

# 경두개 집속 초음파 시뮬레이션 초해상도 트랜스포머에 관한 연구

신민우<sup>1</sup>, 서민지<sup>1</sup>, 유승식<sup>2</sup>, 신원용<sup>1</sup>, 윤경호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교, <sup>2</sup>하버드대학교

[mshin@yonsei.ac.kr](mailto:mshin@yonsei.ac.kr), [islandz@yonsei.ac.kr](mailto:islandz@yonsei.ac.kr), [yoo@bwh.harvard.edu](mailto:yoo@bwh.harvard.edu), [wy.shin@yonsei.ac.kr](mailto:wy.shin@yonsei.ac.kr),

[\\*yoonkh@yonsei.ac.kr](mailto:*yoonkh@yonsei.ac.kr)

## A Study on the super-resolution Transformer for simulation of transcranial focused ultrasound propagation

Minwoo Shin<sup>1</sup>, Minjee Seo<sup>1</sup>, Seung-Schik Yoo<sup>2</sup>, Won-Yong Shin<sup>1</sup>, Kyungho Yoon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Yonsei Univ., <sup>2</sup>Harvard Univ.

### 요약

본 논문은 경두개 집속 초음파(tFUS) 시뮬레이션에 초해상도 트랜스포머 머신러닝 기술을 접목하여 보다 더 효율적으로 경두개 집속 초음파 치료를 할 수 있도록 도와줄 수 있는 최신의 기술에 대한 연구를 다루고 있다. 경두개 집속 초음파는 공간 정밀도와 뇌의 깊은 영역에 도달할 수 있는 능력을 갖춘 비침습적 뇌 자극(NIBS) 방법이다. 성공적인 tFUS 절차를 위해서는 뇌의 원하는 부분에 초음파 초점을 배치하는 것이 중요하지만, 초음파의 전파는 두개골의 영향을 받아 초점 위치, 모양 및 압력이 왜곡된다. 고해상도 (HR) 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 두개골 내 음압장을 모니터링할 수 있지만 컴퓨터를 이용한 계산 시간이 크다는 단점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 우리는 4x Swin Transformer 방법을 사용하여 원하는 부위의 뇌 영역을 대상으로 tFUS 음압장 추정의 정밀도를 향상시켰다. 트레이닝 데이터 셋은 인간 두개골 10 개에 대한 생체내 CT 이미지에서 추출된 초해상도 (2.0 mm) 및 고해상도 (0.5 mm)의 시뮬레이션을 통해 얻었다. 음압장, 파동 속도 및 두개골 CT 이미지의 물리적 특성을 포함하는 다변수 데이터 셋을 사용하여 3 차원 SR 모델을 트레이닝 시켰다. 이 방법으로 트레이닝 시 사용된 두개골 데이터에서 초점 적합성 측면에서 약 91%의 정확도를 얻었고, 트레이닝에 사용되지 않은 새로운 환자의 두개골 데이터에 대해서는 약 87%의 정확도를 얻었다. 이는 기존의 0.5 mm HR 컴퓨터 시뮬레이션에 비해 계산 효율성이 99% 정도 크게 향상되었음을 보여준다. 이 기술로 특정 뇌 표적에 관여하도록 초음파 집속 트랜스듀서의 방향과 위치를 설정하여 tFUS 치료의 안전성과 효과를 크게 향상시킬 수 있다.

### I. 서론

경두개 집속 초음파(tFUS)는 정신 질환 및 신경학적 장애 치료를 위한 비침습적 뇌 자극 (NIBS) 기술로 최근 주목받고 있는 치료법이다 [1]. tFUS 는 두개골을 통해 특정 뇌 영역에 초음파 에너지를 집중시켜 신경 조직의 흥분도를 조절하지만 두개골의 복잡한 구조는 초음파 전파를 왜곡하고 감소시켜 두개내 초음파장 분포의 정확한 예측을 어렵게 한다. 시간이 지남에 따라 초음파 파동이 두개골, 뇌 조직과 어떻게 상호 작용하는지 이해하고 tFUS 프로토콜을 최적화하는 데 수치 시뮬레이션은 필수적이 되었다. 이러한 시뮬레이션은 단순화된 모델에서 현실적인 해부학적 및 이질적인 조직 특성을 포함하는 더 정교한 모델로 발전했다. tFUS 시뮬레이션의 단점은 고해상도의 공간 및 시간 해상도가 필요하기 때문에 발생하는 높은 연산 시간이며, 이는 운영자에게 피드백을 지연시킨다. 초해상도 신경망 (SRNN)은 저해상도 이미지를 고해상도로 변환하여 시뮬레이션의 속도와 정확도를 향상시키는 데 사용될 수 있다. 최근, tFUS 시뮬레이션에서 두개내 초음파 압력장의 예측을 개선하기 위해 다변수 초해상도 네트워크(SE-SRResNet)를 제안되었다 [2]. 전보다 더욱 높은 정확성과 실시간의 예측을 위해, 우리는 tFUS 시뮬레이션을 위한 물리 기반 다중 채널 Transformer 모델을 개발했다. 이 모델은 local self-attention

메커니즘을 사용하며, Transformer 성능을 향상시키기 위한 다중 채널 임베딩을 포함한다. 이 연구로 우리는 Transformer 를 활용한 고성능의 실시간 경두개 집속 초음파 초점 예측을 가능케 하였다.

### II. 본론

본논문에서는 비선형 초음파 전파를 모델링하기 위해 Westervelt 방정식 [3] 이 사용되었다. 이 방정식은 초음파압력, 음속, 시간, 초음파 확산성, 비선형 계수, 매체 밀도를 고려한다. 이 방정식을 직접 풀기보다는 초음파 입자 속도, 주변 밀도, 초음파 압력, 초음파 밀도, 열역학적 음속, 입자 변위 벡터를 포함하는 연결된 방정식 체계를 사용했다. 이러한 시간 영역 파동 방정식을 이질적 매체에서 정확하게 풀기 위해서는 높은 공간 및 시간 해상도가 필요하며, 이로 인해 상당한 계산 시간을 필요로 한다. 열 한 명의 건강한 자원자들의 두개골 CT 이미지가 수집되었으며, 이 중 열 명의 두개골은 네트워크 트레이닝 및 테스트에 사용되고 다른 한 명의 두개골은 트레이닝 시 전혀 보지 못한 두개골 데이터로 또 다른 테스트에 사용되었다. 이 데이터들은 두개골, 뇌 및 초음파 트랜스듀서의 정보를 포함하며, 저해상도 (LR) 요구 사항에 맞게 크기가 조정된다. Hounsfield 단위에 기반한 분할 과정은 다양한 조직 유형을 분류하며, 각 유형에 대한 초음파 속도, 밀도 및

감쇠 계수는 설정된 매개변수를 사용하여 모델링 된다. 연결된 초음파 방정식을 시뮬레이션하기 위해 k-space pseudospectral 방법 [4,5] 이 사용되었으며, Courant-FriedrichsLewy(CFL) 안정성 조건을 충족하면서 계산 효율성을 보장하였다. 시뮬레이션은 또한 새로운 초음파 듀랜스듀서 배치 알고리즘을 포함한다. 이 알고리즘은 뇌 영역에서 표면 노드로의 벡터와 노드의 외부 법선 벡터 사이의 각도를 고려하여 초음파 트랜스듀서의 최적 위치와 방향을 결정한다. 이 각도를 기반으로 초음파 트랜스듀서의 위치가 설정되어 현실적인 운영을 할 수 있도록 하였다. tFUS 시뮬레이션의 효과를 평가하기 위해 다양한 실험 및 기존 초고해상도 방법과의 비교가 수행되었으며, 여기에는 다양한 네트워크 레이어 깊이, 두께를 수량 및 손실 함수가 고려되었다.

### III. 결론

본 논문에서는 경두개 집속 초음파(tFUS) 치료를 위해 개발된 머신러닝 모델인 tFUSFormer 를 소개하였다. 이 모델은 tFUS 치료에 필수적인 두께내 압력장 시뮬레이션의 정밀도와 계산 속도를 크게 향상시킨다. 트레이닝 시 사용되었던 환자의 데이터와 이전에 전혀 보지 못한 환자의 데이터 두 가지 조건 하에서 각각 90.89% 및 86.82%의 높은 정확도를 달성하였고 (표 1), 초음파의 초점 예측에서 전통적인 고해상도 (HR) 시간은 99.4% 감소했다 (표 2). 트레이닝 시 접하지 못한 새로운 환자의 두께내 CT 데이터로 테스트 시 정확도가 약간 감소(4-5%)하지만, 여전히 약 87%의 높은 정확도를 보여준다. tFUSFormer 의 성능을 다양한 초해상도 방법들을 비교하였을 때 다른 어떠한 방법들보다도 훨씬 높은 IoU score 를 나타내었다 (그림 1). 이러한 결과는 모델의 우수성과 새로운 환자 CT 데이터에 적용시킬 수 있다는 가능성을 보여준다. tFUSFormer 의 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 방법 중 한가지는 네트워크 트레이닝 시 더 많은 두께내 CT 데이터를 사용하는 것이다. 많은 의료 데이터의 확보에는 여러 제약이 있어 어려움이 있지만, 다양한 환자의 두께내 CT 데이터를 확보하는 것으로 모델의 정확도를 더욱 더 향상시킬 수 있을 것이다. 이러한 어려움 없이 다양한 데이터셋을 생성하기 위해 GAN(Generative Adversarial Network) 기반 CT 이미지 생성 기술 [6] 을 사용할 수 있으며, 이는 많은 수의 실제 인간 두께내 데이터를 얻는데 겪게 될 문제를 극복할 수 있게 해 줄 것이다. 또한, 여러 다양한 실험의 결과로 네트워크 깊이의 최적화가 모델 안정성 유지에 중요한 것으로 밝혀졌다. 이 연구의 경우에 5 개 레이어의 깊이가 가장 효과적인 것으로 확인되었으며, 깊이를 6 레이어 또는 7 레이어로 늘리면 성능의 저하가 발생하며, 이는 back propagation 시 gradient vanishing 또는 exploding 과 관련된 문제로 인한 것으로 보인다. 마지막으로, 이 네트워크 모델은 두께내 압력장을 빠르고 정확하게 예측할 수 있어 tFUS 치료 중 실시간 모니터링을 가능하게 할 것이다.

### ACKNOWLEDGMENT

The work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (No. RS-2023-00220762).

표 1. 여러 초해상도 방법 성능 비교. (training dataset: HS1-HS10, test dataset: foreseen (HS1-HS10) and unforeseen (HS11)).

networks	IoU (%)	mean $D$ (mm)
unforeseen test		
interp.(trilinear)	67.15 $\pm$ 6.63	3.15
FSRCNN	76.73 $\pm$ 6.90	2.70
SE-SRResNet	77.58 $\pm$ 6.70	2.55
SRGAN	79.88 $\pm$ 7.15	2.75
1ch-tFUSFormer	84.61 $\pm$ 6.12	2.01
5ch-tFUSFormer	86.82 $\pm$ 5.67	1.94
foreseen test		
1ch-tFUSFormer	89.43 $\pm$ 5.08	2.03
5ch-tFUSFormer	90.89 $\pm$ 4.10	1.91

표 2. tFUSFormer 의 연산 시간.

LR (s)	Inference (s)		HR (s)	Saving (%)
	SR	LR+SR		
2.2107	0.0124	2.2231	370.7983	99.40

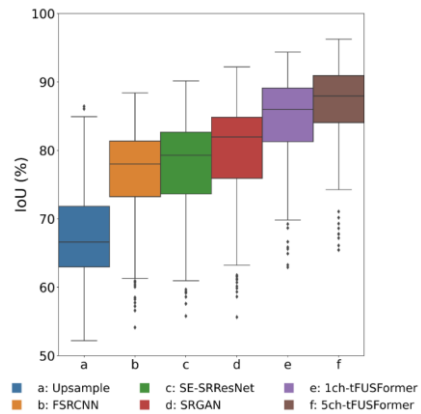


그림 1: 여러 초해상도 방법들의 IoU scores 비교.

### 참고 문헌

- [1] T. Deffieux, Y. Younan, N. Wattiez, M. Tanter, P. Pouget, J.F. Aubry. "Low-intensity focused ultrasound modulates monkey visuomotor behavior", *Curr. Biol.* pp. 2430-2433, Dec. 2013.
- [2] M. Shin, Z. Peng, H.-J. Kim, S.-S. Yoo, K. Yoon, "Multivariable-incorporating super-resolution residual network for transcranial focused ultrasound simulation", *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 237, 107591, 2023.
- [3] P. J. Westervelt, "Scattering of sound by sound", *J. Acoust. Soc. Am.*, pp. 199- 203, 1957.
- [4] N. N. Bojarski, "The k-space formulation of the scattering problem in the time domain: An improved single propagator formulation", *J. Acoust. Soc. Am.*, pp. 826- 831, Mar. 1985.
- [5] B.E. Treeby, B.T. Cox. "k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields", *J. Biomed. Opt.*, 15(2):021314, Mar. 2010.
- [6] H. Koh, T. Y. Park, Y. A. Chung, J. -H. Lee and H. Kim, "Acoustic Simulation for Transcranial Focused Ultrasound Using GAN-Based Synthetic CT," in *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, vol. 26, no. 1, pp. 161-171, Jan. 2022