

사람 손의 지연발광 특성

양준모[†] · 최준호 · 소광섭

서울대학교 물리학부 한의학물리 연구실
④ 151-747 서울시 관악구 신림동 산56-1

임우택 · 이한상 · 채승병 · 윤세열 · 이경일 · 신은석

한국과학영재학교
④ 614-103 부산광역시 부산진구 백양관문로 111

최선미

한국한의학연구원 의료연구부
④ 305-811 대전광역시 유성구 전민동 461-24

(2005년 12월 1일 받음, 2006년 1월 6일 수정본 받음)

6명 피험자의 손바닥과 손등의 일정 영역에 대해 광조사 시간과 파장을 변인으로 하여 빛을 조사한 후 되방출 되는 지연발광을 PMT를 검출기로 한 지연발광 검출장치를 이용하여 시간영역(time domain) 상에서 측정하였다. 광조사 시간을 바꾸어가며 지연발광 특성을 조사한 결과 광조사 시간에는 뚜렷한 의존성을 찾을 수 없었으나 각 피험자마다 지연발광의 세기, 지속시간 등에 있어서 다른 감쇄 특성을 보였다. 그리고 조사광의 파장(색깔)을 350~450 nm, 450~550 nm, 550~650 nm 세 영역으로 나누어 측정한 결과 350~450 nm 영역에서는 강한 지연발광을 보였으나 나머지 영역에서의 지연발광은 상대적으로 미약함을 알 수 있었다. 사람 피부에서의 지연발광 현상은 피험자의 피부조직의 생리상태(활성산소의 농도)와 밀접한 관련이 있을 것으로 예상되며 인체피부 조직의 생리상태를 비침습적으로 진단할 수 있는 새로운 방법이 될 수 있음을 시사한다.

주제어 : 생물광자, 지연발광, 피부, 쌍곡선함수, 진단

I 서 론

모든 살아 있는 생물의 세포와 조직은 그 생명활동으로 자외선과 가시광선 및 적외선 영역(200 nm~800 nm)의 빛을 방출하는 것으로 알려져 있으며, 이를 생물광자(biophoton)이라 한다. 이의 첫 연구는 러시아의 Gurwitsch^[1]였으며, 현대적 연구는 Popp^[2], Inaba^[3] 등이 광증배관(PMT)과 고감도 CCD를 사용하여 수행하게 되었다. 생물광자는 세포분열, 세포 및 조직의 손상과 치료 등과 관련하여 생물 및 의학적 연구가 많이 이루어졌으며^[4,5] 특히 암세포 등에 관한 연구가 많이 수행되었다.^[6,7]

물리학적 측면에서 생물광자의 중요성은 그것이 양자 결맞음(quantum coherence) 특성을 보이므로 큰 관심을 끌었다.^[8,9,10] 생물광자 중 외부의 빛 자극이 없이 세포수준에서 방출되는 것을 자발광(spontaneous photon emission)이라 하고, 외부에서 빛을 조사한 후 차단했을 때 방출되는 것을 지연발광(delayed luminescence)이라 한다. 지연발광의 양자적 결맞음은 그 봉과 곡선이 방사능처럼 지수함수적으로 떨어지지 않고, 쌍곡선 함수적 특성을 갖는다는 것이다. 지연발광의

이러한 쌍곡선봉괴함수(hyperbolic decay curve) 특성을 해밀 토니안 모형을 써서 양자적 결맞음으로 설명하는 이론을 Popp^[10], Bajpai^[11] 등이 제안한 바 있다. 이러한 관점에서 연구가 동물의 조직과^[12] 암세포^[13] 등에서 수행된 바 있으며, 식물의 잎^[14,15]에서 많은 실험이 있었다.

본 연구에서는 사람의 손등과 손바닥의 피부에서 지연발광의 특성을 조사하는 기초실험을 수행하였다. 사람의 피부가 보여주는 지연발광의 연구는 피부의 건강과 피부암 등의 진단과 관련하여 매우 중요한 의학적 활용이 예상되는 바인데, 아직까지 이 연구가 수행된 바 없었다. 본 연구는 비록 기초적이긴 하지만 최초의 시도란 점과, 앞으로 이 방면의 연구를 더욱 체계적으로 수행할 만한 가치가 있다는 것을 보여 준데 의의가 있다. 이 연구는 건강한 청소년을 대상으로 수행하였으며, 추후 노인, 환자 등의 연구를 위한 기초자료의 획득에 목표를 두었다. 각 개인별로 지연발광 특성 곡선의 매개 변수가 어떻게 다른가를 봄으로써, 개인별 피부의 광특성을 체계적으로 분류할 수 있는 가능성도 있음을 보았다. 이러한 연구가 통계적 자료를 얻을 만큼 대대적으로 수행된다면 피부의 진단과 건강검진의 새로운 modality를 제시할 수 있다는 점에서 이 기초 연구의 의미가 있다고 보았다.

[†]E-mail: joonmol@snu.ac.kr

II. 실험 방법과 절차

1. PMT를 이용한 생물광자 지연발광 검출 장치

본 장치의 구성에 대해서는 이미 Yi 등이^[16] 보고한 바 있다. 그림 1의 모식도에서 볼 수 있듯이 이 장치는 CCD와 PMT를 호환할 수 있도록 설계 되었으며 CCD를 사용할 경우 지연발광 영상을 얻을 수 있다. 최초로 CCD를 이용하여 엄밀한 시간 통제 특성을 보이는 지연발광 장치를 구성하였고 싹트는 콩이나 나뭇잎 등 지연발광에 대한 이차원 영상획득에 성공하였다^[16,17]. 인체를 비롯한 동물 조직을 대상으로 한 지연발광 연구가 어려운 이유는 그 강도가 식물에 비하여 상대적으로 훨씬 작기 때문이다. 이로 인해 측정공간 내의 완벽한 광차단이 필수이며, 빠르고 일정하게 시간 통제가 가능한 광조사부와 셔터(shutter), 그리고 샘플을 균일하게 조사할 수 있는 특수 제작된 광학렌즈(Zenosys, Korea)와 이들의 적절한 공간배치 등의 기술적 문제를 극복하여야 한다. 본 장치는 이러한 조건을 모두 충족시킨 시스템(Zenosys 제작)이라고 할 수 있다. 본 실험에서는 사람의 피부조직에 대한 미약한 지연발광 신호를 시간영역(time domain) 상에서 얻기 위하여 PMT를 장착하였다. 시간영역 생물광자 지연발광 검출기는 아래와 같이 크게 3부분으로 구성된다.

a) 광원부

동식물 조직의 지연발광 연구는 가능한 넓은 스펙트럼(spectrum) 특성과 강하며 균일한 광도를 보이는 광원을 사용할수록 다양한 실험을 시도할 수 있다. 본 실험에서 사용한 광원은 metal halide lamp(KLS-150W-NC, Zenosys, Korea)로 이 광원의 스펙트럼 특성은 그림 3과 같다. 그리고 이 빛을 시료가 있는 곳까지 유도하기 위하여 UV가 통과하는 광섬

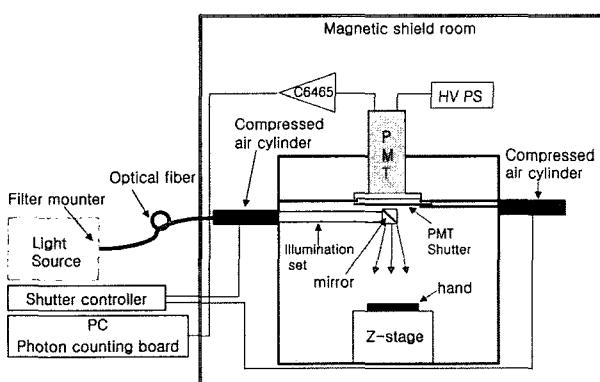


그림 1. 생물광자 지연발광 검출기의 모식도. 피험자는 외부 빛이 차단된 공간에서 측정 부위를 Z-stage 위에 올려놓고 안정적으로 지연발광 측정에 임할 수 있다. 측정 공간의 온도와 습도($22 \pm 1^\circ\text{C}$, $18 \pm 3\%$)는 순환 시스템을 이용하여 외부와 평형을 이루고 있다.

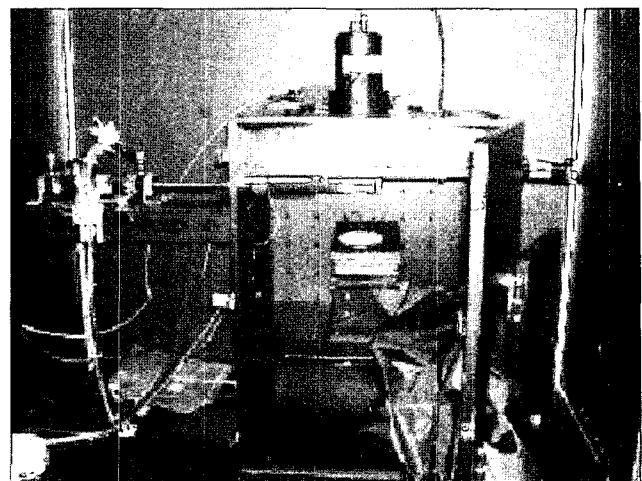


그림 2. 생물광자 지연발광 검출기 모습. Z-Stage의 상단은 접촉 시 냉감을 주지 않게 하기 위해 black styrofoam 재질을 부착하였고, 손가락을 고리에 끼워 측정 동안 손의 흔들림을 막았다.

광조사에 사용된 광원의 스펙트럼

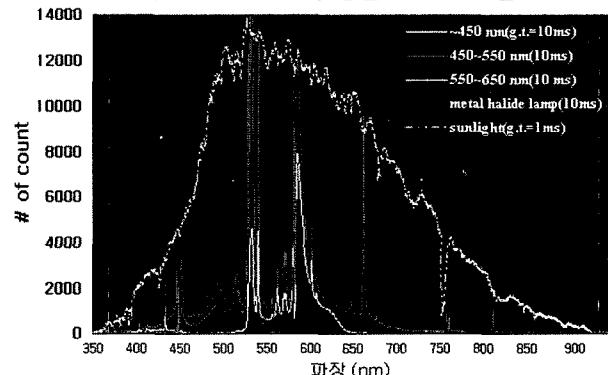


그림 3. 광조사에 사용된 광원의 스펙트럼 Ocean Optics의 HR4000으로 측정하였으며 gate time 은 10 ms이다. (단, 햇빛의 경우는 1 ms 임)

유(A2873, 1-0403009, Hamamatsu, Japan)를 사용하였다. 만일 특정 파장대역의 빛만을 조사하고자 할 경우는 lamp와 광섬유의 연결부위에 있는 mounter에 filter를 장착하면 된다. 본 실험에서는 LPF(long wavelength pass filter, CVI)와 SPF(short wavelength pass filter, CVI)을 조합하여 band pass filter를 구성 조사광의 파장을 선택하였다.

b) Shutter controller & 광 조사부

그리고 이 장치의 가장 큰 특징이라 할 수 있는 광조사부는 강한 압축 공기를 구동력(compressed air cylinder)으로 동작하며 솔레노이드 전기신호에 의해 촉발되고 광원의 빛을 유도하기 위한 광학계가 내장되어 있다. 실험자가 원하는 광조사 시간과 셔터 노출시간을 맞춰 놓으면 통제/구동회로는 이 시간에 따라 일련의 과정을 자동적으로 동작한다. 먼저

광조사가 시작됨에 따라 광조사부는 시료 쪽으로 이동, 설정해 놓은 시간 동안 거울을 통해 시료의 상공에서 빛을 조사한 후 조명시간이 끝나면 실린더의 공기압에 의해 암상자 밖으로 밀려나가며, 다시 이에 의해 촉발된 솔레노이드에 의해 PMT입구에 있는 셔터가 개방되어 지연발광 신호를 측정하게 된다. 광조사부의 빛 조사 종료 후 PMT셔터의 개방까지의 전 과정은 고압의 압축공기를 사용하여 모두 100 ms이하에 동작하게 되어 있다. 이 시스템의 가장 큰 특징은 모든 과정이 자동으로 이루어진다는 점과 빠른 동작 그리고 광조사와 셔터의 개폐가 전자시스템을 이용하여 동일한 조건으로 통제된다는 것이다. 이로써 수동으로 셔터를 조작할 경우의 시간 통제 문제가 극복되었다.

광조사부는 거울을 최종단으로 하여 시료의 상공에서 수직으로 빛을 조사하게 되는데 매우 예리한 끝선을 갖도록 설계되었으며 빛을 받는 면적을 정량적으로 통제할 수 있다. 그리고 지연발광 영상 이미지를 얻기 위해서는 조사하는 영역에 균일한 광도로 빛이 조사되어야 한다. 이를 위해 원형 모양의 광조사 영역은 중심부와 가장 자리가 10% 이하의 광도 차이만을 보이므로 일정 수준 균일한 광조사 조건을 만족시킨다. 광조사는 Z-stage로부터 15 cm 상공에 부착된 반사거울을 통해 이루어졌으며 조사영역은 원형으로 직경 약 6.5 cm의 넓이이다.

c) 광검출부(PMT) 및 자료 수집부

이 시스템은 광검출부에 PMT나 CCD를 모두 장착할 수 있도록 설계되어 있다. 지연발광의 시간적(time domain) 특성을 관찰하고자 한다면 감도가 상대적으로 좋은 PMT를, 2 차원 영상과 같은 공간적 특성을 관찰하고자 할 경우는 CCD를 장착함으로써 시료의 특성에 맞게 호환이 가능하다. 나뭇잎을 비롯한 식물조직은 지연발광 량이 비교적 강하여 CCD를 이용하여 영상의 획득도 가능하나 동물조직을 대상으로 할 경우는 지연발광 양이 매우 미약하여 상대적으로 감도가 우수한 PMT를 사용하는 것이 바람직하다. 사람의 피부조직을 대상으로 한 본 연구에서는 센서로서 PMT(R331-05S, Hamamatsu, Japan)를 사용하였다. 사용된 PMT의 dark count는 30 cps이다.

2. 실험절차

먼저 각 피험자는 피험자는 일정 시간 암실에서 대기 후 지연발광 실험에 임하게 된다. 대기 시간이 필요한 이유는 사람의 피부가 햇빛과 같은 강한 빛에 노출된 경우에도 지연발광과 같은 효과를 보이기 때문이다. 이 신호의 지속시간은 조사 받은 빛의 강도에 따라 다르며 햇빛을 수직으로 조사 받은 경우는 3시간 이상도 소요된다. 그러나 건물내의 일반 조명 수준에서는 30분 이하면 충분하다. 본 실험에서 모든 피험자는 대기실의 매우 희미한 붉은색 조명에만 노출되었으며 실험 결과에 영향을 주지 않음을 확인하였다.

생물광자 측정에 임하기 전에 피험자는 알코올로 측정부위를 세척하고 광차단 된 암실에 입실한 후 stage에 손을 위치시킨 후(그림 2) 외부의 빛이 새어 들어가지 않도록 상자의 문에 설치되어 있는 광차단 용 토시의 매듭을 압박감을 느끼지 않는 수준에서 맨다. 그리고 보조 도구 등을 이용하여 피험자가 측정 시간(약 15분)동안 편안한 자세를 유지할 수 있도록 적절히 팔을 받친다. 피험자의 자세가 안정적으로 확보되면 측정자는 암실의 문을 닫고 실험 규약에 따라 shutter controller에 시간을 입력하고 측정을 시작한다.

6명의 피험자를 두 그룹으로 분류하여 3명(sub1, 2, 3)은 오른 손등, 3명(sub 4, 5, 6)은 오른 손바닥에 대한 지연발광을 측정하였는데 그 분류 기준은 손등/손바닥 중 십 여분이 넘는 측정시간 동안 유지가 편한 자세를 고려한 것이다. 이 하 제시된 각 피험자의 자료는 각 피험자의 지정 부위에 대한 결과이다.

III. 결과 및 분석

6명의 피험자에게 지연발광 효과를 조사하였다. 피험자 1,2,3 은 손등에서, 피험자 4,5,6은 손바닥에서 방출하는 지연발광을 측정했으며, 손등과 손바닥의 뚜렷한 차이는 관찰할 수 없었다. 그리고 광조사 시간을 1분에서 7분까지 1분 간격으로 변화시켜며 측정해 보았으나 이 영역에서는 광조사 시간과 지연발광량 사이의 비례적 경향성이 있는지 여부는 신호에 의해 편차가 작아 결론지을 수 없었다. 그림 4는 6명

6 명 피험자의 지연발광 곡선

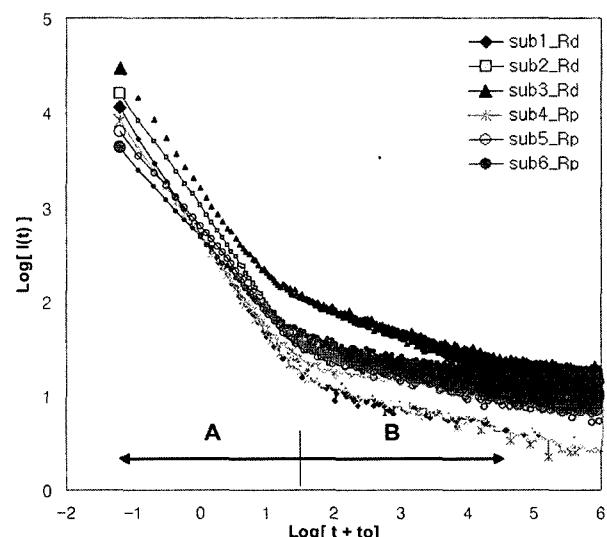


그림 4. log-log 평면상에서 6명 피험자의 3분 광조사 후의 지연발광 특성으로 각 피험자마다 5회 자료의 평균치가 반영됨. 각 피험자마다 지연발광 특성이 다르며 개인별 재현성이 뚜렷이 보임. ($\Delta t = 0.1$ sec, Rd: 오른 손등, Rp: 오른손바닥) 각 피험자의 지연발광 곡선의 명확한 구분을 위하여 오차막대는 표현하지 않았음.

피험자의 전형적인 시간에 따른 지연발광 그래프를 log-log 평면상에서 도시한 것이다. 그림 5와 표1의 I_0 값을 비교하여 볼 때 6명 중 피험자 3이 초기에 가장 강한 지연발광을 보였으며 β 값으로부터 피험자 1과 4는 가장 빠른 감쇄를 보임을 알 수 있다. 그리고 피험자 2,5,6은 초기 값(I_0)에서는 차이를 보였으나 B구간에서는 비슷한 경향을 보였다. 동일한 광조사 시간과 광량에 대해 빛을 조사하였을 시 각 피험자마다 재현성을 갖고 각기 다른 특성을 보인다는 것이 주목할만한 결과였다.

지연발광은 쌍곡선 붕괴함수(hyperbolic decay function)의 특성곡선에 따르는 것이 알려져 있으므로^[10,11], 6명의 피험자의 지연발광 자료를 이에 따라 분석하였다. 먼저 이를 각각의 지연발광 곡선을 다음의 쌍곡선 붕괴함수에 따라서

$$I(t) = I_s + \frac{I_0}{(1+t/t_0)^\beta} \quad (1)$$

매개변수들(I_s , I_0 , t_0 , β)을 최소 χ^2 가 되도록 구하였다. 여기서 I_s 는 $t \rightarrow \infty$ 일 때의 광량자 방출이므로 자발광의 정도를 나타낸다. I_0 는 초기 지연발광의 세기를 나타내는 량이며 t_0 는 일반적으로 개체의 상태에 따라 달라지는 변수로 보편적 해석은 주어져 있지 않다. 지연발광 시스템의 특성을 나타내는 가장 중요한 매개 변수는 β 로 알려져 있으며, 보통 1보다 큰 값을 갖는다^[15]. 여기서는 피험자의 피부의 광 특성을 나타내는 변수가 β 이며, 좀 더 많은 통계적으로 자료를 구한다면 의학적으로 유용한 의미를 찾을 것이 예상되는 량으로 추후 더 연구할 가치가 있다. 1식에서 볼 수 있듯이 지연발광 초기에는 자발광(I_s)보다 두 번째 항 즉 지연발광 항이 지배적이다. 이 경우 자발광(I_s)항을 무시하고 1식의 양변에 로그를 취하면 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다(단, $I(t)$ 와 t 간에 있어서 단위의 관계가 명확해야 함).

표 1. 지연발광의 쌍곡선 붕괴함수 특성 값

$I(t) = I_s + \frac{I_0}{(1+t/t_0)^\beta}$ 의 curve fitting 매개 변수 값들($\Delta t = 0.1$ sec).
5회 측정자료의 평균치 (광조사 3분)

	I_s (counts/0.1 sec)	I_0 (counts/0.1 sec)	t_0 $\times 0.1$ sec.	β
Sub1 (Rd)	6.82 ± 1.45	$1.14 \times 10^4 \pm 4.44 \times 10^3$	2.67 ± 0.43	2.45 ± 0.13
Sub2 (Rd)	13.1 ± 0.95	$1.56 \times 10^4 \pm 11.5 \times 10^3$	3.07 ± 0.35	2.25 ± 0.21
Sub3 (Rd)	20.3 ± 1.58	$2.99 \times 10^4 \pm 1.49 \times 10^3$	2.51 ± 0.79	2.15 ± 0.45
Sub4 (Rp)	6.85 ± 0.60	$0.81 \times 10^4 \pm 2.09 \times 10^3$	3.03 ± 0.62	2.30 ± 0.20
Sub5 (Rp)	10.8 ± 1.33	$0.62 \times 10^4 \pm 3.25 \times 10^3$	3.90 ± 1.78	2.13 ± 0.23
Sub6 (Rp)	13.4 ± 3.03	$0.42 \times 10^4 \pm 3.88 \times 10^3$	3.39 ± 1.30	1.72 ± 0.31
6명 평균	11.8 ± 5.04	$1.26 \times 10^4 \pm 9.38 \times 10^3$	3.09 ± 0.50	2.17 ± 0.25

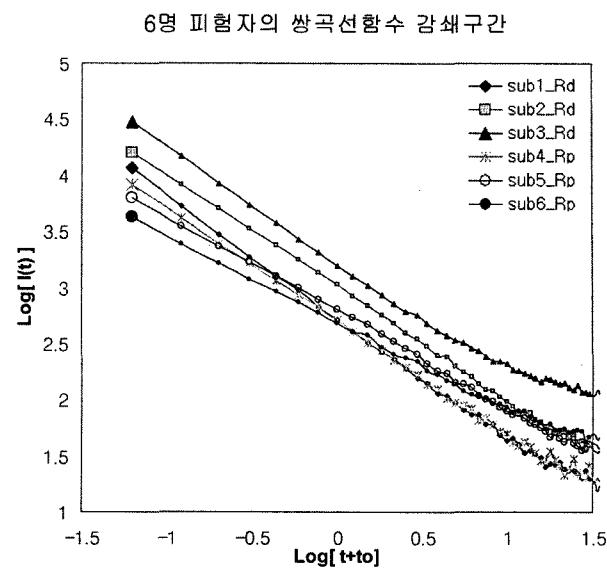


그림 5. 그림 4에서 지연발광 구간 A 만을 도시한 것으로 초기 값 I_0 가 개인에 따라 큰 차이를 보이며 기울기 β 값도 개인별 차이를 보임을 알 수 있다.

$$\log[I(t)] = \log I_0 + \beta \log(t + t_0) \quad (2)$$

이 식은 지연 발광 신호 $I(t)$ 와 시간 t 에 대한 지수 표현형태에서 두 양이 선형관계로 표현될 수 있음을 말하며 쌍곡선함수 붕괴에 따른 수학 표현상의 특징이라고 할 수 있다. 이때 β 는 붕괴곡선의 기울기를 나타내 준다. 그림 4의 결과가 보여주듯이 사람 손의 지연발광 특성도 쌍곡선 함수처럼 붕괴(그림 4의 구간 A)한다는 것을 알 수 있다. 그리고 시간이 지남에 따라 그림 4의 구간 B와 같이 I_s 로 안정화 됨을 알 수 있다. 이 구간은 지연발광은 사라지고 자발광(I_s)이 지배적인 구간이다.

그림 5는 그림 4에서 지연발광이 지배적인 구간인 A부분만을 도시한 것으로 상기 언급하였듯이 이 표현상에서 직선의

기울기인 β 값이 개인별로 명확히 결정될 수 있음을 알 수 있다. 그림 5와 이를 수치적으로 계산한 표1의 값에서 보듯이 피험자 1이 가장 빠른 감쇄특성을 보였으며 다음으로 피험자 4,2 그 다음으로 피험자 3,5 이었으며 피험자 6이 가장 작은 감쇄율 특성을 보였다. 비록 피험자 수가 통계적으로 충분치 않으나 어떤 매개 변수에 대해서도 손바닥과 손등의 차이를 확인할 수 없었다.

이상 6명에 대한 I_s , I_0 , t_0 , β 값을 조사해 봤으며 개인의 특성을 구분 짓는 변수로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 이 값들에 대한 3분 광조사 후의 각 피험자의 평균적 결과(5회)는 표 1과 같다.

표 1에서 보듯이 I_s 는 68 cps에서 203 cps까지 일반적으로 알려진 손의 자발광의 량과 유사함을 볼 수 있다. 한편 I_0 는 조사광에 의한 초기 지연발광으로 0.42×10^5 cps에서 2.99×10^5 cps까지 아주 높은 값을 보여주며, 실험조건에 매우 민감한 값이다. I_0 값이 다른 량들에 비해 편차가 심한 것은 셔터동작의 촉발신호와 PMT측정의 시간 간격이 서로 동기화 되지 않았기 때문이다. 광조사가 끝난 직후 셔터가 완전 열리는데 약 0.1 초가 걸리고 PMT의 gate time이 역시 0.1초 이므로 셔터 동작 시각과 PMT측정의 gate time을 동기화가 이루어지지 않은 본 시스템은 0.1 sec 수준의 time series 상에서의 편차가 있게 된다. 지연발광 초기에는 불과 0.1초의 시간 내에 신호가 급격히 떨어지므로 0.1초의 시간 불일치는 I_0 값에 큰 편자를 만들 수 있는 요인이다. 이 점도 본 시스템이 기술적으로 극복해야 할 문제이다. 그러나 I_s 와 더불어 t_0 와 β 값이 비교적 일정한 값을 보여주는 점이 주목 할 점이며 이의 생의학적 의의는 앞으로 밝혀야 할 중요한 과제이다.

본 실험의 연장으로 사람 손의 지연발광이 조사 광의 파장에 어떠한 의존을 보이는지에 대한 예비 실험을 수행해 보았다. 그림 3의 스펙트럼 분포에서 보듯이 metal halide lamp의 색깔을 350 ~ 450 nm, 450 ~ 550 nm, 550 ~ 650 nm 세 영역으로 나누어 광조사를 실시하였다. 그러나 본 실험에는 각 파장 영역의 강도를 균일하게 통제할 수는 없었다.

그림 6은 이에 대한 지연발광 곡선의 전형적인 그래프이다. 표 2에서 볼 수 있듯이 지연발광의 강도나 감쇄율(β)에 있어서는 피험자마다 다른 값을 보였지만 짧은 파장의 빛을 조사할수록 강한 지연발광을 보인다는 것은 6명 모두 일관되었다. 그림 6에서 550 ~ 650 nm의 빛의 경우는 지연발광을 거의 유도할 수 없다는 것을 알 수 있으며 나머지 피험자

조사광의 색깔에 따른 지연발광 곡선_sub1

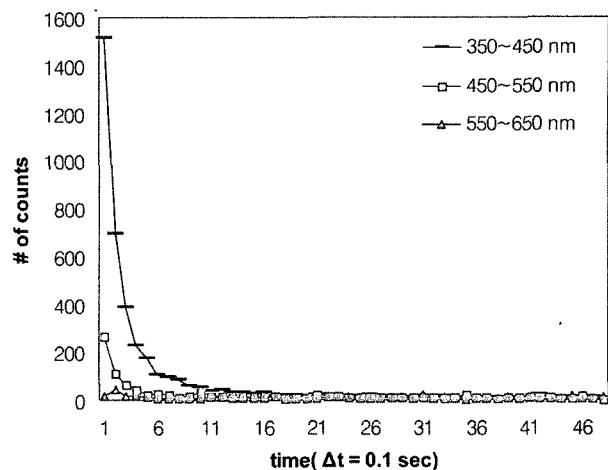


그림 6. 조사광의 색깔에 따른 지연발광 곡선의 전형적인 경우로(피험자1) 짧은 파장을 조사할수록 초기 방출량(I_0)은 물론 총 방출량도 높음을 알 수 있다.

역시 마찬가지 특성을 보였다. 조사광의 강도가 350 ~ 450 nm 영역에서 가장 미약했음에도 불구하고 이 영역의 빛이 가장 강한 지연발광을 유도함을 확인 하였다. 추후 충분한 통계적 의의를 갖는 실험을 수행하여 따로 보고할 예정이다. 더욱이 6 명의 피험자 모두에게서 그림 6과 같은 지연발광 경향을 나타내었으며 이 사실을 바탕으로 350 ~ 450 nm의 빛이 550 ~ 650 nm 영역의 빛보다 강한 지연발광을 유도한다는 것은 일반적인 현상으로 판단된다. 스펙트럼을 나누어 측정할 경우 신호가 감소하는 문제를 극복한 후 조사광의 파장을 세분화 하고 동시에 지연발광 신호도 세분화 하는 실험을 수행한다면 의미 있는 실험 결과가 예상된다.

IV. 토 의

생물체가 방출하는 생물광자(biophoton) 중 지연발광(delayed luminescence)은 시간적 붕괴 곡선이 쌍곡선함수란 것이 큰 특징이다. 일반적으로 무생물과 분자수준의 광방출(형광, 인광)이나 방사능 원소의 방사광 방출은 지수 함수적 붕괴곡선을 갖는다. 즉 두 가지 현상은

$$I(t) = I_s + \frac{I_0}{(1+t/t_0)^\beta} ; \text{ 생물의 지연발광 } \quad (3-1)$$

$$I(t) = I_0 e^{-\alpha t} ; \text{ 형광, 방사능 등 } \quad (3-1)$$

표 2. 조사광의 색깔에 따른 지연발광

광조사 종료 직후부터 지연발광 측정 시작부터 5초 사이에 방출된 광자 수의 총 합

파장 (nm)	Sub1 (Rd)	Sub2 (Rd)	Sub3 (Rd)	Sub4 (Rp)	Sub5 (Rp)	Sub6 (Rp)
350~450	4020	2497	15782	3651	2630	1432
450~550	1044	1067	3578	1256	852	1286
550~650	450	566	929	409	468	496

와 같이 다른 봉괴특성을 보인다. 생물 지연발광의 이러한 특성은 광원이 되는 생물분자들의 상호작용에 의한 협동현상을 의미하며, 물리적으로는 광자들의 양자적 결맞음(quantum coherence)을 나타내는 것으로 Popp^[10], Bajpai^[11], Kim^[12] 등이 해밀토니안 모형으로 해석한 바 있다. 본 실험에서 피험자 6명의 손에 방출하는 지연발광의 경우 역시 쌍곡선 함수적 봉괴로 잘 맞춰짐을 보았다. 이러한 실험은 동물의 조직^[12], 암조직(cancer tissue)^[18,19], 암세포^[13], 식물의 잎^[14,15], 원시생물^[20] 등에서 널리 수행되었으나, 건강인의 피부에서 측정한 것은 본 연구가 최초란 점에서 의의가 있다. 특히 β 값은 각 생물의 중요 광특성을 나타낸다고 여겨지는데, 예를 들어 몇 가지 실험 값들을 비교해보면 사철나무 잎: $\beta = 2.14 \pm 0.29$ ^[15], 49°C에서 테쳐진 사철나무 잎 $\beta = 1.01 \pm 0.16$ ^[15], 쥐의 간 $\beta = 0.62 \pm 0.05$ ^[12], 동결 후 해동된 인간의 암조직의 지연발광의 경우 $\beta = 0.80 \sim 1.17$ ^[21] 등으로 조사 되었다.

Kim 등^[19]이 보고한 암조직에 대한 연구에서 암조직과 정상 조직의 자발광 방출률 간에는 서로 특별한 차이를 보이지 않았으나 지연발광에 있어서는 이들의 특징을 명확히 구분짓는 신호를 보였다. β 값을 환자의 경우, 특히 피부암 등 환자에서 측정한다면 질병진단에 관한 매우 유용한 응용이 가능할 것으로 예상되며, 이에 관한 추가 연구의 필요성이 제기된다. 비침습적이며 경제적이고 빠른 진단의 장점이 예상되기 때문이다.

이 연구를 더 발전시키는 방향으로 조사광의 스펙트럼에 따른 지연발광 특성과 자발광(spontaneous photon emission) 방출률^[22]과의 관련성을 조사하는 것이다. 본 연구에서는 램프의 광량이 불충분하고, 검출장비의 감도 제한으로 파장대역을 350~450 nm, 450 ~ 550 nm, 550 ~ 650 nm의 세 영역으로 나누어 예비실험을 해 보았다. 그림 3의 광원의 스펙트럼에서 알 수 있듯이 램프의 특성과 기술적인 문제로 세 영역의 빛 세기를 균일하게 통제하지는 못하였으나 450 ~ 550 nm 영역에서는 미약하게 지연발광을 검출할 수 있는 수준이었고 550 ~ 650 nm 영역에서는 지연발광이 거의 없음을 확인하였다. 검출기의 양자 효율과 조사광의 상대적 세기 차이, 발광스펙트럼의 분포를 고려할 때 350 ~ 450 nm 영역의 지연발광 효과가 가장 큰 것을 알 수 있었다. 이는 UV-A 영역이 DNA의 광반응 효과가 있다는 사실^[23]과 DNA의 형태변화가 생물광자의 중요원천^[8,24]이라는 사실과 합치하는 결과이다. 그리고 동일한 6명의 피험자에 대하여 생물광자 자발광 진단기^[22]를 이용하여 지연발광과 자발광 방출률과의 상관성을 조사해본 결과 대체적으로 자발광이 강한 피험자일수록 지연발광도 강한 경향을 보였다(상관계수 0.81). 지연발광 측정 시 피험자 손의 안정적 자세유지 등이 보완된다면 더 높은 상관을 보여주는 결과가 예상된다. 이상의 두 선행 실험 결과와 지연발광 신호가 뚜렷한 개인적 특성을 보인다는 사실을 종합하여 볼 때, 생물광자의 중요한 원천이 활성산소(ROS)이므로^[4,5,6,25] 이의 농도를 비침습적으로 유추할 수 있는 방법으로 응용될 수 있을 것이다. 추후 UV-A 영역

의 광원과 검출체계를 갖춘 본격적인 연구가 진행될 경우 지연발광의 근본 기전 연구 및 의학적 응용 연구에 특별한 의의가 예상된다.

본 연구에서는 광원으로 metal halide lamp를 써서 지연발광을 조사했으나, 자연 환경에서의 의학적 응용을 위해서는 햇빛의 지연발광 효과를 연구할 필요가 있다. 햇빛의 경우 실험 조건(광량 등)의 정밀 제어가 어렵고, 따라서 동일 조건의 재현 실험을 하기 어려우므로 통계적으로 의미 있는 결과를 내기가 쉽지 않다. 이 분야의 연구는 피부의 건강과 미용 등으로 보건 산업에 큰 관심을 갖고 있으나, 실제 연구는 극히 미미하다. 본 연구에서 예비적 실험을 수행한 바로는 3분의 햇빛 노출에서 지연발광의 세기(I_0)는 약 10배 정도 커졌으며, 봉괴 시간이 1시간 정도로 길었다. 햇빛에 의한 지연발광은 쌍곡선 봉괴함수로 간단히 맞춰지지 않는 것으로 알려져 있으며, 그 정확한 이유는 알려져 있지 않으나, 빛의 세기가 너무 강하여 보통의 지연발광과는 다른 생리적 활동이 연쇄적으로 일어나기 때문에 Popp^[10]나 Bajpai^[11] 등의 단순한 양자적 해밀토니안 모형으로 설명될 수 없다고 보는 것이다. 그러므로 햇빛의 연구는 실용적으로 매우 중요함에도 불구하고, 그 이론적 복잡성과 정밀한 실험의 수행상 난점으로 지연발광 연구가 활발히 이루어지지 않고 있으나, 앞으로 체계적인 연구를 할 가치가 크다고 본다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부(NRL,M1-0302-00-0007), 한국한의학 연구원, 한국과학기술원의 R&E 프로그램의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- [1] A. G. Gurwitsch, "Ueber den Begriff des embryonalen Feldes," *Arch. Entw. Mech. Org.*, vol. 51, pp. 383-415, 1922.
- [2] F. A. Popp, *Biologie des Lichts*, Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg, 1984.
- [3] B. Devaraj, M. Usa and H. Inaba, "Biophotons: ultraweak light emission from living systems," *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, vol.2, pp.188-193, 1997.
- [4] M. Kobayashi, B. Devaraj, M. Usa, Y. Tanno, M. Takeda and H. Inaba, "Two-dimensional imaging of ultraweak photon emission from germinating soybean seedlings with a high sensitive CCD camera," *J.Photochem. Photobiol.*, vol. 65,no. 3, pp. 535-537. 1997.
- [5] M. Kobayashi, M. Takeda, T. Sato, Y. Yamazaki, K. Kaneko, K. I. Ito, H. Kato and H. Inaba, "In vivo imaging of spontaneous ultraweak photon emission from a rat's brain correlated with cerebral energy metabolism and oxidative stress," *Neurosci. Res.*, vol. 34, pp. 103-113, 1999.

- [6] M. Takeda, Y. Tanno, M. Kobayashi, M. Usa, N. Ohuchi, S. Satomi and H. Inaba, "A novel method of assessing carinaoma cell proliferation by biophoton emission," *Cancer Lett.*, vol.127, pp. 155-160, 1998.
- [7] H.J. Niggli, "The cell nucleus of cultured melanoma cells as a source of ultraweak photon emission." *Naturwissenschaften*, vol. 83, pp. 41-44, 1996.
- [8] M. Rattemeyer, F.A. Popp, W.Nagl, "Evidence of photon emission from DNA in living systems." *Naturwissenschaften*, vol. 68, pp. 572-573, 1981.
- [9] F.-A. Popp, and Y. Yan, "Delayed luminescence of biological systems in terms of coherent states," *Phys. Lett. A*, vol. 293, pp.93-97, 2002.
- [10] F. A. Popp, J. J. Chang, A. Herzog, Z. Yan and Y. Yan, "Evidence of non-classical(squeezed) light in biological systems," *Phys. Lett A*, vol. 293, pp. 98-102, 2002.
- [11] R. P. Bajpai, "Coherent Nature of the Radiation Emitted in Delayed Luminescence of Leaves," *J. Theor. Biol.*, vol. 198, pp. 287-299, 1999.
- [12] J. Kim, J. Lim, B. Sung, K.-S. Soh, "Biophoton Emission from Rat Liver," *J. Kor. Phys. Soc.*, vol. 42, no.3, pp. 427-430, 2003.
- [13] R. Van Wijk, H. Van Aken, "Light induced photon emission by rat hepatocytes and hepatoma cells," *Cell Biophys.*, vol. 18, pp. 15-29, 1991.
- [14] B.Sung, SH Yi, C Lee, JM Yang, JS Kim, KS Soh, JS Yang, Delayed luminescence of biophotons from plant leaves, *J. Opt. Soc. Kor.*, vol. 8, no. 22, pp. 132-136, 2004.
- [15] J. K. Lim, J. Kim, B. Sung, C. Choi, K.-S. Soh, "Investigation of delayed luminescence from plant leaves using photomultiplier tube," *Sae Mulli*,47, pp.133-138, 2003.
- [16] S.-H. Yi, S.-B. Shim, J.-S. Kim, J.-M. Yang, C.H. Lee, K.-S. Soh. "Optimum Lens Organization and System Set-up for 2-Dimensional Imaging of Biophoton," *Hankook Kwanghak Hoeji*, vol.15, no. 6, pp. 519-526, 2004.
- [17] C. Lee, Biophoton imaging system using CCD camera (M.Sc. thesis, Seoul National University, Seoul, 2004).
- [18] F. Musumeci, A. Triglia, and F. Grasso, "Experimental evidence on Ultraweak photon emission from normal and tumour human tissues," in *Recent Advances in Biophoton Research* (F. A. Popp et. al. ed. World Scientific, Singapore, 1992) pp.307-326.
- [19] H.-W. Kim, et al., "Spontaneous photon emission and delayed luminescence of two types of human lung cancer tissues: Adenocarcinoma and Squamous cell carcinoma", *Cancer Letter*, vol. 229, pp. 283-289, 2005.
- [20] R. P. Bajpai, "Biophoton emission in a squeezed state from a sample of *Parmelia tinctorum*," *Phys. Lett. A*, vol. 322, pp. 131-136, 2004.
- [21] J. Kim, et al., "Measurements of Spontaneous Ultraweak Photon Emission and Delayed Luminescence from Human Cancer Tissues," *J. Altern. Complement. Med.*, vol.11, no.5, pp. 879-884, 2005.
- [22] HH Jung, J.-M. Yang, WM Woo, JS Yang, KS Soh, Year-long biophoton measurements: normalized frequency count analysis and seasonal dependency, *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.*, vol.78, pp. 149-154, 2005.
- [23] B. Sung, V. Ogay, J.S. Yoo, H.S. Yu, B.-C. Lee, C. Chan, G. Jung and K-S Soh, "UV-A-Induced Activation of Bonghan Granules in Motion," *J. Intl. Soc. Life Info. Sci.*, vol. 23, no.2, pp. 297-300, 2005.
- [24] F. A. Popp, W. Nagl, K. H. Li, W. Scholz, O. Weigartner and R. Wolf, "Biophoton emission: New Evidence for Coherence and DNA as Source," *Cell Biophys.*, vol. 6, pp. 33-52, 1984.
- [25] A. Boveris, E. Cadenas, R. Reiter, M. Filipkowski, Y. Nakase and B. Chance, "Organ Chemiluminescence: Noninvasive Assay for Oxidative Radical Reactions," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol.77, no.1, pp. 347-351, 1980.

Delayed Luminescence Characteristics of Human Hands

Joon-Mo Yang[†], Chunho Choi and Kwang-Sup Soh

Biomedical Physics Lab, School of Physics, Seoul Nat'l Univ., Seoul 151-747, Korea

[†] *E-mail: joonmol@smu.ac.kr*

Woo-Taek Lim, Han Sang Lee, Seung-Byung Chae, Se-Yeol Yoon,
Kyung-Il Lee and Eun-Seok Shin

Korea Science Academy, Danggam 3-dong, Busanjin-gu, Busan 614-103, Korea

Sun-Mi Choi

Dept. of Medical R&D, Korea Institute of Oriental Medicine, Daejeon 305-811, Korea

(Received December 1, 2005, Revised manuscript January 6, 2006)

Delayed luminescence from human hands after illumination by light at different wavelength bands was studied. A delayed luminescence measurement system equipped with photomultiplier tube (PMT), fiber optics and automatic mechanical shutter system was developed. Three spectrum band-pass filters, for which transmissions are on 350~450 nm, 450~550 nm and 550~650 nm, were used to select irradiation wavelength, and 150W metal-halide lamp was used as an illumination source. Six volunteers put their palms (dorsa) onto the measurement system, and after light illumination, delayed luminescence were measured for 10 minutes. The results show that delayed luminescence after shorter wavelength illumination was higher than that after longer wavelength one. These results indicate the existence of acceptors in human skin which can be excited at short wavelengths. Furthermore, each subjects showed different delayed luminescence curve patterns. Reactive oxygen species (ROS) are known to have important roles on delayed luminescence, and this research suggests that ROS concentration can be measured noninvasively with optical methods.

OCIS Codes : 170.0170, 170.4580, 170.5380, 170.6280, 170.6930.