

# 분산 안테나 시스템에서 안테나 선택을 사용한 joint ZF 빔포밍 기법의 성능 분석

정 건 웅\*, 김 형 건\*, 이 용 환<sup>o</sup>

## Performance of Joint ZF Beamforming with Antenna Selection in Distributed Antenna System

Geon-Woong Jung\*, Hyoung-Keon Kim\*, Yong-Hwan Lee<sup>o</sup>

### 요 약

분산 안테나 시스템에서 셀 경계에 위치한 사용자들은 다수의 radio unit (RU)들을 사용하여 전송 성능을 개선할 수 있다. 대규모 안테나 구조의 RU를 사용하는 경우 모든 안테나를 사용하지 않고도 사용자들에게 요구되는 성능을 제공할 수 있어, 처리 복잡도와 회로 전력 소모를 줄일 수 있다. 본 논문에서는 RU가 안테나를 선택적으로 일부분 사용할 때 joint zero-forcing (ZF) 기반의 전송 성능을 평균 전송 용량 관점에서 분석하고, 안테나 선택과 joint ZF 빔 가중치 형성에 수반되는 실장 복잡도를 분석한다. 마지막으로, 전산 모의 실험 결과를 통해 분석한 결과를 확인한다.

**Key Words** : DAS, massive MIMO, antenna selection, joint transmission, ZF beamforming

### ABSTRACT

Transmission performance of users near the cell boundary can be improved with the use of multiple radio units (RU) in a distributed antenna system. RUs equipped with a large number of antennas can provide users desired transmission performance without utilizing all of their antennas, reducing processing complexity and power consumption as well. In this paper, we analyze the performance of joint zero-forcing (ZF) beamforming with partial use of transmit antennas in terms of the average transmission capacity. We also analyze the computational complexity for the antenna selection and the generation of joint ZF beam-weight. Finally, we verify the analytic results by computer simulation.

### I. 서 론

스마트 폰의 보급에 따른 무선 멀티미디어 서비스 활성화, 사회 관계망 서비스의 활성화, 사물통신 등의

수요 확대에 의해 무선 데이터 통신량이 폭발적으로 급증하고 있다<sup>[1]</sup>. 최근에 폭증하는 무선 데이터 통신량 수요를 만족시키기 위하여 대규모 안테나가 설치된 무선 기지국 (radio unit; RU)들을 하나의 기지대

\* First Author : Department of Electrical and Computer Engineering and Institute of New Media and Communications, Seoul National University, gwjung100@ttl.snu.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Department of Electrical and Computer Engineering and Institute of New Media and Communications, Seoul National University, ylee@snu.ac.kr, 종신회원

\* Department of Electrical and Computer Engineering and Institute of New Media and Communications, Seoul National University, khgeee@ttl.snu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 201806-0-139-SE, Received April 30, 2018; Revised July 30, 2018; Accepted July 31, 2018

역 기지국 (digital unit; DU)이 제어하는 대규모 안테나 (massive multi-input multi-output; m-MIMO) 기반의 분산 구조 안테나 (distributed antenna system; DAS) 사용을 고려하고 있다<sup>2,3)</sup>.

하나의 DU가 다수의 RU들을 중앙 집중적으로 제어하는 DAS 환경에서는, DU가 RU들이 추정된 사용자들의 채널 정보 (channel state information; CSI)를 모두 이용하는 빔포밍 (beamforming) 기술을 사용하거나, 다수의 RU들을 이용한 협력 전송 (joint transmission) 기술을 사용하여 셀 경계 지역에서의 전송 성능을 개선할 수 있다<sup>4,7)</sup>. 독립적인 기지국 환경에서 협력 전송을 하려면, 각 기지국이 사용자들의 CSI와 사용자들에게 전송할 데이터 및 전송 동기화 정보를 기지국간의 백홀 (backhaul)을 통해 정보를 교환해야 하므로 실장이 용이하지 못하다<sup>8)</sup>.

DAS 환경에서 셀 경계 사용자의 전송 성능을 향상하기 위한 협력 전송 기술들이 연구되었다<sup>4,7)</sup>. 이들 대부분의 기법들은 행렬 기반의 연산을 반복적으로 수행하여 빔 가중치 (beam-weight)를 얻어내므로 실장 복잡도가 높다. 특히 m-MIMO 환경에서 복잡도가 매우 커져 실장이 용이하지 않아, 반복적인 행렬 기반의 연산이 필요 없는 zero-forcing (ZF) 기법 사용을 고려하고 있다<sup>9)</sup>. ZF 기법은 신호를 전송할 사용자에 대한 채널 벡터를 간섭 채널들의 영 공간 (null space)에 투사 (projection) 시킴으로써 반복적인 연산을 수반하지 않고 사용자들간의 간섭을 최소화할 수 있다. 또한, m-MIMO 환경에서는 대규모 안테나 이득으로 인해 모든 안테나를 사용하지 않고 안테나를 선택적으로 사용하여 신호 처리 복잡도를 줄이면서 사용자들을 서비스해줄 수 있다<sup>10,11)</sup>. RU의 안테나 개수를  $N_T$ , 신호 전송에 사용하려는 안테나 개수를  $N_S$ 라고 할 때, 안테나 선택을 위해서  $N_T C_{N_S}$  번의 탐색을 수행해야 하므로 실장 복잡도가 높아, 실장 복잡도를 줄이면서 근접한 성능을 내기 위한 안테나 선택 기법들이 제안되었다<sup>12-15)</sup>. 그러나 이들 기법들도 안테나를 선택하는 과정에서 행렬 연산이 반복적으로 수행되어야 하므로 m-MIMO 환경에서는 적합하지 않다. 따라서 채널 이득을 기반으로 안테나를 선택하는 방법이 m-MIMO 환경에서 고려될 수 있다<sup>10,11)</sup>. 채널 이득 기반의 안테나 선택 방식은 전송 성능 측면에서 최적인 아니지만, 반복적인 행렬 연산 없이  $N_T$ 개의 채널 이득만 계산만 하면 되므로 기존의 안테나 선택 기법들보다 계산 복잡도가 낮아 m-MIMO 환경에 쉽게 적용될 수 있다.

본 논문에서는 DAS 환경에서 RU들의 안테나를 선택적으로 사용하여 ZF 기법으로 협력 전송을 할 때, 사용자들의 평균 전송 용량 (transmission capacity)을 분석하고, 안테나 선택과 joint ZF 빔 형성에 수반되는 실장 복잡도를 분석한다. 또한 전산 모의 실험에서 분석한 결과를 확인한다.

## II. 시스템 모델

그림 1과 같이 하나의 DU가  $N_T$ 개의 안테나를 가지고 있는 RU들을 중앙 제어하는 DAS 구조의 셀룰라 통신 시스템을 고려한다. 각 사용자는 단일 안테나를 가지고 있으며, DU는 RU로부터 모든 사용자들의 채널 정보를 얻을 수 있다고 가정한다.

DU는 각 사용자의 신호 전송에 사용될 안테나를 RU마다 선택한다. RU  $i$ 에 속한  $m$ 번째 사용자를  $u_{i,m}$ ,  $\mathbf{h}_{i,u_{i,m}} = [h_{i,u_{i,m}}^{(1)} \dots h_{i,u_{i,m}}^{(M)}]^T$ 을 ( $M \times 1$ )인 RU  $i$ 와 사용자  $u_{i,m}$ 간의 채널 벡터라 하자. RU  $i$ 가  $N_S (\leq N_T)$ 개의 안테나들을 사용하여 사용자  $u_{i,m}$ 의 신호를 전송하기 위해<sup>1)</sup>,  $N_S$ 개의 안테나들을

$$A_{i,u_{i,m}} = \{h_{i,u_{i,m}}^{(1)}, \dots, h_{i,u_{i,m}}^{(N_S)}\} \quad (1)$$

과 같이 선택한다<sup>10,11)</sup>. 여기서  $A_{i,u_{i,m}}$ 는 사용자  $u_{i,m}$ 의 신호 전송에 사용될 RU  $i$ 의 선택된 채널 성분들의 집합을 나타내며,  $A_{i,u_{i,m}}$ 의 각 채널 성분들은  $|h_{i,u_{i,m}}^{(1)}|^2 > \dots > |h_{i,u_{i,m}}^{(N_T)}|^2$ 을 따른다. RU  $i$ 가 전송하는 신호  $\mathbf{x}_i$ 는

$$\mathbf{x}_i = \sum_{j \in R} \sum_{l \in U_j} \sqrt{p_{i,u_{j,l}}} \mathbf{v}_{i,u_{j,l}} s_{u_{j,l}} \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $R (= \{1, \dots, N_{RU}\})$ 은 DU가 제어하는 RU들의 집합,  $N_{RU}$ 는 DU가 제어하는 RU의 수,  $U_j (= \{u_{j,1}, \dots, u_{j,K_j}\})$ 는 RU  $j$ 에 속한 사용자 집합,  $K_j$ 는 RU  $j$ 에 속한 사용자 수,  $p_{i,u_{j,l}}$ 은 RU  $i$ 의 사용자  $u_{j,l}$ 에 대한 송신 전력,

1) RU와 사용자간의 거리, 채널 상태 등에 따라서 각 RU마다 신호 전송에 필요한 안테나 개수가 달라질 수 있지만, 본 논문에서는 분석의 편의를 위해 각 RU가  $N_S$ 개의 안테나를 사용한다고 가정한다.

$\mathbf{v}_{i,u_{j,l}} (\|\mathbf{v}_{i,u_{j,l}}\|^2 = 1)$ 는 RU  $i$ 의 사용자  $u_{j,l}$ 에 대한 빔포밍 벡터,  $s_{u_{j,l}}$ 은 사용자  $u_{j,l}$ 에게 전송할 데이터 심볼을 나타낸다.

사용자  $u_{i,m}$ 가  $R$ 에 속한 RU들로부터 받는 수신 신호는

$$y_{u_{i,m}} = X_{u_{i,m}} + Y_{u_{i,m}} + n_{u_{i,m}} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서  $X_{u_{i,m}}$ 는 사용자  $u_{i,m}$ 가 받은 신호로

$$X_{u_{i,m}} = \sum_{j \in R} \sqrt{p_{j,u_{i,m}} \alpha_{j,u_{i,m}}} \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{j,u_{i,m}} s_{u_{i,m}} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있으며,  $Y_{u_{i,m}}$ 는 사용자  $u_{i,m}$ 가 받는 간섭 신호로

$$Y_{u_{i,m}} = \sum_{u_{j,l} \in U - \{u_{i,m}\}} \sum_{k \in R} \sqrt{p_{k,u_{j,l}} \alpha_{k,u_{i,m}}} \mathbf{h}_{k,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{k,u_{j,l}} s_{u_{j,l}} \quad (5)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\alpha_{j,u_{i,m}}$ 은 RU  $j$ 와 사용자  $u_{i,m}$ 간의 거리에 따른 경로 손실 (path loss),  $U (\cup U_k, |U|=K)$ 는 모든 사용자들의 집합,  $K$ 는 DU가 서비스 하는 모든 사용자들의 수,  $n_{u_{i,m}}$ 은 평균이 0이고 분산이  $\sigma_n^2$ 인 백색 가우시안 잡음을 나타낸다.

사용자  $u_{i,m}$ 의 신호대 간섭 및 잡음비 (signal-to-interference-plus-noise; SINR)은

$$\gamma_{u_{i,m}} = \frac{S_{u_{i,m}}}{I_{u_{i,m}} + \sigma_n^2} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서  $S_{u_{i,m}}$ 는 사용자  $u_{i,m}$ 가 RU들로부터 수신한 데이터 신호 세기로

$$S_{u_{i,m}} = \left| \sum_{j \in R} p_{j,u_{i,m}} \alpha_{j,u_{i,m}} \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{j,u_{i,m}} \right|^2 \quad (7)$$

로 나타낼 수 있으며,  $I_{u_{i,m}}$ 는 사용자  $u_{i,m}$ 가 받는 간섭 신호 세기로

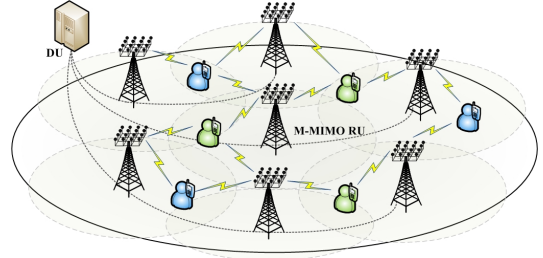


그림 1. M-MIMO 기반의 DAS 전송 환경  
Fig. 1. M-MIMO-based DAS transmission environments

$$I_{u_{i,m}} = \sum_{u_{j,l} \in U - \{u_{i,m}\}} \left| \sum_{k \in R} \sqrt{p_{k,u_{j,l}} \alpha_{k,u_{i,m}}} \mathbf{h}_{k,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{k,u_{j,l}} \right|^2 \quad (8)$$

으로 나타낼 수 있다.

### III. 성능 분석

#### 3.1 전송 성능

RU  $j$ 가 ZF 전송 기법을 사용하여 사용자  $u_{i,m}$ 에게 신호를 전송할 때, 사용자  $u_{i,m}$ 에 대한 빔포밍 벡터는

$$\mathbf{v}_{j,u_{i,m}} = \frac{\mathbf{\Pi}_{j,u_{i,m}}^\perp \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}}{\|\mathbf{\Pi}_{j,u_{i,m}}^\perp \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}\|} \quad (9)$$

으로 나타낼 수 있다<sup>16)</sup>. 여기서  $\mathbf{\Pi}_{j,u_{i,m}}^\perp$ 는 크기가  $(N_S \times 1)$ 인 임의의 벡터를 간섭 채널들의 영 공간 (null space)에 투사시키는 행렬 (projection matrix)로

$$\mathbf{\Pi}_{j,u_{i,m}}^\perp = \mathbf{I}_{N_S} - \mathbf{G}_{j,u_{i,m}} (\mathbf{G}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{G}_{j,u_{i,m}})^{-1} \mathbf{G}_{j,u_{i,m}}^H \quad (10)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\mathbf{G}_{j,u_{i,m}}$ 는 RU  $j$ 의 사용자  $u_{i,m}$ 에 대한 간섭 채널 행렬로

$$\mathbf{G}_{j,u_{i,m}} = [\tilde{\mathbf{h}}_{j,1}, \dots, \tilde{\mathbf{h}}_{j,N_{RU}}] \quad (11)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\tilde{\mathbf{h}}_{j,k}$ 는 RU  $j$ 와 RU  $k$ 에 속한 사용자들 사이의 채널 벡터들의 집합으로

$$\tilde{\mathbf{h}}_{j,k} = \begin{cases} \{\mathbf{h}_{j,u_{k,1}}, \dots, \mathbf{h}_{j,u_{k,K}}\}, & \text{for } k \neq i \\ \{\mathbf{h}_{j,u_{i,1}}, \dots, \mathbf{h}_{j,u_{i,m-1}}, \mathbf{h}_{j,u_{i,m+1}}, \dots, \mathbf{h}_{j,u_{i,K}}\}, & \text{for } k = i \end{cases} \quad (12)$$

으로 나타낼 수 있다. RU들이 ZF를 사용하여 신호를

전송할 때 간섭은 제거되므로, 사용자  $u_{i,m}$ 의 SINR  $\gamma_{u_{i,m}}^{ZF}$  은

$$\begin{aligned} \gamma_{u_{i,m}}^{ZF} &= \left( \sum_{j \in R} \sqrt{\lambda_{j,u_{i,m}}} \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{j,u_{i,m}}^{ZF} \right)^2 \\ &= \left( \sum_{j \in R} \sqrt{\lambda_{j,u_{i,m}}} |\mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{j,u_{i,m}}^{ZF}| \right)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\lambda_{j,u_{i,m}}$  는  $\frac{p_{j,u_{i,m}} \alpha_{j,u_{i,m}}}{\sigma_n^2}$  이며, 두 번째 등호는 항  $\mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{j,u_{i,m}}^{ZF}$  이 음이 아닌 실수이기 때문에 성립한다. 식 (9)로부터 항  $\mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{j,u_{i,m}}^{ZF}$  은

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{j,u_{i,m}}^{ZF} &= \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{M}_{j,u_{i,m}} \mathbf{h}_{j,u_{i,m}} \\ &= \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{U}_{j,u_{i,m}} \mathbf{D}_{j,u_{i,m}} \mathbf{U}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{h}_{j,u_{i,m}} \\ &= \|\mathbf{D}_{j,u_{i,m}}^{1/2} \mathbf{U}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}\|^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 두 번째 등호는  $\mathbf{M}_{j,u_{i,m}}$  의 고유값 분해 (eigenvalue decomposition)을 통해,  $\mathbf{U}_{j,u_{i,m}}$  는  $\mathbf{M}_{j,u_{i,m}}$  의 유니타리 행렬 (unitary matrix),  $\mathbf{D}_{j,u_{i,m}}$  는  $\mathbf{M}_{j,u_{i,m}}$  의 대각 행렬 (diagonal matrix)을 나타낸다. 식 (14)로부터  $\mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{j,u_{i,m}}^{ZF}$  은 음이 아닌 실수임을 알 수 있다.

사용자  $u_{i,m}$ 이 RU  $j$ 로부터 얻을 수 있는 ZF 이득은

$$\begin{aligned} L_{j,u_{i,m}}^{ZF} &= \left| \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H \mathbf{v}_{j,u_{i,m}}^{ZF} \right|^2 \\ &= \|\mathbf{h}_{j,u_{i,m}}\|^2 - L_{j,u_{i,m}}^{ZF} \end{aligned} \quad (15)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 첫 번째 항은 RU  $j$ 와 사용자  $u_{i,m}$  사이의 채널 이득,  $L_{j,u_{i,m}}^{ZF}$  은 간섭을 제거하는 대가 (cost)로 발생하는 ZF 이득 손실로

$$\begin{aligned} L_{j,u_{i,m}}^{ZF} &= \sum_{u_{i,l} \in U_i - \{u_{i,m}\}} l_{j,u_{i,m},u_{i,l}}^{ZF} \\ &+ \sum_{k \in R - \{i\}} \left[ \sum_{u_{k,l} \in U_k} l_{j,u_{i,m},u_{k,l}}^{ZF} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $l_{j,u_{i,m},u_{i,l}}^{ZF}$  은 사용자  $u_{i,l}$ 에게 간섭 신호가 가지 않도록 하기 위해서 발생하는 ZF 이득 손실로

$$l_{j,u_{i,m},u_{i,l}}^{ZF} = \frac{\mathbf{h}_{j,u_{i,m}}^H (\mathbf{h}_{j,u_{i,l}} \mathbf{h}_{j,u_{i,l}}^H) \mathbf{h}_{j,u_{i,m}}}{\|\mathbf{h}_{j,u_{i,l}}\|^2} \quad (17)$$

과 같이 나타낼 수 있다<sup>[17]</sup>.

평균 ZF 이득을 구하기 위해서, 먼저 RU  $j$ 와 사용자  $u_{i,m}$  사이의 평균 채널 이득을 계산한다.  $x_1 > \dots > x_N$ 들이 자유도 (degrees of freedom) 2를 갖는 Chi-square 랜덤 변수일 때,  $N$ 이 무한히 커짐에 따라서  $x_i$ 들의 부분 합 (trimmed sum)

$$\sum_{i=1}^S x_i \quad (1 \leq S \leq N)$$

은 근사적으로

$$\sum_{i=1}^S x_i \sim N(\mu(N, S), \sigma^2(N, S)) \quad (18)$$

과 같은 분포를 따른다<sup>[11]</sup>. 여기서  $\mu(N, S) = \sum_{i=1}^S x_i$ 의 평균으로

$$\mu(N, S) = \left( 1 + \ln\left(\frac{N}{S}\right) \right) S \quad (19)$$

로 주어지며,  $\sigma^2(N, S)$ 은  $\sum_{i=1}^S x_i$ 의 분산으로

$$\sigma^2(N, S) = \left( 2 - \frac{S}{N} \right) S \quad (20)$$

로 주어진다.

식 (18)으로부터 RU  $j$ 와 사용자  $u_{i,m}$  사이의 평균 채널 이득은

$$\begin{aligned} E \left[ \|\mathbf{h}_{j,u_{i,m}}\|^2 \right] &= E \left[ \sum_{n=1}^{N_S} |h_{j,u_{i,m}}^{(n)}|^2 \right] \\ &= \bar{g}_S(N_T, N_S) N_S \end{aligned} \quad (21)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\bar{g}_S$ 은 평균 안테나 선택 이득을 나타내며,  $1 + \ln(N_T/N_S)$ 과 같다.

$\{h_{j,u_{i,l}}^{(n)}\}$ 은 서로 독립적이며 같은 분포를 따르는 (independent and identically distributed) 평균이 0이고 분산이 1인 복소수 가우시안 랜덤 변수 (Gaussian random variables)들이기 때문에  $E[\mathbf{h}_{j,u_{i,l}} \mathbf{h}_{j,u_{i,l}}^H] = \mathbf{I}_{N_S}$

이 성립한다. 따라서 RU  $i$ 에 속한 다른 사용자들에게 간섭이 발생하지 않도록 하기 위해 발생하는 평균 ZF 이득 손실은  $\bar{g}_S(N_T, N_S)(K_i - 1)$ 과 같다<sup>[17]</sup>. 또한 RU  $j$ 의 다른 사용자들에게 간섭이 가지 않도록 하기 위해 발생하는 평균 빔포밍 이득 손실은  $\bar{g}_S(N_T, N_S) \sum_{k \in R - \{i\}} K_k$ 과 같다<sup>[17]</sup>. 따라서 RU  $j$ 에서 다른 사용자들에게 간섭을 주지 않기 위해서 발생하는 평균 ZF 빔포밍 이득 손실은

$$\bar{L}_{j,u_i,m}^{ZF} = \bar{g}_S(N_T, N_S)(K - 1) \quad (22)$$

으로 나타낼 수 있다.

평균 ZF 이득은 식 (21)과 (22)로부터

$$\begin{aligned} \bar{g}_{j,u_i,m}^{ZF} &= E \left[ \|\mathbf{h}_{j,u_i,m}\|^2 \right] - \bar{L}_{j,u_i,m}^{ZF} \\ &= \bar{g}_S(N_T, N_S)(N_S - K + 1) \end{aligned} \quad (23)$$

으로 나타낼 수 있다. 사용자  $u_{i,m}$ 의 평균 SINR은 식 (13)과 (23)으로부터

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_{u_i,m}^{ZF} &= E \left[ \left( \sum_{j \in R} \sqrt{\lambda_{j,u_i,m}} |\mathbf{h}_{j,u_i,m}^H \mathbf{v}_{j,u_i,m}^{ZF}| \right)^2 \right] \\ &= W_{u_i,m} \bar{g}_{j,u_i,m}^{ZF} \end{aligned} \quad (24)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $W_{u_i,m}$ 는

$$W_{u_i,m} = \sum_{j \in R} \lambda_{j,u_i,m} + 2 \sum_{j \in Rk \in R - \{j\}} \sqrt{\lambda_{j,u_i,m} \lambda_{k,u_i,m}} \quad (25)$$

으로 나타낼 수 있다.

### 3.2 실장 복잡도

실수 들의 덧셈, 곱셈, 나눗셈 연산은 하나의 floating point operations (flops)으로, 복소수 (complex number)들의 덧셈, 곱셈은 각각 2, 6, flops으로, 크기가  $(p \times q)$ ,  $(q \times r)$ 인 두 복소수 행렬들의 곱셈은  $8pqr$  flops, 크기가  $(p \times q)$ 인 행렬의 그램 (Gram) 행렬의 계산은  $pq^2$  flops, 크기가  $(q \times q)$ 인 복소수 행렬의 역행렬 연산은  $\frac{4q^3}{3}$  flops의 계산이 필요하다<sup>[18,19]</sup>.

한 사용자의 안테나 선택을 위해 각 RU마다  $N_T$ 개의 채널 성분 크기를 계산해야 하므로,  $3N_{RU}N_T$  flops

의 계산이 필요하다. 따라서 모든 사용자들의 안테나 선택에 수반되는 연산량  $\text{Flops}^{AS}$ 는

$$\text{Flops}^{AS} = 3KN_{RU}N_T \{ \mathbf{1}_{A_S}(N_S) \} \quad (26)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서  $A_S = \{1, \dots, N_T - 1\}$ ,  $\mathbf{1}_{A_S}(N_S)$ 는  $N_S \in A_S$ 인 경우 1,  $N_S \notin A_S$ 인 경우 0을 나타내는 지시 함수 (indicator function)를 나타낸다. 식 (10)으로부터, 투사 행렬의 계산에

$$\begin{aligned} \text{Flops}^{Inv} &= 8(K-1)N_S^2 + (9(K-1)^2 + 1)N_S \\ &\quad + \frac{4(K-1)^3}{3} \end{aligned} \quad (27)$$

flops의 계산이 필요하며, 투사 행렬과 채널 벡터의 곱과 벡터 정규화 (normalization) 과정에는

$$\text{Flops}^N = 8N_S^2 + 6N_S \quad (28)$$

flops의 계산이 필요하다. 모든 사용자들의 ZF 빔 형성에 수반되는 연산량  $\text{Flops}^{ZF}$ 는

$$\text{Flops}^{ZF} = KN_{RU}(\text{Flops}^{Inv} + \text{Flops}^N) \quad (29)$$

으로 나타낼 수 있다. 따라서 DU에서 모든 사용자들의 신호 전송을 위한 안테나 선택과 빔 형성에 수반되는 총 연산량은

$$\begin{aligned} \text{Flops}^{TX} &= \text{Flops}^{AS} + \text{Flops}^{ZF} \\ &\approx O \left( KN_{RU} \left( KN_S^2 + N_T \{ \mathbf{1}_{A_S}(N_S) \} \right) \right) \end{aligned} \quad (30)$$

으로 나타낼 수 있다.

## IV. 성능 평가

상기 분석한 성능 평가를 전산 모의 실험으로 확인한다. 이를 위해 셀 반경 300 m인 3개의 각 RU가 안테나를 64 또는 128개를 사용하며, 각 RU에는 3GPP 경로 손실 모델<sup>[20]</sup>을 따르는  $K_{RU}$ 명의 사용자들이 무작위로 흩어져서 분포하고, 각 RU의 최대 송신 전력은 33 dBm이며, 모든 사용자들에게 균일하게 송신 전력을 할당한다. 사용 주파수 대역폭은 20 MHz, 열잡음 전력 스펙트럼 밀도는 -174 dBm/Hz를 가정한다.

다<sup>[20]</sup>. 안테나간의 공간 상관도 (spatial correlation)를 고려하기 위해

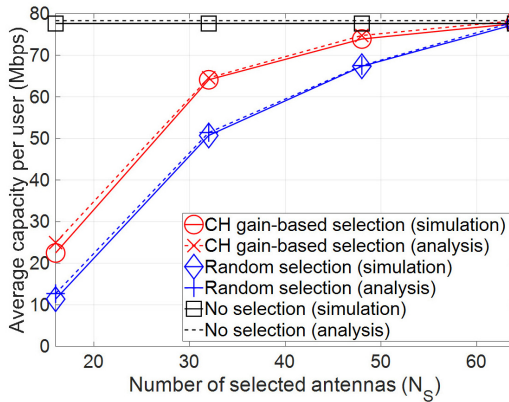
$$\mathbf{h} = \mathbf{R}^{1/2} \tilde{\mathbf{h}} \quad (31)$$

와 같은 채널 모델을 고려한다<sup>[21]</sup>. 여기서  $\mathbf{R}$ 은 채널 성분들 간의 상관도를 나타내는 공간 상관도 행렬,  $\tilde{\mathbf{h}}$ 의 각 성분은 서로 독립적이며 같은 분포를 따르는 평균이 0이고 분산이 1인 복소수 가우시안 랜덤 변수를 나타낸다.  $\mathbf{R}$ 의  $(i, j)$ 번째 성분은

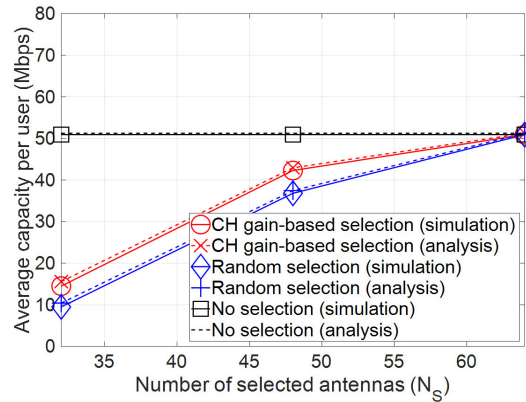
$$[\mathbf{R}]_{i,j} = \begin{cases} r^{j-i}, & i \leq j \\ (r^{i-j})^*, & i > j \end{cases} \quad (32)$$

로 나타낼 수 있다<sup>[21]</sup>. 여기서  $r$ 은 인접한 안테나들의 공간 상관도를 나타내는 복소수 상관도 계수 (complex correlation coefficient)를 나타낸다.  $r$ 의 크기 (amplitude)  $|r|$ 은 0.7,  $r$ 의 위상 (phase)  $\angle r$ 은  $[-\pi, \pi]$ 의 범위에서 랜덤하게 분포한다고 가정 한다<sup>[21]</sup>. 성능 비교를 위해 안테나를 임의로 선택하는 전송 기법 (random selection)과 모든 안테나를 사용하는 전송 기법 (no selection)을 고려한다.

그림 2와 3은  $N_T$ 가 각각 64개, 128개 일 때 선택된 안테나의 개수 ( $N_S$ )에 따른 사용자의 평균 전송 용량 (Mbps)을 나타낸다. 그림에서 전체 안테나의 절반 이상을 사용할 때, 안테나 선택 이득으로 인해 안테나를 모두 사용한 경우와 안테나를 선택적으로 사용한 경우의 성능 차이가 크지 않음을 볼 수 있다. 상



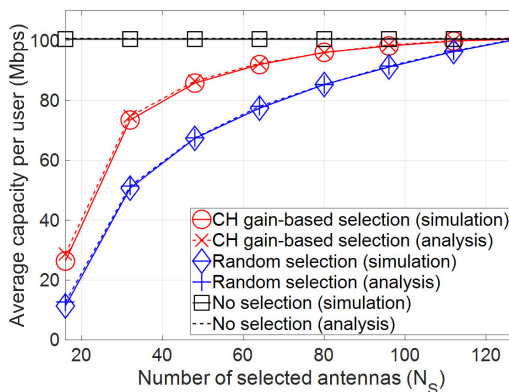
(a)  $K_{RU} = 5$



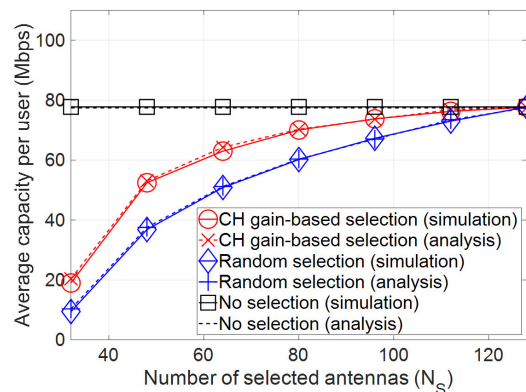
(b)  $K_{RU} = 10$

그림 2. 선택된 안테나 수에 따른 평균 전송 용량 ( $N_T = 64$ )

Fig. 2. Average capacity according to the number of selected antennas ( $N_T = 64$ )



(a)  $K_{RU} = 5$



(b)  $K_{RU} = 10$

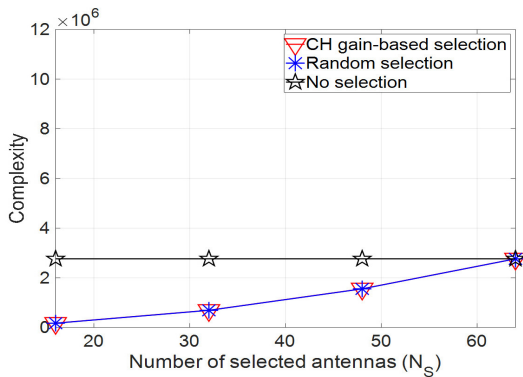
그림 3. 선택된 안테나 수에 따른 평균 전송 용량 ( $N_T = 128$ )

Fig. 3. Average capacity according to the number of selected antennas ( $N_T = 128$ )

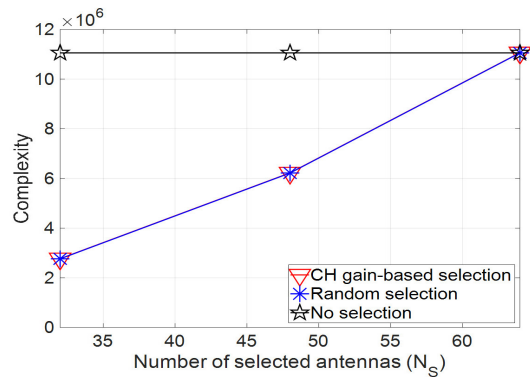
기 성능 차이는  $N_T$ 가 64개일 때보다 128개일 때 더 작은 것을 확인할 수 있는데, 이는 식 (21)에서 분석한 것처럼 안테나 선택 이득은  $N_T$ 에 비례하기 때문이다. 한편 그림 2-(b)에서는 전체 안테나의 절반을 사용하더라도, 안테나를 모두 사용한 경우와 성능 차이가 큰 것을 볼 수 있다. 이는 사용하는 안테나 개수에 비해 사용자수가 많아서, 대부분의 공간 자유도 (spatial degrees of freedom)가 간섭을 제거하는데 사용되었기 때문이다. 안테나를 랜덤하게 선택하는 경우 안테나 선택 이득이 없기 때문에 채널 이득 기반으로 안테나를 선택한 경우보다 성능이 낮은 것을 볼 수 있다. 안테나 선택 이득은  $N_T$ 가 64개일 때보다 128개일 때 더 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 안테나 수가 늘어남에 따라서 채널 이득이 높은 안테나들이 존재할 확률이 증가하기 때문이다. 또한, 전반적으로 실험 결과

와 분석한 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 실험 결과가 분석한 결과보다 성능이 근소하게 낮은 것을 볼 수 있는데, 이는 실제 전송 환경에서는 공간 상관도 영향으로 인해 채널 이득의 다양성 (diversity)이 채널이 독립적인 환경보다 낮아지기 때문이다.

그림 4와 5는  $N_T$ 가 각각 64개, 128개 일 때 선택된 안테나의 개수 ( $N_S$ )에 따른 안테나 선택과 빔 형성에 수반되는 계산 복잡도를 나타낸다. 전반적으로, 안테나를 모두 사용한 경우보다 선택적으로 사용하였을 때 계산 복잡도가 훨씬 낮은 것을 볼 수 있다. 특히,  $N_T$ 가 64개일 때보다 128개일 때, 안테나를 모두 사용한 경우와 선택한 경우의 계산 복잡도 차이가 상대적으로 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 식 (29)에서 분석한 것처럼, ZF 빔 형성에 필요한 계산 복잡도가  $N_S^2$ 에 비례하기 때문이다. 또한, 식 (26)에서 분석



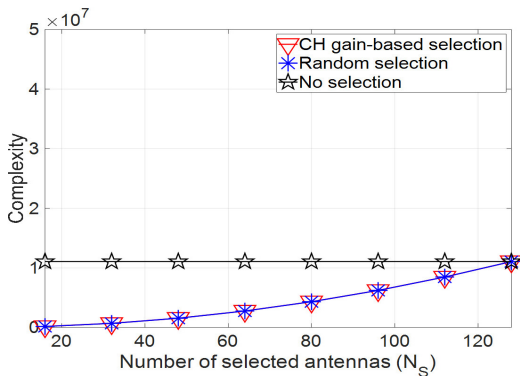
(a)  $K_{RU} = 5$



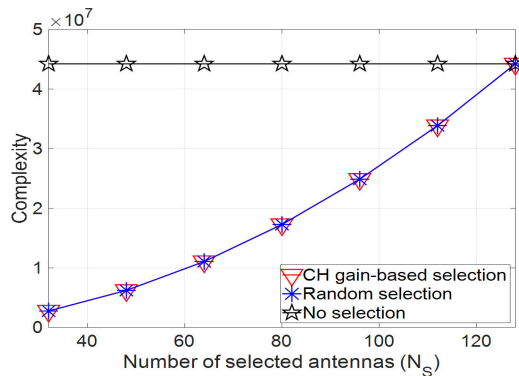
(b)  $K_{RU} = 10$

그림 4. 선택된 안테나 수에 따른 계산 복잡도 ( $N_T = 64$ )

Fig. 4. Computational complexity according to the number of selected antennas ( $N_T = 64$ )



(a)  $K_{RU} = 5$



(b)  $K_{RU} = 10$

그림 5. 선택된 안테나 수에 따른 계산 복잡도 ( $N_T = 128$ )

Fig. 5. Computational complexity according to the number of selected antennas ( $N_T = 128$ )

하였듯이 채널 이득 기반으로 안테나를 선택할 때 수반되는 계산 복잡도가 크지 않기 때문에, 안테나를 랜덤하게 선택하는 경우와 계산 복잡도가 거의 비슷한 것을 볼 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 DAS 환경에서 m-MIMO 안테나가 선택적으로 사용될 때 joint ZF 기법의 전송 성능과 실장 복잡도를 분석하였다. 전산 모의 실험 결과를 통해 안테나를 선택적으로 사용할 때 안테나를 모두 사용한 경우보다 훨씬 낮은 실장 복잡도로 이에 근사한 성능을 낼 수 있다는 것을 확인하였다.

## References

[1] Cisco, *Cisco visual networking index: forecast and methodology*, 2016-2021(2017), Retrieved Apr., 9, 2018, from <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.pdf>.

[2] N. Chen, et al., "Scalable and flexible massive MIMO precoding for 5G H-CRAN," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 1, pp. 46-52, Feb. 2017.

[3] S. Park, C. B. Chae, and S. Bahk, "Large-scale antenna operation in heterogeneous cloud radio access networks: a partial centralization approach," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, pp. 32-40, Jun. 2015.

[4] Z. Wang, et al., "Robust beamforming design in C-RAN with sigmoidal utility and capacity-limited backhaul," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 9, pp. 5583-5598, Sep. 2017.

[5] C. Pan, et al., "Joint user selection and energy minimization for ultra-dense multi-channel C-RAN with incomplete CSI," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 8, pp. 1809-1824, Aug. 2017.

[6] T. X. Tran and D. Pompili, "Dynamic radio cooperation for user-centric cloud-RAN with computing resource sharing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 4, pp. 2379-

2393, Apr. 2017.

[7] J. Kim, H. W. Lee, and S. Chong, "Virtual cell beamforming in cooperative networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1126-1138, Jun. 2014.

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

[9] H. Huh, A. M. Tulino, and G. Caire, "Network MIMO with linear zero-forcing beamforming: large system analysis, impact of channel estimation, and reduced-complexity scheduling," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 58, no. 5, pp. 2911-2934, May 2012.

[10] G. W. Jung, Y. S. Byun, and Y. H. Lee, "Antenna scheduling for energy-efficient transmission in massive MIMO environments," in *Proc. ITC-CSCC*, pp. 649-652, Naha, Japan, Jul. 2016.

[11] H. Li, L. Song, and M. Debbah, "Energy efficiency of large-scale multiple antenna systems with transmit antenna selection," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 2, pp. 638-647, Feb. 2014.

[12] S. L. Ju, et al., "Efficient transmit antenna selection method for massive MIMO system," *J. Satellite, Inf. and Commun.*, vol. 11, no. 3, pp. 58-64, Sep. 2016.

[13] R. Hamdi, E. Driouch, and W. Ajib, "Large-scale MIMO systems with practical power constraints," in *Proc. IEEE VTC-Fall*, pp. 1-5, Montreal, Canada, Sep. 2016.

[14] P. V. Amadori and C. Masouros, "Interference-driven antenna selection for massive multiuser MIMO," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 65, no. 8, pp. 5944-5958, Aug. 2016.

[15] M. Benmimoune, et al., "Joint transmit antenna selection and user scheduling for massive MIMO systems," in *Proc. IEEE WCNC*, pp. 381-386, New Orleans, USA, Mar. 2015.

[16] S. H. Moon, et al., "Joint user scheduling and



adaptive inter-cell interference cancellation for MISO downlink cellular systems,” *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 62, no. 1, pp. 172-181, Jan. 2013.

- [17] K. Wong and Z. Pan, “Array gain and diversity order of multiuser MISO antenna systems,” *Int. J. Wireless Inf. Net.*, vol. 15, no. 2, pp. 82-89, Jun. 2008.
- [18] S. He, et al., “Coordinated multicell multiuser precoding for maximizing weighted sum energy efficiency,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 3, pp. 751-741, Feb. 2014.
- [19] R. Hunger, *Floating point operations in matrix-vector calculus*(2007), Retrieved Apr., 9, 2018, from <https://mediatum.ub.tum.de/doc/625604/625604>.
- [20] A. Osseiran, J. F. Monserrat, and W. Mohr, *Mobile and Wireless Communications for IMT-Advanced and Beyond*, Wiley, 2011.
- [21] E. Björnson, et al., “Massive MIMO systems with non-ideal hardware: energy efficiency, estimation, and capacity limits,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 11, pp. 7112-7139, Nov. 2014.

**정 건 응 (Geon-Woong Jung)**



2013년 2월 : 서울시립대학교 전  
자전기컴퓨터공학부 졸업  
2013년 3월~현재 : 서울대학교  
전기컴퓨터공학부 박사과정  
<관심분야> Massive MIMO 기  
반의 무선 통신 시스템

**김 형 건 (Hyoung-Keon Kim)**



2014년 2월 : 서울대학교 전기  
컴퓨터공학부 졸업  
2014년 3월~현재 : 서울대학교  
전기컴퓨터공학부 박사과정  
<관심분야> 소형 이동 셀 기  
반의 무선 통신 시스템

**이 용 환 (Yong-Hwan Lee)**



1977년 : 서울대학교 전기공학과  
졸업  
1980년 : KAIST 전기공학과 석  
사  
1989년 : Massachusetts 대학교,  
전기공학과 박사  
1980년~1985년 : 국방과학 연구  
소 선임 연구원  
1989년~1994년 : 미국 모토로라 수석 연구원  
1994년~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수  
<관심분야> IoT 네트워킹, 무선 통신 시스템