소형선박에 설치 가능한 해상기인 오염원 멸균용 에너지 자급형 전기분해 장치 개발

오승원 · 한민수¹ · 최해욱^{1*}

KAIST 정보통신공학과, ¹KAIST 전기및전자공학과

Energy self-sufficient electrolysis apparatus for sterilization of portable toilet in small vessels

Seung-Won OH, Min-Soo HAHN¹ and Hae-Wook CHOI^{1*}

*Department of Information and Communications Engineering, Korea Advanced Institute of Science
and Technology, Daejeon, 305-701, KOREA*

*¹Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
Daejeon, 305-701, KOREA*

Marine caused pollution occurs mostly near coastal area and its main cause was known to be human feces issued from small vessels. To sterilize liquid pollutants from portable toilets of small vessels, an electrolysis treatment is judged to be the most economic and stable method considering an environment of its use. In this paper, we presents an electrolysis apparatus which is the most appropriate for sterilizing pollutants from portable toilets of small vessels and derives the minimum operating time of the apparatus for sterilizing norovirus which is a main target of marine caused pollution sources. In order to utilize renewable energy, we designed an apparatus which generates a renewable energy from solar cells. As a result, we could confirm the applicability of the proposed system with the results from experiments in three cases of different weather conditions.

Keywords: Electrolysis apparatus, Renewable energy, Sterilization, Toilet, Vessel

서 론

소형선박용 간이화장실은 연안에서 수시간이
내의 운항을 하는 소형선박에 설치를 목적으로
하는 것으로 낚싯배나 연안 가두리양식장 작업

용어선 등이 주 대상이다. 소형 선박은 별도의
화장실을 설치할 공간이 없고 화장실 설치 시 발
생되는 대소변의 처리를 위한 시설의 운영도 불
가능하다. 이러한 원인으로는 대부분의 화장실

*Corresponding author: hwchoinew@kaist.ac.kr, Tel: 82-42-350-3450 Fax: 82-42-350-6368

이 전기나 기타의 에너지를 사용해야 하는데, 소형선박의 경우 발전시설이 미비하고 관리를 위한 별도의 운영자가 없어 가스나 화학약품 등의 위험물 취급에 제한적이기 때문이다. 소형선박에서 배출되는 사람의 대소변은 해상기인 오염의 주원인이므로 이를 멸균 처리할 수 있는 간이 화장실이 필요하다 (Kim, 2006).

또한, 해양자원의 개발과 운송량의 증가로 인한 해양환경오염원에 노출될 가능성은 높아져가고 있으며, 최근 선박에서 발생하는 밸러스트수에 의하여 발생하는 해양생태계의 교란과 파괴는 심각한 문제로 인식되고 있으므로 해수전해법을 이용한 살균 제어를 위한 차아염소산나트륨의 농도 제어를 단계별로 검증하여 제거효율을 높인 사례도 있으며 (Yoon et al., 2005), 이와 유사하게 육상양식장에서의 전기분해법에 의한 암모니아성 질소 및 대장균 제거도 효과적인 것으로 나타났다 (Lee et al., 1997).

본 연구에서는 선박에서 발생하는 여러 오염원 중에서 해상기인 오염원을 방지하기 위한 것으로서, 소형 선박용 간이화장실에서 발생하는 액상오염물질을 대상으로 멸균 처리 및 효과에 대한 검증과 이를 위한 자급전원에 대한 시스템의 성능을 평가하였다. 일반적으로, 액상 오염 물질을 멸균시키기 위해 석영관 내에서 코로나 방전을 이용하여 OH라디칼을 발생시키는 방법이나 액상 오염물질을 직접 끓여서 멸균하는 방식 등이 있지만, 소형선박에 설치된 간이화장실의 사용 환경 등을 고려하여 전기분해 방식을 활용한 멸균 처리 방법이 가장 경제적이고 안정된 방식으로 판단되었다 (Cao et al., 2011; Malchesky, 1999).

따라서, 소형선박용 간이화장실의 멸균에 가장 적합한 전기분해장치를 제시하고 이를 이용하여 해상기인 오염원 중 주요 대상인 노로바이러스에 대한 전기분해 사멸에 필요한 장치의 최소 동작시간을 도출한다. 그리고 전기분해장치의 전력소모량을 계산하여 태양전지 발전을 위한 재생에너지 생산 장치를 구성하며, 마지막으

로 3가지 일기조건에 따라 재생에너지 생산량을 측정하여 소형선박의 간이화장실 멸균용 전기분해장치의 적용가능성을 검증하였다.

재료 및 방법

에너지 자급형 전기분해 장치 설계 조건

소형 선박에 간이화장실을 설치하기 위해서는 다음과 같은 제약조건들을 만족해야 한다. 첫째, 크기가 작고 오염원의 방류가 없어야 한다. 둘째, 동작 시 필요한 전기 에너지는 일반의 배터리 전원으로 충분히 만족되어야 한다. 셋째, 배터리의 전원은 자급 충전이 가능하여야 한다. 넷째, 저장하는 대소변의 량을 최소화할 수 있어야 한다. 다섯째, 멸균이 용이한 소변 등 액상 물질은 즉석에서 멸균 처리하여 방류가 가능하여야 한다. 여섯째, 대변 등 고형물질은 최소화하여 소각하거나 별도 저장용기에 밀봉 저장되어 수거가 용이하도록 하여야 한다. 일곱째, 최소 15인용의 대소변 저장고를 가져야 한다.

에너지 자급형 전기분해 장치

소형 선박은 내부 공간이 협소하고 승선 인원이 적어 화장실이 매우 취약해서 대부분 사람에게서 발생하는 대소변을 그대로 바다에 투기하는 실정이다. 게다가 대부분의 어업종사자들은 대소변에 의한 바다 환경오염의 심각성을 모른다는 것이다. 특히 배출되는 대소변 중 노로바이러스의 경우 관리 대상 바이러스로 반드시 멸균시켜야 할 바이러스이다 (Straub et al., 2007). 이번 논문에서 제안하는 방법은 레저용 낚싯배 및 연근해

Fig. 1. Block diagram of power supply part of an electrolysis apparatus.

Fig. 2. Block diagram of an electrolytic bath.

어업용 소형선박 등 화장실 시설이 미비한 선박에서 발생하는 오염원을 처리하기 위한 것이다. 소량의 대소변에서 노로바이러스를 멸균시키는 방법은 멸균시설이 단순하고 별도의 운영 전문기술이 필요 없는 전기분해법이 가장 적합하다. 소형선박용 간이화장실의 멸균을 위한 에너지 자급형 전기분해 장치는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같이 구성된다. Fig. 1은 전기분해 장치의 전원장치를 나타내며, Fig. 2는 전기분해부분을 나타낸다.

태양전지를 이용한 재생 에너지의 생산 기준 설정

소형 선박에서 전기분해 장치를 사용하는데 발생 가능한 문제점은 전기 사용이 불안정하다는 것이다. 선박의 발전기가 가동되는 시기에는 전력 공급이 가능하지만, 그 외에는 전력 공급이 중단되며 또한 장소가 협소하여 화장실까지의 전기배선이 용이하지 않다는 것이다. 그러므로 멸균 처리를 위한 전기분해 장치의 안정적인 사용을 위해서 재생에너지의 활용은 필수적이다.

운행 중 혹은 정박해 있는 선박에서 가장 얻기 쉬운 재생에너지는 태양광을 이용한 전기의 생산이다. 본 연구에서는 최대유효출력 18.07V/3.91Amp (NG-SM-065W-G61, 780×670×32mm)를 얻을 수 있는 보급형의 태양광 패널을 적용하였다. 육상에서 태양전지판의 설치 표준은 정남향으로 지표면과 30°의 각으로 설치 시 최대출력을 얻을 수 있다. 그러나 운항중이거나 정박시 방향의 선정이 불가능한 선박에서는 이 방법

의 적용이 불가능하다는 점을 고려하여, 해수면과 수평으로 설치하여 실험을 진행하였다. 설치 후 전기 생산량은 배터리 충전 전압과 충전 전류를 측정하여 판단하였다. 이와 같은 측정방법을 선택한 이유는 정 부하 측정 방법 적용 시 태양전지판에서 생산되는 전기의 경우 수시로 전압이 변화하고 전류량도 그에 연동한다. 그러므로 정확한 측정을 위해서는 배터리 충전 전압과 충전 전류의 측정에 의한 전력량 측정이 측정의 정확도를 높일 수 있다.

재생 에너지 생산량 측정 방법

태양전기의 재생에너지 생산량 측정을 위해 3가지 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 충전 완료시 전기분해 장치의 사용 가능한 시간을 측정하고, 두 번째와 세 번째 실험은 청명한 날씨가 아닌 다른 기후조건에서 제안된 장치의 사용 가능성을 평가하였다. 전기분해 장치의 단위시간당 소비전력 (W)은 $12V \times 1.4A = 16.8W$ 이므로, 실험 진행을 위해서 이와 유사한 전력소모를 갖는 LED를 사용하였다. 재생에너지 실험 회로의 구성은 Fig. 3와 같다. 실험 회로는 최대유효출력 (18.07V/3.91Amp)을 갖는 태양전지와 12V/18A 배터리 2개로 구성되며, 배터리 충전, 배터리 전압 출력 및 과부하 차단, 배터리 과 방전 보호를 위한 Control Board를 포함하고 의사 부하를 위해 LED LAMP (12V/1.8A)가 사용되었다.

첫 번째 실험은 청명한 날 일출부터 일몰까지

Fig. 3. Block diagram of a test circuit for output of renewable energy (solar cell).

배터리 충전을 실시하였고 충전 완료 후 태양전지를 분리하여 추가 충전을 차단하였다. 배터리의 충전은 배터리 단자 전압이 13.6V 이상 18V까지로 제한하며, 배터리의 방전은 배터리 단자 전압이 11.8V에서 중지하였다. 의사 부하를 위해 LED LAMP를 설치하여 만 충전 시부터 배터리 방전 차단 시까지의 사용 가능한 시간을 측정하였다. 또한 전기분해 제어회로의 기본소모전류 100mA는 태양전지 충/방전 제어 보드의 소모전류로 대체 가능하였다.

두 번째 실험은 흐린 날을 가정하여 태양전지 측면에 빛 투과 량이 약 50%인 메쉬 망을 설치하고 일출부터 일몰까지 배터리 충전을 실시하였다. 만 충전 시 사용 가능한 총 시간을 측정했던 첫 번째 실험과 달리 충전과 방전을 반복하며 다른 일기 조건에서 제한된 장치의 사용 가능성을 평가하였다. 의사 부하를 위한 LED LAMP (12V/1.8A)를 설치하고 1회 20분 씩 주간에 10회, 야간에 10회 점등하면서 배터리의 방전 여부를 점검하였다.

세 번째 실험은 태양전지 측면 (서쪽)에 가림막을 설치하여 주간 시간에 태양전지에 1/2정도 그림자가 생기게 하고 일출부터 일몰까지 배터리 충전을 실시하였다. 두 번째 실험과 같은 과정으로 배터리의 방전 여부를 점검하였다.

결과 및 고찰

전기분해 장치의 멸균 조건

전기분해장치의 최적의 조건을 고려하여 재

Fig. 4. Ct value of one step real-time PCR for detection of FCV in 1% saline after electrolysis treatment.

생에너지 생산 기준을 설정하기 위해, 전기분해를 이용한 노로바이러스 멸균실험을 실시하였다. 대상으로 하는 노로바이러스에 대한 전기분해처리의 사멸효과를 조사하기 위해 1% 생리식염수중 FCV (Feline Calicivirus)에 대하여 일정시간 간격으로 전기분해 처리 후 유전자 증폭을 통해 FCV 유전자를 검출한 결과, Fig. 4에서처럼 처리 시간과 비례하여 유전자 검출에 필요한 증폭 사이클 수가 증가하였는데 검출한계 이하로 유전자를 소실시키기 위해서는 15분 이상의 처리가 필요하였다.

전기분해 장치의 전력소모량

전기분해 장치의 생물학적 실험 조건 결과를 만족시키기 위해 1회 멸균 시 1.4A의 전류를 20분간 통전시켰으며 전기분해장치의 1회 처리량은 1,000cc로 설정하였다. 일반 성인의 경우 1일 평

Fig. 5. Battery terminal voltage versus battery discharge time.

균 대변 200cc, 소변 1,500cc 정도를 배출한다. 10인이 사용하는 화장실의 경우 하루 투입량은 대변 2,000cc, 소변 15,000cc 정도이다. 이를 모두 전기분해 장치로 멸균 시 멸균회수는 $(2,000\text{cc} + 15,000\text{cc})/1,000\text{cc} = 17$ 회이다. 이때 소모되는 전류량은 약 7.933A이며 3일 사용 총량은 약 24A이다.

따라서, 총 전력량은 전기분해 장치에 인가된 전압이 약 12V이므로 $12\text{V} \times 24\text{A} = 288\text{W}$ 로 계산된다. 즉, 3일간 10인이 사용하는 화장실에서 발생하는 대소변의 멸균을 위해서는 288W의 전력이 있으면 가능하며, 이때, 전기분해 장치에 12V/18A의 배터리 2개를 병렬로 사용하면 가능하게 된다. 따라서, 제안된 전기분해 장치에는 12V/18A의 배터리 2개를 병렬로 사용하여, 충전 완료시 총 전력량은 $12\text{V} \times 18\text{A} \times 2\text{개} = 432\text{W}$ 로, 10인이 3일 배출량을 멸균시키는데 소요되는 전력이 288W이므로 432W는 4.5일 처리가 가능한 전력량이다.

재생에너지를 이용한 전기분해 장치의 사용 가능 시간 평가

Fig. 5의 재생에너지 생산량 테스트 구성회로

에서 배터리의 완충 전압은 $14.27\text{V} \pm 0.02\text{V}$ 이었다. 태양전지를 이용하여 05:00~18:00까지 13시간동안 배터리에 충전을 실시하였으며 날씨는 맑고 온도는 $12^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 이었다. 충전 완료 후 의사 부하를 위해 LED LAMP를 이용하여 연속 방전 실험을 실시한 결과, Fig. 5에서처럼 16시간 50분 후에 배터리 단자 전압이 11.97V 이하로 내려가서 방전을 중지시켰다. 상기 결과는 멸균을 위한 평균 전기분해 시간이 20분이므로 총 64.9회 실시가 가능한 횟수이며 38여 명의 대소변을 멸균 처리할 수 있는 시간으로 평가되었다.

일기 조건 변화에 따른 재생에너지의 사용 가능성 평가

두 번째 실험에서는 태양전지의 표면에 메쉬망을 이용하여 태양전기 패널의 표면 조도를 09:00에 1,600Lux로 설정하고 배터리에 충전을 실시하였으며 날씨는 맑고 온도는 $14^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}$ 이었다. 배터리 충전 중 단자 전압이 12.2V 이상에서부터 LED LAMP를 이용하여 1회 20분간 방전을 주야간 각각 10회씩 실시하였다. 주간 방전은 배터리 충전 중 실시하였는데 배터리 단자 전

Fig. 6. Battery terminal voltage variation by daytime and nighttime discharge (Experiment of solar cell in cloudy condition).

Fig. 7. Battery terminal voltage variation by daytime and nighttime discharge (Experiment of solar cell in sunny-cloudy mixed condition).

압은 방전 초기에 낮아졌다가 다시 상승하는 패턴을 보였다. 야간 방전은 배터리 충전 없이 실시하였는데 배터리 단자 전압은 방전 중에는 낮아졌다가 방전이 끝나면 다소 상승하는 패턴을 보였다. Fig. 6은 두 번째 실험의 배터리 단자전압 변화를 나타낸 결과이다.

세 번째 실험에서는 태양전지 측면(서쪽)에 가림 막을 설치하여 주간 시간에 태양전지에 1/2정도 그림자가 생기게 하고, 일출부터 일몰까지 배터리 충전을 실시하고 배터리에 충전을 실시하였으며 날씨는 맑고 온도는 $18^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ 이었다. 배터리 충전 중 단자 전압이 12.2V 이상에서부터 LED LAMP를 이용하여 1회 20분간 방전을 주야간 각각 10회 실시하였다. Fig. 7은 세 번째 실험의 배터리 단자전압 변화를 나타낸 결과이다.

따라서, 해상 선박용으로 적용할 경우 다양한 환경조건을 고려한 3가지 실험을 통하여 제안된 태양광 발전 재생 에너지 생산 회로가 청명한 날, 흐린 날 및 구름이 반반인 날 등 다양한 일기 조건에서도 전기분해장치를 가동하기에 충분한 전력 공급 에너지를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

결 론

소형선박용 간이화장실의 멸균 처리를 위한 시스템의 최적 기준장치 처리 시간과 비례하여 유전자 검출한계 이하로 소멸시키기 위해 약 15분 이상의 처리가 필요하였으며, 자급전원 공급을 목적으로 태양전지를 도입하였고 전기분해 장치의 운영 가능성을 실험하기 위해 제안된 재생 에너지 생산량 테스트 구성회로를 구성하고 다양한 조건을 가진 경우를 고려하여 태양광 발전을 실시하여 배터리에 충전하고 이 충전에너지를 이용하여 간이화장실의 오염원을 멸균시키는 전기분해 의사 실험을 한 결과, 모든 조건 하에서 전기분해가 가능한 에너지를 얻을 수 있는 것으로 확인되었다. 또한, 소형 승용차에 사용되는 배터리 (12V/45A)를 완충시키고 본 연구

에서 개발된 전기분해장치를 구동한 결과, 최대 4.5일간 동작이 가능한 것을 알 수 있었다. 따라서, 연안해역에 짧은 기간에 운행하는 소형선박의 경우, 태양전지와 충전 회로 없이도 소형자동차용 배터리만을 이용하여 해상기인 오염원을 제거할 수 있는 전기분해 멸균 장치의 운영이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원에서 지원한 수산기술개발사업 (해상기인 오염원 처리 기술 개발 과제)의 지원에 의해 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- Cao, X., Q. Du, B. Liu and Y. Chen, 2011. Micro-current electrolysis sterilization algacide device and method. US Patent.
- Kim, K.S., 2006. The Present State of Domestic Acceptance of Various International Conventions for the Prevention of Marine Pollution. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety. 12 (4), 293 – 300.
- Lee, B.H., J.K. Lee, D.S. Gil and S.Y. Kawk, 1997. Ammonia-nitrogen removal in sea water by using Electrolysis. J. Aquaculture. 10 (4), 435 – 438.
- Malchesky, P.S., 1999. Sterilization apparatus utilizing catholyte and anolyte solutions produced by electrolysis of water. US Patent.
- Straub, T.M., K.H. Bentrup, P. Orosz-Coghlan, A. Dohnalkova, B.K. Mayer, R.A. Bartholomew, C.O. Valdez, C.J. Bruckner-Lea, C.P. Gerba, M. Abbaszadegan and C.A. Nickerson, 2007. In Vitro Cell Culture Infectivity Assay for Human Noroviruses. Emerg. Infect. Dis., 13 (3), 396 – 403.
- Yoon, B.S., J.H. Rho, K.I. Kim, K.S. Park and H.R. Kim, 2005. Development of ballast water treatment technology (Feasibility study of NaOCl produced by Electrolysis). Journal of the Korean Society for

Marine Environmental Engineering. 8 (4), 174 –
178.

2012년 6월 15일 접수
2012년 8월 1일 1차 수정
2012년 8월 20일 수리