DBpia

사용자 요구조도 보장 에너지 효율적 LED 조명 제어 기법

준회원 김 용 호*, 정회원 이 권 형**, 장 갑 석***, 최 용 훈****, 종신회원 김 훈*°

An Energy-efficient LED Lighting Control Scheme with Provision of User Illumination Requirement

Yongho Kim* *Associate Member*, Kwonhyung Lee**, Kapseok Chang***,
Yonghoon Choi**** *Regular Members*, Hoon Kim*° *Lifelong Member*

요 약

세계적으로 온실가스 감축 정책, 전기전자제품 유해물질 사용제한 지침(RoHS: Restriction of Hazardous Substances) 등 환경 규제 제도의 본격 시행으로 전통적인 조명이 친환경 고효율 LED(Light Emitting Diode)로 빠르게 대체되고 있으며, 에너지 효율의 극대화를 위한 효과적인 조명 제어 기술이 요구되고 있다. 본 논문에서는 여러 광원으로 이루어진 LED 조명 광원의 효과적인 제어를 통해 실내의 각 위치에 따라 요구되는 조도를 만족하면서 LED 조명 시스템의 에너지 소비를 개선하는 조명제어 기법을 제안한다. 실내 각 영역별 사용자 유무, 요구조도 수치 등을 반영하여 조명제어 최적화 문제를 구성하고, 이에 관한 해를 도출하여 LED 조명의 개별 광원 광도(luminous intensity)를 효과적으로 조절한다. 이를 통해 제시되는 각 위치별 요구조도를 만족하고, LED 조명 시스템 에너지 소모를 효율적으로 감소시킨다. 모의실험 결과 제안된 방식이 기존 방식 대비 사용자 실내 점유율 증가에 따라 약 40%, 조명과 피조면 사이 높이 변화에 따라 약 24~71%의 소비전력을 절감 효과를 얻음을 보인다.

Key Words : LED Lighting Control, Luminous Intensity, Linear Programming, User Illumination, Energy Saving

ABSTRACT

Due to many recent activities on enforcement of the intensified environmental regulation such as the policies of curbing the greenhouse gas and the Restriction of Hazardous Substances (RoHS), the usage of Light emitting diode (LED) has been rapidly increased and energy efficient management of LED light system is regarded as an important technology to enhance the energy efficiency. In this paper, we propose an energy-efficient control scheme of LED light, being composed of multiple light sources. The proposed scheme controls the intensity of LED light source to minimize the total intensity while providing the quality of lighting service. The intensity of light is assumed to be proportional to power consumption, thus the objective is to minimize the total power consumption. A linear programming problem is formulated to find the optimal intensity of each light source and

※ 본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2011-0005439)과 인천대학교 2011년도 자체연구비 지원을 받아 수행되었음
* 인천대학교 전자공학과 지능형시스템연구실 (kim_yong_ho@incheon.ac.kr, hoon@incheon.ac.kr), (°:교신저자)
** KAIST 정보통신공학과 정보전송연구실 (trabant@kaist.ac.kr), *** 한국전자통신연구원 (kschang@etri.re.kr)
**** Stanford University, Department of Electrical Engineering (yonghoon@stanford.edu)
논문번호 : KICS2011-08-349, 접수일자 : 2011년 8월 13일, 최종논문접수일자 : 2011년 11월 4일

www.dbpia.co.kr

procedure to apply the proposed scheme in the real system is suggested. The performance evaluation results elucidate that the proposed scheme achieves over 20% improvement in power consumption of light intensity in comparison with the conventional dimming control scheme.

Ⅰ. 서 론

세계적으로 에너지 소비의 급격한 증가로 온실가스 감축 등의 친환경 정책과 전기전자제품에 유독성 물질의 사용을 규제한 RoHS (Restriction of Hazardous Substances 등과 같은 환경 규제 제도 시행에 따라 에너지소비 감축과 효율화를 위한 연구개발 필요성이 강조되고 있다[1]. 특히 전체 에너지 소비 중 건물 분야 에너지 소비가 전체의 24% 수준으로 빌딩에너지의 효율적 관리가 에너지 절감에 큰 비중을 차지한다고 알려져 있다[2]. 또한 건물 내 에너지 소비 중 조명이 차지하는 비율이 30% 수준으로 조명의 효율적인 제어는 에너지 소비 절감 및 효율 향상을 위한 매우 중요한 분야로 인식되고 있다[2].

조명에 대한 에너지 절감 기술 분야로는 크게 고효율 광원, 저전력 조명 디밍(dimming) 제어 등에 관한 연구가 진행되고 있다[3]-[7]. 고효율 광원 연구는 조명에서 사용하는 전력을 열 등의 적외선 영역으로 방출하는 비율을 낮추기 위해 광원의 구조와 방열 패키지용 기판을 개발하는 기술을 의미한다. 대표적인 고효율 광원 기술로 LED (Light Emitting Diode)를 들 수 있다. LED 광원은 p-n접합 다이오드 일종의 반도체 소자로 기존 조명에 비해 낮은 소비전력을 소모하고, 수은이나 충전 가스등 인체에 유해한 물질을 사용하지 않아 친환경적이고, 약 10만 시간으로 기존 조명에 비해 매우 긴 수명을 가지고 있다고 알려져 있다[4]. 이로 인해 최근 백열등과 형광등과 같은 기존 광원이 친환경적이고 효율이 좋은 Light Emitting Diode (LED) 광원으로 빠르게 대체되고 있다[3].

저전력 조명 디밍 제어 기술은 조도·재실·온도 감지센서 등의 정보를 기반으로 일정 지역 조명의 밝기를 제어하는 기술을 말한다. 조명의 효과적인 운용이 에너지 절감 및 효율 개선을 위해 중요한 기술로 인식되고 있으며 최근 관련 연구가 큰 관심 속에 진행되고 있다. 우선적으로 실내 사용자가 요구하는 조도를 만족하기 위한 조명의 광도(luminous intensity) 제어에 관한 연구가 진행되었다[5-7]. [5]에서 사용자의 위치에 따라 실내 각 영역에서 요구조도를 달리하여 에너지 소모를 최소화하는 문제를 고려하고 선형계획법 (Liner Programming)에 기반을 두어 조명의 광도를 제어하는 기법이 제안되었다[5]. 그리고 [6]에서 사용자 만족과 에너지 소비에 관한 효용함수 (utility function)를 정하고 이를 최대화하는 광도 제어 기법이 제안되었다[6]. 또한 자연광과 블라인드의 실내 조도에 미치는 영향이 반영된 광도 제어 기법이 제안되었다[7]. 이러한 대부분의 에너지 효율 향상을 위한 조명 제어에 관한 기존 연구에서는 조명이 단일 광원으로 고려되었다. 그러나 고효율 에너지 광원으로서 최근 보급이 확대되고 있는 LED 조명의 경우 다수 광원의 배열로 조명이 구성되어 이에 보다 적합하고 효율적인 조명제어 기법에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 사용자의 요구조도를 만족하면서 LED 조명 시스템 에너지 효율 극대화를 위한 LED 조명 개별 광원의 광도를 제어하는 방안을 제안한다. 제안 기법은 먼저 실내 각 영역별로 사용자 유무 등에 따라 요구조도를 만족하면서 LED 조명 시스템에서 소비하는 에너지를 최소화하는 최적화 문제를 구성한다. 이어 최적화 문제의 해를 도출하여 각 위치별 요구조도를 만족하고 LED 조명 시스템 에너지 소모를 효율적으로 절감하는 LED 광원의 광도를 제어한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 LED 조도 시스템 모델을 제시한다. 3장에서는 기법을 제안함과 더불어 동작 절차를 설명하고, 4장에서는 성능분석 환경을 제시하고 제안기법의 성능을 비교하고 분석한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구에 대한 결론을 제시한다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문은 그림 1과 같이 사용자가 위치하는 피조면에서 LED 조명을 통해 사용자 요구 조도를 만족시키는 조명 시스템을 고려한다. 피조면은 동일 크기의 정사각형이고 사용자마다 각기 다른 하나의 피조면 영역에 위치함을 가정한다. 사용자가 점유하는 피조면 정보가 사용자 유무 인지 센서 등을 통해 오류 및 전송지연 없이 가능함을 가정한다. LED 조명은 실내 천장에 고르게 위치하며, 각 LED 조명에는 다수의 광원이 일정한 간격으로 균일하게

www.dbpia.co.kr

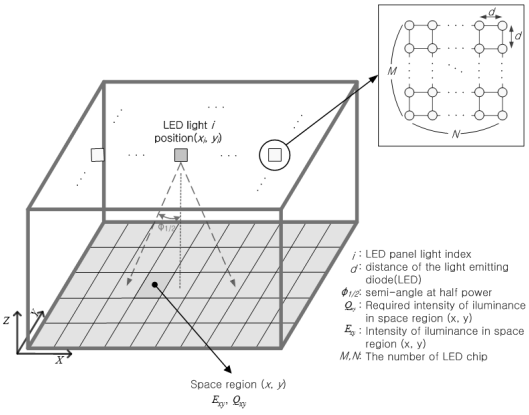

그림 1. LED 조명 시스템 모델

자리하고 있음을 가정한다. 실내 바닥은 사용자가 위치하는 피조면으로 그리드 형태로 영역을 구분한다.

LED 조명이 $M\times N$ 배열 광원으로 구성되고 M, N 이 짝수인 경우, i번째 LED 조명에 의한 피조면 (x,y)에서의 조도 e^i_{xy}는 다음과 같이 계산된다[8].

$$e^i_{xy}=z^{l+1}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}p^i_{mn}[(x-x_i-(m-\frac{M+1}{2})d)^2 +(y-y_i-(n-\frac{N+1}{2})d)^2+z^2]^{-\frac{l+3}{2}} \quad (1)$$

식 (1)에서 x_i, y_i는 i번째 LED 조명의 X축, Y축 좌표이며, z는 LED 조명과 피조면 (x,y)간 높이이다. p^i_{mn}는 i번째 LED 조명의 m번째 행, n번째 열에 위치한 LED 광원의 광도를 의미한다. l은 Lambertian emission의 차수이며 다음과 같이 계산된다[4].

$$l=-\frac{\ln 2}{\ln(\cos\phi_{1/2})} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\phi_{1/2}$는 LED 조명의 방사각으로 중심각으로부터의 최대 광속이 절반이 되는 지점까지의 각도를 의미한다.

각 피조면에서의 조도는 여러 LED 조명으로부터의 조도의 합으로 계산된다[6]. 따라서 피조면 (x,y)에서 I개의 모든 LED 조명에 의한 조도 E_{xy}는 다음과 같다.

표 1. 한국 산업규격 실내 조도 기준

구분	사용용도	요구조도 Q (lx)
학교	강당, 도서관	200
	교실, 실험실	400
	정밀실험, 제도	1000
주택	주방, 거실	200
	공부, 독서	400
사무실	회의실	200
	키보드 작업	400
병원	병실	200
	수술실, 응급실	1000
상점	백화점 진열대	1000

$$E_{xy}=\sum_{i=1}^{I}e^i_{xy} \quad (3)$$

사용자의 실내 점유 비율은 전체 공간의 면적 대비 사용자 위치 피조면 면적의 합의 비율로 정의하며, 실내 점유 비율 변화를 감안할 수 있도록 단일 피조면 대비 전체 공간의 면적이 충분히 큰 상황을 가정한다. 즉 실내 전체 공간이 충분히 커 사용자가 극히 일부 지역에 위치하는 경우에서부터 사용자 수 증가 등에 따라 사용자가 위치하는 피조면 영역이 전체 공간에 이르는 경우를 고려한다.

사용자가 요구하는 조도 Q 는 학교, 주택, 사무실, 병원, 상점 등 실내 공간의 사용자 용도에 따라 다르게 결정된다. 일반 교실에서 필요한 적정 조도는 약 400lx 정도이며, 공장, 수술실 등의 정밀 작업을 하는 경우 이 보다 높은 조도를 필요로 한다. 또한 주택의 응접실, 거실 등은 이보다 낮은 적정 조도를 필요로 한다. 표 1에 한국 산업규격 KS-A-3011 조도 기준을 정리한다[9]. 이와 같이 실내 업무 환경과 사용자의 유무 및 위치에 따라 요구조도가 다르며, 이를 만족하는데 조명의 효과적인 제어가 요구된다.

Ⅲ. 효율적 LED 조명제어 기법

본 장에서는 사용자 요구조도를 만족하면서 LED 조명 시스템의 에너지 소비를 최소화하는 조명제어 기법을 제시한다. LED 광원의 소비전력이 LED 광원의 광도에 비례함을 가정한다[5]. 이 때 실내 사용자 요구조도를 만족하면서 전체 LED 조명의 소비

www.dbpia.co.kr

전력의 합을 최소로 하는 최적화 문제**(P)**를 고려하여 조명 시스템 에너지 소비를 최소화 하며, 다음과 같이 표현된다.

$$\textbf{(P)} : \text{minimize} \sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} p_{mn}^{i} \qquad (4)$$

$$\text{subject to} \quad E_{xy} \geq Q_{xy}, \quad p_{\min} \leq p_{mn}^{i} \leq p_{\max} \qquad (5)$$

식 (5)에서 $p_{\min}$과 $p_{\max}$은 각각 LED 조명 광원의 최소, 최대 광도를 의미한다. 또한 피조면 (x, y)에서의 사용자의 요구조도 Q_{xy}는 사용자 유무에 기반하여 다음과 같이 정한다.

$$Q_{xy} = \begin{cases} Q & \text{사용자 있는 경우} \\ 0 & \text{사용자 없는 경우} \end{cases} \qquad (6)$$

식 (6)에서 Q 는 사용자가 있는 경우 제공해야 하는 적정 조도이다. 사용자가 없는 경우 요구조도 수치를 0 으로 하여 불필요한 에너지 소모를 방지하도록 한다.

실내 구조와 사용자 유뮤, 광원의 요구 조도, 광원의 광도 범위 등의 정보가 주어지고 식 (1)의 조도 전달함수를 적용하면, 문제 (P)는 실내 모든 영역에서 요구 조도를 만족하고 광원 광도의 합을 최소로 하는 각 광원의 광도를 구하는 선형계획법 문제가 되며, CVX 등 상용화 도구를 활용하여 해의 도출이 가능하다[10]. 문제 (P)의 해를 반영하여 i번째 LED 조명의 개별 광원의 광도에 대한 최적 제어가 가능하며, 이를 위한 시스템 전체적인 동작은 그림 2와 같은 3단계의 흐름도로 구성될 수 있다.

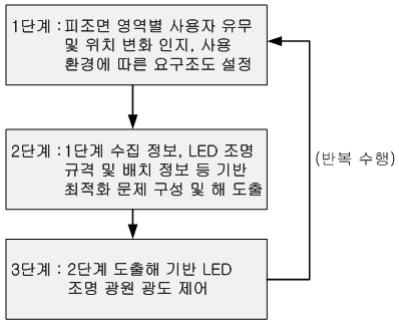

그림 2. LED 조명제어 기법 흐름도

Ⅳ. 성능분석

그림 1과 같은 LED 조명 시스템에서 사용자가 위치하는 영역의 요구조도를 만족하기 위한 광원제어 기법의 에너지 소비를 분석한다. 조명의 광도 사용량이 조명에서 소모되는 전력에 비례함을 가정하고, 이를 성능분석 지표로 삼는다. 제안 기법 외에 LED 조명별 동일 광도를 적용하는 방법에 대한 성능을 제시하여 소비전력 절감 성능을 비교 분석한다.

표 2에 모의실험 환경에 대한 파라미터를 나타내었다. 가로 5m, 세로 5m의 피조면에 피조면 격자 간격을 1m로 가정하여 사용자가 위치할 수 있는 피조면 영역이 총 25개인 조명 시스템을 고려한다. 실내에 4개의 LED 조명이 균일하게 배치되고, 10×10 배열의 조명 광원이 6cm간격으로 이격되어 구성되어 있음을 가정한다. LED 면광원의 방사각이 60°이고, 광원 광도의 가변 범위는 0~44.56cd (140lm) 이다. 각 피조면에서 수신되는 조도는 조명기구에 의한 것이고 식 (1)과 같이 표현됨을 가정한다. 또한 조명기구의 제어를 위해 수집되는 정보에 대한 오류가 없으며 사용자가 임의의 피조면에 위치함을 가정한다. 그리고 일정시간 이상 사용자가 동일 피조면에 충분히 긴 시간 동안 위치함을 가정한다.

그림 3은 전체 피조면 면적(개수) 대비 사용자가 위치하는 피조면 면적(개수)의 비율을 의미하는 사용자의 실내 점유 비율 변화에 따른 전체 LED 조명의 광도 사용량을 도시한 것이다. 피조면과 조명 높이를 2m로 하고, 200lx, 400lx 등 2가지 요구조도에 대한 결과이다. 사용자의 실내 점유 비율이 증가함에 따라 0이 아닌 요구조도를 가지는 면적이 증가하여 두 기법 모두 LED 조명의 광도 사용량이 증가하는 추세를 보인다. 또한 제안 기법이 기존기

표 2. 모의실험 파라미터

Parameters	Value
실내 가로, 세로	5, 5 (m)
피조면 격자 간격	1 (m)
LED 조명	4 (개)
LED 조명 광원의 수 (행×열)	10×10 (개)
LED 광원 방사각	60 (°)
LED 광원 광도 범위	0~44.56 (cd)
LED 광원 간격	6 (cm)
모의실험 반복횟수	10,000

www.dbpia.co.kr

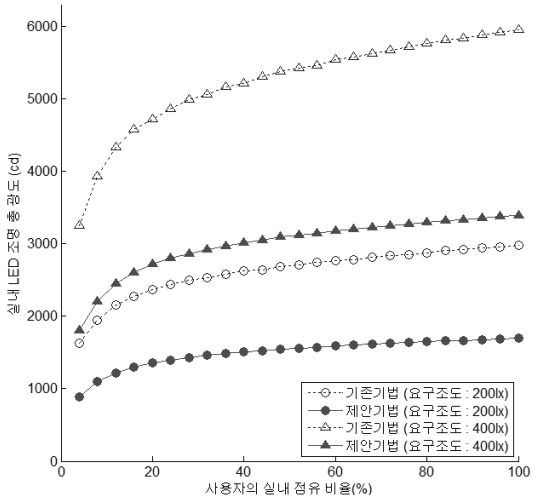

그림 3. 사용자 실내 점유 비율 변화에 따른 조명의 광도 비교

법에 비해 각 요구조도에서 모두 약 40%의 LED 조명 소비전력 절감 효과가 있음을 보인다. 이는 조명단위의 광도 제어에 비해 광원단위의 광도 제어를 통해 더 나은 최적 해를 도출하여 적용한 이득으로 볼 수 있다.

그림 4는 LED 조명과 피조면 사이 높이 변화에 따른 전체 조명의 광도 사용량의 결과를 보여 준다. 사용자 실내 점유율이 100%이고 200lx, 400lx 각각의 요구조도에 대한 성능 결과이다. 조명과 피조면 간 높이가 증가함에 따라 요구조도를 만족시키기 위해 두 기법 모두 LED 조명 광도 사용량이 증가하는 경향을 보인다. 조명과 피조면 사이 높이 변화

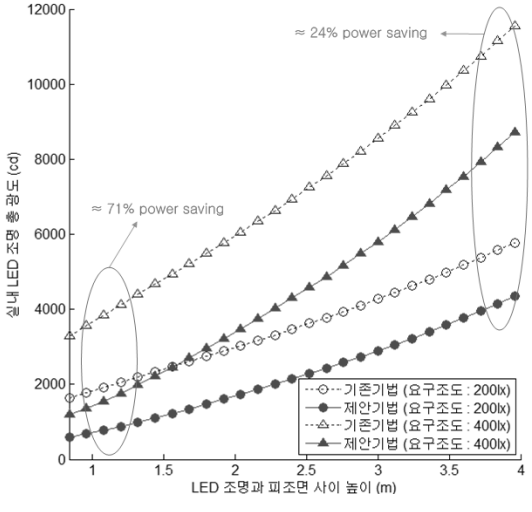

그림 4. 조명과 피조면 사이 높이 변화에 따른 광도 비교

에 따라 제안기법이 기존기법에 비해 약 24~71%의 소비전력 절감 효과가 있음을 보인다. 조명과 피조면간 거리가 상대적으로 가까운 경우 제안기법의 절감율이 높게 나타난다. 이는 조명이 피조면에 가까울수록 개별 광원이 조도에 미치는 영향이 상대적으로 커지므로 LED 조명의 개별적인 광원 광도 제어가 조명별 일정 광도 제어 대비 성능 개선 정도가 크기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 최근 LED 조명의 보급과 시장이 확대됨에 따라 이를 이용한 조명분야 에너지 효율 향상에 목적을 두었다. 이를 위해 실내 세부 영역별 사용자 유무에 따라 요구되는 실내 조도를 최소 광도를 사용하여 만족할 수 있도록 다수의 광원으로 이루어진 LED 조명의 개별 광도를 조절하는 LED 조명제어 기법을 제안하였다. 실내 전체 피조면 면적이 사용자가 위치하는 단일 피조면 면적에 비해 충분히 큼을 가정하고, 사용자 피조면 위치가 고정된 조명 시스템 환경을 고려하였다. 모의실험 결과 제안된 방식이 기존 방식 대비 사용자 실내 점유율 증가에 따라 LED 조명의 소비전력을 약 40%, 조명과 피조면 사이 높이 변화에 따라 약 24~71%의 소비전력 절감 효과를 보였다. 향후 보다 실제적이고 안정적인 조명 시스템 구축을 위한 사용자 이동 모델, 균제도 요구 성능 등을 반영한 연구 진행이 요구된다.

참 고 문 헌

〔1〕 강정모, “미국의 LED 조명 관련 정책동향,” 녹색기술정보포털, 10월 2010년.

〔2〕 이원희, “해외 에너지 효율화 기술과 정책 동향,” SERI 경제 포커스, 194, 5월 2008년.

〔3〕 문영부, “LED BLU용 고출력 LED 산업기술 전망,” 2011 LED 기술 및 융합시장 동향 세미나, pp.21-39, 4월 2011년.

〔4〕 이권형, 강태규, 박현철, “가시광 파장 대역을 고려한 무선통신 채널 특성 연구,” *한국통신학회지*, 26(5), pp.23-29, 4월 2009년.

〔5〕 Yao-Jung Wen, Agogino and A.M., “Wireless networked lighting systems for optimizing energy savings and user satisfaction,” *Wireless Hive Networks Conference 2008 IEEE*, pp.1-7,

www.dbpia.co.kr

Aug., 2008.
〔6〕 V. Singhvi, A. Krause, C. Guestrin, James H. Garrett, Jr., and H. S. Matthews, "Intelligent light control using sensor networks," *in Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems* San Diego, California, pp.1-7, Nov., 2005.
〔7〕 Park K.-W. and Athienitis A.K., "Workplane Illuminance Prediction Method for Daylighting Control Systems," *Journal Solar Energy*, Vol.75(4), pp.277-284. Oct., 2003.
〔8〕 이권형, "LED 조명을 이용한 실내 가시광 무선통신에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위논문, 2011.
〔9〕 한국산업규격, KSA3011, 조도기준.
〔10〕 M. Grant and S. Boyd, CVX User's Guide, Apr., 2011, (http://cvxr.com/cvx)

김 용 호 (Yongho Kim) 준회원

2010년 2월 인천대학교 전자공학과 학사
2010년 2월~현재 인천대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 그린 IT 융합, 센서 네트워크

이 권 형 (Kwonhyung Lee) 정회원

2000년 2월 명지대학교 전기전자공학부 학사
2003년 2월 ICU 공학부 석사
2011년 8월 KAIST 정보통신공학과 박사
2003년~2005년 삼성전자 반도체 총괄 메모리 사업부 Flash 메모리 개발팀 연구원
2008년~2009년 ETRI 위촉연구원
2011년~현재 LG전자 CTO AE연구소 선임연구원
<관심분야> 가시광 무선통신, 빌딩 관리 시스템, 센서 네트워크

장 갑 석 (Kapseok Chang) 정회원

1994년 2월 한국항공대학교 공학사
1999년 8월 KAIST 공학석사
2005년 8월 KAIST 공학박사
2005년~현재 ETRI 선임연구원
2010년 11월 Marquis Who's Who 인명사전 등재
<관심분야> 릴레이 시스템 최적화, Synchronization, Network Coding, 간섭제거, MIMO 송수신, 스마트 안테나

최 용 훈 (Yonghoon Choi) 정회원

1999년 2월 성균관대학교 공학사
2003년 2월 KAIST 공학석사
2010년 8월 KAIST 공학박사
1999년~2007년 정보통신부
2001년 ETRI 위촉연구원
2010년~현재 Stanford University 박사후연구원
<관심분야> 무선자원관리, 시스템최적화, 인지무선, 센서네트워크, 테라헤르츠통신

김 훈 (Hoon Kim) 종신회원

1998년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 학사
1999년 2월 ICU 공학부 석사
2004년 2월 ICU 공학부 박사
1998년~2001년 ETRI 위촉연구원
2004년~2005년 삼성종합기술원 책임연구원
2005년~2007년 정보통신부 사무관
2007년~2008년 Stanford Univ. 박사후연구원
2008년~현재 인천대학교 조교수
<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 펨토셀 네트워크, 무선자원관리

www.dbpia.co.kr