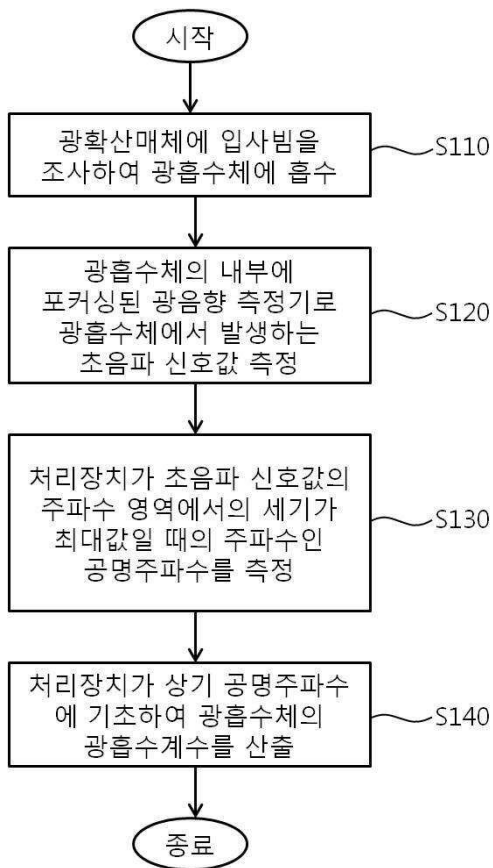
도면1



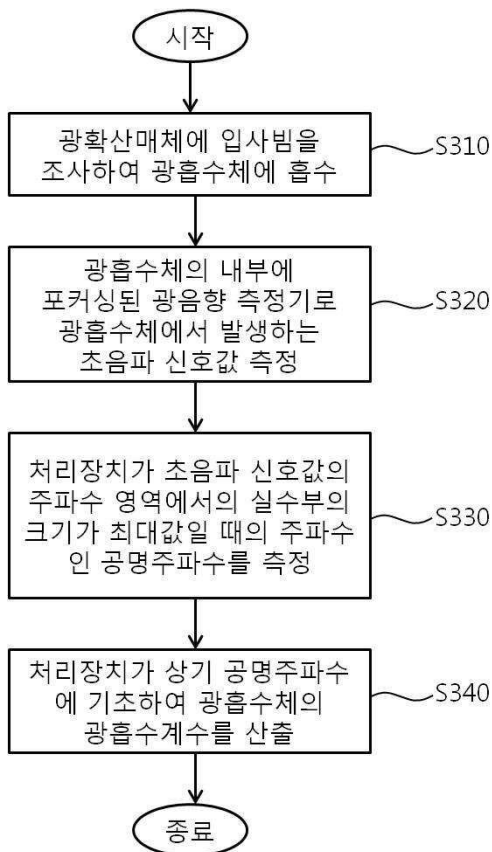
도면2



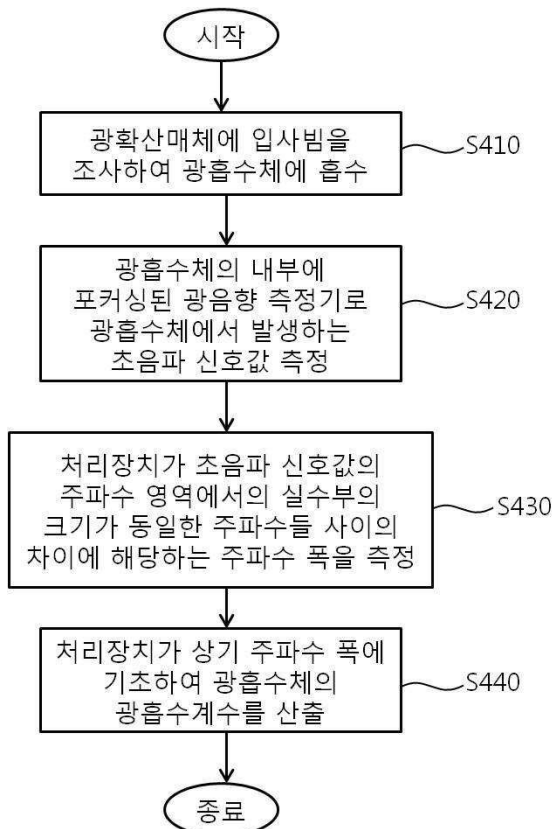
도면3



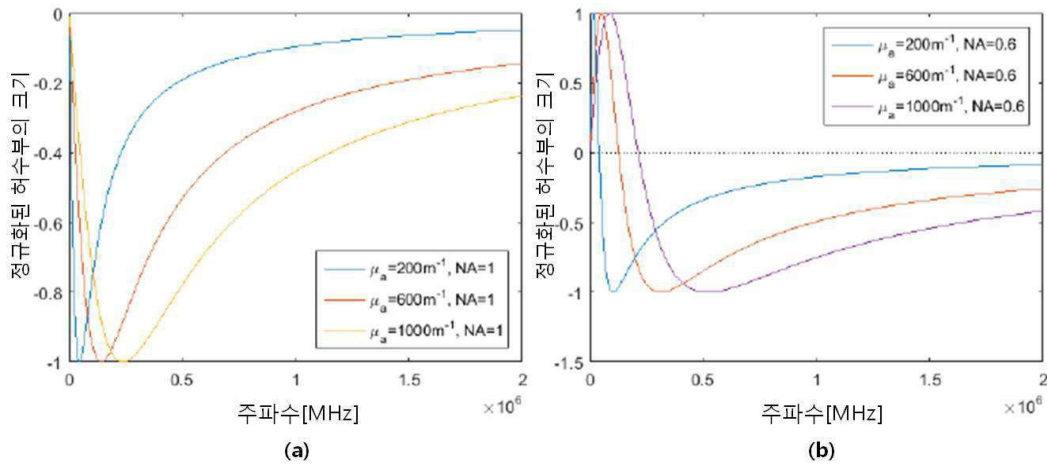
도면6



도면7



도면8



도면9

