



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0058740
(43) 공개일자 2021년05월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 29/24 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 29/24 (2013.01)
G01N 2291/056 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0169740(분할)
(22) 출원일자 2020년12월07일
심사청구일자 없음
(62) 원출원 특허 10-2019-0145448
원출원일자 2019년11월13일
심사청구일자 2019년11월13일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
재단법인 파동에너지 극한제어 연구단
대전광역시 유성구 가정북로 156, 한국기계연구
원1동412, 413, 414, 415호(장동)
서울대학교산학협력단
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
(72) 발명자
김민수
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이우림
서울시 관악구 관악로 1 서울대학교 301동 1317호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
리엔목특허법인

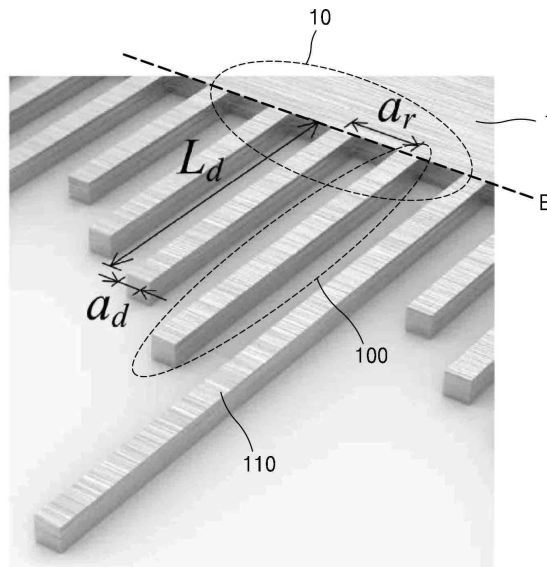
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 소산-증폭 메타표면

(57) 요약

본 발명은 소산-증폭 메타표면에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 극히 큰 위상 기울기를 가지며 얇고 간단한 구조를 갖는 메타표면을 통해 기존의 소산 수단에 비해 더 적은 양의 소산 수단만으로도 종파와 횡파를 모두 효과적으로 흡수할 수 있는 소산-증폭 메타표면에 관한 것이다.

대표도 - 도4



(72) 발명자

오주환

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

김윤영

서울시 관악구 관악로 1 서울대학교 301동 1503호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711082801

과제번호 2014M3A6B3063711

부처명 과학기술정보통신부

과제관리(전문)기관명 한국연구재단

연구사업명 글로벌프론티어지원(R&D)

연구과제명 접촉식 초고감도 · 초고성능 초음파 메타트랜스듀서

기 여 율 1/1

과제수행기관명 서울대학교

연구기간 2019.01.01 ~ 2019.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

단위 메타요소가 반복적으로 형성된 구조를 갖는 메타표면에 있어서,
 상기 단위 메타요소는, 단위체를 $N(N>1)$ 개 포함하며, 상기 단위체는 상기 단위 메타요소 내에서 소정의 방향으로 배열되고,
 각각의 상기 단위체는 소정의 크기의 위상 변이를 발생시키되,
 서로 인접한 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하여,
 하나의 단위 메타요소 내에서 상기 단위체에 의한 위상 변이 크기는 선형적으로 증가하거나, 또는 감소하여,
 상기 단위 메타요소 및 메타표면은 일정한 크기의 위상 기울기(Ψ)를 갖는 소산-증폭 메타표면.

청구항 2

제1항에 있어서,
 일 메타요소 내의 단위체는 순차적으로 $i \times 2\pi/N (i=1,2,3,\dots,N)$ 의 위상 변이를 발생시키는 소산-증폭 메타표면.

청구항 3

제1항에 있어서,
 하나의 상기 단위 메타요소 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하며,
 상기 단위 메타요소의 폭과 상기 위상 기울기(Ψ)는, 하기 식 1의 관계를 갖고,
 하나의 상기 단위체의 폭은, 하기 식 2의 관계를 갖는 소산-증폭 메타표면.

$$\Psi = 2\pi/L \quad (\text{식 1})$$

$$a_r = 2\pi/(\Psi \times N) \quad (\text{식 2})$$

Ψ : 위상 기울기, L : 단위 메타요소의 폭, a_r : 단위체의 폭, N : 하나의 단위 메타요소 내에 포함된 단위체의 개수

청구항 4

제1항에 있어서,
 상기 단위체는,
 소정의 경계면을 갖는 바디, 및 상기 경계면에 형성되며 상기 경계면보다 더 돌출되게 연장되는 로드를 포함하는 막대형 공진기 구조를 갖고,
 각각의 상기 단위체는 상기 로드의 길이에 따라서 소정의 크기의 위상 변이를 발생시키는 소산-증폭 메타표면.

청구항 5

제4항에 있어서,
 하나의 상기 단위 메타요소 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하며,
 상기 단위 메타요소의 폭과 상기 위상 기울기(Ψ)는, 하기 식 1의 관계를 갖고,
 하나의 상기 단위체의 폭은, 하기 식 2의 관계를 갖는 소산-증폭 메타표면.

$$\Psi = 2\pi/L \quad (\text{식 1})$$

$$a_r = 2\pi / (\Psi \times N) \quad (\text{식 } 2)$$

Ψ : 위상 기울기, L : 단위 메타요소의 폭, a_r : 단위체의 폭, N : 하나의 단위 메타요소 내에 포함된 단위체의 개수

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 로드의 폭(a_d)은,

상기 단위체의 폭(a_r)대비 30~70%의 크기를 갖는 소산-증폭 메타표면.

청구항 7

제5항에 있어서,

각각의 상기 단위체의 상기 로드의 길이는,

서로 인접한 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하도록 정해지는 소산-증폭 메타표면.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 위상 기울기(Ψ)의 크기는,

80π 내지 2000π 의 범위를 갖는 소산-증폭 메타표면.

청구항 9

단위 메타요소가 반복적으로 형성된 구조를 갖는 메타표면으로서, 상기 단위 메타요소는, 단위체를 $N(N>1)$ 개 포함하며, 상기 단위체는 상기 단위 메타요소 내에서 소정의 방향으로 배열되고, 각각의 상기 단위체는 소정의 크기의 위상 변이를 발생시키되, 서로 인접한 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하여, 하나의 단위 메타요소 내에서 상기 단위체에 의한 위상 변이 크기는 선형적으로 증가하거나, 또는 감소하여, 상기 단위 메타요소 및 메타표면은 일정한 크기의 위상 기울기(Ψ)를 갖는 소산-증폭 메타표면을 제조하는 방법으로서,

목적하는 위상 기울기(Ψ)의 크기를 정하는 단계;

하나의 상기 단위 메타요소 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하도록 상기 위상 기울기(Ψ)에 따라서 상기 단위 메타요소의 폭(L)을 정하는 단계; 및

서로 인접한 상기 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하도록 상기 단위체를 구성하여 상기 위상 기울기(Ψ)가 구현되도록 하는 단계;를 포함하는 소산-증폭 메타표면 제조방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

서로 인접한 상기 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 $2\pi/N$ 가 되도록 하여, 하나의 상기 단위 메타요소 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하도록 하는 단계;를 포함하는 소산-증폭 메타표면 제조방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 단위체는, 소정의 경계면을 갖는 바디, 및 상기 경계면에 형성되며 상기 경계면보다 더 돌출되게 연장되는 로드를 포함하는 막대형 공진기 구조를 갖고, 각각의 상기 단위체는 상기 로드의 길이에 따라서 소정의 크기의 위상 변이를 발생시키며,

각각의 상기 단위체의 상기 로드의 길이는 서로 인접한 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하도록 하는 단계;를 포함하는 소산-증폭 메타표면 제조방법.

청구항 12

제9항에 있어서,
상기 위상 기울기(Ψ)의 크기는,
 80π 내지 2000π 의 범위를 갖는 소산-증폭 메타표면 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 소산-증폭 메타표면에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 극히 큰 위상 기울기를 가지며 얇고 간단한 구조를 갖는 메타표면을 통해 기존의 소산 수단에 비해 더 적은 양의 소산 수단만으로도 종파와 횡파를 모두 효과적으로 흡수할 수 있는 소산-증폭 메타표면에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 원하지 않는 파동(예 : 탄성초음파)을 흡수하는 기술은 다양한 초음파 응용 분야에서 중요시되는 기술 중 하나이다. 특히, 정밀함과 정확성이 요구되는 의료초음파나 비파괴검사 등과 같은 초음파 분야에서 흡수체의 소형화와 성능 개선은 매우 중요한 기술적 이슈이다.

[0003] 일반적으로, 기존의 탄성초음파 분야에서는 원하지 않는 파를 줄이기 위해 높은 초음파 흡수 성능을 나타내는 소산 물질(예: 트랜스듀서의 백업 재료)이나 산란 방식의 흡수체(예: 웨지의 피라미드형 산란체)를 사용하였다. 도 1 (a) 는 종래 기술에 의한 트랜스듀서 및 그에 적용되는 백업 재료를 나타낸 것이며, 도 1 (b) 는 비파괴 검사용 웨지 및 그에 적용되는 피라미드형 산란체를 나타낸 것이다.

[0004] 하지만 소산 물질의 흡수 능력은 본질적인 물리적 특성에 의존하기 때문에 흡수 성능을 향상시키는데 한계가 있다. 이러한 한계로 인해, 소산 물질의 소형화와 높은 흡수 성능을 동시에 달성하기 어렵다.

[0005] 또한, 산란 방식의 흡수체의 경우 고도로 발산하는 초음파에 대해 불가피한 측정 오차를 야기하는 단점이 있다.

[0006] 따라서, 이러한 한계를 극복할 수 있는 수단이 필요하다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 공개특허 10-2007-0046441

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 전술한 종래기술의 기술적 한계를 해결하기 위한 것으로서, 본 발명의 목적은, 극히 큰 위상 기울기를 가지며 얇고 간단한 구조를 갖는 메타표면을 이용함으로써 기존의 소산 수단에 비해 더 적은 양의 소산 수단만으로도 종파와 횡파를 모두 효과적으로 흡수할 수 있는 소산-증폭 메타표면을 제공하는 것이다.

[0009] 아울러, 본 발명의 목적은, 소형화와 정밀함이 요구되는 다양한 초음파 응용 분야에 적극적으로 활용될 수 있는 소산-증폭 메타표면을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면은, 단위 메타요소가 반복적으로 형성된 구조를 갖는 메타표면에 있어서, 상기 단위 메타요소는, 단위체를 $N(N>1)$ 개 포함하며, 상기 단위체는 상기 단위 메타요소 내에서 소정의 방향으로 배열되고, 각각의 상기 단위체는 소정의 크기의 위상 변이를 발생시키되, 서로 인접한 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하여, 하나의 단위 메타요소 내에서 상기 단위체에 의한 위상 변이 크기는 선형적으로 증가하거나, 또는 감소하여, 상기 단위 메타요소 및 메타표면은 일정한 크기의 위상 기울기

(Ψ)를 갖는다.

- [0011] 일 실시예에 의하면, 일 메타요소 내의 상기 단위체는 순차적으로 $i \times 2\pi/N$ ($i=1,2,3 \dots N$)의 위상 변이를 발생시킨다.
- [0012] 일 실시예에 의하면, 하나의 상기 단위 메타요소 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하며, 상기 단위 메타요소의 폭과 상기 위상 기울기(Ψ)는, 하기 식 1의 관계를 갖고, 하나의 상기 단위체의 폭은, 하기 식 2의 관계를 갖는다.
- [0013] $\Psi = 2\pi/L$ (식 1)
- [0014] $a_r = 2\pi/(\Psi \times N)$ (식 2)
- [0015] Ψ : 위상 기울기, L : 단위 메타요소의 폭, a_r : 단위체의 폭, N : 하나의 단위 메타요소 내에 포함된 단위체의 개수
- [0016] 일 실시예에 의하면, 상기 단위체는, 소정의 경계면을 갖는 바디, 및 상기 경계면에 형성되며 상기 경계면보다 더 돌출되게 연장되는 로드를 포함하는 막대형 공진기 구조를 갖고, 각각의 상기 단위체는 상기 로드의 길이에 따라서 소정의 크기의 위상 변이를 발생시킨다.
- [0017] 일 실시예에 의하면, 하나의 상기 단위 메타요소 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하며, 상기 단위 메타요소의 폭과 상기 위상 기울기(Ψ)는, 하기 식 1의 관계를 갖고, 하나의 상기 단위체의 폭은, 하기 식 2의 관계를 갖는다.
- [0018] $\Psi = 2\pi/L$ (식 1)
- [0019] $a_r = 2\pi/(\Psi \times N)$ (식 2)
- [0020] Ψ : 위상 기울기, L : 단위 메타요소의 폭, a_r : 단위체의 폭, N : 하나의 단위 메타요소 내에 포함된 단위체의 개수
- [0021] 일 실시예에 의하면, 상기 로드의 폭(a_d)은, 상기 단위체의 폭(a_r)대비 30~70%의 크기를 갖는다.
- [0022] 일 실시예에 의하면, 각각의 상기 단위체의 상기 로드의 길이는, 서로 인접한 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하도록 정해진다.
- [0023] 일 실시예에 의하면, 상기 위상 기울기(Ψ)의 크기는, 80π 내지 2000π 의 범위를 갖는다.
- [0024] 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면 제조방법은, 단위 메타요소가 반복적으로 형성된 구조를 갖는 메타표면으로서, 상기 단위 메타요소는, 단위체를 $N(N>1)$ 개 포함하며, 상기 단위체는 상기 단위 메타요소 내에서 소정의 방향으로 배열되고, 각각의 상기 단위체는 소정의 크기의 위상 변이를 발생시키되, 서로 인접한 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하여, 하나의 단위 메타요소 내에서 상기 단위체에 의한 위상 변이 크기는 선형적으로 증가하거나, 또는 감소하여, 상기 단위 메타요소 및 메타표면은 일정한 크기의 위상 기울기(Ψ)를 갖는 소산-증폭 메타표면을 제조하는 방법으로서, 목적하는 위상 기울기(Ψ)의 크기를 정하는 단계; 하나의 상기 단위 메타요소 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하도록 상기 위상 기울기(Ψ)에 따라서 상기 단위 메타요소의 폭(L)을 정하는 단계; 및 서로 인접한 상기 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하도록 상기 단위체를 구성하여 상기 위상 기울기(Ψ)가 구현되도록 하는 단계;를 포함한다.
- [0025] 일 실시예에 의하면, 서로 인접한 상기 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 $2\pi/N$ 가 되도록 하여, 하나의 상기 단위 메타요소 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하도록 하는 단계;를 더 포함한다.
- [0026] 일 실시예에 의하면, 상기 단위체는, 소정의 경계면을 갖는 바디, 및 상기 경계면에 형성되며 상기 경계면보다 더 돌출되게 연장되는 로드를 포함하는 막대형 공진기 구조를 갖고, 각각의 상기 단위체는 상기 로드의 길이에 따라서 소정의 크기의 위상 변이를 발생시키며, 각각의 상기 단위체의 상기 로드의 길이는 서로 인접한 단위체에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하도록 하는 단계;를 포함한다.
- [0027] 일 실시예에 의하면, 상기 위상 기울기(Ψ)의 크기는, 80π 내지 2000π 의 범위를 갖는다.

발명의 효과

[0028] 본 발명에 의하면, 극히 큰 위상 기울기를 가지며 얇고 간단한 구조를 갖는 메타표면을 이용함으로써 기존의 소산 수단에 비해 더 적은 양의 소산 수단만으로도 종파와 횡파를 모두 효과적으로 흡수할 수 있다. 또한, 본 발명에 의한 메타표면은, 소형화와 정밀함이 요구되는 다양한 초음파 응용 분야에 적극적으로 활용될 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0029] 도 1 은 소산 물질 및 소산 구조가 적용된 종래 기술의 일 예를 나타낸 도면이다.
- 도 2 는 스넬의 법칙 및 일반화된 스넬의 법칙의 일 예를 나타낸 도면이다.
- 도 3 은 본 발명에 의한 탄성초음파 흡수 강화를 위한 소산-증폭 메타표면의 일 예를 나타낸 도면이다.
- 도 4 는 본 발명의 일 실시형태에 의한 소산-증폭 메타표면을 구성하는, 단위 메타요소를 도시한 도면이다.
- 도 5 는, 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면의 단위 셀에 포함된 로드의 길이를 선형적으로 변화시킴에 따른 위상 변이(Φ/π) 값의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.
- 도 6 은, 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면에 있어서, 하나의 단위 메타요소에 포함된 단위체가 5 개이며, 위상 기울기(Ψ)가 80π 인 경우, 각각의 단위체의 로드의 길이를 나타낸 것이다.
- 도 7 은 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면에 포함되는 각각의 단위체의 로드의 길이와 각각의 단위체에 의한 위상 변이 크기, 및 그에 의한 위상 기울기(Ψ)를 나타낸 도면이다.
- 도 8 은 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면에 있어서, 하나의 단위 메타요소에 포함된 단위체가 5 개이며, 위상 기울기(Ψ)가 80π 인 경우, 각각의 단위체의 로드의 길이, 로드의 폭 및 단위체의 폭을 표로 나타낸 것이다.
- 도 9 는 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면에 있어서, 위상 기울기(Ψ)가 88.89π 인 경우, 단위체에 포함된 로드의 길이를 선형적으로 변화시킴에 따른 위상 변이(Φ/π) 값의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.
- 도 10 은 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면에 있어서, 위상 기울기(Ψ)가 100π 인 경우, 단위체에 포함된 로드의 길이를 선형적으로 변화시킴에 따른 위상 변이(Φ/π) 값의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.
- 도 11 은 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면에 있어서, 위상 기울기(Ψ)가 114.29π 인 경우, 단위체에 포함된 로드의 길이를 선형적으로 변화시킴에 따른 위상 변이(Φ/π) 값의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.
- 도 12 는 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면에 있어서, 위상 기울기(Ψ)가 133.33π 인 경우, 단위체에 포함된 로드의 길이를 선형적으로 변화시킴에 따른 위상 변이(Φ/π) 값의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.
- 도 13 은, 위상 기울기(Ψ)가 88.89π 인 경우, 100π 인 경우, 114.29π 인 경우, 133.33π 인 경우, 각각의 단위체의 로드의 길이, 로드의 폭, 및 단위체의 폭을 표로 나타낸 것이다.
- 도 14 및 15 는, 종파를 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면을 사용하지 않고 자유 경계(소산 물질 적용)에 입사시킨 경우(CASE 1)와, 종파를 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(소산 물질 적용)을 사용한 경계에 입사시킨 경우(CASE 2)를 비교한 시뮬레이션 결과 및 실험 결과를 나타낸 것이다.
- 도 16 은 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면이 적용될 수 있는 예를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0030] 이하, 본 발명의 실시예를 나타내는 첨부 도면을 참조하여 본 발명을 더욱 상세히 설명한다.
- [0031] 이하에서는, 순차적으로 본 발명의 이론적 배경과, 구체적인 실시예에 대해서 설명한다.
- [0032] <배경이 되는 물리적 법칙 및 현상에 관한 설명>
- [0033] 아래는 본 발명의 배경이 되는 물리적 법칙 및 현상에 대한 설명이다.
- [0034] 1) 스넬의 반사 법칙: 반사에 관한 물리 법칙이다. 스넬의 반사 법칙에 의하면, 일반적으로, 파동의 입사각과

반사각의 크기는 항상 동일하다.

[0035] 2) 위상 기울기: 파동이 반사하는 경계에 선형의 위상 차이를 도입하게 되면, 경계를 따라 일정한 위상 기울기가 구현된다. 즉, 단위 길이마다 균일한 크기의 위상 차이가 구배되면, 일정한 크기의 위상 기울기가 구현되게 된다. 즉, 위상 기울기란, 단위 폭(L) 당 발생하는 위상 차이라고 할 수 있다. 예컨대, 0.01 m 의 폭 당 2π 의 위상 차이가 발생하면, 위상 기울기는 $2\pi/0.01$ 로서, 200π 라고 할 수 있다.

[0036] 3) 일반화된 스넬의 반사 법칙: 위상 기울기를 고려한 스넬의 반사 법칙이다. 위상 기울기의 크기에 따라 파동의 입사각과는 별개로 반사각이 변하게 된다.

[0037] 도 2a, 2b 를 참조하여, 일반화된 스넬의 법칙을 고찰하면 이하와 같다. 먼저, 종파와 횡파의 파수를 각각 γ_1 그리고 γ_2 라고 하고, 경계로 입사하는 종파의 각도를 θ_1 , 경계로부터 반사하는 종파와 횡파의 각도를 각각 θ_1' 그리고 θ_2' 라고 한다.

[0038] 도 2a 에 도시된 바와 같이 탄성 자유 경계에 종파가 입사하게 되면, 항상 종파와 횡파 두 가지 모드의 파가 반사하게 된다. 즉, 종파 입사에 대한 기존의 스넬의 반사 법칙($\gamma_1 \sin \theta_1' = \gamma_2 \sin \theta_2' = \gamma_1 \sin \theta_1$)에 따라, 종파의 입사각과 반사각은 항상 동일한 크기($\theta_1 = \theta_1'$)로 나타난다.

[0039] 이때, 도 2b 에 도시된 바와 같이 경계에 임의의 위상 기울기(Ψ)를 부여하면(즉, 메타표면을 경계에 설치하면), 종파의 입사각과 반사각의 크기가 서로 다르게 나타나게 된다($\theta_1 \neq \theta_1'$). 다시 말해, 위상 기울기(Ψ)의 크기를 변화시킴으로써 반사각의 크기를 입사각과 독립적으로 조절할 수 있다. 이 경우, 파의 거동은 아래 식 1 과 같은 일반화된 스넬의 반사 법칙을 따른다.

[0040]
$$\gamma_1 \sin \theta_1' = \gamma_2 \sin \theta_2' = \Psi + \gamma_1 \sin \theta_1 \quad (\text{식 1})$$

[0041] 이 때, γ_1 과 γ_2 는 각각 종파와 횡파의 파수, Ψ 는 메타표면에 도입된 위상 기울기이다. 그리고, θ_1 , θ_1' , θ_2' 은 각각 종파의 입사각, 반사각 및 횡파의 반사각을 나타낸다.

[0042] 4) 헬름홀츠 포텐셜에 의하여 표현되는 반사파 : 탄성 자유 경계에 종파가 입사할 경우, 반사되는 종파와 횡파는 각각 다음과 같은 헬름홀츠 포텐셜로 나타낼 수 있다.

[0043] 반사되는 종파 :
$$\Phi = A_2 e^{i(\alpha x + \alpha y - \omega t)}$$

[0044] 반사되는 횡파 :
$$H = B_2 e^{i(\alpha x + \beta y - \omega t)}$$

[0045] 이 때, $\alpha^2 + \alpha^2 = \gamma_1^2$, $\alpha^2 + \beta^2 = \gamma_2^2$ 이고, α 와 β 는 각각 $\gamma_1 \sin \theta_1$ 과 $\gamma_2 \sin \theta_2$ 를 나타낸다. α 와 β 는 각각 반사되는 종파와 횡파의 x -방향 파수이다.

[0046] 하지만, 만약 경계에 메타표면을 적용하여 위상 기울기(Ψ)를 도입한다면, α 와 β 는 각각 $\gamma_1 \sin \theta_1'$ 과 $\gamma_2 \sin \theta_2'$ 로 쓸 수 있고, 일반화된 스넬의 반사 법칙에 의해 이들은 모두 $\Psi + \gamma_1 \sin \theta_1$ 이 된다(이하에서는, α 와 β 를 각각 γ_1^x 와 γ_2^x 로 표현한다.).

[0047] 이에 따라, 종파와 횡파의 y -방향 파수인 α 와 β 는 각각 $\sqrt{\gamma_1^2 - (\gamma_1^x)^2}$ 과 $\sqrt{\gamma_2^2 - (\gamma_2^x)^2}$ 이다(이하에서는, α 와 β 를 각각 γ_1^y 와 γ_2^y 로 표현한다.). 이 때, $\gamma_1^x > \gamma_1$ 그리고 $\gamma_2^x > \gamma_2$ 이면 물리적으로, 반사되는 종파와 횡파가 모두 경계(또는 표면)를 따라 전파하는 표면파가 된다는 것을 의미한다. 그러므로, 이 경우에서의 γ_1^y 와 γ_2^y 는 복소수 형태로 나타나게 된다.

[0048] <소산-증폭 메타표면(2) 및 일반화된 스넬의 반사 법칙>

[0049] 본 발명에서는, 우수한 흡수 성능을 갖는 효과를 달성하기 위해 서로 다른 형태의 파동인 종파와 횡파를 모두 고려한다.

[0050] 도 3 은, 탄성조음과 흡수 강화(소산-증폭) 메타표면과, 이에 파동이 입사된 후 반사되는 것을 나타낸 도면이다. x 축은 경계선으로 작용하며, x 축을 경계로 하여, y 축 방향 상방향은 파동이 전달되는 매질로 작용하는 바디(1)이다. 아울러, x 축 아래에는 단위 메타요소가 반복적으로 배열된 소산-증폭 메타표면(2)이 구비된다. 여기서, 바디(1)는 파동이 입사되는 소산 물질(재료)이며, 상기 소산 물질의 경계면(파동이 진행되는 방향에 위치하는 단부면)에 소산-증폭 메타표면(2)이 적용되었다고 이해될 수 있다.

[0051] 도 3 에서, 각각의 기호는 아래와 같다.

[0052] ①: 종파 입사;

[0053] ②: 소산된 회절 종파

[0054] ③: 소산된 회절 횡파

[0055] ④: 소산-증폭 메타표면

[0056] 메타표면에 입사하는 종파와 횡파 중, 종파 입사에 대해 고찰하면, 메타표면에 입사한 종파는 앞서 설명한 바와 같이, 일반화된 스넬의 반사 법칙(식 1)을 따른다.

[0057]
$$\gamma_1 \sin \theta_1' = \gamma_2 \sin \theta_2' = \Psi + \gamma_1 \sin \theta_1 \quad (\text{식 1})$$

[0058] 식 1 을 재구성하면, $\sin \theta_1' = \frac{\Psi}{\gamma_1} + \sin \theta_1$ 가 된다. 이 때, 위상 기울기(Ψ)가 적절히 크다면, $\sin \theta_1'$ 이 1보다 크게 되어($\sin \theta_1' > 1$) θ_1' 의 값은 실수가 아닌 허수로 나타나게 된다. 즉, 종파의 반사각(θ_1')이 허수값을 갖게 되고, 이는 경계 밖의 공간으로 반사되는 것이 아니다.

[0059]
$$\sin \theta_2' = \frac{\Psi}{\gamma_2} + \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \sin \theta_1$$
과 같이 재구성할 수 있다. 이 때, 위상 기울기(Ψ)가 적절히 크다면, $\sin \theta_2'$ 이 1보다 크게 되어($\sin \theta_2' > 1$) θ_2' 의 값은 실수가 아닌 허수로 나타나게 된다. 즉, 이론적으로 위상 기울기(Ψ)의 크기가 적절히 크면, 종파와 횡파가 경계밖으로 반사되지 않는다.

[0060] 물리적으로, 이러한 종파와 횡파는 다음의 식 (2-1 내지 2-3)와 같이 표현되는 경계를 따라 전파하는 표면파로 전환된다. 하기 식 2-1 내지 2-3 은, 앞서 설명한 헬름홀츠 포텐셜로부터 유도된 것이다.

[0061]
$$\Phi \cong e^{i(\gamma_1^x x - \omega t)} e^{-\gamma_1^y y} \quad (\text{식 2-1})$$

[0062]
$$H \cong e^{i(\gamma_2^x x - \omega t)} e^{-\gamma_2^y y} \quad (\text{식 2-2})$$

[0063]
$$\gamma_i^x = \gamma_1 \sin \theta_1 + \Psi, \quad \gamma_i^y = \sqrt{(\gamma_i^x)^2 - \gamma_i^2} \quad (i=1,2) \quad (\text{식 2-3})$$

[0064] 앞서 설명한 바와 같이, Φ 와 H 는 각각 표면 종파와 횡파의 포텐셜을 의미한다. 또한, γ_i^x 은 이러한 표면파의 x 방향(경계 방향) 파수를 나타내며, γ_i^y 는 경계로부터의 감쇠율을 나타낸다.

[0065] 위 식에서 알 수 있듯이, 위상 기울기(Ψ)가 커지게 되면, γ_i^x 가 커지게 되고, 따라서 γ_i^y 도 증가한다. 그러므로, 이를 식 (2-1)과 (2-2)에 대입하여 생각하면, γ_i^y 가 증가할수록 더 급격한 기울기를 갖는 지수 함수의 형태를

나타낸다. 즉, Φ 와 H 가 y -방향에 따라 더 급격하게 감소(감쇠율 증가)하게 된다.

[0066] 결론적으로, 위상 기울기(Ψ)가 극도로 클 경우, 그만큼 감쇠율도 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 또한, 감쇠율이 매우 크다는 것은 경계로부터의 수직 거리를 나타내는 y -방향에 따라 모든 파동 에너지가 매우 급격히 감소하는 것을 의미하기 때문에, 이는 곧 경계에 매우 큰 파동 에너지가 집중된다는 것을 의미한다.

[0067] 하지만, 실제로 메타표면의 주기성으로 인해 표면파로부터 회절파들이 나타나게 된다. 이러한 회절파들은 메타표면 내부에서의 다중 반사를 통해 발생하기 때문에 손실에 매우 민감한 특징이 있다. 즉, 메타표면에 적은 양의 손실만을 부여하더라도 이러한 회절파들은 급격히 줄어들게 된다.

[0068] 또한, 식 2-1 내지 2-3 으로부터, 위상 기울기(Ψ)가 커질수록 소산율도 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 메타표면 경계로 표면파의 에너지가 더 집중되는 것을 의미한다. 따라서, 메타표면에 손실을 부여할 경우에 위상 기울기(Ψ)가 커질수록 더 많은 에너지가 손실 효과에 노출된다. 즉, 메타표면에 큰 위상 기울기(Ψ)를 도입함으로써 회절되는 종파와 횡파를 매우 크게 소산시킬 수 있다.

[0069] 참고로, 종파의 위상 속도(c_1)는 횡파의 위상 속도(c_2)보다 일반적으로 더 크기 때문에 횡파의 파수

($\gamma_2 = \frac{\omega}{c_2}$)는 일반적으로 종파의 파수($\gamma_1 = \frac{\omega}{c_1}$)보다 더 크다. 그러므로, 종파의 반사각뿐만 아니라 횡파의 반사각도 모두 허수값으로 만들기 위해서, 단지 종파의 반사각만 허수값으로 만드는 위상 기울기(Ψ)보다 더 큰 위상 기울기(Ψ)를 도입해야 한다.

[0070] 종합하면, 파동이 입사하는 표면에 특수한 구조를 갖는 메타표면을 구현하고, 상기 메타표면에 극도로 큰 위상 기울기(Ψ)를 도입함으로써, 탄성초음파의 소산을 증폭시키는 효과를 갖는 소산-증폭 메타표면(2)을 구현할 수 있다. 일 예로, 이러한 메타표면은 금속 표면을 가공하는 방법으로 제작될 수 있다.

[0071] <소산-증폭 메타표면(2)을 구현하기 위한 위상 기울기(Ψ)의 크기 범위>

[0072] 위와 같은 물리적 원리를 바탕으로, 본 발명에서는, 종래의 기술(소산-증폭 메타표면(2)을 사용하지 않는 경우로서, 탄성 자유 경계에 단순히 소산물질만 있는 경우)에 비해서, -90° 에서 90° 까지의 모든 입사 범위에서 소산율을 더 크게(정량적으로 표현할 경우, 1배 초과) 할 수 있는 메타표면을 구현한다.

[0073] 이와 같이 소산율을 크게 하는 메타표면에서, 위상 기울기(Ψ)의 크기는 약 80π 이상일 수 있다. 아울러, 실제로 메타표면의 설계가 가능한 범위(실제로 제작 시, 0.1mm를 최소 공차로 생각할 경우)에서 위상 기울기(Ψ)의 크기는 5000π 이하일 수 있다. 하지만, 실제로 효과적인 메타표면의 작동을 위해서는, 위상 기울기(Ψ)의 크기는 최대 2000π 를 초과하지 않는 것이 바람직하다. 이에 따라서, 본 발명의 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면(2)의 위상 기울기(Ψ)의 범위는 80π 에서 2000π 로 생각할 수 있다. 일 예로, 위상 기울기(Ψ)의 크기는, 80π , 88.89π , 100π , 114.28π , 및 133.33π 일 수 있다. 아울러, 일 실시예에 의하면, 위상 기울기(Ψ)의 크기는 바람직하게는 103π 내지 2000π 일 수 있다.

[0074] <실시예에 의한 소산-증폭 메타표면(2)의 단위 메타요소(10)의 구조>

[0075] 도 4 는 본 발명의 일 실시형태에 의한 소산-증폭 메타표면(2)을 구성하는, 단위 메타요소(10)를 도시한 도면이다.

[0076] 이하에서는 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면(2)을 설명한다. 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면(2)은 바디(1)(파동이 전파되는 미디어)의 경계 부분에 구비된다. 이와 같은 소산-증폭 메타표면(2)은, 앞서 설명한 바와 같이, 큰 크기의 위상 기울기(Ψ)를 가지며, 따라서 소산율을 크게 할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면(2)은, 단위 메타요소(10)가 반복적으로 배열되는 구조를 갖는다. 바람직하게는, 소산-증폭 메타표면(2)은, 동일한 구조를 갖는 단위 메타요소(10)가 반복적으로 배열될 수 있다.

[0077] 아울러, 하나의 단위 메타요소(10)는, 막대형 공진기 구조를 갖는 단위체(100)를 복수 개 포함한다. 단위체(100)는 사용 주파수, 종파와 횡파 반사의 임계각 그리고 가공 가능 치수 등을 고려하여 설계될 수 있다.

[0078] 단위 메타요소(10)는 일 방향(제1 방향)으로 반복되게 배열될 수 있고, 마찬가지로 상기 단위체(100)는 하나의 단위 메타요소(10) 내에서 일 방향(제1 방향)으로 배열될 수 있다.

[0079] 물론, 이러한 구조는 본 발명의 일 실시예이며, 본 발명은 위상 기울기(Ψ)를 부여할 수 있는 모든 구조를 포함

할 수 있다. 즉, 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)은, 위상 기울기(Ψ)를 부여할 수 있는 모든 구조를 포함할 수 있다.

[0080] <막대형 공진기 구조에 의한 위상 변이>

[0081] 이하에서는, 단위 메타요소(10)가 구현하는 위상 기울기(Ψ)에 대해서 설명하기 전에, 각각의 단위체(100)가 갖는 막대형 공진기 구조 및 그에 의한 위상 변이에 대해서 설명한다.

[0082] 도 4 에 도시된 바와 같이, 막대형 공진기의 구성을 갖는 각각의 단위체(100)는, 소정의 폭(a_r)을 갖는다. 또한, 단위체(100)는, 소정의 길이를 갖고 바디(1)의 경계면(B)보다 더 외측 방향으로 연장되는 바(bar) 형태의 로드(110)를 가질 수 있다. 상기 로드(110)는 소정의 폭(a_d)과, 길이(L_d)를 갖는다. 이와 같이, 막대형 공진기의 구성을 갖는 단위체(100)는, 일 예로 와이어 커팅을 통해 가공될 수 있다.

[0083] 소정의 크기의 주파수(예 : 100 kHz)를 갖는 종파를 상기 막대형 공진기 구조를 갖는 단위체(100)에 입사(즉, 바디(1)의 내측으로부터, 상기 막대형 공진기가 구비된 경계면 방향으로 입사)하면 반사파가 발생한다. 이때, 로드(110)의 길이 L_d 에 따라서 반사파의 위상 변이(phase shift)가 발생한다.

[0084] 도 5 는, 상기 로드(110)의 길이 L_d 를 선형적으로 변화시킴에 따른 위상 변이(Φ/π) 값의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 본 시뮬레이션에서는, 입사된 종파의 주파수는 100 kHz 이고, 로드(110)의 폭(a_d)는 소정의 값으로 고정되어 있다.

[0085] 도 5 에서, 가로축은 로드(110)의 길이 L_d 이며, 세로축은 해당 길이의 로드(110)를 갖는 단위체(100)에서 발생한 위상 변이의 크기(Φ/π)이다. 시뮬레이션 결과의 세로축 최대값이 2 인 것은, 파동은 2π 의 주기를 갖고 반복되기 때문이다.

[0086] 예컨대, 도 5 를 참조하여 설명하면, 로드(110)의 길이가 $x1$ 인 막대형 공진기에 입사한 파동의 경우, 반사파의 위상 변이의 크기는 $y1$ 이다. 이를 달리 설명하면, 막대형 공진기에서 발생하는 반사파의 위상 변이의 크기를 $y1$ 으로 하고자 하면, 막대형 공진기의 로드(110)의 길이를 $x1$ 으로 하면 되는 것으로 이해될 수 있다. 따라서, 시뮬레이션으로 도출된 로드(110)의 길이와 위상 변이의 크기에 따라서, 단위체(100)에 구비된 로드(110)의 길이를 적절히 선택함으로써, 반사파의 위상 변이의 크기를 쉽게 조절할 수 있음을 알 수 있다. 아울러, 반사파의 위상 변이의 크기를 선택하기 위해서는 단위체(100)가 갖는 로드(110)의 길이를 적절히 선택하면 됨을 알 수 있다.

[0087] <위상 기울기(Ψ)에 따른 단위 메타요소(10)의 폭 및 단위체(100)의 폭>

[0088] 위에서 확인한 바와 같이, 서로 인접한 단위체(100)의 로드(110)의 길이를 서로 상이하게 하면, 각각의 단위체(100)는 서로 상이한 위상 변이 값을 갖게 된다. 따라서, 서로 인접한 단위체(100)의 로드(110)의 길이가 상이하면, 각각의 단위체(100)에서 발생하는 위상 변이 사이에 크기 차이가 있게 되며, 따라서 이러한 위상 변이 크기 차이에 의한 위상 기울기(Ψ)가 발생하게 된다. 앞서, 위상 기울기(Ψ)라 함은, 메타표면의 단위 폭(L) 당 발생하는 위상 차이라고 설명하였다. 본 실시예에서, 위상 기울기(Ψ)란, 서로 인접하는 단위체(100)에서 발생하는 위상 변이 차이 크기를 단위체(100)의 폭으로 나눈 값이라고 이해될 수 있다. 여기서, 위상 기울기(Ψ)의 단위는 rad/m 가 된다.

[0089] 따라서, 실시예와 같이 막대형 공진기 구조를 갖는 단위체(100)로 구성된 단위 메타요소(10)를 포함하는 메타표면의 위상 기울기(Ψ)의 크기는, 각각의 단위체(100)의 폭(a_r), 및 서로 인접한 단위체(100) 사이의 위상 변이 크기 차이에 의해서 결정된다. 여기서, 단위 메타요소(10)에 포함되는 단위체(100)의 개수와 각각의 단위체(100)의 폭을 곱한 값이 곧 단위 메타요소(10)의 폭이 된다.

[0090] 결과적으로, 단위 메타요소(10)의 폭(L)과 위상 기울기(Ψ)의 관계는 아래 식 3 과 같다.

[0091]
$$\Psi = 2\pi/L$$

[0092] (식 3)

[0093] 식 3 에서, 우측 변의 분자가 2π 인 것은, 파동의 위상은 2π 의 주기를 가지기 때문이다. 즉, 본 발명의 목적에 따라서, 하나의 단위 메타요소(10) 내에서 2π 의 위상 변이를 모두 커버할 필요가 있기 때문이다. 또한, 식 3 에서 단위 메타요소(10)의 폭(L)의 단위는 m 이다.

- [0094] 목표하는 위상 기울기(Ψ)의 크기(소산-증폭 메타표면(2)을 달성하는 위상 기울기(Ψ)의 크기)에 따라서, 단위 메타요소(10)의 폭(L)을 도출한다. 일 예로, 위상 기울기(Ψ)의 크기를 80π 로 할 경우에는, 단위 메타요소(10)의 폭(L)은, $1/40m$ (0.025 m) 가 된다. 다른 예로, 위상 기울기(Ψ)의 크기를 133.33π 로 할 경우에는, 단위 메타요소(10)의 폭은 0.015 m 가 될 것이다.
- [0095] 아울러, 하나의 단위 메타요소(10)에 포함되는 단위체(100)의 개수가 N 개일 경우, 하나의 단위체(100)의 폭(a_r)은 단위 메타요소(10)의 폭(L)을 단위체(100)의 개수(N)으로 나눈 값이 된다. 즉, 하나의 메타요소 내의 단위체(100)의 개수(N)와 단위체(100)의 폭(a_r)의 관계는 아래 식 4 와 같다.
- [0096] $a_r = L/N$
- [0097] (식 4)
- [0098] 예컨대, 상기와 같이 위상 기울기(Ψ)를 133.33π 로 하며, 단위 메타요소(10) 내에 포함되는 단위체(100)를 개수(N)를 5 개로 하면, 하나의 단위체(100)의 폭(a_r)은 0.003 m 가 된다.
- [0099] 따라서, 목표로 하는 위상 기울기(Ψ)에 따라서 단위 메타요소(10)의 폭(L)을 설정한 후, 하나의 메타요소가 포함하는 단위체(100)의 개수(N)을 설정하면, 각각의 단위체(100)의 폭(a_r)이 결정된다.
- [0100] 아울러, 각각의 단위체(100)에 포함되는 로드(110)의 폭(a_d)은, 적절하게 선택될 수 있다. 로드(110)의 폭(a_d)이 지나치게 크면 인접한 로드(110)와 맞닿아서 막대형 공진기 효과를 가질 수 없을 수 있으며, 마찬가지로 지나치게 작으면 메타표면으로서 기능을 상실하거나 또는 내구성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 로드(110)의 폭(a_d)은, 단위체(100)의 폭(a_r)대비 30~70% 의 크기를 가질 수 있다.
- [0101] <일정한 크기의 위상 기울기(Ψ)를 구현하기 위한 로드(110)의 길이>
- [0102] 하나의 단위 메타요소(10)가 일정한 크기의 위상 기울기(Ψ)를 갖도록 하기 위해서는, 하나의 단위 메타요소(10)에 구비되는 복수 개의 단위체(100)에 의한 위상 변이가 선형적으로 증가(또는 감소)해야 한다. 즉, 서로 인접한 단위체(100)에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하여야 한다.
- [0103] 따라서, 하나의 단위 메타요소(10)에 포함된 단위체(100)가 5 개일 경우, 서로 인접한 단위체(100) 사이의 위상 변이 차이는 $2\pi/5$ 가 되어야 한다. 즉, 각각의 단위체(100)는 순차적으로(또는 역순으로) $2\pi/5$, $4\pi/5$, $6\pi/5$, $8\pi/5$, $2\pi(=0)$ 의 위상 변이를 가져야 한다.
- [0104] 다른 예로, 하나의 단위 메타요소(10)에 포함된 단위체(100)를 10 개로 하면, 서로 인접한 단위체(100) 사이의 위상 변이 차이는 $2\pi/10$ 가 되어야 한다. 즉, 각각의 단위체(100)는 순차적으로(또는 역순으로) $9\pi/5$, $8\pi/5$, $7\pi/5$, $6\pi/5$, $5\pi/5$, $4\pi/5$, $3\pi/5$, $2\pi/5$, $1\pi/5$, 0 의 위상 변이를 가져야 할 것이다.
- [0105] 실시 형태에서는, 5 개의 단위체(100)를 포함하는 단위 메타요소(10)를 상정한다. 즉, 서로 인접한 단위체(100) 사이의 위상 변이 차이는 $2\pi/5$ 이다. 앞서 시뮬레이션에서, 상기 위상 변이 크기 차이($2\pi/5$)를 충족하는 로드(110)의 길이(L_d)를 각각의 단위체(100)에 적용하면 도 6 에 도시된 바와 같다. 즉, 각각의 단위체(100)에서 발생하는 위상 변이 크기는, 순차적으로 $8\pi/5$, $6\pi/5$, $4\pi/5$, $2\pi/5$, 0 으로 하며, 이에 따른 로드(110)의 길이(L_d)를 도출하면 아래 a, b, c, d, e 와 같다. 물론, 반대의 순서를 가질 수도 있다.
- [0106] 즉, 순차적으로 로드(110)의 길이(L_d)를 a, b, c, d, e 로 하면 하나의 단위 메타요소(10)는 일정한 크기의 위상 기울기(Ψ)를 구현하게 된다. 각각의 단위체(100)의 로드(110)의 길이(L_d)와 각각의 단위체(100)에 의한 위상 변이 크기, 및 그에 의한 위상 기울기(Ψ)를 나타내면 도 7 에 도시된 바와 같다. 도 7 에 도시된 바와 같이, 위상 기울기(Ψ)는, $2\pi/L$ 이 된다.
- [0107] 아울러, 시뮬레이션에 의하여 도출된 a, b, c, d, e 값의 결과는 도 8 과 같다.
- [0108] 아울러, 위상 기울기(Ψ)를 각각 달리(88.89π , 100π , 114.28π , 133.33π) 하였을 때(즉, 단위체(100)의 폭(a_r)을 달리 하였을 때)의 로드(110)의 길이(L_d)에 따른 위상 변이 크기의 시뮬레이션 결과와, 해당 위상 기울기(Ψ)를 달성하기 위한 각각의 단위체(100)의 로드(110)의 길이(L_d)는 도 9 내지 13 에 도시된 바와 같다. 도 9 내지 12 는 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이며, 도 13 은 해당 결과에 따른 로드(110)의 길이(L_d)를 표로 나타낸

것이다.

- [0109] 한편, 입사되는 파동의 주파수가 달라질 경우에는, 주파수에 따라서 파장이 변화하므로, 단위 메타요소(10)의 폭(L)을 파장의 변화만큼 스케일링하면 원하는 위상 기울기(Ψ)를 도출할 수 있게 된다.
- [0110] 이러한 스케일링 방법을 1) 단위체(100)의 로드(110)의 길이와 주파수 변화 사이의 관계, 및 2) 단위체(100)의 폭과 주파수의 변화 사이의 관계를 토대로 설명하면 아래와 같다.
- [0111] 1) 단위체(100)의 로드(110)의 길이와 주파수 변화 사이의 관계 :
- [0112] 단위체(100)의 로드(110)의 길이(L_d)에 따른 위상 변이는 공진 주파수 주변에서 효율적으로 이루어진다. 즉, 공진 주파수 주변에서는 다른 주파수 대역에 비해 로드(110)의 길이(L_d)가 비교적 조금만 변하더라도 위상 변이가 급격히 나타나게 되어 전체적인 위상 변이의 범위를 2π 까지 확보하기 수월하다. 그러므로, 단위체(100)의 로드(110)의 길이(L_d)를, 입사되는 파동의 주파수의 변화에 의한 공진 주파수의 변화만큼 스케일링하면 원하는 위상 기울기(Ψ)를 도출할 수 있다. 일반적으로, 로드(110)의 길이(L_d)가 짧아지면 공진 주파수는 높아지고, 반대로, 로드(110)의 길이(L_d)가 길어지면 공진 주파수는 낮아진다. 그렇기 때문에, 입사되는 파동의 주파수가 높아지면 전체적으로 단위체(100)의 로드(110)의 길이(L_d)는 짧아지게 되고, 반대로, 입사되는 파동의 주파수가 낮아지면 전체적으로 단위체(100)의 로드(110)의 길이(L_d)는 길어지게 된다.
- [0113] 2) 단위체(100)의 폭과 주파수의 변화 사이의 관계 :
- [0114] 호이겐스의 원리에 의해 여러 개의 단위체(100)들로 구성된 단위 메타요소(10) 및 모드 변환 메타표면(2)으로부터 형성되는 반사 파면을 효과적으로 형성하기 위해, 각 단위체(100)의 폭(a_r)은 입사되는 파동의 반파장보다 작아야 한다. 즉, 단위체(100)의 폭(a_r)을 반파장의 변화에 맞춰 더 작게 설계해야 한다. 만일, 입사되는 파동의 주파수가 높아지면, 단위체(100)의 폭(a_r)은 작아져야 하므로 이에 따라 단위 메타요소(10)의 폭(L)도 작아지게 된다.
- [0115] <본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2) 제조방법>
- [0116] 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2) 제조방법은, 단위 메타요소(10)가 반복적으로 형성된 구조를 갖는 메타표면으로서, 상기 단위 메타요소(10)는, 단위체(100)를 $N(N>1)$ 개 포함하며, 상기 단위체(100)는 상기 단위 메타요소(10) 내에서 소정의 방향으로 배열되고, 각각의 상기 단위체(100)는 소정의 크기의 위상 변이를 발생시키며, 서로 인접한 단위체(100)에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하여, 하나의 단위 메타요소(10) 내에서 상기 단위체(100)에 의한 위상 변이 크기는 선형적으로 증가하거나, 또는 감소하여, 상기 단위 메타요소(10) 및 메타표면은 일정한 크기의 위상 기울기(Ψ)를 갖는 소산-증폭 메타표면(2)을 제조하는 방법이다.
- [0117] 이에 의하면, 목적하는 위상 기울기(Ψ)의 크기를 정하는 단계(제1 단계); 하나의 상기 단위 메타요소(10) 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하도록 상기 위상 기울기(Ψ)에 따라서 상기 단위 메타요소(10)의 폭 L 을 정하는 단계(제2 단계); 및 서로 인접한 상기 단위체(100)에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하도록 상기 단위체(100)를 구성하여 상기 위상 기울기(Ψ)가 구현되도록 하는 단계(제3 단계);를 포함한다.
- [0118] 이때, 실시예에 의하면, 서로 인접한 상기 단위체(100)에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 $2\pi/N$ 가 되도록 하여, 하나의 상기 단위 메타요소(10) 내에서 2π 범위의 위상 변이가 발생하도록 하는 단계; 를 더 포함할 수 있다.
- [0119] 아울러, 실시예에 의하면, 상기 단위체(100)는, 소정의 경계면을 갖는 바디(1), 및 상기 경계면에 형성되며 상기 경계면보다 더 돌출되게 연장되는 로드(110)를 포함하는 막대형 공진기 구조를 갖고, 각각의 상기 단위체(100)는 상기 로드(110)의 길이에 따라서 소정의 크기의 위상 변이를 발생시키며, 각각의 상기 단위체(100)의 상기 로드(110)의 길이는 서로 인접한 단위체(100)에서 발생하는 위상 변이의 크기 차이가 동일하도록 하는 단계;를 더 포함할 수 있다. 이때, 상기 로드(110)의 길이 결정은, 상기 설명한 바와 같은 시뮬레이션 결과를 이용하여 이루어질 수 있다.
- [0120] 또한, 상기 위상 기울기(Ψ)의 크기는, 80π 내지 2000π 의 범위를 가질 수 있다.
- [0121] <소산율 실험 결과>

- [0122] 종파를 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)을 사용하지 않고 자유 경계(소산 물질 적용)에 입사시킨 경우(CASE 1)와, 종파를 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)(소산 물질 적용)을 사용한 경계에 입사시킨 경우(CASE 2)를 비교하였다. 즉, CASE 2 는, CASE 1 에 대해서 소산 물질의 경계에 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)을 적용한 것이라고 할 수 있다. 여기서는, 종파만을 우측 면(소산-증폭 메타표면(2)이 적용된 면)으로 입사하였다. 아울러, 위상 기울기(Ψ)는 133.3π 로 설정되었다.
- [0123] 도 14 는 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이며, 도 15 는 실험 결과를 나타낸 것이다.
- [0124] CASE 1 과 CASE 2 의 경우, 모두 종파와 횡파가 반사되는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 시뮬레이션 결과에 의하면, CASE 2 는 CASE 1 에 비해 발생하는 종파와 횡파가 각각 3.33배 그리고 6.52배 더 크게 소산되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 실험적으로는 각각 2.14배 그리고 1.23배 더 크게 소산되는 것을 확인할 수 있다.
- [0125] 추가적으로, 종파의 수직 입사뿐만이 아닌 종파의 비스듬한 입사(45도 입사)에 대해, CASE 2 의 경우, CASE 1 에 비해 발생하는 종파와 횡파가 시뮬레이션 상에서 각각 2.81배 그리고 1.69배 더 크게 소산되는 것이 확인되었다. 또한, 실험적으로는 각각 9.14배 그리고 1.93배 더 크게 소산되는 것을 확인하였다.
- [0126] 상기와 같은 시뮬레이션 결과를 통해, 단지 소산 물질만을 사용하였을 경우(CASE 1 : 소산-증폭 메타표면(2) 미사용)에 비해서, 본 발명의 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면을 부여한 소산 물질을 사용하였을 경우(CASE 2 : 소산-증폭 메타표면(2) 사용)에는, 반사되는 종파와 횡파를 크게 줄일 수 있다는 효과가 확보된다는 사실을 파악할 수 있다. 즉, 본 발명의 실시예에 의한 소산-증폭 메타표면(2)에 의해 소산 물질의 소산 성능이 크게 증폭됨으로써 적은 양의 손실을 부여하는 것 만으로도 탄성초음파의 흡수를 크게 강화할 수 있다. 따라서, 더 작은 양의 소산 물질을 사용하여도 소산 성능을 확보하거나, 강화시킬 수 있다.
- [0127] 또한, 실험 결과에 의해서, 메타표면을 사용하지 않았을 경우(CASE 1)에 비해, 메타표면을 사용하였을 경우(CASE 2)에는 종파와 횡파가 약 80% 이상 더 크게 소산되는 사실을 확인할 수 있다.
- [0128] <적용예>
- [0129] 도 16a 및 16b 는 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)이 적용될 수 있는 예를 나타낸 도면이다. 배경 기술에서 설명한 바와 같이, 종래의 트랜스듀서에는 소정의 소산 물질만을 적용한 백업 재료가 사용되었으며, 비파괴 검사용 웨지의 경우에는 원하지 않는 반사를 산란(또는 소산)시키는 피라미드형 산란체를 사용하였다. 이에 따라서, 소산 물질의 소형화와 높은 흡수 성능을 동시에 달성하기 어렵다.
- [0130] 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)은 이러한 트랜스듀서의 백업 재료나 비파괴 검사용 웨지에 사용되는 피라미드형 산란체의 대체재로 적용될 수 있으며, 소산 효과를 더욱 향상시킬 수 있다. 구체적으로는, 도 16a 및 도 16b 에 도시된 바와 같이, 백업 재료의 표면에 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)을 적용하거나, 또는 비파괴 검사용 웨지의 일 면에 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)을 적용하는 것을 예로 들 수 있다.
- [0131] 즉, 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)은 탄성초음파 흡수 강화 메타표면으로서, 트랜스듀서의 압전 수정체 후방(결합층의 반대측)에 위치하는 백업 재료에 적용되거나, 또는 비파괴 검사용 웨지에서 트랜스듀서 접촉면 및 검사 시편 접촉면을 제외한 다른 면에 적용될 수 있다.
- [0132] 따라서, 본 발명의 소산-증폭 메타표면(2)에 의하면, 얇고 간단한 구조의 메타표면을 이용함으로써 기존의 방법 및 구조에 비해 더 적은 양의 소산 수단만으로도 종파와 횡파를 모두 효과적으로 흡수할 수 있다. 또한, 본 발명에 의한 소산-증폭 메타표면(2)은, 소형화와 정밀함이 요구되는 다양한 초음파 응용 분야에 적극적으로 활용될 수 있다.
- [0133] 이상에서는 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였지만, 본 발명은 상술한 특정의 실시예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진자에 의해 다양한 변형실시가 가능한 것은 물론이고, 이러한 변형실시들은 본 발명의 기술적 사상이나 전망으로부터 개별적으로 이해되어져서는 안될 것이다.

부호의 설명

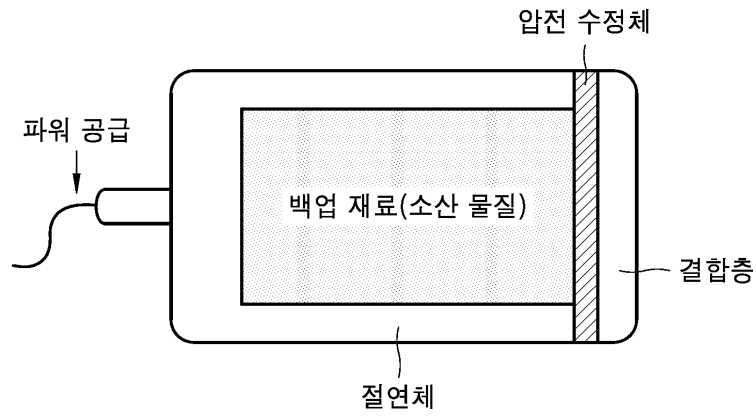
- [0134] 1: 바디
2: 소산-증폭 메타표면
10: 단위 메타요소

100: 단위체

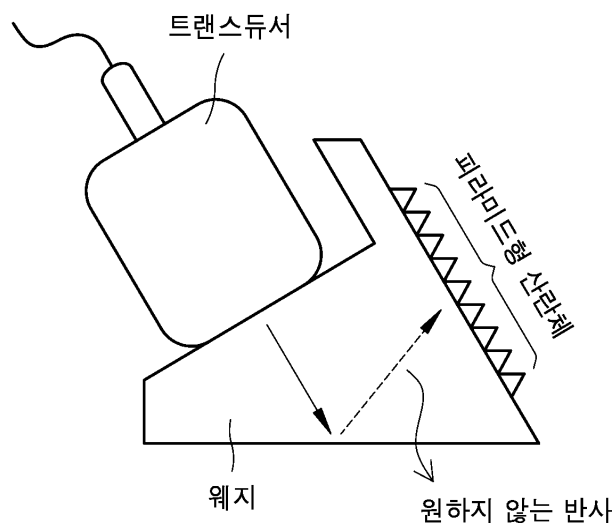
110: 로드

도면

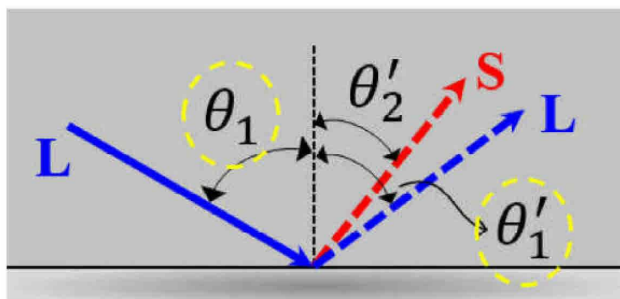
도면1a



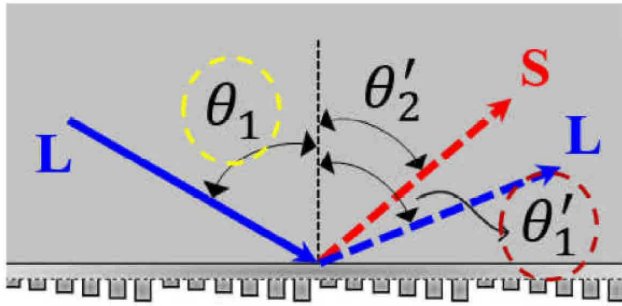
도면1b



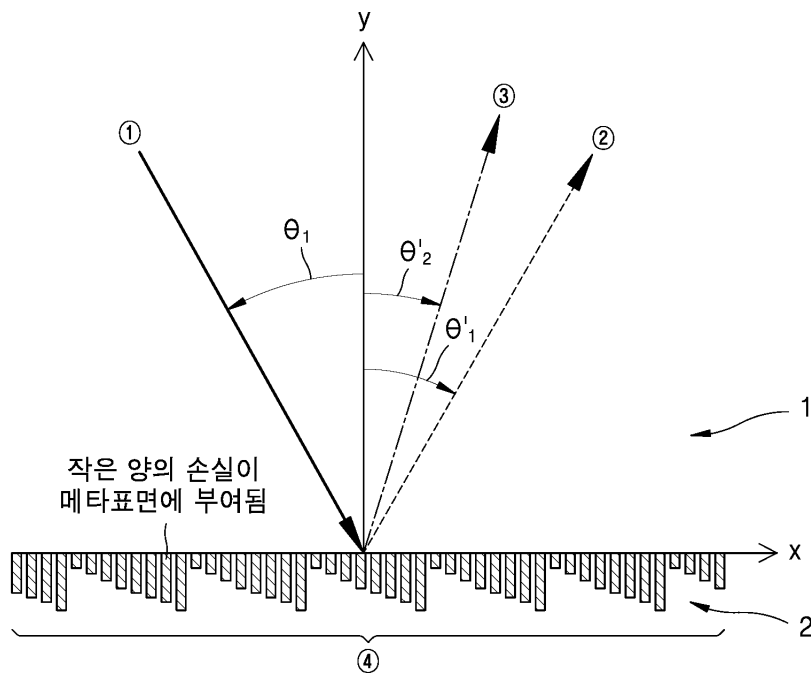
도면2a



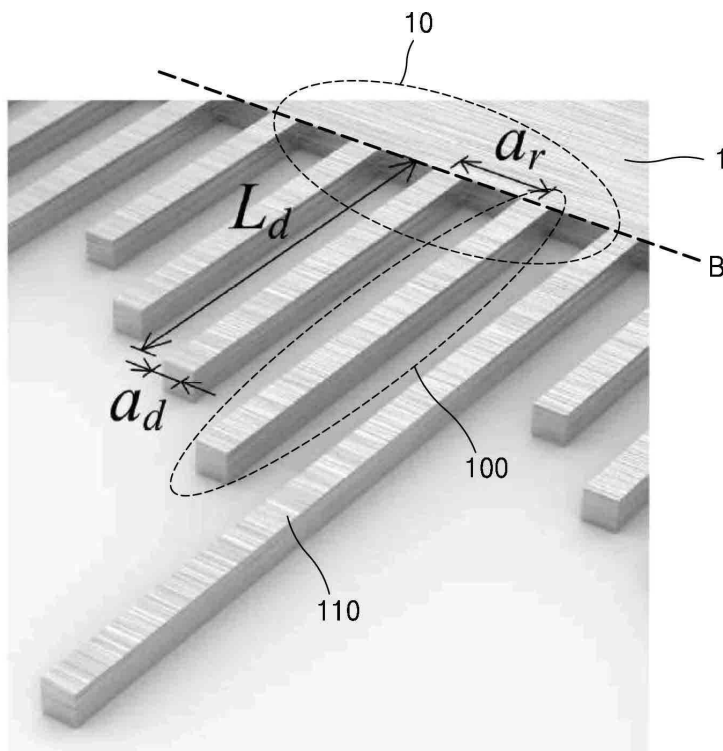
도면2b



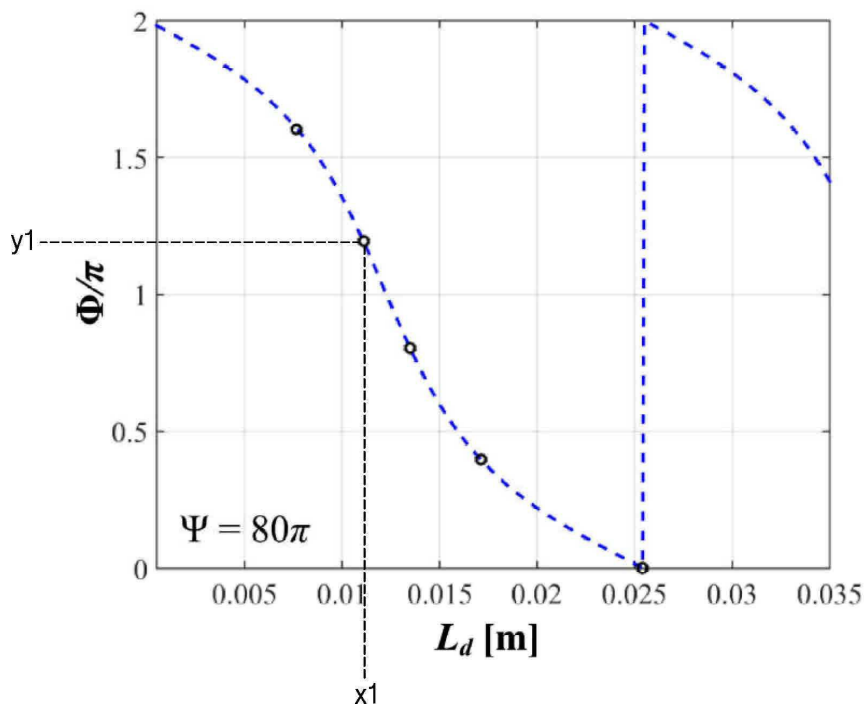
도면3



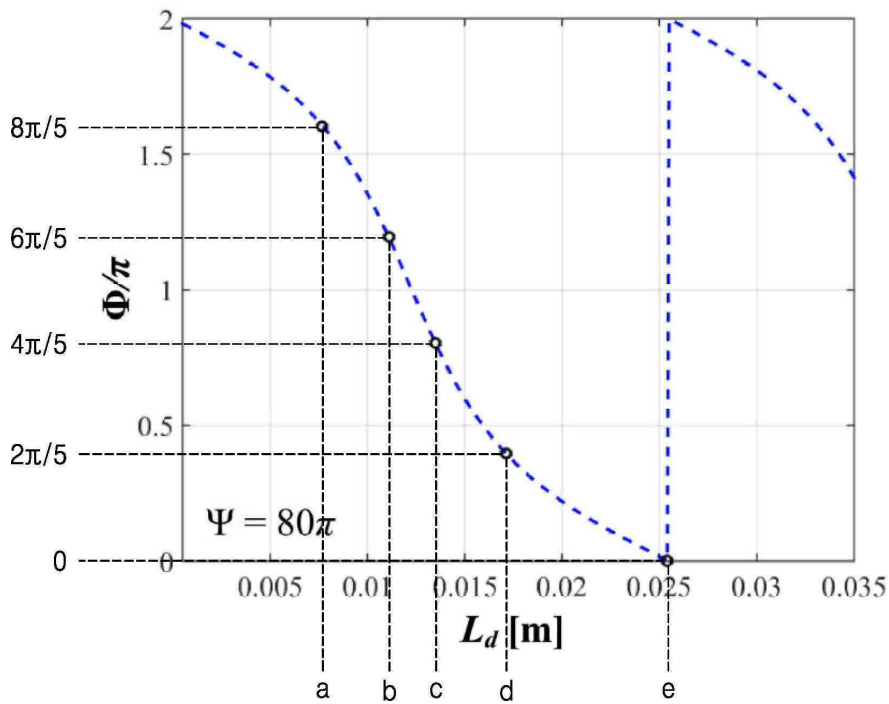
도면4



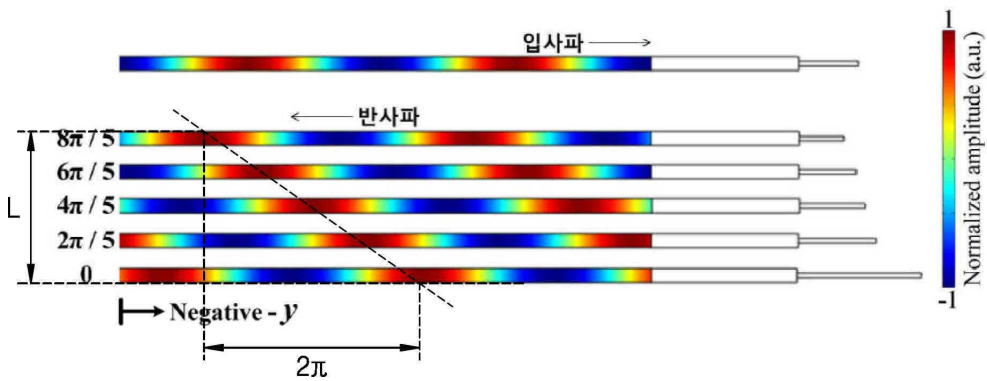
도면5



도면6



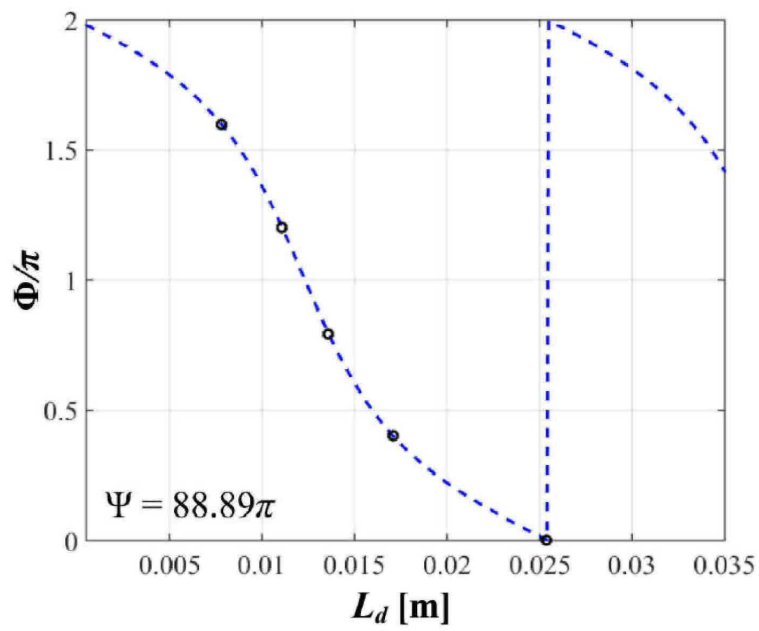
도면7



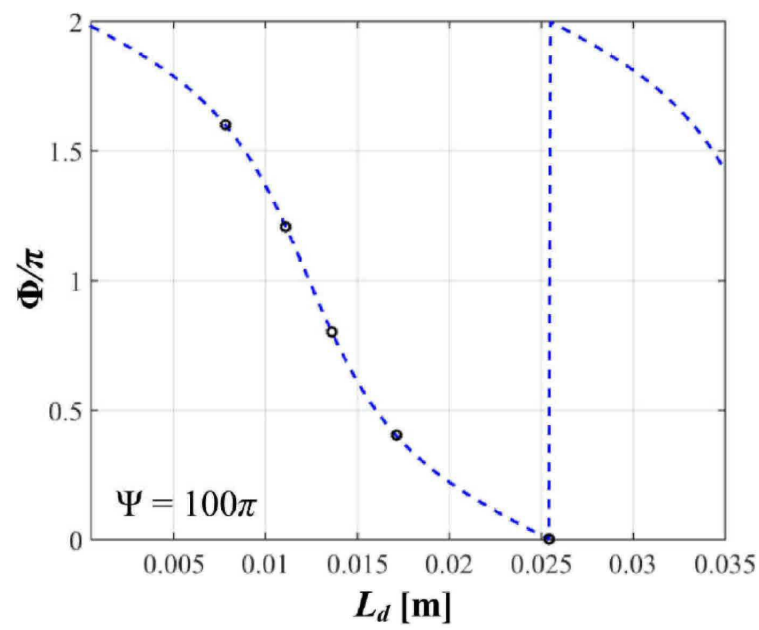
도면8

위상기울기	L_d	a_r	a_d
80π	0.0077 [m]	0.005 [m]	0.0025 [m]
	0.0111 [m]		
	0.0135 [m]		
	0.0171 [m]		
	0.0254 [m]		

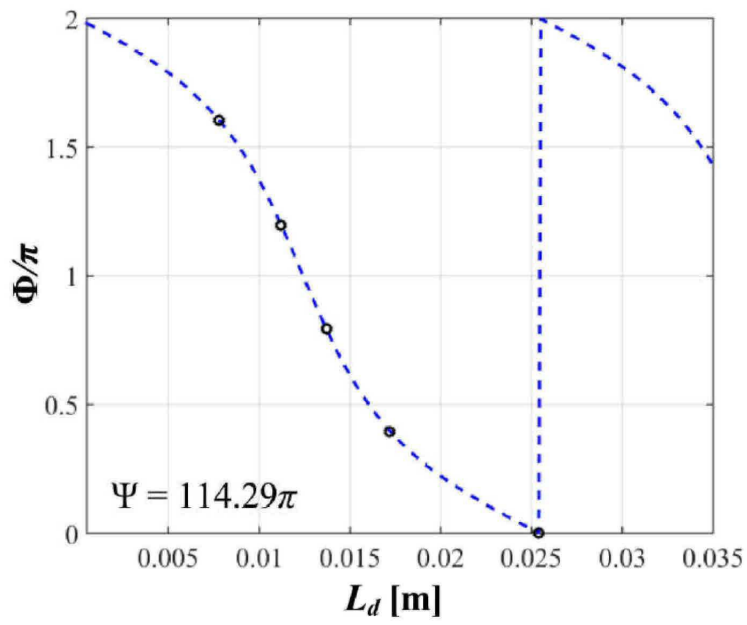
도면9



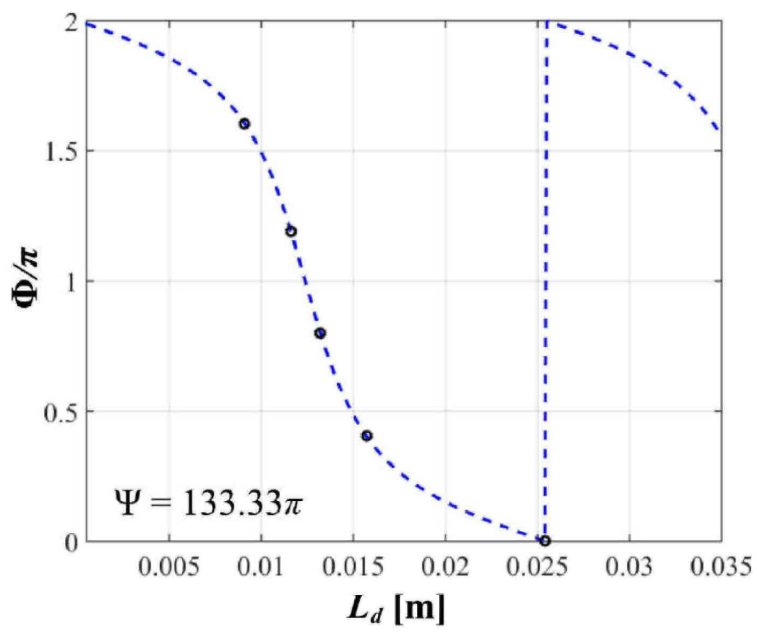
도면10



도면11



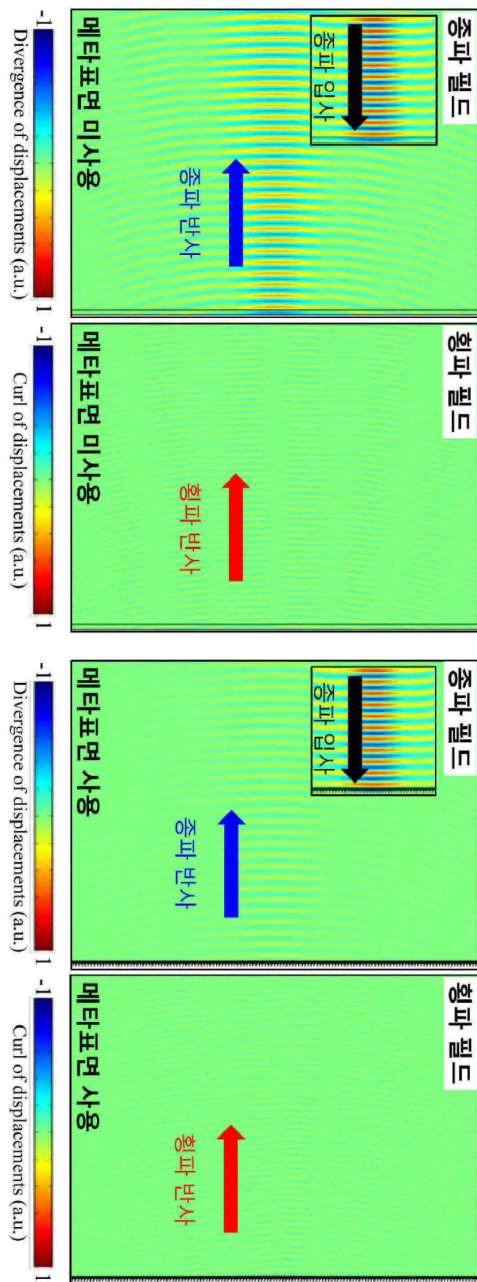
도면12



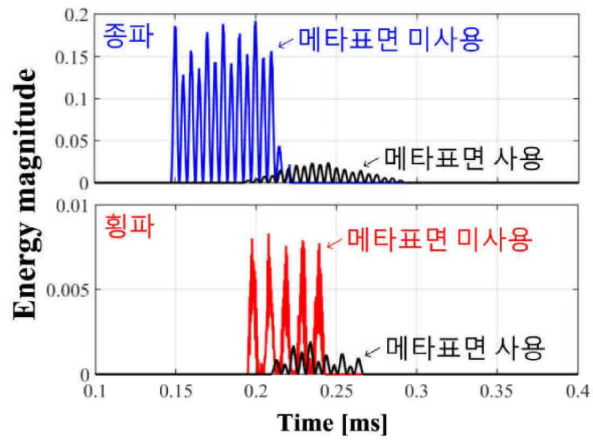
도면13

88.89 π	0.0078 [m]	0.0045 [m]	0.00225 [m]
	0.0111 [m]		
	0.0136 [m]		
	0.0171 [m]		
	0.0254 [m]		
100 π	0.0078 [m]	0.004 [m]	0.002 [m]
	0.0111 [m]		
	0.0136 [m]		
	0.0171 [m]		
	0.0254 [m]		
114.29 π	0.0078 [m]	0.0035 [m]	0.00175 [m]
	0.0112 [m]		
	0.0137 [m]		
	0.0172 [m]		
	0.0254 [m]		
133.33 π	0.0091 [m]	0.003 [m]	0.001 [m]
	0.0116 [m]		
	0.0132 [m]		
	0.0157 [m]		
	0.0254 [m]		

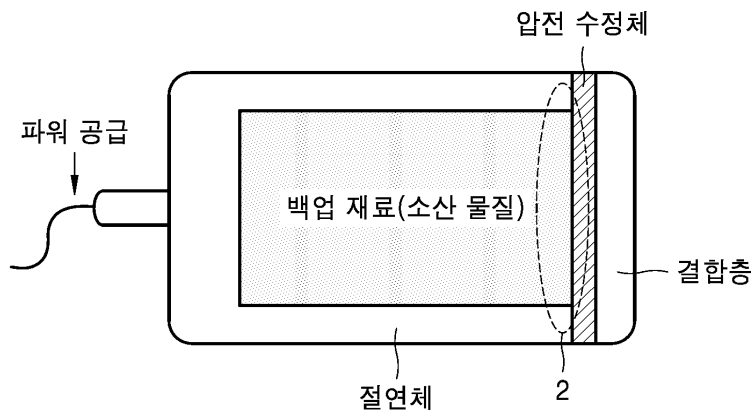
도면14



도면15



도면16a



도면16b

