

# 직교 주파수 분할 다원 접속 시스템에서 실효 링크 계층 용량을 고려한 다중 사용자 자원 할당 기법

준회원 성시환\* , 정회원 유명식\*\*, 신요안\*\*, 이원철\*\*

## Multiuser Resource Allocation Scheme Considering Link Layer Effective Capacity in OFDMA Systems

SiHwan Sung\* Associate Member, Myungsik Yoo\*\*, Yoan Shin\*\*, Woncheol Lee\*\* Regular Members

### 요 약

무선 네트워크 사용자가 폭발적으로 증가하고, 서비스 종류들이 다양해짐에 따라 고 전송률 및 사용자의 QoS(Quality of Service) 보장에 대한 요구가 강화되고 있는 현실이다. 본 논문에서는 이를 위한 해결 방안으로 직교 주파수 분할 다원 접속 시스템 상에서 사용자 QoS 요구사항의 만족을 고려한 주파수 자원 할당 기법을 제안한다. 즉, 본 논문에서는 시간 분할 다원 접속 시스템에서 지연에 민감한 사용자의 QoS 만족을 위하여 송신 기지국과 각각의 사용자들 사이의 통계적인 채널 특성과 더불어 사용자마다의 실시간 큐잉 분석을 고려한 M-LWDF(Modified-Largest Weighted Delay First)를 기반 한 자원할당 기반의 RR(Round Robin) 및 K&H(Knopp&Humblet) 결합 스케줄링을 제안하며, 이를 통해 전체적인 시스템의 전송률 향상과 지연에 민감한 서비스를 요구하는 사용자의 QoS를 만족시킬 수 있다는 점을 확인한다. 또한 제안한 기법을 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 시스템에 적용하여 최적의 부 캐리어 할당을 통한 사용자 스케줄링을 수행한다. 본 논문에서 제안된 기법의 성능을 분석하기 위하여 물리계층의 채널 특성으로부터 구해진 실효 링크 계층 용량을 고려하여 모의실험을 수행하였다.

**Key Words** : Multiuser Diversity, TDMA, OFDMA, Resource Allocation, Scheduling

### ABSTRACT

The explosive growth of wireless network users and the existence of various wireless services have demanded high rate throughput as well as user's QoS guarantees. Towards this, this paper proposes QoS-oriented subcarrier allocation scheme considering the QoS provisioning of multiple users, which is major requirement for wireless network design point of view. This paper introduces joint RR/K&H combined with M-LWDF(Modified Largest Weighted Delay First) scheme throughout observing statistical channel behavior and real time queuing analysis for appropriate resource allocation tightly connected to multiuser scheduling. Accordingly, the system throughput can be enhanced, and the QoS demanded for delay sensitive services can be satisfied. Furthermore, the proposed scheme is applied for OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) systems to allocate sub-carriers in optimal way. The simulation results verify plausible performances of proposed resource allocation scheme via showing superior effective capacity under time-varying physical-layer channel behaviors.

\* 본 연구는 학술진흥재단 협동연구과제(KRF-2003042-D00141)와 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

\* SK 텔레시스 RF개발팀 (sungsh@sktelesys.com) \*\* 숭실대학교 정보통신전자공학부 (교신처자 email : wlee@ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-04-179, 접수일자 : 2005년 4월 26일, 최종논문접수일자 : 2006년 6월 16일

## I. 서론

차세대 무선 네트워크는 음성, 데이터 및 고품질 멀티미디어 서비스와 같은 다양한 응용들의 완벽한 지원을 위해 QoS(Quality of Service)의 보장이 요구된다. 이는 차세대 무선 네트워크를 설계하는데 있어 중요한 해결 과제 중 하나이며, 무선 채널을 통해 전달되는 패킷의 전송률, 지연 및 변이, 그리고 손실은 서비스에 따른 요구사항, 즉 QoS의 만족 여부를 결정하게 되는 주요 성능 지표라고 볼 수 있다<sup>[1]</sup>.

다중 사용자 환경에서 서로 다른 사용자들이 요구하는 상이한 서비스를 만족시키기 위한 QoS 보장을 위해 사실상 MAC (Medium Access Control) 계층의 트래픽 스케줄링 방식 개선이나 오버헤드 최소화가 필수적이며, 이를 통해 전체 시스템의 효율 증가를 기대할 수 있다. 그 결과 단순히 물리계층에서 전송 속도의 증가를 위한 연구보다 MAC과의 연계성을 갖는 계층간 최적화 연동 기반의 다중 사용자 자원 할당 기술에 관한 연구가 필요하다<sup>[2, 3, 16, 7]</sup>.

특히 다중 사용자들이 갖는 독립적인 무선 채널 특성을 고려하여 가장 큰 채널 이득을 갖는 사용자에 한하여 서비스를 제공하는 다중 사용자 다이버시티 기술은 전체 시스템의 용량을 극대화 할 수 있다. 그러나 단지 가용 전송률의 최대화만을 고려한다는 측면에서 다중 사용자의 상이한 QoS 요구조건을 적절히 만족시킬 수 없다는 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 각 사용자의 QoS 요구조건을 만족하는 멀티미디어 서비스 제공을 위한 적절한 트래픽 분할 전송과 고속 데이터 전송을 위한 링크 품질이 고려된 물리계층 전송 방식 도출을 위한 연구가 절실히 요구된다<sup>[4, 5, 8]</sup>.

본 논문은 다음과 같이 구성하였다. 서론에 이어 II장에서는 계층간 연동을 위한 실효 링크 계층 용량 모델에 대하여 기술하고 III장에서는 TDMA (Time Division Multiple Access) 시스템에서 QoS 지원을 위한 시간 자원 할당에 대해 다루며, IV장에서는 III장에서 다룬 시간 자원 할당 방식을 응용하여 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 시스템에서 QoS 지원을 위한 부캐리어 할당에 대해 다루며, V장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 모의실험 및 성능 결과를 제시하며, 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

## II. 계층간 연동을 위한 실효 링크 계층 용량 모델

신호 대 잡음 비에 따른 비트 오율이나 프레임 오율 등의 관찰을 통해 물리 계층의 성능 향상을 위한 다양한 전송 기법들이 제안되어 왔으나, 이러한 물리계층의 채널 특성 정보만으로는 사용자들에 대한 QoS 요구조건을 만족시킬 수 없다는 한계성을 직면하게 된다. 즉, 사용자의 QoS 보장을 완벽히 제공하기 위해서 물리 계층의 채널 특성뿐만 아니라 각 사용자의 큐 사용 현황등과 같은 링크 계층 정보가 고려된 형태의 새로운 실효 링크 계층 용량 모델링을 필요로 한다.

실시간 서비스를 요구하는 단일 사용자의 QoS 요구사항은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$\Pr\{D(t) \geq D_{\max}\} \approx \gamma(\mu) \times e^{-\theta(\mu) \times D_{\max}} = \varepsilon \quad (1)$$

여기서  $D(t)$ 는 시간의 흐름에 따른 사용자의 패킷 지연을 나타내며, 위의 식에서  $Q(t)$ 는 일정 시간  $t$ 에서 비트 단위의 사용자 큐의 길이를 나타낸다.  $D_{\max}$ 와  $\varepsilon$ 는 각각 지연 임계치와 패킷 지연이 주어진  $D_{\max}$ 를 초과할 확률을 나타내며, QoS 지수 함수  $\theta(\mu)$ 는 다음과 같이 정의한다<sup>[5]</sup>.

$$\theta(\mu) = \mu \cdot \alpha^{-1}(\mu) \quad (2)$$

여기서,  $\alpha(\mu)$ 는 물리계층의 순시 채널 용량  $r(t)$ 의 효율적인 용량 함수이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[5]</sup>. 즉,  $\forall \mu > 0$ 인 경우

$$\alpha(\mu) = - \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\mu \cdot t} \log E[e^{-\mu \int_0^t r(\tau) d\tau}] \quad (3)$$

또한 사용자 큐로 입력되는 데이터율을 일정한 값  $\mu$ 로 정의할 경우  $\gamma(\mu)$ 는 큐가 비어 있지 않을 확률을 나타내며, 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma(\mu) = \Pr\{Q(\infty) \geq 0\} \quad (4)$$

결론적으로 식 (1)~(4)의 과정에서 물리 계층의 채널 특성 분석을 통해 계산된 순간 채널 용량  $r(t)$ 를 기반으로 큐잉 분석을 이용한 실효 링크 계층 용량 모델을 구성하는  $\{\gamma(\mu), \theta(\mu)\}$ 을 계산할 수 있다. 순시 채널 용량  $r(t)$ 가 안정적이고 에르 고티한 특성을 가진다고 가정하면  $\gamma(\mu)$ 와  $\theta(\mu)$ 의

관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\gamma(\mu)}{\Theta(\mu)} = \tau_s(\mu) + \frac{E[Q(\infty)]}{\mu} \quad (5)$$

여기서,  $\tau_s(\mu)$ 는 데이터 패킷 서비스가 이루어지는 동안 큐에 남아있는 데이터양에 해당하는 잔여 시간으로 패킷의 크기가 매우 작다고 가정하면 이를 무시할 수 있다. 성능 분석을 위한 프레임 단위의 이산 시간 시스템을 고려하면 변수  $\mu$ 의 함수  $\gamma$ 와  $\Theta$ 는 다음과 같이 추정되어질 수 있다[5].

$$\hat{\gamma} = \left( \frac{1}{N_T} \right) \cdot \sum_{n=1}^{N_i} S(n) \quad (6)$$

$$\hat{q} = \left( \frac{1}{N_T} \right) \cdot \sum_{n=1}^{N_i} Q(n) \quad (7)$$

$$\hat{\tau}_s = \left( \frac{1}{N_T} \right) \cdot \sum_{n=1}^{N_i} \tau_s(n) \quad (8)$$

그리고

$$\hat{\Theta} = \frac{\hat{\gamma} \times \mu}{\mu \times \hat{\tau}_s + \hat{q}} \quad (9)$$

여기서  $N_T$ 는 추정을 위해 사용된 총 샘플의 수, 즉, 프레임 수를 나타내며,  $Q(n)$ 은  $n$ 번째 샘플 시간에 큐의 길이로서 서비스 되지 못하여 큐에 쌓여 있는 잔류 데이터의 양을 나타낸다.  $S(n) \in \{0,1\}$ 은 서비스 되는 순간에 데이터 패킷이 큐에 남아있는지의 유무를 가리키며 잔류 데이터가 있다면 1, 없다면 0으로 계산된다.

### III. 시간 분할 다원 시스템에서 QoS 지향적인 자원 할당 기법

그림 1은 본 논문에서 고려하는 단일 송신 기지국과 특정 사용자들을 위한 송수신 구조를 나타낸다. 단일 셀 환경에서 순방향 채널을 고려하였으며, 기지국은 QoS 보장을 요구하는  $K$ 명의 사용자에게 데이터를 전송한다. 기지국에서 다른 사용자의 패킷 데이터는 사용자 마다 구분된 각각의 큐로 보내진다. 이후 프레임이 차지하는 시간 구간  $T_s$ 로 정해지는 샘플 주기 시간마다 수신된 사용자의 채널 이득 값을 이용하여 시간 자원 할당 과정이 수행된다.

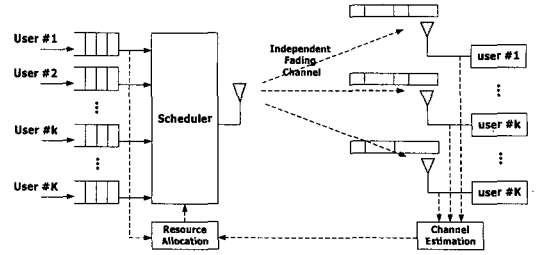


그림 1. 시간 분할 다중 접속 시스템에서 QoS 만족을 위한 송수신단 구조  
Fig. 1. Transceiver structure for QoS provisioning in TDMA system

계환 과정상의 전송 에러가 없다고 가정하면,  $n$ 번째 프레임 샘플 시간에  $k$ 번째 사용자로부터 수신된 채널 이득 값  $h_k(n)$ 으로부터 순시 채널 전력 이득 값  $g_k(n) = |h_k(n)|^2$ 을 계산하고 순시 채널 용량  $r_k(n)$ 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$r_k(n) = B_c \log_2 \left( 1 + g_k(n) \times \frac{P_0}{\sigma_n^2} \right) \quad (10)$$

여기서,  $B_c$ 는 채널의 대역폭이며,  $P_0$ 와  $\sigma_n^2$ 은 각각 송신 전력과 첨가 잡음 전력을 나타낸다. 동등한 조건하에서 단순한 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널의 용량  $r_{awgn}$ 은 다음과 같다.

$$r_{awgn} = B_c \log_2 (1 + SNR_{avg}) \quad (11)$$

여기서,  $SNR_{avg} = P_0/\sigma_n^2$ 이며, 위의 식(10)과 (11)을 이용하여  $B_c$ 를 소거할 수 있고, 페이딩 채널상에서  $k$ 번째 사용자의 순간 채널 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_k(n) = \frac{r_{awgn} \log_2 (1 + g_k(n) \times SNR_{avg})}{\log_2 (1 + SNR_{avg})} \quad (12)$$

이때, 기지국은  $T_s$  크기의 프레임을 미세한 시간 슬롯으로 나누어 다수의 사용자에게 다양한 비율로 할당을 할 수 있다.

#### 3.1 일반적인 결합 스케줄링 기반의 자원 할당

일반적으로 RR(Round Robin) 스케줄러는 가용한 무선 채널의 용량을 균등하게 사용자 모두에게 할당함으로써 동등한 품질의 서비스를 제공할 수 있다는 장점이 있는 반면, 무선자원의 용량 극대화

와 채널 상황에 따라 차별화된 서비스 지원이 어려운 단점이 있다. 이와는 반대로 K&H (Knopp&Humblet) 스케줄러는 특정 시간별로 제한된 채널 정보를 관찰하여 가장 품질이 우수한 채널에 해당하는 사용자를 선택하여 최대 전송량을 지원함으로써 한정된 무선자원의 효율을 극대화 할 수 있다. 그러나 지연에 민감한 특정 사용자에 대한 채널 이득이 장시간 낮을 경우 지연에 대한 QoS 요구조건을 만족시키지 못한다는 단점이 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 전송률과 QoS보장의 측면을 동시에 고려할 필요가 있다. RR/K&H 결합 스케줄러는 K&H 방식을 통하여 전체 시스템의 가용 용량을 극대화 시킬 수 있을 뿐만 아니라 RR 방식을 통하여 지연에 민감한 사용자의 QoS를 만족시킬 수 있는 방법이다. 그림 2는 RR/K&H 결합 스케줄링 기법을 위한 시간 자원 할당을 나타낸다.

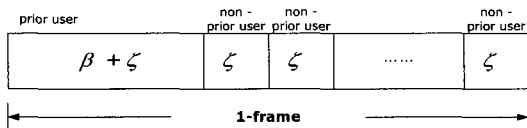


그림 2. RR/K&H 결합 스케줄링에 의한 시간 자원 할당 예시도  
Fig. 2. Temporal resource allocation using joint RR/K&H Scheduler

그림 2에서 나타낸 특정 프레임내의 시간 자원 할당에 관련한 수식적 표현은 다음과 같다.

$$r_k(n) = \begin{cases} (\beta + \zeta) \cdot r_k(n) & \text{for priority user} \\ \zeta \cdot r_k(n) & \text{for non\_priority user} \end{cases} \quad (13)$$

그림 2는 전체 프레임 시간 구간 내에서 K&H 방식과 상응하여 제한된 신호 이득이 가장 큰 사용자에게 할당하는 비율을  $\beta$ 로 나타내었으며,  $\zeta$ 는 RR방식에 상응하여 시간 무선 자원을 모든 사용자들에게 공평하게 할당하는 비율을 나타낸다. 결과적으로 가장 큰 채널 이득을 갖는 최선호 사용자는 프레임의  $\beta + \zeta$ 만큼의 시간 자원 할당을 받게 되며, 나머지 사용자는  $\zeta$ 만큼 할당을 받게 된다. 이때,  $\beta$ 와  $\zeta$ 를 통한 시간 자원의 할당은 다음을 만족해야 한다.

$$\beta + K \cdot \zeta \leq 1 \quad (14)$$

여기서,  $\beta \geq 0, \zeta \geq 0$  그리고 식 (9)의 결과가  $\theta_{\beta, \zeta, K} \leq \rho$ 인 조건을 만족하면서  $\beta + K \cdot \zeta$ 가 최소 값은 갖는 경우 가장 효율적인 시간 자원 할당이 이루어 졌다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 모의실험 과정상의 간편함을 고려하여  $\beta + K \cdot \zeta = 1$ 로 설정한다.

### 3.2 QoS 지향의 M-LWDF기법을 고려하여 제안된 결합 스케줄링 기반의 자원 할당

앞 절에서 고려한 일반적인 RR/K&H 결합 스케줄링 기법은 최적의 QoS 만족을 위하여 장 구간에 걸친 정보를 통해 자원 할당을 위한  $\beta$ 와  $\zeta$ 를 계산하여야 한다. 이에 반하여 본 절에서는 채널의 상태 뿐만 아니라 큐에 도착한 패킷 데이터의 실시간 추적을 통해 큐의 크기를 동시에 고려함으로써 지연에 민감한 서비스를 요구하는 사용자의 QoS 만족도를 향상 시키기 위한 자원 할당 기법을 제안한다.

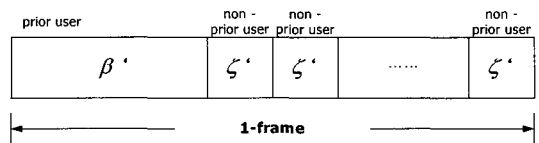


그림 3. 제안된 RR/K&H 결합 스케줄링에 의한 시간 자원 할당 예시도  
Fig. 3. Temporal resource allocation using proposed joint RR/K&H Scheduler

그림 3은 제안한 기법을 통해 프레임 구간 내에 각 사용자에게 할당되는 시간 자원 양을 나타내며 수식적 표현은 다음과 같다.

$$r_k(n) = \begin{cases} \beta' \cdot r_k(n) & \text{for priority user} \\ \zeta' \cdot r_k(n) & \text{for non\_priority user} \end{cases} \quad (15)$$

여기서  $\beta'$ 와  $\zeta'$ 은 각각 프레임 전체 시간 구간  $T_s$ 로 정규화 하여 제한 된 신호 이득이 가장 큰 최선호 사용자와 나머지 사용자에게 할당하는 시간 비율을 의미한다. 이때  $\beta'$ 만큼의 프레임 비율을 할당 받는 최선호 사용자를 선택하는데 있어서 M-LWDF(Modified Largest Weighted Delay First) 방식을 적용한다. 결론적으로, 시간 자원 할당을 위하여 제한된 채널 수신 이득 뿐만 아니라 큐의 크기를 동시에 고려하며, 이를 토대로 최선호 사용자와 그렇지 않은 사용자를 결정하는 파라미터는 다음과 같이 정의한다.

$$\max_k v_k \cdot D_k(t) \cdot r_k(t) \quad (16)$$

여기서  $k$ 는 사용자를 구분하기 위한 인덱스이며,  $v_k$ 는 임의의 양의 상수이고,  $D_k(t)$ 는  $k$ 번째 사용자의 패킷 지연을 나타내며 큐의 길이  $Q_k(t)$ 로 대체할 수 있다. 송신단에서 모든 사용자의 지연에 대한 민감도가 같다고 가정하면  $v_k=1$ 로 설정할 수 있다. 이 때 각 사용자의  $Q_k(t) \cdot r_k(t)$ 를 계산하여 식 (15)의 방법으로 가장 큰 사용자에게  $\beta$ 만큼의 프레임의 비율을 할당하여 서비스하고 잔여 무선자원이 존재할 경우 나머지 사용자들에게 RR 스케줄링 방식으로  $\zeta$ 만큼의 균등한 비율로 시간 자원 할당을 수행한다. 오직 채널 특성만으로 최선호 사용자를 선택할 경우 장시간 특성이 지속되는 채널 환경에서는 낮은 채널 이득을 갖는 지연에 민감한 사용자의 서비스 요구사항을 만족시킬 수 없는 한계성이 존재하지만 M-LWDF 기법을 적용할 경우 어떤 무선 채널 환경에서도 장구간의 추가 정보 없이 큐의 현재 상황을 고려하며 지연에 대한 품질 향상뿐만 아니라 무선 용량의 극대화 실현이 가능하다.

#### IV. 직교 주파수 분할 다원 시스템에서 QoS 지향적인 부 채널 할당 기법

본 장에서는 앞 장에서 제안한 자원 할당 기법을 기반으로 다수의 부 캐리어를 이용하는 OFDMA 시스템에서 가용 전송률 향상 및 사용자의 QoS 만족도 향상을 목적으로 수행되는 주파수 자원 할당 기법을 제안한다.

그림 4는 본 논문에서 고려하는 OFDMA 시스템에서 단일 송신단과 특정 사용자의 수신단 처리 구조를 간략하게 도시하였다. 송신단에서 서로 다른 사용자의 패킷 데이터는 사용자마다 구분된 각각의 큐로 보내진다. 매 OFDM 심벌 주기시간  $T_s$ 마다 모든 수신 사용자의 채널 주파수 응답 값을 계산받고, 이득 값 및 송신단의 큐의 상태를 분석하여 부 캐리어 할당 및 비트 할당 과정을 수행한다. 이후  $N-pt$  IFFT(Inverse Fourier Transform)의 과정을 통해 주파수 영역의 신호를 시간 영역의 신호로 변환한 후 Cyclic Prefix를 첨가하여 다중 사용자 신호를 전송한다. 이와 동시에 송신 제어 채널을 통해 각 부캐리어 및 비트 할당 정보를 전송한다.

특정사용자의 수신단에서는 수신된 신호에서 Cyclic Prefix를 제거한 후 FFT 과정을 통해 시간 영역의 신호를 주파수 영역의 신호로 변환한다. 이후 송신단으로부터 전달된 부 캐리어 주파수 정보 및 비트 할당 정보를 이용하여 자신의 해당 부 캐리어를 선택하고 복호화 과정을 수행하게 된다.

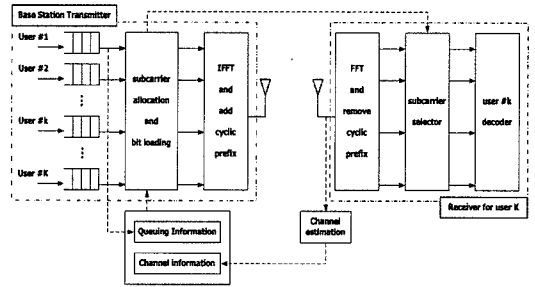


그림 4. 직교 주파수 분할 다중 접속 시스템에서 QoS 만족을 위한 송수신단 구조

Fig. 4. Transceiver structure for proposed Joint RR/K&H resource allocation

$i$ 번째 OFDM 심벌 주기 시간에  $k$ 번째 사용자를 위한 OFDM 시스템의 순간 채널 용량은 다음과 같이  $N$ 개의 부 채널들의 순간 채널 용량의 합으로 표현 할 수 있다.

$$C_i^{(k)} = \sum_{n=1}^N W_n \log_2(1 + r^{(k,n)}(i)) \quad (17)$$

여기서,  $W_n$ 은  $n$ 번째 부 채널의 주파수 대역폭을 나타내며,  $r^{(k,n)}(i)$ 은  $i$ 번째 OFDM 심벌 주기 시간에  $k$ 번째 사용자의  $n$ 번째 부 캐리어에서 수신된 신호 대 잡음 비를 나타내며 다음과 같다.

$$r^{(k,n)}(i) = \left( \frac{P_0}{N} \right) \cdot \frac{G_{k,n}(i)}{N_0 \cdot W_n} \quad (18)$$

특정 OFDM 심벌을 구성하기 위한 부 캐리어들은 서로 다른 사용자간에 공유하지 않는다고 가정하면 다수의 사용자에게 다양한 비율로 부 캐리어를 할당 할 수 있다.

4.1 QoS 지향의 M-LWDF기법을 고려하여 제안된 결합 스케줄링 기반의 부 채널 할당 다수의 사용자들 사이에 가장 큰 주파수 채널 이득을 갖는 특정 사용자에게 부 캐리어들을 할당 할 경우 전체적인 시스템 전송률을 극대화 할 수 있지만, 지연에 민감한 특정 사용자의 경우 낮은 주파수

표 1. OFDMA 시스템에서 QoS 만족을 위한 부캐리어 할당 절차  
Table 1. Procedure of subcarrier allocation for QoS provisioning in OFDMA systems

```

For n=1 to N (=Number of available subcarriers)
%For all users, calculate the following :

Rate_subcarrier(k) = max_{n \in 1, \dots, N} r^{(k,n)}(i)

Index_subcarrier(k) = arg max_{n \in 1, \dots, N} r^{(k,n)}(i)

\hat{k} = arg max_{k \in 1, \dots, K} Q^{(k)}(i) \cdot Rate_subcarrier(k)

\hat{n} = Index_subcarrier(\hat{k})
% \hat{n}-th subcarrier is allocated to user \hat{k}, and then
% perform simplified adaptive bit allocation
n \in \{1, \dots, N\} - \{\hat{n}\}
Q^{(k)}(i) = Q^{(k)}(i) - r^{(k, \hat{n})}(i)
End
    
```

채널 이득으로 인해 부 캐리어들을 할당을 받지 못하게 되어 지연에 대한 QoS 요구조건을 만족시키지 못하게 된다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 다중 사용자의 부 캐리어들에 대한 주파수 채널 이득에 관한 정보 뿐 만 아니라 큐에 남아 있는 잔류 서비스의 양을 고려할 필요가 있다.

표 1은 지연에 민감한 다중 사용자의 QoS 만족을 위한 주파수 자원 할당 과정을 나타낸다. 우선, 모든 사용자로부터 수신되어진  $i$ 번째 프레임 상에서 주파수 채널 이득으로부터  $N$ 개의 부채널에 대하여 지원할 수 있는 전송률  $r^{(k,n)}(i)$ 을 계산한다. 이때 각 사용자가 갖는 다수의 부 캐리어들 중 가장 전송률이 가장 큰 캐리어에 해당하는 전송률과 그때의 부 캐리어 인덱스를 각각 임시 기억 메모리  $Rate\_subcarrier$  와  $Index\_subcarrier$ 에 저장한다. 또한 동시에 큐잉 분석을 통해 각 사용자의 현재 큐의 데이터 잔류량을 추적한다. 이후 모든 사용자에 대하여  $Q^{(k)}(i) \cdot Rate\_subcarrier(k)$  값을 계산하고, 가장 큰 수치를 갖는 사용자에게  $\hat{n} = Index\_subcarrier(\hat{k})$  번째 부 캐리어를 할당한다. 이때 특정 사용자에게 의해 할당되어진 부 캐리어는 다른 사용자가 공유 할 수 없다고 가정한다. 매 번의 부 캐리어에 사용자 할당 시에 큐의 크기를 추적하며 단순한 형태의 비트 할당 기법도 수행되어진다. 위의 과정은  $N$ (총 부 캐리어의 수)번 수행되며 한 OFDM 심벌에 대한 서브 채널 및 비

트할당이 완료된다. 위의 과정과 같이 K&H와 M-LWDF 방식의 적용을 통한 효율적인 자원 이용으로 전체 시스템의 전송률 향상 및 사용자의 QoS 요구사항 만족도를 개선시킬 수 있다.

### V. 모의 실험 결과

본 장에서는 TDMA 시스템에서 제안한 시간 자원 할당 기법을 OFDMA 시스템에 응용하여 주파수 부 캐리어를 할당하는 기법에 대한 성능 확인을 위하여 II장에서 소개한 실효 링크 계층 용량 모델  $\{\gamma(\mu), \theta(\mu)\}$ 의 성능을 분석한다. 이를 위해 먼저 제안한 RR/K&H 결합 스케줄링 기법을 TDMA 시스템에 적용했을 시의 성능을 살펴본다.

#### 5.1 시간 분할 다원 접속 시스템에 적용 결과

본 절의 모의실험은 TDMA 시스템에서 10명의 사용자가 이동속도가 고속인 페이딩 채널 환경에 접속해 있다고 가정하고, 평균 신호대 잡음비 및 AWGN 채널하에서 전송률을 각각  $SNR_{avg} = -40dB$ ,  $r_{avg} = 1000kb/s$ 으로 고정하였다. 그림 5는 패킷 데이터 전송 시에 III장에서 소개되어진 시간 자원 할당 기법의 적용을 통해 발생하는 서비스의 지연으로 큐에 데이터가 잔류해 있을 확률을 보여준다.

점선은 프레임의 비율  $\beta$ 와  $\zeta$ 에 따라 RR, K&H 및 joint RR/K&H 기법을 적용한 경우이며,  $\{\beta=1, \zeta=0\}$ 인 경우 K&H 스케줄링 적용한 방식과 같고,  $\{\beta=0, \zeta=1\}$ 인 경우에는 RR 스케줄링 방식과 같다. 큐로 유입되는 데이터 혹은 패킷의 속도가 느린 상황에서는 K&H 스케줄링인 경우에

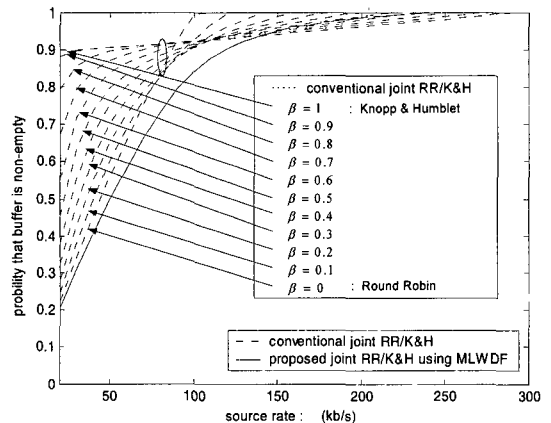


그림 5. 큐에 데이터가 잔류해 있을 확률  
Fig. 5. Probability that buffer is non-empty

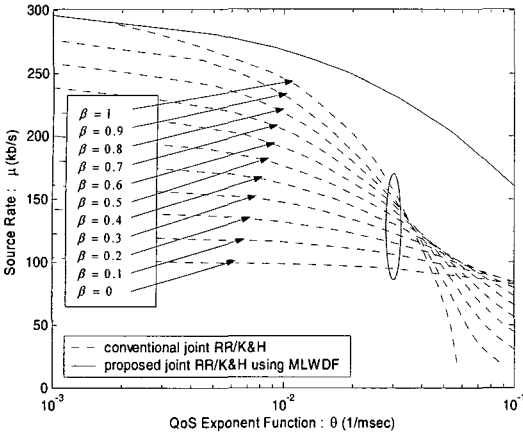


그림 6. TDMA 시스템에서의 QoS 만족도 성능 분석  
Fig. 6. Performance of QoS provisioning in TDMA systems

많은 양의 패킷이 서비스 되지 못하고 있다. 그러나 데이터율이 증가 할 경우에는 RR 스케줄링을 사용한 경우 역시 서비스 받지 못하는 데이터 혹은 패킷이 급격히 증가한다. 실선은 III-2절에서 제안한 M-LWDF 방식을 적용한 결합 스케줄링 기법의 결과를 나타내며 서비스의 제공이 더 효율적임을 확인할 수 있다.

그림 6은 큐로 유입되는 데이터율  $\mu$ 에 따른 QoS 지수함수  $\theta(\mu)$ 의 성능을 나타낸다. 함수  $\theta(\mu)$ 는 식(6)-(9)를 이용하여 추정되며, 이것은 서비스의 지연이 주어진 임계치를 초과할 확률  $\Pr\{D(t) > D_{max}\}$ 과 상응한다. 그림 6에서 점선은 프레임 비율  $\beta$ 와  $\xi$ 를 고정적인 값으로 설정한 일반적인 RR/K&H 결합 스케줄링 방식이며 실선은 M-LWDF를 적용한 결합 스케줄링 기법을 적용할 경우에 대하여 QoS 지수함수  $\theta$ 의 성능을 보여 준다. 여기서, QoS 지수함수는 세가지 크기로 분류하였으며, 그 값에 따라서 지연에 대한 민감한 정도를 나타낸다. 낮은 값의 경우 지연에 민감하지 않은 서비스에 상응하며 큰 값의 경우 지연에 민감한 서비스에 상응한다. 지연에 민감하지 않은 서비스를 요구하는 작은 값의  $\theta$ 에 대하여 제안된 기법들이 K&H 기법과 유사함을 나타냄을 알 수 있다. 이는 전체 시스템의 전송률의 극대화를 실현시킬 수 있음을 말해줄 뿐만 아니라 지연에 민감한 서비스를 요구하는 큰 값의  $\theta$ 에 대해서도 본 논문에서 제안된 기법들이 RR 기법 이상으로 QoS를 만족시키는 것을 확인 할 수 있다.

5.2 직교 주파수 분할 다원 접속 시스템에 적용 결과  
본 장에서는 OFDMA 시스템에서 제안한 서브

채널 할당 기법의 적용을 통해 QoS 지수함수의 성능을 분석하였다. 표 2는 본 장의 시뮬레이션 과정에서 사용되어진 시스템의 파라미터를 나타낸다.

그림 7의 모의 실험은  $CNR_{avg} = 20dB$ 로 고정된 후에 수행하였으며, QoS 만족을 확인하기 위한 지수 함수의 성능을 나타낸다. 그림 7에서 점선은 전체 시스템의 전송용량의 극대화를 위하여 오직 사용자의 채널 정보만을 이용하여 가장 큰 채널 이득을 갖는 사용자에게 해당 부 캐리어를 할당하는 K&H 기법을 적용한 결과이며, 실선은 QoS만족을 위하여 채널 정보와 큐의 상태를 동시에 고려한 제안된 서브 채널 할당의 적용 결과이다.

그림 7에서 QoS의 만족도를 확인하기 위하여 지수함수를 네가지 크기로 분류하였으며, 지수함수  $\theta$ 의 값은 지연의 민감도에 비례한다. 그림에서 나

표 2. 시스템 파라미터들  
Table 2. System parameters

Parameters	Values
Multiple Access	OFDMA/FDD
Downlink channel bandwidth	10MHz
OFDM symbol duration	15 $\mu$ s
Cyclic prefix duration	2.2 $\mu$ s
Total number of subcarriers	128
Number of users	10

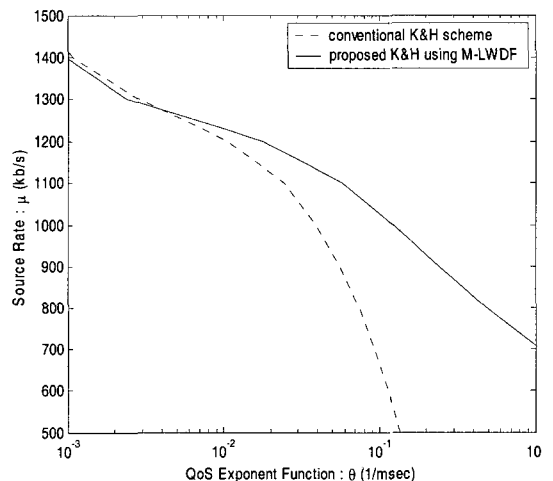


그림 7. OFDMA 시스템에서 QoS의 만족도의 성능 분석  
Fig. 7. Performance of QoS provisioning in OFDMA systems

타나는 바와 같이 작은 값의  $\theta$ , 즉, 지연에 민감하지 않는 서비스에 대한 만족도는 일반적인 기법과 비교하여 비슷한 성능을 나타낼 뿐만 아니라 큰 값의  $\theta$ , 즉, 민감한 지연을 요청하는 서비스에 대한 만족도는 월등히 우수함을 알 수 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 단일 셀 내에 다중 사용자가 접속해 있는 무선환경에서 물리 계층의 채널 특성으로부터 계산된 실패 링크 계층 용량 모델링을 고려하여 사용자의 QoS 보장을 만족시키기 위한 무선 자원의 할당 기법을 제안하였다. 시간에 따라 변하는 물리 계층의 채널 환경 특성 및 큐의 잔류 데이터 양의 추적을 기반으로 시간 분할 다원 시스템에서 시간 자원 할당을 수행하였으며, 또한 이를 OFDMA 시스템에 적용하여 최적의 부 캐리어 주파수 자원 할당을 수행함으로써 지연에 민감한 서비스를 요구하는 사용자의 QoS를 만족 시킬 수 있다. 향후 다중 셀 환경에서 사용자마다 서로 다른 QoS 서비스 요구사항이 존재하는 상황에서 최대한 사용자별 QoS를 만족시키며 전송률을 증대시키기 위한 방안을 고려할 예정이며, 또한 대역폭의 확장 없이 다중 송수신 안테나를 적용하는 MIMO(Multiple-Input-Multiple-Output)기술과 기회적 빔형성 기법과의 결합을 통해 한정된 시간 혹은 주파수 무선자원을 이용 효율을 극대화하기 위한 방안을 도출할 예정이다.

## 참고 문헌

[1] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. Stolyar, P. Whiting, and R. Vijayakumar, "Providing quality of service over a shared wireless link" *IEEE Commun. Mag.*, vol. 39, pp. 150-154, Feb. 2001.

[2] K. Kim, I. Koo, S. Sung and K. Kim. "Multiple QoS support using M-LWDF in OFDMA adaptive resource allocation," *Proc. of IEEE LANMAN 2004*, pp. 217-222, 2004.

[3] R. Knopp and P. A. Humblet, "Information capacity and power control in single-cell multiuser communications," *Proc. IEEE Int'l Conf. Commun. (ICC '95)*, vol. 1, pp. 331-335, Seattle, USA, June 1995.

[4] D. Wu and R. Negi, "Utilizing multiuser di-

versity for efficient support of quality of service over a fading channel," *Proc. IEEE Int'l Conf. Commun. (ICC 2003)*, vol. 3, pp. 2202-2207, Anchorage, USA, May 2003.

[5] D. Wu and R. Negi, "Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no.4, pp. 630-643, July 2003.

[6] S. Duan, Y. Xu and W. Song, "On the performance of multiuser diversity under explicit quality of service constraints over fading channels," *IEICE Trans. Commun.* vol. E87-b, no.5, May 2003.

[7] G. Song and Y. Li, "Utility-based joint physical-MAC layer Optimization in OFDM," *Proc. GLOBECOM'02*, pp.671-675, November 2002.

[8] C. Suh, Y. Cho and S. Yoon, "dynamic sub-channel and bit allocation in multiuser ofdm with a priority user," *SSTA2004*, pp.919-923, August 2004.

성시환 (Sihwan Sung)

준회원



2004년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2006년 2월 숭실대학교 정보통신공학과 석사  
2006년 2월~현재 SK텔레시스 RF 개발팀  
<관심분야> MIMO-OFDM, QoS

Scheduling, Cognitive Radio, RF System

유명식 (Myungsik Yoo)

정회원



1989년 2월 고려대학교 전자전산공학과 학사  
1991년 2월 고려대학교 전자공학과 석사  
2000년 1월~8월 Dept. of Electrical Engineering, SUNY at Buffalo 박사

2000년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 조교수  
<관심분야> 광네트워크, OBS, EPON, 무선 네트워크, QoS, 혼잡 제어 알고리즘, Wireless TCP, Wireless Link Protocol



신 요 안 (Yoan Shin)

정회원



1987년 2월 서울대학교 전자공  
학과 학사

1989년 2월 서울대학교 전자공  
학과 석사

1992년 The University of Texas  
at Austin 박사

1994년 9월~현재 숭실대학교 정

보통신전자공학부 부교수

<관심분야> 무선 통신 시스템, MIMO-OFDM, UWB,  
PAPR 감소기법, Cognitive Radio, Wireless  
Position Location,

이 원 철 (Woncheol Lee)

정회원



1986년 2월 서강대학교 전자공  
학과 학사

1988년 3월 연세대학교 전자공  
학과 석사

1994년 5월 Newyork Polytech-  
nic University, Electronic En-  
gineering 박사

1995년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부  
교수

<관심분야> Cognitive Radio, SDR, Smart Antenna,  
Wireless Position Location, UWB, MIMO-OFDM