

다중물리 시뮬레이션 기반 광열 효과를 활용한 고민감도 혈류 변화 감지 방식의 검증

조민성, 최우석, 김한준
국립금오공과대학교

20236166@kumoh.ac.kr, cws98110@kumoh.ac.kr, hanjoonk@kumoh.ac.kr

Validation of a Highly Sensitive Blood Flow Change Detection Method Utilizing Photothermal Effects Based on Multiphysics Simulation

Minseong Cho, Woo Seok Choi, and Han-Joon Kim
Kumoh National Institute of Technology

요약

본 논문에서는 3D 다중 물리 시뮬레이션을 사용하여 전도와 방사로 열을 전달하는 광원과 전도만으로 열을 전달하는 저항성 열원을 사용한 혈류 감지 방식을 평가하여 광원이 열전달 방식의 혈류 감지에 더 적합함을 보인다. 3D 시뮬레이션 모델은 기존에 본 연구그룹에서 제안한 2D 시뮬레이션 모델보다 현실에 가까운 결과를 제시함으로 실제 장비 설계에서 고려해야 하는 부분들을 보여줄 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통하여 우리는 기존의 2D 시뮬레이션에서 간과한 문제들을 확인하고, 제안한 광열 센서가 기존의 저항성 열원을 사용한 센서보다 혈류 속도의 변화로 인한 온도 변화를 약 50 배 더 민감하게 감지할 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

혈류 측정은 건강 관리를 위한 핵심 지표로, 심혈관계 질환, 당뇨병성 합병증, 등과 같은 만성질환의 진단 및 관리를 위한 모니터링에 필수적이다[1]. 대표적인 혈류 측정 방법인 카테터 삽입법은 정확한 값을 제공할 수 있지만, 침습적이어서 자주 모니터링하기에는 부적합한 방법이며[2], 병원에서 주로 사용하는 도플러 초음파는 사용자의 숙련도, 측정 각도, 장비 설정에 따라 결과가 크게 달라지기 때문에 비전문가가 사용하기에는 어려움이 있다[3]. 만성 질환의 관리를 위해서는 가정에서 비전문가도 쉽게 사용할 수 있는 웨어러블 혈류 측정 기술이 요구된다[4]. 열전달 방식의 혈류 측정 기법은 비침습적이고 장비를 소형화하기에 유리하기 때문에 최근 많은 관심을 받고 있다[5]. 하지만, 열전달을 전도에만 의존하는 기존의 방식은 혈류 속도가 높아짐에 따라 혈류 속도에 따른 온도 변화가 작아지면서 빠른 혈류를 감지하기 어렵다. 본 연구팀은 기존 연구에서 광원을 사용한 열전달 방식이 저항성 열원을 사용할 때보다 혈류 감지에 효과적임을 확인하였다[6]. 하지만, 기존 연구의 2D 시뮬레이션 모델은 기하학적 구조와 실제 열 전달 경로를 충분히 반영하지 못하기 때문에, 현실에 가까운 정확하고 정밀한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 3D 열전달 시뮬레이션 모델을 사용하여 혈류속도에 따른 광원과 열원으로 인한 혈류량에 따른 온도 변화를 민감도로 정의하여 정량적으로 비교한다(그림 1).

II. 본론

열원과 광원의 열전달 성능을 비교하기 위해 설계된 고체 및 유체의 열전달을 동시에 고려할 수 있는

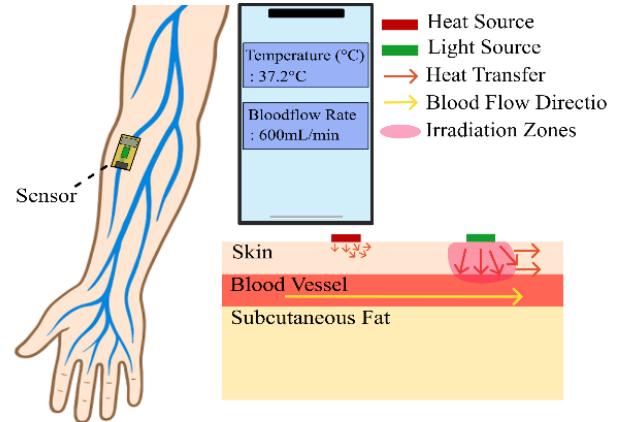


그림 1 열원 및 광원을 이용한 열전달 혈류 모니터링 시스템 비교

유한요소법(Finite element method)기반의 다중 물리 시뮬레이션을 위한 3D 생체 조직 모델은 그림 2a 와 같다. 모델의 크기는 $150 \times 80 \text{ mm}^2$ 이고, 10 mm 두께의 피하지방층, 2 mm 두께의 피부 층, 피부 표면으로부터 깊이 3 mm 위치에 3 mm 두께의 혈관을 배치하였다. 피부 표면에서 자연대류로 인한 열 교환은 경계조건으로 대류 열전달 계수 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 를 적용하여 고려하였고[6], 다른 경계는 단열로 경계조건을 설정하였다. 혈관 내 혈류속도는 인간의 동맥과 정맥의 속도 범위인 $1 - 100 \text{ cm/s}$ 에서 진행하였다[7]. 그림 2a 는 열원 또는 광원이 없는 경우로 혈관이 없는 피부 표면은 대류로 인해 냉각되지만, 혈관 위에서는 혈류로 인해 초기 온도인 36.5°C 로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 2D 모델에서는 혈관 주변의 온도를 알 수 없기에 표면에서의 온도가 모두 동일하다고 여겼지만, 실제로는

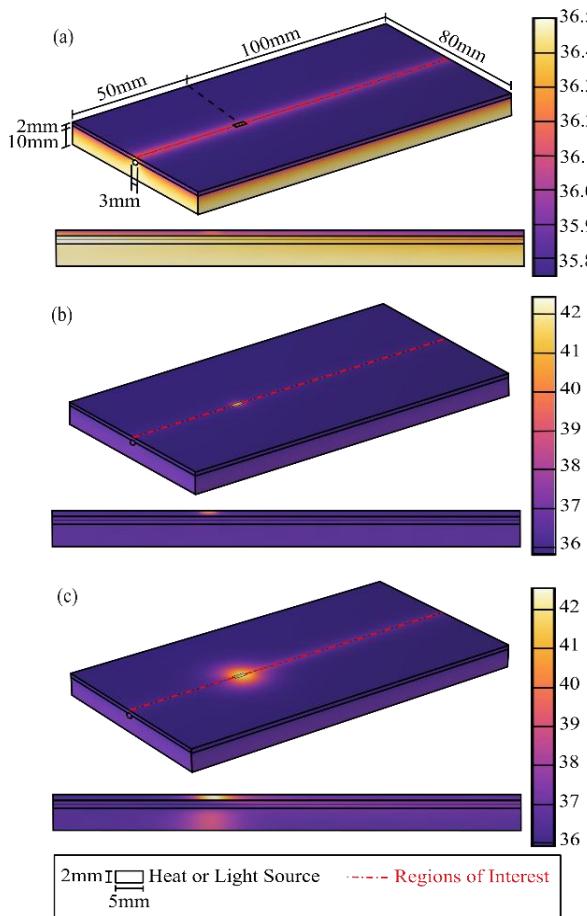


그림 2. 3D 생체조직모델의 온도 분포 (a) 초기 상태, (b) 열원을 적용한 경우, (c) 광원을 적용한 경우

혈관 위와 혈관 주변 피부의 온도는 차이가 있고 3D 시뮬레이션에서는 이러한 상황이 반영되었다. 그림 2b 는 열원을 적용한 시뮬레이션의 결과로 피부 표면에서 전도로 인한 열전달만 관찰된다. 그림 2c 는 광원을 적용한 경우, 열원의 경우와는 달리 전도 뿐만 아니라 방사로 인한 열전달이 복합적으로 작용하여 혈관을 넘어 피부 깊은 지점까지 열을 전달할 수 있음을 시뮬레이션 결과로 확인할 수 있다. 공평한 비교를 위하여 열원과 광원으로 인한 피부의 최대 온도를 약 42°C로 동일하게 설정하고 그림 2의 Regions of Interest에서의 혈류 속도 별 피부 및 혈관 위의 온도 변화를 확인하였다(그림 3). 피부 표면에서 열원은 혈류 속도 변화에 따른 온도 차이가 거의 없으나(그림 3a), 광원의 경우에는 혈류 속도에 따른 온도 차이가 큰 것을 확인할 수 있다(그림 3b). 그림 3c 와 3d 는 혈관 위에서 혈류 속도에 따른 온도 변화의 그래프로 열원은 열 전달 침투 깊이가 크지 않아서 혈관위에서의 온도 변화가 크지 않지만, 광원은 혈관에 빛의 방사로 직접 열을 전달할 수 있기 때문에 혈류 속도의 변화에 따라 온도 변화가 변화를 감지하기에 충분히 큰 것을 확인할 수 있다. 정량적인 비교를 위한 피부 표면에서의 혈류 속도에 따른 온도 변화의 민감도는 다음 수식 1로 정의할 수 있다[4]. 민감도는 광원: 157.96, 열원 3.228로 광원을 사용할 때 약 50 배 민감도가 향상되었음을 알 수 있다.

$$\text{민감도} = \frac{\Delta T_{1 \text{ cm/s}} - \Delta T_{100 \text{ cm/s}}}{\Delta T_{100 \text{ cm/s}}} \quad (1)$$

III. 결론

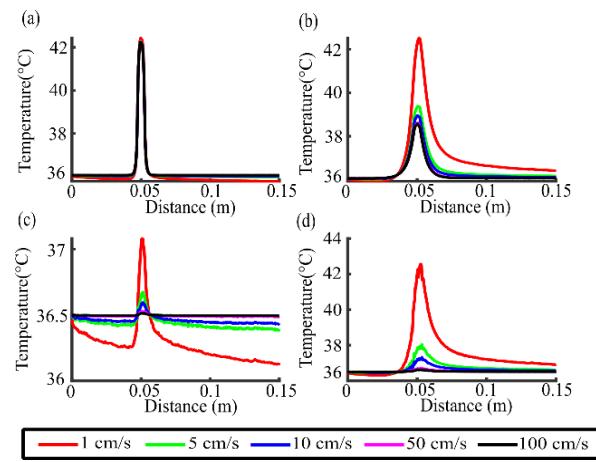


그림 3 Regions of Interest에서 피부 표면 온도 (a) 열원 (b) 광원, 혈관 위에서의 온도 (c) 열원 (d) 광원

본 연구는 기존의 열원 기반의 혈류 측정 방식과 제안한 광원 기반의 혈류 측정 방식의 혈류 속도에 따른 온도 변화 민감도를 3D 다중 물리 시뮬레이션을 이용하여 비교 검증하였다. 시뮬레이션 결과, 광원을 사용한 경우 피부 아래 혈관까지 효과적으로 열을 전달하기 때문에 광원의 경우 혈류 속도로인한 열전달이 더 크게 반영되어 혈류 속도에 대한 온도 변화의 민감도가 약 50 배 향상됨을 확인할 수 있었다. 따라서 광열 효과를 활용한 센서가 혈류 변화를 민감하게 감지해야 하는 웨어러블 장비에 더 적합할 수 있음을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2023-00214390, RS-2024-00415347)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] H. S. Kim, B. -N. Yoo, E. W. Lee, "Evaluation of the national chronic diseases management policy: performance and future directions," *Public Health Aff.*, vol. 2, no. 1, pp. 105-120, Dec. 2018.
- [2] S. Stephan, et al., "Catheter-based arterial input function determination for myocardial perfusion measurements," *Zeitschrift für Medizinische Physik*, vol. 31, no. 1, pp. 65 - 72, Feb. 2021.
- [3] F. Wang, et al. "Flexible Doppler ultrasound device for the monitoring of blood flow velocity." *Sci. Adv.*, vol. 7, no. 44, p. eabi9283, Oct. 2021.
- [4] Y. Deng, et al. "A soft thermal sensor for the continuous assessment of flow in vascular access," *Nat. Commun.*, vol. 16, no. 38, Jan. 2025.
- [5] R. C. Webb, et al. "Epidermal devices for noninvasive, precise, and continuous mapping of macrovascular and microvascular blood flow," *Sci. Adv.*, vol. 1, no. 9, p. e1500701, Oct. 2015.
- [6] 조민성, et al. "열전달 방식의 혈류모니터링 민감도 개선: 광원과 열원의 비교," *J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 401-411, 2025.
- [7] COMSOLAB. "COMSOL Multiphysics v. 6.3, Heat Transfer Module User's Guide", Stockholm, Sweden, 2024.