

# User Association에 따른 User-Centric Cell-Free Massive MIMO 성능분석

이 제 우\*, 김 영 민\*, 안 희 준\*, 홍 인 기<sup>o</sup>

## Analysis of User Association Impact on User-Centric Cell-Free Massive MIMO

Je-Woo Lee\*, Young-Min Kim\*, Hee-Jun Ahn\*, Een-Kee Hong<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 Cell-Free massive MIMO 중 하나인 User-Centric 방식을 적용할 때 각 AP에 연결되는 사용자 수에 따른 시스템 성능을 분석한다. Cell-Free 방식은 다수의 안테나를 넓은 지역에 걸쳐 분산시킴으로써 서비스 지역 내 사용자들에게 균등한 전송 속도를 제공한다는 장점이 있지만, 이 장점을 취하기 위해 각 AP와 중앙처리 장치 사이의 프론트 홀에서 요구하는 용량이 매우 크다는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 제안된 User-Centric Cell-Free 방식은 일정 수의 사용자에게만 신호를 전송하여 프론트 홀을 통해 전송되는 용량을 감소시키면서도 일반 Cell-Free 방식과 비슷한 성능을 보여준다. 본 논문에서는 User-Centric 방식에서 각 AP에 연결되는 사용자 수에 따른 전체 시스템 성능을 분석하여, 사용자 밀도에 따른 각 AP에 연결되는 사용자 수에 의한 시스템 수율 및 사용자 수율 간 편차를 구하였고 User-Centric Cell-Free 방식에서 일반 Cell-Free 방식 대비 사용자 수에 따른 성능 경과와 함께 최적의 성능을 얻기 위하여 고려해야 할 요소들을 제시하였다.

**Key Words** : User-Centric Cell-Free, Massive MIMO, User Association, Network Capacity, Fronthaul Capacity

### ABSTRACT

In this paper, the system performance according to the number of users associated with each AP is analyzed when the user-centric method, which is one of the cell-free massive MIMO, is applied. The cell-free massive MIMO scheme has the advantage of providing a uniform data rate to users in the service area by distributing multiple antennas over a large area. However, in order to take advantage of this, there are disadvantages such as high capacity required in the front-haul between each AP and the central processing unit. In order to improve this, the user-centric method has been proposed to transmit signals only to a certain number of users and reduce the load of front-haul, showing similar performance to the cell-free scheme. In this paper, by analyzing the overall system performance according to the number of users connected to each AP in the user-centric method, the total system throughput and the throughput deviation between users are evaluated. In addition, the performance reduction of user-centric cell-free massive MIMO compared to general cell-free massive MIMO is analyzed for the high and low user density environments and factors to be considered for system optimization are presented.

\* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2016-0-00291-0051001)

• First Author : Kyunghee University Department of Electronic Engineering, jeeu@khu.ac.kr, 학생(석사), 학생회원

o Corresponding Author : Kyunghee University Department of Electronic Engineering, ekhong@khu.ac.kr, 정교수, 중신회원

\* Kyunghee University Department of Electronic Engineering, kst8709@khu.ac.kr, 학생(석사), 학생회원; hmk6160@khu.ac.kr, 학생(석사), 학생회원

논문번호 : 202008-185-A-RE, Received August 5, 2020; Revised August 28, 2020; Accepted August 29, 2020

## 1. 서론

최근 이동통신 사용자들의 폭발적인 트래픽 수요 증가에 맞춰 데이터 전송 속도를 향상시키기 위해 다양한 기술들을 새롭게 개발되어 활용하고 있다. 그중 핵심 기술로 언급되는 mMIMO(massive MIMO)는 기존의 MIMO(Multiple Input Multiple Output)보다 훨씬 많은 수의 안테나를 사용하여 셀 내 무선자원의 효율을 극대화하는 기술이다<sup>1)</sup>. 많은 수의 안테나가 장착된 안테나 어레이에서 전송되는 신호는 빔 폭을 좁게 만들어 공간적으로 분리된 사용자들 간 시간 및 주파수 자원을 재사용할 수 있게 만든다. 이러한 mMIMO는 하나의 기지국에서 수행되는 중앙집중형과 여러 기지국 혹은 다수의 AP에서 수행되는 분산형으로 나눌 수 있다<sup>2)</sup>. 중앙집중형과 비교하여 분산형 mMIMO는 지리적으로 분리된 다수의 안테나로부터 신호를 받기 때문에 페이딩(Fading) 효과를 효과적으로 극복하여 높은 다이버시티 이득을 취할 수 있고, 셀 경계영역에 존재하는 사용자에게도 좋은 환경으로 서비스할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 방식은 조금씩 차이는 있지만 보통 network MIMO, CoMP (Coordinated Multi-Point), DAS(Distributed Antenna System)으로 불리며 이전부터 연구되어왔다. 하지만 분리된 네트워크 환경에서 이를 동시에 운영하기 위해선 네트워크의 긴밀한 동기화, 제어 시그널들의 저지연 통신, 간섭 제어 방식, 동일 데이터를 각기 다른 기지국 또는 AP에서 보내기 위한 프론트 홀 용량 등 극복해야 할 문제들이 다수 존재한다<sup>3)</sup>.

분산형 mMIMO의 개념을 바탕으로 최근에 새로운 네트워크 구조인 CF(Cell-Free) mMIMO가 제시되었다<sup>4)</sup>. CF mMIMO는 다수의 AP를 넓은 지역에 퍼뜨려 다양한 경로를 통해 신호를 전송하는 방식으로 사용자에게 다이버시티 효과를 극대화하고, 넓은 서비스 지역을 형성하는 기술이다. 그림1은 기존의 분산형 네트워크 구조인 network MIMO와 새롭게 제시된 네트워크 구조인 CF mMIMO 구조를 나타낸 그림이다. 그림 1(a)의 network MIMO 구조는 각각의 기지국이 담당하는 영역이 셀로 구분되어 있으며, 서로 다른 기지국과 연결된 백홀 망으로 셀 간 간섭 제어와 같은 기술들이 적용된다. 반면 CF mMIMO는 그림 1(b)와 같이 다수의 AP들이 하나의 중앙처리장치(CPU)로 묶여있고 대용량 프론트 홀을 이용하여 지역 내의 여러 사용자를 동시에 서비스한다. 기존의 하나의 기지국에서 일정 서비스 지역을 담당하는 셀 형태의 네트워크 구조와는 다르게 명확한 서비스 경계가 구분되

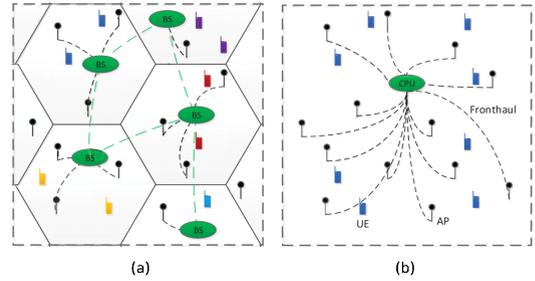


그림 1. (a) network MIMO 구조, (b) CF mMIMO 구조<sup>3)</sup>  
Fig. 1. (a) network MIMO, (b) CF mMIMO.

지 않기 때문에 “Cell-Free”라는 이름으로 불리게 되었다. CF mMIMO 구조를 사용하여 얻을 수 있는 이점을 정리하면 다음과 같다.

**Channel Hardening:** 분산형 mMIMO의 구조와 마찬가지로 다수의 AP가 넓은 지역에 퍼져있기 때문에, 사용자들은 각 AP로부터 다양한 채널을 통한 신호를 수신하게 되어 다이버시티 효과가 극대화된다. 기존의 중앙집중형 mMIMO에서는 사용자의 위치에 따라 색도 페이딩(Shadow Fading)으로 인해 채널의 품질이 급격히 감소하는 현상이 존재하지만, CF mMIMO에서는 많은 수의 분산된 AP를 통해 신호를 수신함으로써 수신된 신호의 품질이 보장된다.

**Uniform Throughput:** 중앙집중형 mMIMO에서는 기지국과의 거리가 가까운 사용자들은 좋은 품질의 채널을 형성하고, 채널 품질에 비례한 서비스를 받지만 기지국과의 거리가 멀어질수록 그 서비스의 품질이 떨어진다는 문제가 있다. 하지만 CF mMIMO에서는 넓은 지역에 퍼져있는 다수의 AP로 인해 송수신 거리가 짧아지고, 서비스 지역 내에서의 송수신 거리에 대한 차이가 미미해진다. 이는 결국 사용자의 위치와는 상관없이 서비스 지역 내 어느 곳이든 비슷한 품질의 서비스를 제공할 수 있다.

**Energy Efficiency:** CF mMIMO에서 사용자들은 각각의 AP로부터 신호를 전송받게 되는데, AP 간의 거리 차로 인해 각기 다른 채널을 경험한 신호가 결합된 형태로 수신한다. 이때 사용자로부터 거리가 가까운 AP에서는 상대적으로 먼 AP들보다 좋은 품질을 가진 신호를 전송받게 된다. 이를 이용해 각각의 AP에서는 복소 빔포밍(Conjugate Beamforming)을 통해 동시에 서비스해야 할 사용자 중 거리가 가까운 사용자에게 더 많은 전력을 할당하여 전송함으로써 전체적으로 봤을 때 에너지 효율적인 전송이 가능케 한다.

이처럼 다양한 장점들로 인하여 CF mMIMO 구조가 제안되고 이에 대해 많은 성능분석 및 개선된 구조가 제안되었다. 참고문헌 [4], [5]에서는 CF mMIMO 개념 소개와 함께 중앙집중형 mMIMO인 스몰셀 시나리오와 사용자당 수율 비교를 통해 모든 사용자에게 균등한 수율을 제공하면서도 전체 수율을 향상할 수 있음을 보였다. 참고문헌 [6], [7]에서는 에너지 효율 (Energy Efficiency)에 대한 성능분석이 이루어졌고, [8]-[10]에서는 다양한 채널 환경(Ricean Fading Channel, Hardware Impairment, mmWave 채널 등)에서의 성능분석이 이루어졌다.

하지만 CF mMIMO에서도 극복해야 할 다양한 문제들이 존재한다. 각각에 대해 설명하면 다음과 같다.

**Orthogonal Pilot Sequence:** CF mMIMO는 TDD방식으로 동작하며 그림 2와 같이 총 세 가지 단계로 구분된다. 첫 번째 단계인 UL Training에서 사용자들은 고유한 파일럿 시퀀스를 가지고 지역 내 모든 AP에게 전송하게 된다. 각 AP는 사용자에 대한 채널 추정을 할 때 이 파일럿 시퀀스를 이용한다. 사용자들이 모두 고유한 파일럿 시퀀스를 갖기 위해선 그 길이가 사용자 수보다 많거나 같아야 한다. 이는 시간 자원을 사용하는 것이므로 제공 가능한 수율이 감소하게 되는데, 만약 사용자에게 고유한 시퀀스를 부여하지 않는다면 데이터 전송에 사용되는 시간 자원은 늘어나지만, 반대로 파일럿 오염으로 인한 채널 추정치에 오차가 늘어나게 되어 신호 전송 시 Beamforming의 정확도에 영향을 주게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위해 참고문헌 [11]에서는 적은 수의 파일럿 시퀀스를 가지고 사용자에게 중복 할당하는 문제에 대해서 클러스터링을 통해 파일럿 오염을 최소화하는 기법이 제시되었다.

**Power Control Optimization:** CF mMIMO의 에너지 효율은 채널 추정치를 보고 각 AP에서 사용자에게 적절한 전력 제어를 적용함으로써 얻어진다. 이 과정에서 전력 제어를 어떤 식으로 적용할 것인가에 대한 문제가 존재한다. 전체 수율을 최대화하는 최적화 문제에 대해 max-min 전력 등 다양한 접근방식이 존재하지만, 상당한 계산복잡도를 요구하기 때문에 실제로 적용하기에는 어렵다. 참고문헌 [4]에서는 최적화

문제를 단순화하여 적용하였고, [12]에서는 사용자의 채널 추정치에 비례하여 전력을 할당하는 일종의 MRC (Maximum Ratio Combining) 기법이 사용되었다.

**Limited Fronthaul Capacity:** CF mMIMO의 구조는 사용자에게 데이터를 전송할 때 모든 AP가 참여함으로써 그 구조적 장점이 성립된다. 이를 위해서는 서비스하는 모든 사용자에게 대한 데이터를 각 AP와 중앙처리장치가 주고받아야 하므로 각각의 프론트 홀에서 높은 처리용량을 가져야 한다는 부담이 있다. 참고문헌 [13]에서는 제한된 프론트 홀 용량 시나리오에서의 성능 변화에 대해 분석하였다. 프론트 홀 용량이 무제한일 경우 전체 성능은 사용자 수에 비례하여 계속 증가할 수 있지만, 용량이 제한된 경우 사용자 수에 따라 성능에 한계가 있음을 제시하였다. 이에 대해 제한된 프론트 홀 용량에 대한 문제를 해결하기 위해 사용자에게 신호를 전송할 때 모든 AP가 참여하는 것이 아닌, 채널 이득이 높은 몇 개의 AP만 참여하는 User-Centric(UC) 방식이 제안되었다. 참고문헌 [12]에서 이 방식을 통해 프론트 홀의 요구사항을 감소시키면서 CF 방식과 비슷한 성능을 낼 수 있음을 보였다.

위에서 언급한 여러 문제에 대해 제안된 방식 중, UC 방식에서 어떤 사용자를 얼마나 선택할 것인지에 대한 문제인 각 AP에서의 사용자 연결(user association)에 대한 기준 제정이 필요하다. 참고문헌 [11]에서는 사용자 수와 파일럿 시퀀스의 수를 고려한 사용자 연결 방식을 제안한 바가 있다. 하지만 이는 채널 추정치의 손상을 최소화하는 문제에 대한 방법 이므로 적절한 기준이 될 수 없다. 따라서 본 논문에서는 프론트 홀 용량이 무제한이라 가정하고, AP당 서비스하는 적절한 사용자 수를 선택하는 문제를 해결하기 위하여 사용자 밀도와 연결 사용자 수에 따른 영향을 분석하였다.

## II. 시스템 모델

선행 연구와의 적절한 비교를 위해 본 논문에서는 [4], [5], [12]에서 사용된 시스템 모델을 고려하였다. 단일 안테나로 이루어진  $M$ 개의 AP와  $K$ 개의 사용자를 무작위로 배치하였다. 다수의 안테나를 사용하면서 발생하는 채널 추정과정의 오버헤드를 고려하여 TDD 방식으로 채널 코히어런스 간격 동안 송수신이 이루어진다고 가정하였다. 동작 과정은 상향링크(Uplink) 채널 추정, 하향링크(Downlink) 데이터 전송, 상향링크 데이터 전송으로 구성되며, 각 단계에 할당된 시간



그림 2. TDD 동작 구조  
Fig. 2. TDD operation architecture.

은  $\tau_p + \tau_d + \tau_u \leq \tau_c$ 로 표현될 수 있고 단위는 심볼(샘플)이다. 첫 번째 단계인 상향링크 채널 추정에서 사용자는 할당받은 파일럿 시퀀스를 전송하여 AP에서 채널 추정이 이루어질 수 있도록 한다. 두 번째 단계에서 AP는 채널 추정치를 이용하여 복소 빔포밍을 적용한 형태로 사용자에게 보낼 데이터를 전송한다. 세 번째 단계에서 사용자는 데이터를 전송하고 AP에서는 마찬가지로 채널 추정치를 이용한 디코딩을 수행한다. 각 채널 계수들은  $\tau_c$ 동안 변하지 않는 것으로 가정하였다.  $m$ 번째 AP와  $k$ 번째 사용자 사이의 채널은  $g_{mk} = \beta_{mk}^{1/2} h_{mk}$ 로 표현되며, 여기서  $\beta_{m,k}$ 는 경로손실과 shadow fading을 포함한 large-scale fading을,  $h_{mk} \sim CN(0, 1)$ 는 small-scale fading을 나타낸다. large-scale fading 계수는  $\beta_{mk} = 10^{PL_{mk}/10} 10^{\sigma_{sh} z_{mk}}$ 로 표현되며, 여기서  $PL_{mk}$ 는  $m$ 번째 AP와  $k$ 번째 사용자 사이의 거리에 따른 경로손실 값을 dB로 표현한 것이다. 경로 손실 값은 [14]에서 제시된 모델을 사용하였으며, 다음과 같다.

$$PL_{mk} = \begin{cases} -L - 35 \log_{10}(d_{mk}) & \text{if } d_{mk} > d_1 \\ -L - 10 \log_{10}(d_1^{1.5} d_{mk}) & \text{if } d_0 < d_{mk} \leq d_1 \\ -L - 10 \log_{10}(d_1^{1.5} d_0^2) & \text{if } d_{mk} < d_0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $d_{mk}$ 는  $m$ 번째 AP와  $k$ 번째 사용자 사이의 거리를 나타내며,  $L$ 은 다음과 같다.

$$L = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_{AP}) - [1.11 \log_{10}(f) - 0.7] h_{MS} + 1.56 \log_{10}(f) - 0.8 \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 반송 주파수(MHz 단위)이며,  $h_{AP}$ 와  $h_{MS}$ 는 각각 AP와 사용자의 안테나 높이를 의미한다. shadow fading은  $\sigma_{sh}$ 와  $z_{mk}$ 로 표현되는데,  $\sigma_{sh}$ 는 shadow fading의 표준편차이다.  $z_{mk}$ 는 실제 시나리오에서 인접한 거리에 있는 AP와 사용자의 경우 그 환경이 비슷하여 채널 계수들에 상관성이 존재한다. 이를 고려하여  $z_{mk} = \sqrt{\delta} a_m + \sqrt{1 - \delta} b_k$ 로 표현하였으며,  $a_m \sim N(0, 1)$ 과  $b_k \sim N(0, 1)$ 는 각각  $m$ 번째 AP와  $k$ 번째 사용자에 의해 결정되는 파라미터이다.  $\delta$ 는 0과 1 사이의 수이며, 앞서 설명한 채널의 유사성을 위해  $a_m$ 과  $b_k$ 의 공분산은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$E[a_m a_m'] 2^{-\frac{d_{AP}(m, m')}{d_{decor}}} E[b_k b_k'] = 2^{-\frac{d_{MS}(k, k')}{d_{decor}}} \quad (3)$$

여기서  $d_{AP}(m, m')$ 과  $d_{MS}(k, k')$ 는 각각  $m$ 번째와  $m'$ 번째 AP와의 거리,  $k$ 번째와  $k'$ 번째 사용자와의 거리를 나타낸다.

### 2.1 상향링크 채널 추정

상향링크 채널 추정 단계에서 각 사용자는 AP가 채널 추정치를 획득할 수 있도록 파일럿 시퀀스를 송신한다. 이때 사용되는 시퀀스의 수는 길이  $\tau_p$ 에 의해 결정된다. 모든 파일럿 시퀀스가 직교하기 위해선  $\tau_p$ 가 사용자수  $K$ 보다 큰 값을 가져야 한다. 하지만 사용자가 많은 경우, 모든 사용자에게 직교한 파일럿 시퀀스를 할당할 수 없어서 채널 추정과정에서 중복된 시퀀스를 사용하는 사용자로부터 파일럿 오염이 발생하게 된다. 이 과정은 수식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y_m = \sqrt{\tau_p \rho_p} \sum_{k=1}^K g_{mk} \phi_k + w_m \quad (4)$$

여기서  $y_m$ 은  $m$ 번째 AP에서 수신된 신호를,  $\rho_p$ 는 파일럿 시퀀스 심볼의 송신전력,  $\phi_k$ 는 크기가  $\tau_p \times 1$ 이고  $\|\phi_k\|^2 = 1$ 인  $k$ 번째 사용자의 파일럿 시퀀스,  $w_m$ 은 가우시안 잡음을 의미한다. 이후 AP는 각 사용자의 채널을 추정하기 위한 연산을 수행한다. 이때 어떤 채널 추정방식을 사용하느냐에 따라 정확도가 달라진다. 본 논문에서는 두 가지 방식인 Least-Squares (LS) 추정과 Mean-Square Estimation (MMSE) 추정을 고려하였다. LS 추정방식의 경우 정확도는 낮지만 간단한 방식으로 구현할 수 있어 AP에서의 계산복잡도를 줄이고 프론트 홀로 전송되는 채널 추정치의 양도 줄일 수 있다. MMSE 추정방식은 LS 추정보다 복잡하고 프론트 홀로 보내지는 데이터양도 많아지지만, 더 정확한 채널 추정치를 얻을 수 있다. 각 추정방식에 따른 채널 추정치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LS: \hat{g}_{mk} = (1/\sqrt{\tau_p \rho_p}) \tilde{y}_{mk} = (1/\sqrt{\tau_p \rho_p}) \phi_k^H y_m \quad (5)$$

$$MMSE: \hat{g}_{mk} = E[\tilde{y}_{mk}^* g_{mk}] E[\tilde{y}_{mk}^2]^{-1} \tilde{y}_{mk} = \frac{\sqrt{\tau_p \rho_p} \beta_{mk}}{\tau_p \rho_p \sum_{i=1}^K \beta_{mi} |\phi_k^H \phi_i|^2 + \sigma_w^2} \tilde{y}_{mk} \quad (6)$$

여기서  $\tilde{y}_{mk} = \phi_k^H y_m$  이고,  $(\cdot)^*$ 는 전치,  $(\cdot)^H$ 는 복소 전치 연산을,  $\sigma_w$ 는 가우시안 잡음의 표준편차를 의미한다. 참고할 점은 AP에서는 사용자가 파일럿 신호 전송에 사용되는 송신전력  $\rho_p$ 와 large-scale fading 계수  $\beta_{mk}$ 를 알고 있다고 가정한다.

### 2.2 하향링크 데이터 전송

하향링크 데이터 전송 단계에서 각 AP는 프리코딩을 거쳐 신호를 송신한다. 이때의 프리코딩은 복소 빔포밍 방식을 고려한다. 이 과정을 통해 각 안테나에서 송신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$x_m = \sqrt{\rho_d} \sum_{k=1}^K C_{mk} \eta_{mk}^{1/2} \hat{g}_{mk}^* s_k \quad (7)$$

여기서  $x_m$ 은  $m$ 번째 AP에서 송신된 신호,  $\rho_d$ 는 AP에서 송신된 신호의 세기,  $C_{mk}$ 는  $m$ 번째 AP에서  $k$ 번째 사용자에게 대한 서비스 여부,  $\eta_{mk}$ 는  $m$ 번째 AP에서  $k$ 번째 사용자로 송신을 위한 전력제어계수,  $s_k$ 는  $k$ 번째 사용자에게 전송될 신호이다. 본 논문에서는 사용자 연결에 대한 영향을 분석하는 것이므로 [12]에서 사용된 바와 같이 MRC 기법을 사용하였다. 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\eta_{mk} = 1 / \sum_{i=1}^K C_{mi} |\hat{g}_{mi}|^2 \quad (8)$$

$C_{mk}$ 는 일반 CF 방식의 경우 모든 계수가 1이지만, UC 방식의 경우 각 AP에 연결될 사용자 수( $N_{uc}$ )를 고려하여 채널 추정치로부터 값이 큰 사용자 순으로  $N_{uc}$ 만큼 선택하여 계수를 1로 설정하고, 나머지는 0으로 설정한다. 이후  $k$ 번째 사용자로부터 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r_k = \sum_{m=1}^M g_{mk} x_m + n_k \quad (9)$$

여기서  $n_k$ 는  $\sigma_n$ 의 표준편차를 갖는 가우시안 잡음이다. 이를 통해 각 사용자에게서 얻어질 수 있는 SINR과 수율을 계산하면 다음과 같다.

$$SINR_k = \frac{\rho_d \left| \sum_{m=1}^M \eta_{mk}^{1/2} g_{mk} \hat{g}_{mk}^* s_k \right|^2}{\rho_d \sum_{i \neq k}^K \left| \sum_{m=1}^M \eta_{mi}^{1/2} g_{mk} \hat{g}_{mi}^* s_i \right|^2 + \sigma_n^2} \quad (10)$$

$$R_k = \frac{1}{2} \frac{\tau_c - \tau_p}{\tau_c} BW \cdot \log_2(1 + SINR_k) \quad (11)$$

계산의 단순화를 위해 하향링크와 상향링크에 할당된 시간은 같다고 가정했다. [12]의 결과를 통해 CF 방식과 UC 방식 모두 하향링크와 상향링크에 끼치는 영향이 같으므로 본 논문에서는 하향링크에 대한 영향만 분석하였다.

### III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 사용자 연결 수  $N_{uc}$ 에 따른 UC 방식의 성능 변화를 분석하기 위하여 총 세 가지 성능분석 결과를 제시한다. 고정된 비율의  $N_{uc}$ 에서 사용자 수의 변화에 따른 사용자당 수율 누적 분포도와,  $N_{uc}$ 의 변화에 따른 평균 수율과 분산으로, 이 경우 사용자 밀도에 따른 두 가지 경우를 고려하였다. 첫 번째 성능평가 결과의 경우 선행 연구들에서 사용자 밀도가 많거나 적은 환경에 대한 성능분석은 이루어졌지만, 구체적으로 밀도의 변화에 대한 분석은 존재하지 않았다. 따라서 이에 대한 분석을 통해 UC 방식의 최적화된 성능과 그 한계를 보이고자 한다. 두 번째와 세 번째의 경우, 선행 연구들에서 고정된 수의  $N_{uc}$ 에 대해 성능분석이 이루어졌기 때문에 주어진 환경에서 최적의  $N_{uc}$ 를 선택하기 위한 기준을 적절히 제시하지 못하였다. 그러므로 이에 대한 분석을 통해 최적의  $N_{uc}$ 를 선택할 수 있는 기준을 제시하고자 한다. II절에서 언급한 바와 같이, 성능분석에는 [4], [5], [12]에서 제시된 모델을 적용하였다. 각 성능은 채널 추정의 정확도에 따른 영향을 고려하기 위해 MMSE, LS 기법을 사용하였고, 성능의 상한점을 나타내기 위해 완벽한 CSI 추정을 가정한 그래프도 함께 제시하였다. 구체적인 파라미터들의 수치는 표 1과 같다.

그림 3은 사용자 수에 따른 UC 방식과 CF 방식의 사용자당 수율 누적 분포도이다. 사용자 수  $K$ 는 밀도가 낮은 상황( $K=10, 20, 30$ )부터 높은 상황( $K=40, 50, 60$ )으로의 변화량을 볼 수 있도록 하였다. 채널 추정방식은 일반적인 때를 가정하여 MMSE 방식으로 추정하였고, UC에서 사용자 연결 수  $N_{uc}$ 는 사용자 수

표 1. 시스템 파라미터  
Table 1. System parameters.

Parameter	Value
Sites Areas	1km <sup>2</sup>
# of APs	100
AP Heights	15m
MS Heights	1.65m
Bandwidth	20MHz
Carrier Frequency	1.9GHz
$\sigma_{sh}$	8dB
Coherence Time Interval	200 symbols
Pilot Sequence Length	15 symbols
AP Tx Power	200mW
MS Tx Power	100mW

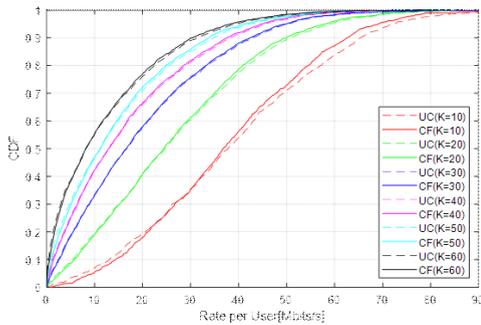


그림 3. 사용자 수에 따른 사용자당 수율 누적 분포도  
Fig. 3. CDF of rate per user according to number of users.

$K$ 에 비례하여  $N_{uc} = \lfloor 0.2K \rfloor$  로 설정하였다. 결과를 보면 밀도가 낮은 경우( $K=10$ )일 때의 UC 방식과 CF 방식의 성능 차이가 가장 높게 나타나며, 밀도가 높아질수록 그 성능 차이가 급격하게 줄어들음을 확인할 수 있다. 특히  $K=50, 60$ 인 경우에는 성능의 차이가 거의 드러나지 않는다. 이를 분석해보면,  $K=10$ 을 제외한 경우는 전부 파일럿 오염이 발생하는 경우로,  $K=20$ 의 경우 설정한  $\tau_c$ 와 크게 차이 나지 않기 때문에 성능 저하가 약간만 일어났지만, 그 이후는 점점 채널 추정치에 대한 오차가 증가하기 때문에 CF 방식에 비해 유의미한 성능 향상은 일어나지 않게 된다.

그림 4는  $N_{uc}$ 에 따른 평균 수율과 분산을 나타낸 그래프로, 사용자 밀도에 따른 두 가지 경우( $K=10, 60$ )를 고려하였다. 그림 4(a)를 보면 CF 방식과 UC 방식의 성능은 사용자 밀도가 높은 경우( $K=60$ )에는 채널 추정의 정확도와는 관계없이 거의 비슷한 평균 수율을 보인다. 특히 주목할만한 점은 CF 방식과 UC 방식의 성능 차이가 거의 없다는 점인데, 이를 통해 밀도가 높은 환경에서는  $N_{uc}$ 의 감소로 인해 발생하는 다이버시티 이득의 감소량이 사용자 간 간섭량의 감소로 인한 이득과 비슷하여 전체 수율에 영향을 거의 주지 않게 된 것으로 해석된다. 하지만 밀도가 낮은 경우( $K=10$ )엔  $N_{uc}$ 가 낮을수록 UC 방식의 성능이 선형적으로 향상되는 것으로 나타났다. 특히 LS 추정방식을 사용했을 때 그 성능 향상이 두드러지는데, 파일럿 오염이 존재하지 않으므로  $N_{uc}$ 가 감소할수록 채널 추정치의 오차가 현저히 줄어들고

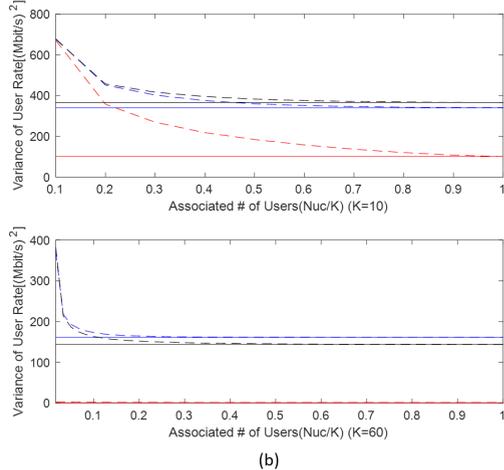
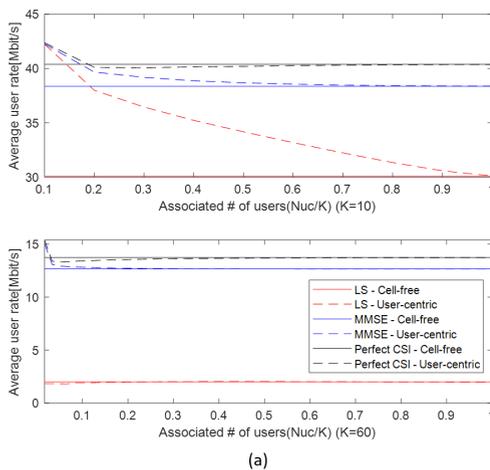


그림 4.  $N_{uc}$ 에 따른 사용자 수율 (a) 사용자 수율의 평균 (b) 사용자 수율의 분산  
Fig. 4. User rate according to  $N_{uc}$ . (a) Average user rate. (b) Variance of user rate.

AP에서 선택한 사용자에게 할당되는 전력량도 배로 증가하기 때문이다. MMSE 추정방식도 LS 추정방식보다 효과적이지 않지만, 평균 수율이 향상됨을 보였다.

하지만 그림 4(b)를 보면 사용자 밀도가 낮은 경우에 대해  $N_{uc}$ 가 감소할수록 사용자의 수율에 대한 편차가 매우 증가한다. 이는 AP들이 하나의 스펙셀처럼 동작하고 간섭이 적으므로 AP와의 거리가 가까운 사용자에게는 채널 상황이 좋으므로 높은 수율을 제공하는 반면, 이와 반대의 상황에 있는 사용자에게는 저조한 수율을 제공하기 때문이다. 따라서  $N_{uc}$ 를 증가시킬수록 높은 수율을 받던 사용자는 원하는 신호 세기의 감소와 간섭의 증가로 인해 수율의 감소를 가져오고, 반대의 상황에 있던 사용자에게는 수율이 향상되는 효과를 가져와 분산이 안정화된다. 이를 통해 사용자 밀도가 낮은 경우에는 프런트 홀 용량의 증대라는 부담을 안고서라도 CF 방식을 선택하는 것이 효과적이라 볼 수 있다. 만약 그 용량이 제한적이라면 채널 추정방식에 상관없이 적어도  $N_{uc}/K=0.2$ 를 만족하는  $N_{uc}$  이상의 수를 선택하여 UC 방식을 적용하는 것이 가장 효율적이라 볼 수 있다.

그 반대의 사용자 밀도가 높은 경우에는 앞서 설명했던 이유와 마찬가지로  $N_{uc}$ 의 변화가 거의 영향을 주지 않는다. 특히 LS 추정방식의 경우 모든  $N_{uc}$ 에 대해 거의 0에 가까운 분산을 보여주므로 이 경우 CF 방식보다는  $N_{uc}$ 를 매우 작게 설정하여 UC 방식을 설정하는 것이 효율적인 운영을 위해 필수적이라 할 수 있다. 다만 MMSE 추정방식을 적용한 경우와 완벽한 채널 추정을 가정한 경우에 대해 매우 작은 수의  $N_{uc}$ 를 선택했을 때 분산이 급증하는 결과를 보였는데, 이러한 경우에도 마찬가지로 적어도  $N_{uc}/K=0.1$ 를 만족하는  $N_{uc}$  이상의 수를 선택하여 UC 방식을 적용할 때 가장 효율적으로 사용자들을 서비스할 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 Cell-Free massive MIMO 환경에서 User-Centric 방식을 적용할 때 각 AP에 연결되는 사용자 수( $N_{uc}$ )에 따른 시스템 성능을 분석하였다. 사용자 밀도가 낮은 경우에 대해  $N_{uc}$ 의 감소는 평균 사용자 수율을 증가시키지만, 사용자 간 수율의 편차가 지수적으로 증가한다. 따라서 프런트 홀 용량이 제한적이지 않은 경우엔 CF 방식을 사용하는 것이 최적이지만, 그렇지 않으면 사용자들을 UC 방식으로 서비스하

기 위해선  $N_{uc}/K=0.2$ 를 만족하는  $N_{uc}$  이상의 수를 선택하는 것이 가장 효율적이다. 밀도가 높은 경우  $N_{uc}$ 의 감소는 평균 수율과 분산에 거의 영향을 주지 않기 때문에 CF 방식보다는 UC 방식을 선택하는 것이 효율적이다. 특히 LS 추정방식을 사용하는 경우 매우 작은 수의  $N_{uc}$ 를 선택하는 것이 필수적이며, MMSE 추정방식의 경우에는  $N_{uc}/K=0.1$ 를 만족하는  $N_{uc}$  이상의 수를 선택했을 때 사용자들의 수율 분산을 큰 폭으로 감소시킬 수 있다.

#### References

- [1] G. Lee, et al., "Research trend for 5G massive MIMO realization," *Mag. IEIE*, vol. 42, no. 10, pp. 858-876, Oct. 2015.
- [2] L. Hanzo, M. El-Hajjar, and O. Alamri, "Near-capacity wireless transceivers and cooperative communications in the MIMO Era: Evolution of standards, waveform design, and future perspectives," in *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 8, pp. 1343-1385, Aug. 2011.
- [3] J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai, and L. Hanzo, "Cell-Free massive MIMO: A new next-generation paradigm," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99878-99888, 2019.
- [4] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-Free massive MIMO versus small cells," in *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, Mar. 2017.
- [5] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-Free massive MIMO: Uniformly great service for everyone," *2015 IEEE 16th Int. Wrkshp. SPAWC*, pp. 201-205, Stockholm, 2015.
- [6] H. Q. Ngo, L. Tran, T. Q. Duong, M. Matthaiou, and E. G. Larsson, "On the total energy efficiency of cell-free massive MIMO," in *IEEE Trans. Green Commun. and Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 25-39, Mar. 2018.
- [7] H. Yang and T. L. Marzetta, "Energy efficiency of massive MIMO: Cell-free vs. cellular," *2018 IEEE 87th VTC Spring*, pp. 1-5, Porto, 2018.

[8] H. Q. Ngo, H. Tataria, M. Matthaiou, S. Jin, and E. G. Larsson, "On the performance of cell-free massive MIMO in ricean fading," *2018 52nd Asilomar Conf. on Signals, Syst., and Comput.*, pp. 980-984, Pacific Grove, CA, USA, 2018.

[9] J. Zhang, Y. Wei, E. Björnson, Y. Han, and S. Jin, "Performance analysis and power control of cell-free massive MIMO systems with hardware impairments," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55302-55314, 2018.

[10] G. Femenias and F. Riera-Palou, "Cell-free millimeter-wave massive MIMO systems with limited fronthaul capacity," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44596-44612, 2019.

[11] F. Riera-Palou, G. Femenias, A. G. Armada, and A. Pérez-Neira, "Clustered cell-free massive MIMO," *2018 IEEE GC Wkshps*, pp. 1-6, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018.

[12] S. Buzzi and C. D'Andrea, "Cell-free massive MIMO: User-centric approach," in *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 6, pp. 706-709, Dec. 2017.

[13] H. Masoumi and M. J. Emadi, "Performance analysis of cell-free massive MIMO system with limited fronthaul capacity and hardware impairments," in *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 19, no. 2, pp. 1038-1053, Feb. 2020.

[14] A. Tang, J. Sun, and K. Gong, "Mobile propagation loss with a low base station antenna for NLOS street microcells in urban area," *IEEE VTS Spring 2001*, vol. 1, pp. 333-336, Rhodes, Greece, 2001.

이 제 우 (Je-Woo Lee)



2019년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업  
 2019년 3월~현재 : 경희대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 5G, Massive MIMO, 딥러닝  
 [ORCID:0000-0002-7621-1301]

김 영 민 (Young-MIn Kim)



2019년 2월 : 경희대학교 컴퓨터공학과 졸업  
 2019년 3월~현재 : 경희대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 5G, 머신러닝  
 [ORCID:0000-0003-2581-3318]

안 희 준 (Hee-Jun Ahn)



2020년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업  
 2020년 9월~현재 : 경희대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 5G, Network Slicing  
 [ORCID:0000-0003-4630-6163]

홍 인 기 (Een-Kee Hong)



1989년 2월 : 연세대학교 전기공학과 학사 졸업  
 1991년 2월 : 연세대학교 전기공학과 석사 졸업  
 1995년 8월 : 연세대학교 전기공학과 박사 졸업  
 1995년~1999년 : SKT선임연구원  
 1999년~현재 : 경희대학교 전자전파공학과 교수  
 2012년~현재 : 미래창조과학부 주파수 정책 자문위원  
 2013년~현재 : 5G 포럼 주파수 위원회 위원장  
 2014년~현재 : 국무조정실 주파수 심의위원  
 2018년~현재 : 한국통신학회 부회장  
 <관심분야> 5G, 이동통신  
 [ORCID:0000-0001-5086-4008]