

# OFDMA 시스템에서 Elastic 서비스를 위한 Opportunistic 스케줄링 기법

준회원 권 정 안\*, 종신회원 이 장 원\*

## Opportunistic Scheduling Schemes for Elastic Services in OFDMA Systems

Jeong-Ahn Kwon\* Associate Member, Jang-Won Lee\* Lifelong Member

### 요 약

본 논문에서는 OFDMA를 이용하는 시스템에서의 elastic 서비스를 위한 공정성을 고려한 opportunistic 스케줄링 기법에 대하여 연구한다. 본 논문에서는 각 유저의 만족도를 유틸리티로 정의한 후 네트워크 유틸리티 극대화 기법을 이용한다. 이러한 유틸리티는 각 유저가 이용하는 서비스에 따라 서로 다르게 정의할 수 있으며 elastic 서비스의 경우에는 평균 전송률이 높을수록 유저의 만족도가 높아지게 된다. 이를 반영하기 위하여 각 유저의 유틸리티를 평균 전송률에 대한 함수로 정의한다. 또한 각 유저 사이의 공평한 자원 배분을 위한 조건을 유저들의 유틸리티를 이용하여 정의하고 이를 만족하는 동시에 각 유저의 유틸리티의 합으로 정의되는 네트워크 유틸리티를 극대화 하기위한 opportunistic 스케줄링 기법을 연구한다. 본 논문에서는 각각의 공정성 조건에 대한 opportunistic 스케줄링 문제를 최적화 문제로 정의하고 이를 dual 기법과 stochastic sub-gradient 기법으로 풀어 스케줄링 기법을 구현하도록 한다.

Key Words : OFDMA, Opportunistic scheduling, Network utility maximization, Fairness

### ABSTRACT

In this paper, we provide opportunistic scheduling schemes for elastic services in OFDMA systems with fairness constraints for each user. We adopt the network utility maximization framework in which a utility function is defined for each user to represent its level of satisfaction to the service. Since we consider elastic services whose degree of satisfaction depends on its average data rate, we define the utility function of each user as a function of its average data rate. In addition, for fair resource allocation among users, we define fairness requirements of each user by using utility functions. We first formulate an optimization problem for each fairness requirement that aim at maximizing network utility, which is defined as the sum of utilities of users. We then develop an opportunistic scheduling scheme for each fairness requirement by solving the problem using a dual approach and a stochastic sub-gradient algorithm.

※ “이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-313-D00522).”

\* 연세대학교 전기전자공학과 통신망 연구실 (pooheup@yonsei.ac.kr), (jangwon@yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-09-410, 접수일자 : 2008년 9월 19일, 최종논문접수일자 : 2008년 11월 25일

## I. 서 론

최근 들어 광대역 무선 통신 시스템에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 일부는 이미 상용화 단계에 이르렀다. 이러한 시스템들의 가장 큰 특징은 무선망을 통하여 기존의 유선망과 비슷한 수준의 서비스를 제공하는 것에 그 목표를 두고 있다는 점이다. 이를 실현하기 위한 주요 기술로서 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 와 opportunistic 스케줄링이 주목을 받고 있다.

OFDMA는 최근에 각광받고 있는 다중 접속 기법으로서 3GPP LTE나 IEEE 802.16등에 적용되고 있다. 이는 주어진 대역폭을 여러 개의 sub-carrier로 분할하여 데이터를 전송하는 방식으로서 sub-carrier들을 각각 다른 유저에게 자유롭게 할당할 수 있다. 이를 이용하면, 각 유저의 각 sub-carrier에서의 채널 상태에 따라 자원을 할당할 수 있어 이와 함께 opportunistic 스케줄링을 적용한다면 보다 높은 이득을 얻을 수 있다.

Opportunistic 스케줄링이란 상대적으로 좋은 채널 상태를 갖는 유저에게 자원을 할당해 주는 기법을 말한다<sup>[1][3]</sup>. 무선 통신에서 각 유저가 겪는 채널 상태는 시간에 따라 변하는 특징을 가지고 있다. 이를 이용하여, 공유하고 있는 무선 자원을 현재의 채널 상태가 상대적으로 좋은 유저에게 할당해 줌으로써 보다 더 높은 성능을 얻을 수 있다.

하지만 단순히 채널 상태가 좋은 유저에게 자원을 할당하는 것은 불공정한 자원 배분을 야기할 수 있다. 예를 들어 기지국에 가까이 있는, 상대적으로 채널 상태가 좋은 유저에게 많은 자원이 할당되고 기지국에서 멀리 있는, 상대적으로 채널 상태가 나쁜 유저에게는 적은 양의 자원이 할당될 수 있다. 따라서 여러 유저에게 자원이 공평하게 배분될 수 있도록 만들어 주어야 하며 이에 최근 여러 연구에서 효율적인 자원할당 뿐만 아니라 공평한 자원 할당도 중요하게 고려가 되고 있다.

본 논문에서는 OFDMA 시스템에서 효율성과 공평성을 고려한 opportunistic 스케줄링을 통한 자원 할당 기법을 네트워크 유틸리티 최대화 기법을 이용하여 연구할 것이다. 유틸리티란 각 유저가 얻는 만족도를 뜻하는 것으로 일반적으로 이는 유저가 할당 받은 자원에 대한 함수로 표현된다. 유저가 할당 받은 자원의 양이 많을수록 만족도가 증가하겠지만, 정비례 관계에 있는 것은 아니기 때문에 이를

유틸리티 함수를 이용하여 나타낸다. 본 기법의 목적은 주어진 조건하에서 각 유저의 유틸리티의 합으로 정의되는 시스템 유틸리티를 최대화하는 것이다.

이러한 유틸리티와 공평성을 위한 조건은 유저가 이용하는 서비스에 따라 서로 다를 수 있다. 특히 대용량의 파일 등을 전송하는 elastic 서비스의 경우 시스템을 통하여 얻는 평균 전송률이 높을수록 유저의 만족도가 높게 된다. 따라서 본 논문에서는 각 유저의 유틸리티를 각 유저가 얻는 평균 전송률에 대한 함수로 정의한다. 이 경우, 각 유저는 자원을 불규칙적으로 할당 받더라도 일정량 이상의 평균 전송률을 보장 받으면 된다. 또한 각 유저의 공평성 조건을 이러한 유틸리티를 이용하여 정의한다. 본 논문에서는 elastic 서비스의 특징을 고려하여 각 유저가 받아야 할 최소한의 유틸리티를 각 유저의 공평성 조건으로 정의한다. 이는 각 유저가 자신이 필요로 하는 양의 유틸리티를 얻을 수 있기 때문에 보다 정확히 유저의 만족도를 충족시켜 줄 수 있다. 하지만, 이 경우 시스템이 지원 할 수 없는 공평성 조건이 발생할 수 있어 상위 계층에서의 admission control이 필요하다.

현재 OFDMA 시스템에서 자원할당에 관한 다양한 연구가 되어있다<sup>[4]-[8]</sup>. 각 시간슬롯에서 전송률을 최대화하는 기법들은 [4]-[6]에서 연구되었다. 이들은 각 유저의 공평성을 고려하여 스케줄링을 하였지만, 시간상에서의 스케줄링이 아닌 하나의 시간 슬롯에서의 자원할당만을 고려하였기 때문에 상대적으로 비효율적인 자원할당이 이루어진다. 또한 전송률의 유틸리티 측면이 아닌 전송률 자체를 증가시키는 것에 대하여 연구하여 유저의 만족도를 효과적으로 반영하지 못한다. 또한 [7]은 각 유저가 얻는 전송률에 대한 유틸리티를 최대화 하는 방안에 대하여 연구하였지만, 공평성에 대한 조건을 고려하지 않고 있기 때문에 불공평한 자원할당이 될 수가 있다. 마지막으로 [8]은 여러 시스템에서 많이 쓰이는 proportional fair (PF) 스케줄링을 OFDMA를 사용하는 시스템에 적용하는 방안에 대하여 논하고 있다. 이는 손쉽게 구현 가능한 효율적인 알고리즘이지만, 각 유저의 서비스에 따른 공평성 조건을 변경할 수 없기 때문에 보다 융통성 있는 스케줄링 기법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 각 유저의 공평성에 대한 조건을 고려한 opportunistic 스케줄링 기법에 대한 연구를 할 것이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 본

논문에서 고려할 시스템 모델에 대하여 설명한다. III장에서는 스케줄링 기법을 설명하며 IV장에서는 이에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 마지막으로 V장에서는 본 논문에 대한 결론과 함께 앞으로 진행하여야 할 부분에 대하여 정리하도록 한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 OFDMA를 사용하는 셀룰러 시스템에서 하향링크만을 고려하도록 하며 하나의 셀만이 존재하는 환경을 가정한다. 또한 시스템의 시간이 슬롯화 되어 있어 각 시간 슬롯마다 기지국이 각 유저에게 sub-carrier와 파워를 스케줄해주는 시스템을 고려한다. 하나의 셀 안에는  $N$ 명의 유저가 존재하며  $M$ 개의 sub-carrier가 존재한다. 또한 모든 유저는 언제나 전송하여야 할 데이터들을 가지고 있다고 가정한다.

무선 시스템에서 유저가 연계 되는 전송률은 각 유저의 채널 상태와 밀접한 관련이 있다. 특히 OFDMA 시스템에서는 여러 개의 sub-carrier가 존재하며 각 sub-carrier마다 채널 상태가 서로 다르다. 이러한 각 유저의 각 sub-carrier에서의 채널 상태는 시간에 따라 변하며 이는 stochastic process로 모델링 할 수 있다. 이러한 채널 상태는 분석의 편의를 위하여 stationary 특성을 갖으며 하나의 시간 슬롯에서는 변하지 않는다고 가정한다. 따라서 하나의 시간 슬롯에서 각 sub-carrier마다 각 유저가 갖는 채널 상태는 해당 유저가 가질 수 있는 몇 가지 채널 상태 단계 중 하나가 될 것이다. 하나의 시간 슬롯에서 셀 내의 모든 유저의 채널 상태의 조합을 하나의 시스템 채널 상태  $s$ 라 정의 하며 이런 시스템 채널 상태의 집합을  $\bar{S} = \{1, 2, \dots, S\}$ 로 나타내도록 한다.1) 따라서 시스템 채널 상태로서 각 유저의 각 sub-carrier에서의 채널 상태를 표현할 수가 있다. 또한 시스템이 시스템 채널 상태  $s$ 에 있을 확률을  $\pi_s$ 라 한다.

논문 [9]와 [10]의 연구 결과에 따르면 sub-carrier 할당 후, power control을 수행해 주는 것은 수행하지 않는 것과 큰 성능차이를 보이지 않는다. 이는 sub-carrier 할당 과정에서 이미 한 번의 최적화가 이루어지기 때문이다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 기지국에서 데이터의 전송 시 사용되는 최대 파워

는 고정되어 있고 기지국이 사용할 수 있는 최대 파워를 각 sub-carrier에 동일하게 할당한다고 가정한다. 따라서 본 논문에서는 각 유저의 sub-carrier의 채널 상태에 따른 sub-carrier 할당만을 고려할 것이다.

본 논문에서 다루는 시스템은 OFDMA 환경에서 하나의 셀만을 고려하기 때문에 각 유저가 겪게 되는 채널 상태는 간섭이 존재하지 않는다. 따라서 단지 수신한 신호의 파워와 노이즈 파워의 비 즉, SNR (Signal to Noise Ratio)에 의해 채널 상태를 나타낼 수 있다.  $P_t$ 는 기지국에서 사용할 수 있는 전체 파워라 하고,  $G_{ijs}$ 는 시스템 채널 상태  $s$ 하에서 유저  $i$ 가 sub-carrier  $j$ 를 이용할 경우의 채널 gain,  $N_{oi}$ 는 데이터의 수신 과정에서 발생하는 노이즈의 파워로 정의한다. 이 경우 채널 상태  $s$ 하에서 유저  $i$ 에게 sub-carrier  $j$ 가 할당되었을 경우의 SNR,  $\gamma_{ijs}$ 는

$$\gamma_{is} = \frac{P_t * G_{ijs}}{N_{oi}} \quad (2.1)$$

이다. 본 논문에서는 각 유저가 각 sub-carrier에서의 SNR을 측정 후 기지국에 전송을 해주어 기지국이 알고 있다고 가정을 한다. 또한 전송률을 나타내 주는 SNR에 대한 함수를  $g$ 라 하면, 채널 상태  $s$ 하에서 유저  $i$ 에게 sub-carrier  $j$ 가 할당되었을 경우의 전송률  $r_{ijs}$ 는

$$r_{ijs} = g(\gamma_{ijs}) \quad (2.2)$$

로 나타내어진다. 본 논문에서는 전송 파워가 고정되어 있기 때문에, 전송률은 SNR 즉, 채널 상태만을 변수로 갖는 함수로 표현되며 이는 기지국에서 쉽게 구할 수 있다.

다음으로는 각 sub-carrier 할당을 나타내 주는 변수  $a_{ijs}$ 를 정의하도록 한다. 이는 채널 상태  $s$ 에서 유저  $i$ 에게 sub-carrier  $j$ 가 할당될 확률을 의미한다. 따라서 본 값은 0에서 1 사이의 실수를 갖게 된다. 이에 따라 시스템 채널 상태  $s$ 에서 유저  $i$ 가 얻는 평균 전송률은

$$\sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs} \quad (2.3)$$

이며, 유저  $i$ 가 연계 되는 평균 전송률은

$$\sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs} \quad (2.4)$$

1) 이러한 가정이 가능한 점은 채널 상태는 연속적인 특성을 지니지만, 실제 시스템에서 유저의 채널 상태는 quantization을 통하여 정해진 몇 단계의 level set 중 하나의 level로 대응되기 때문이다.

로 나타낼 수 있다. 또한 하나의 sub-carrier가 각 유저에게 할당될 수 있는 확률의 합은 1보다 작아야 하므로

$$\sum_{i=1}^N a_{ijs} \leq 1 \quad (2.5)$$

가 각  $j$ 와  $s$ 에 대하여 성립하여야 한다.

마지막으로, 본 논문에서 각 유저  $i$ 의 만족도 즉, 유틸리티 ( $U_i$ )는 각 유저가 할당받은 자원을 통하여 얻게 되는 평균 전송률에 따른 함수라 정의하며 이는 유저의 평균 전송률에 대하여 strictly concave 함수라 가정한다. 따라서 유저  $i$ 의 평균 전송률에 대한 유틸리티는

$$U_i\left(\sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs}\right) \quad (2.6)$$

로 나타내 진다. 또한 각 유저  $i$ 의 공평성 조건인 할당 받아야 할 최소한의 유틸리티를  $C_i$ 라고 정의하고 이는

$$U_i\left(\sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs}\right) \geq C_i \quad (2.7)$$

의 조건을 만족시켜 주어야 한다.

이러한 유틸리티는 각 유저의 만족도를 반영하기 위하여 도입된 것으로서, 일반적으로 유저의 만족도는 할당받은 전송률이 증가할수록 전송률의 증가량에 비하여 만족도의 증가량이 감소한다. 따라서

$$U(x) = \log(x) \quad (2.8)$$

와 같은 concave 형태의 유틸리티 함수를 많이 사용한다.

특히 유틸리티 함수를 식 (2.8)의 log 함수를 사용하고, 각 유저의 공평성 조건을 별도로 설정하지 않은 상태에서 (즉, 식 (2.7)의  $C_i$  값이 0인 경우) 시스템 유틸리티를 최대화 시키는 스케줄링 기법을 PF 스케줄링 기법이라 한다<sup>[11]</sup>. 따라서 본 논문에서 제안하는 스케줄링 기법은 PF 스케줄링 기법을 포함한 보다 일반적인 기법이다.

### III. Opportunistic 스케줄링 기법

본 장에서는 앞에서 말한 각 유저가 할당받아야 할 최소한의 유틸리티가 정의되어 있는 경우의 스케줄링 기법을 논하도록 한다. 이 경우 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \sum_{i=1}^N U_i\left(\sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs}\right) \\ & \text{subject to} U_i\left(\sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs}\right) \geq C_i, \forall i \\ & \sum_{i=1}^N a_{ijs} \leq 1, \forall j, s \\ & 0 \leq a_{ijs} \leq 1, \forall i, j, s \end{aligned} \quad (3.1)$$

이는 각 유저의 유틸리티가 유저가 얻은 평균 전송률에 대한 함수로 정의 되고 이의 최소값을 공평성 요구로 갖는 시스템 유틸리티를 최대화하는 문제가 된다.

유틸리티 함수는 유저의 평균 전송률에 대하여 strictly concave 함수라 가정하였기 때문에 만약 시스템 채널 상태 확률  $\pi_s$ 를 알 수 있다면, 본 문제는 deterministic convex 최적화 문제로서 쉽게 풀 수 있다. 하지만 실제 시스템에서는 이 값을 알기가 어렵기 때문에 본 논문에서는 채널 상태 확률  $\pi_s$ 에 대한 정보가 없는 상태에서 문제를 풀 수 있는 기법을 개발할 것이다. 이를 위하여 유틸리티 함수 내에 존재하는 시스템 채널 상태 확률  $\pi_s$ 를 외부로 나오게 하는 과정이 필요하며 이를 위하여 유저의 평균 전송률  $x_i$ 를 정의하여 위의 문제를 다음과 같이 재정의 한다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \sum_{i=1}^N U_i(x_i) \\ & \text{subject to} U_i(x_i) \geq C_i, \forall i \\ & x_i \leq \sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs}, \forall i \\ & \sum_{i=1}^N a_{ijs} \leq 1, \forall j, s \\ & 0 \leq a_{ijs} \leq 1, \forall i, j, s \\ & x_i \geq 0, \forall i. \end{aligned} \quad (3.2)$$

하지만 아직  $\pi_s$ 가 문제 상에 존재하며 이를 해결하기 위하여 위의 문제를 dual 문제를 통하여 풀도록 한다. 따라서 먼저 위 문제에 대한 Lagrange 함수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L(\bar{x}, \bar{a}, \bar{\mu}, \bar{\lambda}) &= \sum_{i=1}^N U_i(x_i) + \sum_{i=1}^N \mu_i (U_i(x_i) - C_i) \\ &+ \sum_{i=1}^N \lambda_i \left( \sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs} - x_i \right) \\ &= \sum_{i=1}^N U_i(x_i) + \sum_{i=1}^N \mu_i U_i(x_i) - \sum_{i=1}^N \mu_i C_i \\ &- \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i + \sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs} \end{aligned} \quad (3.3)$$

여기에서,  $\bar{x}$ 와  $\bar{a}$ 는 각각  $x_i$ 와  $a_{ijs}$ 의 벡터이며,  $\bar{\mu}$ 와  $\bar{\lambda}$ 는 dual 변수  $\mu_i$ 와  $\lambda_i$ 의 벡터이다. 따라서 dual

문제는

$$\min_{\bar{\mu}, \bar{\lambda} \geq 0} F(\bar{\mu}, \bar{\lambda}) \quad (3.4)$$

으로 정의 되고, 이 때

$$F(\bar{\mu}, \bar{\lambda}) = \max_{\bar{a}, \bar{x} \in \Theta} L(\bar{x}, \bar{a}, \bar{\mu}, \bar{\lambda}) \quad (3.5)$$

이며 여기에서,

$$\Theta = \{ \bar{a}, \bar{x} \mid \sum_{i=1}^N a_{ijs} \leq 1, \forall j, s, \quad 0 \leq a_{ijs} \leq 1, \forall i, j, s, x_i \geq 0, \forall i \} \quad (3.6)$$

로 정의 된다. 식 (3.4)를 풀기 위해서는 그에 앞서 식 (3.5)를 풀어야 한다. 이때 각각  $x_i$ 에 관한 항과  $a_{ijs}$ 에 관한 항을 분리하여

$$L_1(\bar{x}, \bar{\mu}, \bar{\lambda}) = \sum_{i=1}^N U_i(x_i) + \sum_{i=1}^N \mu_i U_i(x_i) - \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i \quad (3.7)$$

$$L_2(\bar{a}, \bar{\mu}, \bar{\lambda}) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs}$$

이라 정의하면 식 (3.3)은

$$L(\bar{x}, \bar{a}, \bar{\mu}, \bar{\lambda}) = L_1(\bar{x}, \bar{\mu}, \bar{\lambda}) + L_2(\bar{a}, \bar{\lambda}) - \sum_{i=1}^N \mu_i C_i \quad (3.8)$$

이라 할 수 있다. 따라서 함수  $L$ 의 최대값은 고정된  $\bar{\mu}$ 와  $\bar{\lambda}$ 에 대하여 각각  $L_1$ 과  $L_2$ 의 최대값을 구함으로써 구할 수 있다. 이 경우  $L_1$ 과  $L_2$ 를 최대화 하는  $x_i$ 와  $a_{ijs}$ 는

$$\bar{x}(\bar{\mu}, \bar{\lambda}) = \arg \max_{x_i \geq 0, \forall i} \{ \sum_{i=1}^N U_i(x_i) + \sum_{i=1}^N \mu_i U_i(x_i) - \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i \} \quad (3.9)$$

와

$$\bar{a}_s(\bar{\lambda}) = \arg \max_{\substack{\sum_{i=1}^N a_{ijs} \leq 1, \forall j, \\ 0 \leq a_{ijs} \leq 1, \forall i, j}} \left\{ \sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs} \right\}, \forall s \quad (3.10)$$

으로 구할 수가 있다.

식 (3.9)의  $\bar{x}(\bar{\mu}, \bar{\lambda})$ 를 구하기 위하여  $\sum_{i=1}^N U_i(x_i) + \sum_{i=1}^N \mu_i U_i(x_i) - \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i$ 를 살펴보면 이는

각 항이  $i$ 에 대한 함으로 이루어져 있으며 이에 따라 각  $i$ 에 대하여 분리할 수 있다. 마찬가지로  $\bar{a}_s(\bar{\lambda})$ 의 경우 식 (3.10)은 각  $j$ 에 대하여 분리할 수 있다. 따라서 식 (3.9)와 식 (3.10)의 해는

$$x_i(\bar{\mu}, \bar{\lambda}) = \arg \max_{x_i \geq 0} \{ (1 + \mu_i) U_i(x_i) - \lambda_i x_i \}, \forall i \quad (3.11)$$

와

$$\bar{a}_{js}(\bar{\lambda}) = \arg \max_{\substack{\sum_{i=1}^N a_{ijs} \leq 1, \forall j, \\ 0 \leq a_{ijs} \leq 1, \forall i, j}} \left\{ \sum_{i=1}^N \lambda_i a_{ijs} r_{ijs} \right\}, \forall j, s \quad (3.12)$$

를 통하여 구할 수 있으며 그 해는

$$x_i(\bar{\mu}, \bar{\lambda}) = \begin{cases} \infty, & \text{if } \lambda_i = 0 \\ U_i^{-1} \left( \frac{\lambda_i}{1 + \mu_i} \right), & \text{otherwise} \end{cases}, \forall i \quad (3.13)$$

와

$$a_{ijs}(\bar{\lambda}) = \begin{cases} 1, & \text{if } i = \arg \max_{t=1,2,\dots,N} \{ \lambda_t r_{tjs} \}, \forall j, s \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.14)$$

가 된다. 만약 식 (3.14)에서 둘 혹은 그 이상의 유저가 같은  $\lambda_t r_{tjs}$ 의 최대값을 갖는다면 해당 유저 중 한 유저만  $a_{ijs}$ 가 1이고 나머지는 0이 되어야 하며, 이는 임의로 선택하여도 관계없다.

이제 dual 문제를 풀도록 한다. 식 (3.5)의 dual 문제  $F(\bar{\mu}, \bar{\lambda})$ 는  $\pi_s$ 를 모르는 stochastic convex optimization problem이므로 직접적으로는 풀기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 stochastic sub-gradient method를 이용하도록 한다<sup>[12],[13]</sup>. 이는 자원 할당이 행해지는 매 시간 슬롯  $t$ 에서 다음과 같은 iteration process를 이용한다.

$$\lambda_i^{t+1} = [\lambda_i^t - \alpha^t \sigma_i^t]^+, i = 1, 2, \dots, N \quad (3.15)$$

와

$$\mu_i^{t+1} = [\mu_i^t - \alpha^t \tau_i^t]^+, i = 1, 2, \dots, N \quad (3.16)$$

여기에서  $[k]^+ = \max\{0, k\}$ 이고  $\sigma_i^t$ 와  $\tau_i^t$ 는 벡터  $\bar{\sigma}_i$ 와  $\bar{\tau}_i$ 의 원소로써 본 벡터들이  $F(\bar{\mu}, \bar{\lambda})$ 의 stochastic sub-gradient 이며 이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_i^t = \sum_{j=1}^M a_{ijs} r_{ijs}^t - x_i^t, \forall i \quad (3.17)$$

그리고

$$\tau_i^t = U_i(x_i^t) - C_i. \quad (3.18)$$

여기에서  $s^t$ 는 시간 슬롯  $t$ 에서의 채널 상태  $s$ 를 의미하며  $x_i^t$ 는 시간 슬롯  $t$ 에서의  $x_i$ 값이고,  $a_{i,j,s^t}$ 와  $r_{i,j,s^t}$ ,  $x_i^t$ 는 시간 슬롯  $t$ 에서 식 (3.13)과 (3.14)를 통하여 구한 해이다.

본 문제는 convex 문제이기 때문에 상기의 dual 문제를 통해 구한 최적의  $\bar{x}$ 와  $\bar{a}$ 는 primal 문제의 최적해로 수렴한다.

이를 이용하여 실제 통신 시스템에서 스케줄링을 할 경우에는 매 시간슬롯에서 다음과 같은 과정이 반복 된다

- i. 기지국은 식 (3.14)에 따라 각 sub-carrier에서  $\lambda_i r_{i,j,s}$ 가 가장 큰 유저에게 해당 sub-carrier를 할당한다.
- ii. 각 유저는 i에서 할당받은 자원을 이용하여 통신한다.
- iii. 기지국은 i에서의  $a_{i,j,s}$ 와 식 (3.13)을 통해 구한  $x_i$  값과 식 (3.15) 및 (3.16)을 이용하여 다음 시간슬롯에서의 각 유저의 dual variable  $\lambda$ 와  $\mu$ 값을 재조정한다.

#### IV. 성능 분석

시뮬레이션은 10명의 유저가 128개의 sub-carrier를 이용하는 경우에 대하여 수행하였고, 각 유저의 유틸리티 함수를 각 유저가 얻은 전송률에 대하여 일반적으로 많이 사용하는 log 함수를 이용하여

$$U(x) = \log(x) \tag{4.1}$$

로 정의하였다. 신호의 세기는 거리의 네제곱에 반 비례하도록 만들어 주었으며 시간에 따라 변하는 채널은 Rayleigh 분포와 표준편차가 8dB인 log-normal 분포를 이용하여 모델링하였다.

제안한 알고리즘의 성능을 알아보기 위하여, 본 기법을 통해 구현한 PF 스케줄링 기법과 각 유저에게 동일한 양의 sub-carrier를 static하게 할당 (Static sub-carrier allocation)한 기법, 각 유저의 만족도인 유틸리티와 공평성 조건을 고려하지 않고 각 시간슬롯마다 데이터 전송률이 최대화 되도록 하는 스케줄링 (Data rate maximization)기법과의 비교를 그림 1을 통해 나타내었다. 유저는 기지국에서부터 가까운 순서로 배열을 하였다.

그림 1에서 보듯이 제안된 기법은 모든 유저의 공평성 조건을 만족시키고 있음을 알 수가 있다. 이

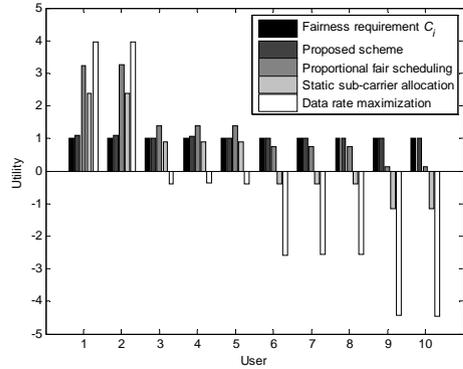


그림 1. 할당받아야 할 최소한의 유틸리티 조건에 따른 스케줄링 기법에서 각 유저의 유틸리티

표 1. 할당받아야 할 최소한의 유틸리티 조건에 따른 스케줄링 기법의 유틸리티 및 전송률 비교

	Total Utility	Average data rate per Hz (bps/Hz)
Proposed scheme	10.30	0.220
PF scheduling	13.10	0.560
Static allocation	3.96	0.246
Data rate maximization	-9.83	0.838

에 반해 PF 스케줄링 기법과 static sub-carrier allocation 기법, data rate maximization 기법은 기지국에서 가까운 유저의 만족도는 상당히 높지만 기지국에서 먼 유저의 만족도는 아주 낮아 공평성 조건을 만족시키지 못함을 알 수가 있다.

또한 표 1을 보면 제안한 기법이 static sub-carrier allocation 기법과 data rate maximization 기법에 비하여 시스템이 주파수 대역폭 1Hz당 얻는 평균 전송률은 더 낮았지만 시스템 유틸리티는 더 높음을 알 수 있다. 이는 본 논문의 목적이 시스템 유틸리티를 최대화시키기 위한 것이고, 유틸리티와 전송률은 정 비례하지 않기 때문에 발생한 현상이다. 이때, 보다 높은 전송률을 얻고자 한다면 유틸리티 함수를 식 (4.1)에 비하여 선형에 가까운 것으로 바꾸어 줌으로써 그 목적을 이룰 수 있다. 즉, 유틸리티 함수의 조절을 통하여 시스템 설계자의 목적에 (혹은 사용자의 목적에) 부합하는 스케줄링을 할 수 있다.

마지막으로 PF 스케줄링의 경우 각 유저의 유틸리티 함수 및 전송률이 보다 높아짐을 알 수 있다. PF 스케줄링은 모든 유저의 공평성 조건  $C_i$ 값이 0

인 상황에서의 제안한 알고리즘을 적용한 것이므로, 본 논문에서 제안한 알고리즘을 통하여 얻을 수 있는 최대의 시스템 유틸리티를 의미한다. 즉, 각 유저의 공평성 조건을 조절하여 보다 높은 시스템의 효율을 얻을 수 있다는 것을 의미하며, 따라서 이를 통해 시스템 효율과 공평성간의 tradeoff를 조절할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 OFDMA 시스템에서 elastic 서비스에 대하여 각 유저가 보장 받는 최소한의 유틸리티 값이 존재하는 경우 opportunistic 스케줄링 기법에 대한 연구를 수행하였으며, 그 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 앞으로는 이 외에도 또 다른 종류의 서비스에 대한 유틸리티를 정의하고, 이에 대한 스케줄링 기법을 연구할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] X. Liu, E. Chong, and N. Shroff, "A framework for opportunistic scheduling in wireless networks," *Computer Networks*, Vol.41, pp.451-474, Mar. 2003.
- [2] X. Liu, E. Chong, and N. Shroff "Opportunistic transmission scheduling with resource-sharing constraints in wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 19, no10, pp.2053-2064, Oct. 2001.
- [3] J.-W. Lee, R. R. Mazumdar, and N. B. Shroff, "Opportunistic power scheduling for dynamic multi-server wireless systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.5, No.6, pp.1506-1515, Jun. 2006.
- [4] Y. J. Zhang and K. B. Letaief, "Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.3, No.5, Sept. 2004.
- [5] W. Xu, C. Zhao, P. Zhou, and Y. Yang, "Efficient adaptive resource allocation for multiuser OFDM systems with minimum rate constraints," *IEEE ICC*, pp.5126-5131, Jun. 2007.
- [6] H. Yin and H. Liu, "An Efficient multiuser loading algorithm for OFDM-based broadband wireless systems," *IEEE Globecom*, pp.103-107, Nov. 2000.
- [7] J. Huang, V. Subramanian, R. Agrawal, and R. Berry, "Downlink scheduling and resource allocation for OFDM systems," *CISS*, pp.1272-1279, Mar. 2006.
- [8] Z. Shen, J.G. Andrews, B.L. Evans, "Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol 4, np 6, pp.2726-2737, Nov. 2005.
- [9] J. Jang and K. B. Lee, "Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.21, No.2, pp.171-178, Feb. 2003.
- [10] Y. J. Zhang, and K. B. Letaief, "Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems," *IEEE Transactions on Wireless Communication*, Vol.3, No.5, pp.1566-1575, Sept. 2004.
- [11] F. Kelly, A. Maulloo and D. Tan, "Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability.," *Journal of the Operational Research Society*, vol 49, no 3, pp.237-252, Mar. 1998
- [12] P. Kall and S. W. Wallace, *Stochastic programming*, Wiley, 1994.
- [13] Y. Ermoliev, "Stochastic quasigradient methods and their application to system optimization," *Stochastics*, Vol.9, pp.1 - 36, 1983.

권 정 안 (Jeong-Ahn Kwon)

준회원



2006년 2월 연세대학교 전기전자 공학부 졸업

2008년 2월 연세대학교 전기전자 공학부 석사

2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자 공학부 박사 과정

<관심분야> 통신네트워크 프로토콜, 네트워크 자원할당, 다계층 최적화, cognitive radio

이 장 원 (Jang-Won Lee)

중신회원



1994년 2월 연세대학교 전자공  
학과 졸업

1996년 2월 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과 석사

2004년 8월 미국 Purdue Univ.  
Electrical & Computer Eng.  
박사

2004년 9월~2005년 8월 Princeton Univ. Post Doc.

2005년 9월~현재 연세대학교 전기전자 공학부 조교수

<관심분야> 통신네트워크 프로토콜, 네트워크 자원  
할당, 다계층 최적화