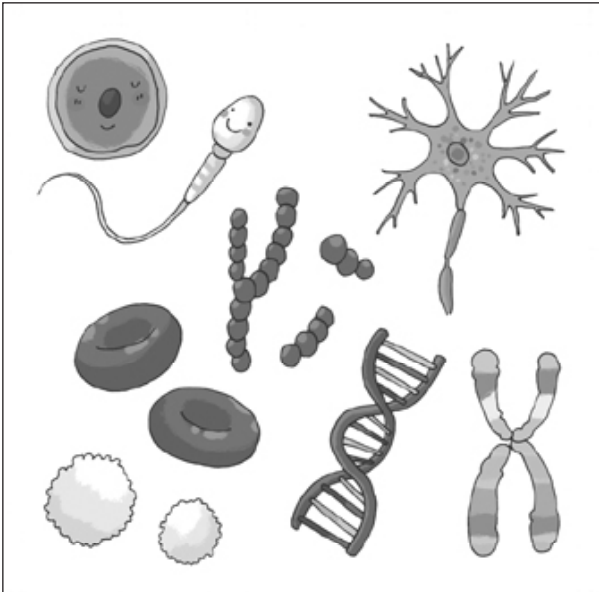


미토콘드리아와 세포 노화

| 제임스 오슈만 | 이영수 · 이명수 옮김 |

근본적으로 에너지란 무엇을 의미하는지, 그 에너지가 생체에서는 어떻게 저장되고 사용되는지 밝히며, 미토콘드리아로 유입되는 전하가 세포노화에 무슨 관련이 있는지를 말합니다. (편집자 주)



요약

물리학에서는 ‘에너지Energy’를 일을 할 수 있는 능력이라고 정의한다. 이 정의는 신체의 에너지 흐름에도 사용할 수 있다. 예를 들어, 하나의 광자는 망막의 색소 분자의 구조를 변경할 수 있을 만큼 충분한 에너지를 가지고 있기 때문에, 우리는 빛을 감지할 수 있으며, 신경 신호를 시각 피질로 전달한다. 중력은 신체가 낙하할 때 조직에 손상을 주는 역할을 한다. 소리는 내이의 모세포hair cell를 진동시켜 소리를 들을 수 있게 한다. 아데노신 3인산ATP에서 방출되는 화학 에너지는 신경세포가 메시지를 전달하고 백혈구가 부상 부위로 이주할 수 있는 동력을 제공한다. 노화방지의학anti-aging medicine의 관점에서는 체내의 에너지 저장, 적절한 에너지 공급 및 순환을 유지함으로써, 필수 과정들을 통해 최적의 생활 기능을 유지할 수 있는 인자에 관심이 집중되고 있다. 이 글에서는 신체의 에너지 생산 및 활용에 관한 생화학적, 생물생리학적 측면, 에너지 ‘결핍’이 일어나는 경로와 교정 방식을 알아보았다. 한 가지 중요한 주제는 모든 면역계에 대사 에너지를 공급하여 신체의 자연 방어와 회복 과정을 유지하고 심지어 극대화하기까지 하는 현상이다. 두 번째 주제는 세포의 에너지 과정에서 양성자와 전자의 역할이다. 마지막으로 만성 염증의 해소와 염증에 대한 대비능력을 유지하는 데 있어서 전자의 역할을 고찰하였다.

키워드: 수명, 에너지 대사, 미토콘드리아, 염증, 생체 매트릭스, 생리학적 균형, 전자 운반

서론

물리학자들은 ‘에너지Energy’를 일을 할 수 있는 능력이라고 정의한

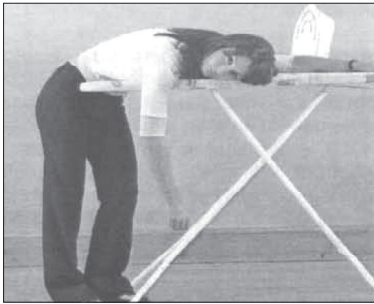


그림 1. 우리는 에너지가 없는 기분이 어떤 것인지 잘 알고 있다.

다. 에너지가 없으면 (그림 1)의 여자처럼 하고 싶은 일을 하지 못한다는 느낌이 드는 것이 일반적이다. 다양한 인자가 이러한 느낌을 유발할 수 있다. 과도한 노력, 부적절한 영양, 운동 부족, 휴식 및 회복 부족, 감정적 고조, 우울, 질병, 부상, 불균형한 구조(자세)

등이 이러한 느낌을 유발할 수 있다. 이 글에서는 사람의 생리를 저해할 수 있는 여러 인자들을 검토하고 노화과정을 가속화하는 생물학적 에너지론을 자세히 살펴보고자 한다. 또한 에너지 무결성을 유지하고 자연스러운 장수 상태를 유지하기 위해 취할 수 있는 예방적 단계를 알아볼 것이다.

생화학적 경로

현대 생화학의 주제는 생명활동에 필수적인 다양한 과정에 에너지를 공급하는 경로를 정의하는 것이다. 이 주제를 중심으로 다음과 같은 중요 질문들이 제기되고 있다.

- 세포는 단백질 합성에 필요한 에너지를 어떻게 얻는가?
- 간의 해독작용, 신장의 소변 생성, 소화 등 기관의 기능을 수행하는 데 필요한 에너지를 어떻게 얻는가?
- 신체 이동으로 이어지는 근육 수축에 필요한 에너지를 어떻게 얻는가?

근수축은 신체에서 가장 중요한 에너지 시스템 중 하나이며, 그에 따라 수많은 연구가 이루어져왔다. 다음은 근육에너지론의 역사에 관한 요약이다.

센트죄르지 Albert Szent-Gyorgyi는 1931년 헝가리 세계드Szeged에서 근수축에 관한 기초연구를 시작했다. 근육의 형태와 크기의 변화, 여기에 개입하는 화학물질을 연구하기 위해 토끼 근육에서 마이오신 myosin을 추출하고 피하주사기로 뽑아 가는 실 형태로 압착시켰다. 센트죄르지가 ATP를 처리된 마이오신에 첨가하자, 실은 근섬유가 긴장하는 것처럼 원래 크기의 3분의 1로 신속하게 수축했다. 이전 연구에서 미토콘드리아가 세포활동에 필요한 중간에너지원인 ATP를 생산한다는 것이 입증되었다. 센트죄르지는 에너지 대사의 화학중간산물을 규명한 연구공로를 인정받아 1937년에 노벨상을 수상했다. 근육에 관한 그의 초창기 연구는 분리된 분자를 사용하여 기초생리학적 과정과 근수축을 연구한 최초의 연구였다. 그는 향후 근육생화학 분야의 양석을 놓았다. 센트죄르지와 그의 연구팀은 근육조직에서 마이오신과 결합하여 상호 결합된 섬유를 만드는 액틴actin이라는 두 번째 단백질을 발견했다. 현재는 액틴과 마이오신이 근육뿐 아니라 거의 모든 세포에서 발견된다고 알려져 있다. 1954년 센트죄르지는 근육에 관한 기초연구를 통해 심혈관계 질환의 이해를 높인 공로로 라스커 상Lasker Award를 수상했다. 분리된 근단백질을 관찰한 센트죄르지는 다음과 같이 말했다.

“이 작은 인공근육들이 도약하는 모습을 처음 본 것은 아마도 내 연구인생에서 가장 흥미로운 경험이었으며, 2주 안에 모든 것을 이해할 것이라는 확신이 들었다. 당시 나는 20년 이상 근육을 연구했지만

아무것도 얻지 못한 상태였다. 아는 것이 늘어갈수록 이해할 수 있는 것은 줄어들었다. 모든 것을 알지만 아무 것도 이해하지 못한 채로 인생을 마감하게 될까봐 두려웠다. 확실히 무언가 아주 기적인 것을 놓치고 있었다. 나는 한 단계 더 낮은 기전을 이해하기 위해 전자로 내려가야겠다고 생각하고 백발이 된 나이에 양자역학에 머리를 싸매고 전자를 공부했다. 그러나 전자는 생명이 없는 전자일 뿐이다. 나는 도중에 생명을 놓쳐버렸다. 내 손가락 사이로 빠져나갔을 것이다. 나는 이 헛된 노력을 후회하지 않는다. 그러한 노력으로 나는 더 현명해졌고 이제는, 생명에 접근하려고 할 때 모든 수준의 조직들이 동등하게 중요하며 전체를 알아야 한다는 것을 알기 때문이다.”

연구자들은 이 초창기 연구를 토대로 근섬유가 스스로 수축한다는 ‘수축섬유가설’을 세웠다. 그러나 전자현미경은 이 가설을 지지하지 않았다. 액틴섬유와 마이오신섬유는 근섬유가 수축할 때 짧아지지 않았다. 굵은 섬유와 가는 섬유 사이의 중첩 정도가 변경될 뿐이었다. 1957년부터 1959년 사이 발표된 논문에서 휴 헉슬리 Hugh Huxley는 액틴분자와 기울어진 마이오신분자의 가교결합이 서로를 잡아당기는 현상의 결과로 수축이 일어난다는 미끄러짐 섬유 모델을 제시했다^{3).4)}. 이 가설이 현재 근수축 모델로 받아들여지고 있다.

1950년에는 영국의 생리학자인 힐 A.V. Hill이 ATP가 진정한 근수축 에너지원인지를 입증하는 문제에 관해 생화학자들에게 도전을 제기했다⁵⁾. 1962년 데이비스 Davies와 동료들은 근수축 과정에서 ATP가 분해된다는 것을 입증하는 연구로 응답했다^{6).7)}. 마이오신 가교결합에 존재하는 효소인 ATPase가 ATP의 말단 인산결합에 저장되어 있던 에너지를 유리시키고, 결합에너지를 마이오신 헤드 기울임으로

전환하여 동작을 유발하는 기전을 밝힌 것이다. ATP 분해에 의한 일련의 마이오신 가교결합 동작은 근수축을 일으킨다. 추후 연구에서는 생체의 1차 동력원이자 세포 발전기라고 불리는 미토콘드리아가 생성한 ATP에 의해 필수 과정들이 일어나는 것을 확인했다.

전자 및 에너지

위에 언급한 쉐트죄르지의 인용구는 생명에 접근하려고 할 때 모든 수준의 조직들이 동등하게 중요하며 전체를 알아야 한다는 개념을 소개한다. 그는 생물학적 에너지론을 볼 수 있는 더 낮은 수준에서 힌트를 얻었다. 이 수준이 바로 전자이며, 양자역학의 세계이다. 양자역학은 태양에서 오는 에너지 흐름을 정의한다.

태양에서 방출된 하나의 광자가 지구상의 한 분자의 전자와 상호작용하면, 전자는 높은 에너지 준위로 상승했다가 0.00000001~0.000000001초 안에 안정상태로 다시 떨어진다. 생명은 고에너지 상태의 전자를 포착하고 다시 자체적인 기전으로 안정상태로 되돌려 놓는 두 과정 사이에서 일어나며, 그때 방출된 에너지를 생명체 유지에 사용한다.

따라서 근육과 뇌, 샘, 장기를 비롯한 모든 것을 작동시키는 에너지는 그림 2에 요약된 바와 같이 태양에서 비롯된다. 에너지 광자는 태양에서 1억5000만 km를 이동한 후 지구에 도달하고 녹색식물의 잎에 있는 엽록소 분자의 전자와 상호작용한다. 광자의 에너지를 받아들인 전자는 여기상태가 된다. 쉐트죄르지는 이 여기된 이동성 전자를 E^* 로 구분했다(그림 3). 이 여기 또는 “흥분한” 전자는 반응중심 reaction center이라고 하는 특수한 엽록소 분자에 도달할 때까지 뜨거

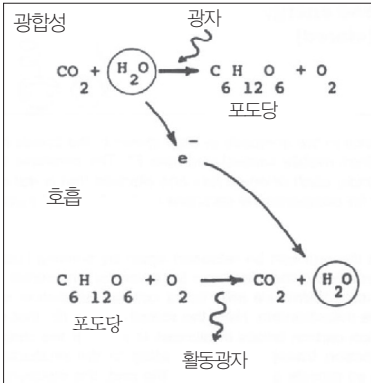


그림 2. 태양으로부터 녹색식물의 엽록소에 유입된 에너지가 동물세포의 호흡 또는 산화적 대사로 이동하는 과정을 나타낸 흐름도

운 감자처럼 한 엽록소 “안테나 antenna”에서 다른 엽록소로 이동한다. 반응중심에 도달한 여기전자는 전자운반사슬을 따라 이동하면서 여기에너지 E*를 뺏기게 되며, 이 추출된 에너지는 ATP의 고에너지 인산결합을 형성하는 데 사용된다. 즉, 이 분자는 이산화탄소와 물에서 포도당과 산소를 형성하는 과정에 에너지를 공급한다.

센트죄르지는 포도당 분자에 저장된 고정성 에너지를 (E)라고 했다. 기본적으로 태양에서 온 에너지는 당분자의 화학적 결합에 포착 또는 저장된다. 이 분자들은 녹색식물의 에너지 저장물질인 녹말이나 셀룰로오스와 결합할 수 있다. 녹말과 결합된 엽록소 분자의 전자는 대체되어야 한다. 대체전자는 그림 2와 같이 물에서 생성되며 이 반응으로 산소가 유리된다.

태양에서 온 광에너지는 빛과 열을 생산하는 식물 연소(산화)로 다시 한 번 유리될 수 있다. 또는 동물에게 먹히기도 한다. 이 경우, 에너지는 단계적 ‘연소’를 통해 천천히 유리되며 이 과정을 세포

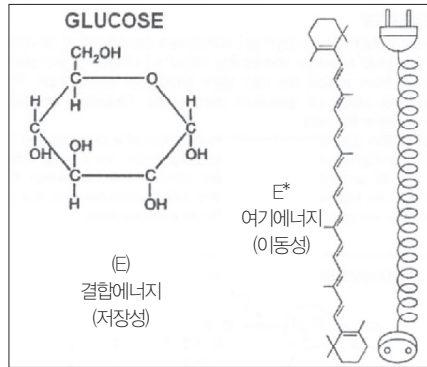


그림 3. 센트죄르지는 포도당 분자에 저장된 고정성 에너지를 이동성 여기전자 E*와 구분하기 위해 (E)라고 했다. 오른쪽의 카로틴(carotene) 분자는 여러 개의 이중결합을 가지고 있으며, 각 결합에는 결합에 고정되지 않고 자유롭게 움직이는 전자가 하나씩 존재한다. 오른쪽은 센트죄르지가 카로틴 분자를 토스터기의 전선에 비유한 그림이다.

호흡cellular respiration 또는 산화적 대사oxidative metabolism라 한다. 이 과정은 미토콘드리아에서 일어난다. 미토콘드리아는 본래 태양에서 유래한 저장된 에너지 (E)를 포도당의 탄소-탄소 결합에서 유리시키고 전자운반사슬을 통과하는 이동성 여기전자 E*를 회수함으로써, 근수축과 같은 생리학적 과정에 에너지를 전달하는 ATP를 생산한다. 결국 동물세포에서 에너지를 모두 소모한 전자는 그림 2 하단에서 볼 수 있듯이 물이 된다.

식물의 엽록체와 동물의 미토콘드리아는 서로 닮은 꼴임을 알 수 있다. 엽록체에서는 태양에서 온 광에너지가 전자운반사슬을 지나는 동안 여기전자 E*가 되면 포착하여 식물의 세포활동에 사용할 ATP를 만들고, CO₂와 H₂O의 결합으로 포도당 분자가 형성된다. 여기에 에너지 E*는 포도당의 화학결합에 저장되는 에너지 (E)로 전환된다. 동물의 미토콘드리아에서는 포도당의 화학결합이 절단되고 저장된 에너지 (E)가 유리된다. 이동성 여기전자 E*는 전자운반사슬을 통과하면서 미토콘드리아 내막 주변에 양성자 구배를 형성한다. 미토콘드리아 내막에 삽입되어 있는 ATP synthase 분자는 양성자 구배에너지를 사용하여 생리학적 과정에 사용되는 ATP를 생성한다.

전체적인 기전은 여러 방식으로 만족스럽게 설명되었으나, 몇 가지 해결되지 않은 문제들이 미국 뉴욕 과학 아카데미New York Academy of Sciences에서 개최된 심포지엄에서 제기되었다⁹⁾. 한 가지 핵심 주제는 에너지를 생산위치(미토콘드리아)에서 소비위치(근육의 마이오신 가교결합 등)로 전달하는 기전을 밝히는 것이었다. 심포지엄에서 논의된 주제 중 하나는 충분한 시간과 노력을 기울였을 때 생물에너지론의 개념으로 미해결 문제를 해결할 수 있을지, 아니면 새로운 관점과 기술이 필요할지에 대한 문제였다. 이는 장수에 핵심적인 역할을 하는

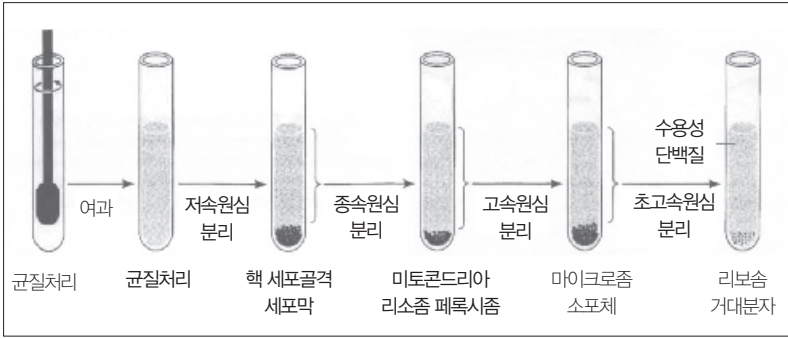


그림 4. 균질처리한 조직을 여러 속도로 원심분리하면 세포성분을 분리할 수 있다. 미토콘드리아와 같은 각 소기관을 분리 및 순수분리할 수 있다. 또 다른 기법으로 소기관을 파쇄하고 전자운반에 관여하는 효소와 같은 분자성분을 분리할 수 있다.

면역기능 등의 생체 과정의 에너지론에서 대단히 중요한 문제이다.

돌이켜 생각해 보면 미해결 주제들의 이유를 알 수 있다. 벨기에의 알베르 클로드 Albert Claude, 록펠러대학의 크리스티앙 드 뒤브 Christian DeDuve, 예일의과대학의 조지 팔레이드 George Palade는 엽록체와 미토콘드리아의 전자운반사슬 연구, ATP가 세포활동을 일으키는 방식에 관한 연구로 1974년 노벨상을 수상했다. 이들의 성과는 엽록체와 미토콘드리아와 같은 소기관들의 분자성분을 분리하여 연구할 수 있는 기술에 관한 것이었다(그림 4). 여러 차례의 원심분리로 세포에서 미토콘드리아를 분리할 수 있었다. 그런 다음, 다른 기법을 적용하여 미토콘드리아를 분쇄하고 중간대사와 전자운반사슬에 관여하는 분자복합체와 개별 분자들, 세포막층을 분리할 수 있었다. 이 분자들에 관한 연구는 에너지 운반의 역할을 크게 발전시켰다. 그러나 쉐네프르지가 언급한 분자적 접근법, 즉 '생명에 접근하려고 할 때 모든 수준의 조직들이 동등하게 중요하며 전체를 알아야 한다'는 개념을 되새겨 보는 것이 좋다.

뉴욕 과학 아카데미 심포지엄에서 논의했던 에너지 운반 문제도 부분적으로 제기되었다. 분자적 접근법의 막대한 성공으로 세포골격, 세포주변구조, 결합조직 바탕질과 같은 조직 수준과 그보다 더 낮은 전자와 양성자 수준까지 접근이 가능해졌기 때문이다. 세포와 조직의 뼈대는 각각 세포골격과 세포 외 단백질로 구성되며, 분자 수준을 우선적인 관심사로 삼는 생화학 연구에서는 일반적으로 폐기된다. 대부분의 생화학자들은 에너지 대사가 단 2개의 전자운반사슬(엽록체, 미토콘드리아)에서 이루어진다는 데 만족했으며, 전자운반사슬에 대한 연구도 거의 여기에 한정되었다. 쉐트죄르지는 세포 및 조직의 뼈대를 에너지 및 정보 전달체로 보고 그 속성을 연구한 얼마 안 되는 사람 중 하나이다.

전자운반사슬을 살펴보면 여기전자 E^* 와 양성자 (H^*)가 세포 내 다른 부위, 인접세포, 조직으로 이동 및 운반되는 방식을 알 수 있다는 점도 좋은 이유이다. 쉐트죄르지는 질병 및 임상의학의 개념에서 잃어버린 고리를 이해할 수 있을 것이라는 강력한 신념으로 연구를 시작했다. 소수의 생물학자와 생물의학자들만이 쉐트죄르지의 뒤를 이어 양자물리학 분야에 뛰어들었기 때문에 개념은 잘 알려지지 않았다. 아래에는 노화의학에 관계된 임상적 응용 사례와 관점을 요약 제시하였다.

세포와 조직 뼈대를 구성하는 단백질은 전기적 반도체

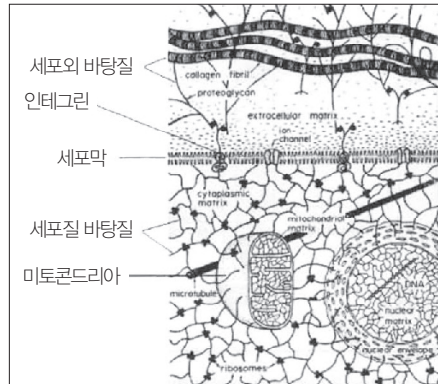


그림 5. 생체 매트릭스(바탕질)은 세포의 결합조직과 세포골격요소로 구성된다. 바탕질은 세포표면에 넓게 분포한다. 핵과 미토콘드리아도 내부에 바탕질을 가지고 있다.

이며 이 단백질에 결합된 수화층은 양성자를 전도한다는 중요한 사실이 발견되었다. 그리고 두 종류의 전하운반과정인 전자와 양성자 운반과정은 서로 상호작용을 일으킨다¹⁰⁾. 따라서, 엽록체와 미토콘드리아가 생성하는 두 에너지 물질이 이동성 여기전자 E^* 와 양성자(H^*)를 소기관 밖으로 옮기고 더 먼 거리로 에너지를 전달할 수 있다고 생각할 수 있다. ATP는 미토콘드리아에서 필요로 하는 곳으로 확산될 수 있지만, 마이오신 가교결합과 같은 구조는 비교적 느리게 임의적인 과정으로 확산된다. 전자와 양성자는 훨씬 높은 속도로 에너지를 전달함으로써 ATP의 역할을 증가시키고, 세포 및 조직 뼈대는 방향성 흐름을 위한 채널로 작용한다.

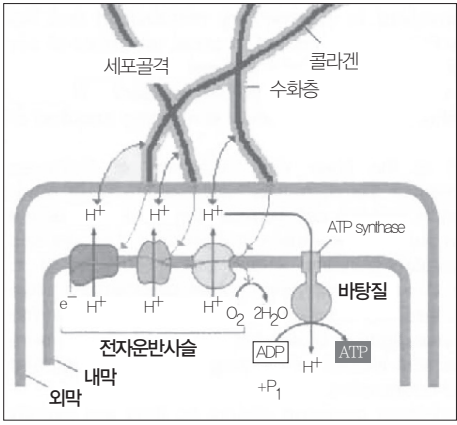


그림 6. 미토콘드리아 막과 내막의 전자운반사슬 세부도. 전자운반은 수소이온구배를 형성하는 것으로 여겨진다. 이 수소이온 일부가 세포골격 단백질 주변의 수화층으로 운반되고 여기전자는 세포골격 단백질을 통해 미토콘드리아에서 반전될 수 있는 것으로 보인다.

그림 5와 그림 6은 여기에서 설명한 개념을 요약한 것이다. 첫째, 여러 연구들이 세포골격과 미토콘드리아 간의 구조적, 기능적 관계를 밝혔다(그림 5 참조). 수많은 미토콘드리아 연구로부터 이 소기관이 외막과 내막으로 이루어져 있으며, 이 막들은 서로 다른 속성을 가진다는 것을 알고 있다.

내막에 삽입된 효소들은 전자운반을 담당한다(그림 6). 미토콘드리아의 외막은 비교적 다공성이다. 따라서 전자운반과정에서 미토콘드리아의 외막으로 운반된 양성자 (H^*)가 여기에 고정되어야 한다. 세포골격 필라멘트 주변의 수화층은 세포막

을 통해 양성자를 세포 전체와 인접 조직에 전달하기에 이상적인 도체이다. 마찬가지로, 이동성 여기전자 E^* 는 반도체성을 가진 세포골격 단백질에 의해 획득되고 멀리 떨어진 곳으로 전달된다. 또한, 에너지는 솔리톤(soliton) 등의 수단으로 세포골격을 통해 운반될 수 있다는 의견이 제시되었다^{15),17)}. 이 경로들은 양방향으로 작동하며, 여기전자를 미토콘드리아 밖으로 운반하고, 외부에서 공급된 전자를 미토콘드리아에 공급할 가능성이 높다. 이러한 기전들은 아래 글에서 알 수 있듯이 노화방지의학에도 적용할 수 있다.

노화방지의학과 관련성

노화방지의학(anti-aging medicine)의 관점에서는 체내의 에너지 저장, 적절한 에너지 공급 및 순환을 유지함으로써, 필수 과정들을 통해 최적의 생활 기능을 유지할 수 있는 인자에 관심이 집중되고 있다. 앞서 우리는 체내의 에너지 생산 및 활용의 생화학적, 생물물리학적 관점을 살펴보았다. 증거에 따르면 양성자와 전자의 이동은 신속하게 일어나며 에너지를 신체 전체에 분포시키는 과정이다. 생체 매트릭스를 통해 이동하는 전하입자들의 능력은 노화방지의학과 관련성을 가진다. 이동성 전자들의 항산화 성질 때문이다. 최근 질병의 염증이론은 생의학 연구의 주요 연구분야 중 하나가 되고 있다. 일반적으로, 소위 노화라는 질병을 비롯해 만성염증 및 만성질환은 서로 긴밀한 관계를 가지고 있다고 여겨진다. 질병상태와 염증의 상관관계를 밝히기 위해 수많은 연구가 실시되었지만, 기전에 관한 이론은 얼마 되지 않는다. 아래에 다양한 증거에 기반한 논리적이고 시험 가능한 이론들을 소개하고자 한다.

항산화제로서의 전자

자유전자 또는 이동성 전자는 궁극적인 항산화제로 알려져 있다^{10),19)}. 이들은 앞서 언급했듯이 센트죄르지가 설명한 여기전자 E^* 이다. 가장 중요한 증거 중 일부는 다소 놀라운 새로운 연구에서 비롯되었다. 그 중 하나는 사람이 맨발로 대지 위를 걸을 때, 그리고 수면 중에 바닥과 연결되어 있을 때 일어나는 변화의 성질을 연구한 내용이다. 초창기 연구에서는 신체가 수면 중에 대지와 연결되면 일일 코르티솔(cortisol) 리듬이 정상화되고 수면을 개선하는 것으로 나타났다²⁰⁾. 그 외에도 고통 및 염증 감소와 같은 여러 가지 효과가 기록되었다. 또한, 신체가 대지와 연결되면 이로운 생리학적 변화가 즉시적으로 일어난다^{21), 22)}. 세발리에(Gaetan Chevalier) 박사와 동료들은 그림 7과 같이 발바닥의 움푹 패인 곳에 전도성 패치를 연결하는 일련의 연구를 실시했다. 이는 대지에 연결되는 시간을 정밀하게 조절하고 연결

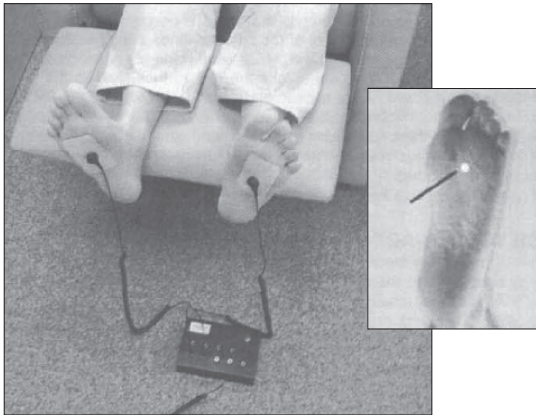


그림 7. 대지에서 사람으로의 전자 흐름을 연구하는 기법. 전도성 패치를 발바닥의 움푹한 부분에 부착한다. 건강한 식물 근처의 흙에 꽂은 접지봉과 이 패치를 선으로 연결하고, 지표면의 자유전자가 원활하게 공급되도록 한다. 오른쪽 사진과 같이 용천혈에 전도성 패치를 붙이고 있다. 출처: Chevalier와 Mori, 200822. 사진 사용을 허가해주신 세발리에 박사와 모리 박사에게 감사드립니다.

전후의 다양한 생리학적 변수를 기록하기 위한 것이다. 대지에 연결 되었을 때 항염증 효과가 발생하는 것은 대지에 여기전자와 이동성 전자 E^* 가 풍부하기 때문이다. 항염증 효과의 증거는 의료용 적외선 영상장치 연구²³⁾, 대지에서 신체로의 전자기동에 관한 연구²⁴⁾, 수면 개선에 관한 연구²⁰⁾, 우수한 운동선수의 신속한 부상 치유에 관한 연구^{18),19)}에서 획득한다.

그림 7에 나타난 전도성 패치의 위치는 발바닥에 있는 용천혈과 일치한다. 침술의 효능에는 의구심이 들지라도, 대지와 발의 연결에 관한 연구는 침술의 진화적 기원과 생리학적 의의에 관해 일관적인 증거를 제시하고 있다. 간단히 말하자면 용천혈은 맨발이 지표면의 에너지 전자 E^* 를 흡수하여 전신으로 자유전자를 퍼뜨릴 수 있는 지점으로 보인다¹⁸⁾.

상술한 개념은 ‘염증 대비inflammatory preparedness’ 개념으로 이어진다. 연속결합조직, 세포 바탕질, 핵 바탕질로 이루어지는 생체 매트릭스가 항염증 전자를 분배하는 시스템으로 작용한다는 것이다. 이 전자들은 기본물질인 고분자 전해질polyelectrolyte 또는 글리코사민글리칸glycosaminoglycan으로 구성된 전신의 저장소에 저장되며 전신으로 전달된다^{25),26)}.

상처가 생기면 우리 몸은 부상 부위를 차단하고 면역계가 고반응성 산소와 질소족을 부상 부위로 전달하여 병원체를 파괴하고 손상된 세포와 조직을 분해하는 것으로 잘 알려져 있다. 부상 부위에서 자유라디칼이 유리되고 인접한 건강 조직 및 세포를 손상시키면 만성염증이 일어나는 것으로 알려져 있다²⁶⁾. 세포외, 세포내, 핵내 생체고분자biopolymer 또는 기본물질은 전신의 전하입자 저장소로서 유기체 전체의 전기적 항상성homeostasis과 “염증 대비”를 유지한다. 기본물질의

투과성 해부학적 분포는 자유롭게 이동하는 이동성 전자 E*와 마찬가지로 신체 내외의 손상 부위를 보호한다. 대지와외의 연결이 장기간 차단되는 등의 이유로 기본물질 저장소가 고갈되면, 손상 부위에서 유리된 자유라디칼이 건강 조직, 세포, DNA를 손상시킬 수 있다. 따라서 면역계의 정상 기능인 염증 대비가 저해된다.

전자기 요법

전자의 염증 감소 역할에 관한 특이한 두 번째 연구는 전하입자를 조직 내에서 이동시키는 다양한 장치들이다. 이 연구는 매우 오래 전에 시작되었다. 핵심 연구 분야 중 하나는 불유합 골절non-union fracture이라고 알려진 심각한 의학적 문제를 해결하고자 하는 노력이다. 1812년, 런던 성토마스 병원의 한 외과의사는 골절 간극에 바늘을 삽입하고 ‘전기 유체electric fluid’를 집어넣었다. 1800년대 중반까지 전기 자극은 지연성 골절의 치료 방법으로 받아들여졌다. 1800년대 후반에는 전기적 및 자기적 치료 장치가 암부터 감기까지 거의 모든 증상의 치료법으로 큰 인기를 끌었다. 이러한 상황은 결국 반발을 일으켰다. 1906년에 식품의약품위생법Pure Food and Drug Act이 통과되었고 1910년에는 과학을 의학 및 임상 교육의 기초로 삼은 플렉스터Flexner 보고서가 발행되었다. 전기골자극을 비롯한 모든 전기치료법들은 과학적 증거가 부실한 것으로 선언되었고 임상에서 법적으로 금지되었다²⁷⁾. 이는 효과가 없었기 때문이 아니라, 과학적 연구에 기반하지 않았기 때문이었다. 당시까지는 무작위 임상시험이 고안되지 않았다. 이 시험은 1980년대 들어 시작되었으며, 1987년부터는 골절 부위에 전류를 흐르게 하는 생체이식기기를 규정으로 승인하게 되었다. 체외에 코일을 대고 펄스 자기장으로 골절 부위에 전류 흐름을 유

도하는 방법이였다²⁸⁾. 코일은 조직 내에 전류 흐름을 유도한다. 이 비 침습적 방법은 외과수술의 필요성을 없앴고 다중심 임상시험에서 안전하고 효과적인 것으로 나타났다. 현재는 이식전기자극과 체외자기 코일의 두 가지 방법이 불유합 및 지연 골절에 널리 사용되고 있다. 또한 펄스 전자기장 치료PEMF: Pulsed Electromagnetic Field Therapy도 기타 조직의 치유에 적용되고 있다²⁹⁾.

자기장은 체내에 진단용 또는 치료용 에너지(미세전류)를 주입한다. 일반적인 교과서는 패러데이의 유도법칙이라는 전자기장 원칙 중 하나를 소개한다. 이는 시간 경과에 따라 변경되는 자기장이 주변의 전하를 이동시킨다는 원칙이다. 생체에서 저주파수 전류의 1차 전하 전달자는 전해질이라고 여겨진다. 전해질은 나트륨, 칼륨, 염소 이온과 같은 전하 이온으로 혈액과 체액에 풍부하다. 고주파수일수록 중요해지는 다른 기전은 전자와 양성자(H⁺)와 같이 매우 작고 생체 매트릭스와 물을 통해 전달되는 전하입자이다(그림 6 참조).

생물물리학적 연구에 따르면 세포와 조직은 중성자를 탈분극시키는데 필요한 것보다 훨씬 약한 전기신호에 반응하여 발열하거나 전리된다³⁰⁾. 또한 자기장은 쌍극물질dipolar molecule(순전하를 가지지 않으나 전하 분포가 불균등한 분자)의 구조를 구부리거나 회전하거나 변경할 수 있다. 즉, 효소반응과 세포행동은 자기장에 영향을 받는 것으로 예상된다³¹⁾.

미세전류가 쥐의 피부세포에서 ATP 생성, 단백질 합성, 세포막을 통과하는 아미노산 운반을 자극한다는 증거도 존재한다. 이러한 관찰 결과는 바탕질을 통한 전자의 이동이 ATP 합성에 관여하는 전자운반 사슬을 포화시키고 ATP 합성량을 증가시키는 기전이라고 간단히 설명할 수 있다.

마지막으로, 골조직 및 기타 조직 치료에 펄스전자기장치료를 사용하는 경우 중요한 점은 주파수 특이적 과정이라는 것이다. 또한 환자마다 주파수를 달리 사용해야 한다는 증거도 있다. 대부분의 환자에서 효과가 없는 주파수가 어떤 환자에서는 효과가 있을 수 있다^{33),34)}. 다음은 상술한 원칙들과 함께 개인에 따라 주파수를 조정하는 시스템에 관한 내용이다.

ONDAMED® 시스템

지금까지 제시한 정보들을 활용하여 현대의 치료기기들로 얻는 결과를 설명해보자. 예를 들어 ONDAMED®시스템은 환자의 질환이나 질병에 진단명을 요구하지 않는다. 대신, 환자의 증상을 에너지 균형의 관점에서 설명하고 적절한 주파수와 낮은 수준의 펄스 전자기장으로 교정한다. 이것은 ‘진단 충격’에 대한 우려가 점차 늘어가고 있는 가운데, 다른 치료법과의 대단히 중요한 차이이다. 환자에게 심각한 질병을 앓고 있다고 알려주면 감정적 반응이 일어난다. 진단 충격은 면역계가 가장 필요한 시기에 이를 억제시키는 우울증과 같은 감정적 상태를 유발하여 치료과정을 지연시킬 수 있다.

ONDAMED® 시스템의 작동은 여러 곳에서 찾아볼 수 있고³⁵⁾, <Anti-Aging Therapeutics>지와 <Anti-Aging Medical News>지에 발표했던 논문에서도 다루었다^{36),37)}. 이 장치는 신체의 전기전자적 측면의 성질에 대한 이해도를 높여주며, 독일 연구자들과 의사들은 지난 50년 동안 이 분야에서 뛰어난 업적을 세웠다. 치료과정은 신체를 다양한 주파수와 매우 낮은 수준의 전자기장에 노출하는 것으로 시작되며, 주파수는 혈관계자율신호VAS: Vascular Autonomic Signal라고 하는 기법으로 개인의 반응을 토대로 결정한다. 기본적으로 VAS

는 신체의 반응을 ‘듣는’ 매우 민감한 기법이다. 전세계 각지의 다양한 치료센터들이 의사들에게 VAS를 읽고 스트레스가 가해진 신체 부위에 국한하여 사용하는 방법, 스트레스의 원인, 화학적 불내성, 가장 이로운 증재법을 훈련시키고 있다. 1966년 프랑스 리옹의과대학의 폴 노지에 Paul Nogier 박사는 환자의 귀 중 어떤 지점을 한 번 치면 VAS가 방사형 펄스(RAC: 프랑스어로 Reflexe Auriculo-Cardiaque, 영어로 Autonomic Circulatory Reaction)로 발생한다는 것을 발견했다. 이에 이어 노지에는 동맥계통이 신체의 핵심 생리학적 계통에 일어나는 다양한 변화에 대해 반복적으로 반응한다는 것을 발견했다. 구체적으로 언급하자면, VAS는 교감신경과 부교감신경의 작용으로 전신의 동맥벽의 평활근 긴장도가 신속하게 변화하는 것이다^{38),39)}. 또한 준임상 문제를 조기에 경고하기도 하므로, 증상이 임상적으로 뚜렷하게 나타나기 전에 문제를 발견할 수 있다. 이는 장수와 뚜렷한 관계를 가진다.

그림 8은 ONDAMED® 장치, 그림 9는 휴대용 방사기 applicator이다. 방사기로 에너지 차단 또는 결핍 또는 불균형이 있는 신체 부위를 찾고 균형 회복에 필요한 자극 수준을 결정할 수 있다. 기존의 진료를 강화하기 위해 이 시스템을 활용하는 의사와 의료전문가들이 늘어나고 있다. ONDAMED®는 허가된 의료전문가의 처방으로만 사용하므로, 정기 진단 또는 치료의 대응으로 사용할 수 없다. 대신, 일반적인 의료기술로 치료하기 어려운 증상에 최대의 가치를 드러낸다. ONDAMED®는 수많은



그림 8. ONDAMED® 시스템은 환자의 질환이나 질병에 진단명을 요구하지 않는다. 대신, 환자의 증상을 에너지 균형의 관점에서 설명하고 적절한 주파수와 낮은 수준의 펄스 전자기장으로 교정한다. 휴대용 방사기를 사용하여 치료가 필요한 신체 일부를 찾을 수 있다(그림 9).

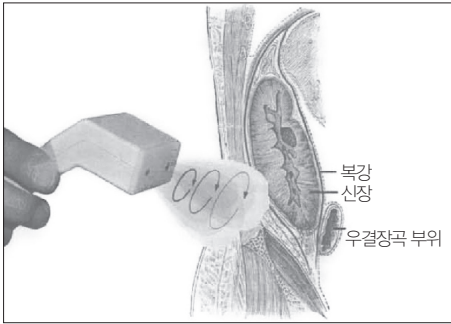



그림 9. ONDAMED® 시스템에 사용하는 휴대용 방사기. 방사기로 에너지 차단 또는 결핍 또는 불균형이 있는 신체 부위를 찾고 균형 회복에 필요한 자극 수준을 결정할 수 있다.

은 치료 방법으로도 개선되지 않아 지친 환자들에게 귀중한 도구로 입증되고 있다. 과거에는 최선을 다해도 진전되지 않아 의사에게 실망하는 경우가 많았다. 이 도구는 특히 난치성 질환을 매우 만족스럽게 해소한다.

이 글에서 논한 정보는 저수준 펄스장의 효과가 조직 내 전하를 “움직이게 하고”, 국소적인 만성염증 부위에 유입되도록 하는 기전을 설명한다. 동시에, 세포와 미토콘드리아에 이동성 전자 유입을 자극하고 전자운반사슬을 포화시켜 ATP 수준을 증가시키는 것으로 여겨진다. 성공적인 면역반응에는 부상 부위로의 세포 이동, 다양한 단백질 분비, 파편의 섭취 및 소화할 에너지가 필요하다. 마찬가지로, 손상된 세포를 대체할 세포 분열에도 에너지가 필요하다. ATP 생성이 감소하면 이들의 과정도 낮아지는데, 적절한 치료로 전자 활용율을 증가시키면 신속하게 반전되어 만성염증을 해소하고 ATP 생성을 자극하는 것으로 보인다.

맺음말

최적의 건강, 활력, 장수는 체내 에너지 시스템의 구조적 및 기능적 무결성을 유지하는 데 중요하다. 특히 면역계의 다양한 활동에 에너지를 공급하는 시스템에 관심이 모아지고 있다. 본 논문은 이러한 에

너지 시스템에 대한 다양한 관점과 전하입자 저장소이자 항산화 전자를 체내 및 체외의 부상 부위로 신속하게 전달하는 매질로서의 생체 바탕질의 역할을 소개했다. 지표면은 이동성 전자의 원천으로서 맨발 일 때 이익을 얻을 수 있다. 사람과 대지가 연결되어 있을 때 일어나는 생리학적 변화에 관한 연구는 대지의 여기전자가 경락을 통해 전신으로 전달되는 상세한 기전을 밝힌다. ONDAMED와 같은 전자기 치료기법은 염증부위와 그 주변조직의 전자를 움직이게 하는 것으로 보인다. 염증가설은 특히 전자기장 주파수를 각 환자에 맞춰 조절하고 해당 신체 부위에 집중시켰을 때 펄스 전자기장 치료법으로 광범위한 증상들이 치료되는 기전을 설명한다. (끝) 

- 이 글은 『Mitochondria and Cellular Aging』에서 발췌하였습니다.
- 이 글은 미내사의 허락 없이 무단 전재나 재배포를 할 수 없습니다.

저자 | **제임스 오슈만**(James L. Oschman, Ph.D.) | 자연연구협회 협회장이며 에너지의학의 권위자다. 피츠버그 대학교에서 생물물리학 학사, 생물학 박사 학위를 받았다. 세계 곳곳의 주요 연구실에서 연구했으며 세계적 권위의 저널에 다수의 논문을 발표했다. 그의 저서 『놀라운 에너지의학의 세계』는 다양한 테라피에 논리적이고 과학적인 토대를 제공한다. 『에너지의학』에서는 최상의 경기력을 보일 때 인체가 어떻게 기능하고 테라피를 실시할 때 인체가 어떻게 반응하는지에 대한 새로운 통찰을 보여준다. 그의 연구는 헬스케어 종사자에게 관련 분야에 대한 이해를 깊이 하는 데 이바지한다. 첨단 의료기기 및 에너지의학 기기를 개발하는 데에도 몸담고 있다. 국립대체의학재단 과학자문단(Scientific Advisory Board for the National Foundation for Alternative Medicine)에 소속된 자문위원이며 국립대체의학재단 설립자상을 수상했다. 롤프 인스티튜트(Rolf Institute)에서 공로상(Distinguished Service Award)도 수상했다.

옮긴이 | **이명수** | 「지금여기」 번역위원, 고려대학교 화학과 졸업, 고려대학교 과학철학 석사과정 수료, 과학전문 프리랜서 번역가로서 과학대중화를 위해 노력하고 있다.

옮긴이 | **이명수** | 「지금여기」 번역위원, 한국 한의학 책임연구원