

# 3차원 심근조직에서의 회귀성 파동에 대한 수치적 해석

심은보\*, 김현영\*, 임채현\*\*

## 1. 서론

Panfilov<sup>(1)</sup>는 3차원 조직에서의 동물세포 기반 회귀성 파동에 대한 이론적 연구를 수행한 바 있다. 그리고 동물의 실제심실 형상에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 연구가 Winslow 등<sup>(2)</sup>에 의해서 진행된 바 있다. 그러나 아직도 심실조직에서의 다양한 회귀성 파동 메커니즘 및 관련 현상에 대한 이론적 연구는 매우 부족한 실정이다. 또한 심장조직의 경우, 두께를 가진 3차원적 형상을 지니고 있으며 층을 따라서 전기생리학적으로 상이한 특성을 가진 세포들로 구성된다. 즉 심근은 층을 가로질러 Epi-cardiac, mid-cardiac, endo-cardiac cell들로 구성되며 각기 다른 APD(action potential duration)을 가지고 있다. 특히 mid-cardiac cell에서의 긴 APD는 심장부정맥 생성기전에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 다양한 이론적 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 3차원 심근조직에서의 활동전위 전도현상에 대한 결과를 제시한다. 먼저 심근의 전기생리학적 현상을 근사하기 위하여 Ten Tusscher 등<sup>(3)</sup>에 의하여 제시된 바 있는 인체 심근세포 모델을 구현한다. 아울러 심실조직층을 근사하기 위하여 3가지 형태의 심실세포(epi-cardiac, endo-cardiac, mid-cardiac cells)가 층간에 존재하는 것으로 가정하였다. 3차원 조직모델을 구현하기 위하여 단순화된 Bidomain방법<sup>(4)</sup>을 사용하였다. 이때 3차원 공간상에서 심근세포에 의한 활동전위 전달현상을 해석하기 위하여 유한요소법을 사용한다.

## 2. 수치 해석 방법

심장조직에서의 활동전위의 전도현상에 대한 지배방정식은 simplified bidomain방법을 사용하였으며, 이것은 다음과 같은 reaction-diffusion 방정식으로 표시된다.

$$C_m \frac{\partial V_m}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla V_m) - (I_{ion} + I_{stim}) \quad (1)$$

여기서 t는 시간, C<sub>m</sub>은 단위 표면적당 capacitance를 의미한다. 또 I<sub>stim</sub>은 외부에서 가한 자극 전류를

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

\*\* 울산대 의대, 생리학교실

나타내고, I<sub>ion</sub>은 세포막의 이온전류의 합으로서 TN 모델을 통하여 구한다. 위의 식에 대하여 유한요소 이산화를 위한 Galekin방법을 적용하면, 격자점에서의 활동전위 값을 변수로 하는 연립방정식이 나오며, 이것을 풀어서 각 시간에서의 해를 구한다.

## 3. 계산결과 및 검토

본 연구에서 사용된 심근세포 모델의 개략도는 다음 Fig. 1과 같다. 그리고 여기에서 구해진 epi-cardiac 및 mid-cardiac 세포에서 활동전위의 시간적 변화는 Fig. 2와 같으며, APD의 차이가 존재한다.

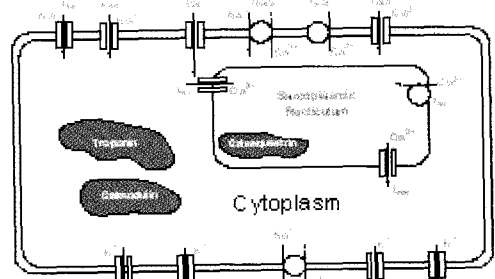
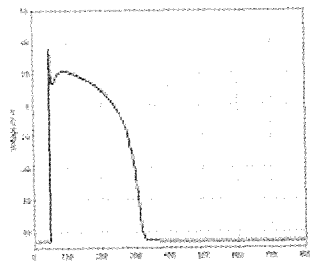
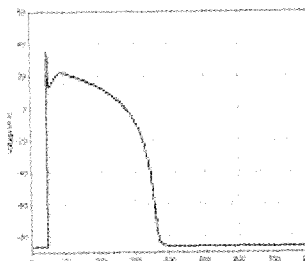


Fig. 1 본 연구에서 사용된 세포모델의 개략도



(a) action potential of epi-cardiac cell



(b) action potential of mid-cardiac cell

Fig. 2. Action potential variations

조직모델과 관련하여 본 연구에서 사용한 3차원 모델의 형상이 다음 Fig. 3에 나타나 있다. 우선 조직의 층(z축 방향)은 3가지로 나누어지는데, 제일 아래에 Endocardial cell, 중간에는 Midcardial cell, 그리고 제일 상층부에는 Epicardial cell을 1/3씩 배치하였다. 그리고 x, y방향은 각각 12cm를 z방향으로는 4cm 크기의 3차원 조직을 상정하였다. 이를 simplified bidomain방법으로 해석하기 위하여 격자로 나누게 되는데, 여기에서는 x, y방향은 각각 100개, 두께방향(z방향) 40개의 유한요소를 고려하였다.

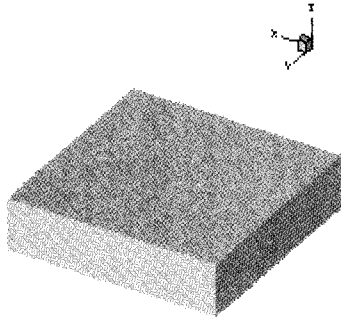


Fig. 3. 3D model of a cardiac tissue.

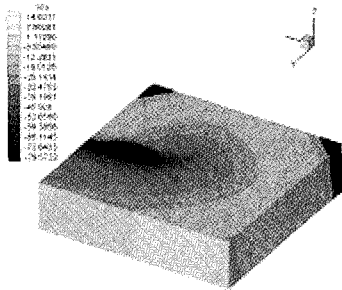


Fig. 4 Generation of a reentry wave in isotropic cardiac tissue.

이 연구에서는 회귀성과동을 유도하기 위하여 s1-s2 protocol을 사용하였으며, 그 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 조직의 중심이 파동의 중심부를 이루고 있으며, 시간에 회귀성과동이 계속적으로 재생성된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3차원 심근조직에서의 회귀성과동에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 심근세포에서는 최근에 발표된 바 있는 인체심근세포기반 모델을 사용하였다. 조직에서의 3차원 전기전도를 설명하기 위하여 bidomain방법에 기반한 유한요소법을 도입하여 시간과 공간에 관한 활동전위 분포 상태를 구하였다.

#### 참고 문헌

- (1) A.V. Panfilov, A.V. Holden: Computer simulation of re-entry sources in myocardium in two and three dimensions. *J Theor Biol.* 1993;161:271-285.
- (2) R..L. Winslow, D.F. Scollan, A. Holmes, C.K. Yung, J. Zhang, M.S. Jafri: Electrophysiological modeling of cardiac ventricular function: from cell to organ. *Annu Rev Biomed Eng* 2, 2000, 119-155.
- (3) K.H. Ten Tusscher, D. Noble, P.J. Noble, A.V. Panfilov: A model for human ventricular tissue. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2003 Dec 4.