



미세조류 검출을 위한 휴대용 형광 측정 장치의 개발

Development of a Portable Fluorescent Detection Device for Microalgae

장동주¹, 조영학¹, 이치범^{1,#}
Dongju Chang¹, Young Hak Cho¹, and Chibum Lee^{1,#}

¹ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: chibum@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6337, FAX: +82-2-974-8270
ORCID: 0000-0001-9749-9810

KEYWORDS: Microalgae (미세조류), Fluorescent detection (형광측정법), Portable device (휴대용 장치), Biodeisel (바이오디젤)

Recently, many attempts have been made to use microalgae as raw material for next generation biodiesel. Since conventional microalgae detection is performed in the laboratory after collecting algae in the field, it is necessary to develop a portable fluorescence measuring device that can effectively reduce detection duration in the field. In this study, we developed a portable fluorescence measurement device composed of an optical system and a control system to detect microalgae in the field. The optical system stimulates excitation light suitable for algae to be measured and determines the amount of algae by measuring the amount of emitted light through the PMT sensor. The optical system facilitates seamless change of filters and lenses according to kinds of algae. This was validated by checking the amount of light measured according to concentration of CC125. Reliability of the fluorescence measuring device was verified through repeated experiments.

Manuscript received: December 19, 2018 / Revised: April 27, 2019 / Accepted: May 24, 2019

1. 서론

지난 수십년 간 화석연료를 대체할 대체 연료로 바이오 연료를 이용하고자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히 바이오 디젤은 동식물의 지방이나 재생 유지로부터 생산되며 기존의 경유와 유사한 열량, 점도 및 상변화 특성을 가지므로, 기존의 내연기관을 개조 없이 사용할 수 있고, 혼유가 가능하다는 장점이 있다.¹ 기존의 바이오 디젤의 주 생산원은 콩이나 유채 등의 식물성 기름이었으나, 농작물을 에너지로 이용하는 것에 대해 인도적인 비판이 존재하며, 생산을 위한 경작지의 확대를 위해 열대 우림의 파괴 등의 초기의 재생 에너지원으로서의 취지에 부적합하다는 비판이 존재한다. 최근에는 차세대 바이오디젤의 원료로 식물성 플랑크톤으로 대표되는 미세조류(Microalgae)를 이용하고자 하는 연구들이 많이 이루어지고 있다.² 미세조류는 물, 이산화탄소와 태양광을 이용하여 광합성을 하게 되는데, 기존의 콩이나 유채를 이용하는 바이오 연료에 비해 바이오매스 생산성이 수십 배 이상으로 높은 것으로 알려져 있으며, 더 높은

생산성을 가지는 미세조류 균주를 찾거나 돌연변이를 만들어 내려는 연구개발이 진행 중이다.³ 더불어 생산 공정에 대해 많은 연구가 이루어지고 있으며,⁴ 미세조류를 찾고, 생산 공정을 최적화하는 과정에서 가장 기초적인 것은 용해된 미세 조류의 양을 검출하고 분석하는 문제라 할 수 있다. 일반적인 미세조류 검출은 현장에서 조류를 채집한 후 연구실에서 검출하는 과정을 거치기 때문에 현재의 검출 방법은 시간이 매우 오래 걸리는 문제점이 있다. 본 연구는 현장에서 미세조류를 검출 가능한 휴대용 측정 장치에 관한 것으로, 검출 시간을 효과적으로 줄이는데 의의를 둔다.

조류의 검출 방법은 크게 전기적 검출 방법(Electrical Detection)⁵과 광학적 검출 방법(Optical Detection)⁶으로 나눌 수 있다(Fig. 1). 전기적인 검출 방법은 대상 샘플의 양단에 전극을 주어 그 사이에 걸리는 임피던스 값을 측정하는 것으로, 복잡하고 비싸다는 단점이 있다.⁶ 광학적 검출 방법 중 광학현미경(Optical Microscope)을 통한 검출은 조류 세포 수를 하나하나 세야 하기 때문에 시간이 오래 걸린다.⁷ 또 다른 광학 검출법인

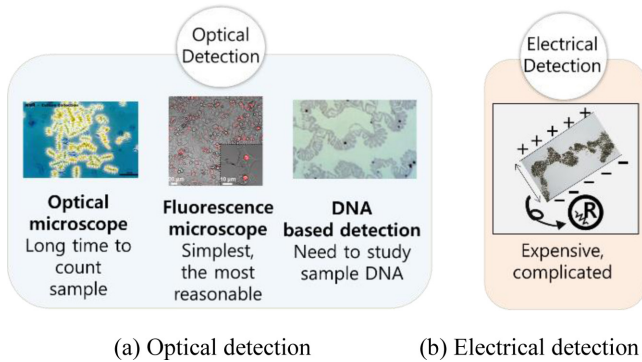


Fig. 1 Traditional methods for detecting algae

DNA를 기반으로 하는 검출 방법(DNA Based Detection)은 샘플의 DNA에 반응하는 물질을 투입하여 원하는 샘플만 검출하여 높은 정확도를 나타내지만 시료의 DNA에 대한 연구가 부가적으로 필요하고 시스템이 복잡하다는 단점이 있다.⁸ 한편, 형광 현미경(Fluorescence Microscope)을 통한 검출은 조류의 종류에 따라 형광물질을 붙이거나 혹은 조류에 따라 형광물질이 없어도 조류 검출이 가능하다. 비교적 간단하고 합리적이기 때문에 녹조 검출에 있어 가장 널리 쓰인다.⁹ 그러나 형광 현미경의 경우 부피가 커 연구실 등에서 사용해야 한다는 단점이 있다. 본 연구는 형광 검출법을 적용하되, 현장에서도 사용 가능한 휴대용 형광측정 장치의 개발을 목표로 한다.

과거에 수중에서 측정하는 것을 목적으로 미세조류 형광 측정 센서를 개발하는 연구가 주로 이루어져 왔다. 최근에 수중이 아닌 소량의 시료로부터 형광측정을 이용하여 농도를 측정하는 센서를 개발한 연구들이 발표되었다. 이들은 주로 광다이오드(Photodiode)나 유기광센서(Organic Photodetector)를 사용하였는데, 센서를 통한 측정 신호가 미약하여 신호의 증폭을 위한 증폭기가 크다는 단점과 광량이 작은 경우 측정 분해능이 떨어지는 단점을 지닌다.^{10,11} 이와는 별개로 미세조류를 측정하는 것은 아니지만 광전자증폭관(Photo Multiplier Tube, PMT)을 이용한 형광측정장치^{12,13}에 관한 연구가 있다. PMT를 이용하면 약한 빛을 증폭시켜 신호를 측정하므로 감지된 신호를 전기적으로 증폭하는 광다이오드를 이용하는 경우보다 높은 정밀도를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 PMT를 사용하여 분해능을 높이고, 광학 필터를 선택적으로 조합하여 의도하는 파장을 감지하는 형광 측정장치를 3D 프린터로 이용하여 제작하였으며 이를 실험을 통해 검증하였다.

2. 형광 측정 장치의 개발

2.1 광학계 설계

형광성을 보이는 미세 조류는 여기광(Excitation Light)를 흡수하고, 여기광 파장과 다른 파장의 빛을 방출광(Emission Light)을 내보내게 된다. 조류의 세포 수가 증가할수록 방출되는

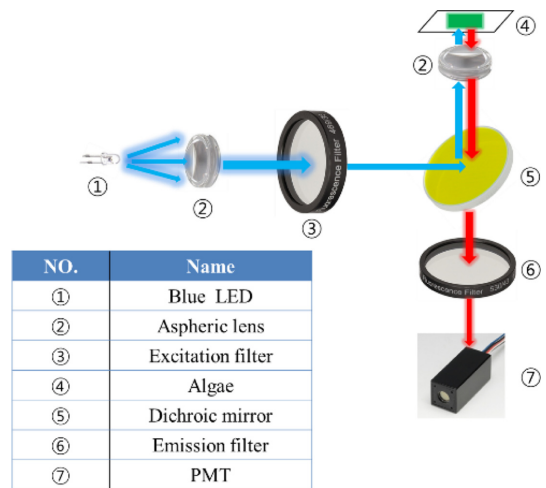


Fig. 2 Composition of an optical system

광량도 비례하므로, 광량을 광학 센서를 통해 측정하면 조류의 농도를 측정할 수 있다. 이러한 형광 검출법 원리를 적용하여, 광학계를 Fig. 2와 같이 구성하였다.

여기광과 방출광은 측정하고자 하는 조류에 따라 다르므로, 본 연구에서는 검증에 사용한 조류 CC125 (*Chlamydomonas Reinhardtii*)¹⁴를 기준으로 설계하였다. CC125 조류는 450-500 nm 파장대(최대치 490 nm)에서 여기광을 흡수하고, 650-700 nm 파장대(최대치 685 nm)의 빛을 방출한다. 다른 조류에 대한 범용성을 가지도록 고가인 PMT는 넓은 파장대를 측정할 수 있는 부품으로 선정하였으며, 형광 파장 특성에 따라 LED 광원과 광학 필터만 변경하면 측정이 가능하도록 하였다. 여기 광원으로는 비교적 좁은 파장을 가지며, 저렴한 청색 LED (470 nm, NSPB310B, Nichia, Tokushima, Japan)를 사용하였고, 비구면 렌즈(354330-A, Thorlabs, Inc. USA)를 이용하여 평행광으로 변환시켰다. 측정에 필요한 파장 이외의 모든 파장을 거르기 위해 여기광 필터(MF475-35, Thorlabs, Inc., USA)를 사용하였다. 파장 범위가 좁혀진 빛은 색선택거울(Dichroic Mirror) (DMLP567, Thorlabs, Inc., USA)에서 위로 반사되며, 다시 비구면 렌즈에 의해서 측정부의 조류에 집중된다. 여기광을 흡수한 조류로부터 방출된 방출광(CC125의 경우 약 680 nm)은 색선택거울을 투과한 뒤 방출광 필터(ET690/50 m, Chroma Technologies, USA)를 통과한다. 이 과정에서 의도하지 않은 경로로 전달된 여기광과 외부의 광원에 의한 노이즈가 걸러지며, 최종적으로 PMT (H10721-20, Hamamatsu, Japan)를 이용하여 광량을 측정하였다.

광학계를 설계함에 있어 중요한 것은 여기광이 가장 효율적으로 조류가 놓여 있는 위치까지 전달되도록 하는 것이다. LED 광원이 비구면 렌즈로부터 정확한 위치에 있어야 의도한 대로 평행광을 만들 수 있다. 그러나 비구면 렌즈는 단면이 기준점이 명확하지 않은 비대칭 구면 형상(Fig. 3(a))일 뿐 아니라 LED 광원 또한 명확한 점광원이 아니므로 비구면 렌즈를 고정된 후 LED 광원을 이동시켜 가면서 실험적으로 최적 위치를 결정하

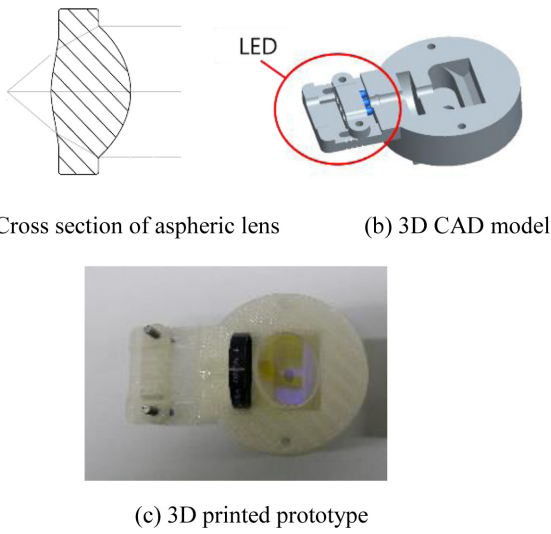


Fig. 3 The prototype for determination of focal length

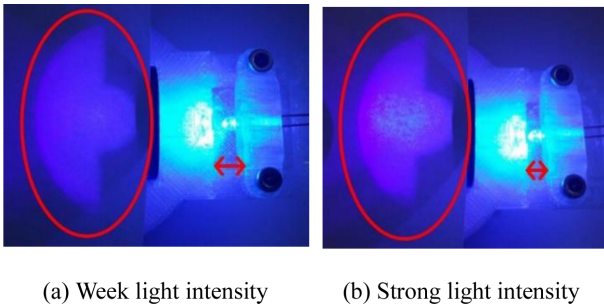


Fig. 4 Experiment for determining focal length (light intensity with respect to lens-LED distance)

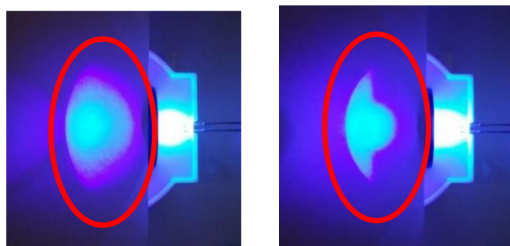


Fig. 5 Comparison of light intensity according to aspheric lens

였다. 본 실험은 LED 광원에서 나온 빛이 비구면 렌즈 통과 후 색선별거울에서 위로 반사된 광량이 최대치일 때 비구면 렌즈와 LED 광원 사이의 거리를 구하는 것을 목표로 하였다. 실험을 위해 LED 광원을 이동시킬 수 있는 프로토타입 기구를 3D 프린터로 제작하였다(Figs. 3(b), 3(c)). 이 기구는 슬라이드 방식을 이용해 LED 광원을 평행으로 이동시켜 LED 광원과 렌즈 사이 거리를 3 mm 내에서 조절할 수 있다.

실험을 통해 비구면 렌즈와 LED 광원 사이의 거리에 따라 조류 샘플이 위치할 상단면에 전달되는 광량의 변화를 확인할

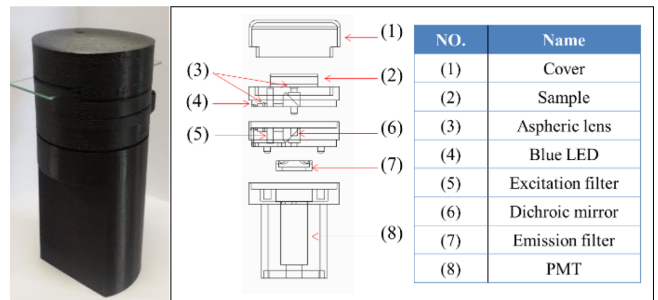


Fig. 6 Photo and description of optical system

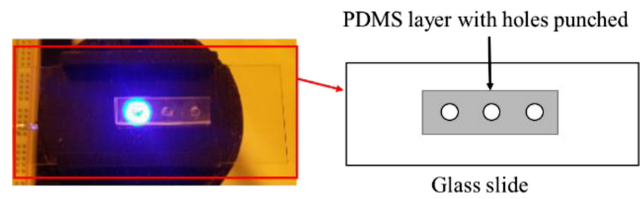


Fig. 7 Well glass slide





수 있었다(Figs. 4(a), 4(b)). Fig. 5는 LED 광원의 위치 결정 후, 비구면 렌즈를 탈착하여 비교한 것으로, 비구면 렌즈가 있을 때 중심부에 광량이 확연하게 집중되는 것을 확인할 수 있다.

2.2 3D 프린터를 이용한 광학부 제작

Fig. 6은 3D 프린터를 이용하여 앞에서 기술한 광학계를 구현한 광학부를 나타낸다. 미세조류가 담긴 용액을 광학부에 위치시키기 위하여 Fig. 7과 같이 슬라이드 글라스(Slide Glass) 위에 웰(Well)을 제작하였다. 직경 2.5 mm의 펀치를 이용하여 두께 2.5 mm의 PDMS (Polydimethylsiloxane)에 웰을 제작하고, 이를 슬라이드 글라스와 플라즈마 본딩하였다. 피펫을 사용하여 정량의 미세조류를 슬라이드 글라스 위에 제작된 웰에 채우고, 측정 장치의 상단에 위치시킨다. 측정 시 외부로부터의 빛을 차단하기 위해 커버를 덮은 후 각 웰에 담긴 시료를 측정하도록 하였다.

3D 프린터를 이용하여 광학계의 제작 시 해결해야 할 사항이 몇 가지 존재하였다. 3D 프린터의 종류에 따라 광학부 제작시 발생하는 문제와 3D 프린터에 사용하는 필라멘트의 재질 문제이다. 본 연구에서는 다양한 3D 프린터를 사용하였는데, Tiertime사의 Up-mini 3D 프린터(Up-mini, Tiertime사, China)의 경우 서포트를 깨끗하게 제거하기 곤란한 문제점이 발생하였다. 이는 샘플 아래 집광을 위한 비구면 렌즈(354330-A, Thorlabs, Inc. USA)가 정확한 위치에 놓이지 못하게 하여, 광학계가 제대로 정렬되지 못하게 하는 문제를 야기하였다. 반면, 용해성 서포트 재료를 사용하는 Stratasys사의 uPrint SE Plus 3D 프린터(uPrint SE Plus, Stratasys사, USA)는 렌즈의 정렬 문제를 해결할 수 있었으나, 사용된 아이보리색의 필라멘트 재질(ABS, 1.75 mm, 플라실, Korea)이 청색 LED 광원의 일부를 투과시켜 PMT에 전달되는 문제를 야기시켰다.

Table 1 3D printing for light shielding (PMT Gain: 0.88 V)

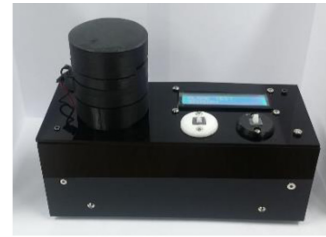
No		Surface coating	Aspheric lens	Output(%au) with LED on	Output(%au) with 100% algae fluid
1		X	X	13.10	18.40
2		Anti-reflect tape	X	4.20	20.82
3		X	O	53.08	-
4		Black spray	X	0.59	17.11
			O	0.59	65.79

uPrint SE Plus 3D 프린터는 검정색 필라멘트를 사용할 수 없는 모델이어서, 결국 Up-mini 프린터를 이용하여 검정색 필라멘트를 이용하여 광학부를 제작한 후, 비구면 렌즈가 위치하는 곳에 대해 후가공 처리를 하여 이 문제를 해결하였다.

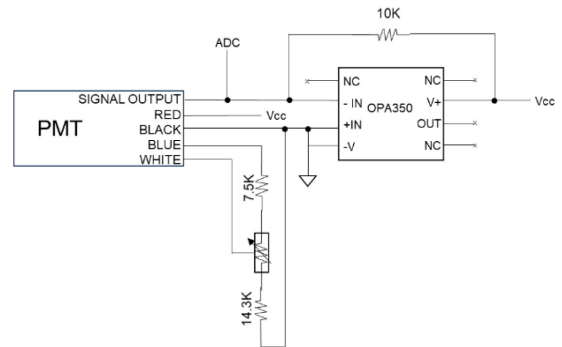
청색 LED 광원에서 나온 빛은 조류를 자극시키기 위한 것으로, 조류로부터 방출된 빛이 아니다. 따라서 조류 시료가 없는 상태에서 LED 광원만을 켜둘 시에는 검출되는 빛이 없어야 한다. 그러나, 검정색 필라멘트로 제작된 광학부에 대해서조차 PMT에서 측정되는 광량은 13.1%au였다(Table 1(1)). 이는 출력된 ABS 재질이 빛을 일부 반사하여 발생하는 것으로 이를 차폐하는 방안을 모색하였다. 초기에는 검정색 무광 테이프를 이용하여 광경로를 차폐한 경우에는 4.20%au로 광량이 크게 줄어들었다(Table 1(2)). 참고로 Table 1(3)에 나타난 바와 같이 uPrint SE 3D 프린터를 이용하여 광학부를 제작한 경우에는 53.08%au의 광량이 검출되었다.

검정색 ABS 재질과 무광테이프를 이용하여 청색 LED 광원에 대해 노이즈를 제거하였다 하더라도, 집광 렌즈가 정확한 위치에 놓이지 않으면 방출광이 제대로 검출되지 않았다. 집광 렌즈가 없을 시 조류 농도가 100%인 시료에 대해 검출했을 때 20.82%au로 낮은 값을 보였다(Table 1(2)). 결국 농도에 대한 분해능을 높이려면, 광경로를 최대한 차폐하여 청색광의 투과를 막아야 할 뿐 아니라, 집광 렌즈의 이용이 필수적이다.

따라서 본 연구에서 광학부 제작을 위해 최종적으로 검정색 ABS 재질을 이용하였으며, 검정색 무광 스프레이(Flat Black Spray Enamel Pintura de Esmalte en Aerosol, Testors, USA)를 이용하여 광경로를 도색하여 광경로를 차폐하였을 뿐 아니라, 후가공을 통해 집광 렌즈를 정확한 위치에 정렬시켰다. 최종적으로 완성된 광학부는 청색 LED 광원에 대해 0.59%au 수준의 아주 낮은 광량만 검출되었으며, 100% 조류 농도에 대해 65.79%au의 높은 신호를 나타내었다(Table 1(4)).



(a) A portable fluorescent detection device



(b) Adjustable amplification circuit

Fig. 8 Controller and circuits of fluorescent detection device

2.3 제어부

제어부는 전원배터리, 마이크로컨트롤러, LCD 디스플레이, PMT 측정 신호 조절 회로로 구성되었으며, 아크릴로 외형을 제작하여 Fig. 8(a)와 같이 최종적으로 장치를 제작하였다. 현장에서 조류를 검출하기 용이하게 적합하도록 소형화(19 × 7.5 × 15 cm³) 하였다.

PMT 출력값은 광전류이며, 측정 계인은 입력되는 제어 전압(0.5-1.1V)에 따라 조절할 수 있도록 하였다. Fig. 8(b)와 같이 가변 저항을 통해 입력 전압을 조정하였으며, OP 앰프로 전압값으로 변환하여 마이크로컨트롤러에서 읽을 수 있도록 하였다. 조류의 움직임에 의해 민감한 PMT에서 측정하는 데이터 값이 실시간으로 변하는 문제점을 해결하기 위해 20개의 실험 데이터를 받아 평균값을 계산한 결과를 디스플레이 화면에 나타내도록 하였다. 펌웨어는 아두이노 Uno를 사용하였으며, 2개의 스위치가 전원과 측정에 이용되었다.

3. 실험 결과

3.1 실험 방법

검증을 위한 농도별 조류를 만들기 위하여, 충분히 증식한 CC125 용액과 버퍼의 혼합 비율에 따라 나누어 제작하였다. 충분히 증식한 CC125 10 μL에는 약 10⁶ 개의 조류가 있는 것으로 알려져 있으나,¹² 본 연구에서는 이를 확인하지 못하여, 조류가 충분히 증식한 용액의 농도를 100%로 설정하고, 이 용액과 버퍼의 혼합 비율을 기준으로 비교하였다.

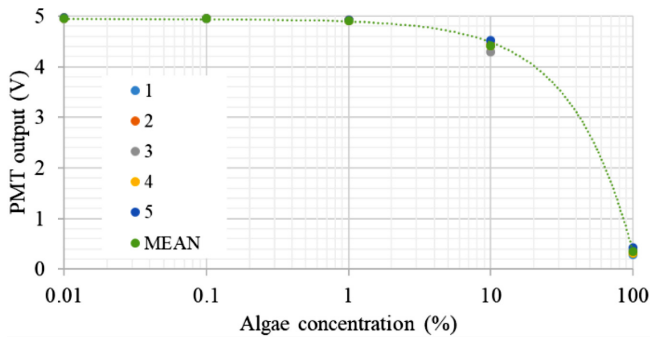


Fig. 9 Measurement of PMT output w.r.t algae-concentration

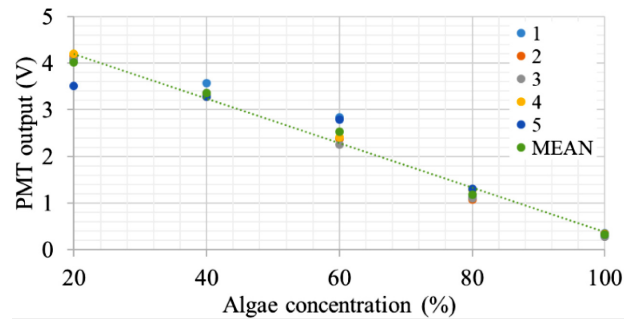


Fig. 11 Measurement of PMT output w.r.t limited algae-concentration

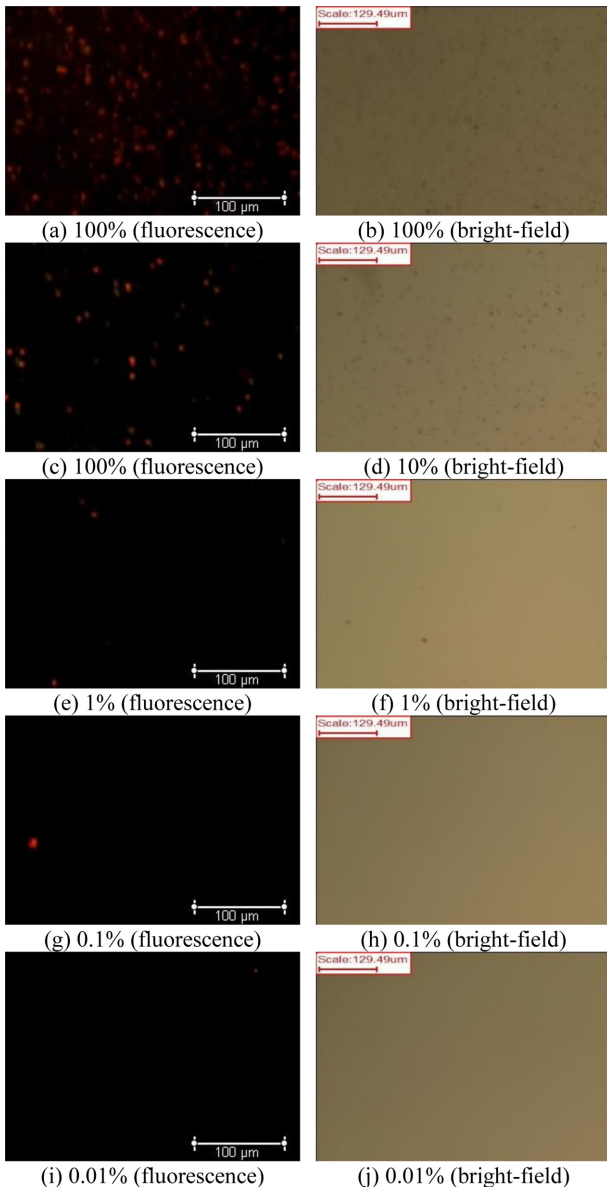


Fig. 10 Microscope images w.r.t. algae-concentration (a fluorescence microscope vs. a bright-field optical microscope)

앞에서 언급한 외부광의 영향을 최대한 배제하기 위하여 실험은 암실에서 진행하였다. 감도를 높이기 위하여, PMT의 게인

조정값을 1.06 V로 설정하였다. 측정의 신뢰도를 높이기 위해 5 번씩 반복 실험을 하여 결과의 평균치를 사용하였다. 조류의 농도에 따라 광량이 선형적으로 수치가 나타나는지 그래프를 통해 살펴 보였으며, 이에 대한 회귀곡선을 구하였다.

3.2 조류 농도에 따른 광량 측정

CC125와 버퍼를 섞어 100, 10, 1, 0.1, 0.01%의 농도를 가진 시료를 만들었을 때 개발 장치를 이용해 검출한 결과는 Fig. 9 과 같다. OP 앰프의 전압 변환과정에서 측정 광량이 많으면 0 V에 가깝고, 방출광 측정이 안되면 5V로 나타나도록 되어있다. 농도가 증가할수록 방출광 측정량이 커지므로, 전압 출력은 0 V에 가까워 지는 것을 볼 수 있다. 또한, 0.1과 0.01%처럼 농도가 매우 낮은 경우에는 방출광이 거의 검출되지 않았다. 결과를 확인하기 위하여, 각각의 농도의 용액을 실제 형광현미경과 광학 현미경을 통해 관찰한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서보면, 0.1, 0.01%에서는 조류가 거의 존재하지 않으며, 형광 현미경으로도 측정이 어려운 수준이다.

3.3 제한된 조류 농도에 따른 광량 측정

실제 측정 장치가 많이 필요한 구간으로 판단되는 10-90%에 대해서 자세히 실험하였다. CC125와 버퍼를 섞어 100, 80, 60, 40, 20%의 농도의 시료 용액을 만들어 개발된 장치로 검출하였다(Fig. 11). 미세조류의 농도와 PMT 출력전압 사이에 비교적 선형에 가까운 관계를 갖는 것을 볼 수 있다. 5회 반복 실험을 통해 얻은 데이터의 선형회귀곡선은 $y = -0.0477x + 5.1453$ (결정계수 $R^2 = 0.9856$)이다. 향후 이와 같은 관계식을 프로그램에 포함시켜 현장에서 조류를 측정했을 때 나온 해당 조류의 농도가 얼마인지 알 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 미세 조류를 현장에서 검출하기 위하여 광학계와 제어계로 구성된 휴대용 형광 측정 시스템을 개발하였다. 광학계는 대상이 되는 조류에 적합한 여기광을 자극하여, 방출

광의 광량을 PMT 센서를 통해 측정함으로써 조류의 양을 판단한다. 광학계는 조류의 종류에 따라 알맞은 필터, 렌즈를 손쉽게 교체 가능하도록 하였다. 전체 시스템의 크기는 $19 \times 7.5 \times 15 \text{ cm}^3$ 으로 휴대에 용이하기 때문에 현장에서 바로 조류의 검출이 가능하다. 또한, 실제 CC125의 농도에 따라 측정되는 광량을 확인하여 유효성을 확인하였으며, 반복 실험을 통하여 형광 측정 장치의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 향후 과제로는 조류 시료의 정량 주입에 필요한 마이크로펌프를 결합하여 조류 시료의 측정이 보다 높은 정확도를 가질 수 있을 것으로 기대된다. 개발된 장비는 바이오디젤의 연구에 사용 가능할 뿐만 아니라, 현재 우리나라에서 문제가 되고있는 하천의 조류 측정에도 이용 가능하며, 개발 장치를 통해 얻는 데이터는 향후에 녹조 세포 수에 대한 통계나 하천 내 녹조 현상을 모니터링 하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Oh, Y. K. and Na, J. G., "Microalgal Biodiesel Production Process," KIC News, Vol. 18, No. 3, pp. 1-14, 2015.
- Brennan, L. and Owende, P., "Biofuels from Microalgae—A Review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co-Products," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 2, pp. 557-577, 2010.
- Kim, H. S., Weiss, T. L., Thapa, H. R., Devarenne, T. P., and Han, A., "A Microfluidic Photobioreactor Array Demonstrating High-Throughput Screening for Microalgal oil Production," Lab on a Chip, Vol. 14, No. 8, pp. 1415-1425, 2014.
- Xu, L., Weathers, P. J., Xiong, X. R., and Liu, C. Z., "Microalgal Bioreactors: Challenges and Opportunities," Engineering in Life Sciences, Vol. 9, No. 3, pp. 178-189, 2009.
- Cady, P., Dufour, S., Shaw, J., and Kraeger, S., "Electrical Impedance Measurements: Rapid Method for Detecting and Monitoring Microorganisms," Journal of Clinical Microbiology, Vol. 7, No. 3, pp. 265-272, 1978.
- Saqer, L., Al Ahmad, M., Taher, H., Al-Zuhair, S., and Al Naqbi, A. H., "Monitoring of Microalgae Lipid Accumulation System Overview," Proc. of the 8th GCC Conference & Exhibition, pp. 1-5, 2015.
- Greenspan, P. and Fowler, S. D., "Spectrofluorometric Studies of the Lipid Probe, Nile Red," Journal of Lipid Research, Vol. 26, No. 7, pp. 781-789, 1985.
- Orozco, J. and Medlin, L. K., "Electrochemical Performance of a DNA-Based Sensor Device for Detecting Toxic Algae," Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 153, No. 1, pp. 71-77, 2011.
- Maxwell, K. and Johnson, G. N., "Chlorophyll Fluorescence-A Practical Guide," Journal of Experimental Botany, Vol. 51, No. 345, pp. 659-668, 2000.
- Shin, Y.-H., Barnett, J. Z., Song, E., Gutierrez-Wing, M. T., Rusch, K. A., et al., "A Portable Fluorescent Sensor for On-Site Detection of Microalgae," Microelectronic Engineering, Vol. 144, pp. 6-11, 2015.
- Lefevre, F., Chalifour, A., Yu, L., Chodavarapu, V., Juneau, P., et al., "Algal Fluorescence Sensor Integrated into a Microfluidic Chip for Water Pollutant Detection," Lab on a Chip, Vol. 12, No. 4, pp. 787-793, 2012.
- Dickens, J. E., Vaughn, M. S., Taylor, M., and Ponstingl, M., "An LED Array-Based Light Induced Fluorescence Sensor for Real-Time Process and Field Monitoring," Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 158, No. 1, pp. 35-42, 2011.
- Koo, C., Malapi-Wight, M., Kim, H. S., Cifci, O. S., Vaughn-Diaz, V. L., et al., "Development of a Real-Time Microchip PCR System for Portable Plant Disease Diagnosis," PloS one, Vol. 8, No. 12, Paper No. E82704, 2013.
- Manna, E., Xiao, T., Shinar, J., and Shinar, R., "Organic Photodetectors in Analytical Applications," Electronics, Vol. 4, No. 3, pp. 688-722, 2015.



Dongju Chang

Undergraduate Student in the Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology. (Currently in SKhynix) Her research interest is Machine design.
E-mail: 94jinju@hanmail.net



Young Hak Cho

Associate Professor in the Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology. His research interest is Bio-MEMS and Nano-fabrication.
E-mail: yhcho@seoultech.ac.kr



Chibum Lee

Associate Professor in the Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology. His research interest is dynamics and control on mechanical system
E-mail: chibum@seoultech.ac.kr