

무선 네트워크의 전력 효율적인 통신을 위한 기지국 제어 기법 조사 및 분석

장 건 희*, 오 준 석*, 하 태 윤*, 이 동 현*, 이 정 화*, 이 윤 성*, 이 충 현*, 조 성 래*

Investigation and Analysis on Base Station Switching Technique for Energy Efficient Communication in Wireless Networks

Gunhee Jang*, Junsuk Oh*, Taeyun Ha*, Donghyun Lee*, Jeonghwa Lee*,
Yunseong Lee*, Chungyun Lee*, Sungrae Cho*

요 약

본 연구에서는 기지국의 수면 상태 제어를 통한 무선 네트워크에서의 총 전력 소모량을 감소시키는 연구에 대한 조사 및 분석을 진행한다. 먼저 기지국과 연결되는 사용자의 제어를 통한 전력 소모량을 감소시키는 연구를 조사하며, 나아가 기지국의 특정 시간에서의 비활성화를 통한 에너지 효율 향상을 달성하는 다양한 연구에 대한 분석을 진행한다. 마지막으로, 분석된 연구들을 기반으로 향후 연구의 방향을 제시한다.

Key Words : Base station control, Base station sleep mode, Energy efficiency, Wireless network, Power control

ABSTRACT

In this paper, we investigate and analyze the researches to reduce the total power consumption in wireless network by controlling the sleep status of base stations. First, we investigate the studies on reducing power consumption through user control connected to each base station, then we analyze the researches to improve energy efficiency by switching the base station into deactivate status. Finally, we suggest the direction of future research from the analyzed studies.

1. 서 론

4차 산업혁명이 도래하고 최근 5세대 이동통신이 상용화됨에 따라, 무선 이동통신의 규모는 더욱 커지고 있으며 네트워크 사용자의 트래픽 또한 큰 폭으로 증가하고 있다. 최근에는 특히 다양한 대용량 콘텐츠

들의 등장으로 무선 네트워크의 트래픽이 증가하고 있는데, 이를 안정적으로 제공하기 위해 이동통신사에서는 다수의 기지국을 보유 및 활용하기 위해 노력하고 있다. 이는 사용자들에게 고수준의 통신 상태를 제공할 수는 있으나, 경제적 문제와 환경 문제를 고려할 필요성을 야기하고 있다. 따라서 최근에는 환경 친화

* 본 연구는 한국 전력 공사의 2019년 선정 기초연구개발 과제(R19X001-41) 지원 및 중앙대학교 관리로 수행되었습니다.

※ 본 연구는 한국 전력 공사의 2019년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음. (과제번호 : R19X001-41)

• First Author : Chung-Ang University Department of Computer Science and Engineering, ghjang@uclab.re.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Chung-Ang University Department of Computer Science and Engineering, srcho@cau.ac.kr, 종신회원

* Chung-Ang University Department of Computer Science and Engineering, jsoh@uclab.re.kr, 학생회원; tyha@uclab.re.kr, 학생회원; dhlee@uclab.re.kr, 학생회원; Jeonghwa@uclab.re.kr, 학생회원; yslee@uclab.re.kr, 학생회원; chlee@uclab.re.kr, 학생회원

논문번호 : KICS202101-016-A-RN, Received January 15, 2021; Revised January 20, 2021; Accepted January 21, 2021

적 시스템을 구성하기 위해 전력 효율적인 통신을 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다¹¹. 이와 관련하여 최근 분석에 따르면¹² 무선 네트워크로 인해 발생하는 이산화탄소의 양은 전체 발생량의 2%에 달하고, 특히 무선 네트워크 모델에서 총 에너지 소모량의 70-80%는 기지국 구동 시 소모된다고 한다^{3,41}. 따라서 최근에는 기지국에서 소모되는 전력량을 최소화하는 것을 목표로 하는 연구들이 진행되고 있으며, 본 논문에서는 이러한 논문들에 대한 조사 및 분석을 진행한다. 더불어 조사된 기지국 제어 기법들을 기반으로 수행할 수 있는 연구에 대해 분석을 진행한다.

II. 기지국 제어 기법

2.1 기지국 전력 소모량 최적화 기법 분석

기지국에서의 전력 소모량을 제어하는 다양한 기법에 대한 조사에 앞서 실제 모바일 데이터 사용량 및 예측 결과에 대해 분석을 진행하였으며⁵, 이는 그림 1에서 한 달 간 사용량을 기준으로 확인할 수 있다. 그림 1에서 확인 가능하듯 월간 모바일 데이터 사용량은 매 해 크게 증가하고 있으며, 2022년도에는 77 Exabyte의 사용량이 예상된다. 또한, 2022년도까지 IPv6에 연결되는 모바일 기기 수에 대한 분석 및 예측 결과를 그림 2에서 확인할 수 있다. 2017년도에 IPv6에 연결된 모바일 기기의 개수는 40억개에서 2022년도에 94억개에 도달할 것으로 해당 기간 2배 이상의 증가량이 예상된다. 이렇듯 모바일 데이터 사용량의 큰 증가에 따라, 앞서 소개된 바와 같이 대부분의 연구에서는 기지국에서 소모되는 전력을 최소화하는 것

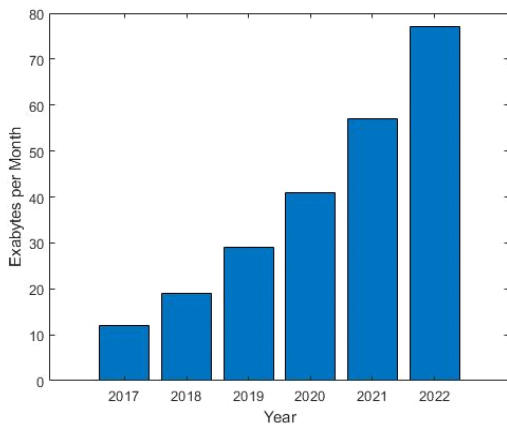


그림 1. Cisco의 2022년도까지의 월간 모바일 데이터 사용량 예측
Fig. 1. Cisco forecasts of mobile data traffic by 2022

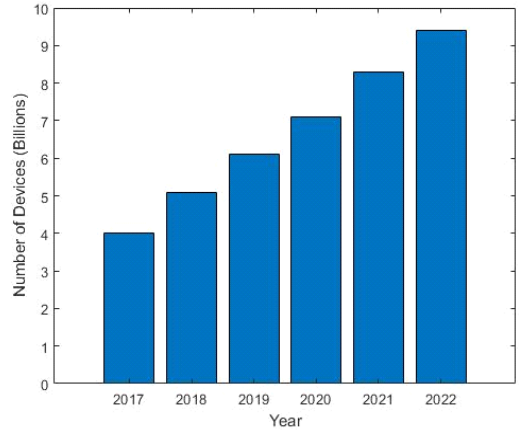


그림 2. Cisco의 2022년도까지의 IPv6 연결 모바일 기기 수 예측
Fig. 2. Cisco forecasts of number of mobile devices connected to IPv6 by 2022

을 목표로 한다.

먼저, 기지국의 전력 소모량을 줄이기 위한 대표적인 방법으로 기지국과 사용자 간의 통신에서 사용자 연결성의 최적화를 진행하거나⁶, 기지국의 트래픽을 분산하여 각 통신의 최적화를 진행하는 방법⁷에 대한 간단한 분석을 진행한다. 사용자 연결성의 최적화를 진행하는 경우⁶, 해당 연구에서는 소형 셀 (Small-cell) 기지국에서 전통적 전력망과 신재생 에너지를 고려하면서 사용자와의 연결성을 고려한다. 신재생 에너지를 효율적으로 활용하기 위한 사용자 알고리즘에 대한 제안 분석을 진행하며, 이후 각 기지국의 전력 소비를 최소화하기 위한 최적의 대역폭을 할당하는 기법을 제시하였다. 이러한 기법의 제시를 통해 총 에너지 비용을 줄임과 동시에 신재생 에너지 활용의 효율성을 증가시킬 수 있도록 하였음이 증명되었다. 다음으로 기지국의 트래픽을 분산하는 방법⁷, 기지국 밀도가 높은 네트워크에서 소형 셀 기지국의 용량을 최대한 활용하도록 하여 트래픽 부하를 분산시킬 수 있다. 해당 연구에서 제안된 트래픽 부하 분산 프레임 워크에서는 지연 시간 등의 네트워크 성능과 에너지의 가용성을 고려하여 사용자 연결성을 최적화한다. 이후 각 기지국에서는 네트워크 성능과 전력 소비 간의 균형을 조절하며, 동시에 트래픽을 효율적으로 분산함을 통해 각 사용자의 통신 오버헤드를 크게 감소하도록 하여 결과적으로 소모 전력이 절약되었음이 증명되었다.

무선 네트워크 시스템의 전력 소모량을 줄이기 위해서는 앞선 연구들에서 소개되었듯 자원의 최적화를

표 1. 최근 연구에서 사용한 기지국 종류 및 트래픽 처리를 위한 시간척도
Table 1. Base station type and time scale for traffic processing used in recent research

	BS Type	BS energy/power model	Traffic Type	Timescale
[16]	Regular BS	Fixed value	Poisson arrival UEs, exponential file size	Slow: duration in objective function, Fast: update of traffic pattern
[18]	Macrocell BS and Small cell BS	MBS: Fixed + load dependent, SBS: Fixed for ON and OFF	Uniform and non-uniform PPP-based user distribution	BS ON/OFF switching
[19]	Small cell BS	Fixed value	Uniform and non-uniform random user distribution	Slow: BS ON/OFF switching, Fast: user association
[27]	Small cell BS	Four modes: ON (100%), Standby (50%), Sleep (15%), and OFF (0%)	PPP-based user distribution	Slow: BS ON/OFF switching, Fast: Time required to wake up

통해 기지국에서 소모되는 전력량을 줄이는 것이 대표적이다. 하지만 기지국의 전력 소모량을 줄인다는 개념을 강하게 이용하기 위해, 최근에는 표 1에서와 같이 필요에 따라 기지국을 수면 상태로 변경하는 연구가 주목받고 있다. 따라서 본 연구에서는 기지국의 상태를 제어하는 다양한 기법에 대해 조사 및 분석을 진행한다.

2.2 기지국 수면 상태 제어 기법 분석

기지국의 수면 상태는 간단하게는 활성화 상태와 비활성화 상태로 나눌 수 있다⁸⁾. 그리고 이 상태를 제어하는 기법은 간단하게 ‘현재 필요 없는 기지국을 비활성화한다’ 라고 설명될 수 있다. 이러한 개념을 이용한 기지국 제어 기법의 일반적인 흐름은 그림 3에서 확인할 수 있다. 대부분의 기지국 제어 기법에서 특정 조건을 정의하기 위해 사용자의 통신 서비스 품질

(Quality of Service, QoS) 이나 트래픽이 충분히 처리되는가 등의 정보를 이용한다. 정의된 조건이 충족되는 특정 셀의 경우 기지국을 수면 상태로 정의할 수 있도록 하는 기법이 제시되며, 다양한 연구들에서는 해당 조건을 충족할 수 있도록 하기 위해 기기 간 통신 (Device-to-device, D2D) 혹은 유저 간 릴레이 (Relay) 기법을 이용하기도 한다. 이를 적용하여 실제로 무선 네트워크의 성능을 보장하면서 전력 소모량을 감소시키기 위해, 다양한 지표를 활용할 수 있도록 하는 분석이 진행되었다^{9,10)}. 해당 연구들에서 분석된 기법들에 따르면 사용자의 QoS 요구사항을 보장하면서 최대한의 기지국 수면 상태를 유지하도록 하며, 사용자의 이동성이나 트래픽 등 정보에 기반한 전략이 채용될 수 있음이 분석되었다.

이러한 이론을 실제로 구현하기 위해 진행된 연구에서는^{11,12)}, 수면 모드를 정의하여 이를 효율적인 방법으로 제어할 수 있는 기법이 간단하게 제시되었다. 먼저 단일 네트워크 셀에서 기지국의 수면 모드를 정의한 후 시스템이 비어있는 경우 기지국을 수면 모드로 운용하면서, 정의된 N명의 사용자가 모이면 깨어나는 방식의 기법이 제시되었다¹¹⁾. 시스템에서 소비되는 총 전력량과 평균 지연을 분석하며, 이를 기반으로 정의된 변수 N과 전송 전력이 해당 상관관계에 놓인 에너지와 지연시간에 대한 영향도를 분석한다. 그 결과를 통해 최적의 상관관계 상태를 유지할 수 있는 상태를 결정하며, 이를 통해 최적의 에너지 효율성을 가지는 시스템을 연구하였다. 혹은 네트워크 전체적 측면에서 셀이 커버되지 못하는 영역을 지우기 위해 활성화된 기지국의 수와 선택을 효율적으로 진행하는 기법 또한 제시되었다¹²⁾. 해당 연구에서는 사용자가

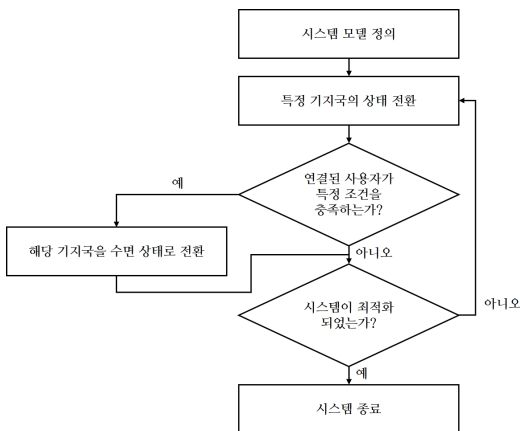


그림 3. 일반적인 기지국 제어 기법의 흐름
Fig. 3. Flow of general of BS switching methods

요구하는 최소 데이터 속도 품질을 유지할 수 있도록 하는 최소한의 기지국 수를 먼저 결정하며, 이를 통해 에너지의 소모량을 최소화하는 것을 목표로 한다.

앞서 분석된 기법들에서는 기지국 상태 제어를 통한 전력 소모량 감소 분야에서의 기본적인 개념을 이용하였는데, 실제 모델로의 적용에는 제약조건 등에 있어서 한계가 존재하며 이를 위해서는 사용자의 밀도나 이동성, 트래픽 등 더 많은 요소들이 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 아래의 하위 섹션에서 시스템의 트래픽을 고려하며 기지국 수면 상태 제어를 진행하는 기법, 사용자의 이동성이나 밀도 등에 대한 정보를 분석하여 기지국 제어 기법으로 확장하는 기법, 이중 통신 환경에서의 사용자 트래픽 제어 등을 통한 기지국 제어 기법, 기지국의 하드웨어적인 요소를 분석하여 수면 깊이 구분에 따른 기지국 제어 기법과 마지막으로 기계학습을 적용하여 기지국 수면 모드를 정의하는 기법들에 대한 분석을 진행한다.

2.2.1 트래픽 기반 기지국 수면 전략

먼저 시스템 트래픽을 계산의 기준으로 이용하여 기지국을 효율적으로 전환하여 총 전력 소모량 감소를 목표로 하는 연구¹³⁻¹⁷⁾에 대한 분석을 진행한다. 이를 효율적으로 진행하기 위해, 표 2와 같이 기지국의 하드웨어적인 요소들의 각 전력 소모량을 분석한 후에 시스템에 접목할 수 있다¹³⁾. 이후 시스템에서 트래픽 부하의 변동에 따라 에너지 소모를 유동적으로 조절하는 알고리즘이 제시되었는데, 이중 통신 시스템에서 활성 사용자의 검출, 코어 네트워크에 의한 기지국 활성화가 중심적으로 다루어진다. 다음으로, 비슷한 연구에서 기지국 상태를 전환할 때 발생하는 비용을 고려한 연구¹⁴⁾가 존재한다. 해당 연구에서는 먼저 활성화할 기지국의 집합과 동시에 트래픽을 충족할 수

있는 전송 전력의 수준을 공동으로 결정함으로써 이 과정에 발생하는 전환 비용을 계산하며 총 에너지 비용을 최소화한다. 또한, 모든 사용자의 트래픽에 따라 서비스를 충분히 제공할 수 있도록 하는 최대 기지국 수를 결정하는 기법¹⁵⁾이 제시되었다. 해당 연구에서는 최대 트래픽 시간에서의 기지국 수를 결정한 후 해당 기지국을 가동하고, 유휴 기간에서는 이들 선택된 기지국들 중 일부만을 활성화 상태로 유지하며 나머지 기지국을 수면 상태로 유지하는 기법을 제시하였다. 이 전략을 통해 밀도가 높은 지역에서는 최대 53%, 밀도가 낮은 지역에서는 최대 23%의 에너지 절약이 달성됨이 증명되었다. 그 외에도, 트래픽을 고려하면서 기지국 제어에서의 계산 복잡성을 고려한 기법¹⁶⁾이 제시되었다. 해당 연구에서는 유저가 가장 강한 신호를 가지는 기지국과의 연결 후 기지국의 상태 전환에 대한 요청 및 확인 작업을 거쳐 해당 기지국의 제어를 진행한다. 이는 전체 시스템에서 적용되며, 이때 평균 트래픽 비용과 기지국의 배치에 따라 에너지 절약의 정도가 달라짐이 분석되었고 최대 80%까지 에너지 절약이 가능하다는 것이 분석되었다. 마지막으로, 전체 시스템을 M/G/1/K 큐로 구성하여 기지국의 수면 상태를 정의하는 연구¹⁷⁾가 존재한다. 해당 연구에서는 총 3가지의 기지국 수면 전략을 제시하였는데, (1) 각 기지국이 자체 실시간 트래픽 부하에 따라서 활성 모드와 수면 모드를 전환하는 독립적 방식, (2) 선택된 기지국이 장기 수면 상태로 전환되고 트래픽의 수면 기지국에서 다른 활성화된 기지국으로 전환되는 협력적 방식, 그리고 (3) 일부 기지국이 장기 수면 상태로 전환되며 다른 기지국이 실시간 트래픽 부하에 따라서 모드를 전환하는 하이브리드형 방식이 제시되었다.

2.2.2 사용자 정보 기반 기지국 수면 전략

위와 같이 시스템의 트래픽을 기준으로 하는 기지국 제어 기법 외에도, 사용자의 밀도나 이동성 등의 정보를 분석하여 에너지 효율성을 높이는 것에 집중하는 연구¹⁸⁻²¹⁾가 존재한다. 먼저, 사용자의 균일도에 대한 분석을 통해 이중 통신 시스템에서 전력 소모량을 최소화 하기 위한 연구가 존재하는데¹⁸⁾, 사용자가 균일하다고 판단되면 그림 4와 같이 매크로 셀 (Macro-cell) 기지국과의 거리를 계산하여 그 기준과의 비교를 통해 소형 셀 기지국의 상태를 제어하는 기법을 제시하였다. 사용자가 균일하지 않은 경우에는 각 소형 셀 기지국에서의 사용자 밀도를 고려하여 해당 기지국에 대한 운용 여부를 결정한다. 해당 기법

표 2. 소형 셀 기지국의 각 세부 하드웨어적 요소에서의 전력 소모량 분석
Table 2. Analysis of power consumption for each hardware component in small cell base station

Hardware Component	Power Consumption (W)
Microprocessor	1.7
Associated Memory	0.5
Backhaul Circuitry	0.5
FPGA	2.0
Associated Memory	0.5
Other Components	1.5
RF Transmitter	1.0
RF Receiver	0.5
RF Power Amplifier	2.0

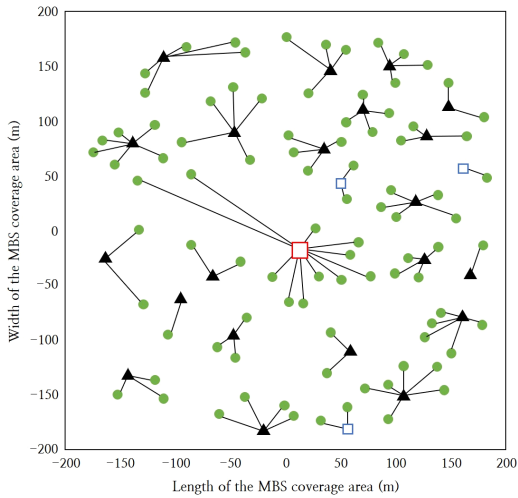


그림 4. 사용자와 기지국 간 거리 관계
Fig. 4. Distance relationship between user and base station

외에도, 사용자와 기지국 상태의 연관을 정수 프로그래밍 문제로 변환하여 에너지 효율을 최대화하기 위한 기법을 제시하는 연구¹⁹⁾가 존재한다. 이후 해당 연구에서는 게임 이론적 접근을 통해 사용자의 입찰 전략과 비용을 공식화하여, 분산 방식을 통한 사용자 자원 할당 및 기지국 제어 기법을 제시하였다. 동시에 해당 게임이 내시 균형 (Nash Equilibrium)에 도달함을 증명하며, 이러한 과정에서 에너지 효율성이 최대화된다는 것이 증명된다. 또한, 사용자의 이동성을 고려하는 연구²⁰⁾가 존재한다. 사용자의 이동성을 이용하면 활성화된 기지국으로의 방향과 도달하기까지의 시간이 계산될 수 있다. 이러한 이론을 전체 시스템으로 적용하여, 활성화에 필요한 기지국 세트를 정의할 수 있으며 그 결과 전체 기지국의 상태를 정의함으로써 전체 에너지 효율성을 증가시킬 수 있다. 그리고, 사용자의 정보 및 수요에 대한 분석을 진행하여 기지국 전환 패턴의 정의 및 선택을 진행하는 연구²¹⁾ 또한 존재한다. 해당 연구에서는 사용자와의 업 링크 및 다운 링크 상황을 복합적으로 고려하며, 전체 커버리지를 제공할 수 있도록 하는 스케줄러가 제시되었다. 통신에서의 간섭을 계산함을 통해 에너지와 통신 성능 간의 트레이드 오프 관계를 정의하며, 이 때 적절한 수치를 보장할 수 있도록 하는 기지국 선택 패턴을 정의한다. 이를 통해 궁극적으로 에너지를 절약하면서 성능 균형을 보장할 수 있는 시스템을 제시하였다.

2.2.3 이중 통신 환경에서의 기지국 수면 전략

그 외에도, 이중 통신 환경에서의 특정 단계의 셀을 관리하는 기지국을 제어하여 전력 효율성을 증가시킬 수 있는 연구²²⁻²⁴⁾가 존재한다. 해당 기법의 간단한 원리는 기지국의 규모에 따라 구분될 수 있는 매크로 셀, 소형 셀 등의 단계에서, 그 커버리지가 중복되는 경우 사용자의 수요에 따라 특정 셀을 비활성화하여 전력 소모량을 감소시킬 수 있다. 먼저, 펌토셀 (FemtoCell) 기지국과의 협업을 통한 전력 소모량 감소를 달성하는 연구²²⁾가 존재한다. 해당 연구에서는 그림 5와 같이 매크로 셀과 소형 셀 기지국에 더불어 펌토셀 기지국이 공존하는 경우의 시스템을 고려한다. 이 때 이중 통신의 자원 할당 기법 최적화를 통해 중복되는 소형 셀 기지국을 추려낼 수 있고, 해당 기지국을 비활성화하는 경우 사용자의 통신 품질은 보장하면서 전력 소모량을 달성할 수 있다. 혹은 드론 셀과의 협업을 통한 연구²³⁾도 존재한다. 해당 연구에서는 네트워크 가입자에게 통신의 연결을 보장할 수 있는 드론의 배치에 대한 연구를 진행하였는데, 마이크로 셀의 커버리지와 드론 셀 커버리지와 배치에 따른 사용자의 연결성을 보장하도록 할 수 있다. 궁극적으로 해당 시스템은 에너지 효율성을 증가하도록 함이 증명되었다. 해당 연구는 그림 6과 같이 매크로 셀과

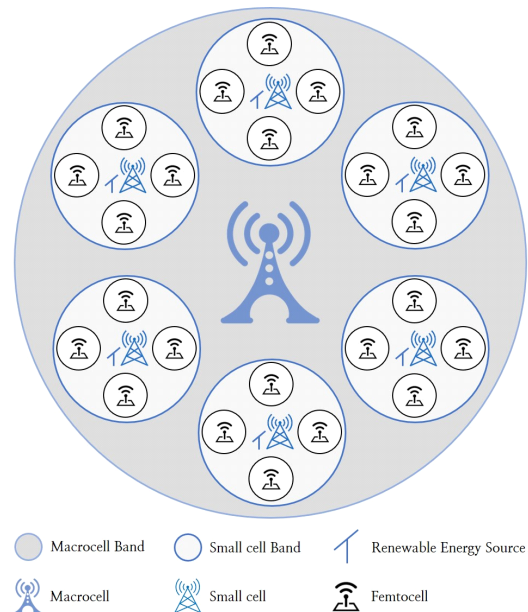


그림 5. 매크로 셀, 소형 셀 기지국, 펌토셀 기지국이 공존하는 모델
Fig. 5. Model in which macrocells, small cell BSs, and femtocell BSs coexist

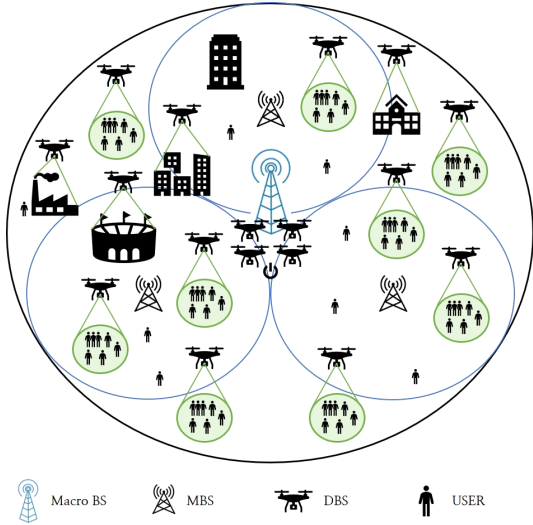


그림 6. 과부하가 된 셀을 보조하기 위해 드론을 배치한 이종통신 네트워크 모델
 Fig. 6. Heterogeneous communication network model with drones deployed to assist overloaded cells

마이크로 셀이 공존하는 환경에서 드론 셀의 배치로 확장되었는데²⁴⁾, 이 경우 과부하가 된 셀을 지원하기 위해 드론 기지국을 배치한다. 피크 시간에서의 사용자 연결성을 보장하기 위해 드론을 배치하는 것이 핵심이며, 이 때 더 나은 채널을 제공할 수 있는, 전력 소모가 작은 장치의 선택을 통해 에너지 소비량에서 이득을 수확하는 방식을 채택하였다.

2.2.4 수면 깊이의 구분에 따른 기지국 수면 전략

앞서 소개된 기지국 제어 기법들은 그 효율성이 입증되었지만, 이들은 공통적으로 기지국의 단순 활성화/비활성화 상태만을 고려한다는 단점이 존재한다. 또한, 기지국을 수면 상태로 전환하면 해당 기지국을 활성화 상태로 전환할 때의 기상 시간이 고려되어야 하지만 대부분의 연구에서는 이를 무시하고 문제를 공식화한다. 하지만 실제 시스템으로의 적용을 위해서는 이러한 기상 시간은 반드시 고려되어야 하며, 이를 구체적으로 이용하기 위해 기지국의 하드웨어적인 요소를 분석할 수 있다²⁵⁾. 해당 연구에서는 소형 셀 기지국의 하드웨어적 요소를 분석하였는데, 대표적인 요소는 그림 7에서 나타나듯 크게 3개의 부분으로 나뉜다. 첫 번째 부분은 마이크로 프로세서로 구성되어 있으며, 표준화된 무선 프로토콜 스택 및 관련 베이스밴드의 처리를 관리 및 구현한다. 또한 해당 부분에서는 코어 네트워크에 대한 백홀 연결을 관리하는 역할을 담당한다. 두 번째 부분은 FPGA (Field-Programmable Gate

Array) 및 기타 집적 회로가 포함되며, 데이터 암호화, 하드웨어 인증 및 네트워크 시간 프로토콜과 같은 기능을 담당한다. 마지막으로 세 번째 부분에서는 데이터의 무선 송수신을 위한 무선 주파수 장치 (Radio Frequency Front, RF Front)로 구성된다. 해당 부분에서는 RF 전력 증폭기가 존재하여 고전력 신호를 송신 안테나로 전송할 수 있다. 위와 같이 구분된 소형 셀 기지국의 하드웨어적 요소에 대한 전력 소모량은 표 2에서 확인할 수 있다. 분석된 결과에 따르면, 특히 하드웨어적 요소 중 RF front가 약 45%에 해당되는 전력 소모량을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 특히 RF front 구동과 직접적인 연관이 되는 TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator) 부분의 경우 7%에 해당되는 전력 소모량을 가지고 있기 때문에, 필요에 따라 해당 요소들을 비활성화한다면 다른 하드웨어적 요소는 이용할 수 있으면서 전력 소모량을 50% 이상 크게 절감할 수 있다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 기지국의 하드웨어적인 요소를 분석하여, 각 요소들이 필요한 경우를 구분하여 기지국의 수면 모드를 여러 개로 정의할 수 있다²⁶⁾. 기지국의 하드웨어적인 요소를 고려한 수면 모드는 그 깊이에 따라 4개의 상태로 정의될 수 있으며, 각 수면 모드에서의 전력 소모량과 기상 시간은 표 3에서와 같이 정의된다. 기지국의 “활성화” 상태는 모든 하드웨어 요소

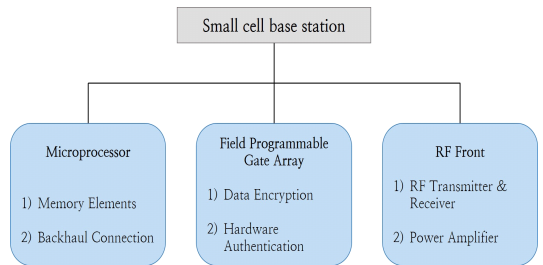


그림 7. 소형 셀 기지국의 하드웨어적 요소
 Fig. 7. Hardware components of small cell BS

표 3. 기지국의 수면 깊이에 따른 수면 모드 정의 예시
 Table 3. Example of sleep mode of BS according to sleep depth.

수면 모드	기상 시간 (초)	전력 소모량 (%)
활성화	-	100
대기	0.5	50
수면	10	15
비활성화	30	0

가 작동하고 있는 상태이며, 이 경우 해당 기지국의 전력 소모량을 기준으로 100%의 전력을 사용한다. 다음으로 “대기” 상태에서는 기지국이 얇은 수면 모드에 있는 상태로, 기지국에서의 전력 소모량의 대부분을 차지하는 RF front 요소만을 비활성화하고 나머지 요소는 활성화하는 상태이다. 기지국 전력 소모 분석 연구²⁵⁾에 따르면, 기지국에서 가장 많은 전력 소모량을 차지하는 요소는 RF front이다. 이는 총 45%의 소모량을 차지하며, 이와 동시에 작동하는 Temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) heater 요소의 경우에도 총 7%의 전력 소모를 차지하기 때문에 해당 요소들을 종료함으로써 표 3에서 정의되었듯 전체 전력 소모량의 50%를 절약할 수 있다. 해당 요소들의 경우 분석에 따르면 0.5초 내에 활성화 상태로 전환이 가능하므로 대기 상태로 정의한다. 다음으로 “수면” 상태에서는 기지국의 파워 서플라이와 백엔드 연결, 그리고 일반적인 CPU만을 가동하는 상태로 존재한다. 이 경우 분석에 따르면²⁵⁾ 전체 전력 소모량의 15%만을 소모하며, 활성화 상태로 전환하기까지 10초가 소요된다. 마지막으로 “비활성화” 상태에서는 기초 대기전력만을 사용하며 기지국을 비활성화 상태로 유지하는데, 이 경우의 전력 소모량은 무시가 가능한 수준이므로 0%로 계산할 수 있지만, 이 경우 기상 시간이 30초가 소요된다. 이와 같이 기지국의 하드웨어적인 요소를 구분하여 기지국의 수면 모드를 단순 활성화/비활성화의 2단계에서 최대 4단계로 세분화함을 통해 더욱 에너지 효율적인 시스템의 구성이 가능하다.

실제로 해당 하드웨어적 요소를 고려하여 깊이에 따른 수면 모드를 적용한 연구에서는²⁷⁾, Random Sleeping 전략과 Strategic Sleeping 기법을 제시하여 각각 확률적 수면 및 사용자의 이동성을 고려한 수면 알고리즘을 제시하였다. Poisson Point Access (PPP)에 따라 구성되는 다 계층 이중 통신 네트워크에서 각 계층에서의 기지국의 수면 전략은 확률적으로 계산되어 에너지 효율성을 증가시킬 수 있는 방향으로의 상태가 결정되었으며, 특히 Dynamic Traffic Model에서의 Strategic Sleeping 기법은 사용자의 이동 방향과 속력을 고려하여 셀에 포함되는 유지의 수에 따라 활성화하고자 하는 기지국을 결정, 에너지 효율성을 증대시킬 수 있도록 하였다. 이러한 연구를 통해 실제 환경에서 적용 가능하도록 하는, 기지국의 하드웨어적 요소를 분석하여 기지국의 수면 상태를 제어하는 기법의 방향이 제시되었다. 분석에 따르면 이러한 전략적 수면 기법을 통해 최대 15%의 전력 소모량 감소를 달성할 수 있다.

2.2.5 기계학습을 이용한 기지국 수면 전략

하지만 앞서 소개된 기지국 제어 연구들에서 공통적으로 가지는 가장 큰 한계점은, 이러한 계산을 통해 제어하는 기법이 무선 네트워크에서는 큰 오버헤드로 작용한다는 것이다. 무선 네트워크에서는 아주 작은 시간의 지연도 시스템 성능에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에, 기지국을 제어하는 데 소요되는 계산 시간은 그 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 최근에는 기계학습 모델을 적용하여 기지국 제어 전략을 예측 모델을 통해 실시간 시스템에 효율적으로 적용하는 연구가 제시되었다²⁸⁻³⁰⁾. 기계학습을 적용한 연구²⁸⁾에서도 마찬가지로 트래픽과 기지국의 커버리지를 고려하게 되는데, 기지국의 전환을 통해 QoS 요구사항을 충족할 수 있도록 하는 정책을 이용한다. 그와 동시에 궁극적 목적인 에너지를 절약할 수 있도록 하는 Q-Learning 기반 기지국 수면 기법이 제시되었으며, 이 때 서비스의 성공에 대한 보상 함수를 고려하여 보상을 최대화하도록 하는 학습 정책을 이용하였다. 혹은, 강화 학습 이론을 적용한 연구도 존재한다²⁹⁾. 해당 연구에서는 Deep Reinforcement Learning (DRL)을 이용하여 Action space를 줄여나감으로 기지국의 상태 전환에 오버헤드를 줄이는 것을 목표로 하였으며, 장기적으로는 QoS 요구사항을 충족하도록 하는 제약을 이용하면서 에너지 소모량을 줄이는 연구를 진행하였다. 또한, 그림 8과 같이 유전 알고리즘의 일반적인 단계를 기반으로 일일 트래픽 부하의 변화에

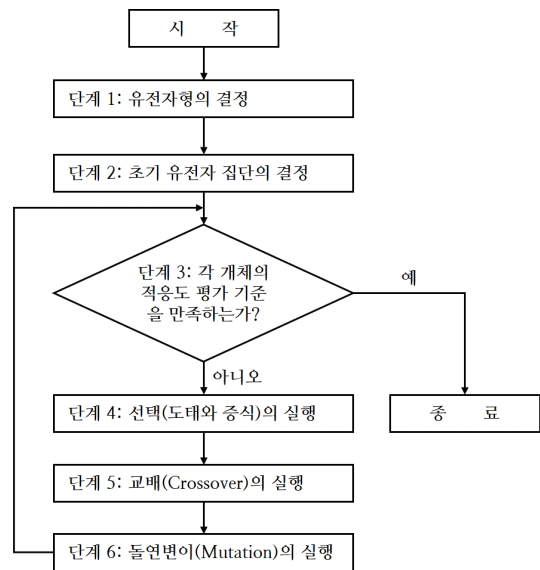


그림 8. 유전 알고리즘의 일반적인 단계
Fig. 8. General steps of the genetic algorithm

따라 기지국의 수면 및 기상 매커니즘을 설계하는 연구³⁰⁾가 존재한다. 해당 연구에서는 활성화 노드로 데이터를 보낼 때 다른 노드를 비활성화하면서 에너지 효율성을 증가시킬 수 있는 유전 알고리즘이 제시되었으며, Monte carlo 기법을 기반으로 한 시뮬레이션을 통해 네트워크 안정성을 보장하면서 기지국을 수면 상태로 전환할 수 있음을 증명하였다.

2.3 연구 방향 제시

이렇듯 네트워크의 총 전력 소모량의 감소를 위해 기지국과 연결되는 사용자 혹은 자원의 최적화를 하는 기법에서 확장되어 기지국 자체의 회로에서 소모되는 에너지를 감소하도록 하는 다양한 기법들이 제시되고 있다. 대부분의 연구에서는 이중 통신 네트워크 환경을 고려하여 사용자의 통신 품질을 보장할 수 있도록 하는 것이 핵심이었으며, 그렇지 않은 경우 사용자에게 페널티가 주어지지 않도록 기지국의 수면 상태를 동적으로 제어하는 기법들이 제시되었다.

또한 앞서 소개된 것과 같이, 최근에는 기계학습 이론을 이용하여 수면 상태 자체에 대한 학습 모델의 적용을 통해 보상 개념을 이용하여 기지국의 수면 상태를 결정하는 전략이 연구되고 있다. 하지만 이러한 최근의 연구 역시 기지국의 상태 전환에 따른 기상 시간을 고려하지 않는다는 단점이 존재하며, 대부분의 연구에서는 그 제약조건으로 사용자의 QoS 요구사항만을 고려하기 때문에 유저의 트래픽을 충분히 고려하는지에 대한 문제 또한 존재한다. 이러한 점을 고려했을 때, 기지국의 수면 선택 전략 기법에 대한 연구는 기계학습을 활용해서 다양한 방향으로 나아갈 수 있다. 먼저 유저의 트래픽과 이동성에 대한 예측을 기반으로 향후 시계열에서의 기지국 상태를 제어할 수 있도록 하는 방향의 연구가 가능하다. 시계열에서의 학습 기법은 다양하게 존재하기 때문에, 높은 정확도를 기반으로 하는 예측 모델을 이용한다면 유저의 트래픽을 충족하면서도 향후의 기지국 상태를 미리 정해둘 수 있으므로, 통신에서의 오버헤드를 제거하면서 기지국의 기상 시간을 고려하여 에너지 효율적인 시스템을 구성할 수 있을 것이다. 또한, 기계학습에서의 행동에 따른 보상에 기상 시간 개념을 적용한 연구가 진행될 수 있을 것이다. 기지국의 수면 상태를 선택함에 따라 계산되는 보상에 기상 시간을 수치화하여 해당 시간동안의 페널티를 주도록 할 수 있으며, 이를 공식화하여 학습 모델에서 수면 전략을 선택하도록 하는 연구로 진행할 수 있을 것으로 예상된다.

III 결 론

과학 기술의 발전으로 모바일 기기의 증가에 따라, 모바일 트래픽 수요는 큰 폭으로 증가하고 있다. 또한 5세대 이동통신의 상용화에 따라 무선 통신을 지원하기 위한 기지국의 수가 많이 증가하고 있는데, 이에 따라 환경친화적인 시스템을 구성하기 위해 기지국의 전력 소모량을 최소화하고자 하는 연구는 이제 무선 네트워크 분야에서 필수로 자리잡고 있다.

본 연구에서는 이러한 기지국 전력 소모량 최소화를 위한 다양한 기법들에 대한 조사를 진행하였고, 최근의 연구 동향에 대한 분석을 진행하였다. 무선 네트워크 환경에서 사용자의 통신 성능을 보장하도록 하면서 기지국을 효율적으로 수면 상태로 전환하고 기상하도록 하는 다양한 기법에 대한 분석을 진행하였으며, 이러한 기지국 제어 기법들을 기반으로 추후 연구를 통해 기지국의 제어 및 수면 깊이를 정의할 수 있는 연구를 진행하고자 한다.

References

- [1] D. Lee, G. Jang, C. Lee, Y. Lee, C. Lee, N. Kim, and S. Cho, "Investigation on low power communication for power-efficient communication," *J. KICS*, vol. 45, no. 5, pp. 805-812, May 2020.
- [2] F. Elsherif, E. K. Chong, and J.-H. Kim, "Energy-efficient base station control framework for 5g cellular networks based on markov decision process," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 9, pp. 9267-9279, Jul. 2019.
- [3] F. Richter, A. J. Fehske, and G. P. Fettweis, "Energy efficiency aspects of base station deployment strategies for cellular networks," in *Proc. 2009 IEEE 70th Veh. Technol. Conf. Fall*, pp. 1-5, Anchorage, USA, 2009.
- [4] H. Holtkamp, G. Auer, S. Bazzi, and H. Haas, "Minimizing base station power consumption," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 32, no. 2, pp. 297-306, May 2013.
- [5] G. M. D. T. Forecast, "Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2017-2022," *Update, 2017-2022*, Cisco, San Jose, CA, USA, Feb.

- 2019.
- [6] B. Wang, Q. Kong, W. Liu, and L. T. Yang, "On efficient utilization of green energy in heterogeneous cellular networks," *IEEE Syst. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 846-857, May 2015.
- [7] T. Han, and N. Ansari, "A traffic load balancing framework for software-defined radio access networks powered by hybrid energy sources," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 24, no. 2, pp. 1038-1051, Mar. 2015.
- [8] M. Feng, S. Mao, and T. Jiang, "Base station on-off switching in 5g wireless networks: Approaches and challenges," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 4, pp. 46-54, Aug. 2017.
- [9] H. Ghazzai, E. Yaacoub, A. Kadri, H. Yanikomeroglu, and M.-S. Alouini, "Next-generation environment-aware cellular networks: Modern green techniques and implementation challenges," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5010-5029, Sep. 2016.
- [10] F. Han, S. Zhao, L. Zhang, and J. Wu, "Survey of strategies for switching off base stations in heterogeneous networks for greener 5g systems," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 4959-4973, Sep. 2016.
- [11] J. Wu, Y. Bao, G. Miao, S. Zhou, and Z. Niu, "Base-station sleeping control and power matching for energy-delay tradeoffs with bursty traffic," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 5, pp. 3657-3675, May 2015.
- [12] Y. Yang, L. Chen, W. Dong, and W. Wang, "Active base station set optimization for minimal energy consumption in green cellular networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 11, pp. 5340-5349, Dec. 2014.
- [13] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho, "Sleep mode techniques for small cell deployments," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 8, pp. 72-79, Aug. 2011.
- [14] N. Yu, Y. Miao, L. Mu, H. Du, H. Huang, and X. Jia, "Minimizing energy cost by dynamic switching on/off base stations in cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 11, pp. 7457-7469, Nov. 2016.
- [15] C. Peng, S. Lee, S. Lu, and H. Luo, "GreenBSN: Enabling energy-proportional cellular base station networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 13, no. 11, pp. 2537-2551, Nov. 2014.
- [16] E. Oh, K. Son, and B. Krishnamachari, "Dynamic base station switching-on/off strategies for green cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2126-2136, May 2013.
- [17] J. Wu, E. W. M. Wong, Y.-C. Chan, and M. Zukerman, "Power consumption and GoS tradeoff in cellular mobile networks with base station sleeping and related performance studies," to appear in *IEEE Trans. Green Commun.*, 2020.
- [18] S. Cai, Y. Che, L. Duan, J. Wang, S. Zhou, and R. Zhang, "Green 5G heterogeneous networks through dynamic small-cell operation," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 34, no. 5, pp. 1103-1115, May 2016.
- [19] M. Feng, S. Mao, and T. Jiang, "BOOST: base station on-off switching strategy for energy efficient massive MIMO HetNets," in *Proc. IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annu. IEEE Int. Conf. Comput. Commun.*, pp. 1-9, San Francisco, CA, USA, 2016.
- [20] J. Gao, Q. Ren, P. S. Gu, and X. Song, "User association and small-cell base station on/off strategies for energy efficiency of ultradense networks," *Mob. Inf. Syst.*, vol. 2019, Jul. 2019.
- [21] A. Kumar and C. Rosenberg, "Energy and throughput trade-offs in cellular networks using base station switching," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 15, no. 2, pp. 364-376, Feb. 2016.
- [22] H. Ghazzai, M. J. Farooq, A. Alsharoa, E. Yaacoub, A. Kadri, and M.-S. Alouini, "Green networking in cellular HetNets: a unified radio resource management framework with base station on/off switching," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 7, pp. 5879-5893, Jul. 2017.

- [23] A. Alsharoa, H. Ghazzai, A. Kadri, and A. E. Kamal, "Energy management in cellular HetNets assisted by solar powered drone small cells," in *Proc. 2017 IEEE WCNC*, pp. 1-6, San Francisco, CA, USA, 2017.
- [24] A. Alsharoa, H. Ghazzai, A. Kadri, and A. E. Kamel, "Spatial and temporal management of cellular HetNets with multiple solar powered drones," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 19, no. 4, pp. 954-968, Apr. 2020.
- [25] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho, "Power savings in small cell deployments via sleep mode techniques," in *Proc. 2010 IEEE 21st Int. Symp. Pers., Indoor, and Mob. Radio Commun. Wkshps*, pp. 307-311, Istanbul, Turkey, 2010.
- [26] W. Vereecken, I. Haratcherev, M. Deruyck, W. Joseph, M. Pickavet, L. Martens, and P. Demeester, "The effect of variable wake up time on the utilization of sleep modes in femtocell mobile access networks," in *Proc. 2012 9th Annu. Conf. Wireless On-Demand Netw. Syst. and Serv. (WONS)*, pp. 63-66, Courmayeur, Italy, 2012.
- [27] C. Liu, B. Natarajan, and H. Xia, "Small cell base station sleep strategies for energy efficiency," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 3, pp. 1652-1661, Mar. 2016.
- [28] F. H. Panahi, G. Hattab, T. Ohtsuki, and D. Cabric, "Green heterogeneous networks via an intelligent sleep/wake-up mechanism and D2D communications," *IEEE Trans. Green Cmmun. and Netw.*, vol. 2, no. 4, pp. 915-931, Dec. 2018.
- [29] H. Ju, S. Kim, Y. Kim, H. Lee, and B. Shim, "Energy-efficient ultra-dense network using deep reinforcement learning," in *Proc. 2020 IEEE 21st Int. Wkshp SPAWC*, pp. 1-5, Atlanta, GA, USA, 2020.
- [30] F. H. Panahi, F. H. Panahi, S. Heshmati, and T. Ohtsuki, "Optimal sleep & wakeup mechanism for green internet of things," in *Proc. 2019 27th ICEE*, pp. 1659-1663, Yazd, Iran, 2019.

장 건 희 (Gunhee Jang)



2019년 2월: 중앙대학교 컴퓨터 공학부 학사 졸업
2019년 3월~현재: 중앙대학교 컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 무선통신, UAV Communication, IoT
[ORCID:0000-0001-7671-8826]

오 준 석 (Junsuk Oh)



2019년 3월~현재: 중앙대학교 컴퓨터공학부 학사과정
<관심분야> Edge Computing, IoT, Machine Learning
[ORCID:0000-0001-7855-6461]

하 태 윤 (Taeyun Ha)



2020년 2월: 중앙대학교 컴퓨터 공학부 학사 졸업
2020년 3월~현재: 중앙대학교 컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 무선통신, 심 우주 통신, IoT
[ORCID0000-0001-6001-4226]

이 동 현 (Donghyun Lee)



2020년 2월: 동국대학교 컴퓨터 공학과 학사 졸업
2020년 3월~현재: 중앙대학교 컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 통신공학, HetNet, 5G, IoT
[ORCID:0000-0001-9117-5647]

이 정 화 (Jeonghwa Lee)



2020년 2월 : 서울여자대학교 컴
퓨터학과 학사 졸업
2020년 9월~현재 : 중앙대학교 컴
퓨터공학과 석사과정
<관심분야> Ubiquitous Compu-
ting
[ORCID:0000-0002-0108-5419]

이 충 현 (Chunghyun Lee)



2018년 2월 : 중앙대학교 컴퓨터
공학부 졸업
2018년 3월~현재 : 중앙대학교
컴퓨터공학과 석사/박사과정
<관심분야> Smart Grid, Gamd
Theory, Ubiquitous Compu-
ting
[ORCID:0000-0002-0762-9771]

이 윤 성 (Yunseong Lee)



2013년 2월 : 중앙대학교 컴퓨터
공학과 졸업
2015년 8월 : 중앙대학교 컴퓨터
공학과 석사
2017년 3월~현재 : 중앙대학교 컴
퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 무선 네트워크, Ubiquitous Computing,
Smart Grid
[ORCID:0000-0001-9245-2968]

조 성 래 (Sungrae Cho)



1992년 2월 : 고려대학교 전자전
산공학과 석사
1994년 2월 : 고려대학교 전자공
학과 석사
2002년 12월 : 미국 조지아공대
전기및컴퓨터공학과 박사
1994년 2월~1996년 8월 : 한국
전자통신연구원 연구원

2003년 1월~2003년 7월 : 미국 조지아서던대학교 컴퓨
터공학과 조교수
2006년 9월~현재 : 중앙대학교 컴퓨터공학부 교수
<관심분야> 무선네트워크, Ubiquitous Computing
[ORCID:0000-0003-1879-688X]