

# 랜덤 셀룰러 네트워크에서의 셀 주밍 및 절전 기법을 이용한 아웃티지 성능 개선

탁 준 우\*, 윤 종 윤\*, 김 호 연\*\*, 양 모 찬\*\*\*, 노 종 선\*

## A Cell Zooming and Sleeping Algorithm for Outage Performance Improvement in Random Cellular Network

Jun-Woo Tak\*, Jong-Yoon Yoon\*, Hoyoun Kim\*\*, Mochan Yang\*\*\*, Jong-Seon No\*

### 요 약

셀 주밍(cell zooming)은 기지국 송신 전력 세기를 조절함으로써 셀룰러 네트워크의 트래픽 분산과 에너지 효율 향상을 도모하는 기법이다. 본 논문에서는 셀 주밍과 절전 기법을 푸아송 보로노이 테셀레이션(Poisson Voronoi Tessellation, PVT) 랜덤 셀룰러 네트워크(random cellular network)에 적용하여 네트워크의 아웃티지 성능을 향상시킬 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 기지국 중심의 분산된 형태이며 작동에 적은 양의 네트워크 상태 정보만을 필요로 한다. 기지국들은 각각 사용자들에게 제공하고 있는 서비스 품질에 따라 상태 정보를 분류하고, 인접 기지국들 간의 정보 교환을 통해 셀 주밍 및 절전 기법을 적용한다. 시뮬레이션 결과는 제안하는 알고리즘이 아웃티지 발생을 줄일 수 있음을 보여준다. 아웃티지 감소 성능은 얻고자 하는 에너지 효율 개선 정도가 클수록 감소하는데, 알고리즘 적용 전과 비교하여 에너지 효율이 감소하지 않는 구간에서 최소 50%의 아웃티지 감소 성능을 보인다.

**Key Words** : cell zooming, cell sleeping, random cellular network, outage performance, energy efficiency

### ABSTRACT

Cell zooming is a technique that targets the traffic balancing and energy efficiency of the cellular network by adjusting the transmit power of the base station. In this paper, we propose a new cell zooming and sleeping algorithm in Poisson Voronoi Tessellation (PVT) random cellular network to improve outage performance. The proposed algorithm operates in a base station-centric distributed manner and requires only small amount of network state information to operate. Base stations classify the state information according to the quality of service provided to their user, and apply the cell zooming and sleeping based on information exchanged between adjacent base stations. Simulation results show that the proposed algorithm reduces the outage event. There exists a tradeoff between the outage reduction performance and energy efficiency but the algorithm still achieves at least 50% of outage reduction performance when there is no energy efficiency loss.

※ 이 논문은 2018년도 한화시스템(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.

• First Author : Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University, jwt@ccl.snu.ac.kr, 학생회원

\* Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University, yjy998@ccl.snu.ac.kr, 학생회원; jsno@snu.ac.kr, 중신회원

\*\* Samsung Electronics, ferui@ccl.snu.ac.kr, 학생회원

\*\*\* Hanwha Systems, ymc0124@hanwha.com, 학생회원

논문번호 : 201904-050-A-RU, Received April 19, 2019; Revised May 15, 2019; Accepted May 22, 2019

## I. 서론

셀룰러 네트워크(cellular network)에서의 셀 설계는 네트워크 계획 단계에서 트래픽 분석과 그에 따른 수용력(capacity)의 예측을 통해 설정된다. 통신 사업자는 이용자의 요구를 만족시키기 위해 셀 설계를 최적화할 필요가 있으며, 보다 효율적인 최적화를 통해 많은 기지국전력 소모 비용을 절감할 수 있다. 하지만 고정된 최적화 셀 설계는 이용 시간대에 따른 트래픽 변동과 사용자 요구 변화에 호응하기 어렵다.

관련하여 시스템의 에너지 소비를 줄이려는 그린(green) 셀룰러 네트워크로의 움직임이 연구된 바 있다<sup>[1]</sup>. 셀 주밍(cell zooming, CZ)은 그 중 한 요소로 소개되었으며<sup>[2]</sup>, 네트워크와 트래픽 변동에 따른 유동적인 셀 크기 조절을 통해 셀 간 트래픽 분산과 시스템 전체의 에너지 효율 향상을 얻는 기법이다. 이용자가 많아 트래픽이 집중된 셀은 셀 크기를 줄이는 셀 줌 인(cell zoom in)을, 인접 셀 중 트래픽에 여유가 있는 셀은 셀 크기를 늘리는 셀 줌 아웃(cell zoom out)을 실행하여 이용자 분산 및 안정적인 서비스를 제공할 수 있다. 아래 그림 1의 기지국 2와 3은 셀 줌 인을, 기지국 1과 4는 셀 줌 아웃을 실행하는 것을 나타낸다.

셀 주밍의 작동에는 셀 주밍 서버와 같은 네트워크 요소를 도입하여 트래픽 상황과 채널 특성 등을 고려한 셀 주밍 여부와 방향을 결정한다. 셀 줌 인이나 셀 줌 아웃이 필요할 때는 인접한 셀과 협력하여 서로의 동작을 조정하도록 한다. 셀 주밍의 물리적인 방법으로는 기지국의 송신 전력 세기를 조절하거나, 안테나의 높이나 기울기를 조절하는 방법이 있다<sup>[2]</sup>.

트래픽이 적은 셀의 셀 크기를 줄이는 작동에서 더 나아가 가능하다면 해당 기지국의 전원을 절전 상태(cell sleeping)로 전환하고 사용하지 않는 것이 가능하다. 기지국을 켜 놓는 데에 필요한 전력은 전체 전

력 사용의 매우 큰 부분을 차지하므로<sup>[3]</sup>, 이용률이 낮은 기지국의 경우 기지국을 절전 상태로 전환하고 인접한 셀들로부터 서비스를 받는 것이 효율적일 수 있다<sup>[4]</sup>. 연관된 연구<sup>[5]</sup>에서는 기지국의 절전 작동에 필요한 시스템 부담 정보를 분류하고 그 가용 여부에 따른 분산된 형태의 절전 알고리즘을 제시한 바 있다.

셀룰러 네트워크 모델의 한 형태인 푸아송 보로노이 테셀레이션(Poisson Voronoi tessellation, PVT) 랜덤 셀룰러 네트워크(random cellular network)<sup>[6]</sup>에서는 기존의 그리드 기반의 고정된 기지국 위치로 모델링 되는 셀룰러 네트워크와는 달리 기지국의 개수와 위치가 무작위로 설정된다. 사용자 단말의 개수와 위치 또한 무작위로 설정되며 이 가정은 보다 유동적인 상황에서의 셀 주밍 알고리즘 작동을 시험할 수 있는 모델이다. PVT 랜덤 셀룰러 네트워크에서의 셀 주밍 관련 연구로 우선 모든 기지국이 동일한 송신 전력을 사용하고 셀 용량이 무한할 때의 에르고딕(ergodic) 용량을 유도하고 면적당 주파수 효율과 에너지 효율을 구한 결과가 있다<sup>[7]</sup>. 하지만 <sup>[7]</sup>에서는 구체적인 셀 주밍 알고리즘을 제시한 것은 아니다. 다른 연구에서 몇 가지 셀 주밍 알고리즘이 소개된 바 있는데<sup>[8, 9]</sup>, 모두 기지국들을 트래픽이 집중된 정도에 따라 정렬하여 그 정보를 이용한 바 있다. 본 연구에서는 기존 연구와는 달리 셀 용량이 한정되어 있는 상황에서 기지국들의 정렬과 우선순위 부여와 같은 과정이 필요 없는, 기지국 각각이 분산된 형태로 작동하는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 PVT 랜덤 셀룰러 네트워크의 시스템 모델과 알고리즘 성능 평가에 쓰일 척도를 설명한다. 3장에서는 제안하는 셀 주밍 및 절전 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 알고리즘의 시뮬레이션 성능을 분석하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델 및 평가 척도

### 2.1 시스템 모델

PVT 랜덤 셀룰러 네트워크의 기지국과 사용자 단말의 위치는 주어진 평면상에 무작위로 분포한다. 기지국과 사용자 단말의 위치는 각각  $\Phi_B, \Phi_U$ 로 표시되는 푸아송 포인트 프로세스(Poisson point process)를 따라 생성된다.  $\Phi_B, \Phi_U$ 의 크기는 각각 기지국과 사용자 단말의 개수이고, 단위 면적당 밀도  $\lambda_B, \lambda_U$ 를 가지는 푸아송 분포를 따른다.

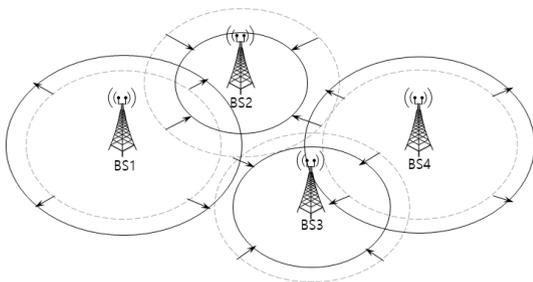


그림 1. 셀 주밍의 작동  
Fig. 1. Cell zooming operation

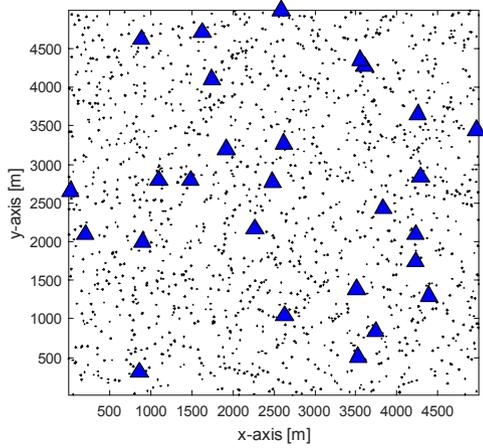


그림 2. PVT 랜덤 셀룰러 네트워크의 예시 - 기지국(▲)과 이용자 단말(•)  
 Fig. 2. An example of the PVT random cellular network - base station(▲) and user equipment(•)

본 모델에서는 기지국에서 사용자 단말로의 하향링크(downlink) 통신을 다루며, 이 때 사용자 단말들은 수신하는 신호의 크기가 가장 강한 기지국의 서비스를 받는다고 가정한다. 기지국  $i$ 로부터 단말기  $k$ 까지의 거리를  $d_{ki}$ 로 표시하고, 채널 환경에서의 경로 손실(path loss)  $PL_{ki}$ 은 다음의 모델을 사용한다<sup>[10]</sup>.

$$PL_{ki} = 15.3 + 37.6 \log_{10} d_{ki} \quad (1)$$

기지국  $i$ 가 사용하는 송신 전력 세기를  $P_i^T$ 라 하면 해당 기지국의 서비스를 받는 단말기  $k$ 가 얻는 신호 대 간섭 잡음비  $SINR_{ki}$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$SINR_{ki} = \frac{P_i^T \times 10^{-PL_{ki}/10}}{\sum_{j \in \Phi_B \setminus \{i\}} P_j^T \times 10^{-PL_{kj}/10} + \sigma^2} \quad (2)$$

여기서  $\sigma^2$ 는 additive white Gaussian noise(AWGN)의 세기이다. 각 기지국에서 사용할 수 있는 총 주파수 대역폭  $B$ 와 그에 따라 동시에 서비스 할 수 있는 단말기의 개수가  $N_{max}$ 로 한정되어 있다고 가정하면 위 단말기  $k$ 가 얻을 수 있는 전송률  $R_k$ 는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$R_k = \frac{B}{N_{max}} \log_2(1 + SINR_{ki}) \quad (3)$$

## 2.2 평가 척도

특정 기지국  $i$ 에 할당된 사용자 단말의 개수를  $N_i$ 라 한다. 만일  $N_i > N_{max}$  라면 기지국은 초과분의 단말기에 대한 서비스를 제공할 수 없다. 이 경우 낮은  $SINR_{ki}$ 의 사용자 단말들이 우선적으로 서비스 대상에서 제외되며 해당 셀에서는 아웃티지(outage)가 발생했다고 한다. 반면에  $N_i \leq N_{max}$  일 경우에도 사용자 단말이 얻고자 하는 최소한의 전송률  $R_{min}$ 을 얻지 못하는 경우가 생기면( $R_k < R_{min}$ ) 그 경우 또한 아웃티지가 발생한 셀이 된다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 성능 척도로는 아웃티지 발생 빈도를 사용한다. 시스템 상의 사용자 밀도가 낮을 때와 높을 때 모두 안정적인 아웃티지 성능 개선을 가져오는 것이 필요하다.

또한 본래 셀 주밍 연구는 에너지 절감을 위해 연구된 바 있기 때문에 알고리즘의 에너지 효율(energy efficiency, EE) 또한 함께 확인할 것이다. 에너지 효율은 시스템의 모든 기지국이 사용한 전력 대비 얻을 수 있는 전송률의 총 합(sum rate)의 비율로 계산할 수 있다. 기지국 사용 전력은 기지국이 작동 상태(active)일 때와 절전 상태(inactive)일 때로 나뉘며 절전 상태일 때의 고정 소비 전력  $P_{sleep}$ 은 작동 상태의 고정 소비 전력  $P_{on}$ 보다 매우 작다. 기지국  $i$ 가 소모하는 전력  $P_i$ 는 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$P_i = \begin{cases} P_{on} + P_i^T, & \text{active} \\ P_{sleep}, & \text{inactive} \end{cases} \quad (4)$$

이 때 시스템 전체의 에너지 효율  $\eta$ 는 얻을 수 있는 전송률의 총 합을 사용된 전력으로 나눈 아래의 식으로 계산된다.

$$\eta = \frac{\sum_{k \in \Phi_U} R_k}{\sum_{i \in \Phi_B} P_i} \quad (5)$$

## III. 셀 주밍 및 절전 알고리즘

### 3.1 기지국 상태 정보 분류

제안하는 셀 주밍 알고리즘은 셀 주밍 서버와 같은 네트워크 상위 요소의 도입 없이 기지국들이 분산된 형태로 작동한다. 우선 서비스 중인 각 기지국들은 아웃티지가 일어났는지의 여부를 조사하여 그 원인에

표 1. 각 기지국의 4가지 가능한 상태  
Table 1. Four possible states of each base station

state	$R_k < R_{\min}$	$R_k \geq R_{\min}$
$N_i > N_{\max}$	1	2
$N_i \leq N_{\max}$	3	4

따라 가능한 네 종류의 상태(state)로 분류한다. 이를 표시하면 표 1과 같다.

각 상태에 대해 기술하면 다음과 같다.

- state = 1  
기지국  $i$ 에 수용 가능한 단말보다 더 많은 단말이 서비스 받길 원하는 상태이고,  $N_{\max} - N_i$ 개의 초과분의 단말기는 0의 전송률을 얻는다. 또한,  $N_{\max}$ 개의 서비스 중인 단말기 중  $R_{\min}$ 의 전송률을 만족시키지 못하는 단말기가 존재한다.
- state = 2  
기지국  $i$ 에 수용 가능한 단말보다 더 많은 단말이 서비스 받길 원하는 상태이고,  $N_{\max} - N_i$ 개의 초과분의 단말기는 0의 전송률을 얻는다.  $N_{\max}$ 개의 서비스 중인 단말기들은 모두 적어도  $R_{\min}$ 의 전송률을 얻을 수 있다.
- state = 3  
기지국  $i$ 에 더 많은 단말을 수용할 수 있는 상태이다.  $N_i$ 개의 서비스 중인 단말기 중  $R_{\min}$ 의 전송률을 만족시키지 못하는 단말기가 존재한다.
- state = 4  
기지국  $i$ 에 더 많은 단말을 수용할 수 있는 상태이다.  $N_i$ 개의 서비스 중인 단말기들은 모두 적어도  $R_{\min}$ 의 전송률을 얻을 수 있다.

상태 정보는 2개의 기준에 대하여 4개의 가능한 상태를 나타내기 때문에 2-bit으로 표현 가능하다. 각 기지국은 스스로의 상태 정보를 현재 기지국의 송신 전력 세기로 브로드캐스트한다. 그러면 각 기지국은 스스로의 상태 정보와 인접한 기지국으로부터 수신한 상태정보를 이용하여 송신 전력 세기를 조절하거나 절전 상태로 전환할지 여부를 결정할 수 있다.

위 정보 교환 방식은 스케줄링을 고려하지 않은 분산된 형태의 브로드캐스트이다. 또한 실제 기지국의 위치 정보를 나타내는 것이 아니며 아래 두 가지 경우를 고려해야 한다. 먼저 특정 기지국이 다수의 기지국으로부터 각각의 상태 정보를 동시에 수신할 수 있다. 이 경우 수신한 여러 개의 상태 정보 중 가장 신호 세

기가 강한 상태 정보를 이용하도록 한다. 이렇게 하면 해당 기지국에 가장 큰 영향을 주고 있는 기지국의 정보를 따르게 된다. 또 다른 경우로 기지국이 무시할 수 있을 정도로 낮은 세기의 상태 신호를 수신하는 때를 고려한다. 수신한 상태 신호가 특정 기준(예를 들면 노이즈 레벨)보다 약하다면 해당 정보는 멀리 떨어져 있는 기지국으로부터 오는 신호로 분류해 해당 정보를 사용하지 않도록 한다. 이렇게 하면 멀리 떨어져 있어 서로 협조하기가 현실적으로 어렵고 그 효과가 미미한 기지국들이 불필요하게 협조를 시도하는 것을 막을 수 있다. 만일 수신한 상태 신호가 모두 기준보다 낮은 세기를 가진다면 해당 기지국은 고립된 기지국으로 분류한다. 고립된 기지국은 인접 기지국과 협조를 할 수 없으며 사전에 지정된 작동을 수행하도록 한다.

### 3.2 알고리즘 구현

알고리즘 구현에 앞서 특정 기지국  $i$ 를 절전 상태로 전환할 수 있는 조건을 다음과 같이 정한다.

- 1) 특정 셀  $i$ 에 할당된 단말의 수  $N_i$ 가 기지국이 수용할 수 있는 최대 단말 수  $N_{\max}$ 에 대한 일정 비율 이하일 때.

$$N_i \leq \rho N_{\max}, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (6)$$

- 2) 고립된 기지국이 아닐 때.
- 3) 인접한 기지국으로부터 수신한 상태 정보가 state = 3 또는 state = 4일 때.

위 세 조건을 모두 만족한다면 1) 이 기지국은 단말의 수가 충분히 적은 이용률이 낮은 기지국이면서, 2) 인접한 장소에 3) 단말을 더 수용할 수 있는 기지국이 존재하는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 이 경우 서비스 중인 모든 사용자들을 인접 기지국으로 핸드오버하고 최소 전력을 사용하는 절전 상태로 전환한다.

기지국  $i$ 의 상태를  $S(i) \in \{1, 2, 3, 4\}$ , 기지국  $i$ 가 받은 인접 기지국의 상태를  $A(i) \in \{1, 2, 3, 4, \emptyset\}$ 로 정의한다.  $A(i) = \emptyset$ 는 기지국이 무시할 수 있을 정도로 낮은 세기의 기지국 상태 신호만을 수신하는 때를 의미한다. 송신 전력 세기는 기본 송신 전력 세기  $P_0^T$ 로부터 단위 크기  $\delta(\text{dB})$ 만큼 증가 또는 감소시키거나 그대로 유지하며 반복 알고리즘을 진행시킨다.

반복 알고리즘은 충분한 수렴이 확인될 수 있을 만큼  $R$ 회 실행하며 매 시행마다의  $P_i^T$ 와  $N_i$ 는  $r=1,2,\dots,R$ 를 사용하여  $P_i^T(r)$ 와  $N_i(r)$ 로 표시한다. 그리고 기지국이 사용할 수 있는 최대 송신 전력 세기를  $P_{\max}$ 로 정하면 제안하는 알고리즘은 표 2로 쓸 수 있다.

알고리즘의 단계 4부터 6까지는 기지국의 절전 상태로의 전환을 위한 부분이다. 기지국의 이용률이라 할 수 있는  $N_i/N_{\max}$ 이 특정 값보다 작아야 절전을 시도한다. 식 (6)에 따르면  $N_i/N_{\max} \leq \rho$ 이면 되지만 실용적인 운용에서의 원활한 작동을 위해  $\rho$  대신  $\min(\rho, r/N_{\max})$ 을 사용한다. 랜덤 셀룰러 네트워크를 가정하기 때문에 단말들과 기지국의 위치에 따라 셀 당 할당되는 단말의 수는 매우 큰 편차를 보인다. 기지국의 이용률은 떨어지지만 다른 인접한 기지국이 매우 멀리 떨어져 있어 고립된 기지국인 경우 해당 기지국을 절전 상태로 전환한다면 인근의 단말들은 그 어떤 기지국으로부터도 서비스를 받을 수 없는 상황이 발생한다.  $\rho$  대신  $\min(\rho, r/N_{\max})$ 을 사용하면 이용률이  $\rho$  이하인 기지국들이 동시에 절전 상태로 전환하는 것을 막을 수 있고 반복 알고리즘의 진행에 따라 순차적인 절전 시도를 실행할 수 있다.

단계 7부터 20까지는  $S(i) = 1$ 인 경우를 위한 부분이다.  $A(i) = 1$ 인 경우 인접한 기지국과 서로 도움을 주거나 받을 수 없는 경우이다. 이때에는 또 다른 인접한 기지국의 도움을 기다리며 송신 전력 세기를 유지한다.  $A(i) = \{2, \emptyset\}$ 인 경우 인접 기지국으로의 핸드오버는 기대할 수 없기에 송신 전력 세기를 늘린다.  $A(i) \in \{3,4\}$ 인 경우 송신 전력 세기를 줄여 인접 기지국으로의 핸드오버를 시도한다. 단, 이전의 반복에서 송신 전력 세기를 줄였는데도 단말의 개수를 줄이지 못했다면 인근의 단말들은 다른 기지국의 서비스를 받지 못하는 위치에 있는 것으로 판단한다. 이 경우 송신 전력 세기를 늘려 수용 가능한 단말들에 한해서는 전송률을 높일 수 있도록 한다.

단계 21부터 24까지는  $S(i) = 2$ 와  $S(i) = 3$ 인 경우를 위한 부분이다.  $S(i) = 2$ 일 때는 전송률에는 여유가 있으면서 단말들은 포화상태이므로 송신 전력 세기를 줄여 인근의 기지국으로의 핸드오버를 시도한다.  $S(i) = 3$ 일 때는 단말들은 더 수용할 수 있으면서 전송률이 모자라는 경우이므로 송신 전력 세기를 늘려 전송률을 확보하고 인접한 기지국의 단말들을 가져오도록 한다.

표 2. 제안하는 셀 주밍 및 절전 알고리즘  
Table 2. Proposed cell zooming and sleeping algorithm

Algorithm	
1:	<b>Initialize.</b> All BS operates with initial transmit power $P_0^T$ and categorizes states.
2:	<b>for</b> $r=1 : R$ <b>do</b>
3:	<b>for</b> $i=1 :  \Phi_B $ <b>do</b>
4:	<b>if</b> $N_i/N_{\max} \leq \min(\rho, r/N_{\max})$ <b>and</b> $A(i) \in \{3,4\}$ <b>then</b>
5:	$P_i^T(r+1) \leftarrow 0$
6:	<b>end if</b>
7:	<b>if</b> $S(i) = 1$ <b>then</b>
8:	<b>if</b> $A(i) = 1$ <b>then</b>
9:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r)$
10:	<b>else if</b> $A(i) = 2$ <b>then</b>
11:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r) + \delta$
12:	<b>else if</b> $A(i) \in \{3,4\}$ <b>then</b>
13:	<b>if</b> $P_i^T(r) < P_i^T(r-1)$ <b>and</b> $N_i \geq N_i(r-1)$ <b>then</b>
14:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r) + \delta$
15:	<b>else</b>
16:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r) - \delta$
17:	<b>end if</b>
18:	<b>else</b> $\{A(i) = \emptyset\}$
19:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r) + \delta$
20:	<b>end if</b>
21:	<b>else if</b> $S(i) = 2$ <b>then</b>
22:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r) - \delta$
23:	<b>else if</b> $S(i) = 3$ <b>then</b>
24:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r) + \delta$
25:	<b>else</b> $\{S(i) = 4\}$
26:	<b>if</b> $A(i) \in \{1,2\}$ <b>then</b>
27:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r) + \delta$
28:	<b>else if</b> $A(i) = 3$ <b>then</b>
29:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r) - \delta$
30:	<b>else</b> $\{A(i) \in \{4, \emptyset\}\}$
31:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_i^T(r)$
32:	<b>end if</b>
33:	<b>end if</b>
34:	<b>for each</b> $P_i^T(r+1) > P_{\max}$ <b>do</b>
35:	$P_i^T(r+1) \leftarrow P_{\max}$
36:	<b>end for</b>
37:	<b>end for</b>
38:	handover: reallocate user association and update $S(i)$ and $A(i)$ for all $i \in \Phi_B$
39:	<b>end for</b>

단계 25부터 33까지는  $S(i) = 4$ 인 경우를 위한 부분이다.  $A(i) \in \{1,2\}$ 인 경우 송신 전력 세기를 늘려 단말들이 포화상태인 인접한 기지국의 부담을 덜도록 한다.  $A(i) = 3$ 인 경우 인접 기지국이 송신 전력을 늘릴 것으로 예상되므로 송신 전력 세기를 줄여 원활한 핸드오버를 돕는다.  $A(i) \in \{4, \emptyset\}$ 인 경우 문제가 발생하지 않았거나 모르는 상태이므로 송신 전력 세기를 유지하면서 이후의 변화에 대응하도록 한다.

단계 34부터 36까지는 최대 송신 전력 세기를 제한하는 부분이다. 단계 38은 각 반복마다 사용자 단말들은 수신하는 신호가 가장 강한 기지국으로의 핸드오버를 수행하고, 기지국들은 그에 따른 기지국 상태 정보를 갱신하는 부분이다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용한 변수는 표 3의 값을 사용하였고  $5\text{km} \times 5\text{km}$ 의 공간에 대해 진행하였다. 따라서 해당 공간에 존재하는 기지국 개수는 평균 25개라 할 수 있다. 수신한 상태 신호가 특정 세기 미만일 때 해당 정보를 사용하지 않기로 하는 기준은 노이즈 세기  $\sigma^2$ 로 정했다. 시뮬레이션 결과는 그림 3과 그림 4로 나타내었다.

그림 3은 알고리즘 수행 전과 후의 사용자 밀도에 따른 아웃티지 개선 정도를 나타낸다. 제한한 알고리

표 3. 시뮬레이션 변수  
Table 3. Simulation parameters

$P_0^T$ [dBm]	45
$P_{max}$ [dBm]	50
$P_{on}$ [dBm]	56
$P_{sleep}$ [dBm]	40
$B$ [MHz]	10
$N_{max}$	100
$R_{min}$ [bit/s/Hz]	$10^4$
$\lambda_B$ [1/km <sup>2</sup> ]	1
$\lambda_U$ [1/km <sup>2</sup> ]	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
$\rho$	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9
$\delta$ [dB]	0.2
$R$	100
$\sigma^2$ [dBm]	-80

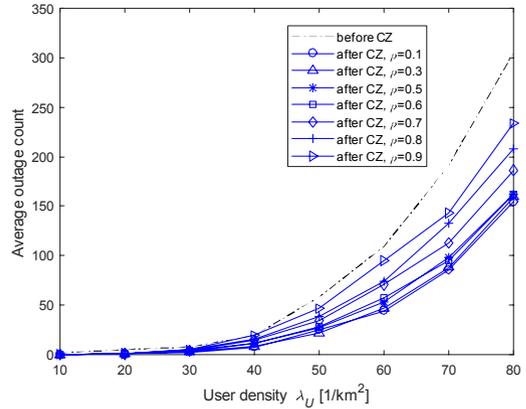


그림 3. 사용자 밀도에 따른 아웃티지 개선  
Fig. 3. Outage improvement for different user densities

즘은 기지국의 이용률이  $\rho$  미만일 때 인근 기지국으로부터 수신한 상태 정보에 따라 기지국 절전을 결정한다. 낮은  $\rho$  값일수록 기지국 절전보다는 아웃티지 성능에 중점을 두며 개선 정도가 뛰어나다.  $\rho$  기준을 어느 정도 높이기까지는 대등한 아웃티지 개선 정도를 보여주며,  $\rho = 0.6$ 까지는 알고리즘 적용 전과 비교하여 최소 50%의 아웃티지 감소 성능을 보인다.

그림 4는 알고리즘 수행 전과 후의 사용자 밀도에 따른 에너지 효율을 나타낸다. 결과는  $\rho$ 가 높을수록 더 적극적인 절전을 시도하기 때문에 향상된 에너지 효율을 얻음을 보여준다. 하지만 사용자 밀도가 높은 환경에서는 이용률이 낮은 기지국의 수가 적기 때문에 절전 시도가 줄어들는다. 또한 더 많은 많은 사용자들의 아웃티지 개선을 위해 에너지 효율 증가 정도가 둔화하는 모습을 보인다.

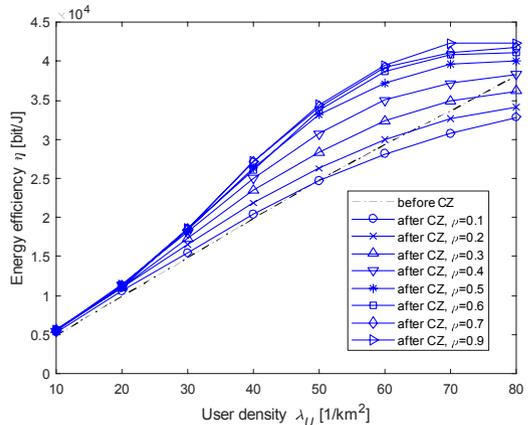


그림 4. 사용자 밀도에 따른 에너지 효율  
Fig. 4. Energy efficiency for different user densities

### V. 결론 및 논의

본 논문에서는 랜덤 셀룰러 네트워크 환경에서 셀 주밍과 기지국의 절전을 통해 아웃티지 성능 개선과 얻을 수 있는 에너지 효율과의 관계에 대해 분석하였다. 제한한 셀 주밍 및 절전 알고리즘은 적은 양의 네트워크 상태 정보만을 필요로 하는 분산된 형태로 작동하며 셀 주밍 시 향상된 아웃티지 성능을 보여주면서도 에너지 효율 또한 개선할 수 있는 모습을 나타낸다. 아웃티지 개선 정도는 보다 적극적인 절전을 시도할수록 감소하지만 어느 정도 에너지 효율 향상을 얻을 수 있는 정도까지는 대등한 아웃티지 개선 성능을 보여준다. 이 때 시스템의 사용자 밀도가 높아질수록 기지국의 절전 상태로의 전환이 어려워지고 아웃티지 개선을 위해 더 많은 전력을 사용해야하기에 얻을 수 있는 에너지 효율 향상에는 한계가 있음을 보였다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 기존의 셀 주밍 연구에서의 주된 목표였던 에너지 효율 향상과는 다르게 아웃티지 개선을 타겟으로 삼고 있다. 또한 PVT 랜덤 셀룰러 네트워크에서의 다른 연구들<sup>7, 8, 9</sup>에서는 셀 용량이 무한한 경우를 가정하거나, 기지국들의 서비스 상태에 따른 우선순위 정렬 과정이 필요하거나, 이중 네트워크(heterogeneous network)에서의 도움을 이용하였으나 본 논문에서는 모두 해당되지 않는다. 따라서 직접적인 성능 비교는 가능하지 않지만 알고리즘이 보여주는 성능을 보았을 때 아웃티지를 크게 개선하면서도 에너지 효율 향상의 여지가 있는 점에 의미가 있다고 할 수 있다.

아웃티지 개선 정도와 에너지 효율 간에는 트레이

드오프 관계가 있는데, 이를 반영하여 아래 (7)의 수식의 최적화 문제를 모델링할 수 있다.

여기서  $b$ 는 아웃티지 개선과 에너지 효율 중 어느 쪽에 비중을 더 둘 것이냐에 따라 정할 수 있는 값이다. 위 문제는 최적화 기법으로 바로 풀 수 있는 문제는 아니며, 특히 구현상 시스템 전체의 아웃티지 발생 여부를 파악할 수 있는 수단이 있어야 하기에 본 연구에서의 분산된 형태의 가정과는 다소 차이가 있다. 위 문제의 해를 푸는 것은 구체적인 알고리즘의 구현보다는 랜덤 셀룰러 네트워크 환경에서 얻을 수 있는 최적의 성능을 구하는 것이고 이는 추후 가치가 있을 연구로 보인다.

알고리즘의 작동에 필요한 기지국 상태 정보는 각 단말기에서의 아웃티지 발생 여부를 상향링크(uplink)로 전송받아 수집할 수 있다. 만일 상향링크의 통신 환경이 좋지 않은 경우 해당 정보의 원활한 전송이 어려울 수 있다. 그럼에도 불구하고 제시하는 알고리즘의 작동에는 큰 지장이 없다고 할 수 있는데, 전달해야 하는 정보는 두 가지 기준에 따른 아웃티지 발생 여부뿐으로 2-bit의 적은 양의 정보 전송이기 때문에 기지국간의 정보 교환과 동일하게 큰 부담이 없는 형태이기 때문이다.

### References

- [1] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. K. Bhargava, "Green cellular networks: a survey, some research issues and challenges," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 13, no. 4, pp. 524-540, Fourth Quarter 2011.
- [2] Z. Niu, Y. Wu, J. Gong, and Z. Yang, "Cell zooming for cost-efficient green cellular networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 11, pp. 74-79, Nov. 2010.
- [3] B. Debaillie, C. Desset, and F. Louagie, "A flexible and future-proof power model for cellular base stations," *2015 IEEE 81st VTC Spring*, pp. 1-7, Glasgow, 2015.
- [4] J. Y. Kim, J. Kim, and C. S. Kang, "A novel power-efficient BS operation scheme for green heterogeneous cellular networks," *J. KICS*, vol. 41, no. 12, pp. 1721-1735, Dec. 2016.
- [5] E. Oh, K. Son, and B. Krishnamachari, "Dynamic base station switching-on/off strategies for green cellular networks," *IEEE*

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{k \in \Phi_U} \mathbf{1}[R_k < R_{\min}] - b\eta \\
 & \text{s.t. } 0 \leq P_i^T \leq P_{\max}, \forall i \\
 & \text{where } \eta = \sum_{k \in \Phi_U} R_k / \sum_{i \in \Phi_B} P_i, \\
 & P_i = \begin{cases} P_{on} + P_i^T, & \text{active} \\ P_{sleep}, & \text{inactive} \end{cases}, \quad (7) \\
 & R_k = \frac{B}{N_{\max}} \log_2(1 + \text{SINR}_{ki}), \\
 & \text{SINR}_{ki} = \frac{P_i^T \times 10^{-PL_{ki}/10}}{\sum_{j \in \Phi_B \setminus \{i\}} P_j^T \times 10^{-PL_{kj}/10} + \sigma^2}.
 \end{aligned}$$

*Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2126-2136, May 2013.

- [6] J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, "A new tractable model for cellular coverage," *2010 48th Annu. Allerton Conf. Commun., Contr., and Comput. (Allerton)*, pp. 1204-1211, Allerton, IL, 2010.
- [7] A. R. Khamesi and M. Zorzi, "Energy and area spectral efficiency of cell zooming in random cellular networks," *IEEE GLOBECOM*, pp. 1-6, Washington, DC, 2016.
- [8] Z. Zhang, F. Liu, and Z. Zeng, "The cell zooming algorithm for energy efficiency optimization in heterogeneous cellular network," *WCSP*, pp. 1-5, Nanjing, 2017.
- [9] Y. You, J. Sheng, Q. Zhu, C. Zhu, and D. Ma, "A novel cell zooming strategy towards energy efficient based on load balancing in random heterogeneous networks," *2017 IEEE ICCT*, pp. 522-527, Chengdu, 2017.
- [10] 3GPP TR 36.942, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (Release 15)*, Jul. 2018.

**탁 준 우 (Jun-Woo Tak)**



2015년 2월 : 고려대학교 컴퓨터통신공학부 졸업  
 2015년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박사 통합과정  
 <관심분야> 통신공학, 간섭관리, 정보이론

[ORCID:0000-0001-9102-980X]

**윤 종 윤 (Jong-Yoon Yoon)**



2013년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 졸업  
 2013년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박사 통합과정  
 <관심분야> 통신공학, 간섭관리, 시공간부호

[ORCID:0000-0002-4415-2458]

**김 호 연 (Hoyoun Kim)**



2012년 8월 : 서울대학교 전기·정보공학부 졸업  
 2018년 8월 : 서울대학교 전기·정보공학부 박사  
 2018년 9월~2019년 2월 : 서울대학교 연구원  
 2019년 5월~현재 : 삼성전자

<관심분야> 통신공학, 간섭관리, 시공간부호

[ORCID:0000-0001-7357-9234]

**양 모 찬 (Mochan Yang)**



2005년 8월 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업  
 2009년 2월 : 숭실대학교 정보통신공학과 석사  
 2014년 8월 : 숭실대학교 정보통신공학과 박사  
 2015년 : GCT 리서치 선임연구원

2016년~현재 : 한화시스템(주) 전문연구원

<관심분야> 전송통신, OFDM, MIMO, 4G, 5G, 인지무선기술

[ORCID:0000-0003-1150-2279]

노 종 선 (Jong-Seon No)



1981년 2월 : 서울대학교 전자  
공학과 공학사

1984년 2월 : 서울대학교 대학원  
전자공학과 공학석사

1988년 5월 : University of  
Southern California 전기공학  
과 공학박사

1988년 2월~1990년 7월 : Hughes Network Systems  
Senior MTS

1990년 9월~1999년 7월 : 건국대학교 전자공학과 부  
교수

1999년 8월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 교수  
<관심분야> 시퀀스, 협력통신, 시공간부호, 네트워크코  
딩, LDPC 부호, OFDM, 이동통신, 암호학

[ORCID:0000-0002-3946-0958]