

## 셀프리 다중안테나 네트워크를 위한 임계값 기반 사용자 중심 클러스터링

류종열<sup>1</sup> · 이웅섭<sup>1</sup> · 반태원<sup>2\*</sup>

### Threshold based User-centric Clustering for Cell-free MIMO Network

Jong Yeol Ryu<sup>1</sup> · Woongsup Lee<sup>1</sup> · Tae-Won Ban<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Information and Communication Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, 53064 Korea

<sup>2\*</sup>Professor, Department of Information and Communication Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, 53064 Korea

#### 요약

본 논문에서는 셀프리 다중안테나 환경에서 네트워크 전체 사용자의 성능을 보장하기 위한 사용자 중심의 클러스터링 기법을 고려했다. 사용자 중심 클러스터링 기법에서 각 사용자는 자신과 연결된 AP(Access Point)들 사이의 대규모 페이딩(large-scale fading) 채널 정보를 이용해 페이딩 계수가 가장 큰 AP와 페이딩 계수의 상대적 크기가 임계값 이상의 값을 갖는 AP들로 클러스터를 구성한다. 사용자 중심으로 구성된 클러스터를 바탕으로 AP들은 분산적인 기법으로 빔형성과 전력할당을 설계하고 이를 이용해 사용자들의 데이터를 협력 전송한다. 시뮬레이션을 통해 주파수 효율 관점에서 사용자 중심 클러스터링의 성능을 검증하고 주어진 환경에서 최적의 성능을 나타내는 임계값을 찾는다.

#### ABSTRACT

In this paper, we consider a user centric clustering in order to guarantee the performance of the users in cell free multiple-input multiple-output (MIMO) network. In the user centric clustering scheme, by using large scale fading coefficients of the connected access points (APs), each user decides own cluster with the APs having the higher the large scale fading coefficients than threshold value compared to the highest large scale fading coefficient. In the determined user centric clusters, the APs design the beamformers and power allocations in the distributed manner and the APs cooperatively transmit data to users by using beamformers and power allocations. In the simulation results, we verify the performance of user centric clustering in terms of the spectral efficiency and we also find the optimal threshold value in the given configuration.

**키워드** : 셀프리 네트워크, 사용자 중심 클러스터링, 다중안테나, 임계값

**Keywords** : Cell-free network, User-centric clustering, Multiple antenna, Threshold

Received 8 November 2021, Revised 13 November 2021, Accepted 16 November 2021

\* Corresponding Author Tae-Won Ban (E-mail: twban35@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9177)

Professor, Department of Information and Communication Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, 53064 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.1.114>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

5세대 무선통신 네트워크에서는 최대한 많은 사용자에게 높은 전송률의 데이터를 서비스하기 위해 정해진 면적 내에 많은 수의 AP를 배치하는 밀집 셀룰러 네트워크(dense cellular network)를 구성한다. 밀집 네트워크에서는 셀의 반경은 줄이면서 AP의 안테나 수를 늘림으로써 AP와 사용자 사이의 무선채널의 질 향상을 가져올 수 있었다. 그러나 동시에 인접 AP로부터 발생하는 간섭의 세기 또한 크게 증가하여 간섭 제어 문제가 새롭게 대두되었다. 인접 AP 간섭 문제를 해결하기 위해 AP들 사이에 협력 전송을 통해 사용자를 서비스하는 분산 다중 안테나 시스템(distributed antenna system, DAS) [1], 네트워크 다중안테나(network MIMO) [2] 등의 기술이 연구되었다. DAS 등의 네트워크에서 인접 AP들은 클러스터를 구성하여 클러스터 내의 사용자들의 데이터를 백홀(backhaul) 링크를 통해 공유하고, 협력 전송을 통해 클러스터 내부 간섭을 제어하면서 데이터를 효율적으로 전송할 수 있다. 그러나 클러스터 간 간섭은 여전히 존재하여 클러스터 외곽(edge)에 위치한 사용자의 전송률은 클러스터 외부간섭으로 인해 크게 저하될 수 있다. 근본적으로 셀을 중심으로 클러스터를 구성할 경우 언제나 클러스터 외곽 사용자가 존재하게 되고, 결과적으로 네트워크 모든 사용자에게 일정한 수준의 서비스를 제공하기 어렵다. 이런 문제를 해결하기 위해 사용자 중심으로 클러스터를 구성하는 셀프리 다중안테나 네트워크가 제안되었다. [3-8]

셀프리 다중안테나 네트워크에서 AP들은 프론트홀(front-haul) 링크를 통해 중앙처리유닛(CPU)에 연결되어 사용자들의 데이터를 공유하고 다수의 AP 간의 협력을 통해 다중안테나처럼 동작하여 데이터를 전송할 수 있다. 기존의 DAS 등과는 다르게 셀프리 다중안테나 네트워크에서 각 사용자는 자신을 중심으로 AP를 선택하여 클러스터를 구성할 수 있다. 따라서 셀 외곽 또는 클러스터 외곽 사용자가 존재하지 않는다. 셀프리 다중안테나 네트워크에서 AP간 협력 전송을 통해 각 사용자가 한 개의 AP와 통신하는 기존의 스몰셀(small cell) 네트워크의 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 보였다 [3]. 셀프리 다중안테나 환경에서 전송률을 향상시키기 위한 AP간의 빔형성 기법과 전력할당 기법이 연구되었다 [4][5]. 간섭 채널을 포함한 모든 채널 정보를 이용해서

CPU에서 중앙집중적으로 전송 빔과 송신전력을 설계하는 기법이 논문 [4]에서 제안되었고, 각 AP에서 자신과 연결된 제한된 채널 정보만을 이용해서 분산적으로 전송 빔을 설계하는 기법이 논문 [5]에서 제안되었다. 채널 상관성(correlation)이 존재하는 환경에서 전송 기법과 전력할당을 설계하는 기법이 논문 [6]에서 제안되었고, 채널 추정 오류를 고려하여 안정적으로 데이터를 전송하는 빔형성 기법이 논문 [7]에서 제안되었다. 또한, stochastic geometry를 이용해 셀프리 다중안테나 네트워크의 성능을 분석한 연구가 논문 [8]에서 진행되었다. 그러나 기존의 연구에서는 사용자 중심의 클러스터링 기법과 그 성능에 대한 분석은 고려되지 않았다. 기존 기법에서는 네트워크 내의 모든 AP와 모든 사용자의 채널 정보를 기반으로 전력할당을 수행하고 전력할당 결과에 따라 전력할당이 0이 된 AP들을 제외하면 자동으로 클러스터링이 결정된다고 가정했다. 그러나 이 같은 방법으로 클러스터링을 결정하는 경우 AP의 개수와 사용자의 수가 증가함에 따라 복잡도가 지수적으로 증가한다는 취약점이 있다. 또한, 새로운 사용자가 네트워크에 합류했을 때, 전체 사용자를 대상으로 하는 복잡도 높은 전력할당 문제를 다시 풀어야 하는 비현실성을 가지고 있다.

본 논문에서는 기존 기법들의 복잡도 증가 문제와 확장성(scalability) 부재의 문제를 해결하기 위해 임계값을 기반으로 각 사용자가 자신과 연결된 채널의 세기를 고려하여 직접 AP를 선택하는 사용자 중심 클러스터링 기법을 고려했다. 각 사용자는 대규모 페이딩 계수를 이용해 가장 채널이 좋은 AP를 클러스터에 포함하고, 가장 큰 페이딩 계수를 바탕으로 상대적 비율이 임계값 이상을 가지는 나머지 AP들을 포함해서 클러스터를 구성한다. 구성된 클러스터에서 분산적인 빔형성 기법과 전력할당 기법을 통해 데이터를 전송한다. 시뮬레이션을 통해 사용자 중심 클러스터링의 효율성을 검증하고, 주어진 환경에서 최적의 성능을 나타내는 임계값이 존재함을 보인다.

## II. 임계값 기반 사용자 중심 클러스터링

본 논문에서는 그림 1과 같이 다중안테나를 보유한  $L$  개의 AP와 단일안테나를 보유한  $K$  명의 사용자가 존재

하는 셀프리 다중안테나 환경을 고려한다. 각 AP는  $N$ 개의 송신안테나를 보유하고 있다고 가정한다. 모든 AP는 프론트홀 링크를 통해 CPU에 연결되어 있으며, 프론트홀 링크를 통해 각 사용자에게 전송할 데이터를 공유할 수 있다. 본 논문에서는 시분할 이중통신 방식(TDD)으로 동작하는 네트워크를 고려한다. 따라서 각 AP는 자신과 사용자들 사이의 채널 정보는 채널 상반성(reciprocity)를 통해 직접 추정할 수 있다고 가정한다. AP  $l$ 과 사용자  $k$  사이의 채널을  $h_{lk}$ 라고 정의하고, 독립적인 레일리(Rayleigh) 분포  $h_{lk} \sim CN(0, g_{lk}I_N)$ 을 따른다고 가정한다. 여기서  $g_{lk}$ 는 경로손실 등을 포함한 대규모 페이딩 계수를 의미하고, 각 AP와 사용자는 자신과 연결된 채널에 대한 페이딩 계수  $g_{lk}$ 를 알고 있다고 가정한다.

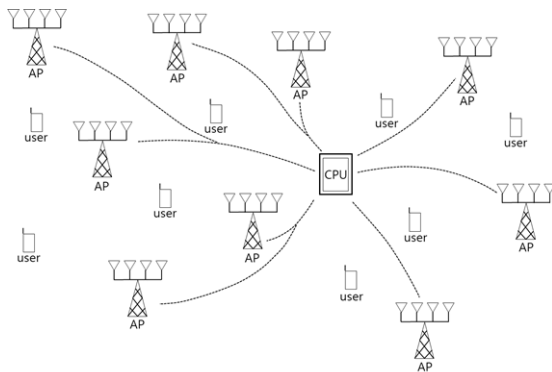


Fig. 1 Cell-free MIMO network

앞서 언급한 것처럼 기존 연구들에서는 네트워크 내의 모든 AP와 모든 사용자의 채널 정보를 기반으로 전력할당을 수행하고 전력할당 결과에 따라 자동으로 클러스터링이 결정된다고 가정했다. 그러나 네트워크의 크기에 따라 전력할당의 복잡도가 증가하는 문제가 발생하고 사용자가 추가되는 경우 등의 네트워크 변화에 대응할 수 없는 확장성의 부재에 대한 문제를 가진다. 따라서 본 논문에서는 각 사용자가 자신과 연결된 채널의 대규모 페이딩 계수를 기반으로 직접 클러스터링을 결정하는 사용자 중심 클러스터링 기법을 고려한다.

사용자  $k$ 의 클러스터링 집합을  $A_k$ 라고 정의한다. 먼저 사용자  $k$ 는 자신과 연결된 채널의 대규모 페이딩 계수가 가장 큰 AP를 클러스터링 집합에 포함한다.

$$A_k = \{AP_l \mid g_{k,\max} = \max_l g_{lk}, l = 1, \dots, L\} \quad (1)$$

이 단계를 통해 모든 사용자가 최소 1개 이상의 AP로부터 서비스를 받을 수 있도록 보장한다. 다음으로 각 사용자는 미리 설정된 임계값  $\Gamma_k$ 을 기반으로 AP들의 페이딩 계수의 상대적 크기가 임계값보다 큰 AP들을 포함하여 다음과 같이 클러스터링 집합을 결정한다.

$$A_k = \{AP_l \mid G_{lk}^{\text{dB}} \geq \Gamma_k \text{ [dB]}, l = 1, \dots, L\} \quad (2)$$

여기서  $G_{lk}^{\text{dB}}$ 는 AP  $l$ 과 사용자  $k$  사이의 페이딩 계수  $g_{lk}$ 와 최대 페이딩 계수  $g_{k,\max}$ 의 비율을 dB 스케일로 나타낸 것으로 다음과 같다.

$$G_{lk}^{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left( \frac{g_{lk}}{g_{k,\max}} \right) \quad (3)$$

결과적으로 각 사용자는 대규모 페이딩 계수가 가장 큰 AP와 페이딩 계수의 상대적 크기가 임계값 이상되는 AP들을 포함함으로써 사용자 중심으로 클러스터를 구성할 수 있다. 또한, 페이딩 계수의 상대적 크기를 통해 클러스터를 구성함으로써 같은 임계값을 갖는 경우에도 사용자마다 클러스터의 물리적인 크기가 달라지게 된다. 예를 들어 AP와 가까운 거리에 있는 사용자의 경우 매우 큰 값의  $g_{k,\max}$ 을 가지게 되고, 따라서 임계값을 넘기 위해서는  $g_{lk}$ 의 값도 매우 커야 한다. 즉 사용자 기준으로 상대적으로 아주 가까운 거리에 있는 AP들만 클러스터에 포함될 수 있다. 반면에 모든 AP와 일정수준 이상 떨어진 거리에 있는 사용자의 경우에는 작은 값의  $g_{k,\max}$ 을 가지게 되고, 따라서 사용자로부터 멀리 떨어진 AP들도 클러스터에 포함된다.

사용자 중심 클러스터링의 결과로 AP  $l$ 이 서비스해야 하는 사용자의 집합이 다음과 같이 결정된다.

$$U_l = \{u_k \mid G_{lk}^{\text{dB}} \geq \Gamma_k \text{ [dB]}, k = 1, \dots, K\} \quad (4)$$

임계값  $\Gamma_k$ 는 네트워크의 성능 목표에 따라 목표 성능을 최대화되도록 설정될 수 있다. 예를 들어 네트워크 사용자들의 성능을 일정 수준 이상으로 보장하는 것을 목표로 하는 경우에는 전체 사용자 중 성능 하위 (ex. 10%) 사용자의 평균 주파수효율(spectral efficiency)을 최대화하도록 임계값을 설정할 수 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 주어진 환경에서 하위 성능 사용자의 주파수효율을 최대화하는 임계값을 찾는다.

### III. 빔형성과 전력할당 기법

사용자 중심 클러스터링을 통해 사용자  $k$ 의 클러스터링 집합  $A_k$ 와 AP  $l$ 의 서비스 사용자의 집합  $U_l$ 이 결정되면 AP  $l$ 은  $U_l$ 에 속한 사용자들의 데이터를  $N$ 개의 송신안테나를 통해 전송한다. 사용자  $k$ 가 수신하는 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 y_k &= \sum_{l \in A_k} \sqrt{P_{lk}} \mathbf{h}_{lk}^\dagger \mathbf{W}_{lk} s_k + \sum_{j \neq k} \sum_{i \in A_j} \sqrt{P_{ij}} \mathbf{h}_{ik}^\dagger \mathbf{W}_{ij} s_j + n_k \\
 &= \sum_{l \in A_k} \sqrt{P_{lk}} \mathbf{h}_{lk}^\dagger \mathbf{W}_{lk} s_k \\
 &\quad + \underbrace{\sum_{j \neq k} \sum_{i \in A_k, i \in A_j} \sqrt{P_{ij}} \mathbf{h}_{ik}^\dagger \mathbf{W}_{ij} s_j}_{\text{intra-cluster interference}} \\
 &\quad + \underbrace{\sum_{j \neq k} \sum_{m \neq A_k, m \in A_l} \sqrt{P_{mj}} \mathbf{h}_{mk}^\dagger \mathbf{W}_{mj} s_j + n_k}_{\text{inter-cluster interference}} \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기에서  $s_k$ 는 사용자  $k$ 의 데이터를 의미하고,  $\mathbf{W}_{lk}$ 와  $P_{lk}$ 는 각각 AP  $l$ 이 사용자  $k$ 의 데이터를 전송하기 위해 사용하는 빔형성 벡터와 전력할당을 의미한다. 그리고  $n_k$ 는 열잡음을 의미한다. 위 수식 (5)에서 두 종류의 간섭이 존재하는 것을 볼 수 있다. 첫 번째는 클러스터 내부(intra-cluster) 간섭으로 빔형성 기법과 전력할당을 통해 제어할 수 있다. 두 번째는 클러스터간(inter-cluster) 간섭으로 이는 클러스터링(임계값)을 통해 제어할 수 있다.

수신 신호를 이용해 사용자  $k$ 의 주파수효율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$SE_k = \log_2(1 + SINR_k) \quad (6)$$

여기에서 수신 신호 대 간섭 잡음비  $SINR_k$ 는 다음과 같다.

$$SINR_k = \frac{\left| \sum_{l \in A_k} \sqrt{P_{lk}} \mathbf{h}_{lk}^\dagger \mathbf{W}_{lk} \right|^2}{\sum_{j \neq k} \left| \sum_{i \in A_j} \sqrt{P_{ij}} \mathbf{h}_{ik}^\dagger \mathbf{W}_{ij} \right|^2 + N_0} \quad (7)$$

$N_0$ 는 잡음의 전력을 의미한다.

#### 3.1. 빔형성 기법

본 논문에서는 각 AP가 자신과 연결된 채널의 정보

만을 이용해 정보를 전송하는 환경을 고려하고 있으므로 각 AP에서 분산적으로 설계할 수 있는 Maximum Ratio Transmission (MRT) 빔형성 기법과 Minimum Mean Square Error (MMSE) 빔형성 기법 두 가지 기법을 고려한다.

먼저 MRT 빔형성 기법은 클러스터 내부 간섭은 고려하지 않고 AP  $l$ 과 사용자  $k$ 의 신호 세기를 최대화하도록 다음과 같이 설계된다.

$$\mathbf{W}_{lk}^{\text{MRT}} = \frac{\mathbf{h}_{lk}}{\sqrt{\mathbf{E} \{ \|\mathbf{h}_{lk}\|^2 \}}} \quad (8)$$

여기서  $\|\cdot\|$ 는 Euclidean norm을 의미한다. MRT 빔형성 기법의 경우 최소한의 복잡도로 설계가 가능하다는 장점이 있는, 반면 간섭을 고려하지 않아 클러스터 내부 간섭으로 인한 성능 저하가 발생할 수 있다.

MMSE 빔형성 기법은 클러스터 내부의 간섭과 신호의 세기를 모두 고려하여 다음과 같이 설계된다 [9].

$$\tilde{\mathbf{W}}_{lk}^{\text{MMSE}} = \left( \sum_{j \in U_l} \mathbf{h}_{lj} \mathbf{h}_{lj}^\dagger + \frac{N_0}{P_l} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{h}_{lk}, \quad (9)$$

$$\mathbf{W}_{lk}^{\text{MMSE}} = \frac{\tilde{\mathbf{W}}_{lk}^{\text{MMSE}}}{\sqrt{\mathbf{E} \{ \|\tilde{\mathbf{W}}_{lk}^{\text{MMSE}}\|^2 \}}} \quad (10)$$

MMSE 빔형성 기법의 경우 AP  $l$ 이 서비스 집합 내의 다른 사용자들에게 미치는 간섭 채널을 고려하여 빔형성 벡터를 설계함으로써 클러스터 내부 간섭을 어느 정도 제어할 수 있다.

#### 3.2. 전력할당 기법

각 AP는 서비스 사용자 집합 내에 속한 사용자들을 동시에 서비스해야 하므로 총 사용 전력 내에서 각 사용자에게 전력을 할당해야 한다. 본 논문에서는 각 AP가 자신과 연결된 채널 정보만을 사용하기 때문에 모든 사용자의 채널을 고려한 복잡도 높은 전력할당 기법을 적용할 수 없다. 따라서 서비스 사용자 집합 내에 속한 사용자들의 채널 크기에 비율에 따라 전력을 할당하는 간단한 분산적 전력할당 기법을 고려한다. AP  $l$ 의 총 사용 전력을  $P_l$ 이라고 할 때, 사용자  $k$ 에게 할당하는 전력은 다음과 같이 결정된다.

$$P_{lk} = \begin{cases} P_l \frac{\sqrt{g_{lk}}}{\sum_{j \in NU_l} \sqrt{g_{lj}}}, & \text{if } k \in NU_l \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

AP  $l$ 은 항상 전체 전력  $P_l$ 을 모두 사용하여 데이터를 전송하고 각 사용자는 채널의 대규모 페이딩 계수의 상대적 크기에 비례하도록 전력을 할당받는다. 따라서 상대적으로 채널이 좋은 사용자는 더 많은 전력을 할당받고, 채널이 안좋은 사용자는 그에 비례하여 적은 양의 전력만을 할당받게 된다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 사용자 중심 클러스터링 기법의 성능을 검증하고, 주어진 환경에서 최적의 임계값을 찾는다.

시뮬레이션을 위해  $1000 \times 1000$  제곱미터의 면적에 25개의 AP( $L=25$ )와 25명의 사용자( $K=25$ )가 존재하는 환경을 고려한다. AP의 송신안테나 수는 4개( $N=4$ )로 가정한다. AP와 사용자의 위치는 정해진 면적 내에서 균일 분포(uniform distribution)를 통해 랜덤하게 생성된다. 이 같은 네트워크를 500번 생성하여 주파수효율의 누적분포함수(CDF)를 구한다.

대규모 페이딩 계수는 2GHz 대역의 3GPP Urban microcell model을 사용하여 다음과 같이 생성한다 [10].

$$g_{lk} = 10^{\frac{g_{lk}^{dB}}{10}}, \quad (12)$$

$$g_{lk}^{dB} = -30.5 - 36.71 \log_{10} \left( \frac{d_{lk}}{1m} \right) + F_{lk} \text{ [dB]} \quad (13)$$

여기에서  $d_{lk}$ 는 AP  $l$ 과 사용자  $k$  사이의 거리를 의미하고  $F_{lk}$ 는 쉐도우 페이딩(shadow fading)을 의미하며  $F_{lk} \sim \mathcal{N}(0, 10^2)$  분포를 따른다. 임계값은 모든 사용자가 같은 값  $\Gamma(\Gamma = \Gamma_1 = \Gamma_2 = \dots = \Gamma_K)$ 로 설정한다고 가정한다.

사용자 중심의 클러스터링 기법 성능 검증을 위해 비교 기법으로 AP 중심의 클러스터링 기법을 고려한다. AP 중심의 클러스터링 기법에서는 AP  $l$ 에서 임계값  $\Gamma_l$

이상의 페이딩 계수를 갖는 사용자들을 서비스 사용자 집합으로 직접 클러스터링한다.

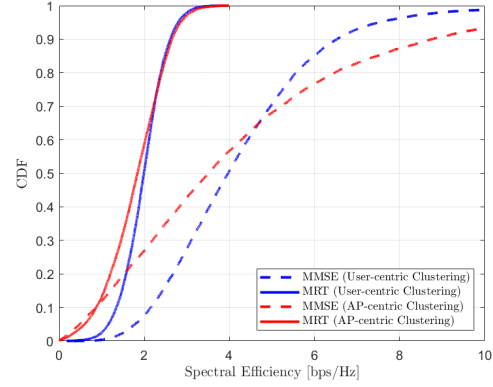


Fig. 2 CDF of Spectral efficiency for User-centric and AP-centric clustering ( $\Gamma = -20\text{dB}$ )

그림 2에서는 임계값이  $\Gamma = -20\text{dB}$  일 때 사용자 중심 클러스터링 기법과 AP 중심 클러스터링 기법의 주파수효율에 대한 CDF를 비교한다. 주파수효율의 단위는 bits/sec/Hz(bps/Hz)를 사용한다. 먼저 그림을 통해 MMSE 빔형성 기법의 성능이 MRT 빔형성 기법의 성능보다 우수한 것을 볼 수 있다. 이는 정해진 면적 안에 다수의 사용자가 존재하는 간섭 제한적인 환경이기 때문이다. MMSE 기법의 경우 다른 사용자에게 미치는 간섭 채널을 고려하여 빔형성 기법을 설계하기 때문에 클러스터 내의 간섭을 억제해줄 수 있다. 사용자 중심 클러스터링과 AP 중심 클러스터링의 성능을 비교해보면 주파수효율이 낮은 영역에서는 사용자 중심 클러스터링 기법이 우수하고, 반면 주파수효율이 높은 영역에서는 AP 중심 클러스터링 기법의 성능이 더 우수한 것을 볼 수 있다. 주파수효율 하위 10% 사용자의 경우 사용자 중심의 클러스터링 기법의 주파수효율이 AP 중심의 클러스터링 기법과 비교하여 각각 약 2.75배(MMSE)와 1.68배(MRT) 높은 것을 볼 수 있다. 사용자 중심 클러스터링의 경우 각 사용자가 자신에게 도움이 되는 AP들로 직접 클러스터를 구성하기 때문에 대부분 사용자가 일정 수준 이상의 주파수효율을 달성할 수 있다. 반면 AP 중심 클러스터링의 경우 AP와 가까이 위치한 사용자들 위주로 서비스하기 때문에 일부 사용자들의 주파수효율은 매우 높지만, AP들과 멀리 떨어진 cell-edge 사용자의 경우 매우 낮은 효율을 나타낸다. 예를 들어 MMSE

빔형성 기법의 경우 사용자 중심 클러스터링 기법에서는 약 92%의 사용자가 2bps/Hz 이상의 주파수효율을 달성할 수 있는 것을 볼 수 있지만, AP 중심 클러스터링 기법에서는 약 73%의 사용자들만 2bps/Hz 이상의 주파수효율을 달성할 수 있다.

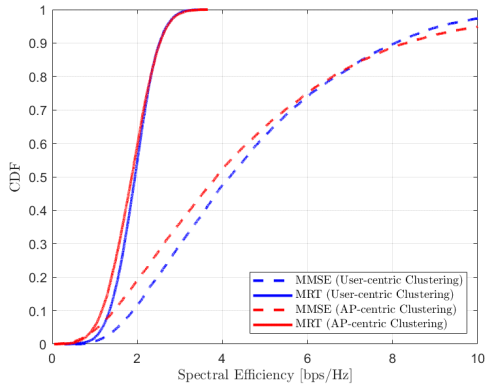


Fig. 3 CDF of Spectral efficiency for User-centric and AP-centric clustering ( $\Gamma=-30\text{dB}$ )

그림 3에서는 임계값이  $\Gamma=-30\text{dB}$  일 때 사용자 중심 클러스터링 기법과 AP 중심 클러스터링 기법의 주파수효율에 대한 CDF를 비교한다. 이 그림에서도 그림 2와 거의 비슷한 현상을 관찰할 수 있다. 그림 2와 그림 3을 통해 모든 사용자에게 일정수준 이상의 서비스를 제공하는 것을 목표로 하는 네트워크에서는 사용자 중심 클러스터링이 AP 중심 클러스터링 기법보다 더 유리하다는 것을 볼 수 있다.

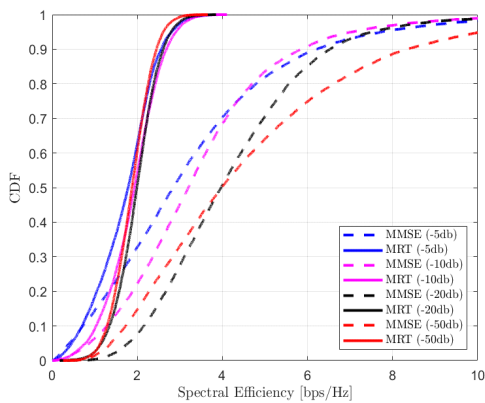


Fig. 4 CDF of Spectral efficiency for User-centric clustering ( $\Gamma=-5,-10,-20-50\text{dB}$ )

그림 4에서는 여러 가지 임계값 ( $\Gamma=-5\text{dB}$ ,  $\Gamma=-10\text{dB}$ ,  $\Gamma=-20\text{dB}$ ,  $\Gamma=-50\text{dB}$ )에 대한 사용자 중심 클러스터링 기법의 주파수효율 CDF를 비교한다. 먼저 임계값을 높게 설정한 경우 ( $\Gamma=-5\text{dB}$ ,  $\Gamma=-10\text{dB}$ )에는 임계값이 상대적으로 낮은 경우 ( $\Gamma=-20\text{dB}$ ,  $\Gamma=-50\text{dB}$ )와 비교하여 전체적으로 성능이 열악한 것을 볼 수 있다. 임계값을 너무 높게 설정하게 되면 클러스터에 포함되는 AP의 수가 적어지게 되고, 따라서 셀프리 다중안테나 네트워크에서 얻을 수 있는 AP간 협력 전송을 통한 공간적 다이버시티(spatial diversity) 이득이 작아지게 된다. 임계값이  $\Gamma=-20\text{dB}$  인 경우와  $\Gamma=-50\text{dB}$  인 경우를 비교해보면 주파수효율 하위 사용자(하위 0~50%)의 성능은  $\Gamma=-20\text{dB}$  인 경우가 유리하고 주파수효율이 높은 사용자의 경우에는 반대로  $\Gamma=-50\text{dB}$  인 경우가 더 유리한 것을 볼 수 있다. 임계값이 너무 낮게 설정된 경우에는 너무 많은 수의 AP들이 클러스터에 포함되게 된다. 이 경우에는 AP가 서비스하는 사용자 집합이 커지게 되고 한정된 전력을 비효율적으로 할당하게 된다. 예를 들어 모든 AP로부터 멀리 떨어진 사용자의 경우 자신의 클러스터에 속한 AP들이 서비스하는 사용자의 수가 많아지면서 (11)에 따라 적은 양의 전력을 할당받게 되고 주파수효율이 낮아진다. 그림 4를 통해 너무 높은 임계값을 설정하게 되면 다이버시티 이득이 낮아지고, 너무 낮은 임계값을 설정하게 되면 전력을 비효율적으로 할당하게 되기 때문에 적절한 임계값을 설정해야 셀프리 다중안테나 네트워크의 모든 사용자에게 일정 수준 이상의 주파수효율을 제공할 수 있다는 것을 알 수 있다.

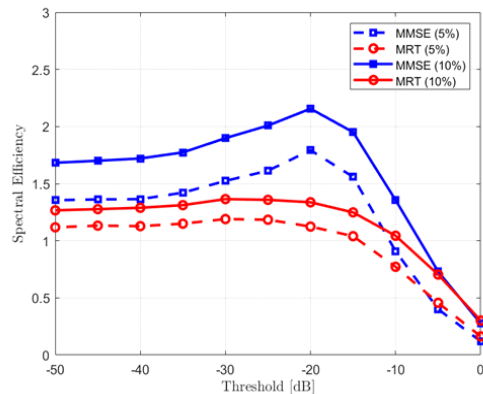


Fig. 5 Spectral efficiency of User-centric clustering versus threshold value

마지막으로 그림 5에서는 사용자 중심 클러스터링 기법 주파수효율 하위 5%, 10% 사용자의 임계값에 따른 주파수효율을 보여준다. 임계값이  $\Gamma=0\text{dB}$  인 경우는 각 사용자가 가장 가까운 AP 한 개에서만 서비스를 받는 경우로 기존의 스몰셀 네트워크 환경과 같다. 임계값이  $\Gamma=-50\text{dB}$  보다 작은 경우 주파수효율이 일정한 값(MMSE 하위 10% 사용자의 경우 1.54bps)으로 수렴하게 된다. 이는 네트워크 내의 모든 AP가 클러스터에 포함되는 경우로 모든 AP가 모든 사용자를 서비스하는 기존의 셀프리 다중안테나 네트워크 연구에서 고려한 환경과 같다. 그림 5에서는 임계값이  $\Gamma=-20\text{dB}$  인 경우 하위 5%, 10% 사용자 모두 가장 높은 주파수효율을 나타내는 것을 볼 수 있다. 기존의 스몰셀 환경( $\Gamma=0\text{dB}$ )과 비교하여 MMSE 하위 10% 사용자는 약 5.65배 높은 효율을 나타냈고, 기존의 클러스터링을 고려하지 않은 경우( $\Gamma=-50\text{dB}$ )와 비교해도 약 27%의 성능 향상을 나타냈다. 그림 5를 통해 셀프리 다중안테나 환경에서 적절한 임계값을 통해 사용자 중심 클러스터링 기법을 적용하면 하위 성능 사용자 기준으로 기존의 기법들보다 더 높은 주파수효율을 달성할 수 있음을 볼 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 셀프리 다중안테나 네트워크에서 임계값을 기반으로 사용자가 직접 클러스터를 구성하는 사용자 중심 클러스터링 기법을 고려하였다. 각 사용자는 대규모 페이딩 계수를 이용해 상대적 채널의 세기가 임계값 이상을 가지는 AP들을 포함해서 클러스터를 구성하여 모든 사용자에게 일정 수준 이상의 전송률을 보장한다. 시뮬레이션을 통해 AP 중심 클러스터링 기법과 비교를 통해 사용자 중심 클러스터링의 효율성을 검증하고, 주어진 환경에서 네트워크 하위 사용자들의 성능을 최대화하는 임계값이 존재함을 보였다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea

government(MSIT) (No.2018-0-00218, Speciality Laboratory for Wireless Backhaul Communications based on Very High Frequency)

## REFERENCES

- [ 1 ] S. Zhou, M. Zhao, X. Xu, J. Wang, and Y. Yao, "Distributed wireless communication system: A new architecture for future public wireless access," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 3, pp. 108-113, Mar. 2003.
- [ 2 ] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. Shamaï Shitz, O. Simeone, and W. Yu, "Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 9, pp. 1380-1408, Dec. 2010.
- [ 3 ] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO versus small cells," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, Mar. 2017.
- [ 4 ] E. Nayebe, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, H. Yang, and B. D. Rao, "Precoding and power optimization in cell-free massive MIMO systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 7, pp. 4445-4459, Jul. 2017.
- [ 5 ] E. Nayebe, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, H. Yang, and B. D. Rao, "Local partial zero-forcing precoding for cell-free massive MIMO," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 7, pp. 4758-4774, Jul. 2020.
- [ 6 ] J. Qiu, K. Xu, X. Xia, Z. Shen, and W. Xie, "Downlink power optimization for cell-free massive MIMO over spatially correlated Rayleigh fading channels," *IEEE Access*, vol. 8, no. 4, pp. 56214-56227, Mar. 2020.
- [ 7 ] V. M. T. Palhares, A. R. Flores, and R. C. de Lamare, "Robust MMSE precoding and power allocation for cell-free massive MIMO systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 5, pp. 3523-3537, May. 2021.
- [ 8 ] A. Papazafeiropoulos, P. Kourtessis, M. Di Renzo, S. Chatzinotas, and J. M. Senior, "Performance analysis of cell-free massive MIMO systems: a stochastic geometry approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 4, pp. 3523-3537, Apr. 2020.
- [ 9 ] D. H. N. Nguyen, L. B. Le, and T. Le-Ngoc, "Multiuser MISO precoding for sum-rate maximization under multiple power constraints," in *Proceeding of IEEE Wireless*

*Communications and Networking Conference*, New Orleans: LA, USA, pp. 729-734, 2015.

- [10] O. T. Demir, E. Bjornson, and L. Sanguinetti, "Foundation of user-centric cell-free massive MIMO," *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 14, no. 3-4, pp. 162-472, Aug. 2021.



**류종열(Jong Yeol Ryu)**

2008년 2월 충남대학교 전기정보통신공학부 학사  
2014년 2월 KAIST 전기및전자공학과 박사  
2014년 4월~2016년 8월 싱가포르기술디자인대학교 박사후 연구원  
2016년 9월~국립경상대학교 정보통신공학과 부교수  
※관심분야: 보안 통신 시스템, 차세대 이동통신 시스템, 셀프리 다중안테나 통신 등



**이용섭(Woongsup Lee)**

2006년 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사  
2011년 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사  
2012년 2월~2013년 2월 한국과학기술원 박사후 연구원  
2013년 2월~2014년 2월 독일 FAU 박사후 연구원  
2014년 3월~현재 경상대학교 정보통신공학과 부교수  
※관심분야: 차세대 이동통신 시스템, 인지 라디오 시스템, 스마트 그리드, 빅 데이터 분석, 딥러닝



**반태원(Tae-Won Ban)**

1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사  
2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사  
2010년 2월 KAIST 전기및전자공학 박사  
2009년 6월~2010년 10월 KT 연구 엔지니어  
2011년 2월~2012년 8월 KT Project Manager  
2012년 9월~현재 경상대학교 정보통신공학과 교수  
※관심분야: 차세대 이동통신, 무선 자원 관리, Cognitive Radios, Relay Systems, OFDM/MIMO