

# FD-MIMO 시스템에서 주파수 효율 향상을 위한 스케줄링 기법 제안

김영재\*, 주상임, 정원호, 김경석\*\*

## Scheduling Scheme Proposition for Spectral Efficiency Improvement in FD-MIMO

Young-Jae Kim\*, Sang-Lim Ju, Won-Ho Jeong, Kyung-Seok Kim\*\*

**요 약** .....

4G 이동통신에서는 본격적으로 데이터 중심의 이동통신 서비스를 제공하기 시작했다. 이에 따라 최근 무선 트래픽에서 인터넷, 동영상 등을 포함한 멀티미디어 등의 서비스가 주된 콘텐츠로 자리 잡게 되었다. 이런 서비스 이용 패턴 변화에 대응하기 위해 현재 더 빠른 전송 속도를 가진 5G 이동통신에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 5G 이동통신은 기존 단말과의 호환성을 위해 4G를 기반으로 구성될 것으로 예상된다. 따라서 본 논문의 시뮬레이션 또한 4G를 기반으로 구성하였으며 시스템의 성능을 높이기 위해 Max throughput 스케줄링 알고리즘을 기반으로 새로운 사용자 스케줄링 기법을 제안한다.

본 논문은 기존의 사용자 스케줄링 알고리즘과 제안한 사용자 스케줄링 알고리즘을 비교하기 위해 주파수 효율과 공정성을 도출한다. 시뮬레이션 결과 모든 상황에서 Max throughput에 비해 향상된 성능을 보였다. 본 논문이 5G 이동통신 기술의 시스템 성능 향상을 위한 연구의 참고자료로서 활용되며, 현재도 진행 중인 표준화 작업에 대해 일부 도움이 되기를 기대한다.

**Key Words** : 5G, FD-MIMO, Scheduling, Max throughput, Proportional Fairness

**ABSTRACT** .....

In 4G mobile communication, data services of mobile communication began to be provided in earnest. As a result, services such as the internet and multimedia including the video have become the main contents in the recent wireless traffic. Accordingly, research on 5G mobile communication with higher transmission rate has been actively carried out. 5G mobile communication is expected to be based on 4G for compatibility with existing terminals. Therefore, the simulation of this paper is based on 4G and we propose a new user scheduling scheme based on the Max throughput scheduling algorithm to improve system performance.

This paper derives the frequency efficiency and fairness to compare the existing user scheduling algorithm with the proposed user scheduling algorithm. The proposed scheme shows better frequency efficiency and fairness than Max throughput in all situations. This paper contributes to the research for improving the system performance of 5G mobile communication technology, and I hope that it will help some of the ongoing standardization work.

### I. 서 론

과거 이동통신 기술은 음성 위주 서비스를 제공하였지만 최근 4G 이동통신 기술의 발달로 인해 본격적으로 데이터

중심의 서비스를 제공하기 시작했다. 이에 따라 무선 트래픽에서 멀티미디어 서비스가 주된 콘텐츠로 자리 잡게 되었다 [1]. 이런 서비스 이용 패턴의 변화는 현재까지도 진행 중이며, 사용자들의 고품질 서비스에 대한 요구가 증가하고 있다.

$$H_{u,s,n}(t) = \sqrt{P_n/M} \sum_{m=1}^M [F_{rx,u}]^T \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{K_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\phi}) \\ \sqrt{K_{n,m}^{-1}} & \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\phi}) \end{bmatrix} [F_{tx,s}] \exp(j2\pi\lambda_0^{-1}(\hat{r}_{rx,u,m}^T \cdot \bar{d}_{rx,u})) \exp(j2\pi v_{n,m}t) \quad (1)$$

※ 이 논문은 2017년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2017R1D1A1B03032420)

\*충북대학교 전자통신공학, \*\*교신저자, 충북대학교 정보통신공학부(kseokkim@cbnu.ac.kr)

접수일자 : 2017년 7월 26일, 최종 게재 확정일자 : 2017년 9월 5일

5G 이동통신 기술은 이런 서비스 이용 패턴 변화에 따라 기존 이동통신 기술에 비해 보다 높은 성능이 요구된다. 5G 이동통신 기술의 표준화를 위한 요구사항으로서 체감 전송률, 최대 전송률, 이동성, 전송 지연, 최대 연결 수, 에너지 효율, 주파수 효율, 면적당 용량 총 8개 파라미터를 ITU에서 정의하고 있다[2]. 5G 이동통신 기술의 요구사항을 만족시키기 위한 분야로서 최근 FD-MIMO 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3][4][5]. FD-MIMO는 기존 무선 채널과 달리 3D 채널 모델을 적용한 시스템으로서 5G 이동통신 기술의 주요 이슈 중 하나인 3D 빔포밍을 위한 시스템 모델이다.

본 논문에서는 FD-MIMO(Full Dimension-Multiple Input Multiple Output) 시스템을 구성하고 기존 사용자 스케줄링 기법에 비해 보다 주파수 효율이 향상된 성능을 도출할 수 있는 알고리즘을 제안하고 기존의 기법과 성능을 비교한다.

## II. FD-MIMO 시스템

일반적인 MIMO 시스템과 비교하여 FD-MIMO 시스템 [6][7]의 중요 특징은 3D 채널 모델을 사용하는 것이다. 이전의 무선 채널 모델은 주로 2차원 환경에서 모델링되었다. 하지만 5G 이동통신의 요구 성능을 만족시키기 위해 3D 빔포밍 기법에 대한 연구가 진행됨에 따라 3D 채널 모델이 요구되었다. 이에 따라 3GPP에서 3D 채널 모델을 정의하였으며 [8], 3D 채널 모델을 고려한 MIMO 시스템을 FD-MIMO라 칭한다.

3GPP에서 정의한 3D 채널 계수는 (1)식을 통해 계산된다. 3D 채널은 delay, 클러스터 파워, 수평 및 수직 방향 출발 각도, 도착 각도가 포함된다. 클러스터는 M개의 sub-path로 구성된다. 각 파라미터는 [9] 문서에 정의되어 있는 순서에 따라 계산된다.  $P_n$ 은 n번째 클러스터의 파워를 의미한다.  $\phi_{n,m}$ 은 n번째 클러스터에서 생성된 빔 m의 초기 위상이며,  $K_{n,m}$ 은 n번째 클러스터의 path m의 XPR(Cross polarization Power Ratio)를 의미한다.  $\theta$ 와  $\phi$ 는 각 클러스터에서 생성된 빔의 도착 각, 출발 각을 의미한다.  $\hat{r}_{rx,n,m}$ 와  $\hat{r}_{tx,n,m}$ 는 출발 각과 도착 각의 단위벡터를 의미하고  $\bar{d}_{rx,u}$ 와  $\bar{d}_{tx,u}$ 는 수신단 안테나 원소 u의 위치 벡터를 의미한다.  $F_{tx,s}$ 는 기지국의 안테나 패턴을 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$F_{tx,s} = \begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{n,m,ZOD}, \phi_{n,m,AOD}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{n,m,ZOD}, \phi_{n,m,AOD}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$F_{rx,u}$ 는 수신단의 안테나 패턴을 의미하고 (3) 식과 같다.

$$F_{rx,u} = \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{n,m,ZOA}, \phi_{n,m,AOA}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{n,m,ZOA}, \phi_{n,m,AOA}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

FD-MIMO 시스템은 3D 채널과 3D 빔포밍을 고려하기

때문에 기존의 ULA(Uniform Linear Antenna) 안테나 배열과 달리 안테나를 사각형 형태로 구성한 UPA(Uniform Planar Antenna) 안테나 배열을 사용한다. 이는 수직 방향 빔포밍을 위한 것으로 ULA 방식은 수평 방향 안테나의 위상차를 이용하여 빔을 형성한다. UPA 방식은 이에 추가로 수직 방향의 안테나 배열을 사용하여 수직 방향 빔포밍이 가능하다.

본 논문에서 구성한 FD-MIMO 시스템은 [그림 1]과 같으며 채널 정보를 완벽히 알고 있는 perfect 상황을 고려하였다. 5G 이동통신은 기존 단말과의 호환성을 위해 4G 표준인 LTE-A에서 크게 벗어나지 않도록 기술 개발이 진행 중이다 [10][11]. 따라서 시뮬레이션의 데이터 송신 과정은 LTE-A 표준[12]을 기반으로 구성하였으며 3D 빔포밍을 위한 프리코딩 기법으로 KPC(Kronecker Product Codebook) 기법을 사용하였다[13][14].

단말은 수신된 데이터를 통해 추정된 채널 정보를 기반으로 CQI와 PMI를 피드백하여 기지국은 피드백 정보를 토대로 채널 상황에 따라 사용자 스케줄링을 통해 각 사용자에게 RB를 할당한다. 할당된 RB를 토대로 송신 데이터를 생성하고 시스템의 각 단계를 거쳐 사용자에게 신호를 전송한다.

송신단의 송신 과정을 거친 데이터 x는 프리코딩 행렬 W이 곱해져 3GPP 3D 채널을 거쳐 수신단에서 수신하게 되며, u번째 사용자의 수신 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_u = H_u W_u x_u + \sum_{i=1, i \neq u}^K H_i W_i + n \quad (4)$$

## III. 기존 사용자 스케줄링 기법

이동 통신 시스템에서 기지국이 서비스하는 모든 사용자들은 각각 다른 무선 채널 상태를 가지고 있다. 한 사용자는 양호한 채널 상태를 가지고 있고, 불량한 채널 상태를 가진 사용자도 존재할 수 있다. 이 경우 채널 상태에 따라 각 사용자들에게 효율적으로 자원을 할당하는 방식을 사용자 스케줄링이라 한다.

이 절에서는 기존의 사용자 스케줄링 기법을 설명하고 다음 절에서 기존 기법을 보완한 사용자 스케줄링 기법을 제안한다.

### 1. Max throughput 기법[15]

일반적으로 무선 채널 상태는 시간에 따라 변한다. 따라서 각 사용자들의 채널 상황은 시간에 따라 변하게 된다. Max throughput 기법은 셀 내의 사용자들의 순간적인 채널 상태에 따른 전송률을 계산하여 최상의 데이터 전송률을 가진 사용자만을 선택한다. Max throughput의 사용자 선택 알고리즘은 수식으로 표현하면 다음과 같다.  $R_i$ 는 i 번째 사용자에 대한 순간 데이터 전송률을 의미한다.

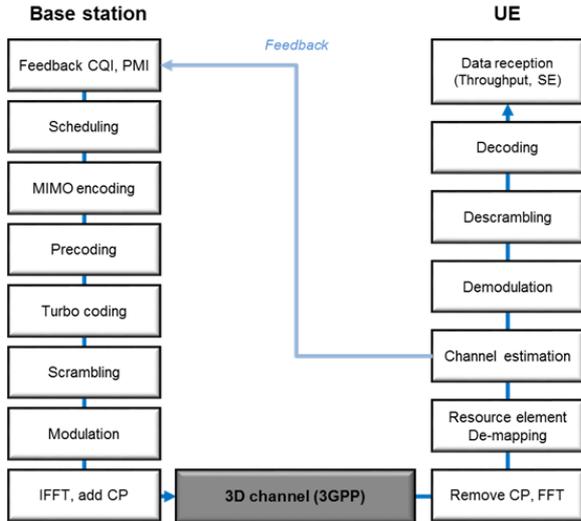


그림 1. FD-MIMO 시뮬레이션 블록도

$$k = \operatorname{argmax}_i R_i \quad (5)$$

셀 내 존재하는 사용자들 중 전송률이 최대인 사용자만을 선택하기 때문에 시스템 용량 측면에서는 가장 높은 성능을 보인다. 하지만 실제 시스템에서 한 사용자가 채널 상태가 불량한 장소에서 오랜 시간 이동하지 않을 경우 지속해서 서비스를 받을 수 없는 경우가 발생한다. 따라서 Max throughput 기법은 모든 사용자들에게 공정하지 않으며 양호한 채널 상태를 가진 사용자에게 매우 편향될 수 있다. 이런 상황은 전체적인 시스템의 서비스 품질 관점에서 허용될 수 없다. 이런 경우를 고려하여 모든 사용자가 순서를 가지고 스케줄링 하는 방식으로서 Round Robin 기법이 개발되었다. 하지만 Round Robin 방식의 경우 모든 사용자가 공정할 수 있지만 시스템 용량 측면에서 비효율적인 단점이 있다.

본 논문을 위한 시뮬레이션에서 적용한 Max throughput 스케줄링 알고리즘은 사용자에게 피드백된 CQI 정보와 코드북을 이용한 양자화 된 채널 정보를 이용한다. 기지국은 양자화된 채널 정보를 이용하여 선택된 사용자들 간의 SINR을 계산한다. 자세한 과정은 다음 의사코드를 통해 설명한다.

의사코드에서 K는 선택된 사용자들의 집합이며 M은 송신 안테나의 수이다. 선택되는 사용자들은 송신 안테나 수를 초과할 수 없다. I번째 사용자부터 양자화된 채널 g를 이용하여 채널 행렬을 생성한다. G는 이미 선택된 사용자들의 채널 행렬이다. 채널 행렬을 통해 SINR  $\Gamma$ 를 계산한 후 계산된 SINR과 CQI를 재맵핑한다. 재맵핑된 CQI는 단순 채널 상황만을 고려한 피드백 CQI와 달리 사용자 간 간섭이 고려된 CQI라 할 수 있다. 재맵핑된 CQI에 따라 MCS 레벨이 결정되고 이에 따른 전송률을 계산한다. 계산된 전송률 중 최대 값을 가진 사용자를 선택한다. 상기 과정을 모든 RB에 대해 반복하여 각 RB 마다 사용자를 선택한다.

표 1. Max throughput 알고리즘

```

Algorithm 1 Max throughput
while [K] ≤ M do
    K' ← {i ∈ {1, ..., K}}
    for i ∈ K' do
        Gi ← [GKT, gi]T
        Pi = GiH(GiGiH)-1
        Λi = diag( $\frac{P_{Tx}}{\|P'_{i}e_i\|_2^2}$ )
        Γi =  $\frac{M}{P_{Tx}}$  Λi diag(Y'i)i∈K
    end for
    i' ← argmaxi∈K' RKU(i)
    if RKU(i) > RK then K ← K ∪ {i'}
    else exit
    end if
end while
    
```

## 2. Proportional Fairness[16]

사용자 스케줄링은 LTE-A 시스템에서 슬롯 단위로 이루어진다. 이 때 시스템은 주기적으로 피드백 정보를 통해 스케줄링이 이루어진다. Max throughput 기법은 순간적인 데이터 전송률을 고려하여 그 당시에 최대 전송률을 가진 사용자만을 선택한다. 하지만 이 경우 사용자들의 공정성이 고려되지 않는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 개발된 사용자 스케줄링 기법으로 Proportional Fairness 이다.

Proportional Fairness 기법은 사용자들의 공정성을 고려하기 위하여 누적 전송률 대비 순간 전송률의 비율을 이용하여 스케줄링을 수행한다. Proportional Fairness 기법은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k = \operatorname{argmax}_i \left( \frac{R_i(t)}{T_i(t)} \right) \quad (6)$$

누적 전송률  $T_i$ 는 공정성을 고려하기 위해 이전 단계에서 사용자가 선택되었을 경우와 선택되지 않았을 경우를 구분하여 계산된다. i 번째 사용자가 선택되었을 경우  $i^*$ 로 표현하며 현재 계산될 사용자가 이전에 선택되었을 때 누적 전송률에서 현재 전송률을 더한다. 선택되지 않았을 경우에는 누적 전송률만을 계산하여 선택된 사용자와 선택되지 않은 사용자 사이의 공정성을 고려한다. 누적 전송률  $T_i$ 는 다음과 같이 표현한다.

$$T_i(t+1) = \begin{cases} (1 - \frac{1}{\tau})T_i(t) + \frac{1}{\tau}R_i(t), & i = i^* \\ (1 - \frac{1}{\tau})T_i(t) & , i \neq i^* \end{cases} \quad (7)$$

## VI. 주파수 효율 향상을 위한 사용자 스케줄링 기법 제안

사용자 스케줄링은 사용자들의 QoS를 보장함과 동시에 시스템 용량을 최대화해야 한다. 하지만 Max throughput은 시스템 용량은 높을 수 있으나 공정성을 고려하지 않기 때문

에 QoS를 보장할 수 없다. 반면에 Proportional Fairness 기법은 사용자들의 공정성을 고려하여 QoS는 보장할 수 있으나, Max throughput에 비해 성능이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 Max throughput 보다 주파수 효율과 사용자 간의 공정성을 증가시킬 수 있는 알고리즘을 제안한다.

제안하는 사용자 스케줄링 기법은 Max throughput 기법을 기반으로 Max throughput 기법을 통해 사용자를 할당 한 후에 사용자를 추가로 할당하는 방식이다. Max throughput 과정은 3.1절에서 언급한 바와 동일하게 진행한다. 제안하는 기법은 Max throughput을 통해 사용자를 할당 한 후 최대 사용가능한 자원에서 할당된 사용자들의 자원을 제거한 여유 자원을 계산한다. 그리고 할당되지 않은 각 사용자들과 할당된 사용자들 사이 SINR을 계산하고 그 중 최대 SINR을 가진 사용자의 자원과 여유 자원을 비교하여 여유 자원이 더 크다면 해당 사용자들 추가 할당한다.

제안하는 기법은 Max throughput 기법에서 할당된 사용자와 추가 할당된 사용자 사이 최대 SINR을 가지는 사용자를 추가 할당하기 때문에 간섭을 최소화하며 주파수 효율을 증가시킬 수 있다. 또한 기존 기법에 비해 할당되는 사용자가 증가하기 때문에 공정성 또한 증가한다.

[그림 2]와 같이 제안하는 알고리즘은 Max throughput과 동일한 과정을 거친 후 할당된 사용자가 1명일 경우 할당되지 않은 각 사용자들의 SINR을 계산하고 그 중 최대값을 가

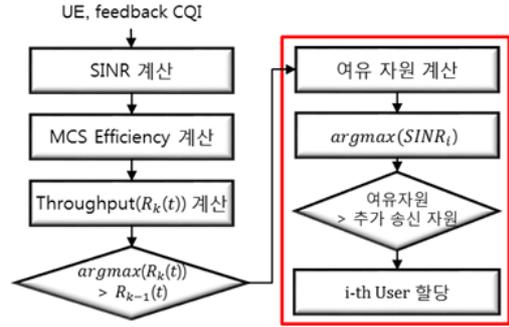


그림 2. 제안하는 스케줄링 기법 흐름도

지는 사용자를 선택한다. 그리고 여유 자원을 계산한다. 이때 최대 사용 가능한 자원은 최대 CQI인 15번 CQI의 MCS 레벨의 변조 방식에 따른 심볼 당 비트 수와 채널 코딩률, RB의 대역폭 및 slot의 단위 시간을 곱하여 계산한다. 사용자의 자원은 동일하게 사용자에게 맵핑된 CQI에 따라 계산된다. 계산된 사용 가능 자원에서 할당된 사용자의 자원을 뺀 여유 자원이 최대 SINR을 가진 사용자의 자원보다 클 경우 추가로 해당 사용자를 할당한다.

## IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

모든 결과는 안테나 배열을 제외한 동일 환경에서 시뮬레이션을 진행하였으며, 각 RB당 선택된 사용자는 CQI에 의해 MCS 레벨이 결정되고 LTE 송신 과정에 따라 데이터를 송신한다. 시뮬레이션 파라미터는 [표 3]에 정리하였다. 송신 주파수는 2.1 GHz이며 대역폭은 10 MHz로 설정하였다. 3D 채널 시나리오는 3D-UMa 환경에서 진행하였으며 안테나 구성은 UPA에서 2x4, 4x4, 4x8, 8x8 총 4가지 경우에서 시뮬레이션을 진행했다. 안테나 간격은  $0.5\lambda$ 이며 추정된 채널은

표 2. 제안하는 스케줄링 기법 알고리즘

Algorithm 2 Proposed scheme	
while	$[K] \leq M$ do
	$K' \leftarrow \{i \in \{1, \dots, K\}\}$
	for $i \in K'$ do
	$G_i \leftarrow [G_{i,K}^T, g_i]^T$
	$P_i = G_i^H (G_i G_i^H)^{-1}$
	$\Lambda_i = \text{diag} \left( \frac{P_{Tx}}{\ P'_i e_i\ _2^2} \right)$
	$\Gamma_i = \frac{M}{P_{Tx}} \Lambda_i \text{diag}(\gamma^i)_{i \in K}$
	end for
	$i' \leftarrow \text{argmax}_{i \in K'} R_{KU(i)}$
	if $R_{KU(i')} > R_K$ then $K \leftarrow K \cup \{i'\}$
	else exit
	end if
	end while
if	size(K) == 1
	for $k \in K'$ do
	$G_k \leftarrow [G_{k,K}^T, g_k]^T$
	$P_k = G_k^H (G_k G_k^H)^{-1}$
	$\Lambda_k = \text{diag} \left( \frac{P_{Tx}}{\ P'_k e_k\ _2^2} \right)$
	$\Gamma_k = \frac{M}{P_{Tx}} \Lambda_k \text{diag}(\gamma^k)_{k \in K}$
	end for
	$k' \leftarrow \text{argmax}_{i \in K'} R_{KU(i)}$
	$r_{\text{total}} = M_{15} \times C_{15} \times B \times T$
	$r_{k'} = M_{k'} \times C_{k'} \times C_{k'} \times B \times T$
	$R_{\text{spare}} = r_{\text{total}} - r_{k'}$
	if $R_{\text{spare}} > r_{k'}$
	$K \leftarrow K \cup \{k'\}$
	end if
	end if

표 3. 시뮬레이션 파라미터

Parameter	Values
Carrier frequency	2.1 GHz
Bandwidth	10 MHz
3GPP scenario	3D-UMa (ISD:500m)
BS antenna height	25 m
Antenna configuration	UPA (2x4, 4x4, 4x8, 8x8)
Antenna element spacing	Horizontal: $0.5\lambda$ Vertical: $0.5\lambda$
Channel estimation	Perfect
Codebook	KPC by dual DFT codebook
User scheduler	Max throughput Proportional Fairness Proposed scheme
UE distribution	random
Feedback information	CQI, PMI

완벽히 알고 있는 것을 가정한다. 프리코딩을 위한 코드북은 3D 빔포밍을 위해 DFT 기반의 KPC를 사용했으며, 사용자 분포는 랜덤하게 분포시켰다. 사용자 스케줄링 기법은 Max throughput, Proportional Fairness와 제안하는 기법을 비교하였다.

다음 [그림 3]은 셀 내 8개 사용자가 존재할 때 안테나 수를 증가함에 따라 시뮬레이션 주파수 효율을 도출한 결과이다. 안테나 개수가 8개 상황에서 Max throughput의 주파수 효율은 4.083 bps/Hz, 제안하는 기법의 주파수 효율은 4.239 bps/Hz로 결과가 나타났다. 16개 송신 안테나 환경의 경우 각각 4.946 bps/Hz, 5.024 bps/Hz 그리고 32개 안테나 환경에서는 5.221 bps/Hz, 5.592 bps/Hz로 나타났으며, Proportional Fairness는 모든 상황에서 가장 낮은 주파수 효율을 보였다. 송신 안테나 개수가 8개, 16개인 상황에서 주파수 효율이 Max throughput 대비 약 3.817 %, 1.582 % 증가하는 결과를 보였으며 안테나 개수가 32개일 경우 주파수 효율이 7.108 % 증가하는 결과가 나타났다.

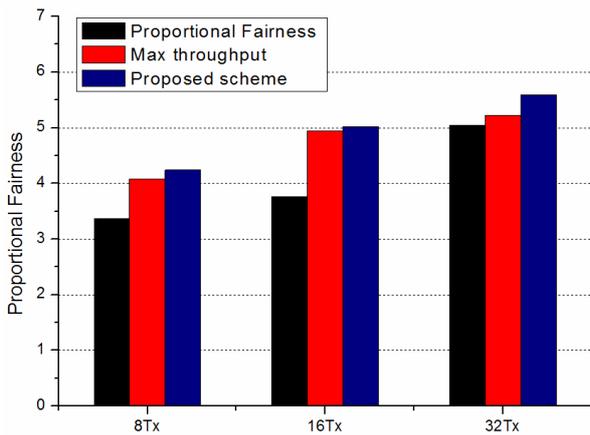


그림 3. 8명 사용자 환경에서의 주파수 효율

[그림 4]는 위와 동일한 시뮬레이션 환경에서 셀 내 사용자의 수가 16명인 상황과 안테나 개수가 최대 64개일 경우의 시뮬레이션 결과이다. 송신 안테나가 16개, 32개, 64개인 각 상황에서 Max throughput은 각각 5.239 bps/Hz, 6.486 bps/Hz, 7.835 bps/Hz의 주파수 효율을 보였으며, 제안하는 기법은 5.453 bps/Hz, 6.906 bps/Hz, 8.297 bps/Hz의 주파수 효율을 나타냈다. 각 상황에서 Max throughput 대비 제안하는 기법의 주파수 효율이 4.092 %, 6.478 %, 4.737 % 증가했다.

[그림 5]와 [그림 6]은 상기 결과와 동일한 환경이지만 32개 송신 안테나와 64개 송신 안테나로 송신 안테나를 고정하고 각 상황에서 사용자 수를 증가시키기에 따라 공정성을 도출했다. 사용자 수는 8명부터 2배씩 증가시켜 최대 32명 사용자까지 증가시켜 결과를 도출했다.

[그림 5]에서 8명의 사용자가 존재할 경우 Max throughput과 제안하는 기법의 공정성은 각각 0.476과 0.558로 나타났으며 16명 사용자 환경에서는 0.378, 0.404로 결과

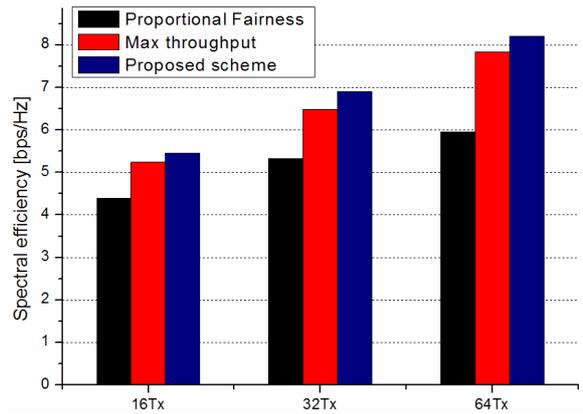


그림 4. 16명 사용자 환경에서의 주파수 효율

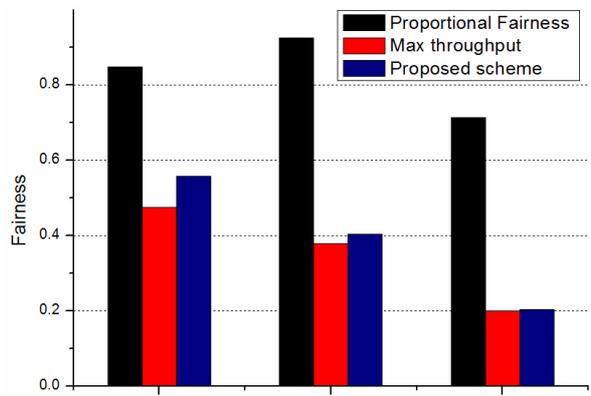


그림 5. 32개 송신 안테나 환경에서의 공정성

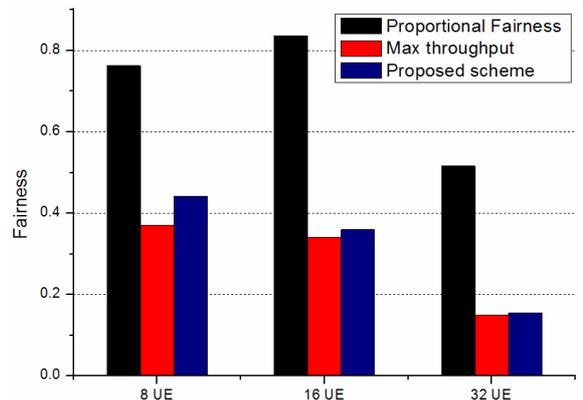


그림 6. 64개 송신 안테나 환경에서의 공정성

가 도출되었다. 32명의 사용자가 존재하는 환경에서는 공정성이 유사하게 나타났으며, 각각 0.200과 0.203로 도출되었다.

[그림 6]은 송신 안테나 수를 64개로 고정된 후에 그림 4.3과 동일한 환경에서 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 4.3과 유사한 경향을 보였으나 대체적으로 그림 4.3에 비해 공정성이 하락하는 현상을 보였다. 사용자가 8명일 때 각 알고리즘의 공정성 결과는 0.370과 0.442로 나타났으며, 16명의 사용자가 존재할 때 0.341, 0.360의 공정성이 도출되었다. 32명 사용자가 존재하는 환경에서는 0.150, 0.156의 공정성이 도출되

표 4. 사용자 스케줄링 기법의 플롭 수

	Computational complexity (flops)
Max throughput	$M \cdot \left\{ K + \frac{M^2}{2} + \frac{13}{2}M - 2 \right\}$
Proposed scheme	$2M \cdot \left\{ K + \frac{M^2}{2} + \frac{13}{2}M - 2 \right\} + K$

었다.

제안하는 기법이 Max throughput에 비해 주파수 효율과 공정성 모두에서 향상된 성능을 보였으나 기존 기법에 추가된 과정에 의해 복잡도가 증가했다. 이를 수치적으로 비교하기 위해 [17]에 기반하여 각 알고리즘의 플롭을 계산하였다. 플롭 계산 결과 Max throughput에 비해 제안하는 기법이 약 2배 많은 플롭을 가졌으며 실제 시뮬레이션 수행 시간 또한 측정했으며, 측정 결과 Max throughput의 수행 시간은 약 1.13 초 경과했으며 제안하는 기법의 시뮬레이션 수행 시간은 약 1.18초로 측정되었다.

## V. 결론

본 논문은 5G 목표 중 주파수 효율의 향상을 위해 FD-MIMO 환경에서 Max throughput 기반의 사용자 스케줄링 기법을 제안하고 기존의 Max throughput과 Proportional Fairness 기법과 성능을 비교 및 분석하였다.

사용자 수 대비 송신 안테나 수에 대한 주파수 효율을 도출하였으며 사용자 수 변경에 따른 변화를 파악하기 위해 사용자 수와 송신 안테나 수를 증가시켜 결과를 도출했다. 시뮬레이션 결과 모든 상황에서 제안하는 기법의 주파수 효율이 증가하는 경향을 보였다. 8명의 사용자가 존재하는 상황에서 주파수 효율 시뮬레이션 결과에서 32개의 송신 안테나를 사용하는 경우 주파수 효율이 7.108% 증가했다. 사용자의 수가 16명인 상황은 사용자의 수가 8명인 상황에 비해 비교적 주파수 효율이 높은 결과를 보였다. 송신 안테나 수가 16개일 경우 주파수 효율이 약 4%의 증가폭을 보였으며 32개 송신안테나를 사용할 경우 Max throughput에 비해 6.478% 증가했다. 송신 안테나가 64개인 경우는 약 4.7%의 증가폭을 보여 사용자 수가 8명일 경우와 16명일 경우 모두 32개 안테나에서 주파수 효율이 최대로 증가했다.

공정성은 송신 안테나를 고정하고 사용자의 수를 증가함에 따른 결과를 도출했다. Proportional Fairness 기법의 결과가 세 가지 스케줄링 기법 중 가장 양호한 결과를 보였으며, 모든 상황에서 제안하는 기법이 기존 Max throughput에 비해 공정성이 상승했다. 32개 송신 안테나를 사용하는 경우 Max throughput 대비 제안하는 기법의 공정성이 최대 17.22% 증가했으며 64개 송신 안테나를 사용하는 경우 최대 19.45% 증가했다. 하지만 사용자 수가 증가할수록 Max

throughput와 제안하는 기법의 공정성이 유사해지는 경향을 보였다. 이는 사용자의 수가 많아질수록 사용자 간 간섭이 증가하기 때문인 것으로 고려된다. 또한 Max throughput과 제안하는 기법 두 알고리즘의 복잡도를 비교했을 시 최대 플롭 수는 2배의 차이를 보였다.

본 논문이 5G 이동통신 기술의 시스템 성능 향상을 위한 연구의 참고자료로서 활용되며, 현재도 진행 중인 표준화 작업에 대해 일부 도움이 되기를 기대한다.

## 참고 문헌

- [1] Mansoor Shafi, Andreas F. Molisch, Peter J. Smith, Peiyong Zhu, Peiyong Zhu, Prasan De Silva, Fredrik Tufvesson, Anass Benjebbour and Gerhard Wunder, "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.35, no.6, June, 2017.
- [2] 김경미, "제 23차 ITU-R WP 5D 회의," TTA Journal Vol.164, pp.101-103, August, 2016.
- [3] 김문홍, 박종한, 나민수, 조성호, "5G 이동통신기술 발전방향," 한국통신학회, 2015.
- [4] 5G Forum, "5G White Paper : 5G Vision, Requirements, and Enabling Technologies," April, 2015.
- [5] Seungmo Kim, Eugene Visotsky, Prakash Moorut, Kamil Bechta, Amitava Ghosh, Carl Dietrich, "Coexistence of 5G With the Incumbents in the 28 and 70 GHz Bands," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.35, no.6, pp.1254-1268, April, 2017.
- [6] Y.-H. Nam, M. S. Rahman, Y. Li, G. Xu, E. Onggosanusi, J. Zhang, and J.-Y. Seol, "Full dimension mimo for lte-advanced and 5G," 2015 Information Theory and Applications Workshop (ITA), 2015.
- [7] H. Ji, Y. Kim, J. Lee, E. Onggosanusi, Y. Nam, J. Zhang, B. Lee, and B. Shim, "Overview of full-dimension MIMO in LTE-advanced pro," IEEE Communications Magazine, vol.55, no.2, pp.176-184, October, 2017.
- [8] Yin Long, Zhi Chen, Jun Fang, "Nonasymptotic Analysis of Capacity in Massive MIMO Systems," IEEE Wireless Communications Letters, vol.4, no.5, July, 2015.
- [9] 3GPP TR 36.873 V2.1.0, "3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network, Study on 3D channel model for LTE (Release 12)," 2014.
- [10] 안재영, 송평중, "3GPP 기반 5G 이동통신 기술 발전 전망," 한국통신학회지(정보와통신), vol.30, no.12, pp.37-50, December, 2013
- [11] 방승관, "5G 통신기술," 한국통신학회지(정보와통신), vol.32, no.5, pp.73-86, May, 2015.
- [12] ETSI TS 136 211, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation," Technical Specification Version 13.0.0,

February, 2016.

- [13] Dawei Ying, Frederick W. Vook, Timothy A. Thomas, David J. Love, Amitava Ghosh, "Kronecker product correlation model and limited feedback codebook design in a 3D channel model," Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference on, June, 2014.
- [14] Y. Wang, L. Jiang, and Y. Chen, "Kronecker product-based codebook design and optimisation for correlated 3D channels," Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2014.
- [15] Na Chen, Scott Jordan, "Downlink scheduling with guarantees on the probability of short-term throughput," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.8, no.2, pp.593-598, February, 2009.
- [16] Raymond Kwan, Cyril Leung, Jie Zhang, "Proportional Fair Multiuser Scheduling in LTE," IEEE Signal Processing Letters, vol.16 no.6, April, 2009.
- [17] Raphael Hunger, "Floating point operations in matrix-vector calculus," Munich: Munich University of Technology, Inst. for Circuit Theory and Signal Processing, Version 1.3, 2007

## 저자

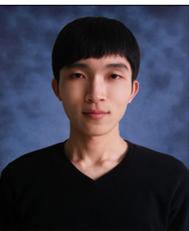
### 김 영 재(Young-Jae Kim)



- 2015년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 공학사
- 2015년 3월~현재 : 충북대학교 전파통신공학과 석사과정

<관심분야> : FD-MIMO, 5G 이동통신

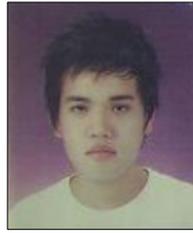
### 주 상 임(Sang-Lim Ju)



- 2014년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 공학사
- 2016년 2월 : 충북대학교 전파공학과 공학석사
- 2016년 3월~현재 : 충북대학교 전파공학과 박사과정

<관심분야> : 디지털라디오, 가시광 통신, Massive MIMO

### 정 원 호(Won-Ho Jeong)



- 2013년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 석사
- 2013년 3월~현재 : 충북대학교 전파통신공학과 박사과정

<관심분야> : 전파전파, MIMO 무선 채널, 채널 모델, 위성통신, 무선 통신 암호화 알고리즘

### 김 경 석(Kyungseok Kim)



- 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
- 1999년 1월 ~ 2002년 3월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임연구원

- 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 충북대학교 생체정보공학부 전임강사
- 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 부교수

<관심분야> 5G Massive-MIMO, 전파채널모델링, 위성보안망분석, Cognitive Radio, 전력선통신, 가시광통신, 디지털라디오, 전파감시/관리시스템