DBpia



# TDD-OFDMA 하향 링크에서의 수율 공평성과 서비스 커버리지 보장을 위한 패킷 스케줄링 알고리즘 연구

정회원 기 영 민*, 김 동 구*

# Packet Scheduling Algorithms for Throughput Fairness and Coverage Enhancement in TDD-OFDMA Downlink Network

Young Min Ki*, Dong Ku Kim* ***Regular Members***

요 약

본 논문은 IEEE 802.16e 기반의 TDD-OFDMA 하향 링크에서의 수율 공평성 및 서비스 커버리지 보장을 위한, WFS(Weighted Fair Scheduling) 알고리즘과 TGS(Throughput Guarantee Scheduling) 알고리즘을 제안하고, RR(Round Robin), PF(Proportional Fair), FFTH(Fast Fair Throughput), FTH(Fair Throughput) 스케줄링 알고리즘과의 비교를 통한 성능 분석을 수행하였다. 제안된 알고리즘의 성능은 64 kbps와 128 kbps 의 두 개의 최소 사용자 수율 요구 조건에서의 서비스 커버리지, 유효 섹터 수율, 공평성 평가를 통하여 분석되었다. 상대적으로 낮은 64 kbps 요구 조건에서, 제안된 알고리즘은 1xEV-DV 공평성 기준을 만족시키면서, 기존의 스케줄링 방식들보다 서비스 커버리지 내의 가용 사용자 수를 증가시켰다. 또한 128 kbps 요구 조건에서는 PF 스케줄링 방식에 비하여 유효 섹터 수율의 손실이 거의 없이, 서비스 커버리지를 증가시킬 수 있음을 보였다.

Key Words : Packet Scheduling, IEEE 802.16e, TDD-OFDMA, WFS(Weighted Fair Scheduling), TGS (Throughput Guarantee Scheduling)

ABSTRACT

The present paper proposes two different packet scheduling algorithms in the IEEE 802.16e type TDD-OFDMA downlink, which are the weighted fair scheduling(WFS) and the throughput guarantee scheduling(TGS). The performance of proposed scheduling algorithms are compared to some of conventional schedulers such as round robin(RR), proportional fair(PF), fast fair throughput(FFTH), and fair throughput(FTH) in terms of service coverage, effective throughput and fairness at 64 kbps and 128 kbps minimum user throughput requirements. For a relatively smaller throughput(64 kbps) requirement, the proposed algorithms provide higher improvement in the number of users per sector within 95% service coverage while satisfying the 1xEV-DV fairness criterion. For a relatively larger throughput(128 kbps) requirement, the proposed algorithms provide higher coverage enhancement while maintaining the same effective aggregate throughput over PF scheduler.

## Ⅰ. 서 론

링크 적응(link adaptation)과 채널 스케줄링(channel scheduling)은 3G 무선 네트워크에서의 동적 자원 관리에서의 중요한 역할을 하는 기술이다[1]. 단일 반송파 기반의 cdma2000 1xEV-DO(1xEVolution Data

* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신 연구실(mellow@yonsei.ac.kr)
논문번호 : KICS2005-03-097, 접수일자 : 2005년 3월 8일
※이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2004-013-D00060)



Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

Optimized)[2], 1xEV-DV(1xEVolution Data and Voice)[3], HSDPA(High Speed Downlink Packet Access)[4] 등은 링크 적응과 채널 스케줄링을 사용하는 대표적인 3G 시스템으로서, 시변하는 페이딩 채널의 특성을 이용하는 시간 축에서의 다중 사용자 스케줄링은 시스템 용량을 혁신적으로 증가시켰다.

다중 반송파 기반의 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 기술은 초고속 데이터 전송률을 요구하는 WLAN(Wireless Local Area Network) 및 3.5G, 4G 시스템의 핵심 전송 기술로서 기대되고 있다[1]. 광대역 채널에서는 페이딩의 시변하는 특성과 더불어, 주파수 측에서의 페이딩 변이가 시스템 성능에 영향을 미치게 된다. 광대역의 RF 채널을 수백에서 수천 개의 부채널로 분할하여 데이터를 전송하는 OFDM 시스템에서, 주파수 측의 페이딩 변이를 극복하기 위한 기술은 주파수 디버시티(frequency diversity)와 주파수 선택(frequency selectivity)의 두 가지로 분류할 수 있다[5]. 주파수 디버시티는 여러 부채널에 걸쳐 동일한 변조 및 부호화 방식을 사용함으로서, 특정 대역이 깊은 페이딩에 빠져 시스템 전체가 성능 열화 되는 현상을 막을 수 있는 기술이다.

주파수 선택은 각 주파수 대역에서의 채널 특성을 이용하여 시스템 용량을 향상시키는 방법으로서, 각 부채널에서의 링크 적응 및 채널 스케줄링을 적용하여 구현할 수 있다. OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 시스템에서의 주파수 선택성을 이용한 채널 스케줄링에 대한 연구는[5-10] 등에서 볼 수 있다. 이와 같은 연구에서는 3G 기반의 스케줄링 알고리즘과 전력 제어 알고리즘을 광대역 OFDMA 시스템에 적용함으로서 시스템 수율 향상 및 이에 따른 공평성 연구에 주로 초점이 맞추어져 있을 뿐, 여전히 사용자 QoS에 대한 명확한 개념 및 서비스 커버리지에 대한 개념을 확립되지 못했다. 사용자 QoS는 공평성 및 최소 사용자 수율 보장으로 얻어질 수 있으며, 서비스 커버리지는 최소 사용자 수율을 보장하는 범위로서 정의될 수 있다. 본 연구에서는 IEEE 802.16e TDD-OFDMA[11-13] 하향 링크에서의 여러 스케줄링 방식들에 대한 연구를 통하여 수율 및 서비스 커버리지, 공평성 성능을 분석하였다. 또한, 수율 공평성 제공을 위한 WFS(Weighted Fair Scheduling) 알고리즘과 최소 사용자 수율 보장을 위한 TGS(Throughput Guarantee Scheduling)알고리즘을 제안하고 성능을 비교 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 TDD-OFDMA 네트워크에서의 하향 링크 스케줄링 구조 및 3G 스케줄링 알고리즘에 대한 설명을 하였다. 제3장은 본 논문에서 제안한 WFS와 TGS 알고리즘을 설명하였다. 제4장은 모의실험을 통한 성능 분석을 수행하였으며, 제5장에서는 결론을 논하였다.

## Ⅱ. TDD-OFDMA 하향 링크 스케줄링

### 2.1 TDD-OFDMA 하향 링크 스케줄링 구조

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송기술은 페이딩 채널의 지연 확산(delay spread) 보다 큰 CP(Cyclic Prefix)를 사용하여, 다중 경로 페이딩 및 ISI(Inter-Symbol Interference)에 대하여 효율적인 전송률을 얻을 수 있는 전송 기술이다. OFDMA는 OFDM 전송 기술을 기반으로 한 시간-주파수 분할 다중 접속 기술로서 IEEE 802.16d [11] 및 802.16e[12-13] 규격에 채택 중이다. 고정된 길이의 OFDMA 프레임은 하향 링크(DL) 프레임과 상향 링크(UL) 프레임으로 구성된다. 광대역 RF 대역폭은 수백에서 수천 개의 부반송파로 나누어지며, 부반송파의 수는 OFDM FFT 크기와 같다. 부채널은 여러 개의 부반송파가 모여져서 구성되는데, 이는 스케줄러가 다룰 수 있는 최소 자원단위가 된다. 일반적으로 부채널 크기는 결합 대역폭(coherence bandwidth)보다 크게 설계된다.

TDD(Time Division Duplexing) 시스템은 연속적인 하향 스트림이나 상향 스트림을 제공하지 않으므로, 채널 피드백은 매 프레임 주기마다 전송될 수 있으며, 채널 스케줄링은 채널 피드백 주기인 매 프레임마다 수행이 가능하다. OFDM/TDM 전송 시스템에서의 스케줄링은 특정 한 시간에 한 사용자에게 전 대역을 할당하게 된다. 하지만, OFDMA 시스템은 여러 사용자가 대역을 분할하여 사용할 수 있다. 그림 1은 TDD-OFDMA 하향 링크 채널 스케줄링의 개념도이다[5][8].

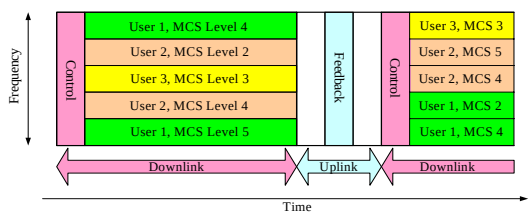


그림 1. TDD-OFDMA 하향링크에서의 채널 스케줄링



Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

### 2.2 시스템 모델

OFDMA 하향링크 스케줄링 시스템은 시간- 주파수 변이 페이딩 채널을 가진 사용자들의 집합으로 볼 수 있다. 각 사용자의 각각의 부채널은 각기 다른 순간 성능을 가지는 랜덤 프로세스로 생각될 수 있다.

$$\{R_{i,n}(t)\} \qquad i=1,...,N_U, \quad n=1,...,N_S, \qquad (1)$$

여기서 $R_{i,n}(t)$ 은 $i$-번째 사용자의 $n$-번째 부채널에서의 특정 수준의 BER(Bit Error Rate) 레벨을 만족시킬 수 있는 데이터 전송률로서, $t$-번째 스케줄링 시간에 $i$-번째 사용자가 $n$-번째 부채널에서 서비스를 받게 된다면 얻을 수 있는 성능이 된다. $N_U$ 는 섹터 내의 사용자 수이고, $N_S$ 는 가용 부채널의 수이다. $R_{i,n}(t)$ 는 사용자 터미널로부터 상향 링크 CQI(Channel Quality Indicator) 채널을 이용하여 피드백된 수신 SINR(Signal to Interference and Noise Ratio) 수준을 기준으로 하여 결정된다.

### 2.3 3G 시스템의 스케줄링 알고리즘

1) Max C/I(Maximum C/I): $t$-번째 스케줄링 시간에서 $n$-번째 부채널에서 서비스를 받게 될 사용자 터미널 $i_n^*$ 를 결정하는 간단한 방법으로는 (2)와 같이 순간 성능이 가장 우수한 사용자를 선택하는 것이다.

$$i_n^* = \arg\max_i R_{i,n}(t), \qquad (2)$$

여기서 $R_{i,n}(t)$ 은 $i$-번째 사용자의 $n$-번째 부채널에서의 순간 데이터 전송률이다. 이와 같은 서비스 방식은 시스템 수율의 최대화를 얻을 수 있지만, 사용자들 간의 수율 공평성은 고려하지 않게 되어, 평균적으로 채널 상황이 좋지 못한 사용자들은 극심한 수율 기아 (starvation) 현상을 격게된다.

*2) PF(Proportional Fairness)*: PF 스케줄링 알고리즘은 cdma2000 1xEV-DO 시스템에서 사용하고 있는 3G 시스템의 대표적인 채널 스케줄링 알고리즘이다[14]. PF 알고리즘은 쉽게 TDD-OFDMA 시스템의 부채널로 확장할 수 있으며, $n$-번째 부채널에서의 스케줄링 될 사용자 $i_n^*$ 는 (3)과 같이 결정된다.

$$i_n^* = \arg\max_i \frac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)}, \qquad (3)$$

여기서 $R_{i,n}(t)$ 은 $i$-번째 사용자의 $n$-번째 부채널에서의 순간 데이터 전송률이고, $T_{i,n}(t)$ 은 평균 수율이다. PF 알고리즘은 사용자의 평균적인 채널 환경에 비하여, 순간적인 전파 특성이 향상되었을 때 채널에 대한 전송권을 부여하는 알고리즘으로서, 페이딩 채널의 시간적인 변이를 이용하는 알고리즘이다 [14].

*3) FFTH(Fast Fair Throughput)*: FFTH(Fast Fair Throughput) 스케줄링 알고리즘은 무선 채널의 변이 특성을 이용하면서, 사용자들에게 균일하게 수율을 분배하기 위한 목적으로 제안되어졌다[15]. $n$-번째 부채널에서의 스케줄링 될 사용자는 (4)과 같이 결정된다.

$$i_n^* = \arg\max_i \frac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)} \left[ \frac{\max_j \left( \overline{R_{j,n}(t)} \right)}{\overline{R_{i,n}(t)}} \right], \qquad (4)$$

여기서 $R_{i,n}(t)/T_{i,n}(t)$ 는 PF 인자이고, $\overline{R_{i,n}(t)}$ 는 $i$-번째 사용자의 $n$-번째 부채널에서의 순간 전송률의 평균값으로서 평균적인 채널 상태를 의미한다. 그러므로 분모로 되어 있는 이 값은 평균적인 채널 상태가 안 좋은 사용자에게도 우선순위를 부여하여, 수율이 전 사용자에게 고르게 분배되도록 하는 기능을 한다. $\max_j \left( \overline{R_{j,n}(t)} \right)$ 는 사용자들이 가질 수 있는 최대 평균 순간전송률을 나타내는 상수이다.

*4) FTH(Fair Throughput)*: 유선 채널에서의 대표적인 공평성 제공 스케줄링에는 RR(Round Robin)이 있다. 그러나 무선 채널에서는 RR과 같은 시간 공평성으로는 수율 공평성을 제공할 수 없다[1]. 무선 채널에서의 수율 공평성을 보장하기 위하여, (5)와 같은 방법으로 $n$-번째 서브채널에서의 서비스 받을 사용자를 결정하는 간단한 FTH 알고리즘을 생각할 수 있다.

$$i_n^* = \arg\max_i \frac{1}{T_{i,n}(t)}, \qquad (5)$$

여기서 $T_{i,n}(t)$ 은 $i$-번째 사용자의 $n$-번째 부채널에서의 평균 수율로서, FTH 알고리즘은 가장 서비스 수율이 낮은 사용자를 서비스하게 된다, 이에 따라, FTH알고리즘은 채널에 대한 어떠한 정보가 없이도 동작할 수 있다 [15].



Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

## Ⅲ. 제안된 스케줄링 알고리즘

### 3.1 WFS(Weighted Fair Scheduling)

시스템 수율을 최대화하기 위해서는 몇몇 채널 조건이 안 좋은 사용자들에게 극히 낮은 수율을 제공해야 한다. 그러나 실제 시스템 설계에서는 모든 사용자에게 QoS 수준에 적합한 어떠한 최소 수준의 수율 조건을 만족시켜야만 하며, 이와 같은 최소 수준의 보장을 공평성(Fairness)라 정의한다[16]. $i$-번째 사용자의 공평성 지수(fairness metric)는 식 (6)과 같이 사용자 수율(user throughput) 대 평균 사용자 수율(average user throughput)의 비율로서 정의된다.

$$F_i = \frac{T_i}{T_{avg}} = \frac{T_i}{\frac{1}{N_U}\sum_{i=1}^{N_U} T_i}, \qquad (6)$$

여기서 $T_i$는 $i$-번째 사용자의 평균 수율이며, $T_{avg}$는 사용자들 간의 평균 사용자 수율(average user throughput) 이다. 본 논문에서는 1xEV-DV 평가 방법론(1xEV-DV evaluation methodology)을 따라 공평성을 평가하였다. 이에 따르면, 공평성 성능은 정규화된 누적 분포 함수(CDF, Cumulative Distribution Function)를 사용하여 평가하며, 정규화된 CDF가 미리 정의되어져 있는 아웃티지 요구 조건을 만족시키게 되면, 공평한 스케줄링 구조라 한다[16]. 본 논문에서는 사용자들 간의 공평한 수율 제공을 목적으로, (6)의 공평성 지수를 PF 스케줄러에 가중치로 도입하여, WFS (Weighted Fair Scheduling) 알고리즘을 제안하였다. 제안된 WFS 알고리즘에서, $n$-번째 부채널에서의 스케줄링 될 사용자 $i_n^*$는 (7)과 같이 결정된다.

$$i_n^* = \arg\max_i \frac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)}\left[\frac{T_{avg}(t)}{T_i(t)}\right], \qquad (7)$$

여기서 $T_{avg}(t)/T_i(t)$는 $i$-번째 사용자의 $t$-번째 스케줄링 시간에서의 공평성 지수의 역수로서, 상대적으로 순시적인 수율 공평성이 낮은 사용자에게 높은 가중치를 부여함으로서 수율 공평성을 제공하게 된다.

### 3.2 TGS(Throughput Guarantee Scheduling)

네트워크 내의 사용자들은 QoS 클래스에 따라 각기 다른 수율 요구 조건을 가지고 있으며, 수율 요구 조건은 평균 수율뿐만 아니라, 수율 아웃티지로서 정의할 수 있다. i-번째 사용자의 수율 아웃티지 확률은 사용자 수율이 요구되는 수율 목표치를 만족시키지 못할 확률로 정의되며 (8)와 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$Pr_i(T_i < T_{i,req}) \le \delta_i, \qquad (8)$$

여기서 $T_i$는 $i$-번째 사용자의 평균 수율이고 $T_{i,req}$는 최소 수율 요구값(minimum throughput requirement) 로서 사용자의 QoS 클래스에 의해 결정된다. $\delta_i$는 $i$-번째 사용자의 수율 아웃티지 요구값이다. 다시 말해, 사용자에 대한 수율 요구 조건을 만족하기 위해서, 네트워크는 각 사용자들에게 일정 수준 이하의 아웃티지를 만족시켜야 한다. 이에 따라, 네트워크 내의 모든 사용자들의 수율 요구 조건의 합이 무선 인터페이스 용량보다 작거나 같은 네트워크를 실행 가능(feasible)하다고 정의한다. 또한 만약 네트워크가 실행 가능하다면, 모든 사용자의 요구 조건을 만족시킬 수 있는 어떠한 스케줄러가 존재함을 의미한다.

[17]에서 G. Barriac 등은 PF 알고리즘의 수정을 통한 패킷 전송 지연을 보장하는 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 본 논문은 수정된 PF(MPF, Modified Proportional Fairness) 스케줄링 알고리즘을 사용자 수율 보장을 위한 목적으로 도입하여, 수율 보장 알고리즘을 제안하였다. 제안된 수율 보장 알고리즘에서 $n$-번째 부채널에서의 스케줄링 될 사용자 $i_n^*$는 (9)과 같이 결정된다.

$$i_n^* = \arg\max_i \begin{cases} \frac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)} \cdot C_{i,n}, & T_i < T_{i,req} \\ \frac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)}, & T_i \ge T_{i,req} \end{cases}, \qquad (9)$$

여기서 $C_{i,n}$은 $i$-번째 사용자의 $n$-번째 부채널을 위한 추가적인 가중치로서, 최소 수율 요구 조건을 만족시키지 못하였을 때에만 추가적인 가중치를 부여받게 된다. 추가적인 가중치 함수는 (10)과 같이 주어질 수 있다.

$$C_{i,n} = \frac{\max_j\left(\overline{R_{j,n}(t)}\right)}{\overline{R_{i,n}(t)}}, \qquad (10)$$



Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

이것은 시스템의 최대 가능 전송률 대 사용자의 평균 순간 전송률의 비율로서, 최소 수율을 만족시키지 못한 사용자의 상대적으로 열악한 채널 상태를 보상해 준다.

셀룰러 네트워크의 셀 외곽 지역에서는 타 셀 간섭(other cell interference)에 의하여 최소 수율을 만족할 수 없을 만큼 낮은 SINR 레벨을 가진 사용자가 존재할 수 있으며, 페이딩 채널 변이에 의하여 네트워크가 어떠한 자원할당 방식을 사용하더라도 모든 사용자의 QoS 요구 조건을 만족할 수 없는 실행 불가능(unfeasible) 한 네트워크가 될 수 있다. 이와 같은 상황에서, (9)의 최소 수율 보장 알고리즘은 모든 사용자의 수율을 보장할 수 없을 뿐만 아니라, SINR이 열악한 사용자에게 추가적인 가중치를 부여함으로서 시스템 수율을 급격하게 감소시킬 수 있다. 이와 같은 환경을 고려하여, 본 논문은 (11)과 같은 수정된 수율 보장 알고리즘을 추가로 제안하였다. 수정된 수율 보장 알고리즘에서 $n$-번째 부채널에서의 스케줄링 될 사용자 $i_n^*$는 (11)과 같이 결정된다.

$$i_n^* = \arg\max_i \begin{cases} \dfrac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)} \cdot \left(C_{i,n}\right)^{\min\left(1.0,\ T_i/T_{i,req}\right)}, & T_i < T_{i,req} \\ \dfrac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)}, & T_i \geq T_{i,req} \end{cases}, \quad (11)$$

여기서 $T_i/T_{i,req}$는 $i$-번째 사용자의 정규화된 수율이다. 이에 따라 요구 조건을 만족 못한 사용자의 수율이 최소 수율 목표 값과 비슷하게 되면, 추가 가중치의 지수가 1에 가까워지게 된다. 그러므로 이 알고리즘은 실행 불가능한(unfeasible) 네트워크에서의 모든 사용자의 최소 수율을 만족시킬 수는 없지만, 최소 수율 목표 값에 가까운 수율을 가진 사용자들에 우선순위를 부가하여 최소 수율을 만족시키는 사용자의 수를 증가시킬 수 있다.

## Ⅳ. 모의실험 및 결과

### 4.1 모의실험 환경

본 논문에서는 IEEE 802.16e TDD-OFDMA 기반의 모의실험 환경을 가정하였다[11-13]. 표 1은 모의실험에서 가정된 IEEE 802.16e TDD-OFDMA 파라미터를 보여주고 있으며, 표 2는 링크 적응(link adaptation) 을 위한 MCS (Modulation and Coding Scheme) 표이다. 전송 MCS 구조는 매 프레임마다 사용자로부터 피드백된 CQICH(Channel Quality Indicator Channel) 정보를 사용하여, SINR 경계값(SINR Sensitivity Threshold) 기준에 의해 결정된다.

표 1. IEEE 802.16e TDD-OFDMA 파라미터

| 변수 | 값 |
|---|---|
| Carrier Frequency | 2.3 GHz |
| Channel BW | 10 MHz |
| Number of used subcarriers | 1,702 of 2,048 |
| Number of traffic subcarriers | 1,536 |
| Subcarrier spacing | 5.57617 kHz |
| Number of subchannels | 32 |
| Number of subcarriers per subchannel | 48 |
| Frame length | 5.0 msec |
| Number of symbols per frame | 26 |
| Number of DL symbols | 18 |
| Number of UL symbols | 8 |
| Sum of RTG and TTG | 45.885 $\mu$sec |
| OFDMA symbol time | 190.543 $\mu$sec |
| Cyclic Prefix | 1/16 |

표 2. MCS(Modulation and Coding Scheme) 링크 적응 표

| 변조방식 | 부호율 | SINR 경계값 | bit/sec/Hz |
|---|---|---|---|
| QPSK | 1/12 | - 3.0 dB | 0.135 |
| QPSK | 1/8 | - 1.3 dB | 0.202 |
| QPSK | 1/4 | 1.4 dB | 0.404 |
| QPSK | 1/2 | 6.6 dB | 0.807 |
| QPSK | 3/4 | 8.5 dB | 1.211 |
| 16QAM | 1/2 | 10.5 dB | 1.613 |
| 64QAM | 2/3 | 15.3 dB | 3.227 |
| 64QAM | 3/4 | 20.8 dB | 3.63 |

3개 섹터에서 동일한 주파수 할당(FA, Frequency Allocation)을 사용하는 1 km 반경을 가진 19개 셀을 가정하였다. 사용자는 다중 셀 도메인에 뿌려지며, 최고 수신 C/I 레벨을 가지는 섹터로부터 서비스된다고 가정하였다. 트래픽 도착 모델은 버퍼가 가득 찬 최선형 모델(best-effort with full buffer)을 가정하였다. $i$-번째 사용자의 $n$-번째 부채널에서의 SINR은 식 (12)와 같이 얻어진다.

$$\left(SINR\right)_{i,n} = \sum_{j=1}^{J} \left\|\gamma_{j,n}\right\|^2 \cdot \left(G_i^{-1} + \sum_{k=i}^{K} \left\|\psi_{k,n}\right\|^2\right)^{-1}, \quad (12)$$



Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

여기서 $G_i$는 $i$-번째 사용자의 평균 SINR로서, 경로 손실(path loss) 및 쉐도잉(shadowing)에 의하여 결정되며, (13)과 같이 얻어진다.

$$G_i = \frac{I_{or}}{I_{oc} + N_0 W} = \frac{1}{I_{oc}/I_{or} + 1/(I_{or}/N_0 W)}, \quad (13)$$

여기서 $I_{or}$ 은 서비스 받는 섹터로부터 수신된 파일럿 전력(received serving-cell pilot strength)이며, $I_{oc}$는 타셀로부터 수신된 파일럿 전력(received other-cell pilot strength)의 합이고, $N_0 W$ 는 열잡음 전력(thermal noise power) 이다. $\{\gamma_j\}$는 보호 구간(guard interval) 내의 다중 경로 성분이고, $\{\psi_k\}$는 보호 구간(guard interval)을 벗어난 다중 경로 성분이다. 본 모의 실험에서는, $\sum\|\gamma_{j,n}\|^2$는 레일레이(Rayleigh) 페이딩으로 모델링 되고, CP(Cyclic Prefix)가 다중 경로의 지연 확산(delay spread)보다 충분히 크다고 가정하여 $\{\psi_k\}$는 모의실험에서 무시되었다 [18]. 기지국과 단말간의 경로 손실 모델은 $129.427 + 37.6 * \log_{10}(d_{km})$을 사용하였으며, 10 dB 표준 편차를 가지는 로그-노말 쉐도잉(log-normal shadowing)을 가정하였다. 페이딩은 3 km/hr의 속도인 6.4 Hz의 도플러 주파수를 가지는 레일레이 페이딩으로 가정하였다. 기지국의 전송 전력은 20 W(43 dBm)로 가정되었으며, 열잡음 밀도는 -174 dBm/Hz으로 설정되고, 30 dB 최대 C/I 제한(maximum C/I limitation) 방식이 적용되었다 [18].

### 4.2 서비스 커버리지 결과

본 논문의 모의실험에서는 RR(Round Robin), PF(Proportional Fairness), FFTH(Fast Fair Throughput), FTH(Fair Throughput), 제안된 WFS(Weighted Fair Scheduling), 제안된 TGS(throughput Guarantee Scheduling) 알고리즘에 대한 성능 평가를 수행하였다. TGS 알고리즘은 2가지 형태로 구현하였는데, TGS 알고리즘 1은 (10)의 부가 가중치를 가지는 (9)의 알고리즘이고, TGS 알고리즘 2는 (10)의 부가 가중치를 가지는 수정된 (11)의 알고리즘이다. 최소 수율에 대한 성능 평가를 위하여, 64 kbps, 128 kbps의 최소 수율 수준을 평가하였으며, 이때 수율 아웃티지 요구값은 5 %로 설정하였다.

그림 2는 64 kbps 최소 사용자 수율에서의 섹터 당 사용자 수에 따른 서비스 커버리지 성능을 보여주고 있다. x-축은 서비스 커버리지로서, 섹터 내에서 수율 아웃티지 요구조건을 만족시키는 사용자의 통계적인 비율을 의미한다[19]. [19]에서의 95 % 서비스 커버리지 정의에 따라, PF 스케줄링 알고리즘은 약 15명의 95 % 서비스 커버리지를 제공함을 알 수 있다. FFTH와 FTH는 약 26 명의 95 % 서비스 커버리지를 보였다. WFS 알고리즘과 TGS 알고리즘 1, TGS 알고리즘 2는 각각 26, 28, 24명의 95 % 서비스 커버리지를 제공한다.

그림 3은 128 kbps 최소 사용자 수율에서의 섹터 당 사용자 수에 따른 서비스 커버리지 성능 곡선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 128 kbps 최소 사용자 수율 수준에서는 TGS 알고리즘 2가 가장 많은 약 13명 정도의 95 % 서비스 커버리지를 제공함을 볼 수 있다. WFS와 TGS 알고리즘 1은 약 12명 정도를 제공함을 볼 수 있다. PF, FFTH, FTH는 각각 약 5, 8, 10 명의 95 % 서비스 커버리지를 보였다. 그리므로 64 kbps 최소 수율 수준에서는 TGS 알고리즘 1이 가장 큰 95 % 서비스 커버

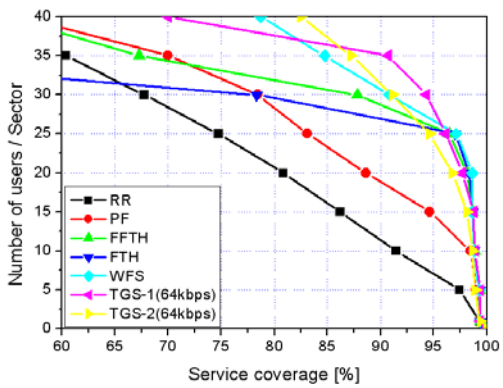


그림 2. 64 kbps 최소 사용자 수율에서의 섹터 당 사용자 수에 따른 서비스 커버리지 성능

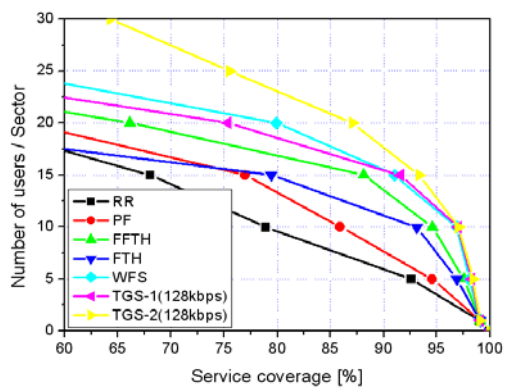


그림 3. 128 kbps 최소 사용자 수율에서의 섹터 당 사용자 수에 따른 서비스 커버리지 성능



Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

리지를 보였으며, 128 kbps 수준에서는 TGS 알고리즘 2가 가장 큰 커버리지를 보였다. 이것은 제안된 WFS, TGS 알고리즘이 스케줄링 가중치의 조정을 통하여, 섹터 내에서의 수율 아웃티지를 만족시키는 사용자 수를 증가시켜 궁극적으로 서비스 커버리지를 확장시킨 결과이다.

제안된 알고리즘을 사용하여 얻을 수 있는 서비스 커버리지의 증가는 셀의 배치, 크기와 같은 시스템의 변경 없이, 효율적인 채널 스케줄링 알고리즘의 설계를 통하여 얻은 결과로서, 동일한 셀 배치에서의 1.5 배에서 2.5 배 정도의 서비스 용량 증가를 의미한다. 다시 말해, 제안된 알고리즘은 OFDMA 기반의 3.5G, 4G 시스템에서의 셀 용량 증가를 위한 채널 스케줄링 기술로서 적용되어 사용할 수 있으며, 효율적인 채널 스케줄링 알고리즘의 설계가 용량 증대를 위한 셀 및 시스템 설계에서 중요한 고려 사항이 되어야 함을 의미한다.

### 4.3 유효 섹터 수율 및 공평성 결과

본 절에서는 제안된 스케줄링 알고리즘의 유효 섹터 수율(effective sector throughput) 및 공평성(fairness)을 평가하였다. 일반적으로 섹터 수율(sector throughput)은 섹터 내의 사용자 수율(user throughput)의 합으로 정의되며, 사용자 수에 따라 다중 사용자 디버시티 이득(multi-user diversity gain)이 증가하는 결과를 볼 수 있다[5-7]. 그러나 최소 사용자 수율과 같은 QoS 요구 조건이 있는 네트워크에서는, 일반적인 개념의 섹터 수율은 실제로 최소 수율을 만족시키는 사용자 수가 몇 명인지에 대한 고려가 되어있지 않기 때문에 시스템의 성능을 평가하는 지표로 적절하지 못하다. 이에 따라, 본 논문은 유효 섹터 수율을 정의하여 평가하였다. 유효 섹터 수율은 최소 수율 요구 조건에 대한 95 % 서비스 커버리지에서의, 섹터 내의 사용자들의 수율의 합으로 정의된다. 다시 말해, 유효 섹터 수율은 95 % 서비스 커버리지를 만족시키는 최대 사용자 수가 섹터 내에 존재하는 상황에서의 섹터 수율이 된다.

표 3은 95 % 서비스 커버리지에서의 여러 스케줄링 알고리즘의 PF알고리즘에 대한 유효 섹터 수율 이득(effective sector throughput gain)을 보여주고 있다. 표에서 볼 수 있듯이, 64 kbps 수준에서 FFTH와 FTH는 각각 PF의 40 %, 32 % 수준의 유효 섹터 수율을 보이고 있다. WFS와 TGS는 63 %에서 67 %의 유효 섹터 수율 이득을 보임을 볼 수 있다. 그러나 128 kbps 수준에서는 FFTH와 FTH, WFS는 각각 PF의 47 %, 40 %, 78 % 수준의 유효 섹터 수율을 보이고 있으며, TGS 알고리즘 1과 TGS 알고리즘 2는 PF에 비하여 거의 비슷한 유효 섹터 수율을 보였다. 이것은 TGS 알고리즘의 부가 가중치 메커니즘이 PF 알고리즘에 비하여 수율 손실을 보임에도 불구하고, 궁극적으로 TGS 알고리즘이 95 % 서비스 커버리지 내에서의 섹터 내 사용자 수가 PF 알고리즘보다 약 2.5 배 정도 많기 때문에 유효 섹터 수율 측면에서는 손실이 거의 없음을 의미한다.

표 3. 95 % 서비스 커버리지에서의 PF알고리즘에 대한 유효 섹터 수율 이득

| Guarantee level | FFTH | FTH | WFS | TGS-1 | TGS-2 |
|---|---|---|---|---|---|
| 64 kbps | 0.40 | 0.32 | 0.64 | 0.67 | 0.63 |
| 128 kbps | 0.47 | 0.40 | 0.78 | 0.99 | 0.98 |

그림 4와 그림 5는 각각 64 kbps, 128 kbps 최소 사용자 수율을 만족하는 95 % 서비스 커버리지에서의 공평성의 CDF(Cumulative Distribution Function) 곡선을 보여 주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 FTH, FFTH, WFS, TGS 알고리즘의 순으로 공평성이 우수함을 볼 수 있다. 본 논문에서는 1xEV-DV 평가 방법론(1xEV-DV evaluation methodology) [16]에 기술된 공평성 평가 기준을 적용하였다. 1xEV-DV의 공평성 평가 기준에 따라, 어떠한 스케줄링 알고리즘의 공평성 CDF 곡선은 공평성 기준(Fairness Criterion)보다 오른쪽으로 존재하여야 한다[16]. 다시 말해, 섹터 내 사용자 중 적어도 50 % 이상의 사용자가 평균 사용자 수율(average user throughput)의 50 % 이상의 사용자 수율을 보여야 한다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 64 kbps 최소 수율 수준에서는 모든 스케줄링 알고리즘이 공평성 기준을 거의 만족시키고 있음을 볼 수 있다. 그러나 128 kbps 최소 수율 수준에서는 TGS 알고리즘 1과 TGS 알고리즘 2가 공평성 기준을 만족시키지 못하고 있다. WFS 알고리즘은 두 가지 최소 수율 요구 조건에서 모두 공평성 기준을 만족시키고 있다.

제안된 WFS 알고리즘과 제안된 TGS 알고리즘은 거의 비슷한 서비스 커버리지를 보였다. 또한 공평성 측면에서는 WFS가 TGS보다 우수하고, 유효 섹터 수율 측면에서는 64 kbps 수준에서 거의 비슷한 성능을 보이지만 128 kbps 수준에서는 TGS 알고리즘이 약 1.26배 정도 우수한 성능을 보였다.



Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

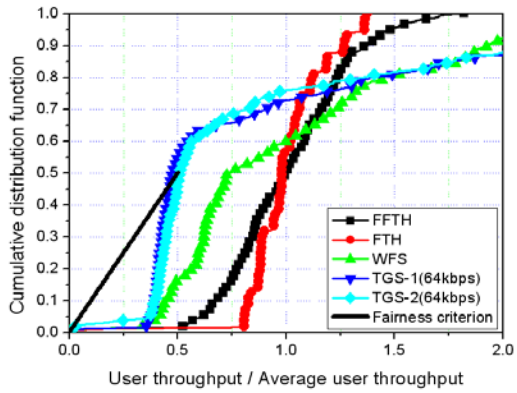


그림 4. 64 kbps 최소 사용자 수율을 만족하는 95 % 서비스 커버리지에서의 공평성 곡선

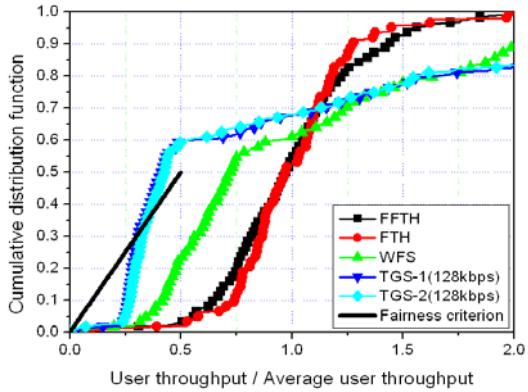


그림 5. 128 kbps 최소 사용자 수율을 만족하는 95 % 서비스 커버리지에서의 공평성 곡선

WFS 알고리즘은 PF 알고리즘에 비하여, 섹터 수율에서의 손실을 통하여 서비스 커버리지를 증가시키며, 1xEV-DV 공평성 기준도 만족시키고 있음을 보였다. TGS 알고리즘은 PF 알고리즘에 비하여, 서비스 커버리지의 증가와 함께, 128 kbps 수준에서 유효 섹터 수율이 거의 손실되지 않음을 보였지만, 128 kbps 수준에서는 1xEV-DV 공평성 기준을 약간 만족시키지 못하는 결과를 보였다.

## V. 결 론

본 논문은 IEEE 802.16e TDD-OFDMA 하향링크 네트워크에서의 수율 공평성 및 서비스 커버리지 보장을 위한, WFS 알고리즘과 TGS 알고리즘을 제안하고, RR, PF, FFTH, FTH 스케줄링 알고리즘과의 비교를 통한 성능 분석을 수행하였다. 제안된 알고리즘의 성능은 64 kbps와 128 kbps 의 두 개의 최소 사용자 수율 요구 조건에서의 95 % 서비스 커버리지, 유효 섹터 수율, 공평성으로 평가하였다. 제안된 알고리즘들은 모두 기존의 스케줄링 알고리즘에 비하여 1.5 배에서 2.5 배 정도의 서비스 커버리지 증가를 보였다. 이와 같은 서비스 커버리지의 증가는 셀의 배치, 크기와 같은 시스템의 변경 없이, 효율적인 채널 스케줄링 알고리즘의 설계를 통하여 얻은 결과로서, 동일한 셀 배치에서의 1.5 배에서 2.5 배 정도의 서비스 용량 증가를 의미한다. WFS 알고리즘과 TGS 알고리즘은 거의 비슷한 서비스 커버리지를 보였지만, 공평성 측면에서는 WFS가 TGS보다 우수하고, 유효 섹터 수율 측면에서는 128 kbps 최소 수율 수준에서 TGS 알고리즘이 우수한 성능을 보였다. WFS 알고리즘은 섹터 수율에서의 손실을 통하여 서비스 커버리지를 증가시키며, 1xEV-DV 공평성 기준도 만족시키고 있음을 보였다. TGS 알고리즘은 서비스 커버리지의 증가와 함께, 128 kbps 수준에서 유효 섹터 수율이 거의 손실되지 않음을 보였지만, 1xEV-DV 공평성 기준을 약간 만족시키지 못하는 결과를 보였다. 향후 연구로는 호 수락 제어(call admission control) 및 QoS 제어 기능을 고려한 스케줄링 알고리즘의 최적화에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

[1] S. Shakkottai, and T. S. Rappaport, "Cross-Layer Design for Wireless Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 41, Oct. 2003, pp. 74-80.

[2] TIA/EIA/IS-856. cdma2000 High Rate Packet Air Interface Specification, 2001.

[3] cdma2000 release C. C.S000X-C, 2002.

[4] 3GPP release 5. TS-25.211-25.214, 2002.

[5] B. Classon, P. Sartori, V. Nangia, and K. Baum, "Multi-dimensional Adaptation and Multi-user Scheduling Techniques for Wireless OFDM Systems," IEEE International Conference on Communications(ICC 2003), 2003.

[6] W. Anchun, X. Liang, Z. Shidong, X. Xibin, and Y. Yan, "Dynamic Resource Management in the Forth Generation Wireless Systems," International Conference on Communication Technology(ICCT2003), 2003.

[7] L. Xiao, A. Wang, S. Zhou, and Y. Yao,



Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

"A Dynamic Resource Scheduling Algorithm for OFDM System," The 9th Asia-Pacific Conference on Communications (APPC2003), 2003.

[8] Young Min Ki, Eun Sun Kim, and Dong Ku Kim, "Downlink Scheduling and Resource Management for Best Effort Service in TDD-OFDMA Cellular Networks," *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3260, Sep. 2004, pp. 315-329.

[9] S. Das, and H. Viswanathan, "Dynamic Power and Sub-carrier Assignment in a Multi-user OFDM System," IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC 2004).

[10] K. Kim, H. Kim, and Y. Han, "Subcarrier and Power Allocation in OFDMA Systems," IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC 2004).

[11] http://www.ieee802.org/16/tgd.

[12] http://www.ieee802.org/16/tge.

[13] IEEE P802.16e/D3, Draft Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access System - Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, May, 2004.

[14] A. Jalali, R. Padovani, and P. Pankaj, "Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System," The 51th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2000-Spring.

[15] P. Ameigeiras, J. Wigard, and P. Mogensen, "Performance of Packet Scheduling Methods with Different Degree of Fairness in HSDPA," IEEE 60th Vehicular Technology Conference, VTC 2004-Fall.

[16] 3GPP2, "1xEV-DV Evaluation Methodology - Addendum (V6)," July 25, 2001.

[17] G. Barriac, J. Holtzman, "Introducing Delay Sensitivity into the Proportional Fair Algorithm for CDMA Downlink Scheduling," IEEE Seventh International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 2002.

[18] 3GPP Ri-030042, Update of OFDM SI simulation methodology, Jan. 2003.

[19] G. Senarath, S. Periyalwar, M. Smith, and R. Matyas, "Coverage Evaluation Methodology for Next Generation Wireless Systems," Wireless World Research Forum (WWRF) 12 Meeting, Nov. 2004. Toronto, Canada.

기 영 민 (Young Min Ki) 정회원

2000년 2월 연세대학교 기계전자공학부 졸업
2002년 2월 연세대학교 전기전자공학과(석사)
2002년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
<관심분야> 무선 자원 관리, 채널 스케줄러, WiBro 휴대인터넷 시스템, cdma2000 1xEV-DO, 802.15.4a WPAN, UWB 위치 추적 기술

김 동 구 (Dong Ku Kim) 정회원

1983년 2월 한국항공대학교 통신공학과 졸업
1985년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering(석사)
1992년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering(박사)
1999년~현재 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 부교수
<관심분야> CDMA 이동통신, 다중접속 기술, 변조 및 채널 부호화 기술, 스케줄링/MAC기술, 순방향링크 빔성형 기술 및 MIMO기술, UWB, Binary CDMA



Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr