

# 딥러닝 기반의 3차원 광음향 영상 공간/시간 해상도 향상

최성욱<sup>1\*</sup>, Jinge Yang<sup>1</sup>, 이수영<sup>1</sup>, 김지웅<sup>1</sup>, 이승철<sup>1</sup>, 김철홍<sup>1</sup>  
포항공과대학교 전자전기공학과, IT융합공학과, 기계공학과

## Deep Learning-based Improvement of Spatial/Temporal Resolution in 3D Photoacoustic Computed Tomography

Seongwook Choi<sup>1\*</sup>, Jinge Yang<sup>1</sup>, Soo Young Lee<sup>1</sup>, Jiwoong Kim<sup>1</sup>, Seungchul Lee<sup>1</sup>, Chulhong Kim<sup>1</sup>

Department of Electrical Engineering, Convergence IT Engineering, Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Korea

\*swchoi715@postech.ac.kr

### Abstract

Photoacoustic computed tomography (PACT) taking advantage of optical imaging and ultrasound imaging has become a powerful biomedical imaging modality. PACT is advancing toward 3D imaging with a multi-element hemispherical array transducer. The greater element counts of the transducer make the image quality enhanced, but it imposes a burden on the hardware requirements and can eventually decrease the temporal resolution when it uses multiplexers. Here, we present the deep learning-based solution to increase both spatial and temporal resolution simultaneously. Our approach improved the limited-view aperture and spatial resolution by approximately three and two times, respectively. Further, it implemented molecular imaging through ICG clearance monitoring, and temporal resolution was improved by four times. It also confirmed the capability of functional imaging by calculating the oxygen saturation ratio with remarkable performance. It is the first study that deep learning has been utilized for molecular and functional imaging in 3D PACT. We believe that our strategy can contribute to the 3D PACT being able to observe biodynamics with high spatial and temporal resolution without being affected by hardware requirements.

### 1. 연구 배경

생체 영상 기법은 생체 내 복잡한 생물학적 시스템에 대한 포괄적인 정보를 제공할 수 있습니다. 특히, 광음향 컴퓨터 단층촬영 (PACT)은 광학 및 초음파 영상 기술의 장점을 동시에 활용하여 전임상 및 임상 연구에서 뛰어난 영상 기법으로 주목받고 있습니다. 이 하이브리드 영상 방식은 흡수된 빛 에너지를 음파로 변환하는 광음향 (PA) 효과를 이용하여 광학 흡수 대비를 영상화합니다. 이러한 기본 원리를 바탕으로 PACT는 생체 내 동물과 인간에 대한 구조적, 기능적, 분자적 정보를 제공합니다.

PA 파동은 표적에서 전방향으로 전파하기 때문에, 표적 주변의 PA 신호의 동시 구형 수집은 한계시야 (limited view)를 넓히는 PACT의 우수한 이미지 품질을 위한 이상적인 방법입니다 [1]. 이를 위해 반구형 초음파 트랜스듀서가 제안되어 오고있으며, 이 경우는 실시간 3D PACT 영상을 가능하게 합니다. 즉, 반구형 초음파 트랜스듀서는 PACT에 있어서 가장 최적화된 트랜스듀서라고 할 수 있습니다. 반구형 초음파 트랜스듀서 역시, 큰 조리개와 많은 수의 센서가 영상의 품질을 더욱 향상시키지만, 영상 속도 측면에서는 병목을 발생시킵니다. 충분한 채널 수의 데이터 수집장치 (DAQ)로 이 문제를 해결할 수 있지만, 이 경우 시스템의 비용이 상당히 높아집니다.

본 연구에서는 위에서 언급한 3D PACT의 문제를 해결하기 위하여, 딥러닝을 통한 솔루션을 제안합니다. 딥러닝은 현재까지 이미지 아티팩트 제거, 공간 해상도 향상, 데이터 처리량 감소 등 PACT의 다양한 문제를 해결하는 강력한 도구로 사용되고 있습니다. 다만, 현재까지의 PACT에 적용된 딥러닝 연구 사례들은 구조적 이미지 품질 및 2D PACT 영상 품질에 중점을 두었다는 한계가 있습니다. 저희는 이번 연구를 통해 처음으로 3차원 인공지능

신경망을 3D PACT에 적용하여 구조적 정보만이 아닌, 기능적, 분자적 영상 정보를 제공하였습니다.

저희는 먼저 딥러닝 전략을 기반으로 한계시야를 극복하여 소동물의 고품질 3D 전신 PACT 영상을 획득할 수 있음을 보여줍니다. 이어, 딥러닝을 통해 향상된 시간적 해상도로 ICG의 약동학 (pharmacokinetics)을 동적으로 추적할 수 있음을 확인합니다. 마지막으로 다중 스펙트럼을 사용하여 살아있는 소동물의 옥시 (oxy-) 및 데옥시-헤모글로빈 (deoxy-hemoglobin)의 농도, 산소포화도와 같은 기능적 파라미터를 딥러닝 프레임워크가 제공할 수 있음을 확인하였습니다. 본 그룹은 이러한 새로운 PACT 딥러닝 전략이 신경학, 심장학, 약리학, 내분비학 및 종양학을 포함한 다양한 전임상 및 임상 응용 분야에서 PACT의 광범위한 활용에 크게 기여할 수 있다고 믿습니다.

### 2. 연구 방법

본 그룹이 개발한 딥러닝 3D PACT 시스템은 1024개 소자의 반구형 초음파 트랜스듀서를 사용합니다. 광원으로는 690-1064 nm의 근적외선 스펙트럼과 20 Hz의 펄스 반복 속도를 가지는 OPO laser를 사용합니다. OPO laser 빔은 트랜스듀서의 구멍으로 통하여 전달되며, 표적은 전신 스캐닝을 위하여 3축 모터 스테이지에 배치됩니다 (그림 1a-b). 발생한 PA 신호는 트랜스듀서로 수집되고, 256개 채널의 DAQ와 4:1 다중화 보드 (MUX board)로 디지털화됩니다. 이때 MUX board를 사용하여 1024개의 소자를 모두 활용한 이미징 모드를 Full 뷰라고 명명하며, MUX board를 사용하지 않고 256개의 소자만을 활용한 이미징 모드를 Cluster 뷰라고 명명합니다 (그림 1c). Full 뷰는 5 Hz의 영상을 할 수 있지만 좋은 영상을 제공하고, Cluster 뷰는 Full 뷰에 비하여 흐릿한 영상을 제공하지만 20 Hz의 영상을 제공합니다.

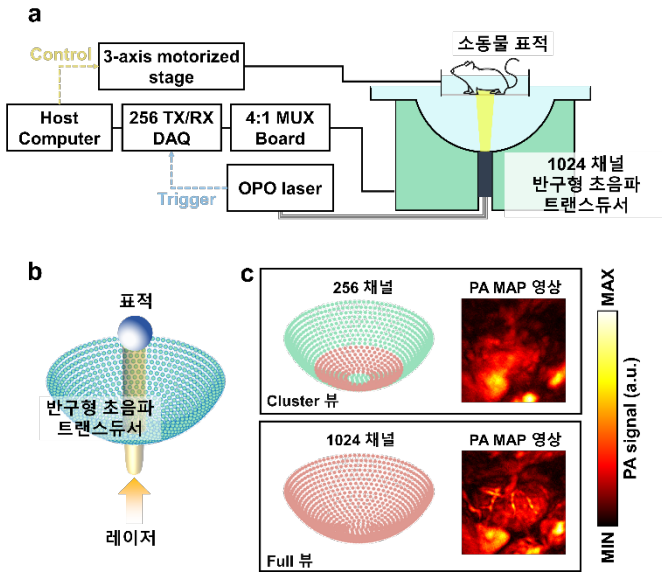


그림 1. (a) 소동물 전신 PACT 시스템 모식도. (b) 반구형 초음파 트랜스듀서 모식도. (c) 256 채널과 1024 채널 비교.

우리는 20 Hz의 영상 속도로 Full 뷰의 영상 품질을 얻기 위하여, Cluster 뷰 영상을 Full 뷰 영상과 딥러닝 학습시켜, 공간 해상도와 시간 해상도를 모두 향상시키고자 합니다. 딥러닝의 성능을 높이기 위하여, 그림 2와 같은 인공지능망을 구성하였습니다. 우리는 쥐에서 얻은 3D 영상 데이터를 사용하여, 그림 2의 인공지능망을 사전 훈련시켰습니다.

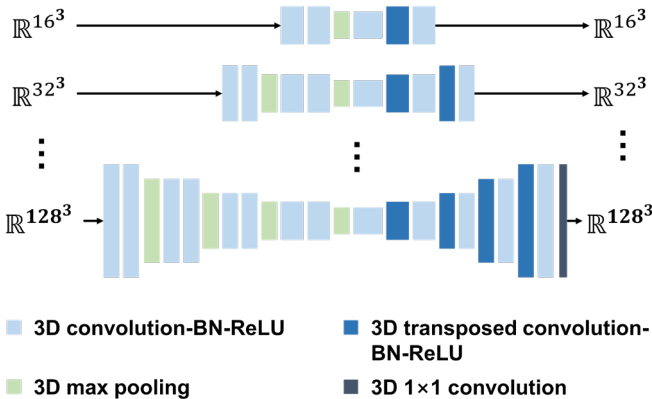


그림 3. 딥러닝 인공지능망 모식도

### 3. 연구 결과

먼저, 우리의 프레임워크의 이미징 기능을 확인하기 위하여 쥐의 전신 PA 영상을 획득하였습니다. 그림 3a는 복부 쪽에서 얻은 Full 뷰 영상을 보여줍니다. 심장, 간, 소장, 대장 등의 주요 장기들을 잘 보여주고 있음을 확인할 수 있고, 각종 혈관 구조도 확인됨을 알 수 있습니다. 이 Full 뷰 영상을 ground truth로 사용하고, 이 데이터를 서브샘플링한 데이터인 Cluster 뷰 PA 영상이 그림 3b입니다. 그림 3a와 b의 영상 품질 차이를 확인할 수 있습니다. 이 Cluster 뷰 영상을 저희가 사전에 학습시킨 인공지능 신경망에 입력하여 그림 3c와 같은 결과를 얻었습니다. 딥러닝 결과는 이미지 품질을 크게 향상시켜, Full 뷰 영상과 매우 유사하게 주요 장기 및 혈관을 복원시켰습니다.

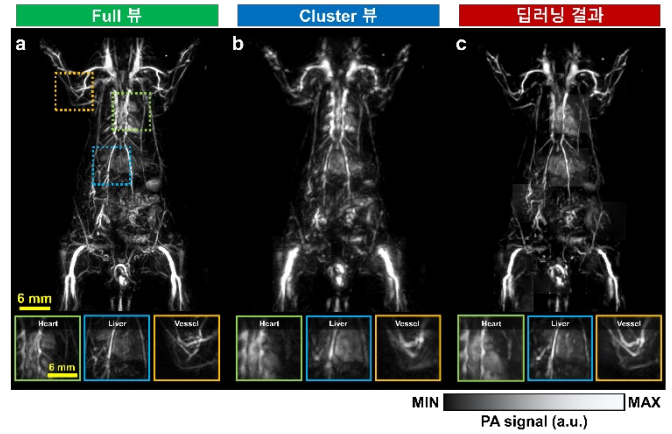


그림 4. (a) Full 뷰, (b) Cluster 뷰, (c) 딥러닝 결과의 쥐 전신 PA 최대강도투사 영상 및 주요 장기

이러 학습된 인공지능망이 생체 내의 동적 변화를 잘 복원할 수 있는지를 확인하였습니다. 본 그룹은 Indocyanine green (ICG)를 쥐에 주입하면서 혈관의 PA 신호 변화를 감지하였습니다. 그림 4는 쥐 뇌 혈관의 PA 최대강도투사를 Full 뷰, Cluster 뷰, 그리고 딥러닝 결과를 보여줍니다. 실제로 시간에 따른 PA 신호 세기의 변화를 측정하였을 때, 딥러닝 결과가 Full 뷰에 가깝도록 신호를 복원하는 것을 확인할 수 있었습니다.

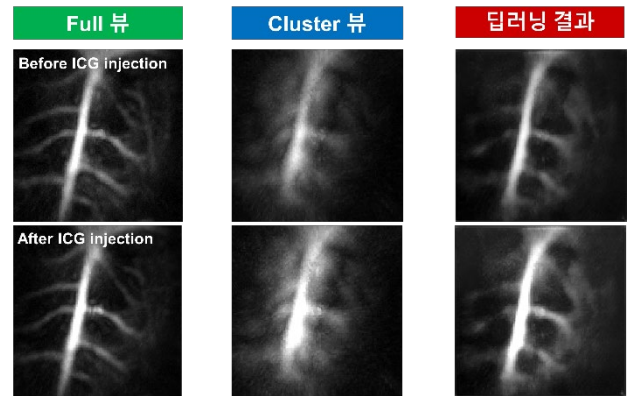


그림 2. Full 뷰, Cluster 뷰, 딥러닝 결과의 ICG 주입에 따른 쥐 뇌의 PA 최대강도투사 영상

이와 같이 본 그룹은 개발한 프레임 워크를 통하여, 공간 해상도와 시간 해상도 모두 향상시킨 3차원 PACT 영상을 얻을 수 있음을 확인하였습니다.

### 4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation (NRF) of Korea 과제 (2019R1A2C2006269, 2021M3C1C3097619, 2021M3C1C3097624, 2019H1A2A1076500, 2020R1A6A1A03047902, 2019-0-01906), Korea Medical Device Development Fund 과제 (9991007019, KMDF\_PR\_20200901\_0008), Artificial Intelligence Graduate School Program (POSTECH), and by the BK21 FOUR project의 지원을 받아 수행하였음.

### 5.참고 문헌

[1] J. Yang, S. Choi, and C. Kim. " Practical review on photoacoustic computed tomography using curved ultrasound array transducer." *Biomedical Engineering Letters*, p.1-17, 2021