J. of the Chosun Natural Science
Vol. 1, No. 1 (2008) pp. 1 - 4

Candela 개념의 광량정량화 활용에 관한 연구

김현식* · 최은서** · 이병일*†

The quantification of photon counts using the concept of candela

Hyeon Sik Kim*, Eun Seo Choi, Byeong-il Lee*†**

Abstract

We developed quantification method based on the concept of candela in physics. The measurement of fluorescence signal from a nude mouse in the research of molecular biology. In the measurement of the optical signal with CCD, the quantification method for photon counts based on bio-luminescence imaging technique can provide comparative reference data. In this paper, we described theoretical derivation of our proposed concept. We hope this method could be a useful standard reference for quantitative date analysis in optical imaging.

Key words : 광자, Flux, Candela, CCD, 광신호

1. 서 론

광량을 측정하는 방법은 크게 CCD(coupled charged device)를 이용한 방법과 PMT(photo multiplier tube)를 이용하는 방법, 그리고 분광기를 이용하는 방법 등이 있다. 물리적인 빛의 파장을 측정하기 위해서는 분광기가 주로 많이 이용되고 있으며, PMT는 미세광자신호를 측정하는데 주로 활용되고 있다. 그러나 CCD를 이용하는 경우 광자 신호의 획득에 많이 사용되고 있다. 세계적으로 많이 사용되고 있는 광학영상기기에서 대부분 CCD를 많이 채택하고 있는데 이것은 사용이 편리하며 영상을 구현하는데 유용하기 때문이다. 최근들어 소동물에서 여기되어 방출되는 특정 광신호를 영상신호로써 얻기 위해서 CCD를 많이 채택하고 있다.[1,2] CCD 중에서는 미세신호의 측정에서 민감도를 향상시키기 위해 냉각형 CCD를 사용하여 보다 미세한 생체신호를 측정하는데 이용되고 있다. 이러한 생체신호를 얻어서 영상으로 구현하거나 시각화하는 정성적인 분석과는 달리 광신호의 정량적인 분석을 위해서는 단순히 밝고 어두운 정도가 아닌 개개의 광자를 하나하나 구분하여 셀 수 있어야 하며 이러한 분석적인 방법이 기반이 된 기준이 될 만한 데이터가 필요하다. 하지만 현재 이러한 정량적인 광신호 정보를 추출하는데 유용한 방법이 제시되지 않아 대부분 정성적인 분석에서 그치는 경우가 대부분이다. 이러한 문제점을 극복하고 보다 정량적인 광신호를 통해 scalable한 유연한 분석을 위해서 본 논문에서는 CCD를 이용하여 획득한 영상으로부터 광량의 정량화 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 물리적인 개념인 flux와 candela를 먼저 비교하여 차이점을 인식하고, 이를 기반으로 실제 광량의 측정에서 어떻게 효율적으로 적용이 가능할 것인가에 대해서 기술하고자 하였다.

*전남대학교병원 핵의학과(Dept. of Nuclear Medicine, Chonnam National University Hospital)
**조선대학교 물리학과(Dept. of Physics, Chosun University)
†Corresponding author: dewpapa@hanmail.net
(Received : April 25, 2008, Revised : May 28, 2008
Accepted : June 18, 2008)

2. 기본 개념 및 이론

2.1 CCD를 통한 광자 신호획득원리

CCD는 광자의 빛에너지를 전기적 신호로 바꾸는 광다이오드 매트릭스를 가진 실리콘을 기반으로 하여 구현된 통합된 회로이다(그림 1). 기본적인 CCD 동작원리는 반도체 에너지 준위를 이용하여 설명할 수 있다. 반도체는 각 에너지 준위를 가지며 전도대에서는 potential well을 가지고 있고 그 곳에 광전자를 저장한다(그림 2).

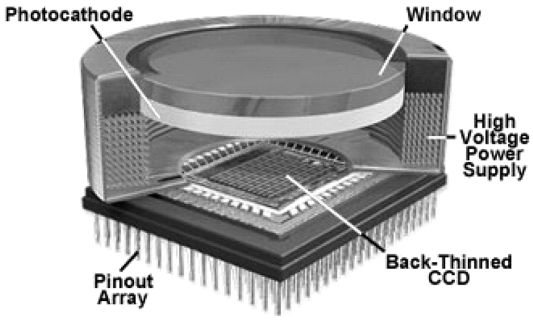


그림 1. the structure of a CCD camera

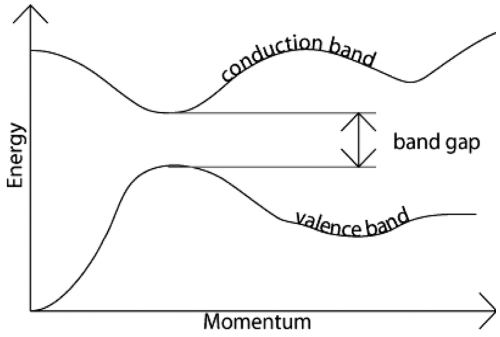


그림 2. 에너지 레벨의 potential well

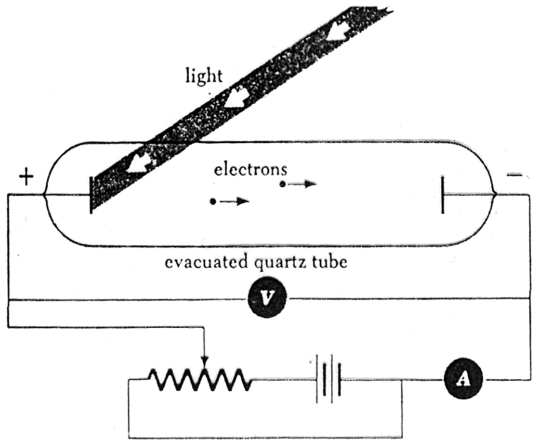


그림 3. 광전효과의 실험적 관측

그림1의 window는 렌즈이고, back-thinned CCD는 렌즈를 통해서 들어온 광자의 target에 해당하는 부분으로 광전자를 발생시키는 부분이다. 그림2는 원자의 에너지 준위를 간단히 그린 것으로 band gap은 금지된 띠로 전자가 존재할 수 없는 부분이 된다. 전도대의 아래로 볼록인 부분이 potential well이 된다.

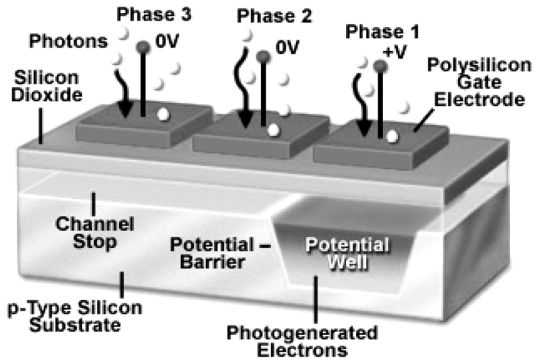


그림 4. 각 픽셀의 potential well

CCD 카메라의 동작원리는 아인슈타인의 광전효과에 의해 설명된다. 광원에서 방출한 광자에 의해 광다이오드에서 광전자가 광량에 비례하여 생성된다. 이렇게 발생한 광전자가 전압 차이에 따라 가속이 이루어지고 입자성을 가진 광자가 CCD의 각 픽셀에 있는 potential well에 저장이 된다. 저장된 전하량이 최종적으로 생성되는 신호값이 되는 것이다.[3]

그림4에서 polysilicon gate electrode는 광자의 target이고, potential well은 광전효과에 의해서 발생한 광전자가 저장되는 곳이다.

2.2 Flux와 Candela의 개념

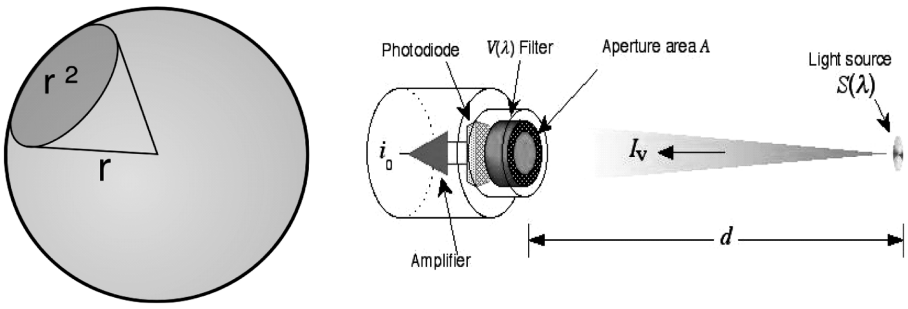
Flux는 물리학에서 어떤 물리량의 흐름에서 사용되는 개념으로 Gauss 법칙에서 주로 사용되고 있다. 전기장에서의 flux는 $\Phi = dint\vec{E}\cdot d\vec{A} = 1/\varepsilon_0 \int_v \rho dV = Q_A/\varepsilon_0$이고, 자기장에서의 flux는 $\Phi = dint\vec{B}\cdot\vec{da} = 0$ 이다. Candela 는 빛의 세기를 표현하는데 사용하고 있는 개념이며, flux와 다른 점은 다음과 같다.

첫 번째, luminous flux (광속: F)는 광원으로부터 나오는 광량을 의미하며 단위는 Lumen (1 m)을 사용한다. 두 번째, Candela(cd)는 점광원으로부터 1 steradian (sr)으로 방사된 광속을 의미한다. 그러므로 1cd = 4π 1m이고, 1 1 m = (1/4π)cd이다. 여기서 steradian(sr)은 입체각(그림 5(a))을 말하며 반지름 r인 구의 표면적이 A일 때 A/r^2로 나타내는 각도이다. 구 전체의 표면은 이므로 구의 입체각, steradian은 이다.

전체적으로 flux와 candela의 관계를 단위로만 해석해본다면 다음과 같다.

$$1\text{m} = \text{cd} \cdot \text{sr}$$
$$\text{cd} = 1\text{m/sr}$$

flux의 물리적인 의미는 단위면적을 단위시간당 흘러



(a) (b)

그림 5. steradian과 steradian을 적용한 CCD 카메라. (a) 1 steradian을 표현한 구 (b) 광원으로부터 방출된 광자의 세기

가는 어떤 물리량(광자)으로 정의하므로 1m = P/cm^2/sec된다. 그러므로 candela는 다음과 같이 정의 되어질 수 있다.

$$cd = P/cm^2/sec/sr$$

Photon flux는 단위시간당, 단위면적당 동적인 광자에 대해 필요한 개념이고, candela는 단위시간당, 단위면적당, 그리고 단위 steradian당 방출하는 광자의 수를 정량화 할 때 적당한 개념이라 할 수 있다.[4]

2.3 획득된 신호에 대한 candela 계산방법

CCD camera의 노출시간을 라고 했을 때, photon flux는$F=P_nAt$ 이 된다. 점광원에서 CCD까지 거리가 d 만큼 떨어져 있고 렌즈의 면적이 A인 곳에서 photon을 받아들이게 되면 steradian은 A/d^2가 되므로 빛의 세기는$I_v=P_nd^2/A^2t$이 된다. 따라서 candela를 계산하는 방법은 flux를 steradian으로 나눠진 값이 되는데, flux에 d^2/A을 곱해준 것과 같은 의미를 갖는다.[5]

CCD 카메라는 광원으로부터 일정한 거리에 떨어져 있으므로 flux만으로는 CCD가 받아들인 광량을 정량화시키기에는 표준화의 개념이 부족하기 때문에, 빛의 세기를 나타내는 candela로 CCD가 받아들이는 광량을 정량화시키는 것이 보다 적절하다. CCD와 광원의 거리가 다른 경우에 같은 광량이 측정되었다면, flux로서는 광원에 대한 정보를 알 수 없지만 candela로 구해진 값은 광원과 렌즈와의 거리, 렌즈의 구경에 대한 정보를 얻을 수 있는 이점이 있다.[6,7]

표준화된 정량화 결과를 얻기 위해 간단한 실험을 하였다. 냉각형 CCD를 이용하여 -120°C로 냉각시켜 민감도를 향상시킨 후 암실에서 빛의 세기가 다른 두 개의 광원에 대해서 두 가지 종류의 렌즈로 노출시간을 달리하여 광량을 측정하였다. 측정한 시간은 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 60초로 노출시켰으며, 두 개의 광원 및 두 개의 렌즈를 바꾸어 가며 측정하였다. 측정결과는 candela로 구하였다.

3. 실험 결과

각각의 값에 대해 flux와 candela 값으로 계산한다면,

표 1. 렌즈별 노출시간에 따른 광량측정결과

노출 시간	F/#=1.0		F/#=1.2	
	광원A	광원B	광원A	광원B
1 sec	4.60E+05	4.56E+05	4.63E+05	4.60E+05
2 sec	4.69E+05	4.64E+05	4.73E+05	4.65E+05
3 sec	4.74E+05	4.68E+05	4.83E+05	4.73E+05
5 sec	4.91E+05	4.77E+05	5.06E+05	4.87E+05
10 sec	5.28E+05	5.05E+05	5.59E+05	5.21E+05
20 sec	6.08E+05	5.55E+05	6.66E+05	5.92E+05
30 sec	6.86E+05	6.07E+05	7.72E+05	6.62E+05
60 sec	9.19E+05	7.61E+05	1.09E+06	8.75E+05

렌즈의 크기나 노출시간에 상관없는 flux는 단위시간당 단위면적당 통과한 물리량이므로 $F=P_n/At=P_n/A$이다. 하지만 빛의 세기를 의미하는 candela는 $I_V=P_n d^2/A^2 t=F\times(d^2/A)$이 된다. F-number가 1.0, 1.2인 두 개의 다른 렌즈를 이용하여 세기가 다른 두 개의 광원을 측정하였다. F/#이 1.2인 렌즈는 $F/\#=f_2/D_2=1.2$이므로 $d_2=f_2=1.2D_2$가 된다. F/#이 1.0인 렌즈의 구경을 $D1$이라하고, D_1=9 cm, d_1=30 cm이였으며, F/#이 1.2인 렌즈의 구경을 D_2이라하고, D_2=5 cm, d_2=50 cm였다. 측정결과는 다음과 같다.

같은 렌즈에서 봤을 때, F/#=1.0과 1.2인 경우 모두 광원A의 count 값이 더 크게 나왔다. 그러므로 광원A의 광원이 광원B의 광원보다 많은 광자를 방출되는 것을 알 수 있었다. 다음으로 F/#=1.0인 렌즈로 광원A를 측정한 것과 F/#=1.2인 렌즈로 광원B를 측정한 값을 보면 1초에서 count가 같은 값을 나타내고 있다. 이 값에 대해서 candela 값을 계산하면 다음과 같다.

F/#=1.0인 렌즈를 사용하여 광원A의 광원의 세기를 $I_{V1.0}$이라 할 때,

$$I_{V1.0}=\frac{d_1^2 P_n}{A_1^2}=\frac{d_1^2 P_n}{\frac{1}{16}D_2^2\pi^2}=\frac{16\times 900}{81}\times\frac{P_n}{\pi}\cong 177.778\times\frac{P_n}{\pi} \quad (1)$$

이 되고, F/#=1.2인 렌즈를 사용하여 광원B의 광원의 세기를 $I_{V1.0}$이라 할 때,

$$I_{V1.2}=\frac{d_2^2 P_n}{A_2^2}=\frac{d_2^2 P_n}{\frac{1}{16}D_2^2\pi^2}=\frac{16\times 2500}{25}\times\frac{P_n}{\pi}\cong 160\times\frac{P_n}{\pi} \quad (2)$$

두 광원의 결과를 비교했을 때 광원A가 값이 더 높았다. Count 만으로 광원을 비교하기 힘든 경우 candela를 이용하여 렌즈가 다르고 광원이 다른 경우도 비교적 정확히 정량화 할 수 있었다.

4. 결 론

Flux의 개념과 Candela의 개념을 이용하여 광량 정량화에 활용할 수 있었다. Flux 보다는 candela 값으로 변환한 값이 광원의 대한 정보를 전달하는 장점이 있고, 보다 정량화된 값을 얻을 수 있게 한다. Candela는 빛의 세기에 따라 더 유용하게 광자를 정량화 할 수 있었다. 그러므로 빛의 세기를 나타내는 candela를 사용하여 보다 정량적인 광자의 값을 활용하면 분자생물학의 연구에 도움이 될 것이다.

5. 참고문헌

[1] 장준성이재형, “현대물리학” (sixth edition), 학술정보, pp. 77-81, 2001.

[2] Robert Eisberg Robert Resnick, “Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles” (second edition), John Wiley & Sons, Inc, pp. 27-34, 1985.

[3] Eugene Hecht, “Optics” (third edition), Addison Wesley, pp. 148-177, 1998.

[4] 허봉수, “CCD 이미지 센서를 위한 경계 적응적 칼라 보간” 전자공학회논문지 제39권 SP편 제1호, 2002.

[5] 박희재, “선형 CCD를 이용한 MTF방법에 의한 카메라 렌즈 초점거리의 측정 및 보정 시스템 개발” 한국정밀공학회지 제15권 제8호, 1998.

[6] 이상준, “고해상도 CCD 카메라를 이용한 Single-Frame PIV 속도장 측정기법 개발” 대한기계학회논문집B 제 24권 제1호, 2000.

[7] 김봉채, “He-Ne 레이저와 CCD 카메라를 이용한 비접촉 3차원 측정” 대한기계학회논문집A 제21권 제11호, 1997.