

# 심장 부정맥 시 vortex breakup 현상에 대한 수치적 연구

심은보\*, 권순성\*\*, 최승윤\*\*

## Computational analysis of vortex breakup in arrhythmias

Eun Bo Shim\*, Soon Sung Kwon\*\* and Seung Yoon Choi\*\*

**Key Words** : Arrhythmias (심장부정맥), Vortex breakup, Computational analysis (수치적 연구)

### Abstract

In this study, we present the computational analysis of cardiac arrhythmias that is the major cause of human sudden cardiac death. First, electric excitation and conduction in one dimensional cardiac tissue model is solved and the results on conduction block are represented. In two dimensional model, vortex dynamics in cardiac tissue is analyzed to delineate the breakup phenomenon inducing ventricular fibrillation. We also simulated a three dimensional heart model to see the vortex breakup and explained the mechanism in physiological aspect.

### 1. 서론

부정맥이란 심장박동의 리듬이 비정상적인 것을 지칭하며, 너무 느리거나 (서맥: Bradycardia), 너무 빠르거나 (빈맥: Tachycardia) 혹은 불규칙적인 증상을 모두 포함한다. 심장은 혈액을 박출하는 펌프로서의 역할을 하며, 이것은 심장을 구성하는 근육세포들의 수축작용 때문에 일어난다. 심장근육을 구성하는 심근세포에서 세포막의 이온통로 활성화로 인하여 전기적 흥분이 발생하면 세포질 내 칼슘의 농도가 높아지고, 이것은 세포 내부의 수축기계들을 작동시켜 심장의 역학적 수축을 일으킨다. 이때 심근세포들은 거의 동시에 흥분하고 거의 동시에 수축하는 동시성(synchronization)을 가지고 있으며, 이것이 심실에 채워진 혈액을 박출하는 근본적인 원동력이 된다.

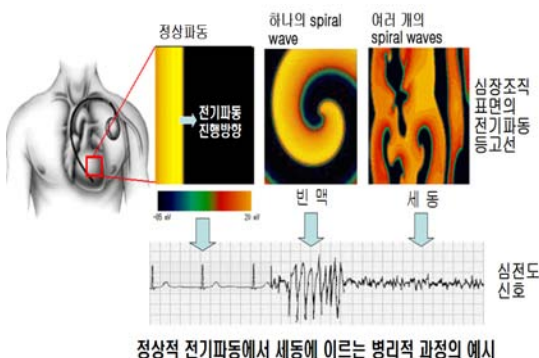


Figure 1. 부정맥의 생리학적인 기전 (일반적으로 세동은 심장박동이 빨라지는 빈맥에서 출발하며, 어떤 불안정한 요인이 더해질 경우 세동으로 발전됨)

심근세포들 간의 동시적인 수축작용이 깨어질 경우, 흥분과 수

축이 조직 부위별로 제각기 서로 다른 시간에서 발생하게 된다. 이 경우 심장이 제대로 수축을 하지 못하고, 조직표면에서 떨림 현상만이 발생하는데 이것을 세동(fibrillation)이라고 한다. 세동은 심방이나 심실 모두에서 일어날 수 있다. 심장마비란 심실에서 세동이 발생한 경우이며, 즉각 멈추게 하지 못할 경우에는 사망에 이르게 된다. 세동은 심장표면에서 발생한 하나의 회오리 파동(single spiral wave)이 여러 개로 쪼개질 경우(multiple spiral waves)에 발생하며 유체의 와류발생 및 와류 breakup 현상과 유사하다 (그림 1 참조).

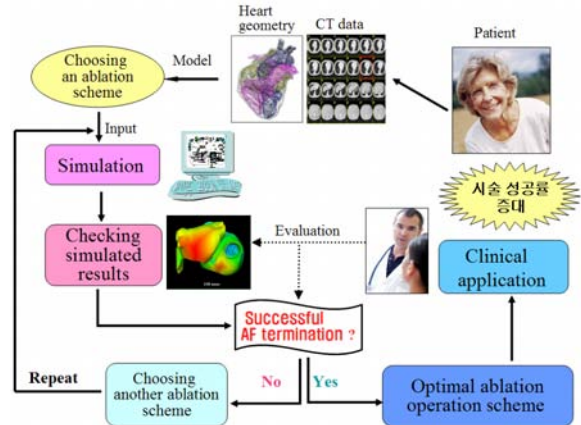


Figure 2. 심방세동 절제술 시술에 있어 모델 적용 방법 (AF: 심방세동, ablation: 전극도자 절제술)

부정맥으로 인한 급사는 모든 심장질환으로 인한 사망의 55%에 달하는 개인-사회-국가적으로 심각한 질병이다. 특히 부정맥 질환 중 심방세동(심방에서 세동이 발생하는 경우)은 유병률이 가장 높아 60세 이상 인구의 5%, 80세 이상의 15%에서 발견된다. 심방세동은 치명적 뇌질환인 뇌졸중(중풍)의 주된 원인이기 때문에 수술적인 요법들을 통하여 조기에 치료하여야 한다.

\* 강원대학교 ebshim@kangwon.ac.kr  
\*\* 강원대학교 대학원, ssknwo@kangwon.ac.kr

심방세동 환자의 치료를 위하여 전극도자 절제술(ablation기법: 심방조직의 회오리 파동의 루트를 차단하기 위하여 병변 조직 일부를 레이저로서 태우는 방법)이 일반적으로 쓰이고 있다. 그러나 심방세동의 경로 및 병변이 개인 별로 다르기 때문에 심방세동 컴퓨터 모의 시술을 통하여 최적의 치료방법을 찾기 위한 많은 노력들이 진행되고 있는 상태이다(그림 2 참조). 본 연구에서는 이에 대한 수치해석적 방법을 소개하고 일부 계산결과를 제시하였다.

## 2. 수치해석 방법

세포의 전기생리학적 현상을 기술한 세포모델[1]에서는 외부로부터의 전기적 자극이 세포막 전압의 상승을 유발하게 된다. 이렇게 세포차원의 전압상승은 주변 세포로 퍼져서 조직이 전기적 흥분을 일으키게 된다. 이때 조직의 전기전도 해석을 위하여 monodomain method를 사용하였다. monodomain method는 세포외액(extracellular region)은 일정한 성질을 보인다는 가정 하에 세포 내(intracellular) 영역의 변화만을 고려하는 방법이다[2, 3].

$$\nabla \cdot (J_i(\vec{x}, t)) = 0 \quad (1)$$

여기에서,  $\vec{x}$ 는 공간좌표벡터이고  $J$ 는 단위면적당 전류밀도이다. 첨자  $i$ 는 세포내 영역을 의미한다. 단위체적당 공간 전류  $I_v$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$I_v(\vec{x}, t) = \nabla \cdot (D_i \nabla \phi_i(\vec{x}, t)) \quad (2)$$

$\phi_i$ 는 Intracellular potential(세포내 공간의 전기전위)이다.  $D$ 는 전기전도텐서이다. 또한 막전류  $I_m$ 는 다음과 같은 미분방정식으로 나타낼 수 있다.[4]

$$I_m(\vec{x}, t) = C_m \frac{\partial V_m}{\partial t} + I_{ion} + I_{app} \quad (3)$$

위 식에서  $C_m$ 은 단위 면적당 세포막의 정전용량,  $I_{app}$ 은 단위면적당 가해진 자극 전류이며,  $V_m$ 은  $\phi_i - \phi_e$ 로 정의되는 막전위인데, monodomain method에서는  $\phi_e$ 가 constant한 성질을 보인다는 가정 하에 계산하기 때문에 0이 된다.  $I_{ion}$ 은 단위면적당 이온전류의 합이며, 세포 모델에서 구해진 막전류이다. 단위 체적당 공간 전류  $I_v$ 는 체적에 대한 면적비  $\beta$ 와 단위면적당 막전류  $I_m$ 로 표현할 수 있다.

$$I_v = \beta I_m \quad (4)$$

식 (2)와 (4)를 식 (3)에 대입하여 막전위에 대한 다음과 같은 미분방정식을 얻을 수 있으며 이는 reaction-diffusion방정식이 된다.

$$\frac{\partial V_m}{\partial t} = -(I_{ion} + I_{app}) \frac{1}{C_m} + (\nabla \cdot D_i \nabla V_m) \frac{1}{C_m \beta} \quad (5)$$

이와 같이 최종적인 식 (5)를 유한요소법을 이용하여, Galerkin method를 적용하고 시간항에 대한 Euler 전진차분방법을 사용하면 격자점들에서의 상태값을 변수로 하는 연립대수방정식을 풀어 구할 수 있다.[5]

## 3. 계산결과

빈맥 발생 시 심실에서는 회귀성 파동이 발생한다. 빈맥이 진행되는 경우 심장비대로 인한 fibrosis나 관상동맥 허혈에 의한 허혈이 존재할 경우, 심실세동의 가능성이 높아지며, 이에 대한 수치적 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 격자간격이 1.3mm, 전체 크기가 170×170mm인 2차원 조직모델을 사용하였다. 2차원 조직모델에서 회귀성 파동을 유도하기 위하여 S1-S2 protocol을 적용한다[6]. Fig. 3의 (a)의 경우는 spiral vortex 하나인 경우이며, 임상적으로는 심실빈맥에 해당한다. 반면 (b)에서는 여러개의 spiral vortex가 있으며, 심실세동을 의미한다.

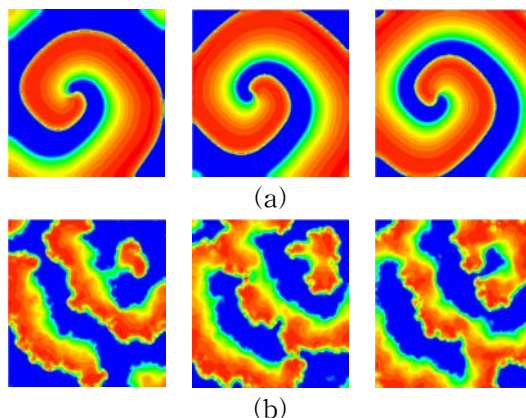


Figure 3. 2차원조직에서 회오리 파동의 생성. (a) 빈맥 (b) 세동

## 4. 결론

심근세포의 전기 생리학 모델을 기반으로 2차원 조직모델을 개발하였다. 2차원 조직모델의 해석을 위하여 유한요소법을 사용하였으며 조직에서의 회귀성 파동을 재현하였다. 심실비대 시 발생하는 fibrosis에 의해 세동의 생성을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] Ten Tusscher KH, Noble Pj, Panfilov Av, "A model for human ventricular tissue.", Am J Physiol Heart Circ Physiol, Vol 286, 2004, pp.1573-1589
- [2] A.V. Panfilov, A.V. Holden, "Computer simulation of re-entry sources in myocardium in two and three dimensions." J Theor Biol. Vol. 161, 1993, pp.271-285.
- [3] J.M. Rogers, A.D. McCulloch, "A collocation-Galerkin finite element model of cardiac action potential propagation." IEEE Trans Biomed Eng. Vol. 41, 1994, pp.743-757.
- [4] 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, Vol. 2, 2000, pp.119-155.
- [5] P.J. Hunter, A.J. Pullan, B.H. Smaill, "Modeling total heart function." Annu Rev Biomed Eng. Vol. 5, 2003, pp.147-77.
- [6] Robin M. Shaw, Yoram Rudy, "Electrophysiologic effects of acute myocardial ischemia: a theoretical study of altered cell excitability and action potential duration", Biophysical journal, Vol. 74, pp.256-272, 1997