

# OFDMA 시스템에서 실시간 트래픽 전송을 위한 효율적 스케줄링 기법

준회원 박정식\*, 정회원 조호신\*

## An Efficient Packet Scheduling Scheme to support Real-Time Traffic in OFDMA Systems

Jeongsik Park\* *Associate Member*, Ho-Shin Cho\* *Regular Member*

요약

본 논문에서는 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 시스템에서 실시간 트래픽 전송을 위한 효율적 패킷 스케줄링 기법을 제안한다. 본 방식은 패킷의 시간 지연 구축을 우선 만족시키면서 데이터 전송률도 향상 시키는 기법으로 TEDC(Throughput Enhancement Under Delay-Constraint)라 불리운다. 사용자별 트래픽 특성에 따른 허용 지연 시간(Tolerable Delay Time TDT)을 정의 하여 다양한 시간 지연 요구 조건을 차별화 하여 관리함으로써 무선 자원의 사용 효율을 향상시킨다. 논문에서 제안하는 TEDC 방식은 두 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는, 실시간 서비스를 위해 요구되는 시간 지연 구축을 만족하기 위해 잔여 허용 시간이 남지 않은 긴급한 사용자들에게 우선적으로 무선자원을 할당한다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 할당하고 남은 잉여 무선 자원에 대해서 자원의 활용도를 최대화하여 전체 데이터 전송률(Throughput)을 향상시킨다. 제안된 TEDC 방식의 성능은 기존의 자원할당 방식인 Round robin, M-LWDF, EXP 방식과 패킷 손실률, 데이터 전송률, 채널 활용도 측면에서 비교, 분석된다. 시뮬레이션 결과, TEDC 방식이 패킷 손실률, 데이터 전송률, 채널 활용도 측면에서 다른 자원 할당 방식보다 모두 우수한 성능을 보였다.

**Key Words** : OFDMA, 실시간트래픽, 패킷 스케줄링, 패킷손실률, Throughput, 채널활용도

ABSTRACT

In this paper, a packet scheduling scheme that supports real-time traffic having multi-level delay constraints in OFDMA systems is proposed. The proposed scheme pursues to satisfy the delay constraint first, and then manage the residual radio resource in order to enhance the overall throughput. A parameters named tolerable delay time (TDT) is newly defined to deal with the differentiated behaviors of packet scheduling according to the delay constraint level. Assuming that the packets violating the delay constraint are discarded, the proposed scheme is evaluated in terms of the packet loss probability, throughput, channel utilization. It is then compared with existing schemes for real-time traffic support such as the Exponential Scheduling (EXP) scheme, the Modified Largest Weighted Delay First (M-LWDF) scheme, and the Round robin scheme. The numerical results show that the proposed scheduling scheme performs much better than the aforementioned scheduling schemes in terms of the packet loss probability, while slightly better in terms of throughput and channel utilization.

\*이 논문은 2006년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2004-202-D00510).

\* 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (iroolroo@hotmail.com, hscho@ec.knu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-01-006, 접수일자 : 2007년 1월 17일, 최종 논문 접수일자 : 2007년 1월 17일

## I. 서론

한국형 휴대 인터넷 시스템인 와이브로 (WiBro)를 비롯한 세계적 기술 표준인 IEEE 802.16과 3GPP의 LTE (long term evolution)에서 변조 및 복조 방식으로 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 신호 전송 방식을 채택하고 있다. 특히 무선자원의 효율적 사용 및 주파수 선택적 페이딩 (frequency selective fading)에 대한 강인성으로 인해 OFDM에 근간을 둔 OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) 다중 접속 방식은 상기 열거한 시스템은 물론 IEEE 802.20 MBWA (mobile broadband wireless access)에서도 표준으로 채택되어 차세대 이동 통신 기술의 핵심적인 기능을 수행할 것으로 보인다 [1]-[4].

지금까지 무선 통신 자원의 희소성으로 인하여 효과적인 자원 관리 방식의 필요성이 강하게 제기되어 왔다. 무선 통신에서 채널 상태는 시간에 따라 변하며 (time varying), 이러한 환경에서의 다양한 종류의 링크 적응화 기법 (link adaptation techniques)이 연구되어 왔다. 그 중에서도 데이터 전송률 최대화 (throughput maximization)와 사용자간 공정성 (user fairness)을 동시에 만족시킬 수 있는 채널 할당 및 패킷 스케줄링 (scheduling) 방식이 집중적으로 연구되어 왔다 [5]-[8].

그러나, 실시간 트래픽의 QoS (quality of service) 측면에서는 데이터 전송률 최대화나 사용자간 공정성보다도 패킷 별 시간 지연 구속 (time delay constraints)을 만족시키는 것이 훨씬 더 중요하다. 과거처럼 균일한 (homogeneous) 실시간 음성 서비스 시장과는 달리 현재는 아주 다양한 종류의 멀티미디어 실시간 서비스가 소개되었고 점점 더 크게 성장하고 있다. 따라서 시간 지연 구속을 충족시키는 것을 가장 우선으로 하고 그에 덧붙여 사용자들의 채널 상태 (channel state)를 효과적으로 반영하여 데이터 전송률도 함께 향상시키는 스케줄링 방식이 절실히 필요하다.

그동안 실시간 트래픽의 전송을 보장하는 여러 가지 스케줄링 방식이 제안되어 왔다. EXP 방식 (the exponential rule)은 사용자의 채널 상태와 패킷의 버퍼 대기 시간 (waiting time)을 고려하여 스케줄링 하는 방식이며 버퍼 대기 시간에 더 큰 비중 (weighting)을 두는 방식이다. 사용자간 대기 시간에 큰 차이가 없을 경우에는 Proportional fairness 방식과 동일하게 동작한다 [9]-[10]. 또 다른 방식으로는 M-LWDF (modified largest weighted delay first) 방식이 있다. M-LWDF 방식은 패킷의 버퍼 대기 시간과 채널 상태를 동일하게

고려하여 스케줄링한다 [11]-[12]. 위의 두 가지 방식 모두 CDMA (code division multiple access) 환경에서 제안된 것이며 패킷별 상이한 지연 구속 값에 대해서는 고려하지 않았다. 이 밖에 Round robin 방식은 가장 간단한 스케줄링 방식이며 사용자 순서대로 돌아가면서 패킷을 전송하는 방식이다 [13]-[14]. 이 방식은 채널 상태나 대기 시간, 그리고 지연 구속 값에 대한 고려가 전혀 없기 때문에 지연에 민감한 실시간 트래픽 스케줄링에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 시스템에서 실시간 트래픽 전송을 위한 효율적 패킷 스케줄링 기법으로 패킷의 시간 지연 구속을 우선 만족시키면서 데이터 전송률도 향상시키는 TEDC (Throughput Enhancement Under Delay-Constraint) 방식을 제안한다. 트래픽 특성에 따른 다양한 시간 지연 요구 조건을 차별화 하여 관리함으로써 무선 자원의 사용 효율을 향상시킨다. 이를 위해 허용 지연 시간 (Tolerable Delay Time :TDT)을 정의한다. 본 논문에서 제안하는 TEDC 방식은 두 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는, 실시간 서비스를 위해 요구되는 시간 지연 구속을 만족하기 위해 잔여 허용 시간이 남지 않은 긴급한 사용자들을 우선적으로 처리한다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 할당하고 남은 잉여 무선 자원에 대해서 자원의 활용도를 최대화하여 전체 데이터 전송률 (Throughput)을 향상시킨다. 제안된 TEDC 방식의 성능은 기존의 자원할당 방식인 Round robin, M-LWDF, EXP 방식과 패킷 손실률, 데이터 전송률, 채널 활용도 측면에서 비교, 분석된다. 시뮬레이션 결과, TEDC 방식이 패킷 손실률, 데이터 전송률, 채널 활용도 측면에서 다른 자원 할당 방식보다 모두 우수한 성능을 보였다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 가진다. 2 장에서는 본 논문에서 고려하는 시스템 환경에 대해서 설명하고 3 장에서는 본 논문에서 제안하는 자원 할당 방식을 설명한다. 4 장에서는 시뮬레이션 결과를 이용하여 패킷 손실률과 데이터 전송률, 채널 활용도의 데이터를 분석하고 제안한 자원 할당 방식의 성능을 고찰하고 마지막으로 5 장에서 EXP, M-LWDF, Round robin 스케줄링 방식, 그리고 본 논문에서 제안한 방식의 성능비교를 바탕으로 종합적 분석을 통해 결론을 맺도록 한다.

## II. 시스템 환경

### 2.1. 채널 구조

그림 1은 본 논문에서 다루는 OFDMA 시스템의

### III. 제안하는 자원 할당 방식

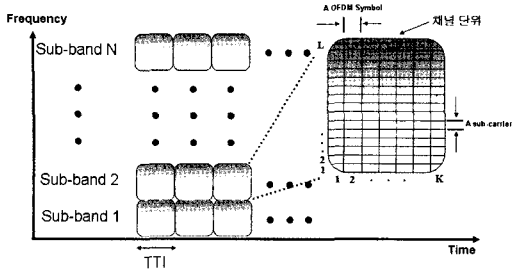


그림 1. OFDMA 채널구조

채널 구조를 나타낸다.  $N$ 개의 서브 밴드가 존재하고 스케줄링은 매 TTI마다 이루어진다고 가정한다. 기본 채널 단위는 한 개의 TTI에 해당하는  $K$ 개의 OFDM 심볼 (symbol)시간과 부반송파  $L$ 개로 이루어진 시간-주파수의 2차원적인 형태이고  $M (= K \times L)$  개의 OFDM 심볼들로 이루어져 있다[15]-[17].

#### 2.2. 적응형 변복조 부호화 기법

본 논문에서는 사용자의 채널 상태에 따라서 변조 및 채널 부호화 (modulation and coding scheme: MCS) 등급을 달리 적용하는 적응형 변복조 부호화 (adaptive modulation and coding: AMC) 방식을 적용한다. 무선 통신 환경에서는 시간에 따라서 채널의 상태가 변하며, 한정된 무선 자원을 효율적으로 사용하기 위해서는 시간에 따라 변하는 채널 상태에 가장 적합한 변조 및 부호화 방식을 사용하여 무선 자원의 효율을 높일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 무선 통신 환경을 고려하여 채널을 총 9 등급으로 구분하였고 등급마다 서로 다른 적응형 변복조 부호화 방식을 적용한다.

그림 1에서 보듯이 하나의 채널 단위는  $K$ 개의 OFDM 심볼과  $L$ 개의 부 반송파로 구성된다. 따라서 하나의 채널 단위는 총  $M (= K \times L)$  개의 OFDM 심볼들로 구성된다. 각 채널 단위의 신호 대 잡음비에 의한 MCS 등급은 총 9 등급 ( $M_1 \sim M_9$ )으로, 가장 낮은 등급인  $M_1$ 의 경우 BPSK 변조 방식과 1/4 부호화율을 사용한다. 이때,  $M$ 개의 OFDM 심볼을 통해서 전송할 수 있는 데이터량은  $M/4$ bits 이며, 이를 단위 패킷 크기로 정의한다. 또 각 MCS 등급에서 하나의 채널 단위를 통해 전송될 수 있는 패킷 크기는 단위 패킷 크기로 정규화되며 정수의 값을 갖는다고 가정한다.

#### 3.1. 첫 번째 단계: 최소 허용 지연시간 우선 자원 할당

각 사용자별 생성된 패킷은 일시적으로 버퍼에 머물다가 채널을 할당받은 경우, FIFO (first-in first-out) 방식으로 전송된다고 가정한다. 전체 사용자는 서비스 종류에 따라 크게 여섯 그룹으로 구분되며 사용자별 패킷은 서비스 종류에 따라 서로 다른 지연 구속 값을 가진다. 즉, 서로 다른 서비스를 이용하는 각각의 그룹 내 사용자 패킷은 서로 다른 지연 구속 값을 가지며 지연 구속 값 내에 패킷이 전송되지 않으면 실시간 서비스의 요구 조건을 만족하지 못한 것으로 간주하여 손실 되었다고 가정한다. 또한 각각의 사용자는 서로 독립적으로 버퍼를 운용한다.

그림 2는 본 논문의 수학적 모델에 사용된 변수의 의미를 도식적으로 보여준다. 그림 2에서  $x_i[n]$ 은  $n$  번째 TTI가 시작되기 직전에 사용자  $i$ 의 버퍼에 있는 패킷 수를 의미한다.  $\alpha_i[n]$ 은 번째 TTI동안 생성된 사용자  $i$ 의 패킷 수,  $\beta_i[n]$ 은  $n$ 번째 TTI 동안 전송된 사용자  $i$ 의 패킷 수를 나타낸다. 본 예에서 사

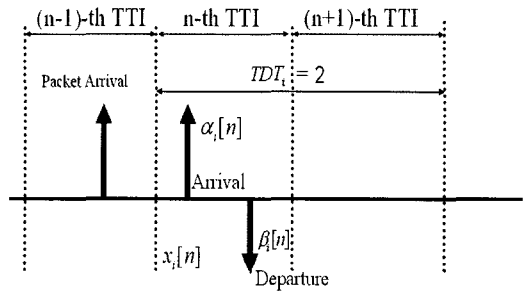


그림 2. 수학적 모델링에 사용된 변수.

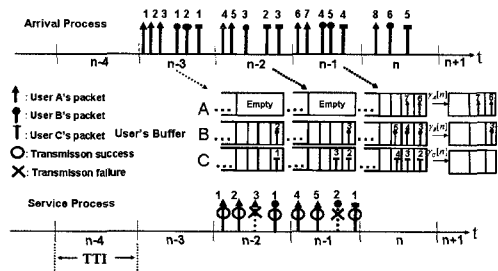


그림 3. TDT 개념 설명도

용자  $i$ 의 지연 인내 허용시간 (Tolerable Delay Time :TDT),  $TDT_i$ 는 2이다. 이 경우,  $(n-1)$ 번째 TTI에서 생성된 패킷은  $n$ 번째와  $(n+1)$ 번째 두 TTI 동안 전송되어야 실시간 서비스 요구 조건을 만족할 수 있다. 그림 3은 서로 다른 지연 인내 허용시간을 갖는 다중 사용자의 경우, 패킷의 전송과 손실, 버퍼의 상태에 대한 예를 보여준다. 세 명의 사용자 A, B, C가 있고 사용자 각각의 TDT는 1, 2, 3이라고 가정한다. 사용자 A, B, C의 패킷을 나타내는 그림 위의 숫자는 사용자별 패킷이 생성된 순서를 의미한다.  $(n-3)$ 번째 TTI 동안에 생성된 사용자 A, B, C 패킷의 수는 각각 3, 2, 1이다. 사용자 A의 TDT는 1이 때문에  $(n-3)$ 번째 TTI 동안에 들어온 모든 패킷은 지연 구속을 만족하기 위해서  $(n-2)$ 번째 TTI에서 모두 전송되어야 한다. 사용자 A의 경우,  $(n-3)$ 번째 TTI동안 버퍼에 들어온 세 개의 패킷 중 두 개는 전송되었고 나머지 하나는 전송되지 못하였다. 반면에 사용자 B의 경우, TDT가 2이기 때문에  $(n-3)$ 번째 TTI동안에 들어온 패킷은  $(n-2)$ 번째 TTI 혹은  $(n-1)$ 번째 TTI에서 전송되면 실시간 서비스 요구 사항을 만족시킬 수 있다. 따라서 사용자 B의  $(n-3)$ 번째 TTI동안 들어온 2개의 패킷 중에서  $(n-2)$ 번째 TTI에서 하나의 패킷만 전송되었지만 나머지 하나의 패킷은 손실되지 않고  $(n-1)$ 번째 TTI에서 전송 기회를 기다릴 수 있다. 사용자 C의 경우도 똑같은 원리에 의해서 패킷이 전송, 손실된다.

사용자  $i$ 가  $n$ 번째 TTI에서 전송해야만 하는 패킷 수를  $\gamma_i[n]$ 으로 나타낸다고 정의하면 사용자 A의 경우는 6번, 7번 패킷을 전송해야만 하고 사용자 B의 경우는 3번 패킷, 사용자 C의 경우는  $n$ 번째 TTI에서 반드시 전송해야만 하는 패킷은 없으므로

$$\gamma_A[n]=2, \gamma_B[n]=1, \gamma_C[n]=0$$

이 된다.

앞에서 정의한  $\gamma_i[n]$ 을 이용해서 전체 사용자를 식 (3-1), 식 (3-2)과 같이 크게 두 그룹, 급한 (Impatient) 그룹, 급하지 않은(Patient) 그룹으로 나눌 수 있다.

$$S_{ip} = \{i|\gamma_i[n] > 0, 1 \leq i \leq U\}, \quad (3-1)$$

$$S_p = S - S_{ip} = \{i|\gamma_i[n] = 0\}. \quad (3-2)$$

여기에서  $S$ 는  $n$ 번째 TTI에서 자원 할당을 받기 위해서 서로 경쟁하고 있는 모든 사용자의 집합이며,  $U$ 는

$S$ 의 크기이다.  $S_p$  그룹에 속한 사용자들은 현재  $n$ 번째 TTI에서의 패킷 전송이 실패하더라도 그 다음 TTI에서 패킷 전송의 기회가 있을 수 있다. 하지만  $S_{ip}$  그룹에 속한 사용자들은 패킷 전송의 기회가 현재 TTI 밖에 없기 때문에 자원 할당에 있어서  $S_p$  그룹보다 우선순위를 부여하는 것이 전체적인 지연 구속을 만족하는데 유리하다. 따라서 패킷 손실을 줄이기 위해서  $S_{ip}$  그룹에 속한 사용자에게 자원을 우선 할당 하여 패킷을 전송한다. 실시간 트래픽 전송에 있어서 가장 중요한 QoS는 서비스별 시간 지연 조건을 얼마나 충족시키는가에 있다. 최소 허용 지연 시간 우선 자원 할당 방식은 데이터 전송률이나 공정성과 같은 다른 QoS보다도 시간 지연 조건을 충족시키는데 가장 큰 우선순위를 두어 자원 할당 한다.

최소 허용 지연 시간 우선 자원할당 방식의 알고리즘을 설명한다. 각각의 패킷은 서로 다른 허용 지연 시간 값이 주어지고, 패킷이 처음 들어온 시점에서는 허용 지연 시간 값과 잔여 허용 시간 값은 서로 동일하다. 하지만 서브 밴드를 할당받지 못하여 패킷 전송이 이루어지지 않으면 사용자의 잔여 허용 시간 값은 1씩 감소하게 되고 잔여 허용 시간이 0이 되면 해당 패킷은 손실된다. 즉, 잔여 허용 시간이 1인 패킷은 현재 전송하지 않으면 손실되는 패킷을 의미하고 잔여 허용 시간이 1인 패킷을 가진 사용자는  $S_{ip}$  그룹에 속하게 된다. 최소 허용 지연 시간 우선 자원할당 방식은 식 (3-1)에서 구한  $S_{ip}$  그룹, 즉, 잔여 허용 시간이 1인 사용자의 패킷부터 서브 밴드를 할당하여 전송하며 잔여 허용 시간이 1인 값을 가지는 패킷 전송이 모두 이루어지고 나면 잠재적  $S_{ip}$ 인 잔여 허용 시간이 2인 패킷을 전송한다. 즉, 현재  $n$ 번째 TTI에서 전송되지 않으면 손실 처리 되는 패킷을 가진 사용자에게서 서브 밴드를 우선 할당하여 패킷을 전송하여 패킷의 시간 지연 조건을 최우선으로 만족시키는 기법이다.

동일한 잔여 허용 시간을 갖는 사용자가 두 명 이상일 경우는 서브 밴드의 비효율적인 사용을 방지하기 위하여  $\gamma_i[n]$  크기가 큰 사용자에게서 서브 밴드를 우선 할당한다. 왜냐하면  $\gamma_i[n]$ 이 작은 사용자에게서 서브 밴드를 우선 할당하게 되면 전송해야 하는 패킷 수보다 서브 밴드가 전송할 수 있는 패킷 수가 더 큰 경우가 생길 수 있고, 이런 경우에는 서브 밴드의 비효율적인 사용이 이루어지기 때문이다.

### 3. 2. 두 번째 단계: 데이터 전송률 향상

본 절에서는 첫 번째 단계에서 할당하고 남은 잉여

채널 자원에 대해서 자원의 사용 효율을 최대화하여 전체 데이터 전송률을 향상하기 위한 자원 할당 방식을 제안한다. 설명의 편의성을 위해 시스템 전체의 무선 채널 자원을 잉여 자원으로 간주한다.

$$H = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \dots & C_{1U} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & \dots & C_{2U} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & \dots & C_{3U} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{M1} & C_{M2} & C_{M3} & \dots & C_{MU} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

식 (3-3)은 각 단위 채널에 대해 사용자가 느끼는 채널 등급을 나타내는 채널 행렬 (channel matrix)이다.  $N$ 은 주파수 영역의 서브 밴드 개수를 나타내고  $U$ 는 사용자 수를 나타낸다. 따라서  $C_{ij}$ 는  $j$ 번째 사용자의  $i$ 번째 서브밴드 채널 상태를 나타낸다. 채널 상태는 최솟값 1에서 최댓값 9로 표시되며 따라서 채널 값이 클수록 채널 상태가 우수함을 나타낸다. 이러한 채널 상태에 따라 기본 채널 단위가 전송할 수 있는 패킷 수가 결정되며 본 논문에서는 2.2 절에서 언급하였듯이 9등급의 각 채널 상태에서 하나의 단위 채널을 통해서 전송할 수 있는 패킷 크기는 단위 패킷 ( $M/4\text{bits}$ )으로 정규화 되었다고 가정한다. 또한 분석의 편의성을 위해 각 채널 등급과 그 채널을 통해 전송되는 정규화된 패킷 개수는 일치한다고 가정한다. 즉, 채널 상태가 5인 채널 단위는 정규화된 다섯 개의 패킷을 전송할 수 있다. 사용자들은 주기적으로 MCS 등급이 포함되어 있는 채널 상태 정보 (channel state information)를 기지국에 보고하고 기지국은 이 정보를 바탕으로 AMC 등급을 결정하여 패킷을 전송한다.

$C_{avg}$ 를 채널 행렬  $H$ 를 이루는 구성 요소들의 평균 값이라 정의하면,

$$C_{avg} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^U \frac{C_{ij}}{N \times U} \quad (3-4)$$

이 된다.

$C_{max}$ 는 채널 행렬  $H$ 의 최댓값이고, 식 (3-9)으로 나타낼 수 있다.

$$C_{max} = \max[C_{ij}], \text{ for } 1 \leq i \leq N \text{ and } 1 \leq j \leq U. \quad (3-5)$$

채널 행렬  $H$ 의 행과 열, 각각의 평균은 식 (3-6), 식 (3-7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{Ri} = \frac{\sum_{j=1}^U C_{ij}}{U} \quad (3-6)$$

$$M_{Cj} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ij}}{N} \quad (3-7)$$

본 논문에서는 OFDMA 시스템을 고려하므로 다수 사용자와 다수 서브밴드가 존재한다. 각각의 사용자에게 대해서 서브 밴드가 가지는 채널 상태 중 최댓값을 가지는 사용자에게서 서브 밴드를 할당 하여 패킷을 전송하면 데이터 전송률을 향상시킬 수 있다. 하지만 하나의 서브 밴드에 대해서 최대 채널 상태 값을 가지는 사용자가 한명이 아니라 둘 이상일 경우, 어느 사용자에게 먼저 서브 밴드를 할당 하여야 하는지에 대한 문제가 생긴다. 이러한 문제를 고려하지 않고 서브 밴드를 할당하다 보면 채널 상태가 좋은 한명의 사용자가 다수의 서브 밴드를 할당 받음으로써 사용자간 공정성이 나빠질 수 있다. 하지만 최대한 다수의 사용자가 높은 채널 상태를 가지는 서브 밴드를 할당 받아서 패킷을 전송하면 데이터 전송률을 향상시키는 동시에 사용자간 공정성도 함께 향상시킬 수 있다.

표 1. OFDMA 시스템의 다수 사용자 다수 서브밴드의 예

User \ Sub-band	A	B	C	D	E
S1	9	9	8	1	5
S2	9	6	7	5	4

표 1은 다섯 명의 사용자와 두 개의 서브 밴드가 존재하는 OFDMA 시스템의 예를 보여준다. 사용자의 버퍼는 전송해야할 패킷이 충분히 많고, 하나의 서브 밴드는 한 명의 사용자에게만 할당 될 수 있다고 가정한다. 다섯 명의 사용자가 각각의 서브 밴드에 대해서 가지는 채널 상태 값은 S1이 9, 9, 8, 1, 5이고 S2는 9, 6, 7, 5, 4이다. 최대 채널 상태 값은 두 서브 밴드 모두 9이다. 따라서 데이터 전송률을 향상시키기 위해서

는 각각의 서브 밴드를 채널 상태 9를 가지는 사용자에게 할당하면 된다. 먼저 S1부터 채널 상태 9를 가지는 사용자 A에게 할당하고 S2를 마찬가지로 채널 상태 9를 가지는 사용자 A에게 할당한다고 가정하자. 이 경우, 최대 채널 상태를 가지는 서브 밴드를 사용자 A에게 할당 하였으므로 데이터 전송률은 향상될 수 있지만 두 개의 서브 밴드 모두가 사용자 A에게 할당되어서 사용자간 공정성은 나빠진다. 반대로 서브 밴드 할당 순서를 S2를 먼저 사용자 A에게 할당 하고 S1은 최대 채널 상태 값을 가지는 다른 사용자 B에게 할당하자. 이 경우 데이터 전송률은 첫 번째 경우와 동일하지만 서브 밴드는 사용자 A에게 모두 할당된 것이 아니라 사용자 A, B에게 할당 되었으므로 사용자간 공정성은 향상되었다. S2의 경우 사용자 A만이 최대 채널 상태 9를 갖는다. 따라서 다른 사용자에게 S2가 할당되면 최대 채널 상태 9를 사용하지 못하고 낮은 채널 상태를 사용하여 패킷 전송을 하므로 자원의 효율성이 떨어지게 된다. 반면에 S1의 경우 사용자 A외에도 사용자 B도 최대 채널 상태를 가지므로 반드시 사용자 A에게 할당되지 않더라도 최대 채널 상태를 사용할 수 있다[18].

표 1과 함께 설명한 예와 같이 데이터 전송률 향상 자원 할당 방식을 정의할 때 우선 고려하여야 하는 서브 밴드 구별 인자와 동일한 개념으로 사용자 구별 인자를 지금부터 정의한다. 먼저 서브 밴드 할당 순서의 우선순위를 결정하는 서브 밴드 구별 인자인 SDF (Subband discrimination factor)를 식 (3-8)에서 새롭게 정의한다.

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^U a_{ij} (C_{\max} - C_{ij})^2}}{M_{Ri}} \quad (3-8)$$

이 때,  $b_i = \sum_{j=1}^U a_{ij}$ 로 정의되며  $a_{ij}$ 는 인덱스 행렬  $I$ 의 구성값으로 다음과 같이 정의된다.

$$I = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1U} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2U} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3U} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & \dots & a_{NU} \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } a_{ij} > C_{avg}. \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-10)$$

$\sigma_i$ 는 서브 밴드  $i$ 가 각각의 사용자들에 대해서 가지는 채널 상태 중  $C_{avg}$ 보다 큰 채널 상태 값들의  $C_{\max}$ 에 대한 편차의 합을  $M_{Ri}$ 로 나눈 값이다. 즉,  $\sigma_i$ 가 작을수록 서브밴드  $i$ 가 각각의 사용자에 대해서 가지는 채널 상태 값이  $C_{\max}$ 에 가깝다는 것을 의미한다.

서브 밴드들 간에 동일한 SDF를 가지는 것을 방지하기 위해서 식 (3-8)에서  $C_{avg}$ 보다 큰 채널 상태 값들의  $C_{\max}$ 에 대한 편차의 합을  $M_{Ri}$ 로 나누어 주었다. SDF는 하나의 서브 밴드에 대해서  $C_{\max}$ 와 모든 사용자의 채널 값들과의 편차의 합으로 구하는 것이 아니라  $C_{avg}$ 이상의 채널 값들과의 편차의 합으로 구해지므로 경우에 따라서 전체적인 서브 밴드의 채널의 우수성이 다를지라도 동일한 SDF가 생길 수 있다.

식 (3-8)에서 구한 SDF는 서브 밴드 할당의 우선순위를 정하는데 이용된다.  $\sigma_i$ 가 작을수록( $\sigma_i=0$ 이 아닌 경우)에, 서브밴드  $i$ 에 대해서 좋은 채널 상태를 가지는 사용자가 많다는 의미이고, 데이터 전송률을 향상시키면서 공정성을 함께 고려하기 위해서는 채널 상태 최댓값이 동일한 경우  $\sigma_i$ 가 큰 서브 밴드부터 우선 할당한다. 서브 밴드들 간의 우선순위를 SDF를 이용하여 결정한 것과 동일한 원리로 사용자 구별 인자를 결정할 수 있다. 이를 위해 UDF (User discrimination factor)가 다음과 같이 정의된다.

$$u_j = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N a_{ij} (C_{\max} - C_{ij})^2}}{M_{Cj}} \quad (3-11)$$

이때,  $d_j = \sum_{i=1}^N a_{ij}$ 이며,  $u_j$ 가 작을수록 사용자  $j$ 에 대해서 높은 채널 상태를 갖는 서브 밴드들을 많이 가지고 있다는 의미이다. 따라서 서브 밴드 할당 우선순위 결정과 마찬가지로 주어진 서브 밴드에 대해서 동일한 채널 상태를 갖는 사용자가 두 명 이상일 때  $u_j$ 가 큰 사용자부터 서브 밴드를 할당한다.

그림 4는 1 TTI동안에 SDF와 UDF를 이용한 서브 밴드 할당 과정을 보여준다. 여섯 명의 사용자와 다섯 개의 서브 밴드가 있다고 가정하였다. 각각의 정수는

채널 행렬  $H$ 에서의 채널 상태 값이다. 각각의 서브 밴드는 최대 채널 상태에 따라서 크게 두 그룹으로 나누어진다. 최대 채널 상태 값이 8인 Sub-band 2, Sub-band 3, Sub-band 4가  $G_8$  그룹에 속하고, 최대 채널 상태 값이 7인 Sub-band 1, Sub-band 5가  $G_7$  그룹에 속한다.

$$G_7 = \{ \text{Sub-band 1, Sub-band 5} \},$$

$$G_8 = \{ \text{Sub-band 2, Sub-band 3, Sub-band 4} \}.$$

Freq.	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6	SDF	Selected user
Sub-band 5	7	7	4	4	6	6	0.2790	User 2
Sub-band 4	7	4	1	7	4	8	0.1580	User 6
Sub-band 3	5	2	5	8	7	5	0.1326	User 4
Sub-band 2	4	4	1	8	8	7	0.1083	User 5
Sub-band 1	5	7	7	7	3	4	0.1818	User 3
UDF	0.1786	0.2083	0.2778	0.1040	0.2305	0.2152		

그림 4. 1 TTI동안의 서브밴드 할당 과정.

데이터 전송률을 향상시키기 위해서는 높은 채널 상태를 가지는 그룹인  $G_8$ 이  $G_7$ 보다 먼저 할당되어야 한다.  $G_8$ 에 속한 서브 밴드들 중에서는 SDF 값이 가장 큰 Sub-band 4가 사용자 6에게 가장 먼저 할당되고, 그 다음으로 SDF 값이 큰 Sub-band 3이 사용자 4에게 할당된다.  $G_8$  그룹 중 Sub-band 2가 마지막으로 할당되는데 Sub-band 2의 경우, 8의 채널 상태 값을 가지는 사용자가 한명이 아니라 사용자 4, 사용자 5, 두명이다. 이 경우에는 SDF를 이용한 서브 밴드 할당 과정과 동일한 이유로 Sub-band 2는 UDF 값이 큰 사용자 5에게 할당된다.  $G_8$ 의 서브 밴드 할당이 끝났으므로  $G_7$ 에 속한 서브 밴드들 중에서 SDF 값이 큰 Sub-band 5가 사용자 2에게 먼저 할당되고 마지막으로 Sub-band 1이 사용자 3에게 할당되어 패킷 전송이 이루어진다.

본 논문에서 TEDC 방식은 앞에서 설명한 두 단계로 이루어져 있으며, 패킷의 실시간 트래픽 전송을 우선적으로 보장하면서 동시에 데이터 전송률을 향상시키는 방식이다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 절에서는 본 논문에서 제안한 TEDC 방식을 기존의 할당 방식인 Round robin, M-LWDF, EXP

방식과의 시뮬레이션 결과를 가지고 성능을 비교, 분석한다.

##### 4.1. 시뮬레이션 환경 및 파라미터

본 논문의 시뮬레이션 환경에 사용된 채널 구조는 OFDMA 시스템을 이용하는 3GPP LTE의 에릭슨 모델을 참조하였다[16]-[17]. 2005년 5월 그리스에서 열린 RAN WG1 #41에서 제시한 OFDM 파라미터는 TTI를 기준으로 0.5, 0.625, 0.667msec 세 가지를 후보로 선택하였고 2005년 6월 프랑스에서 열린 RAN WG1 Ad Hoc on LTE 회의에서 표 3과 같이 0.5msec로 결정되었다[16]. 0.5msec를 선택함으로써 한 개의 프레임(10msec)내에 20개의 TTI가 배치될 수 있다. 또한 부반송파 간격도 15kHz로 확정되면서 OFDM 심볼 시간이 결정되었고 한 개의 TTI 동안 사용되는 OFDM 심볼 시간도 일반 셀에서 7개 (short CP)와 MBMS용은 6 (long CP)개로 고정되었다. 대역폭은 2005년 3월의 도쿄 회의에서와 동일하게 1.25, 2.5, 5, 10, 15, 20 MHz로 다양하게 선택할 수 있도록 하였다. 본 논문의 시뮬레이션 환경에서는 대역폭을 10MHz로 정하여 Sampling 주파수는 15.36MHz이고 FFT(Fast Fourier Transform) 크기는 1024이다.

본 논문의 시뮬레이션에 사용된 채널 환경은 레일리 페이딩 (rayleigh fading) 과 Additive White Gaussian Noise (AWGN)이 고려되었다. 일반적으로 여러 방향에서 신호가 들어오는 환경에서 수신된 신호는 레일레이(Rayleigh) 분포를 따르게 된다. 이 신호에 AWGN이 함께 고려되면 채널 환경에서의 신호 대 잡음비 (SNR: signal to noise ratio)의 변화는 식 (4-1)의 분포를 따른다[19]-[20].

$$p(\gamma) = \frac{1}{\gamma_0} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right), \quad \gamma \geq 0 \quad (4-1)$$

본 논문의 시뮬레이션에는 평균 신호 대 잡음비( $\gamma_0$ )를 18dB로 가정했다[18].

본 논문의 시뮬레이션에 사용된 적응형 변조 및 코딩의 MCS 등급은 앞에서 설명한 바와 같이 총 9 등급으로 나누어진다. 표 2는 SNR 값에 따른 MCS 등급 구분과 MCS 등급 별 사용하는 변조 방식 및 하나의 기본 채널에서 전송할 수 있는 패킷 수를 나타낸다. 표 2에서처럼 MCS 등급은 해당 서브밴드의 SNR 값을 기준으로 결정된다.

표 3은 본 논문에서 사용한 시뮬레이션 파라미터를 정리해 놓은 표이다. 각각 사용자별 패킷은 TTI마다

각각 7, 8, 9의 평균값으로 포아송 분포를 따라서 발생 시켰다. 여기서 평균값은 하나의 TTI동안 발생한 평균 패킷 개수를 의미하며 여기서 모든 패킷의 사이즈는 동일하다고 가정한다. 총 9등급의 MCS 등급을 사용하였으며 MCS 1등급의 기본 채널 단위가 전송할 수 있는 실제 데이터 크기는 43.75 bits이다. 서브 밴드와 사용자 수는 24로 동일하다. 사용자의 실시간 서비스 종류에 따라서 시간 지연 구속 값인 TDT는 각각 다르다고 가정하며, 4명의 사용자가 동일한 하나의 서비스를 받는다고 가정한다. 즉, 4명이 동일한 TDT 값을 갖고, 표 3에서 TDT 값이 총 6가지이므로 사용자는 24명으로 정의하였다.

표 2. MCS 등급 기준 및 변조 방식

MCS 등급	$Min \leq SNR \leq Max$	변조 방식	부호화율 R	전송 가능한 패킷 수
$M_1$	$SNR < 2dB$	BPSK	1/4	1
$M_2$	$2dB \leq SNR < 5dB$	BPSK	1/2	2
$M_3$	$2dB \leq SNR < 5dB$	BPSK	3/4	3
$M_4$	$2dB \leq SNR < 5dB$	QPSK	1/2	4
$M_5$	$2dB \leq SNR < 5dB$	QPSK	5/8	5
$M_6$	$2dB \leq SNR < 5dB$	QPSK	3/4	6
$M_7$	$2dB \leq SNR < 5dB$	QPSK	7/8	7
$M_8$	$2dB \leq SNR < 5dB$	16QAM	1/2	8
$M_9$	$2dB \leq SNR < 5dB$	16QAM	9/16	9

표 3. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	특징
패킷발생	포아송 (poisson)분포, 사용자 별 평균: 7, 8, 9
TDT	200, 300, 400, 500, 1500, 2000 TTI
무선채널	AWGN+Rayleigh fading channel
신호 대 잡음비 (SNR)	지수 (exponential)분포, 평균값: 18dB
평균 채널 상태 값, $C_{avg}$	6
MCS 등급	총 9등급
MCS 등급별 전송하는 데이터 크기	$M_i = i \times 43.75 \text{ bits}$ , $1 \leq i \leq 9$
하나의 TTI에서의 OFDM 심볼, $K$	7
하나의 서브밴드의 부반송파, $L$	25
기본 채널 단위가 전송하는 실제 데이터 크기, $M/4$	43.75 bits
서브밴드 $N$	24
사용자, $U$	24
시뮬레이션 시간	50,000 TTI

4.2. 결과 분석 - 패킷 손실률

그림 5는 기존의 자원 할당 방식인 Round robin 방식, M-LWDF방식, EXP 방식과 본 논문에서 제안하는 TEDC 방식을 패킷 손실률 측면에서 성능을 비교한 그림이다. 여기에서 패킷 손실률은 전체 TTI에서 전송되어야 하는 패킷 수와 서브 밴드를 할당 받지 못하여 손실되는 패킷 수의 비로 나타낸다. 그림에서 X 축에서 숫자는 1 TTI 동안 발생하는 평균 패킷 수를 나타내며 패킷의 발생은 포아송 과정을 따른다. 그림에서 Y축은 패킷 손실률을 로그 스케일로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, TEDC 방식의 성능이 가장 우수하며, 사용자의 채널 상태와 패킷의 대기 시간에 대한 고려 없이 사용자 순서대로 서브 밴드를 할당하는 Round robin 방식의 성능이 가장 떨어지는 것을 확인할 수 있다. TEDC 방식은 잔여 허용 시간이 남지 않은 긴급한 사용자들의 패킷을 우선적으로 처리함으로써 패킷 손실률 측면에서의 성능이 가장 우수하다. 반면에, EXP 방식과 M-LWDF 방식의 경우 EXP 방식의 성능이 더 우수하다. EXP 방식은 M-LWDF 방식과는 달리 서브 밴드를 할당할 때, 패킷의 버퍼 대기시간에 좀더 비중을 두어 패킷을 전송하기 때문에 M-LWDF 방식보다 우수한 성능을 보인다. Round robin 방식의 경우는, 잔여 허용시간이나 패킷의 대기 시간은 전혀 고려하지 않고, 사용자의 순서대로 패킷을 전송하여 가장 낮은 성능을 나타낸다.

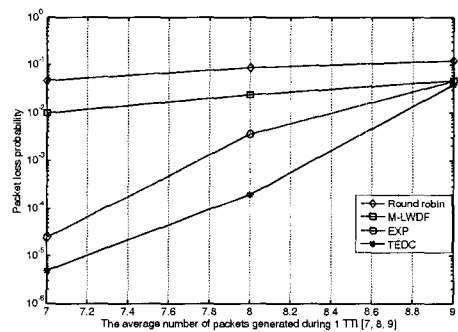


그림 5 1 TTI동안 발생하는 평균 패킷 수에 따른 패킷 손실률.

4.3. 결과 분석 - 데이터 전송률

그림 6은 기존의 자원 할당 방식인 Round robin 방식, M-LWDF방식, EXP 방식과 본 논문에서 제안하는 TEDC 방식을 데이터 전송률 측면에서 성능을 비교한 그림이다. 여기에서 데이터 전송률은 1 TTI 동안 전송



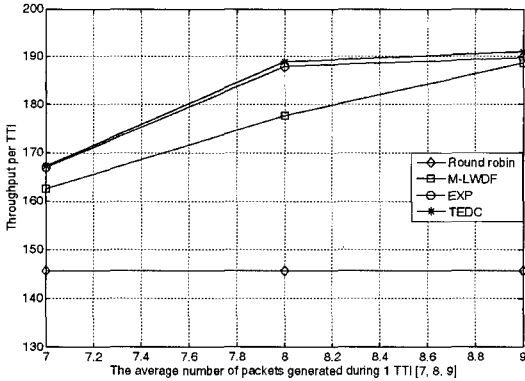


그림 6 1 TTI 동안 발생하는 평균 패킷 수에 따른 데이터 전송률

되는 평균 패킷 수로 정의 하였다. TEDC 방식이 다른 방식들에 비해서 가장 우수한 성능을 나타낸다. 본 논문에서 고려하는 시스템에서 최대 데이터 전송률은  $216(=9 \times 24)$ 이며, 9는 채널이 가질 수 있는 최댓값을 나타내고, 24는 서브 밴드 수이다. TEDC 방식의 경우, 1 TTI 동안 발생하는 평균 패킷 수가 9일 때, 데이터 전송률은 거의  $192(=8 \times 24)$ 로써 평균 8의 채널 상태로 효율적인 패킷 전송이 이루어진 것을 확인할 수 있다. EXP 방식의 경우, 1 TTI 동안 발생하는 평균 패킷 수가 9일 때, 데이터 전송률은 거의  $190(=7.9167 \times 24)$ 로써 약 평균 7.92의 채널 상태로, M-LWDF 방식의 경우는  $188(=7.8333 \times 24)$ 로써 약 평균 7.83의 채널 상태로 패킷을 전송하였다. Round robin 방식의 경우, 데이터 전송률은  $144(=6 \times 24)$ 에서 수렴하는데 이는 평균 채널 상태인 6으로 패킷을 전송하였다는 것을 의미한다.

#### 4.4. 결과 분석 - 채널 활용도

그림 7은 기존의 자원 할당 방식인 Round robin 방식, M-LWDF 방식, EXP 방식과 본 논문에서 제안하는 TEDC 방식을 채널 활용도 측면에서 성능을 비교한 그림이다. 채널 활용도를 정의하기 전에 먼저 식 (3-9)를 이용해서 1 TTI 동안 모든 사용자들이 패킷을 전송할 때 사용할 수 있는 기본 채널 단위의 최대 채널 값들의 합을 식 (4-2)와 같이 정의한다.

$$Add(C_{\max}) = \sum_{i=1}^N \max_{k \in J_{iV}} [C_{ij}] \quad (4-2)$$

채널 활용도는 식 (4-2)에서 정의한  $Add(C_{\max})$ 와 1 TTI 동안 사용자들이 전송한 실제 패킷 수의 비로 나

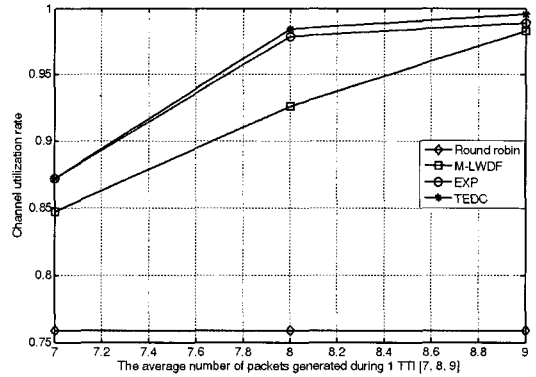


그림 7 1 TTI 동안 발생하는 평균 패킷 수에 따른 채널 활용도

타낸다. 즉, 채널 활용도가 1에 가깝다는 것은 주어진 채널을 최적으로 활용했다는 의미가 된다. 채널 활용도는 데이터 전송률과 관계가 있으므로 그림 7은 그림 6과 거의 똑같은 경향을 보인다. TEDC 방식이 가장 우수한 성능을 보이며, 1 TTI 동안 발생하는 평균 패킷 수가 9일 때, 채널 활용도가 거의 1에 가까워진다. EXP 방식은 채널의 효율적인 사용으로 M-LWDF 방식보다 우수한 성능을 보이며, Round robin 방식은 1 TTI 동안 발생하는 평균 패킷 수가 증가할수록 채널 활용도는 약 0.76으로 일정한 것을 볼 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 OFDMA 시스템에서 실시간 트래픽 전송을 위한 효율적 무선 자원 할당 기법을 제안하였다. 실시간 트래픽은 서로 다른 실시간 서비스 종류에 따라 서로 다른 시간 지연 구속 값을 가진다. 이처럼 서로 다른 시간 지연 값을 가지는 실시간 트래픽의 효율적인 처리를 위해서 전송시까지 허용되는 시간 지연 값인 TDT를 새롭게 정의하였고 이를 이용하여 최소 허용 지연 시간 우선 자원 할당과 데이터 전송률 향상의 두 단계로 이루어진 TEDC 방식을 제안하였다. TEDC 방식은 패킷의 잔여 허용 시간 값에 따라서 사용자를 크게  $S_{ip}$ 와  $S_p$ 의 그룹으로 구분하여 현재 TTI에서 전송되지 않으면 손실되는 패킷을 가지는  $S_{ip}$  그룹에 우선 서브 밴드를 할당하여 패킷을 전송함으로써 패킷 손실률을 줄인다.  $S_{ip}$  그룹의 서브 밴드 할당 후에 사용가능한 서브 밴드가 있을 경우, 데이터 전송률을 향상시키는 방식으로  $S_p$  그룹에 서브 밴드를 할

당하여 패킷을 전송한다. 시뮬레이션 결과, TEDC 방식이 패킷 손실률, 데이터 전송률, 채널 활용도 측면에서 다른 자원 할당 방식보다 모두 우수한 성능을 보였다. 향후에는 보다 다양한 방식과 시뮬레이션 결과의 비교를 통해서 제안하는 방식의 우수성을 증명하고, 제안한 방식의 수학적 모델에 대한 연구를 통해 보다 최적화된 자원 할당 방식을 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] 김동철, 신현준, 홍인기, "OFDMA 시스템에서 AMC를 위한 전력할당 방식에 관한 연구", *한국항공학회논문지*, 2005.

[2] 김재각, 전문석, "정보통신 : 4 세대 무선통신을 위한 OFDM 전송기술의 성능분석", *정보처리학회논문지*, 2001.

[3] 지성태, 최홍식, "유비쿼터스 서비스 ; 휴대인터넷(Wibro) 비즈니스 모델 연구", *춘계학술대회*, 2005.

[4] Jianhua Liu, Jian Li, "Packet Design and Signal Processing for OFDM-Based Mobile Broadband Wireless Communication Systems", *Mobile Computing, IEEE Transactions on* Volume 5, Issue 9, Sept. 2006.

[5] A. Gyasi-Agyei, Seong-Lyun Kim, "Comparison of opportunistic scheduling policies in time-slotted AMC wireless networks", *Wireless Pervasive Computing*, 2006 1st International Symposium on 16-18 Jan. 2006 Page(s):6 pp.

[6] H. Aida, Y. Tamura, Y. Tobe, H. Tokuda, "Wireless packet scheduling with signal-to-noise ratio monitoring", *Local Computer Networks*, 2000. 8-10 Nov. 2000 Page(s):32 - 41

[7] W.K. Wong, Haiying Zhu, V.C.M. Leung, "Soft QoS provisioning using the token bank fair queuing scheduling algorithm", *Wireless Communications*, Volume 10, Issue 3, Jun 2003 Page(s):8 - 16

[8] Songwu Lu, V. Bharghavan, R. Srikant, "Fair scheduling in wireless packet networks", *Networking, IEEE/ACM Transactions on*

Volume 7, Issue 4, Aug. 1999 Page(s):473 - 489

[9] S. Shakkottai and A. L. Stolyar, "Scheduling for Multiple Flows Sharing a Time-Varying Channel: The Exponential Rule," *Bell Laboratories Technical Report*, December, 2000.

[10] S. Shakkottai and A. L. Stolyar, "Scheduling Algorithms for a Mixture of Real-Time and Non-Real-Time Data in HDR," *Bell Laboratories Technical Report*, 2000.

[11] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. L. Stolyar, R. Vijayakumar, P. Whiting, "CDMA Data QoS Scheduling on the Forward Link with Variable Channel Conditions," *Bell Laboratories Technical Report*, April, 2000.

[12] S. C. Tsao, and Y. D. Lin, "Pre-order Deficit Round Robin: A New Scheduling Algorithm for Packet-Switched Networks," in *Computer Networks* 35 (2-3) 2001, pp. 287-305.

[13] C. M. Arm, J. F. Kurose, D. S. Reeves, and H. Schulsrinne, "Real-Time Communication in Packet-Switched Networks," *Proc. IEEE*, pp. 122-139, 1994

[14] H. J. Band, T. Ekman, D. Gesbert, "A channel predictive proportional fair scheduling algorithm," *Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2005 IEEE 6th Workshop on 5-8 June 2005 Page(s):620 - 624

[15] 3GPP TR 25.814 V1.0.2, "Physical Layer Aspects for Evolved UTRA (Release 7)," 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, January 2006.

[16] 3GPP R1-050255, "E-UTRA ? Downlink Transmission Scheme," April 2005.

[17] 3GPP R1-050619, "E-UTRA Downlink Radio Access," June 2005.

[18] 황성호, "OFDMA에서 AMC를 이용한 효율적인 자원할당 방안," *경북대학교 석사학위 논문 청구*, 2005.

[19] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, "Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System," *IEEE VTC*

2000-Spring, Vol. 2, pp. 1854-1858, May 2000.

- [20] Yonghong Zhang, G. David Michelson, "Opportunistic QoS Enhanced Scheduler for Real-time Traffic in Wireless Communication Systems", *IEEE VTC* 2006-Fall, September 2006.
- [21] 3GPP R1-050386, "Views on OFDM Parameter Set for Evolved UTRA Downlink," May 2005.
- [22] Toni Janevski, *Traffic analysis and design of wireless IP networks*, Artech House, 2003.
- [23] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1989.

박 정 식 (Jeongsik Park)

준회원



2005년 2월 : 경북대학교 전자전  
기공학부 공학사  
2007년 2월 현재 : 경북대학교  
정보통신학과 공학석사  
<관심분야> 이동통신시스템, 무  
선자원관리

조 호 신 (Ho-Shin Cho)

정회원



1992년 2월 : 한국 과학기술원 전  
기 및 전자공학과 공학사  
1994년 2월 : 한국 과학기술원 전  
기 및 전자공학과 공학석사  
1999년 2월 : 한국 과학기술원 전  
기 및 전자공학과 공학박사  
1999년 3월~2001년 2월 : 한국전

자통신연구원 선임연구원

2001년 3월 ~ 2003년 2월 : 한국항공대학교 전자정보  
통신컴퓨터공학부 전임강사

2003년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부  
조교수

<관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 트래픽 제  
어, Cognitive Radio, Sensor Network