

## 탄소배출권용 AIoT 고효율 가로등 성능분석 연구

박승호<sup>1</sup>, 신성욱<sup>1\*</sup>, 유경선<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국공학대학교 IT반도체융합공학과 학생, <sup>2</sup>한국공학대학교 나노반도체공학과 교수

# A Study on the Performance Analysis of AIoT High-Efficiency Streetlamp for Carbon Emissions

Seung-Ho Park<sup>1</sup>, Seong-Uk Shin<sup>1\*</sup>, Kyung-Sunl Yoo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Student, Department of IT Semiconductor Convergence Engineering, Tech University of Korea,

<sup>2</sup>Professor, Department of Nano & Semiconductor Engineering, Tech University of Korea

**요약** 파리기후변화협약(UNFCCC, 2015) 체결에 따라 선진국뿐만 아니라 개발도상국을 포함하는 포괄적 참여를 통해 전 세계가 온실가스 감축 활동을 확대하고 있다. 세계 주요국은 탄소배출권 시장을 통한 탄소배출 총량규제의 효과에 많은 기대를 걸고 있다. 그러나 탄소배출권을 얻기 위해서는 정량적인 탄소저감량 데이터를 바탕으로 제3자 검증이 필요하다. 이에 본 논문에서는 탄소배출권용 AIoT 고효율 가로등을 개발하여 등기구의 광효율을 측정하는 성능분석 연구를 진행했다. 탄소배출권을 얻기 위해 고효율 LED PKG를 사용하며 고전압용 PFC를 자체 개발하고 통신이 가능한 고효율의 등기구를 개발했다. 통신을 위해 등기구와 Gateway간 2.4GHz LoRa 방식을 채택했다. 한국 도로공사 표준 가로등 Type A, B, C 시뮬레이션을 통하여 렌즈 설계를 진행했다. 가로등의 성능은 공인 성적기관의 광효율 측정을 통하여 기존 타제품 대비 고효율의 성능을 검증하였으며, 이를 통한 전기에너지 절감으로 탄소배출권을 획득할 것으로 기대된다.

**주제어** : 가로등, AIoT, 고효율, 탄소배출권, LoRa

**Abstract** Following the signing of the Paris Agreement on Climate Change (UNFCCC, 2015), the world is expanding greenhouse gas reduction activities through comprehensive participation that includes not only developed countries but also developing countries. Major countries around the world are placing high expectations on the effectiveness of total carbon emissions regulation through the carbon emissions market. However, in order to obtain carbon credits, third-party verification is required based on quantitative carbon reduction data. Accordingly, in this paper, we developed an AIoT high-efficiency street light for carbon emissions and conducted a performance analysis study to measure the luminous efficiency of the lighting fixture. To obtain carbon emissions rights, we used high-efficiency LED PKG, developed our own high-voltage PFC, and developed high-efficiency lighting fixtures capable of communication. For communication, the 2.4GHz LoRa method was adopted between the lighting fixture and the gateway. Lens design was conducted through simulation of Korea Expressway Corporation's standard streetlight types A, B, and C. The performance of the streetlight was verified as being more efficient than other existing products through the measurement of luminous efficiency by an accredited rating agency, and it is expected that carbon emissions rights will be obtained by reducing electrical energy through this.

**Key Words** : Street lights, AIoT, high efficiency, carbon credits, LoRa

\*This work was supported by the Korea Environmental Industry & Technology Institute(KEITI) funded by the Ministry of Environment(MOE) (Training DX-based carbon supply network environmental experts).

\*This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20224000000200).

\*Corresponding Author : Seong-Uk Shin (seonk6221@gmail.com)

Received November 14, 2023

Revised December 6, 2023

Accepted December 22, 2023

Published December 30, 2023

## 1. 서론

기후변화 및 지구온난화는 범세계적 지속가능성에 큰 위협으로 인식이 되고 있다. 이에 1997년 유엔기후변화협약(UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change)은 교토의정서라 명칭이라는 '기후변화에 관한 유엔 기본 협약'을 채택했다(UNFCCC, 1998)[1-3]. 이후 파리기후변화협약(UNFCCC, 2015) 체결에 따라 선진국뿐만 아니라 개발도상국을 포함하는 포괄적 참여를 통해 전 세계가 온실가스 감축 활동을 확대하고 있다.

탄소배출권[4-6]은 할당량 및 Credit을 포괄하는 개념으로, 할당량은 국가 또는 지역 내에서 정한 온실가스 배출총량만큼 발전 설비나 생산 설비 등 주요 온실가스 배출원에 지급된 온실가스 배출 권리를 의미하며, Credit은 외부 온실가스 저감 프로젝트에 대해 기준 전망치(BAU : Business-As-Usual, BAU) 대비 온실가스 배출량을 줄였다는 증거로서 해당 프로젝트에 지급되는 배출권을 의미한다. 온실가스 배출권을 거래하는 제도를 도입함으로써 감축 목표 달성을 촉진한다. Table 1[7]과 같이 탄소배출권 시장은 연 평균 30.7%의 성장률을 보일 것으로 전망된다. 이러한 탄소배출권을 얻기 위해서는 정량적인 탄소저감량 데이터를 바탕으로 제3자 검증이 필요하다.

이에 본 연구에서는 데이터 통신이 가능한 탄소배출권용 AIoT 고효율 가로등을 개발하여 등기구의 광효율에 대한 성능분석을 진행하려 한다.

Table 1. Carbon emissions market size and outlook

	Global (Million \$)	Korea (Million \$)
'19	21,150	326
'20	36,957	470
'21	48,302	615
'22	63,131	803
'23	82,512	1,050
'24	107,843	1,372
'25	140,951	1,794
CAGR	30.7%	30.7%

## 2. 본론

### 2.1 연구 방법

#### 2.1.1 PFC(Power Factor Correction)

기존 DC LED 가로등 시스템의 경우 AC Grid 전원

을 SMPS(Switched-Mode Power Supply)에서 평활화하기 위해 고용량 전해콘덴서를 사용한다. 이러한 전해콘덴서의 경우 일교차가 큰 환경에서는 수명이 짧아 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 반면 AC LED 가로등 시스템에서는 전해콘덴서를 사용하지 않는다. 그러나 기존 AC Direct 조명에 대해서는 저가형으로 개발한다는 개념과 효율 한계 및 Flicker 등의 문제가 기존의 DC 조명시장에 인식이 되어 있다. 미국 DOE와 IEEE에서 발표한 내용에 따르면 근거리 실내조명에 대해서는 Flicker가 잠재적인 건강 문제로 문서화(IEEE PAR1789)한 반면 원거리 실외 조명에서는 중요하지 않다고 보고되어 있다[8].

이에 AC 장점과 DC 장점을 살려 전원공급 시스템을 구현했다. PFC 전원공급장치를 사용하며 장비 수명 개선을 위해 극저온 내성의 Film Capacitor를 사용했다. PFC는 Fig. 1과 같이 입력 전압을 승압하는 작업을 수행하는 Converter이다. 본 연구에서는 AC 220V / 60Hz의 입력 전압을, PFC를 통해 전파 정류하여 DC 400V로 승압하여 등기구에 전원공급을 하는 시스템을 적용했다. 이에 Fig. 2와 같은 고전압 저전류 특성에 적합한  $\pi$ -filter 평탄화 회로 구성이 필요하다. L은 인덕터 즉 코일을 칭하며 C는 축전기이다.

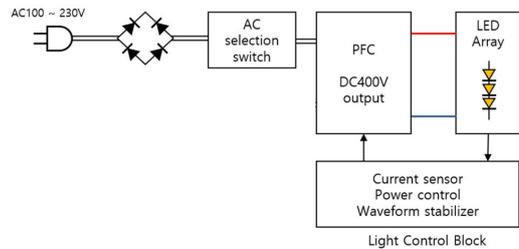


Fig. 1. PFC system configuration diagram

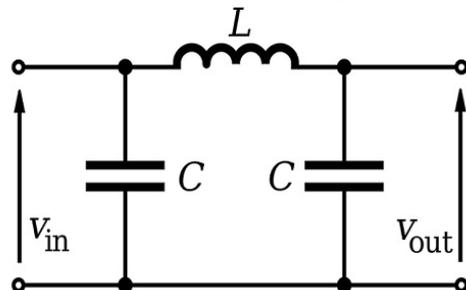


Fig. 2.  $\pi$ -filter circuit diagram[9]

2.1.2 LED 광원 선정

LED pkg는 LM 80인증을 받은 서울반도체사의 SAWOL60A-Acrich MJT 5050 패키지를 사용했다. MJT란 여러 개의 Chip을 연결하는 기존 System 대신, Chip 위에 Cell을 집적하여 고전압을 구동하는 Multi Junction Technology를 적용한 세계 최초 서울반도체사의 기술이다. Table 2은 MJT 5050의 특성이다. LED 패키지 1개당 1.2 W가 적정 전력 공급이나 조명 시스템 효율을 높이기 위해 1 W를 공급했다.

Table 2. LED Characteristics,  $I_F = 60mA, T_j = 25^\circ C$

Parameter	Symbol	Value			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
Forward Voltage	$V_F$	15.0	16.5	18.0	V
Luminous Flux (5000K)	$\phi_V$	-	200	-	lm
Luminous Flux (3000K)		-	195	-	
Correlated Color Temperature	CCT	2,700	-	7,000	K
CRI	Ra	70	-	80	-
Viewing Angle	$2\theta_{1/2}$	-	120	-	deg.
Thermal resistance (J to S)	$R\theta_{j-s}$	-	1.8	-	K/W
ESD Sensitivity(HBM)	-	Class2 JESD22-A114E			

2.1.3 Lens 설계

Fig. 3과 같이 Lens를 설계하여 국내 및 국제 가로등 배광 규격에 적용 가능성 판단을 위하여 DIALux 프로그램을 통하여 시뮬레이션을 진행하려 한다.[10] Fig. 4는 한국 도로공사 규격 Type A, B, C 조건이며 Fig. 5는 해외 표준규격에서 가장 일반적인 Type II Medium[11] 조건이다. Table 3는 한국도로공사 규격 Type A, B, C를 Table 4은 해외 표준규격 Type II Medium을 정리했다.

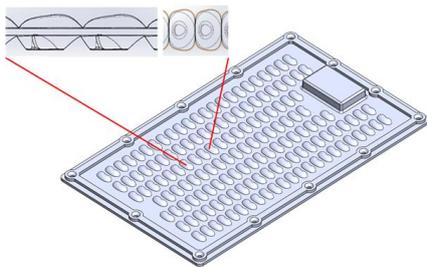


Fig. 3. Lens design data

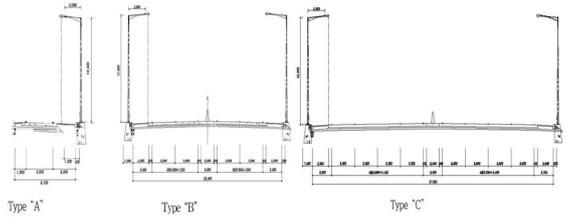


Fig. 4. Korea domestic standard specifications

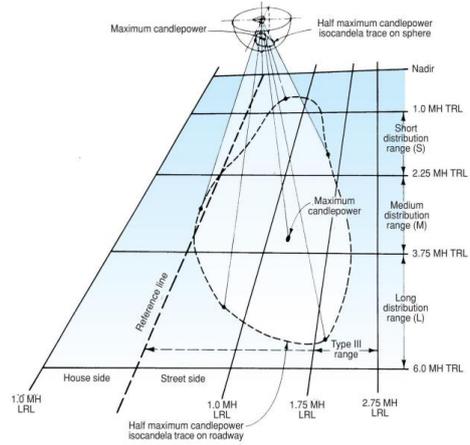


Fig. 5. Overseas standard specifications

Table 3. Korea domestic standard specifications

	Type 'A'	Type 'B'	Type 'C'
Applicable road	Concrete one-lane (one way)	Concrete 4 lanes (round trip)	Concrete 8 lanes (round trip)
Road width	8.1m	23.4m	37.8m
Roadway width	3.6m	14.4m	28.8m
Rated power	$\leq 100 W$	$< 100 W$ $\leq 150 W$	$< 150 W$ $\leq 250 W$
Installation interval	35m (one side)	55m (face to face)	65m (face to face)
Light pole height	10m	12m	12m
Arm length / overhang	2.0m / 1.5m	2.8m / 2.3m	2.8m / 2.3m
Incline angle	10°	12°	12°
Pay rate	0.84	0.84	0.84
Average road surface brightness	$\geq 1cd/m^2$	$\geq 1cd/m^2$	$\geq 1cd/m^2$
Comprehensive bacteria system	$\geq 0.4$	$\geq 0.4$	$\geq 0.4$
Suboptimal sterilization system	$\geq 0.6$	$\geq 0.6$	$\geq 0.6$
Threshold Increment (TI)	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$



$$X = \phi * P = 0.45941 * P [tCO_2eq]$$

$$A = X_2 - X_1$$

$P$  = 전력사용량[MWh]  
 $\phi$  = 한국온실가스배출계수 : 0.45941[tCO<sub>2</sub>eq/MWh]  
 $X$  = 온실가스배출량[tCO<sub>2</sub>eq]  
 $X_1$  = 교체 이전 온실가스배출량[tCO<sub>2</sub>eq]  
 $X_2$  = 교체 이후 온실가스배출량[tCO<sub>2</sub>eq]  
 $A$  = 최종 온실가스감축량[tCO<sub>2</sub>eq]

## 2.2 연구결과

### 2.2.1 PFC 효율

Fig. 8은 DC 400 V에 적용할 최종 회로기판 설계도이다. 본 연구에서는 고전압 저전류 특성을 고려하여 PFC 드라이버를 제작하였고 Yokogawa사의 WT3000E를 통하여 PFC효율을 측정했다. Fig. 9를 보면 120분 평균 96.55%의 PFC효율 결과값을 알 수 있다.

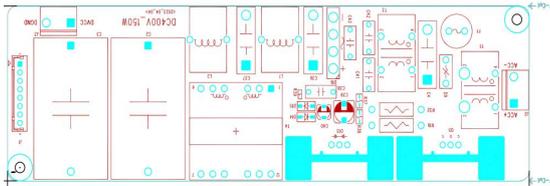


Fig. 8. Circuit board design for 400 V

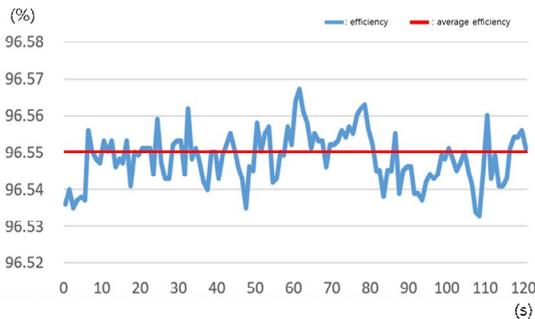


Fig. 9. PFC efficiency analysis results

### 2.2.2 조명광학계 시뮬레이션 결과

Fig. 10은 국내 및 해외 가로등 배광 규격에 범용적으로 적용이 가능성을 판단하기 위하여 DIALux프로그램을 통한 시뮬레이션 진행 결과이다. Table 5는 국내 표준 조건의 결과값이며, Table 6는 해외 표준규격에서 가장 일반적인 TypeII Medium 규격 결과값이다. Table 3, Table 4과 비교를 통해 설계를 통한 Lens가

두 조건 모두 만족을 하는 것을 확인할 수 있다.

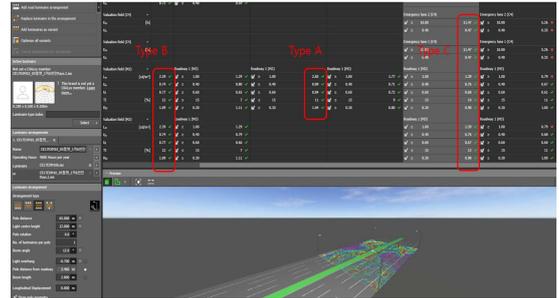


Fig. 10. DIALux lighting optical system simulation

Table 5. Domestic conditions simulation results

	Type "A"	Type "B"	Type "C"
Average road surface brightness	2.85cd/m <sup>2</sup>	2.39cd/m <sup>2</sup>	1.39cd/m <sup>2</sup>
Comprehensive bacteria system	0.89	0.74	0.76
Suboptimal sterilization system	0.84	0.77	0.68
Threshold Increment (TI)	11%	12%	13.5%

Table 6. Overseas conditions simulation results

	Min-Min	Min-Max	Max-Min	Max-Max
Average road surface brightness	6.58cd/m <sup>2</sup>	5.29cd/m <sup>2</sup>	1.75cd/m <sup>2</sup>	1.42cd/m <sup>2</sup>
Comprehensive bacteria system	0.84	0.67	0.74	0.54
Suboptimal sterilization system	0.80	0.75	0.69	0.52
Threshold Increment (TI)	7%	7%	11%	13%

### 2.2.3 최종 배광 곡선 및 광효율 측정

시뮬레이션을 통한 기준 검증을 완료하여 Fig. 11과 같은 등기구 시제품을 제작하여 공인 성적기관에 배광 곡선 패턴과 등기구 광효율을 측정했다. 측정 장비는 FIMACS사의 Neolight3000를 사용했다. Table 7과 같은 측정 조건으로 진행했다. 그 결과 Fig. 12의 배광 곡선 결과가 나왔으며, 광효율 및 기타 결과를 Table 8에 정리했다.



Fig. 11. Measurement samples and measuring equipment

Table 7. Light efficiency measurement conditions

	Measuring conditions
Measuring angle( $\phi$ )	345° / 15°
Measuring angle( $\theta$ )	180° / 5°
Light source stabilization conditions	Test after 30 minutes of continuous lighting
input voltage	AC 200 V / 60Hz
Light distribution type	C type

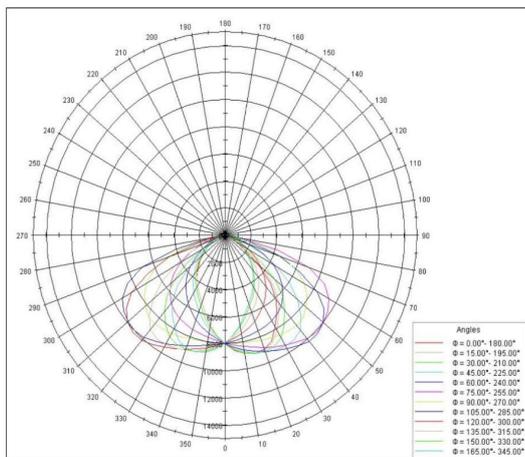


Fig. 12. Measurement samples and measuring equipment

Table 8. Light efficiency measurement results

Test Items	Test Results
Electric light beam ( $lm$ )	24,293
Power ( $W$ )	135.9
Light efficiency ( $lm/W$ )	178.7
Light distribution	Fig. 12

### 3. 결론

본 논문에서는 전 세계적인 탄소중립 선언이 가속화되며 국가별 글로벌사회에 책임 분담에 활용되는 탄소배출권거래 제도에 발맞춰 탄소배출권용 AIoT 고효율 가로등의 성능분석을 진행했다. 효율을 높이기 위하여 AC등기구와 DC등기구의 장점을 살린 효율 96.55%의 PFC 드라이버를 개발하여 적용하였으며, LM 80인증을 받은 LED를 적용했다. 또한 국내 및 해외 도로에 범용적으로 적용할 수 있는 Lens를 설계하여 각 규격 조건 검증을 진행하였으며, 최종 Mock-up을 제작하여 178.7lm/W의 광효율의 결과를 얻었다.

향후 본 연구에서 검증한 등기구는 2.4GHz LoRa통신을 적용하여 전력사용량 및 온도, 기타 Data를 수신할 수 있으므로, 수집된 Data를 활용해 등기구를 통한 탄소배출권 획득이 가능한 System을 구축할 것으로 기대된다.

### REFERENCES

- [1] D. S. Kim & B. H. Led & I. Huh (2022). A Study on Domestic and International Climate Crisis Response Legislation Trends for 'Carbon Neutral 2050'. *Hannam Journal of Law&Technology*, 28(1), 95-137. DOI : 10.32430/ilst.2022.28.1.95
- [2] N. C. Chung (2022). Improvements of the Renewable Energy Legislation for the Realization of 2050 Carbon Neutral. *The Justice*, (190), 5-27. DOI : 10.29305/tj.2022.6.190.05
- [3] J. S. Lee (2021). The Significances and Challenges of the Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth to Cope with Climate Crisis. *Environmental Law Review*, 43(3), 243-277.
- [4] K. H. Choi & S. M. Yoon (2023). Efficiency analysis of the Korean carbon emissions market. *Journal of The Korean Data Analysis Society*, 25(1), 235-247. DOI : 10.37727/jkdas.2022.25.1.235
- [5] W. H. Lee (2018). Carbon Trading Strategies from the Perspective of International Trade. *Electronic trade research*, 16(2), 81-109. DOI : 10.17255/etr.16.2.201805.810.29305/tj.2022.6.190.05
- [6] K. S. Kim & Y. M. Jang (2023). Determinants of Carbon Emissions of SME and Mid-sized Enterprises : Focusing on Companies Granted Credit Guaranteed Loans. *Journal of SME finance*,

43(3), 39-73.

DOI : 10.33219/jsmef.2023.43.3.002

- [7] (2021.06). *Carbon Credit Market Analysis*, Coherent
- [8] N. J. Miller (2015). *FLICKER: Understanding the New IEEE Recommended Practice*. U. S. Department of Energy [Online].  
[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/05/Of22/miller%2Blehman\\_flicker\\_lightfair2015.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/05/Of22/miller%2Blehman_flicker_lightfair2015.pdf)
- [9] *What is Pi Filter : Circuit, Working and Its Applications* Electornics/Projects/Focus [Online].  
<https://www.elprocus.com/pi-filter-circuit-working-and-its-applications>
- [10] B. J. Lee (2017). A Difference Study on the Lighting Simulation of the Illuminance Values from Daylight for the Glass Greenhouse. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 18(8), 350-354.  
 DOI : 10.5762/KAIS.2017.18.8.350
- [11] S. N. (1947). *IES lighting handbook: the standard lighting guide*. Now York : Illuminating Engineering Society.
- [12] N. C. Jung (2022). Improvements of the Renewable Energy Legislation for the Realization of 2050 Carbon Neutral. *The Justice*, (190), 5-27.  
 DOI : 10.29305/tj.2022.6.190.05
- [13] W. Cho (2019). LoRa for LPWA Network: Overview and its Performance Enhancement Technologies. *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, 14(2), 283-288.  
 DOI : 10.22156/JKCS.2018.7.1.001
- [14] J. S. Bae & Y. S. Yoon & E. H. Kwon & T. W. Jeon & Y. G. Lee (2018). Evaluation of Power Generation Efficiency and GHG Reduction Effect in Municipal Waste Incineration Facilities - Enhancement of Waste Heat Recovery Capability -. *KSNRE*, 14(3), 20-29.  
 DOI : 10.7849/ksnre.2018.9.14.3.020
- [15] K. S. Chae & S. P. Lee & S. W. Yoon & 松岡俊文 (2010). Trends of Underground CO<sub>2</sub> Storage Technology for the Large Scale Reduction of GHG. *TUNNEL AND UNDERGROUND SPACE*, 20(5), 309-317.  
 UCI : G704-000521.2010.20.5.006
- [16] D. W. Noh (2011). Estimation of Regional GHG Mitigation Potential and Abatement Cost. *Regional development research*, 43(1), 27-48.  
 UCI : I410-ECN-0102-2012-350-002422275

### 박 승 호(Seung-Ho Park)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국공학대학교 기계공학과(공학사)
- 2022년 2월 : 한국공학대학교 AI제조융합공학과(공학석사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국공학대학교 IT반도체융합공학과(박사과정)
- 관심분야 : 3D기구설계, 데이터케더링, 머신러닝, 탄소중립
- E-Mail : psh9408@tukorea.ac.kr

### 신 성 옥(Seong-Uk Shin)

[정회원]



- 2023년 2월 : 한국공학대학교 나노반도체공학 전공(공학석사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국공학대학교 IT반도체융합학과 전공(박사과정)
- 관심분야 : 마이크로LED, Laser, Lens, DOE, 3D 기구설계, 광학&방열 해석
- E-Mail : seonk6221@gmail.com

### 유 경 선(Kyung-Sun Yoo)

[정회원]



- 2015년 3월 : 한국산업기술대학교 광나노전공(공학박사)
- 2008년 12월 ~ 현재 : Smart Energy Platform E/H 수석연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국산업기술대학교 나노반도체공학과 연구교수
- 관심분야 : 스마트시티, 스마트팩토리, 스마트LED조명, 광학&방열 해석
- E-Mail : yks077@naver.com