

“빛으로 소리를 감지해 몸속을 본다”

GIST-고려대,

피부 접촉 없이 선명한 3D 생체 영상 기술 개발

- GIST 전기전자컴퓨터공학과 이병하 교수팀, 고려대 물리학과 최원식 교수와 공동으로 세계 최초 초음파 신호 영상화 및 역전파 기술 개발로 3차원 생체 촬영 성공
- 레이저와 광학 센서만으로 초음파 신호 발생·감지해 접촉 없이 최대 5mm 깊이까지 고해상도 3D 이미지 구현 및 기존 기술보다 10배 빠른 3차원 영상화(1초 이내)
- 뇌혈관·종양 진단부터 반도체·원전 비파괴 검사까지... 국제학술지 《Photoacoustics》 게재



▲ (상단 왼쪽부터 시계 방향으로) GIST 이병하 교수, 고려대 최원식 교수, 고려대 윤태일 박사, GIST 임정묘 연구원, KAIST 고학석 박사, GIST 정의현 교수

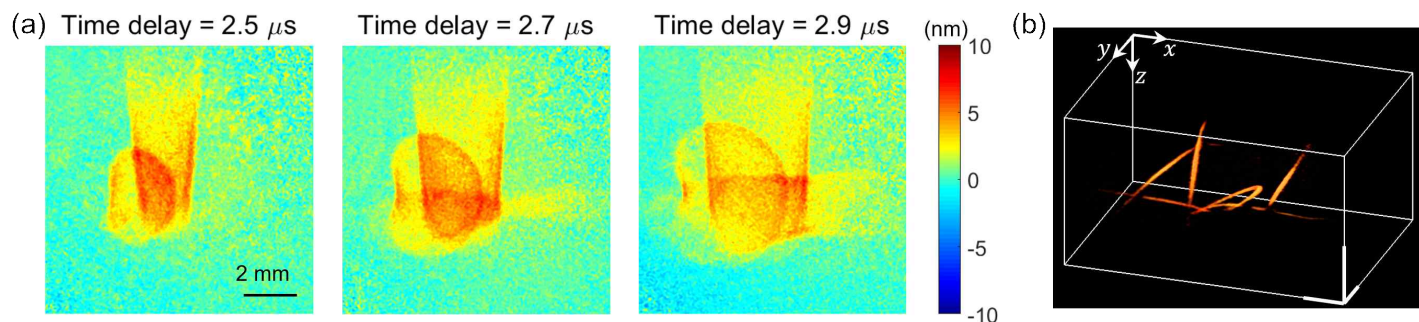
국내 연구진이 레이저와 초음파 원리를 결합해, 피부에 기기를 직접 대지 않고도 생체 내부를 선명한 3차원 영상으로 구현하는 데 세계 최초로 성공했다.

이 기술은 뇌혈관·종양·약물 반응 추적 등 의료 영상 분야는 물론, 반도체·원전 설비 같은 산업 현장의 비파괴 검사에도 폭넓게 활용될 전망이다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 전기전자컴퓨터공학과 이병하 교수팀이 고려대학교 물리학과 최원식 교수와 공동으로, 광학 기반 비접촉식 광음향 단층촬영 (PAT)* 기술을 개발했다고 밝혔다.

이 기술은 초음파 센서를 피부에 밀착할 필요 없이, 생체 조직 내부를 고해상도로 3차원 영상화할 수 있어 기존 한계를 뛰어넘는 의료 영상 진단 분야의 혁신을 이끌 것으로 기대된다.

* **광음향 단층촬영(Photoacoustic Tomography, PAT) 기술:** 짧은 시간의 레이저 빛을 생체 조직에 조사했을 때, 빛을 흡수한 부위에서 발생하는 초음파(광음향파)를 감지해 조직 내부를 3차원 영상으로 재구성하는 기술이다. 이 기법은 빛의 높은 선택성과 초음파의 깊은 투과력을 결합해, 체내 깊은 곳의 구조와 생리적 정보를 동시에 고해상도로 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 종양 탐지, 혈관 영상화, 약물 반응 추적 등 의료 영상 분야에서 주목받고 있으며, 비침습적·정밀 영상 기술로 활용 가능성이 크다.



▲ **‘AOL’ 형상 팬텀에 대한 광음향단층영상.** (a) 시료 표면에서 획득한 광음향 초음파의 파문 영상. 시료 내부에서 발생한 초음파가 시간에 따라 퍼져나가는 양상을 보여줌, (b) 역전파 알고리즘으로 재구성한 대상체의 3차원 영상.

PAT는 짧은 시간 동안 레이저를 조직에 쏘아 그 에너지를 흡수한 조직에서 발생하는 광음향파(초음파)를 감지해 내부 구조를 3D로 재구성하는 기술이다. **빛의 높은 선택성과 초음파의 깊은 침투력을 결합해, 종양 탐지, 혈관 관찰 등 다양한 분야에서 유용하게 활용된다.**

그러나 기존 PAT는 초음파 센서(트랜스듀서*)를 피부에 밀착해 신호를 받아야 했기 때문에 **센서의 크기나 형태에 따라 적용이 제한되고, 감도·해상도가 저하됐다.** 또 **화상 부위나 안구처럼 민감한 부위에는 사용하기 어려웠다.**

* **초음파트랜스듀서(Ultrasound Transducer, UT):** 전기 신호를 초음파로 변환하거나, 반대로 초음파를 전기 신호로 변환하는 장치로, 의료 영상에서 초음파를 송신하고 수신하는 센서 역할을 한다. 일반적으로 산부인과 진단, 심장초음파 등에서 피부에 밀착해 사용하는 탐촉자(프로브)가 이에 해당하며, 광음향 영상 기술에서는 조직에서 발생한 광음향파(초음파)를 감지하는 데 사용된다.

이에 연구팀은 초음파 센서를 전혀 사용하지 않고, **레이저와 광학 센서만으로 초음파 신호를 발생시키고 감지하는 비접촉식 광음향 영상 시스템을 구현했다.**

연구팀은 레이저로 조직에서 광음향파를 발생시킨 뒤, **생체 표면에 퍼지는 미세한 초음파 파문을 디지털 홀로그래피(Digital Holography)*로 감지해 동영상 수준으로 기록하고, 이를 분석해 내부 혈관 구조를 3차원으로 정밀하게 복원했다.**

* **디지털 홀로그래피(Digital Holography):** 빛의 간섭 현상을 디지털 이미지로 기록하고, 이를 컴퓨터로 해석해 물체의 3차원 형상이나 미세한 움직임을 정밀하게 영상화하는 기술이다. 레이저와 같은 코히런트한 빛을 이용해 물체에서 반사된 빛과 기준광 사이의 간섭무늬(홀로그램)를 디지털 카메라로 촬영한 뒤, 이를 수학적으로 복원함으로써 물체의 표면 굴곡, 진동, 변형 등을 나노미터 단위로 정밀 측정할 수 있다. 이번 연구에서는 생체 표면에서 발생한 미세한 초음파 파문을 넓은 영역에서 동시에 감지하기 위해 이 기법을 활용했다.

특히 디지털홀로그래피를 통해 넓은 면을 한 번에 측정함으로써, 기존의 점 단위 스캔 방식보다 훨씬 빠른 영상화가 가능해졌다.

또한 수 나노미터(nm) 단위의 미세한 표면 변위를 감지할 수 있도록 투명하고 부드러운 PDMS 커버층*을 적용했으며, 여러 번 측정된 신호의 '위상(파형의 위치)'을 평균 내어 배경 잡음을 없애고 실제 신호만 또렷하게 살려 감도를 높였다.

* PDMS 커버층: 투명하고 부드러운 폴리디메틸실록산 재질로, 생체 조직 표면에 적용해 불규칙하고 움직이는 표면에서도 정밀한 초음파 신호 측정을 가능하게 한다. 이 층은 빛의 투과를 방해하지 않으면서 표면 잡음을 줄이고 신호 감도를 높이며, 생체 적합성과 유연성 덕분에 측정 정확도 향상과 조직 보호에 기여한다.

하지만 표면에 나타난 파형만으로는 내부 구조를 정확히 파악하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 연구팀은 주파수별 역전파* 방식을 활용해 파문이 시작된 위치로 정보를 되돌려 보내는 새로운 알고리즘을 개발했다.

특히 단일 시트 역전파* 기법을 적용해, 최대 5mm 깊이까지 가로 158마이크로미터(μm), 세로 92 μm 수준의 고해상도 3D 영상을 구현했다. 10×10 mm² 면적의 3차원 영상도 1초 이내에 처리해 기존 대비 10배 이상 빠른 영상화 속도를 달성했다.

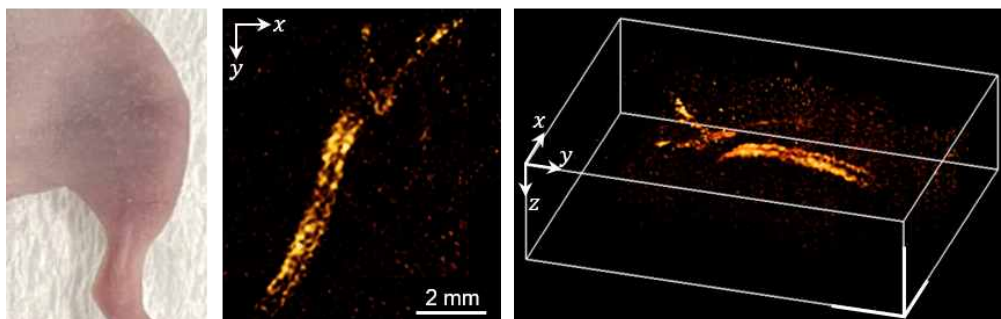
* 역전파(Backpropagation): 시료 표면에서 특정 시간에 측정한 초음파 파문을 그 주파수 별로 거꾸로 전파시켜, 초음파가 최초로 발생한 내부 위치를 추적하고 그 구조를 3차원 영상으로 재구성하는 수학적 기법이다.

* 단일 시트 역전파(single-sheet backpropagation): 시료의 표면에서 측정한 한 장의 2차원 초음파 파면 정보로부터 이를 발생시킨 시료 내 초음파 발생원들의 분포를 3차원 영상으로 재구성하는 고속 역전파 알고리즘이다.

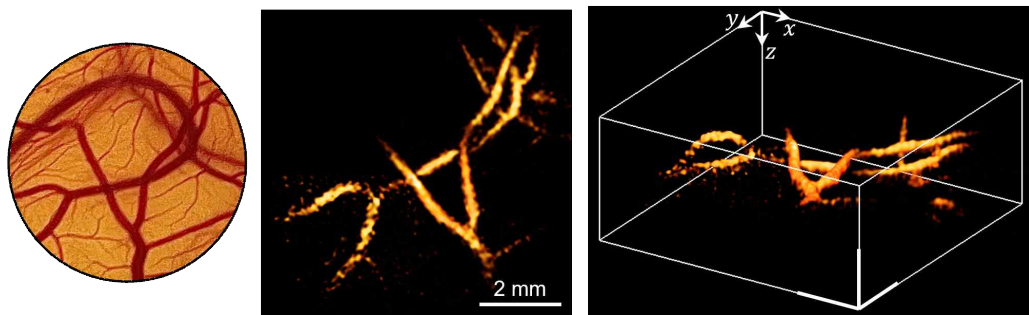
연구팀은 이 기술을 활용해 생쥐의 허벅지 혈관과 닭 배아의 용모막 혈관*을 3D로 선명하게 촬영해 실제 해부 이미지와 비교했으며, 높은 일치도를 확인했다.

특히 지방조직 등 불투명한 층 아래의 혈관도 명확히 식별돼, 심층 혈관 모니터링, 종양 탐지, 약물 반응 추적 등 다양한 의료 영상에 응용 가능성이 크다.

* 생쥐의 허벅지 혈관과 닭 배아의 용모막 혈관(CAM): 생쥐의 대퇴부 혈관은 생체 내에서 실제 혈류가 흐르는 깊은 조직을 정밀하게 관찰할 수 있는 모델이며, CAM 모델은 혈관이 풍부하고 얇은 층에 위치해 영상화 성능의 지표인 해상도와 감도 검증에 적합해, 두 모델을 병행함으로써 기술의 정확성과 범용성을 동시에 입증했다.



▲ 쥐 허벅다리에 대한 광음향단층영상. (왼쪽) 허벅다리 사진, (가운데) 상단에서 본 재구성 영상, (오른쪽) 재구성한 3차원 영상. 혈관의 분포를 보여줌.



▲ 닭 배아에 대한 광음향단층영상. (왼쪽) 배아 사진, (가운데) 상단에서 본 재구성 영상, (오른쪽) 재구성한 3차원 영상. 혈관의 분포를 보여줌.

GIST 이병하 교수는 “이번 연구로 생체에 접촉할 필요 없이 빛만으로 생체 내부에서 발생한 초음파 신호를 넓은 영역에 걸쳐 빠르게 측정할 수 있는 기술을 세계 최초로 구현했다”며, “뇌혈관 질환 진단, 종양 진단 등 의료 영상은 물론, 반도체 웨이퍼나 원자력 설비 등 산업 전반의 비파괴 검사에도 폭넓게 활용될 수 있을 것”이라고 밝혔다.

고려대학교 최원식 교수는 “새로운 역전파 알고리즘과 다층 음향 보정 기술로 해상도와 속도 측면에서 기존 광음향 영상의 한계를 뛰어넘었다”며, “고정밀·고속·비침습 3D 영상이 필요한 다양한 분야에서 새로운 패러다임을 열 수 있을 것”이라고 강조했다.

GIST 전기전자컴퓨터공학과 이병하 교수의 지도 아래 윤태일 박사과정생이 주도하고, 고헌석 박사(KAIST), 임정묘 연구원(GIST), 정의현 교수(GIST), 최원식 교수(고려대) 등이 참여한 이번 연구는 산업통상자원부 및 과학기술정보통신부·한국연구재단의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지《포토어쿠스틱스(Photoacoustics)》에 2025년 7월 25일 온라인으로 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Photoacoustics

(IF: 6.8, Medical Imaging 분야 상위 5.4% (12 / 212), 2024년 기준)

- 논문명 : All-optical in vivo photoacoustic tomography by adaptive multilayer acoustic backpropagation

- 저자 정보 : 윤태일 박사*(제1저자, GIST-고려대학교), 고학석 박사(공동저자, KAIST), 임정묘 연구원(공동저자, GIST), 정의현 교수(공동저자, GIST), 최원식 교수(교신저자, 고려대), 이병하 교수(교신저자, GIST)
- * 본 연구는 윤태일 박사가 GIST 박사학위과정 동안 주도적으로 수행하였으며, 윤 박사는 2024년 GIST에서 박사학위 취득 후, 현재 고려대학교 박사후연구원으로 재직 중임.