(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0030146
(43) 공개일자 2025년03월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04R 23/00 (2006.01) *H04R 31/00* (2006.01)
(52) CPC특허분류
H04R 23/002 (2013.01)
H04R 31/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0111157
(22) 출원일자 2023년08월24일
심사청구일자 2023년08월24일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
고현협
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원
김진영
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원
정건영
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원
(74) 대리인
특허법인지원

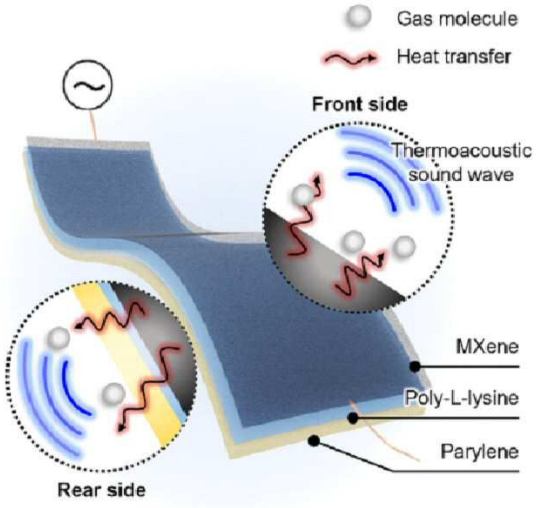
전체 청구항 수 : 총 5 항

(54) 발명의 명칭 **맥신 기반 열음향 스피커**

(57) 요 약

본 발명은 맥신 도체를 이용한 열음향 스피커에 관한 발명이다. 구체적으로, 본 발명은 맥신 기반 열음향 스피커로 기계적 변형이 가능하면서도 일 방향이 아닌 전 방향으로 소리의 생성이 가능한 열음향 스피커에 관한 발명이다.

대 표 도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711186594
과제번호	2022M3H4A1A02076825
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	나노소재기술개발
연구과제명	이온트로닉 소재 및 소자 기반 초실감형 메타버스용 웨어러블 다중 촉감 인지/재현 시스템 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2023.01.01 ~ 2023.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

맥신(MXene), 폴리리신(poly-Lysine) 접착층 및 기판을 포함하는 열음향 스피커.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 열음향 스피커는 원통형, 키리가미, 포물선 형태 및 구형을 포함한 입체적 형태를 가지는 것을 특징으로 하는

열음향 스피커.

청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 기판은 파릴렌(parylene), PEN(Polyehtlene naphtahalate), HDPE(High density Polyethylene), 유리(glass), 실리콘(Silicon)에서 선택되는 1 또는 2이상에서 선택되는 것인,

열음향 스피커.

청구항 4

제 1항에 있어서,

상기 기판의 두께는 0.8 내지 100 ㎛ 의 두께를 가지는 것을 특징으로 하는,

열음향 스피커

청구항 5

유리 기판을 용매로 세척하는 단계;

상기 세척된 유리 기판 위에 희생층을 코팅하는 단계;

화학기상증착법에 의해 파릴렌 층을 도입한 후 폴리-L-라이신(poly-L-lysine) 접착층으로 코팅하는 단계;

맥신 용액을 스핀 코팅하는 단계; 및

잔류 용매를 증발시키는 단계를 포함하는,

열음향 스피커 제조방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 맥신 도체를 이용한 열음향 스피커에 관한 발명이다. 구체적으로, 본 발명은 맥신 기반 열음향 스피커로 기계적 변형이 가능하면서도 일 방향이 아닌 전 방향으로 소리의 생성이 가능한 열음향 스피커에 관한 발명이다.

배 경 기 술

[0002] 최근 음성 인식 및 생성이 가능한 웨어러블 전자 장치가 핵심 기술로 부상하고 있다. 기존의 음성 인식 스피커는 강성과 큰 부피로 인해 전자 제품으로 활용하는데 어려움이 존재한다.

[0003] 이와 반대로, 기계적 진동이 없는 열음향 스피커는 다이어프램을 구성요소로 포함하지 않아도 되며, 가벼운 무

게, 단순한 설계가 가능하다는 이점이 존재한다. 또한, 열음향 스피커는 변형 가능성이 우수하다는 이점이 존재한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) KR등록특허 10-1699796

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 종래 스피커는 기계적 변형을 하게 되면 사운드 생성 성능이 저하되는 문제점이 존재한다. 본 발명은 기계적 변형이 가능하면서도 전 방향으로 사운드 생성이 가능한 열음향 스피커를 제공하고자 함이다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 발명의 일 실시예에 따른 열음향 스피커는 맥신(MXene), 폴리리신(poly-Lysine) 접착층 및 파릴렌 기판을 포함할 수 있다.

[0007] 상기 열음향 스피커는 키리가미 구조를 가질 수 있다.

[0008] 상기 파릴렌 기판의 두께는 0.8 내지 100 ㎛ 의 두께를 가질 수 있다.

[0009] 열음향 스피커 제조방법은 유리 기판을 용매로 세척하는 단계, 상기 세척된 유리 기판 위에 희생층을 코팅하는 단계, 화학기상증착법에 의해 파릴렌 층을 도입한 후 폴리-L-라이신(poly-L-lysine) 접착층으로 코팅하는 단계, 맥신 용액을 스핀 코팅하는 단계 및 잔류 용매를 증발시키는 단계를 포함할 수 있다.

[0010] 상기 유리기판을 세척하는 용매는 증류수, 아세톤 및 이소프로필알코올으로 이루어진 군에서 선택되는 하나이상을 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0011] 본 발명은 기계적 변형이 가능하면서도 전 방향으로 사운드 생성이 가능한 열음향 스피커를 제공하고자 함이다.

도면의 간단한 설명

[0012] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 열음향 스피커의 모습을 도시한 것이다.

도 2은 기판 두께에 따른 발생 음압/거리 및 음향 지향성을 도시한 것이다.

도 3은 다양한 형태에 따른 TA 확성기의 3D 음향 분포도를 도시한 것이다.

도 4은 열음향 발생에 영향을 미칠 수 있는 변수의 관계를 도시한 것이다.

도 5은 두께에 따른 도체의 HCPUA 값을 도시한 것이다.

도 6은 본 발명의 일실시예에 따른 맥신 기반 TA 스피커의 제조과정의 흐름도를 도시한 것이다.

도 7은 일 실시예에 따른 TA음 발생 시스템을 도시한 것이다.

도 8은 무반향실에서 측정된 배경소음의 출력 스펙트럼 밀도를 도시한 것이다.

도 9은 맥신 기반 TA 스피커의 SPL 응답의 이론 값 및 실제 값을 그래프로 도시한 것이다.

도 10은 맥신 기반 TA 스피커의 기판 종류에 따른 열 유동성을 그래프로 도시한 것이다.

도 11은 맥신 기판 TA 스피커의 전력에 따른 음압의 이론 값 및 실제 값을 그래프로 도시한 것이다.

도 12은 맥신 기반 TA 스피커의 거리에 따른 음압의 이론 값 및 실제 값을 그래프로 도시한 것이다.

도 13은 파릴린 기질에서 30분 동안 매일 측정한 맥신 기반 TA 스피커의 장기(14일) SPL 안정성을 그래프로 도

시한 것이다.

도 14은 특정 온도에서 측정된 서로 다른 기질을 가진 맥신 기반 TA 스피커의 적외선 열이미지를 도시한 것이다.

도 15은 맥신 기반 TA 스피커의 전력에 따른 표면 온도의 이론 값 및 실제 값을 그래프로 도시한 것이다.

도 16은 맥신 기반 TA 스피커의 실시간 온도 모니터링 결과 값을 그래프로 도시한 것이다.

도 17은 TA 스피커의 광범위 주파수 범위에서의 On/Off 응답을 도시한 것이다.

도 18은 얇은 기판의 열 침투에 대한 개념도 및 그에 상응하는 온도 프로파일을 도시한 것이다.

도 19은 두께가 다른 기판의 열침투 깊이와 주파수 관계를 도시한 것이다.

도 20은 다른 파릴렌 층 두께를 가진 검체의 주파수 의존적 SPL 응답을 도시한 것이다.

도 21은 다른 파릴렌 층 두께를 가진 맥신 기반 TA 스피커의 Polar SpL 맵을 도시한 것이다.

도 22은 두께가 다른 맥신 층 및 파릴렌 기판 측면의 맥신 기반 TA 스피커의 실시간 온도 모니터링을 도시한 것이다.

도 23은 다중 구성에서의 맥신 기반 TA 스피커의 SPL 차이를 도시한 것이다.

도 24은 맥신 기반 TA 스피커의 사운드 생성 기능을 설명하기 위한 4가지 구성에 대한 SPL 분포를 도시한 것이다.

도 25은 다른 파릴렌 기판 두께를 갖는 맥신 기반 TA 스피커의 저항 변화를 도시한 것이다.

도 26은 다른 파릴렌 기판 두께를 갖는 맥신 기반 TA 스피커의 1000사이클 벤딩 테스트 전후의 SEM 이미지를 도시한 것이다.

도 27은 롤업된 원통형 맥신 기반 TA 스피커의 개략도를 나타낸 것이다.

도 28은 파릴렌 기판을 갖는 롤업 원통형 맥신 기반 TA 스피커의 극성 SPL 플롯을 도시한 것이다.

도 29은 일축 키리가미 구조의 맥신 기반 TA 스피커의 도식을 나타낸 것이다.

도 30은 일축-키리가미 구조의 맥신 기반 TA 스피커의 신축, 굽힘 및 비틀림을 받을 때의 모습을 도시한 것이다.

도 31은 신장, 굽힘 및 뒤틀림 변형을 거친 일축-키리가미 구조의 맥신 기반 TA 스피커의 SPL 응답을 도시한 것이다.

도 32은 단축-키리가미 구조의 맥신 기반 TA 스피커의 반복횟수에 따른 장기 안정성을 도시한 것이다.

도 33은 3D 프린팅 된 포물선 형태의 스피커의 개략도를 나타낸 것이다.

도 34은 XY 평면 및 XZ평면의 SPL 분포를 파악하기 위한 포물선 기반 TA 스피커의 개략도 및 실제 사진을 나타낸 것이다.

도 35은 포물선 형태의 맥신 기반 TA 스피커의 극성 SPL 맵과 SPL 응답을 도시한 것이다.

도 36은 포물선 형태의 열음향 스피커의 길이에 대한 FEA 시뮬레이션 결과 값을 도시한 것이다.

도 37은 포물선 형태의 열음향 스피커의 주파수에 대한 FEA 시뮬레이션 결과 값을 도시한 것이다.

도 38은 포물선 형태의 열음향 스피커의 15kHZ 주파에서 수행된 FEA 시뮬레이션 결과를 도시한 것이다.

도 39은 구형 맥신 기반 TA 스피커의 모습을 도시한 것이다.

도 40은 구형 맥신 기반 TA 스피커의 극성 SPL 플롯을 도시한 것이다.

도 41은 구형 맥신 기반 TA 스피커에 대한 사운드 지향성의 등고선 SPL 기반 극성 플롯을 도시한 것이다.

도 42은 면 형태의 열음향 스피커의 서로 다른 평면에 대해 측정된 SPL 값을 도시한 것이다.

도 43은 구형 및 십이면체 맥신 기반 TA 스피커의 제작과정을 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0013] 본 발명의 일 실시예에 따른 열음향 스피커는 맥신(MXene), 폴리리신(poly-Lysine) 접착층 및 기판을 포함할 수 있다.

[0014] 본 발명의 일 실시예에 따른 열음향 스피커는 맥신, 폴리리신 접착층 및 기판이 순차적으로 적층될 수 있다. 구체적으로, 폴리리신 접착층은 맥신이 기판에 잘 붙도록 도와주는 역할을 할 수 있다.

[0015] 상기 열음향 스피커는 원통형, 키리가미, 포물선 형태 및 구형을 포함한 입체적 형태의 구조를 가질 수 있다.

[0016] 상기 기판은 파릴렌(parylene), PEN(Polyehtlene naphtahalate), HDPE(High density Polyethylene), 유리(glass), 실리콘(Silicon)에서 선택되는 1 또는 2 이상일 수 있다.

[0017] 상기 기판의 두께는 0.8 내지 100 ㎛ 의 두께를 가질 수 있다.

[0018] 열음향 스피커 제조방법은 유리 기판을 용매로 세척하는 단계, 상기 세척된 유리 기판 위에 희생층을 코팅하는 단계, 화학기상증착법에 의해 파릴렌 층을 도입한 후 폴리-L-라이신(poly-L-lysine) 접착층으로 코팅하는 단계, 맥신 용액을 스핀 코팅하는 단계 및 잔류 용매를 증발시키는 단계를 포함할 수 있다.

[0019] 상기 맥신 용액은 용질로 맥신, 용매로 증류수로 이루어진 수용액일 수 있다.

[0020] 상기 유리기판을 세척하는 용매는 증류수, 아세톤 및 이소프로필알코올으로 이루어진 군에서 선택되는 하나이상을 포함할 수 있다.

[0021] 열음향 스피커를 개발하기 위해 전도성 물질이 연구되었다.

[0022] 상기 전도성 물질은 나노와이어(AgNWs), 탄소 나노튜브(CNT), 인듐 주석 산화물(ITO) 및 그래핀을 포함할 수 있다.

[0023] 일반적으로, 전도성 물질은 단위 면적당 열 용량(heat-capacity-per-unit-area, HCPUA)이 높기 때문에 열음향 스피커는 소리를 생산하는데 제한이 존재한다. 저 HCPUA 그래핀은 음압 수준의 높은 소리 생성이 가능하지만 표면 기능군이 부족하여 다른 물질과의 정전기적 상호작용을 제한하여 기계적인 변형을 하는 경우 소리 성능 저하를 초래할 수 있다.

[0024] 일반적으로, 기판 두께는 맥신(MXene) 도체에서 파릴린(parylene) 기판으로의 열 방출에 상당한 영향을 미칠 수 있으며, 이는 열음향 스피커 소리 생성에 영향을 미칠 수 있다.

[0025] 종래의 두꺼운 기판을 가는 열음향 스피커는 맥신 도체 앞에서 단방향의 소리를 발생시키고, 두꺼운 기판에 대한 과도한 방열로 인해 기판 측의 음압이 현저히 낮다는 문제점이 존재한다.

[0026] 그러나, 기판 두께가 열 침투 깊이 이하로 감소하면, 기판에 대한 열 방출이 최소화되며, 열음향 스피커의 맥신 및 파릴린 측 모두에서 양방향 소리 생성이 가능할 수 있다.

[0027] 열음향 스피커를 작동하기 위해 AC 전압이 전도성 맥신을 통과하여 주기적인 줄 가열을 유발하여 맥신의 교대 가열을 유도하여 주변 공기의 압력 진동(즉, 압력/음파 발생)을 유도한다. 특히, 효율적인 사운드 생성을 달성하기 위해서는 낮은 단위 면적당 열용량(Heat capacity per unit are)이 필수적이다.

[0028] 상기 단위 면적당 열 용량은 주로 도체의 열 용량과 두께에 의해 영향을 받으며, 도체의 열용량과 도체의 두께가 낮을수록 바람직하다.

[0029] 기판에 대한 열 손실을 최소화하면서 주변 공기로 효율적인 열 전달을 제공하기 때문에 기판의 낮은 열 유동성 또한 중요하다.

[0030] 본 발명의 일 실시예에 따른 열음향 스피커는 원통형, 단축-키리가미 구조, 포물선형 및 구형의 모양을 갖을 수 있다. 다만, 상기 기재된 구조에 한정되는 것은 아니다.

[0031] 본 발명의 일 실시예에 따른 열음향 스피커는 XY평면에서 전방향 소리를 생성하고, 신장 상태에서 소리를 생성하며, 3D 전방향으로 소리를 방사할 수 있다.

[0032] 열음향 스피커의 소리 생성은 전력, 주파수, 거리와 같은 외부변수뿐만 아니라 단위 면적당 열 용량(HCPUA)와 열 효율성과 같은 고유변수에 의존적이다. 도 4는 발생에 영향을 미칠 수 있는 변수의 관계를 도시한 것이다.

[0033] 일반적으로, 열음향 스피커의 소리 출력은 전도성 물질의 단위 면적당 열 용량 기판의 열유동성이 증가함에 따라 감소한다. 이에 따라, 본 발명은 여러 전도성 물질을 조사하였다.

[0034] 도 5를조하면, 맥신이 낮은 두께에서 낮은 단위 면적당 열 용량을 나타내었다.

[0035] 일반적으로, 열음향 스피커의 출력은 입력 전력 및 주파수에 비례하고 열음향 스피커와 마이크 사이의 거리에 반비례한다.

[0036] 효과적인 사운드 생성을 위해서는 열 유동성이 중요하다. 열 유동성은 재료가 열을 흡수할 수 있는 속도를 나타낸다. 일반적으로, 기판은 공기보다 열 유동성이 월등히 높기 때문에 입력된 열을 쉽게 방출할 수 있다.

[0037] 낮은 열 유동성을 갖는 기판은 기판에 대한 열에너지를 희생하여 주변 공기로의 향상된 열에너지 전달을 가능하게 하여 주변 공기와 효과적인 열에너지 교환을 용이하게 할 수 있다.

[0038] 도 10을 참조하면, 파릴렌, PEN, HDPE, 유리 및 실리콘 기판의 열유동성은 각각 262, 478, 889, 1550 및 16100W-$s^{0.5}$ m^{-2} k^{-1}를 나타낸다. 이에 따라, 파릴렌 기판의 맥신 도체의 SPL 출력은 다른 기판의 맥신 도체의 SPL 출력보다 우수하였다.

[0039] 또한, 맥신 기반 TA 스피커의 시트 저항은 줄 가열 및 그에 따른 SPL에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 동일한 AC 전압에서 시트 저항이 낮은 맥신은 더 많은 열을 방출하여 향상된 TA 사운드를 생성할 수 있다. 시트 저항이 낮은 맥신은 더 높은 SPL 출력을 산출하였으며, 이는 표면 온도가 더 높기 때문인 것으로 추정된다.

[0040] 입력 전력 및 마이크와 TA 스피커 사이의 거리와 관련하여서도 SP 출력의 상관관계를 측정하였다. 도 11 및 12를 참조하면, 맥신 음원의 SP 출력은 입력 전력 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

[0041] 도 13을 참조하면, 맥신 기반 TA 스피커는 14일 동안 SPL 저하가 없는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라기반 TA 스피커는 장기적인 안정성이 우수함을 확인할 수 있다.

[0042] 도 14를 참조하면, 다양한 기판의 맥신 도체는 전체 면적에 걸쳐 균일한 온도를 나타내었다. 이에 따라 맥신이 균일하게 코팅되었음을 확인할 수 있었다.

[0043] 도 15를 참조하면, 맥신 도체의 평균 표면 온도는 입력 전력에 따라 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 변환기 필름과 주변 공기 사이의 온도 구배가 높을수록 생성된 SPL이 더 높았으며, 특히 파릴렌 기판 상의 맥신 전도체의 온도가 가장 높은 온도를 나타내었다. 이에 따라 파릴렌 기판 상의 맥신 전도체가 높은 SPL을 생성하였다.

[0044] 도 16을 참조하면, 파릴렌 기질이 낮은 열 유동성으로 인해 시료 중 가장 급격한 온도 상승/감소를 나타냄을 확인할 수 있다.

[0045] 도체의 AC 유도 주기적 가열은 도체에서 주변 공기로 전파되는 온도파를 생성할 수 있으며, 이 온도파의 진폭은 급격히 감소할 수 있다. 파릴렌 기판으로 TA 스피커에 순차적으로 단일 사인파 펄스를 전송하여 생성된 마이크의 TA 전압 출력은 함수 발생기에서 생성된 입력 전압과 일치함을 확인할 수 있었다. 도 17를 참조하면 TA 스피커가 지연 없이 광범위한 주파수 범위에서 즉시 On/Off 응답을 나타냄을 확인할 수 있다.

[0046] TA 스피커에서 사운드 생성은 도체에서 각 매체로 전달되는 열의 양에 영향을 받을 수 있다. 상기 매체는 공기, 기판 및 변환기 필름일 수 있다.

[0047] 전달된 열은 각 매질의 열 용량과 부피에 비례한다. 또한, 기판의 열 체적은 표면적과 열 침투 깊이에 비례하므로, 기판의 두께는 일정 두께 이하로 유지되어야 TA 사운드 생성이 더 커질수 있다.

[0048] 맥신 기반 TA 스피커에서의 열전달을 고려하면, 교류전압에 의해 공급되는 열에너지는 필름, 기판, 전면 및 후면 인터페이스의 주변 공기의 열 에너지로 분류 할 수 있다.

[0049] 도 18을 참조하면, 입력 AC 전압은 맥신 도체 전면에서 가장 높은 온도를 유도함을 확인할 수 있다. 또한, 맥신 전도체 후면에서 기판으로의 열전달은 기판을 통과하여 선형적으로 감소하는 온도로 이어진다. 이에 따라 얇은 기판은 후면에서 더 높은 표면 온도를 나타내게 된다.

[0050] 특히, 기판 두께가 충분히 낮은 경우에는 두 계면의 온도는 유사할 수 있다. 이는 기판으로 방출되는 열 에너지가 무시될 수 있고 기판-공기 계면에서의 열파 반사가 기판 내부의 온도에 상당한 영향을 미치기 때문이다.

[0051] 일반적으로, 열 침투 깊이는 열파가 시간에 따라 물질을 통해 확산되는 거기로 정의되며 주파수의 제곱근에 반

비례한다. 이에 따라 SPL 출력은 저주파 영역에서 기판 두께에 의해 큰 영향을 받을 수 있다.

[0052] 도 19를 참조하면, 파릴렌층 두께가 열 침투 깊이 보다 작으면, 맥신 전도체로부터 발생한 열이 파릴렌 기판의 후방 측으로 효율적으로 전달되어 기판 측과 공기 간의 열교환으로 이어져 SPL 출력의 감소가 거의 없을 수 있다.

[0053] 반면, 파릴렌 두께가 열 침투 깊이보다 크면 기판 후면에서 SPL 출력이 감소할 수 있다.

[0054] 도 20은 다른 파릴렌 층 두께를 가진 검체의 주파수 의존적 SPL 응답을 도시한 것이다. 도 20을 참조하면, 0.8㎛ 두께의 파릴렌을 가진 맥신 기반 TA 스피커는 모든 가청 주파수 범위에서 더 두꺼운 파릴렌 기판을 가진 경우보다 더 높은 SPL 출력을 보임을 확인할 수 있다.

[0055] 도 21을 참조하면, 0.8㎛ 두께의 파릴렌 기판은 전면과 후면에서 균일한 TA 사운드 프로파일을 갖는 양방향 TA 사운드를 생성함을 확인할 수 있다.

[0056] 도 22를 참조하면, 파릴렌의 두께가 두꺼울수록 전면부에 비해 후면부의 표면온도가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

[0057] 초박형 맥신 기반 TA 스피커는 낮은 굽힘 강성으로 인해 다양한 기계적 변형에 대해 높은 안정성을 보여준다. 도 23은 다양한 기계적 변형 하에서 스피커의 SPL 출력을 나타낸다. 두꺼운 파릴렌 기질을 가진 TA 스피커는 기계적 변형에 취약하여 방향 조정 가능한 사운드 생성 능력이 제한됨을 확인할 수 있다.

[0058] 도 25는 기계적 변형이 전기 전도도에 미치는 영향을 알아보기 위해 1,000회의 벤딩 사이클에 걸친 저항 변화 조사한 것을 도시한 것이다.

[0059] 도 26은 주사전자현미경 분석을 통해 원시 및 사이클링 샘플의 표면 형태 변화를 추가로 확인 하였다.

[0060] 도 25 및 26을 참조하면 초박형 맥신 기반 TA 스피커는 전기적 안정성과 내구성이 우수함을 나타내었다. 또한, 두꺼운 파릴렌 시료의 표면은 균열이 나타났지만, 초박형 파릴렌 시료는 높은 기계적 변형 후에도 무시할 정도의 표면 손상이 발생하였다.

[0061] 도 27은 롤업된 원통형 맥신 기반 TA 스피커의 개략도를 도시한 것이다. 전방향 음원은 청취자를 위해 모든 각도에서 일관된 음질을 생성할 수 있으므로 원통형 모양의 TA 스피커를 제작하였다. 도 28을 참조하면, 초박막 파릴렌 두께를 가진 TA 스피커의 경우 중심 대칭인 SPL 출력을 나타내었다.

[0062] 다양한 3D 모양에 맞춰 제작할 수 있는 신축성 스피커는 웨어러블 전자 장치 및 소프트 로봇 공학에서 잠재적인 응용분야에서 사용될 수 있다. 이에 따라 키리가미 구조로 절단된 초박형 맥신 기반 TA 스피커를 제작할 수 있다.

[0063] 도 29은 일축 키리가미 구조의 맥신 기반 TA 스피커의 도식을 나타낸 것이다.

[0064] 도 30 내지 32를 참조하면, 키리가미 구조의 초박형 맥신 기반 TA 스피커 또한 우수한 기계적 내구성을 보였다.

[0065] 사운드 포커스 능력을 평가하기 위해 3D 포물선 접시에 대면적의 초박형 TA 스피커를 배치하였다. 도 35를 참조하면, 평면 TA 스피커는 낮은 SPL 출력과 소리 감지 기능이 없는데 반해, 포물선 형태의 TA 스피커는 특정 Z_{focal}에서 높은 SPL 출력을 나타냄을 확인할 수 있다. 또한, 도 36을 참조하면, Z_{focal}과 초점에서의 최대 SPL 출력은 포물선 맥신 기반 TA 스피커의 직경이 감소함에 따라 감소하였다.

[0066] 도 37을 참조하면, 인가된 주파수가 증가할수록 방향성, SPL 출력 및 Z_{focal-} 값을 향상시키는 것을 확인할 수 있다.

[0067] 도 38을 참조하면, Z_{focal}로부터의 거리가 증가함에 따라, 농축된 SPL의 초점은 점차 소멸되는 것을 확인할 수 있다.

[0068] 원통형, 키리가미, 포물선 형태이외에도 맥신 기반 TA 스피커는 구형 및 십이면체 등 다양한 형태로 제조될 수 있다.

[0069] 도 39 및 도 43은 실제 구형 및 십이면체 구조의 맥신 기반 TA 스피커를 도시한 것이다.

[0071] 제조예1. 맥신 나노 시트 제조

[0072] 최소 집중 층 박리(minimally intensive layer delamination) 방법을 사용하여 불화리튬(LiF)과 염산(HCl)의 혼합물로 Ti_3AlC_2 MAX 전구체 Ti_3AlC_2에서 Al층을 선택적으로 에칭하여 박리된 맥신 나노시트를 제조하였다 구체적으로, LiF 3.25g를 HCl(9M) 40ml 에 20분간 연속 교반하였다. 이후 MAX 분말 2g을 식각액에 첨가반응을 진행하였다. 상기 반응은 35℃ 분위기하에서 24시간 동안 550rpm으로 교반하였다. 이후 증류수(DI water)로 3500rpm으로 5분간 반복 세척하였다.

[0073] 이후 원심분리관 바닥부의 Tx 침전물을 1시간 동안 얼음찜질을 하여 Ti_3C_2Tx 박편을 박리시킨 후 3500 rpm으로 1시간 동안 원심분리를 진행하였다 마지막으로 진공보조여과를 통해 상등액을 채취하여 120℃ 진공에서 24시간 건조하였다. 상기 원심분리는 Ph 6으로 중화하였을 때 걸리는 시간이 5분에서 1시간으로 증가하였다.

[0074] 맥신 나노시트의 원자력현미경(AFM) 분석결과 맥신 나노시트의 단일층의 두께는 1.7nm이었다.

[0076] 제조예2. 맥신 기반 열음향 스피커 제작

[0077] 유리기판을 증류수(DI water), 아세톤 및 이소프로필알코올로 각각 10분간 세척하고 Micro-90(Cole-Parmer, USA) 희생층으로 코팅하였다. 그리고 파릴렌 코터(NRPC-500, NURITECH, South Korea)를 이용하여 화학기상증착법(CVD)에 의해 파릴렌-C 필름을 증착하였다. 이후, O2 플라즈마 포함하여 다섯 가지 물질인 PEN, HDPE, 유리, 실리콘 및 파릴렌으로 필름의 수성 표면 처리하였다. PLL 용액(미국 Sigma-Aldrich, H2O의 0.1 w/v%)을 60초 동안 2000rpm으로 스핀 코팅한 후, MXene 용액(25 mg/mL)을 60초 동안 4000rpm으로 스핀 코팅한 후 110° C에서 어닐링하여 DI 물을 제거했다. 이후 Micro-90위에 파릴렌 기질이 있는 가공된 TAMXene 기반 라우드스피커를 DI 물에 녹여 미세 90 희생층을 제거했다.

[0079] 실험예. 열음향 스피커의 사운드 출력 평가

[0080] MXene 기반 TA 스피커의 SPL 출력을 측정하기 위해 각 샘플을 직사각형 조각(1cm x 1.5cm)으로 절단했다. 이후 Ag-paste 코팅된 Ni/Cu 전극 2개(측정면적: 1cm x 1cm)를 부착하고 60° C에서 1시간 동안 어닐링하여 MXene 기반 TA 확성기를 제작하였으며, 함수 발생기(미국 Tektronix, AFG 3011C)를 사용하여 전극을 통해 사인파 AC 전압을 인가하였다.

[0081] 표준 마이크(40PH, GRAS, 덴마크)를 사용하여 방출된 소리를 감지하고 무반향 챔버(SMB-80, IDS-technology, 대한민국)에서 동적 주파수 분석기(National Instruments Corp, USA)를 사용하여 측정했다. SPL 안정성 테스트를 14일 동안 수행했고, 각 측정은 매일 30분 동안 수행했다. 무반향 챔버의 기본 소음 수준은 20dB 미만이었다.

[0083] 실험예. 열음향 스피커의 사운드 생성에 대한 기판의 영향 조사

[0084] 열음향 스피커의 사운드 생성에 대한 기판의 영향을 조사하기 위해 동일한 두께(100㎛)와 면적(1.0cm X 1.0cm)을 가진 5개의 서로 다른 기판(파릴렌, 폴리에틸렌 나프탈레이트(PEN), 고밀도 폴리에틸렌(HDPE), 유리 및 실리콘)에 MXene 기반 TA 스피커를 제작했다.

[0085] MXene 도체의 전기 시트 저항을 5개 기판에서 65Ω · sq-1로 제어하고, 0.5W의 입력 전력과 3cm의 측정 거리에서 0.1~20kHz의 가청-음 주파수 영역에서 서로 다른 기판에 있는 MXene 도체의 SPL(Sound-presuure leve)을 측정했다.

[0086] 모든 기판의 SPL 출력은 입력 주파수에 비례하여 증가하였다. 특히, 파릴렌 기판의 MXene 도체로부터의 TA 사운드 생성은 15 kHz에서 다른 기판의 MXene(PEN, HDPE, 유리 및 실리콘의 경우 각각 72.4, 70.9, 65.4 및 51.2 dB)보다 우수하였다.

[0087] 모든 기판의 열유동성을 측정한 결과 파릴렌, PEN, HDPE, 유리 및 실리콘 기판의 열유동성은 각각 262, 478, 889, 1550 $W \cdot s0.5 \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$로 측정되었다. 파릴렌 기판의 맥신 도체의 SPL 출력은 다른 기판의 맥신 도체의 SPL 출력보다 우수하였다. 동일한 AC 전압에서 시트 저항이 낮은 맥신은 더 많은 열을 방출하여 향상된 사운드

생성이 가능하였다.

[0088] 다양한 시트 저항을 갖는 파릴린 기판의 맥신 기반 열음향 스피커에 대해 동일한 입력 AC 전압에서 SPL 출력/주파수 및 온도/시간 분석을 수행하였다.

[0089] 시트 저항이 낮은 맥신은 더 높은 SPL 출력을 산출하였으며, 이는 표면 온도가 더 높기 때문인 것으로 추정된다.

[0090] 입력 전력 및 마이크와 열음향 스피커 사이의 거리와 관련하여 SP 출력을 측정하였다.

[0091] MXene 음원의 SP 출력은 입력 전력 증가에 따라 선형적으로 증가했으며 거리에 반비례했다.

[0092]
$$\Delta P = \frac{3}{4\pi}\frac{P_{input}}{v_{air}^2}\frac{f}{r}\frac{e_{air}}{e_{air}+e_{sub}+d_{film}\rho_{film}C_{p,film}\sqrt{2\pi f}}, \quad (1)$$

[0093] 상기 식(1)은 Daschewski 모델(32)을 사용하여 설명할 수 있으며, 여기서 기판의 MXene 음원에 의해 생성된 SP는 다음과 같이 설명될 수 있다.

[0094] ΔP : 음압

[0095] v_{air} : 공기 중 음속

[0096] e_{air} : 공기의 열유동성,

[0097] d_{film} : 필름의 두께

[0098] ρ_{film} : 필름의 밀도

[0099] $C_{p,film}$: 필름의 열용량

[0101] MXene 기반 TA 스피커의 주파수, 입력 전력 및 측정 거리에 따른 실험 SP의 변화는 이론적 결과와 일치했다.

[0103] 실험예. 열음향 스피커의 표면온도 측정

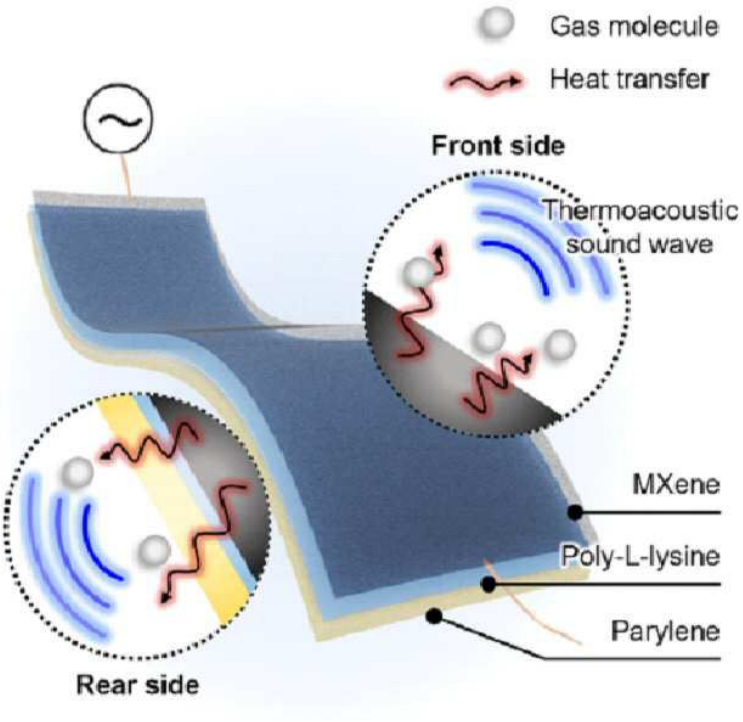
[0104] 열음향 스피커의 표면 온도를 측정하기 위해 4채널 온도계(TM-747D, TENMARS)에 연결된 K형 열전대(5SRTC-TT-K-30-36, OMEGA, 스위스)를 사용하였다.

[0106] 실험예. 열음향 스피커의 광투과율 측정

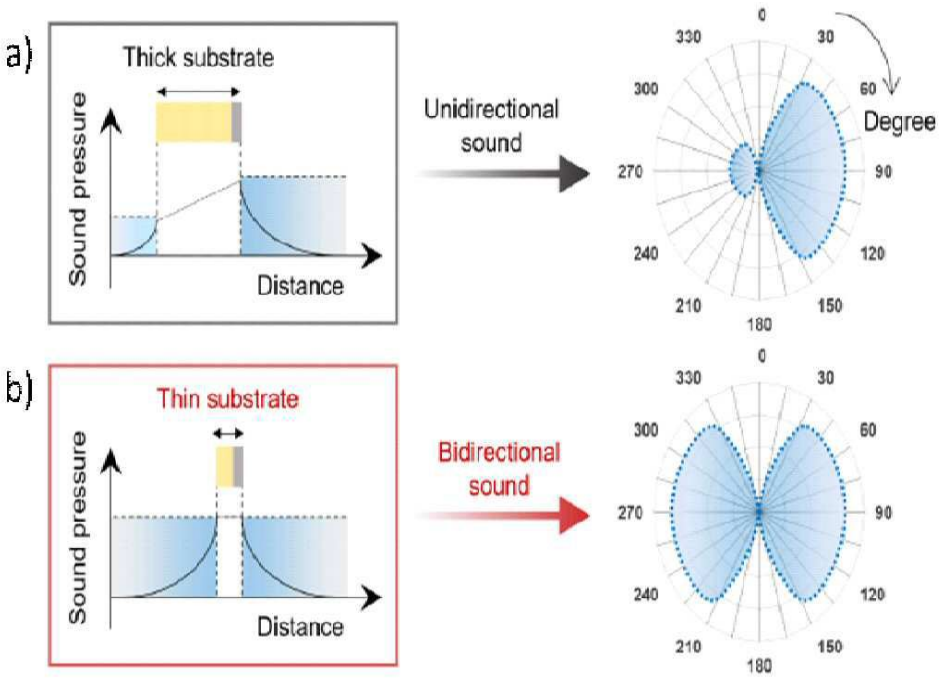
[0107] 열음향 스피커의 광투과율을 측정하기 위해 자외선 가시 분광 광도계(Cary 5000, Agilent, USA)를 사용하였다.

도면

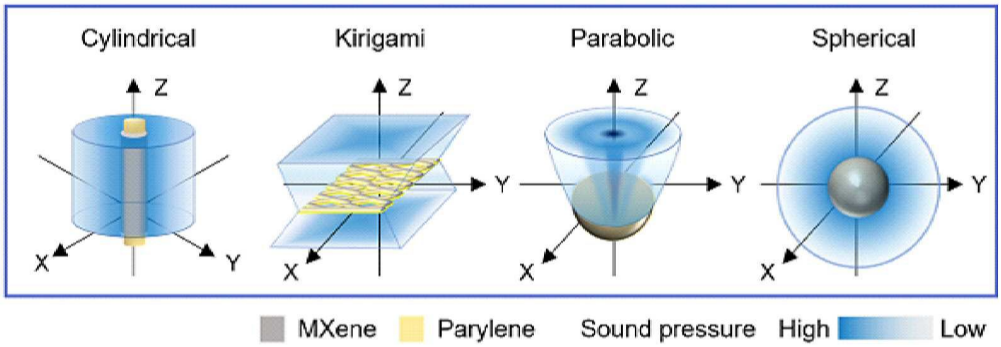
도면1


Gas molecule
Heat transfer
Front side
Thermoacoustic sound wave
MXene
Poly-L-lysine
Parylene
Rear side

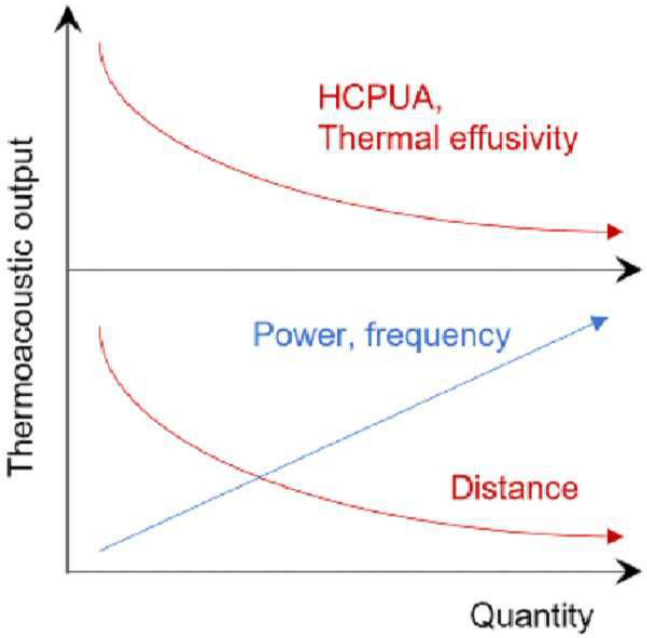
도면2


a)
Thick substrate
Sound pressure
Distance
Unidirectional sound
0
30
60
90
120
150
180
210
240
270
300
330
Degree
b)
Thin substrate
Sound pressure
Distance
Bidirectional sound

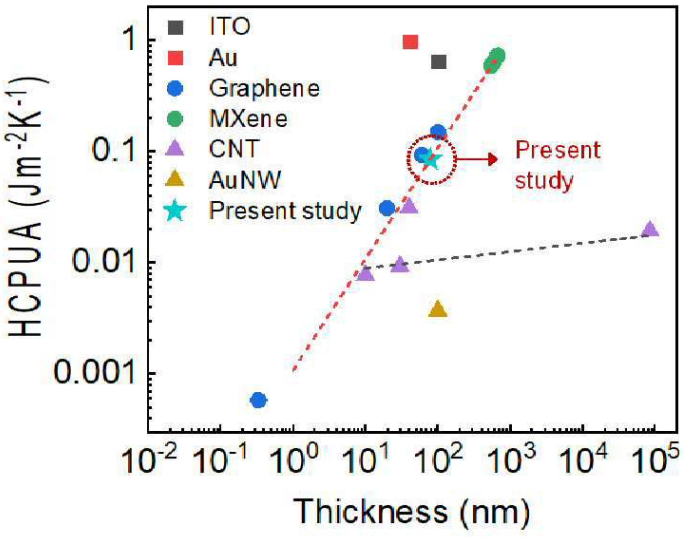
도면3


Cylindrical
Kirigami
Parabolic
Spherical
Z
X
Y
MXene
Parylene
Sound pressure
High
Low

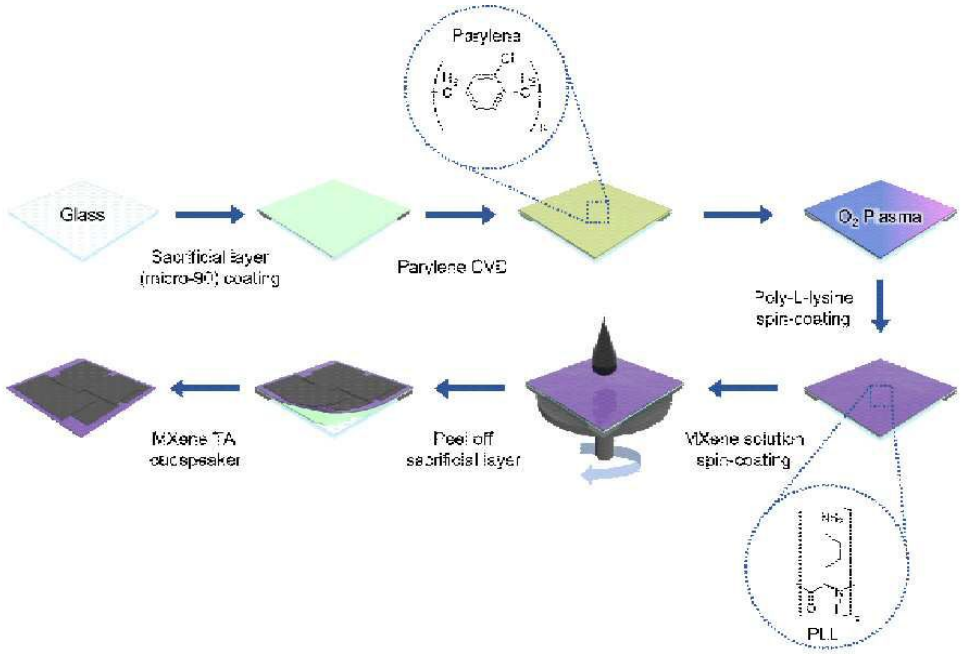
도면4


HCPUA,
Thermal effusivity
Power, frequency
Distance
Thermoacoustic output
Quantity

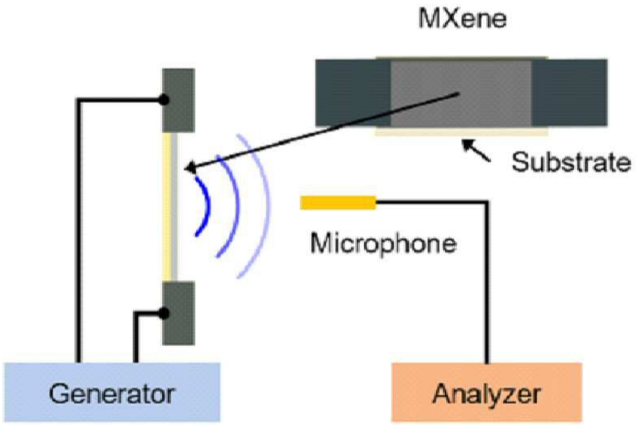
도면5


ITO
Au
Graphene
MXene
CNT
AuNW
Present study
Present
study
HCPUA (Jm-2K-1)
1
0.1
0.01
0.001
10-2 10-1 100 101 102 103 104 105
Thickness (nm)

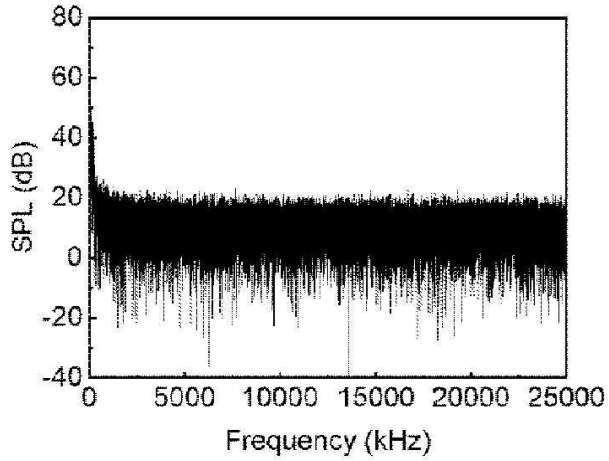
도면6


Parylene
Glass
Sacrificial layer
(micro-90) coating
Parylene CVD
O_2 Plasma
Poly-L-lysine
spin-coating
MXene TA
ouicspeaker
Peel off
sacrificial layer
MXene solution
spin-coating
PLL

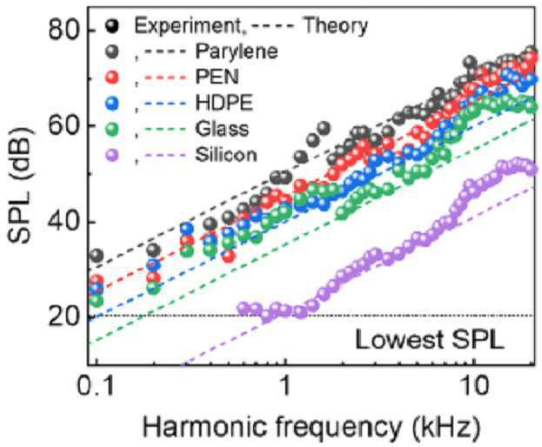
도면7


MXene
Substrate
Microphone
Generator
Analyzer

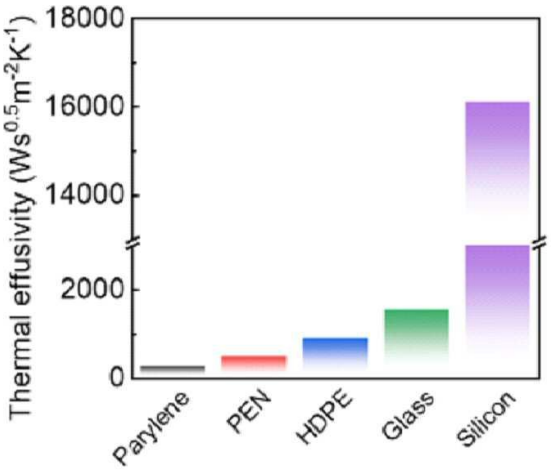
도면8


80
60
40
20
0
-20
-40
SPL (dB)
0
5000
10000
15000
20000
25000
Frequency (kHz)

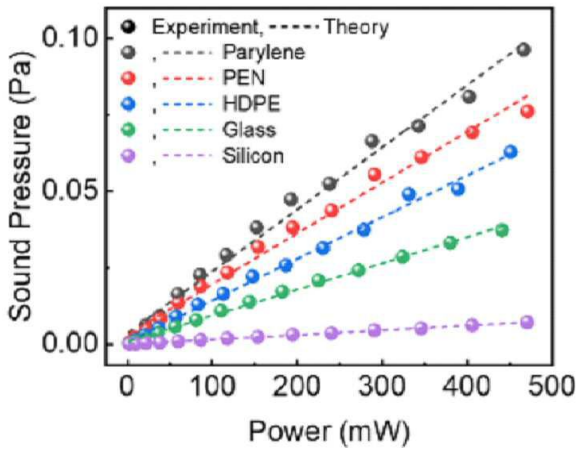
도면9


Experiment, ---- Theory
, ---- Parylene
, ---- PEN
, ---- HDPE
, ---- Glass
, ---- Silicon
80
60
40
20
SPL (dB)
Lowest SPL
0.1
1
10
Harmonic frequency (kHz)

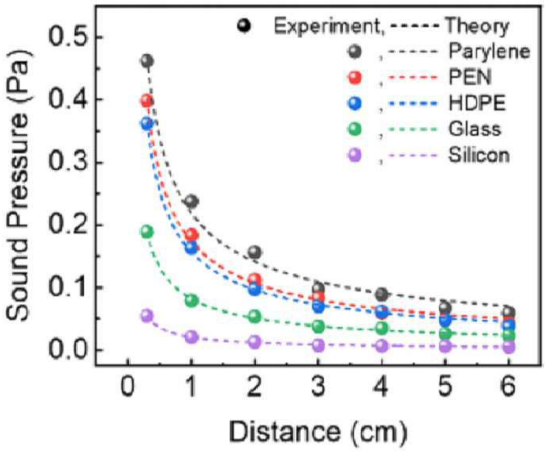
도면10


18000
16000
14000
2000
0
Thermal effusivity (Ws$^{0.5}$m^{-2}K^{-1})
Parylene
PEN
HDPE
Glass
Silicon

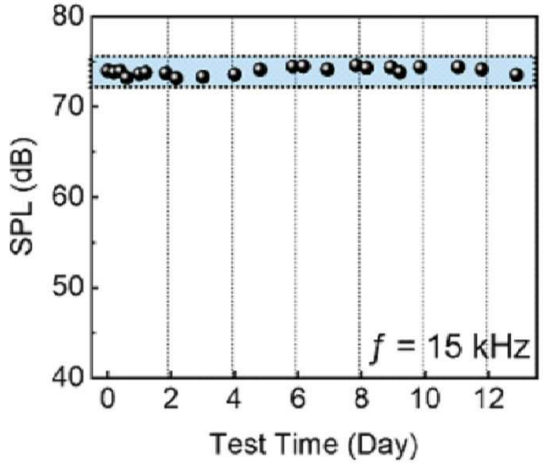
도면11



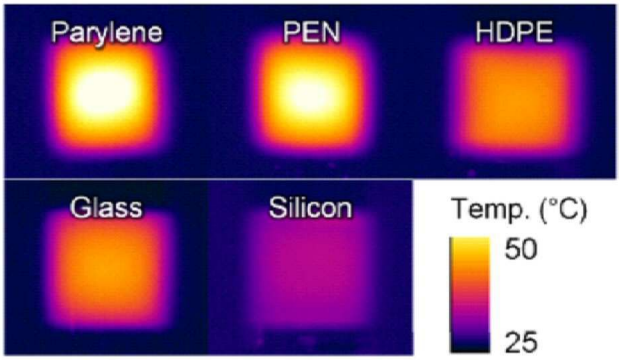
도면12



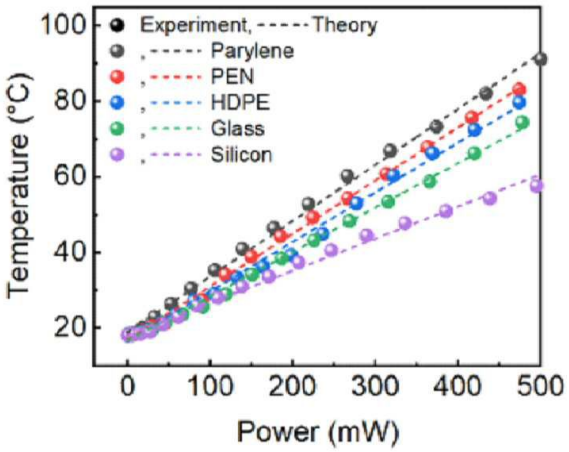
도면13



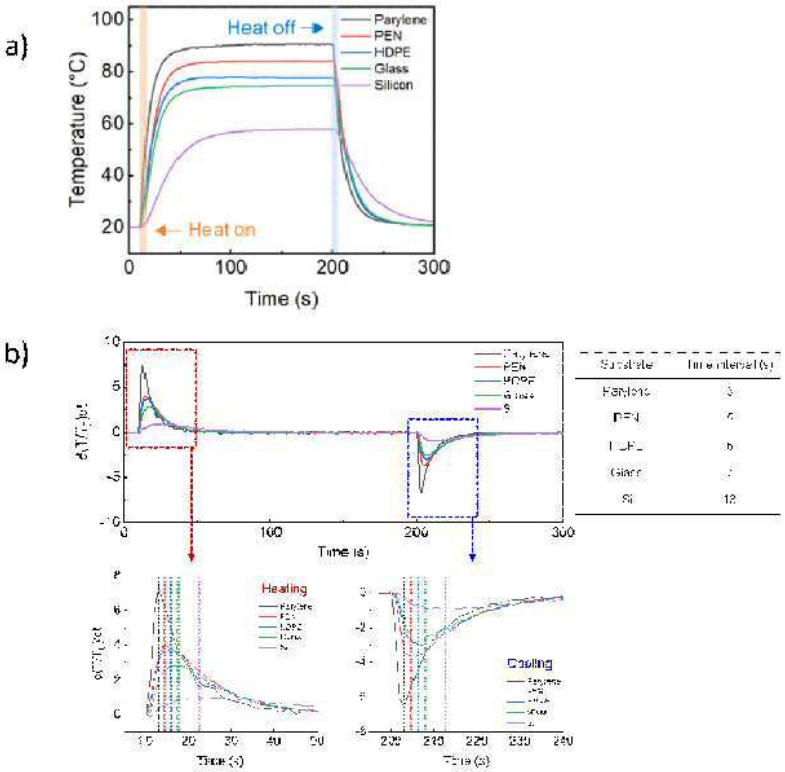
도면14


Parylene
PEN
HDPE
Glass
Silicon
Temp. (°C)
50
25

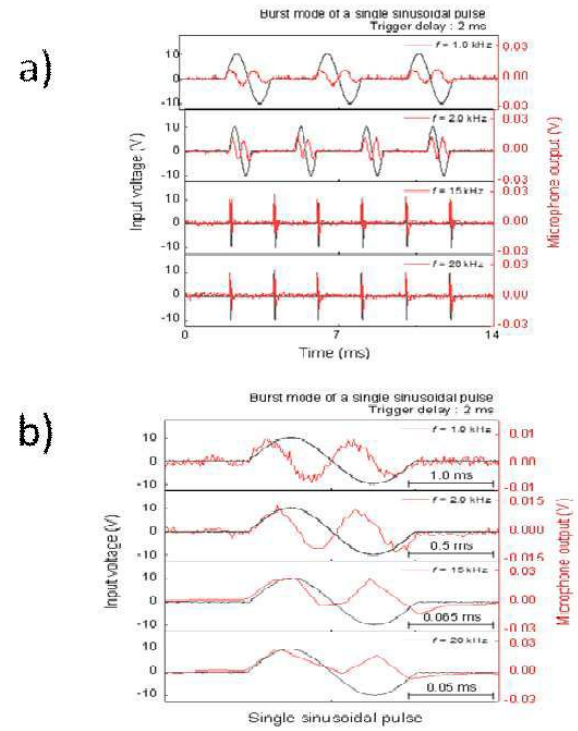
도면15


Experiment, Theory
Parylene
PEN
HDPE
Glass
Silicon
Temperature (°C)
100
80
60
40
20
0
100
200
300
400
500
Power (mW)

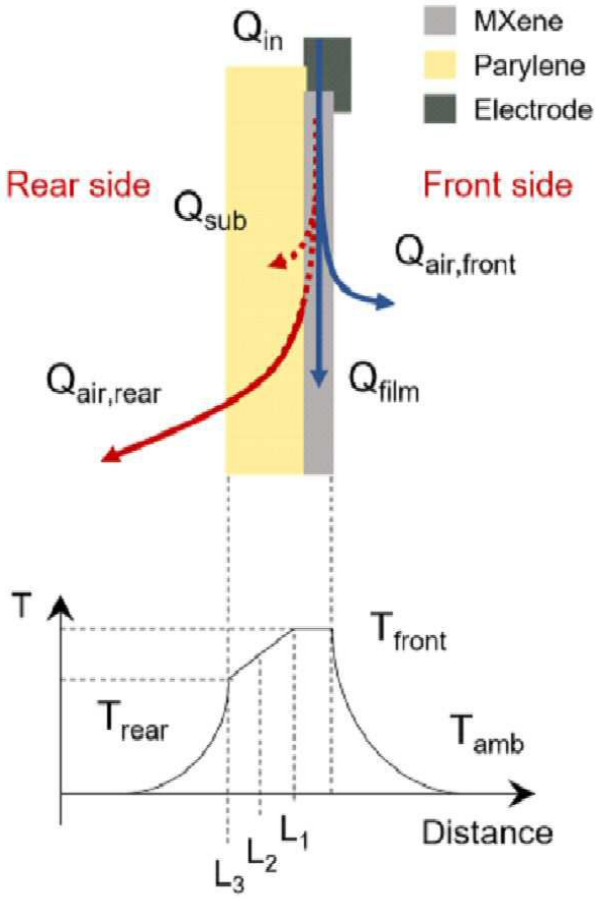
도면16


a)
Heat off
Heat on
Parylene
PEN
HDPE
Glass
Silicon
Temperature (°C)
Time (s)
b)
Heating
Cooling

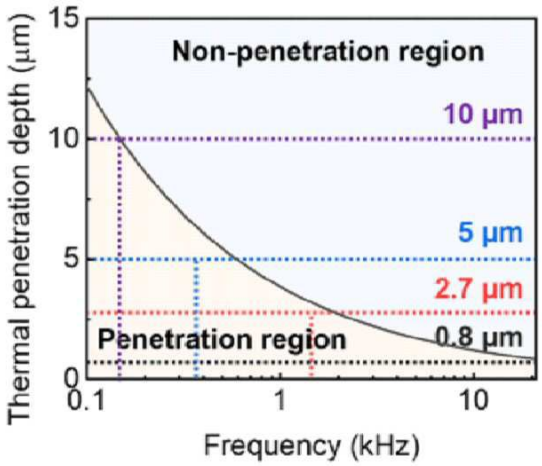
도면17


a)
Burst mode of a single sinusoidal pulse
Trigger delay : 2 ms
Input voltage (V)
Microphone output (V)
Time (ms)
b)
Burst mode of a single sinusoidal pulse
Trigger delay : 2 ms
1.0 ms
0.5 ms
0.005 ms
0.05 ms
Input voltage (V)
Microphone output (V)
Single sinusoidal pulse

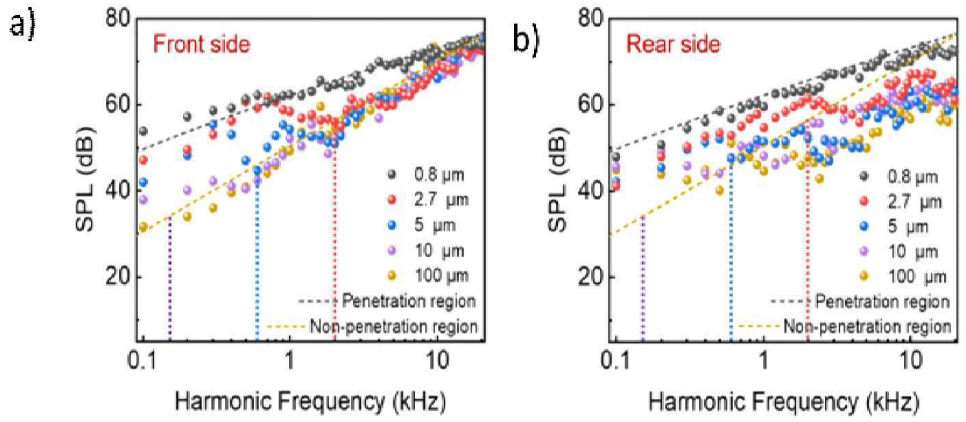
도면18


Q_in
MXene
Parylene
Electrode
Rear side
Front side
Q_sub
Q_air,front
Q_air,rear
Q_film
T
T_front
T_rear
T_amb
Distance
L_1
L_2
L_3

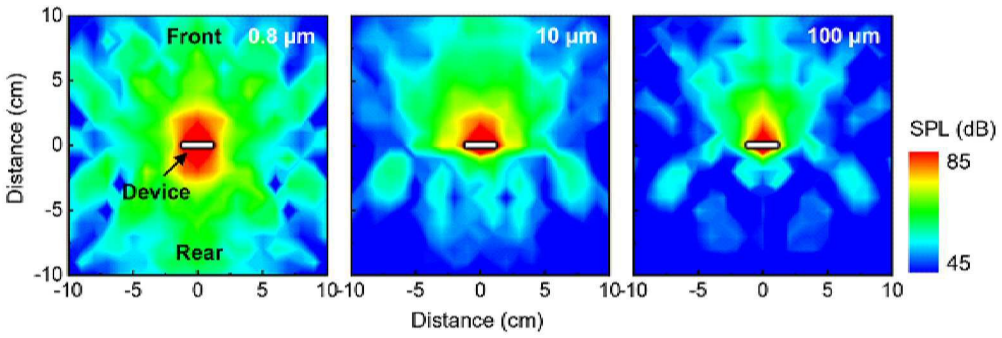
도면19


Thermal penetration depth (μm)
15
10
5
0
Non-penetration region
10 μm
5 μm
2.7 μm
Penetration region
0.8 μm
0.1
1
10
Frequency (kHz)

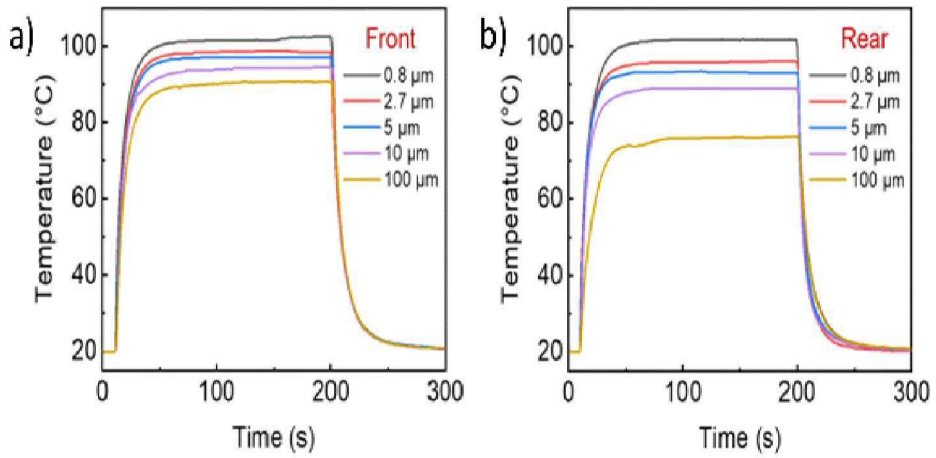
도면20



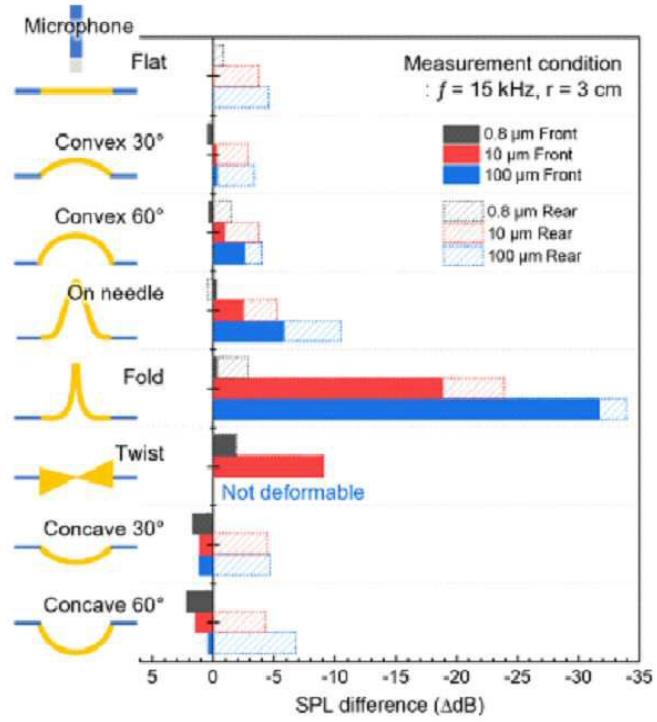
도면21



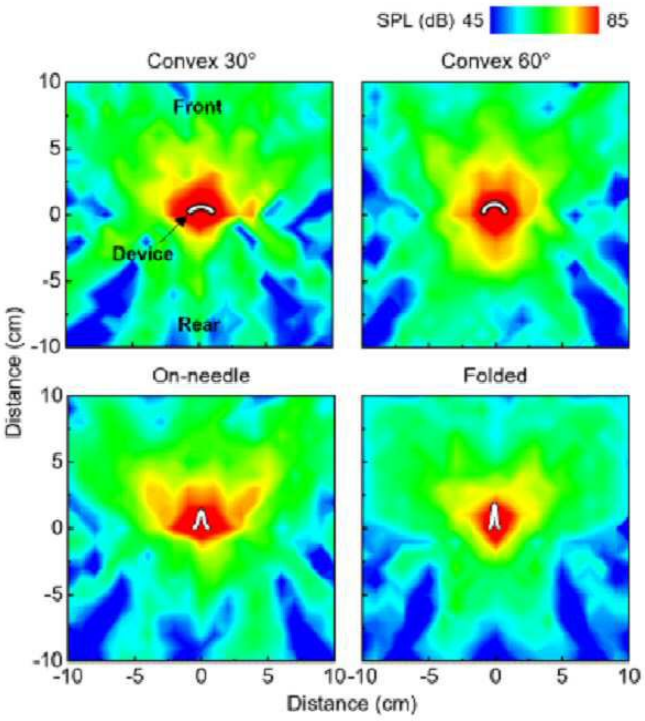
도면22



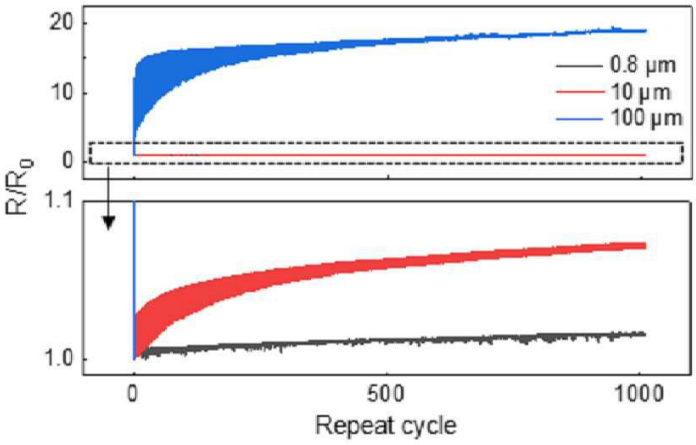
도면23


Microphone
Flat
Convex 30°
Convex 60°
On needle
Fold
Twist
Concave 30°
Concave 60°
Measurement condition
: f = 15 kHz, r = 3 cm
0.8 μm Front
10 μm Front
100 μm Front
0.8 μm Rear
10 μm Rear
100 μm Rear
Not deformable
5 0 -5 -10 -15 -20 -25 -30 -35
SPL difference (ΔdB)

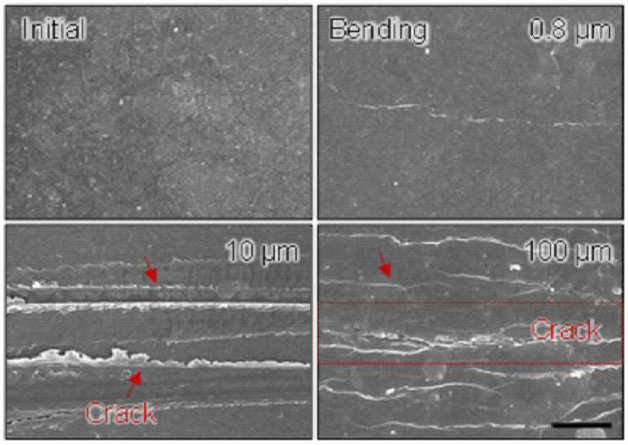
도면24


SPL (dB) 45
85
Convex 30°
Convex 60°
Front
Device
Rear
On-needle
Folded
Distance (cm)
Distance (cm)
10 5 0 -5 -10
-10 -5 0 5 10

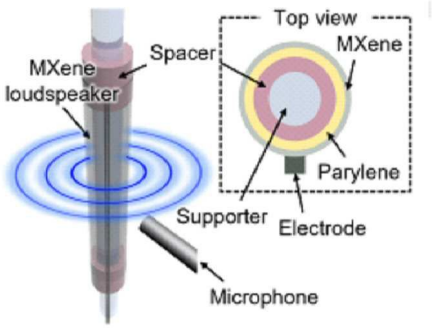
도면25



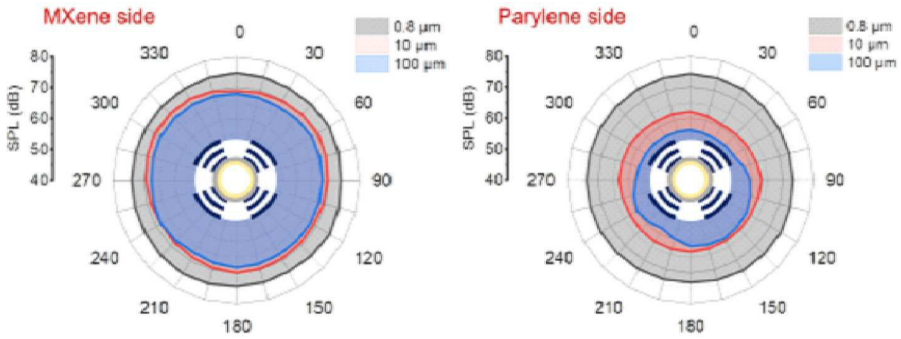
도면26



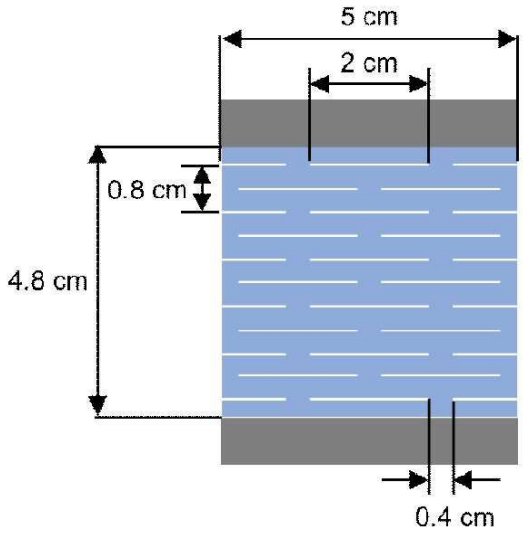
도면27



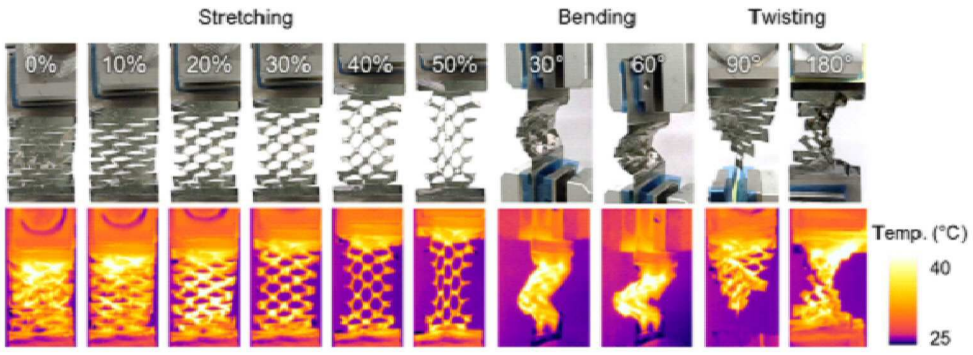
도면28



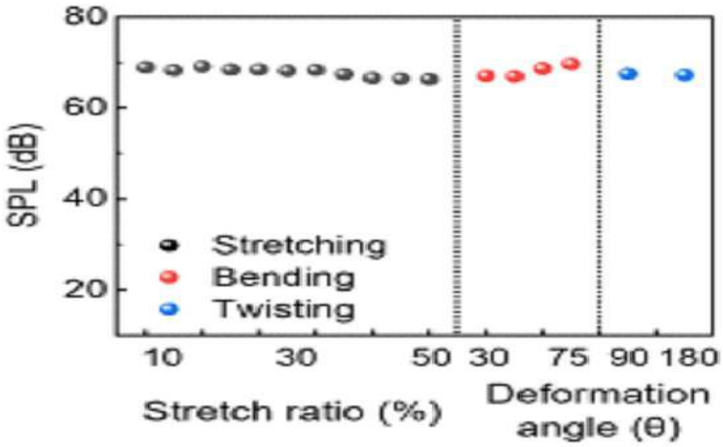
도면29



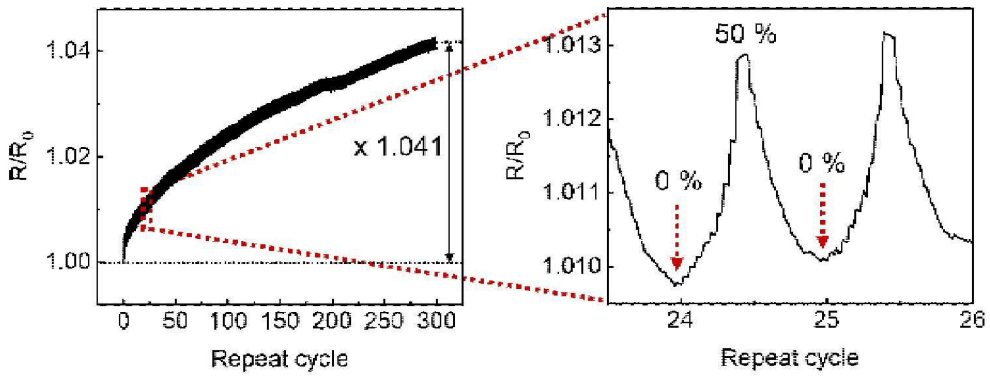
도면30



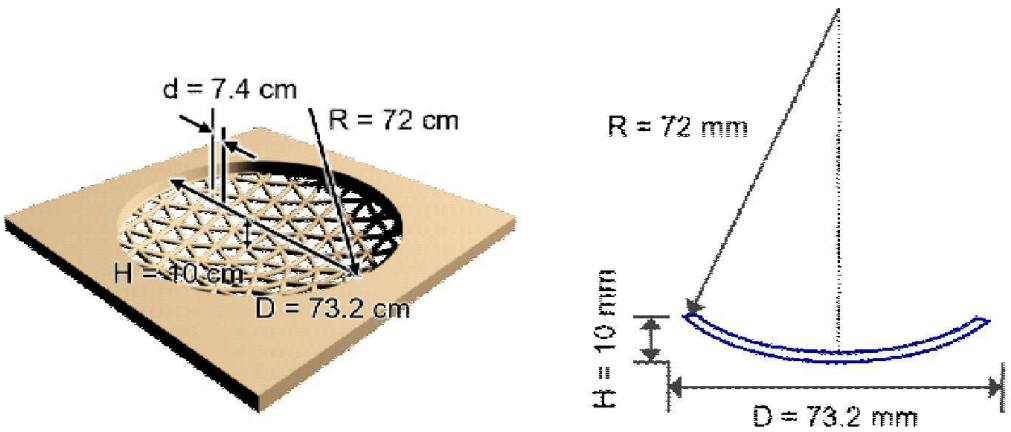
도면31



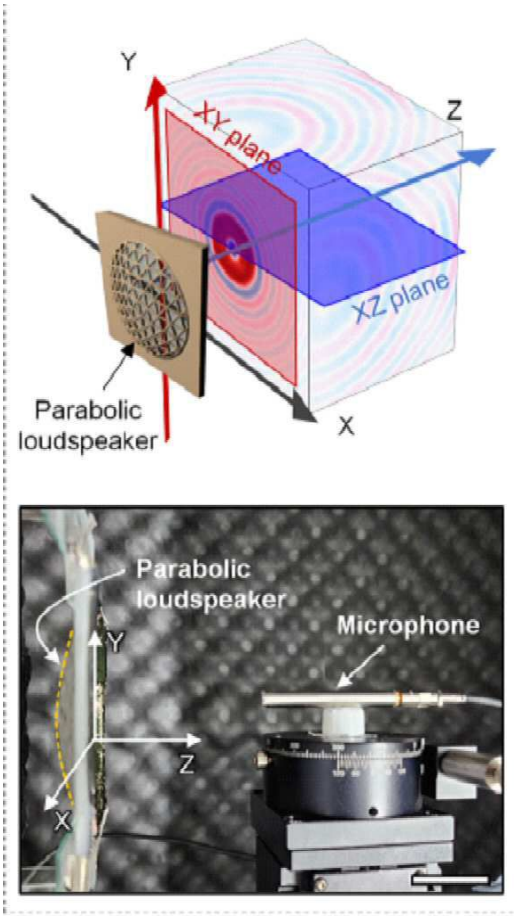
도면32



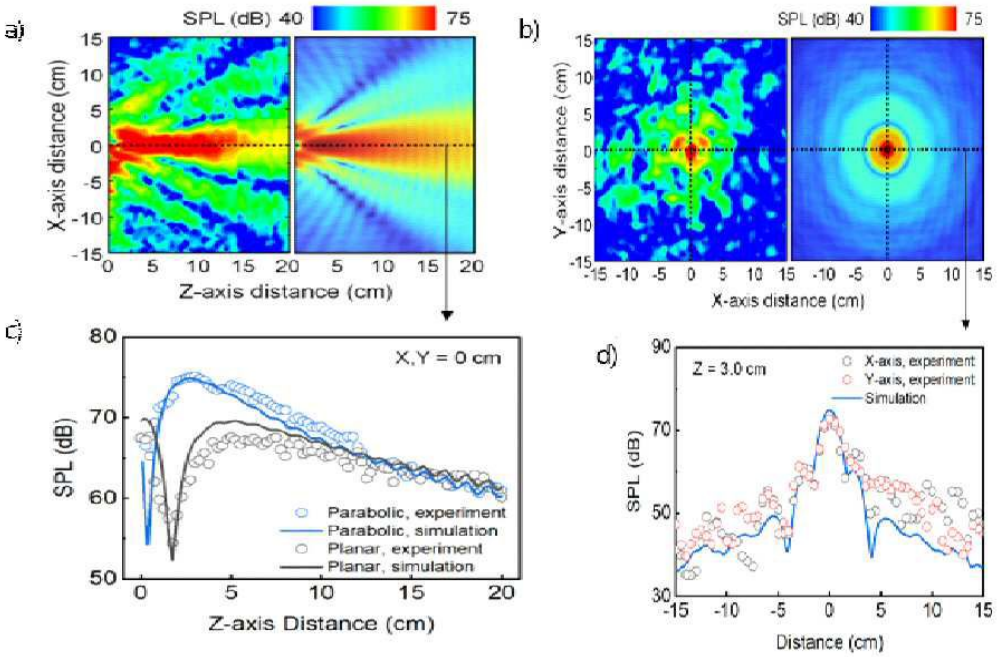
도면33



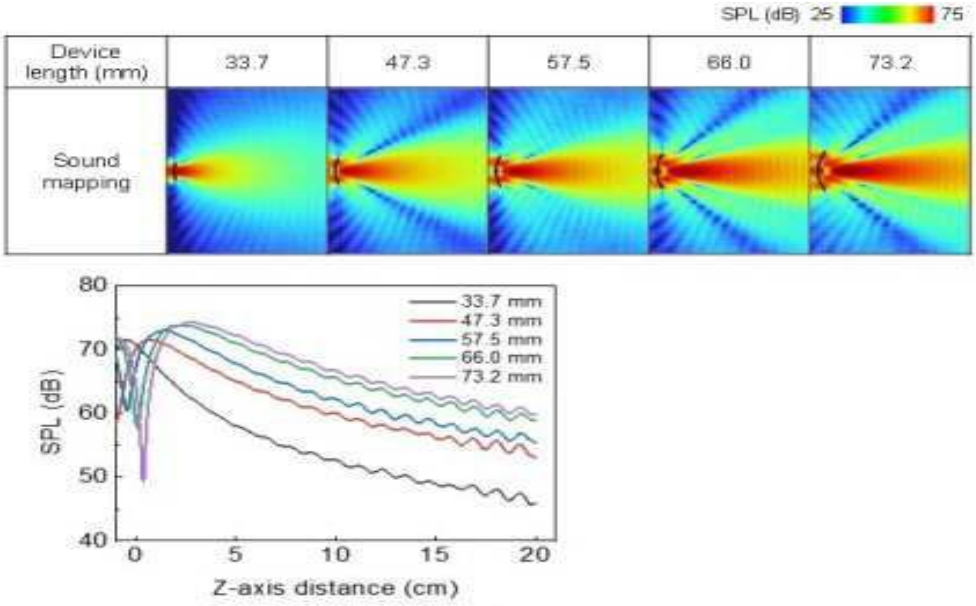
도면34


Y
Z
XY plane
XZ plane
X
Parabolic
loudspeaker
Parabolic
loudspeaker
Microphone
Y
Z
X

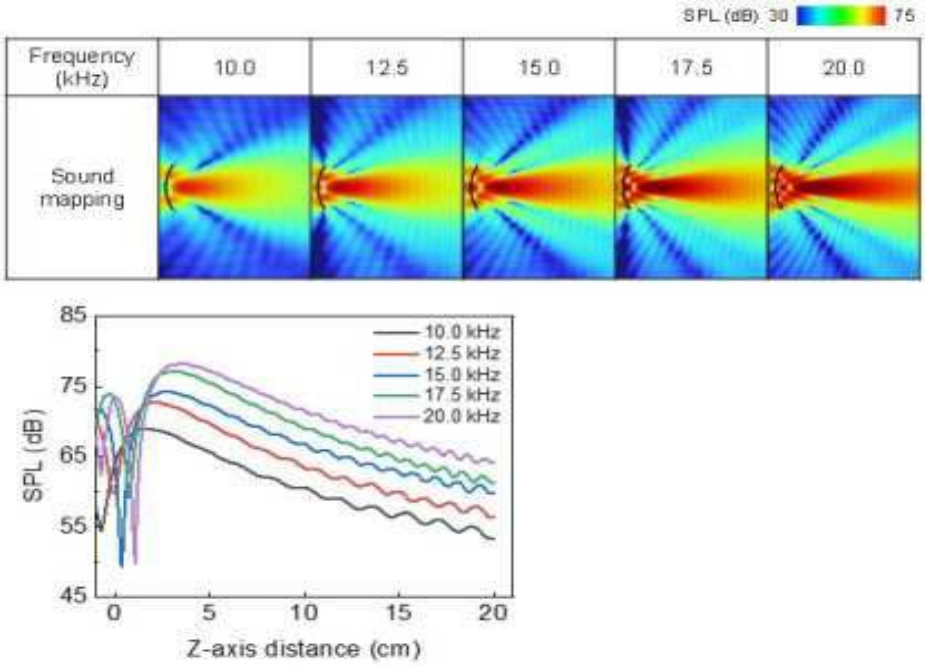
도면35


a)
SPL (dB) 40
75
X-axis distance (cm)
Z-axis distance (cm)
b)
SPL (dB) 40
75
Y-axis distance (cm)
X-axis distance (cm)
c)
X,Y = 0 cm
SPL (dB)
Parabolic, experiment
Parabolic, simulation
Planar, experiment
Planar, simulation
Z-axis Distance (cm)
d)
Z = 3.0 cm
X-axis, experiment
Y-axis, experiment
Simulation
SPL (dB)
Distance (cm)

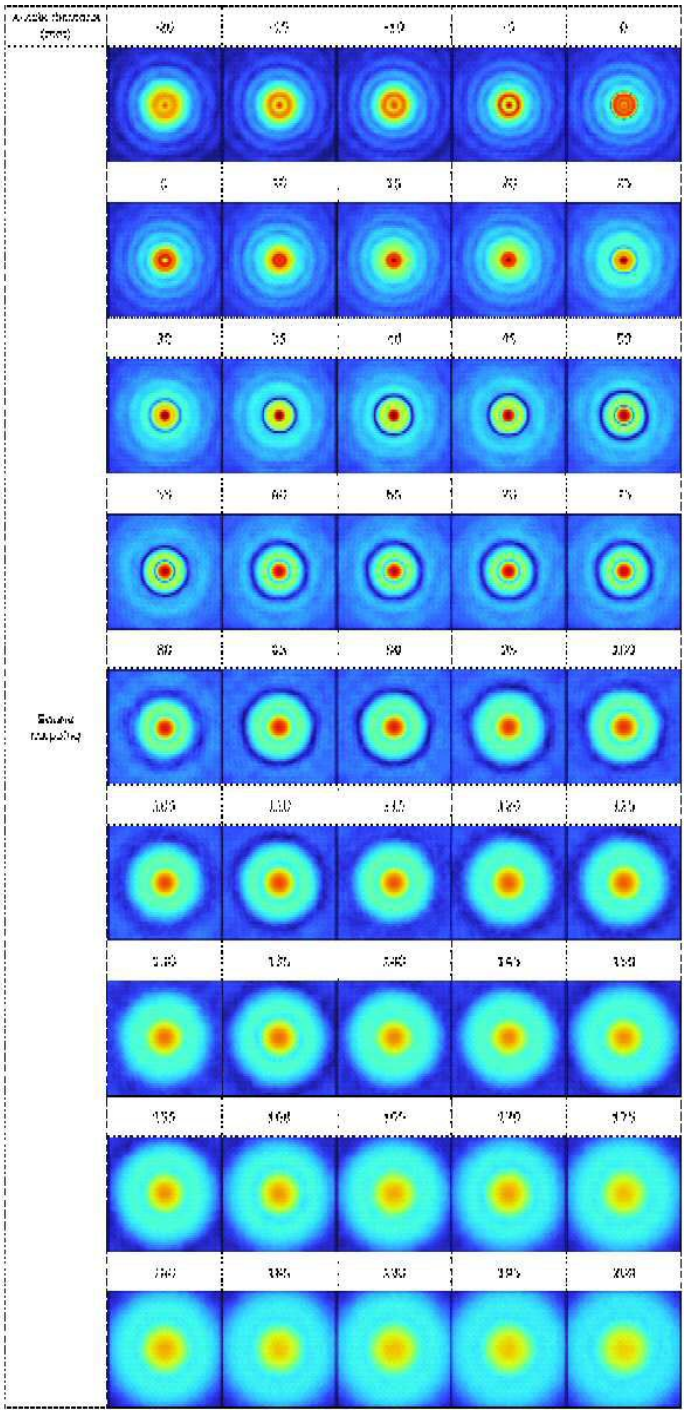
도면36


SPL (dB) 25 75
Device length (mm)
33.7
47.3
57.5
66.0
73.2
Sound mapping
80
70
60
50
40
SPL (dB)
0
5
10
15
20
Z-axis distance (cm)
33.7 mm
47.3 mm
57.5 mm
66.0 mm
73.2 mm

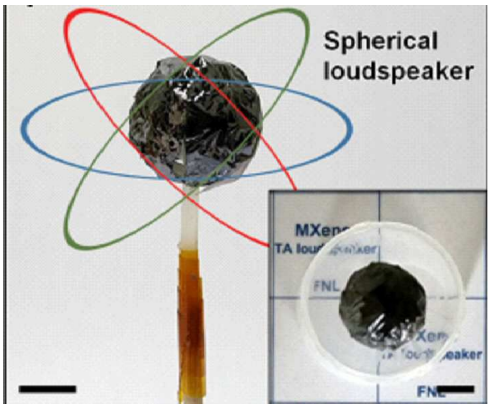
도면37


SPL (dB) 30 75
Frequency (kHz)
10.0
12.5
15.0
17.5
20.0
Sound mapping
85
75
65
55
45
SPL (dB)
0
5
10
15
20
Z-axis distance (cm)
10.0 kHz
12.5 kHz
15.0 kHz
17.5 kHz
20.0 kHz

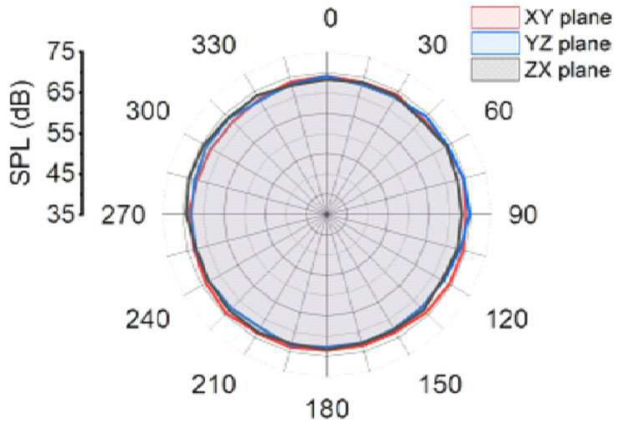
도면38



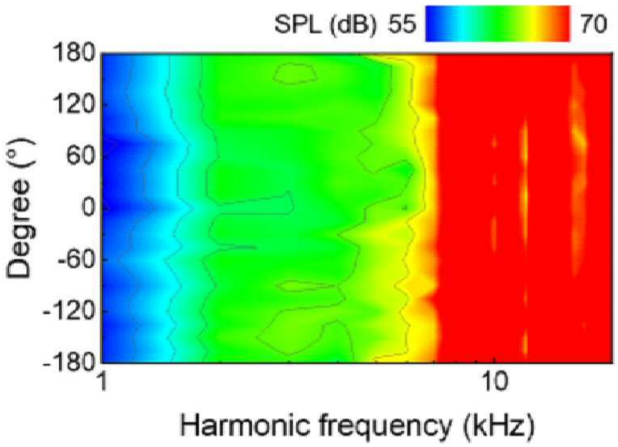
도면39



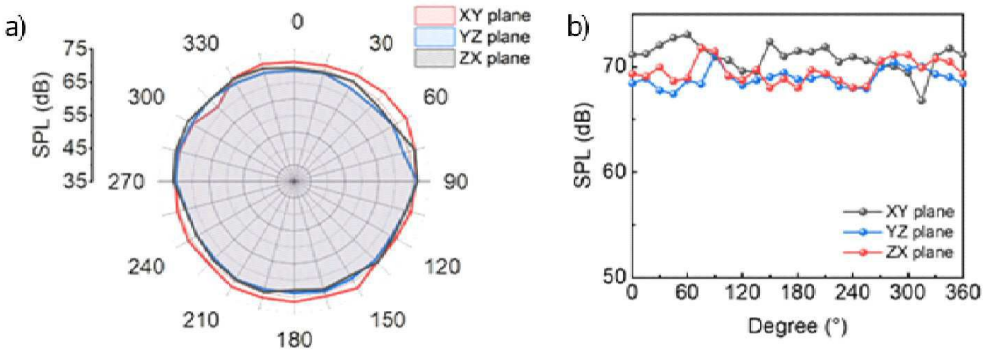
도면40



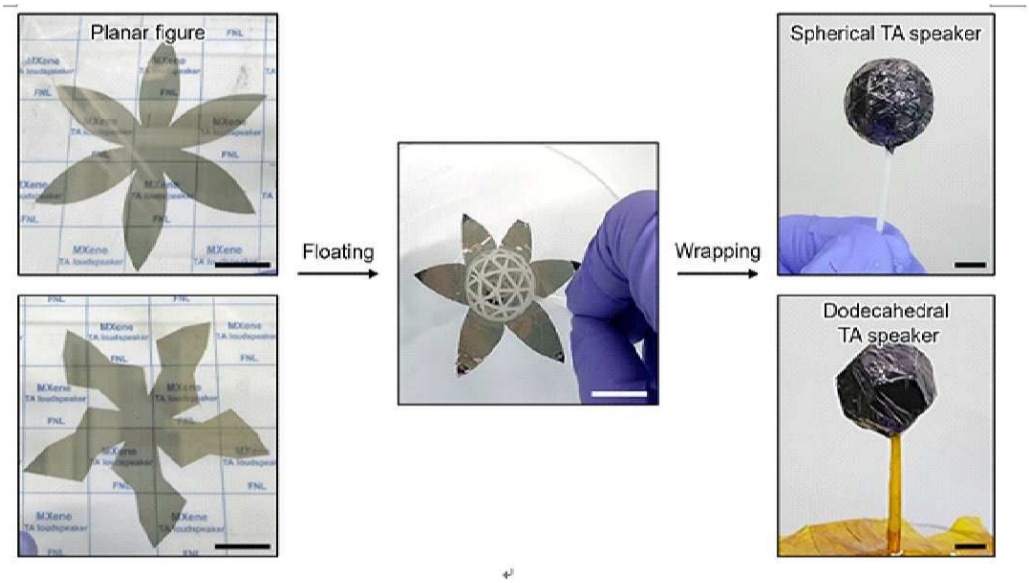
도면41



도면42


a)
0
30
60
90
120
150
180
210
240
270
300
330
75
65
55
45
35
SPL (dB)
XY plane
YZ plane
ZX plane
b)
70
60
50
SPL (dB)
0
60
120
180
240
300
360
Degree (°)
XY plane
YZ plane
ZX plane

도면43


Planar figure
Floating
Wrapping
Spherical TA speaker
Dodecahedral
TA speaker