

# 인지 라디오 네트워크에서 우선 사용자 출현 확률을 고려한 하향링크 스케줄링 알고리즘

준희원 허 대 철\*, 김 정 중\*, 이 정 원\*, 정희원 황 준 호\*, 이 원 철\*,  
종신회원 신 요 안\*, 유 명 식\*\*

## Downlink Scheduling Algorithm Based on Probability of Incumbent User Presence for Cognitive Radio Networks

Daecheol Heo\*, Jungjong Kim\*, Jungwon Lee\* *Associate Members*,  
Junho Hwang\*, Woncheol Lee\* *Regular Members*,  
Yoan Shin\*, Myungsik Yoo\*\* *Lifelong Members*

### 요 약

인지 라디오 (Cognitive Radio: CR)란 할당된 주파수 대역 중에 우선 사용자가 사용하지 않는 유휴 주파수를 사용하여 주파수의 효율을 극대화 시킬 수 있는 기술이다. 그러나 CR 환경에서는 우선 사용자에 대한 간섭이 없는 상태에서만 자원을 공유하는 매우 엄격한 제한을 가지고 있다. 더욱이 유휴 주파수 자원은 시간, 주파수 별로 변화하기 때문에 이를 효율적으로 사용하기 위한 스케줄링 알고리즘이 필수적이다. 그러나 기존의 우선 사용자들만 존재하는 무선 통신 환경에서 적용되던 스케줄링 알고리즘은 CR 환경에 대한 제약 조건이 반영되지 않아 유휴 주파수 자원 사용의 효율성 문제가 발생한다. 이에 본 논문에서는 무선 채널 상태와 우선 사용자 출현 확률을 고려하는 하향링크 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안 스케줄링 알고리즘의 성능 평가를 위해 모의실험을 수행하였으며, 그 결과 제안 알고리즘이 우선 사용자 출현 확률을 고려하지 않는 하향링크 스케줄링 알고리즘에 비해 우수한 성능이 제공됨을 확인하였다.

Key Words : Cognitive Radio, Downlink Scheduling Algorithm, Proportional Fairness Scheduling, Incumbent User

### ABSTRACT

Cognitive radio (CR) technology is to maximize the spectrum utilization by allocating the unused spectrums to the unlicensed users. In CR environment, it is strictly required for the unlicensed users not to interference with the licensed users. Thus, it is essential to rely on the scheduling algorithm to avoid the interference when utilizing spectrum holes that are changing in time and frequency. However, the existing scheduling algorithms that are applied for the wireless communication environment considering the licensed users only is not appropriate for CR environment. In this paper, we propose downlink scheduling algorithm based on probability of incumbent user presence for cognitive radio networks. With computer simulations, it is shown that the proposed scheduling algorithm outperforms the conventional scheduling algorithm.

\* 본 연구는 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2006-000-10578-0)

\* 숭실대학교 정보통신전자공학부

\*\* 숭실대학교 정보통신공학부 통신망설계 및 분석연구실(myoo@ssu.ac.kr)(<sup>o</sup> : 교신저자)

논문번호 : #KICS2008-12-545, 접수일자 : 2008년 12월 09일, 최종논문접수일자: 2009년 1월 6일

## I. 서 론

최근 급속히 발전하는 다양한 형태의 무선 통신 기술은 일상생활뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 더 IMT-2000, WiBro 등과 같은 무선 통신 기술의 급격한 발달은 많은 정보를 손쉽게 어디서나 얻을 수 있는 기회를 제공하였다. 그러나 다양한 무선 기술 및 단말 기기의 등장으로 인해 통신에 필요한 주파수 대역이 증가하게 되고 이로 인해 한정된 주파수 자원은 점차 고갈되고 있는 실정이다. 더욱이 이러한 주파수 자원은 미래 통신 시장에서 매우 중요한 국가의 무형 자산으로 인식되고 있어 주파수를 효율적으로 사용할 수 있는 방법이 미래 통신 시장의 경쟁력을 결정하는 중요한 요소라 할 수 있다<sup>[1][2]</sup>.

일반적으로 무선 네트워크에서는 특정 대역에서의 주파수가 우선 사용자 (Incumbent User: IU)를 위주로 사용되기 때문에 시간적, 공간적으로 유휴 주파수가 발생할 수 있다. 그러나 이는 특정 사용자에게 고정적으로 할당되어있어 다른 목적으로 재사용이 불가능하다는 한계점을 가지고 있었다.

인지 라디오 (Cognitive Radio: CR)란 이러한 문제를 해결하기 위해 SDR (Software Defined Radio) 기술의 개념을 도입하여 지능화된 통신 단말기 및 네트워크를 통해 동적으로 변화하는 주파수 자원을 인지하고, 유휴 주파수를 재사용함으로써 주파수 자원의 효율성을 증대 시키는 기술이다<sup>[3][4]</sup>.

그림 1과 같이 구성되는 CR 네트워크<sup>[5]</sup>에서는 우선 사용자의 주파수 대역 보장이 중요하며, 우선 사용자에게 간섭을 끼치지 않는 범위에서 자원을 공유하여 사용하는 것이 최우선적으로 수행되어야 한다. 따라서 무선 자원의 정확한 인지가 무엇보다도 중요하다. 이때 무선 자원의 정확한 인지만 우선 사용자의 동작 채널, 위치, 간섭 범위, 종류 등과 같

이 우선 사용자에 대한 정보 파악을 일컫는다<sup>[6]</sup>. 이를 위해 CR 시스템은 인지 엔진을 통해 정확한 유휴 주파수 정보를 수집하고, 우선 사용자에 간섭을 일으키지 않는 유휴 주파수를 선택하여 사용한다.

그러나 CR 네트워크에서는 우선 사용자의 출현으로 인해 동적으로 변화하는 유휴 주파수 자원을 사용하기 때문에 가용 자원이 한정되어 있을 뿐만 아니라 자원의 확보가 용이하지 않다. 이에 동적으로 변화하는 유휴 주파수 자원을 효과적으로 사용할 수 있는 스케줄링 알고리즘의 연구가 매우 중요하다.

이와 같은 CR 네트워크의 하향 링크 자원 스케줄링을 위해 기존 무선 통신 시스템에서 널리 사용되고 있는 비례 공평성 (Proportional Fairness: PF) 스케줄링 알고리즘<sup>[7][8][9]</sup>을 사용할 경우 우선 사용자의 출현을 고려하지 않고 CR 단말별 채널 품질 및 평균 데이터 처리량만을 고려하여 자원을 할당하기 때문에 할당된 자원을 사용하려는 우선 사용자가 출현하면 우선 사용자와의 간섭을 피하기 위해 해당 자원의 사용을 중지하게 되어 PF 스케줄링 알고리즘이 제공하고자 하는 성능을 저하시키게 된다.

이에 본 논문에서는 CR 네트워크의 특성을 고려하여 기존 PF 스케줄링 알고리즘을 수정한 새로운 하향링크 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 하향링크 스케줄링 알고리즘은 앞서 설명한 기존 PF 스케줄링 알고리즘이 CR 네트워크에 적용될 경우 발생하는 문제점을 해결하기 위해 BS (Base Station)와 CR 단말간의 채널 품질 및 평균 데이터 처리량뿐만 아니라 우선 사용자의 출현 확률을 추가적으로 고려하는 것이 특징이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 PF 스케줄링 알고리즘의 운용 방법 및 CR 네트워크에 적용할 때 발생하는 문제점 및 이를 해결하기 위한 시스템 모델을 설명한다. 이어 III장에서는 본 논문에서 제안하는 하향링크 스케줄링 알고리즘에 대해 설명하고, IV장에서는 제안하는 하향링크 스케줄링 성능 평가를 위한 모의실험 환경 및 도출 결과를 분석한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

## II. 관련연구 및 시스템 모델

본 장에서는 제안하는 하향링크 스케줄링 알고리즘의 기본이 되는 PF 스케줄링 알고리즘 및 제안 스케줄링 알고리즘의 운용을 위해 고려하는 중앙 집중형 CR 네트워크 시스템의 구성 요소인 BS, 우선 사용자, CR 단말, 제어 채널, 자원 구조 및 적

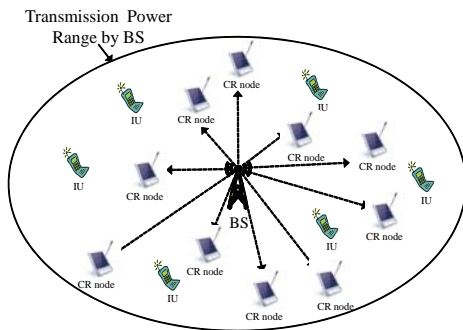


그림 1. Cognitive Radio 네트워크 구성도

응 변조 및 코딩 기법 (Adaptive Modulation and Coding: AMC)의 적용 등 하향링크 스케줄링 알고리즘 운용에 필요한 시스템 모델과 PF 스케줄링 알고리즘의 문제점에 대해 서술한다.

### 2.1 PF 스케줄링 알고리즘

차세대 이동통신에서 단말에게 자원을 할당하기 위한 스케줄링 알고리즘 중 널리 사용되는 방식인 PF 스케줄링 알고리즘은 전체 데이터 처리량을 향상시키면서 단말 (Mobile Station: MS)들 간 채널 품질에 따른 공평성을 제공하는 스케줄링 알고리즘이다.

이러한 PF 스케줄링 알고리즘을 사용하기 위해서 각 기지국에서는 매 스케줄링 주기마다 단말들로부터 케환 (Feedback) 받은 채널 품질 정보 (Channel Quality Information: CQI)를 통해 각 단말별 무선 채널 상태와 평균 데이터 처리량을 도출한 후, 이를 활용하여 단말별 하향 전송에 필요한 자원을 선택한다. PF 스케줄링 알고리즘은 수식 1을 사용하여 하향 자원이 할당될 단말을 선택 한다.

$$i^*(t) = \arg \max_i \frac{R_i(t)}{T_i(t)} \quad (1)$$

이때,  $i$ 는 단말 번호를 나타내며,  $R_i(t)$ 는 단말  $i$ 의 채널 품질을 고려한 현재 데이터 처리량 그리고  $T_i(t)$ 는 단말  $i$ 의 평균 데이터 처리량을 의미한다. 또한 단말  $i$ 의 평균 데이터 처리량은 수식 2와 같이 선택 단말과 현재 단말과의 관계에 따라 두 가지 방법으로 갱신된다. 여기서,  $t_c (= 1000)^{[7]}$ 는 상기의 평균 데이터 처리량을 계산하기 위해 사용되는 가중치이다.

$$T_i(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_i(t) + \left(\frac{1}{t_c}\right)R_i(t), & i = i^* \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_i(t), & i \neq i^* \end{cases} \quad (2)$$

따라서 PF 스케줄링 알고리즘은  $R_i(t)/T_i(t)$  값에 따라 자원을 할당하여 단말의 채널 상태에 비례하게 공평성을 제공하고 동시에 시스템 전체 데이터 처리량을 증대시키는 효과가 있다.

## 2.2 CR 네트워크 시스템 모델

### 2.2.1 BS

본 논문에서 고려하는 BS는 CR 네트워크의 고정 무선 기지국으로써 다수의 CR 단말을 관리한다. BS는 효율적인 자원 할당을 위해 각 CR 단말로부터 귀환된 CQI와 더불어 우선 사용자의 출현 확률 정보를 가지고 있으며, 이때 우선 사용자의 출현 정보는 CR 단말의 인지 알고리즘을 통해 정확하게 인지되어 BS에게 통보된다고 가정한다.

이러한 BS와 CR 단말 간의 교환 정보를 토대로 중앙 집중적인 상·하향 링크의 무선 자원 스케줄링을 수행하며, 본 논문에서는 상·하향 링크 스케줄링 중 하향 링크 스케줄링만을 고려한다. 이때 하향 전송되는 각 CR 단말의 데이터는 단말 별로 독립적인 큐에 저장된다.

### 2.2.2 우선 사용자

우선 사용자는 기존 무선 통신 시스템 단말으로써 주파수 자원에 대한 우선 사용권을 가지고 있기 때문에 CR 단말로부터 영향을 받지 않고 최우선적으로 자원을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 우선 사용자가 각 주파수 대역마다 임의의 랜덤한 분포를 가지고 출현하여 해당 자원을 점유하여 사용한다고 가정하였다.

### 2.2.3 CR 단말

CR 단말은 우선 사용자를 인지하고 사용하지 않는 유휴 주파수를 사용하여 통신을 하는 단말으로써, 주변의 우선 사용자 출현을 인지하면 제어 채널을 통해 우선 사용자 출현 정보를 BS에게 전송한다.

이러한 CR 단말은 자원 할당 주기인 TTI (Transmit Time Interval)마다 제어 채널을 통해 자원 할당 정보를 수신하며, 이를 토대로 BS가 전송한 데이터를 수신한다. 또한 매 TTI마다 우선 사용자 출현 정보 이외에 무선 자원 스케줄링을 위해 자신의 CQI를 BS에 제어 채널을 통해 전송한다. 이때 BS와 CR 단말 사이에 제어 채널을 통해 송·수신되는 정보는 에러가 없이 이상적으로 전송된다고 가정한다.

### 2.2.4 제어 채널

BS는 CR 단말들과의 필요한 제어 정보를 송·수신하기 위해 우선 사용자 검출 기법을 통해 확보한 유휴 주파수 중에 가장 안정적인 주파수 채널을 선택하여 제어 채널로 사용한다. 이때 제어 채널의

목적으로 사용되는 유휴 주파수 자원은 항상 존재한다고 가정하며, 선택된 주파수 채널은 제어 채널로서의 역할만을 수행하는 out of band 구조를 가진다.

이러한 제어 채널은 CR 단말이 BS에게 정보를 전송하는 상향 제어 채널과 BS가 CR 단말에게 정보를 전송하는 하향 제어 채널로 구분된다. 상향 제어 채널의 경우 CR 단말의 CQI, 우선 사용자 출현 정보 등 하향링크 스케줄링 알고리즘 운용에 필요한 정보들이 전송되며, 하향 제어 채널의 경우 BS가 CR 단말들에게 할당한 자원에 대한 사용 주파수 대역, 사용 변·복조 기법 등의 정보들이 브로드캐스트 (Broadcast) 방식으로 전송된다. 이때 제어 채널을 통해 전송되는 모든 정보 전달에 소요되는 지연은 무시될 정도로 작다고 가정한다.

### 2.2.5 자원 구조

본 논문에서 CR 단말의 통신을 위해 사용되는 무선 자원 구조는 각 주파수 대역을 고정적인 TTI 간격의 시간으로 나눈 RB (Resource Block) 단위로 구성된다고 가정한다. BS는 전체 RB에서 우선 사용자에 의해 점유된 주파수 대역을 제외하고, 유휴 주파수 대역인 유휴 RB들에 대해 하향링크 스케줄링 알고리즘을 적용한다. 유휴 RB 할당은 매 TTI 마다 이루어지며, 각 유휴 RB는 최적의 채널 품질을 갖는 단말에게 할당되어 하향전송에 사용된다. 이때, 각 RB의 데이터 전송에는 무선 채널 상태에 따라 AMC를 적용한다.

### 2.2.6 AMC

본 논문에서는 효율적인 하향 링크 자원의 활용을 위해 각 CR 단말 별 유휴 주파수 자원의 CQI에 따라 MCS (Modulation and Coding Scheme) 등급을 달리 적용하는 AMC 방식을 사용하여 채널 품질에 따라 차등적인 전송률을 가정한다. 이때, CQI로는 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio: SNR)를 사용하며, 각 CR 단말 및 유휴 주파수 대역에 따라 다르며 시간에 따라 변화한다.

### 2.3 PF 스케줄링 알고리즘의 문제점

PF 스케줄링 알고리즘을 CR 네트워크 환경에 적용할 경우 다음과 같은 문제점이 발생한다. 문제점 제시를 위하여 앞서 기술한 가정에 따라 모든 CR 단말들은 감춰진 노드 문제 (Hidden Node Problem) 없이 우선 사용자 출현을 인지하여 별도

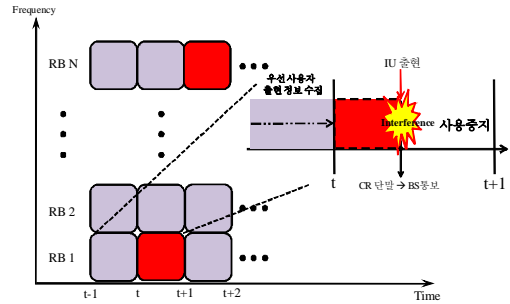


그림 2. 우선 사용자 출현에 따른 PF 알고리즘의 문제점

의 제어 채널을 통하여 BS에게 통보한다.

BS는 현재 스케줄링 주기  $t$ 까지 수집된 우선 사용자 인지 정보를 기반으로 유휴 RB를 구성하고, 이들에 대하여 PF 알고리즘을 적용하여  $t$ 시간에 수행될 하향 전송에 필요한 자원을 할당한다. 그러나 그림 2에서와 같이 CR 네트워크에서는 BS가 특정 CR 단말의 하향 데이터를 유휴 RB1에 할당하여 전송을 수행하는 도중 RB1의 주파수 대역을 사용하고자 하는 우선 사용자가 출현하게 되면, CR 단말은 우선 사용자 출현을 즉시 BS로 통보하게 되고, 이를 수신한 BS는 우선 사용자와의 간섭을 피하기 위하여 해당 RB1의 사용을 중지하게 된다. 따라서 해당 RB1에 할당된 CR 단말의 데이터는 전송을 하지 못하는 결과를 초래하게 된다.

본래 PF 스케줄링 알고리즘은 단말별 채널 품질에 기준하여 전송할 단말을 선택함으로써 장기적 (Long-term)으로 채널 품질에 비례하게 자원을 할당하는 것을 목적으로 한다. 그러나 상기 기술한 바와 같이 임의의 주파수 대역을 사용하고자 하는 우선 사용자가 임의의 시간에 무작위 (Random) 형태로 출현하게 되면, 이에 따른 전송 중지로 인해 본래 PF 스케줄링 알고리즘이 목적인 채널 품질에 비례하는 공정성 제공이 어렵게 된다. 예로, 특정 CR 단말이 특정 유휴 RB에 대해 항상 가장 우수한 품질의 채널 상황을 가지고 있고, 그 결과 항상 제일 높은 우선순위를 가지고 해당 RB를 할당 받았지만, 할당 받은 RB에 우선 사용자가 계속적으로 출현하게 되면 PF 스케줄링 알고리즘이 제공해야 하는 공정성을 유지할 수 없게 된다.

더욱이 PF 스케줄링 알고리즘은 보다 높은 시스템 데이터 처리량 (Throughput)을 위해 높은 전송률이 가능한 우수한 채널 품질을 갖는 단말들에게 우선적으로 유휴 RB를 할당한다. 그러나 우선 사용자가 높은 전송률을 갖는 유휴 RB에 출현하게 되

면 해당 RB들을 사용하지 못하게 되어 전체 시스템 데이터 처리량이 저하되는 문제가 발생한다. 따라서 기존 PF 알고리즘의 성능은 우선 사용자의 출현 분포에 의해 상당한 영향을 받게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 스케줄링 시 우선 사용자 출현 확률을 추가적으로 고려하여 우선 사용자 출현 확률이 가장 낮은 RB에 대해 가장 우수한 채널 품질을 갖는 CR 단말을 해당 RB에 할당함으로써 상기한 문제의 발생을 최소화하고, 본래의 PF 스케줄링 알고리즘이 목적하는 바와 같이 채널 품질에 비례하게 공평성을 제공하는 동시에 시스템 전체 데이터 처리량 증대 시키고자 한다.

### III. 제안하는 하향링크 스케줄링 알고리즘

CR 환경에서는 시간, 주파수에 따라 변화하는 유휴 주파수 자원을 사용하기 때문에, 이를 반영한 스케줄링 알고리즘을 사용하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서 제안하는 CR 네트워크를 위한 하향링크 스케줄링 알고리즘은 기존의 PF 스케줄링 알고리즘에 각 RB별 우선 사용자의 출현 확률을 추가적으로 고려하여 자원을 할당한다.

제안 알고리즘을 살펴보면 다음과 같다. 그림 3에서와 같이 BS는 CR 단말들로부터 제환 받은 CQI를 통해 단말과의 무선 채널 상태를 확인하여 데이터 전송에 필요한 변조 기법 및 RB별 전송 가능한 최대 데이터량을 계산할 수 있다. 또한 현재 스케줄링 시간  $t$ 까지 각 RB별 누적된 우선 사용자 출현 확률을 계산한다. 이후 앞서 계산된 정보와 현재 스케줄링 주기까지의 단말별 평균 데이터 처리량을 토대로 데이터를 수신할 CR 단말과 RB의 쌍(Pair)을 선택하게 된다. 이때 선택되는 RB는 유휴 RB만을 고려하기 때문에 유휴 RB 수만큼의 수신할 CR 단말이 선택되게 된다.

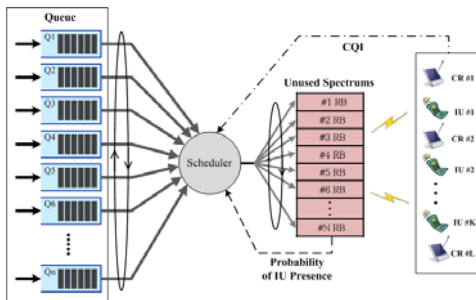


그림 3. 제안하는 하향링크 스케줄링 기법의 개념도

제안하는 하향링크 스케줄링 알고리즘을 통해 하향 전송에 필요한 자원을 할당 받을 CR 단말의 그룹 ( $I^*$ ) 선택 방법은 수식 3과 같다.

$$I^*(t) = \arg \max_{I,j} \{Pr(i, j, t)\}, \quad I^*(t) \subset I \quad (3)$$

이때,  $t$ 는 현재 스케줄링 주기,  $i$ 는 하향 데이터를 수신하게 될 CR 단말 번호,  $j$ 는 RB 번호를 의미한다. 또한  $I$ 는 하향 데이터가 존재하는 CR 단말의 큐 그룹,  $J$ 는 유휴 RB의 그룹이다. 따라서 수식 3은 수식 4에 의해 정의된  $Pr(i, j, t)$ 이 최대값을 갖게 되는  $i, j$  쌍을 찾는 것이 목표이다.

수식 3에 있어서 하향 데이터를 수신할 CR 단말  $i$ 와 RB  $j$ 를 결정하는 기준인  $Pr(i, j, t)$ 는 수식 4와 같다.

$$Pr(i, j, t) = \frac{R_{ij}(t) \cdot (1 - F_j(t))}{T_i(t)}, \quad i \in I, j \in J \quad (4)$$

이때,  $R_{ij}(t)$ 는 현재 스케줄링 시간  $t$ 에 CR 단말  $i$ 의 하향 데이터를 RB  $j$ 에 할당할 경우 전송 가능한 최대 데이터량을 의미한다. 또한  $T_i(t)$ 는 현재 스케줄링 시간  $t$ 까지 CR 단말  $i$ 로 전송된 하향 데이터의 스케줄링 주기 당 평균 데이터량을 의미하며,  $F_j(t)$ 는 RB  $j$ 의 우선 사용자 출현 확률을 나타내며 수식 5를 통해 계산된다. 이때  $A_j(t)$ 는 스케줄링 시간  $t$ 에서의 RB  $j$ 에 대한 우선 사용자 출현 여부를 나타내며 0 또는 1의 값을 가진다. 따라서  $\sum_{t=0}^i A_j(t)$ 를 통해 RB  $j$ 에 누적된 우선 사용자의 출현 횟수를 알 수 있으며, 이를 운용된 총 TTI 횟수( $N\_TTI$ )로 나누어 줌으로써 RB  $j$ 의 우선 사용자 출현 확률을 계산할 수 있다.

$$F_j(t) = \frac{\sum_{t=0}^i A_j(t)}{N\_TTI}, \quad A_j(t) \in \{0, 1\} \quad (5)$$

한편,  $T_i(t)$ 의 갱신 방법은 기존 PF 스케줄링 알고리즘과 같은 형태이나 본 논문에서 고려하는 RB 단위의 자원 구조에 적용하기 위해  $R_i(t)$ 를 CR 단말  $i$ 의 하향 데이터가 할당된 RB의 전송량  $\bar{R}_i(t)$ 로 확장하여 사용한다. 이때  $\bar{R}_i(t)$ 는 AMC를 사용하기 때문에 해당 RB의 채널 품질에 따라 결정된다. 이러한 확장된 갱신 방법은 수식 6과 같다.

$$\left( \left( 1 - \frac{1}{t} \right) T_i(t) + \left( \frac{1}{t} \right) \bar{R}_i(t) \right), \quad (6)$$



이와 같이 우선 사용자 출현 확률을 고려한 제안 스케줄링 알고리즘에서는 채널 품질이 높아 AMC에 따른 전송 가능한 데이터량이 크고, 우선 사용자의 출현 확률이 낮은 RB일수록 높은  $\Pr(i, j, t)$  값을 가지게 되고, 이중 가장 큰  $\Pr(i, j, t)$  값을 가지는  $i$ 와  $j$ 의 쌍이 결정되게 된다. 이러한 과정을 모든 유휴 RB 자원이 할당될 때까지 반복함으로써 스케줄링 주기  $t$ 에 전송할  $i, j$  쌍의 그룹  $I^*(t)$ 가 결정된다.

결과적으로 우선 사용자 출현 확률을 추가적으로 고려한 제안 알고리즘을 사용함으로써 BS와 CR 단말 간 채널 품질이 우수하면서 우선 사용자 출현 확률이 낮은 RB에 먼저 자원이 할당되게 된다. 따라서 높은 데이터 크기를 전송할 주파수 대역에 우선 사용자가 출현하여 전송이 중지될 확률을 낮추게 됨으로써 CR 환경에서 발생하는 전송 중지로 인한 PF 스케줄링 알고리즘의 성능 저하 문제를 최소화할 수 있다. 즉, 제안 알고리즘을 사용함으로써 본래의 PF 스케줄링 알고리즘이 목적하는 바와 같이 채널 품질에 비례한 공평성을 제공하는 동시에 시스템 전체의 데이터 처리량을 증대시킬 수 있다.

#### IV. 모의실험 결과

본 논문에서 제안하는 우선 사용자 출현 확률을 고려한 하향링크 스케줄링 알고리즘의 성능평가를 위해 다음과 같은 C++ 기반의 모의실험 환경을 구축하였다. 먼저, 모의실험에 사용된 파라미터는 표 1과 같이 우선 사용자와 CR 단말 그리고 RB는 각각 50개씩 존재하며, CR 단말들을 거리에 따라 5개의 그룹으로 나누고 한 그룹 당 10개의 CR 단말이 존재한다고 가정하였다. 이 때 TTI는 1msec이며, 각 RB 당 우선 사용자 출현 확률은 0.1~0.9 사이의 평균 발생 확률을 가진 균일 랜덤 분포 (Uniform Random Distribution) 형태를 가정하였으며, 시스템 주파수 대역 내 RB별 우선 사용자 평균

표 1. 본 논문에서 고려한 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value
Number of RBs	50
Number of IUs	50
Number of CR nodes	50
Number of CR node Groups	5
TTI (msec)	1
Simulation Time (msec)	1000
Probability of IU Presence	0.1 ~ 0.9

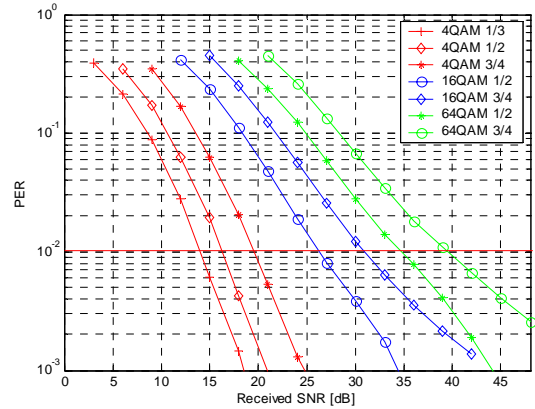


그림 4. SCME Urban Micro 환경

발생 확률의 분포 형태는 그림 7에서와 같이 정규 분포를 따른다고 가정하였다. 한편, 하향 링크 데이터 패킷의 발생은 고정 비트율 (Constant Bit Rate: CBR) 형태로 생성되며, 본 논문에서 고려하는 변조 및 코딩 기법을 통해 전송할 수 있는 충분한 양의 트래픽이 발생된다.

이와 더불어 본 논문에서 고려한 채널 환경은 3GPP (3rd Generation Partnership Project)에서 제시한 SCME (Spatial Channel Model Extended) Urban Micro<sup>[10]</sup> 환경을 기반으로 한다. 그림 4는 이 같은 환경에서 AMC를 적용하였을 때 BS와 CR 단말 간 채널의 SNR에 따른 PER (Packet Error Rate)을 나타낸 그래프로서, 본 논문에서는 10<sup>-2</sup>의 PER을 기준으로 MCS 등급을 구분하였으며, QPSK 1/3에서 64QAM 3/4까지 7가지 등급을 사용한다.

BS와의 거리에 따른 CR 단말의 그룹 설정 및 SNR 분포, 그리고 이에 따른 변조 및 코딩 기법은 표 2와 같다. 표에서 볼 수 있듯이 CR 단말의 평균 SNR 값은 17 ~ 41dB 사이의 값을 가지며, 실

표 2. BS와의 거리에 따른 CR 단말 그룹 설정 및 SNR 분포

CR Group	Node ID	SNR (dB)		MCS Level	BS와의 거리
		평균	분산		
1	1~10	41	3	64QAM (1/2, 3/4)	가깝다 ↑
2	11~20	35	3	64QAM (1/2) 16QAM (3/4)	
3	21~30	29	3	16QAM (1/2, 3/4)	↓ 멀다
4	31~40	23	3	QPSK (3/4)	
5	41~50	17	3	QPSK (1/3, 1/2, 3/4)	

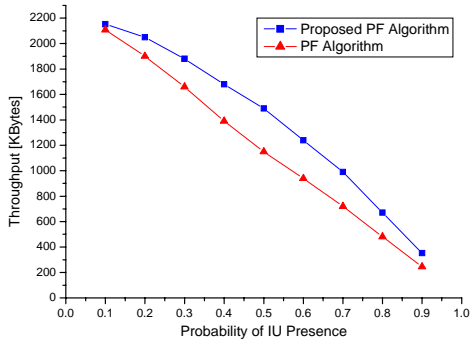


그림 5. 우선 사용자의 평균 출현 확률에 따른 시스템 데이터 처리량

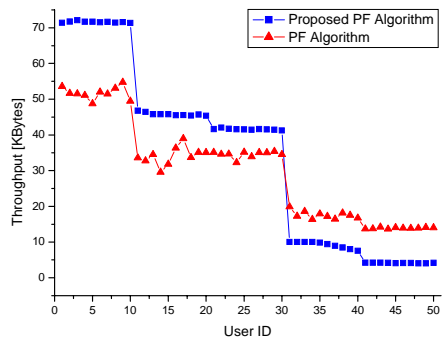


그림 6. 각 CR 단말별 데이터 처리량 (출현확률 0.5, 그림 7. 환경 (a))

제 환경과 유사한 환경을 고려하기 위해 BS와의 거리에 따라 CR 단말 그룹 별로 차등적인 발생 범위를 가진다. 이때 SNR 발생은 해당 그룹의 평균에서 3dB의 분산 값을 갖는 균일 랜덤 분포의 형태로 발생한다.

이와 같은 모의실험 환경을 토대로 제안하는 스케줄링 알고리즘의 성능 분석을 위해 데이터 처리량 측면에서 기존 PF 스케줄링 알고리즘과 비교하였다. 또한 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 100회의 시뮬레이션 결과에 대한 평균치를 사용하였다.

먼저, 그림 5는 우선 사용자 평균 출현 확률에 따른 데이터 처리량의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안하는 스케줄링 알고리즘이 기존 PF 기법에 비해 전체적으로 높은 데이터 처리량을 보이고 있다. 이는 제안 스케줄링 알고리즘이 BS와 CR 단말 간 채널 상태 별 전송 가능한 최대 데이터 처리량과 우선 사용자 출현 확률을 고려하여 자원을 할당하기 때문에 고차 변조 기법을 사용하여 전송한 RB가 우선 사용자 출현에 의해 전송이 중지되는 확률이 기존의 PF 스케줄링 알고리즘에 비해 낮아져 CR 환경에서 발생하는 PF 스케줄링 알고리즘의 성능 저하를 최소화하기 때문이다.

그러나 우선 사용자의 출현 확률이 매우 낮거나 높은 경우 두 기법의 성능 차이를 보이지 않는다. 이는 우선 사용자의 출현 확률이 매우 낮은 경우에는 우선 사용자 출현으로 인한 전송 중지횟수가 매우 적어 전송 중지된 RB의 데이터 크기의 총 합이 매우 작아 제안하는 알고리즘에 의한 성능 차이 또한 작게 나타나기 때문이다.

한편, 우선 사용자의 출현 확률이 매우 높은 경우에는 대부분의 유휴 RB에서 전송 중지가 발생하여 전송에 성공한 데이터가 많지 않기 때문에 두 알고리즘의 성능 차가 크게 나타나지 않는다. 따라

서 우선 사용자의 출현 확률이 매우 높거나 낮지 않은 0.4 ~ 0.6% 사이의 구간에서 제안하는 알고리즘이 높은 성능을 보이게 된다.

그림 6은 우선 사용자의 평균 출현 확률이 0.5이며, RB별 우선 사용자 출현 확률 분포가 그림 7의 환경 (a)와 같은 정규 분포 형태일 때 각 CR 단말별 데이터 처리량을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 PF 스케줄링의 특성에 따라 앞서 표 2에서 정의된 5개 그룹의 채널 품질 상황과 비례하게 데이터 처리량이 계단 형태로 발생한다.

먼저, CR 단말 그룹 1의 경우 평균 SNR이 가장 높아 고차 변조 기법인 64QAM 기법을 사용할 수 있을 뿐 아니라 우선 사용자 출현 확률이 낮은 RB를 할당 받음으로써 제안하는 스케줄링 알고리즘의 데이터 처리량이 기존 PF 스케줄링 알고리즘에 비해 높은 것을 볼 수 있다.

반면 그룹 5의 경우 CR 단말의 평균 SNR이 가장 낮아 저차 변조 기법인 QPSK 기법을 사용할 뿐 아니라 우선 사용자 출현 확률이 상대적으로 높은 RB를 할당받기 때문에 제안하는 스케줄링 알고리즘의 데이터 처리량이 기존 PF 스케줄링 알고리즘에 비해 낮아지게 된다. 즉, 높은 평균 SNR을 가진 CR 단말들의 자원 활용률을 높임으로써 전송 중지로 인한 성능 저하를 최소화하고, 높은 전체 시스템 데이터 처리량을 보이게 된다.

이와 더불어 각 그룹 내 CR 단말 간 데이터 처리량을 보다 자세히 살펴보면 제안 스케줄링 알고리즘의 경우 그룹 내 사용자별 데이터 처리량이 비교적 일정하게 유지되는 반면, 기존 PF 스케줄링 알고리즘의 경우 동일 그룹 내 사용자의 데이터 처리량이 불규칙적으로 나타남을 알 수 있다. 이는 제안 알고리즘이 CR 환경에서 채널 품질에 비례한 공평성을 보다 안정적으로 제공할 수 있음을 의미한다.

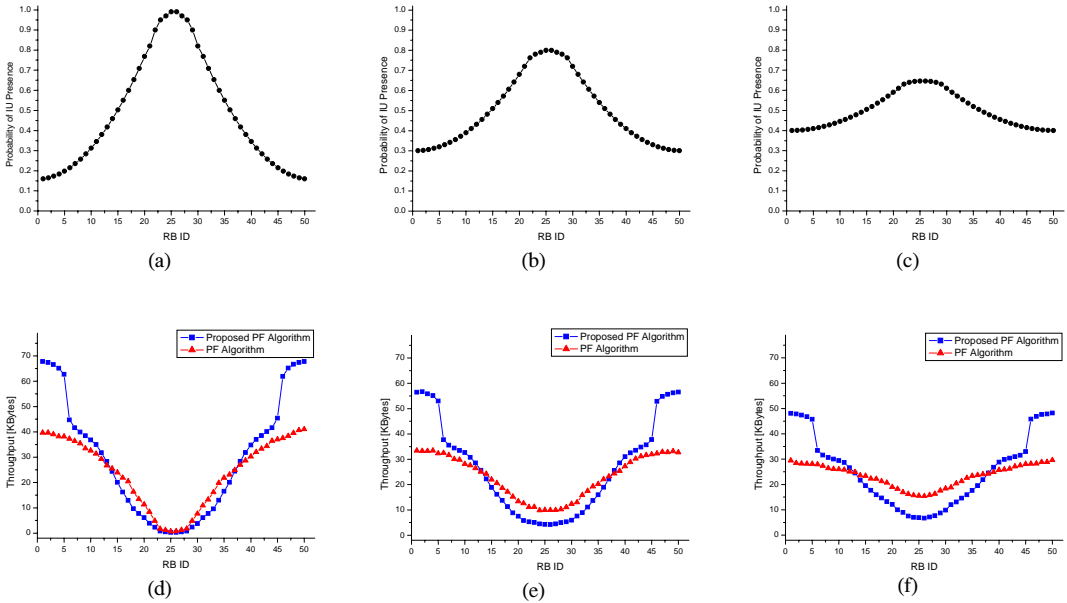


그림 7. RB별 우선 사용자의 출현 확률 분포 환경에 따른 RB별 데이터 처리량

그림 7은 우선 사용자의 평균 출현 확률이 0.5일 때 RB별 우선 사용자의 출현 확률 분포 환경에 따른 RB별 데이터 처리량의 변화를 나타내고 있다. 이때 그림 7-(a),(b),(c)는 우선 사용자의 출현 확률 분포를 나타내며, (a)에서 (c)로 갈수록 분산이 커지는 정규 분포의 형태를 보인다. 또한 그림 7-(d),(e),(f)는 각각 우선 사용자의 출현 확률 분포가 7-(a),(b),(c)일 때의 데이터 처리량을 나타내고 있다. 이와 같은 우선 사용자 출현 확률 분포에 따른 두 기법의 데이터 처리량은 표 3에 정리하였다.

표 3에서 볼 수 있듯이 우선 사용자 출현 확률은 0.5로 동일하나 출현 확률 분포가 변할 경우 두 스케줄링 알고리즘 모두 데이터 처리량의 변화가 발생한 것을 알 수 있다. 이때 제안 스케줄링 알고리즘은 우선 사용자의 출현 확률이 낮은 RB에 고차 변조 기법을 사용한 CR 단말의 하향 데이터를 할당할 수 있어 PF 스케줄링 알고리즘에 비해 높은 데이터 처리량이 보이고 있으며, 모든 환경에 대해 제안 알고리즘이 기존 PF 기법 보다 우수한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다.

또한, 우선 사용자 출현 확률의 분산이 작을수록 더 큰 성능 차를 보이는데 이는 그림 7을 통해 알 수 있듯이 평균을 기준으로 낮은 우선 사용자 출현 확률을 가지는 구간에서 제안하는 스케줄링 알고리즘이 PF 스케줄링 알고리즘에 비해 높은 데이터 처

표 3. 우선 사용자의 출현 확률 분포에 따른 데이터 처리량

환경	데이터 처리량 [MBytes]		성능 차 [MBytes]
	제안 스케줄링 알고리즘	기존 PF 스케줄링 알고리즘	
(a)	1.466	1.223	0.243
(b)	1.354	1.191	0.163
(c)	1.261	1.177	0.084

리량을 보이고, 우선 사용자 출현 확률이 낮아질수록 더욱 높은 데이터 처리량을 보이기 때문이다. 따라서 우선 사용자 출현 확률의 분산이 작을수록 낮은 우선 사용자 출현 확률을 가지는 RB가 많아지게 되고 이에 따라 제안하는 스케줄링 알고리즘의 전체 시스템 데이터 처리량은 더욱 높아지게 된다.

## V. 결론

본 논문은 기존 무선 통신 시스템에 대표적으로 사용되는 PF 스케줄링 알고리즘을 CR 환경에 적용할 때 발생하는 문제점을 분석하고, 이를 해결하기 위해 CR 네트워크의 특성을 반영한 하향링크 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 하향링크 스케줄링 알고리즘은 기존 PF 스케줄링 알고리즘을 토대로 우선 사용자의 출현 확률을 추가적



인 파라미터로 설정하고, 스펙트럼 센싱을 통해 확보한 유휴 RB에 대해 높은 품질의 무선 채널 상태를 가진 CR 단말과 우선 사용자 출현 확률이 낮은 RB를 결합하여 최적의 CR 단말과 RB 쌍을 찾아 유휴 주파수 자원을 할당하는 특징을 가지고 있다.

또한 제안하는 스케줄링 알고리즘의 성능 평가를 위해 다양한 모의실험 환경을 토대로 성능 분석을 수행하였으며, 그 결과 기존 PF 스케줄링 알고리즘을 CR 환경에 적용할 경우 발생하는 문제점을 최소화하여, 채널 품질에 따른 비례적 공평성 제공과 더불어 시스템 데이터 처리량은 더욱 높아짐을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] J. Mitola III, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," In Proc. of IEEE MoMuC, pp.3-10, Nov., 1999.

[2] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," In Proc. of IEEE ACSSCC, pp.772-776, Nov., 2004.

[3] J. Mitola III, and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," IEEE Personal Communications, Vol.6, No.4, pp.13-18, 1999.

[4] Z. Kostic, and N. Sollenberger, "Performance and implementation of dynamic frequency hopping in limited-bandwidth cellular systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.1, No.1, pp.28-36, Jan., 2002.

[5] A. T. Hoang, and Y. C. Liang, "Maximizing Spectrum Utilization of Cognitive Radio Networks Using Channel Allocation and Power Control," In Proc. of IEEE VTC, pp.1-5, Sep., 2006.

[6] S. Krishnamurthy, M. Thoppian, S. Venkatesan, and R. Prakash, "Control Channel-based MAC-layer Configuration, Routing and Situation Awareness for Cognitive Radio Networks," In Proc. of MILCOM, pp.455-460, Oct., 2005.

[7] A. Jalali, R. Padovani, and P. Pankaj, "Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System," In Proc. of IEEE VTC, pp.1854-1858, May, 2000.

[8] P. Aneigeiras, J. Wigard, and P. Mogensen, "Performance of Packet Scheduling Methods with Different Degree of Fairness in HSDPA," In Proc. of IEEE VTC, pp.26-29, Sep., 2004.

[9] 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.

[10] D. S. Baum, J. Salo, G. Del Galdo, M. Milojevic, P. Kyosti, and J. Hansen, "An Interim Channel Model for Beyond-3G Systems," In Proc. of IEEE VTC, pp.3132-3136, May, 2005.

허 대 철 (Daecheol Heo)

준회원



2007년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
 2007년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사과정  
 <관심분야> IPTV, Cognitive Radio

김 정 종 (Jungjong Kim)

준회원



2007년 8월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
 2007년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사과정  
 <관심분야> Optical Network, EPON, Cognitive Radio

이 정 원 (Jungwon Lee)

준회원



2008년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2008년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사과정  
<관심분야> Sensor Network, Cognitive Radio

신 요 안 (Yoan Shin)

중신회원



1987년 2월 서울대학교 전자공학과 학사  
1989년 2월 서울대학교 전자공학과 석사  
1992년 12월 University of Texas at Austin 전기및컴퓨터공학과 박사

1992년 12월~1994년 7월 오스틴소재 MCC (Microelectronics & Computer Technology Corp.) 연구원  
1994년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수  
<관심분야> CDMA 및 OFDM 모델, UWB 전송 시스템, MIMO 시공간신호처리, Cognitive Radio

황 준 호 (Junho Hwang)

정회원



2004년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2006년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사  
2006년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 박사과정  
<관심분야> Optical Network,

EPON, 3&4G 무선 이동통신 시스템, Cognitive Radio

유 명 식 (Myungsik Yoo)

중신회원



1989년 2월 고려대학교 전자공학과 학사  
1991년 2월 고려대학교 전자공학과 석사  
2000년 6월 SUNY at Buffalo Dept. of EE 박사  
2000년 9월~현재 숭실대학교

정보통신전자공학부 부교수  
<관심분야> Optical Network, OBS, EPON, 인터넷 QoS, Wireless MAC Protocol, Ad-hoc Network, Cognitive Radio

이 원 철 (Woncheol Lee)

정회원



1986년 2월 서강대학교 전자공학과 학사  
1988년 2월 연세대학교 전자공학과 석사  
1995년 7월 Polytechnic Univ. Electrical Engineering 박사  
1995년 9월~현재 숭실대학교

정보통신전자공학부 부교수

<관심분야> Transmit Diversity, Software Defined Radio, Antenna, Cognitive Radio, Position Location based on UWB, CDMA 2000/WCDMA