

자외선램프를 이용한 선박평형수 처리시스템의 설계 및 제작

표태성* · 천상규* · 박대원** · 최성국** · 김성연*** · 길경석†

(원고접수일 : 2009년 7월 20일, 원고수정일 : 2009년 8월 26일, 심사완료일 : 2009년 9월 8일)

Design and Fabrication of a Ballast Water Treatment System Using UV Lamps

Tae-Sung Pyo* · Sang-Gyu Cheon* · Dae-Won Park** · Sung-Kuk Choi** ·
Seong-Yeon Kim*** · Gyung-Suk Kil†

Abstract : The International Maritime Organization (IMO) has adopted the ballast water management convention at a diplomatic conference in early 2004 that all ships should be equipped with a treatment system from 2010 gradually. In this paper, the disinfection characteristic of ultra-violet (UV) rays was studied and a ballast water treatment system (BWTS) which can treat 50 m³/h sea water was manufactured. The system consists of a disinfection chamber with six 3.5 kW UV lamps which are operated by magnetic ballasts, a programmable logic controller (PLC) and set of pipe lines. The biological disinfection efficacy of the prototype BWTS was evaluated following the IMO rules using zooplankton such as *Artemia* and *Rotifer* species for the size over 50 μm, and phytoplankton such as *Tetraselmis* and *Thalassiosira* species for the size between 10 to 50 μm. From the experimental results, the disinfection efficacy was 99.99% that meets the IMO requirement. However, more studies on an energy saving system are needed because the consumption power of the prototype system is as high as over 21 kWh for 50 m³/h.

Key words : IMO(국제해사기구), BWTS(선박평형수 처리시스템), Ultraviolet rays(자외선), Disinfection efficacy(살균효율), Zooplankton(동물성 플랑크톤), Phytoplankton(식물성 플랑크톤).

1. 서 론

선박평형수(Ballast Water)란 선박의 안전 운항을 확보하기 위해 선박에 유입되는 해수를 말한

다. 이러한 평형수는 전 세계적으로 연간 30~50억 톤이 이동되는 것으로 추정되며, 박테리아, 병원균, 소형 무척추 동물, 플랑크톤 등과 같은 3,000종 이상의 미생물이 포함되어 있다.

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

* (주)파나시아

** 한국해양대학교 전기전자공학부

*** 한국해양대학교 첨단마린조명연구센터

이들 외래 생물종이 토착 생물종을 몰아내고 기존의 안정적인 해양 생태계 및 환경에 악영향을 끼쳐 전 세계적으로 피해 사례가 급증하고 있는 추세이다^[1]. 현재 전세계 물동량의 80% 이상이 선박을 통해 운송되고 있으며 특히, 에너지의 해외 의존도가 높고 외국과의 교역에 크게 의존하는 우리나라의 경우 선박평형수에 의한 피해 우려가 크고 선박평형수로 인한 해양 생태계 교란 및 수자원 피해 등 경제적 손실 외에도 해양레저 활동이나 보건상의 문제도 우려되는 실정이다. 이러한 배경에서 국제해사기구(IMO)에서는 외국에서 자국으로 입항하는 모든 선박에 선박평형수 처리 의무를 규정하였다^{[2],[3]}. 종전보다 훨씬 엄격해진 선박평형수 처리기준을 만족하기 위해서는 새로운 설비와 보다 높은 처리 기술 수준이 요구된다.

본 연구에서는 선박에 설치·탑재·교체가 용이하며 평형수 처리 후에 2차 오염이 없고 처리 과정에서도 유해 물질(DBPs : Disinfection By Products)이 생성되지 않는 등 환경적 수용성이 뛰어나 선박평형수 처리 방식으로 주목받고 있는 자외선 처리방식을 적용하였다^[4]. 자외선을 이용한 수처리 시스템은 육상의 소규모 정수장이나 폐수처리장 등에서 운용되고 있으며 국·내외적으로 실용성과 안전성 등이 검증된 방식이다^{[5]~[7]}.

본 연구에서는 IMO에서 규정한 제반 기준을 충족시키는 선박평형수 처리시스템을 설계·제작하였다. 시제작한 자외선램프와 안정기에 대한 광학적, 전기적 특성을 분석하였으며, 자외선 처리 전·후의 생존 플랑크톤을 계수하여 시스템의 살균 효율을 평가하였다.

2. 설계 및 제작

2.1 자외선 살균 원리

Fig. 1에 자외선 영역에서 유효 살균 파장을 나타내었다. 자외선은 파장이 짧아 투과력이 약하지만 강력한 에너지를 가지고 있어 화학 반응을 촉진하고 유기물을 산화시켜 미생물의 살균작용을 일으킨다.

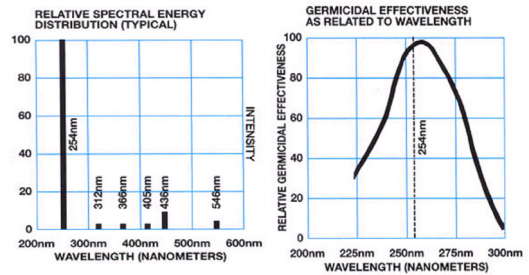


Fig. 1 Germicidal wavelength

자외선을 이용한 살균은 미생물 세포내 핵산(nucleic acid, DNA & RNA)의 구조를 변경시켜 신진대사를 억제하거나 복제 또는 증식을 불가능하도록 하는 작용을 이용한 것이다^{[8],[9]}. 살균영역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 200~320 nm이며, 260 nm부근에서 살균작용이 강하게 일어난다. 이는 세포내에 존재하는 핵산이 UVC(200 nm~280 nm)영역의 자외선을 잘 흡수하기 때문이다^[8].

2.2 자외선램프의 살균 작용

Fig. 2는 수처리용으로 사용되고 있는 세가지 자외선램프의 출력과 이에 따른 살균효율을 나타낸 것으로 아말감 램프와 저압 자외선램프는 253.7 nm의 단일 파장만 발생시키는 반면, 중압 자외선램프는 265 nm를 중심으로 다양한 파장을 발생시킴을 알 수 있다.

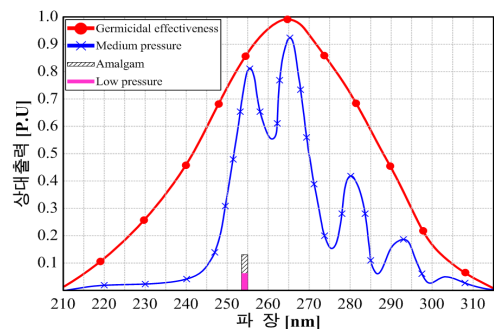


Fig. 2 Comparison of germicidal effectiveness of UV lamps

자외선 조사에 의한 미생물의 비활성도는 다음과 같은 반응식(first-order kinetics)으로 평가된다^{[9],[10]}.

$$N = N_0 \exp(-kIt) \text{ [MPN/100ml]} \quad (1)$$

여기서,

- N_0 : 초기의 미생물 농도 [MPN/100ml]
- N : 자외선 조사후의 미생물 농도 [MPN/100ml]
- k : 비활성화 계수 [$\text{cm}^2/\text{mW} \cdot \text{s}$]
- I : 자외선 평균 강도 [mW/cm^2]
- t : 조사시간 [s]

이다.

실제 적용에 있어서는 식 (1)과 다소 차이가 나타나는데, 이는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 자외선의 미생물 표면에서의 산란, 자외선에 대한 미생물의 저항력 증가, 미생물 군집에 의한 자외선 차폐 가능성, 반응 용기내의 불균일 확산 등이 원인이다.

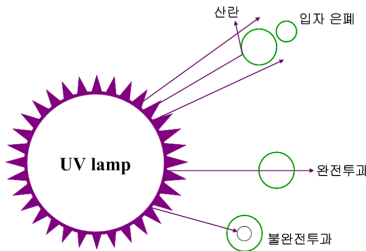


Fig. 3 Particle screen and incomplete transmissivity

저압 자외선램프는 소용량 해수처리에 적합하고 중압 자외선램프는 상대적으로 높은 자외선 출력을 발생시키므로 대용량 해수처리에 적합하다^[11].

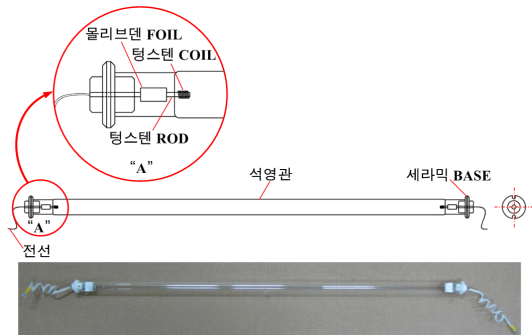


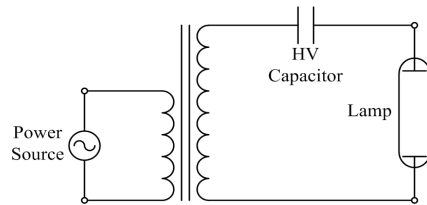
Fig. 4 Structure of the prototype UV lamp

본 연구에서는 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 의 선박평형수를 살균처리하기 위하여 Fig. 4와 같이 3.5 kW급 중압 자외선램프를 설계·제작하였다.

시제작 램프는 페닝효과(Penning effect)에 의한 방전개시전압을 낮추기 위하여 수은(Hg)과 소량의 아르곤(Ar) 및 혼합가스를 봉입하였으며 방전개시전압은 파센의 법칙(Paschen's law)에 의해 관내 압력과 전극간 거리에 비례하므로 봉입가스의 조정으로 램프의 길이를 산정하였다.

2.3 자외선램프 구동용 안정기

방전램프용 안정기는 동작원리에 따라 자기식(magnetic type)과 전자식(electronic type)으로 구분되며 대용량의 방전램프의 구동에는 자기식 안정기가 주로 사용된다. 자기식 안정기는 회로의 구성 방법에 따라 RC형과 CC형으로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 램프에 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 특성을 가진 RC형 자기식 안정기를 설계·제작하였다. 시제작한 안정기의 전기적 등가회로와 안정기용 누설변압기의 사진을 Fig. 5에 나타내었다.



(a) Equivalent circuit

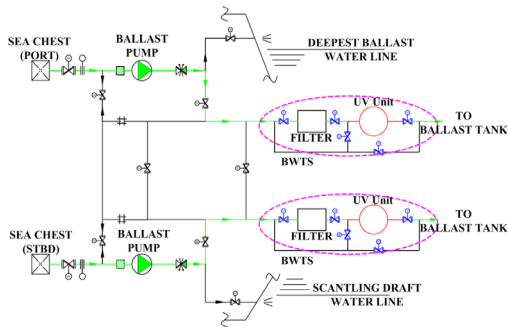


(b) Photograph of the leakage transformer

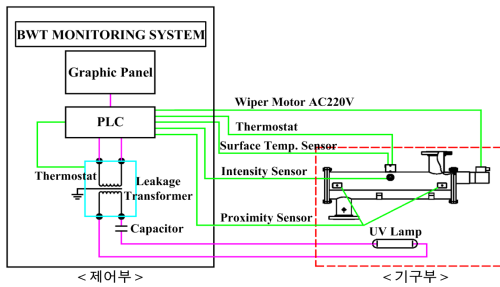
Fig. 5 Prototype ballast for driving the UV lamp

2.4 자외선 살균시스템

본 연구에서 제작한 선박평형수 처리시스템을 Fig. 6에 나타내었으며, 자외선 살균처리에 앞서 여과처리(Filtration) 함으로써 살균 효율을 높일 수 있도록 하였다.



(a) Piping diagram



(b) UV disinfection chamber



(c) Photograph

Fig. 6 Prototype BWTS

전처리용 여과기는 선박에 유입되는 해수 중에 비교적 큰 입자의 부유물이나 미생물을 일차적으로 여과시키는 역할을 한다. 자외선 살균시스템은 시간당 50 m³의 평형수를 살균 처리할 수 있는 규격으로 설계하였으며, 자외선 반응기 내부에는 시제작 중압 자외선램프 4개가 각각 석영관에 내장되어 있다. 반응기 외부에는 자외선 강도계, 세척장치, 표면온도검출 센서 및 세척장치 위치검출 센서가 설치된다. 제어부의 패널에는 안정기가 설치되고, PLC(Programmable Logic Controller)를

사용하여 살균시스템을 제어한다. 각종 센서를 통해 취득된 데이터는 PLC를 통해 그래픽 패널(GP)로 전송되고, 모니터링 되도록 하였다.

3. 실험 및 평가

3.1 램프 및 안정기

3.1.1 광학적 특성

시제작 자외선램프의 광학적 특성을 분석하기 위하여 1~10 W/cm²/nm의 측정 센서를 가진 스펙트럼 분석기(RPS900W, International Light)를 사용하였다. 센서부와 램프의 거리를 15 cm로 이격시켜 상용제품과 스펙트럼을 비교하였으며 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다.

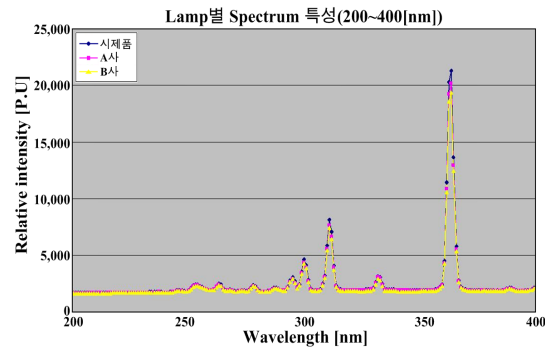


Fig. 7 Comparison of lamp spectrum

3.1.2 전기적 특성

시제작 램프는 입력전압 및 전류, 소비전력, 관전압, 관전류를 측정하여 전기적 특성을 비교하였다. 측정결과를 Table 1과 같으며 측정과형의 예를 Fig. 8에 나타내었다.

Table 1 Electrical characteristics of UV lamps

항 목	A사 제품	시제작품
입력전압 [V]	385	386
입력전류 [A]	10.83	11.23
소비전력 [W]	4,170	4,335
관 전 압 [V]	986	991
관 전 류 [A]	3.94	4.06

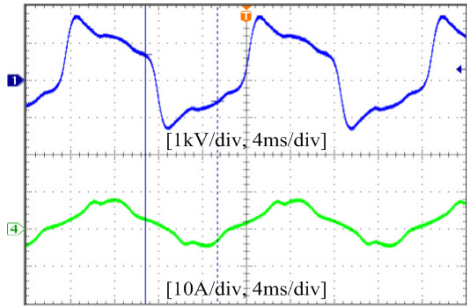


Fig. 8 Waveforms of lamp voltage and current (A company)

또한 시제작 안정기의 전압-전류 특성은 동일한 자외선램프를 적용하여 비교하였으며, 측정 결과를 Table 2와 Fig. 9에 각각 나타내었다.

Table 2 Electrical characteristics of ballasts

항 목	A사 제품	시제작품
관 전 압 [V]	986	1,010
관 전 류 [A]	4.22	4.64
관 전 력 [W]	4,161	4,686

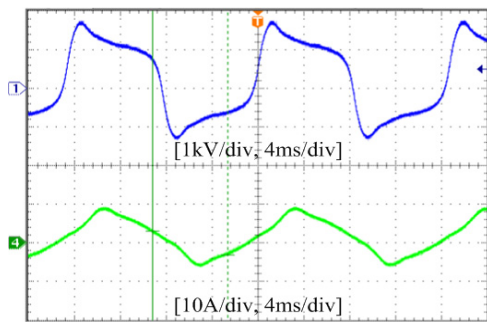
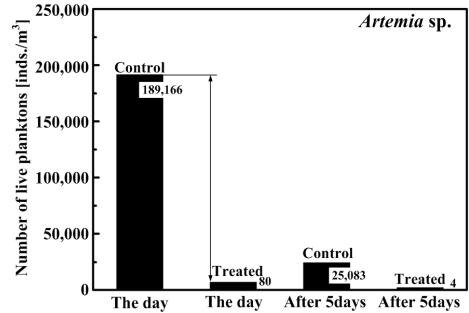


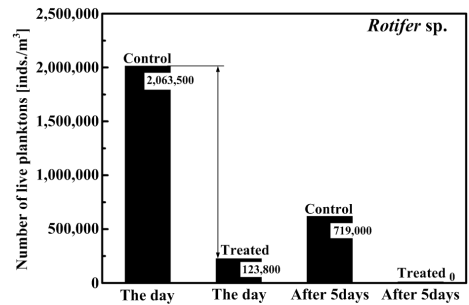
Fig. 9 Waveforms of lamp voltage and current (prototype)

3.2 살균효율

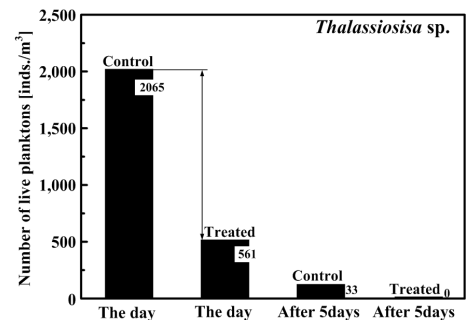
살균효율 실험은 IMO 규정에 따라 미생물의 크기가 50 μm이상은 동물성 플랑크톤인 알테미아 종 (*Artemia* sp.)과 로티퍼 종(*Rotifer* sp.)을, 10 ~ 50 μm의 크기는 식물성 플랑크톤인 테트라셀미즈 종(*Tetraselmis* sp.)과 탈라시오시라 종(*Thalassiosira* sp.)을 사용하였다. 시료의 분석



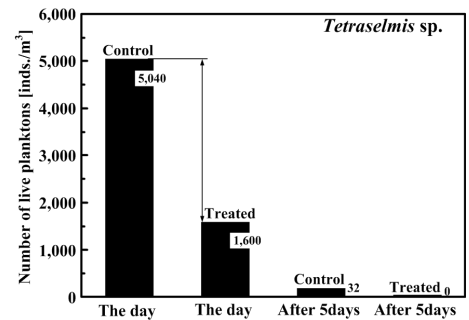
(a) *Artemia* sp.



(b) *Rotifer* sp.



(c) *Thalassiosira* sp.



(d) *Tetraselmis* sp.

Fig. 10 Biological efficacy of Plankton

리로 구분하였으며 처리 직후와 5일 경과 이후의 사멸율을 비교하였다. 처리 직후의 사멸율 분석은 시료채취 후 6시간 내에 수행하였다. 플랑크톤 종류에 따른 살균효율 실험 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

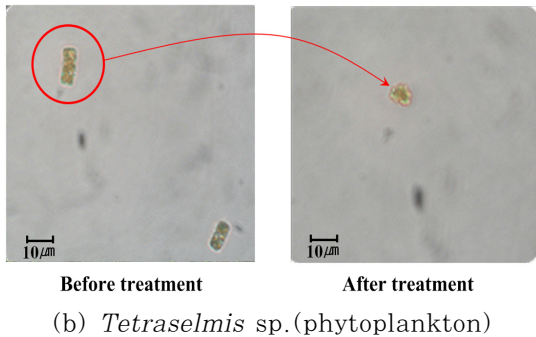
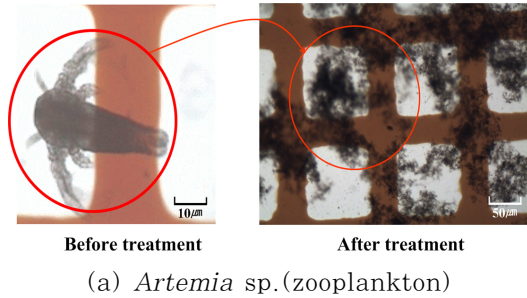


Fig. 11 Shapes of plankton before and after treatment

Fig. 11은 살균처리 전·후의 플랑크톤의 형상을 나타낸 것으로 플랑크톤의 종류에 관계없이 처리 직후 보다 5일 경과 이후의 시료에서 플랑크톤 사멸율이 높게 나타났으며 이는 처리 직후 생존해 있던 형태가 불완전한 플랑크톤이 시간이 경과함에 따라 자기증식 불능상태 혹은 자연도태로 완전히 사멸되었기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서 시제작한 자외선램프 방식 살균시스템의 성능을 IMO의 선박평형수 처리 기준에 따라 특성을 분석한 결과, 해수에 포함된 플랑크톤의 사멸율은 99.99%로 IMO 기준에 적합한 수준이었

으며, 자외선 살균으로 처리 직후보다 5일 경과 후의 사멸율이 더 높은 것으로 나타났다.

또한 시제작한 자외선램프 및 안정기는 효율이 92.8%로 기존 상용화 제품과 동등이상의 특성을 나타냄으로써, 에너지 및 원가 절감에 충분한 경쟁력을 확보할 수 있을 것이다. 향후 대형 선박에는 단위 살균챔버의 병렬설치로 처리용량을 증가시켜 적용이 가능하다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지자원기술개발사업(2008-E-EL-02-P-02-0-000-2008)과 정보통신연구진흥원의 대학IT연구센터 지원사업(IITA-2009-C1090-0903-0007)에 의해 수행되었습니다.

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] IMO, "Report of the Marine Environment Protection Committee on its 51st Session", MEPC 51/22, 2004.
- [3] IMO, "International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediments, 2004", BWM/CONF/36, 2004.
- [4] James R. Bolton and Christine A. Cotton, "The Ultraviolet Disinfection Handbook" American Water Works Association, 2008
- [5] Snowball, M.R. and I.S. Hornsey, "Purification of water supplies using ultraviolet light" *Developments in food microbiology*, edited by R.K. Robinson, NY : Elsevier Applied Science, pp. 171-191, 1988.

- [6] NWRI & AWWA, "UV Disinfection guidelines for drinking water and wastewater reclamation", National Water Research Institute and American Water Works Association Research Foundation, 2000.
- [7] 장인성, 김준영, "자외선을 이용한 수(水)처리 살균기술", 조명전기설비학회지, 제19권, 제5호, pp. 18-19, 2005.
- [8] Roy L. Wolfe, "Disinfection of portable water", Current Technology and Research Needs, Environment Science Technology, Vol. 24, No. 6, 1990.
- [9] E. R. Blatdhley, III and B. A. Hunt, "Bioassay for full-scale UV disinfection system", Water Science Technology, Vol. 30, No. 4, pp. 115-123, 1994.
- [10] USEPA, "Ultraviolet disinfection guidance manual", EPA 815-D-03-007, 2003.
- [11] Persson, E. and D. Kuusisto, "A performance comparison of electronic vs. magnetic ballast for powering gas-discharge UV lamps", Proceedings of the RadTech Conference, RadTech International, pp. 1-9, 1998.

저 자 소 개



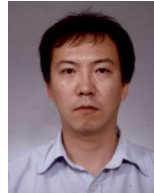
표태성(表泰成)

1963년 8월 8일생. 2008년 한국해양대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 현재 주식회사 파나시아 이사.



천상규(千相奎)

1972년 1월 18일생. 1997년 한국해양대학교 전기공학과 졸업, 2008년 한국해양대학교 대학원(박사과정수료), 현재 주식회사 파나시아 차장.



박대원(朴大元)

1977년 12월 28일생. 2002년 한국해양대학교 전기시스템공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2007~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 박사과정.



최성국(崔聖國)

1981년 11월 21일생. 2008년 한국해양대학교 나노반도체공학과 졸업. 2008~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 석사과정.



김성연(金成演)

1968년 7월 19일생. 1996년 성균관대학교 금속공학과 졸업, 2003년 성균관대학교 대학원 졸업(박사), 현재 한국해양대학교 첨단마린조명연구센터 전임연구원.



길경석(吉暉碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년 3월~2004년 2월 영국 카디프대학 방문교수. 1996~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수.