



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년04월27일
 (11) 등록번호 10-1730816
 (24) 등록일자 2017년04월21일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 G01N 29/34 (2006.01) A61B 8/00 (2006.01)
 A61B 8/08 (2006.01) G01N 21/17 (2006.01)
 G01N 29/06 (2006.01) G01N 29/46 (2006.01)

(52) CPC특허분류
 G01N 29/348 (2013.01)
 A61B 8/4416 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2016-0025490
 (22) 출원일자 2016년03월03일
 심사청구일자 2016년03월03일

(56) 선행기술조사문헌
 JP2013055988 A
 JP2010167167 A
 US20140049770 A1
 WO2012144395 A1

(73) 특허권자
 한밭대학교 산학협력단
 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

(72) 발명자
 강동열
 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

(74) 대리인
 특허법인 플러스

전체 청구항 수 : 총 3 항

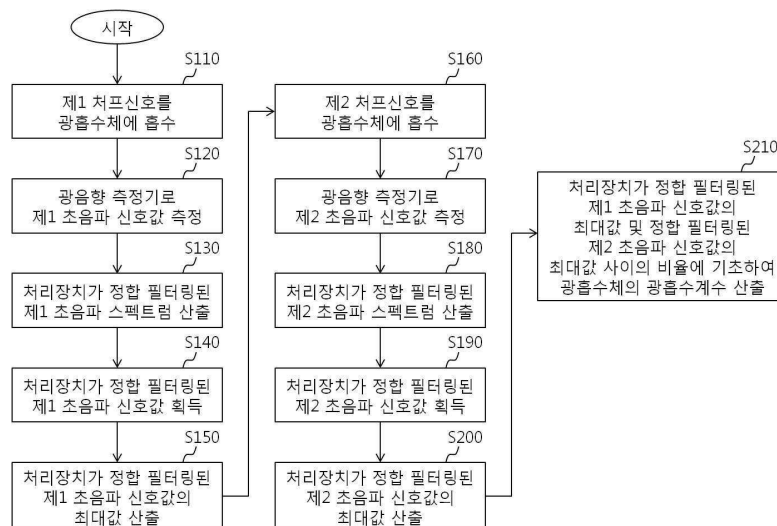
심사관 : 양성지

(54) 발명의 명칭 **주파수 영역 광음향 측정에서 처프신호를 이용하여 광흡수계수를 산출하는 방법**

(57) 요약

본 발명은 처리장치에서 초음파 신호값의 정합 필터링을 수행할 때 기존에 수행되던 정합 필터링 방법과는 상이한 방법을 적용하여, 광음향 측정기의 전달함수가 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값에 미치는 영향을 최소화하였다. 이에 따라, 본 발명에 의하면 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값, 처프신호의 주파수 범위 및 광흡수계수 간에 일정한 관계를 도출하여 광흡수계수를 산출할 수 있게 되며, 결과적으로 본 발명에 의한 광흡수계수 산출 방법은 광음향 측정기의 전달함수의 형태에 거의 무관하게 범용적으로 사용될 수 있다는 이점이 있다.

대표도 - 도11



(52) CPC특허분류

A61B 8/5207 (2013.01)

G01N 21/1702 (2013.01)

G01N 29/0672 (2013.01)

G01N 29/46 (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

기여율 1/1

주관기관 한밭대학교

연구기간 2014.11.01 ~ 2017.04.30

명세서

청구범위

청구항 1

- (a) 광원을 통해 방출되는 제1 처프신호를 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계;
- (b) 광음향 측정기를 이용하여 상기 제1 처프신호로 인해 상기 광흡수체에서 발생하는 제1 초음파 신호값을 측정하는 단계;
- (c) 상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 상기 제1 초음파 신호값을 입력받아 주파수 영역에서 정합 필터링 처리를 수행하여 정합 필터링된 제1 초음파 스펙트럼을 산출하되, 상기 정합 필터링된 제1 초음파 스펙트럼은, 상기 제1 초음파 신호값을 푸리에 변환한 초음파 스펙트럼과, 정합 필터링 처리인자 $Q_1(v) = I_1(v)/(-i2\pi v)$ (여기서, $I_1(v)$ 는 상기 제1 처프신호의 스펙트럼이고, i 는 허수단위이며, v 는 주파수임)의 컨จู게이트의 곱에 따라 산출하는 단계;
- (d) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제1 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환하여 정합 필터링된 제1 초음파 신호값을 획득하는 단계;
- (e) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제1 초음파 신호값의 최대값을 산출하는 단계;
- (f) 상기 광원을 통해 방출되는 제2 처프신호를 상기 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계;
- (g) 상기 광음향 측정기를 이용하여 상기 제2 처프신호로 인해 상기 광흡수체에서 발생하는 제2 초음파 신호값을 측정하는 단계;
- (h) 상기 처리장치가 상기 제2 초음파 신호값을 입력받아 주파수 영역에서 정합 필터링 처리를 수행하여 정합 필터링된 제2 초음파 스펙트럼을 산출하되, 상기 정합 필터링된 제2 초음파 스펙트럼은, 상기 제2 초음파 신호값을 푸리에 변환한 초음파 스펙트럼과, 정합 필터링 처리인자 $Q_2(v) = I_2(v)/(-i2\pi v)$ (여기서, $I_2(v)$ 는 상기 제2 처프신호의 스펙트럼이고, i 는 허수단위이며, v 는 주파수임)의 컨จู게이트의 곱에 따라 산출하는 단계;
- (i) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제2 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환하여 정합 필터링된 제2 초음파 신호값을 획득하는 단계;
- (j) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제2 초음파 신호값의 최대값을 산출하는 단계; 및
- (k) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제1 초음파 신호값의 최대값 및 상기 정합 필터링된 제2 초음파 신호값의 최대값 사이의 비율에 기초하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함하는 주파수 영역 광음향 측정에서 처프신호를 이용하여 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
 상기 제1 처프신호의 주파수 상한과 상기 제2 처프신호의 주파수 상한은 동일하고, 상기 제1 처프신호의 주파수 하한과 상기 제2 처프신호의 주파수 하한은 상이한 것을 특징으로 하는 주파수 영역 광음향 측정에서 처프신호를 이용하여 광흡수계수를 산출하는 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 (k)단계는,

상기 처리장치가 상기 비율 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블을 포함하고, 상기 룩업 테이블을 통해 상기 비율에 대응하는 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 하는 주파수 영역 광음향 측정에서 처프신호를 이용하여 광흡수계수를 산출하는 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 처프신호를 광흡수체에 흡수시킴에 따라 발생하는 초음파 신호값에 대하여 처리장치가 주파수 영역에서 정합 필터링(matched filtering) 처리를 수행함으로써 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 방출되는 입사빔을 광확산매체(예를 들어, 생체조직)에 조사시켜 광확산매체 내부의 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, 상기 전파된 입사빔은 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체(예를 들어, 혈관, 암세포, 뼈 등)에 흡수되게 된다. 이에 따라 광흡수체에서는 열팽창 현상으로 인해 초음파가 발생하게 되며, 이 초음파는 광확산매체 내에서 산란이 거의 일어나지 않기 때문에 광확산매체의 내부에 포커싱된(focused) 광음향 측정기를 이용하여 고해상도로 초음파의 신호값을 측정하게 된다.

[0004] 이 때, 광확산매체 내부에 위치하는 광흡수체의 광흡수계수를 정량적으로 산출해낼 경우에는 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 없었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 미국 등록특허 제5713356호(1998.02.03)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 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.

[0009] 또한, 본 발명은 처리장치에서 광흡수계수를 산출하기 위해 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 산출할 때, 상기 최대값이 광음향 측정기의 전달함수에 의한 영향을 되도록 적게 받을 수 있도록 함으로써, 범용적으로

사용될 수 있는 광흡수계수의 산출 방법을 제공하는 것에 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0010] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 발명에 따른 처프신호를 이용하여 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하는 방법은, (a) 광원을 통해 방출되는 제1 처프신호를 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계; (b) 광음향 측정기를 이용하여 상기 제1 처프신호로 인해 상기 광흡수체에서 발생하는 제1 초음파 신호값을 측정하는 단계; (c) 상기 광원 및 상기 광음향 측정기와 연결되는 처리장치가 상기 제1 초음파 신호값을 입력받아 주파수 영역에서 정합 필터링 처리를 수행하여 정합 필터링된 제1 초음파 스펙트럼을 산출하되, 정합 필터링 처리인자를 $Q_1(v)$ 라 할 때 $Q_1(v)=I_1(v)/(-i2\pi v)$ 를 만족시키는 값(여기서, $I_1(v)$ 는 상기 제1 처프신호의 스펙트럼이고, i 는 허수단위이며, v 는 주파수임)으로 정합 필터링 처리를 수행하는 단계; (d) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제1 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환하여 정합 필터링된 제1 초음파 신호값을 획득하는 단계; (e) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제1 초음파 신호값의 최대값을 산출하는 단계; (f) 상기 광원을 통해 방출되는 제2 처프신호를 상기 광확산매체에 조사하여 상기 광확산매체의 내부에 위치하는 광흡수체에 흡수시키는 단계; (g) 상기 광음향 측정기를 이용하여 상기 제2 처프신호로 인해 상기 광흡수체에서 발생하는 제2 초음파 신호값을 측정하는 단계; (h) 상기 처리장치가 상기 제2 초음파 신호값을 입력받아 주파수 영역에서 정합 필터링 처리를 수행하여 정합 필터링된 제2 초음파 스펙트럼을 산출하되, 정합 필터링 처리인자를 $Q_2(v)$ 라 할 때 $Q_2(v)=I_2(v)/(-i2\pi v)$ 를 만족시키는 값(여기서, $I_2(v)$ 는 상기 제2 처프신호의 스펙트럼이고, i 는 허수단위이며, v 는 주파수임)으로 정합 필터링 처리를 수행하는 단계; (i) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제2 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환하여 정합 필터링된 제2 초음파 신호값을 획득하는 단계; (j) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제2 초음파 신호값의 최대값을 산출하는 단계; 및 (k) 상기 처리장치가 상기 정합 필터링된 제1 초음파 신호값의 최대값 및 상기 정합 필터링된 제2 초음파 신호값의 최대값 사이의 비율에 기초하여 상기 광흡수체의 광흡수계수를 산출하는 단계;를 포함한다.

[0011] 여기서, 상기 제1 처프신호의 주파수 상한과 상기 제2 처프신호의 주파수 상한은 동일하고, 상기 제1 처프신호의 주파수 하한과 상기 제2 처프신호의 주파수 하한은 상이한 것을 특징으로 한다.

[0012] 여기서, 상기 (k)단계는, 상기 처리장치가 상기 비율 및 상기 광흡수계수가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블을 포함하고, 상기 룩업 테이블을 통해 상기 비율에 대응하는 광흡수계수를 산출하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0013] 본 발명에 의하면, 광흡수체에 처프신호를 흡수시키고, 처리장치가 초음파 신호값을 입력받아 정합 필터링 처리를 수행한 뒤 그에 따라 획득되는 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 산출하는 방법을 통해, 비록 광확산매체의 유효산란계수(μ_{eff})를 알지 못하더라도 광확산매체 내부에 위치하는 광흡수체의 광흡수계수(μ_a)를 정량적으로 산출해낼 수 있게 된다.

[0014] 또한, 본 발명은 처리장치에서 초음파 신호값의 정합 필터링을 수행할 때 기존에 수행되던 정합 필터링 방법과는 상이한 방법을 적용하여, 광음향 측정기의 전달함수가 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값에 미치는 영향을 최소화하였다. 이에 따라, 본 발명에 의하면 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값, 처프신호의 주파수 범위 및 광흡수계수 간에 일정한 관계를 도출하여 광흡수계수를 산출할 수 있게 되며, 결과적으로 본 발명에 의한 광흡수계수 산출 방법은 광음향 측정기의 전달함수의 형태에 거의 무관하게 범용적으로 사용될 수 있다는 이점이 있다.

도면의 간단한 설명

- [0015] 도 1은 본 발명에 따른 광흡수계수 산출 방법을 구현하는 장치의 개략도이다.
- 도 2는 광원을 통해 방출되는 처프신호를 예시적으로 나타낸 그래프이다.
- 도 3은 광음향 측정기의 전달함수를 예시적으로 나타낸 그래프이다.
- 도 4는 도 3에 나타낸 광음향 측정기의 전달함수를 고려했을 때, 처리장치에 의해 기존 방법인 $Q(v)=I(v)$ 로 정합 필터링된 초음파 신호값을 나타낸 그래프이다.
- 도 5는 처리장치가 초음파 스펙트럼을 기존 방법인 $Q(v)=I(v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 이상적인 광음

향 측정기의 전달함수를 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 처프신호의 주파수 하한에 따라 나타낸 그래프이다.

도 6은 처리장치가 초음파 스펙트럼을 기존 방법인 $Q(v)=I(v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 도 3에 나타낸 광음향 측정기의 전달함수를 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 처프신호의 주파수 하한에 따라 나타낸 그래프이다.

도 7은 처리장치가 초음파 스펙트럼을 $Q(v)=I(v)/(-i2\pi v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 도 3에 나타낸 광음향 측정기의 전달함수를 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 처프신호의 주파수 하한에 따라 나타낸 그래프이다.

도 8은 광음향 측정기의 서로 다른 형태를 갖는 두 가지 전달함수를 예시적으로 나타낸 그래프이다.

도 9는 처리장치가 초음파 스펙트럼을 기존 방법인 $Q(v)=I(v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 도 8에 나타낸 광음향 측정기의 서로 다른 형태를 갖는 두 가지 전달함수를 각각 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 처프신호의 주파수 하한에 따라 나타낸 그래프이다.

도 10은 처리장치가 초음파 스펙트럼을 $Q(v)=I(v)/(-i2\pi v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 도 8에 나타낸 광음향 측정기의 서로 다른 형태를 갖는 두 가지 전달함수를 각각 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 처프신호의 주파수 하한에 따라 나타낸 그래프이다.

도 11은 본 발명에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 처프신호를 이용하여 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 처프신호를 이용하여 광흡수계수를 산출하는 방법에 대해 상세하게 설명한다. 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대해서는 그 상세한 설명을 생략하기로 한다.

[0017] 도 1은 본 발명에 따른 광흡수계수 산출 방법을 구현하는 장치의 개략도로서, 상기 장치는 광원(100), 광음향 측정기(200) 및 처리장치(300)를 포함하여 구성될 수 있다.

[0018] 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.

[0019] 광음향 효과는 광확산매체(10) 내부에 위치하는 광흡수체(20)에 입사빔이 흡수될 때 상기 광흡수체(20)의 열탄성(thermo-elastic) 팽창에 의해 초음파가 발생하는 현상을 의미한다.

[0020] 광음향 분야에서는 다음의 수학적 1과 같은 시간 의존성(time-dependent) 파동 방정식이 알려져 있다.

[0021] [수학적 1]

$$(\nabla^2 - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2})g_{PA}(\vec{r},t) = -\frac{\beta}{C_p} \frac{\partial H(\vec{r},t)}{\partial t}$$

[0023] 상기 수학적 1에서 $g_{PA}(\vec{r},t)$ 는 광확산매체(10)의 내부에 위치하는 광흡수체(20)가 광을 흡수함에 따라 발생시키는 초음파 신호값을 나타낸다. 그리고 $H(\vec{r},t)$ 는 광흡수체(20)가 광을 흡수함에 따라 발생하는 열분포를 나타낸다.

[0024] 그리고 상기 수학적 1에서 v_s 는 초음파의 속도, β 는 광흡수체(20)의 열팽창 계수, 그리고 C_p 는 광흡수체(20)의 정압비열을 나타내는데, 이들은 광음향 효과와 관련한 대개의 상황에서 상수로서 취급될 수 있는 값들이다.

[0025] 상기 수학적 1에 의하면, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파 신호값은 광흡수체(20)의 열분포가 시간에 따라 변화하는 경우에만 나타난다는 것을 알 수 있으며, 이는 곧 광흡수체(20)에서 초음파가 발생하기 위해서는 광원(100)에서 방출되는 입사빔이 광흡수체(20)의 열분포를 시간에 따라 변화시킬 수 있어야 한다는 것을 의미한다.

[0026] 다만, 입사빔이 단일 주파수를 갖는 사인(sine) 형태의 신호일 경우에는 광흡수체(20)에서 이와 동일한 형태의

초음파 신호가 발생하기 때문에, 광음향 측정기(200)로 초음파 신호값을 측정하더라도 광확산매체(10)의 표면으로부터 광흡수체(20)까지의 위치(즉, 광확산매체(10)의 두께; L)에 대한 정보를 알아내기 어렵다. 이에 따라, 종래 라이다 장치에서는 대상물에 선형 주파수(linear frequency) 신호인 처프신호를 입사시킨 후 그로부터 반사되어 돌아오는 신호에 정합 필터링 처리를 수행함으로써, 대상물의 검출 및 대상물까지의 거리 측정을 수행하고 있다.

[0027] 본 발명은 이와 같은 라이다 장치에서와 마찬가지로, 광원(100)을 통해 방출되는 입사빔으로서 선형 주파수 신호인 처프신호를 이용한다.

[0028] 도 2는 광원을 통해 방출되는 처프신호를 예시적으로 나타낸 그래프로서, 도 2의 (a)에서 x축은 시간을, y축은 주파수를 나타내고, 도 2의 (b)에서 x축은 시간을, y축은 신호의 크기를 나타낸다. 이 때, 도 2의 (a)에서 T_{ch} 는 처프신호의 시간 간격(time interval)에 해당하며, T_{ch1} 은 시간 간격의 하한을, T_{ch2} 는 시간 간격의 상한을 나타낸다. 그리고 B_{ch} 는 처프신호의 주파수 범위(frequency range)에 해당하며, B_{ch1} 은 주파수 하한을, B_{ch2} 는 주파수 상한을 나타낸다.

[0029] 본 발명에서는 이와 같은 처프신호를 광확산매체(10)에 조사하여 상기 광확산매체(10)의 내부에 위치하는 광흡수체(20)에 흡수시키며, 광흡수체(20)가 그 표면에 도달하는 처프신호를 흡수할 경우에는 시간에 따른 열분포의 변화로 인해 초음파를 발생시키게 된다.

[0030] 광음향 측정기(200)는 광확산매체(10) 상에 위치하여, 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 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 맞춰진 것으로 나타냈지만, 상기 포커스는 광흡수체(20)의 표면으로부터 위쪽이나 아래쪽으로 소정 거리 이격된 위치에 맞춰질 수도 있다. 또한, 광음향 측정기(200)는 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 신호값을 측정하기만 하면 되므로, 반드시 포커스를 형성하여 상기 신호값을 측정하는 것으로 한정되는 것은 아니다.

[0031] 처리장치(300)는 광원(100)과 연결되어 있어 광원(100)에서 방출되는 처프신호의 시간 간격(T_{ch}) 및 주파수 범위(B_{ch})를 조정하거나, 주파수 범위(B_{ch})가 상이한 처프신호를 연속해서 방출하도록 조정할 수 있다. 처리장치(300)는 처프신호의 시간 간격을 수 ms 이내로 조정한다. 한편, 처리장치(300)는 광음향 측정기(200)와도 연결되어 있어 광음향 측정기(200)에 의해 측정되는 초음파 신호값을 입력받을 수 있다.

[0032] 처리장치(300) 내에는 광음향 측정기(200)로부터 입력받는 초음파 신호값에 대하여 주파수 영역에서 정합 필터링 처리를 수행함으로써 정합 필터링된 초음파 스펙트럼을 산출하고, 상기 정합 필터링된 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환하여 정합 필터링된 초음파 신호값을 획득하며, 상기 정합 필터링된 초음파 신호값에 대하여 그 최대값을 산출할 수 있는 프로그램이 구비되어 있다.

[0033] 또한, 처리장치(300) 내에는 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값들 사이의 비율을 구하고, 상기 비율에 기초하여 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수 있는 프로그램이 구비되어 있다.

[0034] 이에 따라, 처리장치(300)는 광음향 측정기(200)로부터 초음파 신호값을 입력받아 각종 처리를 수행함으로써 광흡수체(20)의 광흡수계수를 정량적으로 산출할 수 있게 되는데, 이하에서는 처리장치(300)의 동작에 대해 보다 구체적으로 설명하기로 한다.

[0035] 우선, 처리장치(300)가 광음향 측정기(200)로부터 초음파 신호값($g_{PA}(t)$)을 입력받은 뒤, 상기 초음파 신호값($g_{PA}(t)$)을 주파수 영역에서(즉, 초음파 스펙트럼 $G_{PA}(v)$)를 획득하기 위하여 초음파 신호값 $g_{PA}(t)$ 를 푸리에 변환하는 것을 의미함) 정합 필터링 처리(정합 필터링 처리인자 $Q(v)$ 이용)를 수행함으로써 정합 필터링된 초음파 스펙트럼($G_{MF}(v)$)을 산출하는 동작과, 상기 정합 필터링된 초음파 스펙트럼($G_{MF}(v)$)을 인버스 푸리에 변환하여 정합 필터링된 초음파 신호값을 획득(즉, $G_{MF}(v)$ 를 인버스 푸리에 변환하여 정합 필터링된 초음파 신호값 $g_{MF}(t)$ 를 획득)는 동작과, 상기 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 산출하는 동작에 대해 설명한다.

[0036] 다음의 수학적 식 2는 정합 필터링된 초음파 스펙트럼($G_{MF}(v)$)을 나타낸 것으로, 이는 초음파 스펙트럼 $G_{PA}(v)$ 와 정합 필터링 처리인자 $Q(v)$ 의 컨쥬게이트($Q^*(v)$)의 곱에 해당한다.

[0037] [수학식 2]

$$G_{MF}(\nu) = G_{PA}(\nu)Q^*(\nu) = e^{-\mu_{eff}L} e^{-i2\pi\nu t_L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} [S_{PA}(\nu)I(\nu)T(\nu)i2\pi\nu]Q^*(\nu)$$

[0038]

[0039] 상기 수학식 2에서 μ_{eff} 는 광확산매체(10)의 유효산란계수, L은 광확산매체(10)의 두께, ν 는 주파수, t_L 은 광 흡수체(20)에서 발생하는 초음파가 광확산매체(10)의 표면까지 도달하는 시간($t_L=L/v_s$)이고, μ_a 는 광흡수체(20)의 광흡수계수이다. 그리고 $S_{PA}(\nu)$ 는 광흡수체(20)의 반응함수, $I(\nu)$ 는 초음파의 스펙트럼, $T(\nu)$ 는 광음향 측정기(20)의 전달함수이고, $i2\pi\nu$ 는 상기 수학식 1에서 열분포의 시간 도함수인 $\frac{\partial H(\vec{r},t)}{\partial t}$ 로 인해 산출되는 값이다.

[0040] 일반적으로 라이다 장치에서는 정합 필터링 처리를 위해 정합 필터링 처리인자로서 입사빔의 스펙트럼을 선택하고 있다. 이와 마찬가지로, 만일 처리장치(300)가 정합 필터링 처리 인자 $Q(\nu)$ 로서 초음파의 스펙트럼인 $I(\nu)$ 를 선택(즉, $Q(\nu)=I(\nu)$)하게 되면, 다음의 수학식 3과 같은 정합 필터링된 초음파 스펙트럼이 산출된다.

[0041] [수학식 3]

$$G_{MF}(\nu) = G_{PA}(\nu)Q^*(\nu) = e^{-\mu_{eff}L} e^{-i2\pi\nu t_L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} [S_{PA}(\nu)|I(\nu)|^2 T(\nu)i2\pi\nu]$$

[0042]

[0043] 그 뒤, 처리장치(300)가 상기 정합 필터링된 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환(Inverse Fourier Transform)하게 되면, 다음의 수학식 4와 같은 정합 필터링된 초음파 신호값이 획득된다.

[0044] [수학식 4]

$$g_{MF}(t) = e^{-\mu_{eff}L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} \int_{-\infty}^{\infty} [S_{PA}(\nu)|I(\nu)|^2 T(\nu)i2\pi\nu e^{i2\pi\nu(t-t_L)}] d\nu$$

[0045]

[0046] 한편, 광원(100)을 통해 방출되는 초음파 신호는 시간 영역에서 다음의 수학식 5와 같이 나타낼 수 있다.

[0047] [수학식 5]

$$I(t) = I_0 \cos(\omega_0 t + \pi B_{ch} t^2 / T_{ch}) \text{rect}(t / T_{ch})$$

[0048]

[0049] 수학식 5에서 I_0 는 초음파의 최대값이고, ω_0 는 각 진동수이다. 수학식 5에 의하면, 수학식 4에 나타난 $|I(\nu)|^2$ 은 주파수 범위 $B_{ch}=B_{ch2}-B_{ch1}$ 을 갖는 구형 함수(rectangular function)로 근사화된다는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 상기 수학식 4는 다음의 수학식 6과 같이 나타낼 수 있다(이하의 수학식에서, k는 상수).

[0050] [수학식 6]

$$g_{MF}(t) = k e^{-\mu_{eff}L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} \int_{B_{ch1}}^{B_{ch2}} [S_{PA}(\nu)T(\nu)i2\pi\nu e^{i2\pi\nu(t-t_L)}] d\nu$$

[0051]

[0052] 한편, 도 3은 광음향 측정기의 전달함수를 예시적으로 나타낸 그래프로서, 보다 구체적으로는 광음향 측정기(200)의 전달함수($T(\nu)$)의 세기, 실수부의 크기 및 허수부의 크기를 정규화하여 나타낸 그래프이다.

[0053] 그리고 도 4는 도 3에 나타낸 광음향 측정기의 전달함수를 고려했을 때, 처리장치에 의해 기존 방법인 $Q(\nu)=I(\nu)$ 로 정합 필터링된 초음파 신호값을 나타낸 그래프이다. 부연하면, 도 4는 도 3에 나타낸 나타낸 광음향 측정기(200)의 전달함수($T(\nu)$)를 상기 수학식 6에 대입하고, 광확산매체(10)의 두께를 20mm($L=0.02m$), 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 속도를 1500m/s($v_s=1500m/s$)로 하였을 때, 처리장치(300)에 의해 $Q(\nu)=I(\nu)$ 로 정합 필터링된 초음파 신호값을 각기 다른 주파수 범위(B_{ch})마다 시뮬레이션을 통해 나타낸 그래프이다.

[0054] 도 4에 의하면, 광원(100)에서 초음파가 방출되는 시점(0초)부터 약 $13.33 \mu s (= \frac{0.02m}{1500m/s})$ 전후에서, 정합 필터링된 초음파 신호값이 최대가 된다는 것을 알 수 있다. 또한, 도 4에 의하면, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값은 초음파의 주파수 범위($B_{ch}: B_{ch1}-B_{ch2}$)에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다. 만일 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값이 초음파의 주파수 범위에 따라 어떤 일정한 관계가 성립할 경우에는 그 최대값의 변화

를 통해 광흡수체(20)의 광흡수계수를 구할 수 있게 된다.

- [0055] 도 5는 처리장치(300)가 초음파 스펙트럼($G_{PA}(v)$)을 기존 방법인 $Q(v)=I(v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 이상적인 광음향 측정기(200)의 전달함수를 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값($g_{MF}(t)$)의 최대값을 처프신호의 주파수 하한에 따라 나타낸 그래프이다. 여기서 광음향 측정기(200)의 전달함수($T(v)$)가 이상적이라는 것은, 그 전달함수의 세기(절대값)가 주파수 전 범위에 걸쳐 1이라는 것을 의미한다.
- [0056] 도 5에 대해 부연하면, 도 5는 처프신호의 주파수 상한(B_{ch2})을 6MHz('점'으로 표시)와 3.5MHz('원형'으로 표시)로 각각 고정시킨 상태에서, x축을 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})으로 하고, y축을 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값(정규화하여 나타냄)으로 하여 나타낸 도면이다.
- [0057] 도 5에 의하면, 처프신호의 주파수 상한(B_{ch2})을 고정시킨 상태에서 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})을 변화시키면, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값은 광흡수계수(μ_a)마다 달리 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값은 처프신호의 주파수 상한이 6MHz와 3.5MHz로 상이하더라도, 주파수 하한이 동일한 지점에서는 주파수 상한과 무관하게 대략 동일한 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.
- [0058] 한편, 도 6은 처리장치(300)가 초음파 스펙트럼($G_{PA}(v)$)을 기존 방법인 $Q(v)=I(v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 도 3에 나타낸 전달함수($T(v)$)를 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})에 따라 나타낸 그래프이다. 부연하면, 도 6은 처프신호의 주파수 상한(B_{ch2})을 6MHz('점'으로 표시)와 3.5MHz('원형'으로 표시)로 각각 고정시킨 상태에서, x축을 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})으로 하고, y축을 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값(정규화함)으로 하여 나타낸 도면이다.
- [0059] 도 6에 의하면, 처프신호의 주파수 상한(B_{ch2})을 고정시킨 상태에서 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})을 변화시키면, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값은 광흡수계수(μ_a)마다 달리 나타난다는 것을 알 수 있다. 하지만 정합 필터링된 초음파 신호값을 획득함에 있어서 광음향 측정기(200)의 전달함수를 고려할 경우에는, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값이 상기 전달함수에 의해 큰 영향을 받게 되어, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값, 처프신호의 주파수 범위 및 광흡수계수 간에 일정한 관계를 도출해내기 어렵다는 것을 알 수 있다.
- [0060] 이상적이 아닌 실제 광음향 측정에 있어서 광음향 측정기(200)의 전달함수는 항상 고려되어야 한다. 즉, 광원(100), 광음향 측정기(200) 및 처리장치(300)를 통해 주파수 영역에서 광흡수계수를 산출하기 위해서는, 도 3 및 상기 수학식 2 등에 나타낸 바와 같이 광음향 측정기(200)의 전달함수($T(v)$)가 고려될 수밖에 없다.
- [0061] 하지만 도 6에서 알 수 있듯이, 처리장치(300)가 초음파 스펙트럼($G_{PA}(v)$)을 $Q(v)=I(v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행할 경우에는, 광음향 측정기(200)의 전달함수의 영향으로 인해 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값, 처프신호의 주파수 범위 및 광흡수계수 사이에 어떤 일정한 관계를 도출해낼 수 없게 된다.
- [0062] 이 때, 광음향 측정기(200)의 전달함수를 구한 뒤 이를 처리장치(300)에 입력시키는 방법을 통해 광흡수계수를 산출하는 방안도 고려될 수 있지만, 이와 같은 방안은 같은 종류의 광음향 측정기(200)에서도 달라질 수 있는 전달함수를 일일이 고려해야 한다는 점에서 매우 번거롭고 비효율적인 방안이 된다.
- [0063] 한편, 상기 수학식 2에 의하면 초음파 스펙트럼($G_{PA}(v)$)은 $i2\pi v$ 를 가지고 있음을 알 수 있는데, 이는 열분포의 시간 도함수로 인해 산출되는 값으로서 기존의 라이다 측정에서와는 달리 광음향 측정에서만 존재하는 특유의 값이다.
- [0064] 이에 따라, 본 발명에서는 처리장치(300)가 광음향 측정기(200)로부터 입력받는 초음파 신호값에 대하여 주파수 영역(초음파 스펙트럼; $G_{PA}(v)$)에서 $i2\pi v$ 를 제거하기 위한 정합 필터링, 즉 상기 수학식 2에 $Q(v)=I(v)$ 를 대입하는 정합 필터링 처리 대신, $Q(v)=I(v)/(-i2\pi v)$ 를 대입하는 정합 필터링 처리를 수행하는 것을 특징으로 한다.
- [0065] 이하에서는, 처리장치(300)가 $Q(v)=I(v)/(-i2\pi v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행함으로써, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값이 광음향 측정기(200)의 전달함수에 의해 어떠한 영향을 받는지와, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값, 처프신호의 주파수 범위 및 광흡수계수 간에 일정한 관계가 도출될 수 있는지에 대해서 살펴보기로 한다.

[0066] 처리장치(300)가 정합 필터링 처리인자 $Q(\nu)$ 로서 처프신호의 스펙트럼인 $I(\nu)$ 를 $(-i2\pi\nu)$ 로 나눈 값을 선택 (즉, $Q(\nu)=I(\nu)/(-i2\pi\nu)$)하게 되면, 상기 수학식 2는 다음의 수학식 7과 같은 정합 필터링된 초음파 스펙트럼 $G_{MF}(\nu)$ 가 산출된다.

[0067] [수학식 7]

[0068]
$$G_{MF}(\nu) = G_{PA}(\nu)Q^*(\nu) = e^{-\mu_{eff}L} e^{-i2\pi\nu t_L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} [S_{PA}(\nu)I(\nu)T(\nu)]$$

[0069] 그 뒤, 처리장치(300)가 상기 수학식 7과 같이 정합 필터링된 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환하게 되면, 다음의 수학식 8과 같은 정합 필터링된 초음파 신호값 $g_{MF}(t)$ 가 획득된다.

[0070] [수학식 8]

[0071]
$$g_{MF}(t) = e^{-\mu_{eff}L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} \int_{-\infty}^{\infty} [S_{PA}(\nu)|I(\nu)|^2 T(\nu) e^{i2\pi\nu(t-t_L)}] d\nu$$

[0072] 상술한 바와 같이, 광원(100)을 통해 방출되는 처프신호는 시간 영역에서 상기 수학식 5와 같이 나타낼 수 있다. 상기 수학식 5에 의하면, 상기 수학식 8에 나타낸 $|I(\nu)|^2$ 는 주파수 범위 $B_{ch}=B_{ch2}-B_{ch1}$ 을 갖는 구형 함수로 근사화된다는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 상기 수학식 8은 다음의 수학식 9와 같이 나타낼 수 있다.

[0073] [수학식 9]

[0074]
$$g_{MF}(t) = k e^{-\mu_{eff}L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} \int_{B_{ch1}}^{B_{ch2}} [S_{PA}(\nu)T(\nu) e^{i2\pi\nu(t-t_L)}] d\nu$$

[0075] 상기 수학식 9에 의하면 상기 수학식 6과는 달리, 정합 필터링된 초음파 신호값 $g_{MF}(t)$ 에서 열분포의 시간 도함수로 인해 산출되는 $i2\pi\nu$ 가 제거된 것을 알 수 있다.

[0076] 한편, 도 4는 처리장치(300)에 의해 $Q(\nu)=I(\nu)$ 로 정합 필터링된 초음파 신호값 $g_{MF}(t)$ 을 나타낸 그래프이지만, $Q(\nu)=I(\nu)/(-i2\pi\nu)$ 로 정합 필터링된 경우에도 그 초음파 신호값의 분포는 도 3에 나타낸 바와 같이, 어느 특정 지점(예를 들어, 광확산매체(10)의 두께와 광흡수체(20)에서 발생하는 초음파의 속도가 도 4의 경우와 동일하다면 약 13.33 μ s 전후 지점에서 최대값을 갖는 형태로 나타나게 된다.

[0077] 도 7은 처리장치(300)가 초음파 스펙트럼($G_{PA}(\nu)$)을 $Q(\nu)=I(\nu)/(-i2\pi\nu)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 도 3에 나타낸 광음향 측정기의 전달함수를 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})에 따라 나타낸 그래프이다. 부연하면, 도 7은 처프신호의 주파수 상한(B_{ch2})을 6MHz('점'으로 표시)와 3.5MHz('원형'으로 표시)로 각각 고정시킨 상태에서, x축을 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})으로 하고, y축을 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값(정규화함)으로 하여 나타낸 도면이다.

[0078] 도 7에 의하면, 처프신호의 주파수 상한(B_{ch2})을 고정시킨 상태에서 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})을 변화시키면, $Q(\nu)=I(\nu)/(-i2\pi\nu)$ 로 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값은 광흡수계수(μ_a)마다 달리 나타난다는 것을 알 수 있다. 게다가, $Q(\nu)=I(\nu)/(-i2\pi\nu)$ 로 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값은 처프신호의 주파수 상한이 6MHz와 3.5MHz로 상이하더라도, 주파수 하한이 동일한 지점에서는 주파수 상한과 무관하게 대략 동일한 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

[0079] 즉, 도 7에 의하면 상기 도 6에서 살펴본 바와는 달리, 정합 필터링된 초음파 신호값을 획득함에 있어서 광음향 측정기(200)의 전달함수를 고려하더라도, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값과 광흡수계수와의 관계가 처프신호의 주파수 상한(B_{ch2}) 변화에 따라 별다른 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 주파수 상한을 고정시킨 상태에서 주파수 하한만 변화시킨 처프신호들을 광흡수체(20)에 흡수시키고, 처리장치(300)에서 일련의 처리 과정을 거쳐 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 각각 산출해낸다면 그로부터 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출할 수 있음을 알 수 있다.

[0080] 한편, 도 8은 광음향 측정기(200)의 서로 다른 형태를 갖는 두 가지 전달함수($T_1(\nu)$, $T_2(\nu)$)를 예시적으로 나타낸 그래프로서, 이하에서는 처리장치(300)가 도 8에 나타낸 각각의 전달함수를 고려하여 정합 필터링된 초음

과 신호값의 최대값을 산출할 경우, 상기 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값이 광음향 측정기(200)의 전달 함수에 의해 어떠한 영향을 받는지와, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값, 처프신호의 주파수 범위 및 광흡수계수 간에 일정한 관계가 도출될 수 있는지에 대해서 살펴보기로 한다.

[0081] 도 9는 처리장치(300)가 초음파 스펙트럼($G_{PA}(v)$)을 기존 방법인 $Q(v)=I(v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 도 8에 나타난 광음향 측정기(200)의 서로 다른 형태를 갖는 두 가지 전달함수($T_1(v)$, $T_2(v)$)를 각각 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})에 따라 나타난 그래프이다. 부연하면, 도 9는 처프신호의 주파수 상한(B_{ch2})을 6MHz('점'으로 표시)와 3.5MHz('원형'으로 표시)로 각각 고정시킨 상태에서, x축을 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})으로 하고, y축을 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값(정규화함)으로 하여 나타난 도면이다.

[0082] 도 9에 의하면, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값은 광흡수계수(μ_a)마다 달리 나타난다는 것을 알 수 있다. 하지만 처리장치(300)가 초음파 스펙트럼($G_{PA}(v)$)을 $Q(v)=I(v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행할 경우에는, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값이 광음향 측정기(200)의 전달함수($T_1(v)$, $T_2(v)$)에 따라 크게 달라지기 때문에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값, 처프신호의 주파수 범위 및 광흡수계수 간에 일정한 관계를 도출해내기 어렵다는 것을 알 수 있다.

[0083] 이에 반해, 도 10은 처리장치(300)가 초음파 스펙트럼을 $Q(v)=I(v)/(-i2\pi v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행하고 도 8에 나타난 광음향 측정기의 서로 다른 형태를 갖는 두 가지 전달함수($T_1(v)$, $T_2(v)$)를 각각 고려한 경우에, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 처프신호의 주파수 하한에 따라 나타난 그래프이다. 부연하면, 도 10은 처프신호의 주파수 상한(B_{ch2})을 6MHz('점'으로 표시)와 3.5MHz('원형'으로 표시)로 각각 고정시킨 상태에서, x축을 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})으로 하고, y축을 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값(정규화함)으로 하여 나타난 도면이다.

[0084] 도 10에 의하면, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값은 광흡수계수(μ_a)마다 달리 나타난다는 것을 알 수 있다. 게다가, 도 10에 의하면 처리장치(300)가 초음파 스펙트럼($G_{PA}(v)$)을 $Q(v)=I(v)/(-i2\pi v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행할 경우에는, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값은 광음향 측정기(200)의 전달함수($T_1(v)$, $T_2(v)$)가 상이하더라도, 주파수 하한이 동일한 지점에서는 대략 동일한 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

[0085] 즉, 도 10에 의하면 도 9의 경우와는 달리, 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값이 광음향 측정기(200)의 전달함수($T_1(v)$, $T_2(v)$)에 의해 별다른 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

[0086] 이상에서 살펴본 바와 같이, 처프신호의 주파수 범위를 서로 달리하여(예를 들어, 주파수 상한(B_{ch2})은 고정시킨 채 주파수 하한(B_{ch1})만 변화시킨 처프신호) 광흡수체(20)에 흡수시키고, 처리장치(300)는 초음파 스펙트럼을 $Q(v)=I(v)/(-i2\pi v)$ 로 정합 필터링 처리를 수행한 뒤 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값을 산출한다면, 광음향 측정기(200)의 전달함수의 형태에 거의 무관하게 범용적으로 사용될 수 있는 광흡수계수 산출 방법을 도출해낼 수 있게 된다.

[0087] 도 11은 본 발명에 따른 주파수 영역 광음향 측정에서 처프신호를 이용하여 광흡수계수를 산출하는 방법을 나타낸 흐름도로서, 본 발명에서는 처리장치(300)가 광음향 측정기(200)로부터 초음파 신호값을 입력받아 주파수 영역에서 정합 필터링 처리를 수행하고, 그에 따라 획득되는 정합 필터링된 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환하며, 그 결과 획득되는 정합 필터링된 초음파 신호값에 대하여 이의 최대값을 산출하는 과정을 반복 수행한 뒤, 그 최대값들 사이의 비율에 기초하여 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출하는 방안을 제공한다.

[0088] 본 발명에 따른 광흡수계수 산출 방법은, 우선 광원(100)을 통해 방출되는 제1 처프신호를 광확산매체(10)에 조사하여 상기 광확산매체(10)의 내부에 위치하는 광흡수체(20)에 흡수시킨다(S110). 광원(100)을 통해 방출되는 제1 처프신호는 광확산매체(10) 내에서 전파 및 확산되면서 광흡수체(20)에 도달하게 되며, 광흡수체(20)가 제1 처프신호를 흡수할 경우에는 시간에 따른 열분포의 변화로 인해 초음파를 발생시키게 된다. 이하에서는, 제1 처프신호의 주파수 하한을 B_{ch1} , 제1 처프신호의 주파수 상한을 B_{ch2} 로 하여 설명하기로 한다.

[0089] 다음으로, 광음향 측정기(200)를 이용하여 상기 제1 처프신호로 인해 광흡수체(20)에서 발생하는 제1 초음파 신

호값을 측정한다(S120).

[0090] 다음으로, 광원(100) 및 광음향 측정기(200)와 연결되는 처리장치(300)가 상기 제1 초음파 신호값을 입력받아 주파수 영역에서 정합 필터링 처리를 수행하여 정합 필터링된 제1 초음파 스펙트럼을 산출한다(S130). 이 때, 처리장치(300)는 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값이 광음향 측정기(200)의 전달함수에 의한 영향을 받지 않도록, 정합 필터링 처리인자를 $Q_1(v)$ 라 할 때 $Q_1(v)=I_1(v)/(-i2\pi v)$ (여기서, $I_1(v)$ 는 제1 처프신호의 스펙트럼이고, i 는 허수단위이며, v 는 주파수임)를 만족시키는 값으로 정합 필터링 처리를 수행한다. 상기 정합 필터링된 제1 초음파 스펙트럼은 다음의 수학적 식 10과 같이 나타낼 수 있다.

[0091] [수학적 식 10]

[0092]
$$G_{MF}(v) = G_{PA}(v)Q^*(v) = e^{-\mu_{eff}L} e^{-i2\pi v t_L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} [S_{PA}(v)I_1(v)T(v)]$$

[0093] 다음으로, 처리장치(300)가 상기 정합 필터링된 제1 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환하여 정합 필터링된 제1 초음파 신호값을 획득한다(S140). 처리장치(300)가 상기 수학적 식 10을 인버스 푸리에 변환할 경우 획득되는 정합 필터링된 제1 초음파 신호값은 다음의 수학적 식 11과 같이 나타낼 수 있다.

[0094] [수학적 식 11]

[0095]
$$g_{MF}(t) = ke^{-\mu_{eff}L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} \int_{B_{ch1}}^{B_{ch2}} [S_{PA}(v)T(v)e^{i2\pi v(t-t_L)}] dv$$

[0096] 상기 수학적 식 11에 의하면, 정합 필터링된 제1 초음파 신호값은 적분 구간이 제1 처프신호의 하한(B_{ch1})부터 제1 처프신호의 상한(B_{ch2})까지로 된다는 것을 알 수 있다.

[0097] 다음으로, 처리장치(300)가 상기 S140에서 획득한 정합 필터링된 제1 초음파 신호값의 최대값을 산출한다(S150). 즉, 처리장치(300)는 수학적 식 11과 같이 정합 필터링된 제1 초음파 신호값에 대하여 그 신호값의 최대값을 산출한다.

[0098] 후술하는 S160부터 S200까지의 단계는 상술한 S110부터 S150까지의 단계를 반복하여 진행하되, 제1 처프신호와 는 주파수 범위가 상이한 제2 처프신호를 광흡수체(20)에 흡수시킨다.

[0099] 즉, 상기 S150 단계 이후에, 광원(100)을 통해 방출되는 제2 처프신호를 광확산매체(10)에 조사하여 상기 광확산매체(10)의 내부에 위치하는 광흡수체(20)에 흡수시킨다(S160). 이 때, 광원(100)을 통해 방출되는 제 2 처프신호는 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값이 광음향 측정기(200)의 전달함수에 의한 영향을 받지 않도록 하기 위하여, 상기 제1 처프신호와 주파수 상한은 동일하되 주파수 하한은 상이한 것이 바람직하다. 그리고 이 경우에는 주파수 하한을 달리하되, 주파수 상한은 임의의 값으로 고정시키기만 하면 되므로 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출함에 있어서 편의성이 확보될 수 있다.

[0100] 광원(100)을 통해 방출되는 제2 처프신호는 광확산매체(10) 내에서 전파 및 확산되면서 광흡수체(20)에 도달하게 되며, 광흡수체(20)가 상기 제2 처프신호를 흡수할 경우에는 시간에 따른 열분포의 변화로 인해 초음파를 발생시키게 된다. 한편, 상술한 바와 같이, 처리장치(300)는 광원(100)과 연결되어 있어, 광원(100)에서 방출되는 처프신호의 시간 간격 및 주파수 범위를 조정할 수 있으며, 서로 다른 주파수 범위를 갖는 처프신호를 연속해서 방출하도록 조정할 수 있다(즉, 광원(100)에서 제1 처프신호를 방출하도록 한 뒤, 곧바로 제2 처프신호를 방출하도록 할 수 있다). 이하에서는, 상기 제2 처프신호의 주파수 하한을 B_{ch1}' , 제2 처프신호의 주파수 상한을 B_{ch2} 로 하여 설명하기로 한다.

[0101] 다음으로, 광음향 측정기(200)를 이용하여 상기 제2 처프신호로 인해 광흡수체(20)에서 발생하는 제2 초음파 신호값을 측정한다(S170).

[0102] 다음으로, 광원(100) 및 광음향 측정기(200)와 연결되는 처리장치(300)가 상기 제2 초음파 신호값을 입력받아 주파수 영역에서 정합 필터링 처리를 수행하여 정합 필터링된 제2 초음파 스펙트럼을 산출한다(S180). 이 때, 처리장치(300)는 상기 S130 단계와 마찬가지로 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값이 광음향 측정기(200)의 전달함수에 의한 영향을 받지 않도록, 정합 필터링 처리인자를 $Q_2(v)$ 라 할 때 $Q_2(v)=I_2(v)/(-i2\pi v)$ (여기서, $I_2(v)$ 는 제2 처프신호의 스펙트럼이고, i 는 허수단위이며, v 는 주파수임)를 만족시키는 값으로 정합 필터링 처

리를 수행한다. 상기 정합 필터링된 제2 초음파 스펙트럼은 다음의 수학적 식 12와 같이 나타낼 수 있다.

[수학적 식 12]

$$G_{MF}(\nu) = G_{PA}(\nu)Q^*(\nu) = e^{-\mu_{eff}L} e^{-i2\pi\nu t_L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} [S_{PA}(\nu)L_2(\nu)T(\nu)]$$

다음으로, 처리장치(300)가 상기 정합 필터링된 제2 초음파 스펙트럼을 인버스 푸리에 변환하여 정합 필터링된 제2 초음파 신호값을 획득한다(S190). 처리장치(300)가 상기 수학적 식 12를 인버스 푸리에 변환할 경우 획득되는 정합 필터링된 제2 초음파 신호값은 다음의 수학적 식 13과 같이 나타낼 수 있다.

[수학적 식 13]

$$g_{MF}(t) = ke^{-\mu_{eff}L} \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mu_a}{v_s^2} \int_{B_{ch1}'}^{B_{ch2}} [S_{PA}(\nu)T(\nu)e^{i2\pi\nu(t-t_L)}]d\nu$$

상기 수학적 식 13에 의하면, 정합 필터링된 제2 초음파 신호값은 적분 구간이 제2 처프신호의 하한(B_{ch1'})부터 제2 처프신호의 상한(B_{ch2})까지로 된다는 것을 알 수 있다.

다음으로, 처리장치(300)가 상기 S190에서 획득한 정합 필터링된 제2 초음파 신호값의 최대값을 산출한다(S200). 즉, 처리장치는 상기 수학적 식 13과 같이 정합 필터링된 제2 초음파 신호값에 대하여 그 신호값의 최대값을 산출한다.

마지막으로, 처리장치(300)는 상기 S150에서 산출한 정합 필터링된 제1 초음파 신호값 및 상기 S200에서 산출한 정합 필터링된 제2 초음파 신호값 사이의 비율에 기초하여 광흡수체(20)의 광흡수계수를 산출한다(S210).

이하에서는, 상기 S210 단계를 통해 광흡수계수를 산출하는 모습을 예를 들어 설명한다.

처리장치(300)는 광원(100)을 조정하여 제1 처프신호를 방출시킨 뒤 연속해서 제2 처프신호를 방출시킬 수 있다. 이 때, 제1 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1})은 0.025MHz, 주파수 상한(B_{ch2})은 6MHz이고, 제2 처프신호의 주파수 하한(B_{ch1'})은 0.2MHz, 주파수 상한(B_{ch2})은 제1 처프신호의 주파수 상한과 동일한 6MHz로 할 수 있다.

만일, 제1 처프신호에 의해 발생하는 제1 초음파 신호값을 처리장치(300)가 입력받아 본 발명에 따른 방법으로 정합 필터링 처리를 수행한 뒤 정합 필터링된 제1 초음파 신호값의 최대값을 산출한 결과 4.0×10^{-6} [a.u.]이고, 제2 처프신호에 의해 발생하는 제2 초음파 신호값을 처리장치(300)가 입력받아 본 발명에 따른 방법으로 정합 필터링 처리를 수행한 뒤 정합 필터링된 제2 초음파 신호값의 최대값을 산출한 결과 1.8×10^{-6} [a.u.]라 했을 때, 처리장치(300)는 상기 정합 필터링된 제1 초음파 신호값의 최대값과 상기 정합 필터링된 제2 초음파 신호값 사이의 비율을 산출할 수 있다. 즉, 상기 예에서 제1 초음파 신호값의 최대값과 제2 초음파 신호값의 최대값 사이의 비율은 1:0.45가 되며, 도 7을 참고할 때 이와 같은 결과는 광흡수체(20)의 광흡수계수가 $200m^{-1}$ 을 의미하는 것임을 알 수 있다.

다만, 실제 적용에 있어서는 처리장치(300)가 상기 정합 필터링된 초음파 신호값의 최대값들 사이의 비율(상기 예에서, 1:0.45) 및 광흡수계수(상기 예에서, $200m^{-1}$)가 서로 대응하여 기록된 룩업 테이블(LUT)을 미리 구비해 놓을 수 있으며, 이와 같은 룩업 테이블을 통해 상기 정규화한 초음파 신호값의 최대값들 사이의 비율에 대응하는 광흡수계수를 산출할 수 있다.

이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다. 본 발명의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타내어지며, 특허청구범위의 의미, 범위 및 등가개념으로부터 도출되는 모든 변경 내지 변형된 형태는 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

부호의 설명

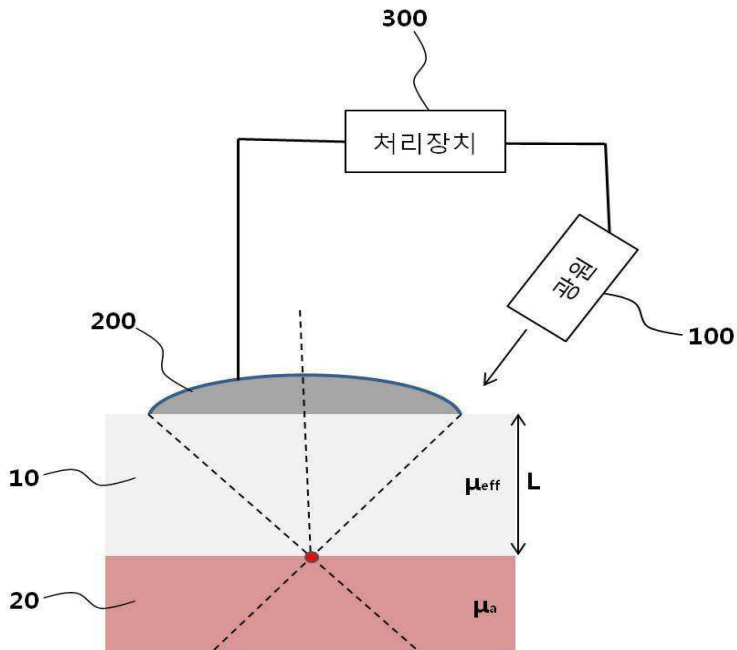
- [0116] 10: 광확산매체
- 20: 광흡수체
- 100: 광원

200: 광음향 측정기

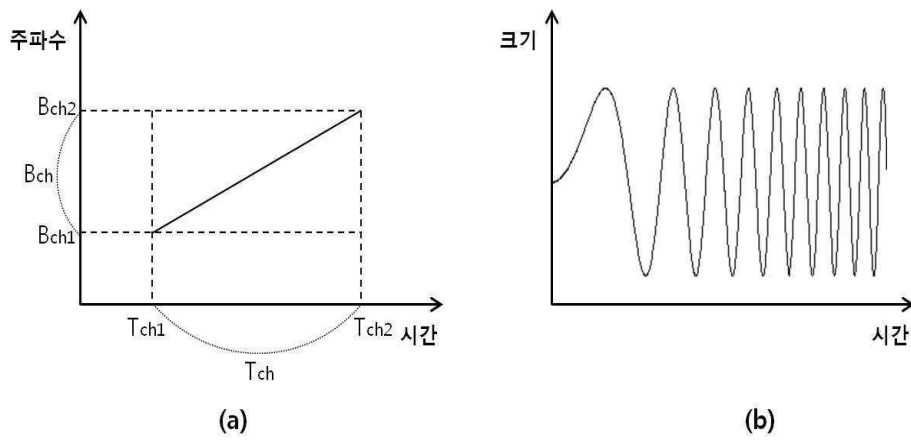
300: 처리장치

도면

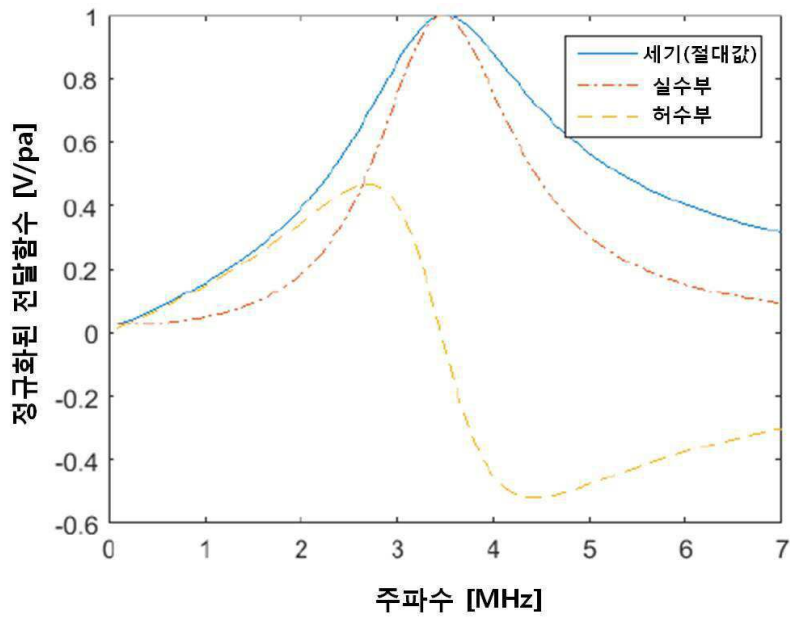
도면1



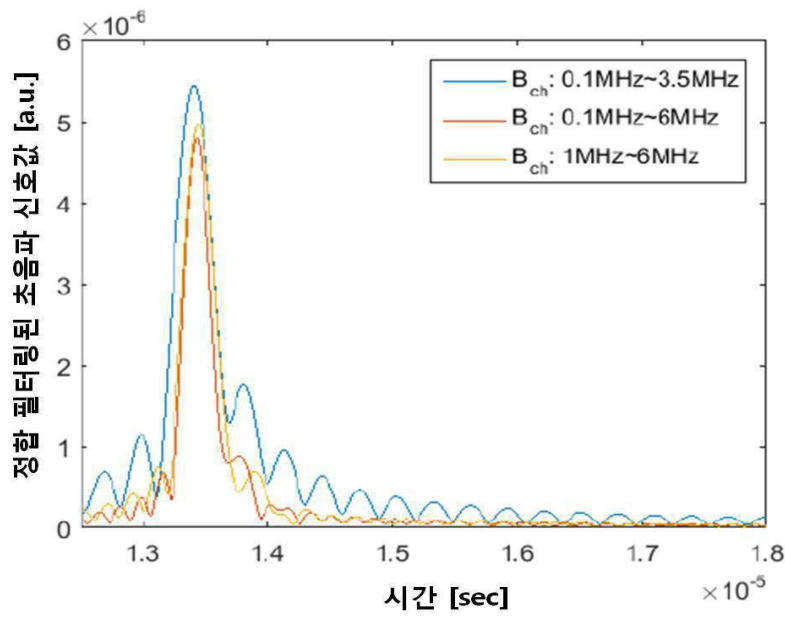
도면2



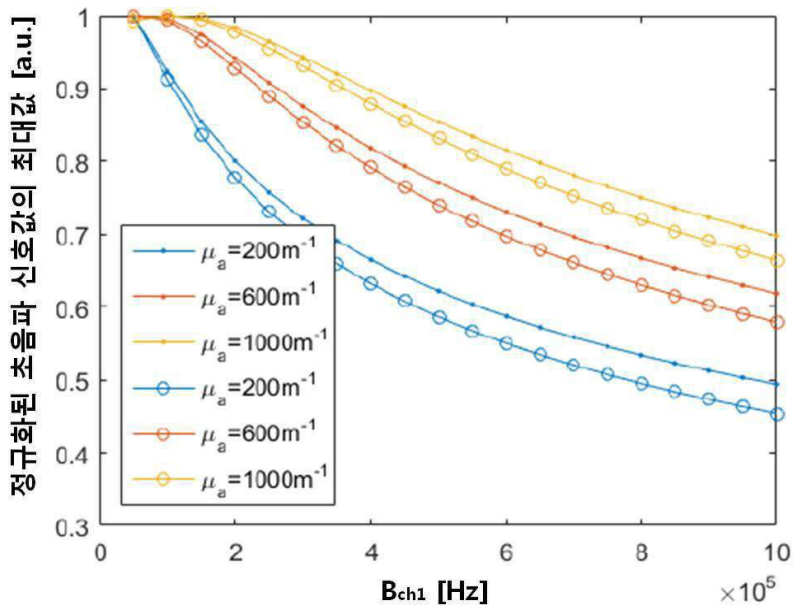
도면3



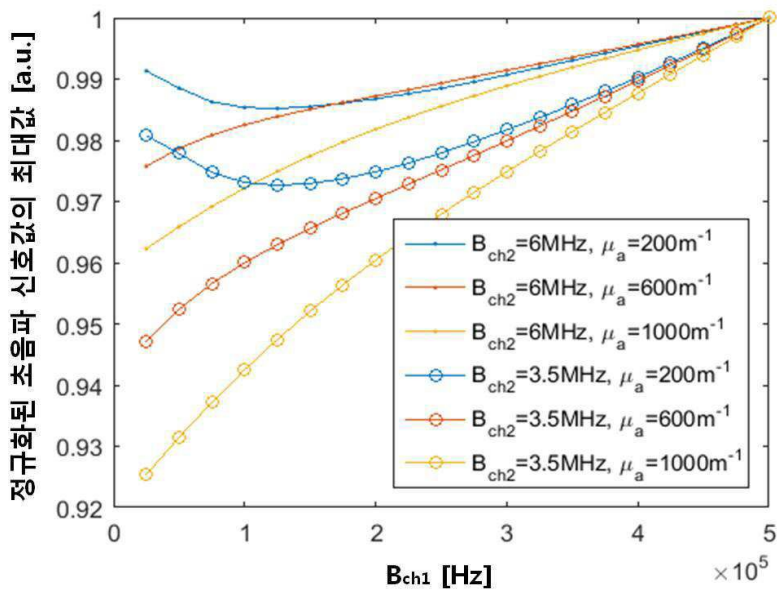
도면4



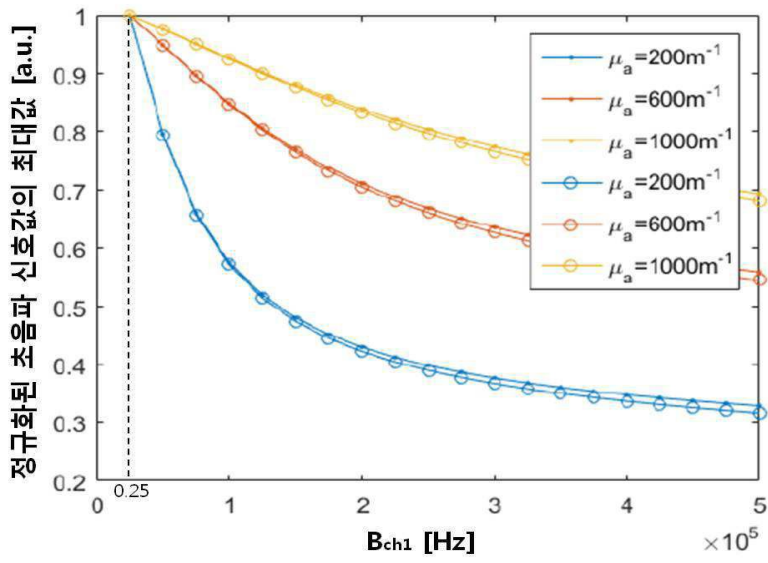
도면5



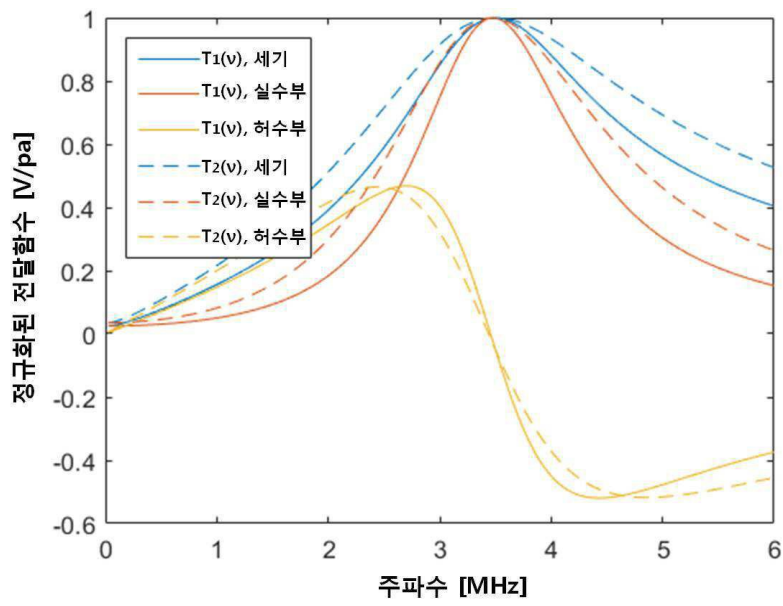
도면6



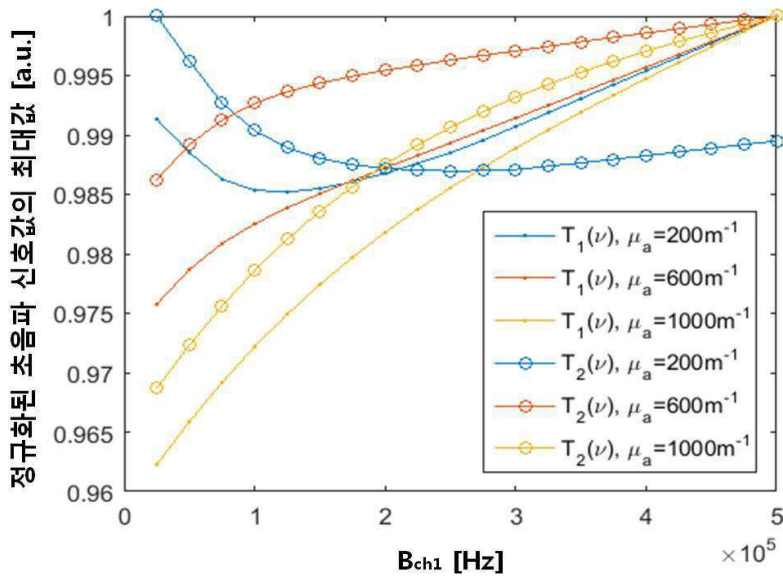
도면7



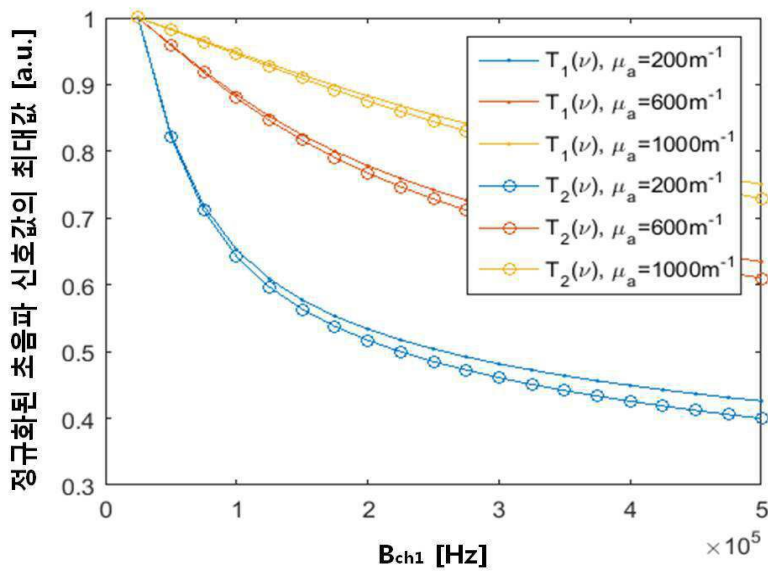
도면8



도면9



도면10



도면11

