

선박평형수 처리용 자외선 램프 및 안정기 개발

천상규¹ · 박대원² · 길경석[†]

(원고접수일 : 2011년 6월 27일, 원고수정일 : 2011년 7월 11일, 심사완료일 : 2011년 7월 18일)

Development of an Ultra-Violet Lamp and a Ballast for Ship's Ballast Water Treatment

Sang-Gyu Cheon¹ · Dae-Won Park² · Gyung-Suk Kil[†]

요 약 : 본 논문에서는 선박평형수 처리시스템의 핵심부품인 중압 자외선 램프와 자기식 안정기의 설계 및 제작에 대하여 기술하였다. 자외선 램프의 최적 방전조건을 확보하기 위하여 봉입되는 아르곤 가스와의 수은량 변화에 따른 전기·광학적 특성변화를 분석하였다. 시제작 램프의 전압은 490 [V], 전류는 8.6 [A], 전력은 4.0 [kW]이며, 자외선 세기는 현재 사용되고 동등한 제품과 비교해 15 [%] 이상 향상되었다. 자기식 안정기는 이론적 해석과 시뮬레이션을 통해 UI 코어를 사용한 단상 내철형으로 설계하였으며, 무부하 전압은 920 [V]이고 정격출력은 8.5 [kVA]이다. 시제작 자외선 램프 및 안정기를 적용한 350 [m³/h]급 선박평형수 처리시스템에서 해수에 포함된 플랑크톤 사멸률을 평가한 결과 99.99 [%] 이상으로 IMO에서 정한 규정을 만족하였다.

주제어 : 선박평형수 처리시스템, 중압 자외선 램프, 자기식 안정기, 살균효율

Abstract: In this paper, we dealt with the design and fabrication of a medium pressure ultra-violet (UV) lamp and a magnetic ballast which are main components for ballast water treatment systems (BWTS). To acquire an optimal discharge condition of UV lamp, electrical and optical characteristics depending on the argon gas volume and the amount of mercury were experimentally analyzed. Rated voltage, current and power consumption of a prototype lamp were 490 [V], 8.6 [A] and 4.0 [kW], respectively. UV intensity of the lamp was 15 [%] higher than that of an equivalent lamp which is used in a BWTS. The magnetic ballast was designed in a UI core type through theoretical analysis and simulation. The open voltage and the rated power consumption of the ballast were 920 [V] and 8.5 [kVA] respectively. The disinfection efficacy which is carried out in a BWTS equipped with the UV lamp and magnetic ballast was over 99.99 [%], and this satisfy the IMO regulations.

Key words: Ballast water treatment system, Medium pressure UV lamp, Magnetic ballast, Disinfection

1. 서 론

선박의 안전한 항해를 위하여 선박 복원력, 흘수 등을 조절하기 위한 목적으로 선저 등에 채우는 물을 선박평형수(ballast water)라고 한다[1-2]. 전 세계 물동량의 80 [%] 이상은 선박을 통해 운송되

고 있으며, 화물을 적재하지 않은 선박은 균형을 확보하기 위해 Figure 1에 나타낸 것과 같이 평형수를 싣고 항해한 후, 화물 선적 장소에 도착하여 이를 연안에 배출하게 된다.

이 과정에서 선박평형수로 이동되는 해수의 양

[†] 교신저자(한국해양대학교 전기전자공학부, E-mail:kilgs@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4414)

1 (주)파나시아 기술연구소 선임연구원

2 한국해양대학교 전기전자공학부 박사과정

은 연간 30~50억 톤에 이르고 있는 것으로 추정된다[3]. 이들 해수의 양은 선박의 크기 즉, 배수량을 기준으로 설정되는데 대형 선박의 경우 1만 톤 이상의 해수를 유입하는 경우도 빈번하게 나타난다. 선박이 집안한 국가 및 지역에서 평형수를 유입한 후 타 국가 및 지역으로 이동하여 방출하는 경우, 혼입된 미세 해양생물이 타 지역으로 전파되어 해양생태계의 파괴와 질병을 발생시킨다.

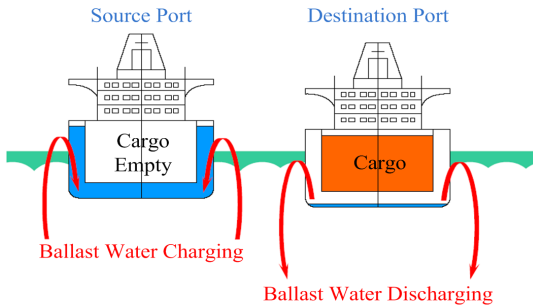


Figure 1: Conceptual diagram of ballast water exchange.

이 과정에서 배출되는 생물은 박테리아, 병원균, 소형 무척추동물과 다양한 종류의 난과 포자, 유생 등이 있으며, 저서생물의 경우는 유생 상태로 유입되어 새로운 환경에 정착하게 된다. 전 세계적으로 선박평형수에 의해 운반되는 해양생물은 하루에 최소 3,000 종이 넘을 것으로 추정된다[4].

이러한 배경에서 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 10 여년에 걸친 논쟁 끝에 국제 항해를 하는 모든 선박에 평형수를 관리(Ballast Water Management)하도록 하였다[5~7].

본 논문에서는 자외선 방식 선박평형수 처리시스템의 핵심부품으로 전량 수입에 의존하고 있는 중압 자외선 램프와 안정기 개발에 대하여 연구하였다. 이론적·실험적 분석으로부터 자외선 램프와 안정기를 시제작하고, 램프의 관전압·관전류, 광스펙트럼, 왜형률 및 역률 등 전기·광학적 특성을 분석하고 이를 적용한 350 [m³/h]급 실규모 선박평형수 처리시스템에서 살균능력을 평가하였다.

2. 관련 이론

2.1 선박평형수 처리시스템

선박평형수 처리시스템은 해수에 포함된 세균, 플랑크톤과 같은 미생물들을 처리하기 위한 것이다. 처리시스템에 사용되는 자외선 반응기는 일반적으로 폐쇄형과 개방형으로 분류되는데, 선박에서는 Figure 2와 같은 폐쇄형 자외선 반응기를 사용하고 있다.

폐쇄형 자외선 반응기는 중압 자외선 램프, 석영관, 자외선 강도 측정장치, 세척장치 등으로 구성된다[8]. 중압 자외선 램프는 반응기내에서 석영관 중앙에 방사상 모양으로 설치되고, 반응기를 통과하는 해수와 직접적인 접촉이 일어나지 않도록 해야 하며, 석영관과 살균장치 사이에 가스패킹을 이용하여 완벽한 방수처리가 되도록 하여야 한다.



Figure 2: Photograph of a closed UV reactor.

석영관은 자외선 램프가 최적의 온도를 유지하여 방전 유지와 램프의 파손을 막아주는 역할을 함과 동시에 살균에 필요한 자외선을 최대한 투과시키는 특성을 갖는다. 램프의 길이는 이와 연관된 전기적 결합부분들을 포함할 수 있도록 최적합하게 설계되어야 한다.

2.2 자외선 살균

자외선에 의한 살균 원리는 자외선 조사에 의한 미생물 세포내의 핵산 변화와 더불어 신진대사의 장애를 줌으로써, 미생물의 증식능력을 잃게 하여 살균시키는 것이다[9]. Figure 3에 pH 7에서의 뉴클레오티드와 핵산의 파장별 자외선 흡수도를 나타내었다[10,11]. 살균 작용은 대체로 파장이 200~320 [nm] 영역에서 일어나게 되고, 약 260 [nm]에서 가장 강하게 일어난다. 이는 세포내에 존재하는 핵산이 UV-C를 잘 흡수하기 때문이다.

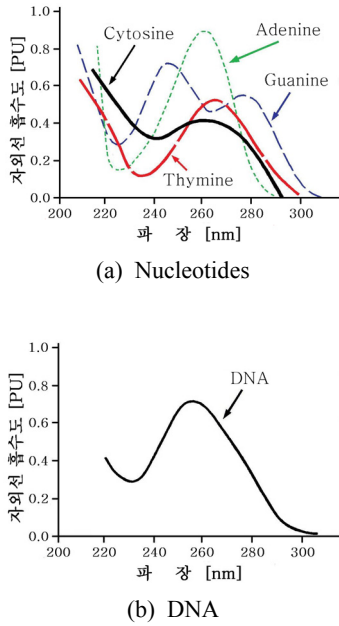


Figure 3: UV absorbance of Nucleotides and DNA at pH 7.

3. 설계 및 제작

본 논문에서는 중압 자외선 램프와 자기식 안정기를 제작하였으며, 특성 평가를 위해 Figure 4와 같이 실험 장치를 구성하였다.

전력 분석기와 스펙트로미터를 사용하여 시제작 램프 및 안정기의 전기·광학적 특성을 분석하였다.

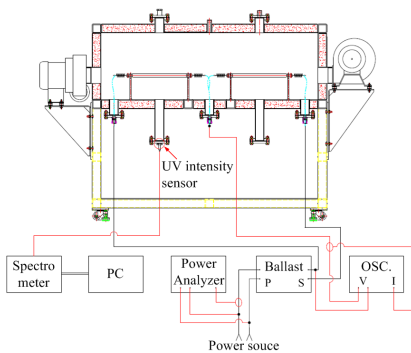


Figure 4: Configuration of the test equipment.

3.1 자외선 램프

대용량 해수의 살균처리를 위하여 고출력 중압 자외선 램프를 설계 대상으로 선정하였으며, 350

[m³/h]의 해수처리를 목표로 4.0 [kW]급 램프를 제작하였다.

자외선 램프는 페닝 효과(Penning Effect)에 의한 방전개시전압(V_i)을 낮추기 위해 수은(Hg)에 소량의 아르곤(Ar) 가스를 봉입하였고, 방전개시전압이 관내 압력(P)과 전극간 거리(d)에 비례 ($V_i \approx P \times d$)한다는 파센의 법칙(Paschen's Law)에 따라 봉입 가스의 압력을 조정하여 램프의 길이와 압력을 결정하였다[12]. 봉입되는 아르곤 가스의 양을 결정하기 위하여 A(α -5 [Torr]), B(α [Torr]), C(α +5 [Torr])의 세 가지 조건으로 자외선 램프를 제작하였다. 전기·광학적 특성을 평가한 결과를 Table 1 및 Figure 5에 나타내었으며 아르곤 가스량에 따른 광스펙트럼은 변화가 없었다.

Table 1: Electrical characteristics of prototype UV lamps depending on Ar gas volume.

Ar gas [Torr]	전압 [V]	전류 [A]	PF [%]	V_{THD} [%]	I_{THD} [%]	전력 [kW]
A	488.4	8.6	90.1	36.8	23.9	3.78
B	486.8	8.6	90.2	36.9	24.5	3.77
C	490.2	8.6	90.2	36.6	22.5	3.8

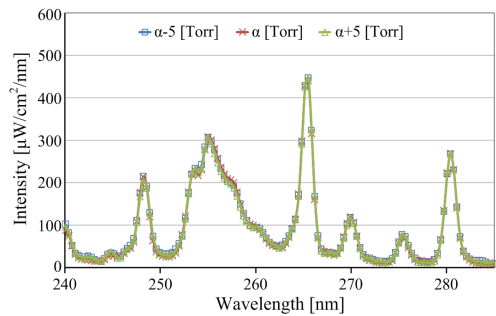


Figure 5: Optical spectrum of prototype UV lamps depending on Ar gas volume.

자외선 램프에 봉입되는 수은의 양을 결정하기 위하여 주입량에 따른 전기·광학적 특성을 분석하였다. 아르곤 가스를 동일하게 봉입한 상태에서 수은량을 달리하여 a(β -1 [mg]), b(β [mg]), c(β +1 [mg])로 자외선 램프를 제작하였다. 수은량에 따른 전기적 특성은 Table 2에 나타내었으며, 광스펙트

럼은 Figure 6과 같다. 수은량의 증가에 따라 살균 작용이 이루어지는 200~320 [nm] 파장의 세기가 증가하였다.

Table 2: Electrical characteristics of prototype UV lamps depending on the amount of mercury.

Hg [mg]	전압 [V]	전류 [A]	PF [%]	V_{THD} [%]	I_{THD} [%]	전력 [kW]
A	405.6	9.5	83.4	42.2	55.3	3.21
B	491.9	8.6	90.0	36.6	24.0	3.81
C	627.5	8.4	83.0	41.2	44.2	4.37

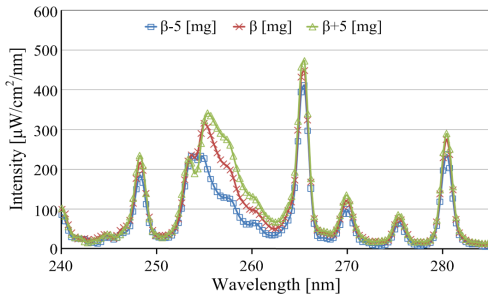


Figure 6: Optical spectrum of UV lamps depending on the amount of mercury.

수은량이 많아지면 관전압은 증가하고 관전류는 감소하지만 전체적으로 관전력이 상승하는 결과를 보였다. 또한 수은의 고유 파장으로 살균에 유효한 255 [nm]의 발생량은 수은량에 따라 크게 변화하였다. 실험 결과로부터 제작한 자외선 램프를 Figure 7에 나타내었으며 사양은 다음과 같다.

- ① 정격 전압 : 490 [V]
- ② 정격 전류 : 8.6 [A]
- ③ 정격 출력 : 4.0 [kW]
- ④ 램프 길이 : 440 [mm]
- ⑤ 램프 내/외경 : 18/21 [mm]



Figure 7: Photograph of the prototype UV lamp.

3.2 자기식 안정기

자외선 램프 4.0 [kW] 두 개를 직렬로 구동할 수 있도록 8.5 [kVA]급 자동정전력형 안정기(Constant Wattage Autotransformer, CWA)를 설계하였다. CWA는 압력전압의 변동에도 관전류의 부(-)특성을 이용하여 관전력을 일정하게 유지시켜 안정적인 특성을 가질 뿐만 아니라, 출력 가변이 용이하다는 장점이 있어, 현재 육상의 수처리 장치에 가장 보편화되어 사용되고 있다. 안정기는 UI 코어의 단상 내철형 구조로, 양측 코어에 각각 1차측과 2차측 코일을 감는 직렬 리액턴스 결합이며, 1차측과 2차측 코일의 전압은 인가전압의 1/2씩 분배된다. 따라서 안정기의 용량 P_a 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_a = \frac{E_p \cdot I_p}{2} \quad [\text{VA}] \quad (1)$$

여기서, E_p 와 I_p 는 각각 안정기의 1차측 단자전압 [V]과 전류 [A]이다. 주파수 f [Hz]에서 유효단면적 A_c [cm²], 최대자속밀도 B_m [Wb/m²]인 철심에 유도되는 비전압 e [V]는

$$e = 4.44f \cdot A_c \cdot B_m \quad [\text{V}] \quad (2)$$

이며, 철심의 유효단면적은

$$A_c = \frac{e}{4.44f \cdot B_m} \quad [\text{cm}^2] \quad (3)$$

이다. 여기서, 최대자속밀도 B_m 은 철심의 규격에 의해 결정되는데, 자기식 안정기에 사용된 철심은 규소강판 G-6로 B_m 은 1.9 [Wb/m²]이다. 전류밀도를 J [A/m²], 2차측 전류를 I_s [A]라 하면, 1차측과 2차측 코일의 단면적 S_{pc} 와 S_{sc} 는 다음 식으로 구해진다.

$$S_{pc} = \frac{I_p}{J \times 10^6} \quad [\text{mm}^2] \quad (4)$$

$$S_{sc} = \frac{I_s}{J \times 10^6} \quad [\text{mm}^2] \quad (5)$$

원형 코일을 사용할 경우, 1차측과 2차측 코일의 직경 d_{pc} 와 d_{sc} 는

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{4S_{pc}}{\pi}} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

$$d_{sc} = \sqrt{\frac{4S_{sc}}{\pi}} \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

으로 결정된다[13,14].

설계 이론을 바탕으로 Figure 8과 같이 CWA형 안정기를 제작하였으며, Table 3에 세부사항을 나타내었다.

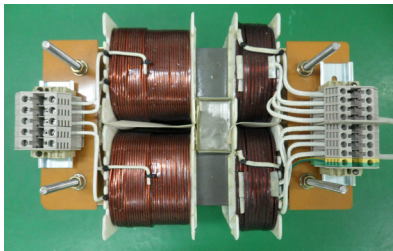


Figure 8: Photograph of the prototype ballast.

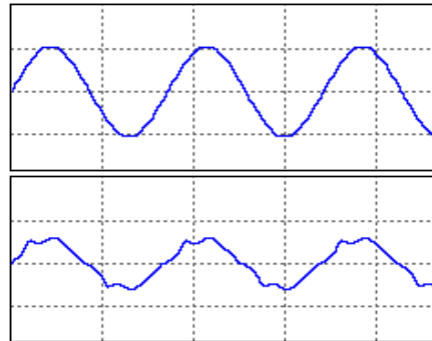
Table 3: Specifications of the prototype ballast.

구 분	1차	2차
코일 단면적 [mm ²]	2×3.5	2.4
턴 수 [회]	138	282
코일의 규격(내열온도 [°C])	AIW(220)	
누설 코어의 크기 (폭[mm]×길이[mm]×적층수[EA])	57.5×100×39	
코어 재질(두께 [mm])	방향성 규소강판 G-6 (0.3)	
코팅 처리액	절연 에폭시 처리	

안정기의 철심은 G-6 재질, 두께는 0.3 [mm]의 규소 강판을 사용하였으며, 코일은 폴리이미드이미드(AIW)계 피복절연을 채용하여 내열 온도를 C중(220 [°C])으로 하였다.

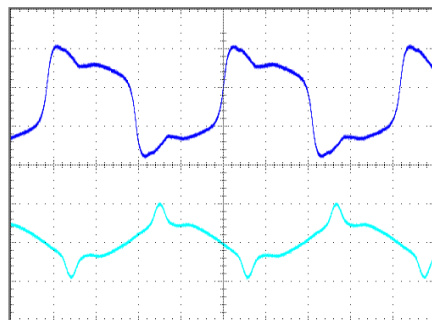
Figure 9와 Figure 10에 시제작 안정기와 램프의 입력전압 및 전류, 관전압 및 관전류 파형을 나타내었다. 관전압은 419.9 [V], 관전류는 8.6 [A]이며,

방전 고유 특성으로 파형이 크게 일그러져 왜형률은 관전압 36.9 [%], 관전류 24.5 [%]로 나타났으며 기존 상용 램프와 비교하여 5~7 [%] 개선된 수준이다.



Upper : 입력전압[500 V/div, 10 ms/div]
Lower : 입력전류[50 A/div, 10 ms/div]

Figure 9: Waveforms of input voltage and current.



Upper : 관전압[1 kV/div, 4 ms/div]
Lower : 관전류[20 A/div, 4 ms/div]

Figure 10: Waveforms of lamp voltage and current.

4. 살균능력 평가

시제작 자외선 램프와 안정기를 적용한 선박평형수 처리시스템의 살균능력을 평가하기 위하여 Figure 11과 같이 실험계를 구성하고, 350 [m³/h]급 선박평형수처리시스템에서 IMO 규정에 따라 실험하였다. 50 [μm] 이상 생물로서 알테미아 종 (*Artemia sp.*)과 로티퍼 종(*Rotifer sp.*), 10~50 [μm] 사이의 테트라셀미즈 종(*Tetraselmis sp.*)을 살균 대상으로 하였다.



Figure 11: Configuration of the BWTS.

해수처리 유량을 350 [m³/h]로 유지하면서 전처리 장치인 50 [μm] 필터와 자외선 반응기를 거쳐 처리수 탱크에 5일 동안 보관하고, 전처리장치와 자외선 반응기를 거치지 않은 시험수는 대조군 탱크로 이송시켜 5일 동안 저장하였다. 유입수와 처리수의 샘플링 지점은 전처리장치를 거치기 전과 자외선 반응기를 거친 후이고, 채수량은 Table 4의 유입수 및 처리수 기준에 맞추어 샘플링하였다.

설비가동 후 시험수가 줄어드는 시점의 처음(20 [%]), 중간(50 [%]), 끝(80 [%])으로 나누어 샘플을 채취하였으며, 당일 처리되어 5일 동안 저장되는 시험수는 공기에 노출되고 빛은 차단된 상태로 보관하였다.

Table 4: Sampling condition by organism size.

분 류	유입수	처리수
50 [μm] 이상	20 [ℓ]	1 [m ³]
10~50 [μm]	1 [ℓ]	10 [ℓ]

샘플링한 시험수 중 50 [μm] 이상의 생물은 대각선 32 [μm]인 그물망으로 여과하여 시료를 농축시켰으며, 10~50 [μm] 미만의 생물은 대각선 5 [μm]로 여과하여 시료를 농축시켰다. 실험 당일 시료는 샘플 당 최소 3회 이상 분석하여 결과값을 도출하였고, 5일 경과 후에는 농축한 시료를 모두 전수 검사하여 개체수의 오차를 줄였다. 모든 시료의 분석은 IMO 규정에 따라 시료 채취 후 6시간 내에 수행하였다 [5]. 선박평형수 처리시스템의 살균효율 실험은 전처리 전과 UV 램프 조사 후 시료를 채취/분석하여 살아있는 생물을 계수하여 총 5회에 걸쳐 살균효율을 평가하였으며, 결과는 Figure 11과 같다.

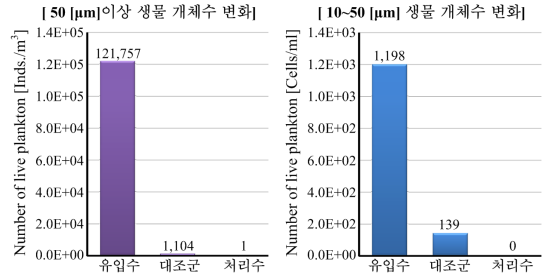


Figure 11: Biological efficacy of the BWT system.

5. 결 론

본 논문에서는 IMO의 선박평형수 배출과 관련한 처리 기준에 대응할 수 있는 자외선 방식 선박평형수 처리시스템의 핵심 부품으로 중압 자외선 램프 및 안정기를 개발하였다. 350 [m³/h]급 선박평형수 처리시스템에 적용하고, IMO 규정에 따라 살균능력을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

아르곤 가스의 주입량은 페닝 효과에 의한 방전 개시전압에, 수은량은 자외선 방사량과 관전압 및 관전류에 영향을 주었다.

자외선 램프의 관전압과 관전류는 각각 490 [V]와 8.6 [A], 정격출력은 4.0 [kW]이다. 관전압 및 전류의 왜형률은 각각 36.9 [%], 24.5 [%] 이하로, 안정기의 역률은 0.9 이상이며, 기존 제품과 비교해 유효 살균과장(UV-C)을 15 [%] 이상 향상시켰다.

안정기는 UI 코어를 사용한 단상 내철형으로 무부하 전압은 920 [V]이며, 정격 최대 출력은 8.5 [kVA]이다. 기존 제품과 비교해 왜형률을 개선함으로써 관전력을 약 10 [%] 증가시켰다.

시제작 자외선 램프 및 안정기를 적용한 선박평형수 처리시스템으로 해수에 포함된 플랑크톤 살균 성능을 평가한 결과, 살균 처리 5일 후의 생존 생물은 거의 존재하지 않았으며, 99.99 [%] 이상의 생물 살균효율을 나타내었다. 최종적으로 본 논문에서 개발한 자외선 램프와 안정기를 350 [m³/h]급 선박평형수 처리시스템에 적용한 결과, IMO 규정에 부합하는 살균능력이 있는 것으로 평가되었다.

후 기

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

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-C1090-1121-0015)

참고문헌

[1] Culver. S. L. and A. Kuris, "The apparent eradication of a locally established introduced marine pest", Biological Invasions. vol. 2, pp. 245-253, 1998.

[2] Bax N., Williamson A. et al., "Marine invasive alien species:A threat to global biodiversity", marine policy, vol. 27, pp. 313-323, 2003.

[3] National Research Council (NRC), Stemming the Tide: Controlling Introductions of Nonindigenous Species by Ships' Ballast Water, National Academy Press., Washington D.C., USA, 1996.

[4] Waite T. D., Kazumi J., et al., "Removal of Natural Populations of Marine Plankton by a Large-scale Ballast Water Treatment System", Marine Ecology Progress Series, Vol. 258, pp.51~63, 2003.

[5] IMO, "International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast water and Sediments, 2004", BWT/CON/36, 2004.

[6] 표태성, 길경석, 천상규 외, "자외선램프를 이용한 선박평형수 처리시스템의 설계 및 제작", 한국마린엔지니어링학회지, 제33권 제6호, pp. 952-958, 2009.

[7] 윤상국, 박병근, "선박 밸러스트 탱크 유입수 필터링 시스템 설계 및 구조해석", 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제2호, pp. 282-287, 2009.

[8] 천상규, 길경석, 박대원 외, "에너지 절감형 평형수 처리장치 개발에 관한 연구(I)", 한국마린엔지니어링학회지, 제34권, 제6호, pp. 880-886, 2010.

[9] NWRI & AWWA, UV Disinfection Guidelines for Drinking Water and Wastewater Reclamation, National Water Research Institute and American Water Works Association Research Foundation, 2000.

[10] Jagger, J., Introduction to Research in Ultraviolet Photobiology, Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall, Inc, 1967.

[11] Snowball, M. R. and Hornsey I. S., "Purification of water supplies using ultraviolet light" Developments in Food Microbiology, Edited by Robinson R.K., NY : Elsevier Applied Science, pp. 171-191, 1988.

[12] John F. W., Electric Discharge Lamps, The M.I.T Press, pp. 307-335, 1971.

[13] Colonel Wm. T. McLyman, Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors: A User's Guide to Practice and Specification, 2nd Edition, Marcel Dekker, Inc., pp. 9-385, 1997.

[14] Chung H. S. -H., Ngai-Man Ho, et al., "Comparison of Dimmable Electromagnetic and Electronic Ballast Systems - An Assessment on Energy Efficiency and Lifetime", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 6, pp.3145~3154, 2007.

저 자 소 개



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, 선박평형수 살균처리, PLC 제어.



박대원(朴大元)

2002년 한국해양대학교 전기시스템공학과(공학사), 2005년 동 대학원 전기전자공학과(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 첨단마린조명연구소 소장. 관심분야: 조명공학, 전력시스템공학.