

3차원 가상심장 모델을 활용한 제세동 시 심장의 역학적 현상 분석

김기태* · 이종호* · 심은보*

Analysis of cardiac mechanical phenomena during defibrillation using a 3D virtual heart model

Ki Tae Kim*, Jong Ho Lee*, Eun Bo Shim*

Abstract : Defibrillation is a method for treating cardiac arrhythmia and eliminates the ventricular fibrillation or tachycardia which is an irregular electrical conductivity of the heart. The purpose of this paper is first to observe that the ventricular arrhythmia(tachycardia, fibrillation) can be eliminated when biphasic wave gives defibrillation shock to 3D virtual heart model, and second to observe membrane potential · calcium, ABP(aortic blood pressure), EF(ejection fraction) and etc. according to virtual cardiac arrhythmia and defibrillation. For this reason, we simulated contraction · relaxation mechanism of the electric excitation of the heart(E-C coupling), based of this, we implemented an electro-mechanical 3-D virtual heart model. Also, we used bi-domain method considering the inside and outside of cells to analyze ventricular electrical conductivity, and a finite element method to analyze excitation-contraction mechanism of heart.

1. 서 론

심실 제세동(ventricular defibrillation)은 불규칙한 전기전도 패턴을 가지는 심실의 부정맥(빈맥 혹은 세동)에 순간적으로 강한 전류를 흘려보내 심장의 전류 신호를 정상화 시키는 것이다. 그러나 제세동은 심장 또는 체표면에 강한 전류를 사용하기 때문에 환자의 심장 또는 주변 장기의 손상을 유발할 수 있다. 이에 효율적인 제세동 메커니즘을 찾기 위한 여러 컴퓨터 시뮬레이션이 진행되고 있다. 그러나 기존 연구들은 단순히 제세동 효율성에만 초점을 둔 상태이다.

본 연구에서는 심장의 흥분과 수축-이완 기전을 활용하여 제세동 효율성뿐만 아니라 심장의 병리 상태 및 제세동 상태에서의 생리학적 결과 또한 분석하고자 하였다. 이를 위해 3차원 가상 심장 모델에서 심장의 흥분에 따른 수축-이완 기전을 구현하였고, 이를 제세동 메커니즘 분석을 위한 시스템과 결합하여 가상

제세동 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이 모델을 통해 3차원 부정맥 심실 모델에서 제세동 여부를 확인하고, 정상과 부정맥 및 제세동 상태에서의 생리학적 분석을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1. 연구방법

2.1.1. 3차원 가상 심실 모델

본 연구에서는 인간 심근세포 모사한 ten Tusscher 모델[1]을 사용하여 심근 세포 이온통로화 이온 펌프 등의 세포막 기전을 수치적으로 구현하여 세포막 전압을 계산하였고, FEM을 통해 3차원 심실의 전기적 흥분을 해석하였다. 본 연구에서 사용된 3차원 심실 해석 모델은 개(canine) 심실 격자 모델을 기반으로 인간 심실 형상에 맞게 크기를 조절하여 사용하였다. 이에 따라 집중 파라미터 모델에 적용된 canine 상수 또한 human 상수로 변경하여 인간 심실에 더욱 근접한 심장수축 기전 시스템

* 강원대학교, 기계의용공학과

을 구축[3]하였다.

2.1.2. 심실 부정맥 모델

부정맥 모델은 심실세포의 불안정성을 증가 시키고 심실의 이상 자극(S1-S2 protocol)을 발생[2]시켜 심실 전기 전도 장애를 유발하였다. (fig 2-b)

2.1.3. 제세동 메커니즘

제세동에 사용된 파형(waveform)은 제세동 첫 자극 이후 자극 에너지가 점차 감소하는 biphasic truncated exponential(BTE)을 사용하였고, 제세동 자극은 첫 번째 자극과 두 번째 자극이 6:4 비율로 10ms동안 가하였다 (fig 1).

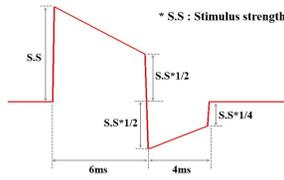


Fig. 1 Defibrillation waveform(biphasic truncated exponential)

2.2. 결과

본 연구에서는 정상상태의 심실(fig 2-a)에서 세동현상이 발생(fig 2-b), 이에 제세동(fig 2-c) 자극을 주어 다시 정상상태의 심실(fig 2-d)로 되돌아오는 전체적인 과정을 심장의 흥분-수축기전을 활용한 시뮬레이션으로 살펴봐왔다.

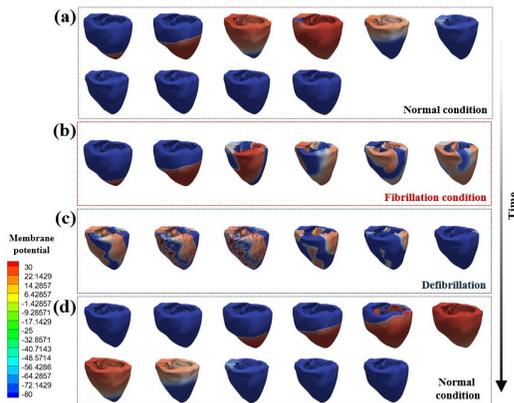


Fig. 2 Excitation-contraction of virtual ventricular model

일정한 cycle을 지닌 세포막전압은 세동현상 이후 불규칙한 값을 나타내며 (fig 3-a), calcium 또한 낮은 값으로 떨어진다(fig 3-b). 그러나, 제세동 이후 정상 값을 되찾는 것을 볼 수 있다.

정상상태의 심장에서의 혈압은 약 80~110mmHg이고, ejection fraction은 55%의 값을 보인다(Table 1). 그러나 심실의 세동현상 발생 후, 혈압과 심실의 volume은 매우 낮은 값으로 떨어져 심장이 박동하지 않는 상태에 이른다(fig 3-c,d). 이러한 심실세동 상태에 20ms 부근에서 제세동 자극이 가해지고 심장이 다시 제 기능을 되찾는 것을 확인할 수 있다.

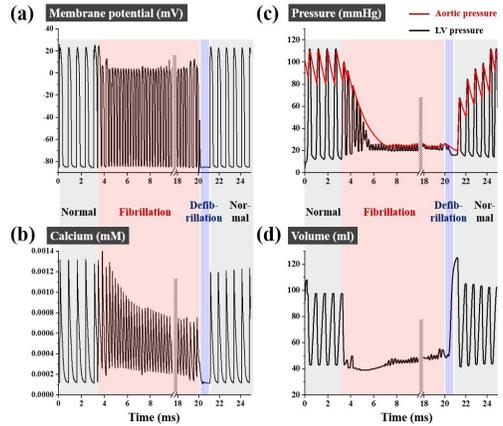


Fig. 3 Physiology information in total process

Table 1 Physiology information in normal condition

Normal condition			
SBP	110.38 (mmHg)	ESV	43.08 (ml)
DBP	79.99 (mmHg)	EDV	97.57 (ml)
P·P	30.39 (mmHg)	E·F	55.85 (%)

* PP = Pulse pressure, EF = Ejection fraction

3. 결론

본 연구에서는 전기 생리학적 이론에 따른 조직-장기 수준을 고려한 가상심장 모델을 통해 전기전도 장애의 병리 모델을 개발하였다. 또한 가상 심장의 전기적 흥분에 따른 수축-이완 기전을 구현하였고, 이를 제세동 메커니즘 시스템과 결합하였다. 시간에 따른 심장의 전기전도 패턴과 수축-이완 과정 및 혈압과 체적, EF 등 심장의 상태에 대한 생리학적인 분석을 관측하였다. 이러한 시스템을 활용한 효율적 제세동 연구가 진행 될 것이다.

참고 문헌

- (1) K.H. Ten Tusscher, P.J. Noble, and A.V. Panfilov, 2004, "A model for human ventricular tissue.", *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, Vol 286, pp.1573-1589.
- (2) ten Tusscher, Kirsten HWJ, and Alexander V. Panfilov. "Alternans and spiral breakup in a human ventricular tissue model." *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 291.3 (2006): H1088-H1100.
- (3) Belik, Mary E., Taras P. Usyk, and Andrew D. McCulloch. "Computational methods for cardiac electrophysiology." *Handbook of Numerical Analysis* 12 (2004): 129-187.