

논문 2010-47TC-2-6

# 영점 강제 다중 사용자 MIMO 전송 시 셀 간 정보 교환을 활용한 협력적 PF 스케줄러의 성능 평가

(Performance Evaluation of Inter-Sector Collaborative PF Schedulers  
for Multi-User MIMO Transmission Using Zero Forcing)

이지원\*, 성원진\*\*

(Jiwon Lee and Wonjin Sung)

## 요약

다중 사용자 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 협력적 전송을 기반으로 한 협력적 PF (Proportional Fair) 스케줄러를 사용하는 경우 사용자 평균 전송률의 로그 합 성능의 개선이 가능하다. 단일 셀 기반의 기존 PF 알고리즘은 여러 채널 환경에 대하여 그 성능이 평가되어 왔으나 여러 개의 기지국들이 스케줄링에 참여하여 한 프레임 동안 다수의 사용자를 스케줄링하는 알고리즘의 제시 및 성능 평가는 많은 연구가 필요한 상태이다. 본 논문에서는 서로 다른 셀에 속하는 인접한 세 섹터에 위치한 기지국들이 사용자들의 채널 정보를 교환하여 다중 사용자에게 자원을 할당하는 협력적 PF 스케줄러를 분산 다중 사용자 MIMO 시스템에 적용하고 사용자 평균 전송률의 로그 합 성능을 평가한다. 또한 그 성능을 기지국 간의 채널 정보 교환 없이 자원을 할당할 사용자를 각자 선택하는 병렬적 PF 스케줄러와 자원 할당 시 선택할 수 있는 동시 사용자 그룹의 모든 조합을 검색하는 full-search 협력적 PF 스케줄러의 평균 전송률의 로그 합 성능과 비교 분석한다. 본 연구에 적용된 협력적 PF 스케줄러는 하위 사용자 평균 전송률의 로그 합 성능 측면에서 병렬적 PF 스케줄러보다 우수한 성능을 보인다. 또한 모든 조합을 검색함으로써 가장 큰 평균 전송률의 로그 합 성능을 나타내는 full-search 협력적 PF 스케줄러의 성능의 대부분을 달성하면서도 연산 복잡도를 크게 감소시킨다.

## Abstract

Multi-user MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) systems require collaborative PF schedulers to improve the performance of the log sum of average transmission rates. While the performance of single cell based conventional PF schedulers has been evaluated over various channel conditions, scheduling algorithms by multiple base stations which select multiple users over a given time frame and their performance require further investigations. In this paper, we apply a collaborative PF scheduler to the distributed multi-user MIMO system, which assigns radio resources to multiple users by exchanging user channel information from base stations located in three adjacent sectors. We further evaluate its performance in terms of the log sum of average transmission rates. The performance is compared to that of the full-search collaborative PF scheduler which searches over all possible combinations of user groups, and that of a parallel PF scheduler that determines users without channel information exchange among base stations. We show the log sum of average transmission rates of the collaborative PF scheduler outperforms that of the parallel PF scheduler in low percentile region. In addition, the collaborative PF scheduler exhibits a negligible performance degradation when compared to the full-search collaborative PF scheduler while a significant reduction of the computational complexity is achievable at the same time.

**Keywords :** Proportional fairness, 스케줄링, Multi-user MIMO, 분산 안테나 시스템, 협력적 전송

## I. 서론

\* 학생회원, \*\* 평생회원, 서강대학교 전자공학과  
(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

접수일자: 2009년10월29일, 수정완료일: 2010년2월17일

시스템의 효율성과 평등성 간의 trade-off를 위하여

스케줄러의 성능을 concave 형태의 목적 함수 관점에서 최대화하는 방식이 많이 연구되었으며<sup>[1]</sup> 이를 위해 기존에 사용되어온 PF 알고리즘은 로그 형태의 목적 함수를 최대화하는 알고리즘임이 증명되었다<sup>[2]</sup>. 기존 PF 알고리즘에 대한 성능 연구는 다양한 채널 환경에 대하여 이루어져왔는데<sup>[3]</sup> PF 알고리즘을 적용할 경우 기지국으로부터 지리적으로 멀리 떨어져 있는 사용자가 겪는 불평등을 해소할 수 있다는 장점이 있어서 평등성 지표의 향상을 기대할 수 있다. 최근에는 다수의 사용자에게 신호를 동시 전송하기 위하여 분산된 기지국들이 협력적으로 사용자를 스케줄링하는 방식이 제안되고 있다<sup>[4]</sup>. 다수 개의 분산 안테나로부터 다수 명의 사용자에게 신호를 동시 전송하는 방식에는 대표적으로 ZF (Zero Forcing)와 ZF - DPC (Zero Forcing - Dirty Paper Coding) 방식이 있다. ZF 방식은 기지국과 사용자 간의 채널 행렬의 역행렬을 선처리 행렬로 사용하므로 구현이 간단하며 기존의 PF 알고리즘이 ZF 전송 방식을 사용한 단일 셀 다중 사용자 MIMO 환경에 적용된 결과가 제시된 바 있다<sup>[6]</sup>. 그러나 ZF 전송 방식은 분산 다중 안테나 시스템에 적용될 경우 각 안테나의 최대 전력 사용량이 미리 설정된 전력 제한을 초과하지 않도록 전체적으로 전력 사용량을 하향 조절하는 경우에 각 안테나가 최대 전력을 활용하지 못한다는 단점이 있다. 이에 비해 ZF-DPC 협력적 전송 방식은 선처리 행렬의 특성으로 인하여 개별 안테나 당 전력 제한을 만족하므로 모든 기지국이 최대 전력을 사용할 수 있어 ZF 전송 방식에 비하여 우수한 성능을 보인다. 기존의 PF 스케줄러가 이러한 협력적 전송 방식을 사용할 경우에는 신호를 전송할 동시 전송 사용자 그룹을 결정하기 전에는 정확한 순간 전송률을 알 수 없어 최적의 사용자 그룹을 선택할 수 없다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 가능한 모든 동시 전송 사용자 그룹을 검색할 경우 스케줄링 알고리즘의 연산 복잡도가 크게 올라가게 된다.

본 논문에서는 서로 다른 셀에 속한 인접한 세 섹터에 지리적으로 분산되어 위치한 기지국들이 사용자들의 채널 정보를 교환하여 ZF-DPC 협력적 전송 방식을 기반으로 신호를 전송할 동시 전송 사용자 그룹을 결정하는 협력적 PF 스케줄러를 분산 다중 사용자 MIMO 시스템에 적용하고 그 성능을 평균 전송률의 로그 합 측면에서 평가한다. 협력적 PF 스케줄러는 기지국들이 채널 정보 교환 없이 자신이 속한 섹터 내에서 사용자들을 각자 선택하는 병렬적 PF 스케줄러에 비해 하위 사

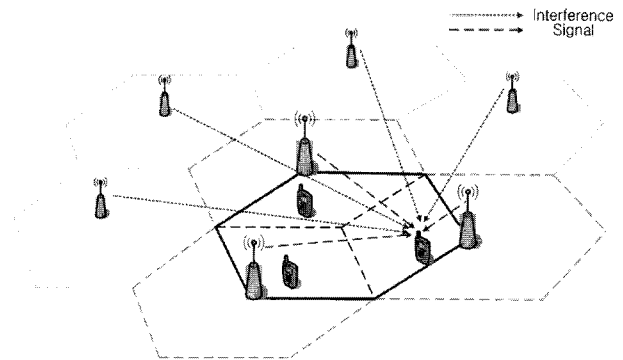


그림 1. 시스템 모델: 분산 다중 사용자 MIMO 시스템  
Fig. 1. System model: Distributed multi-user MIMO system.

용자의 성능을 향상시킴으로서 평등성 지표를 개선한다. 또한 ZF-DPC 협력적 전송 방식의 선처리 행렬이 사용자 채널 사이에 서로 직교하는 성분을 제외한 나머지 성분을 순차적으로 제거하는 역할을 함을 활용하여 가능한 모든 동시 전송 사용자 그룹의 조합을 검색함으로써 가장 큰 사용자 평균 전송률의 로그 합 성능을 보이는 full-search 협력적 PF 방식의 성능의 대부분을 달성하면서도 연산 복잡도를 상당히 감소시킨다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델과 신호 모델을 정의하고 기존 PF 알고리즘과 병렬적 PF 스케줄러를 제시한다. III장에서는 협력적 PF 방식을 설명하고 IV장에서는 각 스케줄러들의 성능을 비교하며 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

## II. 신호 모델 및 기존의 PF 스케줄러

### 1. 시스템 모델 및 신호 모델

스케줄러의 성능을 평가하기 위하여 사용되는 환경은 그림 1과 같은 분산 다중 사용자 MIMO 시스템이다. 기지국들은 서로 다른 셀에 속하는 인접한 3개의 섹터에 지리적으로 분산되어 있으며 협력적 전송을 통해 한 프레임 당 여러 명의 사용자에게 동시에 신호를 전송한다. 기지국들은 모두 방향성 안테나를 구비하고 있으며 인접한 3개의 기지국은 협력적 전송 방식을 사용하므로 서로 간섭을 주지 않고 간섭은 외부의 기지국으로부터만 들어온다. 안테나 당 사용 가능한 최대 전력의 상한이 존재하며 주파수 재사용률은 1이다. 또한 ZF-DPC 협력적 전송 방식을 사용하기 위해 기지국과 사용자는 채널 정보를 모두 알고 있다고 가정한다.

기지국과 사용자는 모두 단일 안테나를 가지고 있으며 스케줄러는 섹터 당 한 명의 사용자를 선택하여 총

3명으로 이루어진 동시 전송 사용자 그룹을 결정한다. 기지국과 사용자 간의 채널 행렬을  $\mathbf{H}$ , 선처리 행렬을  $\mathbf{W}$ , 전송 심볼 벡터를  $\mathbf{d}$ , 잡음 벡터를  $\mathbf{n}$ 이라고 할 때 선택된 동시 전송 사용자 그룹이 ZF-DPC 협력적 전송 방식으로 전송 받는 수신 신호  $\mathbf{y}$ 는

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{d} + \mathbf{n} \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다. 선처리 행렬  $\mathbf{W}$ 는 채널을 QR 분해한 결과로 나오는 행렬  $\mathbf{Q}$ 를 사용하며 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= (\mathbf{R}^H \mathbf{Q}^H) \mathbf{Q} \mathbf{d} + \mathbf{n} \\ &= \mathbf{R}^H \mathbf{d} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (2)$$

선처리 행렬  $\mathbf{Q}$ 는  $\mathbf{Q}\mathbf{Q}^H = \mathbf{I}$ 를 만족하는 행렬로  $\mathbf{Q}$ 에 속하는  $(1 \times 3)$  벡터를  $\mathbf{q}$ 라 할 때  $\mathbf{q}$ 의 Frobenius norm은 모두 1이 되어 분산 다중 안테나 시스템에서의 개별 안테나 당 전력 제한 조건을 만족하게 된다.  $\mathbf{R}^H$ 는 선처리 행렬  $\mathbf{Q}$ 를 통해 간섭이 제거된 하삼각 행렬을 나타내며 DPC 방식을 통해 대각 성분을 제외한 나머지 간섭 성분들을 제거하게 된다.  $\mathbf{n}$ 은 AWGN (Additive White Gaussian Noise)으로 평균은 0, 분산은  $\sigma^2$ 이며 i.i.d (independent and identically distributed) Gaussian 확률 분포를 따른다.

## 2. 기존의 PF 알고리즘

단일 셀에서 한 프레임 당 한 명의 사용자에게 자원을 할당하는 기존의 PF 스케줄러에서는 다음과 같은 방식으로 사용자를 선택한다. 셀에 총  $M$ 명의 사용자가 있을 경우 현재 사용자가  $i$ 번째 프레임에 자원을 할당받을 경우 낼 수 있는 성능을  $R_m(i)$ , 이전  $i-1$  프레임 동안 낸 성능의 평균 전송률을  $T_m(i)$ 라 할 때  $i$ 번째 프레임에서 스케줄러가 자원을 할당하는 사용자  $m^*(i)$ 는

$$m^*(i) = \arg \max_{m \in \{1, \dots, M\}} \frac{R_m(i)}{T_m(i)} \quad (3)$$

이며  $T_m(i)$ 는 window size  $t_c$  값을 적절히 선택하여 다음과 같이 업데이트한다.

$$T_m(i+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_m(i) & m \neq m^*(i) \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_m(i) + \frac{1}{t_c} R_m(i) & m = m^*(i) \end{cases} \quad (4)$$

기존의 PF 스케줄러를 분산 다중 사용자 MIMO 환경에 적용할 경우 지리적으로 떨어져있는 기지국에 각각 존재하는 스케줄러들은 다른 기지국의 스케줄러들과의 정보교환 없이 각각 섹터 당 1명의 사용자를 선택하게 된다. 이를 병렬적 PF 스케줄러라 한다. 이 때 기존 알고리즘의  $R_m(i)$ 는 비협력전송을 가정하고 섹터 별로 계산하게 되며 병렬적 PF 스케줄러의 사용자 선택 방식을 다음과 같이 정리할 수 있다. 섹터의 인덱스를  $s$ , 섹터 당 존재하는 사용자의 수를  $K$ 라고 하고  $s$ 번째 섹터에 존재하는  $k$ 번째 사용자의 인덱스를  $(s, k)$ 로 표시하고  $i$ 번째 프레임에서 선택되는 사용자를 벡터  $\pi^*(i)$ 로 표시할 때

$$\pi^*(i) = \arg \max_{s \in \{1, 2, 3\}, k \in \{1, \dots, K\}} \frac{R_{(s, k)}^n(i)}{T_{(s, k)}(i)} \quad (5)$$

이다. 이 때  $R_{(s, k)}^n(i)$ 는 비협력적 전송 (non-collaborative transmission)을 가정한 것이며 사용자  $(s, k)$ 가 속한 섹터의 기지국과의 채널 성분  $h_{(s, k)}(i)$ 의 제곱값만을 신호 전력으로 계산하며 이를 제외한 신호들을 간섭성분  $I_{(s, k)}^n(i)$ 으로 하고 다음과 같이 계산한다.

$$R_{(s, k)}^n(i) = \log_2 \left( 1 + \frac{\|h_{(s, k)}(i)\|^2}{I_{(s, k)}^n(i) + \sigma^2} \right) \quad (6)$$

스케줄러를 통해 선택한 동시 전송 사용자 그룹에 ZF-DPC 협력적 전송(collaborative transmission)을 통해 신호를 전송한 후에는 실제 순간 전송률을 알 수 있으며 이를  $R_{(s, k)}^c(i)$ 로 하고 이에 따른 평균 전송률은 다음과 같이 업데이트 한다.

$$T_{(s, k)}(i+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_{(s, k)}(i) & (s, k) \neq \pi^*(i) \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_{(s, k)}(i) + \frac{1}{t_c} R_{(s, k)}^c(i) & (s, k) = \pi^*(i) \end{cases} \quad (7)$$

병렬적 PF 스케줄러에서는 사용자를 선택하기 위하여 사용하는  $R_{(s, k)}^n(i)$ 과  $R_{(s, k)}^c(i)$ 에 차이가 있으므로 시스템의 하위 사용자 성능에 영향을 미치게 된다.

## III. 협력적 스케줄링 방식

### 1. Full-search 협력적 PF 스케줄러

ZF-DPC 협력적 전송을 사용할 경우 동시 전송 사용자 그룹을 선택하지 않으면 병렬적 PF 스케줄러의 경우와 같이 사용자를 고르는데 사용되는 순간 전송률  $R_{(s,k)}^n(i)$ 과 실제 전송 후 평균 전송률 값 업데이트에 사용되는  $R_{(s,k)}^c(i)$ 의 값에 차이가 생기게 된다. 이를 해결하는 동시에  $\sum_{s=1}^3 \sum_{k=1}^K \log T_{(s,k)}$ 를 최대화하는 방법으로 모든 동시 사용자 그룹의 조합에 대하여 PF 지표를  $\sum_{s=1}^3 \frac{R_{(s,k)}^c(i)}{T_{(s,k)}(i)}$ 로 하고 이 값을 최대화하는 사용자 그룹을 검색하는 방법을 사용할 수 있다. 이 방법의 경우 스케줄러의 성능 지표인  $\sum_{s=1}^3 \sum_{k=1}^K \log T_{(s,k)}$ 을 최대화하는 최적의 사용자 그룹을 매 프레임마다 결정해 나갈 수 있으나 섹터 당 존재하는  $K$ 명의 사용자에게 대하여 총  $K^3$ 개의 조합을 검색하여야하므로 알고리즘의 연산 복잡도가 매우 높아지게 된다.

## 2. 협력적 PF 스케줄러

협력적 PF 스케줄러 방식은 full-search 협력적 PF 스케줄러의 연산 복잡도를 크게 줄일 수 있다. 이는 ZF-DPC 협력적 전송 방식에 사용되는 연속적 간섭 제거 방식이 사용자간 채널 직교성을 활용한다는 점에 기반한 것이다.  $B_j$ 를 사용자가 선택되지 않은 섹터 인덱스의 집합이라 할 때  $i$ 번째 프레임에서 섹터마다 선택되는 사용자  $\pi^*(i)$ 는

$$\pi^*(i) = \arg \max_{s \in B_j, k \in \{1, \dots, K\}} \frac{R_{(s,k)}(i)}{T_{(s,k)}(i)} \quad (8)$$

이다. 이 때  $R_{(s,k)}(i)$ 는 사용자의 순간 전송률로 이전에 선택된 다른 섹터에 존재하는 사용자와 직교하는 채널 성분만을 신호 전력으로 하여 다음과 같이 계산한다.

$$R_{(s,k)}(i) = \log_2 \left( 1 + \frac{\| \mathbf{g}_{(s,k)}(i) \|^2}{I_{(s,k)}(i) + \sigma^2} \right) \quad (9)$$

$\mathbf{g}_{(s,k)}(i)$ 는 후보 사용자의 채널 성분이 이전에 선택된 사용자의 채널들에 의해 만들어진 부분 공간과 직교하는 성분을 뜻하며 이 부분 공간을 만드는 사용자들의 채널 성분을  $\mathbf{g}^{(p)}(i)$ 이라 하고 이미 선택된 사용자의 수가  $l$ 일 때 할 때 다음과 같은 수식을 사용하여 계산

한다.

$$\mathbf{g}_{(s,k)}(i) = \mathbf{h}_{(s,k)}(i) - \sum_{p=1}^l \frac{\mathbf{h}_{(s,k)}(i) \{ \mathbf{g}^{(p)}(i) \}^*}{\| \{ \mathbf{g}^{(p)}(i) \}^* \|^2} \mathbf{g}^{(p)}(i) \quad (10)$$

협력적 PF 알고리즘은 섹터 당  $K$ 명의 사용자에게 대하여 동시 전송 그룹에 들어갈 첫 번째 사용자를 고르기 위해 전체 사용자  $3K$ 명의 사용자에게 대하여 검색을 하게 되며 이 때 순간 전송률을 계산하기 위하여 사용되는  $\mathbf{g}_{(s,k)}(i)$ 는 사용자  $(s,k)$ 와 3개의 기지국 사이의 채널 성분을 나타내는  $(1 \times 3)$  벡터  $\mathbf{h}_{(s,k)}(i)$ 가 된다. 두 번째 사용자는 이전 단계에서 이미 선택된 사용자가 속한 섹터를 제외한 나머지  $2K$ 명의 사용자의 채널 성분 중 이미 선택된 사용자의 채널과 직교하는 채널 성분만을 신호전력으로 계산하여 사용자를 고르게 된다. 마지막 사용자도 같은 방식으로 선택할 수 있으며 이렇게 선택된 동시전송 사용자 그룹이 ZF-DPC 협력적 전송을 통해 신호를 전송 받게 된다.

협력적 전송 방식을 사용하여 신호를 전달할 동시 전송 사용자 그룹을 선택할 경우 사용자 채널 간의 직교성을 이용하는 방식은 기존의 결과에서도 활용된 바가 있으나, 모두 단일 셀 MIMO 환경에서 적용된 경우이며<sup>[6-8]</sup>, 본 연구의 주제와 같은 섹터 간 협력을 전제로 하는 스케줄링 방식의 경우 그 특성을 활용한 적용이 필요하다. 섹터 당 적어도 한 명의 사용자에게 전송을 하기 위해 이미 선택된 사용자가 속한 섹터의 사용자는 검색의 대상에서 제외함으로써 알고리즘의 연산 복잡도를 감소시킬 수 있으며, 기존 방식의 검색 사용자 수  $3K + (3K-1) + (3K-2)$ 와는 달리 본 절에서 사용한 협력적 PF 스케줄링은  $3K + 2K + K$ 명의 사용자에게 대하여 검색을 수행하므로 섹터 당 사용자가 늘어남에 따른 연산 복잡도 증가를 완화할 수 있다. 또한 기존 방식과는 달리 사용자 그룹의 채널 직교성을 기준으로 걸러진 후보 사용자들에 대해서만 전송기회를 부여하는 방식을 통해 전송 사용자 수를 가변화하지 않음으로서 추가적인 성능을 얻을 수 있게 된다. 이는 DPC 전송 방식이 모든 사용자에게 동일한 전력을 할당하는 동시에 성능 합을 최대화하므로 추가적인 성능 향상을 달성할 수 있다는 특성에 기반한 것이다.

협력적 PF 알고리즘은 ZF-DPC 협력적 전송 방식이 선처리 행렬을 통해 사용자간 채널 직교성에 기반한 연속적 간섭 제거 방식을 사용하는 것을 활용함으로써 실제 전송되는 순간 전송률  $R_{(s,k)}(i)$ 값의 정확한 계산이

가능하다. 또한 이 값이 평균 전송률 업데이트에 쓰이므로 병렬적 스케줄러에서 보였던 사용자 선택 전후의 순간 전송률 값의 차이가 사라지게 된다. 이를 통해 협력적 PF 알고리즘은 섹터 내에 존재하는 모든 사용자에게 자원 접근권을 평등하게 할당할 수 있게 된다. 또한 선처리 행렬  $\mathbf{Q}$ 는  $\mathbf{Q}\mathbf{Q}^H = \mathbf{I}$ 의 특성을 가지므로 항상 분산 안테나 시스템의 개별 안테나 당 전력 제한 조건을 만족한다. 이로서 전력 하향 조절 없이 항상 3명의 사용자에게 신호를 전송할 수 있게 되므로 협력적 PF 스케줄러는 동시 전송 사용자 그룹의 순간 전송률을 높이는 동시에 평균 전송률 성능을 향상시킬 수 있게 된다.

#### IV. 성능 비교

본 장에서는 협력적 PF 방식을 병렬적 PF 방식, full-search 협력적 PF 방식과 비교하고 성능을 분석한다. 성능 비교를 위해 사용된 환경은 분산 다중 안테나 MIMO 환경이다. 인접한 기지국 사이의 거리는 500m이며 각 섹터에는 10명의 사용자가 균일한 분포를 가지고 위치한다. 스케줄러의 성능은 인접한 세 섹터에 존재하는 총 30명의 사용자에게 대하여 분석한다. 채널 환경은 레일레이 페이딩 환경이며 인접 프레임 간 채널의 상관도는 0이며 기지국과 사용자 채널 사이의 경로 감쇄 상수는 3.76이다. 안테나 당 최대 전력은 1로 제한되며 열 잡음은 10MHz 당 -104dBm이다. 스케줄러의 window size  $t_c = 50$ 에 대하여  $L = 500$  프레임동안 성능을 평가하였다. 사용자는 이 프레임 구간동안 이동하지 않음

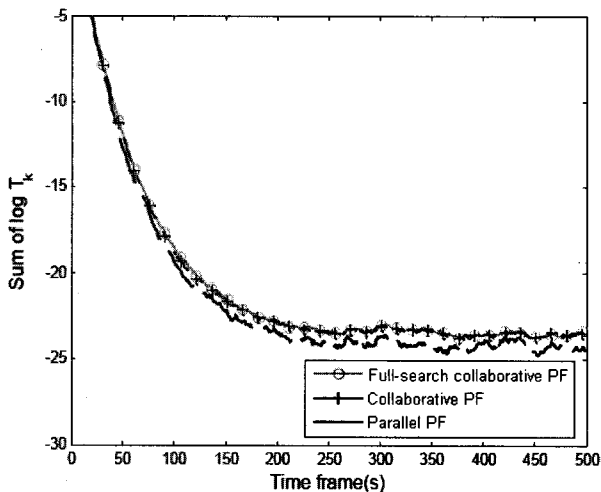


그림 2. 평균 전송률의 로그 합 성능  
Fig. 2. Sum of log running average rate.

며 이러한 독립적인 실험을  $M = 15$ 에 대하여 수행하였다.

그림 2는 PF 알고리즘의 목적인  $\sum_{s=1}^3 \sum_{k=1}^K \log T_{(s,k)}$ 의 값을 스케줄러마다 프레임축에 대하여 나타낸 것으로 각 스케줄러의 성능이 시간이 지남에 따라 수렴하는 것을 볼 수 있다. 성능면에서 full-search 협력적 PF 스케줄러가 최대값을 보이며 협력적 PF 스케줄러의 성능이 full-search 협력적 PF 스케줄러의 성능에 매우 근접함을 알 수 있다. 병렬적 PF 스케줄러는 근소한 차이지만 가장 낮은 성능 곡선을 보인다.

사용자가 낸 실제 성능을 알아보기 위해 indicator 함수  $Y_{(s,k)}$ 를 정의하여 다음과 같이 정규화된 사용자 성능을 계산할 수 있다.

$$\Gamma_{(s,k)} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L R_{(s,k)}(i) Y_{(s,k)}(i) \quad (11)$$

$$Y_{(s,k)}(i) = \begin{cases} 1 & (s,k) = \pi^*(i) \\ 0 & (s,k) \neq \pi^*(i) \end{cases} \quad (12)$$

각 사용자의  $\Gamma_{(s,k)}$  값으로 CDF (Cumulative Distribution Function)를 그리면 스케줄러 별로 사용자의 성능을 도시할 수 있으며 결과를 그림 3에 도시하였다. 그림 3에서 협력적 PF 스케줄러의 성능은 full-search 협력적 PF 스케줄러의 성능과 거의 동일함을 알 수 있다. 또한 하위 사용자의 성능면에서 full-search 협력적 PF와 협력적 PF 스케줄러가 병렬적

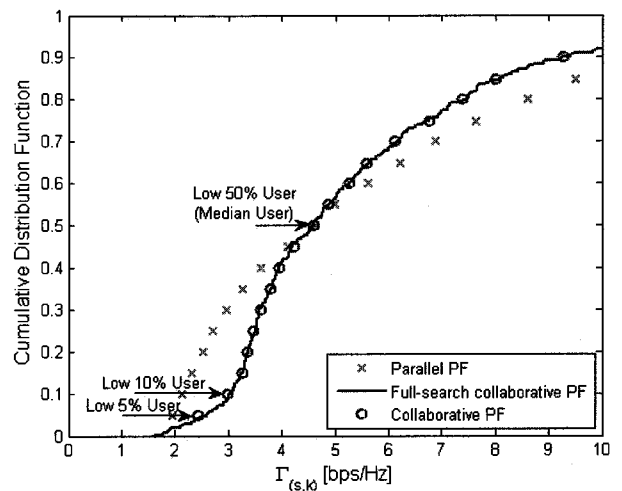


그림 3. 정규화된 사용자 성능의 누적분포그래프 [bps/Hz]

Fig. 3. CDF of normalized user rate [bps/Hz].

표 1. 하위 사용자들의 성능 [bps/Hz]과 병렬적 스케줄러 사용대비 협력적 스케줄러의 성능 이득 [%]

Table 1. Performance of low percentile users [bps/Hz] and its gain compare to parallel scheduler. [%]

|     | 병렬적 PF      | Full-search 협력적 PF |        | 협력적 PF      |        |
|-----|-------------|--------------------|--------|-------------|--------|
|     | 성능 [bps/Hz] | 성능 [bps/Hz]        | 이득 [%] | 성능 [bps/Hz] | 이득 [%] |
| 5%  | 1.95        | 2.59               | 33.8   | 2.44        | 25.1   |
| 10% | 2.13        | 3.03               | 42.3   | 3.02        | 41.9   |
| 50% | 4.62        | 4.60               | - 0.4  | 4.61        | - 0.2  |

표 2. 평등성 지표

Table 2. Jain's Fairness Index.

| 병렬적 PF | Full-search 협력적 PF | 협력적 PF |
|--------|--------------------|--------|
| 0.70   | 0.81               | 0.81   |

PF 스케줄러보다 더 좋은 성능을 내는 것을 알 수 있다. 표 1에서는 하위 사용자의 성능을 3개의 스케줄러에 대하여 표시하고 협력적 PF 스케줄러의 병렬적 PF 스케줄러 대비 성능 이득을 나타내었다. 협력적 PF 스케줄러의 하위 5% 사용자 성능은 병렬적 PF 스케줄러 대비 25% 성능 이득이 있었으며 하위 10% 사용자의 경우에는 41.9%의 성능 이득이 있었다. 이로써 표 2에서 볼 수 있는 것처럼 full-search 협력적 PF, 협력적 PF 스케줄러는 병렬적 PF 스케줄러에 비하여 평등성 지표를 향상시킨다. 이와 같은 맥락에서 병렬적 PF 스케줄러의 상위 사용자의 성능이 우수하며 이로서 병렬적 PF 스케줄러는 협력적 PF 스케줄러에 비해 더 불평등하게 자원을 할당함을 알 수 있다. 이는  $R_{(s,k)}^n(i)$  과  $R_{(s,k)}^c(i)$  값의 차이에 의한 것으로  $R_{(s,k)}^n(i)$ 은 협력적 전송을 기반으로 한  $R_{(s,k)}^c(i)$ 에 비하여 기지국으로부터 지리적으로 가까이 있는 사용자에게 기지국으로부터 지리적으로 먼 곳에 있는 사용자에게 비해서 자원의 접근권을 상대적으로 많이 주게 되기 때문이다. 즉 기지국으로부터의 지리적인 거리에 따른 자원 접근권에 차등을 두게 되어 병렬적 PF 스케줄러의 하위 사용자의 경우에는 협력적 PF 스케줄러에 비하여 성능 열화가 일어나고 상위 사용자의 경우에는 성능 이득이 생기게 된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 ZF-DPC 협력적 전송을 기반으로 한 분산 다중 사용자 MIMO 전송 시스템에서 전체 사용자의 성능을 효율성과 평등성 사이에서 trade-off하기 위한 PF 알고리즘을 분산 다중 사용자 MIMO 시스템에 적용하고 그 성능을 분석하였다. 병렬적 PF 스케줄러와 협력적 PF 스케줄러는 모두 평균 전송률의 로그 합 측면에서 알고리즘이 수렴해나감을 확인하였으며 이로써 concave 형태의 목적 함수를 최대화하는 측면에서 잘 동작함을 확인하였다. 또한 자원에 대한 접근권에 차별을 두지 않은 협력적 PF 스케줄러가 병렬적 PF 스케줄러에 비해 하위 사용자의 성능면에서 이득이 있음을 확인하였다. 또한 협력적 PF 스케줄러는 평균 전송률 측면에서 가장 좋은 성능을 나타내는 full-search 협력적 PF 스케줄러의 성능에 상당히 근접하는 성능을 나타내면서도 알고리즘의 연산 복잡도를 감소시켜 ZF-DPC 협력적 전송을 기반으로 하는 분산 다중 사용자 MIMO 전송 시스템에 적합한 방식임을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. Song and Y. Li, "Cross-layer optimization for OFDM wireless networks - Part I: Theoretical framework; Part II: algorithm development," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 2, pp. 614 - 634, March 2005.
- [2] H. J. Kushner and P. A. Whiting, "Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 4, pp. 1250-1259, July 2004.
- [3] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, pp. 1277-1294, June 2002.
- [4] H. Zhou, P. Fan, and J. Li, "Cooperative proportional fairness scheduling for wireless transmissions," in *Proc. 2009 Int. Conf. Commun. and Mobile Com.*, Leipzig, Germany, June 21-24, 2009.
- [5] X. Chen and H. Hu, "Double proportional fair user pairing algorithm for uplink virtual MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 7, pp. 2425-2429, July 2008.
- [6] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Select.*

- Areas Commun.*, vol. 23, no. 3, pp. 528-541, Mar. 2006.
- [7] L. Zhoa and Y. Jiawei, "Distributed scheduling algorithm for multiuser MIMO downlink with adaptive feedback," *J. Commun.*, vol. 4, no. 3, pp. 164-169, April 2009.
- [8] E. H. Shin and D. W. Kim, "On the optimal sum-capacity growth of ZFBF with quality based channel reporting in multiuser downlink channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 6, pp. 1643-1647, June 2009.
- [9] F. P. Kelly, "Charging and rate control for elastic traffic," *European Trans. Telecommun.*, vol. 8, pp. 33-37, 1997.
- [10] F. P. Kelly, A. Maulloo, and D. Tan, "Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 49, no. 3, pp. 237-252, Mar. 1998.

---

 저 자 소 개
 

---



이 지 원(학생회원)  
 2008년 서강대학교  
 전자공학과 학사 졸업  
 2008년~현재 서강대학교  
 전자공학과 석사 과정

<주관심분야 : 디지털통신, 분산 MIMO 시스템,  
 통계적 통신 이론>



성 원 진(평생회원)  
 1990년 서울대학교  
 전자공학과 학사 졸업  
 1992년 University of Michigan  
 EECS 석사 졸업  
 1995년 University of Michigan  
 EECS 박사 졸업

1996년 1월~2000년 8월 Hughes Network  
 Systems 책임연구원

2000년 9월~현재 서강대학교 전자공학과 교수  
 <주관심분야 : 이동무선통신, 통계적통신이론,  
 MIMO, 위성모델>