



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0031802
(43) 공개일자 2025년03월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 29/44 (2006.01) G01N 29/09 (2006.01)
G01N 29/11 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 29/4463 (2013.01)
G01N 29/09 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0113728
(22) 출원일자 2023년08월29일
심사청구일자 2023년08월29일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
김건
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과
학기술원
백승오
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과
학기술원
(74) 대리인
특허법인지원

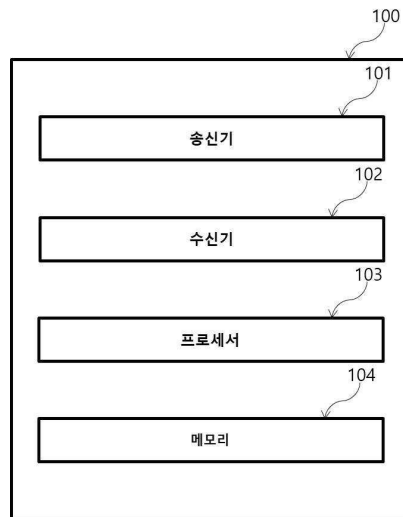
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 재료의 음향 비선형 계수 측정을 위한 전자 장치 및 동작 방법

(57) 요약

본 발명은 재료의 음향 비선형 계수를 결정하는 전자 장치 및 동작 방법에 관한 것으로, 초음파 신호를 발생시키는 송신기(transmitter), 상기 초음파 신호가 상기 재료 내부를 투과하면서 감쇠된 반사파 신호를 수신하는 수신기(receiver), 및 프로세서를 포함하고, 상기 프로세서는, 상기 재료의 경계에서 상기 반사파 신호의 반사 횟수에 기반하는 상기 재료 내에서의 상기 반사파 신호의 이동 거리를 이용하여, 상기 반사파 신호의 기본 조화파의 감쇠 보정을 위한 제1 감쇠 보정 정보 및 상기 반사파 신호의 이차 조화파의 감쇠 보정을 위한 제2 감쇠 보정 정보를 획득하고, 및 상기 제1 감쇠 보정 정보 및 상기 제2 감쇠 보정 정보를 이용하여, 상기 재료의 음향 비선형 계수(β)를 결정하도록 설정되는 전자 장치를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G01N 29/11 (2013.01)

G01N 29/4472 (2013.01)

G01N 2291/015 (2013.01)

G01N 2291/02491 (2013.01)

G01N 2291/044 (2013.01)

G01N 2291/048 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711195191
과제번호	00213559
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	사회기반시설 손상 예방 및 즉각적 대응을 위한 지능형 폴리머 센서 개발
기 여 율	90/100
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711186663
과제번호	2021R1A4A1030867
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	집단연구지원
연구과제명	탄소중립형 고성능 무시멘트 콘크리트 및 구조적용 기술 개발
기 여 율	5/100
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711171328
과제번호	2022R1F1A1065676
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	응력 시각화 폴리머 소재 기반 구조물 손상 진단 플랫폼 개발
기 여 율	5/100
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2022.06.01 ~ 2023.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

재료의 음향 비선형 계수를 결정하는 전자 장치에 있어서,

초음파 신호를 발생시키는 송신기(transmitter),

상기 초음파 신호가 상기 재료 내부를 투과하면서 감쇠된 반사파 신호를 수신하는 수신기(receiver), 및
프로세서를 포함하고,

상기 프로세서는,

상기 재료의 경계에서 상기 반사파 신호의 반사 횟수에 기반하는 상기 재료 내에서의 상기 반사파 신호의 이동 거리를 이용하여, 상기 반사파 신호의 기본 조화파의 감쇠 보정을 위한 제1 감쇠 보정 정보 및 상기 반사파 신호의 이차 조화파의 감쇠 보정을 위한 제2 감쇠 보정 정보를 획득하고, 및

상기 제1 감쇠 보정 정보 및 상기 제2 감쇠 보정 정보를 이용하여, 상기 재료의 음향 비선형 계수(β)를 결정하도록 설정된,

전자 장치.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 프로세서는,

하기의 [수학식 1]에 따라, 상기 제1 감쇠 보정 정보 및 상기 제2 감쇠 보정 정보를 획득하도록 설정된,
전자 장치.

[수학식 1]

$$(1) \eta_1(n) = e^{-\alpha_1(2n+1)L}$$

$$(2) \eta_2(n) = \frac{e^{-2\alpha_1(2n+1)L} - e^{-\alpha_2(2n+1)L}}{\alpha_2 - 2\alpha_1}$$

여기서, $\eta_1(n)$ 은 상기 제1 감쇠 보정 정보, $\eta_2(n)$ 은 상기 제2 감쇠 보정 정보, α_1 은 상기 기본 조화파 진동수에 대한 감쇠 계수, α_2 은 상기 이차 조화파 진동수에 대한 감쇠 계수, n은 상기 반사파의 반사 횟수, L은 상기 재료의 두께를 나타냄.

청구항 3

제2 항에 있어서,

상기 프로세서는,

하기의 [수학식 2]에 따라, 상기 제1 감쇠 보정 정보를 이용하여, 상기 기본 조화파 정보를 산출하고, 및

하기의 [수학식 3]에 따라, 상기 제2 감쇠 보정 정보를 이용하여, 상기 이차 조화파 정보를 산출하도록 설정된,
전자 장치.

[수학식 2]

$$u_1(L) = A_{10} \sum_{n=0}^N \sin[k(2n+1)L + nj\pi - \omega t] \eta_1(n)$$

[수학식 3]

$$u_2(L) = -\frac{\beta k^2 L A_{10}^2}{8} \sum_{n=0}^N \cos[2k(2n+1)L + nj\pi - 2\omega t] \eta_2(n)$$

여기서, $u_1(L)$ 은 상기 기본 조화파 정보, $u_2(L)$ 은 상기 이차 조화파 정보,

A_{10} 은 초기 가진 진폭, k 는 기본 파수, ω 는 기본 각진동수, β 는 상기 재료의 음향 비선형 계수를 나타냄.

청구항 4

제 2항에 있어서,

상기 프로세서는,

상기 제1 감쇠 보정 정보를 이용하여, 하기의 [수학식 4]에 따라, 상기 기본 조화파의 중첩에 대한 제1 진폭 보정 정보 및 제1 위상 보정 정보를 산출하고, 및

상기 제2 감쇠 보정 정보를 이용하여, 하기의 [수학식 5]에 따라, 상기 이차 조화파의 중첩에 대한 제2 진폭 보정 정보 및 제2 위상 보정 정보를 산출하도록 설정된,

전자 장치.

[수학식 4]

$$(1) \quad \varepsilon_1 = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^N \eta_1(n) \sin[k(2n+1)L + nj\pi]\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^N \eta_1(n) \cos[k(2n+1)L + nj\pi]\right)^2}$$

$$(2) \quad \varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{n=0}^N \eta_1(n) \sin[k(2n+1)L + nj\pi]}{\sum_{n=0}^N \eta_1(n) \cos[k(2n+1)L + nj\pi]} \right)$$

[수학식 5]

$$(1) \quad \varepsilon_2 = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^N \eta_2(n) \sin[2k(2n+1)L + nj\pi]\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^N \eta_2(n) \cos[2k(2n+1)L + nj\pi]\right)^2}$$

$$(2) \quad \varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{n=0}^N \eta_2(n) \sin[2k(2n+1)L + nj\pi]}{\sum_{n=0}^N \eta_2(n) \cos[2k(2n+1)L + nj\pi]} \right)$$

여기서, ε_1 는 상기 제1 진폭 보정 정보, ε_2 는 상기 제2 진폭 보정 정보, φ_1 는 상기 제1 위상 보정 정보, φ_2 는 상기 제2 위상 보정 정보를 나타냄.

청구항 5

제 4항에 있어서,

하기 [수학식 6]에 따라, 상기 제1 진폭 보정 정보 및 상기 제1 위상 보정 정보를 이용하여, 상기 기본 조화파 정보를 산출하고,

하기 [수학식 7]에 따라, 상기 제2 진폭 보정 정보 및 상기 제2 위상 보정 정보를 이용하여, 상기 이차 조화파 정보를 산출하도록 설정된,

전자 장치

[수학식 6]

$$u_1(L) = A_{10}E_1 \sin(\omega t - \varphi_1)$$

[수학식 7]

$$u_2(L) = -\frac{\beta k^2 L A_{10}^2}{8} E_2 \cos(2\omega t - \varphi_2)$$

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 프로세서는,

하기 [수학식 8]에 따라, 상기 제1 진폭 보정 정보, 상기 제2 진폭 보정 정보, 상기 기본 조화파 정보, 및 상기 이차 조화파 정보를 이용하여, 상기 음향 비선형 계수를 결정하도록 설정된,

[수학식 8]

$$\beta = \frac{8|u_2(L)|E_1^2}{(u_1(L))^2 k^2 L E_2}$$

청구항 7

재료의 음향 비선형 계수를 결정하는 전자 장치의 동작 방법에 있어서,

상기 재료의 경계에서 반사파 신호의 반사 횟수에 기반하는 상기 재료 내에서의 상기 반사파 신호의 이동 거리를 이용하여, 상기 반사파 신호의 기본 조화파의 감쇠 보정을 위한 제1 감쇠 보정 정보 및 상기 반사파 신호의 이차 조화파의 감쇠 보정을 위한 제2 감쇠 보정 정보를 획득하는 단계;

를 포함하고,

상기 제1 감쇠 보정 정보 및 상기 제2 감쇠 보정 정보를 이용하여, 상기 재료의 음향 비선형 계수(β)를 결정하는 단계;

를 포함하는,

전자 장치의 동작 방법

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 재료의 음향 비선형 계수를 결정하는 전자 장치 및 동작 방법에 관한 것으로, 재료 내부에 무수히 많은 반사파를 인위적으로 생성함으로써 시편 크기와 무관하게 높은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)로 이차 고조파(second harmonic) 성분을 측정하여 음향 비선형 계수를 효과적으로 측정하기 위한 전자 장치 및 동작 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 비선형 초음파 기법인 이차 고조파 발생(Second harmonic generation, SHG)은 재료 미세 구조 변화에 민감한 음

향 비선형 계수 β 를 측정하여 재료 미세 균열 및 손상의 정량적 분석이 가능하여 이를 활용한 비파괴 검사 기법에 대한 수요가 증가하고 있다.

[0004] 일반적인 종파를 이용한 SHG(second harmonic generation) 기법은 시편 내부에 일정한 cycle을 가지는 사인 함수의 톤-버스트(tone-burst) 신호를 사용하여 시편 내부로 초음파를 송신 및 수신 하고 수집된 신호에 대한 주파수 영역 분석을 수행함으로써 음향 비선형 계수 β 를 측정한다.

[0005] 하지만 표면 반사파에 의한 간섭을 최소화해야 한다는 점에서 시편의 크기가 작아질 경우 매우 적은 수의 cycle이 허용되며 이는 주파수 영역 신호의 폭 늘어짐(band broadening)에 의한 낮은 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)로 이차 고조파(Second harmonic) 성분이 제대로 측정되지 않는 문제를 발생시켜 정밀한 β 측정에 한계가 존재한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 국내 등록특허공보 제10-2349443호
(특허문헌 0002) 국내 등록특허공보 제10-1961267호.
(특허문헌 0003) 해외 등록특허공보 제7065468호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 이에 본 발명이 해결하고자 하는 기술적 과제는, 전술한 문제점을 해결하기 위해 창출된 것으로, 시편의 크기에 의한 측정 한계를 극복하여 작은 시편에 대해서도 β 를 효과적으로 정밀하게 측정할 수 있는 기술을 제공하기 위한 전자 장치 및 동작 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

[0009] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제들은 이상에서 언급한 기술적 과제들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 기술적 과제들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0011] 상기 기술적 과제를 해결하기 위한 본 발명에 따른, 재료의 음향 비선형 계수를 결정하는 전자 장치 및 동작 방법은, 초음파 신호를 발생시키는 송신기(transmitter), 상기 초음파 신호가 상기 재료 내부를 투과하면서 감쇠된 반사파 신호를 수신하는 수신기(receiver), 및 프로세서를 포함하고, 상기 프로세서는, 상기 재료의 경계에서 상기 반사파 신호의 반사 횟수에 기반하는 상기 재료 내에서의 상기 반사파 신호의 이동 거리를 이용하여, 상기 반사파 신호의 기본 조화파의 감쇠 보정을 위한 제1 감쇠 보정 정보 및 상기 반사파 신호의 이차 조화파의 감쇠 보정을 위한 제2 감쇠 보정 정보를 획득하고, 및 상기 제1 감쇠 보정 정보 및 상기 제2 감쇠 보정 정보를 이용하여, 상기 재료의 음향 비선형 계수(acoustic nonlinearity parameter, β)를 결정하도록 설정되는 전자 장치를 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0013] 본 발명은 기존의 방법론이 가진 시편 크기에 의한 측정의 제약을 극복하여 시편의 크기와 무관하게 음향비선형

계수(β)를 측정 할 수 있는 특징이 있다.

[0014] 이로 인해, 작은 크기의 시편에 대해 재료 미세 구조 변화를 정량적 평가가 가능하게 할 수 있다.

[0015] 또한, 본 발명은 어떠한 재료들에 대해서도 보편적으로 적용될 수 있다는 점에서 큰 확장성을 가질 수 있다.

[0016] 본 발명의 효과들은 상술된 효과들로 제한되지 않으며, 본 발명의 기술적 특징들에 의하여 기대되는 잠정적인 효과들은 아래의 기재로부터 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0018] 도 1는 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치가 구성요소들을 간략히 나타낸 도면이다.

도 2는 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치를 이용하여 재료의 비선형 계수를 측정하는 모습을 개략적으로 나타낸 도면이다.

도 3은 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치가 동작하는 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

도 4는 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치가 동작하는 방법을 설명하기 위한 예시 도면이다.

도 5는 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치가 동작하는 방법을 설명하기 위한 예시 도면이다.

도 6a는 다양한 실시예들에 따른, 열 손상에 따른 시간 영역 신호를 나타내는 실험 결과를 도시한 도면이다.

도 6b는 다양한 실시예들에 따른, 열 손상에 따른 주파수 영역 신호를 나타내는 실험 결과를 도시한 도면이다.

도 7a는 다양한 실시예들에 따른, 열 손상에 따른 종파 속도 변화를 나타낸 도면이다.

도 7b는 다양한 실시예들에 따른, 열손상에 따른 측정된 음향비선형 계수 및 중첩 효과가 보정된 음향 비선형 계수를 나타낸 도면이다.

도 8은 다양한 실시예들에 따른, 실험 재료의 예시를 나타낸 도면이다.

도 9는 다양한 실시예들에 따른, 재료에 열손상을 가하는 과정을 나타낸 예시 도면이다.

도 10a는 다양한 실시예들에 따른, 실제 실험 장치들의 예시 도면이다.

도 10b는 다양한 실시예들에 따른, 도 2를 실제 실험 장면으로 구현한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0019] 이하, 본 문서의 다양한 실시예들이 첨부된 도면을 참조하여 기재된다. 실시예 및 이에 사용된 용어들은 본 문서에 기재된 기술을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 해당 실시예의 다양한 변경, 균등물, 및/또는 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 도면의 설명과 관련하여, 유사한 구성요소에 대해서는 유사한 참조 부호가 사용될 수 있다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함할 수 있다. 본 문서에서, "A 또는 B" 또는 "A 및/또는 B 중 적어도 하나" 등의 표현은 함께 나열된 항목들의 모든 가능한 조합을 포함할 수 있다. "제 1," "제 2," "첫째," 또는 "둘째," 등의 표현들은 해당 구성요소들을, 순서 또는 중요도에 상관없이 수식할 수 있고, 한 구성요소를 다른 구성요소와 구분하기 위해 사용될 뿐 해당 구성요소들을 한정하지 않는다. 어떤(예: 제 1) 구성요소가 다른(예: 제 2) 구성요소에 "(기능적으로 또는 통신적으로) 연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 상기 어떤 구성요소가 상기 다른 구성요소에 직접적으로 연결되거나, 다른 구성요소(예: 제 3 구성요소)를 통하여 연결될 수 있다.

[0020] 본 문서에서, "~하도록 구성된(또는 설정된)(configured to)"은 상황에 따라, 예를 들면, 하드웨어적 또는 소프트웨어적으로 "~에 적합한," "~하는 능력을 가지는," "~하도록 변경된," "~하도록 만들어진," "~를 할 수 있는," 또는 "~하도록 설계된"과 상호 호환적으로(interchangeably) 사용될 수 있다. 어떤 상황에서는, "~하도록 구성된 장치"라는 표현은, 그 장치가 다른 장치 또는 부품들과 함께 "~할 수 있는" 것을 의미할 수 있다. 예를 들면, 문구 "A, B, 및 C를 수행하도록 구성된(또는 설정된) 프로세서"는 해당 동작을 수행하기 위한 전용 프로세서(예: 임베디드 프로세서), 또는 메모리 장치에 저장된 하나 이상의 소프트웨어 프로그램들을 실행함으로써, 해당 동작들을 수행할 수 있는 범용 프로세서(예: CPU 또는 application processor)를 의미할 수 있다.

- [0021] 본 문서의 다양한 실시예들에 따른 전자 장치는, 예를 들면, 스마트폰, 태블릿 PC, 데스크탑 PC, 랩탑 PC, 넷북 컴퓨터, 워크스테이션, 서버 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [0022] 도 1은 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치가 구성요소들을 간략히 나타낸 도면이다.
- [0023] 도 2는 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치를 이용하여 재료의 비선형 계수를 측정하는 모습을 개략적으로 나타낸 도면이다.
- [0024] 도 1을 참조하여, 다양한 실시예에서의, 전자 장치(100)는 송신기(transmitter)(101), 수신기(receiver)(102), 프로세서(103), 메모리(104)를 포함할 수 있다. 어떤 실시예에서는, 전자 장치(100)는, 구성요소들 중 적어도 하나를 생략하거나 다른 구성요소를 추가적으로 구비할 수 있다.
- [0025] 일 실시예에서, 송신기(101)는 재료의 음향 비선형 계수(β)를 측정하기 위한 초음파 신호를 생성 할 수 있다. 송신기(101)는 변환기(transducer)를 포함하여, 초음파 신호를 생성 할 수 있는 모든 형태의 장치나 기기를 의미 할 수 있다. 예를 들어, 도 2를 참조하면, 송신기(101)는 초음파 신호를 생성할 수 있다.
- [0026] 일 실시예에서, 수신기(102)는 송신기(101)에서 나온 초음파 신호를 음향 비선형 계수를 측정하기 위한 재료에 투과하였을 때, 재료의 내부를 투과하면서 감쇠된 반사파 신호를 수신 할 수 있다. 예를 들어, 도 2를 참조하면, 수신기(102)는 재료(201)의 내부를 투과하면서 감쇠된 반사파 신호를 수신할 수 있다. 수신기(102)는 초음파 신호를 수신 할 수 있는 모든 형태의 장치나 기기를 의미 할 수 있다. 일 실시예에 따라, 도 2를 참조하면, 본 개시에 따른 수신기(102)는 재료(201)로부터 이격되어 위치할 수 있고, 전자 장치(100)는 감쇠된 반사파 신호를 이용하여, 기존의 방법으로 측정하기 어려웠던 작은 크기(예: 5 x 5 x 5 cm)의 재료(201)(예: cement paste)에 대한 음향 비선형 계수도 용이하게 측정할 수 있다.
- [0027] 일 실시예에서, 프로세서(103)는, 중앙처리장치, 어플리케이션 프로세서, 또는 커뮤니케이션 프로세서(communication processor(CP)) 중 하나 또는 그 이상을 포함할 수 있다. 프로세서(103)는, 예를 들면, 전자 장치(100)의 적어도 하나의 다른 구성요소들의 제어 및/또는 통신에 관한 연산이나 데이터 처리를 실행할 수 있다.
- [0028] 일 실시예에서, 메모리(104)는, 휘발성 및/또는 비휘발성 메모리를 포함할 수 있다. 메모리(104)는, 예를 들면, 전자 장치(100)의 적어도 하나의 다른 구성요소에 관계된 명령 또는 데이터를 저장할 수 있다.
- [0029] 메모리(104)는, 휘발성 및/또는 비휘발성 메모리를 포함할 수 있다. 메모리(104)는, 예를 들면, 전자 장치(100)의 적어도 하나의 다른 구성요소에 관계된 명령 또는 데이터를 저장할 수 있다. 한 실시예에 따르면, 메모리(104)는 소프트웨어 및/또는 프로그램을 저장할 수 있다. 프로그램은, 예를 들면, 커널, 미들웨어, 어플리케이션 프로그래밍 인터페이스(API), 및/또는 어플리케이션 프로그램(또는 "어플리케이션") 등을 포함할 수 있다. 커널, 미들웨어, 또는 API의 적어도 일부는, 운영 시스템으로 지칭될 수 있다.
- [0031] 도 3은 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치가 동작하는 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.
- [0032] 도 4는 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치가 동작하는 방법을 설명하기 위한 예시 도면이다.
- [0033] 도 5는 다양한 실시예들에 따른, 전자 장치가 동작하는 방법을 설명하기 위한 예시 도면이다.
- [0034] 301 동작에서, 다양한 실시예들에 따르면, 전자 장치(예: 도 1의 프로세서(103))는 재료의 경계에서 반사파 신호의 반사 횟수에 기반하는 재료 내에서의 반사파 신호의 이동거리를 이용하여, 반사파 신호의 기본 조화파의 감쇠 보정을 위한 제1 감쇠 보정 정보 및 반사파 신호의 이차 조화파의 감쇠 보정을 위한 제2 감쇠보정 정보를 획득 할 수 있다. 여기서, 조화파는 고조파(harmonics)를 의미하고, 기본 조화파는 기본 각주파수 ω 를 가지는 조화파를 의미하고, 이차 조화파는 2배의 각주파수 2ω 를 가지는 조화파를 의미 할 수 있다. 일 실시예에 따르면, 감쇠 보정 정보는, 송신기(101)에 의하여 발생된 초음파 신호가 재료(201) 내부를 투과하는 과정에서 흡수, 반사, 산란 등에 의해서 에너지가 소산되는 감쇠(attenuation) 현상이 발생하는 것을 보정하기 위한 정보 일 수 있다.
- [0035] 일 실시예에 따르면, 제1 감쇠 보정 정보 및 제2 감쇠 보정 정보는 [수학식 1]에 의하여 나타낼 수 있다.

[0036] [수학식 1]

[0037] (1) $\eta_1(n) = e^{-\alpha_1(2n+1)L}$

[0038] (2) $\eta_2(n) = \frac{e^{-2\alpha_1(2n+1)L} - e^{-\alpha_2(2n+1)L}}{\alpha_2 - 2\alpha_1}$

[0039] 일 실시예에 따라, $\eta_1(n)$ 은 제1 감쇠 보정 정보, $\eta_2(n)$ 은 제2 감쇠 보정 정보, α_1 은 기본 조화파 진동수에 대한 감쇠 계수, α_2 은 이차 조화파 진동수에 대한 감쇠 계수, n은 반사파의 반사 횟수, L은 재료의 두께를 나타낼 수 있다.

[0040] 1)일 실시예에 따라, 도 4 내지 5를 참고하면, 재료(201)내부에서 반사가 일어날 경우, 1번 반사되는 동안 파동인 재료(201)의 두께(L)에 대하여 2L 만큼 더 이동하게 되어 2Lk 만큼의 위상차가 발생 할 수 있다. (w_1 이 w_0 보다 2Lk 만큼 더 길다.)

[0041] 2)일 실시예에 따라, 도 4 내지 5를 참고하면, 재료(201)의 음향 임피던스 (Z) 경계조건에 따라 추가적인 위상차가 발생 할 수 있다. 예를 들어, 공기(A), 재료(C), 송신기(T)의 음향 임피던스 관계가 $Z_T > Z_C \gg Z_A$ 인 경우 [수학식 2]에 의하여 공기의 음향 임피던스 Z_A 가 재료(201)의 음향 임피던스 Z_C 보다 작기 때문에 고정단 반사 조건에 의해 반사시 π 의 위상 반전이 발생 할 수 있다.

[0042] 일 실시예에 따라, Z_A 는 공기의 음향 임피던스, Z_C 는 재료(201)의 음향 임피던스, Z_T 는 송신기의 음향 임피던스를 의미 할 수 있다

[0043] [수학식 2]

[0044] $R_{C \rightarrow A} = \frac{Z_A - Z_C}{Z_A + Z_C} < 0 \Rightarrow \pi \text{ (phase inversion)}$

[0045] $R_{C \rightarrow T} = \frac{Z_T - Z_C}{Z_T + Z_C} > 0 \Rightarrow 0$

[0046] 일 실시예에 따라, 위 1), 2) 조건에 의하여 n번째 반사파의 위상차는 $(2Lk + \pi)n$ 로 나타 낼 수 있다.

[0047] 일반적으로 반사파가 시편 내부를 일회 왕복하는 과정에서의 고정단 반사 횟수 j (= 0 or 1 or 2)에 대하여 n번째 반사파의 위상차는 $(2Lk + j\pi)n$ 로 나타낼 수 있다.

[0048] 일 실시예에 따르면, 301 동작을 수행하기 전에 일반적인 음향 비선형 계수를 측정하는 과정이 추가 될 수 있다.

[0049] 구체적으로, 송신기(101)를 통해 재료(201) 내부에 무수히 많은 반사파를 생성하고, 수신기(102)를 통해 반사파들의 중첩신호를 수신할 수 있다. 이때, [수학식 3]의 (1)비선형 구성 방정식과 (2) 1차원 운동방정식을 통하여, [수학식 4]의 비선형 파동방정식을 유도 할 수 있다.

[0050] [수학식 3]

[0051] (1) $\sigma = E_0(1 + \beta\epsilon + \delta\epsilon^2 \dots + \alpha[\Delta\epsilon + \epsilon\text{sign}(\epsilon)])\epsilon$

[0052] (2) $\rho \partial^2 u / \partial t^2 = \partial \sigma / \partial x$

[0053] [수학식 4]

[0054]
$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left[1 - \beta \frac{\partial u}{\partial x} \right] \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

[0055] 일 실시예에 따라, σ 는 stress(응력), ε 는 strain(변형률), β 는 이차 비선형계수, u 는 x축 방향 변위, c 는 종파 속도를 의미 할 수 있다.

[0056] 여기서, 수집된 신호에 대한 주파수 성분분석을 통해 기본 조화파 및 이차 조화파의 진폭을 측정 할 수 있다. 이때, [수학식 4]의 비선형 파동방정식에 대한 조화파 방정식이 [수학식 5]의 (1) 기본조화파의 변위와 (2) 이차 조화파 변위의 합으로 유도 될 수 있으며, 이를 통해 [수학식 6]와 같이 음향 비선형 계수를 측정 할 수 있다.

[0057] [수학식 5]

[0058]
$$(1) u_1 = A_1 \sin(kx - \omega t)$$

[0059]
$$(2) u_2 = -\frac{\beta k^2 x A_1^2}{8} \cos 2(kx - \omega t) = A_2 \cos 2(kx - \omega t)$$

[0060] [수학식 6]

[0061]
$$\beta = \frac{8|A_2|}{k^2 x A_1^2}$$

[0062] 일 실시예에 따라, u_1 은 기본 조화파 변위, A_1 은 기본 조화파 진폭, u_2 는 이차 조화파 변위, A_2 는 이차 조화파 진폭, ω 는 기본 각진동수, k 는 기본 파수, x 는 파동의 진행거리를 의미 할 수 있다. 일 실시예에 따라, 파동이 재료(201) 내부를 투과하는 과정에서, 흡수, 반사, 산란 등에 의해서 에너지가 소산되는 감쇠(attenuation)현상이 발생 할 수 있으며, 재료의 감쇠 계수를 통해 [수학식 7]과 같이 (1) 기본조화파 변위와 (2) 이차 조화파 변위를 나타 낼 수 있으며, 이를 통해 감쇠 [수학식 8]과 같이 감쇠 효과가 보정된 음향 비선형 계수를 측정 할 수 있다.

[0063] [수학식 7]

[0064]
$$(1) u_1 = A_0 \sin(kx - \omega t) e^{-\alpha_1 x} = A_1 \sin(kx - \omega t)$$

[0065]
$$(2) u_2 = -\frac{\beta k^2 x A_0^2}{8} \cos 2(kx - \omega t) \frac{e^{-2\alpha_1 x} - e^{-\alpha_2 x}}{(\alpha_2 - 2\alpha_1)} = A_2 \cos 2(kx - \omega t)$$

[0066] [수학식 8]

[0067]
$$\beta = \frac{8|A_2|}{k^2 x A_1^2} \frac{(\alpha_2 - 2\alpha_1)}{(1 - e^{-(\alpha_2 - 2\alpha_1)x})}$$

[0068] 일 실시예에 따라, A_0 는 초기 가진 진폭, α_1 는 기본 조화파 진동수에 대한 감쇠계수, α_2 는 이차 조화파 진동수에 대한 감쇠 계수를 의미 할 수 있다.

[0070] 303 동작에서, 다양한 실시예들에 따르면, 전자 장치(예: 도 1의 프로세서(103))는 301 동작에서 구한 제1 감쇠 보정 정보 및 제2 감쇠 보정 정보를 이용하여, 재료의 음향 비선형 계수를 결정 할 수 있다.

[0071] 일 실시예에 따르면, [수학식 9]에 의하여 앞에서 구한 제1 감쇠 보정 정보를 이용하여 기본 조화파 정보를 산출하고, [수학식 10]에 의하여 앞에서 구한 제2 감쇠 보정 정보를 이용하여 이차 조화파 정보를 산출 할 수 있다.

[0072] [수학식 9]

[0073]
$$u_1(L) = A_{10} \sum_{n=0}^N \sin[k(2n+1)L + nj\pi - \omega t] \eta_1(n)$$

[0074] [수학식 10]

[0075]
$$u_2(L) = -\frac{\beta k^2 L A_{10}^2}{8} \sum_{n=0}^N \cos[2k(2n+1)L + nj\pi - 2\omega t] \eta_2(n)$$

[0076] 일 실시예에 따라, $u_1(L)$ 은 상기 기본 조화파 정보, $u_2(L)$ 은 상기 이차 조화파 정보, A_{10} 은 초기 가진 진폭, k 는 기본 파수, ω 는 기본 각진동수, β 는 상기 재료의 음향 비선형 계수를 나타낼 수 있다.

[0077] 일 실시예에 따라, 상기 [수학식 9]를 참고하여, n 번째 반사파의 기본 조화파 성분의 무수히 많은 반사파들의 중첩은 $A_{10} \sum_{n=0}^N \sin[k(2n+1)L + nj\pi - \omega t] \eta_1(n)$ 로 표현 될 수 있으며, 이는 앞서 설명한 위상차가 포함될 수 있으며, $\eta_1(n)$ 로 기술되는 반사 과정에서 샘플 내 이동거리 증가로 축적되는 감쇠효과 보정 항이 포함될 수 있다.

[0078] 일 실시예에 따라, 상기 [수학식 10]을 참고하여, n번째 반사파의 이차 조화파 성분의 무수히 많은 반사파들의 중첩은 $-\frac{\beta k^2 L A_{10}^2}{8} \sum_{n=0}^N \cos[2k(2n+1)L + nj\pi - 2\omega t] \eta_2(n)$ 로 표현 될 수 있으며, 이는 앞서 설명한 위상차가 포함될 수 있으며, $\eta_2(n)$ 로 기술되는 축적된 감쇠효과 보정항이 포함 될 수 있다.

[0079] 일 실시예에 따르면, [수학식 11]에 의하여 기본 조화파의 중첩에 대한 제1 진폭 보정 정보 및 제 위상 보정 정보를 산출하고, [수학식 12]에 의하여 이차 조화파의 중첩에 대한 제2 진폭 보정 정보 및 제2 위상 보정 정보를 산출 할 수 있다.

[0080] [수학식 11]

[0081] (1)
$$\bar{\varepsilon}_1 = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^N \eta_1(n) \sin[k(2n+1)L + nj\pi]\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^N \eta_1(n) \cos[k(2n+1)L + nj\pi]\right)^2}$$

[0082] (2)
$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{n=0}^N \eta_1(n) \sin[k(2n+1)L + nj\pi]}{\sum_{n=0}^N \eta_1(n) \cos[k(2n+1)L + nj\pi]} \right)$$

[0083] [수학식 12]

[0084] (1)
$$\bar{\varepsilon}_2 = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^N \eta_2(n) \sin[2k(2n+1)L + nj\pi]\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^N \eta_2(n) \cos[2k(2n+1)L + nj\pi]\right)^2}$$

[0085] (2)
$$\varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{n=0}^N \eta_2(n) \sin[2k(2n+1)L + nj\pi]}{\sum_{n=0}^N \eta_2(n) \cos[2k(2n+1)L + nj\pi]} \right)$$

[0086] 일 실시예에 따라, $\bar{\varepsilon}_1$ 는 상기 제1 진폭 보정 정보, $\bar{\varepsilon}_2$ 는 상기 제2 진폭 보정 정보, φ_1 는 상기 제1 위상 보정 정보, φ_2 는 상기 제2 위상 보정 정보를 나타낼 수 있다.

[0087] 일 실시예에 따르면, [수학식 13]에 의하여 위에서 구한 제1 진폭 보정 정보 및 제1 위상 보정 정보를 이용하여, 기본 조화파 정보를 산출 하고, [수학식 14]에 의하여 위에서 구한 제2 진폭 보정 정보 및 제 2 위상 보정 정보를 이용하여, 이차 조화파 정보를 산출 할 수 있다.

- [0088] [수학식 13]
- [0089]
$$u_1(L) = A_{10} \varepsilon_1 \sin(\omega t - \varphi_1)$$
- [0091] [수학식 14]
- [0092]
$$u_2(L) = -\frac{\beta k^2 L A_{10}^2}{8} \varepsilon_2 \cos(2\omega t - \varphi_2)$$
- [0093] 일 실시예에 따르면, 앞서 상기 [수학식 9]에 의하여 나타낸 수식은 phaser(오일러 공식에 따라 삼각함수를 지수함수로 기술하는 방식)의 합 공식에 따라, 위상 (φ_1) 과 진폭 (ε_1) 항을 가지는 기본 조화파 함수인 상기 [수학식 13]의 형태로 나타낼 수 있다.
- [0094] 일 실시예에 따르면, 앞서 상기 [수학식 10]에 의하여 나타낸 수식은 phaser의 합 공식에 따라, 위상 (φ_2) 과 진폭 (ε_2) 항을 가지는 기본 조화파 함수인 상기 [수학식 14]의 형태로 나타낼 수 있다.
- [0095] 일 실시예에 따라, [수학식 15]에 의하여 301 동작에서 구한 제1 진폭 보정 정보, 제2 진폭 보정 정보, 기본 조화파 정보 및 이차 조화파 정보를 이용하여 음향 비선형 계수를 결정할 수 있다.
- [0096] [수학식 15]
- [0097]
$$\beta = \frac{8|u_2(L)|\varepsilon_1^2}{(u_1(L))^2 k^2 L \varepsilon_2}$$
- [0099] 추가 실시예에 따라, 매우 많은 cycle을 가지는 초음파 신호를 재료내부에 투과하여 반사파를 형성하고 이를 수집하고, 수집된 초음파 신호에 대해 개별 반사파 성분을 시편의 크기에 대한 파장의 비율과 음향 경계 조건을 통해 계산되는 위상 지연 효과 항 및 반사에 의한 시편 내부 이동 거리에 따른 감쇠 효과 항으로 변수화하고 이들의 중첩을 통해 수식적으로 풀이되는 진폭 보정 계수를 도출하여 측정된 음향 비선형 계수에 적용함으로써 음향 비선형 계수를 정밀하게 측정할 수 있다.
- [0100] 또 다른 추가 실시예에 따라, 재료가 손상을 입게 되는 경우 재료 내부의 파속이 감소하여 반사파들 간의 위상차가 변화하게 되는데 이때 위상차가 재료의 크기와 특정한 관계를 가지게 되는 경우 공진(resonance)이 발생하여 시편이 진동하며 이는 $\hat{a}$ 측정의 정밀도를 저해할 수 있으므로 이를 해결하기 위해 재료 내부에서 음파가 일정한 파수(wavenumber)를 유지하도록 조정함으로써 파동의 공간적 분포를 고정하여 중첩 효과를 획일화하고 공진에 의한 진동 효과를 미연에 방지할 수 있다.
- [0102] 도 6a는 다양한 실시예들에 따른, 열 손상에 따른 시간 영역 신호를 나타내는 실험 결과를 도시한 도면이다.
- [0103] 도 6b는 다양한 실시예들에 따른, 열 손상에 따른 주파수 영역 신호를 나타내는 실험 결과를 도시한 도면이다.
- [0104] 도 7a는 다양한 실시예들에 따른, 열 손상에 따른 종파 속도 변화를 나타낸 도면이다.
- [0105] 도 7b는 다양한 실시예들에 따른, 열손상에 따른 측정된 음향비선형 계수 및 중첩 효과가 보정된 음향 비선형 계수를 나타낸 도면이다.
- [0106] 도 8은 다양한 실시예들에 따른, 실험 재료의 예시를 나타낸 도면이다.
- [0107] 도 9는 다양한 실시예들에 따른, 재료에 열손상을 가하는 과정을 나타낸 예시 도면이다.
- [0108] 도 10a는 다양한 실시예들에 따른, 실제 실험 장치들의 예시 도면이다.
- [0109] 도 10b는 다양한 실시예들에 따른, 도 2를 실제 실험 장면으로 구현한 도면이다.
- [0110] 다양한 실시예들에 따라, 도 6a 내지 6b 및 도 7a 내지 7b를 참조하면, 기존의 방법으로는 측정이 어려웠던 작

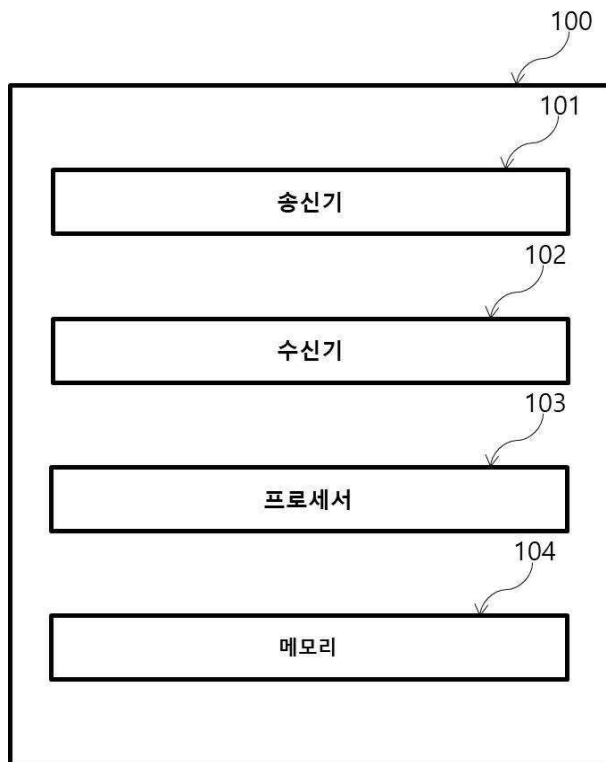
은 크기의 재료(201)에 대하여 **100°C, 200°C** 온도에서 2시간 동안 순차적으로 열 손상을 가하여 미세 균열을 발생시키고 앞서 설명한 방식을 통해 음향 비선형 계수를 측정하여 재료(201)의 미세 구조 변화를 높은 민감도로 정량화하여 분석 할 수 있다. 구체적으로, 도 8과 같이 미세 구조 변화를 측정할 예시 재료(201)를 준비하고, 도 10b의 도면과 같이 재료(201), 송신기(101) 및 수신기(102)를 세팅 할 수 있으며, 이를 측정하기 위한 실제 실험장치들을 도 10a와 같이 준비하여 도 9와 같이 재료(201)에 열손상을 가하여 음향 비선형 계수를 측정할 수 있다. 이는 단지 예시일 뿐, 재료의 크기, 종류, 실험 장치 및 열 손상을 가하는 온도 및 시간 등은 위에서 언급한 것들에 한정 되지 않는다.

[0112] 본 문서에서 사용된 용어 "모듈" 또는 "~부"은 하드웨어, 소프트웨어 또는 펌웨어로 구성된 유닛을 포함하며, 예를 들면, 로직, 논리 블록, 부품, 또는 회로 등의 용어와 상호 호환적으로 사용될 수 있다. "모듈" 또는 "~부"는, 일체로 구성된 부품 또는 하나 또는 그 이상의 기능을 수행하는 최소 단위 또는 그 일부가 될 수 있다. "모듈" 또는 "~부"는 기계적으로 또는 전자적으로 구현될 수 있으며, 예를 들면, 어떤 동작들을 수행하는, 알려졌거나 앞으로 개발될, ASIC(application-specific integrated circuit) 칩, FPGAs(field-programmable gate arrays), 또는 프로그램 가능 논리 장치를 포함할 수 있고, 프로세서(120)에 의하여 실행될 수 있다. 다양한 실시예에 따른 장치(예: 모듈들 또는 그 기능들) 또는 방법(예: 동작들)의 적어도 일부는 프로그램 모듈의 형태로 컴퓨터로 판독 가능한 저장 매체(예: 메모리(130))에 저장된 명령어로 구현될 수 있다. 상기 명령어가 프로세서(예: 프로세서(120))에 의해 실행될 경우, 프로세서가 상기 명령어에 해당하는 기능을 수행할 수 있다. 컴퓨터로 판독 가능한 기록 매체는, 하드디스크, 플로피디스크, 마그네틱 매체(예: 자기테이프), 광기록 매체(예: CD-ROM, DVD, 자기-광 매체 (예: 플롭티컬 디스크), 내장 메모리 등을 포함할 수 있다. 명령어는 컴파일러에 의해 만들어지는 코드 또는 인터프리터에 의해 실행될 수 있는 코드를 포함할 수 있다. 다양한 실시예에 따른 모듈 또는 프로그램 모듈은 전술한 구성요소들 중 적어도 하나 이상을 포함하거나, 일부가 생략되거나, 또는 다른 구성요소를 더 포함할 수 있다. 다양한 실시예에 따른, 모듈, 프로그램 모듈 또는 다른 구성 요소에 의해 수행되는 동작들은 순차적, 병렬적, 반복적 또는 휴리스틱하게 실행되거나, 적어도 일부 동작이 다른 순서로 실행되거나, 생략되거나, 또는 다른 동작이 추가될 수 있다.

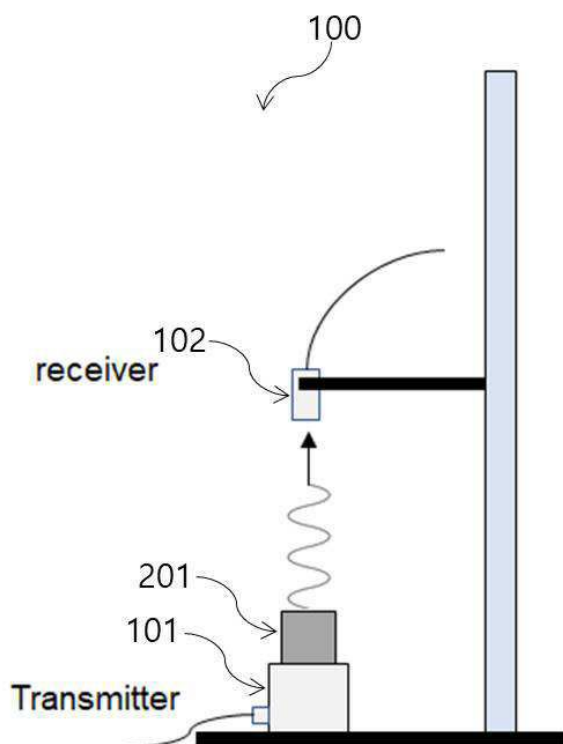
[0113] 그리고 본 문서에 개시된 실시예는 개시된, 기술 내용의 설명 및 이해를 위해 제시된 것이며, 본 개시의 범위를 한정하는 것은 아니다. 따라서, 본 개시의 범위는, 본 개시의 기술적 사상에 근거한 모든 변경 또는 다양한 다른 실시예를 포함하는 것으로 해석되어야 한다.

도면

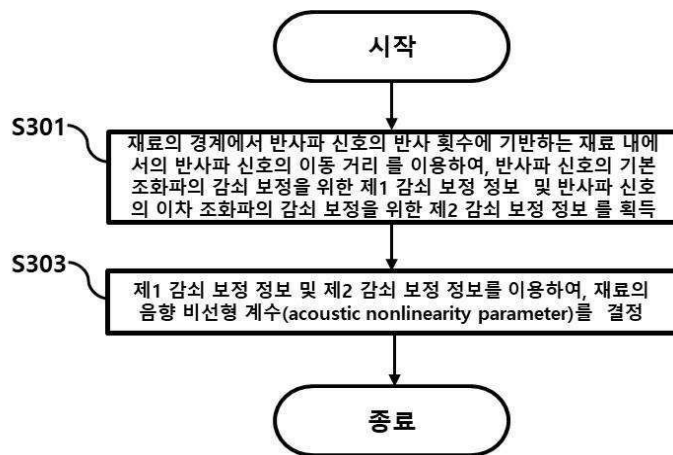
도면1



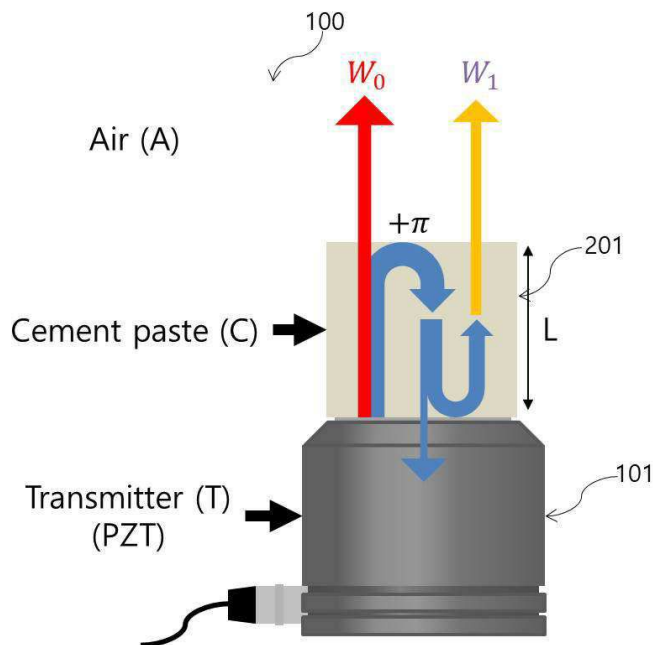
도면2



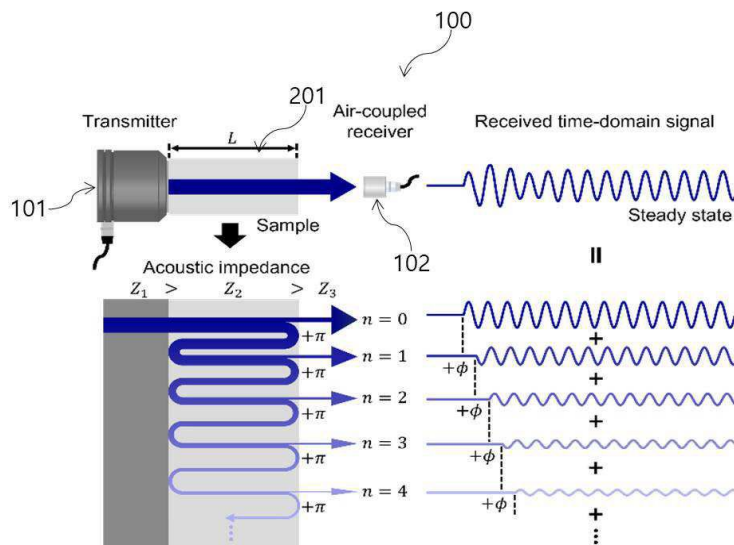
도면3



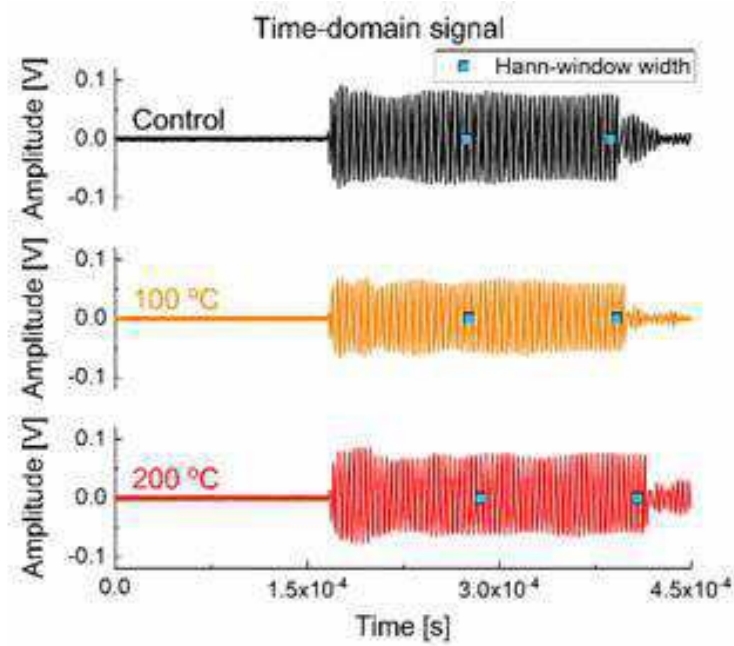
도면4



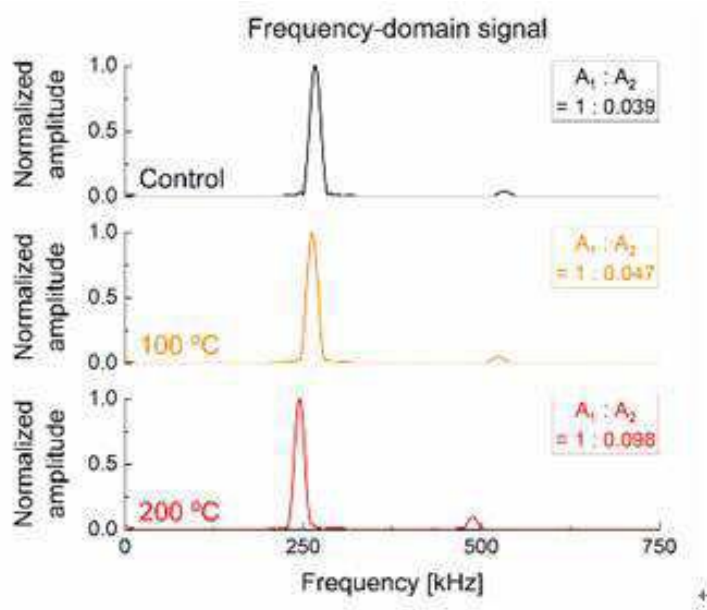
도면5



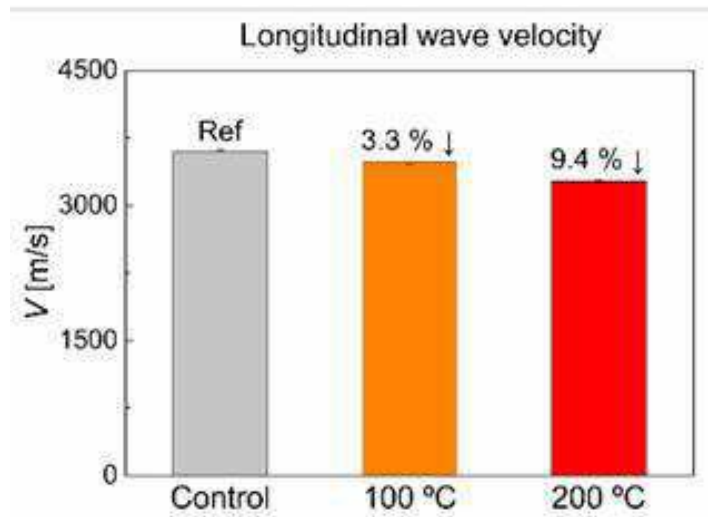
도면6a



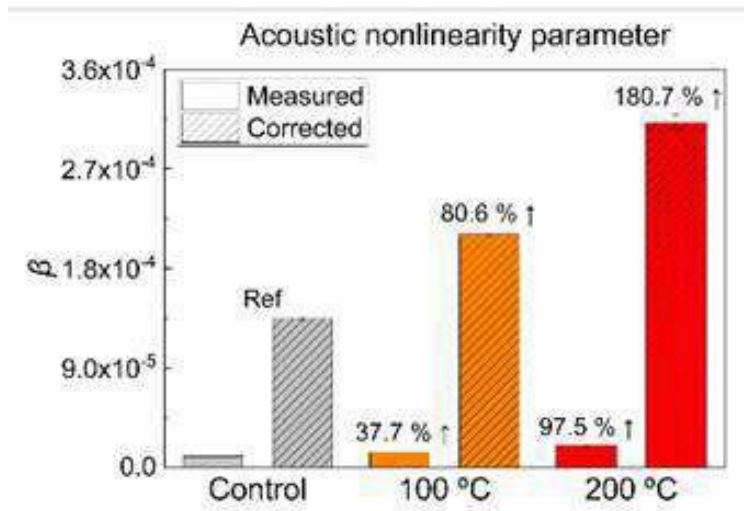
도면6b



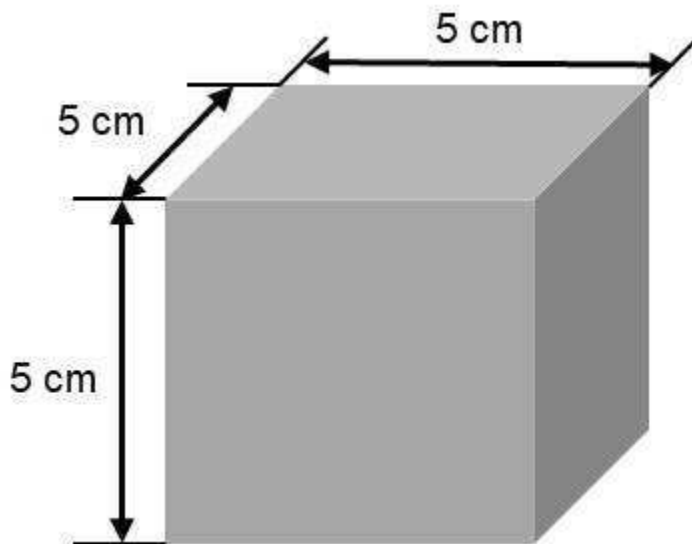
도면7a



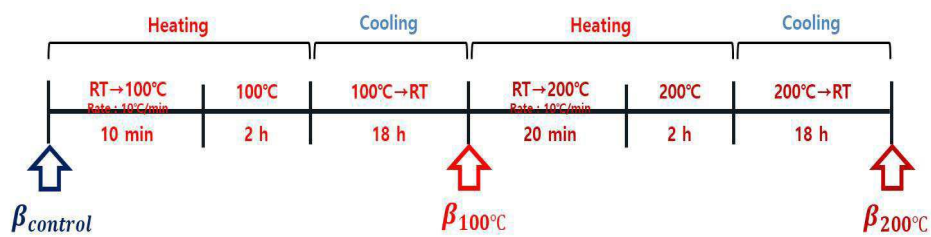
도면7b



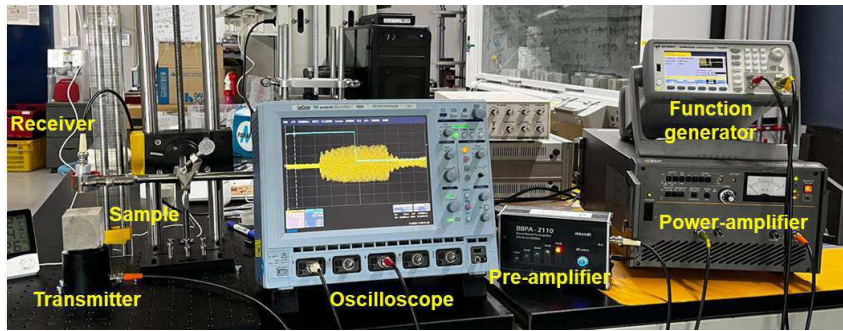
도면8



도면9



도면10a



도면10b

