

OFDMA/TDMA 시스템에서 PF 스케줄러의 구현

Implementation of proportional fair scheduler in OFDMA/TDMA wireless access networks

최진구¹ 최진희²

¹KT컨버전스연구소, ²고려대학교 컴퓨터학과

Jin-Ghoo Choi¹, Jin-Hee Choi²

¹KT Convergence Lab., ²Department of Computer Science and Engineering, Korea University

Abstract

A simple scheduler satisfying the proportional fairness (PF) was introduced in wireless access networks and revealed that it can achieve a good compromise between total throughput and user fairness. Though it has received much attention for some time, its application was mainly restricted to the single channel systems. In this paper, we study how to implement the PF scheduler in the multi-channel environments such as OFDMA/TDMA. Besides the traditional PF-SC scheme, we propose a new PF-OPT scheme that is the genuine PF scheduler in a sense of maximizing the total log-utility of users. The simulation results show that PF-OPT gives large throughput under the heterogeneous subchannel statistics.

Keywords

OFDMA, opportunistic scheduler, proportional fair scheduler, utility, multi-channel

I. 서 론

인터넷의 급속한 성장과 무선 이동통신의 발달로 인해 언제, 어디서나 인터넷에 접속하고자 하는 사용자들의 요구가 급격히 늘어나고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해 cdma2000 1xEV-DO, WCDMA HSDPA, WiMAX, WiBro와 같은 고속 무선 패킷 접속망이 소개되고 있다. 무선 접속망의 구현 기술은 FDMA, TDMA를 거쳐 CDMA 방식으로 발전해 왔으며, 특히 CDMA는 협대역 잡음에 둔감하고 다중경로 환경에 강인하며 주파수 할당이 필요 없는 등의 장점이 있어 2, 3세대 무

선 셀룰러 망에서 널리 채택되어 왔다. 그러나 전송 속도가 증가함에 따라 칩 간 간섭이 늘어나고 하드웨어의 복잡도가 크게 증가하는 단점이 있어 고속의 데이터 전송에는 부적합하다. OFDM은 고속의 데이터를 여러 개의 저속 데이터 흐름으로 변환하고 각각의 저속 데이터들을 서로 직교하는 부반송파에 실어 전송하는 방식으로, 심볼의 길이가 길어 다중경로 환경에 강인하고 FFT 알고리즘에 의해 쉽게 구현할 수 있어 고속 패킷망 실현을 위한 접속 기술로서 가장 각광받고 있다 [1].

고속 데이터의 전송을 위해 다중 수준 변조 방식을 활용한 링크 적응 기술이나 혼합 재전송 기법 (hybrid ARQ) 등이 활용되고 있으며, 패킷 스케줄러 측면에서도 순간적으로 채널 상태가 좋은 사용자를 먼저 서비스함으로써 다중 사용자 이득을 얻는 기회주의적 스케줄링 (opportunistic scheduling) 방식이 사용될 수 있다. 기회주의적 스케줄링은 각 무선 단말이 자신의 채널 상태를 측정하여 기지국에 위치한 패킷 스케줄러에게 지속적으로 전달하는 과정에서 요구되는 제어 채널의 부담이 있을 뿐만 아니라 패킷 지연의 편차가 증가하는 등의 단점이 있으나, 평균적인 수율 (throughput)을 크게 증가시켜 주므로 고속의 데이터 서비스에 적합한 것으로 평가받고 있다. 근래들어 다양한 기회주의적 스케줄링 방식들이 제안되어 왔으나 [2]-[4], cdma2000 1xEV-DO 시스템과 함께 소개된 PF (proportional fair) 스케줄러는 구현이 간단하고 각 사용자에게 비슷한 양의 시간 슬롯을 할당하는 특성이 있어 가장 실용적인 스케줄러로 인식되고 있다. 또한, 각 사용자의 효용 (utility)의 합을 최대화하는 스케줄링 방식임이 증명되어 학술적으로도 많은 관심을 받고 있다 [2], [5].

원래 PF 스케줄러가 가정하였던 cdma2000 1xEV-DO 시스템의 하향 채널은 하나의 채널을 여러 사용자가 시분할 기법에 의해 공유하는 구조로서, 한 슬롯에서 서비

스되는 사용자의 수는 최대 1명이다. 반면, 본 논문에서 고려하는 OFDMA/TDMA 시스템은 하나의 시간 슬롯에 여러 부채널 (subchannel)이 존재하므로, 한 슬롯에서 동시에 여러 명의 사용자가 서비스되는 것이 가능하다. 이상적으로는 각각의 부반송파 (subcarrier)가 독립된 부채널을 이루는 것이 바람직하겠으나 무선 단말이 스케줄러에게 지속적으로 전송해야 하는 채널 상태 정보의 양을 고려해 볼 때, 동기 주파수대 (coherent bandwidth)에 위치한 적절한 수의 부반송파들을 묶어 하나의 부채널로 구성하는 것이 현실적이다. 어떤 부채널에서 모든 사용자가 동시에 심한 페이딩을 겪을 확률은 매우 낮으므로, OFDMA/TDMA 시스템에서 기회주의적 패킷 스케줄러를 사용한다면 주파수 다중성에 의한 이득을 크게 얻을 수 있다.

본 논문은 여러 부채널을 갖는 광대역 OFDMA/TDMA 시스템에서 PF 스케줄러를 구현하기 위한 기본적인 방안을 살펴보고 이론적인 최대 효율을 달성할 수 있는 최적의 방안을 제안한다. 제안하는 방식은 각 부채널의 통계적 특성이 서로 다를 때 특히 높은 이득을 얻을 수 있음을 컴퓨터 모의 실험에 의해 보인다.

이후의 논문 전개는 다음과 같다. 먼저, 2장에서 OFDMA/TDMA 시스템과 PF 스케줄러에 대해 간단히 소개하며, 3장에서는 여러 부채널을 갖는 시스템에서 PF 스케줄러를 구현하기 위한 기본적인 방식과 함께 최적의 방식을 제안한다. 4장에서 두 가지 구현방식에 의해 얻을 수 있는 각 사용자의 슬롯 양과 전체 수율 및 효율의 크기를 모의실험에 의해 비교하고, 마지막으로 5장에서 본 논문의 기여를 정리하면서 끝을 맺는다.

II. 시스템 모델

2.1 OFDMA/TDMA 시스템

OFDMA/TDMA 시스템의 하향링크에 대한 전체적인 블록도는 그림 1과 같다. 입력된 각 사용자의 패킷은 먼저 스케줄러에 의해 전송될 부채널들을 할당받고, 부반송파 할당기는 부채널을 실제 부반송파로 매핑한다. 부반송파를 할당받은 패킷들은 하나의 OFDM 심볼로 변조되어 전송된다. 각 사용자는 수신한 OFDM 심볼을 복조한 후 자신이 할당받은 부채널에 대응하는 부반송파들로부터 전송된 패킷을 추출한다. 또한, OFDM 심볼에 포함된 파일럿 심볼의 세기를 측정하여 자신의 채널 상태를 추정하여 패킷 스케줄러에게 회송 (feedback)함으로써 기회주의적 스케줄링이 가능하도록 한다. 즉, 특정 부채널을 할당받은 사용자의 현재 채널 상태에 따라 대응하는 부반송파에 실리는 비트의 양이 달라진다. 각각의 OFDM 심볼은 하나의 시간 슬롯을 구성하여, 전체적인 시스템은 OFDMA/TDMA 방식으로 동작한다.

임의의 슬롯에서, 하나의 부채널은 한 사용자에게 할당될 수 있으며 한 사용자는 하나 이상의 부채널을 동시에 할당 받을 수 있다. 사용자 k 가 슬롯 j 에서 j 번째 부채널을 할당 받을 때 실현 가능한 최대 전송 속도를 R_{kj}^* (kbps)로 표시하자. 사용자의 수 N 이 4이고 부채널의 수 M 이 3일 때, 슬롯 j 에서 전송 가능한 속도 R_{kj}^* 들을 예시한 표 1과 같이 $N \times M$ 크기의 2차원 배열로 나타낼 수 있다. 이 예에서, 어떤 스케줄러 Q_1 이 모든 부채널을

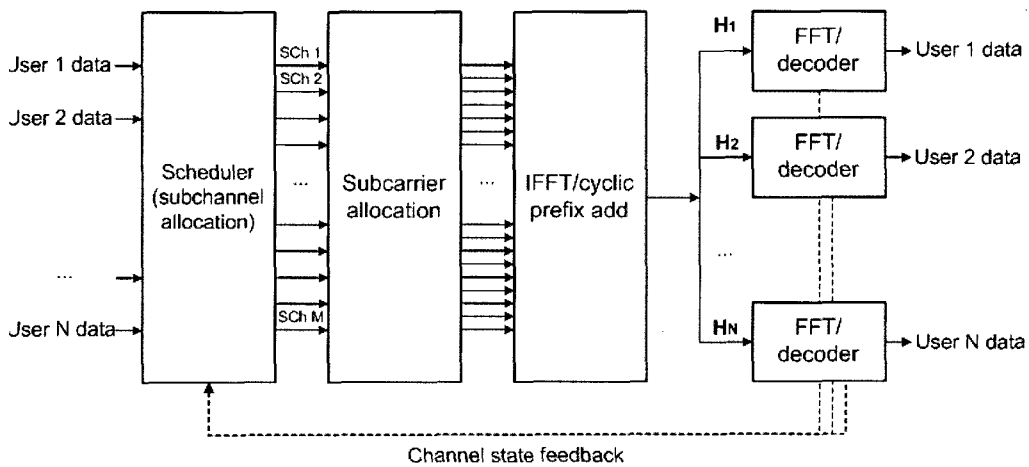


그림 1. OFDMA/TDMA 시스템의 구조

Fig. 1. Architecture of OFDMA/TDMA Systems

사용자 2에게 할당한다면 전체적으로 900 (kbps)의 속도를 얻을 수 있는 반면, 다른 스케줄러 Q_2 가 부채널 1을 사용자 4에게, 부채널 2를 사용자 1에게, 부채널 3을 사용자 2에게 할당한다면 전체적으로 1200 (kbps)의 속도를 얻는다. 부채널을 할당받지 못한 사용자 3는 다른 슬롯에서 부채널을 할당 받음으로써 기아 상태 (starvation)에 빠지지 않아야 한다. 이 예는 동일한 채널 환경에서도 패킷 스케줄러에 따라 각 사용자의 전송 속도 뿐만 아니라 전체적인 수율도 크게 달라질 수 있음을 보여주고 있다.

2.2 PF 스케줄러

패킷망의 경우 외부에서 유입되는 트래픽이 증가함에 따라 패킷 누락율이나 전달 지연이 크게 증가하며, 극단적인 경우 혼잡 붕괴 (congestion collapse)에 이르기도 한다. 이를 피하기 위해 TCP와 같은 전송계층 프로토콜은 망의 혼잡도를 추정하여 동적으로 전송 속도를 조절하는 혼잡 제어 기법을 구현한다. 따라서, TCP를 이용하는 세션 (session)은 대역폭의 동적 변화에도 적응할 수 있어야 하는데, 이러한 특성을 갖는 트래픽을 탄성적 (elastic)이라고 표현하며 대부분의 데이터 세션이 이에 속한다. 사용자가 망의 서비스에 따라 느끼는 만족도를 효용이라는 개념으로 추상화할 수 있는데, 탄성적인 트래픽의 경우 평균 전송 속도에 따라 효용의 크기가 로그 (logarithm) 형태로 증가한다고 알려져 있다.

표 1. 실현 가능한 전송 속도의 예 (kbps)
Table 1. Example of feasible transmission rates in a time slot (kbps)

	User1	User2	User3	User4
Antenna1	100	200	300	400
Antenna2	400	300	200	100
Antenna3	300	400	100	200

일반적으로 유선망의 대역폭은 충분히 크므로 사용자의 전송 속도는 무선 접속망에서 결정된다고 볼 수 있다. 무선 접속망에서 사용자 k 의 평균 전송 속도를 \overline{R}_k 라고 하면 효용 U_k 는 $\ln \overline{R}_k$ 로 주어지고 모든 사용자의

총 효용은 $\sum_{k=1}^N U_k$ 이 된다 [6]. 각 사용자 채널의 통계적 특성이 주어졌을 때 스케줄링 방식에 따라 사용자의 평균 전송 속도가 달라지고 따라서 효용도 달라진다. 이때, 총 효용을 극대화하는 전송 속도 분배를 비례공평 (proportional fair: PF)하다고 정의하며 이러한 분배를 달성하는 패킷 스케줄러를 PF 스케줄러라고 부른다.

단일 채널 시분할 시스템에서 PF 스케줄러의 동작을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다 [2]. 사용자 k 가 j 번째 슬롯에서 선택될 때 실현 가능한 최대 전송 속도 (maximum feasible rate)를 R_j^k 로 표기하고, 이전 슬롯까지의 평균 전송 속도를 \overline{R}_j^k 라고 하자. 이 때, PF 스케줄러는 R_j^k / \overline{R}_j^k 의 비율이 가장 큰 사용자 k^* 를 선택하여 서비스 하며, 각 사용자의 평균 전송 속도는

$$\overline{R}_{j+1}^k = \begin{cases} \alpha \overline{R}_j^k + (1-\alpha)R_j^k, & k=k^* \\ \alpha \overline{R}_j^k, & k \neq k^* \end{cases} \quad (1)$$

에 따라 갱신된다. 단, α 는 이동 평균 (moving average) 계산에 필요한 시상수로서 보통 $1-0.001=0.999$ 정도의 값이 사용된다.

III. OFDMA/TDMA 시스템에서의 PF 스케줄러

이번 절에서는 OFDMA/TDMA 시스템에서 PF 스케줄러를 구현하는 기본적인 방식을 살펴보고, 보다 높은 효용을 줄 수 있는 새로운 방식을 제안한다. 제안하는 방식은 사용자의 평균 전송 속도를 구하는 부분에서만 기존 방식과 다른데, 계산량의 측면에서도 기존 방식보다 빠르고 시스템에 추가적인 부담을 요구하지 않는다.

3.1 부채널 별 구현 방식 (PF-SC)

여러 개의 부채널을 갖는 시스템에서 PF 스케줄러를 구현하는 기본적인 방법은 각 부채널 별로 독립적으로 PF 스케줄링을 수행하는 것이다. 이러한 방식을 PF-SC (PF-SubChannel)라고 표기하자. 사용자 k 는 j 번째 슬롯에서 각각의 부채널을 할당받을 때 실현 가능한 최대 전송속도 벡터 $(R_{j,1}^k, R_{j,2}^k, \dots, R_{j,M}^k)$ 를 스케줄러에게 전송

하고, 스케줄러는 전달된 속도 벡터들을 취합하여 표1과 같은 행렬을 구성한다. 스케줄러는 각 부채널 별로 사용자 k 의 평균 전송 속도 \overline{R}_i^k ($1 \leq i \leq M$)를 유지, 관리하며, 부채널 i 에서 $R_{ji}^k/\overline{R}_{ji}^k$ 의 비율이 가장 큰 사용자 k_i^* 를 선택하여 서비스한다. 따라서 한 슬롯에 최대 M 명의 사용자를 동시에 서비스할 수 있다. 사용자의 평균 전송 속도는 각 부채널 별로에 따라 갱신된다.

$$\overline{R}_{j+1,i}^k = \begin{cases} \alpha \overline{R}_{ji}^k + (1-\alpha)R_{ji}^k, & k=k_i^* \\ \alpha \overline{R}_{ji}^k, & k \neq k_i^* \end{cases} \quad (2)$$

3.2 최적의 구현 방식 (PF-OPT)

제안하는 방식은 PF-SC와 매우 유사하나 사용자의 평균 전송 속도를 부채널 별로 유지하는 것이 아니라 사용자 당 하나만 유지한다는 점에서 다르다. 이 방식은 아래에 증명하는 것과 같이 총 효용을 최대화하는 방법이므로 PF-OPT (PF-Optimal)라고 표기한다. 사용자 k 는 j 번째 슬롯에서 각 부채널을 할당받을 때 실현 가능한 최대 전송 속도 벡터 $(R_{j1}^k, R_{j2}^k, \dots, R_{jM}^k)$ 를 스케줄러에게 전송하고, 스케줄러는 부채널 i 에 대해 $R_{ji}^k/\overline{R}_{ji}^k$ 의 비율이 가장 큰 사용자 k_i^* 를 선택하여 서비스한다. 슬롯 j 에서 사용자 k 가 받은 실질적인 전송 속도는 할당받은 각 부채널에서 실현 가능한 최대 전송 속도의 합이므로 $R_j^k = \sum_{i \in \{k=k_i^*\}} R_{ji}^k$ 로 표현된다. 마지막으로, 각 사용자의 평균 전송 속도는 식 (1)과 동일하게 갱신된다.

제안한 스케줄러가 최대의 총 효용을 줄 수 있는 진정한 의미의 PF 스케줄러임을 보이도록 한다. 사용될 기호들은 아래와 같으며, 이후로는 임의의 슬롯에 대해 기술하므로 모든 기호에서 슬롯에 대한 지수 (index) j 를 생략한다.

Q^* : 제안하는 스케줄러 (PF-OPT).

Q PF-OPT가 아닌 임의의 스케줄러.

k_i^* : 임의의 슬롯에서 Q^* 에 의해 부채널 i 를 할당받은 사용자.

k_i : 동일 슬롯에서 Q 에 의해 부채널 i 를 할당받은 사용자.

\overline{R}_k^Q : 충분히 긴 시간이 흐른 후 Q^* 에 의해 사용자 k 가 얻은 평균 전송 속도.

\overline{R}_k^Q : 충분히 긴 시간이 흐른 후 Q 에 의해 사용자 k 가 얻은 평균 전송 속도.

$I_{\{A\}}$: 사건 A 가 참일 때는 1, 거짓일 때는 0의 값을 갖는 지시 함수 (indicator function).

Q^* 에 의해 부채널 i 를 할당받은 사용자 k_i^* 는 실현 가능 속도와 평균 전송 속도의 비율 $R_i^{k_i^*}/\overline{R}_{k_i^*}^Q$ 를 갖는데,

이 값을 지시 함수를 이용하여 $\sum_{k=1}^N R_i^k/\overline{R}_k^Q I_{\{k=k_i^*\}}$

의 형태로 표기할 수 있다. Q^* 는 이 값이 최대가 되는 사용자만을 선택하므로 다른 스케줄러 Q 에 의해 얻은

$\sum_{k=1}^N R_i^k/\overline{R}_k^Q I_{\{k=k_i\}}$ 보다 큰 값을 갖는다¹⁾. 따라서

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \frac{R_i^k}{\overline{R}_k^Q} I_{\{k=k_i^*\}} \geq \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \frac{R_i^k}{\overline{R}_k^Q} I_{\{k=k_i\}} \quad (3)$$

가 성립한다. 양 변의 기대값을 취하고,

$$\sum_{i=1}^M E\{R_i^k I_{\{k=k_i^*\}}\} = R_k^Q, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^M E\{R_i^k I_{\{k=k_i\}}\} = R_k^Q \quad (5)$$

임을 이용하여 정리하면,

$$\sum_{k=1}^N \frac{R_k^Q - R_k^Q}{R_k^Q} \leq 0 \quad (6)$$

를 얻는다.

각 스케줄러에 의해 얻은 평균 속도 벡터 $\overline{R}_Q = (\overline{R}_1^Q, \dots, \overline{R}_N^Q)$, $\overline{R}_Q = (\overline{R}_1^Q, \dots, \overline{R}_N^Q)$ 와 총 효용

$U = \sum_{k=1}^N \ln \overline{R}_k$ 를 정의하고, 위 식을 벡터 형식으로 표

기하면

$$\nabla U(\overline{R}_Q) \cdot (\overline{R}_Q - \overline{R}_Q) \leq 0 \quad (7)$$

1) 분모가 \overline{R}_k^Q 이 아니라 \overline{R}_k^Q 임에 주목한다.

가 된다. 이것은 제안한 스케줄러 Q^* 에 의해 각 사용자가 얻은 평균 전송 속도 $\overline{R_1^Q}, \dots, \overline{R_N^Q}$ 에서 총 효용이 최대가 됨을 의미하며, 따라서 Q^* 는 비례공평성을 달성한다.

표 2. 각 부채널에서 사용자의 실현 가능한 최대 전송 속도 (kbps)

Table 2. Maximum feasible rates of users in each subchannel (kbps)

	User1	User2	User3	User4
SC1	20~100	20~100	100	100
SC2	100	100	20~100	20~100

IV. 모의 실험 결과

이 장에서는 PF-SC와 PF-OPT의 성능을 모의 실험에 의해 비교한다. 각 부채널의 통계적 특성이 동등 (equivalent)한 경우 $\overline{R_1^*} = \overline{R_2^*} = \dots = \frac{\overline{R_i^*}}{M}$ 이므로 결국 두 스케줄러는 동일하나, 만약 부채널들의 특성이 상이하다면 각 스케줄러의 성능도 서로 다를 수 있다.

모의 실험 환경은 다음과 같다. 하나의 기지국에 연결된 4명의 사용자를 고려하고 부채널의 수는 2개로 설정한다. 사용자 1과 2를 묶어 그룹 1 (G1)이라고 부르고, 사용자 3과 4를 묶어 그룹 2 (G2)라고 부른다. 각 그룹에 속한 사용자들은 지리적으로 충분히 인접해 있어서 부채널들의 통계적 특성이 동일하다고 가정한다. 각 그룹의 사용자가 임의의 슬롯에서 부채널을 할당받을 때 전송할 수 있는 최대 속도는 표 1에 주어진 평균값을 갖고 지수 분포를 따르는 확률변수 (random variable)라고 가정한다. 이 설정은 그룹 1 주변에 부채널 1 대역의 협대역 간섭원이 존재하며 그룹 2 주변에 부채널 2 대역의 협대역 간섭원이 존재하는 환경을 모델링한 것으로서, 현실적으로 자주 일어나는 상황이라고 볼 수는 없으나 PF-SC와 PF-OPT의 특성을 명확히 드러내기 위해 선택되었다. 시간 슬롯의 크기는 1.667 (msec)로 설정되었으며 100,000 슬롯에 대해 모의실험을 수행하였다.

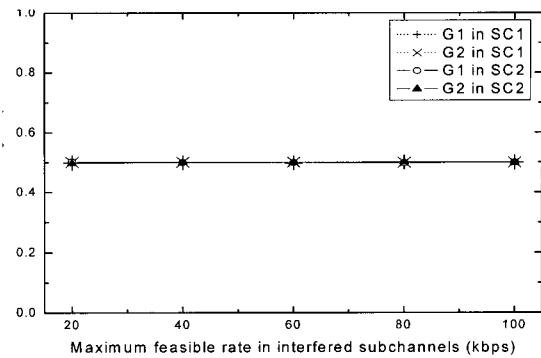


그림 2. PF-SC에서 두 사용자 그룹이 각 부채널의 슬롯을 점유하는 양

Fig. 2. Time-share of each user group in subchannels

부채널의 통계적 특성이 상이한 정도에 따라 두 스케줄러의 성능 변화를 살펴보기 위해, 협대역 간섭원의 세기를 서서히 감소시켜 간섭 받는 부채널들에서 실현 가능한 최대 전송 속도의 크기를 점차 증가시켰다. 간섭원이 완전히 사라진 경우 간섭 받는 부채널에서의 전송 속도는 일반 부채널들과 마찬가지로 100 (kbps)의 평균 전송 속도를 갖는다. 그림 2는 PF-SC를 사용한 경우 각 그룹에게 할당된 시간 슬롯의 비율을 나타낸 것으로서, 모든 사용자에게 비슷한 양의 슬롯을 할당하는 PF 스케줄러의 특성이 부채널 별로 그대로 드러난다. 반면, 그림 3에서 볼 수 있듯이 PF-OPT는 부채널 1에서 상태가 좋지 않은 그룹 1에게는 슬롯을 적게 할당하고 상태가 좋은 그룹 2에게 많은 슬롯을 할당한다. 대신 상황이 역전된 부채널 2에서는 그룹 1에게 많은 슬롯을 할당하는 모습을 보인다. 이러한 경향성은 협대역 간섭원의 크기가 작아짐에 따라 줄어들어 결국 PF-SC와 동일해진다. 전체적으로 보아, 각 그룹이 할당받은 전체 슬롯의 양은 PF-SC나 PF-OPT나 거의 차이가 없으나, PF-SC는 각 부채널 별로도 공평하게 슬롯을 할당한 반면 PF-OPT는 부채널 별로로는 불공평하지만 그룹 별 (사용자 별)로는 공평하게 할당하는 특성을 보인다. 사용자 입장에서 볼 때 어떤 부채널을 통해 서비스 받았는지는 중요하지 않으므로, 각 부채널 별로도 공평한 PF-SC의 특성은 장점이 되지 못한다.

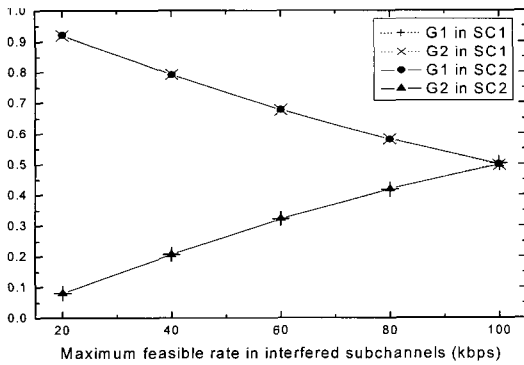


그림 3. PF-OPT에서 두 사용자 그룹이 각 부채널의 슬롯을 점유하는 양

Fig. 3. Time-share of each user group in subchannels

동일한 모의실험에서 두 스케줄러에 의해 각각의 그룹이 얻는 평균 전송 속도를 비교하면 그림 4와 같다. PF-OPT는 상태가 좋지 않은 부채널에서는 슬롯을 적게, 상태가 좋은 부채널에서는 슬롯을 많이 할당하므로 전체적으로 높은 전송 속도를 보이고 있다. 간섭 받는 부채널들의 평균 전송 속도가 20 (kbps)인 경우, 전체 수율의 측면에서 PF-OPT는 304.30 (kbps)로서 PF-SC의 250.02 (kbps)보다 약 21.72 (%) 높고, 총 효율의 측면에서도 17.33 로서 PF-SC의 16.54 보다 약 4.78 (%) 높았다. PF-OPT는 효율 함수의 로그 형상 때문에 총 효율의 측면에서는 이득이 크지 않으나 수율의 측면에서는 큰 이익을 얻을 수 있다.

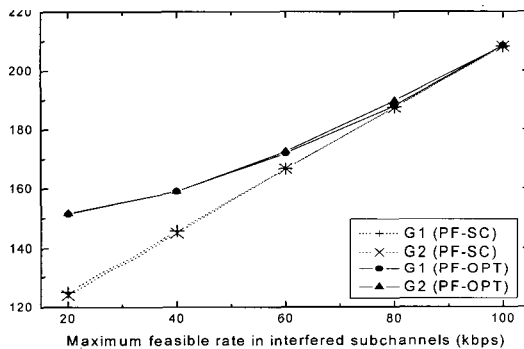


그림 4. PF-SC와 PF-OPT를 사용했을 때 각 그룹이 얻는 평균 수율

Fig. 4. Average throughput of each user group by PF-SC and PF-OPT

V. 결 론

본 논문은 WiMAX, WiBro와 같은 고속의 무선 패킷망에서 채택하고 있는 OFDMA/TDMA 시스템에서 PF 스케줄러를 구현하는 새로운 방안을 제시하였다. 모의실험 결과, 부채널들의 통계적 특성이 동일한 경우에는 기존의 구현 방식과 제안하는 방식 사이에 차이가 없었으나, 그렇지 않을 경우 제안하는 방식이 더 높은 수율과 효율을 얻을 수 있었다. 또한, 시스템에 미치는 부담이나 구현의 복잡성 측면에서도 두 방식은 거의 비슷하거나 제안한 방식이 더 우수하였다.

[참고 문헌]

- [1] J. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, pp. 17-25, Mar, 1990.
- [2] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, "Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system," *Proc. IEEE VTC*, Tokyo, Japan, pp. 1854-1858, 2000.
- [3] S. Borst and P. Whiting, "Dynamic rate control algorithm for HDR throughput optimization," *Proc. IEEE INFOCOM*, Anchorage, Alaska, pp. 976-985, 2001.
- [4] X. Liu and E. Chong, and N. Shroff, "A framework for opportunistic scheduling in wireless networks," *Computer Networks*, vol. 41, no. 4, pp. 451-474, Mar, 2003.
- [5] H. 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.
- [6] F. Kelly, "Charging and rate control for elastic traffic," *Europ. Trans. Telecom.*, vol. 8, pp. 33-37, 1997.

Biography



최진구

1998년 서울대학교 전기전자제어공학과 졸업

2000년 서울대학교 대학원 전기공학부
(공학석사)

2005년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학
부 (공학박사)

2005년~현재 KT 컨버전스 연구소 선임
연구원

<주관심분야> Wireless packet scheduler, Wireless resource management, Ad-hoc network, TCP, System modelling

<이메일> jinchoi@kt.co.kr

최진희

2000년 고려대학교 컴퓨터학과 졸업

2002년 고려대학교 대학원 컴퓨터학과(이학석사)

2004년 고려대학교 대학원 컴퓨터학과(박사수료)

2002년~현재 고려대학교 대학원 박사과정 연구원

<주관심분야> Operation system, Adaptive network subsystem, TCP, Ad-hoc network

<이메일> jhchoi@os.korea.ac.kr