

생체전기 어드미턴스

徐 丙 高

(正 會 員)

漢陽大學校 電子通信工學科

I. 서 론

갈바니(Galvani)가 생체에서 전기적 현상을 발견한 이래 생체 시스템의 전기적 속성에 관한 연구는 중요한 과제가 되어 왔다. 폐순환(feed back)을 이용한 전자 측정기의 개발로 인한 현대식 측정기술 개발 이후 패시브(passive)한 전기적 특성은 물론 액티브(active)한 특성도 측정 가능하게 하였다. 그리고 포텐셜(potential) 이론을 사용하여 패시브한 전기적 특성을 설명하여 주는 기전(mechanism)을 연구하여 전기적 신호들의 전도 현상과 자극현상(excitability)의 원천을 이해하는데 도움을 주었다. 특히 컴퓨터의 출현으로 수학적 모델링에 크나큰 도움을 주었을 뿐만 아니라 실험적으로 관측된 데이터를 효율적으로 처리할 수 있게 하여 자극 현상의 많은 사실을 이해할 수 있었다. 그러나 지난 수십여년간의 노력으로 생체의 전기적 현상에 대한 이해의 크나큰 진전은 있었으나 이러한 현상을 완전히 설명하여 주는 분자적 기전에 대한 이해는 아직 제한되어 있다.

생체 세포나 조직 그리고 이들을 구성하는 성분들의 액티브(active)하고 패시브한 전기적 특성에 대한 이해는 전기적 원리들의 진단적 및 치료적 응용 때문에 공학 및 의학에 있어서는 학문자체 뿐만 아니라 의기기 개발 및 임상적인 측면에서 중요하다.

본 논문에서는 생체에서 일어나는 전기적 특성들을 이해하는데 근간적인 역할을 하는 이완현상 및 생체전기 어드미턴스에 대해서 중점적으로 서술하고자 한다.

II. 이완현상 및 어드미턴스

어떤 물질의 전기적 속성은 교류전류에 의해 측정되어질 수 있고 그때, 임피던스(impedance)는 $Z=R+jX$ 로 표시될 수 있으며 어드미턴스(admittance)는 $Y=G+j\omega C$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 R은 저항(re-

sistance), X는 리액턴스(reactance), C는 커패시턴스(capacitance), G는 콘덕턴스(conductance), ω 는 각주파수를 의미한다. R과 G는 전기적 에너지가 방출될 때 일어나고 X와 C는 손실이 없는 저장상태로부터 발생한다. 어떠한 입방 센티미터(cm^3)를 고려할 때 G가 ohm^{-1} 으로 표현되었다면 G는 전도율 $\text{Kohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$ 가 되고 C는 $C=\epsilon \times C_r$ 관계에 있다. 여기서 C_r 은 자유공간(free space)에서 커패시턴스이다($C_r=0.0884 \mu\text{f}/\text{cm}$). ϵ 과 k의 값은 전해질이나 세포막 같은 물질에 대해서는 비교적 광범위한 주파수 영역에 걸쳐서 일정하며 이들 변수들은 간단한 물리적 해석을 갖고 있기 때문에 생체 구조의 분석과 묘사를 위해서는 편리하다.

생체 구조에 있어서 에너지는 어떠한 장소에서 다른 장소로 이동하거나 어떠한 형태에서 다른 형태로 전환된다. 이때, ϵ 과 k의 값은 주파수에 따라 변화하며 이러한 프로세스는 시간상수(time constant) T에 의해 표현된다. 이와 같이 시간에 의존하는 자극을 가했을 때 발생하는 응답 사이에는 지수적 시간지연(exponential time delay)에 의해 어드미턴스는 아래와 같은 관계가 있음을 보였다. 이와 같이 시간에 의존하는 현상을 이완현상(relaxation)이라 한다.

그림 1에서 볼 수 있는 것 같이 계단 함수의 포텐셜을 가했을 때 시간에 의존하는 이완현상을 볼 수 있다.

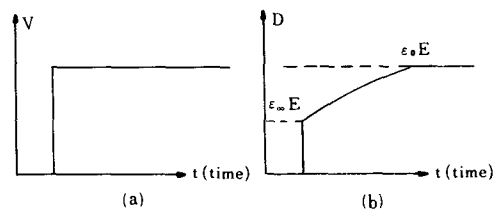


그림 1.

그림 1 (a)는 계단 포텐셜 함수를 나타내며 전극면적 (electrode area), cm^2 에 대한 $Q = \int_{-\infty}^t i dt$ 의 변화에 의해 정의된다. 그림 1 (b)는 관계식 $D(+) = \epsilon_{\infty} E + (\epsilon_0 - \epsilon_{\infty})(1 - e^{-V/T}) E$ 로 표시될 수 있다. 또한 실험적으로 다른 계단 함수의 포텐셜을 가했을 때 이에 비례하여 중첩(principle of superposition)의 이완현상을 일으킨다. Danger와 Rajewsky (1938)는 이와 같은 선형(linear)의 속성 및 지수적 시간지연을 고려하여 아래와 같은 관계식을 유도하였다.

$$\epsilon^* = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega T} \quad (1)$$

여기서 ϵ^* 는 복소 유전상수를 의미한다.

식(1)은 아래와 같이 분리될 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + (\omega T)^2} \quad (2)$$

$$k = k_0 + (k - k_0) \frac{(\omega T)^2}{1 + (\omega T)^2} \quad (3)$$

여기서 $T = 1/2\pi f_0$ 인 시간상수이다. f_0 는 이산(dispersion)의 중심에 있는 특성 주파수(characteristic frequency)이다. (Schwan, 1957). f_0 에서는 $\epsilon = (\epsilon_0 + \epsilon_{\infty})/2$ 와 $k = (k_0 + k_{\infty})/2$ 의 관계가 성립되며 위에서 언급한 바와 같이 ϵ_0 , ϵ_{∞} 와 k_0 , k_{∞} 는 f_0 에 비할때 높거나 낮은 주파수에서의 값이다. 식(2)와 식(3)에 의해 묘사되는 시스템에 $t = 0$ 에서 일정한 포텐셜, V 를 가했을 때 $(\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}) = (k_{\infty} - k_0)T$ 의 관계식을 고려하면 하나의 시간상수를 고려할 때의 어드미턴스 관계식이 아래와 같이 유도될 수 있다.

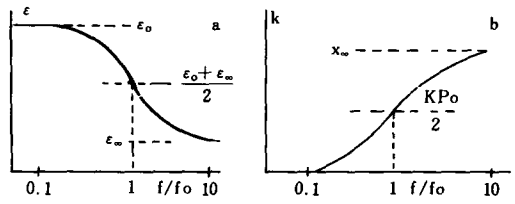
$$I/V = k_{\infty} + (k_0 - k_{\infty})(1 - e^{-V/T}) \quad (4)$$

대부분의 세포나 조직에서는 식(1)에서와 같이 하나의 시간상수로 표현될 수는 없을 것이다. 분자적 특성(molecular characteristics) 및 이질성(heterogeneity) 등을 고려할 때는 여러개의 시간상수가 필요하며 식(1)은 아래와 같은 관계식으로 대체 되어져야 할 것이다.

$$\epsilon^* = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}) \int \frac{f(T) dT}{1 + j\omega T} \quad (5)$$

여기서 함수 $f(T)$ 는 시간상수의 분포(distribution)를 의미한다. 그러나 실험적 결과를 간주할 때는 식(1)로 충분하다. 이 이완현상을 좀 더 자세히 고찰하면 아래와 같은 중요한 현상을 발견할 수 있다.

1. 그림(1)에서 볼 수 있는 것 같이 이완현상은 유전상수의 감소를 일으키며 콘다턴스의 증가를 가져오게 한다. 이와 같은 현상을 좀 더 구체적으로 그림 2에 잘 나타내었다. 그리고 이 그림은 하나의 시간상수, $T = 1/2\pi f_0$ 일때의 이완현상을 전제로 한 것이다.



(a) 유전상수대 주파수 (b) 전도율 대 주파수

그림 2.

2. 관계식 (1)로 표현된 유전상수를 $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ 으로, 즉, 실수 부분과 허수 부분을 분리하여, 실수 부분을 x 축에 허수 부분을 y 축으로 하여 $x-y$ 평면에 도시하면 그림 3과 같은 원(circle)을 나타내게 된다. 실제 경험상 원의 중심은 실수축 약간 아래에 있게 된다. 이와 같은 원을 나타내는 좀 더 일반적인 관계식은 아래와 같은 형태로 주어진다.

$$\epsilon^* = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + j^{1-\alpha} f(\omega T)} \quad (6)$$

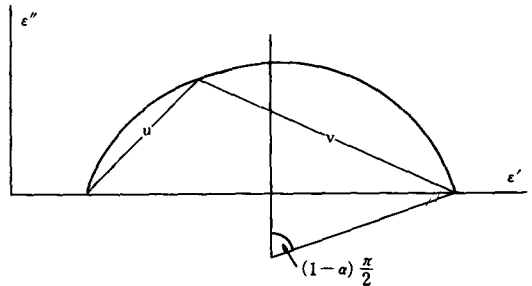


그림 3.

여기서, α 는 경험적 분포상수(empirical distribution parameter)이며 $0 \leq \alpha \leq 1$ 이다. 그리고, $(1-\alpha)\pi/2$ 은 그림(3)에서 표시된 각과 동일하다. $f(\omega T)$ 는 주파수의 함수이기 때문에 Cole과 Cole (1941)은 식(6)을 아래와 같이 유도하였다.

$$\epsilon^* = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + (j\omega T)^{1-\alpha}} \quad (7)$$

여기서 $n = 1 - \alpha$ 라 놓고 식(7)의 실수 부분과 허수 부분을 표시하면 아래와 같다.

$$\text{실수부분: } \epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + (\omega T)^{2n}} \quad (8)$$

$$\text{허수부분: } \epsilon'' = (\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}) \cdot \frac{(\omega T)^n}{1 + (\omega T)^{2n}} \quad (9)$$

여기서 $j^n = \cos(n\pi/2) + j\sin(n\pi/2)$ 이므로 이것을 식 (7), 식(8), 식(9)에 대입하면 아래와 같이 유도된다.

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{\left[1 + (\omega T)^n \cos \frac{n\pi}{2}\right] + j\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) (\omega T)^n} \quad (7')$$

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + (\epsilon_0 - \epsilon_\infty) \left[\frac{1 + (\omega T)^n \cos \frac{n\pi}{2}}{1 + 2(\omega T)^n \cos \frac{n\pi}{2} + (\omega T)^{2n}} \right] \quad (8')$$

$$\epsilon'' = (\epsilon_0 - \epsilon_\infty) \left[\frac{(\omega T)^n \sin \frac{n\pi}{2}}{1 + 2(\omega T)^n \cos \frac{n\pi}{2} + (\omega T)^{2n}} \right] \quad (9')$$

식(8')와 식(9')를 식(7')에 대입하면 아래와 같은 관계식이 유도되며 그림3과 같은 그림이 도시된다.

$$\left[\epsilon' - \frac{\epsilon_0 + \epsilon_\infty}{2} \right]^2 + [\epsilon'']^2 = \left[\frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{2} \right]^2$$

1과2의 도시(plot) 방법에는 서로의 장·단점이 있다. 1의 도시에는 주파수에 대한 변화를 자세히 알 수 있는 잇점이 있고 2의 도시에는 이완현상의 속성을 쉽게 나타내주는 잇점이 있다고 할 수 있다.

3. 이완현상은 시간상수들과 관련된 현상이다. 생체 물질의 유전상수(dielectric constant)는 주파수에 따라 변화하며, 3개의 주요 주파수 영역, 즉, 저주파, 중주파(radio frequency), 고주파(microwave frequency)에서 이산(dispersion)될 수 있는 것으로 알려졌다. 이들은 각각 α, β, γ 이산으로 부른다. 근육 조직에 대해 조사된 이산현상이 그림4에 나타나 있다.

이들 이산현상은 서로 다른 기전에 의해 발생한다. 그림4에서 볼 수 있듯이 α 이산은 100 ϵ /sec에 가까

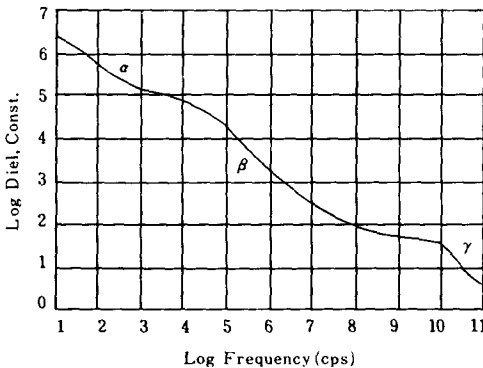


그림 4.

운 저주파 영역에서 일어나며 세포 멤브린들 사이의 경계면에서 발생하는 시간지연의 과정에서 일어난다고 생각되고 있다. β 이산은 라디오 주파수 영역인 1MC/sec 근처에서 일어나며 조직내에 있는 세포 멤브린의 용량(capacity)으로 부터 발생한다. 이것에 대한 한 기전이 가장 잘 이해되고 있다. γ 이산은 고주파인 10~100kMC/sec 근처에서 일어나며 이것에 대한 기전은 내부세포 구조와 이를 구성하고 있는 성분들로부터 기인 한다는 것을 내용으로 하고 있다. 이들 이산현상을 조사한 몇가지 예를 아래와 같이도 표화 하였다.

표 1.

	α -이산	β -이산	γ -이산
전해질 및 물	없음	없음	20,000MC
단백질 및 다른 고분자 스펙션	없음	1~10MC	"
세포내액물질 (핵, 미토콘드리아)	없음	1~10MC	"
세포 스펙션, 박테리아 및 조직	0.1~10KC	0.1~10MC	"

이 도표로부터 보면 전해질이나 물은 α 와 β 이산에는 아무런 기여도 하지 못한다는 것을 알 수 있다. 주파수가 변함에 따라 유전상수의 변화($\Delta\epsilon$) 및 전도율의 변화(Δk)를 이산크기(dispersion magnitude)라 한다. $\Delta\epsilon$ 와 Δk 에 대해 한 개의 시간상수만이 존재할 때는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\epsilon_r \frac{\Delta\epsilon}{T} = K$$

이산크기는 물질에 따라 달라질 수 있을 뿐만 아니라 농도 주변 이온의 종류, 온도등과 같은 요소에 영향을 받는다. 이러한 요소들을 고려하여 최대값을 취한 이산크기는 3개의 이산영역에서 아래와 같은 값을 나타낸다.

표 2.

	α -이산	β -이산	γ -이산
$\Delta\epsilon$	5×10^6	10^6	75
ΔK (mho/cm)	0.1×10^{-3}	10^{-2}	0.8

표2에서 볼 수 있듯이 근육 조직과 생체 물질에서는 동일 물질의 액체나 고체에 비할 때 유전상수값이 상당히 높다. 이것은 세포 서스펜션(cell suspen-

sion), 조직, 이온 이동 과정에서 볼 수 있는 이질적 구조를 고려할 때 쉽사리 이해된다.

식(1)과 같이 시간상수의 상관함수로 되어있는 이완현상의 기전(mechanism) 혹은 극화 현상을 설명 하는데는 2개의 기전(mechanism)이 존재한다. 그 하나는 정 이온과 부 이온의 분포 불균형으로 생겨나는 극성물질(polar molecule)의 존재로 인하여 자장에 따라 회전을 일으킨다는 것이다. 이와 같은 극성 물질의 회전은 순간적으로 일어나지 않기 때문에 그림 1과 같은 이완현상을 나타내게 된다. 이와 같이 자장에 의해 발생한 힘은 브라우니언 움직임(Brownian movement)에 기인되는 힘과 경쟁하게 되어 사실상 부분적 회전만이 있게 되며 이 회전의 정도는 자장의 크기와 비례한다. 또한, 회전의 속도는 극성 물질의 크기와 형태뿐만 아니라 점성, 온도에 따라 달라지며, 이산(dispersion)의 특성 주파수 f_0 는 극성 물질의 크기와 무제에 반비례한다. 이렇게 하여 시간상수는 어떠한 분자가 자장과 함께 회전하는데 소요되는 시간을 의미하게 된다.

다른 하나의 기전은 서로 다른 유전상수를 갖고 있는 이질적(heterogeneous) 구조의 존재로 인한 것이다. 이러한 구조들은 서로 다른 전기적 속성들을 갖고 있는 물질로 구성되어 있기 때문에 서로 다른 물질을 분리시키는 경계면들은 전하를 갖게 될 것이다. 그리고 이것은 이온의 이동(ion transfer)을 통해 발생하게 되며 상당한 시간의 소요를 필요로 하게 될 것이다.

전자의 기전은 “극성이완(polar relaxation)”이라고 불리며 1929년 Debye에 의해 처음으로 연구되었고 후에 Böttcher(1952)와 Smyth(1955) 등에 의해서 연구되었다. 그리고 Kauzmann(1942)은 화학적 반응율 프로세스(chemical rate process)의 원리를 도입하여 이완현상 극선의 대칭성(symmetrical phenomenon)을 설명할 수 있었다. 후자의 기전은 “구조적이완(structural relaxation)”이라고 불리며 1914년 Wagner에 의해서 연구되었으며 “Maxwell-Wagner 이론”이라고 부르기도 한다. 그리고, Cole(1928), Schaeter(1933), Dänzer(1934), Grawl(1935), Fricke(1925, 1953) 등에 의해서 연구 되었다.

생체에서 일어나는 극화현상은 이완 기전에 의해 잘 설명될 수 있으며 혈액과 같은 간단한 세포의 서스펜션(suspension)에서는 쉽사리 발견된다.

Ⅲ. 실험적 조사자료

생체 어드민탄스의 측정은 많은 종류의 생물질에서 시도 되었다. 제한된 지면 때문에 몇 개의 중요한 것만을 다음에 도표화 하였다. 도표화된 자료는 교류전류로서 측정된 것이며 우리 신체 속에 존재하는 조직(tissue)의 전기적 특성을 보여 주고 있다. 다음에 있는 표 3(a)는 특정저항(specific resistance)을 표시화 했고 표 3(b)는 유전상수(dielectric constant)를 나타내었다.

표 4에서 [1]은 37°C에서 개의 조직, [2]는 25°C에서 개구리의 조직, [3]은 180°C에서 양의 조직, [4]는 23°C에서 인간의 조직, [5]는 37°C에서 개의 조직, [6]과 [7]은 방 온도에서 토끼의 조직, [8]과 [9]는 23°C에서 인간 및 다른 동물의 조직, [10]과 [11]은 37°C에서 인간의 조직, [12]는 20°C에서 개와 말의 조직, [14]는 27°C에서 인간의 조직, [15]는 37°C에서 인간의 조직, [16]은 180°C에서 양의 조직, [17]은 22°C에서 쇠고기의 조직을 표시하고 있다. (이들 자료를 위해 참고문헌 참조)

Ⅳ. 중요성

생체를 연구하는데 있어서 전기적 속성인 생체 어드민탄스에 대한 지식은 필요 불가결한 것이다. 몇가지 실 예를 들어보면 ① 이론적인 심전도는 신체표면(body surface)에서 측정된 심장의 활동에서 생겨나는 전기적 포텐셜에 상응되는 간단한 제너레이터(generator)인 점에서 이해하려는 시도를 하고 있는 것이다. 심장과 다른 인체 부분을 분리시키는 신호를 만들어 내는 심장의 신호가 인체 표면에 도착하기 전에 변형(distortion)되는지 여부를 결정 짓는데 중요한 역할을 한다. ② 고주파를 이용한 전기 치료기기인 diathermy에서도 고주파에서 조직의 전기적 특성에 대한 이해는 diathermy 기계에서 발생하는 전류가 높은 주파수에서 인체에 침투되는 현상 및 열을 발생시키는 현상을 이해하는데 필요 불가결한 것이다. ③ 인간에 대한 마이크로파(microwave)에 대한 영향은 상당히 큰 것으로 알려졌다. 조직에 대한 마이크로파 특성은 전자기파(electromagnetic wave)가 인체에 침투되는 현상을 결정짓는 중요한 요소들 및 흡수상수(absorption coefficient)를 정하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 또한 이와 같은 지식은 임상적 치료에 응용될 뿐만 아니라 방사선이 인간에 미치는 영향을 연구하는데 있어서도 중요하다. ④ 최근에 암 치료를 위한 열요법(hyperthermia)에 대한 연구에 있어서 암 세포만을 파괴하기 위한 적정 온도의 결정이 중요한

표 3. (a) 특정저항

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
주파수	근육	간	폐	지라	신장	대뇌	지방조직	골 및 골수	전혈
1									
2	100Hz	1060							166
3									
4			800	800	1000			1500~5000	
5	1KHz	970	400~850	260~430		450~550	1700~2500		166
6									980
7									
8	10KHz	880	850						147
9									
10			460						
11	100KHz	170~250	220~550	165~200	250~500	150~270	460~850		147
12		520	550~800						
13									
14	1MHz	160~210	210~420	150~180	230~380	140~250	430~700		140
15		250	400~550						
16									
17	10MHz	150~170	180~260	110~150	150~170	120~170	300~450		90
18									
19		100~130	120~145	95~130	85~105	100~120	160~230	1170~1250	82
20	100MHz	130~160	150~200	100~140	110~150	100~150	200~300	1500	
21		140~200	180~210		150	130~160	220~260	2200~4300	4100~5300
22		75~79	98~100				700~140	1000~2300	64~72
23	1,000MHz	81~84	92~100	137		81~82	1100~3500		80
24		77	100				2500		
25	10,000MHz	12	15~17				240~370	60~200	11
26		120	13				210	100~130	

(b) 유전상수

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
주파수	근육	간	폐	지라	신장	대뇌	지방조직	골 및 골수	전혈
1									
2	100Hz	$800 \cdot 10^3$							2900
3			$900 \cdot 10^3$	$450 \cdot 10^3$				$150 \cdot 10^3$	
4		$1000 \cdot 10^3$							
5	1KHz	$130 \cdot 10^3$	$150 \cdot 10^3$	$90 \cdot 10^3$				$50 \cdot 10^3$	2900
6		$170 \cdot 10^3$							
7		$100 \cdot 10^3$							
8	10KHz	$50 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$				$20 \cdot 10^3$	2810
9		$90 \cdot 10^3$							
		$50 \cdot 10^3$							

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
주파수	근육	간	폐	지라	신장	대뇌	지방조직	골 및 골수	전혈
10									
11 100KHz	$30 \cdot 10^3$								2740
12	$20 \cdot 10^3$	$(7 \sim 12) \cdot 10^3$							
13									
14 1MHz									2040
15	$2 \cdot 10^3$	$(12 \sim 2) \cdot 10^3$							
16									
17 10MHz									200
18									
19		65~75					8~13		
20 100MHz									
21	69~73	72~74		88~90	83~84	70~75			72~74
22	49~52	46~47					4.3~7.8	4.3~7.8	58~62
23 1,000MHz	53~55	45~52	35		53~56		3.2~5		63
24	61	50					9.5		
25 10,000MHz	40~42	34~38					3.5~3.9	4.4~6.6	50~52
26	29						3.6	6	45

표 4.

Data		Data		Data	
Coordinates	References	Coordinates	Reference	Coordinates	References
1 A-C, G	[1]	6 I	[16]	14 A-F	[4]
1 I	[3]	7 A-C, G	[1]	14 I	[6]
2 A	[2]	8 A	[2]	15 A	[7]
2 B	[1]	8 B	[1]	15 B	[8, 9]
4 A-C, G	[1]	8 I	[6]	17 A-F	[4]
4 I	[3]	9 A	[7]	17 I	[6]
5 A	[2]	10 B	[4]	19 A-G, I	[10, 11]
5 B	[1]	11 A-F (Resist.)	[1]	20 A-G	[4]
5 C, G	[5]	11 A (Diel, const.)	[2]	21 A, B, D-I	[12]
5 I	[6]	11 I	[6]	22 A, B, G-I	[13]
6 A	[7]	12 A	[7]	23 A-C, E, G, I	[14]
6 B, D, F	[8, 9]	12 B	[8, 9]	24 A, B, G	[17]
				25 A, B, G-I, I	[13]
				26 A, G, H, I	[15]

문제로 이것에 대한 이론적 근거를 제공하여 줄 수 있을 것이다.

V. 결 론

생체의 구성 요소인 세포 및 조직들에 대한 전기적

특성의 중요한 요소인 생체 임피던스에 대한 개념 및 정의를 서술하였고 주파수에 따라 변화하여 이완현상 (relaxation phenomenon)이 일어난다는 사실이 언급되었다. 또한 이 현상중 3개의 중요한 이산 (dispersion)이 있다는 사실도 명시되었다. 이러한 이완현상

은 시간지연(time delay)을 의미하는 시간상수의 함수적 관계로 표시되어질 수 있음과 이 현상을 설명할 수 있는 기전이 간략하게 서술되었다. 다양한 생체 임피턴스의 측정 자료가 많을지라도 이들중 몇개만을 선정하여 본 논문 표 3 (a),(b)에 도시하였다. 이들 측정 자료들은 환경조건 및 측정 기술에 따라 그 측정값이 달라질 수 있기 때문에 좀 더 정확한 전자식 측정 기기의 개발과 표준적 자료를 작성하여 생체 분야에 종사하는 연구자에 도움이 될 수 있는 공인된 "사전 dictionary)"을 만들어야 할 것이다. 기전에 대해서도 많은 학설들이 있으나 가장 널리 인정되는 학설을 소개하였다. 이 기전에 대해 확실한 이해는 못하고 있으나 상당히 많은 연구자의 노력으로 많은 진척을 보여왔고 가까운 장래에 좋은 결과를 얻을 것으로 생각된다.

본 논문은 필자에 의해 전자공학회지에 이미 투고되었던 원고를 토대로 하여 집필한 것으로 의용생체 분야에 종사하는 연구자들에게 다소나마 도움이 되길 바란다. 끝으로, 필자는 본 논문의 주요 용어인 시간상수 즉 유전상수의 이완현상 시간(dielectric relaxation time)의 개념을 이해하기 어려운 독자들을 위해서, 필자의 전자기학 강의 노트(note)를 토대로 회로(circuit)나 장(field)인 점에서 그 개념을 부록에 소개하고자 한다.

VI. 부 록

1. Dielectric Relaxation Time from circuit point of view

Let us consider a conductor which we shall model as a leaky "parallel plate capacitor" whose geometry is shown in Fig. 1.

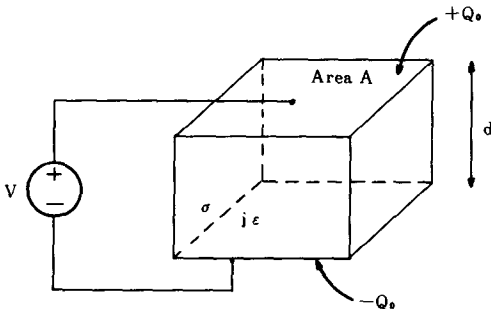


Fig 1

We charge this conductor by connecting to it a voltage source.

The total charge on the plates of the capacitor is then given by : $Q_0 = CV$ where C is the capacitance.

Now if we remove the voltage source, the charge will decay exponentially, since the dielectric is loosy (i.e. it has a finite conductivity σ).

The circuit model for this situation is shown in Fig. 2.

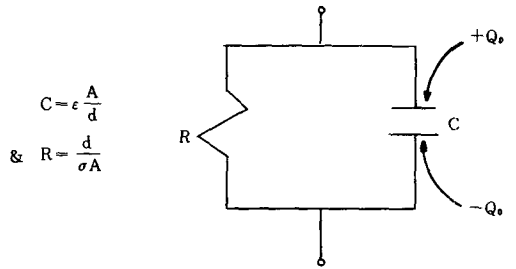


Fig. 2.

Initially, let's say at time $t=0$,

$$Q(t;t=0) = Q_0 = Cv$$

The capacitor will discharge in the resistance with a time constant $\tau = RC$. The charge at any time t will therefore be given by :

$$Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau}$$

$$\text{where } \tau = RC = \epsilon/\sigma$$

The time constant τ , is known as the dielectric relaxation time.

It is exceedingly small i.e for, Cv and Al , $\sigma \sim 10^6 \text{ ohm}^{-1} \text{ Cm}^{-1}$ and $\epsilon \sim 10^{-12} \text{ farad Cm}^{-1}$

$$\Rightarrow \tau = 10^{-18} \text{ sec.}$$

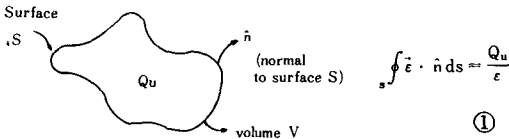
So any charge imbalance is eliminated within 5 or $\sim 10^{-17}$ sec.

2. Dielectric Relaxation Time from field point of view.

Consider a neutral conductor with n_0 conducting electrons Cm^{-3} and an equal concentration of positive charges. Now let us disturb charge neutrality by introducing n' extra conducting electron Cm^{-3}

This unneutralized charge distribution will produce an electric field inside the conductor. This follows directly from Gauss's law.

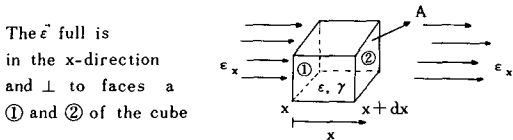
Consider a surface S, enclosing the unneutralized charge, Q_u . From Gauss's law we have:



The net current crossing the surface S is related to the total charge Q_u , by the law of conservation of charges.

$$\underbrace{\oint_S \vec{J} \cdot \hat{n} ds}_{\text{Rate at which charge is leaving enclosed volume V.}} = - \underbrace{\frac{dQ_u}{dt}}_{\text{Rate at which charge is diminishing inside volume V.}} \quad (2)$$

To simplifying algebra, let us consider the one-dimensional case.



Applying the integral law to the above system we obtain:

$$\oint_S \vec{\epsilon} \cdot \hat{n} ds = [\epsilon_x(x+dx) \cdot \epsilon_x(x)] A \quad (3)$$

$$\text{and } \frac{Q_u}{\epsilon} = \frac{\rho dx A}{\epsilon} \quad (4)$$

Note: ρ is used for charge density ($C Cm^{-3}$) in eq.(4)

It is also used for resistivity Equaling (3) and (4), we obtain

$$[\epsilon_x(x+dx) - \epsilon_x(x)] A = \frac{\rho A dx}{\epsilon}$$

$$\text{simplifying; } \frac{\epsilon_x(x+dx) - \epsilon_x(x)}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (5)$$

In the limit when $dx \rightarrow 0$, eq. (5) becomes

$$\frac{d}{dx} \epsilon_x(x) = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (6)$$

similarly, eq.(2) gives us; (note that $\vec{J} = \sigma \vec{\epsilon} \Rightarrow \vec{J} \parallel \vec{\epsilon}$)

$$[J_x(x+dx) - J_x(x)] A = - \frac{d}{dt} Q_u = - \frac{d}{dt} (\rho A dx)$$

simplifying the above and in the limit when $dx \rightarrow 0$, we have :

$$\frac{d}{dx} J_x(x) = - \frac{d\rho}{dt} \quad (7)$$

We can now combine eq.(6) and (7) to obtain a 1st order differential equation in n' .

Now remember that $J = \sigma \epsilon$ (ohm's law) negative because of e^-

also $\rho = \text{charge density} = -n'q$

density of extra e^-

$$\therefore \text{from (6) } \frac{d\epsilon}{dx} = - \frac{n'q}{\epsilon}$$

$$\text{and from (7) } \frac{dJ}{dx} = \sigma \frac{d\epsilon}{dx} = + \frac{d}{dt} n'q$$

$$\text{substituting (6) in (7) yields; } q \frac{dn'}{dt} = - \frac{\sigma}{\epsilon} n'q \quad (8)$$

$$\text{simplifying eq.(8) } \rightarrow \frac{dn'}{dt} + \frac{n'}{\epsilon/\sigma} = 0 \quad (9)$$

Eq.(9) is a first order differential equation whose solution is given by

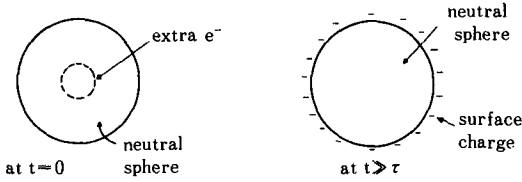
$$n'(t) = n'(0) e^{-t/\tau}$$

where $\tau \equiv \frac{\epsilon}{\sigma} \triangleq \text{dielectric relaxation time}$

note again that the excess charge exponentially with, time constant τ .

Now we might ask ourselves where does this extra charge go?

Suppose we had disturbed an electrically neutral spherical conductor by injecting extra mobile electrons in the center of the sphere. The excess charge produce an ϵ -field which in turn causes a current. The injected electron thus appear as a surface charge on the surface of the sphere.



參 考 文 獻

1. 표 4 작성을 위해

[1] Schwan, H.P. and C.F. Kay: *Circulat. Res.* 4, 664 (1956) : 5, 439, (1957).
 [2] -*Z. Naturforsch.* 96, 245, (1954).
 [3] -*Z. Ges. Exp. Med.* 109, 531, (1941).
 [4] Rajewsky, B. : *Results of biophysical research.* Vol. 1, Leipzig: Thieme, (1938)
 [5] Kaufman, W. and F.D. Johnston: *Amer Heart J.* 26, 42, (1943).
 [6] Fricke, H., and H.J. Cartis: *J. Gen. Physiol.* 18, 821, (1935).
 [7] - *Physics* 1, 106, (1931).
 [8] Stachowlak, R. : *Ann. Physik* 37V, 495, (1940).
 [9] -Pflüg, *Arch. Ges. Physiol.* 244, 570, (1941).
 [10] Schatter, H.: *Z. Ges. Exp. Med.* 100, 706, (1937).
 [11] -*Erforschung U. Praxis Wärmebeh. Medizin.* pp. 71ft. Leipzig: Steinkopff (1937, 2).
 [12] -*Fortschr. Rontgenster.* 54. 59 (1936).
 [13] Osswalk, K. : *Hochfrequenztech. U. Elektroakust.* 49. 40, (1937).
 [14] Herrick, J.F., D.G. Jelatis and G.H. Lee: *Fed. Proc.* 9, 60, (1950)
 [15] Schwan, H.P. and K. Li: *Proc. I. R.E.* 41,

1735, (1953).

[16] England, T.S. and N.A. Sharples : *Nature (Lond)*, 163, 487, (1949)
 [17] Rajewsky, B., and H.P. Schwan: *Z. Ges. Exp. Med.* 113, 553, (1944)
 [18] Hartmuth, L. : *Z. Naturforsch.* 96, 257, (1954)

2. 논문 작성을 위해

[1] Böttcher, C.J.F. : Elsevier Press, Houston, Texas (1952).
 [2] Cole, K.S. : *J. Gen. Physiol.* 12, 29, 1928. 2.
 [3] Dänzer, H.: *Ann. Physik [V]* 20, 463: [V] 21, 783, (1934).
 [4] Debye P. : *Physik* 2, 13, 97.
 [5] Debye P.: *The Chemical Catalog Co.* N.Y., (1929).
 [6] Fricke, H.: *Phys. Rev.* 24, 678, (1925).
 [7] Fricke, H.: *Nature* 172, 731, (1953C).
 [8] Geddes L.A. and Baker L.E.: *Med. & Biol. Engang.* 5, 271, (1967).
 [9] Graul, F. (1935) : *Ann. Physik [V]* 24, 326.
 [10] Kaugmann, W. : (1942). *Revs. Modern Phys.* 14, 12.
 [11] Schaefer, H. : (1933). *Klin. Wochschr* 12, 102.
 [12] Schwan, H.P. and Kay, C.F. : *Ann. N.Y. Acad. Sci.* (1957).
 [13] Smyith, C.P.: *Dielectric Behaviour and Structure*, McGraw-Hill, N.Y., (1955).
 [14] Wagner, K.W. : *Am. Physik* 40, 817, (1913). *

◆ 用 語 解 說 ◆

HECD(Hall Electrolytic Conductivity Detector)

호을 효과를 이용한 전해 이온 검출기

HC·CO계

자동차의 배기 가스중에 포함되어 있는 HC·CO성분을 측정하는 장치