

# 인간 심근세포 모델을 활용한 심실조직의 2차원 회귀성 파동 해석 및 심자도 패턴 분석

임옥빈\* · 심은보\* · 김기웅\*\* · 이용호\*\*

Computational analysis of the re-entry wave propagation and the magnetocardiogram pattern in a two-dimensional cardiac tissue model

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

## 1. 서 론

본 연구에서는 심외박측 심근세포에 대한 2차원 모델을 사용하여 회귀성 파동(re-entrant wave) 해석과 회귀성 파동이 발생시키는 자기장 맵의 패턴에 대해 논의한다. 심실 허혈로부터 비롯한 회귀성 파동은 심실 세동(ventricular fibrillation)을 유발하여 심장 정지에 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 심실의 2차원 등방성 심근조직에서의 활동전위 전도현상에 대한 결과와 자기장 맵의 패턴을 제시한다.

## 2. 본 론

### 2.1 수치해석 방법

조직 모델은 인체 심실세포의 TN모델을 사용하였다.<sup>(1)</sup> 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

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

로 기술될 수 있으며, 여기서  $t$ 는 시간,  $C_m$ 은 단위 표면적당 세포막의 capacitance이다. 우리는 2D에서 비등방성 효과를 목적으로 하지 않기 때문에 확산계수(diffusion coefficient)는  $D_x = D_y = D = 0.0017 \text{ Cm}^2 / \text{msec}$ 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 논문에서 나와 있다. 자기장 패턴  $z < 0$ 인 공간에서 전기전도도가 균일한 층으로 구성된 horizontally layered conductor 모델에서는 도체내의 위치  $r_0$ 에 있는 쌍극자 전류원  $(Qr_0)$ 에 의해 도체 외부의  $r$ 에서 측정되는 자장 신호  $B$ 는 아래와 같이 계산된다.<sup>(3)</sup>

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

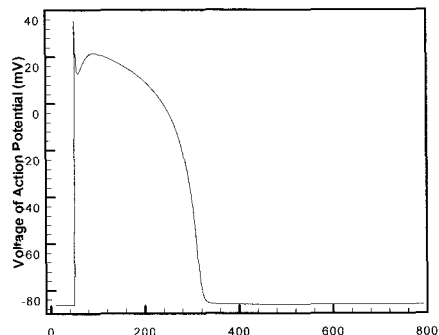


Fig 1. 한 주기 동안의 활동전위(AP)

\* 강원대학교, 기계메카트로닉스 공학부

\*\* 한국표준과학연구원, 생체자기계측센터

## 2.2 계산 결과 및 검토

우선 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

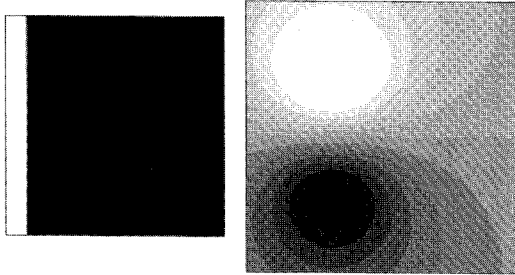


Fig 2. 초기 전위의 파동 패턴과 MCG 패턴

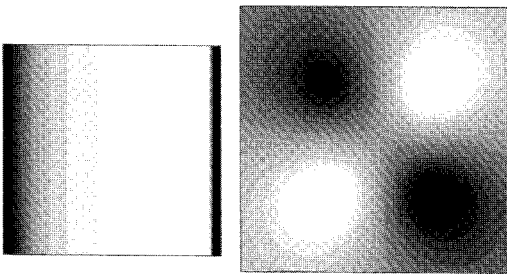


Fig 3. 재분극 발생 시의 파동 패턴과 MCG 패턴

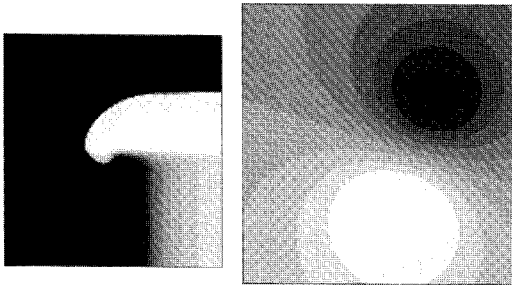


Fig 4. 회귀성 파동 패턴의 시작과 MCG 패턴

돌아간 세포 모델에 의해 계산된 전류의 흐름을 입력하여 2차원 등방성 조직모델에서의 회귀성 파동을 유도한다. 이때 2차원 조직에서의 회귀성 파동을 유도하기 위하여 S1-S2 protocol을 사용한다<sup>(2)</sup>. Fig. 2는 초기 왼쪽 측면에 자극 전위를 가하였을 때 발생하는 심근세포의 탈분극과 이에 해당하는 심자도(MCG) 패턴이다. MCG 패턴의 검은색은 음의 자기장 현상은

Fig 5. 나선형 회귀성 파동 패턴과 MCG 패턴

양의 자기장을 나타낸다. Fig. 3은 처음 탈분극(+)이 일어났던 부분부터 재분극(-)이 일어나는 과정을 보여 준다. 또한, 해당 MCG 패턴 역시 위치와 방향이 상반된 두 개의 전류쌍극자로 인해 전류 4극자를 형성하므로 Magnetic field map pattern도 quadruple한 양상을 보인다. 탈분극이 절반 이상 진행되면 상단의 절반을 임의적으로 재분극 상태로 만들었다. 그 결과 재분극된 곳으로 전류가 전파되기 시작되면서 회귀성 파동이 유도된다. 그 전류의 방향이 일정치 않게 되면서 회전하는 MCG 패턴에 불규칙한 양상을 더하였다(Fig. 4). 회귀성 파동은 점점 재분극된 부분으로 점차 전류가 전파되면서 파동 패턴이 나선형을 그리고, 그에 따른 MCG 패턴을 나타내었다(Fig 5). 이때의 회귀성 파동이 재분극이 일어난 심실주위로 전파되면서 심실의 세동을 유발시킨다.

## 3. 결론

인간 심근세포의 생리학 모델인 TN모델을 기반으로 한 조직모델을 2차원적으로 개발하였다. 2차원 조직모델을 풀기위해서 유한요소법을 사용하였으며 조직에서의 회귀성 파동을 재현하였다. 회귀성 파동은 나선형을 그리며 심실 세포를 다시 탈분극 시키고 그 결과 전류 방향이 일정치 않게 된다. 그에 따른 심자도(MCG) 패턴의 변화를 볼 수 있었다. 심실 세동시 회귀성 파동이 나타나는 것은 회귀성 파동이 심실 세동의 원인이었다는 것과 심자도(MCG) 패턴을 통해 실제 심장에서 회귀성 파동의 유무를 알기 위하여 향후 3차원적 세포모델을 통한 회귀성 파동의 패턴, MCG 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) Henriquez, C. S., 1993, "Simulating the electrical behavior of cardiac tissue using the bidomain model", Crit Rev Biomed Eng, Vol. 21, pp. 1~77.
- (3) Jukka Savas, "Basic mathematical and electromagnetic concepts of the biomagnetic inverse problem", Phys. Med. Biol., 1987, Vol 32, pp. 11-22.