

## 에너지 절감형 평형수 처리장치 개발에 관한 연구 (I)

박대원<sup>1</sup> · 길경석<sup>†</sup> · 최용기<sup>2</sup> · 최철영<sup>3</sup> · 장지호<sup>4</sup> · 천상규<sup>5</sup>

(원고접수일 : 2010년 8월 5일, 원고수정일 : 2010년 8월 11일, 심사완료일 : 2010년 8월 19일)

### A Study on the Development of an Energy Saving Ballast Water Treatment Device (I)

Dae-Won Park<sup>1</sup> · Gyung-Suk Kil<sup>†</sup> · Yong-Ki Choi<sup>2</sup> · Chul-Young Choi<sup>3</sup> · Jiho-Chang<sup>4</sup> · Sang-Gyu Cheon<sup>5</sup>

**요약** : 본 논문에서는 에너지 절감형 선박평형수 처리장치 개발을 위한 저압 자외선 램프의 적용에 대하여 연구하였다. 중압 및 저압 자외선 램프의 방사 에너지 분포를 분석하여 램프의 최적배치방안에 대해 제안하였다. 실험결과에 기초하여 저압 자외선 램프로 구성되는 살균 챔버를 제작하였다. 챔버의 정격 전력은 216 [W], 처리용량은 10 [m<sup>3</sup>/h]이며, 이는 기존 중압 자외선 램프 2 [kW] 2개로 처리되는 살균 챔버의 능력을 대처할 수 있다. 살균성능은 중압 자외선 램프에 비해 소비전력은 약 1/18이지만 미생물 94 [%], 동물성 플랑크톤 93 [%], 식물성 플랑크톤 94 [%]로 높게 나타났다. 따라서, 저압 자외선 램프의 적용으로 100 [m<sup>3</sup>/h]이하의 소용량에서는 에너지절감형 선박평형수 처리시스템의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

**주제어** : 에너지 절감, 평형수, 살균, 자외선 램프, 미생물, 플랑크톤

**Abstract**: In this paper, we studied the application of low pressure ultra-violet (UV) lamps for the development of an energy saving ship's ballast water treat (BWT) device. We proposed the optimal arrangement of UV lamps by analyzing the energy radiated from medium- and low-pressure UV lamps.

Based on the experimental results, we manufactured a disinfection chamber which is composed of low-pressure UV lamps. The rated power and the treatment capacity of the chamber are 216 [W] and 10 [m<sup>3</sup>/h], respectively. This can replace a disinfection chamber treated by two 2 [kW] medium pressure lamps. The disinfection performance, however the power consumption is about one-eighteen compare to the medium pressure UV lamp, is over 94 [%] for bacteria, 93 [%] for zooplankton, and 94 [%] for phytoplankton. Therefore, it would be possible to develop an energy saving BWT device in a low capacity below 100 [m<sup>3</sup>/h].

**Key words**: Energy saving, Ballast water, Disinfection, UV lamp, Bacteria, Plankton

## 1. 서 론

전을 위하여 사용되는 해수로서, 매년 전 세계 적  
선박평형수(ballast water)는 선박 항해의 안 으로 100억여 톤의 해수가 선박 평형수로 이용되

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 전기전자공학부, E-mail:kilgs@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4414)

<sup>1</sup> 한국해양대학교 전기전자공학부 박사과정

<sup>2</sup> 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 전임연구원

<sup>3</sup> 한국해양대학교 해양환경·생명과학부 교수

<sup>4</sup> 한국해양대학교 나노반도체공학과 교수

<sup>5</sup> (주)파나시아 기술연구소 차장

어 다른 생태계로 이동되고 있다. 현재, 국제교역량의 90 [%] 이상이 선박을 이용하여 처리되고 있으며, 매년 증가하는 국제교역량과 선박의 대형화 및 고속화가 진행됨에 따라 선박평형수의 사용량은 점점 증가하고 있다[1,2]. 선박평형수의 이동과 함께 해수 내의 약 7천여종의 해양 동·식물(플랑크톤, 세균, 박테리아)이 새로운 생태계로 이동하고 있다. 이러한 외래해양생물종은 해양생태계의 파괴와 질병의 원인으로 작용하여 환경적, 경제적으로 많은 피해를 주고 있다[3,4]. 이에 미국과 유럽 일부 국가에서는 해양환경 및 생태계 보호를 위한 선박 평형수의 관리 및 규제를 강화하고 있으며, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 2004년 2월, “선박평형수와 침전물 관리를 위한 국제협약”을 채택하여, 2009년부터 건조하는 신조선부터 선박평형수 처리장치의 설치를 의무화 하고 있다[5,6]. 현재 선박평형수 처리장치는 자외선(ultraviolet, UV), 오존, 초음파, 전기분해 및 염소 등 다양한 기술을 적용하여 상용화되고 있으나, 전력소비가 너무 커서 발전기 용량의

증대 또는 추가 설치의 문제가 있어 낮은 소비전력의 선박평형수 처리장치에 대한 요구가 절실하다 [7].

자외선 방식의 선박평형수 처리장치는 Figure 1(a)의 스펙트럼을 갖는 중압(medium pressure, MP) 자외선 램프가 사용되고 있다. 그러나 이들 램프는 방사 에너지 중 단지 수 [%]만이 살균력이 있는 250 [nm]~280 [nm]이고, 점등 후 정상상태에 도달하기까지 10분 이상 소요되며, 중·고압으로 수명이 짧은 문제점이 지적되고 있다[8].

이들 배경으로부터 본 논문에서는 에너지 절감형 선박평형수 처리시스템 개발을 위하여, Figure 1(b)와 같이 총 방사 에너지는 작지만 입력전력의 대부분이 253.7 [nm]의 UV-C만을 방사하는 특성에 기초하여 중압 자외선 램프 대신 저압(low pressure, LP) 자외선 램프의 적용방안을 연구하였다.

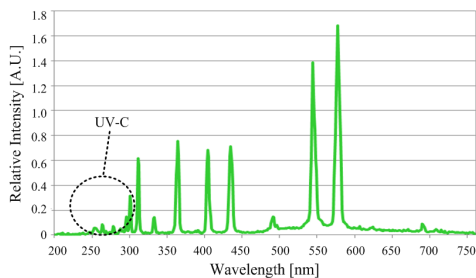
## 2. 설계 및 제작

저압 자외선 램프 방식의 선박평형수 처리용 살균 챔버를 설계하기 위해서는 램프의 적정 용량과 배치가 중요하므로, 본 논문에서는 저압 및 중압 자외선 램프의 해수중 자외선 투과와 감쇄에 대해 분석하였다. 이들 결과로부터 10 [m<sup>3</sup>/h]급 살균 챔버를 제작하여 미생물 및 플랑크톤을 대상으로 살균능력을 평가하였다.

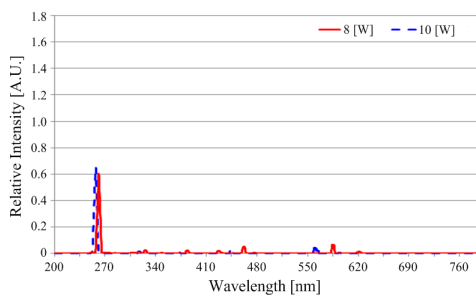
### 2.1 램프의 최적 배치

해수중 거리에 따른 자외선 강도의 변화는 현재 선박평형수 처리에 사용되고 있는 중압 2 [kW]와 새로이 대체하고자 하는 저압 8 [W], 10 [W] 및 8 [W]×3개의 24 [W]램프를 대상으로 비교하였다. 저압 자외선 램프의 선정은 현재 중압 자외선 램프를 사용하는 살균 챔버에 설치 가능한 것을 기준으로 하였으며, 8 [W]×3개의 번들(bundle)구성도 챔버 내에 그대로 적용이 가능하다.

실험은 해수가 채워진 아크릴 수조내에 설치된 석영관내에 램프를 삽입하고 자외선 강도계(HD2102/ Deltaohm)로 220~280 [nm] 대역에서 측정하였으며, 결과는 Figure 2에 나타내었다.

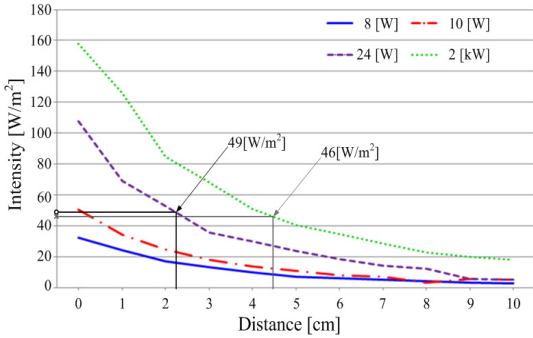


(a) Medium pressure UV lamp



(b) Low pressure UV lamp

Figure 1: Spectrum of UV lamps



**Figure 2:** Attenuation of UV intensity as a function of distance from UV lamp in sea water

자외선 강도는 소비 전력이 클수록 높고, 램프 표면에서 최대로 거리가 멀어질수록 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 현재 IMO 처리기준을 충족하는 중압 자외선 램프방식의 살균 챔버 내부에 램프의 배치는 Figure 3(a)와 같으며, 램프의 표면간 거리는 90 [mm], 램프 표면과 제일 가까운 챔버 내벽면은 45 [mm]이다. 본 논문에서는 이들

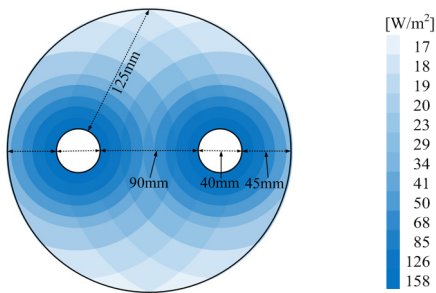
45 [mm]까지를 유효 살균영역으로 설정하였으며, Figure 2에서 중압(MP) 자외선 램프의 강도는 45 [mm]에서 46 [W/m<sup>2</sup>]이므로 이와 동등한 세기는 8 [W]급에서는 얻을 수 없고, 10 [W]급에서는 표면이므로 실제 적용시 챔버내가 모두 램프로 채워져야 하므로 적용이 불가능하다. 그러나 8 [W]×3개의 24 [W]급 변들 구성에서는 25~26 [mm]에서 나타나므로 램프 배치를 해수가 흐르는 모든 공간에 자외선 강도가 46 [W/m<sup>2</sup>] 이상이 되도록 하면 충분히 살균이 가능할 것으로 판단한다.

따라서 본 논문에서는 Figure 3(b)와 같이 램프 표면으로부터 가장 먼거리가 23 [mm]를 넘지 않도록 설계하여, 자외선 강도가 중압 자외선 램프에서보다 높은 49 [W/m<sup>2</sup>] (Figure 2 참조)가 되도록 설계하였다.

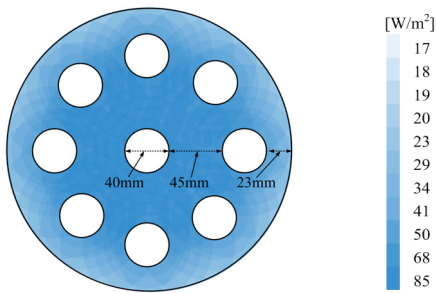
2.2 살균 챔버

램프로부터 방사되는 자외선의 최대 강도 및 해수중 거리에 따른 감쇄특성으로부터 얻어진 자외선 램프의 최적 배치로부터 Figure 4(a)와 같이 살균 챔버(470×342×495 [mm])를 제작하였다.

살균 챔버는 해수에 의한 부식과 내압에 충분히 견딜 수 있도록 SUS 316을 사용하였으며, 최대 사용압력은 14 [kg/cm<sup>2</sup>], 최대 처리용량은 20 [m<sup>3</sup>/h]이다. 또한 자외선 램프는 해수중 수압과 온도차에 보호되면서 동시에 자외선을 해수에 100 [%] 방사시킬 수 있도록 석영관(내경 37 [mm], 외경 40 [mm]) 내에 설치된다. 하나의 살균 챔버에서 Figure 4(b)와 같이 중압 2 [kW] 2개 또는 Figure 4(c)와 같이 저압 24 [W] 9개를 설치할 수 있다.



(a) MP UV lamp(2 [kW]×2)



(b) LP UV lamp(24 [W]×9)

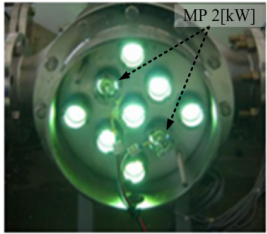
**Figure 3:** Optimal allocation of UV lamps

3. 평가 및 분석

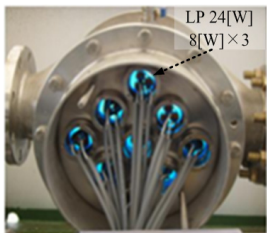
저압 및 중압 자외선 램프의 살균능력은 살균 챔버내의 유속을 10 [m<sup>3</sup>/h]로 일정하게 유지한 조건에서 미생물과 플라크톤에 대해 평가하였으며, 정상 점등 10분후 유입수와 처리수를 각각 샘플링 하였다.



(a) Disinfection chamber



(b) MP lamp (2 [kW] x 2)



(c) LP lamp (8 [W] x 3 x 9)

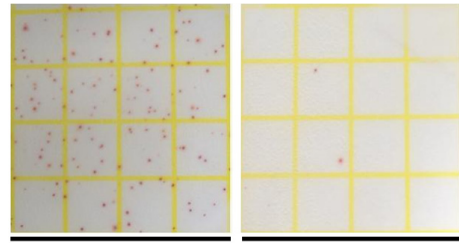
Figure 4: UV disinfection chamber

3.1 미생물 살균능력

자외선 처리 전후의 해수내 일반세균(aerobes), 대장균(*E-coli*) 및 대장균군(coliform)을 건조 필름법을 이용하여 배양하였다.

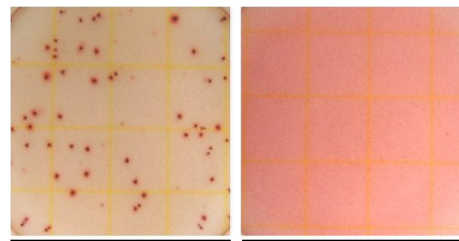
건조필름배지(3M™ Petrifilme™ Plate)에 자외선 처리 전·후의 해수 1 [ml]를 수직으로 접촉하고, 상부 필름을 누름판을 이용하여 기포발생에 유의하여 누른 후 35 [°C]에서 48 시간 배양하였다. 배양 후에 육안으로 각각의 균수(colony forming unit, [cfu])를 계수하였다. 자외선 처리 전·후의 미생물 계수 결과를 Figure 5 및 Table 1에 나타내었으며, 처리전 해수(대조구)에서 일반세균은 669.2 [cfu], 대장균은 35.5 [cfu], 대장균군(coliform)은 31.5 [cfu]로 나타났다. 중앙 자외선 램프 (4 [kW]) 구성의 실험에는 일반세균이 10 [cfu]으로 검출되어 98.5 [%], 대장균과

대장균군은 100 [%] 살균된 것으로 평가되었다.



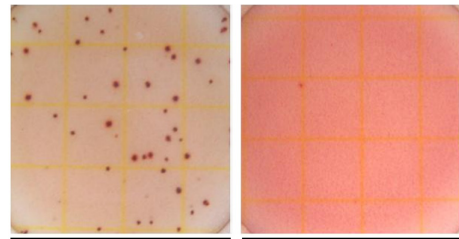
Before treatment (Control water)      After treatment (Treated water)

(a) Aerobes



Before treatment (Control water)      After treatment (Treated water)

(b) *E. coli*



Before treatment (Control water)      After treatment (Treated water)

(c) Coliform

Figure 5: Disinfection of bacteria by UV treatment

Table 1: Colony forming unit [cfu] of bacteria of before and after UV treatment

Bacteria	Test water (before)	Treated water (after)	
		4 [kW]	216 [W]
Aerobes	669.2	10	22.1
<i>E. coli</i>	35.5	0	2.1
coliform	31.5	0	0.7

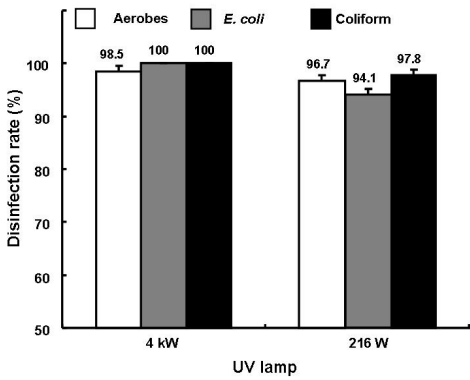


Figure 6: Disinfection rate of bacteria by UV treatment

저압 자외선 램프 216 [W]에서는 일반세균 22.1 [cfu], 96.7 [%], 대장균 2.1 [cfu], 94.1 [%] 대장균군 0.7 [cfu], 97.8 [%]의 살균효율을 보였다. 미생물 살균능력은 중압 램프가 높지만 저압 램프에서도 94 [%] 이상으로 높게 나타났다.

3.2 플랑크톤 살균능력

자외선 처리후의 플랑크톤은 IMO 협약에 근거하여 5일 동안 암실조건에서 보관되었으며, 자외선 처리 전과 직후 그리고 처리 후 5일 동안 매일 5회 반복하여 개체수를 측정하였다. 동물성 플랑크톤은 Bogorov 계수판을 이용하여 해부현미경(Stemi DV4/Carl Zeiss)하에서 관찰하였으며 생사는 운동성의 유무로 판단하였다. 식물성 플랑크톤은 형광현미경(Axiostar plus/Carl Zeiss)에 의해 운동성과 엽록소(chlorophyll) 유무에 따른 형광색 차이를 기준으로 적색은 생존개체 그리고 노란색은 사멸개체로 판단하여 계수하였다. 해부 현미경 관찰결과, 처리 직후에 급격한 개체수 감소와 운동능력의 저하를 확인할 수 있었으며 식물성 플랑크톤의 경우 형광현미경으로 엽록소의 소실을 확인하였다.(Figure 7)

또한 5일 후에는 대부분의 플랑크톤이 운동성을 잃고 사망하였으며, 식물성 플랑크톤의 경우 엽록소를 완전히 소실하였고 심하게는 분해(lysis)되는 현상을 나타내었다. Figure 8에서는 처리 직전과 처리 5일 후의 동물 및 식물성 플랑크톤의 살균효율을 나타내었다.

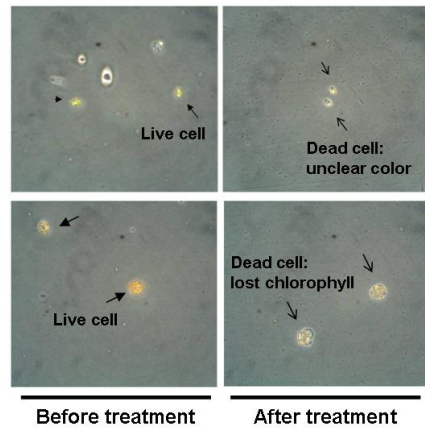


Figure 7: Disinfection of bacteria by UV treatment

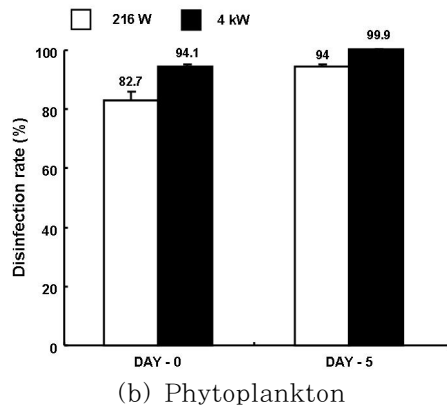
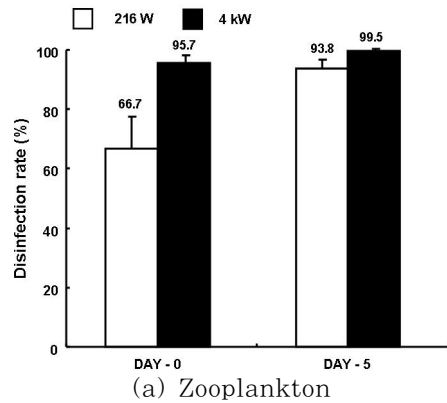


Figure 8: Comparison of disinfection for plankton

중압 자외선 램프로 처리한 실험구에는 동물 및 식물성 플랑크톤이 처리 5일 후 약 99 [%] 이상의 높은 살균효율을 나타내었으며, 저압 자외선 램프

의 경우에 직후의 살균효율을 중압 자외선 램프에 비하여 다소 낮게 나타났지만 처리 5일 후에는 동물성 플랑크톤 93.8 [%], 식물성 플랑크톤 94 [%]로 높은 살균효율을 확인하였다. 플랑크톤의 살균효율은 미생물 살균에서와 마찬가지로 중압 4 [kW]에서 다소 높게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 해수 처리능력 10 [m<sup>3</sup>/h]의 에너지 절감형 선박평형수 처리장치의 개발을 위해 해수중 자외선 투과와 감쇄 및 살균 챔버내 자외선 램프의 최적배치에 대해 연구하였다. 해수중 2 [kW] 중압과 8 [W], 10 [W] 및 24 [W]의 저압 자외선 램프의 방사 에너지를 비교하여 10 [m<sup>3</sup>/h] 급 처리장치에는 24 [W] 9개의 구성이 가장 적합함을 알 수 있었다.

실험결과로부터 4 [kW] 중압 자외선 램프 구성에 비해 소비전력이 1/18정도인 저압 자외선 램프 216 [W] 정격의 선박평형수 처리장치를 제작하고 살균능력을 비교한 결과, 미생물은 94 [%], 동물 및 식물성 플랑크톤은 약 94 [%]이상으로 높은 살균률을 나타내었다. 이는 4 [kW] 중압 자외선 램프 구성에 비해 소비전력은 1/18정도이지만 저압 자외선 램프의 유효 살균과장인 253.7 [nm]가 해수 전체에 동일한 강도로 방사되도록 설계하였기 때문이다. 이와 같이 해수처리용량에 필요한 자외선 세기와 램프의 최적 배치를 통해 에너지 절감형 선박평형수 처리장치의 설계가 가능할 것으로 기대한다. 그러나 대용량 해수처리시 다수의 저압 자외선 램프를 설치해야 하므로 장치의 규모가 커지는 이유로 실적용에 한계가 있을 것으로 생각되므로, 자외선 광원을 대체할 수 있는 초소형 자외선 발광다이오드(LED)의 대체적용에 대한 연구도 필요하다.

#### 후 기

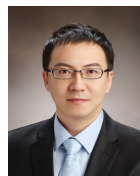
본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2008EEL02P020000)

본 연구는 지식경제부 및 정보통신진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2010-C1090-1021-0015)

#### 참고문헌

- [1] Bernal and Cincin-sain, "Global forum on oceans", Coastal and Islands Report, 2001.
- [2] North Sea Foundation, "Alien species from ballast water", pp. 4-9, 2001.
- [3] IMO, "Alien invaders-putting a stop to the ballast water hitch-hikers", Focus on IMO, 1998.
- [4] 표태성, 천상규, 박대원, 최성국, 김성연, 길경석, "자외선 램프를 이용한 선박평형수 처리시스템의 설계 및 제작", 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제6호, pp. 952-958, 2009.
- [5] IMO, International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast water and Sediments, 2004, BWT/CON/36, 2004.
- [6] 윤상국, 박병근, "선박 밸러스트 탱크 유입수 필터링 시스템 설계 및 구조해석", 한국마린엔지니어링학회지 제33권, 제2호, pp. 282-287, 2009.
- [7] R. B. III, Ernest and A. H. Bruce, "Bioassay for Full-scale UV disinfection system", Wat. Sci. Tech. 30(4), pp. 115-123, 1994.
- [8] Metcalf & Eddy Inc., Wastewater Engineering Treatment and Reuse, 4th Edition, McGraw Hill, 2004.

#### 저 자 소 개



##### 박대원(朴大元)

2002년 한국해양대학교 전기시스템공학(공학사), 2005년 동 대학원 전기전자공학(공학석사), 2007~현재 한국해양대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정. 관심분야: 전기공학, 조명공학.





### 길경석(吉璟碩)

1984년 인하대학교 전기공학과(공학사), 1987년 동 대학원 전기공학과(공학석사), 1996년 동 대학원 전기공학과(공학박사). 2003년 3월~2004년 2월 영국 Cardiff 대학 방문교수. 1996~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수. 2009년~현재 첨단마

린조명연구센터 소장. 관심분야: 조명공학, 전력시스템공학.



### 최용기(崔湧氣)

2007년 한국해양대학교 해양환경생명과학부(이학사), 2009 한국해양대학교 대학원 해양생명환경학과 석사(이학석사). 2009~현재 한국해양대학교 부설 산업기술연구소(전임연구원). 관심분야: 선박평형수 처리장치, LED.



### 최철영(崔哲泳)

1990년 부경대학교 양식학과 (수산학사), 1999년 일본 동경해양대학 자원육성학과 (수산학박사), 1999년~2000년 일본 국립琉球大學 강사, 2000년~2001년 캐나다 캘거리대학교 연구원, 2002년~2003년 미국 국립 보건연구원(NIH) 연구원. 2004

년~현재 한국해양대학교 해양환경생명과학부 (교수). 관심분야: 해양생물의 광반응 특성, LED광원별 해양생물의 성장, 성숙에 미치는 영향



### 장지호(張志豪)

1991년 인하대학교 전자공학과 (공학사), 1993년 인하대학교 전자공학과 (공학석사), 2001년 Tohoku대(일) 응용물리학과 (공학박사), 2001년~2002년 Tohoku대 전임강사, 2003년~현재 한국해양대학교 나노반도체공학과 교수. 관심분야: 박막공

학, 화합물반도체, LED 조명응용.



### 천상규(千相奎)

1999년 한국해양대학교 전기공학과 (공학사), 2001년 한국해양대학교 전기공학과 (공학석사), 2008년 한국해양대학교 전기공학과(박사수료), 2006년~현재 (주)파나시아 기술연구소 선임연구원. 관심분야: 전기공학, 조명공학, LED 조명, 선박평형수 살균처리, PLC 제어.