

3차원 가상심장모델을 활용한 심자도 패턴 분석

임옥빈* · 심은보* · 김기웅** · 이용호** · 박용기**

Computational analysis of the magnetocardiogram pattern using a three-dimensional virtual heart model

U. B. Im* · E. B. Shim* · K. Kim** · Y. H. Lee** · Y. G. Park**

1. 서론

본 연구에서는 심근세포에 대한 3차원 심실모델을 사용하여 허혈 발생 시에 전위전파 패턴과 이에 따라 발생하는 자기장 맵의 패턴에 대해 논의한다. 심실 허혈은 회귀성 파동과 심실 세동(ventricular fibrillation)을 유발하여 심장정지에 의한 돌연사에 이르게 되는 원인으로 지목되고 있다. 최근 심자도(Magnetocardiograph; MCG)가 관상동맥질환 등으로 인한 심근 허혈의 조기 진단에 매우 유용한 것으로 보고되고 있다. 하지만, 심자도에서 심근 허혈을 판단하기 위한 임상 파라미터의 개발은 여전히 진행 중이고, 최적의 파라미터 개발을 위해서는 회귀성 파동이 발생시키는 자기장의 형태에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 3차원 심실조직에서의 활동전위 전도현상에 대한 결과와 자기장 맵의 패턴을 제시한다.

2. 본론

2.1 수치해석 방법

조직 모델은 인체 심실세포의 TN모델을 사용하였다.⁽¹⁾ 그러나 이 모델에는 세포의 수축은 포함되지 않는다. TN모델은 빠른 나트륨 전류, L-형 칼슘 전류, 과도외향전류등 주요 이온 전류 대부분에 대한 최근의 실험 데이터에 기반을 두고 있다. 칼슘 버퍼링을 제외한 본 연구에서의 모든 기전들은 TN모델과 같다. 세포막 전위 V_m 은

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{I_{ion} + I_{stim}}{C_m} + D_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (1)$$

로 기술될 수 있으며, 여기서 t 는 시간, C_m 은 단위 표면적당 세포막의 capacitance이다. 심실조직은 등방성이며 확산계수(diffusion coefficient)는 $D=0.0017$

$Cm^2 / msec$ 로 주었다. 여기에서 I_{stim} 은 외부에서 가한 자극 전류를 나타내고, I_{ion} 은 세포막 사이의 이온전류의 합으로서 채널 형태에 따라서 달라지며 이온 전류들 및 관련된 상수들에 대한 정보는 TN 모델의 논문에 나와 있다. 자기장 패턴 $z < 0$ 인 공간에서 전기전도도가 균일한 층으로 구성된 horizontally layered conductor 모델에서는 도체내의 위치 r_0 에 있는 쌍극자 전류원 $Q(r_0)$ 에 의해 도체 외부의 r 에서 측정되는 자장 신호 B 는 아래와 같이 계산된다. (3)

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi K^2} (Q \times a \cdot e_z \nabla K - K e_z \times Q) \quad (2)$$

2.2 계산 결과 및 검토

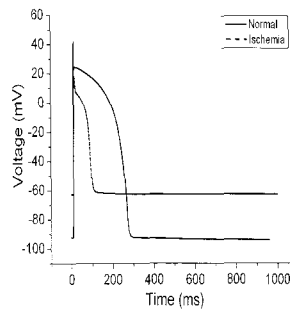


Fig. 1 정상세포와 허혈세포의 활동전위(AP)

세포모델에서 계산된 활동전위의 변화가 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 한 번 탈분극시 전위는 최고치에 도달한 후 어느 정도 고원(plateau) 값 유지한 후 재분극이 일어나면서 원래의 초기 상태로 돌아간다. 허혈은 Increased extracellular potassium concentration, Acidosis, Anoxia를 모두 합하여 계산하였다. (2) 허혈시의 활동전위는 휴지기 상태의 전위 크기가 작고 활동전위기간(Action potential duration)이 짧게 나타난다.

* 강원대학교, 기계메카트로닉스 공학부

** 한국표준과학연구원, 생체신호계측센터

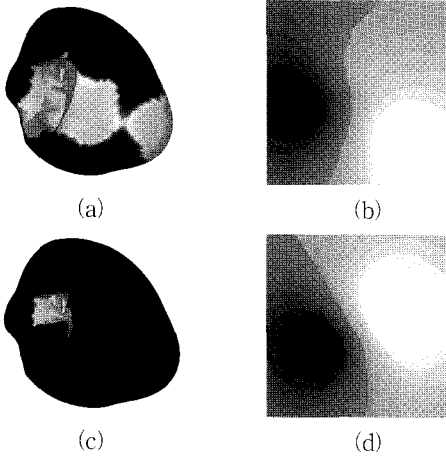


Fig. 2 초기 전위전파와 자기장패턴

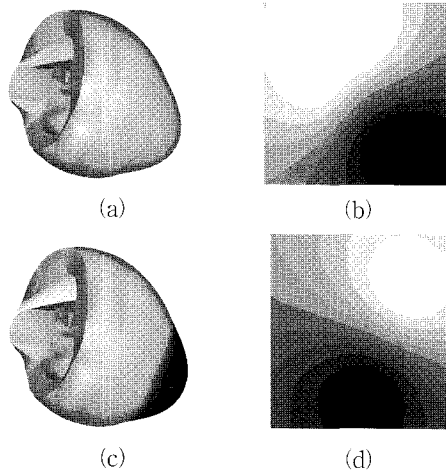


Fig. 3 전체 탈분극 시 전위전파와 자기장 패턴

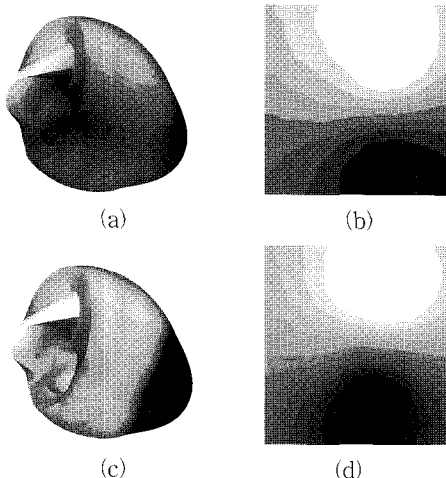


Fig. 4 재분극 시 전위전파와 자기장 패턴

세포 모델에 의해 계산된 전류의 흐름을 입력하여 3차원 등방성 심실조직모델에서 파동패턴을 계산하였다. 심실조직은 X축 -5~5 cm, Y축 -5~5 cm, Z축 -4~-10 cm에 위치해 있다. 자기장 센서는 X, Y축 모두 -10~10 cm인 정사각형이며 Z축의 위치는 +3 cm에 존재한다. 심실조직의 전위에서 검정색은 휴지기 흰색은 탈분극 상태를 나타낸다. 자기장 패턴의 경우 흰색은 양의 값을 가지며 검은색은 음의 값을 가진다. Fig. 2는 60 ms일 때 계산되었으며, (a)와 (b)는 정상심실조직의 전위전파와 자기장 패턴이고 (c)와 (d)는 허혈 조직의 전위전파와 자기장 패턴이다. (c)의 짙은 회색이 허혈조직이다. (b)와 (d)를 비교하면 전위전파의 속도 차에 의한 자기장패턴에 큰 변화가 있음을 볼 수 있다. Fig. 3은 200 ms일 때 심실조직 전체가 탈분극 되었음을 보여준다. (c)를 보면 허혈 조직부분은 휴지기 상태가 되어있다. 이는 허혈 세포의 활동전위기간이 정상세포보다 짧아서 재분극이 먼저 일어났기 때문이다. 자기장 패턴을 보면 전류의 방향에 큰 차이를 보인다. Fig. 4는 재분극(320 ms)이 일어날 때의 전위전파를 나타내었다. 허혈 조직이 있을 시에 전위 전파 속도가 느려져 정상조직보다 재분극 속도가 느린 것을 볼 수 있다. 자기장 패턴의 경우 전류방향에 미묘한 차이를 보이며 자기장 크기 분포가 크게 다를 수 있다.

3. 결론

인간 심근세포의 생리학 모델인 TN모델을 기반으로 하여 조직모델을 개발하였다. 3차원 심실조직모델을 풀기위해서 유한요소법을 사용하였으며 조직에서의 전위전파를 재현하였다. 정상세포와 허혈세포의 AP를 계산하였다. 이는 기존의 세포모델계산결과와 잘 일치하였고 이를 이용하여 가상심실조직에서의 전위 전파를 재현하였다. 정상심실조직과 허혈이 존재하는 심실조직의 전위전파와 그에 따른 자기장 패턴을 비교하였다. 향후 심방조직을 결합한 가상심장의 자기장 패턴을 연구할 것이다.

참고 문헌

- (1) Ten Tusscher KH, Noble D, Noble Pj, Panfilov Av. "A model for human ventricular tissue." Am J Physiol Heart Circ Physiol. 2003 DEC; 4 286:H1573-H1589
- (2) Robin M. Shaw, Yoram Rudy. "Electrophysiologic effects of acute myocardial ischemia: a theoretical study of altered cell excitability and action potential duration." Cardiovascular Research. 1997, vol 35, pp. 256-272.
- (3) Jukka Savas, "Basic mathematical and electromagnetic concepts of the biomagnetic inverse problem", Phys. Med. Biol., 1987, Vol 32, pp. 11-22.