

N-propyl-N,N-dimethylethanolamine의 Phantom에서 Laser Induced Fluorescence의 스펙트라에 관한 연구

김기준[†] · 이주호* · 이주엽** · 성완모

[†]대진대학교 공과대학 화학공학과

*Southern California대학 화학과, **중원대학교 방재안전공학과
(2015년 6월 2일 접수; 2015년 6월 20일 수정; 2015년 6월 20일 채택)

A Study on Spectra of Laser Induced Fluorescence in Phantom of N-propyl-N,N-dimethylethanolamine

Ki-Jun Kim[†] · Joo-Ho Lee · Joo-Youb Lee · Wan-Mo Sung

[†]*Dept. of Chemical Engineering, Daejin Uni. Pochun 487-711, Korea*

**University of Southern California, Dept. of Chemistry,
Locker Hydrocarbon Institute Bloom Walk LHI 132, Los Angeles, USA*

***Dept. of Disaster Manag. & Safety Engineering, Jungwon Uni. Chungbuk, 367-700, Korea
(Received June 2, 2015; Revised June 20, 2015; Accepted June 20, 2015)*

요약 : N-propyl-N,N-dimethylethanolamine의 산란혼탁매질에서 형광, 산란과 응집의 영향은 파장과 산란된 형광세기로 나타내는데, laser induced fluorescence(LIF) 분광학에 의한 분자특성으로 나타난다. 산란매질에서 광학적 효과는 광학적 파라미터들(μ_s , μ_a , μ_t)에 의해 표현되고 응집은 고-액상 분리 공정에서 중요하게 활용되고 있다. 따라서 입자가 서로 접근될 때 콜로이드 입자들의 상호작용을 LIF와 응집효과로 분석하였다. Monte Carlo simulation과 실험으로 레이저 광원에서 검출기까지 거리의 함수에 의해 농도가 묽어짐에 따라 산란세기가 기하급수적으로 감소함을 알 수 있었다. 이는 유지화학, 생의학, 레이저 의학, 의공학 분야적용에 LIF와 입자이동 현상은 아주 적합한 모델 연구에 큰 도움이 될 것이다.

Abstract : The influences of fluorescence, scattering, and flocculation in turbid material by light scattering of N-propyl-N,N-dimethylethanolamine, fluorescence agent and absorption agent were interpreted for the scattered fluorescence intensity and wavelength. They have been studied the molecular properties by the spectroscopy of laser induced fluorescence (LIF) and flocculation. The effects of optical properties in scattering media have been found by the optical parameters(μ_s , μ_a , μ_t). Flocculation is an important step in many solid-liquid separation processes and is widely used. When two particles approach each other, interactions of several colloid particles can come into

[†]Corresponding author
(E-mail: kjkim@daejin.ac.kr)

play which may have major effect on the flocculation and LIF process. The values of scattering coefficient μ_s are large by means of the increasing scattering of scatterer, The values have been found that the slope decays exponentially as a function of concentration from laser source to detector by our experimental result. It may also aid in designing the best model for oil chemistry, bio-pharmaceutical, laser medicine and application of medical engineering on LIF and coagulation in particle transport mode.

Keywords : *N-propyl-N,N-dimethylethanolamine, light scattering, laser induced fluorescence, optical parameters, flocculation, biopharmaceutical*

1. 서론

농도가 진한 turbid 매질의 물질계에서 산란, 흡수계수의 물리적 의미가 불확실하였으나, laser 등의 효율적 광원의 발명과 reflectance 문제에 대한 분석에서 산란 cross section과 흡수 cross section에 의해 optical parameters의 해석이 가능하게 되었다[1-3]. 이러한 장치를 이용하여 산업 뿐만 아니라 생의학적 응용에서 외과적인 수술시 종양조직을 완전히 제거하지 못할 뿐만 아니라 방사선 치료와 약물요법에서 광활성제의 대부분이 높은 독성을 가지고 있기 때문에 종양세포 뿐만 아니라 정상세포에도 작용하여 부작용을 준다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 광활성제를 종양조직에만 선택적으로 수송하여 치료함은 물론, 정상조직에 영향을 미치지 않게 하려는 연구들이 많이 진행되고 있다[4,5].

이에 Dougherty 가 Photodynamic Therapy (PDT)에서 인체에 생기는 많은 종양에 대해 새로운 치료 모델링을 제안하였으나, 지금까지 이 분야에 대한 연구는 그 필요성 때문에 주로 생의학 분야에서 활발히 진행되고 있으나 아직 초기 단계에 있다. 따라서 이 분야에 대한 기초를 정립하여 발전하게 될 Laser induced fluorescence (LIF) spectroscopy의 biomedical 응용에서 종양의 진단 및 치료에 효과적으로 이용할 수 있도록 모델링을 세우기 위해 본 연구를 수행하게 되었다. 산란 매질에서 빛 에너지 전파가 diagnostic spectroscopy의 발전과 therapeutic laser delivery의 dosimetry에서, PDT의 임상실험과 photobiology 등의 여러 분야에 응용되나, 특히 살아 있는 tissues에서의 비파괴적 흡수 및 산란 성질의 측정은 광학적 특성을 결정하는 데 가장 중요한 문제이다[6-8]. 40°C에서 50°C사이에는

효소들과 단백질의 작용기에서 변질과 비가역적 응집이 일어나고, 60°C에서 70°C사이에서는 교원질 변질이 생기며 부차적인 결손이 일어난다고 보고된 바 있다. 따라서 정확한 량의 빛을 쬐어 주어도 조직에 전달된 빛 중에서 약간의 차이에 따라 효과적일 수도 있으며, 또는 비효과적, 치명적인 손상을 입히게 되는 치료가 될 수도 있다 [9].

이에 본 연구의 제 일차목적은 scattering media에서의 fluorescence spectral lineshapes이 산란체, 형광체, 흡수체의 성질, optical geometry에 대한 토대를 세우기 위해 실험과 Monte Carlo simulation을 하여 비교 분석하였다. 따라서 이론과 실험으로 규명한 결과 같은 경향성을 나타내고 있었다. 그리하여 부차적으로 수반되는 목적은 laser와 광섬유와의 연결기술 개발 [10-12], 또한 광섬유를 이용한 light delivery 등을 개발 연구하였다.

2. Scattering 실험

인체의 세포조직은 lipid가 주성분으로 산란체로 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine을 사용하였으며, 흡수체(melanin)가 함유되어 있고, 광증감제가 대부분 형광물질이기 때문에 형광체로 Rhodamine 6G (RA-6G)를 사용했다. 실험은 single line mode의 argon ion laser를 사용하였고(Coherent Co., Innova70 파장 514.5 nm) 형광을 520 부터 900 nm 사이에서 측정하였다. Laser beam을 산란체, 형광체(RA-6G), 흡수체(india ink)가 들어 있는 Phantom(모의 시스템)에 비추며, 광섬유(4 mm 직경)를 사용하여 측정된 빛을 모아서 photomultiplier로 검출하며,

photon counter로 photon intensity를 측정하였다. 실험장치는 Fig. 1과 같다. 산란된 빛은 광섬유를 통하여 neutral density filter를 지나 Monochromator(SPEX, model 1870, 50Cm focal, length, groove 1800개/mm)에 들어가는데 Monochromator의 파장은 minidrive(SPEX, model 1872)로 작동하며, Monochromator에 연결된 Photo multiplier tube(products for Research사, model RCA31034A)의 thermal noise를 줄이기 위해 수냉식과 DC power supply를 이용하여 -20 °C를 유지해 주었다.

III. Monte Carlo Simulation

Monte Carlo simulation을 이용하여 광자의 행적, 성질, 생성, 소멸 등을 albedo ($a = \mu_s / [\mu_s + \mu_a]$)와 photon source geometry를 변수로 이용하여 확산에 의한 computer simulation을 하는 방법을 사용하였다[13-14]. 빛의 전송부분에 있어서 광자들이 산란되거나 흡수되는 경로를 기록하는데, 여기서 μ_s 는 scattering coefficient, μ_t 는 total attenuation coefficient, 즉 $\mu_t = \mu_a + \mu_s$ 이며, μ_a 는 absorption coefficient이다. Monte Carlo simulation을 이용하여 μ_a , μ_t 등의 변수들을 체계적으로 변화시키며 산란광의 행적을 조사했다. Scattering process에 대한 Monte Carlo simulation의 model geometry는 Fig. 2와 같다.

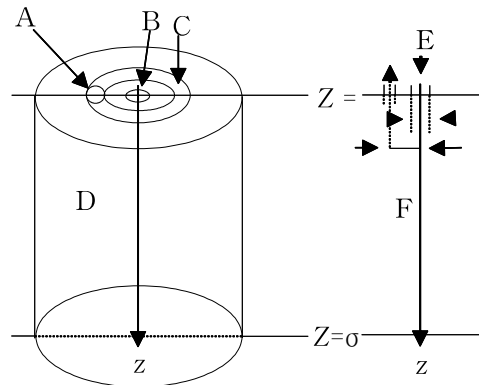


Fig. 2. Geometry to measure the reflected light as a function of the distance to an incident beam.

A: measuring area, B: source, C: detection ring, D: scattering volume, E: incident beam, F: scattering medium

Model geometry는 인체 치아에서 치관을 덮는 조직인 에나멜에 비교된다. 튼튼한 에나멜은 투명하나, 초기의 충치는 에나멜 안쪽의 구조적 변화가 일어나 에나멜에 검은 반점이 생긴다. 치아의 광학 parameters의 측정은 충치 과정의 단계를 나타낸다.

Monte Carlo simulation의 computer program은 광자의 산란에서 행동을 관측하기 위한 simulation이다. Computer program은 크게 scattering simulation program들과 image processing부분으로 나눌 수 있는데, 본 program은 C언어로 작성하였으며 산란, 형광과 흡수에 대한 photon flux의 transport 과정을 다룬다. 본

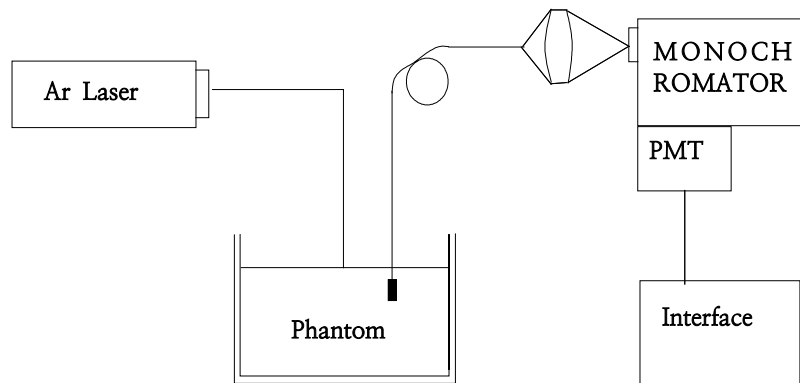


Fig. 1. Diagram of experimental apparatus.

연구에서 scattering simulation program의 code는 약 1400줄로 작성하였으며, scattering program의 설계원리는 다음과 같다.

첫째; 초기의 입사광의 성질을 결정한다. Source로 부터 입사되는 광자는 등방적 phase function으로부터 통계적으로 방향 등에 대한 광자의 성질을 부여한다. Random number는 0와 1사이 값을 갖는다.

둘째; 한번 산란되는 구간을 정한다. 매질로부터 광자가 이탈되는 것을 고려하고 광자는 처음 위치에서 충돌에 의해 다음 산란체가 있는 위치로 진행할 때 거리의 함수로서 나타낼 수 있다. 입사간의 거리를 나타내는 평균 자유 행로(mean free path)의 stepsize는 total attenuation coefficient의 역이다.

산란된 구간을 다음 식으로

$$\Delta S = \frac{1}{\mu_t} = \frac{1}{\mu_a + \mu_s} \quad (1)$$

나타낼 수가 있는 데, stepsize가 모의 계에서 아주 작아지면 광자의 상호작용(산란과 흡수)을 못한다. 광자는 진행하는 방향에 따라 3개의 공간 좌표와 2개의 방향 각도로 설명할 수 있으며, (X, Y, Z)위치에서 ΔS 가 움직인 거리 (μ_x, μ_y, μ_z)에 따라 새로운 좌표 (x', y', z')에 의해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x' &= x + \mu_x \Delta S \\ y' &= y + \mu_y \Delta S \\ z' &= z + \mu_z \Delta S \end{aligned} \quad (2)$$

셋째; 진행된 빛의 세기, 비행거리, 위치등을 계산한다. 빛이 입사됨에 따라 매질에서 광자의 순수한 흡수가 일어나며 최초의 광자의 질량은 1로 간주하고 경로에 따라 감소한다. 광자가 경계를 통해 매질에 입사됨에 따라 굴절률이 다른 영역에서 내부 반사(internal reflection)가 일어난다. 이는 Fresnel reflection 방법에 의해 아래와 같이 주어진다[15].

$$R(\theta_i) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right\} \quad (3)$$

윗 식에서 $\theta_i = \cos^{-1}(\mu_z)$ 는 경계에서 입사각이고 θ_t 는 Snell 법칙에 의한 반사된 각도이다.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (4)$$

광자가 내부적 반사를 하지 않으면 광자는 phantom을 빠져 나가거나 backscattering light이나 transmitted light이 된다. 또한 광자가 내부 반사를 하면 광자의 위치와 방향이 변하며, phantoms geometry에서 x, y 방향은 무한하고 z 방향에서 두께만이 변한다. 내부적으로 반사된 광자는 현 광자 위치 (x', y', z')에서 새로운 광자의 위치 ($\mu_x, \mu_y, -\mu_z$)로 진행함에 따라 (x', y', z') = ($\mu_x, \mu_y, -\mu_z$)와 같이 나타낼 수 있다.

네째; 광자의 위치가 산란체 밖이거나 세기가 0이 되면 비행을 중지 한다. 대부분 표면반사(surface reflection)에 따른 확산이 일어나지 않는 조건은 매질의 두께 d에서 표면 $z = 0$ 과 바닥 $z = d$ 을 경계조건이라 간주하면 다음 식으로 나타낸다.

$$\int_{2\pi, \mu > 0} L_d(r,s)(s,z) d\omega = 0 \quad (5)$$

윗 식에서 경계조건 밖이란 산란체 밖을 의미하며 광자의 경로 길이가 0이다. 광자의 weighting scheme은 매질에서 순수한 absorption을 설명할 수 있으며, 질량은 1이고 광자가 경로에 따라 순수한 흡수가 감소됨을 감안한다. 광자는 흡수와 산란 두 부분으로 구분하며, 흡수되는 광자의 분율은 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{fraction absorbed} &= \\ \frac{\mu_a}{\mu_s + \mu_a} &= 1 - \frac{\mu_s}{\mu_a + \mu_s} = 1 - a \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 a는 입자의 albedo 이다. 새로운 광자의 질량 $\omega' = a\omega$, 이는 새로운 단계에서 산란되어진 packet의 분율을 나타낸다. 즉 흡수는 흡수된 빛의 량과 위치에 관계됨을 알 수 있지만 특히, 광자는 $(1 - a)\omega$ 가 0이 될 때까지 비행한다.

다섯째; 광자는 현재의 위치, 방향 및 계의 성질에 의해 새로운 산란구간을 진행한다. 광자의 위치와 운동 방향은 공간 좌표에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \omega &= \cos(\theta) = \text{reldir}[2] \\ v &= \cos(\varphi)\sin(\theta) = \text{reldir}[1] \\ u &= \sin(\varphi)\sin(\theta) = \text{reldir}[0] \end{aligned} \quad (7)$$

현재의 광자위치 (x, y, z)와 새로운 광자의 위치 (x', y', z')는 아래 식으로 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} x' &= x + \Delta s u \\ y' &= y + \Delta s v \\ z' &= z + \Delta s \omega \end{aligned} \quad (8)$$

광자는 (x, y, z)위치와 방향 (θ, φ) 에서 새로운 위치 (x', y', z')와 방향 (θ', φ') 으로 산란에 의해 진행함을 알 수 있다. 광자가 현재의 산란되는 점에서 광섬유에 도달하는 확률밀도 P는 다음식과 같다.

$$P = \omega P(\mu_0) d\omega_0 \exp[-(\rho \sigma_s + a) z_0] \quad (9)$$

여기서 ω = photon의 질량, p(μ₀) = phase function, μ₀는 산란되기 전 광자의 방향사이 cosine각도로 표면 z = 0에 수직이고, dω₀는 시료에서 검출기의 solid angle z₀ = scattering 의 depth를 뜻한다. 따라서 exp[-(ρσ_s + a) z₀]는 현재 위치에서 산란, 흡수 되지 않고 검출기에 도달하는 확률이다.

여섯째; 세번째의 과정으로 돌아간다. 광자 무게가 거의 영(0)에 도달하면 비행을 중지하고 산란에 의해 광자 무게가 회복되어 순환을 계속하게 되는 기법을 Roulette라고 한다. 이러한 일련의 Roulette결과에 의해 매질에 입사된 빛이 광섬유에 검출되어 광자 세기를 나타낸다.

결론적으로 확산이론은 광자 flux가 산란체를 확산해 가는 것으로 확산방정식을 분석적으로 푸는 방법이다[19]. 다음 식은 collimated pulsed light 빔이 semi-infinite 또는 finite의 균일한 입자의 매질에 입사된 경우에서 확산 식으로 다음과 같다.

$$\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \phi(r, t) - D \nabla^2 \phi(r, t) + \sigma_a \phi(r, t) = S(r, t) \quad (10)$$

여기서 φ(r, t) 는 diffuse photon fluence rate로 source-detector 간의 거리(r)와 시간(t)의 함수로

나타내며, c 는 이 매질에서의 광속도 이며, σ_a 는 linear absorption coefficient을 뜻한다. D는 diffusion coefficient로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D &= [3(\sigma_a + \mu_s)]^{-1} \text{ 이고} \quad (11) \\ \mu_s &= (1-g)\sigma_s \text{ transport scattering coefficient} \\ \sigma_s &= \text{linear scattering coefficient} \\ g &= \text{scattering angle의 평균 cosine} \\ S(r, t) &= \text{photon source} \end{aligned}$$

산란계의 행동을 관측하기 위한 본 프로그램은 광자가 시료 속에서 생성되어 진행됨은 산란, 흡수, 형광에 의해 생성되거나 소멸되고 내부적으로 반사, 투과된 진로에 따라 광자의 세기, 비행거리, 위치 등을 계산하였다. Scattering process에 대한 Monte Carlo simulation의 program process는 Fig. 3과 같다.

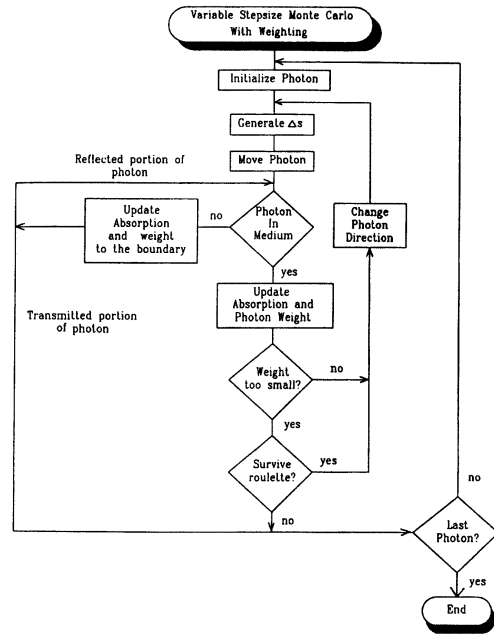


Fig. 3. Monte Carlo simulation program processes.

4. 결과 및 고찰

산란체인 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine 의 scattering coefficient를 결정하기 위해

N-propyl-N,N-dimethylethanolamine의 농도 변화에 따라 산란되지 않은 빛의 양을 측정하였으며, Added Absorber Technique[15]을 사용하여 total attenuation coefficient(μ_t)는 산란 입자만 존재하기 때문에 scattering coefficient(μ_s)에 일치한다. 전체 attenuation coefficient 측정은 single scattering만이 일어나도록 하기 위해 매우 묽은 농도에서 실험 하였고, 산란되지 않고 나오는 light detection의 각도를 작게 하기 위해 iris를 사용하였다.

μ_s 를 측정하기 위한 공식은 다음과 같다.

$$I = I_0 \exp(-\mu_s C d) \quad (12)$$

여기에서 C는 농도를 뜻하고, d는 cuvette 의 직경, I는 irradiance (W/m^2), I_0 는 입사 irradiance를 뜻한다. 그러므로 scattering coefficient: μ_s 는 다음 식으로 나타낸다.

$$\mu_s = \frac{1}{d} \frac{\partial \ln(I/I_0)}{\partial C} \quad (13)$$

RA-6G는 정상세포에 비해 세포분열이 왕성한 종양세포 및 종양세포가 전이된 세포에 특이적으로 결합하는 능력이 있다. 자외선이나 빛을 쬐어 활성화시키면 특이한 형광을 발생하므로 종양 및 종양세포가 전이된 곳의 위치를 확인할 수 있다. 광활성 작용이란 어떤 물질이 빛을 흡수하여 산화될 수 있는 조건(oxidative condition: dye + light + oxygen)하에서 biological molecule system을 변화시키거나 파괴시키는 작용을 뜻하며 singlet oxygen에 의해 photodynamic therapy(PDT)결과를 얻어 낼 수가 있었다.

Table 1. Measured Mean Values versus Optical Parameters of N-propyl-N,N-dimethylethanolamine, from source to detector

I	$\mu_t(mm^{-1})$	Distances(cm)
4,386	09.469	2.0
8,627	11.788	1.5
14,998	17.134	1.0
19,249	24.052	0.5

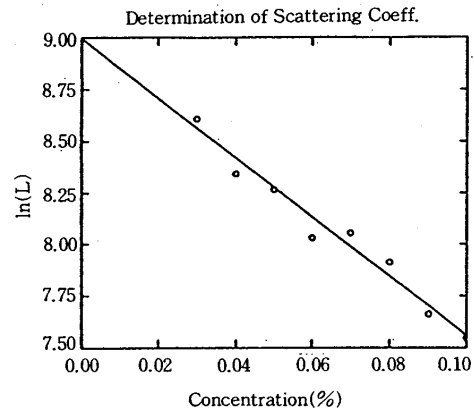


Fig. 4. Transmitted light as a function of the concentration of N-propyl-N,N-dimethylethanolamine

Fig. 4는 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine의 농도 변화에 대한 측정되어진 빛의 세기를 보여준다. 이 값들은 10번을 짤현성 있게 실험하여 평균한 값들이다. Table 1은 Fig. 4에서 측정된 값을 나타낸 것으로 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine 농도가 묽을수록 강한 forward쪽으로 투과가 일어나고, 반면 농도가 진함에 따라 산란에 의해 on-axis intensity가 크게 작아짐을 알 수 있었다. 이는 농도가 진해짐에 따라 검출기에 닿는 비율이 적어짐을 뜻하는데, 매질 층이 두꺼워서 증가함을 예상할 수 있었다. Table 2는 흡수체인 india ink를 Phantom 속에서 상온 하에 농도변화에 따른 흡수한 빛의 세기를 측정한 결과를 도시한 것으로 농도가 진할수록 흡광계수가 증가함을 알 수 있었다. 이는 india ink 농도가 진해짐에 따라 빛의 흡수가 많이 일어나 투과된 빛의 세기가 감소하였고, 광자가 매질속에서 상호작용하여 흡광체의 농도가 증가함에 따라 입자간의 거리, 즉 MFP(mean free path)가 작아지며 on-axis 투과도 역시 작아짐을 확인하였다. Fig. 5의 그림은 (a)Monte carlo simulation과 Phantom 속에서 실험적으로 측정된 결과로서 on-axis 투과도는 흡수와 산란에 의해 감쇠현상이 일어나는데 광원과 검출기까지의 거리에 대한 투과도를 도시하여 기울기로부터 total attenuation coefficient, $\mu_t = \mu_s + \mu_a$ 의 크기를 알 수 있다. 따라서 거리에 대한 함수로 스펙트럼을 조사하고 attenuation coefficients와 penetration depth에서 광자 deposition의 공간

Table 2. Measured Mean Values versus Optical Parameters of RA-6G from source to detector

I	$\mu t(\text{mm}^{-1})$	Distances(cm)
4,113	07.896	0.5
3,412	05.268	1.0
2,236	03.743	1.5
1,024	1.765	2.0

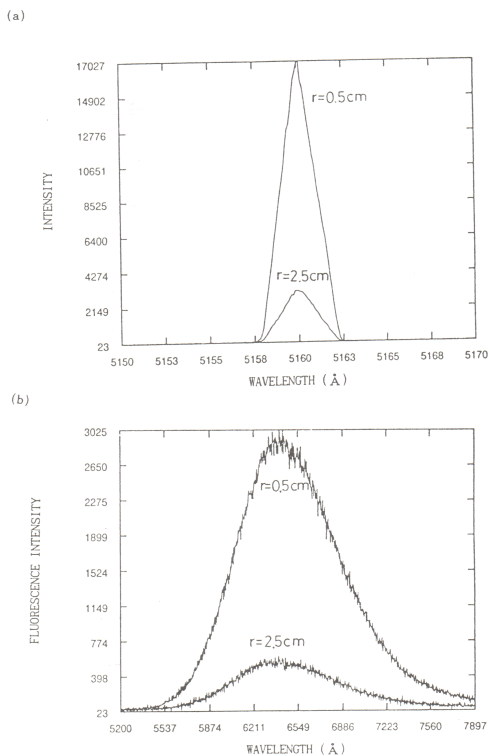


Fig. 5. Scattering and fluorescence Spectra of as a function of distance measured from source to detector by Monte carlo simulation: (a) scattering spectra of intralipid as a function of distance (0.5 cm, 2.5 cm), (b) fluorescence lineshapes of RA-6G as a function of distance(0.5 cm, 2.5 cm).

방사 energy fluence 값 및 다른 optical parameters 를 구해서 광자 성질을 정성적으로 분석하였다. 광자가 혼탁 매질에서 비행함에 따라 산란체 입자의 수에 의해 산란세기가 검출되며,

광원과 검출기 간의 거리가 가까우면 앞 쪽으로 강한 광자 세기가 나타난다. (a), (b)의 작은 스펙트럼처럼 세기가 작아지는 것은 거리가 멀어짐에 따라 한번 또는 전혀 산란이 안 일어 날 수도 있다. (a)는 intralipid에 대해 광원과 광검출기 간의 거리 0.5 cm와 2.5 cm 등의 거리 별로 레이저 산란을 측정하고, (b)는 형광체인 RA-6G 를 거리 별로 형광 세기를 도시 하였으며, 거리가 멀어지면 형광 세기가 작아지는 데, 다른 연구자들의 보고와 같이 조직 세포 두께를 첨가함에 따라 실험한 결과와 경향성이 같음을 알 수 있었다. Beer법칙에서 벗어난 결과로서 산란체의 입자가 많을수록 광자 세기가 증가하였고, 이는 backscattered retroreflectance의 영향이라고 사료 된다.

실험과 비교분석할 수 있는 simulation 방법은 일정한 geometry에서 입사하는 광자의 방향을 측정하여 얻을 수 있다. 굴절된 광자가 매질성질에 의해 산란되거나 흡수가 되고, 광자가 내부 반사를 하지 않으면 계 밖으로 이탈함으로 소멸된다. 따라서 Program은 특정시간이나 공간에서 산란된 광자들의 위치와 방향, 또는 흡수된 광자들의 위치를 추적할 수 있었다.

Monte Carlo simulation에 의해 광자가 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine의 phantom속에 입사될 때부터 검출기에 닿을 때까지의 깊이에 대하여 레이저를 이용한 광원과 광검출기간의 거리를 1.0cm로 고정해 놓고, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0cm의 길이에서 광자수가 동시에 혼탁매질에 입사되는 경우의 simulation 결과이다. 이들의 광자에 대한 분포를 조사하면 매질에서 깊이가 가까우면 산란 세기가 증가하고, 깊이가 커지면 산란 세기가 감소함을 알 수 있다. 따라서 광자수를 많이 simulation의 대상으로 할수록 편차가 적고 정확도가 커짐을 알 수 있었다.

Fig. 5의 (a)는 산란체인 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine을 상온 하에서 광원에서 검출기까지의 농도별로 흡수되지 않고 투과한 빛의 세기를 측정하고, (b)는 광증감제, 형광체인 RA-6G에서 형광세기를 측정하고, (a)는 농도가 진함에 따라 형광세기가 크게 나타났다. Table 2는 Fig. 5와 같은 실험 결과로서 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine의 Phantom 속에서 광원에서 검출기까지의 거리에 따른 산란세기를 측정하고, (b)는 거리가 가까워짐에 따라 산란세기가 기하급수적으로 증가함을

알 수 있었다.

N-propyl-N,N-dimethylethanolamine의 아미노산의 농도가 증가함에 따라 산란세기가 증가하고, 뭉침에 의해 빛의 흡수가 강해진다. 이는 투과된 빛의 세기가 약해지는 현상이다. 이 현상은 광자가 상호 작용하여 매질의 농도가 클수록 입자간의 거리, 즉 MFP(mean free path)가 작아지며 축방향 투광도 역시 작아짐을 확인하였다.

Table 3. Measured Mean Values versus Optical Parameters of N-propyl-N,N-dimethylethanolamine, from source to detector

I	$\mu t(\text{mm}^{-1})$	Distances(cm)
4,274	09.435	2.0
18,525	11.785	1.5
12,776	16.034	1.0
17,027	23.911	0.5

Table 4. Measured Mean Values versus Optical Parameters of RA-6G from source to detector

I	$\mu t(\text{mm}^{-1})$	Distances(cm)
3,025	07.195	0.5
2,250	05.028	1.0
1,149	03.279	1.5
398	00.982	2.0

5. 결론

본 연구에서 LIF에 의한 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine, RA-6G, india ink의 phantom 속에서 광학적 파라미터를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산란매질에 레이저 광이 입사됨에 따라 광자를 검출하는 광검출기까지의 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine의 농도가 진할수록 산란 세기가 증가하였으며, N-propyl-N,N-dimethylethanolamine의 농도가 묽을수록 산란 세기가 작아짐을 알 수 있었다.
2. 무질서한 산란매질에서 N-propyl-N,N-dimethylethanolamine 시료가 RA-6G 시료보다 산란계수기가 더 증가함을 알 수 있었다.

3. Monte Carlo simulation과 실험의 경향성이 동일하였으며, 광자 축적에 따른 공간적 침투에 대한 광자의 발견확률, 침투거리 등에 관한 산란세기가 형광세기보다 크게 나타났다. 따라서 Scattering media 안에서 광원과 광검출을 하는 광검출기까지 광분포를 분석한 결과 거의 일치함을 알 수 있었다. Fluorescence lineshape의 변화는 이론 및 실험 두 방법에서 거의 일치함을 알 수 있었다.
4. 빛의 파장에 의해 광자의 확산과 열적반응을 뭉침과 정밀여과 공정을 거친 후에 입자크기 분포에서 산란체, 형광체, 흡수체 순으로 산란과 형광세기가 나타났다.

Phantom속에 레이저 빛이 입사됨에 따라 광원으로부터 광자를 검출하는 광검출기까지 거리나 깊이가 가까울수록 산란세기가 증가하였다. 산란체, 흡수체 및 광증감제인 RA-6G에서 스펙트럼의 선모양은 광학적 파라미터의 경향을 알 수 있으며 산란체가 증가할수록 광자세기가 증가하였다. Monte Carlo simulation에 의해서 계산된 값과 실험결과가 일치함을 보였다. 따라서 의공학분야에서 레이저와 광검출의 연결기술 개발 및 light delivery의 개발 등에 기초를 세울 수 있다.

References

1. K. J. Kim and K. C. Sung, A Study on Spectra of Laser Induced Fluorescence in Phantom, *J. of Korean Oil Chemist' Soc.*, **16**(4), 329 (1999).
2. K. J. Kim and K. C. Sung, Monte Carlo Simulation on Light Distribution in Turbid Material, *J. of Korean Oil Chemists Soc.*, **15**(4), 11 (1998).
3. K. J. Kim and K. C. Sung, Studies on Measurements of Optical Parameters in Turbid Material by Light Scattering, *J. of Korean Oil Chemists Soc.*, **12**(2), 151 (1995).
4. S. L. Jacques and S. A. Prahl, Modeling Optical and Thermal Distribution in Tissue During Laser Irradiation, *Laser in Surgery and Medicine* **6**, 494 (1987).
5. B. C. Wilson, Y. D. Park, Y. Hefetz, M.

- S. Patterson, S. J. Madsen and S. L. Jacques, The Potential of Time-resolved Reflectance Measurements for the Noninvasive Determination of Tissue Optical Properties, in Thermal and Optical Interactions with Biological and Related Composite Materials, M. J. Berry and G. M. Harpole, eds., Proc. S. P. I. E., p. 97, (1989).
6. S. L. Jacques, C. A. Alter, and S. A. Prahl, Angular Dependence of HeNe Laser Light Scattering by Human Dermis, *Laser in the Life Science*, **1**(4), 309 (1987).
7. T. J. Dougherty, C. J. Gomer, and K. R. Weishaupt, Energetics and Efficiency of Photoinactivation of Murine Tumor Cells Containing Hematoporphyrin, *Cancer Research* **36**, 2330 (1976).
8. R. R. Alfano, G. C. Tang, A. Pradhan, W. Ran, S. J. Daniel and E. Opher, Fluorescence Spectro from Cancerone and Normal Human Breast and Lung Tissues, *IEEE J. Quan. Elec. QE*, **23**(10), 1806 (1987).
9. S. R. Wickramasinghe, Y. Wu, and B. Han, Enhanced Microfiltration of sorbitan ester of fatty acid by Flocculation, *Desalination* **147**, 25, (2002).
10. L. O. Poicard, C. J. Gomer, and A. E. Profio, Laser-Induced Hyperthermia of Ocular Tumors, *Appl. Opt.*, **28**(12), 2318 (1989).
11. M. Winkelmann, B. Chance, and B. C. Wilson, Time Resolved Reflectance and Transmittance for the Noninvasive Measurement of Tissue Optical Properties, *Appl. Opt.*, **28**(12), 2331 (1989).
12. K. Lee, I. J. Forbes, and W. H. Betts, Oxygen Dependency of Photocytotoxicity with Hematoporphyrin Derivative, *Photochem. Photobiol* **39**(5), 631 (1984).
13. R. Hilf, P. B. Leakey, S. J. Sollitt, and S. L. Gibson, Photodynamic Inactivation of R3230AC Mammary Carcinoma in vitro with isobutyl-p-hydroxybenzoate: Effects of Dose, Time and Serum on Uptake and Phototoxicity, *Photochem. Photobiol.* **37**(6), 633 (1983).
14. H. Schneckenburger, M. Frenz, Y. Tsuchiya, U. Denzer, and L. Schleinkofer, Picosecond Fluorescence Microscopy for Measuring Chlorophyll and Porphyrin Components in Conifers and Cultured Cells, *Lasers in the Life Science* **1**(4), 299 (1987).
15. S. R. Wickramasinghe, Y. Wu, and B. Han, Enhanced Microfiltration of sorbitan ester of fatty acid Flocculation, *Desalination*, **147**, 25(2002).