



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0115808
(43) 공개일자 2023년08월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 29/22 (2006.01) G01N 29/04 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 29/221 (2013.01)
G01N 29/04 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2022-0012716
(22) 출원일자 2022년01월27일
심사청구일자 2022년01월27일

(71) 출원인
서울대학교산학협력단
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
재단법인 파동에너지 극한제어 연구단
대전광역시 유성구 가정북로 156 , 한국기계연구원
원1동412, 413, 414, 415호(장동)
충남대학교산학협력단
대전광역시 유성구 대학로 99 (궁동, 충남대학교)
(72) 발명자
김윤영
서울특별시 서초구 방배로 14, 3동 1004호 (방배
동, 임광아파트)
오유빈
서울특별시 관악구 관악로 1(신림동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
유미특허법인

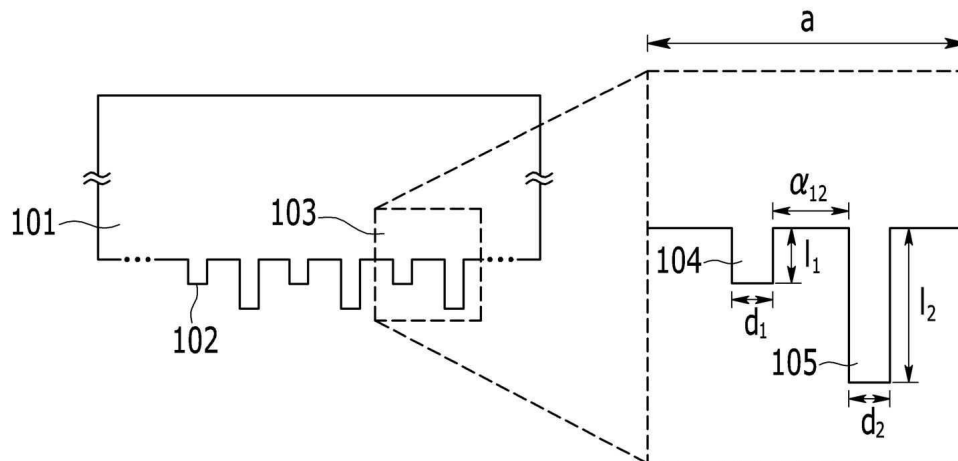
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 모드 변환 반사체

(57) 요약

본 발명의 실시예는 탄성 매질의 가장자리 표면에 구비되어 입사하는 초음파를 고효율로 모드 변환시킴과 동시에 원하는 방향으로 반사시킬 수 있는 모드 변환 반사체를 제공하기 위한 것이다. 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체는 탄성 매질, 그리고 탄성매질의 가장자리 표면에 비평면 구조로 형성되어 파동의 회절에 의한 간섭 현상을 발생하여 탄성매질을 통해 입사되는 초음파를 모드 변환시키면서 미리 설정된 방향으로 반사시키는 반사층을 포함한다.

대표도 - 도1a



(52) CPC특허분류

G01N 2291/0428 (2013.01)

G01N 2291/044 (2013.01)

G01N 2291/101 (2013.01)

(72) 발명자

김신영

서울특별시 관악구 관악로 1(신림동)

이중석

대전광역시 유성구 대학로 99(궁동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711136862
과제번호	2021R1F1A1063190
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	광대역 흡음을 위한 다공성 메타그레이팅 연구
기 여 율	1/2
과제수행기관명	충남대학교
연구기간	2021.06.01~2022.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711132911
과제번호	2014M3A6B3063711
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	글로벌프론티어지원(R&D)
연구과제명	접촉식 초고감도 · 초고성능 초음파 메타트랜스듀서
과제수행기관명	서울대학교
연구기간	2021.01.01~2021.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

탄성 매질, 그리고

상기 탄성매질의 가장자리 표면에 비평면 구조로 형성되어 파동의 회절에 의한 간섭 현상을 발생하여 상기 탄성 매질을 통해 입사되는 초음파를 모드 변환시키면서 미리 설정된 방향으로 반사시키는 반사층을 포함하는 모드 변환 반사체.

청구항 2

제1항에서,

상기 반사층은 조절 가능한 복수의 설계 변수를 갖는 요철 형태의 메타-격자 표면 구조를 포함하는 모드 변환 반사체.

청구항 3

제2항에서,

상기 반사층은凸자 형태의 돌출형 구조가 단위 구조 내에 길이방향을 따라 복수로 구비되는 모드 변환 반사체.

청구항 4

제3항에서,

상기 단위 구조는 길이방향을 따라 적어도 2개 이상을 포함하는 모드 변환 반사체.

청구항 5

제4항에서,

상기 반사층은 상기 단위 구조 내부에서 2개의凸자 형태의 돌출형 구조가 서로 다른 돌출 길이를 갖고 길이방향을 따라 주기적으로 반복된 형태로 구비되는 모드 변환 반사체.

청구항 6

제5항에서,

상기 복수의 설계 변수는

상기 단위 구조의 가로 길이(a), 첫 번째 돌출형 구조의 폭(d_1), 상기 첫 번째 돌출형 구조의 길이(l_1), 두 번째 돌출형 구조의 폭(d_2), 상기 두 번째 돌출형 구조의 길이(l_2), 상기 첫 번째 돌출형 구조와 상기 두 번째 돌출형 구조의 간격(a_{12})을 포함하는 모드 변환 반사체.

청구항 7

제4항에서,

상기 반사층은 상기 단위 구조 내부에서 3개의凸자 형태의 돌출형 구조가 서로 다른 돌출 길이를 갖고 길이방향을 따라 주기적으로 반복된 형태로 구비되는 모드 변환 반사체.

청구항 8

제7항에서,

상기 복수의 설계 변수는

상기 단위 구조의 가로 길이(a), 첫 번째 돌출형 구조의 폭(d_1), 상기 첫 번째 돌출형 구조의 길이(l_1), 두 번째 돌출형 구조의 폭(d_2), 상기 두 번째 돌출형 구조의 길이(l_2), 세 번째 돌출형 구조의 폭(d_3), 상기 세 번째 돌출형 구조의 길이(l_3), 상기 첫 번째 돌출형 구조와 상기 두 번째 돌출형 구조의 간격(a_{12}), 상기 첫 번째 돌출형 구조와 상기 세 번째 돌출형 구조의 간격(a_{13})을 포함하는 모드 변환 반사체.

청구항 9

제3항에서,

상기 반사층은 오목한 Π 자 형태의 내재형 구조가 단위 구조 내에 길이방향을 따라 복수로 구비되는 모드 변환 반사체.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 모드 변환 반사체에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 초음파의 종류와 방향을 제어하는 기술은 웨지와 같은 경사진 구조물을 이용하여 파동을 제어하였다. 탄성 매질 내에서 초음파를 원하는 종류로 변환시키고, 전파하는 방향을 임의로 제어하는 것은 파동을 원하는 위치로 전달해야 하는 초음파 비파괴검사 산업에서 매우 중요한 이슈이다. 초음파의 종류 및 방향 제어는 보통 경계면에서 발생하는 파동의 반사와 투과 현상을 이용하며, 일반적인 탄성 매질에서 이러한 현상은 복잡한 양상을 띤다. 예를 들어, 반사 현상에서는 종파 또는 횡파가 자유 경계에 입사하게 되면, 탄성 매질에서의 반사 법칙에 의해 종파와 횡파가 동시에 발생한다.

[0004] 이렇게 두 종류의 파동이 발생하는 탄성 매질의 본질적인 특성으로 인하여 파동의 전달 효율은 필연적으로 감소하게 된다. 이러한 초음파의 종류와 방향을 제어하는 종래 기술에는, 웨지와 같은 경사진 구조물이나 표면이 굴곡지게 설계된 구조물 등 매질의 기하학적, 물리적 특성과 아울러 반사 및 굴절 법칙을 이용하거나 최신 기술인 위상배열 탐촉자를 활용하여 초음파의 방향을 제어하는 기술을 들 수 있다.

[0005] 이와 같은 종래 기술은 산업용 초음파 비파괴검사 및 유량계 분야 등지에 많이 적용되어 사용되고 있지만 구조물과 매질이 가지고 있는 파동의 낮은 투과율 문제로 인해 파동 전파 효율이 낮다는 한계점을 가지고 있다.

[0006] 가변 입사각 웨지의 경우에는 매질과의 접촉 문제가 발생할 수 있으며, 위상배열 초음파 탐촉자의 경우에는 전자기 장비의 추가로 인하여 부피가 증가하는 단점도 존재한다. 또한, 메타물질과 같은 주기적인 구조물을 설치했을 때는 회절 간섭 현상에 의하여 특정 각도로 파동의 세기가 증가하는 고차 회절 모드가 발생하게 된다. 결과적으로, 두 종류의 파동이 발생하는 매질의 특성과 구조물의 주기성에 의한 고차 회절 모드 발생 등으로 인하여 파동 전달 효율이 낮아지게 되며, 이를 극복하는 고효율의 비파괴검사 장비 개발이 요구되고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명의 실시예는 탄성 매질의 가장자리 표면에 구비되어 입사하는 초음파를 고효율로 모드 변환시키고 동시에 원하는 방향으로 반사시킬 수 있는 모드 변환 반사체를 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체는 탄성 매질, 그리고 탄성매질의 가장자리 표면에 비평면 구조로 형성되어 파동의 회절에 의한 간섭 현상을 발생하여 탄성매질을 통해 입사되는 초음파를 모드 변환시키면서 미리

설정된 방향으로 반사시키는 반사층을 포함한다.

- [0011] 반사층은 조절 가능한 복수의 설계 변수를 갖는 요철 형태의 메타-격자 표면 구조를 포함할 수 있다.
- [0012] 반사층은 π 자 형태의 돌출형 구조가 단위 구조 내에 길이방향을 따라 복수로 구비될 수 있다.
- [0013] 단위 구조는 길이방향을 따라 적어도 2개 이상을 포함할 수 있다.
- [0014] 반사층은 단위 구조 내부에서 2개의 π 자 형태의 돌출형 구조가 서로 다른 돌출 길이를 갖고 길이방향을 따라 주기적으로 반복된 형태로 구비될 수 있다.
- [0015] 복수의 설계 변수는 단위 구조의 가로 길이(a), 첫 번째 돌출형 구조의 폭(d1), 첫 번째 돌출형 구조의 길이(l1), 두 번째 돌출형 구조의 폭(d2), 두 번째 돌출형 구조의 길이(l2), 첫 번째 돌출형 구조와 두 번째 돌출형 구조의 간격(a_{12})을 포함할 수 있다.
- [0016] 반사층은 단위 구조 내부에서 3개의 π 자 형태의 돌출형 구조가 서로 다른 돌출 길이를 갖고 길이방향을 따라 주기적으로 반복된 형태로 구비될 수 있다.
- [0017] 복수의 설계 변수는 단위 구조의 가로 길이(a), 첫 번째 돌출형 구조의 폭(d1), 첫 번째 돌출형 구조의 길이(l1), 두 번째 돌출형 구조의 폭(d2), 두 번째 돌출형 구조의 길이(l2), 세 번째 돌출형 구조의 폭(d3), 세 번째 돌출형 구조의 길이(l3), 첫 번째 돌출형 구조와 두 번째 돌출형 구조의 간격(a_{12}), 첫 번째 돌출형 구조와 세 번째 돌출형 구조의 간격(a_{13})을 포함할 수 있다.
- [0018] 반사층은 오목한 π 자 형태의 내재형 구조가 단위 구조 내에 길이방향을 따라 복수로 구비될 수 있다.

발명의 효과

- [0020] 탄성 매질의 가장자리 표면에 요철 형태로 구비되어 주기적인 구조물에서 관측되는 고차 회절 모드의 영향을 효과적으로 제어하여 입사하는 초음파를 고효율로 모드 변환시키면서 원하는 방향으로 반사시킬 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0022] 도 1a는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 돌출형 구조를 도시한 도면이다.
- 도 1b는 도 1a의 변형예를 도시한 도면이다.
- 도 2a는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 오목형 구조를 도시한 도면이다.
- 도 2b는 도 2a의 변형예를 도시한 도면이다.
- 도 3a는 탄성 매질의 가장자리 자유 경계 표면에 초음파가 수직으로 입사하는 상황을 도시한 도면이다.
- 도 3b는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 돌출형 구조에 초음파가 수직으로 입사하는 상황에서 고효율로 모드 변환됨과 동시에 수직으로 반사하는 상황을 도시한 도면이다.
- 도 3c는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 변형된 돌출형 구조에 초음파가 수직으로 입사하는 상황에서 고효율로 모드 변환됨과 동시에 반사각을 가지고 반사하는 상황을 도시한 도면이다.
- 도 4a 탄성 매질의 가장자리 자유 경계 표면에 P파가 수직으로 입사하는 경우에 대한 반사장 변위의 발산 필드와 회전 필드를 도시한 도면이다.
- 도 4b는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 돌출형 구조에 대해 P파가 수직으로 입사할 때 SV파가 수직으로 반사하는 경우에 대한 반사장 변위의 발산 필드와 회전 필드를 도시한 도면이다.
- 도 4c는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 변형된 돌출형 구조에 대해 P파가 수직으로 입사할 때 SV파가 반사각을 가지고 경사지게 반사하는 경우에 대한 반사장 변위의 발산 필드와 회전 필드를 도시한 도면이다.
- 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 돌출형 구조를 활용하여 송신용 웨지의 트랜스듀서에서 발

생한 초음파가 시편을 투과하여 수신용 웨지의 트랜스듀서에 도달하는 파동 전파 상황을 도시한 도면이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 돌출형 구조를 활용하여 송수신용 웨지를 구성하고 초음파를 입사한 경우에 대해 변위의 발산 필드와 회전 필드를 도시한 도면이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 돌출형 구조를 활용하여 송신용 웨지의 트랜스듀서에서 발생한 초음파가 배관 및 유체를 투과하여 수신용 웨지의 트랜스듀서에 도달하는 파동 전파 상황을 도시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0023] 여기서 사용되는 전문용어는 단지 특정 실시예를 언급하기 위한 것이며, 본 발명을 한정하는 것을 의도하지 않는다. 여기서 사용되는 단수 형태들은 문구들이 이와 명백히 반대의 의미를 나타내지 않는 한 복수 형태들도 포함한다. 명세서에서 사용되는 "포함하는"의 의미는 특정 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소 및/또는 성분을 구체화하며, 다른 특정 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소, 성분 및/또는 군의 존재나 부가를 제외시키는 것은 아니다.
- [0024] 다르게 정의하지는 않았지만, 여기에 사용되는 기술용어 및 과학용어를 포함하는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 일반적으로 이해하는 의미와 동일한 의미를 가진다. 보통 사용되는 사전에 정의된 용어들은 관련기술문헌과 현재 개시된 내용에 부합하는 의미를 가지는 것으로 추가 해석되고, 정의되지 않는 한 이상적이거나 매우 공식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0025] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다.
- [0026] 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체는 탄성 매질, 그리고 탄성매질의 가장자리 표면에 비평면 구조로 형성되어 파동의 회절에 의한 간섭 현상을 발생하여 탄성매질을 통해 입사되는 초음파를 모드 변환시키면서 미리 설정된 방향으로 반사시키는 반사층을 포함한다. 여기서, 반사층은 조절 가능한 복수의 설계 변수를 갖는 요철 형태의 메타-격자 표면 구조를 포함할 수 있다.
- [0027] 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체는 주기적으로 배열된 단위 구조 내부에 제작이 편리한 요철 형태의 구조물을 설계 및 배치한 메타-격자 표면 구조를 제안함으로써, 주기적인 구조물에서 관측되는 고차 회절 모드의 영향을 제어하여 초음파를 고효율로 모드 변환시키면서 원하는 방향으로 반사시킬 수 있다. 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체는 종래 기술과 비교했을 때 파동의 종류, 크기, 방향을 모두 제어함으로써 인하여 원하는 방향으로 보내고자 하는 파동의 전달 효율이 높고, 단순한 요철 형태로 인하여 설계 및 제작이 용이하다.
- [0028] 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 메타-격자 표면 구조는 단위 구조 내부에 2개 또는 3개의 돌출형 또는 내재형 요철이 배치되어 주기적으로 반복된 형태로 구성될 수 있다. 그리고 메타-격자 표면 구조는 각각 6개와 9개의 조절 가능한 설계 변수를 포함할 수 있다. 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 돌출형 메타-격자 표면 구조에 대한 개념도는 도 1a와 도 1b에 도시한다.
- [0029] 도 1a는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 돌출형 메타-격자 표면 구조(101)와 해당 단위 구조(103)를 도시한다. 세부적으로는,凸자 형태의 돌출형 구조(102)가 단위 구조(103) 내에 2개씩 설계되어 주기적으로 배열되는 구조물이며, 조절 가능한 설계 변수에는 단위 구조(103)의 가로 길이(a), 첫 번째 돌출형 구조(104)의 폭(d_1), 첫 번째 돌출형 구조(104)의 길이(l_1), 두 번째 돌출형 구조(105)의 폭(d_2), 두 번째 돌출형 구조(105)의 길이(l_2), 첫 번째 돌출형 구조(104)와 두 번째 돌출형 구조(105)의 간격(a_{12})을 포함할 수 있다.
- [0030] 도 1b는凸자 형태의 돌출형 구조가 3개씩 설계되어 주기적으로 반복되는 메타-격자 표면 구조의 단위 구조(106)를 도시한다. 이 경우에 조절 가능한 설계 변수에는 단위 구조(106)의 가로 길이(a), 첫 번째 돌출형 구조(107)의 폭(d_1), 첫 번째 돌출형 구조(107)의 길이(l_1), 두 번째 돌출형 구조(108)의 폭(d_2), 두 번째 돌출형 구조(108)의 길이(l_2), 세 번째 돌출형 구조(109)의 폭(d_3), 세 번째 돌출형 구조(109)의 길이(l_3), 첫 번째 돌출형 구조(107)와 두 번째 돌출형 구조(108)의 간격(a_{12}), 첫 번째 돌출형 구조(107)와 세 번째 돌출형 구조

(109)의 간격(α_{13})을 포함할 수 있다.

- [0031] 메타-격자 표면 구조(101)의 구성 물질은 입사하는 탄성 매질과 동일하게 선택하며, ∇ 자 형태의 돌출형 요철 구조는 기계적 가공 및 레이저 커팅을 통해 원자재를 절삭 가공하는 방식으로 제작할 수 있다.
- [0032] 여기서 메타-격자 표면 구조의 요철 구조는 구조물 상황에 따라 ∇ 자 형태의 내재형 구조로도 설계 가능하며, 이에 대한 개념도는 도 2에 나타난다.
- [0033] 도 2a는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 오목형 메타-격자 표면 구조(201)와 해당 단위 구조(203)를 도시한다. 세부적으로는, ∇ 자 형태의 내재형 구조(202)가 2개씩 설계되어 주기적으로 배열되는 구조물이며, 조절 가능한 설계 변수에는 단위 구조(203)의 가로 길이(a), 첫 번째 내재형 구조(204)의 폭(d_1), 첫 번째 내재형 구조(204)의 길이(l_1), 두 번째 내재형 구조(205)의 폭(d_2), 두 번째 내재형 구조(205)의 길이(l_2), 첫 번째 내재형 구조(204)와 두 번째 내재형 구조(205)의 간격(α_{12})을 포함할 수 있다.
- [0034] 도 2b는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 오목형 구조에서 ∇ 자 형태의 내재형 구조가 3개씩 설계되어 주기적으로 반복되는 메타-격자 표면 구조의 단위 구조(206)를 도시한다. 이 경우에 조절 가능한 설계 변수에는 단위 구조(206)의 가로 길이(a), 첫 번째 내재형 구조(207)의 폭(d_1), 첫 번째 내재형 구조(207)의 길이(l_1), 두 번째 내재형 구조(208)의 폭(d_2), 두 번째 내재형 구조(208)의 길이(l_2), 세 번째 내재형 구조(209)의 폭(d_3), 세 번째 내재형 구조(209)의 길이(l_3), 첫 번째 내재형 구조(207)와 두 번째 내재형 구조(208)의 간격(α_{12}), 첫 번째 내재형 구조(207)와 세 번째 내재형 구조(209)의 간격(α_{13})을 포함할 수 있다.
- [0035] 앞서 돌출형 또는 내재형 메타-격자 표면 구조에서 제시한 6개의 설계 변수($a, \alpha_{12}, d_1, d_2, l_1, l_2$) 또는 9개의 설계 변수($a, \alpha_{12}, \alpha_{13}, d_1, d_2, d_3, l_1, l_2, l_3$)를 적절하게 조절하면, 입사하는 초음파를 고효율로 모드 변환 및 원하는 방향으로 반사시키는 메타-격자 표면 구조를 설계할 수 있다. 본 발명의 실시예에서는 앞서 설명한 여러 구조 중 구성 물질이 입사하는 탄성 매질과 동일하며, ∇ 자 형태의 돌출형 요철 구조를 가지는 도 1a, 도 1b의 메타-격자 표면 구조를 포함할 수 있다.
- [0036] 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 메타-격자 표면 구조는 탄성 매질의 가장자리 표면에 설계 및 가공이 편리한 ∇ 자 형태의 돌출형 구조 또는 ∇ 자 형태의 내재형 구조를 포함할 수 있다. 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체는 종래 초음파의 방향을 제어하는 기술과 비교했을 때 파동의 종류, 크기, 방향을 모두 제어함으로써 제어하고자 하는 파동의 전달 효율이 높고, 단순한 요철 형태를 원자재로부터 가공한다는 점에 있어 설계 및 제작이 편리하다는 이점을 갖고 있다.
- [0037] 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 메타-격자 표면 구조를 활용하면 탄성 매질의 가장자리 표면에서 입사하는 초음파를 고효율로 모드 변환시킴과 동시에 원하는 방향으로 반사시킬 수 있다. 여기서 고효율 모드 변환 및 원하는 방향으로의 반사란 메타-격자 표면 구조를 향해 입사하는 초음파를 높은 에너지 효율로 모드 변환시키면서 반사시켜 원하는 위치로 전달함을 의미한다. 본 발명에서 다루는 초음파는 등방성(isotropic) 탄성 매질에서 면내(in-plane)로 전파하는 평면파인 P파(pressure wave)와 SV파(shear vertical wave)를 의미하며, 이때 탄성 매질은 평면 변형(plane strain) 또는 평면 응력(plane stress)조건을 가정한다. P파의 경우, 파동의 진행 방향과 매질의 진동 방향이 서로 평행한 종파(longitudinal wave)이고, SV파는 파동의 진행 방향과 매질의 진동 방향이 서로 수직인 횡파(shear wave or transverse wave)이다. 앞서 말한 모드 변환(mode conversion)이란, 종파인 P파를 횡파인 S파로, 또는 횡파인 S파를 종파인 P파로 파동의 종류를 변환시키는 것을 의미한다.
- [0038] 본 발명의 실시예에서는 탄성 매질의 가장자리 표면에 수직으로 입사한 초음파를 고효율로 모드 변환시킴과 동시에 원하는 방향으로 반사시킬 수 있는 메타-격자 표면 구조에 관한 개념도를 제시한다. 일반적인 탄성 매질의 가장자리 자유 경계 표면에 초음파가 수직으로 입사하는 경우, 입사된 초음파와 동일한 종류의 파동이 수직으로 반사하며, 이에 대한 개념도는 도 3a에 나타난다. 이때 본 발명에서 제안하는 메타-격자 표면 구조를 탄성 매질의 가장자리 표면에 삽입하면 수직으로 입사하는 초음파를 다른 종류의 파동으로 고효율 모드 변환시켜 수직 반사시킬 수 있으며, 이에 대한 개념도는 도 3b에 나타난다. 또한, 메타-격자 표면 구조를 적절하게 설계할 경우, 수직으로 입사하는 파동을 다른 종류의 파동으로 모드 변환 및 방향 전환을 시켜 경사지게 반사시킬 수도 있으며, 이에 대한 개념도는 도 3c에 나타난다.
- [0039] 도 3a는 일반적인 탄성 매질(301)의 가장자리 자유 경계 표면에 초음파가 수직으로 입사하는 상황을 도시한다.

여기서 입사 초음파(302)는 P파와 SV파가 모두 가능하다. 일반적인 탄성 매질의 가장자리에 초음파가 수직으로 입사하게 되면 입사한 초음파와 동일한 종류의 초음파(303)가 수직으로 반사될 수 있다.

[0040] 도 3b는 탄성 매질(304)의 가장자리 표면에 공학적으로 설계된 메타-격자 표면 구조(305)를 삽입했을 때 초음파가 수직으로 입사하는 상황에 대하여 고효율로 모드 변환됨과 동시에 수직으로 반사하는 상황을 도시한다. 여기서 수직으로 입사하는 초음파(306)를 P파라고 가정하자. 수직으로 입사한 P파는 공학적으로 설계된 메타-격자 표면 구조에 의해 다른 종류의 파동인 SV파(307)가 수직으로 반사될 수 있다.

[0041] 도 3c는 탄성 매질(308)의 가장자리 표면에 공학적으로 설계된 메타-격자 표면 구조(309)를 삽입했을 때 초음파가 수직으로 입사하는 상황에 대하여 고효율로 모드 변환됨과 동시에 특정한 반사각을 가지고 반사하는 상황을 도시한다. 여기서 수직으로 입사하는 초음파(310)는 P파와 SV파 모두 가능하며, 여기서는 P파로 가정하자. 수직으로 입사한 P파는 공학적으로 설계된 메타-격자 표면 구조에 의해 다른 종류의 파동인 SV파(311)가 특정한 각도(312)로 반사하게 된다. 이때 반사되는 파동(311)의 반사각(312)은 회절 격자 이론에 의해 결정될 수 있다.

[0042] 상기한 바와 같이 탄성 매질(308)에서의 회절격자 이론을 사용하여 반사하는 여러 개의 파동 중 원하지 않는 모드의 파동을 메타-격자 표면 구조를 통해 상쇄시킬 수 있다.

[0043] 일반적으로 파동이 장애물이나 좁은 틈을 만나면 퍼지면서 뒤편까지 전파되는데, 이를 회절이라고 한다. 그런데 이러한 장애물이 주기적으로 이어진 회절격자의 경우, 여러 개의 파동이 서로 간섭을 일으킨다. 이때 상호간의 경로차에 의해 특정 각도에서 보강 및 상쇄 간섭이 일어나며, 이중 보강 간섭으로 파동의 세기가 세진 파동을 각도에 따라 n 번째 모드로 지칭한다. 탄성 매질(308)에서의 회절격자 이론을 적용하면, 단위 구조의 길이가 결정된 탄성 매질(308)에서 회절 및 반사되는 종파 또는 횡파의 모드 수가 결정될 수 있다. 즉, 단위 구조의 길이를 조절함으로써 산출될 수 있는 모드의 수를 결정하고, 그 중에서 원하지 않는 모드를 상쇄시킬 수 있도록 형상 최적화를 이용하여 구조물을 설계할 수 있다.

[0044] 예를 들어, 전술한 도 3b에서는 종파가 입사하면 종파와 횡파가 각각 1개씩만 반사되어 나올 수 있도록 단위 구조의 길이를 결정하고, 이중 원하지 않는 종파 모드를 상쇄시킬 수 있도록 형상 최적화를 구현할 수 있다. 그런데, 종파와 횡파의 회절모드 수가 총 2개(종파 1개 + 횡파 1개)이므로 단위 구조당 2개의 요철 형상으로 조절할 수 있다.

[0045] 한편, 도 3c에서는, 종파가 입사하면 종파와 횡파가 각각 1개, 3개씩만 반사되어 나올 수 있도록 단위 구조의 길이를 결정하고, 이중 원하지 않는 종파 및 횡파 모드를 상쇄시킬 수 있도록 형상 최적화를 구현할 수 있다. 그런데, 종파와 횡파의 회절모드 수가 총 4개(종파 1개 + 횡파 3개)이므로 도 3b보다 자유도가 더 필요하여 단위구조당 3개의 요철 형상으로 조절할 수 있다.

[0046] 도 1에 도시한 바와 같이 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 메타-격자 표면 구조는 6개의 설계 변수($a, a_{12}, d_1, d_2, l_1, l_2$) 또는 9개의 설계 변수($a, a_{12}, a_{13}, d_1, d_2, d_3, l_1, l_2, l_3$)를 포함할 수 있다. 설계 시스템이 결정되었을 때(입사 매질, 반사 매질, 입사 초음파의 입사각, 반사 초음파의 반사각, 입사 초음파의 주파수, 입사 초음파의 파동 모드, 반사 초음파의 파동 모드가 결정되었을 때) 설계 변수를 적절하게 설계하면 도 3에 도시된 바와 같이 입사하는 초음파를 모드 변환 및 원하는 방향으로 반사시킬 수 있다.

[0047] 본 발명의 실시예에서는 탄성 매질의 가장자리에 수직으로 입사하는 초음파를 고효율로 모드 변환시키면서 원하는 방향으로 반사시키는 메타-격자 표면 구조와 시뮬레이션 해석 결과를 제시한다. 본 발명의 실시예에서는 알루미늄을 입사 매질 및 메타-격자 표면 구조의 구성 물질로 가정하였다. 주파수 60 kHz인 P파가 탄성 매질의 가장자리 표면에 수직으로 입사하여 SV파로 반사하는 경우를 설명한다. 여기서, 주파수에 따라 적당한 비율로 메타-격자 표면 구조의 크기를 변화시켜 설계할 수 있다.

[0048] 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 메타-격자 표면 구조가 없는 경우에 대한 시뮬레이션 해석 결과는

$$\vec{u} \quad \vec{u}$$

도 4a에 나타나며, 반사장 변위의 발산 필드($\nabla \cdot$)와 회전 필드($\nabla \times$)를 나타낸다. 여기서, 발산 필드를 통해서 종파인 P파의 크기와 진행 방향을, 회전 필드를 통해서 횡파인 SV파의 크기와 진행 방향을 알 수 있다. 본 발명에서 제안하는 메타-격자 표면 구조가 있는 경우에 대한 시뮬레이션 해석 결과는 도 4b, 도 4c에 나타나며, 각각 P파가 수직으로 입사할 때 SV파가 수직 및 반사각을 가지고 경사지게 반사하는 경우에 대한 반사

장 변위의 발산 필드($\nabla \cdot \vec{u}$)와 회전 필드($\nabla \times \vec{u}$)를 나타낸다.

[0049] 도 4a는 일반적인 탄성 매질의 가장자리 자유 경계 표면에 P파가 수직으로 입사하는 경우에 대한 반사장 변위의

발산 필드($\nabla \cdot \vec{u}$)와 회전 필드($\nabla \times \vec{u}$)를 도시한다. 메타-격자 표면 구조가 없는 자유 경계 표면의 경우에는, 반사장 변위의 발산 필드(401)를 보면, P파(402)가 수직으로 모두 반사하며, 반사장 변위의 회전 필드(403)에서는 SV파가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

[0050] 도 4b는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 메타-격자 표면 구조가 있는 경우에 대해 P파가 수직으로

입사할 때 SV파가 수직으로 반사하는 경우에 대한 반사장 변위의 발산 필드($\nabla \cdot \vec{u}$)와 회전 필드($\nabla \times \vec{u}$)를 도시한다. 모드 변환 반사각이 0도로 설계된 메타-격자 표면 구조(405)의 경우에는, 반사장 변위의 발산 필드(404)를 보면, 수직 입사한 P파가 모드 변환되어 나타나지 않는 모습을 확인할 수 있다. 반면, 반사장 변위의 회전 필드(406)를 보면, 모드 변환된 SV파(407)의 세기가 크게 나타나며, 0도의 반사각으로 반사하는 것을 확인할 수 있다.

[0051] 도 4c는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 변형된 메타-격자 표면 구조가 있는 경우에 대해 P파가

수직으로 입사할 때 SV파가 반사각을 가지고 경사지게 반사하는 경우에 대한 반사장 변위의 발산 필드($\nabla \cdot \vec{u}$)와 회전 필드($\nabla \times \vec{u}$)를 도시한다. 모드 변환 반사각이 45도로 설계된 메타-격자 표면 구조(409)의 경우에는, 반사장 변위의 발산 필드(408)를 보면, 수직 입사한 P파가 모드 변환되어 나타나지 않는 모습을 확인할 수 있다. 반면, 반사장 변위의 회전 필드(410)를 보면, 모드 변환된 SV파(411)의 세기가 크게 나타나며, 45도의 반사각으로 반사하는 것을 확인할 수 있다.

[0052] 한편, 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체는 원하는 종류의 파동을 원하는 위치로 전달하는 작업이 필요한 고효율의 비파괴검사 장비 개발에 활용될 수 있다. 대표적인 예시로, 배관이나 판재, 용접부 등의 결함을 탐지하는 비파괴검사 장비나 비침습형 초음파 유량계 장비의 웨지 등에 직접적으로 적용될 수 있다.

[0053] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체는 산업용 초음파 비파괴검사 및 비침습형 유량계 장비 등의 웨지로 활용될 수 있으며, 이에 대한 개념도는 도 5에 나타난다. 본 발명에서 제안하는 메타-격자 표면 구조를 활용하면 도 5에 도시한 바와 같이 웨지와 시편의 경계에서 초음파를 고효율로 투과시킬 수 있는 각도로 SV파를 반사시킬 수 있어 수신 신호의 크기를 극대화할 수 있다. 이를 검증하기 위해 상용 유한요소 해석 소프트웨어(COMSOL Multiphysics v5.3)를 활용하여 시뮬레이션 해석을 진행했고, 해당 결과는 도 6에 나타난다. 시뮬레이션에서 웨지의 재질은 알루미늄, 시편의 재질은 철로 설정하였다. 또한, 도 7에서는 본 발명에서 제안하는 메타-격자 표면 구조를 활용한 웨지를 사용한 비침습형 유량계 장비의 개념도를 확인할 수 있다. 도 7에 도시한 바와 같이 트랜스듀서를 통해 발생한 초음파를 모드 변환시키고 유량계 내부로 투과시켜 유량계의 수신 신호 크기를 극대화할 수 있다.

[0054] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 메타-격자 표면 구조(501, 502)를 활용하여 송신용 웨지(503)의 트랜스듀서(504)에서 발생한 초음파가 시편(505)을 투과하여 수신용 웨지(506)의 트랜스듀서(507)에 도달하는 파동 전파 상황을 도시한다. 송신용 웨지(503)의 트랜스듀서(504)는 P파를 발생시키고, 수신용 웨지(506)의 트랜스듀서(507)는 수신한 P파 신호를 분석한다. 송신용 웨지(503)의 트랜스듀서(504)에서 발생한 P파는 공학적으로 설계된 메타-격자 표면 구조(501)에 의해 SV파로 모드 변환되며 특정한 반사각으로 반사하게 된다. 반사하는 SV파는 시편(505)으로 입사하여 높은 효율로 투과된다. 수신용 웨지(506)에서는 SV파가 입사하게 된다. 특정 각도를 가진 채 입사하는 SV파는 메타-격자 표면 구조(502)에 의해 P파로 모드 변환되며 수직으로 반사하여 트랜스듀서(507)에 도달한다. 즉, 본 발명에서 제안하는 메타-격자 표면 구조(501, 502)를 활용하면 송신용 웨지(503) 및 수신용 웨지(506)를 통해 초음파를 모드 변환시키고 시편(505) 경계에서 고효율로 투과시킬 수 있어 수신 신호의 크기를 극대화시킬 수 있다.

[0055] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 메타-격자 표면 구조를 활용하여 송수신용 웨지를 구성하



고 초음파를 입사한 경우에 대해 변위의 발산 필드($\nabla \cdot$)와 회전 필드($\nabla \times$)를 도시한다. 각각 변위의 발산 필드와 회전 필드에서는 P파와 SV파만이 측정되며, 필드의 진폭은 각 파동의 진폭에 비례한다. 먼저, 송신용 웨지에서 송신하는 P파(601)가 메타-격자 표면 구조에 수직으로 입사하고, SV파(603)로 모드 변환 및 반사각 55도로 반사되어 철 재질의 시편을 투과한다. 이때, 메타-격자 표면 구조 기준 반사각 55도(시편 기준 입사각 35도)에서는, 철 재질의 시편과 알루미늄 재질의 웨지 사이에서 임피던스 차이가 거의 없어 투과율이 높다는 것을 알 수 있다. 수신용 웨지에서는 SV파(603)가 입사각 55도로 메타-격자 표면 구조에 입사하고, P파(602)로 모드 변환 및 반사각 0도로 반사되어 수신됨을 알 수 있다. 여기에서는, 수신용 웨지에서의 파동 전달 효율이 높게 나타난다(도달하는 수신용 웨지에서 P파의 세기가 크다)는 점을 통해 메타-격자 표면 구조를 통한 모드 변환이 높은 효율로 이루어졌다는 점을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 발명에서 제안하는 메타-격자 표면 구조를 활용하여 초음파 비파괴검사 장비나 비침습형 초음파 유량계 장비에 응용할 수 있다.

[0056] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 메타-격자 표면 구조(701, 702)를 활용하여 송신용 웨지(703)의 트랜스듀서(704)에서 발생한 초음파가 배관(705) 및 유체(706)를 투과하여 수신용 웨지(707)의 트랜스듀서(708)에 도달하는 파동 전파 상황을 도시한다. 송신용 웨지(703)의 트랜스듀서(704)는 P파를 발생시키고, 수신용 웨지(707)의 트랜스듀서(708)는 수신한 P파 신호를 분석한다. 송신용 웨지(703)의 트랜스듀서(704)에서 발생한 P파는 공학적으로 설계된 메타-격자 표면 구조(701)에 의해 SV파로 모드 변환되며 특정한 반사각으로 반사하게 된다. 일반적으로 배관(705)과 유체(706)의 경계면에서는 임피던스 차이로 인해 투과되는 파동의 효율이 낮다. 이때 P파보다 속도가 작은 SV파를 이용하면 배관과 유체 사이의 임피던스 차이를 줄일 수 있어 SV파가 높은 효율을 유지하면서 배관(705) 및 유체(706)로 투과하게 된다. 수신용 웨지(707)에서는 높은 효율로 투과한 SV파가 입사하게 된다. 특정 각도를 가진 채 입사하는 SV파는 메타-격자 표면 구조(702)에 의해 P파로 모드 변환되며 수직으로 반사하여 트랜스듀서(708)에 도달한다. 즉, 본 발명에서 제안하는 메타-격자 표면 구조(701, 702)를 활용하면 송신용 웨지(703) 및 수신용 웨지(707)를 통해 초음파를 모드 변환시키고 배관(705) 경계에서 고효율로 투과시킬 수 있어 수신 신호의 크기를 극대화시킬 수 있다.

[0057] 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체는 설계 및 제작이 편리한 요철 형태의 구조물을 탄성 매질의 가장자리 표면에 설계하여 입사하는 초음파를 고효율로 모드 변환(종파에서 횡파로, 또는 횡파에서 종파로 파동의 종류를 변환)시키고 동시에 원하는 방향으로 반사시킬 수 있다. 또한, 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체를 이용하면 종래 초음파 방향을 제어하는 기술로는 어려웠던 파동의 낮은 에너지 효율성 문제를 극복할 수 있다. 본 발명의 실시예에 따른 모드 변환 반사체의 적용 가능 기술 분야는 산업용 초음파 비파괴검사 및 유량계 분야이며, 높은 에너지 효율의 초음파를 원하는 위치로 전달함으로써 기기를 이용한 검측 및 계량을 효율성 측면에서 개선할 수 있다.

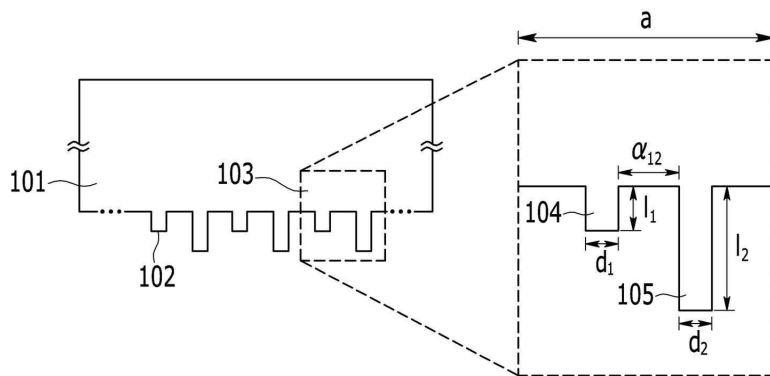
[0058] 이상을 통해 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 설명하였지만, 본 발명은 여기에 한정되는 것이 아니고 특허 청구범위와 발명의 상세한 설명 및 첨부한 도면의 범위 안에서 다양하게 변형하여 실시하는 것이 가능하고, 이것도 또한 본 발명의 범위에 속하는 것은 당연하다.

부호의 설명

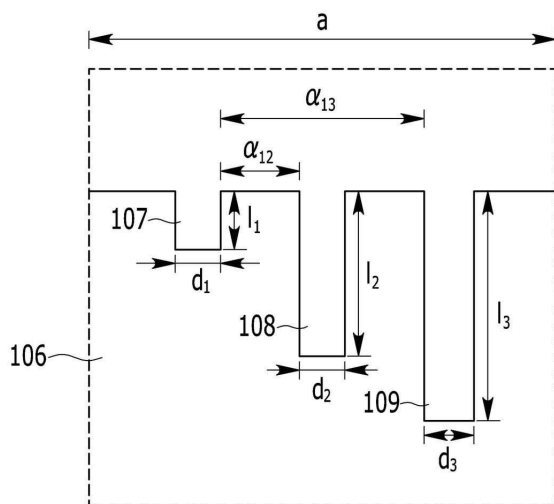
[0060] 101 ; 메타-격자 표면 구조 102 ; 돌출형 구조
103 ; 단위 구조

도면

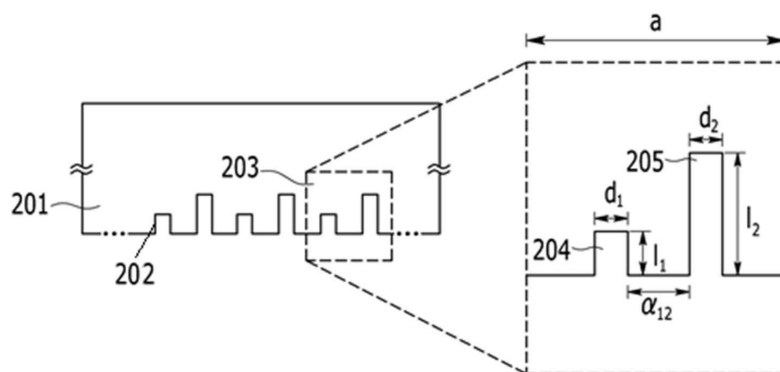
도면1a



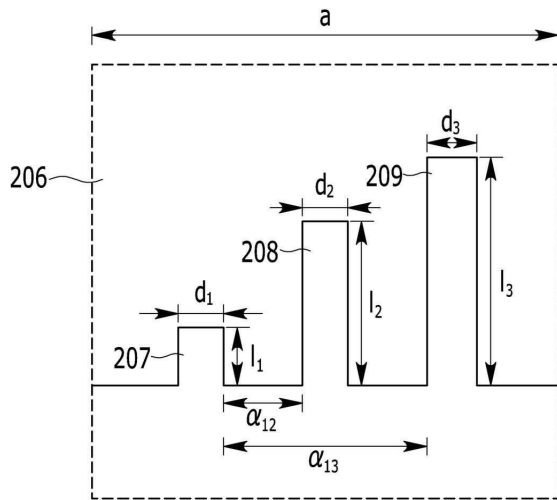
도면1b



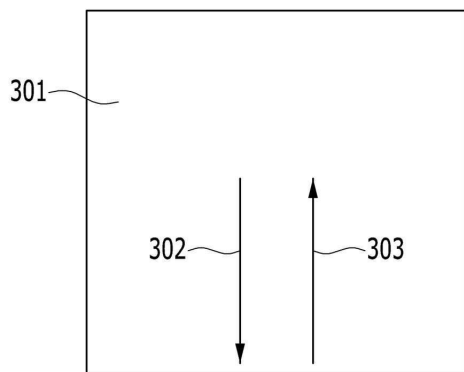
도면2a



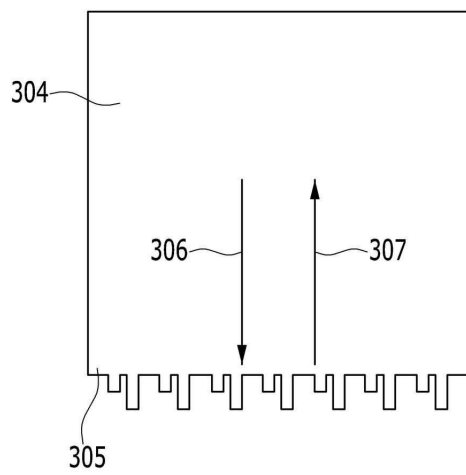
도면2b



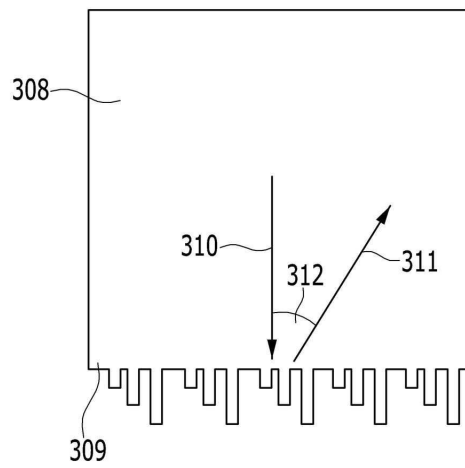
도면3a



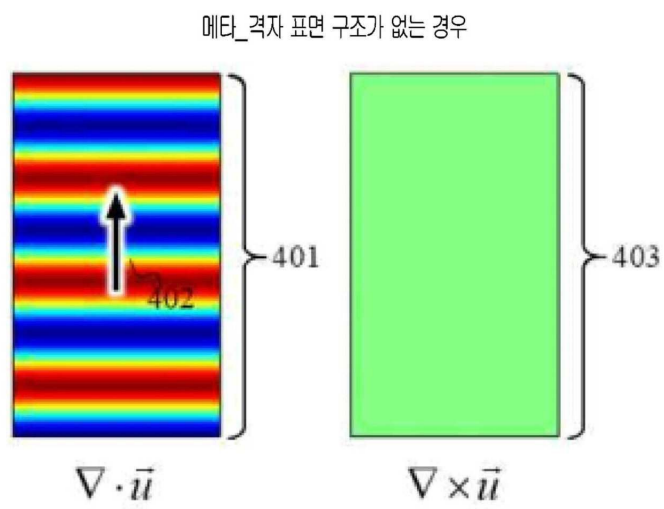
도면3b



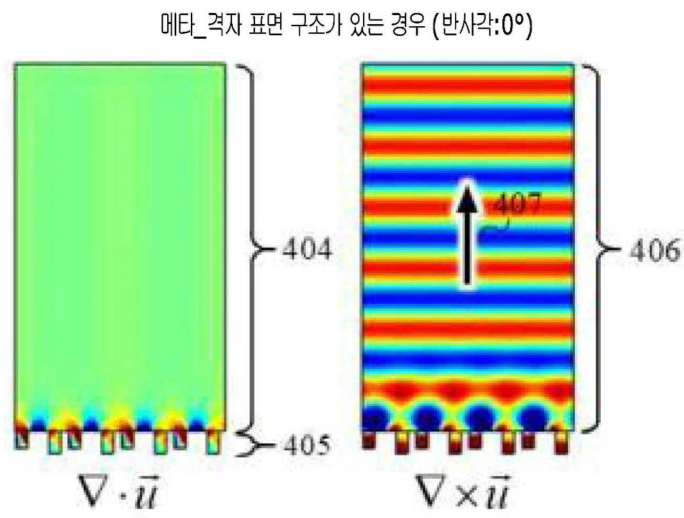
도면3c



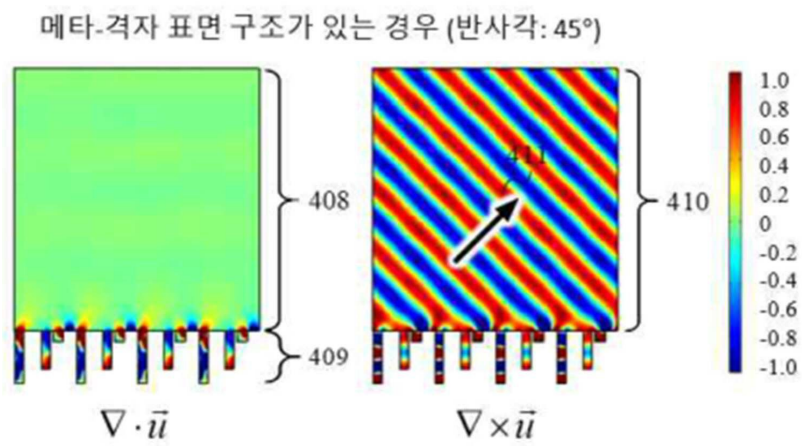
도면4a



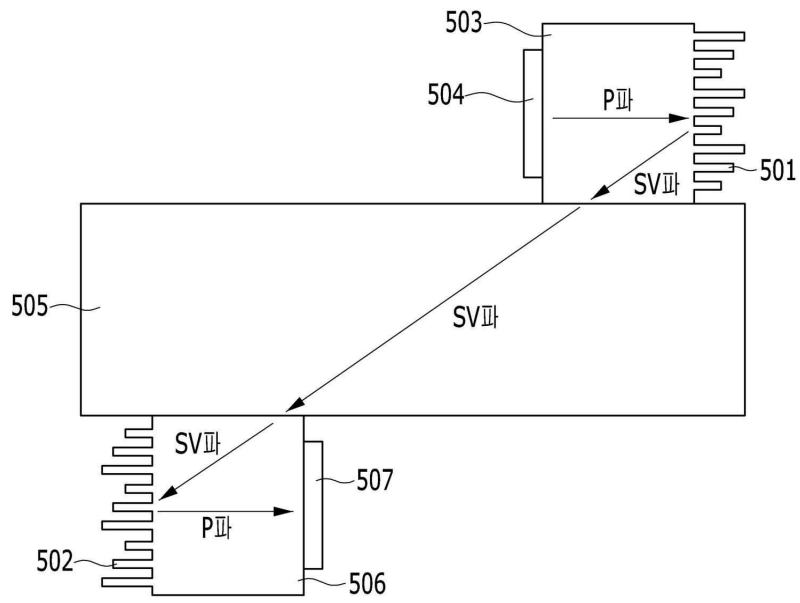
도면4b



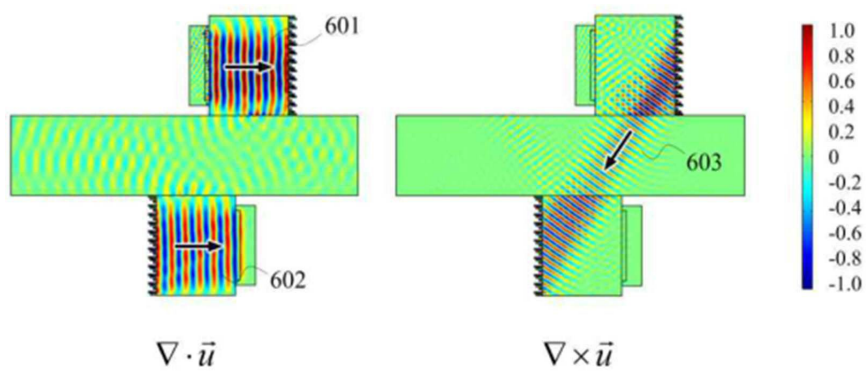
도면4c



도면5



도면6



도면7

