



근적외선 형광 영상시스템의 PWM 제어에 관한 연구

이병호*, 반성범**

A Study on PWM Control of Near-Infrared Fluorescence Imaging System

Byeong-Ho Lee*, Sung Bum Pan**

이 논문은 2018년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

요 약

근적외선을 이용한 형광 영상은 방사능에 대한 걱정이 없고 수술 중 실시간으로 영상 확인이 가능한 장점이 있다. 따라서 감시리프절 생검에 형광 영상을 이용하는 실험이 활발히 진행되고 있다. 형광 영상장비는 LED, 카메라와 같은 고발열 부품이 사용되어 안정적인 발열 억제 수단으로 수랭 방식의 쿨링 시스템을 사용하고 있다. 형광 영상장비에서 수랭 쿨링 시스템은 큰 부피를 차지하여 장비의 소형화 측면에서는 단점이 된다. 장비의 소형화를 위해 공랭 쿨링 방식을 이용할 경우 발열이 문제가 된다. 본 논문에서는 장비의 소형화를 위해 PWM 제어를 이용한 공랭 방식을 적용하여 실험을 했고, 장비를 장시간 사용해도 문제가 없는 일정한 품질의 형광 영상과 발열 억제 성능을 확인했다.

Abstract

Fluorescent images using near-infrared light have no worry about radioactivity, and images can be checked in real time during surgery. Therefore experiments using fluorescent images for monitoring lymph node biopsy are actively under way. Fluorescent imaging equipment uses high heat-generating components such as LED and camera, thus uses water-cooling system as a stable heating suppression means. However in the fluorescent image equipment, the water cooling system takes a large volume which is a disadvantage in terms of miniaturization of the equipment. Even if the air cooling system is used for miniaturizing the equipment, heat generation is a problem. In this paper, we have experimented with the air cooling method using PWM control for the miniaturization of the equipment, and confirmed the constant quality of the fluorescent image and the suppression of the heat generation without any problems even when the equipment is used for a long time.

Keywords

near infrared, fluorescence, imaging system, pulse width modulation, indocyanine green

* 조선대학교 소프트웨어융합공학과
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-745X>
** 조선대학교 전자공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0960-5706>

· Received: Apr. 17, 2018, Revised: Jul. 02, 2018, Accepted: Jul. 05, 2018
· Corresponding Author: Sung Bum Pan
Dept. of Electronics Engineering, Chosun University,
375 Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea,
Tel.: +82-62-230-6897, Email: sbpan@chosun.ac.kr

1. 서 론

캐나다, 프랑스, 일본 등에서는 근적외선 형광 영상시스템의 개발이 끝나 상용화되었으나, 우리나라의 형광 영상에 관한 연구는 대부분 소모성 재료인 조영제를 개발하는데 집중되고 있으며, 형광 영상 장비에 관한 연구는 미흡한 실정이다[1].

국내에서 개발된 형광 영상 장비는 해외의 소형 형광 영상 장비의 구성과 같이 단일 카메라로 구성된 프로브를 가지고 있으며 수랭 쿨링 방식을 이용하여 전체 크기가 해외의 소형 형광 영상 장비에 비해 크다[2][3].

그림 1은 형광 영상 장비의 LED 온도 변화 그래프이며, 이 장비는 워터 블록을 이용한 수랭 쿨링 방식을 사용했다. 수랭 쿨링 방식을 사용한 근적외선 형광 영상시스템은 발열 억제에 안정적인 모습을 보여준다. 그러나 수랭 쿨링 장비의 비싼 가격과 냉각수 누수의 위험성, 주기적으로 냉각수를 교체해야 하는 불편함 그리고 워터 블록, 호스, 라디에이터, 펌프, 물통 등 여러 부품들이 차지하는 부피로 인해 제품의 소형화에는 단점이 된다.

본 논문에서는 PWM(Pulse Width Modulation) 제어를 이용한 공랭 방식의 형광 영상시스템을 구축하여 장비를 소형화하고 시스템의 성능을 검증한다. LED에서 발생하는 열을 제어하기 위해 기존의 CW(Continuous Wave) 방식 대신 PWM 제어를 이용하여 광원부의 발열을 제어하고 프로브 내부에서 발생한 열의 방열을 위해 알루미늄 프로브 케이스를 이용하여 소형화에 따른 발열 문제를 해결한다. 그리고 PWM 제어를 이용한 형광 영상시스템의 성

능을 확인하기 위해 프로브의 온도를 측정하고 형광 영상을 촬영하여 이를 분석한다. 실험 결과 PWM방식은 CW방식에 비해 떨어지는 형광 영상 품질을 보였다. 그러나 PWM방식은 알루미늄 케이스를 이용한 공랭 방식으로도 장시간 동안 일정한 품질의 형광 영상을 획득할 수 있음을 확인하였다.

II. 제안하는 근적외선 형광 영상시스템

제안하는 근적외선 형광 영상시스템은 그림 2와 같이 영상획득부, 제어부, 출력부로 구성된다. 기존에 문제가 되었던 수랭 쿨링 장비와 쿨링 플레이트를 제거하고 대신 LED를 PWM 제어할 PCB를 추가한다. 그리고 제안한 형광 영상시스템은 그림 3과 같이 사용이 편한 워크스테이션 카트에 장착한다.

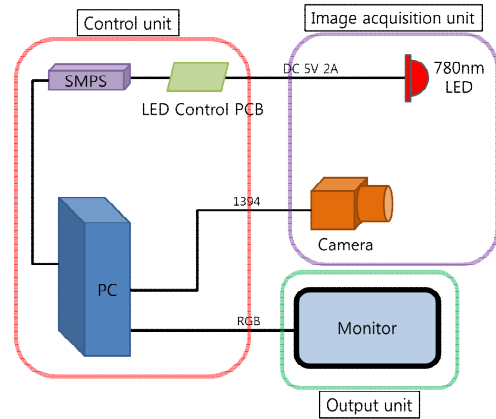


그림 2. 수랭 쿨링 장비가 빠진 형광 영상시스템의 구성
Fig. 2. Configuration of fluorescent imaging system without water cooling system

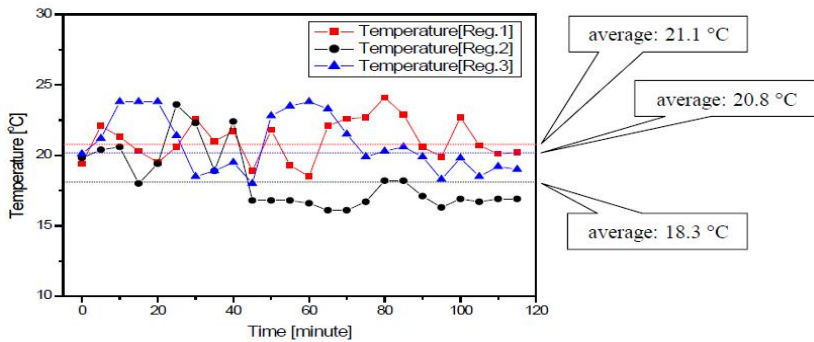


그림 1. 수랭 쿨링 방식을 사용한 근적외선 형광 영상시스템의 LED 온도 변화
Fig. 1. LED temperature variation of NIR fluorescence imaging system using water cooling system



그림 3. 제안하는 형광 영상시스템의 전체 구성 모습
Fig. 3. Full configuration of the proposed fluorescence imaging system

2.1 시스템 구성

영상획득부는 ICG를 여기시키고 그 여기광을 영상화하는 장치 부분이다[4]. 광원인 근적외선 LED 모듈, NIR 카메라, 카메라 렌즈, 집광렌즈, 그리고 잡음 제거를 위한 숏 패스 필터, 밴드 패스 필터로 구성된다. 이는 자유로운 이동과 사용이 가능한 형광 영상 프로브를 제작하기 위한 구성이다[5].

제어부는 형광 영상시스템에서 시스템과 근적외선 LED 모듈, 출력부에 전원을 공급하고 카메라에서 들어온 형광 영상을 처리하는 장치 부분이다. 근적외선 LED 모듈의 전원 공급과 PWM 제어를 위한 SMPS와 PWM 제어보드, 그리고 소프트웨어를 구동하고 영상을 처리할 PC 부품, 카메라의 신호를 송수신하기 위한 통신카드, 영상획득부와 제어부 연결을 위한 터미널 보드, 터미널 보드와 형광 영상 프로브를 연결할 커넥터를 구성된다.

출력부는 제어부에서 처리한 영상을 모니터에 출력하는 장치 부분이며 일반적으로 사용하는 모니터로 구성된다. 형광 영상을 보기 위한 프로그램은 SH SYSTEM사의 N-Vision 프로그램을 사용한다.

2.2 근적외선 형광영상 프로브 구성

근적외선 형광 영상 프로브의 광원과 광학필터는 생체 조직의 빛 흡수 파장, 빛의 파장에 따른 침투 범위, ICG 조영제의 흡수 및 방출 스펙트럼을 고려하여 구성한다[6]. 그리고 케이스는 방열을 위해 알루미늄으로 구성한다.

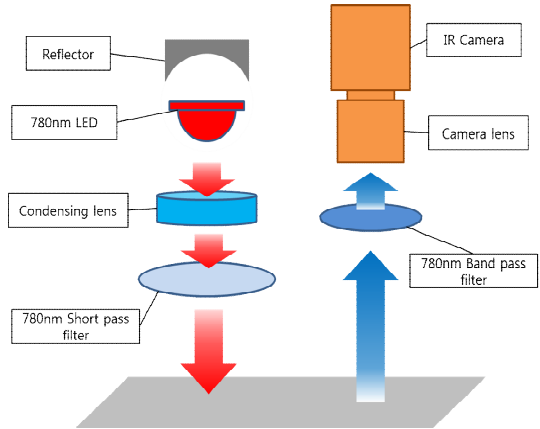


그림 4. 근적외선 형광영상 프로브의 광학적 구조
Fig. 4. Optical structure of near-infrared fluorescent image probe fluorescence imaging

LED에서 발생한 근적외선의 빛은 리플렉터와 집광렌즈에 의해 빛이 퍼지지 않고 직진하게 되고 이 근적외선의 빛은 숏 패스 필터를 지나면서 ICG를 여기시키기 위해 필요한 광원만을 통과시키게 된다. 광학 필터를 사용하는 이유는 ICG의 흡수 및 방출 스펙트럼이 겹치는 부분에서 잡음이 발생하므로 입사하는 광과 반사되어 나오는 광을 분리시켜야 하기 때문이다[7]. ICG의 여기광은 그림 4와 같이 잡음 제거를 위한 광학 필터인 밴드 패스 필터를 거쳐 카메라 렌즈를 통해 카메라로 들어와 영상화된다.

제안한 형광 영상시스템에서 사용한 광원은 780nm LED이며 5V, 350mA, 작동 온도는 $-40^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 이다. 사용한 숏 패스 필터는 780nm 이하의 빛만 투과되고, 밴드 패스 필터는 800~840nm 사이의 빛만 투과된다. 이는 앞에서 설명했던 ICG의 여기 및 여기광에 관련된 빛의 파장과 잡음 영역을 고려한 것이다. 사용된 NIR 카메라의 정상 작동 온도는 $+5^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ 이다.

2.3 LED의 PWM 구동과 카메라의 연동

PWM은 DC모터의 속도 제어, 사운드 출력, LED의 밝기 제어에 사용된다. 그림 5에서 t_1 은 펄스가 On인 시간이고 t_2 는 펄스가 Off인 시간이다. 듀티비 (Duty Ratio 또는 Duty Cycle)는 t_1/T 이다. 즉, 전체 펄스 주기에서 펄스가 On인 비율을 말한다. 따라서 듀티비의 공식은 식 (1)과 같다.



그림 5. 듀티비
Fig. 5. Duty ratio

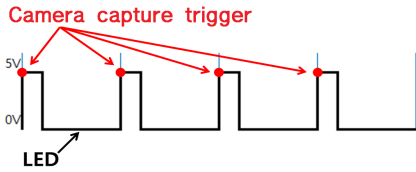


그림 6. LED와 카메라의 캡처 트리거 신호 연동
Fig. 6. LED and camera capture trigger signal interlock

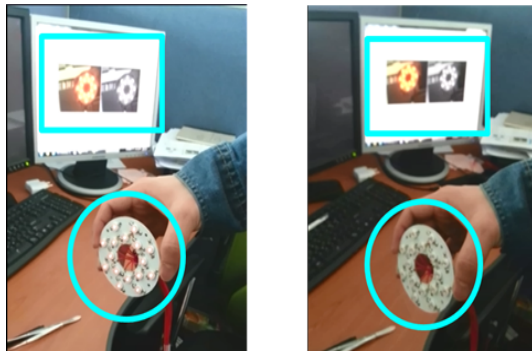


그림 7. PWM과 카메라 연동 확인
Fig. 7. Confirmation of PWM and camera interlocking

$$Duty\ Ratio = \left(\frac{t1}{T}\right) \times 100\% \quad (1)$$

t1과 t2가 2:3일 경우 듀티비는 40%가 된다. 듀티비가 40%라고 하면 전체 주기의 40% 동안만 LED가 On이 되고 나머지 60% 동안은 LED가 Off 상태가 된다. 이렇게 PWM을 이용하여 LED가 켜져 있는 시간을 조절하면 듀티비가 100%인 상태보다 LED가 켜져 있는 시간이 줄어들게 되므로 발열량 또한 줄어들게 된다. 같은 원리로 LED의 밝기도 조절이 가능해진다[8][9].

그림 6과 같이 LED가 On일 때 카메라가 영상을 캡처하도록 하였다. PWM에서 일반적인 카메라 연동 시 LED가 2400Hz이고 카메라는 120 프레임이라고 가정하면, 트리거 신호가 1초 동안 2400번이 나오게 되는데 첫 번째 트리거 신호에 의해 카메라가

캡처하고 처리하는 중에 다음 트리거 신호가 들어오게 된다. 그러면 연산 중인 첫 번째 캡처를 Null값으로 표시하고 두 번째 트리거 신호를 받아 캡처하게 된다. 이렇게 되면 계속 Null값만이 화면에 나오게 된다. 그러나 머신 비전 카메라는 캡처해서 처리하는 중에 들어온 트리거 신호는 카메라 자체에서 무시하고 들어왔던 신호의 처리가 끝난 이후에 들어온 트리거 신호를 받아 화면에 출력해 준다.

LED가 On일 때만 카메라가 캡처하여 화면에 표출하기 때문에 LED가 Off일 때와는 상관없이 그림 6에서처럼 화면에서는 일정하게 LED가 On인 상태의 영상을 출력하게 된다.

III. 실험 결과

실험에서 사용된 소프트웨어는 윈도우 10, N-Nision, Vimba 2.1이며 소프트웨어 구동을 위한 하드웨어는 Intel Core i5 6600, IEEE 1394A PCI Express카드 사양의 PC를 사용했다. 프로브의 카메라에서 얻는 NIR 원본 영상의 해상도는 640×480이다. 실험 장소는 외부요인을 최소화하기 위해 크린룸 내에서 진행했으며, 크린룸은 온도 22℃, 습도 50%로 설정했고 크린룸은 암실을 유지했다. 제안한 형광 영상시스템의 LED와 카메라의 안정적인 동작을 확인을 위해 프로브 내부 온도를 측정한다. LED 모듈 뒷면과 프로브 내부 및 외부에 온도센서를 장착하고 거치대를 이용하여 300mm 높이에서 ICG의 근적외선 형광 영상을 촬영한다.

실험을 통해 얻은 각 듀티비 별 LED 모듈, 프로브 내부 온도를 종합하면 그림 8, 그림 9과 같다. 사용한 LED의 정상 작동 온도는 최고 +80℃까지이며, 프로브에 내장된 카메라의 정상 작동 온도는 최고 +45℃까지이다. PWM 제어를 이용했을 때 밀폐된 프로브 내부에 장착된 LED와 카메라 모두 정상 작동 온도 내에 있는 것을 확인할 수 있다.

LED 모듈 자체에 방열을 위한 설계가 되어있음에도 CW 방식은 15분 만에 LED의 정상 작동 온도를 초과하였고 이후 실험을 계속 진행하자 LED 모듈의 LED 2개가 고장이 났다. 따라서 CW 방식으로 LED에 전원을 인가할 경우에는 반드시 별도의 쿨링 시스템이 필요하다는 것을 알 수 있다.

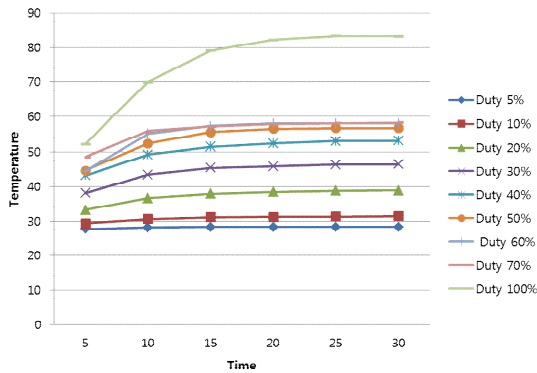


그림 8. LED모듈의 온도
Fig. 8. Temperature of LED module

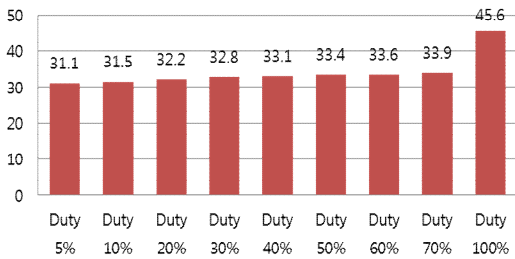


그림 9. 프로브 내부 온도
Fig. 9. Probe internal temperature

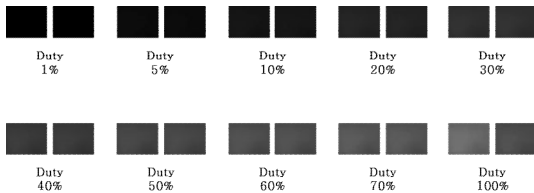


그림 10. 원본 영상 샘플링
Fig. 10. Original image sampling

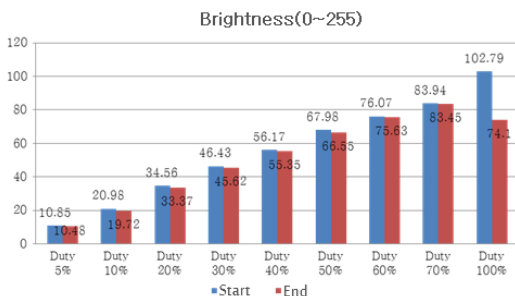


그림 11. PWM 듀티비에 따른 형광영상 밝기값
Fig. 11. Fluorescent image brightness value according to PWM duty ratio



그림 12. 차영상
Fig. 12. Difference images

실험 시작 시점과 종료 시점에서 형광 영상의 밝기를 비교하기 위해 그림 10과 같이 외부 요소에 의한 영상 변화가 가장 적은 부분을 44×33픽셀 크기로 샘플링하였다. 그림 11은 이를 8비트 그레이스케일 수치로 비교한 것이다. 0~255 총 256개의 값으로 밝기를 나누며 0에 가까울수록 어둡고 255에 가까울수록 밝아진다.

실험 초반에 출력된 형광 영상의 경우 듀티비가 증가함에 따라 형광 영상의 밝기도 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있다. 실험 종료 시점에 출력된 형광 영상의 경우 PWM 듀티비 5%부터 70%까지는 실험 초반과 비슷한 수치가 측정되었다. 그러나 CW 방식은 PWM 듀티비 60%보다 떨어지는 수치가 측정되었다.

차영상 방법을 이용하여 CW 방식으로 얻은 형광 영상과 PWM 방식으로 얻은 형광 영상의 차이를 비교했다. 그림 12의 좌측은 실험 시작 시점, 우측은 실험 종료 시점의 형광 영상에 대한 차영상이다.

현재 영상의 픽셀 값을 $M(x,y)$, 이전 영상의 픽셀 값을 $N(x,y)$ 라고 하면 차영상의 값 $O(x,y)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$O(x,y) = |M(x,y) - N(x,y)| \quad (2)$$

차영상 실험을 통해 실험 전에는 PWM 듀티비가

가장 높았던 70%부터 차이가 드러나는 것에 비해 실험 후에는 PWM 듀티비 40%부터 영상의 차이가 드러남을 볼 수 있다.

표 1은 실험 전후 CW, PWM 두 형광 영상의 PSNR을 측정하여 정리한 것이다. 실험 전후 PSNR 값의 피크대의 변화를 관찰하여 화질의 변화를 해석할 수 있다.

그림 13은 측정된 값들을 그래프로 나타낸 것으로 PSNR 측정값의 피크대 변화를 한눈에 볼 수 있다. 실험 전후 PSNR 값의 피크대가 PWM 듀티비 40%에서 20%로 옮겨간 것을 알 수 있다. 앞서 진행했던 온도, 밝기 및 차영상 실험의 결과들을 봤을 때 PSNR 값의 피크대 변화는 CW 방식의 화질이 나빠졌다는 의미로 해석이 된다.

표 1. 실험 전후 형광영상의 PSNR 측정표
Table 1. PSNR measurement table of fluorescence images before and after experiment

PWM Duty	PSNR(Start)	PSNR(End)
100% - 70%	25.14 dB	21.76 dB
100% - 60%	28.02 dB	21.77 dB
100% - 50%	32.64 dB	22.17 dB
100% - 40%	39.21 dB	24.86 dB
100% - 30%	32.29 dB	29.43 dB
100% - 20%	27.04 dB	40.87 dB
100% - 10%	22.59 dB	30.03 dB
100% - 5%	20.94 dB	25.18 dB
100% - 1%	19.17 dB	21.96 dB

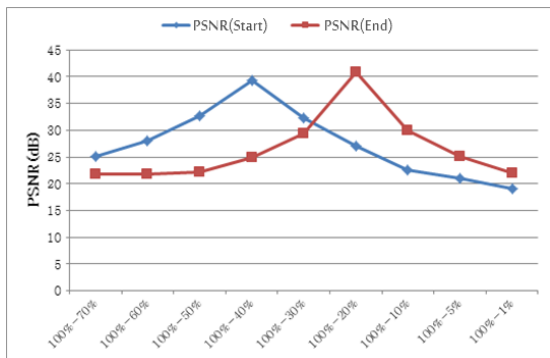


그림 13. 측정된 PSNR 값의 그래프
Fig. 13. Graph of measured PSNR values

IV. 결론

본 논문에서는 PWM 제어를 이용하여 근적외선 형광 영상시스템을 소형화하였다. 제안하는 형광 영상시스템에서는 기존의 시스템에서 많은 부피를 차지하고 있던 수랭 방식의 쿨링 시스템을 제거하여 형광 영상시스템의 전체 크기가 워크스테이션 카드 내에도 설치가 가능할 정도로 작아졌다. 제안한 시스템은 형광 영상을 획득하는데 충분한 발열 억제가 가능하였다. PWM의 듀티비에 따른 근적외선 LED의 온도 변화는 LED의 정상 작동 한계 온도인 80℃에서 최소 20℃ 이상 낮은 온도를 보였으며, 프로브 내부의 온도 변화는 카메라의 정상 작동 최고 온도보다 최소 5℃정도 낮은 온도가 측정되었다. 획득한 형광 영상의 품질에서는 CW 방식의 LED 출력이 초반에는 PWM 방식보다 더 밝았지만 시간이 경과할수록 형광 영상의 품질이 떨어져 실험 2시간 경과 후에는 PWM 듀티비가 60% 일 때의 밝기보다 못한 결과를 보였고 LED 광원 2개가 고장 나는 일이 발생하였다. 차영상 실험과 PSNR 측정에서도 CW 방식의 품질 저하를 확인할 수 있었다. 반면에 PWM 방식은 시간의 경과와 관계없이 일정한 품질의 형광 영상을 보여주는 것을 확인하였다.

향후 근적외선 형광 영상시스템의 초소형화를 위해 생체 투과율, 투과 깊이, ICG 여기에 필요한 최소 광량 등의 광원에 관련된 연구와 형광 영상시스템의 임베디드화에 관한 연구를 진행할 계획이다.

References

[1] A. V. DSouza, H. Lin, E. R. Henderson, K. S. Samkoe and B. W. Pogue, "Review of Fluorescence Guided Surgery Systems: Identification of Key Performance", Journal of Biomedical Optics, Vol. 21, No. 8, pp. 080901, Aug. 2016.

[2] Z. Chen, N. Zhu, S. Pacheco, X. Wang, and R. Liang, "Single Camera Imaging System for Color and Near-infrared Fluorescence Image Guided Surgery", Biomedical Optics Express, Vol. 5, No. 8, pp. 2791-2797, Aug. 2014.

- [3] C. Chi, Y. Du, J. Ye, D. Kou, J. Qiu, J. Wang, J. Tian, and X. Chen, "Intraoperative Imaging Guided Cancer Surgery from Current Fluorescence Molecular Imaging Methods to Future Multi Modality Imaging Technology", *Theranostics*, Vol. 4, No. 11, pp. 1072-1084, Aug. 2014.
- [4] M. V. Marshall, J. C. Rasmussen, I. C. Tan, and M. B. Aldrich, "Near-Infrared Fluorescence Imaging in Humans with Indocyanine Green: A Review and Update", *Open Surg Oncol J.*, Vol. 2, No. 2, pp. 12-25, Jan. 2010.
- [5] B. Zhu and E. M. Sevick-Muraca, "A Review of Performance of Near-Infrared Fluorescence Imaging Devices Used in Clinical Studies", The Authors. Published by the British Institute of Radiology, Vol. 88, No. 1045, pp. 1-26, Jan. 2015.
- [6] B. E. Schaafsma, J. S. D. Micog, M. Hutteman, and van der Vorst, "The Clinical Use of Indocyanine Green as a Near-Infrared Fluorescent Contrast Agent for Image-Guided Oncologic Surgery", *Journal of Surgical Oncology*, Vol. 104, No. 3, pp. 323-332, Apr. 2011.
- [7] S. Keereweer, T. J. A. Snoeks, and J. D. F. Kerrebijn, "Optical Image-Guided Cancer Surgery: Challenges and Limitations", *American Association for Cancer Research*, Vol. 19, No. 14, pp. 3745-3754, May 2013.
- [8] K. H. Um, "Design of a PWM-Controlled Driving Device for Backlights of LED Systems", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC)*, Vol. 15, No. 1, pp. 245-251, Feb. 2015.
- [9] H. J. Kim, E. Y. Kang, S. B. Im, G. C. Hoang and Y. K. Kim, "A Comparative Analysis of Thermal Properties of COB LED based on ThermoelectricDevice Structure", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC)*, Vol. 15, NO. 2, pp. 189-194, Apr. 2015.

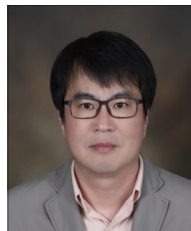
저자소개

이 병 호 (Byeong-Ho Lee)



2008년 2월 : 조선대학교
전자공학과(공학사)
2017년 8월 : 조선대학교
소프트웨어융합공학과(공학석사)
2017년 9월 ~ 현재 : (주)구보다심
책임연구원
관심분야 : 영상처리, 임베디드

반 성 범 (Sung Bum Pan)



1999년 : 서강대학교 전자공학과
공학박사
1999년 ~ 2005년 : 한국전자통신
연구원 정보보호연구단
생체인식기술연구팀 팀장
2005년 ~ 현재 : 조선대학교
전자공학부 교수

관심분야 : 바이오인식, VLSI 영상처리