

광대역 OFDMA 무선통신시스템의 호 접속제어에 관한 연구

백천현[†]

동의대학교 산업경영공학과

Study on the Call Admission Control in the Broadband OFDMA Wireless Communication Systems

Chun-hyun Paik

Department of Industrial and Management Engineering, Dongeui University, 995 Eomgwangno, Busanjin-gu, Busan

This paper addresses a call admission control(CAC) scheme giving handoff calls a priority over new calls for OFDMA wireless communication systems. The characteristics of OFDMA system and a variety of user QoS (Quality of Service) requirements are incorporated into the proposed CAC scheme which consists of several optimization modules for the system resource(subcarriers and power) allocations. The mathematical models and its solution methods for the embedded resource allocation problems are proposed. Some extensive computational experiments are conducted to illustrate the superiority of our CAC.

Keywords: Call Admission Control, Wireless Communication System, Quality of Service, Mathematical Model

1. 서론

이동통신시스템의 진화방향은 다양한 멀티미디어 서비스를 통합된 시스템 및 프로토콜 구조로 제공하는 광대역(broadband) 시스템화로 요약될 수 있다. 음성서비스를 위한 시스템 용량 증대를 위해 등장한 2G(generation) 시스템(예 : CDMA(code division multiple access) IS-95)은 제한된 전송속도를 가진 멀티미디어서비스를 음성서비스와 분리된 시스템구조로 제공하는 2.5G(예 : CDMA EV-DO(evolution-data only))으로 발전하였다. 2.5G 시스템에 이어 등장한 3G(W-CDMA(wideband-CDMA)) 시스템에 이르러 통합된 시스템 구조로 멀티미디어 서비스를 제공하게 되었으며, 최근에는 광대역서비스를 수용하기 위해 전송속도가 보다 강화된 3.5세대(예 : HSPDA, high speed downlink packet access) 시스템이 운용되고 있다.

한편, 특정 지역 내로 사용자의 이동성이 제한되는 환경에서 데이터서비스의 제공을 목적으로 하는 무선랜(WLAN, wireless local area network) 시스템은 광대역화를 통해 데이터 전송속도를 향상시키는 동시에 이동성을 확대하는 방향으로

진화하고 있다(예 : BWA(broadband wireless system) : IEEE 802.16, 802.20). 최근 국내기술의 주도로 서비스 제공이 본격화되고 있는 와이브로(wibro) 시스템이 바로 BWA계열에 해당된다.

OFDMA(orthogonal frequency division multiplexing access) 기술은 와이브로 시스템뿐만 아니라 이동통신 계열 또는 BWA 계열에서 진화되는 차세대(4G) 이동통신시스템 기술의 핵심으로 인식되고 있어 이에 대한 연구가 최근에 활발히 진행되고 있다. OFDMA 시스템에서는 주어진 주파수 대역폭을 상호 직교성(orthogonality)이 유지될 수 있도록 수백 개의 부반송파(subcarriers)로 나누고, 상이한 전파환경 및 요구QoS(quality of service) 수준에 적합하게 부반송파(또는 이들의 묶음)를 사용자 별로 할당한다(Ali *et al.*, 2007; Kulkani *et al.*, 2005; Liu and Li, 2005). OFDMA 시스템의 자원관리(또는 할당)에 관한 연구 중에서 경영과학 분야와 관련하여 그 동안 가장 활발히 진행된 연구주제는 부반송파 할당(subcarrier assignments)과 부반송파별 전력할당(power assignment per subcarrier)이다(Ali *et al.*, 2007; Gross and Bohge, 2006; Ki *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2008;

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-321-B00387).

[†] 연락처 : 백천현, 614-714 부산시 부산진구 엄광로 995, 동의대학교 산업경영공학과, Tel : 051-890-1660, Fax : 051-890-2627,

E-mail : chpaik@deu.ac.kr

2008년 7월 17일 접수; 2008년 9월 23일 수정본 접수; 2008년 9월 26일 게재 확정.

Kulkani *et al.*, 2005; Lee and Chong, 2007; Song, 2005). 그러나 그 동안 많은 연구가 발표된 CDMA 시스템하의 호 접속제어(CAC, call admission control) 연구와는(Badia and Gazzini, 2003; Epstein and Schwarz, 2000; Paik, 2007; 인용된 연구의 참고문헌 참고) 달리 OFDMA 시스템하의 CAC에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다(Jeong *et al.*, 2005; Niyato and Hossain, 2005A and 2005B; Qin *et al.*, 2007; Rong *et al.*, 2007; Sohn *et al.*, 2007). 본 연구는 OFDMA 시스템 하의 CAC에 관한 연구이다.

OFDMA 시스템에서 가장 기본적인 자원(resource)은 부반송파와 부반송파에 할당되는 전력(power)으로 구분할 수 있다. 각 부반송파의 채널이득(channel gain)은 사용자마다 일반적으로 상이하하며, 채널이득은 시간에 따라 동태적으로 변하게 된다. 자원할당 모듈은 서비스 사용자의 QoS와 무선 환경특성을 고려하여 자원을 서비스 사용자에게 할당하게 되고, 이는 정해진 시간주기(일반적으로 frame)마다 반복된다.

CAC는 특정 사용자(또는 서비스)의 서비스 연결요청(connection request)이 시스템에 도착했을 때, 접속수락(connection accept)을 할 것인지 아니면 접속거절(connection reject)을 할 것인지를 결정하는 것을 의미한다. OFDMA 시스템은 기존의 CDMA 및 FDMA(frequency division multiple access) 또는 TDMA(time division multiple access) 방식과는 매우 상이한 시스템 특성을 가지고 있다. OFDMA 방식이 FDMA나 CDMA 방식과 구분되는 점은 확정된 자원용량과 소프트한 용량요소가 혼재한다는 점이다. 즉, 확정된 수의 부반송파가 있다는 점은 시스템 용량의 확정적 요소이지만 각 부반송파의 전송속도는 신호간섭 환경에 동태적 영향을 받는다는 점은 소프트한 용량으로 볼 수 있다. 따라서 기존 연구에서 수행된 CAC 방식은 OFDMA 시스템에 적합하지 않다.

최근 본격적인 연구를 위한 초기단계에 있는 OFDMA CAC 방식에 대한 대표적인 기존 연구들은 다음과 같다. 먼저, Niyato *et al.* (2005B)의 연구에서는 CAC에 대한 조사연구로 4세대 시스템의 CAC가 갖추어야 할 특성 및 조건에 대한 일반사항들을 소개하고 있다. Jeong *et al.* (2005)의 연구에서는 IEEE 802.16x 계열 시스템을 대상으로 서비스를 실시간 및 비실시간 서비스로 구분하고, 기존 CDMA에서 제안된 아이디어를 응용한 CAC를 제안하고 있지만 제시된 CAC 방식은 OFDMA의 특성이 거의 반영되지 않는 등 OFDMA CAC로는 한계를 가지고 있다. 참고문헌 Niyato *et al.* (2005A)에서는 OFDMA 시스템의 상향링크(uplink)를 위한 CAC를 다루고 있다. 멀티미디어 데이터 서비스환경에서 트래픽은 비대칭성(asymmetry)을 가지게 되어 시스템용량에 대한 제약은 일반적으로 하향링크(downlink)에 의해 결정된다. 따라서 상향링크를 대상으로 한 Niyato *et al.* (2005A)의 연구의 실용적 의미는 제한적이다. Qin *et al.* (2007)의 연구에서는 신규호(new call)와 핸드오프호(handoff call)를 구분하는 CAC를 제시하고 있다. 그러나 각 부반송파에게 할당되는 전력이 동일하다는 단순한 가정을 도입하고, 사용자 별로 상이할 수 있는 요구 QoS 기준 차이를 반영

하지 않는다. Sohn *et al.* (2006)은 자원할당문제에 대한 간단한 비선형 휴리스틱을 제안하고 이를 CAC에 연계시키고 있는데, 제안된 알고리즘이 실시간으로 적용되기 어렵고 CAC와의 연계내용 역시 불명확하다. 마지막으로 Rong *et al.* (2007)에서는 사용자의 도착 및 통화완료 행태에 대한 확률적 모형을 도입함으로써 기존 연구와 구분되지만 전력자원을 고려하고 있지 않다. 결론적으로, OFDMA 시스템의 CAC는 CDMA나 FDMA 시스템의 그것과는 다른 특성을 가지고 있으나 이에 대한 연구는 양·질적으로 매우 빈약하다고 할 수 있다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 OFDMA 시스템에 대한 소개와 본 연구에서 새로이 제안되는 CAC에 대해 설명한다. 제 3절에서는 자원할당 및 CAC에 관련된 최적화 모형 및 해법에 대해 소개한다. 제시된 CAC에 대한 실험은 제 4절에서 소개된다. 마지막으로 결론에서는 본 연구의 의의 및 추후 연구과제에 대해 살펴본다.

2. 시스템모형 및 CAC

2.1 OFDMA 시스템

본 연구의 CAC 분석은 국내에서는 개발되어 본격적인 상용 서비스가 제공되고 있는 와이브로 시스템규격의 근간이 된 IEEE 802.16e 규격하의 TDD-OFDMA(time division duplexing OFDMA) 시스템을 대상으로 한다. TDD-OFDMA의 프레임 구조에서 하향링크와 상향링크는 <Figure 1>과 같이 시분할에 의해 구분된다. 즉, 하향링크의 연속적인 OFDMA 심볼(symbol)이 지속된 후, 연이어 상향링크 심볼이 뒤 따른다. 주파수 영역관점에서, 전체 주파수대역은 수백 개의 부반송파로 나누어진다.

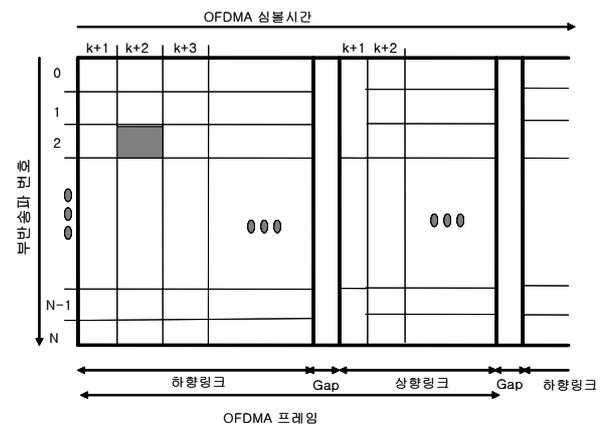


Figure 1. The frame structure of TDD-OFDMA system

본 연구는 멀티미디어 서비스의 비대칭성 특성으로 인해 시스템용량 제약에 보다 중요한 하향링크를 대상으로 한다. TDD-OFDMA 시스템에서는 사용자(본 연구에서는 사용자(user)

와 호(call)을 서로 구분 없이 사용한다)와 기지국(base station) 사이의 하향링크 상태에 대한 정보(채널계인)는 프레임 단위로 갱신된다. 따라서, 자원할당 및 CAC는 프레임 단위로 이루어진다고 가정한다. 즉, 기지국은 매 프레임마다 각 사용자로부터 상향링크를 통해 사용자-기지국간 링크정보를 전달받고, 이에 근거해 자원할당 및 CAC가 이루어진다.

본 연구는 대부분의 현실시스템에서 채용하고 있는 분산제어 방식을 가정한다. 분산제어 방식에서는 특정 셀에서 서비스를 요구하는 사용자는 해당 셀을 관장하는 기지국에 호 접속요구를 전달한다. 기지국에 내장된 CAC 기능 블록은 이미 접속되어 있는 사용자들의 QoS상태에 대한 영향을 분석하고, 분석결과와 설정된 CAC 기준을 비교하여 호 접속여부를 결정한다.

2.2 호 접속제어(CAC) 방식

본 연구에서는 호(call)를 3가지로 구분한다. 먼저 통화호(ongoing call)는 현재 셀(current cell)에서 호 접속과정이 이미 완료되어 통화가 진행 중인 호를 지칭한다. 다음으로, 현 기지국에 새로이 접속요청을 하는 호는 신규호와 핸드오프호로 나누어진다. 신규호는 현재 셀에서 새로이 통화를 시작하기 위해 호 접속을 시도하는 호를 그리고 핸드오프호는 통화 중에 인접 셀(neighboring cell)로부터 현재 셀로 이동하는 호를 각각 의미한다. 설명의 편의를 위해 n 번째 프레임이 시작되기 직전 CAC를 대상으로 한다. 따라서 별도의 설명이 없는 한 “현 프

레이프”는 n 번째 프레임을 의미한다. 본 연구에서 제시된 CAC는 다음과 같이 요약된다.

시스템 QoS($Q(n)$)는 현 프레임에서 신규호 또는 핸드오프호에 대한 호 접속여부가 결정되기 전에 자신들이 요구하는 데이터율(bps) 수준을 만족하는 통화호들의 비율로 정의된다. 직전($n-1$ 번째) 프레임 동안 도착한 핸드오프호 및 신규호에 대한 연결여부는 n 번째 프레임이 시작되기 전에 이루어진다. $Q(n)$ 이 시스템 QoS가 요구수준(β) 미만이면(즉 $Q(n) < \beta$), 핸드오프호 또는 신규호의 연결 요청은 거부된다. $Q(n) \geq \beta$ 인 경우는 두 가지 상황으로 구분된다. 먼저, 호 연결 시도호가 핸드오프호인 경우 핸드오프호만을 위해 예약된 전력량(reserved power)을 이용해 핸드오프호에 대한 자원(전력 및 부반송파)을 할당한 뒤, 나머지 자원을 통화호에 할당한다. 다음으로, 호 연결 시도호가 신규호인 경우에는 통화호와 신규호를 구분하지 않고 자원을 임시로 할당한다. 신규호에 대한 임시 자원할당 후, 통화호만을 대상으로 시스템 QoS를 재계산한다(재계산된 시스템 QoS를 $Q'(n)$ 으로 표시하자). 만약 신규호의 호 접속허용으로 시스템 QoS가 요구수준을 위배할 것으로 예상되면(즉, $Q'(n) < \beta$), 신규호에 대한 연결요청은 거부되고 신규호에 임시로 할당된 자원은 통화호에 재분배된다. 제시한 이상의 CAC는 아래 <Figure 2>와 같이 요약된다.

제시된 CAC는 매 프레임마다 이루어지므로, n 번째 프레임에 이루어지는 CAC를 $CAC(n)$ 으로 표기하기로 한다. $CAC(n)$ 에는 다음과 같은 3가지 자원할당 절차가 포함된다. 먼저, 새로운 호 접속연결이 필요하지 않거나(새로이 도착하는 사용자

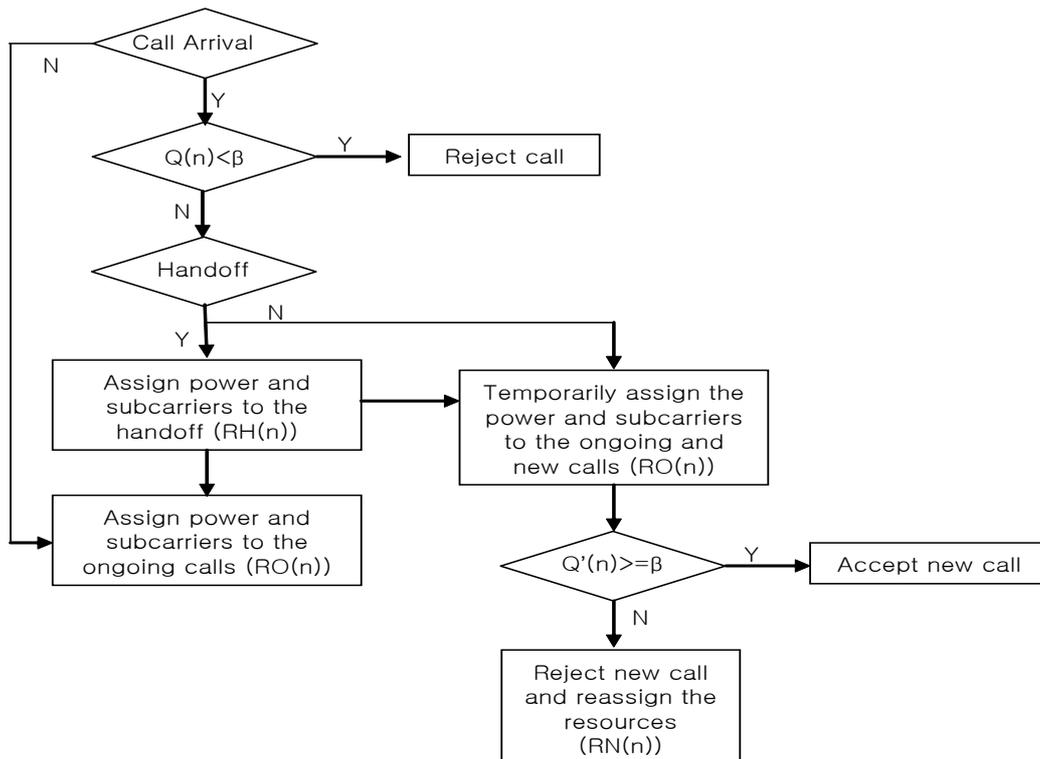


Figure 2. Summary for the proposed call admission control

가 없거나 CAC가 접속거절을 한 경우) 또는 핸드오프호에 대한 자원할당이 이루어진 후 통화호에 자원(부반송파, 전력)할당을 수행하는 절차이다. 이를 RO(n)이라고 표시하자. 다음으로, 핸드오프호의 접속이 허용된 경우, 핸드오프호에 자원을 할당하는 절차인데(RH(n)으로 표기), 핸드오프호에게는 독점적으로 사용 가능한 전력량은 주어졌다고 가정한다. 마지막으로, RN(n)은(통화호+신규호)에 대한 임시 자원할당이 이루어진 후 시스템 QoS 기준이 위배되어 신규호가 거절된 경우 신규호에게 임시로 할당된 부반송파 및 전력을 통화호에게 재분배하는 절차이다.

3. 최적화 모형

CAC에 관계된 자원할당에 대한 최적화 모형을 수립하기 위해 다음과 같은 기호 및 가정을 도입한다. 먼저, 사용자(또는 호)가 요구하는 데이터율(이를 간단히 요구데이터율로 치칭)은 사용자 별로 다를 수 있으며, 사용자 i 의 요구데이터율을 R_i (bps)라고 표시한다. 사용자 QoS 조건은 사용자의 평균데이터율(average data rate)이 요구데이터율 이상이 되어야 하는 조건을 의미한다.

시스템에서 사용할 수 있는 가용 주파수 대역은 B (Hz)이고 부반송파 각각의 대역폭은 Δf (Hz)으로 표시한다. 따라서 시스템에서 사용할 수 있는 부반송파의 수는 $|N| = B/\Delta f$ 이 된다. 각 부반송파는 일련의 번호로 구분하고 집합 N 은 부반송파들의 집합을 표시한다. 그리고 도착하는 호는 핸드오프호 및 신규호로 구분되며 이들의 도착은 포아송 과정(Poisson process)을 따른다고 가정한다. 시스템(셀)에 도착한 호의 통화시간은 평균이 D 인 지수분포를 따른다. 단일 프레임 동안 핸드오프호의 도착, 신규호의 도착 및 통화호의 통화료 중 하나의 사건(event)만 발생하는 것으로 가정한다. 이 가정은 매우 짧은 단일 프레임 동안(와이브로 시스템의 경우 5ms) 복수의 사건이 발생할 확률은 매우 미미하기 때문에 현실적 상황을 크게 훼손하지 않으면서 분석의 편의를 도모하기 위해 도입되었다. 그러나 프레임의 길이가 충분히 길어 복수개의 신규호 또는 핸드오프호가 단일프레임 동안에 발생하는 경우 제시된 CAC는 그대로 적용할 수 없다. 시스템(셀)에 할당된 전체 전력량은 P_{\max} (watt)로, 핸드오프호에 우선적으로 할당할 수 있는 전력량은 P_H (watt)으로 표시한다. $g_{ij}[n]$ (dB)는 사용자 i 와 부반송파 j 간의 n 번째 프레임에서의 채널게인(channel gain)으로, 이는 경로 감쇄(path loss), 음영손실(shadowing loss) 그리고 빠른 페이딩(fast fading)에 의해 결정된다(Liu and Li, 2005). $\gamma_{ij}[n]$ 는 사용자 i 와 부반송파 j 간의 단위 전력 당 신호 대 잡음비(SNR, signal to noise ratio) 즉, $\gamma_{ij}[n] = (g_{ij}[n])^2/N_o$ 이고, 여기서 N_o 는 잡음 전력(noise power)를 나타낸다. n 번째 프레임에 부반송파 j 에 할당된 전력량이 $p_j[n]$ 이고 이 부반송파가 사용자 i 에 할당되면 전송데이터율 $r_{ij}[n]$ 은 아래와 같이 결정된다(Kulkani *et al.*,

2005; Liu and Li, 2005).

$$r_{ij}[n] = \Delta f \log_2(1 + \gamma_{ij}[n]p_j[n]). \quad (1)$$

식 (1)에 주어진 $r_{ij}[n]$ 에 대한 표현식에서 Δf 는 상수로, 수식의 편의상 아래에서는 Δf 이 생략된 $r_{ij}[n]$ 을 사용하기로 한다.

3.1 RO(n) 최적화 모형

RO(n)은 n 번째 프레임이 시작하기 직전에, 대상 사용자(또는 호)에 부반송파 및 이들에게 할당되는 전력의 양을 결정하는 절차로 OFDMA 시스템 자원운용 및 CAC에 가장 핵심적인 기능을 담당한다. 기존 CAC에 대한 대부분의 연구(Jeong *et al.*, 2005; Niyato and Hossain, 2005A; Rong *et al.*, 2007; Qin *et al.*, 2007)는 이 절차를 고려하지 않거나 균등 전력할당(uniform power distribution)과 같은 단순한 가정을 도입하고 있다. 아래에서 제시하는 RO(n) 최적화 모형 및 해법은 CAC의 하위모듈(sub-module)로써 뿐만 아니라 그 자체로도 의미가 있다.

n 번째 프레임이 시작되기 직전에 현재 셀에 있는 사용자(통화호 또는 통화호 + 신규호)들의 집합을 K 로 표시하자. 그리고 이들 사용자들이 사용 가능한 가용 전력량은 P_{\max} 그리고 이용 가능한 부반송파들의 집합은 N 이라고 하자(핸드오프호에 대한 자원할당이 통화호에 앞서 이루어진 경우, 통화호를 위한 RO(n)의 가용 전력량 및 부반송파는 핸드오프호에 할당된 것을 제외한 나머지가 된다).

n 번째 프레임에서의 사용자 i 와 부반송파 j 간 채널게인 $g_{ij}[n]$, $i \in K$, $j \in N$ 은 주어져 있다. $x_{ij}[n]$ 은 부반송파 j 가 사용자 i 에 할당되면 1이고 그렇지 않으면 0의 값을 갖는 0-1 변수라고 정의한다. 또한 변수 $p_j[n]$ 은 부반송파 j 에 할당되는 전력의 양이라고 하면, n 번째 프레임에 사용자 i 의 순간데이터율(instant data rate) $r_i[n]$ 은 식 (1)에 의해 $r_i[n] = \sum_{j \in N} x_{ij}[n]r_{ij}[n]$ 이 된다. 그리고 n 번째 프레임까지 사용자 i 의 평균데이터율(average data rate 또는 throughput)($\bar{r}_i[n]$)은 다음과 같다.

$$\bar{r}_i[n] = \frac{\sum_{j \in N} \sum_{l=1}^n r_{ij}[l]}{n}. \quad (2)$$

RO(n)에서 자원할당을 위한 기준(목적함수)으로 효용함수(utility function)을 사용한다. $U_i(\bar{r}_i[n])$ ($U_i(r_i[n])$)을 n 번째 프레임까지(에서) 평균데이터율(순간데이터율)이 $\bar{r}_i[n]$ ($r_i[n]$)인 사용자의 i 의 효용을 나타낸다고 하자. RO(n)에서 자원할당을 위한 기준으로 현 프레임에서의 순간데이터율 즉 $r_i[n]$ 을 사용하는 방법과 n 번째 프레임까지의 평균데이터율 $\bar{r}_i[n]$ 을 사용하는 방법이 있는데, 이 두 방법은 응용 및 이론적 측면에서 나름대로 의의를 가지고 있다(Song and Li, 2005). 통신 서비스의 품질은 순간데이터율 보다는 평균데이터율에 의해 결정되므

로 응용적 측면에서 평균데이터율 $\bar{r}_i[n]$ 이 보다 큰 의미를 가진다고 할 수 있다. 그러나 아래에서 소개되는 RO(n)의 최적화 모형에서 보듯이 RO(n)의 의사결정변수 $(x_{ij}[n], p_j[n])$ 와 직접적으로 연관을 가진 척도는 $r_i[n]$ 이 되어, 이론적 접근에는 순간 데이터율을 이용하는 것이 편리한 측면이 있다.

아래 정리는 n 이 충분히 큰 경우, RO(n)의 목적함수가 $\sum_i U_i(\bar{r}_i[n])$ 인 경우와 $\sum_i U_i(r_i[n])$ 의 경우의 관계를 보여주고 있다.

정리 1 : 만약 n 이 충분히 크면, 문제 $\max_{\{r_i[n], i \in K\}} \sum_{i \in K} U_i(\bar{r}_i[n])$ 는 근사적으로 문제 $\max_{\{r_i[n], i \in K\}} \sum_{i \in K} U_i'(\bar{r}_i[n-1])r_i[n]$ 이 된다.

증명 : $\bar{r}_i[n] = \bar{r}_i[n-1] + \frac{1}{n} (\sum_{j \in N} x_{ij}[n]r_{ij}[n] - \bar{r}_i[n-1])$
 $= \bar{r}_i[n-1] + \rho[n](r_i[n] - \bar{r}_i[n-1])$. 여기서, $\rho[n] = \frac{1}{n}$,
 $r_i[l] = \sum_{j \in N} x_{ij}[l]r_{ij}[l]$. 따라서 $\rho[n]$ 이 충분히 작으면, 다음이 만족된다.

$$\frac{\partial U_i(\bar{r}_i[n])}{\partial r_i[n]} = \rho[n]U_i'((1-\rho[n])\bar{r}_i[n-1] + \rho[n]r_i[n]) \\ \approx \rho[n]U_i'(\bar{r}_i[n-1]).$$

즉, 위 결과는 n 이 충분히 클 때, 현 프레임의 할당결과에 따른 한계 효용값(marginal utility value)은 직전 프레임의 할당 결과에 전적으로 의존함을 의미한다.

일차 Taylor 전개에 따라($r_i[n] = \bar{r}_i[n-1]$ 에서),

$$\sum_i U_i(\bar{r}_i[n]) = \sum_i U_i(\bar{r}_i[n-1]) + \rho[n](r_i[n] - \bar{r}_i[n-1]) \\ \approx \sum_i U_i(((1-\rho[n])\bar{r}_i[n-1] + \rho[n]r_i[n])) \\ + \sum_i \frac{\partial U_i(((1-\rho[n])\bar{r}_i[n-1] + \rho[n]r_i[n]))}{\partial r_i[n]} (r_i[n] - \bar{r}_i[n-1]) \\ \approx \sum_i U_i(\bar{r}_i[n-1]) + \sum_i \rho[n]U_i'(\bar{r}_i[n-1])(r_i[n] - \bar{r}_i[n-1]).$$

$\bar{r}_i[n-1]$ 은 이미 알려진 값이기 때문에(따라서 $\sum_i U_i(\bar{r}_i[n-1])$ 도 알려진 값임) 결국 $\sum_i U_i(\bar{r}_i[n])$ 의 최대화하기 위해서는 $\sum_i U_i'(\bar{r}_i[n-1])r_i[n]$ 을 최대화하면 된다. □

위 정리는 직전 프레임의 한계 효용값으로 가중화된 현 프레임의 순간데이터율을 극대화하는 자원할당 방식은 경과된 프레임의 수가 충분히 큰 경우 평균데이터율을 극대화하는 것으로 근사화됨을 의미한다. 이 같은 결과를 바탕으로 자원할

당 RO(n)을 위한 최적화 문제(ROP(n))를 다음과 같이 정식화하였다.

문제 (ROP(n))

$$\text{Max} \sum_{i \in K} u_i[n] \sum_{j \in N} x_{ij}[n]r_{ij}[n] \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in N} p_j[n] \leq P_{\max} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in K} x_{ij}[n] \leq 1, \quad \forall j \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij}[n]r_{ij}[n] \geq R_i, \quad \forall i \quad (6)$$

$$p_j[n] \geq 0, \quad \forall j \quad (7)$$

$$x_{ij}[n] \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \quad (8)$$

여기서, $u_i[n] = U_i'(\bar{r}_i[n-1])$

목적함수 (3)은 직전 ($n-1$ 번째) 프레임까지의 평균데이터율의 한계 효용값 ($U_i'(\bar{r}_i[n-1])$)을 가중계수로 가진 현 프레임의 순간데이터율들의 합을 최대화하는 것이다. 효용함수의 구체적 형태와 관련하여 가장 중요시 되는 요소 중 하나는 사용자 간 자원할당의 공정성(fairness)을 반영하는 문제이다. 자원할당의 목적함수가 시스템 순간데이터율(또는 평균데이터율)을 최대화하는 것으로 설정되면(예 $U_i(\bar{r}_i[n]) = \bar{r}_i[n]$) 전과환경이 우수한(기저국에 가까운 호)에 자원할당이 집중되기 때문에 상대적으로 셀 주변에 있는 호는 자원할당에 소외되는 경향이 있다. proportional fair(PF)로 불리는 자원할당 방식(Kelly *et al.*, 1998; Kulkani *et al.*, 2005; Nguyen and Han, 2006)은 사용자 간 자원할당 공정성을 위해 $U_i(\bar{r}_i[n]) = \ln(\bar{r}_i[n])$ 을 사용한다. 본 연구의 모든 결과는 일반적인 효용함수에 대해서도 적용되지만, 본 연구의 목적이 새로운 효용함수를 찾는 것이 아니기 때문에 자원할당에 가장 많이 사용되는 PF 방식하의 효용함수를 대상으로 한다. ROP(n)에서 제약식 (4)는 전력할당이 가용 전력 범위에서 이루어져야 함을 나타낸다. 그리고 제약식 (5)는 각 부반송파는 하나의 사용자에게만 할당되어야 함을 의미한다. 그리고 식 (6)은 각 사용자의 요구데이터율이 만족되어야 함을 나타낸다.

자원할당 문제 (ROP(n))의 의사결정변수는 각 부반송파에 할당되어야 할 전력의 양 $p_j[n]$ 과 각 사용자에게 할당되는 부반송파 $x_{ij}[n]$ 을 동시에 결정해야 하는 비선형 정수계획법 문제가 된다. 이 같은 문제의 복잡성으로 인해 제시된 ROP(n)에 비해 단순한 목적함수를 가지거나 일부 제약식이 없는 모형을 다루고 있는 대부분의 기존 연구에서도 최적해법이 아닌 휴리스틱을 제안하였다(Chung, Paik, and Kim, 2007; Lee and Chong, 2007; Mohanram and Bhashyam, 2005; Nguyen and Han, 2006; Song and Li, 2005). Lee and Chong (2007)과 Song and Li (2005)는 제약식 (6)이 없는 문제에 대한 휴리스틱을 제안하였다. 그

리고 Nguyen and Han(2006)은 PF방식 하에서 모든 부반송파에게 전력이 균등하게 할당되었을 때 최적 부반송파 할당에 대한 이론적 결과를 제시하였는데, 이 연구에서도 역시 제약식 (6)은 고려되지 않았다. 그리고 Mohanram and Bhashyam (2005)는 사용자간 요구데이터율의 상대적 비율 제약식을 도입하여 사용자 QoS와 사용자간 공평성을 간접적으로 반영하고 있다. 본 연구에서와 같이 사용자 QoS조건을 직접적으로 반영한 연구는 Chung, Paik and Kim(2007)의 연구인데 목적함수로 순간 변화율만을 고려한 휴리스틱 해법을 제안하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 ROP(n)은 기존 문헌에서 제시된 최적 자원할당 문제와 비교하여 가장 일반화 형태로, 이에 대한 최적해를 현실에 응용될 수 있는 정도로 빠른 속도로 구하는 것은 매우 어렵다.

문제구조의 특성을 반영한 휴리스틱을 개발하기 위해 문제 (ROP(n))의 부문제(sub-problem) (SP1)을 먼저 생각해 보자.

부문제 (SP1)

$$\text{Max}_{\{p_j[n], j \in N\}} \sum_{i \in K} u_i[n] \sum_{j \in N} x_{ij}[n] \log_2(1 + \gamma_{ij}[n] p_j[n])$$

s.t. (4), (7)

부문제 (SP1)에서는 부반송파 각각이 사용자들에게 이미 할당된 상태에서(즉, $x_{ij}[n]$ 이 주어짐), 각 부반송파에 할당되어야 할 전력량 $p_j[n]$ 을 구하는 문제로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{Max}_{\{p_j[n], j \in N\}} \sum_{j \in N} u_{a(j)} \log_2(1 + \gamma_{a(j)j}[n] p_j[n])$$

s.t. (4), (7)

여기서, $a(j)$: 부반송파 j 가 할당된 사용자 인덱스.

부분제 (SP1)은 전통적인 water-filling 문제(Kulkani, 2005; Papandreou and Antonakopoulos, 2008)가 되는데, 목적함수가 의사결정변수 $p_j[n]$ 에 대해서 증가함수이기 때문에 부문제 (SP1)의 최적해 $p_j^*[n]$ 는 $\sum_j p_j^*[n] = P_{\max}$ 을 만족한다. 제약식 (4)의 부등호를 등호로 바꾸고, 이 제약식만을 고려해 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 조건을 이용하면 다음과 같은 결과를 얻는다(Lee and Chong(2007)).

$$p_j^*[n] = u_{a(j)}[n] \frac{P_{\max} + \sum_{k(\neq j)} \frac{1}{\gamma_{a(k)k}[n]} \left[1 - \frac{u_{a(k)}[n] \gamma_{a(k)k}[n]}{u_{a(j)}[n] \gamma_{a(j)j}[n]} \right]}{\sum_k u_{a(k)}[n]},$$

$$j \in N. \quad (9)$$

식 (9)에 주어진 최적해 $p_j^*[n]$ 는 조건 $\sum_j p_j^*[n] = P_{\max}$ 은 만족하지만 어떤 부반송파 대해서는 비음수(non-negativity) 조건

(7)을 만족하지 않을 수 있다. 이 경우 해당 부반송파들을 제거하고 다시 식 (9)을 적용한다. 음수 전력이 할당된 부반송파가 없을 때까지 이 과정은 반복된다. Lee and Chong(2007)은 이 같은 반복과정에서 제거된 부반송파들에게 0 전력을 할당하면, 최대 N 번의 반복으로 부문제 (SP1)의 최적해를 구할 수 있음을 보였다. 따라서 각 반복에서 최대 N 개의 식 (9)에 의한 연산이 필요하고 최대 반복 횟수는 N 이므로 부문제 (SP1)의 이론적인 복잡도(complexity)는 $O(N^2)$ 이 된다. 그러나 0 전력이 할당된 부반송파들이 동시에 제거되고 이들이 다시 양의 전력을 할당 받는 경우가 발생하지 않기 때문에 실제 해법실행에 있어 반복의 수는 N 보다 매우 작은 것이 일반적이다.

이제, 모든 부반송파에 전력이 이미 할당되어 있을 때(즉, $p_j[n]$ 가 주어짐), 부반송파 각각을 사용자에게 할당하는 부문제 (SP2)을 생각해 보자.

부문제 (SP2)

$$\text{Max}_{\{x_{ij}[n], i \in K, j \in N\}} \sum_i u_i[n] \sum_j x_{ij}[n] \log_2(1 + \gamma_{ij}[n] p_j[n])$$

s.t. (5), (8)

각 부반송파는 한 사용자에게만 할당되는 조건으로부터 부문제 (SP2)의 최적해 $x_{ij}^*[n]$ 는 다음과 같다(Song and Li, 2005).

$$a(j) = \arg \max_i u_i[n] \log_2(1 + \gamma_{ij}[n] p_j[n]), \quad \forall j \quad (10)$$

$$x_{ij}^*[n] = \begin{cases} 1, & \text{if } i = a(j), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

위에서 살펴본 부문제 (SP1)과 (SP2) 모두에서 고려되지 않은 제약식은 각 사용자의 요구데이터율에 대한 제약식 (6)이다. 비록 본 연구의 ROP(n) 보다 단순화된 목적함수식을 이용하고 있지만 제약식 (6)이 포함된 부반송파 및 전력을 동시에 할당하는 문제에 대한 연구로는 본 연구자의 조사에 의하면, Chung, Paik and Kim(2007)의 연구가 유일하다. 이 연구에서 제시된 서브그래디언트(subgradient) 기반 휴리스틱은 이론적 기반에도 불구하고 최종해까지의 수렴시간이 비교적 길고, 무엇보다도 이 연구에서 제시된 해법은 단일 프레임상에서 이루어지는 자원할당만을 다루고 있어 프레임 진행에 따른 사용자들의 평균데이터율로 대표되는 사용자 QoS 조건을 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다.

사용자 QoS 수준은 사실 장기 평균데이터율(long-run average data rate)에 의해 결정된다. 사용자 i 의 장기 평균데이터율은 $\bar{r}_i[\infty] \equiv \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{r}_i[n]$ 으로 정의될 수 있는데, $\bar{r}_i[\infty] \geq R_i$ 을 위해 제약식 (6)은 매 프레임의 순간데이터율 $r_i[n]$ 이 요구데이터율 R_i 이상이 되도록 하는 조건이다. 물론, 매 프레임마다 $r_i[n] \geq R_i$ 이면 $\bar{r}_i[\infty] \geq R_i$ 은 만족되지만, 특정 프레임의 순간데이터율이 제약식 (6)을 만족하지 못하더라도 다른 프레임에

서 이를 보상할 수 있다면 $\bar{r}_i[\infty] \geq R_i$ 을 만족시킬 수 있다. 따라서 특정 프레임의 관점에서 보면, 제약식 (6)은 가능한 만족시키려고 노력하지만 반드시 만족시킬 필요는 없는 일종의 “soft constraint”의 성격을 가지고 있다. 제약식 (6)의 이 같은 성격과 앞서 살펴본 부문제 (SP1)과 (SP2)의 최적해를 이용해 본 연구에서 제안하는 ROP(n)의 휴리스틱은 다음과 같다.

ROP(n)을 위한 휴리스틱(편의상 현 프레임 인덱스 n 생략)

[단계 1] 초기화

$$l = 0, p_j^0 = \frac{P_{\max}}{N}, j \in N. \quad (12)$$

$$\Delta_i = R_i + (R_i - \bar{r}_i[n-1])^+, i \in K (\bar{r}_i[0] = R_i)$$

[단계 2] 부반송파의 할당이 변하면 아래 과정 반복

$$a^l(j) = \arg \max_{i \in K} e^{m \Delta_i} u_i \log_2(1 + \gamma_{ij} p_j^l), j \in N. \quad (13)$$

여기서, $m(\geq 0)$: 상수

식 (13)에 의해 부반송파 할당 $x_{ij}^l (i, \in K, j \in N)$ 를 구한다.

부문제 SP1에 대한 최적해 $p_j^{l+1} (j \in N)$ 를 구한다.

$l = l + 1.$

위에서 주어진 휴리스틱은 다음과 같이 요약된다: 초기화 단계([단계 1])에서 각 부반송파에게는 일단 균등한 전력량이 할당된다. [단계 2]에서는 먼저, 부반송파를 할당한다(부문제 (SP2)에 해당). 다음으로, 사용자 별로 부반송파가 주어진 상태에서 각 부반송파 별로 전력을 할당한다(부문제 (SP1)에 해당). 할당된 전력을 가지고 다시 부반송파를 할당한다. 이 부반송파 할당결과가 이전 할당결과와 동일하면, 휴리스틱은 완료되고 그렇지 않으면 반복적으로 이 과정이 수행된다.

식 (12)의 Δ_i 는 직전 프레임까지의 사용자 i 의 평균데이터율이 요구데이터율에 못 미치는 경우 그 차이와 요구데이터율의 합으로 이 값이 큰 사용자에게 부반송파 할당 우선권을 가능한 부여하기 위해 도입되었는데, 이는 [단계 2]의 식 (13)에 반영되어 있다. 제약식 (6)이 고려되지 않는 경우, 부반송파 할당이 한계 효율값과 순간데이터율에 의해 결정되는 것에 비해 (식 (10)) 식 (13)은 이 값과 더불어 요구데이터율 및 요구데이터율과 직전 프레임까지의 평균데이터율과의 차이를 반영하여 사용자를 결정하게 된다. 항목 $e^{m \Delta_i}$ 에서 m 는 임의의 음이 아닌 상수로 요구데이터율의 충족조건의 강화 정도에 따라 입력되는 값이다.

3.2 RH(n) 및 RN(n) 최적화 모형

핸드오프호가 도착하면, 현재 기지국 CAC 모듈은 이전 프레임까지의 시스템 QoS를 기준으로 핸드오프호의 호 연결여부를 결정하게 된다. 일단, 시스템 QoS 조건이 충족되면, RH(n)을 통해 핸드오프호에 대한 자원할당이 통화호에 앞서 이루어

지는데, 본 연구에서는 핸드오프호를 위해 사용 가능한 전력의 양은 P_H 로 주어졌다고 가정하였다. 전력 P_H 를 가지고 핸드오프호의 요구데이터율(이를 R_H 라고 하자)을 만족시키도록 부반송파를 할당해야 하는데, 핸드오프호에게 할당되고 남은 부반송파들이 통화호에 할당되기 때문에 RH(n)의 부반송파 할당 결과는 통화호의 자원할당에 영향을 미치게 된다.

핸드오프 호와 부반송파 j 간의 SNR을 γ_{oj} 으로 표기하고, 의사결정 변수 y_j 는 부반송파 j 가 핸드오프호에 할당되면 1이고 그렇지 않으면 0의 값을 갖은 0-1 정수변수 그리고 q_j 는 핸드오프호에 할당된 부반송파 j 에 할당되는 전력량이라고 하자. 아래 최적화 문제 (RHP(n))는 핸드오프호를 위해 요구되는 가장 적은 부반송파의 수와 이들 각각 할당되는 전력량을 결정하는 문제로 다음과 같이 정식화 된다.

문제 RHP(n)

$$\text{Min} \sum_{j \in N} y_j \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in N} y_j \log_2(1 + \gamma_{oj} q_j) \geq R_H$$

$$\sum_{j \in N} y_j q_j \leq P_H \quad (15)$$

$$q_j \geq 0, j \in N \quad (16)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, j \in N. \quad (17)$$

문제 RHP(n)에 대한 최적해법에 필요한 두 가지 성질에 대해 먼저 살펴본다.

(성질 1) 가용 부반송파의 집합은 $S (S \subseteq N)$ 이고, 전파환경은 $\gamma_o(S) = (\gamma_{o1}, \dots, \gamma_{o|S|})$ 일 때, RHP(n)의 최적 목적 함수 값을 $Z^*(\gamma_o(S))$ 이라고 하자. 만약, $\gamma_{oj} \geq \gamma'_{oj}, \forall j \in S$ 이면 $Z^*(\gamma_o(S)) \leq Z^*(\gamma'_o(S))$.

(성질 2) 가용 부반송파의 집합 S 와, 전파환경 $\gamma_o(S) = (\gamma_{o1}, \dots, \gamma_{o|S|})$ 이 주어진 경우, 제약식 (14), 제약식 (16) 그리고 제약식 (17)을 만족하는 최소의 전력량을 $\zeta(S)$ 라고 하자. 만약 $\zeta(S) > P_H$ 이면, 부반송파 집합 S 하에서 RHP (n)의 실행가능해(feasible solutions)는 존재하지 않는다.

RHP(n)을 위한 최적해법

입력: $\gamma_{oj}, j=1, \dots, |N|.$ γ_{oj} 는 내림차순으로 정렬되었다고 가정 (즉, $\gamma_{o1} \geq \dots \geq \gamma_{o|N|}$).

$k \leftarrow 1; S = \{k\};$

while ($k \leq |N|$) do {

Find $\zeta(S), y_j^*$ and $q_j^*, j \in S;$

If $\zeta(S) \leq P_H$, break;

$$\begin{aligned}
 &k = k + 1; \\
 &S = S \cup \{k\}; \\
 &\}
 \end{aligned}$$

위에서 주어진 해법에서는 핸드오프호를 위한 가용주파수 집합에 전파환경이 우수한 부반송파를 우선하여 하나씩 증가시킨다. 특정 부반송파 집합 S 하에서 요구되는 최소전력량 ($\zeta(S)$)이 제약식 (14)를 만족시키지 못하면 전파환경이 다음으로 우수한 부반송파를 가용 부반송파 집합에 추가한다. 따라서 (성질 1)과 (성질 2)에 의해 주어진 해법은 제약식 (14)을 만족시키는 가장 적은 부반송파의 수를 찾게 된다. 물론, 만약 $S = N$ 이고 $\zeta(N) > P_H$ 이면, RHP(n)은 실행 가능해가 존재하지 않는다. 부반송파의 집합 S 가 주어졌을 때 $\zeta(S)$ 을 구하는 최적화 해법은 참고문헌 Kim *et al.* (2008)에서 제시하였는데, 이에 대한 간단한 소개가 [별첨]에 주어졌다.

다음으로, RN(n)에 대한 문제를 생각해보자. n 번째 프레임에서 (통화호+신규호)를 대상으로 ROP(n)을 통한 할당 결과, 시스템 QoS 조건이 위배되어 신규호에 대한 호접속이 거절되는 경우이다. 이 경우 신규호를 제외하고 통화호만을 대상으로 하여 ROP(n)을 통해 전체 자원을 다시 할당하는 방법이 고려될 수 있다. 그러나 이 경우 단일 프레임 동안 두 번의 RO(n) 절차가 수행되어 자원할당 소요시간이 지나치게 증가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 신규호에 임시로 할당되었던 부반송파(들)의 전력량은 그대로 유지한 채, 이 부반송파들을 통화호에게 재할당하는 단순화된 RN(n)을 사용한다. 이 경우 RN(n)을 위한 최적화 모형은 부문제 (SP2)에 해당되므로, 이에 대한 해법은 앞에서 제시한 부문제 (SP2)의 해법을 그대로 사용한다.

4. 실험

제안된 CAC 방법의 유용성을 확인하기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다. 실험을 위한 셀은 원형(circular)으로 반경은 1000m 그리고 단일 프레임의 길이는 50ms로 가정한다. 동일한 사용자 전파환경이 반복되는 경우의 수를 줄이기 위해 실험에서 사용하는 프레임 길이를 현실 시스템(와이브로 또는 IEEE 802.16e)의 프레임 길이 5ms보다 크게 설정하였다. 사용자 QoS 수준에 따른 사용자 종류는 3가지로 구분하였으며 이들의 요구데이터율 및 구성비율은 <Table 1> 과 같다.

Table 1. User QoS classes and ratio

사용자 종류	요구데이터율(QoS) : kbps	구성비율(%)
종류 1	5	30%
종류 2	15	40%
종류 3	22.5	30%

한편, 시스템 및 전파환경에 관련된 파라메타는 <Table 2>와 같이 설정하였다.

Table 2. Parameters for system and radio propagation environment

부반송파의 수(N)	100개
대역폭	5MHz
주파수 대역	2,000MHz
총 가용전력(Pmax)	20Watt
경로손실(path loss 모형) : ITU-Veh.	37.6log10(d) + 16.62 (dB), d : 사용자와 기지국간 거리
음영손실(shadowing loss)	Lognormal : 파라메타 (σ) 8dB
빠른 페이딩(fast fading)	Jake 모형

사용자들의 속도는 하한이 5km이고 상한이 50km인 균등분포(즉, Uniform(5, 50))이고, 진행방향은 Uniform(0, 2π)에 따라 매 프레임이 시작되기 전에 갱신되고, 프레임 도중에는 변하지 않는다고 가정한다. 핸드오프 및 신규호의 도착은 각각 도착율이 $\lambda_h = 0.15/\text{sec}$ 와 $\lambda_n = 0.3/\text{sec}$ 인 포아송(Poisson)분포를 따르고, 통화시간은 핸드오프호와 신규호 모두 동일한 평균 통화시간 ($D = 150$ 초)을 갖는 지수분포 (exponential)를 따른다고 가정한다 (Hong and Rappaport, 1986). 핸드오프호는 셀 경계 (boundary) 지점에서 발생하고, 신규호는 셀 영역 내 임의의 지점에서 발생한다. 식 (13)에서 사용되는 상수 m 은 음이 아닌 임의의 값을 가질 수 있는데, m 의 값이 커질수록 사용자들의 전파환경 보다는 사용자의 요구데이터율에 의해 부반송파 할당이 이루어져 시스템 평균데이터율 저하를 야기시킬 수 있다. 그렇다고 지나치게 작은 값을 m 값으로 설정하면 요구데이터율을 만족시키지 못하는 사용자의 수가 증가하게 된다. 본 연구에서는 사전실험을 통해 이 같은 현상을 확인하고 $m = 0.5$ 으로 설정하였다.

위에서 제시된 시스템, 전파환경 그리고 트래픽 파라메타를 이용한 모의실험(simulation) 결과의 신뢰성 제고를 위해 다음과 같은 모의실험 환경을 설정하였다. 모의실험을 위한 초기 사용자의 수는 사용자 수 변동에 관련된 실험(<Figure 5>)을 제외하고는, 트래픽 혼잡도가 높은(즉, heavy traffic) 상황을 상정하여 50명으로 설정하였다. 초기 사용자들의 셀 영역 내 위치는 임의로 결정되고, 이들의 종류 역시 <Table 1>에 주어진 비율에 의해 임의로 결정하였다. 모의실험은 10,000프레임을 수행하며 처음 3000프레임이 경과한 후, 나머지 7000 프레임의 실행결과만을 유효한 것으로 하였다.

본 실험의 효용함수는 $U_i(\bar{r}_i[n]) = \ln(\bar{r}_i[n])$ 으로 하였다. 이 효용함수(PF)의 목적은 전파환경이 우수한(예를 들어 기지국에 근접한) 사용자에게 자원할당이 집중되는 것을 방지하고 가능한 자원할당의 기회를 공평하게 하기 위한 것으로, 이에 대비되는 자원할당 기준으로는 순간데이터율을 최대로 하는 최대 데

이터율(MAX, maximum throughput) 기준(즉, $U_i(r_i[n]) = r_i[n]$) 이 있다.

<Figure 3>은 PF 및 MAX 기준하의 자원할당 결과를 보여준다. <Figure 3>의 결과는 두 방식의 특성 비교를 분명히 보여주기 위해 핸드오프 및 신규호의 도착과 통화완료 없이 사용자의 수를 50명으로 고정하고, 사용자들의 위치 역시 변하지 않는다는 가정하에 얻어진 것이다(따라서 프레임 별 사용자간 전과환경(채널게인)의 변동은 오직 음영손실과 빠른 페이딩에만 기인한다). 또한 사용자 QoS 제약 역시 고려하지 않았다. 그리고 n 번째 프레임에서 이 두 방식의 성능비교를 위해 시스템 평균데이터율($TH(n)$)과 공평성 척도($F(n)$)는 다음과 같이 정의하였다. 아래에서 $\bar{r}_i(n)$ 은 사용자 i 에게 n 번째 프레임까지 자원할당이 이루어진 프레임의 비율을 의미한다.

$$TH(n) = \sum_{i \in K} \bar{r}_i(n), \quad F(n) = \frac{\sum_{i \in K} (\bar{r}_i(n) - \bar{\bar{r}}(n))^2}{|K|}$$

여기서, $\bar{r}_i(n) = \frac{\sum_{l=1}^n h_i(l)}{n}$,

$$h_i(l) = \begin{cases} 1 & \text{만약 프레임 } l \text{에 사용자 } i \text{가 자원할당을 받으면,} \\ 0 & \text{그렇지 않으면,} \end{cases}$$

$$\bar{\bar{r}}(n) = \frac{\sum_{i \in K} \bar{r}_i(n)}{|K|}$$

<Figure 3>에서 보듯이 MAX 기준하의 시스템 평균데이터율(MAX_TH(n))은 PF하의 그것(PF_TH(n))에 비해 매우 크지만, 이것은 공평성의 희생으로 이루어진 것임을 알 수 있다.

<Figure 4>는 PF 기준 하에서 사용자 종류별 사용자 QoS 제약이 반영되었을 때와 그렇지 않은 경우 공평성에 어떠한 영

향을 미치는가를 보여준다. <Figure 4>에서 사용자 QoS 조건을 제외한 다른 요소는 <Figure 3>과 동일 조건하에서 얻어진 것이고 n 번째 프레임에서 사용자 종류별 공평성 척도($Fc(n)$)은 동일 종류에 속한 사용자의 $\bar{r}_i(n)$ 을 모두 더하고 이를 해당 종류에 속한 사용자의 수로 나누어준 값이다. 즉, 특정 사용자 종류의 $Fc(n)$ 은 n 번째 프레임까지 해당 종류에 속한 사용자에게 부반송과 할당이 이루어진 프레임의 사용자당 평균비율을 나타낸다. 위에서 정의된 두 가지 공평성 척도 $F(n)$ 과 $Fc(n)$ 모두는 프레임에 대한 비율을 의미하는 것으로 할당된 부반송과에 대한 비율을 의미하지 않는다.

<Figure 4>에서 보듯이 요구데이터율에 대한 사용자 QoS 조건이 반영되는 않는 경우 사용자 종류별 공평성은 프레임이 진행됨에 따라 영향을 받지 않고 일정하게 유지되는 경향이 있다. 반면에 사용자 QoS가 반영되면, 프레임 진행초기에는 공평성보다는 QoS조건이 강력하게 작용하여 요구전송률이 높은 사용자((종류 3) > (종류 2) > (종류 1))에 대한 자원할당이 집중되고, QoS 조건이 어느 정도 만족되는 시점부터는 공평성을 회복하는 방향으로 진행됨을 확인할 수 있다. 즉, 프레임 진행 초기에는 요구전송률이 낮은 사용자들은 요구전송률이 높은 사용자들에 비해 부반송과를 할당 받지 못하는 프레임의 비율이 높아지게 되는데, 이는 부반송과 할당결정에 사용자 요구데이터율 조건이 주는 영향이 사용자의 순간데이터율 및 한계효용 가중계수($u_i[n]$) 값에 비해 크기 때문이다(식 (13) 참고). 일단, 사용자 요구데이터율 조건이 주는 영향이 완화되면 요구전송률이 낮은 사용자들에게 부반송과가 할당되는 프레임의 상대적 비율은 증가하게 된다. <Figure 4>에서 프레임이 일정기간 진행된 후 종류 1의 공평성 척도가 종류 2 또는 종류 3보다 크게 되는데, 이는 종류 2 또는 종류 3 사용자들의 평균 데이터율이 요구전송률 조건을 어느 정도 만족된 상태에 도달

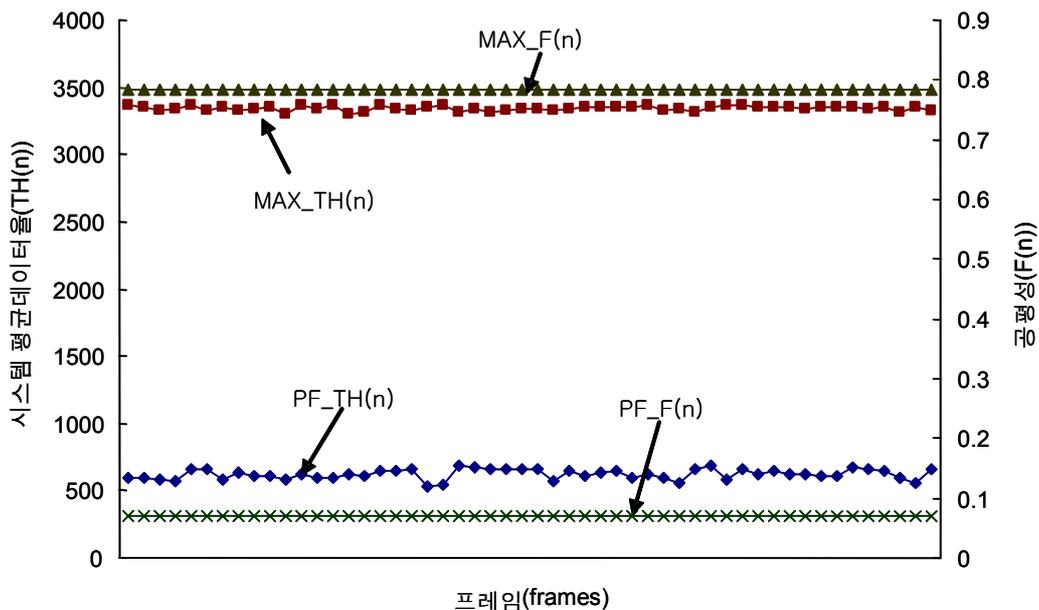


Figure 3. Comparisons of system average data rates and fairness between PF and MAX

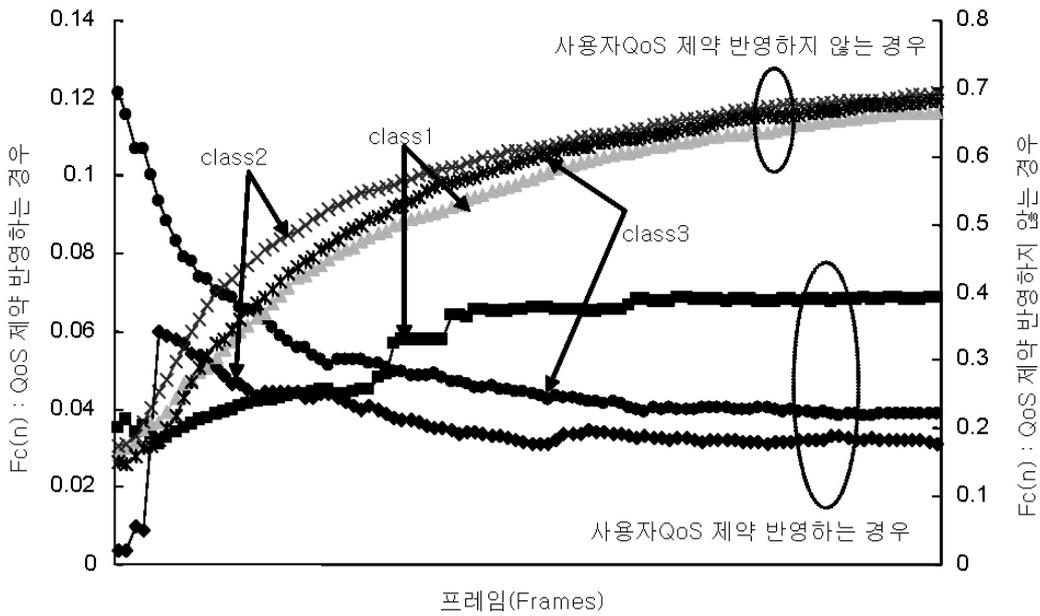


Figure 4. Fairness impact on user's QoS criteria

하여 요구데이터율 조건이 아니라 한계효용 가중계수 값과 순간데이터율에 의해 결정되고 있음을 보여준다. 물론 이러한 사실이 종류 1 사용자들에게 보다 많은 부반송파가 할당됨을 의미하지는 않는다. 종류 1에게 부반송파가 할당되는 프레임의 비율이 증가해도 종류 2 또는 종류 3 사용자들의 평균데이터율을 요구데이터율 이상으로 유지하기 위해서는 이들에게 할당되는 부반송파의 수는 평균적으로 종류 1 사용자에 비해 높게 유지된다.

<Figure 3>과 <Figure 4>으로부터 PF 기반 효용함수와 사용자 QoS 조건의 도입은 QoS의 차이와 사용자의 전파환경에 따른 공평성을 효과적으로 동시에 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

<Figure 5>는 셀 내 사용자 수에 대한 조건을 제외하고 <Figure 4>와 동일한 전제조건에서 셀 내 사용자 수에 따른 시스템 QoS의 변화행태를 보여 준다. n번째 프레임에서 시스템 QoS(Q(n))은 다음과 같이 정의된다.

$$Q(n) = \frac{\sum_{i \in K} 1_{\{\bar{r}_i(n) \geq R_i\}}}{|K|}$$

즉, Q(n)은 n번째 프레임까지 자신의 평균데이터율이 요구 데이터율 조건을 만족하는 사용자 수의 비율을 의미한다. <Figure 5>에서 보듯이, 시스템 내 사용자의 수가 증가할수록, Q(n)은 감소하는데 이는 유한한 전송자원(부반송파 및 전력)

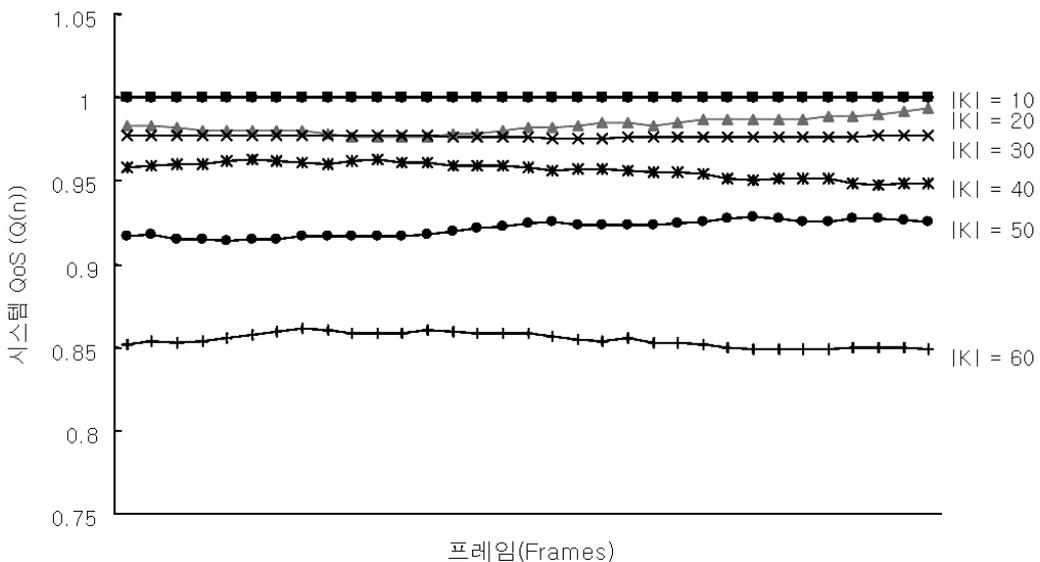


Figure 5. System QoS versus the number of users

을 공유하는 사용자 수가 증가할수록 사용자 각각에게 전송자원이 할당되는 기회가 작아지기 때문이다. 사실 $\lim_{n \rightarrow \infty} Q(n)$ (이를 $Q(\infty)$ 으로 표기)이 특정 값 이상이 되도록 하는 $|K|$ 값은 시스템용량(system capacity)로 해석할 수 있는데, 이에 대한 이론적 값을 유도하는 것은 매우 어렵다. <Figure 5>는 사용자의 위치변동이 없는 제한적인 전파환경 하에서 시스템 QoS를 90%로 설정하는 경우 시스템용량은 근사적으로 $|K| = 50$ 이 하 임을 시사한다.

<Figure 6> 사용자의 수는 $|K| = 50$ 로 고정하고, 사용자의 위치가 매 프레임마다 갱신되는 경우 시스템 평균데이터율($TH(n)$) 변화를 보여주고 있는데 사용자 위치가 고정되었던 앞서의 결과와 비교하여 시스템 평균데이터율의 변동성이 확대됨을 확인할 수 있다. 이는 채널이득에 경로손실의 변동성 효과가 추가 반영된 것으로 그 원인을 찾을 수 있다.

앞에서 살펴본 <Figure 3>~<Figure 6>은 핸드오프 및 신규호의 도착을 고려하지 않은 상황에서 본 연구의 자원할당 모형 ROP(n) 및 해법의 유용성에 대한 결과를 보여준 것이었다. 아래에서는 핸드오프호와 신규호의 도착 그리고 통화완료까지를 포함하는(즉, RH(n) 및 RN(n) 모두 고려) 상황에서 본 연구의 CAC 방식이 적용되는 경우 시스템성능에 대한 모의실험 결과이다. <Figure 7>~<Figure 11>의 결과는 50명의 사용자를 셀 영역에 임의로 위치시킨 후에 모의실험이 진행되며, 모의실험이 진행됨에 따라 핸드오프호 및 신규호의 도착 그리고 통화완료 등으로 셀 영역 내 사용자 수는 변동한다. 물론 셀 영역 내 사용자의 위치 역시 프레임 별로 달라질 수 있다. 도착하는 핸드오프호 및 신규호의 종류(사용자 QoS)는 <Table 1>에 주어진 비율에 따라 임의로 결정된다. <Figure 7>~<Figure 10>에서 핸드오프호에 우선하여 할당되는 전력의 양은 $P_H = 2$

watt로 설정한다.

제시된 CAC 방식에서 핸드오프호와 신규호의 접속제어에 가장 중요한 파라메타는 β 값이다. n 번째 프레임이 시작되기 전에 호 접속요청을 하는 핸드오프호 및 신규호는 $Q(n) < \beta$ 이면 호 접속요청이 거절되고, 그렇지 않은 경우 핸드오프호에 대한 호 접속은 허용되고 신규호의 경우에는 임시 자원할당 결과 $Q'(n) > \beta$ 이 유지되어야 접속이 허용된다. <Figure 7>은 β 값에 따라 시스템 평균데이터율 $TH(\infty)$ 및 시스템 QoS $Q(\infty)$ 값을 보여주는데, 이는 10,000프레임에 대한 모의실험이 완료된 후에 얻어진 값을 의미한다.

<Figure 7> (a)에서 보듯이, β 값이 상대적으로 작은 경우에는 전파환경이 열악한 (셀 경계에서 핸드오프가 발생하므로) 핸드오프호의 수락이 상대적으로 많아져 시스템 평균데이터율($TH(\infty)$)이 하락하는 요인으로 작용할 수 있음을 보여 준다. 반면, β 값이 상대적으로 큰 값으로 결정되면 대부분의 신규호 및 핸드오프호가 봉쇄되어 시스템 내 통화호의 수가 작아지게 되어 시스템 평균데이터율이 하락하게 된다. <Figure 7> (b)는 β 값에 따라 시스템 QoS 값($Q(\infty)$)의 값의 변화를 보여주는데, β 값이 커짐에 따라 새로운 호(핸드오프 호 또는 신규호)의 접속조건이 강화되어, 통화호의 QoS 향상이 시스템 QoS 향상으로 연결됨을 알 수 있다.

<Figure 8>은 $\beta = 0.9$ 일 때 프레임 진행에 따른 핸드오프호 및 신규호의 봉쇄확률을 보여주고 있는데, n 번째 프레임의 핸드오프호의 봉쇄확률($BH(n)$)과 신규호의 봉쇄확률($BN(n)$)은 다음과 같이 정의된다.

$$BH(n) = 1 - \frac{n\text{번째 프레임까지 접속이 허용된 핸드오프호의 수}}{n\text{번째 프레임까지 핸드오프 시도호 수}}$$

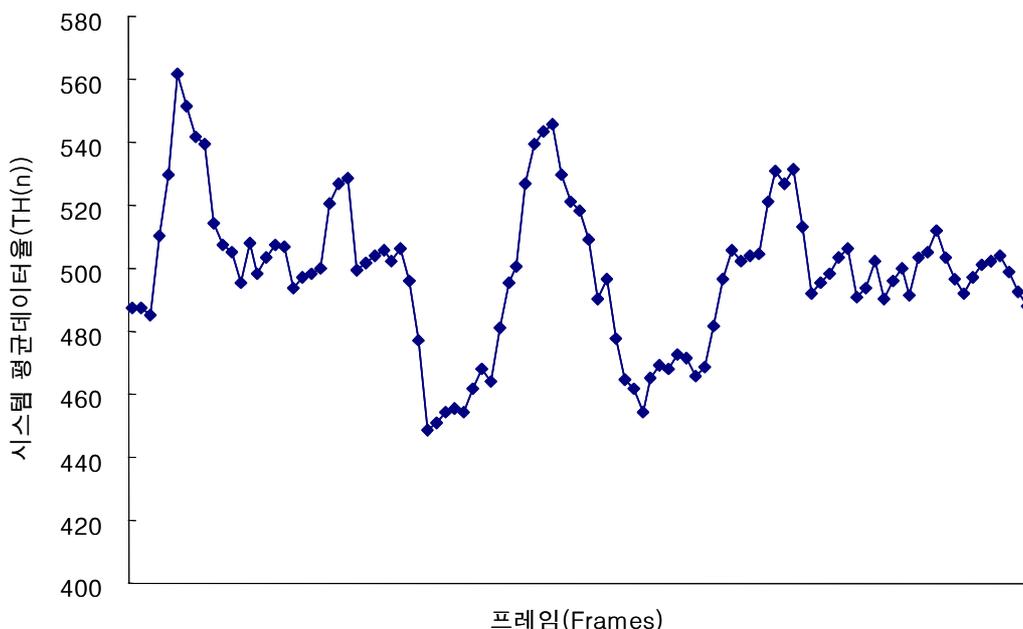


Figure 6. System average data rates when the users move

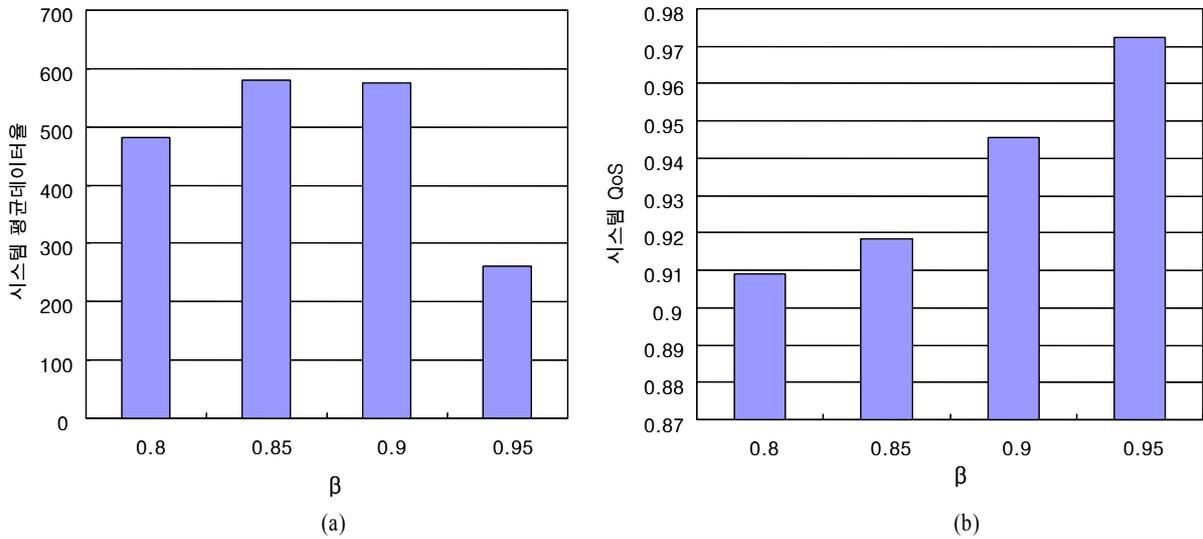


Figure 7. System average data rates and system QoS versus CAC parameter β

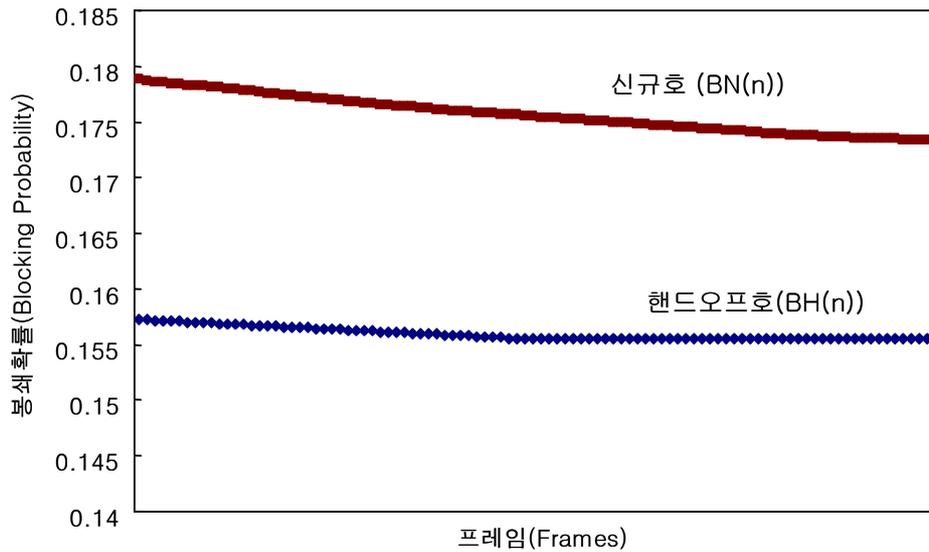


Figure 8. Blocking probabilities of handoff and new calls

$$BN(n) = 1 - \frac{n\text{번째 프레임까지 접속이 허용된 신규호의 수}}{n\text{번째 프레임까지 신규호 시도호 수}}$$

<Figure 9>는 호 접속 파라메타 β 값에 따른 $BH(\infty)$ 와 $BN(\infty)$ 을 보여준다. 그림에서 보듯이 β 값이 상대적으로 작은 경우와 높은 경우에 $BH(\infty)$ 와 $BN(\infty)$ 의 차이가 작아지는데, 값이 작은 경우 두 트래픽 모두 접속이 허용되고 β 값이 큰 경우 모두 봉쇄되는 경우가 많아지기 때문인 것으로 판단된다.

위 실험 결과로부터 시스템 평균데이터율, 시스템 QoS 그리고 핸드오프호 및 신규호의 봉쇄확률 등 시스템의 중요 성능척도들이 CAC 파라메타 β 값에 따라 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 시스템 엔지니어링 기준과 특정 트래픽 및 전파환경에 적합한 최적 β 값을 찾는 문제는 매우 중요한 이슈가 된다.

<Figure 10>은 $\beta = 0.9$ 인 경우 핸드오프호의 가용 전력량 (P_H) 변화에 따른 봉쇄확률을 보여준다. 그림에서 보듯이, P_H 가 증가함에 따라 핸드오프호의 봉쇄확률($BH(\infty)$)은 감소하고 신규호의 봉쇄확률($BN(\infty)$)은 증가하지만 일정 수준(그림에서 $P_H = 1$)을 넘어서는 전력할당은 핸드오프호의 봉쇄확률 감소에 별다른 효과가 없음을 보여준다.

마지막으로, <Figure 11>은 핸드오프호와 신규호의 도착율 비율은 2 : 1로 고정된 채, 전체 도착율의 변화에 따른 $BH(\infty)$ 및 $BN(\infty)$ 의 변화를 보여주고 있다($\beta = 0.9$).

5. 결론

본 연구에서는 OFDMA 이동통신시스템을 위한 새로운 호 접

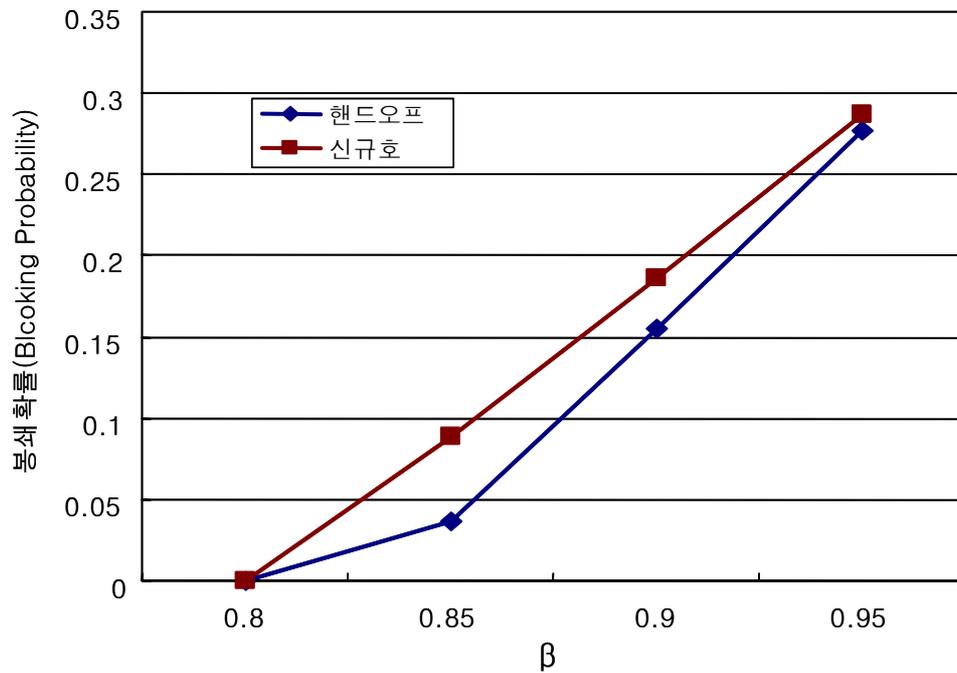


Figure 9. Blocking probabilities of handoff and new calls versus β

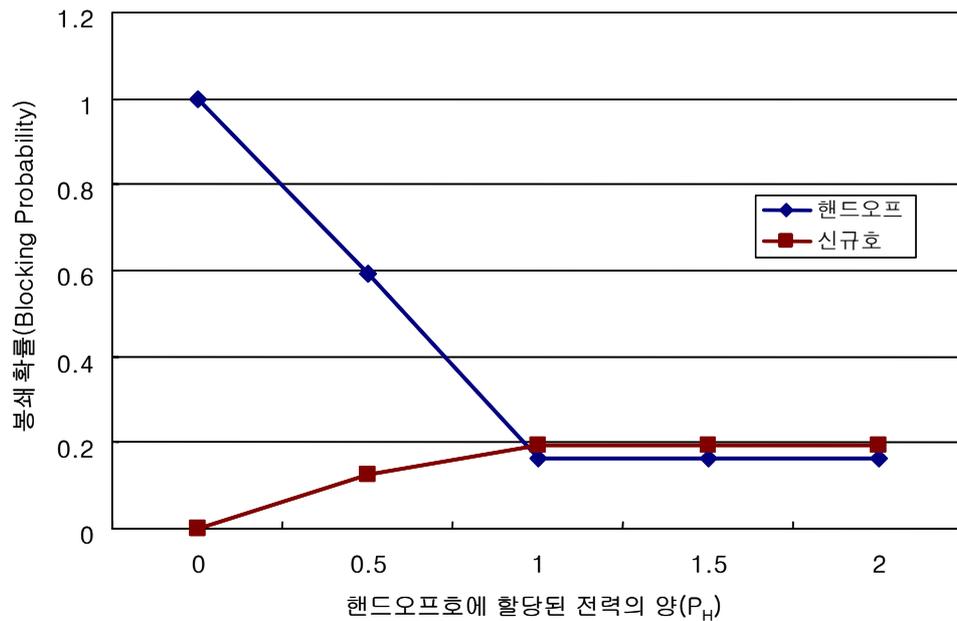


Figure 10. Blocking probabilities versus P_H

속제어(CAC) 방식을 제안하고, 이에 관련된 최적화 모형 및 해법을 제시하였다. OFDMA 시스템에서의 CAC는 부반송파 및 전력에 대한 자원할당 모듈과 밀접하게 연동되어 다른 다중접속 방식 하의 CAC에 비해 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 자원할당 모듈과 결합된 CAC에 대한 기존 연구가 매우 미진한 상태에서 이루어진 본 연구는 사용자 QoS의 차이 반영 그리고 핸드오프호에 대한 우선권 부여 등 현실 시스템의 CAC에 필요한 요구사항을 수용하고 있어 단순한 가정 하에서 연구된

다른 CAC에 비해 현실응용 가능성이 높을 것으로 판단된다. 본 연구와 관련하여 다음과 같은 사항에 대한 추가 연구가 필요하다. 먼저, 제시된 CAC의 효율적 운용에 필수적인 CAC 파라메타 (β)를 트래픽의 혼잡도에 따라 동태적으로 제어할 수 있는 모형 및 방법론에 대한 연구가 필요하다. 제시된 ROP(n) 해법에서 부반송파 할당 하위모듈의 성능은 상수 m 에 따라 영향을 받는 것으로 실험결과 나타났다. 시스템 평균데이터율 (throughput)과 사용자 QoS 조건과의 상관관계를 고려하여 상

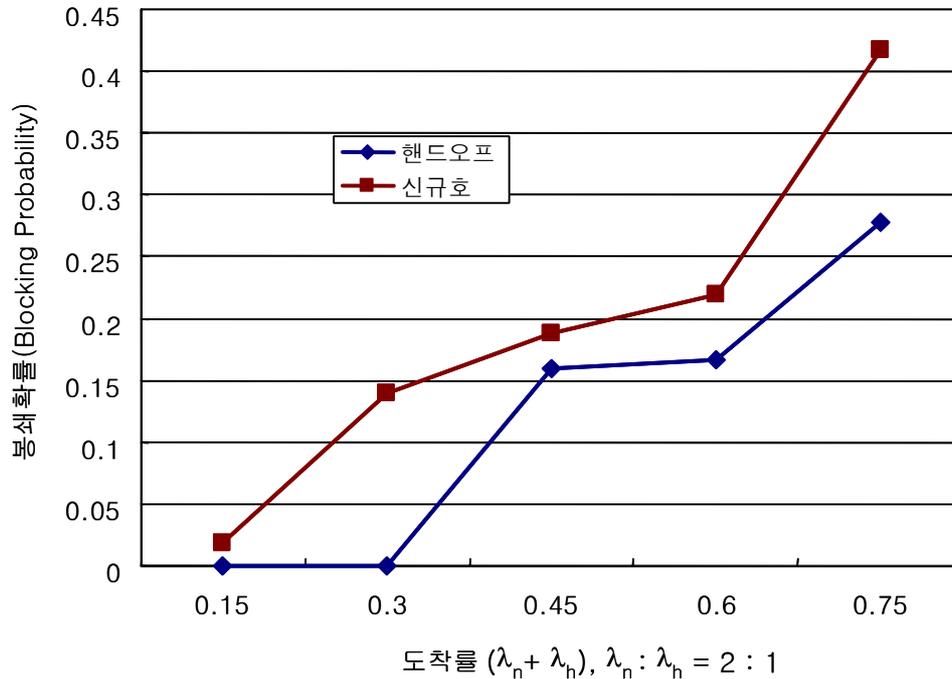


Figure 11. Blocking probabilities versus arrival rates of calls

수 m 을 체계적으로 결정할 수 있는 방안이 요구된다. 다음으로, 본 연구의 CAC 및 자원할당 모듈에서 사용하는 사용자 QoS는 평균데이터율만을 고려하고 있다. 그러나 현실에서는 지연(delay)에 역시 서비스 특성에 따라 QoS 범위에 포함되어야 하는 경우가 있다. 따라서 평균데이터율과 더불어 지연에 관련된 QoS조건을 반영한 모형에 대한 연구가 필요하다. 마지막으로 CAC는 실시간으로 이루어져야 하기 때문에 CAC에 포함된 하위모듈들의 이론적인 복잡성(complexity) 및 현실 활용(implementation) 시에 수반되는 실행시간에 대한 고찰이 필요하다.

<부 록>

가용 부반송파의 집합 S 가 주어진 경우 요구 데이터율(R)을 만족시키는 최소 전력량을 구하는 문제는 다음과 같이 정식화된다(Kim *et al.*, 2008).

$$\min \sum_{i \in S} f_i(x_i)$$

$$s.t. \sum_{i \in S} x_i = R, \quad (11)$$

$$x_i \geq 0, i \in S, \quad (12)$$

여기서 x_i 는 부반송파 i 에 의한 데이터율을 그리고 $f_i(x_i)$ 는 x_i 을 위해 요구되는 전력량을 의미한다. 즉, $f_i(x_i) = 1/\gamma_i(2^{x_i} - 1) = a_i(2^{x_i} - 1)$ 이다. 위 문제는 전통적인 convex programming 문제가 되어 KKK(Karush-Kuhn-Tucker)조건은 최적해를 위한

필요충분조건이 된다. Kim *et al.* (2008)은 KKK 조건으로부터 실행시간이 $O(|S| \log |S|)$ 인 다음과 같은 최적해법을 유도하였다.

Input : $a_i, i \in S$

Sort a_i in increasing order (let the indices of a_i be arranged so that $a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_{|S|}$ holds).

$k \leftarrow 1$;

while ($k \leq |S|$) do {

if $(R + \sum_{i=1}^k \log_2 a_i) / k - \log_2 a_k < 0$, then exit while;

$k \leftarrow k + 1$;

}

$A(k) \leftarrow (R + \sum_{i=1}^k \log_2 a_i) / k$

Output : $x_i^* = A(k) - \log_2 a_i, f_i(x_i^*) = 2^{A(k)} - a_i$, for $i = 1, 2, \dots, k$.

$x_i^* = 0, f_i(x_i^*) = 0$, for $i = k + 1, \dots, |S|$.

참고문헌

- Ali S. H. et al. (2007), Dynamic resource allocation in OFDMA wireless metropolitan area networks, *IEEE Wireless Communications, February*, 6-13.
- Assimakopoulos C. and Pavlidou F. N. (2006), New bit loading algorithms for DMT systems based on the greedy approach, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 6(8), 1047-1056.
- Badia M. Zorzi and Gazzini A. (2003), A model for threshold comparison call admission control in third generation cellular systems, *Proc. of IEEE ICC'03*, 3, 1664-1668.

- Chung Y.-J., Paik C.-H., and Kim H.-G. (2007), Resource allocation for multiuser OFDM systems, *J. of Korean Operations Research and Management Science Society*, **32**(3), 33-46.
- Epstein B. and Schwarz M. (2000), Predictive QoS-based admission control for multiclass traffic in cellular wireless networks, *IEEE JSAC*, vol. 18, pp. 523-534.
- Gross J. and Bohge M. (2006), Dynamic mechanisms in OFDM wireless systems : a survey on mathematical and system engineering contributions, *Technical University Berlin TKN Technical Report, TKN-06-001*.
- Hong D. and Rappaport S. S. (1986), Traffic model and performance analysis for cellular radio telephone systems with prioritized and non-prioritized handoff procedures, *IEEE Vehicular Technology, VT-35*(3), 77-92.
- Jeong S., et al. (2005), Adaptive connection admission control scheme for high data rate mobile networks, *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference*, September, 2607-2611.
- Kelly F., et al. (1998), Rate control in communication networks : shadow prices, proportional fairness and stability, *Journal of the Operational Research Society*, **49**, 237-252.
- Ki Y., et al. (2004), Downlink scheduling and resource management for best effort service in TDD-OFDMA cellular networks, Lecture notes in Computer Science, *LNC3 3260*, 316-329.
- Kim H.-G., et al. (2008), Computationally efficient bit-loading algorithms in multicarrier communication systems, submitted for publications.
- Kulkarni G., et al. (2005), Subcarrier allocation and bit loading algorithm for OFDMA-based wireless networks, *IEEE Trans. on Mobile Computing*, **4**(6), 652-662.
- Lee H. W. and Chong S. (2007), Downlink resource allocation in multi-carrier systems : frequency-selective vs. equal power allocation, *Proc. of IEEE World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 1-8.
- Liu H. and Li G. (2005), *OFDM-Based Broadband Wireless Networks*, John Wiley and Sons, Inc.
- Maniatis S. I., et al. (2003), QoS issues in the converged 3G wireless and wired networks, *IEEE Commun. Magazine*, 44-53.
- Mohanram C. and Bhashyam S. (2005), A sub-optimal joint subcarrier and power allocation algorithm for multiuser OFDM, *IEEE Communications Letters*, **9**(8), 685-687.
- Nguyen T.-D. and Han Y. (2006), A proportional fairness algorithm with QoS provision in downlink OFDMA systems, *IEEE Communications Letters*, **10**(11), 760-762.
- Niyato D. and Hossain E. (2005A), Connection admission control algorithm for OFDM wireless networks, *Proc. of IEEE Globecom*, 2455-2459.
- Niyato D. and Hossain E. (2005B), Call admission control for QoS provisioning in 4G wireless networks : Issues and Approaches, *IEEE Networks*, September/October, 5-11.
- Paik C.-H. (2007), Analytic capacity and performance models for CDMA mobile communication systems with multiple carriers, *J. of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **33**(1), 126-137.
- Papandreou N. and Antonakopoulos T. (2008), Bit and power allocation in constrained multicarrier systems : the single-user case, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, **2008**, 1-14.
- Qin C., et al. (2007), Power reservation-based admission control scheme for IEEE 802.16e OFDMA systems, *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1831-1835.
- Rong B., Qian Y., and Lu K. (2007), Integrated downlink resource management for multiservice WiMAX networks, *IEEE Trans. on Mobile Computing*, **6**(6), 621-632.
- Sohn K. H., et al. (2006), Adaptive admission control algorithm for multiuser OFDMA wireless networks, *Proc. of 25th IEEE International Conference on Computer Communications(INFORCOM)*, 1-3.
- Song G. and Li Y. (2005), Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-Part I : Theoretical framework, *IEEE Trans. Wireless Communications*, **4**(2), 614-624.