

심실세동에 숨겨진 '복잡계 과학'

심장마비 원인 .. '전기 토네이도'

글_이경진 고려대학교 물리학과 교수 kyoung@nld.korea.ac.kr

심장마비는 아주 치명적인 돌연사의 주범이다. 미국의 경우, 매년 수십만 명의 사람들이 이로 인하여 사망하거나 중증환자가 된다. 이들 가운데는 평소 신체가 건강한 젊은 사람들도 상당수 포함된다. 과연 심장에 어떤 일이 벌어진 것일까?

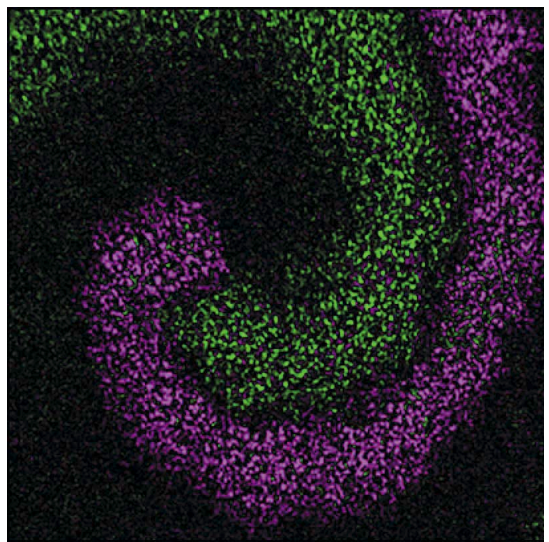
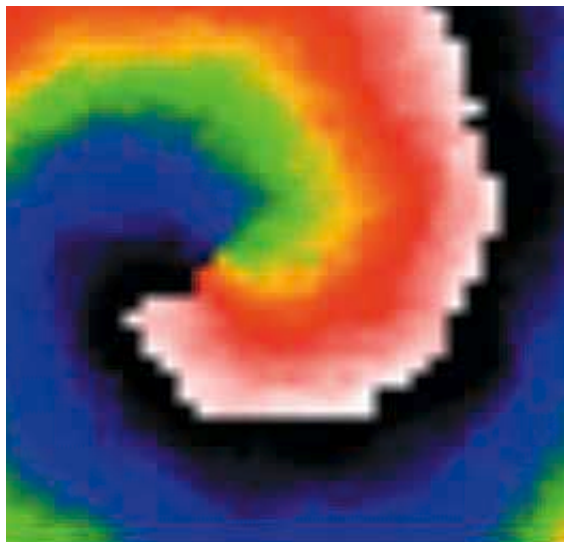
심장마비의 원인은 여러 가지가 있을 수 있지만, 많은 경우 심실세동(ventricle fibrillation)이라는 특이한 현상에 기인하는데 이는 심실이 제대로 수축을 하지 못하고 파르르 떨기만 하는 양상을 일컫는다. 이 상황이 5분 이상 지속되면, 뇌에 혈액 공급이 중단되고, 환자는 뇌사상태에 빠지게 된다. 그렇다면, 심실세동은 어떻게 일어나는 것일까?

나선형 '전기 토네이도'가 심장 박동원 무력화시켜

심장막을 구성하는 각각의 심장세포(cardiac myocytes)들은 뇌세포(neurons)와 매우 유사해 순간적으로 전기화학적 '혼분상태'를 가질 수 있다. 즉, 일정한 크기 이상의 외부자극을 받게 되면, 세포벽을 기준으로 안과 밖에 형성된 세포막-전위에 순간적으로 급격한 변화가 생긴다. 심장세포인 경우에는 이와 동시에 빠른 기계적 수축이 일어나며, 이후 상대적으로 완만한 이완과정이 뒤따른다.

심장은 이러한 특성을 갖는 세포들의 두터운 층으로 형성되어 있고, 심방과 심실에는 서로 연계된 박동원(pacemaker)이 하나씩 있다. 정상적인 상황에서, 이들

심장막에서 형성된 전기적 나선파 : 심실빈맥에 해당됨



박동원은 상당히 일정한 주기를 유지하며 주변의 심장 세포들에 전기적 자극을 가해 흥분시킨다. 흥분된 주변 세포들은 도미노 현상을 보이며 이웃한 세포들을 순차적으로 흥분시킨다. 이렇게 흥분된 세포들은 시간이 지남에 따라서 원래의 휴지기 상태로 되돌아간다. 이 흥분성 전달과정은 대형 스타디움에서 가끔 볼 수 있는 관중들의 파도타기 물결과 매우 유사하다. 다시 말해, 박동원은 심장막의 활성 리듬을 관장하는 매우 중요한 역할을 담당하며, 이것이 없는 심장은 상상할 수 없는 일이다.

일반적으로, 심실세동은 심실빈맥(ventricle tachycardia)이라는 증상에 뒤이어서 나타난다. 심실빈맥은 정상적인 경우보다 적게는 서너 배에서 많게는 열 배 이상으로 매우 빠른 (즉, 주기가 매우 짧은), 동시에 상당히 규칙적인 심박이다. 놀랍게도 심실빈맥의 원인이 심장 고유의 박동원에 무관하게 심실표면에 형성되는 나선형의 '전기적 토네이도'라는 것이 최근 밝혀졌다. 나선형의 '전기적 토네이도'는 실제 기상과 관련된 토네이도와는 무관하다. 이 토네이도는 자발적으로 또는 외부적인 요인에 의하여 형성될 수 있으며, 일단 형성이 되면 자기 고유의 핵을 중심으로 빠른 주기로 회전하며 유지되기 때문에, 상대적으로 느린 고유의 박동원을 무력화하게 만든다.

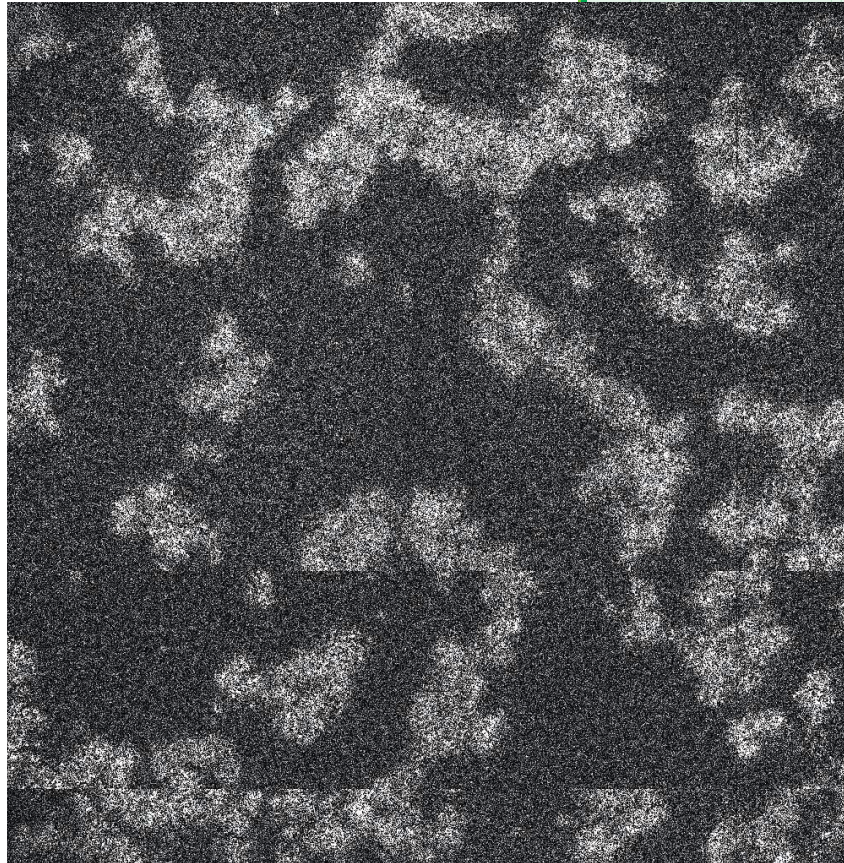
즉, 심실 전체가 이 전기적 토네이도의 빠른 회전 주기에 동기화하는 것이다.

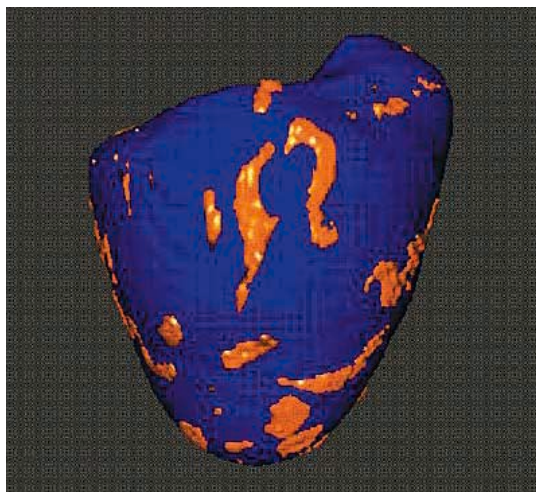
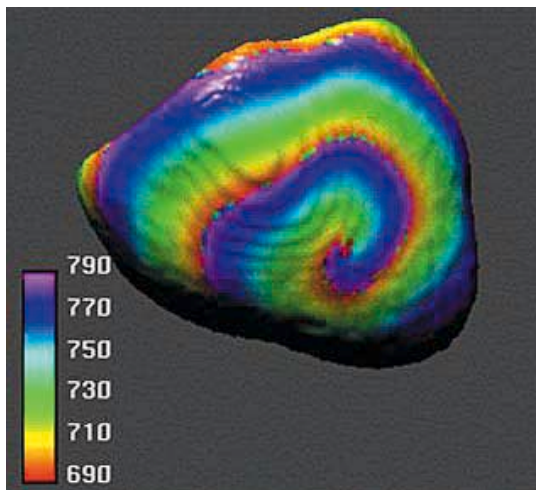
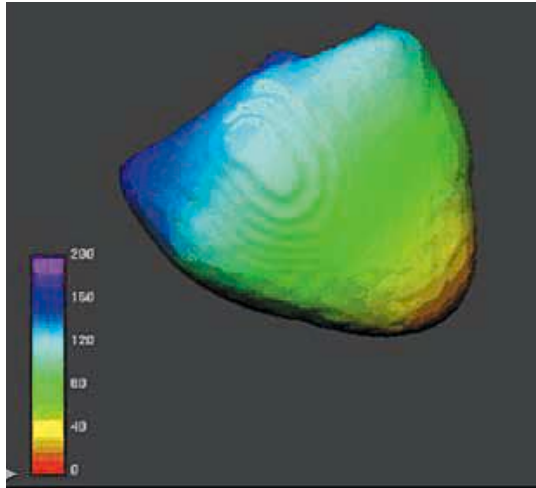
이 토네이도의 핵 부분은 복잡한 궤적을 그리며 공간적인 이동을 할 수 있을 뿐만 아니라, 여러 개의 작은 토네이도들로 나뉘어져, 뒤섞인 복잡한 혼돈의 양상으로 발전할 수 있는데, 바로 이 복잡한 상태가 심실세동을 유발하는 것으로 믿어진다. 즉, 심실 조직의 각 부분은 무작위로 분포된 전기적 토네이도들에 기인하여 비동기화되고, 정상 상태의 동기화된 심실 수축은 불가능해진다. 이 때, 심전도상에서는 매우 빠르며 불규칙적인 리듬이 나타난다.

'전기적 토네이도'는 보편적인 자연계 현상

다행히도 병원이나 응급처치가 가능한 환경에서 이러한 일이 벌어진다면, 제세정기(defibrillator)가 바로 이용되어야 한다. 영화나 드라마에 자주 등장하는 이 의료기기는, 매우 짧은 동안에 수 암페어의 강력한 전류를 몸에 흘려주는 것으로, 심실세동 상태의 환자를 구할 수 있는, 매우 중요한, 현재까지 알려진 유일한 도구이다. 제세정기의 큰 전기적인 충격은 심실세동의 원인이 되는 전기적 토네이도들을 순간적으로 제거하는데 쓰이는 셈이다. 전기 충격이 가해진 후, 환자의 입장에서 보면 원래 심장 고유의 박동원이 다시 제 기능을 해주길, 그리고 이 전기적 토네이도들이 다시 나타나지 않기를 바랄 뿐이다.

심장막에서
형성된 시공
간 혼돈 양상
: 심실세동에
해당됨





전산모의 실험 결과 정상적인 상황(맨 위), 심실빈맥의 양상(가운데), 심실세동의 양상(아래)

심장의 표면에서 나타나는 이 겹나는 '전기적 토네이도들'은 심장마비와 관련되어 매우 특별한 의학적 연구대상이기도 하지만, 최근 '복잡계의 물리학' 차원에서 보면 아주 보편적인 자연계 현상이기도 하다. 유사한 '토네이도 현상들'이 아메바 세포들의 군집, 수정된 개구리 알의 세포질, 뇌의 시각피질, 또한 다양한 비선형 화학반응계 및 액정막 등 매우 다양한 생물, 화학, 물리적인 시스템에서 발견되고 있다. 즉, 이들은 우리 자연계 전반에 걸쳐 매우 다양한 스케일에서 보편적으로 나타나며, 근래에 등장한 복잡계 물리학의 핵심적 이슈들과 직결된다.

아마도 관련된 가장 핵심적인 질문은 '어떻게 나선형의 토네이도 양상이 자발적으로 형성될 수 있으며, 왜 여러 개의 작은 조각으로 나뉘어 지는 것일까' 일 것이다. 또한, 이들 전기적 토네이도들의 형태와 동력학적 양상은 무엇에 의하여 결정되는 것일까? 이러한 일련의 의문에 대한 물리학자들의 도전은 이미 시작되었고, 지난 수년간 몇 가지 중요한 사실이 확인되었다. 복잡계에서는 자기조직화(self-organization)가 일어날 수 있으며, 이는 관련된 계의 불안정성에 기인한다, 그리고 복잡계의 불안정성은 계의 세세한 특성과 무관한 일반성이 있다. 즉, 복잡계의 현상은 보편성을 갖는다.

심장마비의 예방에 대한 기존의 많은 약물 연구들은 모두 실패하였다. 돌이켜 생각해보면, 이 사실은 심장마비라는 병리적인 상태에 대한 근본적인 이해의 부재에 따른 당연한 결과였다.

복잡계의 동력학적 측면에서 최근 몇 년 동안, 심실세동에 대한 여러 사실이 밝혀졌고, 앞으로도 이에 대한 보다 근본적인 이해와 대책마련에 물리학자들이 한 역할을 담당할 수 있을 것으로 기대된다. ㉔



글쓴이는 미국 텍사스대에서 물리학 박사 학위를 받은 후 미국 프린스턴대 연구원을 지냈고, 현재 창의연구단 신경망동력학연구단장을 겸임하고 있다.