

픽법에 의한 생체 내의 농도 확산 분석

Analysis of density diffusion analysis by Fick's laws in the human body

최규식*

Gyu-Shik Che*

요 약

용질분자를 용매를 통하여 전달시키는 기법중의 하나는 확산에 의한 것이다. 이러한 기전은 각개 용질분자의 열운동에 의한 것이다. 유체는 정지해 있는 상태로서 용질 전달의 핵심기전은 농도차에 의하여 결정된다. 인체 내에서 각종 하전 이온을 포함한 입자나 분자들은 체내의 농도차에 의해서 또는 외부 전기에 의해서 영향을 받아 고농도에서 저농도쪽으로 확산되어간다. 이러한 현상은 픽이 제안한 확산에 관한 제1법칙과 제2법칙에 의하여 정량적으로 전개할 수 있다. 본 논문에서는 체내의 물질이 확산되는 과정을 픽의 법칙을 이용하여 해석하고 그것을 실례를 통하여 구현하였다. 각 시간별 공간상의 확산현상에서 확산계수가 클 때는 시간이 경과함에 따라 발생지점의 농도는 현저히 낮아지고 그 농도가 주위로 급속히 확산되어감을 알 수 있었다. 그러나 어느 정도의 시간이 경과되면 그 농도의 감소는 매우 약해진다.

Abstract

One of the methods to transmit solute through solvent is diffusion. Various particles or molecules including several charged ions in the body diffuse from high density region to low density due to density difference or external electric field. This kind of mechanism is due to thermal motion of each solute molecules. These situations can be deployed using Fick's first and second laws that govern diffusion phenomena in the body. I analysis these diffusion status of material in the body using above mentioned Fick's laws and then implement them through illustration.

keywords : resting potential exciting potential diffusion diffusion coefficient density of material
(정지전위 흥분전위 확산 확산계수 물질농도)

I. 서 론

인체 내의 모든 기관들이 상호보완적인 의사소통을 할 수 있는 신호가 각 세포 단위에서 발생되어 인체가 정상적인 기능을 유지하도록 한다. 이러한 활동

전위는 세포막을 통한 이온들의 움직임에 의해서 발생, 전달되고 있으며, 궁극적으로는 전기적인 신호의 개념으로 설명할 수 있다. 즉, 생체에서 발생하는 각종 감각을 비롯한 정보의 전달이 전기적인 현상으로 이루어진다는 것이 그간의 수많은 연구를 통하여 밝

* 건양대학교 의공학부

· 제1저자 (First Author) : 최규식

· 투고일자 : 2012년 3월 29일

· 심사(수정)일자 : 2012년 3월 29일 (수정일자 : 2012년 6월 27일)

· 게재일자 : 2012년 8월 30일

혀지고 있는 것이다[1,2,3,4,5].

이처럼 본질적으로 인체의 모든 기능과 활동은 어떤 형태로든 전기와 관련되어 있다. 예를 들어 근력은 극성이 다른 전하의 인력에 의해 발생하며, 뇌의 활동도 기본적으로는 전기적인 것으로서 뇌로 들어가고 나오는 모든 신경신호는 전류의 흐름과 관련이 있다. 인체의 기능을 수행하는 데에는 이와 같은 많은 전기적 신호가 발생되는데, 이러한 신호들은 특정 세포의 전기화학적 활동의 결과로 나타나는 것이다.

그런데 확산이란 액체나 기체에서 밀도차이나 농도차이에 의해 물질을 이루고 있는 입자들이 스스로 농도(밀도)가 높은 쪽에서 농도(밀도)가 낮은 쪽의 액체나 기체속으로 퍼져가는 현상이다. 관내에 물이 흐르지 않고 있을 경우, 관을 따라 포도당의 농도가 균일하게 분포되어 있으면 그것은 어느 쪽으로도 흘러가지 않을 것이다. 그러나 포도당이 관내의 어느 한 쪽 끝에만 있고, 다른 쪽에는 없다면, 물이 흐르지 않더라도 포도당은 점차 확산되어 결국 관 전체의 밀도가 같아질 것이다.

이것은 물이 흐르지 않더라도 물과 포도당 분자가 정지해 있지 않고 움직이기 때문에 생기는 현상이다. 즉, 평균적으로만 움직이지 않고 있는 것이다. 각 분자들은 평균속도로 앞뒤로 운동하고 있으며, 온도에 따라 운동량이 증가한다. 단지 절대온도 0도에서만 완전히 정지해 있다. 분자는 다른 분자와 충돌하여 방향을 바꾸기 전까지 완전히 무작위적으로 움직이려는 경향을 보이는데 이러한 현상을 분자의 무작위 운동(random walk)이라 한다. 물이 흐를 때, 한 방향으로의 모든 분자의 흐름은 모든 방향으로의 이런 무작위적인 운동을 포함하고 있다[6].

본 논문에서는 체내에서 약품을 비롯한 영양분 등이 확산되어가는 과정을 픽의 법칙을 중심으로 해석하고 실례를 통하여 이를 정량적으로 연구하고자 한다. 2장에서는 세포막을 중심으로 각종 영양분이나 이온들이 어떻게 분포되는가를 검토하고 3장에서는 픽법을 중심으로 확산현상을 연구하며 4장에서는 실례를 들어서 이러한 확산현상을 가시적으로 해석하고자 한다.

II. 세포막 및 이온분포

생체의 근육이나 신경과 같이 전기적 활동성을 가진 조직의 세포막을 흥분막(excitable membrane)이라 부른다. 미국의 전기전자공업규격인 IEEE Std 539-1990에서는 흥분막을 “적당한 자극에 의하여 흥분될 때 이온의 투과율에 갑작스럽게 큰 변화가 생기는 전기화학적 특성을 가지는 신경이나 근육 세포의 얇은 막(膜)(The membrane of nerve or muscle cells having an electrochemical property that results in sudden, major changes in ionic permeability when excited by an appropriate stimulus.)”이라 정의하고 있다.

생체는 신경계와 호르몬계의 두 가지 제어시스템으로 조절되는 것으로 알려져 있다. 신경 및 근육에서 이루어지는 운동 명령의 전달 및 신속한 조절을 하는 가장 중추적인 역할을 하는 뇌의 활동은 바로 신경계에서의 정보의 전달과 처리 그 자체이다. 이 근육이나 신경의 활동은 각각의 조직에 존재하는 ‘막(membrane)’의 전기적 활동에 그 근원을 두고 있다 [7]. 모든 뉴런의 표면(세포막)에서 안쪽에는 음이온이 다수로 존재하고, 바깥쪽에는 양이온이 다수로 존재하기 때문에 막 사이에 전위차(전압)가 발생한다. 이 양이온과 음이온의 복잡한 상호작용에 의해서 외부로 순수 전하가 표현되는 것이다. 이 때문에 세포의 내부는 보통 세포 외부보다 음성적으로서 이러한 전압차를 뉴런의 안정막전압이라 한다.

그림 1에서는 평형상태(즉, 분극상태)에 있는 세포의 내외에 분포된 하전 이온들의 농도를 보여주고 있다. Na^+ 는 세포내(15mmol/L)보다 세포외(145mmol/L)가 더 많으나, K^+ 는 세포외(5mmol/L)보다 세포내(150mmol/L)가 더 많은 것을 볼 수 있다. 세포외에 분포된 여러 가지 양전하를 포함하여 세포 내외에는 165mmol/L의 양전하가 존재한다. 마찬가지로 세포내(9mmol/L)보다 세포외(125mmol/L)에 더 많은 Cl^- 이온이 존재한다. 그러나 내부(156mmol/L)에는 외부(30mmol/L)에 비하여 기타 다른 여러 가지 음전하들(단백질을 포함하여)이 있다. 세포내외에 165mmol/L이나 되는 음이온들도 있다.

축삭내부	세포막	세포의 유량	no/mi
[Na+]=15	-	[Na+]=14 5	9.7
[K+]=150	-	[K+]=5	0.03
[Cl-]	-	[기타+]=5	
[기타-]	-	[Cl-]=125	13.9
	-	[기타-]=3	0.2
	-	0	
V=-70mV	-	V=0mV	
전하	-	전하	

그림 1. 평형전위를 결정하는 극성세포막의 양단을 통하는 이온의 기전[8]

Fig. 1 mechanism of ions transmitting across polarized membrane determining the equilibrium potential[8]

일반적으로 이온농도를 결정하는 데에는 여러 가지 구동력이 있으며 세포내외의 농도는 특히 다음과 같은 특성을 가지고 있다고 한다.

어떤 물질이든 그 농도는 시간에 경과함에 따라 모든 곳으로 균일하게 분포되는 경향을 가진다. 그러므로 막 양단에서 농도차가 있으면 세포내외의 농도가 같아질 때까지 물질이 고농도영역에서 저농도영역으로 흘러간다.

세포내의 전위는 음의 값을 가지므로 양의 이온이 세포로 들어가면 세포외 유량보다 세포내 유량에 더 큰 지배인자가 된다. 그러나 K+에는 이러한 현상이 적용되나 Na+에는 적용되지 않는다. 이와 마찬가지로 평형전위 때문에 세포내보다 세포외에서 더욱 더 큰 지배인자가 되므로 음의 이온이 세포를 떠난다는 것을 예상할 수 있다. 이 또한 농도 경사가 생긴다. 이것이 Cl-에는 적용되나 음의 값으로 하전된 단백질에는 맞지 않는다. 이 단백질은 여러 가지 음의 이온의 덩어리를 형성한다. 하전된 것이 전계 내에 있게 되면 가속이 되어 결국 정상상태의 표류속도 v 를 얻게 된다. 이는 잡아끄는 힘으로 작용하는 충돌 때문이다. 주어진 이온의 표류속도는

$$v_d = \mu E \tag{1}$$

여기서 μ 는 이동도라 하고 E는 전계이다. 이 전계 때문에 발생하는 유량은 다음 식과 같다.

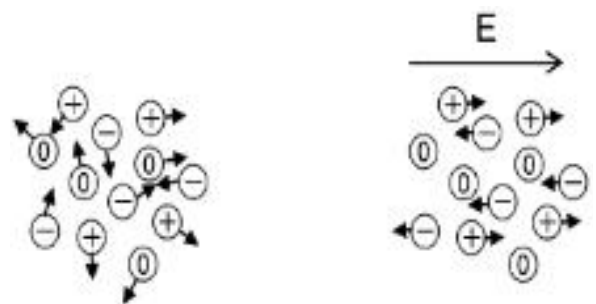
$$J_e = nv_d = n\mu E \tag{2}$$

세포막의 투과성과 활성화 과정 때문에 전계 내의 전하의 확산과 운동에 의한 막 양단의 농도차가 발생된다. 세포막은 K+와 Cl-에 투과성이므로 이것이 그들이 예측한대로 거동하는 것을 설명해주게 된다. 단백질은 결코 세포막을 투과하지 못하므로 이것이 음의 값을 가진 단백질이 내부에 숨어 있는 이유를 설명해준다. Na+펌프(또는 Na+ - K+ 펌프)라 하는 화학적 기전은 세포외에서 세포내로 전달되는 매 2K+ 마다 3Na+를 세포내에서 세포외로 전달한다. 그러므로 세포외에서는 Na+가, 세포내에서는 K+가 유지되는 것이다.

III. 픽 법칙에 의한 확산

세포외에서 Na+가 고농도로 유지되면 세포는 구동전계에 대응하는 Na+가 되는 결과를 가져온다. 결국 농도가 균일해지게 된다. 세포내에서 K+가 고농도로 유지되면 전계를 형성하는 결과가 되어 Na+펌프가 대응하여 농도가 균일해지게 된다. 세포외에서 Cl-의 농도가 고농도이면 농도를 균일하게 하려는 전계에 대응하게 된다. 음의 이온인 단백질의 농도는 내부에서 예측할 수 없을 정도로 고농도이다. 왜냐면 이들의 양이 많고 투과성이 없기 때문이다.

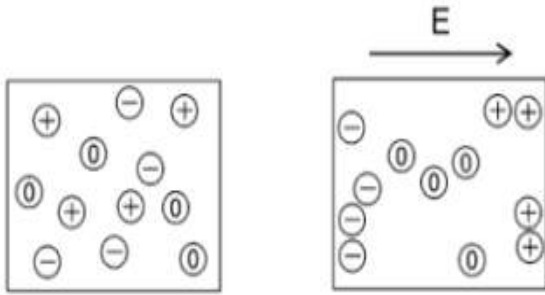
그림 2는 열적 무작위 확산운동이나 전계의 방향성효과에 대한 하전 및 중성 분자의 운동방향을 서술해준다. 그림 3은 하전 및 중성 분자의 농도피가 확산이나 전계 때문에 어떻게 변화되는가를 보여준다.



(a) 확산에 의한 경우 (b) 전계에 의한 경우

그림 2. 하전 및 중성 분자의 운동

Fig. 2 motion of charged and neutral molecules



(a) 확산 후 (b) 전계를 가한 후
 그림 3. 하전 및 중성 분자의 초기 띠의 변화

Fig. 3 initial band change of charged and neutral molecules

한편, 입자나 분자의 농도가 균일하지 않을 때에는 입자의 무작위 열운동에 의해서 농도가 높은 곳에서부터 낮은 곳으로 입자의 순수이동(확산)이 일어난다. 순수이동효과에 의해서 그 농도는 그림 4에서 보는 것처럼 좀더 균일해지게 된다. 농도의 비균일성이나 경도가 크면 클수록 이러한 확산은 증가되는데, 픽의 첫번째 확산법칙(Fick's First Law of Diffusion)에 의하면 일차원 흐름유체에 대해서 다음과 같다.

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x} \quad (3)$$

여기서 J는 입자속(flux of particle)으로서 단위시간당 단위면적당의 입자흐름이다. D는 확산계수이고 n(x,t)는 입자의 농도이다. (3)에서 음의 부호는 아주 중요한데 분자의 흐름이 고농도에서 저농도로 향한다는 사실을 반영하는 것이다. 이 식에서 모든 사장이 x와 t만의 함수이다. 확산계수는 배경매체에 따라 결정되며 매경매체가 기체인 경우 약 0.1cm²/sec 이상, 액체인 경우 약 10-5cm²/sec 이상, 고체인 경우 약 10-9 cm²/sec 이상인 것으로 알려지고 있다[8].

용액이 3차원공간의 일정부분을 점유하므로 직각 좌표계에서 농도 n=n(t,x,y,z)는 시간 t의 함수이고 공간좌표 x, y, z의 함수가 된다[9]. 픽의 제1법칙에 의

하여 그 양은 성분 J_x, J_y, J_z로 이루어진 벡터 J이다. 즉,

$$J_x = -D \frac{\partial n}{\partial x}, \quad J_y = -D \frac{\partial n}{\partial y}, \quad J_z = -D \frac{\partial n}{\partial z}$$

인 관계가 성립된다. 여기서 물론 용매가 균질이고 등방성(isotropic)으로서 D는 위치함수이고 모든 방향에서 동일하다. 즉, D는 상수이다.

이러한 유체의 이동기간 동안 입자의 총수는 보존되어야 한다. 그림 5에서 구성된 실린더형 체적을 고려해보기로 한다. 실린더의 축은 x 축으로서 길이는 dx, 단면적은 A이다. 단위시간 dt 동안 좌측에서 유입되는 입자의 총수는

$$J(x)A(dt)$$

이고 동일시간에 우측으로 나가는 총수는

$$J(x + dx)A(dt)$$

$$\simeq \{J(x) + (\partial J / \partial x)dx\}A(dt)$$

이므로 실린더 내에서 증가하는 입자 총수의 순수한 증가분은

$$- (\partial J / \partial x)dx A(dt)$$

이다. 이는 이 시간동안 체적 내에서 밀도의 변화로 고려되어야만 하며 그 변화는

$$\{(\partial n / \partial t)dt\}A(dx)t$$

으로서 입자의 보존을 의미한다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad (4)$$

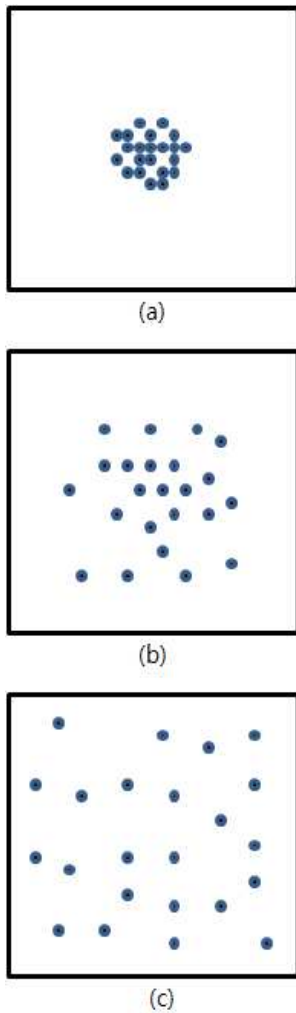


그림 4. 확산에 의해서 입자의 위치가 (a)→(b)→(c)로 순차적으로 변하는 모습을 보인 모식도
Fig.4 diagram for sequential particle shift of (a)→(b)→(c) locations due to spreading

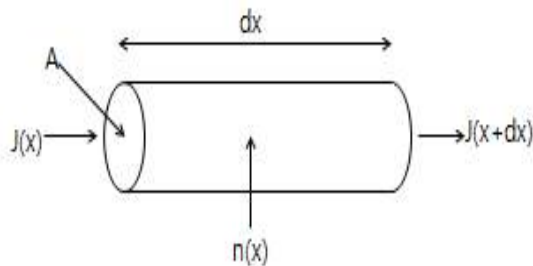


그림 5. 실린더내 입자흐름의 보존[8]
Fig.5 conservation of particle streaming in the cylinder[8]

D가 x에 무관하다고 가정하여 방정식(3)을 공간미분하여 $\partial J/\partial x = -D\partial^2 n/\partial x^2$ 를 얻고 방정식(4)에 이 결과를 대입하여 두 방정식을 결합할 수 있다. 이

결과 픽의 두 번째 확산법칙(Fick's Second Law of Diffusion)이라 하는 다음과 같은 확산법칙이 성립된다.

$$D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (5)$$

이러한 확산은 시간 t동안 가우스법칙을 따라 $x \sim \sqrt{2Dt}$ 만큼 서서히 무방향성 확산을 하게 된다.

공식적인 해 $n(x, t)$ 를 구하기 위해 $n(x', t=0)$ 으로부터 시작하기로 한다. 시각 t=0인 순간의 모든 x에 관한 분포(x)를 이용한 $n(x, t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$n(x, t) = \frac{N}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_{-\infty}^{\infty} n(x', 0) \cdot \exp\left\{-\frac{(x-x')^2}{4Dt}\right\} dx' \quad (6)$$

여기서 N은 어떠한 순간의 모든 x에 대한 n의 적분치로서 확산에 관여하는 총량을 의미한다. 이는 입자의 질량이나 수로서 확산기간중 총량은 불변이다. 초기분포가 가우스분포이고 처음 확산이 $\sigma(0)$ 일 때에 이러한 확산과정이 중요하다.

$$n(x, 0) = \frac{N}{\sqrt{2\pi\sigma^2(0)}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2(0)}\right\}$$

인 관계가 있으므로 (6)에 관한 해법은 아래와 같다[8].

$$n(x, t) = \frac{N}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2(t)}\right) \quad (7)$$

여기서

$$\sigma^2(t) = \sigma^2(0) + 2Dt \quad (8)$$

이고 $\sigma(0)$ 는 초기분포이다. 이 분포가 가우스분포가 아니라면 그 해는 약간 다르나 x값과 t값이 커지

면 이 값에 접근한다. 한편, 그 분포가 3차원인 경우는 확산에 의한 입자의 분포는 다음과 같다.

$$n(x, t) = \frac{N}{\{2\pi\sigma^2\}^{3/2}} \exp(-r^2/2\sigma^2(t)) \quad (9)$$

여기서

$$\sigma^2(t) = \sigma^2(0) + 6Dt \quad (10)$$

이고 $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ 이다. 인체 내에서 1~100 μm (산소확산인 경우 100 μm) 정도의 짧은 거리에서 확산이란 극히 중요하다. 그러나 거리가 멀어지면 중요성이 떨어진다. 한 부위에서 다른 부위로 이동하는 매체의 양은 확산의 방향성 상실 때문에 제약을 받게 된다. 이 때문에 무질서가 증가하게 되고 특성시간규격 내에서 제어와 규제를 필요로 한다.

무질서의 레벨은 엔트로피라 한다. 물체의 냄새는 분자의 확산에 의한 것이다. 유량시스템에서도 확산은 아주 중요하다.

IV. 확산 실험

이제 픽의 법칙을 용질이 세포로 확산되어 가는 문제를 해결하는 데에 적용해보기로 한다. 여기서 확산은 세포의 원형질(protooplasm) 즉, 원형질막 주위의 막을 통하여 용액의 전달에 절대적으로 의존한다. 이 막은 양지방질층(bilipid layer)이라 불리는 지방질분자의 이중층으로 구성된다. 이 층은 양면에 소구체(globular) 단백질구조를 포함하고 있어서 이 중 일부는 양지방질층 전체쪽에 걸쳐서 투과된다.[9]

동맥인 경우에 각 시각에 대한 공간거리의 함수로서 농도의 변화 현상을 그림 6과 그림 7에 표시하였다. 여기서 확산계수의 크기에 의한 확산현상을 시각적으로 명확하게 보여주기 위해 편의상 그림 6에서는 $D=0.5$ 을, 그림 7에서는 $D=3$ 을 취하였다.

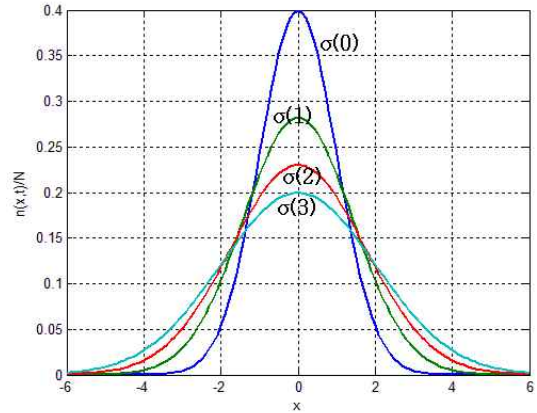


그림 6. 각 시간별 거리대비 농도의 확산, $D=0.5$
Fig. 6 density diffusion against distance for each time, $D=0.5$

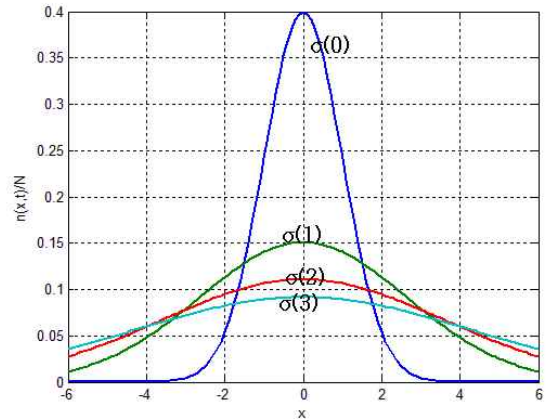


그림 7. 각 시간별 거리대비 농도의 확산, $D=3$
Fig. 7 density diffusion against distance for each time, $D=3$

이 두 그림에서 각 시간별 공간상의 확산현상을 관찰해보면 $t=0, x=0$ 인 순간에는 초기값으로 그 값들이 같다. 확산계수가 클 때는 시간이 경과함에 따라 발생지점의 농도는 현저히 낮아지고 그 농도가 주위로 급속히 확산되어감을 알 수 있다.

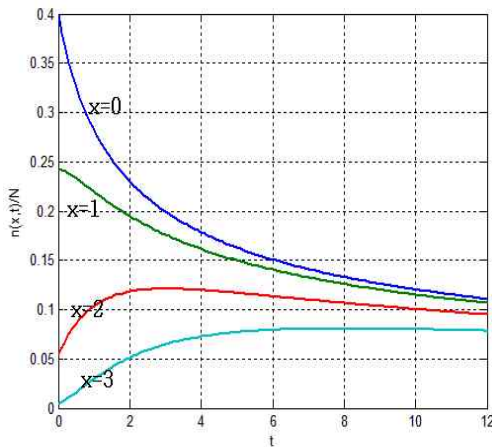


그림 8. 시간경과 대비 농도 확산, D=0.5
 Fig. 8 density diffusion over time for each distance, D=0.5

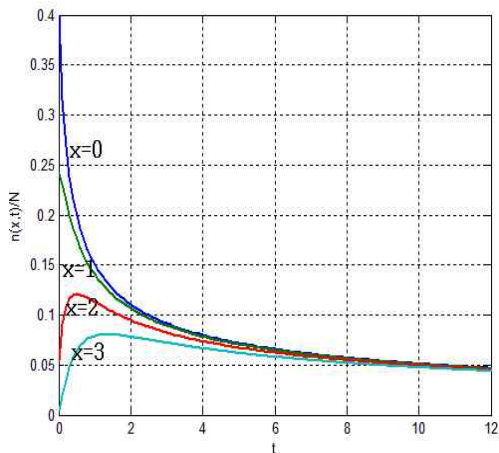


그림 9. 시간경과 대비 농도 확산, D=3
 Fig. 9 density diffusion against time for each distance, D=3

그러나 어느 정도의 시간이 경과되면 그 농도의 감소는 매우 약해진다. 또한, 공간상의 차이도 많이 줄어든다. 한편, 각 공간 거리별 시간대비 농도의 확산 현상을 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

상기 그림 6과 그림 7에서 확산계수를 채택한 이유와 마찬가지로 그림 8인 경우에 D=0.5를, 그리고 그림 9인 경우에 D=3를 적용하여 작성하였다. 이 두 그림에서 보면 확산계수가 작으면 시간이 경과해도 어느 정도까지는 거리별 농도의 차이가 아주 좁혀지지 않는다. 그런데 거리가 아주 멀어지면 좀더 근접하기는 한다. 한편, 그림 9에서와 같이 확산계수가 크면 시간이 어느 정도 경과하면 거리에 관계 없이 농도가 일정한 수준으로 수렴해간다. 그림의 경우는

본래 농도의 5% 정도가 된다. 즉, 아주 중요한 문제로서 인체에 약품을 주입한다든가 할 때에 그 확산속도가 빠르면 경과시간이나 도달거리가 얼마냐에 관계 없이 본래 약품의 약 5% 정도는 잔류하게 된다는 것이다.

V. 결 론

확산이란 체내의 입자나 분자의 농도가 균일하지 않을 때에 입자의 무작위 열운동에 의해서 물질의 농도가 높은 곳에서부터 낮은 곳으로 입자의 순수이동이 일어나는 현상이다. 순수이동효과에 의해서 그 농도는 시간이 경과함에 따라 점차 균일해지게 된다. 농도의 비균일성이나 경도가 크면 클수록 이러한 확산은 증가되는데, 이러한 현상을 픽의 첫번째 확산법칙에 의하여 해석할 수 있다. 확산방정식에서 음의 부호는 아주 중요한데 이는 분자의 흐름이 고농도에서 저농도로 향한다는 사실을 반영하는 것이다.

이러한 현상을 정량적으로 분석하기 위해 동맥인 경우에 각 시각에 대한 공간거리의 함수로서 농도의 변화 현상을 그림으로 표시하였다. 여기서 확산계수의 크기에 의한 확산현상을 시각적으로 명확하게 보여주기 위해 편의상 확산계수가 작은 경우와 큰 경우로 나누어서 검토하였다.

이 결과 각 시간별 공간상의 확산현상을 관찰해보면 확산계수가 클 때는 시간이 경과함에 따라 발생지점의 농도는 현저히 낮아지고 그 농도가 주위로 급속히 확산되어감을 알 수 있다. 그러나 어느 정도의 시간이 경과되면 그 농도의 감소는 매우 약해진다. 또한, 공간상의 차이도 많이 줄어든다. 한편, 각 공간 거리별 시간대비 농도의 확산 현상도 검토하였다. 그 결과 확산계수가 작으면 시간이 경과해도 어느 정도까지는 거리별 농도의 차이가 아주 좁혀지지 않는다. 그런데 거리가 아주 멀어지면 좀더 근접하기는 한다. 그런데, 확산계수가 크면 시간이 어느 정도 경과하면 거리에 관계 없이 농도가 일정한 수준으로 수렴해간다. 그림의 경우는 본래 농도의 5% 정도가 된다. 즉, 아주 중요한 문제로서 인체에 약품을 주입한다든가 할 때에 그 확산속도가 빠르면 경과시간이나

도달거리가 얼마냐에 관계 없이 본래 약품의 약 5% 정도는 잔류하게 된다는 것이다. 본 논문에서는 픽법에 의한 체내의 확산에 대해서 살펴보았으나, 체내의 확산에는 여러 가지 요인이 관계되므로 앞으로 좀 더 넓은 범위의 연구가 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 호시아마 노조무, 엄광문·김영철 편역, “의용계측의 기초”, *양서각*, 2004.8.
- [2] Stuart Ira Fox, "Human Physiology", 7th ed., *Academic Internet Publisher*, 2009.12.
- [3] Robert Plonsey, Roger C. Barr, "Bioelectricity - A Quantitative Approach", 3rd ed., *Springer*, pp97-154, 2007.
- [4] Paul Davidovits, "Physics in Biology and Medicine", 3rd ed., *Academic Press*, pp180-199, 2008.
- [5] Martin Zinke-Allmang, "Physics for the Life Science", *Nelson Education*, pp443-480, 2007.
- [6] 최규식, 최은정, "인체물리", *여문각*, pp163-188, 2011.1
- [7] A. L. Hodgkin, A. F. Huxley, "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve", *University of Cambridge, J. Physiol.*, pp500-544, 1952.
- [8] Irving P. Herman, "Physics of the Human Body", *Springer*, pp713-766, 2007.
- [9] D.S.Jones, B.D.Sleeman, "Differential equation and mathematical biology", *CRC Press Company*, pp263-298, 2005

최 규 식 (崔圭植)



1973년 서울대학교 공과대학
전기공학과(공학사)
1983년 뉴욕공과대학 전기공학과
(공학석사)
1993년 명지대학교 전기공학과
(공학박사)
1978년 ~1993년 한국전력기술
중앙연구소 책임연구원

1993년 ~ 현재 건양대학교 의공학과 교수

관심분야 : 생체계측, 의학물리, 원자력