

자외선 살균조명을 이용한 친환경빌딩 방역시스템 연구

김지원¹, 이창신¹, 배정자^{2*}
¹커니스, ²동의대학교 기초과학교양학부

A Study of Eco-friendly Building Prevention System using UV disinfection lighting

Ji-Won Kim¹, Chang-Shin Lee¹, Jeong-Ja Bae^{2*}
¹Conis Co. Ltd.,
²Division of Basic Sciences, Dongeui University

요약 코로나 팬데믹 여파에 지속적으로 대응하려면 많은 사람들이 밀집해 있는 빌딩 공간을 상시적, 친환경적으로 방역하는 시스템이 필요하다. 본 연구는 기존 조명과 UVC-LED를 3개 이상의 안전장치(인체감지센서, 심야운전, 유무선 리모콘)와 결합해 화학물질 스프레이형 방역의 비효율성을 극복하고 스위치 하나로 공간을 상시 방역하는 시스템 개발이다. 일반 면조명에 UVC 모듈을 결합하여 시험인증기관의 최대 높이인 1.5m 아래 부착세균 살균성능을 시험한 결과 6시간 조사로 5종의 균이 99.99% 살균됨을 확인하였다. 일반 사무실 내 살균조명 설계를 위해서 실험의 도즈량과 유사한 값으로 방사조도 측정식을 매트랩으로 코딩하여 천정에서 2.6m 거리의 바닥을 시뮬레이션하였다. 본 연구를 통해 UVC를 일반 조명에 결합하여 공간방역이 가능하며 중앙제어실에서 조명과 같이 관찰할 경우 스위치 하나로 빌딩 전체를 방역하는 스마트 방역빌딩을 구현할 수 있다.

Abstract A system that regularly and eco-friendlily quarantines building spaces, where many people are concentrated, is needed to respond to the aftermath of COVID-19 continuously. This study aims to develop a system that combines existing lighting and UVC-LED with three or more safety devices (human detection sensors, late-night driving, wired and wireless remote controls. etc.) to overcome the inefficiency of chemical spray-type quarantine. The proposed system also always quarantines space with one switch. This study tested the sterilization performance of bacteria attached at 1.5 m below the maximum height prescribed by the test and certification agency by combining the UVC module with general face-lighting. Subsequently, it was confirmed that five types of bacteria were 99.99% sterilized. The design of sterilization lighting in the general office was also performed in this study. Specifically, the floor at 2.6 m from the ceiling was simulated by coding the radiation intensity measurement method in MATLAB with a dose similar to the one used in the experiment. UVC can be combined with general lighting to prevent space, based on the study. In addition, smart quarantining of buildings can be implemented to prevent the entire building with a single switch when controlled by the central control room that uses lighting control.

Keywords : Pandemic, Antibiotic Building, UVC-LEDs, Sterilization, Radiation, Simulation.

본 논문은 2021 중기부 전략형 창업과제 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jeong-Ja Bae(Dongeui Univ.)

email:jjbae@deu.ac.kr

Received December 29, 2021

Revised March 3, 2022

Accepted March 4, 2022

Published March 31, 2022

1. 서론

1.1 빌딩 방역 시스템

1.1.1 환경소독제

코로나 팬더믹에 의해 불특정 다수가 거주하는 빌딩의 상시 소독이 중요해졌다. 실내 건물 내 세균과 곰팡이와 같은 미생물 피해를 나타내는 연구로 건물 내부 소독의 필요성은 제기되어 왔다[1]. 공조 장치가 작동하지 않는 무풍 사무실에서는 대부분의 부유세균은 시간이 지남에 따라 낙하하거나 부착된다. 공조기가 가동되는 경우 공기 중 부유세균을 살균 혹은 대량의 외기로 제거해야 하나 전 외기 도입의 경우 에너지 비용이 급상승하여 채용이 어렵다[2]. 감염예방법에 근거한 환경부 소독제의 경우 물체 표면제로 닦거나 분무 형태이며 유효 접촉시간은 1~10분으로 다소 길다. 비의료용 환경소독 관련 장비의 경우 인증기준이 없으며 WHO에서는 UVC 조사의 경우 인체의 위해성을 우려하여 밀폐형으로 제한하고 있다. 분무 형태 소독제도 환자의 비말 전파 위험을 감소시키지 않고 오히려 호흡기 등의 영향을 고려하여 인체에 직접 사용하는 것은 권장하지 않고 있다.

1.1.2 광선 소독

분무형 화학제품 외에 직접적인 자극이 없는 물리적인 소독 방법으로 자외선과 가시광선에 의한 소독 방법이 있다. 자외선 살균은 RNA를 비활성화하여 증식 능력을 억제하며 바이러스와 균에 대한 살균 효과가 뛰어난 것으로 알려져 있으나[3] 인체에도 유해하여 피부와 눈에 노출한계를 30 J/m²으로 제한하고 있다[4].

또한 전기용품 안전기준의 전기소독기 제품기준으로는 자외선이 직접 새어 나오지 않는 구조로 제한하고 있어 밀폐공간에 소독대상을 두는 경우에만 사용하게 한다[5]. 따라서 건물은 공조기 내부와 같이 인체와 접촉이 없는 제한된 공간에서 UVGI(Ultraviolet Germicidal Irradiation) 살균이 가능하며 임시대피소에 적용한 연구 결과 유의미한 결과를 도출하였다[6].

가시광선 영역에서 살균력이 있는 405 nm LED[7]는 인체에 무해하여 장시간 노출이 가능하나 275 nm에 비해 방사에너지가 1/700~1/1,000 밖에 되지 않아 살균력이 적어 많은 에너지를 장시간 투입해야 한다. 현장 적용 연구 결과 근거리(5 cm)에서 곰팡이류에 대한 살균 효과를 보였으나 실제로 천정에 부착되는 조명에서 실내 공간 전체와 바닥까지 살균 효과를 나타내기는 어렵다[8].

반면에 자외선 살균기능을 조명등에 첨가한 경우는 실내 공간이 청정하게 유지됨을 확인하였다[9]. 주방 환경 살균을 위해 부엌 조명등에 UVC 램프를 적용하고 UVC에 의한 살균력 방정식을 도입한 시뮬레이션 연구는 계산값이 실측값에 비해 약 30% 높게 나타났는데 이는 문헌에 근거한 반사율의 재료가 실제와 달라 잘 반영되지 않음이 분석되었다[10]. 또한 환기 해석에 적용하는 시뮬레이션 프로그램과 CFD를 이용하여 개별 사무실 공간의 부유세균에 대한 시뮬레이션 결과 낙하 및 부착되는 세균의 비율을 적용하는 자료가 축적되어야 함을 제기하였다[11].

따라서 본 연구는 빌딩방역을 위해 사무실용 조명에 UVC를 결합하고 바닥에서 부착세균의 살균력을 시험하여 UVC로 실내공간 광선방역을 설계하고자 한다.

2. 본론

2.1 공간 살균조명 개발

2.1.1 조명 결합형 살균등 설계

연구대상은 사무실에서 사용하는 일반 직사각형 led 면조명에 UVC 모듈을 삽입하는 융합조명으로 조명과 살균기능을 갖는 등을 설계하였다.

UVC 살균등의 인체 위해성을 배제하기 위해서 세 가지 이상의 안전장치를 설정하였다. ① 주간에는 조명 led를 켜고 사람들이 퇴실한 심야시간에만 UVC를 점등할 수 있도록 RTC(real time clock)를 설치 ②조명과 살균등이 동시에 켜지지 않도록 스위치를 제어 ③심야시간이지만 인체 혹은 생물이체가 감지되면 UVC 살균등이 자동으로 꺼지도록 센서가 프로그램 스위치와 연동되게 하였다. UVC가 결합된 살균 면조명의 블록도는 아래 Fig. 1과 같다.

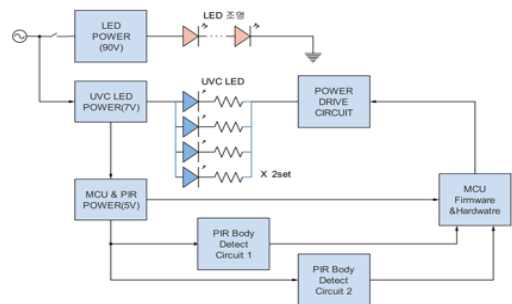


Fig. 1. Block Diagram of antivirus face light

2.1.2 자외선 살균등 모듈 개발

Fig. 2와 같이 130×32 cm² 면조명 양측에 UVC LED를 4개씩 넣고 UVC의 점등을 가시화할 수 있도록 점등용 푸른 LED 1개를 연결하였다. 인체를 감지하여 살균등이 꺼지도록 PIR(Passive Infrared) 센서를 넣고 PCB 모듈을 제작하였다. 사용된 UVC PKG는 3.5×3.5×1.8 cm³ 크기로 파장은 275nm, 광출력은 10 mW, 전류와 전압값은 I_f 100 mA, V_f 6 V, 지향각 125°의 국내 제품[12]을 사용하였다.

조명과 별도의 소형전원장치(SMPS)에 연결한 UVC LED의 측정 전압값은 5.2 V로 개당 전류값은 48 mA, 총 방사에너지는 4.8 mW/개 x 4개이므로 면조명 양측에 각각 19.2 mW 광출력이 나온다. UVC 광출력과 시간을 곱하면 총 살균에너지(도즈량)로 살균력을 조절할 수 있는 인자가 된다.

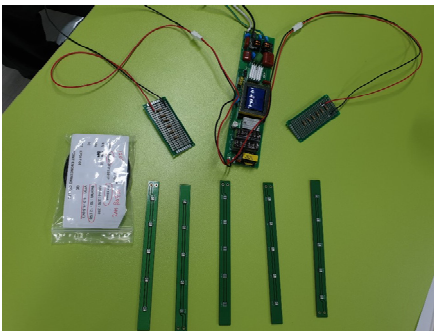


Fig. 2. UVC-LED PCB module & SMPS

2.2 공간살균 실험

2.2.1 실험방법

조명융합형 자외선 살균등으로 사무실 공간을 방역하기 위해 천정에서 UVC가 비추는 영역의 살균 실험을 하였다.

Fig. 3과 같이 면조명 양측에 UVC LED 모듈을 삽입하고 바닥과 수직의 여러 위치에서 살균실험을 행하였다. 공인시험기관(KCL[13])에서 실험가능한 최대 높이는 1.5 m이며 바닥에 5종 부착세균에 대한 살균율을 시험하였다. 먼저, 빌딩의 근무자가 야근하고 늦게 퇴근하는 경우 출근 시까지 조사할 수 있는 최대 시간을 8시간으로 하여 실험을 행하였고 이후 조사 시간을 줄여서 실험하였다.

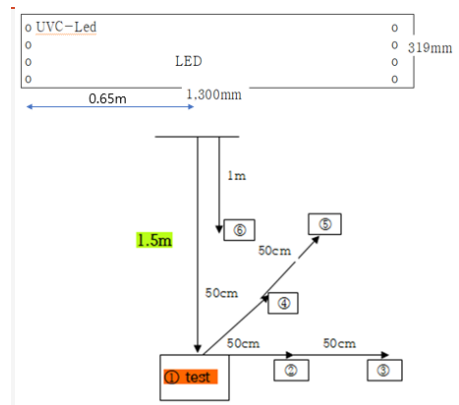


Fig. 3. Position of sterilization experiment

2.2.2 실험결과

Table 1의 결과는 1차 항균 시험으로 1.5 m 아래에서 8시간 후 5종 세균에 대한 살균율을 나타내었다. 5종 균 모두 99.9%의 살균율을 나타내어 방역 효과를 충분히 나타내었다.

Table 1. The 1'st antibacterial test in an office

Strain type	Antibacterial Performance	Experimental Condition
Coli	99.9%	1.5 m below 8 hr radiation
Staphylococcus aureus		
Pseudomonas aeruginosa		
Pneumonia		
MRSA		

시간과 세균 수를 줄여 2차 실험을 행한 결과는 Table 2와 같이 2시간 조사에 90% 이상의 살균율을 보였으며, 6시간에는 두 균 모두 99.9% 살균율을 나타내었다. 대장균은 4시간 조사에 살균율 99.9%로 다른 세균보다 생존력이 약하게 나타나 기존 연구들과 유사한 결과를 보였다.

Table 2. The 2nd antibacterial test in an office

strain type	2hr	4hr	6hr	Experimental Condition
Coli	93.7%	99.9%	99.9%	1.5 m below
Staphylococcus aureus	91.5%	98.6%	99.9%	

따라서 UVC 광으로 빌딩방역을 행할 경우 심야 6시간 이상 조사하면 공간 살균이 가능하다고 판단된다. 따라서 관리자가 직접 빌딩을 돌며 약품 살균을 하는 수고에 비해 근무자들이 퇴근한 심야 시간에 중앙제어 스위치 하나로 건물 내부 전체를 살균하는 스마트 방식이 가능하다.

2.3 공간살균 모델링

2.3.1 살균등 조사범위 설계

빌딩 내부의 사무실 공간전체를 방역하기 위해 조명의 배치간격을 고려하여 공간살균 모델링을 설계하였다. 모델링에서 사용한 UVC 방사에너지는 세균 실험에서 살균율 99.9 %를 얻은 광에너지와 시간을 곱한 도즈량 [2](mJ/cm)이며 조명에서 멀리 떨어진 바닥에서 에너지로 전환하기 위해서는 UVC-Led 지향각 125°로 공간에 원뿔 형태로 방사된 면적을 고려해야 하므로 유해자외방사의 측정방법(KS A 5006[14])의 수식을 이용하였다.

이 규격은 일반 인공광 및 자연광에서 유해방사조도를 물리적으로 측정하는 방법에 관한 규정으로 입사면 단위 면적당 밀도, W/m²로 측정한다. 점 방사원을 완전 확산성으로 간주하면 거리 D(m)인 점의 방사조도 H는 다음 식 (1)과 같다. 공간살균 모델링을 위한 방사조도 계산은 매트랩으로 코딩하였다.

$$H = NA/D^2(W/m^2) \tag{1}$$

N : 방사원의 방사휘도 [W/(sr·m²)]

A : 방사원의 면적(m²)

2.3.2 모델링 입력조건

모델링 입력자료는 살균조명의 공간배치, 광원의 출력과 UVC-Led 지향각에 따른 배광자료(Fig. 4-5)과 같다.

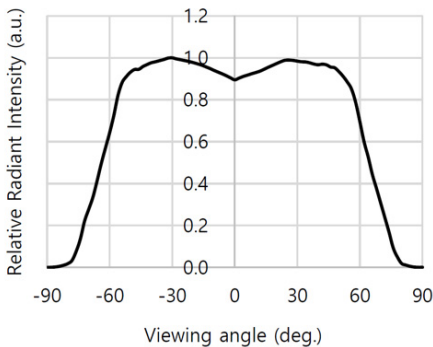


Fig. 4. Light Distribution curve of case 1.

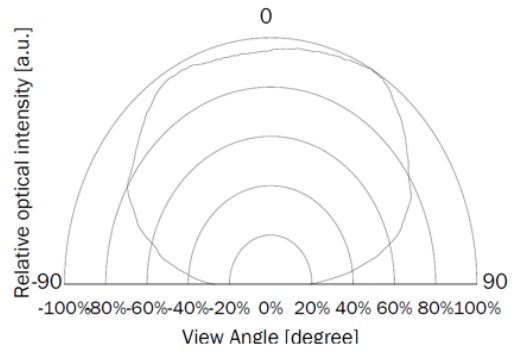


Fig. 5. Light Distribution curve of case 2.

시뮬레이션 조건은 Table 3과 같이 세균 실험에 사용된 살균등 조건(case 1)과 실제 사무실 천정 높이 아래 바닥살균 조건(case 2)을 비교하였다. 바닥에서 유사한 살균성능이 유지되도록 도즈량을 유지했으며 case 2에서는 천정에서 바닥까지의 거리가 더 크므로 UVC 광출력이 더 높은 제품을 사용하였다.

공간 살균에 사용한 도즈량은 약 4mJ/cm²으로 문헌값 [15]에서 제시한 Cov 19의 99.99% 살균 도즈량 16mJ/cm² 보다 작았다. 그 이유는 자외선에 의한 살균성능은 같은 도즈량에서도 광출력 세기보다는 조사시간의 효과가 더 크며 주변의 벽에서 반사되는 효과가 포함된 것으로 판단된다.

Table 3. The condition for sterilization light design.

condition	Case 1	Case 2
UV-C	10mW(100mA)	20mW(100mA)
angle view	125°	160°
radiation power(mW)	4.8(48mA)	12(60mA)
array	2parallel, 4series	2parallel, 6series
total(mW)	38.4	144
height(m)	1.5	2.6
irradiation(hr)	6	4
Dose(mJ/cm ²)	4.53	4.12

2.3.3 모델링 결과

사무실의 공간에 법적인 간격으로 배치되어 있는 면조명 4개를 대상으로 살균성능 시뮬레이션을 실행하였다. 면조명의 앞뒤 거리는 2,700 mm, 측면 거리는 2,400 mm이다(Fig. 6).

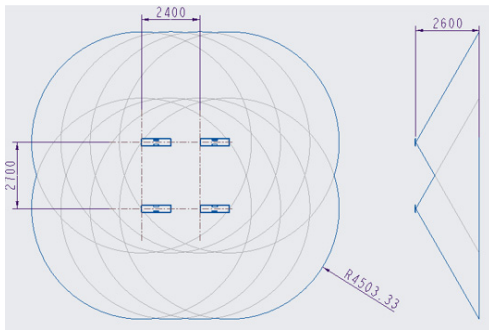


Fig. 6. 4face light array in an office.

UVc 살균조명은 160° 배광곡선에 의한 방사 면적이 4개의 등 모두 겹치는 모양으로 나타났다. 따라서 실험에 의한 살균성능보다 훨씬 공간 살균 효과가 더 클 것으로 판단된다.

Fig. 7은 면조명 하나의 지향각 160° UVc Led의 배광곡선에 의한 방사조도 분포를 나타내었다. 중앙에서 멀어질수록 조도값은 감소한다.

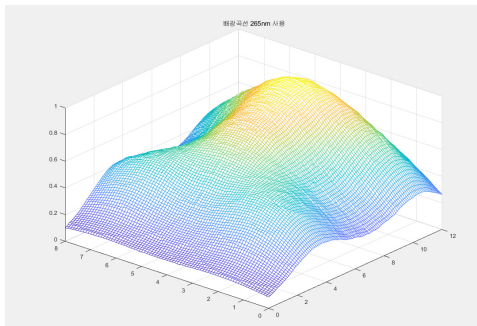


Fig. 7. Simulation of UVc radiation flux by a face light in office room

Fig. 8은 사무실 전체 면조명에 결합된 자외선 방사분포를 나타낸다. 조명 상하좌우로 방사조도는 모두 겹쳐져 실제 살균 효과는 더 클 것으로 판단된다.

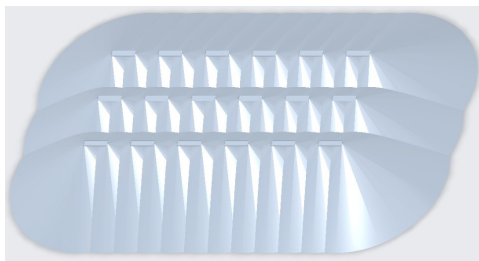


Fig. 8. Simulation of UVc radiation area by³ total face light in office room.

3. 결론

빌딩방역시스템으로서 UVc 자외선 방사에 의한 공간 살균 가능성을 연구하였다. 일반 면조명에 UVc 모듈을 결합하여 시험인증기관의 최대 높이인 1.5 m 아래 부착 세균 살균성능을 시험한 결과 6시간 조사로 5종의 균이 99.99 % 살균됨을 확인하였다.

실험의 도즈량과 유사한 값으로 천정에서 2.6 m 거리의 일반 사무실에 살균조명을 설제하기 위해 방사조도 측정식을 매트랩으로 코딩하여 시뮬레이션 하였다.

UVc의 배광곡선에 의해 조명배치 간격 내에서 조명의 개수만큼 겹치는 효과와 반사가 추가되어 살균 효과는 더욱 상승될 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 UVc를 일반 조명에 결합하여 공간방역이 가능하며 중앙제어실에서 조명과 같이 관장할 경우 스위치 하나로 빌딩 전체를 방역하는 스마트 방역빌딩을 구현할 수 있다.

References

- [1] Y. R., Yoon, H. J. Moon, "A study on the status of mould growth problems in residential buildings based on questionnaire survey", *Journal of Odor and indoor Environment*, Vol.7, No.1, pp. 25-32 2010.
- [2] K. B. Jeong, S. G. Choi., "UV Immune System of Personalized Space" Facilities engineering paper collection, 2009.
- [3] S. G. Hwang, H. K. Choi., Y. J. Song., C. G. Yoon, J. E. Lee, and H. Y. Shin, "A study on the lighting fixture with sterilization feature about airborne bacteria", *Proceeding of KIEE Fall Conference*, The Korean Institute of illuminating and Electrical Instalation Engineers. 2010.
- [4] Photobiological Safety of Lamps and Lamp Devices, K62471-1, [IEC 62471, ed1, 2006-07] Safety Standards for Electrical Appliances, Enactment and Standards Agency Notification No. 2009-0476, 2009.
- [5] Electrical Supplies Safety Standards K7000, "Individual Requirements for Safety, Electric Disinfectors, and Similar Electric Appliances for Household and Similar Electric Appliances" Revised Technical Standards Institute Notification 2008-907 (December 12, 2008)
- [6] J. Y. Park, M. K. Sung, J. W. Lee, "Numerical Analysis of Airborne Infection Control Performance of Germicidal Systems in a Temporary Shelter", *Journal of the Korea Institute of Healthcare Architecture*, Vol.21, No.1, pp. 7-15, 2015.
- [7] L. E. Murdoch, K. McKenzie, M. Maclean, S. J.

Macgregor, J. G. Anderson, "Lethal effects of high-intensity violet 405nm light on *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida albicans*, and on dormant and germinating spores of *Aspergillus niger*", *Fungal biology*, Vol.117, No.7-8, pp.519-527, 2013.

- [8] J. H. Kim, J. I. Bang, A. S. Choi, M. K. Sung, "An analysis on the Effect of Mold Sterilization in Apartment Using 405nm Visible Light LED", *Journal of Korea Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, pp.580-598, 2019.
- [9] S. G. Hwang, H. K. Choi, Y. J. Song, C. G. Yoon, I. E. Lee, and H. Y. Shin, "a study on the lighting fixture with sterilization feature about airborne bacteria", *Proceeding of KIIEE Fall Conference*, 2010.
- [10] J. H. Kim, Y. L. Jo, J. I. Bang, A. S. Chio, M. K. Sung, "A study on the prediction of surface sterilization performance of ultraviolet germicidal irradiation system using radiance analysis", *Journal of Odor and indoor Environment*, Vol. 18, No.1, pp.60-66, 2019.
- [11] S. G. Choi, A study of air Sterilization System in Personalized Office Using Simulation, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.22, No.6, pp.353-360, 2010.
- [12] UVC3535-25-100 semicon light co. ltd. FAB I49, Wongomae-ro 2beon-gil, Giheung-gu, Yongin-si., Gyeonggi-do, Korea, <https://www.semiconlight.com>
- [13] KCL, Korea Conformity Laboratories, Korea Institute of Construction and Living Testing, Microbial Reduction Performance Test, Antibacterial /Antibacterial Fungal Test. 2020.
- [14] Measurement method of harmful ultraviolet radiation KSA 5006 and calculation method of irradiation illumination of annexes. 2009.
- [15] Light output (mW) × irradiation time (t) / distance 2 (S2) = dose amount (mj/cm), https://www.efsen.dk/uvc-for-disinfection-of-surface/?utm_source. 2020.

이 창 신(Chang-Shin Lee)

[정회원]



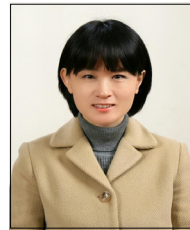
- 1994년 2월 : 부산대학교 환경공학과 (공학사)
- 2020년 2월 : 부경대학교 기술경영전문대학원 (산업공학 석사과정 수료)
- 2020년 3월 ~ 2021년 3월 : 부산외국어대학교 특임교수
- 2017년 1월 ~ 현재 : 커니스 대표

<관심분야>

조명, 살균등, 자동제어

배 정 자(Jeong-Ja Bae)

[정회원]



- 1993년 2월 : 부산대학교 일반대학원 수학과 (이학석사)
- 1998년 8월 : 부산대학교 일반대학원 수학과 (이학박사)
- 2004년 8월 : 큐슈대학교 일반대학원 수학과 (논문박사)
- 2004년 3월 ~ 2008년 2월 : 울산대학교 수학과 강의전담교수
- 2013년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 수학과 조교수

<관심분야>

수학, 통계

김 지 원(Ji-Won Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 부산대학교 일반대학원 환경공학과 (환경공학 석사)
- 2002년 2월 : 부산대학교 일반대학원 환경공학과 (환경공학 박사)
- 2007년 9월 ~ 2010년 1월 : 울산대학교 연구교수
- 2013년 3월 ~ 2019년 2월 : 동의대학교 환경공학과 부교수

<관심분야>

환경, 에너지