

# 다중 사용자 OFDM 무선 이동통신 환경에서의 비례공정 부반송파 할당기법

정희원 박효순\*, 김준석\*, 이재용\*

## Proportional Fair Subcarrier Allocation Scheme in the Multiuser OFDM Wireless Mobile Communication Systems

Hyosoon Park\*, Junsoek Kim\*, Jaiyong Lee\* *Regular Members*

### 요약

본 논문에서는 OFDMA 무선 이동 통신시스템에서 시스템의 수율을 최대화 하면서 비실시간 트래픽 사용자들에게 비례적인 공정성을 제공하기에 적합한 새로운 스케줄링 알고리즘을 제안 하였다. 새로이 제안된 알고리즘은 3GPP2에 적용된 비례공정 (Proportional Fairness) 스케줄링과 채널이득 값들에 대한 소팅 (Sorting) 개념을 응용하여 제안 하였다. 비례공정 스케줄링은 OFDMA에서 각 사용자들에게 할당될 부반송파 개수를 계산하는데 응용하였으며, 소팅기법은 계산된 부반송파를 실제 사용자들에게 할당 하는데 있어 시스템의 수율을 최대화 하는데 기여하였다. 모의실험을 통해 본 논문에 의해 새로이 제안된 알고리즘이 최대전송선택 알고리즘과 소팅을 하지 않은 경우에 비해 공정성 및 시스템 수율에서 특성이 향상됨을 알 수 있었으며, 또한 제안된 소팅 기법은 기존 사용자간 부반송파의 스와핑을 이용한 반복 순환기법과 비교 시 시스템 평균 수율은 거의 같으나 계산에 따른 부하가 최대 3배까지 개선됨을 알 수 있다.

Key Words : Scheduling, Fairness, Proportional, Sorting, OFDMA

### ABSTRACT

In this paper, the new scheduling algorithm that supports the maximization of system throughput and the proportional fairness among non-real time traffic users is proposed in OFDMA wireless mobile communication systems. The concept of the proposed algorithm is based on the proportional fairness algorithm, which is deployed in 3GPP2, and sorting method. The proportional fairness algorithm is adapted to allocate the number of subcarrier per user. A sorting method is contributed to the maximization of system throughput in the practical allocation of subcarrier per user. Simulation results show that new algorithm had better performance than the max rate rule in case of fairness, higher throughput than the scheduling algorithm without sorting method. Even though the system throughput of the proposed algorithm is almost same with the iteration scheme using subcarrier swapping method between users, the computational time of the former is reduced up to 3 times than the latter.

### I. 서론

향후 휴대인터넷 및 4세대 이동 통신시스템에서의 고속 데이터전송 및 다양한 QoS 지원을 위한 무선접

속 기술로 최근에 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다중경로 페이딩 특성을 갖는 무선채널에서 단일 반송파 방식으로 고속 데이터를 전송 할 경

\* 연세대학교 전기전자공학부 고성능 멀티미디어 네트워크 연구실(hspark@nasla.yonsei.ac.kr)  
논문번호: #KICS2004-08-129, 접수일자: 2004년 8월 2일

우 짧은 심볼 주기로 인한 심볼간 간섭이 심각하게 발생할 수 있으나, 하나의 반송파를 직교성을 갖는 다수의 부반송파로 전송하는 OFDM 방식은 이러한 심볼간 간섭 문제를 해결하면서 또한 다중경로에 의한 주파수 선택적 페이딩 채널 환경에서도 우수한 특성을 갖는다. [1][5]

하나의 OFDM 심볼 구간 동안 다중 사용자 트래픽을 전송하는 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 다중접속방식은 심볼내 부반송파를 각 사용자에게 분배하고 사용자별로 분배된 부반송파를 통해 정보비트를 전송한다. OFDMA 시스템의 하향링크에서 제어가능한 자원은 부반송파와 제한된 전력으로, 사용자들의 요구사항 및 각 부반송파별 채널상태에 따라 시스템의 성능을 최대화 하면서 사용자간 공정성을 지원할 수 있는 효율적인 자원관리 방법이 필요하다.

다중 사용자 OFDM 환경에서 동적 부반송파 할당, 부반송파별 정보비트 및 전력할당의 최적해법으로 초기에 라그랑지안 방법을[1] 이용한 방안이 제안되었으며, 또한 선형계획법[7], 헝가리안 알고리즘[8] 등의 알고리즘들이 제안되었다. 그러나 이들 알고리즘들은 실제 시스템에 적용측면에서 복잡한 계산상의 문제점을 갖고 있으며, 이후 이러한 계산상의 복잡성을 보완한 준 최적화 방안으로 [2],[3],[4]에서는 부반송파간 스와핑 기법을 이용한 반복 순환 기법이 제안되었다.

본 논문에서는 OFDMA 무선 이동 통신시스템에서 시스템의 수율을 최대화 하면서 비실시간 트래픽 사용자들에게 비례적인 공정성을 제공하기에 적합한 새로운 스케줄링 알고리즘을 제안 하였다. 새로이 제안된 알고리즘은 3GPP2에 적용된 비례공정 (Proportional Fairness) 스케줄링과 채널이득 값들에 대한 소팅 (Sorting) 개념을 응용하여 제안 하였다. 비례공정 스케줄링은 OFDMA에서 각 사용자들에게 할당될 부반송파 개수를 계산하는데 응용하였으며, 소팅기법은 계산된 부반송파를 실제 사용자들에게 할당 하는데 있어 시스템의 수율을 최대화하기 위한 방안으로 제안되었다. 모의실험을 통해 본 논문에 의해 새로이 제안된 알고리즘이 최대전송선택 알고리즘과 소팅을 하지 않은 경우에 비해 공정성 및 시스템 수율에서 특성이 향상됨을 알 수 있었으며, 또한 제안된 소팅 기법은 기존의 사용자간 반송파 스와핑을 통한 반복 순환 기법과 비교 시 시스템의 평균 수율은 거의 같으나 계산에 따른 시간이 최대 3배까지 개선됨을 알 수 있었다.

본 논문의 순서는 2장에서는 OFDMA 무선 통신시스템에 대한 시스템 모델을 제시하며, 3장에서는 기존 비례공정 스케줄링 기법과 OFDM에서의 부반송파별 비트로딩 알고리즘을 설명하고, 또한 새로운 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 4장에서 모의실험 결과를 보임으로써 그 성능을 입증하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

다중 사용자 OFDM 무선 통신 시스템의 블록도로 제시한 그림 1.은 주파수 선택적 페이딩 환경에서 사용자들이 보고한 부반송파별 채널특성과 적응 변조기법을 이용한 자원관리 체계를 제시한다. 다중 사용자 OFDM은 K개의 사용자가 N개의 부반송파를 공유하며, 부반송파들에 대한 사용자들의 채널이득은 사용자들이 스케줄링 주기마다 별도의 채널 또는 메시지를 통해 기지국에 보고하여 시스템에서 이미 알고 있는 것으로 가정하였다. 이 모델에서 스케줄링 주기는 OFDM 프레임 단위로 이루어지며, 이 구간 내에서 사용자에 대한 채널이득 변동은 거의 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

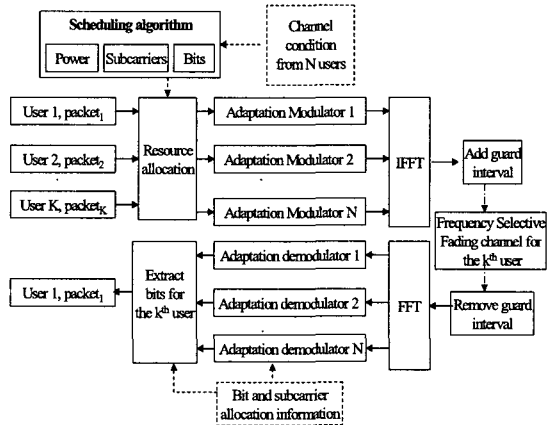


그림 1. OFDMA 시스템 블록도

K개의 사용자부터 패킷이 입력되면 스케줄링 알고리즘은 각 사용자로부터 수신한 채널상태 정보를 바탕으로 부반송파를 할당하며, 할당된 부반송파에 대해서는 목표 수신 BER (Bit Error Rate), 할당 전력, 채널이득을 이용하여 해당 변조방식에 따라 비트가 할당된다. 적응변조기를 거친 심볼은 IFFT에 의해 시간 영역에서 샘플로 변화되어 무선 채널로 전송된다.

사용자 수신부에서는 시스템으로부터 별도의 제어 채널을 통해 수신한 할당 부반송파와 변조방식 정보를 이용하여 해당 데이터를 수신한다.

### III. 스케줄링 알고리즘

#### 1. 비례공정 알고리즘

비실시간 트래픽에 대한 스케줄링 기법으로 3GPP2의 CDMA 1x EV-DO 시스템에 도입된 비례공정 스케줄링 기법은 사용자의 채널정보와 이전에 서비스 받은 정보를 이용하여 매 타임 슬롯 주기마다 서비스 받을 사용자를 선택하는 기법으로 아래와 같이 정의된다.

$$k^*[n] = \arg \max_k (R_k[n] / \tilde{R}_k[n]) \quad (1)$$

여기서  $R_k[n]$ 은  $n$ 번째 타임 슬롯에서  $k$ 번째 사용자의 받을 수 있는 최대 전송속도를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_k[n] = & (1-a) \cdot \tilde{R}_k[n-1] \\ & + a \cdot R_k[n] \delta[k^*[n] - k] \end{aligned} \quad (2)$$

$\delta[\cdot]$ 는 dirac-delta 함수이며,  $a$ 는 시상수로 0.001 정도의 값을 갖는다. 이 알고리즘은 시스템의 최대 성능을 지원하는 최대전송속도 알고리즘보다는 시스템 성능이 떨어지지만 최대전송 속도 알고리즘이 갖는 공정성 문제를 해결한다는 장점을 갖고 있다. 본 논문에서는 위의 비례공정 스케줄링 기법을  $K$ 개의 사용자와  $N$ 개의 부반송파로 구성된 OFDMA 무선 통신 시스템 환경에서 사용자별 부반송파 개수를 결정하는데 응용코자 한다.

#### 2. 부반송파 비트 로딩알고리즘

OFDM 시스템에서  $n$ 번째 부반송파에 의해 전달되는 비트 수를 할당하는 Chow's 알고리즘을 다음과 같다.[9]

$$b_n = \log_2 \left( 1 + \frac{p_n g_n}{\sigma^2 \Gamma} \right) \quad (3)$$

여기서  $p_n$ 은 전체 전력  $P$ 를 부반송파 수  $N$ 으로 나눈 값으로 모든 부반송파에 동일 값을 할당한다.  $g_n$ 은  $n$ 번째 부반송파에 대한 채널이득을 나타내며,  $\sigma^2$ 은 백색가우시안 잡음의 분산 값이다.  $\Gamma$ 는 목표 수신 BER과 채널코딩 함수로 표현되는 SNR 갭 (Gap)으로 다음과 같이 정의된다. [9]

$$\Gamma = \frac{-\ln(5BER_{target})}{1.5} \quad (4)$$

이 알고리즘은 사용자별로 할당된 부반송파에 실제 전송 가능한 비트 수를 도출 하는 것으로 이 값에 따라 해당 변조모드가 적용된다.

#### 3. 부반송파 할당 알고리즘

비실시간 트래픽을 갖는  $K$ 개의 사용자와  $N$ 개의 부반송파 및 제한된 전력 자원을 갖는 OFDMA 무선 이동통신 시스템에서 제안된 스케줄링 기법은 사용자 간 공정성을 지원하면서 시스템의 성능을 최대화하기 위해 다음의 식(5)와 같이 사용자별로 할당할 부반송파의 개수 계산에 비례공정 개념을 응용하였다.

$$\phi_k[t] = (N \times \zeta) \times \left( \varphi_k[t] / \sum_{k=1, \dots, K} \varphi_k[t] \right) \quad (5)$$

$$\hat{\phi}_k[t] = \text{round}(\phi_k[t]) \quad (6)$$

여기서  $\phi_k[t]$ 는  $k$ 번째 사용자에게 할당 할 부반송파의 개수이며,  $\zeta$ 는 전체 부반송파 자원 중에서 비실시간 트래픽에 할당된 비율을 나타내는 변수로  $(N \times \zeta)$ 는 스케줄링 구간동안 비실시간 트래픽에 할당 가능한 부반송파의 전체 개수를 나타낸다.  $\varphi_k[t]$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\varphi_k[t] = \frac{\bar{\eta}_k[t]}{\pi_k[t]} \quad (7)$$

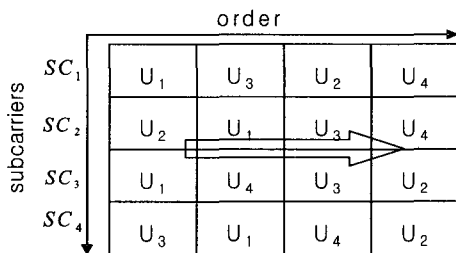
$$\bar{\eta}_k[t] = \frac{1}{N} \sum_{n=1, \dots, N} g_k[n] \quad (8)$$

$$\pi_k[t] = (1-a)\pi_k[t-2] + a \frac{\alpha_k[t-1]}{\beta[t-1]} \quad (9)$$

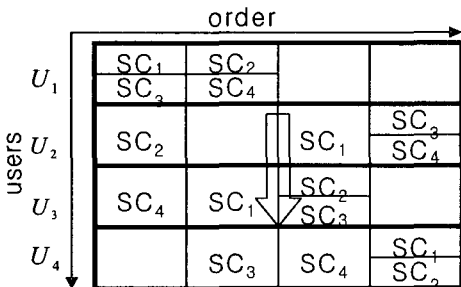
$\bar{\eta}_k[t]$ 는 사용자  $k$ 의 부반송파에 대한 평균 채널 이득을 나타내며,  $\pi_k[t]$ 는 이전 스케줄링 구간까지 전체 비트 수에 대한 사용자  $k$ 가 전송한 비트 수의 비를 나타내는 것으로  $\beta$ 는  $[t-1]$  스케줄링 구간에서 시스템이 전송한 전체 비트 수를 나타내며,  $\alpha_k$ 는  $[t-1]$ 구간에서 사용자  $k$ 가 서비스 받은 비트의 총 수를 의미한다.

제안된 알고리즘에 의해 계산된 사용자별 부반송파 개수를 실제 부반송파에 할당하기위해 채널이득 행렬에 대한 소팅 (sorting) 기법을 또한 제안하였다. 이 소팅 기법은 사용자로부터 수신한 채널이득 행렬을 부반송파 기준과 사용자 기준의 순차적 소팅을 통해 실제 부반송파를 할당 시 시스템의 성능을 향상시키

는데 기여한다. 제안한 소팅 기법을 4명의 사용자와 4개의 부반송파를 이용해 그림 2.에서 간략히 설명한다. 각 부반송파에 대해 사용자의 채널이득 값을 내림차순 수평 소팅 (그림 2.1)을 수행 후 이 결과를 이용하여 각 사용자별로 수직 소팅 (그림 2.2)을 수행한다. 그림 2.2의 행렬에서 임의의 사용자에 대한 열 방향 정보는 그림 2.1의 부반송파별 정보 중 첫 번째 열부터 정보요소로 사용자가 있는 부반송파들을 다시 채널이득에 대해 내림차순으로 소팅을 수행 후 해당 사용자의 열 정보로 정하며, 그림 2.1의 열 정보에 없는 사용자는 그림 2.2의 해당 사용자의 열 정보로 공란을 둔다. 식(6)에 의해 사용자별로 할당된 부반송파 개수를 그림 2.2의 열 란에 따라 할당한다. 예로서 각 사용자별로 부반송파가 하나씩 할당되면  $U_1$ 은  $SC_1$ ,  $U_2$ 는  $SC_2$ ,  $U_3$ 는  $SC_4$ ,  $U_4$ 는  $SC_3$ 가 할당된다. 하나의 부반송파는 오로지 한 사용자에게만 할당 가능하며, 2명 이상의 사용자가 할당 될 수 없다. 사용자별로 그림 2.의 소팅 표에 따라 할당되지 않은 부반송파들이 다음 열의 정보로부터 할당 된다. 본 논문에서 제안한 소팅 방법을 적용한 방식과 [3]에서 제안한 사용자간 부반송파 스와핑 기법을 이용한 반복 순환 방식을 모의실험을 통해 비교한 결과 시스템의 평균수율은 거의 같으나 제안된 방식이 계산에 따른 부하가 최대 3배나 개선됨을 알 수 있었다.



2.1 부반송파별 사용자 소팅



2.2 사용자별 부반송파 소팅

그림 2. 스케줄링을 위한 부반송파 소팅

#### IV. 모의실험 환경 및 결과

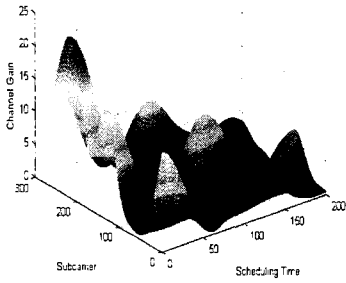
시스템의 상하향 링크는 시분할 방식을 적용하였으며, 프레임 길이는 5ms로 하향링크는 3ms, 상향링크는 2ms로 구성되었다. 하향링크는 25개의 심볼로 구성되었으며, 하나의 프레임 내에서 각 부반송파에 대한 사용자의 채널 이득에 대한 변동은 거의 없는 것으로 가정하였다. 또한 시스템의 하향링크를 통해 15명의 사용자에게 보낼 비실시간 트래픽이 사용자별 버퍼에 항상 저장되어 있다고 가정하였다. 본 논문에서 모의실험을 위한 기타변수들은 값은 표 1과 같이 정의하였다. 채널이득은 Jake's 모델을 이용하였으며, 다중경로 개수는 2에서 6사이 값을, 사용자의 속도는 시속 0에서 50km사이 값을 임의로 선택 할 수 있도록 하였다.

위의 Jake's 모델의 예로 2Khz의 반송파 주파수에 3개의 다중경로 페이딩과 시속 40km의 속도를 갖는 사용자와 5개의 다중경로 페이딩과 시속 50km의 속도를 갖는 사용자들의 채널이득 분포는 그림 3.과 같다. 다중경로 페이딩 현상과 속도에 따른 도플러 효과로 인해 부반송파들의 채널이득이 스케줄링 주기마다 변화됨을 볼 수 있다.

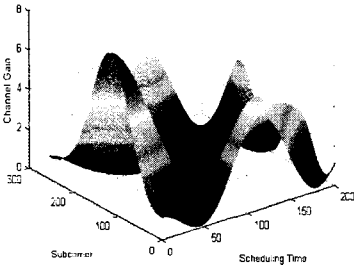
표 1. 모의실험을 위한 변수

항목	값
반송파 주파수	2GHz
사용자 개수 (K)	15
부반송파 개수 (N)	256
하향링크 프레임 길이	3ms
프레임내 심볼의 개수	25
수신단의 목표 BER	$10^{-5}$
스케줄링 주기	5ms
채널 모델	Jake's model

새로이 제안된 소팅 기법을 적용한 비례공정 부반송파 할당 알고리즘을 사용하였을 경우의 시스템 수율에 대한 성능평가를 그림 4.에 나타내었다. 기존 알고리즘과의 비교를 위해 최대전송선택 알고리즘, 소팅 기법이 적용 되지 않은 알고리즘 및 사용자간 부반송파의 스와핑을 통한 반복 순환 알고리즘을 적용 했을 경우의 시스템 수율에 대한 성능을 같이 표시하였다. 제안된 알고리즘이 사용자간의 공정성을 고려하지 않은 최대 전송선택 기법과 비교할 경우는 수율이 최대



(가) 다중경로: 3, 속도: 40km/h



(나) 다중경로: 5, 속도: 50km/h  
그림 3. 사용자의 채널이득 분포

3배정도 낮지만, 소팅을 하지 않은 경우와 비교 했을 때는 최대 2배의 수율 향상을 가져왔으며, 또한 스와핑을 통한 반복 순환 알고리즘과 비교 할 경우는 거의 같다. 또한 그림 5.에서 제안된 소팅 알고리즘을 사용할 경우 부반송과 간 스와핑을 통한 반복 순환 알고리즘에 비해 계산시간이 최대 3배 감소되었음을 알 수 있다. 사용자별 평균 수율과 할당된 부반송과 개수에 대한 분포는 그림 6.와 같다. 최대 전송 스케줄링 기법을 적용하여 부반송과를 할당 시 사용자 2, 8, 10, 13에서 수율이 집중되고 3, 7, 12, 14 사용자는 거의 서비스 되지 않는 공정성 문제가 심각하나, 제안된 알고리즘을 적용할 경우 모든 사용자를 서비스하며, 최대전송선택 기법과 소팅을 하지 않은 방법 보다 우수한 특성을 갖는다.

### V. 결론

고속 데이터 전송을 위한 OFDMA 무선 이동통신 시스템에서 비실시간 트래픽을 갖는 사용자들에게 비례적인 공정성을 지원하면서 시스템의 효율을 최대화

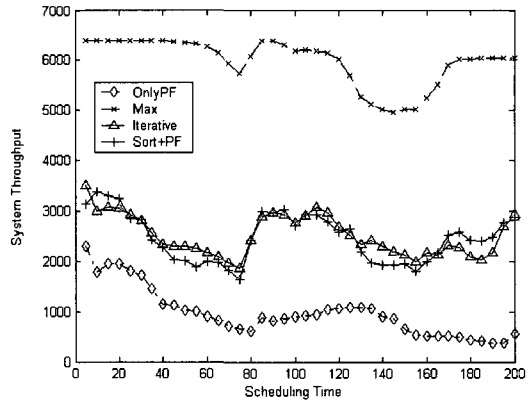


그림 4. 시스템 수율

하기 위해 부반송과 자원들을 사용자들에 할당하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 먼저 시스템 수율을 최대화하기 위해 부반송과별 각 사용자의 채널 이득 행렬에 대해 부반송과를 기준으로 한 사용자의 소팅 및 사용자를 기준으로 한 부반송과의 소팅을 수행하고, 사용자별 비례적 공정성을 위해 3GPP2에 적용된 비례공정 스케줄링 기법을 응용하여 각 사용자에 할당될 부반송과의 개수를 계산하는 알고리즘을 제안하였다. 이 제안된 두개의 기법을 적용한 알고리즘을 모의실험을 통해 최대전송속도 기법과 소팅을 적용하지 않은 기법에 비해 우수한 특성을 보임을 알 수 있었으며, 또한 [3]에서 제안한 부반송과간 스와핑을 통한 반복 순환 기법에 비해 계산 시간이 최대 3배나 감소됨을 알 수 있었다. 향후 비실시간 트래픽뿐만 아니라 다양한 클래스의 트래픽에 대해 비례적인 차별화 서비스를 지원 할 수 있도록 알고리즘에 대한 개선이 필요하며 이에 대한 연구를 진행중이다.

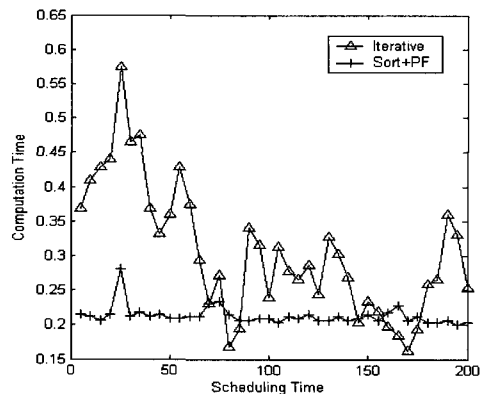
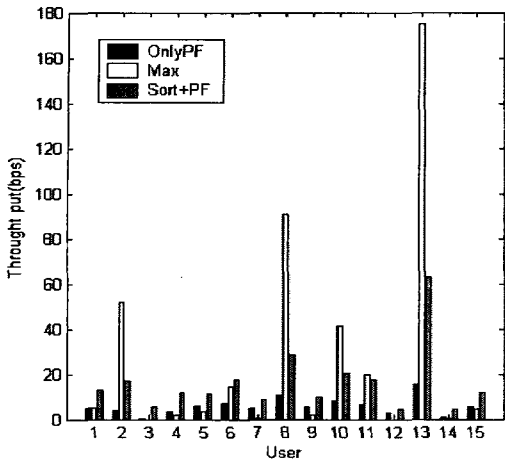
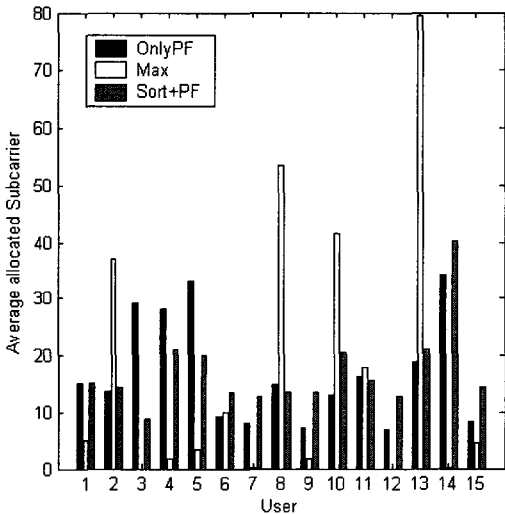


그림 5. 스케줄링 구간별 계산 시간



(가) 사용자별 평균수율



(나) 사용자별 평균 부반송파 수

그림 6. 사용자별 평균 수율 및 할당된 부반송파의 개수

[3] C. Y. Wong, C. Y. Tsui, R. S. Cheng, and K. B. Letaief, "A real-time subcarrier allocation scheme for multiple access downlink OFDM transmission," *Proc. VTC 1999*, vol. 2, pp. 1124-1128, 1999.

[4] M. Ergen, S. Coleri, and P. Varaiya, "QoS Aware Adaptive Resource Allocation Techniques for Fair Scheduling in OFDMA BAsed Broadband Wireless Access Systems," *IEEE Trans. On Broadcasting*, vol. 49, pp. 362-370, Dec. 2003.

[5] 조용수, "OFDM 기술동향," *Telecommunication Review*, 12권 4호, pp. 466-478, 2002

[6] D. Kivanc, G. Li, and H. Liu, "Computationally Efficient Bandwidth Allocation and Power Control for OFDMA," *IEEE Trans. On Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, Nov. 2003.

[7] I. Kim, H. L. Lee, B. kim, and Y. H. Lee, "On the use of linear programming for dynamic subchannel and bit allocation in multiuser OFDM," in *IEEE GLOBECOM'01*, vol. 6, pp. 3648-3652, 2001.

[8] H. W. Khun, "The Hungarian method for the assignment problem," *Nav. Res. Logist. Quart.*, vol. 2, pp. 83-97, 1955.

[9] P.S. CHow, "Bandwidth optimized digital transmission techniques for spectrally shaped channels with impulse noise," Ph. D. Thesis, Stanford University, 1993

참고 문헌

[1] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit and Power Allocation," *IEEE J. Select. Area Commun.*, vol. 17, pp. 1747-1758, Oct. 1999.

[2] S. Pietrzyk and G. J. M. Janssen, "Multiuser subcarrier allocation for QoS provision in the OFDMA systems," *Proc. VTC 2002*, vol. 2, pp. 1077-1081, 2002.

박 효 순 (Hyosoon Park)

정회원



1989년 2월 : 경북대학교 전자공  
학과 졸업

1991년 2월 : 경북대학교 전자공  
학과 석사

1991년~2001년 : 삼성전자(주) 책  
임연구원

2001년 2월~현재 : 연세대학교  
전기전자공학부 박사과정

<관심분야> Resource management, Scheduling  
Algorithm, Wireless QoS, Mobility Management

김 준 석 (Junseok Kim)

정회원



1997년 2월 : 건국대학교 전자공  
학과 졸업

1997년~2003년 : 삼성전자(주) 선  
임연구원

2004년 2월~현재 : 연세대학교  
전기전자공학부 석사과정

<관심분야> Network Management, Scheduling  
Algorithm.

이 재 용 (Jaiyong Lee)

정회원



1977년 : 연세대학교 전자공학과  
졸업

1984년 : 미국 Iowa 주립대 컴퓨  
터공학 석사

1987년 : 미국 Iowa 주립대 컴퓨  
터공학 박사

1977년 ~ 1982년 : 국방과학연구소 연구원

1987년 ~ 1994년 : 포항공과대학교 전자계산학과 부  
교수

1994.8 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학부 교수

<관심분야> QoS Management/Protocol, 차세대 이동  
통신망 프로토콜 : MAC, Mobility Management,  
WTCP, Sensor Network