

초청논문

전자파와 인체세포의 생리

강 위 생

서울대학교 의과대학 치료방사선과학교실

I. 서 론

세포는 생명체의 가장 기본단위이다. 식물은 태양 에너지를 변환하여 화학에너지의 형태로 축적한다. 모든 생물은 이 화학에너지를 변환하여 생명을 유지하고 있다. 인체 세포는 이 화학에너지를 변환하여 세포 자체의 구조를 유지하면서 체온을 유지하고, 근육수축과 같은 기계적인 일과 신경전달과 같은 전기적인 일도 한다. 또 세포는 새로운 화학물질을 합성하기도 한다.

세포에 이상이 생기면 조직이나 기관의 이상이 따르게 되고 결국 병적인 상태에 이르게 된다. 외부 환경이 세포의 기능에 영향을 미치는 것 중의 중요한 요인이다. 세포에 대한 외부환경은 세포를 둘러싸고 있는 세포외액과 몸밖에서 들어오는 방사선이나 열과 같은 물리적 에너지로 대별된다. 영양의 불균형이나 섭취한 물질은 세포외액의 항상성 유지를 방해한다. 방사선, 특히 이온화 방사선은 직접 세포속에서 중요한 분자를 분해시키기도 하고 새로운 분자를 합성하기도 하여 세포를 죽이기도 하고 세포의 기능을 비정상적으로 바꾸기도 하고 드물게는 암세포로 바꾸기도 한다. 열은 단백질의 변성을 촉진한다.

산업정보사회란 말이 전혀 어색하지 않은 사회에 우리가 현재 살고 있다. 오늘날 전력과 통신은 공기와 마찬가지로 우리의 생활에서 떼어놓을 수 없는 수단이다. 현재 대부분의 장치는 전력을 이용하고 있고, 통신은 전파에 크게 의존하고 있으며, 계속해

서 전력과 전파 의존도가 증가할 것이 틀림없다. 우리 나라에서 전력은 주파수가 60 Hz인 교류이다. 전력 공급을 위해 설치된 송전선이나 배전선 주위에는 부수적으로 60 Hz의 전파가 발생된다. 조리나 열처리를 위해 전파를 이용하는 장치도 있지만, 목적과 관계없이 전파를 방출하는 다양한 전기·전자제품이 있다. 결과적으로 너나 없이 인공적인 전파속에 살고 있다.

Wertheimer와 Leeper^[1]가 1979년에 고압 동력선에서 발생되는 60 Hz, 0.2 μ T의 자장이 어린이 백혈병의 중요한 원인이 되고 있다고 발표한 이래 전자파의 유해성과 무해성에 대한 대량의 연구결과들이 발표되고^[2] 있다. 그렇게도 많은 연구에 의해서도 아직은 이렇다 할 결론에 이르지 못하고 있는 실정이다.

전자파에 의한 인체에 미치는 영향을 열적인 것과 비열적인 것으로 대별하고 있다. 사람이 열기를 느끼지 못하는 정도이면 전자파의 열적 효과가 없다. 일상적으로 이용하는 전자·전기제품이나 전력선 주변에서 열기를 느끼지는 않는다. 그러므로 전파로 말미암아 병이 생겼다면 그것은 전자파의 비열적 효과일 것이다.

세포의 생리와, 전자파가 세포의 생리에 미칠 수 있는 비열적 효과에 대해 알아보려고 한다.

II. 인체세포의 생리

인체세포의 크기는 대략 10 μ m이고, 사람은 약

10¹⁴개의 세포로 구성되어 있다. 세포는 세포막에 의하여 외부와 구분된다. 세포 내외에는 여러 가지 전해질이 녹아 있는 물이 있으며 세포 안의 액체를 세포내액, 세포 밖의 액체를 세포외액이라고 한다. 세포내액과 세포외액의 이온농도는 동일하지 않다. 세포내액의 주된 양이온은 K⁺이고 주된 음이온은 단백질과 PO₄³⁻이며, 세포외액의 주된 양이온과 음이온은 각각 Na⁺와 Cl⁻이다. 세포외액은 세포가 잘 살 수 있게 온도와 삼투압, pH 등의 항상성을 유지하고 있다.

세포막은 7.5nm의 두께이며 각각 2.5nm의 두께를 가진 세 커로 구성되어 있다. 세포막의 바깥쪽은 단백질이며, 중간쪽은 지방질이며 여기저기에 구형 단백질이 있다. 바깥쪽과 중간쪽 사이에는 친수성 부분이다. 세포막의 기본적인 구조로 보아 지질용해성이 높은 산소와 탄산가스는 잘 통과할 수 있어도 수용성 물질은 통과하기 어렵다. 수용성 물질이 쉽게 통과할 수 있는 구멍(pore)이 세포막에 있으며 특히 이온이 통과하는 이온통로도 있다.

세포의 생리적인 기능은 영양물질의 흡수와 노폐물의 배설에 크게 좌우된다. 물질의 운반기전은 확산과 능동적 운반을 포함하여 여러 가지가 있다.

농도가 다른 두 용액이 접해 있으면 농도가 같아질 때까지 확산현상이 일어난다. 농도경사에 의하여 일어나는 확산속도 J 는 아래와 같이 Fick 식으로 표현된다.

$$J = -DA \frac{dC}{dx}$$

여기서 A 는 확산이 일어나는 면의 면적이고, D 와 dC/dx 는 각각 확산계수와 농도경사다.

세포막과 같이 두께 x_m 이 얇고 세포막의 내외측 농도가 각각 C_{im} , C_{om} 인 경우에 세포막내에서 확산속도는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$J = D_m A_m (C_{om} - C_{im}) / x_m$$

세포막 내측 농도 C_{im} 과 세포속 농도 C_i 는 같지 않을 것이며, 세포막 외측 농도 C_{om} 과 세포밖 농도 C_o 도 같지 않을 것이다. 분리계수(K)는 수용액에 대한 세포막의 물질농도의 비이다. 분리계수와 세포내외의 물질의 농도 C_i , C_o 를 적용하면 확산속도는 아래와 같다.

$$J = D_m A_m K (C_o - C_i) / x_m$$

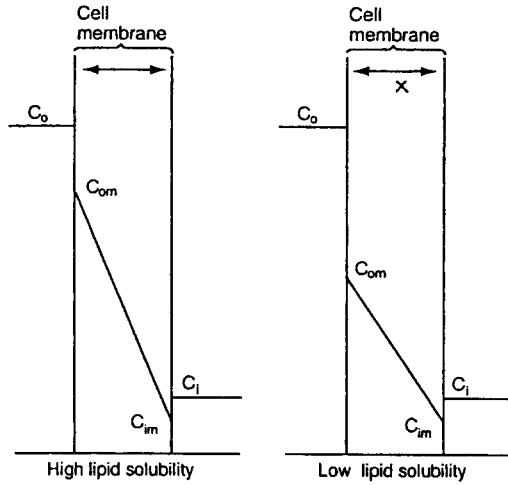
$D_m K / x_m$ 을 투과계수라 하며 세포막 및 물질에 좌우된다.

농도가 다른 두 용액 사이에 있는 막이 용질의 통과를 막는 경우 Donnan 평형에 이르게 된다. 막 양쪽 용액의 정수압이 동일하지 않고 물과 용질의 이동이 가능한 경우에는 여과가 일어난다.

세포대사에 필수 불가결한 포도당이나 아미노산 등은 구멍을 통과할 수 없는 크기인데도 지방용해도로 보아 예측되는 확산속도에 비해서도 훨씬 빠르게 세포막을 통과한다. 이와 같은 이동은 운반체에 의한 촉진적 확산이라고 하며 운반체의 농도경사에 따른 피동적 이동이다. 촉진적 확산은 농도경사에 따른 운반과 마찬가지로 에너지를 쓰지 않는다. 여러 가지 촉진적 확산이 관찰되고 있지만 운반체의 성상에 대해서는 별로 알려지지 않았다.

세포 밖에서 세포 속으로 농도경사에 반하여 분자가 운반되는 경우가 있으며 세포속 농도가 세포밖 농도의 10배까지 높게 될 정도로 운반되기도 한다. 대표적인 분자는 당류이다. 이런 분자는 대개 Na⁺ 이온과 공동운반에 의하여 세포 속으로 이동되며 그 때 에너지를 소비한다. 공동운반은 Na⁺의 농도경사에 따른 것으로 보고 있다. 공동운반이 지속적으로 일어나기 위해서는 세포내 Na⁺의 농도가 낮게 유지되어야 하며, Na 펌프가 그 기능을 맡고 있다.

세포막은 용질에 따라서 밖으로 또는 속으로 이동하는 것을 제한하는 특성을 가진 반투막이다. 반투막 양쪽의 용질농도가 다를 때 용질과 반대로 물의 농도경사가 있게 된다. 이와 같이 물의 농도경사



[그림 1] 세포막내에서 한 물질의 농도경사에 대해 지용성이 미치는 효과. 세포내외의 농도 경사가 동일한 경우라도 막내에서의 농도 경사는 지용성이 클수록 커진다.

<표 1> 세포내외의 이온농도(mM)

이온	세포내액		세포외액	
	양이온	음이온	양이온	음이온
K ⁺	155		5	
Na ⁺	12		145	
Mg ²⁺	15		2	
Ca ²⁺	<0.0002		2	
Cl ⁻		4		110
HCO ₃ ⁻		8		27
단백질 ⁻		64		15
PO ₄ ³⁻		90		2
기타		16		
합계	182	182	154	154

에 의해 물이 이동하는 것을 삼투현상이라고 한다. 삼투압 $\Delta\pi$ 는 용질의 종류나 크기에는 무관하고 농도 차이 ΔC 에 비례한다. 이 관계는 van't Hoff 식

$$\Delta\pi = RT\Delta C$$

과 같으며, R 과 T 는 각각 기체상수(8.314J/K mol), 절대온도이다.

그러나 세포막은 이상적인 삼투막은 아니고 어느 정도 용질을 통과시킨다.

세포막을 경계로 하여 삼투압 이외에 정수압의 차이 삼투압이 ΔP 가 있을 때, 세포막의 면적이 A 이고, 세포막을 통한 물에 대한 액체전도도가 L_p 이면 단위시간에 이동하는 물의 양 J_v 는 아래와 같다.

$$J_v = AL_p(\Delta P - \Delta\pi)$$

ΔP 와 $\Delta\pi$ 가 같거나 모두 0이면 J_v 가 0이 되며 그 경우에 세포의 부피는 일정하며 항정상태를 유지한다.

세포내외에 여러 가지 있지만 이온들의 농도차가 현저하다. Na⁺, Cl⁻, HCO₃⁻ 등은 세포 밖에 많고, K⁺, PO₄³⁻, 단백질(음이온)은 세포 속에 많다.

용액에서 이온의 확산속도 J 는 전기 화학적 경사를 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J = -DA \left(\frac{dC}{dx} + \frac{zCF}{RT} \cdot \frac{dV}{dx} \right)$$

여기서 z 와 F , dV/dx 는 각각 이온의 원자가, Faraday 상수(9.649×10⁴C/mol), 전압차 경사(전장의 세기)이다. 37℃일 때 RT/F 는 26.71 mV이다.

위의 식을 이용하면 이온농도차에도 불구하고 이온 이동이 없게 되는 전압차를 구할 수 있다. 그러한 전압을 Nernst 평형전압이라고 하며, 이온 X 에 대한 Nernst 평형전압 E_x 는 아래 식으로 구한다.

$$E_x = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[X^+]_o}{[X^+]_i}$$

여기서 $[X^+]_i$ 와 $[X^+]_o$ 는 각각 세포내액과 세포외액의 이온농도이다. 세포 내외에는 여러 가지 이온이 있기 때문에 세포막 내외의 전위차는 한 가지 이온에 대한 Nernst 평형전압과는 다르다. 실제로 세포 안은 세포 밖에 비하여 -70 mV 가량의 전위차를 가지고 있다. 세포막의 두께가 약 7.5 nm이므로 세포막에 형성된 전장의 세기는 약 $10,000,000$ V/m이다. 보통 좋은 절연체도 1 m당 $1,000,000$ V 이상의 전압을 견디지 못하는 것에 비교하면 세포막은 매우 큰 전압에 견디고 있는 셈이다.

세포막은 세포내액의 주된 양이온인 K^+ 과 세포외액의 주된 음이온 Cl^- 에는 비교적 높은 투과성을 보이는 반면, 세포외액의 주된 양이온 Na^+ 에는 투과성이 낮고 세포내 음이온인 단백질과 PO_4^{3-} 에는 전혀 투과성을 보이지 않는다.

세포는 세포내 K^+ 는 높게, Na^+ 는 낮게 유지하고, 세포밖 K^+ 는 낮게, Na^+ 는 높게 유지한다. K^+ 와 Na^+ 는 세포막을 통과한다. 그럼에도 불구하고 항정상태의 세포는 이 두 가지 이온의 농도차를 유지한다. 항정상태를 유지하기 위해서는 세포 속으로 들어오는 Na^+ 를 밖으로 퍼내야 하고 세포 밖으로 나가는 K^+ 를 다시 속으로 끌어들여야 한다. 이와 같은 이동방향은 K^+ 와 Na^+ 의 농도경사에 반하여 이동이 일어나야 함을 뜻한다. 농도경사에 반하여 운반되는 물질이동이 능동운반이다. 능동운반은 에너지를 필요로 한다. 모든 능동운반은 세포 내외의 농도경사 특히 K^+ , Ca^{2+} 등 세포내 활동을 조절하는 이온들의 조성을 유지하는데 중요하다.

Ca^{2+} 은 Na^+ 과 같이 이동하기도 하고 어떤 경우는 순전히 Ca^{2+} 전용의 이동 통로를 갖기도 한다. Ca^{2+} 은 세포막의 전기적 신호를 세포내 반응기관이나 장소로 전달하는 전령역할을 하며, 세포막의 전기적 특성에 중요한 역할을 한다. 세포내 Ca^{2+} 농도 증가는 K^+ 전류의 활성화와 Ca^{2+} 전류의 억제효과로 재분극을 촉진한다. Ca^{2+} 통로를 억제시키면 K^+ 전류는 순전히 막전압 변화에 의한 영향만 받게 된다.

III. 전자파 발생원

지구에는 지자기가 존재하며 적도에서 약 $30 \mu T$, 극에서 약 $70 \mu T$ 이며 위치에 따라 다르다. 우리나라에서는 약 $45 \mu T$ 이며 12 kV 배전선 주위 자장의 약 200 배이다. 태양에 의해 갑작스레 $10 \mu T$ 이상을 초과하여 자장이 증가하는 경우가 있으며 번개가 칠 때 지역적으로 자장이 크게 증가한다.

지표면에 수직방향으로 약 120 V/m의 정전장이 있으며 12 kV 배전선 주위 전장의 약 3 배이다. 지표 정전장은 지표가 가진 약 1 nC/m²의 표면전하 밀도와 관련이 있다. 천둥은 지역적으로 굉장히 강한 전장을 형성한다. 번개가 칠 때 전장의 세기는 3 MV/m이고 최대 전류는 $10\sim 20$ kA이며 공기를 이온화한다. 세계적으로 하루에 4 천 만번의 번개가 친다.

막스웰 방정식은 전자파의 시간적 공간적 의존관계를 설명하며 직류에서부터 빛의 주파수에 이르기까지 아주 잘 일치한다. 세포생물학의 범주에 드는 크기인 $1 \mu m$ 나 그 이상의 크기에 대해서는 막스웰 방정식을 믿을 만하다. 주파수가 $30\sim 300$ Hz인 극저주파(ELF)에 대해서는 막스웰 방정식의 해가 아주 간단하다. 전장과 자장에 대하여 분리하여 해를 구한 다음 시간에 대한 의존성을 곱하면 된다. 동력선에서 전자파가 발생된다고 다양한 출판물에 거론되고 있지만 의미 있는 세기의 전자파는 아니다. 전력선에 근처에서 사람이 겪을 수 있는 일은 근거리장 문제이지 복사선 문제는 아니다. 더욱이 생체분자의 결합에너지는 체온($37^\circ C$)에서 분명히 분자의 $kT(=0.027$ eV)보다 크다. 체온에 대응하는 원적외선의 어떠한 단일 빛알(광자)의 발생과정도 6 THz의 주파수가 필요하다. 분명히 전력선의 주파수는 생체분자를 이온화시킬 수 없을 정도(100 억분의 1)로 낮다.

우리 나라의 대도시에 있는 전철이 일반대중이 일상적으로 겪게 되는 자장과 전장의 가장 강한 발

생원이다. 자장이 가장 강한 지역은 전철역의 승차장 난간이다. 가장 강한 전장을 겪게 되는 경우는 비오는 날 물에 젖은 신을 신고 전철 철로 위에서 있을 때이다. 사람 신체는 주위 공기에 비해 아주 좋은 도체이기 때문에 잘 접지된 상황에서 사람의 머리 부위의 전장은 전력선 아래에서는 최대 1,200 V/m로 지전장의 약 10 배, 전철 철로 위에서는 12,000 V/m로 약 100 배이다.

IV. 인체와 전자파의 결합

인체 조직의 투자율은 공기의 투자율과 거의 같기 때문에 체내 자장은 공기중 자장과 같다. 그러나 자장은 kT 에 비해 큰 서로작용에너지가 될 정도로 센 영구자석이 있는 경우에만 중요하다. 그런 경우에도 서로작용은 일차적으로 직류에 의한 자장에 대해 의미가 있다. 체액 점성에 의한 감폭은 60 Hz의 전자장에 대하여 세포 크기의 자기쌍극자내의 결합에너지를 심하게 감소시킨다.

박테리아에서부터 해양동물과 사람에 이르기까지 생체 내에 영구자석이 있다는 것이 발견되었다. 단일자석의 자기모멘트는 약 6×10^{-17} Am²이며, 인체의 부신에서 보이는 정도의 자기모멘트와 고압선 주위의 2 μ T의 자장과 상호작용에너지는 체온에서 0.03 kT 정도이다. 그러므로 전력선에서 발생하는 자장과 직접적인 상호작용은 체온에 의한 열에 의해 무력해질 것이다.

ELF에서 공기에 대한 인체조직의 전도율과 유전율의 상대적인 값은 외부전장이 표면에서 항상 수직일 정도이며, 내부전장 E_{int} 는 공기중의 외부전장 E_{air} 보다 항상 여러 자리수 작다. 공기와 조직의 경계면에서 경계조건에 의하여 나타나는 결과이다. 조직의 전도율 σ_{int} 은 0.5 S/m이고 공기의 전도율은 거의 0이다. 유전율은

$$\epsilon_{int} \approx \epsilon = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

이며 주파수 60 Hz($\omega=2\pi f$)에 대해서 $\epsilon\omega = 3.34 \times 10^{-9}$ S/m이다. 이리하여 $\sigma_{int} \gg \omega\epsilon_{int}$, $\omega\epsilon \gg \sigma_{air}$ 라고 할 수 있으며, 그때

$$|E_{int} / E_{air}| \approx \omega\epsilon / \sigma_{int} \approx 0.67 \times 10^{-8}$$

이다. ELF 범위에서 생체물질의 전도율과 유전율의 변화는 거의 무시될 수 있다.

우중에 맨발로 전철 철로에서 있는 경우가 전장이 가장 강한 경우이며 전장의 세기는 약 12,000 V/m이다. 그 경우 체내 전장의 세기는 약 80 μ V/m이며 전류밀도는 약 40 μ A/m²이다.

자장 속에서 움직이는 전하는 속도와 자장, 전장에 비례하는 Lorentz 힘을 받는다. 지표에서 300 km 위의 궤도에서 동서로 움직이는 우주선에 타고 있는 우주인의 체내 이온은 약 0.4 V/m의 전장을 경험하게 되며, 시속 800 km로 나는 제트기에 탄 승객은 11 mV/m의 전장을 경험하게 된다. 심박에 의해 피가 분출될 때 동맥에서 혈류의 유속은 약 0.6 m/s이다. 동력선의 1 μ T의 자장은 혈류에 0.6 μ V/m의 전장 효과를 미칠 것이다. 지자기에 의한 전장은 약 27 μ V/m로서 동력선에 의한 전장의 45 배가량이다. 자장이 2 T인 진단용 핵자기공명영상(MRI)장치의 자장에 의해 환자 동맥혈류는 약 1.2 V/m의 전장효과를 받게 되고 약 0.6 A/m²의 전류밀도가 유도된다.

자장이 $B = B_0 \sin \omega t$ 와 같이 시간에 따라 변할 때 반지름이 r 인 원형고리내의 자속 $\pi r^2 B$ 에 대응하는 기전력에 의해 이온이 전장을 경험하게 된다. 이 전장의 세기 E_{int} 는 아래와 같다.

$$E_{int} = -0.5r \frac{dB}{dt} = -0.5r\omega B_0 \sin \omega t$$

60 Hz 동력선 자장 1 μ T는 반지름이 10 cm인 원형고리에 있는 이온에 약 19 μ V/m의 전장효과를 미치며 약 9.5 μ A/m²의 전류밀도가 유도된다. 이

효과는 회로의 크기에 전적으로 좌우되지만 외부전장과 맞먹을 정도이다.

세포막과 결합될 때 세포 내부 전장이 증폭된다고 Schwann^[4]이 주장하였다. 반지름 r 이 $10\ \mu\text{m}$ 이고 세포막의 두께 δ 가 $7.5\ \text{nm}$ 인 구형 세포를 고려하자. 세포막은 절연체이기 때문에 세포막에서 전장의 세기 E_{mem} 은 내부전장 E_{int} 와

$$E_{mem} \approx 1.5 E_{int} r / \delta \approx 2000 E_{int}$$

의 관계를 갖는다. ELF 전자장과 직접 결합할 때 세포에서 전압강하는 실질적으로 세포막에서 일어나며 세포막은 외부전장으로부터 세포의 내부를 보호한다.

우중에 맨발로 전철 위에서 있는 것과 같은 가장 나쁜 상황에서 $E_{int} = 80\ \mu\text{V}$ 에 대하여 세포막 전장은 E_{mem} 은 불과 $0.16\ \text{V/m}$ 이며 세포 내외액의 이온 농도에 의한 전장 $10^7\ \text{V/m}$ 에 비하면 무시될 수 있다. 동력선 주변의 $1\ \mu\text{T}$ 의 자장에서 Faraday 효과에 의하여 $10\ \text{cm}$ 반경의 고리에서 E_{mem} 은 약 $0.057\ \text{V/m}$ 상승할 것이다.

V. 조직내에서 열장

피할 수 없는 전기적 잡음이 자연에 존재한다. 가장 중요한 전기적 잡음은 열잡음이다. 열잡음은 전자와 이온의 브라운 운동에 의하여 저항체에서 일어난다. 열잡음에 관한 Nyquist의 정량적 이론에 의하면 주파수 밴드 Δf 에서 저항이 R 인 저항체에 걸린 평균자승전압은 아래와 같다.

$$\langle V^2 \rangle = 4RkT\Delta f$$

여기서 R , k , T 는 각각 기체상수, 볼츠만 상수, 절대온도이다. 이 식은 아주 일반적이어서 기체가 아닌 액체에 대해서도 적용되며, 주파수 범위는 직류에서 마이크로파에 이르기까지 굉장히 넓다.

Adair는 열잡음에 의한 세포내 전장의 세기를 어렵하기 위하여 위의 Nyquist 식을 적용하였다. 변의 길이가 d 인 정육면체인 저항체를 평판 축전기 사이에 두었을 때 비저항이 ρ 이면 저항체의 저항 $R = \rho/d$ 이고 열전장 E_{KT} 는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$E_{KT} = \frac{\sqrt{\langle V^2 \rangle}}{d} = \frac{2}{d} \left(\frac{\rho k T \Delta f}{d} \right)^{1/2}$$

체액의 비저항은 $2\ \Omega\text{m}$ 이므로 세포를 $20\ \mu\text{m}$ 의 정육면체로 가정하고 주파수 밴드폭을 $100\ \text{Hz}$ 라고 할 때 체온에서 열잡음에 의한 세포내 전장의 세기는 약 $20\ \text{mV/m}$ 이다.

열잡음에 의한 세포내 전장은 동력선에 의한 내부전장(E_{int}) 세기의 약 1,000 배이고 전철위의 가장 나쁜 상황에 의한 전장의 약 40 배이다. 세포내의 열잡음에 의한 전장과 같은 세기의 전장을 유발하기 위해서는 $3\ \text{MV/m}$ 의 외부전장이 요구된다. 그 정도의 전장의 세기는 공기중에서 불꽃방전을 일으킬 수 있을 정도이다.

동력선에 의해 유도된 전장이 세포막과 작용하여 칼슘이온(Ca^{2+}) 유출과 같은 현상을 일으켜 세포의 변화를 일으킬지도 모른다는 주장이 있다. 세포막에서 열잡음에 의한 전장을 어렵해 보는 것도 좋을 것이다. 세포를 반지름이 r 이고 두께가 δ 인 공이라고 가정하면 세포막 저항 R_{mem} 은 단순히

$$R_{mem} = \rho\delta / 4\pi r^2$$

과 같고 ρ 는 비저항이다. 세포막의 비저항은 $10^5 \sim 10^7\ \Omega\text{m}$ 이므로, $r = 10\ \mu\text{m}$, $\delta = 7.5\ \text{nm}$ 라고 할 때 세포막 저항은 $0.6 \sim 60\ \text{M}\Omega$ 이다. $100\ \text{Hz}$ 의 밴드폭에 대하여 열잡음에 의한 세포막 전장 $E_{mem, KT}$ 은 $135 \sim 1,350\ \text{V/m}$ 이며 세포막전장의 주된 불확정성이다. 이 값은 가장 나쁜 경우의 자장에 대해 계산된 전장의 $150 \sim 1,500$ 배이다.

VI. 결 론

세포막은 지방질로 되어 있어서 지용성 물질의 이동은 쉽지만 수용성 물질의 이동은 어렵다. 그러나 수용성 물질의 이동을 가능하게 해 주는 구멍이 세포막에 존재한다.

세포 내외로 물질의 이동은 확산과 운반체에 의한 촉진적 확산, 이온펌프에 의한 능동적 이동, 다른 이온과 공동운반에 의하여 일어난다. 세포 내외로 물의 이동율은 정수압과 삼투압의 차이에 비례한다.

세포 내외의 각 이온농도는 Nernst 평형을 유지하며 이온농도의 차이로 인해 세포막에는 10^7 V/m의 전장이 형성되어 있다.

전파는 분자를 직접 이온으로 만들기에는 에너지가 아주 낮으며, 그렇다고 체내에서 방전을 일으킬 정도로 전장이 강하지도 않고 세포내액이나 세포막에서 열잡음에 의한 전장에 비해서도 약하다.

체액의 전도율이 외부공기에 비해 여러 자리 수만큼 크기 때문에 체액 내부의 전장의 세기는 전자파의 공기중 전장에 비해 무시할 수 있을 정도로 약하다.

세포막의 전도율이 세포내액의 전도율에 비해 무시할 수 있을 정도이기 때문에 외부전장에 대해 전압강하는 세포막에서 일어난다.

동력선 전자파가 혈류 이온에 미치는 전장의 세기는 $0.6 \mu\text{V/m}$ 로서 체트기를 타고 갈 때에 비해 약 2만분의 1, 핵자기공명영상장치 속에 있을 때(1.2 V/m)에 비해 약 2백만분의 1이다.

전장과 자장이 세포막 내외로 이동시킬 수 있는 물질은 이온이다. 사람이 일상적으로 겪게 되는 전장과 자장은 세포막 전장에 비하여 무시할 수 있을 정도이다. 전자파의 전자장과 전자장이 세포막 전장에 비교될 정도라야 촉진적 운반이나 능동운반, 공동운반을 방해하거나 촉진할 수 있겠지만 실제로는 세포막 전장에 비해 무시될 정도이다.

전파는 체내 물질의 이온화도 세포 내외로 이온 흐름의 변화도 일으킬 수 없으므로 사람이 일상적으로 경험하는 열 발생을 느낄 수 없을 정도로 약한 전파는 암을 비롯한 질병을 유발하기 어렵다.

참 고 문 헌

- [1] Wertheimer, N., Leeper E.: *Electrical wiring configurations and childhood cancers. Am. J. Epidemiol.* 109:273-284(1979)
- [2] Goldberg, R.B.: *Literature resources for understanding biological effects of EM fields. IEEE-EMB.* 15:96-101(1996)
- [3] Bennett Jr., W.R.: *Cancer and power lines. Phys. Today* 47[Apr]:23-29(1994)
- [4] Schwann, H.P.: *Ann. Biomed. Eng.* 16:245 (1988)

저자소개

1972년 2월 : 서울대학교 사범대학 물리과 (이학사)
1975년 2월 : 서울대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
1987년 8월 : 서울대학교 대학원 물리학과 (이학박사)
1978년 3월~1990년 3월 : 서울대학교 의과대학 전임강사
1990년 4월~현재 : 서울대학교 의과대학 조교수
1986년 3월~현재 : 방사선안전관리책임자(서울대학교 의과대학)
1989년 11월~현재 : 공업표준심의회 IEC부회 TC45 전문위원회
위원
1993년 9월~현재 : 한국의학물리학회 부회장
1997년 2월~현재 : 보건복지부 중앙약사심의위원회 위원
1972년 2월 : 중등학교 정교사 취득
1986년 1월 : 방사선취급감독자면허(291) 취득
본 학회 전자장과 생체관계연구회 연구위원