

# 다중 사용자 MIMO 시스템의 사용자 스케줄링을 위한 동적 피드백 선택 기법

김이천\*, 강충구<sup>o</sup>

## Dynamic Feedback Selection Scheme for User Scheduling in Multi-user MIMO Systems

I-cheon Kim\*, Chung G. Kang<sup>o</sup>

요 약

본 논문은 다중 사용자 MIMO 시스템에서 사용자 선택을 위해 필요한 precoding matrix index (PMI)/channel quality indication (CQI)의 보고 방식에 따른 성능을 분석한다. 이러한 분석을 통해 셀 내의 단말의 수, 선택되는 사용자의 수, 그리고 코드북(codebook)의 크기가 Best Companion Grouping (BCG) 방식 스케줄링의 성능에 복잡하게 영향을 미치는 것을 확인한다. 이에 따라 셀 내의 사용자 수와 코드북의 크기에 따라 동시에 스케줄링 되는 사용자들의 그룹이 형성될 수 있는 확률이 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 피드백 오버헤드가 주어졌을 때 이에 따라 피드백하는 PMI의 수와 사용하는 코드북의 크기를 적응적으로 선택함으로써 시스템의 평균 수율 성능을 최적화할 수 있음을 보였다.

**Key Words** : Multi-user Multi-Input Multi-Output (MU-MIMO), closed-loop MIMO, user scheduling, precoding matrix index (PMI), channel quality indication (CQI), dynamic feedback selection (DFS)

ABSTRACT

In this paper, the system-level performance is evaluated for the feedback scheme on the pre-coding matrix index (PMI) and channel quality indication (CQI), which are required for user selection in the multi-user MIMO system. Our analysis demonstrates that the number of users, the number of selected users, and codebook size are the key factors that govern the performance of the best companion grouping (BCG)-based user scheduling. Accordingly, we have confirmed that the probability of forming the co-scheduled user group is determined by these factors, which implies that the number of PMI's and codebook size can be dynamically determined so as to maximize the average system throughput as the number of users varies in the cell.

### I. 서 론

3GPP LTE-A 시스템에서는 기지국에서의 송신 안테나 수가 증가하면서 동일한 자원으로 다수의 사용

자를 동시에 지원할 수 있는 다중 사용자(multi-user MIMO: MU-MIMO) 기술을 통해 무선 대역의 효율성을 증대하고자 한다<sup>[1,2]</sup>. 이때 주파수 분할 다중화(Frequency Division Duplexing: FDD) 방식으로 동

\* 본 연구는 미래창조과학부 '범부처 Giga KOREA 사업'의 일환으로 수행하였음[GK13N0100, 밀리미터파 5G 이동통신 시스템 개발]

• First Author : 고려대학교 전기전자전파공학과 무선정보시스템공학 연구실, hello828@korea.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : 고려대학교 전기전자전파공학과 무선정보시스템공학 연구실, ccgkang@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-03-061, Received March 23, 2015; Revised April 21, 2015; Accepted April 21, 2015

작할 경우에, 다중 사용자에 대해서 빔포밍 (beamforming)을 지원하면서 사용자간의 간섭(inter-user interference: IUI)을 효율적으로 회피하기 위해서는 하향 링크의 채널 상태 정보(channel quality indication: CQI)가 요구된다. 하지만 현재 3GPP LTE/LTE-A 규격에서는 기지국이 선택할 precoding matrix에 대한 정보(precoding matrix index: PMI)를 각 단말이 피드백하는 페루프 방식이 규격화되어 있지만, 다수의 사용자를 선택하는 MU-MIMO 방식에 적합한 피드백 방식은 아직 지원되지 않고 있고<sup>[2],[3]</sup>, 제한된 피드백 오버헤드에 따른 여러 방식들이 제안되고 있다<sup>[4-7]</sup>.

모든 사용자에 대해서 채널 정보를 알 수 있다면 사용자의 간섭(inter-user interference: IUI)을 완벽하게 제거할 수 있다. 하지만, 제한적인 PMI/CQI 정보를 이용하는 MU-MIMO 방식에서는 IUI를 최소화하는 것만이 가능하다. [8]-[10]에서 제시하는 Best Companion Pairing (BCP) 방식은 2명의 사용자를 선택하는 방식이며, 본 논문에서는  $K$ 명의 사용자를 선택하는 Best Companion Grouping (BCG) 방식으로 일반화 시키고자 한다( $K \geq 2$ ). 이와 같은 일반화에 대한 성능 분석을 통해, 셀 내의 단말의 수, 선택되는 사용자의 수, 그리고 코드북의 크기가 복합적으로 셀 평균 수율에 미치는 것을 확인하고자 한다. 그리고, 피드백 오버헤드가 고정되어 있을 때, 이러한 성능 분석의 결과에 따라 시스템의 평균 수율을 극대화할 수 있는 시스템 구조에 대해서 살펴본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 제시한다. III절에서는 피드백 정보와 그에 따른 사용자 선택 방식에 대해서 설명하고, 시뮬레이션을 통해 그 성능을 분석한다. IV절에서는 III절의 피드백 방식을 이용한 동적 피드백 선택 방식을 제안하고, 이를 통해 얻을 수 있는 성능 이득을 비교한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 각 단말이 피드백한 정보를 이용하여 기지국에서 동일한 자원으로 동시에 전송할 수 있

는 다수의 사용자들을 선택하는 페루프 방식의 MU-MIMO 시스템을 고려한다.  $i$ 번째 단말의 MIMO 채널 행렬과 단말에서 선택된 precoding 행렬을 각각  $\mathbf{H}_i$ 와  $\mathbf{P}_i$ 로 나타내자. 송신 안테나와 수신 안테나의 수를 각각  $N_t$ 와  $N_r$ 이라고 하자. 그리고 rank adaptation에 의해 결정된 전송 계층(layer)의 수를  $N_L$ 이라고 하자. 따라서,  $\mathbf{H}_i$ 와  $\mathbf{P}_i$ 는 각각  $N_r \times N_t$ 와  $N_t \times N_L$  행렬이다.  $N_L \times 1$ 의 송신 신호 벡터  $\mathbf{x}_i$ 가 주어졌을 때 MU-MIMO를 위해  $K$ 명의 사용자가 선택된다고 하면,  $i$ 번째 단말의 수신 신호 벡터  $\mathbf{y}_i$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{x}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_j \mathbf{P}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{n} \quad (1)$$

여기서  $\vec{n}$ 은  $\sigma_N \mathbf{I}$ 의 covariance matrix를 갖는 가우시안 잡음 벡터이다. MMSE 수신기를 사용한다고 가정하면 전처리 행렬  $\mathbf{F}_i$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{P}_i^H \mathbf{H}_i^H (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{P}_i^H \mathbf{H}_i^H + \sigma_N \mathbf{I})^{-1} \quad (2)$$

수신단에서  $i$ 번째 계층의 신호대 간섭비는 식 (3)과 같이 주어진다. (3)에서  $\mathbf{D}_i$ 는 전송 데이터 stream의 행렬로서  $\mathbf{D}_i = \text{diag}[\mathbf{F}_i \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i]$ 이다.  $\mathbf{I}_s$ 는  $i$ 번째 단말에서 다른 stream이 야기하는 간섭으로서  $\mathbf{I}_s = \mathbf{F}_i \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i - \mathbf{D}_i$ 이며,  $\mathbf{I}_s^H$ 는 계층간의 간섭에 해당한다. 한편, IUI는  $\sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{F}_j \mathbf{H}_j \mathbf{P}_j \mathbf{P}_j^H \mathbf{H}_j^H \mathbf{F}_i^H$ 로 주어진다.

단말이  $N$ 개의 PMI와  $M$ 개의 CQI 정보를 기지국으로 피드백한다고 했을 때,  $N \geq K$ 이어야 (3)을 통해서  $K$ 명의 사용자를 선택할 수 있다. 즉,  $N < K$ 이면 부족한 PMI 정보 때문에 (3)을 계산할 수 없다. 본 논문의 III절에서는 최소한의 PMI 피드백으로 하나의 SINR 계산이 가능한  $N=K$  및  $M=1$ 의 경우를 가정한다. 한편, IV절에서는 고정된 피드백 오버헤드를 사용할 때 SINR 계산이 가능한  $N \geq K$ 과  $M \geq 1$ 의

$$SINR_i = \frac{\text{diag}[\mathbf{D}_i \mathbf{D}_i^H]_{(n,n)}}{\text{diag}[\mathbf{I}_s^H + \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{F}_j \mathbf{H}_j \mathbf{P}_j \mathbf{P}_j^H \mathbf{H}_j^H \mathbf{F}_i^H + \sigma_N \mathbf{F}_i \mathbf{F}_i^H]_{(n,n)}} \quad (3)$$

$$n = 1, 2, \dots, N_L$$

모든 가능한 조합에 대해서 고려한다.

### III. 다중 사용자 선택 방식과 성능 분석

#### 3.1 피드백 정보와 사용자 선택 방식

$K$ 명의 사용자를 선택하기 위해서 총  $K$ 개의 PMI와 하나의 CQI 값을 피드백하는 방식(즉,  $N=K$  및  $M=1$ )을  $K$ -PMI 피드백 방식이라고 명명하며, 이 방식은 주어진 채널 정보로 기지국에서 하향링크의 전체 수율 성능을 극대화할 수 있도록 사용자를 선택하는 스케줄링을 수행한다. 한편,  $N=M=1$ 의 경우는 1-PMI 피드백 방식으로서, 기지국에서 가장 좋은 CQI를 보고한 단말을 선택하는 특수한 상황에 해당된다. 본 소절에서는  $F$ 개의 precoding matrix 중에서  $j$  번째 행렬을  $\mathbf{P}_j$ 로 나타낸다.

##### 3.1.1 1-PMI 피드백 방식: $N=M=1$

이 방식에서는 기지국에서 최대의 CQI 값을 갖는 사용자를 선택하며, 이 CQI값과 더불어 다음과 같이 CQI 값을 최대로 하는 PMI도 피드백해야 한다.

$$j^* = \operatorname{argmax}_{j \in \{1,2,\dots,F\}} \{|\mathbf{H}_i \mathbf{P}_j|^2\} \quad (4)$$

(4)에서  $i$ 번째 사용자는 하향 링크 채널  $\mathbf{H}_i$ 에서  $F$ 개의 PMI 중에서 가장 좋은 인덱스  $j^*$ 를 선택한다. 이 경우에는 별도의 다른 사용자 채널 정보를 전혀 알 수 없기 때문에 (3)의 분모에서 IUI가 반영되지 않는다.

##### 3.1.2 $K$ -PMI 피드백 방식: $N=K \geq 2, M=1$

기지국은  $K$ 명의 사용자 선택을 위해서는  $K$ 개의 PMI가 필요하고, 각 사용자 입장에서 최대의 CQI를 얻기 위해서는 (4)와 같이 선택한  $j^*$ 와 더불어, (5)와 같이 순차적으로 가장 작은 간섭을 야기하는  $(K-1)$ 개의 PMI가 필요하다. (5)는  $\mathbf{H}_i$ 에 간섭을 가장 작게 야기하는  $\mathbf{P}_{j_1}$ 부터  $(K-1)$ 번째로 간섭을 작게 야기하는  $\mathbf{P}_{j_i}$ 까지를 반영한 것이다.  $i$  번째 단말은  $(K-1)$ 개의 PMI와 (4)의  $j^*$ 를 가지고 식 (6)과 같이 CQI를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} j_1^* &= \operatorname{argmin}_{j \in \{1,2,\dots,F\} \setminus i^*} \{|\mathbf{H}_i \mathbf{P}_j|^2\}, \\ &\vdots \\ j_{K-2}^* &= \operatorname{argmin}_{j \in \{1,2,\dots,F\} \setminus i^*, j_{K-3}^*, \dots, j_1^*} \{|\mathbf{H}_i \mathbf{P}_j|^2\}, \\ j_{K-1}^* &= \operatorname{argmin}_{j \in \{1,2,\dots,F\} \setminus i^*, j_{K-3}^*, \dots, j_1^*} \{|\mathbf{H}_i \mathbf{P}_j|^2\} \end{aligned} \quad (5)$$

각 사용자가 피드백한  $K$ 개의 PMI를 가지고 기지국에서는 가장 좋은 SINR값을 갖는  $K$ 명의 사용자를 선택하게 된다. 이를 위해서는 피드백된 PMI 집합이 동시에 일치하는  $K$ 명의 사용자 그룹이 존재해야 하며, 이를 통해서 Best Companion Group (BCG)을 결정해야 한다. 즉, 기지국의 스케줄러는 각 사용자가 피드백한  $K$ 개의 PMI 정보를 이용하여 BCG를 결정하는 것이다. 그러나 각 사용자가 독립적으로 PMI 정보를 보고하기 때문에 BCG가 형성되지 않을 수 있으며, 이 경우에는 어떤 사용자도 선택될 수 없다. 따라서, BCG의 존재 여부에 따라 성능이 결정되며, 이는 셀 내의 사용자 수, 피드백한 PMI의 수( $K$ ), 그리고 코드북의 크기( $F$ )에 따라 달라지게 된다. 셀 내의 사용자 수가  $L$ 로 주어지고, 각 PMI가 동일한 확률로 선택된다고 가정하자. 이때 가능한 Companion Group (CG) 수의 평균  $\bar{N}_{CG}$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{N}_{CG} = \binom{L}{K} \times P_{CG} \quad (7)$$

(7)에서  $P_{CG}$ 는 가능한 PMI의 선택 조합이 CG가 될 확률로서 다음과 같이 주어진다.

$$P_{CG} = \frac{\{(K-1)!\}^K}{\left\{ \prod_{i=1}^K (F-i+1) \right\}^{K-1}} \quad (8)$$

즉,  $\bar{N}_{CG}$ 이 증가하면 평균 수율이 향상되며, 따라서 시스템의 성능은 결국  $L, K, F$ 에 의해 결정된다.

### 3.2 성능분석

#### 3.1소절에서 제시한 피드백 정보와 사용자 선택 방

$$CQI_i = \frac{\operatorname{diag}[\mathbf{D}_i \mathbf{D}_i^H]_{(n,n)}}{\operatorname{diag}[\mathbf{I}_s \mathbf{I}_s^H + \sum_{j=j_1}^{j_{K-1}} \mathbf{F}_i \mathbf{H}_i \mathbf{P}_j \mathbf{P}_j^H \mathbf{H}_i^H \mathbf{F}_i^H + \sigma_N^2 \mathbf{F}_i \mathbf{F}_i^H]_{(n,n)}} \quad (6)$$

식에 대해서 시뮬레이션을 통해 성능 분석을 수행한다. 이때 셀 내의 사용자 수와 피드백되는 PMI의 수, 그리고 코드북 크기가 성능에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 이를 위해 Urban Macro-cell (UMa) 환경 채널 모델을 적용하며, wideband SINR의 평균값을 고려하여 SNR을 4dB로 고정한다<sup>[11]</sup>. 송수신 안테나는 각각 4개와 2개를 가정한다(즉,  $N_t = 4$  및  $N_r = 2$ ). 그리고, 3가지 다른 크기의 코드북을 고려한다. 코드북 크기가 16인 경우는 3GPP LTE 규격을 따르고<sup>[3]</sup>, 이는  $N_t = 4$ 일 때 Householder matrix에 의해 생성된다<sup>[12]</sup>. 한편, 코드북 크기가 8과 4인 경우에는 Discrete Fourier Transform (DFT)기반의 코드북을 가정한다<sup>[13]</sup>. 본 시뮬레이션 적용된 시나리오와 가정을 요약하면 표 1과 같다.

그림 1, 2, 3은 코드북의 크기가 각각  $F = 16, 8, 4$ 일 때,  $L$ 이 증가하면서  $K$ 값에 따른 평균 수율을 나타낸다. (7)식에 의해  $L$ 이 증가하면 CG가 존재할 가능성이 높아져서 수율이 증가하게 된다. 한편, 그림 1에서 보는 바와 같이  $F = 16$ 일 때,  $K$ 값이 증가하면 수율이 급격하게 감소한다. 이는  $K$ 가 증가하면서 (8)에 의해 CG가 형성될 확률이 매우 낮아지기 때문이다. 한편, 사용자 수가 충분히 많을 경우에는  $K = 2$ 에 대해서는 CG가 존재할 확률이 커져서 다중 사용자 이득에 의해  $K = 1$ 의 경우보다 성능이 좋아진다. 한편, 코드북의 크기가 작을 경우에, 셀 내의 사용자 수가 충분히 크면 서로 다른 빔에 있는 사용자들을 선택할 수 있는 가능성이 높아져서 CG가 형성될 확률이 높아진다. 따라서, 단말 내의 사용자 수가 충분히 많

표 1. 시뮬레이션 시나리오  
Table 1. Simulation Scenario

Parameter	Assumption
Signal-to-Noise Ratio (SNR)	4dB
The number of antennas	$N_t = 4, N_r = 2$
Precoding	4Tx LTE codebook: Rank=1, $F = 16$
	4Tx LTE codebook: Rank=1, $F = 8$
	4Tx LTE codebook: Rank=1, $F = 4$
Receiver algorithm	MMSE
Traffic model	Full buffer
User selection scheduling	Best Companion Grouping (BCG)

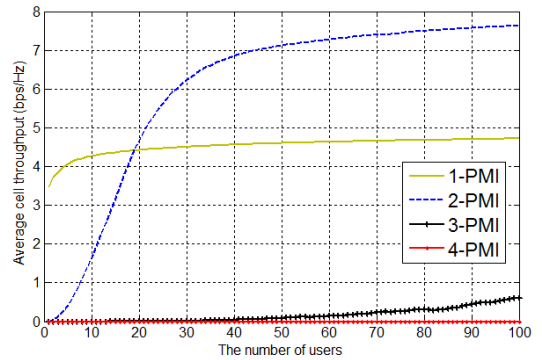


그림 1. 단말 수에 따른 셀 평균 수율:  $F = 16$   
Fig. 1. Cell average throughput per the number of users:  $F = 16$

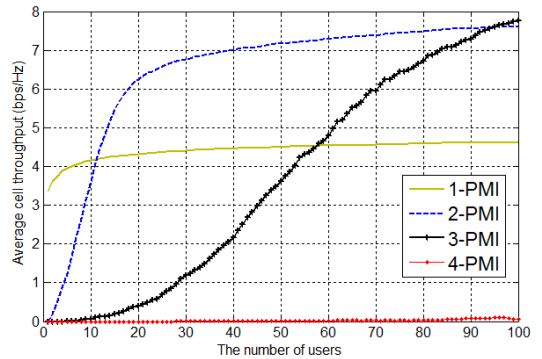


그림 2. 단말 수에 따른 셀 평균 수율:  $F = 8$   
Fig. 2. Cell average throughput per the number of users:  $F = 8$

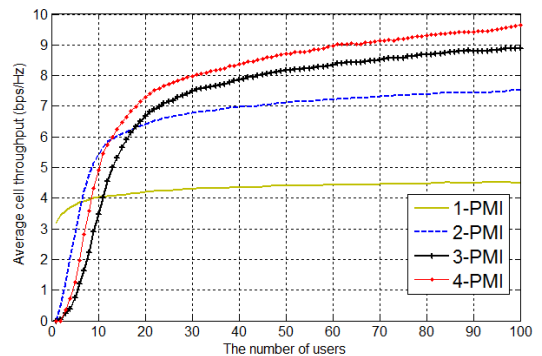


그림 3. 단말 수에 따른 셀 평균 수율:  $F = 4$   
Fig. 3. Cell average throughput per the number of users:  $F = 4$

을 때,  $F$ 가 작아질수록  $K$ 값에 따른 이득이 보이기 시작한다. 그림 3에서 보는 바와 같이  $F = 4$ 일 때는  $K = 4$ 일 때,  $F = 16$ 의 어떤 경우보다도 항상 성능이 더

향상되는 것을 알 수 있다. 즉, PMI 피드백 오버헤드가 제한된 상황에서는 코드북 크기를 늘려 단말의 SINR을 크게 하는 것보다는 코드북 크기를 줄여서 CG가 형성될 확률을 높이는 것이 성능 향상에 더 큰 요인이 될 것이라는 것을 알 수 있다. 즉, 셀 내의 사용자 수에 따라 최적의  $K$ 와  $F$  값이 존재할 수 있다.

#### IV. 다중 사용자 선택 방식과 성능 분석

III절에서 셀 평균 수율을 위한 최적의  $L, K, F$  값이 주어지는 것을 확인하였다. 본 절에서는 실제 시스템 구현 관점에서 볼 때 제한된 피드백 오버헤드로 실현할 수 있는 최적의 성능을 살펴본다. 즉,  $Q$  비트의 피드백 오버헤드가 주어졌을 때  $N, M$ , 그리고  $F$  값에 따라 다양한 형태의 피드백이 이루어 수 있다. 예를 들어,  $F = 16$ 일 때 1개의 PMI를 나타내기 위해 4개 비트가 사용되므로,  $Q = 8$ 로 1개의 PMI와 하나의 CQI를 전송할 수 있다(즉,  $(N, M, F) = (1, 1, 16)$ ). 한편,  $F = 8$ 일 경우에는 1개의 PMI를 나타내기 위해 3개 비트가 사용되므로,  $Q = 8$ 로 2개의 PMI와 1개의 CQI를 전송할 수 있다(즉,  $(N, M, F) = (2, 1, 8)$ ). 따라서, 8개 비트의 피드백 오버헤드를 가지고 구현될 수 있는 조합은  $(N, M, F) = (1, 1, 16)$ 와  $(N, M, F) = (2, 1, 8)$ 이며, 그림 1과 2에서 보는 바와 같이 각 경우에서 사용자의 수에 따라 성능이 달라진다. 따라서, 피드백 오버헤드가 고정되어 있을 때 다양한 조합의 피드백 구조가 존재하며, 셀 내의 사용자 수에 따라 평균 수율이 최대가 되는 방식을 선택적으로 적용할 수 있다. 이와 같이 시스템의 상황에 따라 피드백 구조를 동적으로 선택하는 방식을 동적 피드백 선택(dynamic feedback selection: DFS)이라고 하자. 표 2는  $N \geq K$ 과  $M \geq 1$ 일 때 피드백 오버헤드에 따라 구현 가능한 피드백 구조  $(N, M, F)$ 를 나타낸 것이다.

표 2에서 normal feedback 방식은 기존의 LTE-A 시스템에서 사용되는 1-PMI 방식에 해당한다. 표 2에서  $(N, M, F) = (1, 1, 4)$ 와  $(N, M, F) = (1, 1, 8)$ 은  $L$ 과 상관없이  $(N, M, F) = (1, 1, 16)$ 보다 항상 셀 평균 수율이 낮기 때문에 별도로 고려하지 않는다. 또한 DFS with  $Q = 12$ 의 경우에서도  $(N, M, F) = (2, 1, 4)$ 는  $(N, M, F) = (2, 2, 4)$ 보다 항상 셀 평균 수율이 낮기 때문에 제외한다.  $(N, M, F) = (2, 2, 4)$ 는 단말이 1-PMI 방식의 CQI와 2-PMI 방식의 CQI를 모두 피드백하므로 기지국은 두 가지 방식을 모두 고려하여 스케줄링할 수 있다.

기지국은  $L$  값에 따라 최대의 성능을 내는 피드백

표 2. 제한된 피드백 오버헤드에 따른 피드백 방식  
Table 2. Dynamic feedback selection (DFS) per limited feedback overhead

Feedback scheme with Q-bit overhead	$(N, M, F)$
Normal feedback: Q=8 (bits)	(1, 1, 16)
DFS: Q=8 (bits)	(1, 1, 16)
	(2, 1, 4)
DFS: Q=10 (bits)	(1, 1, 16)
	(2, 1, 8)
	(2, 1, 4)
DFS: Q=12 (bits)	(3, 1, 4)
	(1, 1, 16)
	(2, 1, 16)
	(2, 1, 8)
	(2, 2, 4)
	(3, 1, 4)
	(4, 1, 4)

방식을 선택하며, 이렇게 선택된 방식은 필요할 때마다 셀 내의 단말로 방송하여 단말들이 동적으로 피드백 구조를 변경할 수 있도록 할 수 있다. 그림 4는 정해진 피드백 오버헤드에 대해서  $L$  값에 따라 셀 평균 수율을 최대로 하는 피드백 구조를 적용하여 얻을 수 있는 성능을 보여주고 있으며, 이는 각각의 제한된 오버헤드로 실현할 수 있는 최적의 성능에 해당한다. 그림 4에서  $Q = 8$ 은 현재 3GPP LTE-A 규격에서 정한 피드백 오버헤드에 해당하며, 사용자 수가 충분히 크면(예를 들어,  $K > 7$ 이면) 동일한 오버헤드로 MU-MIMO에 의해 용량을 증대할 수 있는 가능성을 보여준 것이다. 한편, 실제 MU-MIMO 환경에서는 셀 내에서 동시에 활성화되는 사용자 수가 아주 크지 않을 것이기 때문에(예를 들어,  $L < 30$ ), 주어진 오버헤

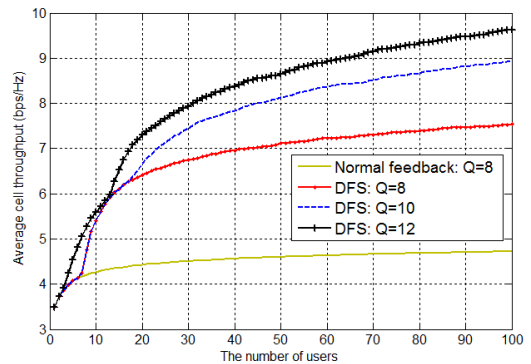


그림 4. 동적 피드백 방식 선택에 따른 셀 평균 수율의 최적화  
Fig. 4. The optimized cell average throughput with dynamic feedback selection (DFS)

드 비트의 수에 따라 DFS 방식이 매우 유효한 것을 알 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 페루프 방식의 다중사용자 MIMO 시스템에서 각 사용자들이 피드백하는 채널 상태 정보로서 사용자와의 간섭을 반영하는 PMI와 자신의 CQI를 이용하여 동시에 전송하는 사용자를 선택하는 방식의 성능을 분석하고, 이에 미치는 시스템 파라미터에 대해서 살펴보았다. 셀 내의 사용자 수와 코드북의 크기에 따라 동시에 스케줄링 되는 사용자들의 그룹이 형성될 수 있는 확률이 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 피드백 오버헤드가 주어졌을 때 이에 따라 피드백하는 PMI의 수와 사용하는 코드북의 크기를 적응적으로 선택함으로써 시스템의 평균 수율 성능을 최적화할 수 있음을 보였다. 향후 연구에서는 주어진 피드백 오버헤드로 PMI의 수와 코드북의 크기를 적응적으로 선택하기 위한 동적 피드백 방식 선택(DFS) 알고리즘에 대한 설계가 필요하다. 또한, 안테나의 수가 매우 많아질 때 3차원 공간 MU-MIMO에 대해서 피드백 방식이 미치는 영향에 대한 시스템 레벨에서의 성능 분석을 수행하고, 이에 대한 최적화 방안에 대한 연구가 필요하다.

### References

[1] Multiplexing and Channel Coding, 3GPP TS 36.212 V8.7.0.  
 [2] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical Layer Procedures 3GPP TS 36.213 v8.7.0.  
 [3] 3GPP TS 36.211, V12.3.0, Rel. 12, Sept. 2014.  
 [4] A. Hottinen and E. Viterbo, "Optimal user pairing in downlink MU-MIMO with transmit precoding," in *6th Int. Symp. Modeling and Optimization in Mob., Ad Hoc, and Wirel. Netw. and Workshops*, pp. 97-99, Apr. 2008.  
 [5] C. Wang and R. D. Murch, "Adaptive downlink multi-user MIMO wireless systems for correlated channels with imperfect CSI," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 5, no. 9, pp. 2435-2446, Sept. 2006.  
 [6] C. Wang and R. D. Murch, "Adaptive

downlink multi-user MIMO wireless systems for correlated channels with imperfect CSI," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 5, no. 9, pp. 2435-2446, Sept. 2006.

[7] B. Haberland, "BL research innovations for future mobile systems(LTE)," in *WTS Conf., Prague*, Apr. 2009.  
 [8] Y. Du and J. Tong, "Evaluation of PMI feedback schemes for MU-MIMO pairing," *IEEE System J.*, vol. 4, no. 4, Dec. 2010.  
 [9] UE PMI Feedback Signalling for User Pairing/Coordination Alcatel-Lucent, R1-083759, R1-084141, R1-090051, R1-090777.  
 [10] Best Companion Reporting for Improved Single-Cell MU-MIMO Pairing Alcatel-Lucent, R1-090926, R1-091307, R1-092031, R1-092546, R1-093333.  
 [11] 3GPP TR 36.873, V12.0.0, Rel. 12, Sept. 2014.  
 [12] J. Wang, M. Wu, and F. Zheng, "The codebook design for MIMO precoding systems in LTE and LTE-A," *Wirel. Commun. Netw. and Mob. Comput.*, Sept. 2010  
 [13] D. Yang, L.-L. Yang, and L. Hanzo, "DFT-based beamforming weight vector codebook design for spatially correlated channels in the unitary precoding aided multiuser downlink," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, 2010.

김 이 천 (I-cheon Kim)



2013년 8월 : 세종대학교 정보통신공학과 졸업  
 2014년 3월~현재 : 고려대학교 전기전자공학과 석사과정  
 <관심분야> MU-MIMO, FD-MIMO, Beamforming,

강 충 구 (Chung G. Kang)



1987년 6월: Univ. of California (San Diego), 전자공학과 학사

1993년 3월: Univ. of California (Irvine), 전자 및 컴퓨터 공학과 박사

1992년 7월~1993년 6월: (미) Aerospace Corp. 연구원

1993년 3월~1994년 2월: (미) Rockwell International 연구원

2000년 9월~2001년 8월: (미) Center for Wireless Communication, UCSD 방문 교수

1994년 3월~현재: 고려대학교 전기전자공학부 교수

2005년 1월~2005년 12월: 한국통신학회 이동통신연구회 위원장

2006년 1월~현재: 한국통신학회 상임이사/학술사업 부회장/학술서비스 부회장

<관심분야> 이동통신 시스템, 무선 네트워크 및 응용 서비스