

AMC/TDM/CDM 다중접속방식에서의 Best Effort 순방향 서비스를 위한 Water-filling Based 채널 스케줄러

The Channel Scheduler based on Water-filling Algorithm for Best Effort Forward Link Traffics in AMC/TDM/CDM System

마동철*, 기영민*, 김동구*

Dongl-Chul Ma*, Young-Min Ki*, and Dong-Ku Kim*

요 약

제한된 무선 채널을 여러 사용자들에게 공정성과 수율을 보장하면서 서비스하고자 제안된 무선 자원 관리 기법이 채널 스케줄러이다. 비례 공정 스케줄링 알고리즘은 AMC(Adaptive Modulation and Coding)/TDM 시스템에서 사용되고 있는 채널 스케줄러로서, 이 알고리즘은 사용자들의 시간적인 공정성을 고려한 상황에서 수율을 높인 것이다. 본 논문에서는 CDM 방식이 결합된 AMC/TDM/CDM 시스템에서 사용 가능한 채널 스케줄러를 제안하였다. CDM 방식을 사용하기 때문에 TDM만을 사용하는 시스템에서처럼 매 시간 슬롯에 한 사용자만을 서비스하는 것이 아니라, 다중 코드 채널을 사용하여 여러 사용자들을 서비스할 수 있다. 따라서 매 순간 다중 채널의 사용자들에게 제한된 송신 전력을 할당하는 문제가 발생한다. 이것을 해결하기 위해서 본 논문에서는 water-filling 알고리즘을 적용한 water-filling fairness(이하 WF2) 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. WF2 스케줄링 알고리즘은 water-filling 스케줄링 알고리즘에 사용자들의 평균 신호 대 간섭 전력비를 고려하여 사용자간의 공정성을 부여한 알고리즘이다. 본 논문에서는 레일레이 페이딩과 음영 및 경로 손실을 고려한 시스템 레벨 모의 실험을 통해 WF2 스케줄링 알고리즘의 성능을 분석하였다.

ABSTRACT

The channel scheduler is suggested the radio resource management method in order to provide service with guaranteeing fairness and throughput to the users who use limited wireless channel. Proportional fairness scheduling algorithm is the channel scheduler used in the AMC(Adaptive Modulation and Coding)/TDM system, and this algorithm increases the throughput considering the user's time fairness. In this paper is suggested the channel scheduler combining CDM scheme available in AMC/TDM/CDM system. Unlike the system which only uses TDM which provide the only one user at the same slot, this scheduler can service a lot of users since this uses the CDM scheme with multi-cord channel. At every moment, allocation of transmission power to multi-channel users is problematic because of CDM scheme. In this paper, we propose a water-filling scheduling algorithm to solve the problem. Water-filling fairness(WF2) scheduling algorithm watches the average channel environment. So, this modified method guarantees fairness for each user in terms of power and service time.

Key words : channel scheduler, water-filling, AMC/TDM/CDM system.

* 연세대학교 전기 전자 공학부 (Electrical and Electronics Eng., Yonsei University)

· 논문번호 : 2003-1-8

· 접수일자 : 2003년 4월 21일

I. 서 론

현재까지의 대부분의 무선 자원 관리 기술은 순방향 채널에 대한 정보를 기지국에서 사용하지 않은 채 서킷 스위칭 형태로 자원을 할당해주는 무선접속 방식이었으며, 따라서 채널 스케줄러가 필요하지 않았다. 그러나 앞으로의 고속 무선 데이터 전송을 위해서는 주어진 무선 자원을 효율적으로 사용할 필요가 있다. 그래서 채널 스케줄러 기술이 필요하게 되었다. 채널 스케줄러는 기지국에서 사용자들의 순방향 채널 정보를 이용하여 무선 자원을 효율적으로 사용하는 기술이다.

3세대 이동통신 시스템의 기반 기술로서 CDMA를 바탕으로 한 무선 접속 방식이외에, 효율적인 패킷 데이터 전송을 위한 AMC/TDM 시스템이 다중 접속방식으로 연구되어 왔다[1],[2]. 채널 스케줄러가 처음으로 무선 다중 접속방식과 연관되어서 소개된 것은 비례 공정 스케줄러이다[3]. 비례공정 스케줄러를 AMC/TDM 무선 다중 접속 방식에 사용하여, 다중사용자간의 비례 공정한 서비스를 제공하면서 네트워크의 수율을 최대화시키는 무선접속방식으로 소개되었다.

3.5세대 IMT-2000 시스템, WCDMA 기술의 고속 패킷 데이터 전송인 HSDPA(High Speed Down-link Packet Access)[4] 기술에서는 AMC/TDM 시스템에 CDM 기술을 결합한 다중 무선접속 방식을 사용하며, 이러한 AMC/TDM/CDM 시스템에서는 일반적인 AMC/TDM 시스템과는 다르게 다중 채널(Multiple Channel)을 고려한 채널 스케줄러의 연구가 필요하게 되었다. 즉, 일정 수의 코드 채널을 음성서비스에 할당하고, 남은 채널로 데이터 서비스를 제공하는 형태의 무선 자원관리 기법을 사용하기 위해 AMC/TDM/CDM 시스템이 제안되었다. 본 논문에서는 이를 채널의 일반화 과정으로 재해석하여 이에 적합한 스케줄러를 제안하게 된다.

본 논문에서는 기지국이 모든 이동가입자들의 수신 신호 대 간섭 전력 비(SINR)를 사용하여, AMC/TDM/CDM 무선접속방식에서 사용자들의 공정성을 만족하면서 수율을 최대화시키는 채널 스케줄러를 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 AMC/TDM 다중 무선 접속 시스템과 연계되어서 개발된 스케줄러에 대해서 소개하고, 3장에서는 AMC/TDM/CDM 다중 무선 접속 시스템과 연계하여 Water-filling, WF2 그리고 W2F2 스케줄링 알고리즘을 제시하며, 4장에서는 모의 실험 환경과 제안된 스케줄링 알고리즘을 모의 실험을 통하여 각 알고리즘의 수율과 공정성 등에 대하여 분석하고 5장에서 결론을 맺는다

II. AMC/TDM 다중 접속 방식에서의 비례공정 채널 스케줄러

비례공정 스케줄링 알고리즘은 전송 지연에 민감하지 않은 트래픽(traffic) 즉, 비실시간용 서비스를 위해서 설계되었다. 명칭에서 알 수 있듯이 이 알고리즘은 서로 다른 사용자들에 대해 비례적으로 공정하게 서비스를 할당한다.

표 1은 각 사용자의 채널 상태(SINR)에 따른 요구 데이터율(request data rate)을 나타낸다.

이동국은 기지국으로부터 파일럿(pilot) 신호의 세기를 측정함으로써 자신의 수신 신호 대 잡음 전력 비를 계산하여 표 1에 해당되는 데이터율을 가지

표 1. 채널 상태에 따른 전송속도 (요구 데이터율, DRC) [4]

Table 1. Data rate according to channel state (Data Rate Control, DRC).

Data Rate (kbps)	Number of Value per Physical layer Packet	
	Packet Length (Slots)	SINR(dB)
38.4	16	-12.5
76.8	8	-9.5
153.6	4	-6.5
307.2	2	-4.0
614.4	2	-1.0
921.6	2	1.3
1,228.8	1	3.0
1,843.2	1	7.2
2,457.6	1	9.5

국에게 요구하게 된다. 이에 따른 비례공정 스케줄링 알고리즘에서 선택되는 사용자는 다음 식에 의해서 결정이 된다.

$$Q_{PF}[n] = \arg \max_i \frac{u_i(t)}{\bar{u}_i(t)} \quad (1)$$

이때 $Q_{PF}[n]$ 는 n 번째 슬롯에서 서비스를 받는 사용자를 의미하고, i 는 사용자 인덱스(index)를 의미한다. $\bar{u}_i(t)$ 는 표 1에서와 같이 i 번째 사용자의 수신 신호 대 잡음 전력 비에 따른 요구 데이터율을 나타낸다.

그리고 $\bar{u}_i(t)$ 는 i 번째 사용자의 평균 데이터율을 의미한다. 그러나 이것은 전체 요구 데이터율에 대한 평균이 아니라 슬라이딩 윈도우(sliding window)에 의해 측정된 일정 구간에 대한 평균이다. 그런 의미에서 $\bar{u}_i(t)$ 를 이동 평균값(moving average)이라고 한다. 실제 스케줄러의 구현에 있어서 슬라이딩 윈도우의 크기는 대략 1000 슬롯으로 잡게 되는데, 이동 평균값을 구하기 위해서는 1000개의 버퍼가 필요하다. 이러한 낭비를 막기 위해 또는 슬라이딩 윈도우 크기의 유동성을 위해 $\bar{u}_i(t)$ 는 다음 식에 의해 업데이트 된다.

$$\bar{u}_i(t) = (1 - \frac{1}{t_r}) \cdot \bar{u}_i(t-1) + \frac{1}{t_r} \cdot u_i(t) \cdot \delta(Q_{PF}[n]-i) \quad (2)$$

식 (2)에서 $\delta(Q_{PF}[n]-i)$ 는 디랙 델타(dirac-delta)함수를 나타낸다. 이것은 $Q_{PF}[n]$ 과 i 가 같을 때 1의 값을 가지며 같지 않을 때는 0의 값을 갖는다. 이때 $Q_{PF}[n]$ 는 슬롯에서 선택된 사용자이고, i 는 각 사용자의 인덱스이다. 즉 해당 슬롯에서 선택된 사용자는 식 (2)의 디랙 델타 함수가 1이 되어 현재의 데이터 요구율이 평균 데이터율에 포함되며, 해당 슬롯에서 선택되지 못한 사용자는 식 (2)의 디랙 델타 함수에 의해 0이 되어 평균 데이터율에 현재의 데이터 요구율이 포함되지 않게 되고 결국 평균 데이터율은 더 작아지게 된다. 이에 따라 서비

스 받지 못한 사용자들은 식 (1)에 의해 다음 슬롯에서 상대적으로 우선순위가 높아진다. t_r 은 슬라이딩 윈도우 크기를 의미하며 보통 1000의 값을 갖는다. 식의 앞부분에선 이전 평균값의 99.9%가 취해지고 뒷부분에서 현재 값이 0.1% 비율로 더해져 새로운 현재의 평균값을 이룬다. 이로써 버퍼의 사용 없이 슬라이딩 윈도우를 구현할 수 있다.

III. AMC/TDM/CDM 다중 접속 방식에서의 채널 스케줄러

3-1 Water-Filling 채널 스케줄러

Water-filling 기술은 다중 채널 환경에서 제한된 전력을 각 채널에 효율적으로 분배함으로써 각 채널 용량의 합을 최대화시키는 알고리즘이다[5]. AMC/TDM/CDM 다중 무선 접속 시스템에서는 한 시간 슬롯에 CDM으로 여러 사용자에게 서비스를 하기 때문에 AMC/TDM 다중 무선 접속 시스템과는 달리 한 사용자에게 모든 전력을 할당치 않고, 네트워크의 수율을 최대화시킬 수 있도록 전력을 각 사용자에게 분배하여 주어야 한다. 그러므로, Water-filling 알고리즘을 AMC/TDM/CDM 시스템의 채널 스케줄러로 사용하면 수율의 극대화 및 어느 정도의 시간적 공정성을 제공할 수 있다.

본 논문에는 AMC/TDM/CDM 다중 무선 접속 시스템에서 쓸 수 있는 전력 분배형 스케줄러 방법으로 water-filling 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

다수의 서로 독립적인 채널에 대해서 무선 채널 환경에서 가질 수 있는 채널 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$C = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \log_2(1 + \epsilon_n \cdot g_n) \quad (3)$$

여기서, C 는 각 채널 용량의 합을 의미하고, N 은 다중 채널의 개수를 의미한다. g_n 은 각 채널의 신호 대 잡음 비를 나타내고, ϵ_n 은 각 채널에 분배되는 전력의 비율을 나타낸다. 따라서 ϵ_n 의 값을 변

화시키면 채널의 용량 C 역시 다양한 값을 가진다. Water-filling 알고리즘은 C 의 값을 최대화시키는 ε_n 을 찾는 것이다. 다시 말해서, 각 채널에 할당되는 전력량을 조절함으로써 각 채널 용량의 합을 최대화하는 것이다.

식 (3)에서 ε_n 은 다음과 같은 전력 제한을 갖는다.

$$\sum_{n=1}^N \varepsilon_n = 1 \quad (4)$$

위의 식 (3)과 식 (4)에 라그랑지 승수, λ 를 적용하면 다음과 같은 식이 된다.

$$L(\varepsilon_n) = \frac{1}{2\ln(2)} \sum_n \ln(1 + \varepsilon_n \cdot g_n) + \lambda \left(\sum_n \varepsilon_n - 1 \right) \quad (5)$$

식 (5)를 ε_n 에 대하여 미분을 한 값이 0이 되는 것을 찾으면

$$\frac{1}{2\ln(2)} \frac{1}{\varepsilon_n + 1/g_n} = \lambda, \quad n=1, 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

이 된다.

여기서 식 (4)의 조건을 만족하면서 식 (3)을 최대화시키는 조건은 상수 C_0 에 대하여,

$$\varepsilon_n + \frac{1}{g_n} = C_0, \quad n=1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

이다. 따라서 최적의 n 번째 채널의 전력 분배율은 식 (7)을 만족시키는 ε_n 이 된다. 식 (7)의 C_0 는 식 (4)를 만족하는 값이 된다.

그림 1은 식 (7)을 사용하여 6개의 다른 채널에 Water-filling 스케줄링 알고리즘을 적용하여 전력을 분배한 예를 보여준다. 그림에서 보듯이 한정된 전력을 각 채널에 분배함으로써 이 채널의 용량을 최대화시킬 수 있다. 여기서 $1/g_n$ 의 값이 제한 값보

다 (그림 1에서는 C_0) 높은 값을 가지게 되면 이 채널에는 전력을 할당하지 않고 전송을 하지 않는다. 다시 말해, 채널상태가 좋지 못한 것은 전송 기회를 주지 않고 좋은 채널들에 대해서만 전력을 할당한 다음 서비스를 받게 한다.

여기서 AMC/TDM 시스템과 AMC/TDM/CDM 시스템에서의 스케줄링 차이점에 대하여 알아보면, AMC/TDM 방식에서는 사용자들이 각각의 채널 상황에 따라서 우선권을 부여받은 다음 선택된 사용자가 그 시간에 채널을 점유하게 된다. 물론 한 시간 슬롯에 한 사용자만이 채널을 사용하기 때문에 최대 전력으로 서비스를 받는다.

이와는 달리 AMC/TDM/CDM 방식에서는 사용자들을 시간과 코드로 구분하기 때문에 동시에 여러 사용자에게 서비스를 할 수 있다. 그러나, 각 시간 슬롯마다 전송할 사용자를 결정한 다음, 선택된 사용자들에게 제한된 전력을 효율적으로 분배하는 문제가 발생한다.

그림 1과 같이 water-filling 스케줄링 알고리즘을 적용하면 채널이 좋은 여러 사용자에게 전력을 할당함으로써 동시에 많은 사용자들이 서비스를 받을 수 있다. 또한 water-filling 스케줄링 알고리즘을 사용함으로써, 제한된 전력 자원에서 높은 수율을 보일 수 있다. 따라서 water-filling 스케줄링 알고리즘은 한 순간에 여러 사용자들의 서비스를 가능하게 하는 AMC/TDM/CDM 시스템에 사용할 수 있다.

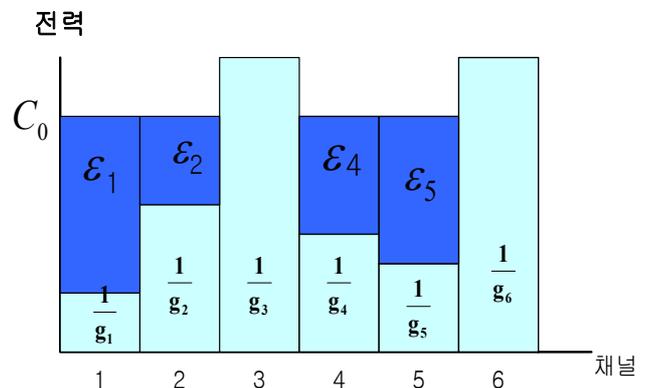


그림 3. Water-filling 스케줄링 알고리즘에 의한 채널의 전력 분배[5]

Fig. 3. Power allocation by Water-filling scheduling algorithm.

3-2 AMC/TDM/CDM 시스템을 위한 Water-filling 채널 스케줄러

CDM의 경우 전력을 분배하는 방법에 따라서 시스템의 성능과 사용자들의 공정성이 결정된다. 이때 각 사용자들에게 할당된 전력이 3-1절에서 소개된 Water-filling 스케줄링 알고리즘에 의해 분배되면 전송 용량이 최대화 될 수 있다. 만일 사용자가 4명 일 경우의 전력 제한은 다음과 같다.

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4 \leq P \quad (8)$$

식 (8)에서 P 는 기지국의 최대 송신 전력을 나타낸다.

그러나 AMC/TDM/CDM 시스템에서의 Water-filling 스케줄링 알고리즘만을 적용하면 단순히 수율을 최대화시키게 되고, 각 사용자간의 공정성을 고려하지 못하게 된다. 따라서 전력 분배 시 Water-filling 스케줄링 알고리즘에 공정성을 고려한 조건이 필요하게 된다.

그림 2는 Water-filling 스케줄링 알고리즘만으로 스케줄링 한 경우 한 사용자에게 의해 채널이 독점되는 예를 보인다. 그림 2에서와 같이 첫 번째 사용자만이 채널 상태가 아주 좋고 나머지 사용자들은 채널 상태가 아주 나쁘다고 가정하자. 이 같은 환경에 Water-filling 스케줄링 알고리즘을 적용하면 채널이 좋은 첫 번째 사용자에게만 전력이 할당되어 서비스를 받게 된다.

그림 2의 채널 조건에서는 Water-filling 스케줄링 알고리즘이 가장 채널 상태가 좋은 사용자들에게만 우선권을 부여하기 때문에 상대적으로 채널이 좋지 못한 사용자는 서비스를 받을 기회를 잃게 된다. 이것은 마치 AMC/TDM 시스템의 Max C/I 스케줄링 알고리즘과 비슷한 결과를 보여준다. 그러므로 이것에 대한 보완이 필요하게 된다. 즉, 단순히 채널 상태가 좋은 순서로 사용자를 선택하는 것이 아니라 장기 페이딩(long-term fading)을 고려한 채널의 평균값을 적용하여 현재 채널이 평균에 비하여 얼마만큼 좋은지에 대한 것을 생각해야 한다. 본 연

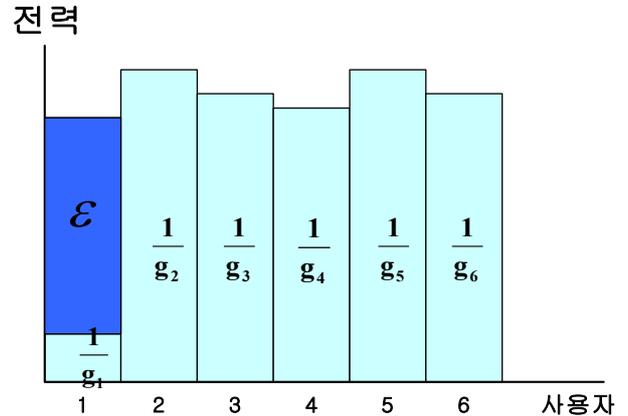


그림 2. 채널이 좋은 사용자 1명이 있는 환경에서의 Water-filling 스케줄링 알고리즘

Fig. 2. Water-filling scheduling algorithm when there is one user who has good channel state.

구에서는 각각의 사용자가 서비스 받은 전송 속도의 평균값을 사용함으로써 사용자간의 공정성을 유지시키는 조건을 고려하였다.

AMC/TDM/CDM 시스템에서의 Water-filling 스케줄링 알고리즘을 적용할 때, 그림 1에서 보는 바와 같이 신호 대 잡음 비의 역수에 해당하는 $1/g_n$ 의 값이 전력의 분배에 중요한 요소이다. 하지만 $1/g_n$ 값을 그대로 적용하여 전력을 분배하면 사용자들 간에 공정성이 지켜지지 않는다는 것은 위에서 알아보았다. 이번에 제시할 알고리즘은 이 같은 문제점을 보완할 다시 말해서 공정성을 지키면서 전력을 분배하는 방법 알고리즘이다. 본 논문에서는 다음의 두 알고리즘을 제시한다.

3-2-1 Water-Filling Fairness 채널 스케줄러

첫 번째 스케줄링 알고리즘은 $1/g_n$ 값에 신호 대 잡음 비의 평균인 $\overline{g_n}$ 값을 구한 다음 이 두 값을 곱하는 것이다. 즉, $\frac{1}{g_n} \times \overline{g_n}$ 의 값을 계산한다. 이 값에 대하여 water-filling 스케줄링 알고리즘을 적용하여 각 사용자들에게 전력을 분배한 다음 서비스를 하는 것이다.

Water-filling fairness 스케줄링 알고리즘은 다음 식에 의해서 각 사용자에게 전력을 분배한다.

$$\varepsilon_n + \frac{\overline{g_n}}{g_n} = C_1, \quad n=1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

C_1 은 식 (4)에 의해서 결정되는 상수 값이다. 그리고 $\overline{g_n}$ 은 g_n 의 평균값을 의미하며 다음 식에 의해서 결정된다.

$$\overline{g_n} = \left[1 - \frac{1}{t_r} \right] \cdot \overline{g'_n}, \quad n=1, 2, 3, \dots, N \quad (10)$$

$\overline{g'_n}$ 값은 이전 시간 슬롯의 $\overline{g_n}$ 값을 의미하고, t_r 은 평균값에서 계산되는 시간 슬롯의 개수를 의미한다.

식 (9)는 식 (7)에 사용들의 평균 채널상태인 $\overline{g_n}$ 을 첨가하여 각 사용자들의 현재 채널상태가 평균보다 얼마만큼 좋은지에 따라 전력을 분배하는 것을 나타낸다. 이 알고리즘을 본 논문에서는 WF2 (Water-Filling Fairness) 스케줄링 알고리즘이라 명명한다.

그림 3은 WF2 스케줄링 알고리즘을 적용하여 각 사용자들에게 전력을 분배하는 것을 보여준다. 앞절에서 소개한 Water-filling 스케줄링 알고리즘에서는 $1/g_n$ 의 값에 대하여 각 사용자들에게 전력을 분배하였으나, WF2 스케줄링 알고리즘에서는 $\frac{1}{g_n} \times \overline{g_n}$ 의 값으로 사용자들에게 전력을 분배한다.

전력

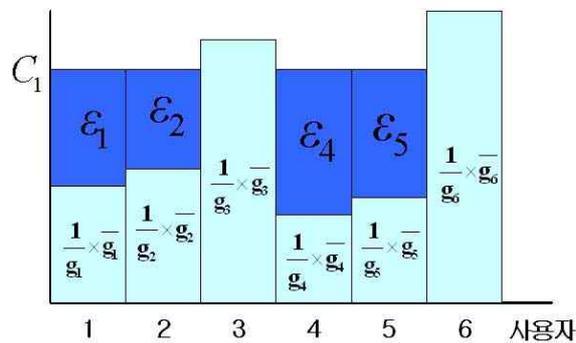


그림 3. WF2 스케줄링 알고리즘에 의한 전력 분배

Fig. 3. Power allocation by WF2 scheduling algorithm.

각 사용자들의 채널에 대한 평균값이 곱해져 있기 때문에 사용자들은 같은 레벨을 가지는 신호 대 잡음 비로써 표현된다. 각 사용자들은 동일한 장기 페이딩의 환경에 각기 다른 단기 페이딩(short-term fading)을 갖는 채널이 된다. 그러므로, WF2 스케줄링 알고리즘은 각 사용자들의 평균 신호 대 잡음 비에 대한 현재 신호 대 잡음 비의 비율로 파워를 분배할 수 있다. 즉, 현재 채널 상태가 평균 채널에 비해 얼마만큼 높은가에 따라서 사용자들이 선택되고, 서비스를 받을 수 있는 권한을 부여받게 된다.

본 논문에서 제안하는 weighted Water-filling 스케줄링 알고리즘은 채널이 좋지 못한 사용자에게 가중치를 주어서 더 공정성을 유지시키기 위한 것이다. Weighted Water-filling fairness 스케줄링 알고리즘은 다음 식에 의해서 각 사용자에게 전력을 분배한다.

$$\overline{g_n} \left[\varepsilon_n + \frac{1}{g_n} \right] = C_2, \quad n=1, 2, 3, \dots, N \quad (11)$$

식 (11)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\overline{g_n} \cdot \varepsilon_n + \frac{\overline{g_n}}{g_n} = C_2, \quad n=1, 2, 3, \dots, N \quad (12)$$

여기서 식 (9)와 식 (12)를 비교해 보면, 각 사용자에게 분배되는 전력인 ε_n 에 가중치 $\overline{g_n}$ 값이 곱해진 형태이다. $\overline{g_n}$ 의 값이 크게 되면 상대적으로 ε_n 값은 작아지게 되고, 반대로 $\overline{g_n}$ 값이 작은 경우에는 ε_n 은 큰 값을 가지게 된다.

따라서 $\overline{g_n}$ 의 값이 작은 사용자(평균적으로 채널이 좋지 못한 사용자)들은 $\overline{g_n}$ 값이 큰 사용자에게 비하여 weighted water-filling fairness 스케줄링 알고리즘을 사용하였을 때와 비교하여 보다 많은 전력을 할당받게 된다. 즉, 채널이 좋지 못한 사용자들에게 가중치를 주어서 평균적으로 채널이 좋은 사용자들에게 분배되는 전력의 일부분을 할당받게 된다. 본

논문에서는 이 알고리즘을 W2F2(Weighted Water-filling Fairness) 스케줄링 알고리즘이라 명명한다.

W2F2 스케줄링 방식은 WF2 스케줄링 알고리즘에 비하여 수율면에서 사용자간의 공정성을 더 보장하는 알고리즘이다.

그림 4는 W2F2 스케줄링 알고리즘을 사용자들에게 적용한 것을 보여주고, 그림 5는 사용자들에게 실제로 분배되는 전력을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 WF2 스케줄링 알고리즘에서는 ϵ_n 으로 사용자들에게 전력이 분배되었지만, W2F2 알고리즘에서는 \bar{g}_n 에 의해서 분배되는 전력의 양이 변화하게 된다.

IV. 모의 실험

기지국의 모양은 육각형 모델을 사용하였으며 19개의 셀을 고려하였다. 사용자수는 중심 셀에 동시에 존

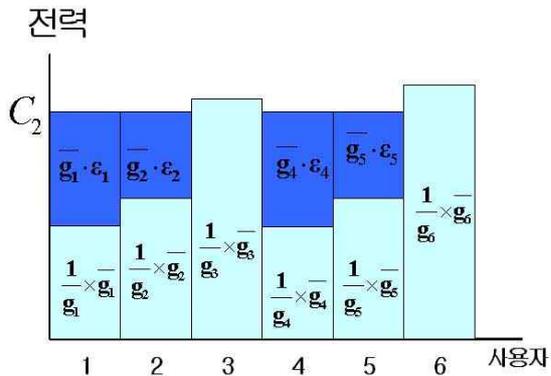


그림 4. W2F2 스케줄링 알고리즘의 적용
Fig. 4. Adoption of W2F2 scheduling algorithm.

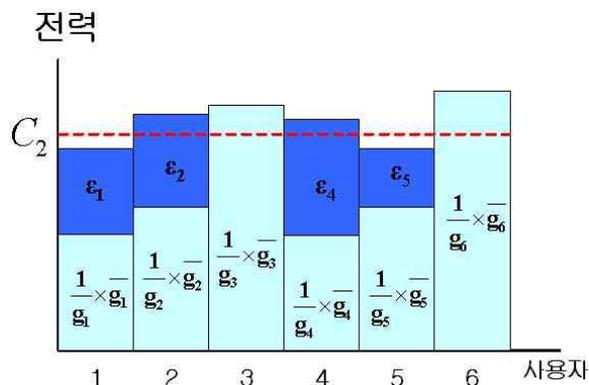


그림 5. W2F2 스케줄링 알고리즘에 의한 전력 분배

Fig. 5. Power allocation by W2F2 scheduling algorithm.

재하는 사용자의 수를 의미한다. 각 사용자는 수신된 파일럿 신호의 신호 대 잡음 전력 비를 계산하는데, 간섭은 다른 셀 간섭(Other Cell Interference)만을 고려하였다.

SINR 계산시 LTF(Long-term Fading)과 STF(Short-term Fading)의 영향을 고려하였다. LTF은 기지국과 사용자간의 거리의 4승에 반비례하는 경로 손실과 평균은 0이고 표준 편차 값이 4 dB인 로그노말 음영(Shadowing)을, STF은 레일레이 페이딩을 가정하였다. 다른 셀의 간섭은 경로 손실 모델을 사용하였고, 중심 셀에서의 전력은 경로 손실과 음영 그리고 레일레이 페이딩을 고려하였다.

각 사용자들의 신호 대 잡음 전력 비 값에 대응되는 데이터율은 현재 HDR 시스템에서 사용하고 있는 데이터율 테이블에 의하여 결정되었고, 표 2-1에서 보여주고 있다.

4-1 Water-filling 스케줄링 알고리즘과 Max C/I 스케줄링 알고리즘의 성능 비교

이번 절에서는 Water-filling 스케줄링 알고리즘과 Max C/I 스케줄링 알고리즘의 성능을 비교한다.

그림 6은 5명의 사용자들에 대한 두 알고리즘의 평균 수율을 보여준다. 가로축은 각각의 사용자를 나타내고, 세로축은 평균 수율을 나타낸다. 사용

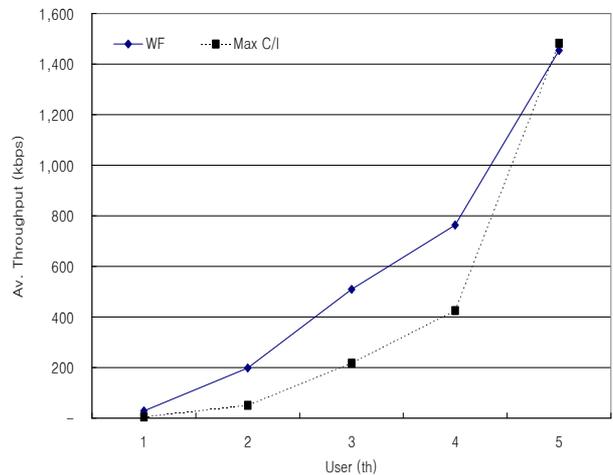


그림 6. Water-filling과 Max C/I의 평균 수율

Fig 6. Average throughput by Water-filling algorithm and Max C/I algorithm.

자들은 평균 채널 환경은 1번, 2번, 3번, 4번, 5번 사용자로 정렬을 하였다. 즉, 5번 사용자가 가장 좋은 채널 환경을 가진다. 그림에서 보면 대부분의 사용자들이 water-filling 알고리즘에서 보다 높은 수율을 가진다. 다만 평균 채널이 가장 좋은 사용자는 평균 수율이 조금 감소한 것을 볼 수 있다. 그렇지만 다른 사용자의 수율 및 전체적인 수율은 Max C/I 알고리즘에 비하여 상당히 향상된 것을 알 수 있다.

그림 2는 두 알고리즘의 전력 분배 비율을 보여준다. 가로축의 사용자들은 그림 4-1과 동일하고, 세로축은 비율을 의미한다. 각 사용자들의 전력 분배 비율 역시 평균 수율과 비슷한 결과를 보여준다. 평균 채널 환경이 가장 좋은 사용자 5만이 전력의 감소를 보이고, 나머지 사용자들은 전력 분배 비율이 Max C/I 알고리즘에 비하여 증가함을 보여준다.

표 2는 두 알고리즘 사이의 평균 수율 및 전력 분배 비율의 증가를 보여준다. 전체 수율은 water-filling 알고리즘이 Max C/I 알고리즘에 비하여 약 35.5% 증가한 것을 알 수 있다.

4-2 Water-filling, Water-filling Fairness 그리고 Weighted Water-filling Fairness 스케줄링 알고리즘의 성능 비교

이번 절에서는 Water-filling 스케줄링 알고리즘과 본 논문에서 제시한 WF2, W2F2 스케줄링 알고리즘을 비교한다. 그림 8은 각 사용자들에 대한 세 알고리즘의 점유 시간 비율을 보여준다. Water-filling 스케줄링 알고리즘을 사용한 경우 평균 채널이 좋은 사용자들¹⁾의 시간 점유 비율이 아주 크게 나타나고, 반대로 채널이 좋지 못한 사용자들은 시간을 낮은 비율로 점유하는 것을 알 수 있다. 즉, 사용자간의 공정성이 전혀 고려가 되지 않은 알고리즘이다. 그러나 WF2 스케줄링 알고리즘의 경우는 채널 상황에 관계없이 사용자들의 시간 점유 비율이

거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 Water-filling 스케줄링 알고리즘에 비하여 사용자들의 공정성이 보장되는 것을 보여준다고 할 수 있다.

표 2. Water-filling과 Max C/I 알고리즘의 성능 비교

Table 2. Comparison of the performance between Water-filling algorithm and Max C/I algorithm.

사용자 알고리즘	1	2	3	4	5	전체
평균 수율 증가	575% ↑	293% ↑	134% ↑	79.7% ↑	1.9% ↓	35.5% ↑
전력 비율 증가	503% ↑	222% ↑	82.7% ↑	34.2% ↑	35.7% ↓	-

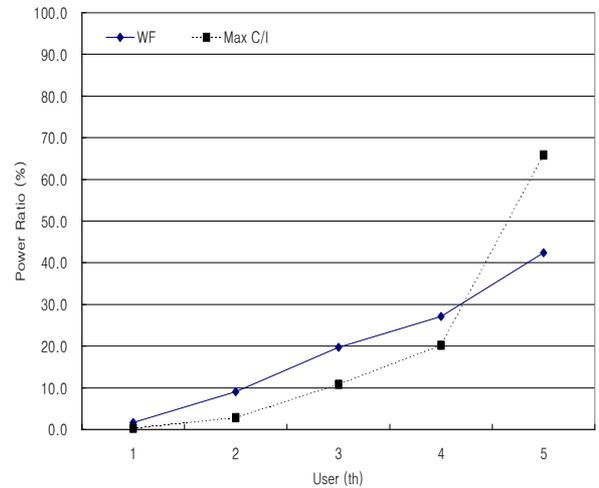


그림 7. Water-filling과 Max C/I의 전력 분배 비율

Fig. 7. Power allocation ratio by Water-filling algorithm and Max C/I algorithm.

1) 그림에서 4, 5번에 해당하는 사용자.

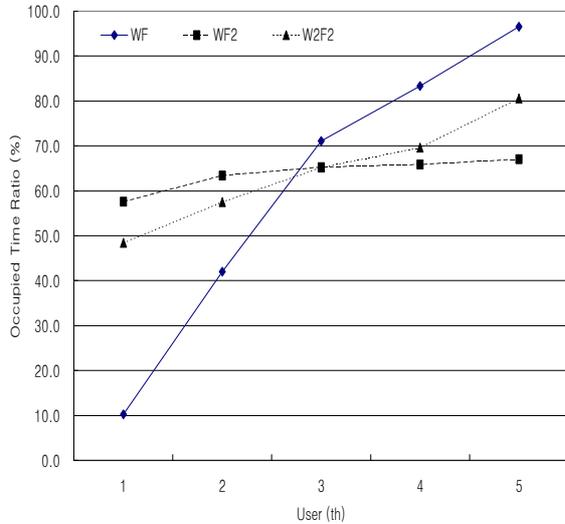


그림 8. Water-filling, WF2, W2F2 스케줄링 알고리즘의 점유 시간

Fig. 8. Occupation time by Water-filling algorithm, WF2 algorithm and W2F2 scheduling algorithm.

그리고, W2F2 스케줄링 알고리즘 역시 Water-filling 스케줄링 알고리즘에 비해 사용자간의 시간 점유 비율에 있어 공정성을 유지하는 것을 알 수 있다. 그렇지만, WF2 스케줄링 알고리즘보다는 사용자간의 시간 점유에 대한 공정성이 덜 지켜지는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 세 가지 스케줄링 알고리즘에 의한 각 사용자들의 전력 분배 비율을 보여준다. 먼저 water-filling 스케줄링 알고리즘을 사용하는 경우는 채널 환경에 따라서 채널 환경이 좋은 사용자에게 전력을 많이 할당하는 형태의 전력 분배가 이루어지는 것을 알 수 있다. 평균 채널 환경이 가장 좋은 사용자가 가장 많은 전력을 분배받아서 서비스 받는다. 그러나 WF2 스케줄링 알고리즘을 사용하면 각 사용자들의 전력 분배 비율이 고르게 나타남을 알 수 있다 (그림에서 보면 전력 분배 비가 1/5로 나타난다). WF2 스케줄링 알고리즘은 앞에서 살펴본 바와 같이 시간적인 측면에서도 공정성을 이루고 전력 측면에서도 사용자들 사이에 공정성을 유지한다.

W2F2 스케줄링 알고리즘은 WF2 스케줄링 알고리즘에서 채널 환경이 좋지 못한 사용자에게 가중치를 더 부여하는 것이다. 결과는 그림에서 볼 수 있듯

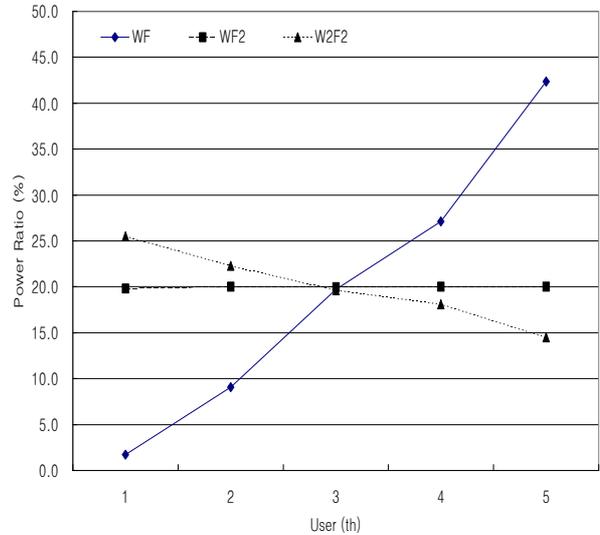


그림 9. Water-filling, WF2, W2F2 스케줄링 알고리즘의 전력분배 비율

Fig. 9. Power allocation ratio by Water-filling algorithm, WF2 algorithm and W2F2 scheduling algorithm.

이 W2F2 스케줄링 알고리즘의 경우 평균 채널 환경이 좋지 못한 사용자들이 많은 전력을 분배받는 것을 확인할 수 있다. 시간 점유 면에서는 사용자들 사이에 공정성을 유지하는 알고리즘이지만, 전력 분배에서는 채널 환경이 좋지 못한 사용자들에게 높은 전력이 할당되는 결과를 볼 수 있다.

따라서 W2F2 스케줄링 알고리즘은 각 사용자들에게 음성 QoS를 만족시켜 주기 위하여, 채널상태가 나쁜 사용자에게 많은 전력을 할당해 주는 형태의 IS-95 CDMA 시스템에서 사용하는 전력 분배 (power control)와 비슷한 결과를 보여준다. 즉, W2F2 스케줄링 알고리즘은 수율 최대화형 전력 분배가 아닌, QoS 보장형 전력 분배와 같은 형태의 알고리즘이다.

그림 10은 각 사용자들에 대한 네 가지 스케줄링 알고리즘의 평균 수율을 보여준다.

Water-filling 스케줄링 알고리즘의 특징은 평균 채널 환경이 좋은 사용자들은 높은 수율을 보여주지만, 채널 환경이 좋지 못한 사용자들은 거의 서비스를 받지 못하여 낮은 수율을 나타낸다. 또한, 본 논문에서는 사용자들에게 매 시간 슬롯마다 균일하게

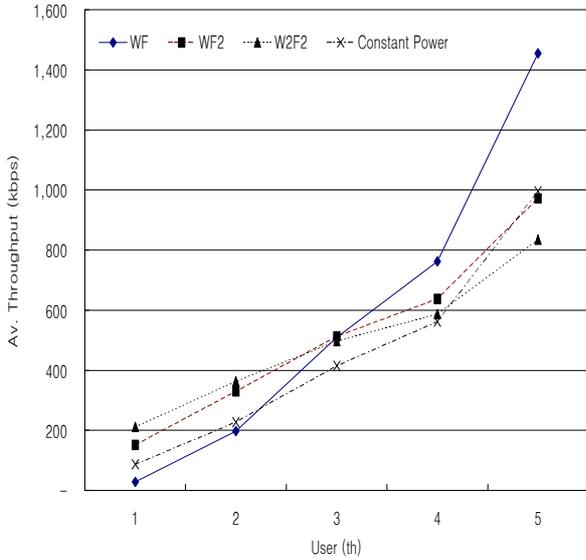


그림 10. Water-filling, WF2, W2F2, Constant Power 스케줄링 알고리즘의 평균 수율

Fig. 10. Average throughput by Water-filling algorithm, WF2 algorithm, W2F2 algorithm and Constant power shceduling algorithm.

전력을 분배하여 서비스하는 스케줄링 알고리즘을 균일 전력 스케줄링 알고리즘이라고 명명하겠다. 균일 전력 스케줄링 알고리즘과 본 논문에서 제안한 WF2 스케줄링 알고리즘을 비교해 보면, 채널이 좋지 못한 사용자들의 수율이 균일 전력 스케줄링 알고리즘에 비하여 상대적으로 많이 증가한 것을 알 수 있다.

물론 WF2 스케줄링 알고리즘 역시 앞에서 살펴본 바와 같이 사용자들의 시간 및 전력에 대한 공정성을 만족시키는 알고리즘이다. 그리고, W2F2 스케줄링 알고리즘의 경우 평균 채널 환경이 좋지 못한 사용자들의 수율이 WF2 스케줄링 알고리즘에 비하여 높게 나타나고, 반대로 채널 환경이 좋은 사용자들의 수율은 감소되는 것을 볼 수 있다. 이것은 그림(???)에서 알 수 있듯이 채널 환경이 좋지 못한 사용자에게 가중치를 부여한 것이기 때문에 나타나는 결과이다.

표 3은 water-filling, WF2, W2F2 그리고 균일 전력 스케줄링 알고리즘을 사용할 때, 사용자들의 수율 합을 보여준다. 공정성이 전혀 고려가 되지 않은 water-filling 알고리즘이 가장 높은 수율을 보여

준다. 그리고 공정성을 부여한 WF2, W2F2 그리고 균일 전력 스케줄링 알고리즘의 수율 또한 차이를 나타낸다. WF2 스케줄링 알고리즘이 시간 점유 및 전력 분배에 대한 공정성을 유지하면서 가장 높은 수율을 보여준다.

4-3 AMC/TDM 시스템과 AMC/TDM/CDM 시스템에서 스케줄링 알고리즘의 성능 비교

그림 11은 AMC/TDM 시스템에서 사용되는 Max C/I, 비례 공정 스케줄링 알고리즘과 AMC/TDM/CDM 시스템에서 적용할 수 있는 Water-filling, WF2, W2F2 그리고 균일 전력 스케줄링 알고리즘에 의한 각 사용자들의 평균 수율을 나타낸다. 위 스케줄링 알고리즘 가운데 Max C/I와 water-filling 스케줄링 알고리즘을 제외한 나머지 세 스케줄링 알고리즘은 사용자간의 공정성을 보장하는 알고리즘이다. 그림에서 알 수 있듯이 WF2 스케줄링 알고리즘을 사용함으로써 비례 공정 스케줄

표 3. Water-filling, WF2, W2F2, Constant Power 스케줄링 알고리즘의 전체 수율

Table 3. Total throughput in Water-filling algorithm, WF2 algorithm, W2F2 algorithm and Constant power scheduling algorithm.

알고리즘 수율	Water-filling	WF2	W2F2	Contant Power
전체 수율 (kbps)	2,953.30	2,602.86	2,492.02	2,285.01

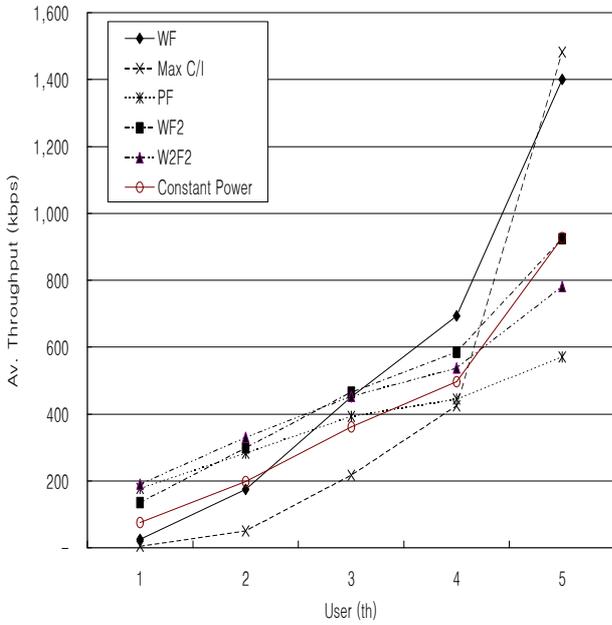


그림 11. Max C/I, Proportional Fairness, Water-filling, WF2, W2F2, Constant Power 스케줄링 알고리즘의 평균 수율

Fig. 11. Average throughput by Max C/I, Proportional Fairness, Water-filling, WF2, W2F2, Constant Power scheduling algorithm.

링 알고리즘에 비해서 모든 사용자에서 높은 수율을 보여준다. 이것은 WF2 스케줄링 알고리즘이 CDM 방식을 사용함으로써 사용자에게 전력을 효율적으로 분배하여 시스템의 전체 수율을 높인 결과라고 할 수 있다.

또한, AMC/TDM/CDM 다중 접속 방식의 시스템에서 가장 간단하게 사용될 수 있는 균일 전력 스케줄링 알고리즘에 비하여 WF2와 W2F2 스케줄링 알고리즘을 사용할 경우 사용자간의 공정성을 유지하면서 대부분의 사용자에게서 높은 수율을 보여준다.

표 4-3. Max C/I, Proportional Fairness, Water-filling, WF2 그리고 W2F2 스케줄링 알고리즘의 전체 수율

Table 4-3. Total throughput by Max C/I, Proportional Fairness, Water-filling, WF2, W2F2 scheduling algorithm.

알고리즘	Max C/I	Water-filling	Proportional Fairness
전체 수율 (kbps)	2,179.06	2,743.82	1,868.41
알고리즘	WF2	W2F2	Constant Power
전체 수율 (kbps)	2,407.04	2,292.22	2,058.39

표 4는 각 알고리즘의 전체 평균 수율을 보여준다. AMC/TDM/CDM 다중 접속 방식 시스템에서의 스케줄링 알고리즘 중 공정성이 고려되지 않은 water-filling 스케줄링 알고리즘이 가장 높은 수율을 나타낸다. 그리고 공정성이 보장되는 알고리즘에서는 WF2와 W2F2 스케줄링 알고리즘이 균일 전력 스케줄링 알고리즘에 비하여 각각 17.0 %와 11.4 %의 수율 증가를 보여준다.

VI. 결 론

본 논문에서는 AMC/TDM/CDM 다중 접속 방식에서의 채널 스케줄링 알고리즘을 제안하여 각 알고리즘에 의한 사용자들의 수율 및 공정성 등을 비교하였고, 기존의 AMC/TDM 다중 접속 방식에서 사용되는 Max C/I와 Proportional Fairness 스케줄링 알고리즘과의 비교를 통해서 제시한 알고리즘의 우수성을 평가하였다.

가장 먼저 소개한 Water-filling 스케줄링 알고리즘의 경우 CDM 방식을 사용하는 시스템에서 최대의 수율을 나타낸다. TDM 방식에서 최대 수율을 보여주는 Max C/I 스케줄링 알고리즘보다 높은 결과를 보여준다. 그렇지만 이 두 스케줄링 알고리즘은 공정성을 전혀 고려하지 않은 것이기 때문에 실제 시스템에 적용할 수 없다. 여기서 Water-filling 스케줄링 알고리즘에 공정성을 부여한 WF2 스케줄링 알고리즘의 경우 각 사용자들의 시간 점유 비율이나 전력 분배 비율에서 시뮬레이션 결과 대략 $1/N$ (사용자 수)의 값을 나타내었다. 다시 말해서 시간과 전력 분배 측면에서 공정성을 만족하는 알고리즘으로 해석이 된다. 또한 수율 역시 비교 대상인 AMC/TDM 시스템에서의 비례 공정 스케줄링 알고

리즘과 AMC/TDM/CDM 시스템에서의 사용자들에게 균일한 전력을 분배하는 스케줄링 보다 높은 결과를 보인다. 마지막으로 소개한 WF2 스케줄링 알고리즘에서 채널 환경이 열악한 사용자들에게 가중치를 좀 더 부여한 W2F2 스케줄링 알고리즘의 경우는 시간 점유 비율에서는 $1/N$ 을 만족하지만, 전력 분배 비율에서는 채널이 열악한 사용자들에게 많은 비율로 분배가 되는 것을 알 수 있다. 채널 환경이 좋지 못한 사용자에게 가중치를 부여한 결과이기 때문이다. 또한 수율 면에서는 열악한 채널을 가지는 사용자들은 40.8% 높아졌지만, 가장 좋은 채널 환경을 가진 사용자의 수율은 15.5%의 감소를 나타낸다. 그리고 전체적인 수율은 4.8% 감소를 보여준다. 다른 측면에서 보면, W2F2 스케줄링 알고리즘은 수율에 있어서 사용자들의 공정성을 만족시키려는 것으로 볼 수 있다. 따라서 WF2 스케줄링 알고리즘이 시간 점유나 전력 분배 측면에서 가장 공정성을 나타내면서 수율 역시 높게 나타나는 알고리즘이라 할 수 있다.

결론적으로, 본 논문에서는 AMC/TDM/CDM 다중 접속 방식에 사용될 수 있는 스케줄링 알고리즘으로 water-filling과 WF2, 그리고 W2F2 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 이 세 가지 알고리즘 중에 사용자들의 시간 점유나 전력 분배 등에서 공정성을 유지하면서 수율을 높일 때는 WF2 스케줄링 알고리즘이 사용될 수 있고, 전체적인 수율의 감소는 어느 정도 있더라도 각 사용자들이 수율 측면에서 공정성을 이루고자 할 경우에는 W2F2 스케줄링 알고리즘을 사용함으로써 조건을 만족할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Motorola, Nokia, et al., "Proposed 1XTREME Physical Layer Delta Specification", Oct. 24, 2000.
- [2] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana, and A. Viterbi, "CDMA/HDR : A Bandwidth-Efficient High-Speed Wireless Data Service for Nomadic Users", *IEEE Comm. Mag.*, pp. 70-77, July 2000

- [3] A. Jalai, R. Padovani, and R. Pankaj, "Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System", *VTC 2000 Spring, IEEE 51st*, vol. 3, pp. 1854-1858, 2000.
- [4] 1xEV IS-856 TIA/EIA Standard, "Airlink Overview", Qualcomm Inc. May 11. 2001 Revision 7.1.
- [5] Cioffi, "Multichannel Modulation, The Water-filling Optimization".

마 동 철(馬東哲)



2002년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 3월~현재: 연세대학교 전기, 전자공학과 (공학석사)
관심분야: 채널스케줄러, 1xEV-DOsystem

기 영 민(奇榮敏)



2000년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
2002년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2002년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
관심분야: 무선 자원 관리, 채널 스케줄링 기술, 애드 혹 네트워크

김 동 구(金東九)



1983년 2월 : 한국항공대학교 통신
공학과(공학사)

1985년 2월 : U.S.C. Dept. of
Electrical Engineering (공학석사)

1992년 2월 : U.S.C. Dept. of
Electrical Engineering (공학박사)

1985년~1991년 : University of

Suthern California Research Assistant

1992년~1994년 : Cellular Infrastructure group. Motorola,
Fort Worth, Tx

1999년~현재 : Qualcomm Yonsei Joint Research Pro-
gram 책임교수

관심분야 : CDMA 이동통신, IMT-2000, 3G 및 4G,
Multiple Access 기술, 변조 및 채널 코딩기술, Data
Link Layer 및 3G를 위한 Scheduleing 기술, Forward
Link Beamforming 기술 및 MIMO 기술, 간섭제거기
술, Binary CDMA 기술, IMT-2000을 위한 Broad-
casting 기술, Wireless LAN MAC (IEEE802.11e)기
술, CDMA System Engineering 기술, Time Hopping
Ultra Wideband System 등