



유체와류현상과 심장부정맥의 상관성 연구-수치적 접근

심 은 보*¹

SIMILARITY ANALYSIS OF HEART ARRHYTHMIA WITH FLUID VORTEX-NUMERICAL APPROACH

E.B. Shim*¹

Considering the similarity between fluid vortex and arrhythmogenic reentrant waves in heart, we applied the non-dimensionalization method in fluid dynamics to arrhythmia analysis and discovered a new non-dimensional number, as the Reynolds number, that can be used as a biomarker of chaotic electric waves. According to the simulation results, there was a threshold value of the number that resulted in the induction of a reentrant wave.

Key Words : 유체와류(Fluid vortex), 심장부정맥(Cardiac arrhythmia), 무차원수(Non-dimensional number)

1. 서 론

여기에서는 한국전산유체공학회지 논문의 원고를 작성함에 있어서 주의해야 할 사항을 설명한다. 심장은 혈액순환 시 원동력이 되는 순환계의 중추기관으로, 주기적인 수축과 이완을 반복하여 온몸에 혈액을 공급하는 펌프역할을 한다. 이러한 심장의 기계적 수축에는 반드시 전기적 흥분이 선행되어야 하므로 심장기능의 핵심은 심장세포들의 전기적 흥분과 이로 인한 기계적 수축 현상으로 요약될 수 있다. 심장이 정상적인 혈액 공급을 하기 위해서는 심장세포들이 전기적 흥분의 동시성을 유지하여 심장근육이 동시에 기계적 수축을 해야 한다. 또한 혈액을 혈관으로 펌핑을 하고 난 이후, 심실에 혈액이 다시 채워질 때까지 시간적으로 충분한 휴지기를 가져야만 전신으로 공급할 수 있는 충분한 혈액을 확보할 수 있다. 이것과 같이 정상적 심장 기능의 주요한 전제조건은 바로 심장세포들 간의 동시성(synchronization)과 충분한 휴지기의 존재이다.

어떤 경우, 심장에서의 전자자극 또는 전기전도가 비정상적으로 느리거나 빨라지거나 혹은 불규칙적인 잔 떨림이 생길수가 있는데 이를 부정맥(arrhythmia)이라 한다. 부정맥은 심장의 박동의 빠르기에 따라 빈맥(tachycardia)과 서맥(bardycardia)으로 나뉜다. 특히, 빈맥은 심장의 리듬이 너무

빠른 것을 의미하며, 심장근육의 떨림만이 존재하는 세동(fibrillation)으로 발전할 수가 있다. 세동은 심장마비 직전에 일어나는 것으로 돌연사를 유발한다. 빈맥과 세동의 원인은 심장 조직 표면에서 발생하는 전기적 흥분 파동의 회오리 현상이며, 이것을 회귀성파동(reentrant wave)이라고 한다. 생리학적으 볼 때, 심장에서 하나의 중심을 가진 전기파동 회오리가 발생·지속될 경우 심장세포들이 전기적 휴지기도 없이 끊임없는 흥분을 일으키는데 이를 빈맥이라 한다. 또한 이러한 하나의 전기파동 회오리가 어떠한 원인으로 인해 여러 개의 작은 회오리들로 쪼개지게 되면 심장 조직들간 전기적 흥분의 동시성마저도 깨어지게 되는데 이것이 심장마비 과정에서 일어나는 세동 현상의 원인이다.

심장에서의 회오리 파동이 유체 와류 현상과 유사하다는 사실은 이미 의학 논문들에서 제기된 바가 많이 있다. 심장표면의 회귀성파동이 병리적 현상으로 인해 여러 개로 쪼개지는 현상인 세동의 경우는 유체역학의 vortex breakup 및 난류로의 천이형상과 유사하며, 심장의 수축에 따른 활동전류를 기록한 심전도(ECG)신호도 유체의 와류 및 난류천이 현상의 주기적 패턴과 매우 유사하다. 하나 이러한 유체현상과 심장 부정맥 사이의 상관성이 지적되었음에도 불구하고, 아직까지는 심장에서의 회오리 발생 및 여러 개의 회오리로 쪼개지는 현상에 대한 진단근거는 없는 실정이다.

따라서 여기에서는 유체와류와 심장 회오리 현상을 비교 검토하여 부정맥을 미리 예측하고 진단할 수 있는 하나의 무차원 인자를 유도한다.

1 정회원, 강원대학교 기계·의용공학과

* Corresponding author, E-mail: ebshim@kangwon.ac.kr



2. 본 론

심장조직에서 활동전압(전기적 흥분)의 전도현상을 기술하는 지배방정식은 아래의 식 (1)로 표현된다. 이것은 심장 세포들의 전기적 활동상황을 종합하여 조직 차원에서 전기적 파동 현상을 기술하는 방정식이다[1].

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{I_{ion} + I_{stim}}{C_m} + \frac{1}{\rho S C_m} \nabla^2 V_m \quad (1)$$

여기서, V 는 심근세포의 막간 전압(mV), I_{ion} 은 심근세포의 막간 전류의 합(단위 면적당 흐르는전류, pA/cm²), I_{stim} 은 외부에서 주어지는 자극전류, C_m 은 세포막의 Capacitor 성분(단위면적당 용량, pF/cm²), ρ 는 세포의 저항률(Ω cm), S 는 세포의 표면적 대 부피 비(cm⁻¹), ∇ 는 공간 도함수를 나타내는 기호이다. 식 (1)의 좌변항은 심실조직의 특정 위치에서 전기 전압의 시간적 변화를 나타내며, 우변 첫 번째 항은 조직을 이루는 심장세포에서 발생하는 전기적 흐름으로 인해 발생하는 원천 항이다. 우변의 두 번째 항은 전기적 파동의 확산 항인데 이것은 매우 일반적인 reaction-diffusion 형식의 편미분방정식이다[2].

일반적으로 다수의 변수에 의존하는 물리적 현상을 소수의 복잡한 변수 문제로 축소하기 위해서는 무차원화가 필요한데, 심장조직에서의 전기적 파동전도의 분석을 위해 식 (1)의 방정식을 아래 식 (2)와 같은 무차원 방정식으로 전환하면 다음과 같다[3].

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} = -(I_{ion}^* + I_{stim}^*) + \frac{D}{fL^2} \nabla^{*2} V_m^* \quad (2)$$

여기서 $V^* = V/V_{ref}$, $\nabla^* = L_{ref}\nabla$, $t^* = f_{ref}t$, $I^* = I/I_{ref}$ 로서 무차원화 된 변수들이다. D 는 확산계수로서 $D = 1/(\rho S C_m)$ 로 표현되고, V_{ref} 는 특성 전압, L_{ref} 은 심장의 특성길이(표면적의 제곱근), f_{ref} 는 특성주기로서 v/L 로 표현할 수 있으며 여기서 v 는 활동전압의 전도속도(cm/s)이다. I_{ref} 는 특성 전류이다.

식 (2)에서 무차원 지배방정식의 파라미터들을 얻을 수 있는데 그것을 통해 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} = -(I_{ion}^* + I_{stim}^*) + \frac{1}{[Shim]} \nabla^{*2} V_m^* \quad (3)$$

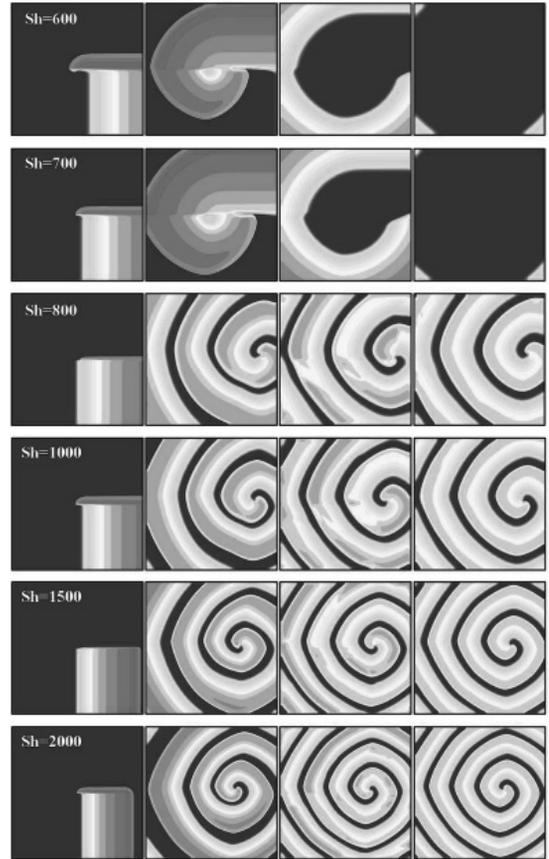


Fig. 1 Computational results of the effect of the Shim number on cardiac reentry dynamics. Sequential contours of action potential propagation for reentrant wave according to the Shim number

편미분 방정식 (1)의 무차원방정식인 식 (3)에서, 계수로서 나타나는 무차원수 [Shim]가 있는데 이것이 바로 위의 방정식이 기술하는 물리적 현상을 규정하는 변수가 된다. 이와 비슷한 예를 들어 유체의 유동을 기술하는 Navier-Stokes 방정식의 경우, 무차원화를 수행하면 하나의 무차원수 계수 Reynolds 수가 나타나는데 Reynolds 수는 유체 유동에서 회오리 흐름의 생성 및 분화/난류화 등을 판단하는 기준으로 사용된다.

무차원 지배방정식의 파라미터로서 [Shim]수는 아래 식 (4)과 같이 표현된다.

$$[Shim] = \frac{(fL)L}{D} = \frac{CV \cdot L}{D} \quad (4)$$

CV 는 f 와 L 에 비례하는 Conduction Velocity이다. [Shim]는 위에서 언급한 Reynolds수와 그 형태가 유사한데, [Re]가



유체유동의 성격을 가늠하는데 아주 중요한 지표가 되듯이 심장 활동전압 전파의 성격을 가늠하는데 [Shim]가 증대한 지표가 될 수 있다.

3. 계산결과 및 검토

앞에서 도출한 무차원수 [Shim]에 따른 심근조직상의 회귀성 파동 변화양상을 분석해 보았다. 그리고 [Shim]변화에 따른 활동전압 전파가 정상, 빈맥으로의 변화 가능성을 확인하였다.

Fig. 1에서는 심장표면 조직을 2차원적으로 단순화 시킨 것이다. 그리고 전도파가 조직을 따라 흐를 때 회귀성 파동을 발생시켜 그 결과를 관찰하였다. 그림에서 보듯이 [Shim]수가 증가함에 따라서 회귀성 파동이 생성되는 유지됨을 알 수 있다. 즉 심장조직의 특성에 따라 결정되는 [Shim]수에 따라서, 회귀성 파동의 생성여부가 분류될 수 있다는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 무차원화 된 심장 전기파동의 지배방정식을 통해 한 개의 무차원수를 유도하였다. 심장에서의 전기파동은

근본적으로 이 무차원수에 따라 결정되며, 심장 병리적 현상도 이에 좌우될 것이다. 즉 심각한 부정맥 증상인 빈맥, 세동 현상에 대한 위험도예측 및 진단에 위의 두 무차원수가 사용될 수 있을 것이며, 또한 부정맥이 아닌 정상적 경우라 할지라도 심장조직의 전기파동 진행이 정상적인지를 예측하고 판단하는 근거로도 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 1994, Winfree, A.T., "Electrical turbulence in three-dimensional heart muscle," *Science*, Vol.266 No.5187 pp.1003-1006.
- [2] 1999, Weiss, J.N., Garfinkel, A., Karagueuzian, H.S., Qu, Z. and Chen, P.S., "Chaos and the transition to ventricular fibrillation: a new approach to antiarrhythmic drug evaluation," *Circulation*, Vol.99 No.21 pp.2819-2826.
- [3] 1998, Beaumont, J., Davidenko, N., Davidenko, J.M. and Jalife, J., "Spiral waves in two-dimensional models of ventricular muscle: formation of a stationary core," *Biophys J.*, Vol.75 No.1 pp.1-14.