

# Cell-Free MIMO 구조에 적합한 분산 CPU-Less Functional Split 구조와 분산 프리코딩 방법

윤현식\*, 최계원<sup>o</sup>

## Distributed CPU-less Functional Split Structure and Distributed Precoding Method for Cell-Free MIMO Structures

Hyun-sik Yoon\*, Kae-won Choi<sup>o</sup>

요 약

본 논문에서는 기존의 중앙 집중형 CF(Cell-Free) MIMO 시스템이 지니고 있었던 백 홀에서의 높은 처리 용량으로 인한 과부하 및 많은 데이터가 오고 가는 프론트 홀의 용량 문제를 해결할 수 있는 User-Centric CF MIMO 시스템에 적합한 유동적인 통신이 가능한 AP간 분산 CPU-less Functional Split 구조를 제안한다. 또한, 해당 분산 구조에서 사용 가능한 각각의 User-Centric cell에서의 분산적인 프리코딩 알고리즘을 제안한다. 또한, MATLAB을 활용하여 일정 넓이의 환경에서 기지국과 단말의 밀도 및 각 단말의 User-Centric cell을 협력하는 기지국의 개수를 정하여 랜덤 분포한 환경을 만든 후 중앙집중형 MMSE 프리코딩, 전체 단말을 고려하여 보호하는 분산 MMSE 프리코딩 방법, 각각의 User-Centric cell마다 보호 범위를 고려하여 보호하는 분산 MMSE 프리코딩 방법 세 가지를 이용하여 프리코딩 행렬을 계산한다. 그리고 해당 시뮬레이션에서 통신 성능 결과를 SNR의 CDF 그래프로 나타내어, 제시한 분산 프리코딩 방법의 성능을 검증한다.

**Key Words** : Cell Free MIMO, Functional Split, Precoding, Optimization, MMSE

ABSTRACT

This paper proposes a distributed CPU-less functional split structure between APs that are capable of fluidly communicating according to environment of User-Centric CF(Cell-free) MIMO in order to solve the problem of overload due to the high processing capacity in the Backhaul and capacity of Fronthaul where a lot of data comes and goes of the existing centralized CF MIMO system. At the same time, we propose a Precoding algorithm that can be calculated distributionally in each User-Centric cell suitable for the distributed structure. In addition, by using MATLAB, virtual CF MIMO communication environments were randomly created just by setting the density of the Access Point(AP) and the User Equipments(UE) and the number of APs cooperating with the User-Centric cell of each UE. in an environment with a certain width. and The precoding matrix was

\* 이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018-0-01659, 5G NR기반 지능형 오픈 스텔셀 기술 개발)

• First Author : Sungkyunkwan University Department of Electrical and Computer Engineering, a42000@skku.edu, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Sungkyunkwan University Department of Electrical and Computer Engineering, kaewonchoi@skku.edu, 종신회원

논문번호 : 202109-240-A-RU, Received September 14, 2021; Revised October 4, 2021; Accepted October 8, 2021

calculated using three methods: centralized MMSE precoding, a distributed MMSE precoding method that protects the entire UEs and a distributed MMSE precoding method that protects UEs in consideration of a protection range for each user-Centric cell. And the communication performance results are represented by CDF of SNR to verify the performance of the proposed distributed Precoding algorithm.

### 1. 서론

5G/6G 차세대 이동통신 사용자들의 대량으로 증가하는 트래픽 수요 증가에 맞춰 QoS, 접속 사용자, 데이터 속도의 향상을 위해 다양한 기술들이 개발되어 활용되고 있다. 그중 주목을 받는 기술 중 하나인 Cell-Free(CF) MIMO 시스템은 많은 수의 분산된 AP로 구성되며 상대적으로 적은 수의 사용자에게 서비스를 제공하는 분산형 MIMO 시스템이다.<sup>[1]</sup> 해당 시스템은 모든 AP가 공동 협력하여 사용자 중심(User-Centric)으로 사용자에게 서비스를 제공한다. 그렇기에 기존의 하나의 기지국에서 일정 서비스의 지역을 담당하는 셀 형태의 네트워크 구조와는 다르게 셀이나 셀 경계선이 없으며, TDD(Time-Division Duplex)를 통해 모든 사용자에게 동일한 시간과 주파수 자원을 제공한다.

CF MIMO는 다수의 AP를 넓은 지역에 퍼뜨려 다양한 경로를 통해 신호를 전송하는 방식이다. 그에 따라 다양한 채널을 통해 사용자에게 다이버시티 이득을 극대화하고, 넓은 서비스 지역 형성이 가능하며, 사용자 위치와 관계없이 일정한 QoS 및 파워를 제공할 수 있다.<sup>[2]</sup>

기존의 중앙집중형 CF MIMO 구조인 그림 1에서는 다수의 AP들이 하나의 중앙처리 장치로 묶여져 있고, 대용량 프러트 홀을 이용하여 지역 내의 여러 사용자를 동시에 서비스한다. 기존의 하나의 기지국에서 일정 서비스의 지역을 담당하는 셀 형태의 네트워크 구조와는 다르게 명확한 서비스 경계가 구분되지 않는다.<sup>[3]</sup> 논문 [1], [4]에 따르면 기본적으로 완전한 AP

협력하는 중앙집중형 CF MIMO 방식은 사용자당 처리량 측면에서 소형 셀 형태 통신 시스템보다 95% 더 나은 성능을 제공한다고 한다. 또한, [5] 논문은 최근 다운로드 파일럿을 사용하여 저밀도 CF MIMO 네트워크에서 더 좋은 성능을 얻을 수 있다는 것을 보여주었고, [6] 논문은 다운로드에서 Zero-forcing 프리코더의 사용으로 중앙집중형 CF MIMO 구조에서 사용할 수 있는 프리코딩 방식과 사용 하였을 시 소형 셀 구조에 비해 얻게 되는 성능을 분석하였다. 하지만 중앙 CF MIMO 구조에서는 서비스하는 모든 사용자에 대한 데이터 및 프리코딩을 CPU(Central Processing Unit)가 처리해야 하므로 백 홀에서 높은 처리 용량을 가져야 한다는 부담이 있고, CPU와 AP들 사이의 많은 데이터가 오고 가기 때문에 프러트 홀 용량 문제가 크게 존재한다.

최근에 중앙집중형 CF MIMO에서의 프러트 홀 용량 문제를 해결하기 위해 각각의 사용자에게 신호를 전송할 때 모든 AP가 참여하는 것이 아닌 그림 2와 같은 채널 이득이 높은 몇 개의 AP만 참여하는 User-Centric 방식이 제안되었다.<sup>[2]</sup> 논문 [7]에서는 User Centric CF MIMO 구조에서 사용 가능한 몇 가지의 프리코딩 방법을 제시하고 있고 기존 중앙집중형 CF MIMO에서와 성능 비교를 제시하고 있다. 하지만, 여전히 프리코딩 및 AP와 사용자들 사이의 데이터 조율을 위한 CPU가 존재하며, 각각의 User-Centric cell 안에서 완벽하게 분산적이게 운영하는 구조를 제시하지는 못하고 있다.

본 논문은 기존 CF MIMO 시스템이 가지고 있던

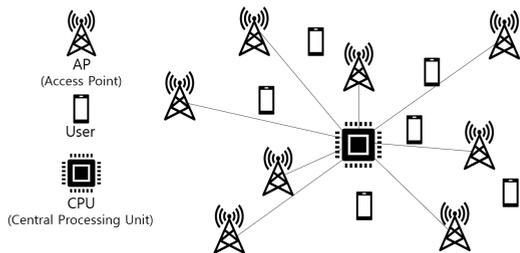


그림 1. 중앙 집중형 Cell-free MIMO 시스템[3]  
Fig. 1. Centralized Cell-free MIMO System[3]

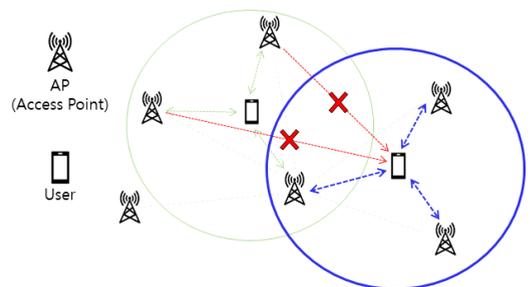


그림 2. User-Centric Cell-free MIMO 시스템  
Fig. 2. User Centric Cell-free MIMO System

백 홀의 속도 제약 및 프린트 홀 용량 문제를 해결할 수 있으며, User-Centric CF MIMO 구조에서 완전히 분산적이게 운영하는 분산 Functional Split 구조 및 해당 구조에서 사용 가능한 분산 프리코딩 방법을 다음과 같이 제안한다.

● 분산 CPU-less Functional Split 구조

User-Centric CF MIMO 구조로써 사용 가능한 분산 CPU-less Functional Split 구조를 제안한다. 해당 구조는 3.1항에서의 설명과 같이 어떤 AP가 특정 UE에게 데이터를 보내고자 하는 Primary node 혹은 Primary node로부터 데이터를 받아 데이터 전송을 협력하는 Secondary node로 따로 정해지는 것이 아니라 통신 상황에 따라 유동적으로 노드의 역할을 정하여 사용이 가능하다는 장점을 지닌다.

● 분산 프리코딩 방법

위에서 제시한 분산 CPU-less Functional Split 구조에 적합한 분산 프리코딩 방법을 제안한다. 해당 프리코딩 방법에서는 각각의 User-Centric cell에서 분산적으로 목표 단말을 위한 프리코딩 계산을 실시하며, User-Centric cell 간 타 Cell 내의 AP들이 자신의 단말에 미치는 영향을 상호 간에 교환하여 프리코딩 계산 시 상대 단말에 미치는 영향을 최소화해주는 것이 가능하다. 또한, 보호 범위 및 영향 범위를 설정하여 계산 복잡도를 감소시키는 방안도 함께 제시한다.

위와 같이 제시하는 구조 및 프리코딩 방법은 기존의 다중 포인트 협력 통신 기술(CoMP)의 Joint Transmission 기술<sup>[8]</sup>과 AP와 단말 간의 채널 정보를 AP들끼리 서로 교환하여 목표로 하지 않는 단말에게 null을 형성해 주려고 하는 점에서 일부 유사하다. 하지만, 기존의 Cell 통신에서 인접한 셀 간에 실시되었던 COMP에 비해, 제시한 구조는 AP가 단말보다 월등히 많은 상황에서 사용자 단말마다 User-Centric cell을 형성한 구조이며 AP마다 Primary와 Secondary node가 따로 정해지지 않아 통신 상황에 따라 유동적으로 사용 가능하며 동시에 운용이 될 수도 있다는 점에서 구조적 차이가 존재한다. 또한, 보호 범위와 영향 범위를 통신 환경마다 유동적으로 설정하여 분산 프리코딩시 고려해야 할 단말 범위를 유동적으로 설정할 수 있어 빔포밍 방식의 자유도가 높다는 장점이 제시하는 분산 프리코딩 방법에서 존재한다.

본 논문에서는 2, 3장에서 앞서 말한 분산 CPU-less 구조 및 분산 프리코딩 방법에 대해 설명하

표 1. 사용된 축약어 정리  
Table 1. Summarization of used abbreviations

Abbreviation	Definition
AP	Access Point
BS	Base Station
CF MIMO	Cell Free MIMO
CRC	Cyclic Redundancy Check
CPU	Central Processing Unit
DUC	Digital Up Converter
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
LDPC	Low Density Parity Check
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
MMSE	Minimum Mean Square Error
PR	Protected Range
RLC	Radio Link Control
SNR	Signal-to-Noise Ratio
UE	User Equipment
QoS	Quality of Service

고 4장에서 MATLAB 프로그램을 사용하여 다수의 AP와 UE가 분포한 환경에서 제시하는 구조 및 프리코딩 방법을 활용했을 때의 각 단말에서의 SNR 결과를 도출하고 이를 통해 제시된 방법의 통신 성능을 검증하였다.

또한, 본 논문에서는 표현의 편의를 위해 여러 축약어를 사용하였으며, 사용된 축약어들의 정의는 표 1에 정리하였다.

II. 분산적인 CPU-less Functional Split 구조

기지국 모듈을 5G RAN CU/DU Functional split 기준 중 하나인 Functional Split 7.3<sup>[9]</sup> 기준에 맞춰서 그림 3과 같이 High, Low PHY로 나눈다. 그에 따른 각각의 세부 모듈은 다음과 같다.

● UE High PHY module

다른 기지국들의 Secondary node의 협력을 받아 데이터를 보내고자 하는 어떤 Primary node 기지국이 송신 데이터에 RLC 헤더 삽입, CRC 삽입, LDPC 인코딩, 스칼라블링, MAC 헤더 삽입을 하는 부분으로 이루어져 있다.

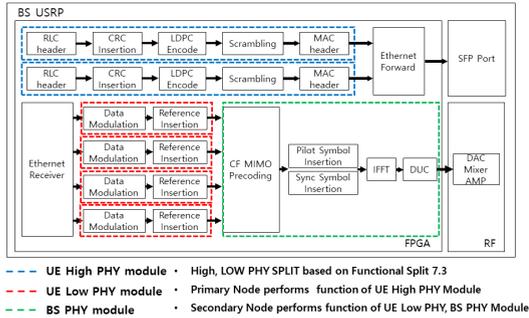


그림 3. 분산 Functional Split 구조  
Fig. 3. Structure of Distributed Functional Split

• UE Low PHY module

Primary node로부터 데이터를 받아 협력 통신을 지원하는 Secondary node 기지국이 각각의 데이터를 받아 병렬적으로 변조과정(Modulation)과 참조신호(Reference signal)를 삽입하는 과정으로 이루어져 있다.

• BS PHY module

Secondary node에서 각각의 병렬적인 Low PHY module을 거친 후의 데이터를 MIMO 프리코딩을 통해 하나의 데이터로 합친 후 파일럿 신호와 동기신호(sync symbol)을 삽입하고 IFFT와 DUC를 거쳐 기지국에서 최종적으로 송신할 데이터를 만드는 모듈이다.

본 논문에서 제안하는 모델은 기존의 Functional Split 7.3<sup>[9]</sup> 기준으로 Functional Split을 하였지만, 모든 기지국이 각각 필요한 통신 모듈들을 복수 개로 지니고 있기 때문에 어떠한 기지국이라도 통신 상황에 따라 Primary node 혹은 Secondary node로 유동적으로 기능할 수 있으며, 동시에 기능 하는 것 또한 가능하다. 따라서 기존의 Functional Split 구조들과 차별화를 가진다고 말할 수 있다.

그림 4를 참고하면 BS 3이 BS 1을 협력하는 Secondary면서 동시에 UE 2에 Data 2를 보내고자 하는 Primary node인 것을 확인 할 수 있다. 이런 구조는 다음과 같은 장점을 지닌다.

- CPU와 같은 중앙 집중 모델이 아니기 때문에 특정 기지국에 계산, 처리량이 집중되지 않아 단말 처리량의 공평성을 제공한다.
- CPU 없이도 물리적인 위치에 제한되지 않고 네트워크 상황에 따라 유동적으로 협력하여 통신하는 기지국을 선택할 수 있기에 분산적인 방법으로도 리소스 풀링이 가능하다.

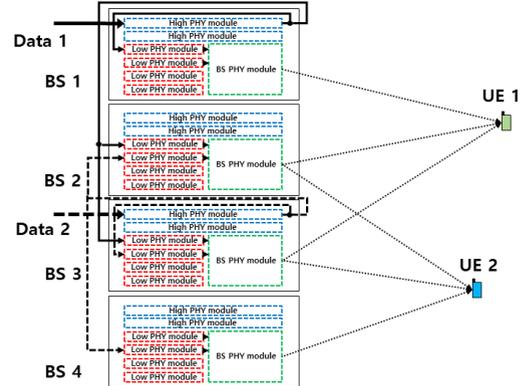


그림 4. 다중 Primary와 Secondary 노드의 동작 예시  
Fig. 4. Examples of operations of multiple primary and secondary nodes.

III. User CF MIMO를 위한 분산 프리코딩 방법

이러한 User-Centric cell-free MIMO는 일반적인 MIMO 프리코딩 방법을 사용하면 CPU와 같은 한 기지국에 걸리는 계산적 부하가 크고, 그 기지국과 나머지 기지국들 사이의 프린트홀에 걸리는 부하가 상당히 크다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 해당 시스템에 적합한 프리코딩 방법을 제시한다.

3.1 User-Centric cell 설정

분산적인 프리코딩을 하기 위해서는 우선적으로 기지국들이 지원할 단말을 결정하고 시작한다. 본 논문에서는 단말  $k$ 을 협력하여 지원하는 기지국의 집합  $\mathcal{M}_k$ (해당 집합의 원소의 개수= $N_{\mathcal{M}_k}$ )를 정해 단말  $k$ 의 User-Centric cell을 만든다. 현 통신 시스템에서 지원하는  $N_K$ 개의 모든 단말을 위한  $N_K$ 개의 User-Centric cell을 구성한다. 해당 과정을 정하는 알고리즘으로 [10]에서 설명하고 있는 ‘Initial Access and AP selection’, ‘IB-KM pilot Assignment’, ‘User-Group Pilot Assignment Algorithm’ 등의 이미 존재하는 기술을 이용할 수 있다.

그 이후 단말  $k$ 의 User-Centric cell의 Primary node 기지국이 해당  $\mathcal{M}_k$ 의 기지국과 단말  $k$ 사이의  $N_{\mathcal{M}_k} \times 1$ 의 프리코딩 벡터를 계산하여 나머지 Secondary node 기지국에 전송하는 방식을 제안한다.

3.2 보호 범위와 영향 범위 설정

본 논문에서는 여기서 추가적으로 계산량을 줄이기 위해 보호 범위와 영향 범위를 새로 정의한다.  $\mathcal{M}_k$ 가 영향을 미치게 되는 단말  $k$ 를 제외한 모든 단말들의

집합을 보호 범위  $\mathcal{R}_k$ (해당 집합의 원소의 개수= $N_{\mathcal{R}_k}$ )라고 지정한다. 그와 반대로 단말  $k$ 에 영향을 주는  $\mathcal{M}_i$ 의 속하는 기지국들이 협력해서 지원하는 단말  $k$ 를 제외한 모든 단말들의 집합을 영향 범위  $\mathcal{J}_k$ 로 지정한다. 본 논문에서는 보호 범위와 영향 범위를 User-Centric cell에 따라 구분이 되기 때문에, 영향 범위는 자신을 보호 범위에 속하는 단말의 집합하고 같다. 따라서 영향 범위는 (1)과 같이 보호 범위를 설정함으로써 자동으로 설정되어 진다.

$$\mathcal{J}_k = \{i | k \in \mathcal{R}_i\} \quad (1)$$

3.3.2에서 설명하는 Lagrange multiplier 최적화 방법을 사용하는 분산 MMSE 프리코딩의 예시 풀이에서 단말  $k$ 의 User-Centric cell에서 실행되는 한 iteration의 프리코딩 계산 복잡도는  $O((N_{\mathcal{R}_k} + N_{\mathcal{M}_k})N_{\mathcal{M}_k}^2)$ 와 같다. (그림 5에서 보이는  $\mathcal{M}_k$ 들의 파워의 총합의 제한을 위한 sub-gradient 계산에서의 iteration 과정과 선형 복호 행렬  $q_k$ 와 프리코딩 행렬  $\mathbf{w}_k$ 의 상호적인 최적화 계산을 위한 iteration 과정의 계산 복잡도는 정량적으로 정해져 있지 않고 환경에 따라 다르므로 해당 계산 복잡도에서는 고려하지 않았다.)

$N_{\mathcal{R}_k}$ 를 줄일 시 계산 복잡도가 낮아지므로 본 논문에서는 보호 범위를 적절히 설정하여 프리코딩 과정에서 계산 복잡도를 줄이는 것을 제안한다.

### 3.3 MMSE를 통한 목표로 하는 문제 설정

3.1, 3.2에서 제안하는 방법이 실효성이 있다는 것을 증명하기 위해 분산적 MMSE 프리코딩의 방법을 예시로 들어 본 항에서 설명하겠다.

#### 3.3.1 중앙 집중화된 전체 CF MIMO 시스템에서 MMSE 프리코딩 방법

먼저 중앙 집중화된 전체 CF MIMO 시스템에서 MMSE 알고리즘을 소개한다. 해당 알고리즘에서는  $N_M$ 개의 기지국으로 이루어진 기지국 집합  $\mathcal{M} = \{1, \dots, N_M\}$ 과  $N_K$ 개의 단말로 이루어진 단말 집합  $\mathcal{K} = \{1, \dots, N_K\}$ 가 통신 시스템을 이루고 있다고 가정한다. 또한, 각각의 기지국과 단말은 단일 안테나를 가지고 있다고 가정한다. 그러므로 해당 통신은  $N_M \times N_K$  MIMO 시스템이라고 할 수 있다. 기지국의 파워를 제한한 상태에서 MMSE 알고리즘을 활용

하여 최소화하기 위한  $MSE_C$ 는 다음과 같다.

$$MSE_C = E\|\mathbf{Q}(\mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{x} + \mathbf{n}) - \mathbf{x}\|^2 \quad (2)$$

$MSE_C$ 에 있는 파라미터들은 다음과 같다.

- $\mathbf{x}$ 는  $N_M$ 개의 기지국이 협력하여  $N_K$ 개의 단말에 신호를 보내어 만들어진  $N_K \times 1$ 의 송신 신호 벡터이다.
- $\mathbf{H}$ 는  $N_M$ 개의 기지국과  $N_K$ 개의 단말 사이에 이루어지는  $N_K \times N_M$  채널 행렬이다. 여기서  $\mathbf{H}$ 를 구하기 위한 AP-단말간 채널 추정방법으로는 TDD 통신 시스템이라 가정한다면 물리적 채널의 reciprocity 성질에 의하여  $h_{i \rightarrow j} = h_{j \rightarrow i}$ 이 성립하므로, Uplink Pilot 신호를 통해 AP가 Downlink 채널  $\hat{h}_{m \rightarrow k}$ 을 추정해내는 방법을 고려하였다. 그렇게 모든 AP와 단말 사이의 채널을 추정하여 CPU에게 전달하여  $\mathbf{H}$ 를 구할 수 있다. 그러나 통신 환경에 따라 최적의 채널 추정방법이 다양하게 존재하며, 본 논문에서는 해당 주제에 대해 특별하게 다루지는 않는다.
- $\mathbf{W}$ 는 단말에 최적의 신호를 전송하기 위하여 기지국에서 처리되어서 보내어지는  $N_M \times N_K$ 의 프리코딩 행렬이다.
- $\mathbf{Q}$ 는 각각의 단말에서 처리되는 선형 복호 행렬이고,  $(q_1, \dots, q_K)$ 의 선형 복호 상수로 이루어지는  $N_K \times N_K$ 의 대각 행렬로 이루어져 있다.
- $\mathbf{n}$ 은 송수신 도중에 발생 되는 평균 0에 표준편차가 인  $N_K \times 1$  가우시안 잡음 벡터이다.

$MSE_C$ 식을 기반으로 MMSE 최적화 문제는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{W}} MSE_C \\ & s.t. \text{tr}(\mathbf{W}^H \mathbf{W}) = \sum_{k=1}^{N_K} \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k = P \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $P_T$ 는 기지국에서 단말을 향한 신호의 파워 총합에 대한 제한 값이다. 위의 파워 제한 식에서 사용된  $\mathbf{w}_k$ 는 단말  $k$ 를 위한  $N_M \times 1$ 의 프리코딩 벡터를 의미한다.

3.3.2 User-Centric CF MIMO 시스템에서 분산적으로 활용할 수 있는 MMSE 프리코딩 방법  
 기지국에서 단말 전체에 최적화로 신호를 보내기 위한 분산적인  $MSE_D$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$MSE_D = \sum_{k=1}^K E |q_k(\mathbf{h}_{kk}\mathbf{w}_k x_k + \sum_{\forall l \in \mathcal{J}_k} \mathbf{h}_{kl}\mathbf{w}_l x_l + n) - x_k|^2 \quad (4)$$

$MSE_D$ 에 있는 파라미터들은 다음과 같다.

- $x_k$ 는  $\mathcal{M}_k$ 가 협력하여 단말  $k$ 에 보내어 만들어진 송신 신호 스칼라 값이다. 각각의 신호의 파워의 평균은 1이고( $E\{x_k^* x_k} = 1$ }), 다른 신호와의 상관관계는 없다. ( $E\{x_l x_k} = 0 (l \neq k)$ )
- $\mathbf{h}_{kl} (\forall l \in \mathcal{J}_k)$ 는  $\mathcal{M}_l$ 와 단말  $k$  사이에 이루어지는  $1 \times N_{\mathcal{M}_l}$  채널 벡터이다. AP-단말간의 채널 추정 방법은 3.3.가항에서 설명했던 것과 같이 Reciprocity 성질에 의한 Uplink Pilot 신호를 통하여 Downlink 채널을 추정하는 방법이 있을 수 있고, 통신 환경에 따라 다양하고 구체적인 채널 추정 방법이 존재한다. 예를 들어, 단말  $k$ 의 User-Centric cell에 속해 있는 AP( $\mathcal{M}_k$ )들이 보호 범위( $\mathcal{R}_k$ )내 단말 및 단말  $k$  사이의 채널 추정을 한 후, 단말  $k$ 의 User-Centric cell과 보호 범위( $\mathcal{R}_k$ )내 단말들의 User-Centric cell의 Primary AP에게 전송함으로써 각 User-Centric cell 내에서  $\mathbf{h}_{kl} (\forall l \in \mathcal{J}_k)$ 를 알 수 있다.
- $\mathbf{w}_k$ 는 단말  $k$ 에 최적의 신호를 전송하기 위하여  $\mathcal{M}_k$ 에서 처리되어 보내어지는  $N_{\mathcal{M}_k} \times 1$  프리코딩 벡터이다.
- $q_k$ 는 각각의 수신단에서 처리되는 수신단 복호 상수이다.
- $n$ 은 송수신 도중에 발생하는 평균 0에 표준편차가  $\sigma$ 인 가우시안 잡음이다.

$\mathbf{h}_{kk}\mathbf{w}_k x_k$  항은  $\mathcal{M}_k$ 가 협력 통신하여 프리코딩 과정 후 채널을 거쳐 들어온 단말  $k$ 가 원하는 신호이고,  $\sum_{\forall l \in \mathcal{J}_k} \mathbf{h}_{kl}\mathbf{w}_l x_l$  항은 단말  $k$ 의 영향 범위인  $\mathcal{J}_k$ 으로부터 들어온 간섭 신호가 되겠다. 모든 단말의 경우에서 발생하는 해당 신호들을 더해주면 우리가 구하고자 하

는 전체 시스템에서의  $MSE_d$ 를 구할 수 있다. 단말  $k$ 에서 프리코딩 과정을 분산적으로 처리하기 위하여  $MSE_d$ 에  $\mathbf{w}_k$  혹은  $q_k$ 를 가지고 있는 항만을 모아 정리하면 (5)와 같은  $DDMSE_k$ 를 구할 수 있다.

$$DDMSE_k(\mathbf{w}_k, q_k) = |q_k(\mathbf{h}_{kk}\mathbf{w}_k) - 1|^2 + \sum_{\forall l \in \mathcal{R}_k} |q_l|^2 |\mathbf{h}_{lk}\mathbf{w}_k|^2 + |q_k|^2 (\sum_{\forall l \in \mathcal{J}_k} |\mathbf{h}_{kl}\mathbf{w}_l|^2 + \sigma^2) \quad (5)$$

여기서 각 항이 지니는 의미는 다음과 같다.

- $|q_k(\mathbf{h}_{kk}\mathbf{w}_k) - 1|^2$ 항은 다른 간섭 및 노이즈를 고려하지 않았을 때,  $\mathcal{M}_k$ 가 협력하여 단말  $k$ 에 얼마나 정확하게 신호를 줄 수 있는지를 의미한다.
- $\sum_{\forall l \in \mathcal{R}_k} |q_l|^2 |\mathbf{h}_{lk}\mathbf{w}_k|^2$ 항은  $\mathcal{M}_k$ 에서 사용하는 프리코딩 벡터  $\mathbf{w}_k$ 를 사용해 보내진 신호에 의해 보호 범위 안의 다른 단말( $\mathcal{R}_k$ )에게 얼마나 영향을 미치는지를 의미한다.
- $\sum_{\forall l \in \mathcal{J}_k} |\mathbf{h}_{kl}\mathbf{w}_l|^2 + \sigma^2$ 항은 단말  $k$ 가 영향범위 안의 다른 기지국( $\mathcal{J}_k$ )으로부터 받은 간섭과 노이즈의 양을 의미한다.

$DDMSE_k$ 에서 타 단말에 영향을 끼치는 양 ( $\sum_{\forall l \in \mathcal{R}_k} |q_l|^2 |\mathbf{h}_{lk}\mathbf{w}_k|^2$ )과 타 기지국 및 외부에서 들어오는 노이즈의 양( $\sum_{\forall l \in \mathcal{J}_k} |\mathbf{h}_{kl}\mathbf{w}_l|^2 + \sigma^2$ )에 대한 제한을 어떻게 설정할지에 따라 여러 가지 방법으로 문제가 풀이가 가능하다. 예를 들어, 타 단말에 영향을 끼치는 양을 최소한으로 줄여서 통신을 하고 싶다면 Zero-forcing을 이용하여 계산이 가능하다. 또는 타 단말에 영향을 끼치는 양과 타 기지국 및 외부에서 들어오는 노이즈의 양을 특정한 제한 값들로 설정하고 계산이 가능하다. 본 논문에서는 특정 제한 값이 없다고 가정하고,  $DDMSE_k$ 을 최소화 하기 위한 각 수신단에서 분산적인 MMSE 최적화 문제로 설정하였으며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \min_{q_k, \mathbf{w}_k} DDMSE_k \\ & s.t. \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k = P_k \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\mathcal{M}_k$ 에서 보내는 파워 역시  $P_k$ 의 값으로 제

한이 되어 있다고 가정한다.

이 문제를 해결하기 위해 여러가지 방법이 있을 수 있으나, 여기서는 Lagrange multiplier 최적화 방법을 소개하겠다. 그러면 위의 문제를 다음과 같은 최적화 목표함수인  $L_k(q_k, \mathbf{w}_k, \lambda_k)$ 를 작성할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L_k(q_k, \mathbf{w}_k, \lambda_k) &= DDMSE_k + \lambda_k (\mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k - P_k) \\
 &= \text{tr}(\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_{kk}^H \mathbf{h}_{kk}^* q_k \mathbf{h}_{kk} \mathbf{w}_k - \mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_{kk}^H \mathbf{h}_{kk}^* q_k - q_k \mathbf{h}_{kk} \mathbf{w}_k) \\
 &+ \sum_{\forall l \in \mathcal{R}_k} \mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_{lk}^H \mathbf{h}_{lk}^* q_l \mathbf{h}_{lk} \mathbf{w}_k + \sigma^2 q_k q_l \\
 &+ \sum_{\forall l \in \mathcal{I}_k} \mathbf{w}_l^H \mathbf{h}_{lk}^H \mathbf{h}_{lk}^* q_l \mathbf{h}_{lk} \mathbf{w}_k
 \end{aligned} \quad (7)$$

(7)값을  $\mathbf{w}_k$ 로 편미분 한 후 해당 값을 0으로 만드는  $\mathbf{w}_k$ 는 다음 (8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L_k(q_k, \mathbf{w}_k, \lambda_k)}{\partial \mathbf{w}_k^H} &= 0 \\
 \Rightarrow \mathbf{w}_k &= \left( \sum_{\forall l \in (\mathcal{R}_k + k)} \mathbf{h}_{lk}^H q_l \mathbf{h}_{lk} + \lambda I \right)^{-1} \mathbf{h}_{kk}^H q_k
 \end{aligned} \quad (8)$$

또한, [11]에서 최적화된  $\mathbf{w}_k$ 와  $\mathbf{h}_{kk}$ 가 주어졌을 때, 수신 선형 복호기  $q_k$ 를 설계하는 합리적인 기준으로 Zero-forcing 방법을 제시하였으며, 본 논문은 해당 방법을 인용하였다. 해당 방법에 따르면 수신 복호기  $q_k$ 값은 (9)와 같다.

$$q_k = (\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k)^{-1} = \frac{1}{\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k} \quad (9)$$

위의 같은 방법을 iteration마다 반복하여  $\mathbf{w}_k$ 와  $q_k$ 를 상호간에 인터랙티브한 방식으로 최적화가 가능하다. 그리고 동시에  $\mathcal{M}_k$ 가 보내는 파워를 목표로 하는  $P_k$ 로 제한하기 위하여 (7) 값을  $\lambda_k$ 로 편미분 한 후 해당 값을 0으로 만드는  $\mathbf{w}_k$ 를 찾으면 다음과 같다.

$$\frac{\partial L_k(q_k, \mathbf{w}_k, \lambda_k)}{\partial \lambda_k} = 0 \Rightarrow \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k = P_k \quad (10)$$

$$\lambda_k^{(i_\lambda + 1)} = [\lambda_k^{(i_\lambda)} + \eta^{(i_\lambda)} * (\mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k - P_k)]^+ \quad (11)$$

그 후 sub-gradient method<sup>[12]</sup>를 사용하면 (11)과 같이 iteration( $i_\lambda$ )마다  $\mathcal{M}_k$ 의 파워를  $P_k$ 로 제한해 줄 수 있는  $\lambda_k$ 를 구할 수 있다. 여기서  $\eta^{(i_\lambda)}$ 는  $i_\lambda$ 마다

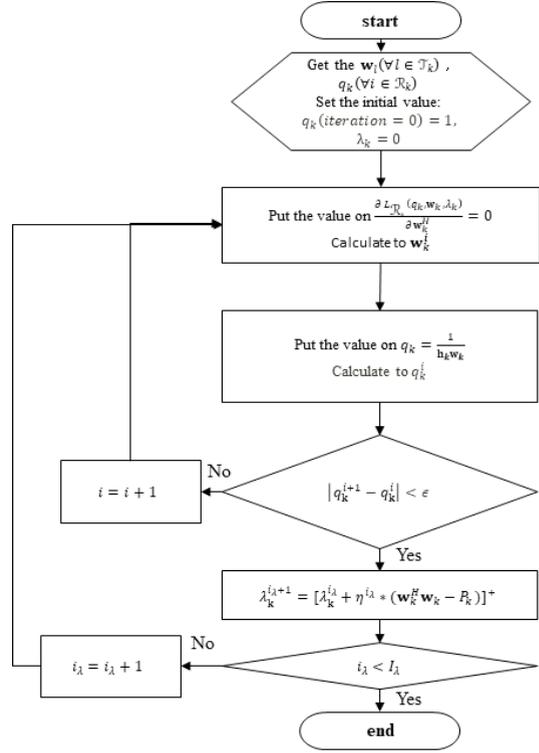


그림 5. 분산적 MMSE 프리코딩 문제 해결이 가능한 예시 알고리즘  
Fig. 5. One example algorithm to solve Distributed MMSE Precoding problem

sub-gradient method의 스텝 사이즈를 의미하며 [13]에서 설명하는 여러 가지 알고리즘에 따라 자유롭게 설정이 가능하다, 본 논문에서는 고정된 스텝 사이즈를 사용하였다.

분산적인 MMSE 프리코딩 문제 해결이 가능한 설명된 Lagrange multiplier 방식의 예시 알고리즘 과정을 그림 5와 같이 순서도로 정리하였다.

설명한 Lagrange multiplier 방식의 목표함수는  $L_k(q_k, \mathbf{w}_k, \lambda_k)$ 는 컨벡스 함수가 아니기 때문에 primal problem과 dual problem의 duality gap을 확인하는 것에 어려움이 있으며, 따라서 해당 방법이 완전한 optimal solution라는 점을 수식적으로 증명하기 어렵다. 하지만 해당 방법을 통해 sub-optimal solution을 구해낼 수 있다는 가정으로 문제 풀이가 가능하고, 다음 4장에서 여러 환경에서의 시뮬레이션 결과로 그것을 검증해 볼 것이다. 또한,  $f(\lambda_k^{(i_\lambda)}) = L_k(q_k, \mathbf{w}_k, \lambda_k)$ 은 컨벡스 함수가 아니기에 sub-gradient가 완전한 optimal solution으로 수렴한다는 것을 수식적으로 증명하기 어렵다. 하지만, 해당 문제가

$\lim_{i_\lambda \rightarrow \infty} f^{(i_\lambda)} - f^{(i_\lambda - 1)} < \epsilon$  로 sub-gradient 특성상 수렴

하고, 4장에서 시물레이션을 통해  $f(\lambda_k^{(i_\lambda)})$ 가 sub-optimal solution으로 수렴하는 것을 보일 것이다. sub-gradient의 수렴에 대해 좀 더 비중을 두는 목적을 가진다면 그림 5에서 sub-gradient의 종료조건을  $i_\lambda < I_\lambda$ 로 두는 것이 아닌  $f^{(i_\lambda)} - f^{(i_\lambda - 1)} < \epsilon$ 로 변경해서 사용 가능하다.

#### IV. 다수의 가상 통신 환경에서 MMSE 프리코딩 성능 검증 시물레이션

3.3에서 설명한 전체 MIMO 시스템의 프리코딩 행렬을 한 번에 계산하는 중앙 집중형 MMSE 프리코딩 방법과 User-Centric CF MIMO 시스템에서 활용 가능한 분산 MMSE 프리코딩 방법의 성능을 시물레이션을 통하여 검증하여 보았다.

본 논문에서 시물레이션에서의 채널 모델은 다음과 같이 설정하였다.

$$h_{mk} = \frac{c}{4\pi d_{mk} f_C} * R \quad (12)$$

$d_{mk}$ 는 AP  $m$ 과 UE  $k$ 의 거리를 의미하고,  $f_C$ 는 중심 주파수 대역을 의미하며 본 시물레이션에서는 5.8Ghz라고 가정하였다.  $\frac{c}{4\pi d_{mk} f_C}$ 는 Pathloss term

이고,  $R$ 은 분산이 1인 Circularly-symmetric complex Gaussian random variable을 의미한다.

MATLAB을 이용하여 500m×500m 넓이의 환경에서 AP의 밀도와 UE의 밀도를 정하여 랜덤 분포한 환경을 만든 후 각 UE의 User-Centric cell을 협력하는 AP의 개수를 정하여 결정하였다. 그 후, 중앙집중형 MMSE 프리코딩, 전체 UE를 고려하여 보호하는 분산 프리코딩 방법, 각각의 User-Centric cell마다 보호 범위(PR)를 고려하여 보호하는 분산 프리코딩 방법 세 가지를 이용하여 프리코딩 행렬을 계산하였다. 그 후 해당 시물레이션에서 각 단말의 통신 성능 결과를 SNR의 CDF 그래프로 나타내었다.

- 시물레이션 1) 150개의 AP와 10개의 UE가 랜덤하게 분포해 있는 환경

그림 6는 150개의 AP와 10개의 UE가 랜덤하게 분포해 있는 환경이다. 해당 환경에서 150×10 MIMO

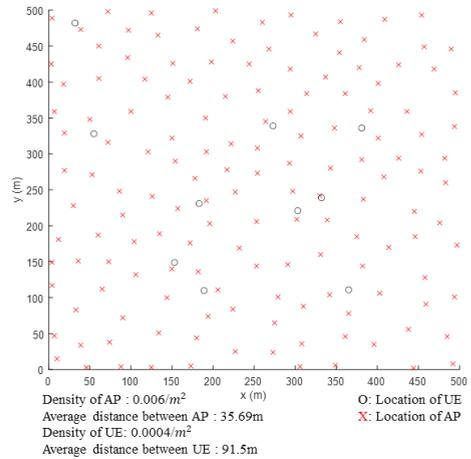


그림 6. 시물레이션 1의 AP 및 UE의 위치  
Fig. 6. Locations of AP and UE of the simulation 1

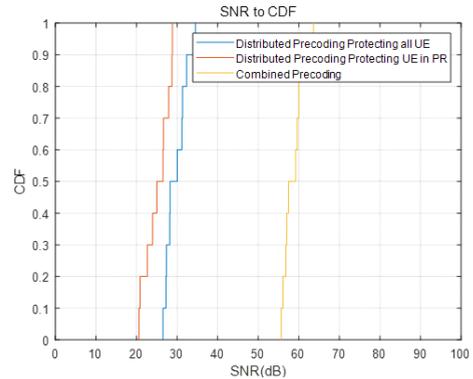


그림 7. 시물레이션 1에서 SNR의 CDF  
Fig. 7. CDF of SNR at the simulation 1

를 한번에 계산하는 중앙집중형 프리코딩 방법과 각각의 UE마다 가장 가까운 15개의 AP가 User-Centric cell를 이루는 CF MIMO 환경에서의 분산 프리코딩 방법을 비교하였다. 분산 프리코딩을 할 때 모든 UE를 보호하는 경우와 3.2에서 설명한 것과 같이 각각의 User-Centric cell의 AP들과 UE 사이의 평균 거리가 280m 이내의 UE들만을 보호 범위로 설정하여 보호 범위 내의 UE들만 보호하는 경우 또한 같이 비교하였다. 추가적으로, 중앙집중형 프리코딩의 경우 모든 AP들의 파워의 총합을 2W로 제한하였고, 분산 프리코딩의 경우 각각의 User-Centric cell의 AP들의 파워의 총합을 0.2W로 제한하였다. 해당 시물레이션의 SNR의 CDF 결과는 그림 7에 나타내었다.

- 시뮬레이션 2) 300개의 AP와 20개의 UE가 랜덤하게 분포해 있는 환경

그림 8은 300개의 AP와 20개의 UE가 랜덤하게 분포해 있는 환경으로 분산 프리코딩에서 각각의 UE마다 30개의 AP가 User-Centric cell를 이루며 보호 범위의 설정 기준 거리는 280m이다. 또한 중앙집중형 프리코딩의 경우 모든 AP의 파워의 총합을 4W로 제한하였고, 분산 프리코딩의 경우 각각의 User-Centric cell의 AP들의 파워의 총합을 0.2W로 제한하였다. 해당 시뮬레이션의 SNR의 CDF 결과는 그림 9에 나타내었다.

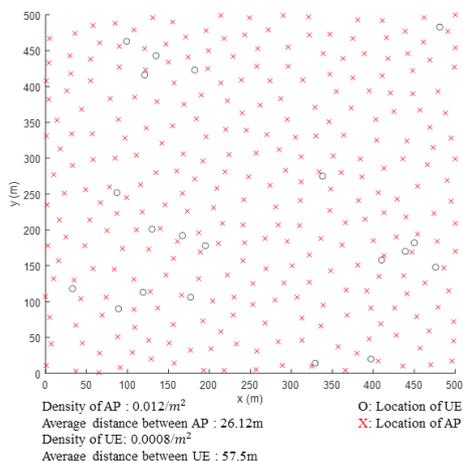


그림 8. 시뮬레이션 2의 AP 및 UE의 위치  
Fig. 8. Locations of AP and UE of the simulation 2

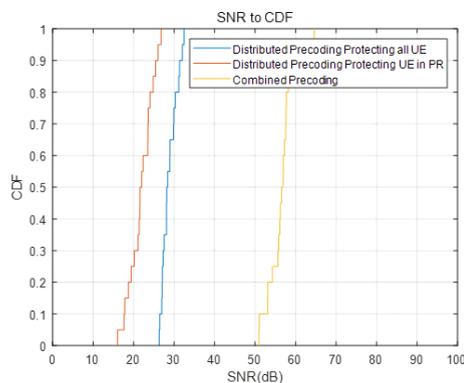


그림 9. 시뮬레이션 2에서 SNR의 CDF  
Fig. 9. CDF of SNR at the simulation 2

- 시뮬레이션 3) 500개의 AP와 50개의 UE가 랜덤하게 분포해 있는 환경

그림 10은 500개의 AP와 50개의 UE가 랜덤하게

분포해 있는 환경으로 분산 프리코딩에서 각각의 UE마다 80개의 AP가 User-Centric cell를 이루며 보호 범위의 설정 기준 거리는 280m이다. 또한 중앙집중형 프리코딩의 경우 모든 기지국의 파워의 총합을 10W로 제한하였고, 분산 프리코딩의 경우 각각의 User-Centric cell의 AP들의 파워의 총합을 0.2W로 제한하였다. 해당 시뮬레이션의 SNR의 CDF결과를 그림 11에 나타내었다.

시뮬레이션 1~3의 결과를 통해 제시한 분산 프리코딩의 방법이 여러 AP와 UE의 환경에서 목표로 하는 파워로 제한하면서 프리코딩 계산 결과를 산출할 수 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 보호범위를 고려하여 보호하는 분산 프리코딩 방법이 모든 UE를 보호하는 것이 아닌 보호 범위내의 단말만을 보호함으로써 프리코딩에 필요한 계산량을 크게 줄였음에도 불구하고 모든 UE를 보호할 때와 비교하여 SNR 성능 차이가

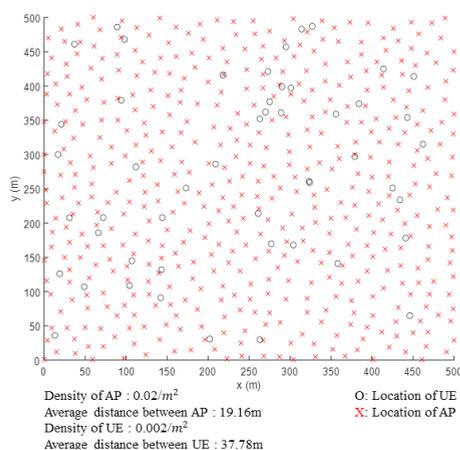


그림 10. 시뮬레이션 3의 AP 및 UE의 위치  
Fig. 10. Locations of BS and UE of the simulation 3

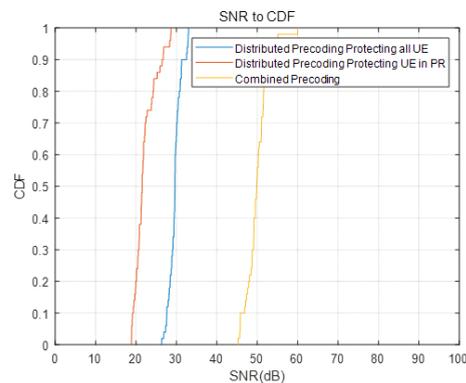


그림 11. 시뮬레이션 3에서 SNR의 CDF  
Fig. 11. CDF of SNR at the simulation 3

크지 않음을 볼 수 있고, SNR 성능 역시 모든 단말의 경우에서 약 18dB 이상을 보장한다.

$$SNR(dB) = \frac{E_b}{N_0}(dB) + 10\log_{10}\left(\frac{R_b}{B}\right) \quad (13)$$

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) (QPSK) \quad (14)$$

그 경우 (13), (14)의 식에 의해서 QPSK 변조 사용 시 이론적으로 약  $9.8 \times 10^{-16}$  이하의 BER을 보장함을 알 수 있다. 따라서 보호 범위 및 영향 범위를 설정한 분산 프리코딩의 방법이 실효적인 것을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 백 홀 네트워크 구조 및 속도 제약 을 고려하고 프러트 홀 용량 문제를 해결을 목적으로 User-Centric cell-free MIMO에 알맞은 통신 환경에 따라 특정 기능에 묶이지 않고 유동적으로 통신이 가능한 AP간의 분산 CPU-less Functional Split 구조를 제안하였다. 또한, 해당 분산 구조에 적합한 유동적으로 각각의 User-Centric cell에서 분산적으로 계산 가능한 프리코딩 방법을 제안하였으며, MATLAB을 활용하여 기지국과 단말의 밀도가 다른 다수의 가상 통신 환경에서 제안된 분산 프리코딩의 성능을 검증하였다. 추후의 연구에서 제안된 구조 및 프리코딩 알고리즘을 활용하는 CF MIMO 테스트베드를 완성하여, 실제 통신 환경에서의 현장 실험 및 레이트레이싱을 활용하여 제작된 여러 가상 통신 환경에서의 HIL(Hardware-In-the-Loop) 실험을 실시하여 본 논문에서 제시한 분산 CPU-less Functional Split 및 분산 프리코딩의 실용성을 검증할 예정이다.

### References

[1] H. Q. Ngo, et al., "Cell-Free massive MIMO versus small cells," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, Mar. 2017.

[2] J. W. Lee, "Analysis of user association impact on user-centric cell-free massive MIMO," *J. KICS*, vol. 45, no. 11 pp. 2014-2021, Nov. 2020.

[3] M. C. Ha, "Implementation and experiment of

a software defined radio-based cell-free MIMO testbed," *J. KICS*, vol. 46, no. 08, pp. 1355-1366, Aug. 2021.

[4] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO: Uniformly great service for everyone," in *Proc. IEEE 16th Int. Wkshps. SPAWC*, pp. 201-205, Stockholm, Sweden, Jul. 2015.

[5] G. Interdonato, H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and P. Frenger, "How much do downlink pilots improve cell-free massive MIMO?," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1-7, Washington, DC, USA, Dec. 2016.

[6] E. Nayebi, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and H. Yang, "Cell-free massive MIMO systems," in *Proc. 49th Asilomar Conf. Signals Syst. Comput.*, pp. 695-699, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2015.

[7] S. Buzzi and C. D'Andrea, "Cell-Free massive MIMO: User-Centric approach," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 6, no. 6, pp. 706-709, Dec. 2017.

[8] D. Lee, et al., "Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: Deployment scenarios and operational challenges," in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. 148-155, Feb. 2012.

[9] 3GPP TR 38.801: "Study on New Radio Access Technology; Radio Access Architecture and Interfaces", 3GPP RAN3, 2016

[10] S. Chen, et al., "Structured massive access for scalable cell-free massive MIMO systems," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 39, no. 5, pp. 1086-1100, May 2021.

[11] A. Scaglione, P. Stoica, S. Barbarossa, G. B. Giannakis, and H. Sampath, "Optimal designs for space time linear precoders and decoders," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 50, no. 5, pp. 1051-1064, May 2002.

[12] S. Boyd, L. Xiao, and A. Mutapcic, "Subgradient methods," lecture notes of EE392o, Stanford University, Autumn Quarter 2004 (2003): 2004-2005.

[13] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex*

*Optimization*, USA: Cambridge University Press, 2004.

윤 현 식 (Hyun-sik Yoon)



2020년 2월 : 성균관대학교 전자전기공학부 졸업

2020년 3월~현재 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정

<관심분야> CF MIMO, 5G Beamforming

[ORCID:0000-0003-3274-8649]

최 계 원 (Kae-won Choi)



2007년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사

2010년 9월~2016년 8월 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 조교수

2016년 9월~현재 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 부교수

<관심분야> 무선통신, 무선전력전송

[ORCID:0000-0002-3680-1403]