

핸드오프호를 고려한 OFDMA 무선통신시스템의 확률적 트래픽모형*

백 천 현**†

Queueing Traffic Model of Giving a Priority to Handoff Calls in OFDMA Wireless Communication Systems

Chun-hyun Paik**

■ Abstract ■

OFDMA systems have been expected to be widely used to provide multimedia services over wireless channels. To evaluate performance of the OFDMA system, power should be considered as system resource as well as subcarriers. This study propose a queueing traffic model incorporating two kinds of resources (power and subcarriers), and an extended model giving a priority to handoff calls over new calls. Some extensive experiments are conducted to illustrate the usefulness of the proposed traffic model.

Keyword : OFDMA, Traffic Model, Blocking Probabilities, Multi-Class Multi-Resource Loss Model

1. 서 론

광대역 무선시스템(BWA, Broadband Wireless

System)은 이동성(mobility)을 보장하면서 다양한 멀티미디어 광대역 서비스의 제공을 목적으로 하는 차세대 무선시스템이다. 최근 국내외에서 서비스 중인

논문접수일 : 2011년 04월 25일 논문게재확정일 : 2011년 06월 22일

논문수정일(1차 : 2011년 06월 20일)

* 이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단(현, 한국연구재단)의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-327-B00168).

** 동의대학교 산업경영공학과

† 교신저자

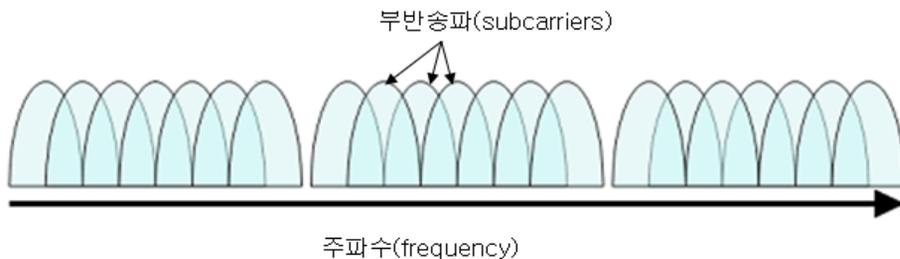
와이브로(wibro) 시스템의 기반기술인 IEEE 802.16e (또는 이를 WiMax라고 함)와 유선시스템에 비견되는 전송속도 구현을 목적으로 개발 중에 있는 4세대 (4G) 이동통신시스템 역시 BWA 시스템에 해당된다. BWA 시스템의 가장 중요한 기술적 특징 중 하나는 유한한 무선자원(radio resource)을 이용해 고속의 전송속도를 구현하는 것이다. 이러한 BWA 시스템의 목적을 가능케 하는 전송기술 중 하나가 OFDMA(orthogonal frequency division multiple-access) 기술이다. OFDMA에서는 주어진 주파수대역을 상호직교성(orthogonality)이 유지되도록 수백 개의 부반송파(subcarriers)로 나누고, 사용자(또는 호) 특성에 맞게 부반송파(또는 이들의 묶음)를 사용자별로 할당한다[10].

시스템(또는 셀)에 할당되는 자원(resource)으로 부반송파 그리고 전력(power)이 함께 고려되는 OFDMA 무선시스템은 무선자원으로서 채널(반송파, carrier)만이 고려되는 FDMA(TDMA)과 전력만이 무선자원으로 여겨지는 CDMA 시스템과는 뚜렷이 구분된다. 그리고 FDMA(TDMA)에서는 하나의 호에 한 개의 채널만이 할당되는 것에 반해 OFDMA에서는 복수개의 부반송파가 할당될 수 있다는 점도 OFDMA의 중요한 특징이다. 따라서 기존방식(FDMA, TDMA, CDMA)에서 적용되어 왔던 트래픽 모형은 더 이상 OFDMA 시스템에 적용될 수 없어, OFDMA 특성에 부합되는 새로운 트래픽 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. (무선)통신시스템에서 트래픽모형은 트래픽 엔지니어링(성능 및 용량분석)과 더불어 시스템 운용 파라메타 설계, 호접속제어(call admission control) 등에 기반이 된다.

경쟁과학 분야에서 수행되는 OFDMA 시스템에 관한 연구 주제는 사실상 “부반송파할당(subcarrier assignments)” 및 “부반송파별 전력할당(power assignments per subcarrier)” 분야에 집중되어 있다 [2, 4, 11, 17, 18]. 이 분야는 특정시점(snapshot)에서 시스템에 있는 사용자(호)의 전파환경과 QoS(Quality of Service)를 고려하여 어떤 사용자에게 어떤 부반송파를 할당하며 할당되는 부반송파에게 얼마의 전력을 할당할지를 결정하는 문제를 최적화문제로 정립하고 이에 대한 해법을 연구한다. 이를 위해 시스템에 있는 호의 특성 및 수는 이미 주어진 것으로 가정하는 정태적(deterministic) 환경을 전제하고 있어, 트래픽의 동태적(또는 확률적) 특성은 반영되어 있지 않다.

정보통신 시스템에서 트래픽엔지니어링은 일정한 양의 트래픽을 처리하기 위해 필요한 시스템자원의 규모를 결정하는 과정을 의미한다. 따라서 OFDMA 시스템에서 트래픽엔지니어링은 “동태적(확률적) 트래픽 환경 하에서, 시스템 QoS(예 : 호의 봉쇄확률(blocking probability)를 만족시키기 위해 요구되는 부반송파의 수(또는 전력의 양)는?”에 대한 답을 줄 수 있는 방법론(절차)라고 할 수 있다. 그런데 이 질문에 대한 답을 구하기 위해서는 동태적 트래픽 하에서 시스템 QoS를 구할 수 있는 적합한 트래픽 모형이 있어야 한다.

FDMA(TDMA) 시스템에서는 물리적인 채널자원이 확정적으로 주어지고 트래픽과 채널자원 간의 관계가 단순히 관련된 해석적(analytical) 확률모형의



[그림 1] OFDMA 시스템에서 부반송파

유도가 비교적 용이하였다[9]. 시스템 용량이 물리적 채널수 보다는 인접 및 자기 셀에서 발생하는 신호간섭 양에 의해 좌우되는 CDMA 방식 하에서는 요구부하(offered load)와 함께 호의 지리적 분포로 인한 신호간섭 양의 동태적 특성으로 인해 트래픽 모형이 FDMA(TDMA) 방식에 비해 비교적 복잡한 구조를 가지게 된다. 호의 지리적 분포에 따른 전파환경의 변동성을 얼마나 자세히 확률적으로 표현하느냐에 따라 다양한 모형이 존재하고 그들의 복잡성이 좌우된다[1, 3, 7].

문헌조사에 따르면, OFDMA 시스템에 관련된 대부분의 연구는 부반송파 및 전력할당에 집중되어 있고, OFDMA 시스템에 대한 확률적 트래픽 모형은 최근에 발표된 연구[5, 14, 19]만이 존재한다. 문헌[5]에서 제시하는 트래픽모형은 호가 요구하는 부반송파의 수가 동시에 복수 개일 수 있는 사실을 반영하기 위해 batch arrival이 있는 대기행렬 시스템에 기반하고 있다. 이 연구는 OFDMA 특성을 일부 반영하고 있는 초기연구로서 의의가 있지만 다음과 같은 한계를 가지고 있다. 첫째, 셀 내 모든 호의 전파환경을 동일하게 가정하고 있다. 셀 내 호의 위치의 차이는 전파전파(radio propagation) 특성에 차이를 유발하고 이는 다시 특정 데이터 전송률을 위한 요구전력의 차이를 가져오게 된다. 즉, Chen and Chen[5]의 연구는 OFDMA 시스템의 자원 중 부반송파만을 반영하고 있고 또 다른 자원 요소인 전력을 반영하고 있지 못하다. 둘째, 이 연구에서는 하나의 호에 할당된 복수개 부반송파의 점유시간을 독립적으로 설정하고 있다. 이는 특정 호에 의해 점유된 부반송파의 경우 해당 호의 통화가 완료되면 동시에 비점유상태(release)가 되는 현실을 무시한 것이다.

문헌[3]에서 제시된 모형의 이 같은 두 번째 한계를 지적하고 이를 해결할 수 있는 트래픽모형이 Pla et al.[14]에서 제시되었다. 한편, 문헌[19]에서는 OFDMA 시스템의 호점속제어를 위해 광대역(wide-band) 및 협대역(narrow-band) 두 종류의 트래픽만을 상정한 트래픽모형을 제시하였다. 하지만 문

헌[3, 19]에서 제시된 트래픽 모형 모두는 앞서 지적한 Chen and Chen 모형[3]과 같이 부반송파 자원만이 고려되고 전력자원이 고려되지 못한 한계를 가지고 있다. 최근에 연구[13]에서는 부반송파 뿐만 아니라 전력이 함께 고려된 트래픽모형을 제시하였다. 그러나 연구의 초점을 문헌[14]에서 제시된 모형과의 비교에 두어 제시된 모형의 특성이 제시되지 않았고 특히 이동통신 시스템을 위한 트래픽모형에서 매우 중요시 되는 핸드오프호에 대한 우선순위가 트래픽모형에 반영되지 않았다.

본 연구에서는 문헌[13]에서 제시된 트래픽모형에서 셀 내에서 호의 지리적 위치 차이로 인한 전력사용의 차이를 반영하는 절차를 구체화하고 트래픽모형의 파라메타에 따른 시스템 성능에 대한 영향을 분석한다. 또한 핸드오프호에 대한 우선순위를 부여할 수 있는 일반화된 트래픽모형 제시하고 관련 파라메타에 대한 시스템 성능에 대한 영향을 심도있는 실험을 통해 분석한다.

2. 시스템 모형

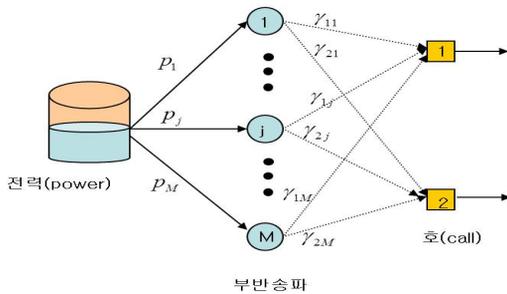
본 연구는 OFDMA 기반 셀룰러 시스템에서 특정 셀의 하향링크(downlink)만을 대상으로 한다. 셀의 형태는 원형(circular)이며 기지국(base station)의 위치는 셀 중앙에 위치한다고 가정한다. 셀에 할당된 부반송파의 수는 M 개이며, 기지국에서 할당 가능한 가용 전력량은 P (watt) 그리고 각 부반송파의 평균 전송속도는 R (bps)로 일정하다고 가정한다. 현실에서 각 부반송파의 전송속도는 기지국과 호(또는 사용자)간의 전파전파 특성에 따라 달라지며 이는 매우 짧은(프레임)시간 마다 변할 수 있다. 그러나 확률적 모형에서 이러한 특성을 그대로 반영하기 어려운 상황을 감안하여 기존의 다른 연구[5, 14, 19]에서와 같이 본연구도 부반송파의 평균 전송속도는 일정하다고 가정하였다.

부반송파 j 가 호 i 에 할당될 때, 부반송파 j 에 의해 전송될 수 있는 이론적인 데이터전송률(bits)(r_{ij})은 다음과 같다(Shannon's capacity)[10, 17] :

$$r_{ij} = \Delta f \cdot \lfloor \log_2(1 + \gamma_{ij} p_j) \rfloor \quad (1)$$

여기서 Δf 는 부반송파의 대역폭

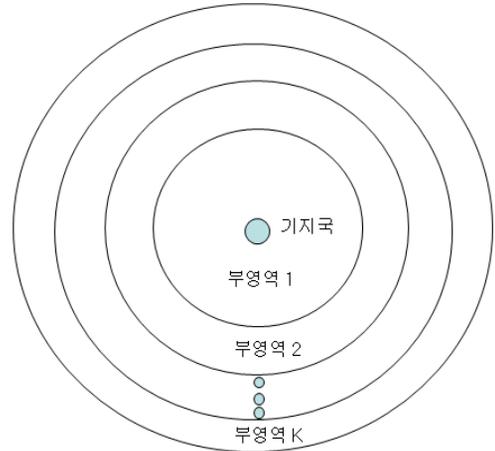
식 (1)에서 γ_{ij} 는 호 i 와 부반송파 j 간 채널게인(channel gain)을 그리고 p_j 는 부반송파 j 에 할당된 전력의 양을 나타낸다. 결국, 각 부반송파가 실어 나를 수 있는 비트의 수는 γ_{ij} 로 대표되는 전파환경과 부반송파에 할당된 전력양에 의해 결정됨을 알 수 있다([그림 2]).



[그림 2] OFDMA 시스템에서 자원할당과 데이터전송률

채널게인은 각 사용자에게 할당된 반송파별로 상이하며 사용자의 위치 이동, 전파환경 등의 변화에 따라 수시로 변하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 해석적인 확률적 트래픽 모형개발을 위해 다음과 같은 가정을 도입한다: 셀 내에 위치한(평균적인) 채널게인 패턴(pattern)은 K 개가 존재하며, 각 호의 채널게인 패턴은 호의 발생시점(generation epoch)에서 결정되고 이 때 결정된 채널게인 패턴은 호 완료시점까지 변하지 않는다. [그림 3]은 전체 셀 영역을 K 개의 부영역(subarea)으로 구분하고 있는데, 부영역 k 에서 발생한 호들의 채널게인은 모두 동일하다고 가정하고, 이를 채널게인 패턴 k 라고 부른다. $q_k (k=1, \dots, K)$ 는 채널게인 패턴 k 를 가진 호에 할당되는 단일 부반송파의 전송속도가 R 이 되기 위해 요구되는 전력의 양을 나타낸다. q_k 는 식 (1)에 의한 이론적인 값으로 결정된다고 가정한다. 일반적으로, 기지국으로부터 거리가 멀어질수록 신호감쇄

가 증가되므로 $q_1 \leq q_2 \leq \dots \leq q_K$.



[그림 3] 호 발생지점에 따른 채널게인 패턴

BWA 시스템에서는 각기 서로 다른 전송속도를 요구하는 멀티미디어 서비스를 지원한다. 호가 요구하는 전송속도의 종류로는 L 개가 존재하고, 종류 $l (l=1, \dots, L)$ 의 전송속도는 $b_l R$ 이라고 하자. 전송속도 종류 l 을 요구하는 호 접속을 위해서는 b_l 개의 부반송파가 동시에 할당되어야 하고, 호완료(call completion) 시점에 b_l 개의 부반송파가 동시에 비점유상태가 된다. 만약 호접속 시도(call attempt) 시점에 요구되는 수만큼 부반송파 할당이 불가능 한 경우 해당 호는 봉쇄(blocking)된다.

3. 트래픽모형

K 개의 채널게인 패턴과 L 개의 전송속도 종류를 감안할 때, 셀에 도착하는(호접속을 요구하는) 호의 종류의 수는 $K \cdot L$ 개가 된다. 일단, 신규호와 핸드오프호의 구분은 없다고 하자. 채널게인 패턴이 k 이고 전송속도의 종류가 l 인 호의 종류를 (k, l) 이라고 부르기로 한다. 종류 (k, l) 의 호접속을 위해서는 $p_{kl} = q_k \cdot b_l$ 만큼의 전력이 요구되므로 호 접속 요구 시 기지국의 가용 전력이 p_{kl} 미만인 경우 해당 호는 봉쇄된다. 한편, 종류 (k, l) 호의 셀 도착은 도착

율이 λ_{kl} 인 서로 독립적인 포아송과정(Poisson process)을 따르며, 호 종류와 무관하게 모든 호의 통화 시간은 평균이 $1/\mu$ 인 일반분포(general distribution)를 따른다고 하자.

n_{kl} 를 안정상태(steady-state)에서 셀에 있는 종류 (k, l) 호의 수라고 하자. 그러면 셀 내에 있는 호의 수에 대한 대기행렬모형(queueing model)은 소위 multi-class multi-resource loss 모형이 되어, 상태변수 $\mathbf{n} \equiv (n_{kl}, k=1, \dots, K, l=1, \dots, L)$ 는 아래와 같은 승수곱(product form) 형태의 안정상태 확률분포를 가진다[6, 13, 15].

$$\pi(\mathbf{n}) = G(P, M)^{-1} \prod_{k,l} \frac{\rho_{kl}^{n_{kl}}}{n_{kl}!}, \quad \text{여기서 } \rho_{kl} = \lambda_{kl}/\mu, \quad (2)$$

$$G(P, M) = \sum_{\mathbf{n} \in S(P, M)} \prod_{k,l} \frac{\rho_{kl}^{n_{kl}}}{n_{kl}!}, \quad (3)$$

$$S(P, M) = \left\{ \mathbf{n} = (n_{kl}) \mid \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L b_l n_{kl} \leq M, \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p_{kl} n_{kl} \leq P, n_{kl} \geq 0 \right\} \quad (4)$$

식 (2)~(4)에 주어진 승수형태의 안정상태 확률이 성립하기 위해서는 b_l, M, p_{kl} 그리고 P 가 정수 값이어야 한다[6, 15]. 그런데 b_l 와 M 은 일반적으로 정수 값으로 주어지지만 p_{kl} 와 P 는 정수가 아닌 값을 가질 수 있다. 여기서는 p_{kl} 와 P 는 모두 유리수(rational number)라고 가정한다. 이 경우 식 (4)에 주어진 식 $\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p_{kl} n_{kl} \leq P$ 은 양변에 적당한 상수(constant)를 곱하여 동일한 의미의 식($\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p'_{kl} n_{kl} \leq P'$, 여기서 p'_{kl} 와 P' 는 정수)으로 변환될 수 있다[6]. 따라서 본 연구에서 별도의 언급이 없는 한 p_{kl} 와 P 는 정수라고 가정한다.

식 (2)~(4)에서 보듯이, 성능척도(봉쇄확률(blocking probability) 및 자원의 사용효율(utilization)을 구하기 위해서는 정규화상수($G(\cdot)$)(normalization constant)를 계산해야 한다. 참고문헌[15]에서

제시된 몇 가지 알고리즘 중 본 연구에서 이용한 소위 정규화상수 알고리즘을 본 연구의 내용 및 기호로 맞추어 표현한 것을 아래에서 소개한다.

[정규화상수 알고리즘]

(아래에서 $k_1 < 0$ 또는 $k_2 < 0$ 이면 $G(k_1, k_2) = 0$)

[단계 1] 초기화 $G(0, 0) = 1$.

[단계 2] For $(0, 0) \leq (k_1, k_2) < (P, M)$:

 Compute

$$G(k_1 + 1, k_2) = G(k_1, k_2)$$

$$+ \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{\rho_{kl} p_{kl}}{k_1 + 1} \left\{ G(k_1 + 1 - p_{kl}, k_2 - b_l) - G(k_1 - b_l, k_2 - p_{kl}) \right\}$$

$$G(k_1, k_2 + 1) = G(k_1, k_2)$$

$$+ \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{\rho_{kl} b_l}{k_2 + 1} \left\{ G(k_1 - p_{kl}, k_2 + 1 - b_l) - G(k_1 - b_l, k_2 - p_{kl}) \right\}$$

일단, 정규화상수가 계산되면, 종류 (k, l) 호의 봉쇄 확률 $B(k, l)$ 은 다음과 같다.

$$B(k, l) = 1 - \frac{G(P - p_{kl}, M - b_l)}{G(P, M)}, \quad (5)$$

$$k = 1, \dots, K, l = 1, \dots, L$$

그리고 시스템 전체의 봉쇄확률(BP)과 데이터 전송율(TH)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$BP = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L B(k, l) \lambda_{kl}}{\Lambda}, \quad \text{여기서 } \Lambda = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \lambda_{kl} \quad (6)$$

$$TH = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \lambda_{kl} (1 - B(k, l)). \quad (7)$$

한편, 부반송과 사용효율(utilization) SU 와 전력 자원 사용효율 PU 는 아래와 같다.

$$SU = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L Q(k, l) b_l}{M}, \quad (8)$$

$$PU = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L Q(k, l) p_{kl} b_l}{P}. \quad (9)$$

위에서, $Q(k, l)$ 은 시스템에 있는 종류(k, l) 호의 평균수를 의미한다.

정리 1 : 호 종류별 봉쇄확률은 다음과 같은 성질을 만족한다.

- (a) $B(k_1, l) \geq B(k_2, l)$, 만약 $k_1 \geq k_2, l=1, 2, \dots, L$.
- (b) $B(k, l_1) \geq B(k, l_2)$, 만약 $l_1 \geq l_2, k=1, 2, \dots, K$.

증명) 먼저, (a)의 경우를 살펴본다. 식 (3)에서 만약 $k_1 \geq k_2, l=1, 2, \dots, L$ 이면, $p_{k_1} \geq p_{k_2}$ 이기 때문에 $G(P-p_{k_1}, M-b_l) \leq G(P-p_{k_2}, M-b_l)$ 이 된다. 따라서 식 (5)에 의해 $B(k_1, l) \geq B(k_2, l)$ 이 만족한다. (b)의 경우도 비슷한 방법으로 증명될 수 있다.

정리 1은 동일한 전송속도(채널게인 또는 전력)를 요구하는 호의 경우 요구하는 전력량(전송속도가) 커질수록 봉쇄확률은 증가하는 성질을 의미한다.

위에서 소개된 트래픽모형은 신규호와 핸드오프호의 구분이 없어 핸드오프호에 대한 보호방안이 모형에 반영되지 않는 경우이다. 아래에서는 호를 신규호(new call)와 핸드오프호(handoff call)로 구분하고 핸드오프호에 대한 보호방안이 반영된 트래픽모형을 제시한다. 핸드오프호는 인접셀에서 통화를 유지한 채 현재셀(current cell)로 이동하는 호로서, 현재셀에서 통화를 시작하는 신규호에 대해 자원할당에 우선순위가 부여되어 핸드오프호의 봉쇄확률을 신규호의 그것에 비해 낮게 유지하는 것이 일반적이다[2, 9].

핸드오프호는 셀경계(cell boundary)에서 발생하므로, 핸드오프호는 [그림 3]에서 가장 셀 가장자리에 해당되는 부영역 K 에서 발생한다고 하자. 그리고 $M_1 (\leq M)$ 개의 가상(virtual) 부반송파와 $P_1 (\leq P)$ (watt)의 가상 전력 등 2종류의 가상자원이 존재한다고 하자. 따라서 시스템에서 호접속을 위한 자원의 종류는 실제자원과 가상자원을 포함하여 4가지 종류의 자원이 존재한다. 호 종류(k, l)(만약, $k=K$ 이

면 이는 핸드오프호를 그렇지 않으면 신규호를 의미)의 가상 부반송파에 대한 요구량(b_l^v)는 다음과 같이 설정한다.

$$b_l^v = \begin{cases} b_l, & \text{if } (k, l) \text{에서 } k \neq K, \\ 0, & \text{if } (k, l) \text{에서 } k = K. \end{cases} \quad (10)$$

즉, 신규호의 경우에는 실제 부반송파의 수만큼을 가상 부반송파 자원과 함께 요구하는 반면, 핸드오프호는 가상 부반송파 자원은 요구하지 않는다. 이에 따라 호 종류(k, l)이 요구하는 가상 전력자원의 양(p_{kl}^v)은 다음과 같이 결정된다. 이 때, p_{kl}^v 는 정수값을 가진다고 가정한다.

$$p_{kl}^v = \begin{cases} p_{kl}, & \text{if } (k, l) \text{에서 } k \neq K, \\ 0, & \text{if } (k, l) \text{에서 } k = K. \end{cases} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에서와 같이 가상자원에 대한 호의 자원 요구량이 설정되면 $(M-M_1)$ 만큼의 실제 부반송파 자원과 $(P-P_1)$ 만큼의 실제 전력 자원은 핸드오프호만이 독점적으로 사용할 수 있게 된다. 이와 같이 핸드오프를 고려한 확장모형은 가상자원의 도입에 따른 자원종류 및 핸드오프호를 구분하기 위한 호 종류가 증가될 뿐, 기본적으로 앞에서 소개된 multi-class multi-resource loss 모형이 되기 때문에, 앞에서 주어진 정규화 알고리즘이 이용될 수 있다. 이 때 상태공간(state space)과 정규화 상수는 아래와 같다.

$$S(P, P_1, M, M_1) \quad (12)$$

$$= \left\{ \mathbf{n} = (n_{kl}) \mid \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L b_l n_{kl} \leq M, \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L b_l^v n_{kl} \leq M_1, \right. \\ \left. \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p_{kl} n_{kl} \leq P, \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p_{kl}^v n_{kl} \leq P_1, \right. \\ \left. n_{kl} \geq 0 \right\}$$

$$G(P, P_1, M, M_1) = \sum_{\mathbf{n} \in S(P, P_1, M, M_1)} \prod_{k,l} \frac{P_{kl}^{n_{kl}}}{n_{kl}!}. \quad (13)$$

참고로, $M=M_1$ 이고, $P=P_1$ 이면, 상태공간 식 (12)는 식 (4)와 같게 된다.

호 종류(k, l)의 봉쇄확률 및 신규호(BP_n) 및 핸드오프호(BP_h)의 봉쇄확률은 아래와 같다.

$$B(k, l) = 1 - \frac{G(P - p_{kl}, P_1 - p_{kl}^v, M - b_l, M_1 - b_l^v)}{G(P, P_1, M, M_1)}, \quad (14)$$

$$k = 1, \dots, K, \quad l = 1, \dots, L.$$

$$BP_n = \frac{\sum_{k=1}^{K-1} \sum_{l=1}^L B(k, l) \lambda_{kl}}{\sum_{k=1}^{K-1} \sum_{l=1}^L \lambda_{kl}}, \quad BP_h = \frac{\sum_{l=1}^L B(K, l) \lambda_{kl}}{\sum_{l=1}^L \lambda_{kl}}. \quad (15)$$

정리 2 : 가상 부반송파의 수가 x 개이고 가상 전력의 양이 y 일 때, 신규호의 봉쇄확률을 $BP_n(M, x, P, y)$ 으로 그리고 핸드오프호의 봉쇄확률을 $BP_h(M, x, P, y)$ 으로 표시하면, 가상자원의 양에 따른 신규호와 핸드오프호의 봉쇄확률은 다음의 성질을 만족한다.

- (a) $BP_n(M, x_1, P, y_1) \leq BP_n(M, x_2, P, y_2)$,
만약, $x_2 \leq x_1, y_2 \leq y_1$,
여기서 $x_1, x_2 \leq M, y_1, y_2 \leq P$
- (b) $BP_h(M, x_1, P, y_1) \geq BP_h(M, x_2, P, y_2)$,
만약, $x_2 \leq x_1, y_2 \leq y_1$,
여기서 $x_1, x_2 \leq M, y_1, y_2 \leq P$

증명) 가상 부반송파 자원 또는 가상 전력량이 감소함에 따라 핸드오프호가 독점하는 실질 부반송파 및 전력자원의 양은 증가한다. 따라서 이 때의 신규호의 봉쇄확률은 증가하고 핸드오프호의 봉쇄확률은 감소한다.

셀 주변지역에서 발생하는 핸드오프호의 평균적인 채널계인은 셀 전체 영역에서 발생하는 신규호의 그것에 비해 불리한 것이 일반적이다(즉, 동일 데이터 전송률에 보다 많은 전력일 필요). 정리 2는 가상자원의 감소에 따른 신규호 및 핸드오프호의 봉쇄확률의 변화방향을 보여주는 것으로 가상자원의 양을 적절히 설정함으로써 신규호의 희생으로 핸드오프호의 봉쇄확률을 감소시킬 수 있음을 보여준

다. 그러나 가상자원이 도입으로 핸드오프호의 봉쇄확률의 감소는 보장되지만 신규호의 봉쇄확률 보다 무조건 작게 되는 것을 보장하지 않는 것에 유의한다.

4. 실험 결과

본 연구에서 제시된 트래픽모형의 유용성 확인을 위한 실험에는 다음과 같은 가정들을 도입하였다. 먼저, 원형 모양의 OFDMA 기반 셀룰러 시스템(기지국)에 할당된 가용전력은 $P=1$ watt이고, 전체 5MHz 대역폭이 32(즉, $M=32$)개의 부반송파로 나누어졌다고 하자. 그리고 각 부반송파의 전송속도는 $R=329.5$ kbps. 전송속도 요구에 따른 호의 종류는 3개로($L=3$)로 설정하였다($b_1=1, b_2=2, b_3=5$). 셀 전체 영역은 3개의 부영역으로 구분되며($K=3$)(따라서 전송속도 요구 및 호 발생지역에 따라 모두 9개($LK=9$)의 호 종류가 있게 된다), 부영역별 단위전력 당 SNR(단위 dB) 값은 각각 15, 12 그리고 10으로 정하였다. 부영역 1은 기지국에서 가장 가까운 영역 그리고 부영역 3은 기지국으로부터 가장 떨어진 지역의 신호감쇄 특성을 나타낸다. 각 부영역별 주어진 SNR 값을 바탕으로 식 (1)을 이용하여 전송속도 $R=329.5$ kbps을 위해 요구되는 전력양(watt)은 다음과 같이 계산되었다 : $q_1=0.03, q_2=0.06, q_3=0.1$. 요구전력량의 정수화 조건을 만족시키기 위해 $q_1=3, q_2=6, q_3=10$ 그리고 $P=100$ 으로 수정하였다.

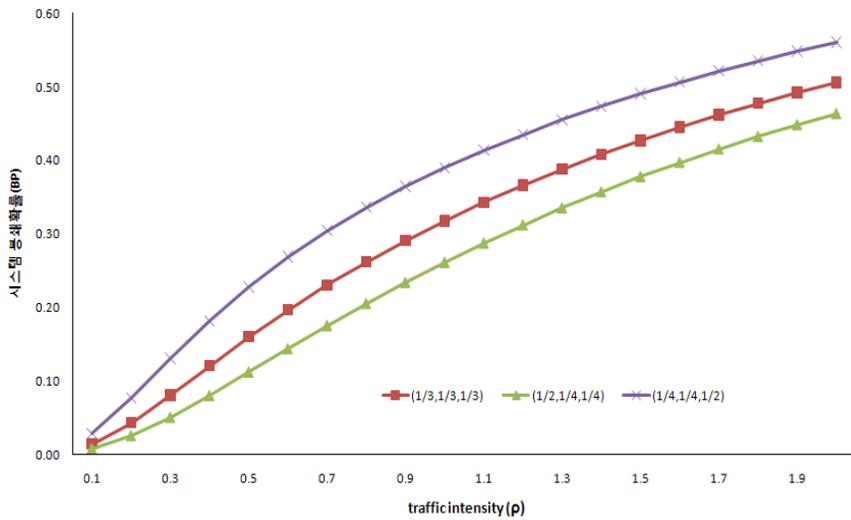
셀 전체의 호 도착율은 Λ 으로 a_k 를 셀에 도착하는 전체 호 중 부영역 k 로 도착하는 호의 비율이라고 할 때, 종류(k, l) 호의 도착율은 다음과 같이 정하였다 : $\lambda_{kl} = \Lambda \cdot a_k \cdot 1/L$. 그리고 호의 평균 통화시간은 $1/\mu=180$ 초 그리고 셀의 트래픽밀도(traffic intensity)는 $\rho = \hat{g}\Lambda/(M\mu)$ 으로 설정하였는데, 여기서 $\hat{g}(=2.67)$ 는 평균 부반송파 요구 수를 나타낸다.

[그림 4]~[그림 8]에서는 신규호와 핸드오프호의 구분이 없는 경우들에 대한 실험결과이다. [그림 4]는 (a_1, a_2, a_3) 의 3가지 ((1/3, 1/3, 1/3), (1/2, 1/4, 1/4) 그리고 (1/4, 1.4, 1/2)) 각각의 경우에 대해 트

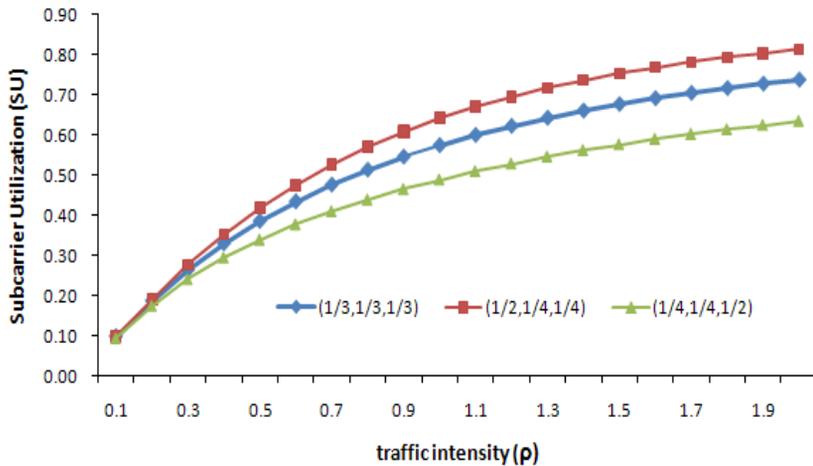
래픽밀도(ρ)값의 변화에 따른 시스템 봉쇄확률(BP)의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이, 트래픽 밀도에 따라 시스템 봉쇄확률은 단조 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 전송속도 R 을 위해 요구되는 전력의 양이 보다 많이 요구되는 셀 경계지역에서 발생하는 트래픽의 비율이 상대적으로 큰 경우(예 : (1/4, 1/4, 1/2))가 그렇지 않은 경우에 비해(예 : (1/3, 1/3, 1/3)) 시스템 봉쇄확률이 크게 나타난다. 한편, [그림 5]는 부반송파 사용효율(SU) ([그

림 5](a) 및 전력 사용효율(PU) ([그림 5](b))를 보여주는데, 셀 경계지역의 트래픽발생 비율이 높을수록 전력사용 효율이 높아지는 반면 부반송파 사용효율은 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

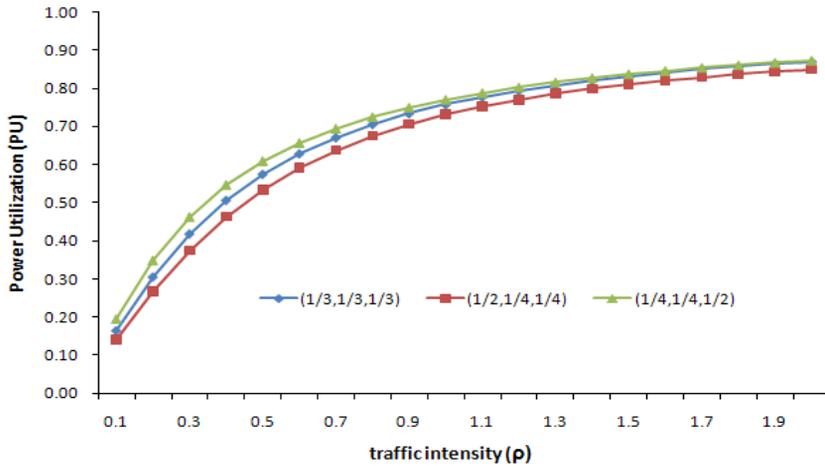
[그림 6]은 트래픽밀도가 $\rho=0.5$ 인 경우, 호 종류별로 봉쇄확률을 보여준다. 동일한 부영역에 속한(즉, 동일한 채널계인 패턴) 호 종류간의(예 : 호종류 (1, 1)과 (1, 2)) 봉쇄확률의 차이는 요구 전송속도(즉, 요구 부반송파 의 수)의 차이로 그리고 동일한 요구 전



[그림 4] 트래픽밀도 변화에 따른 시스템 봉쇄확률($M = M_i, P = P_i$)

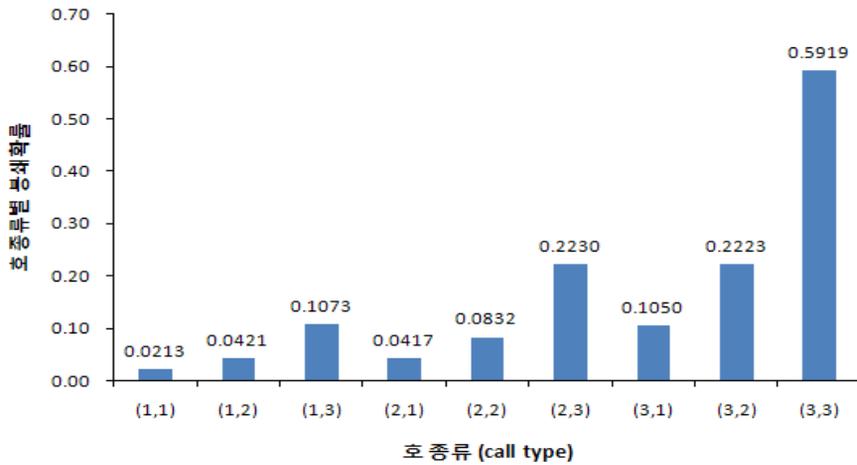


(a) 부반송파의 사용효율



(b) 전력의 사용효율

[그림 5] 트래픽밀도 변화에 따른 부반송파 및 전력의 사용효율($M = M_1, P = P_1$)



[그림 6] 호 종류별 봉쇄확률($\rho = 0.5, (a_1, a_2, a_3) = (1/4, 1/4, 1/2)$)

송속도 가지고 있으나 채널계인 패턴이 다른(예 : 호종류 (1, 1)과 (2, 1)호 간의 봉쇄확률 차이는 요구 전력량의 차이로 설명될 수 있다. [그림 6]은 정리 1의 결과를 실험을 통해 보여준다.

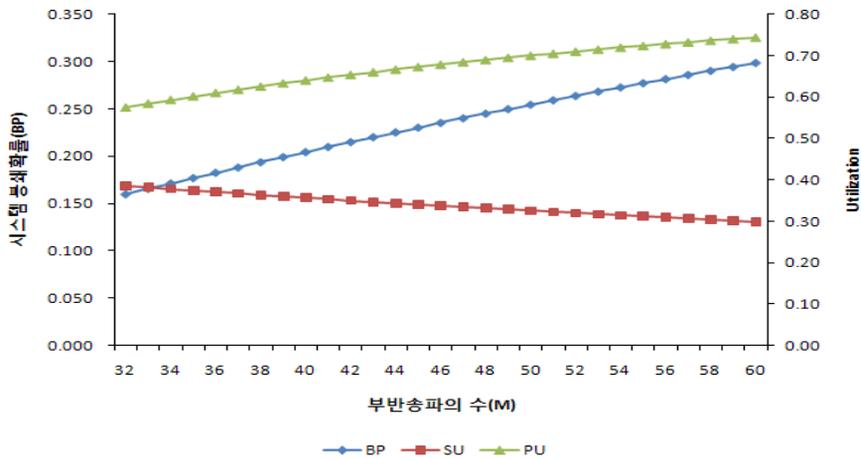
[그림 7]은 가용 부반송파의 수(M) 증가에 따른 시스템 봉쇄확률(BP) 및 자원들(부반송파, 전력)의 사용효율을 보여주고 있는데, 여기에서(a_1, a_2, a_3)은 셀 경계지역에서 발생하는 트래픽의 비중이 큰(1/4, 1/4, 1/2)으로 설정하였다. 이 실험결과에 따르면, 부반송

파 자원이 증가함에 따라 시스템 봉쇄확률은 오히려 증가하게 된다. 이러한 결과는 다음과 같이 해석할 수 있다. $M = 32$ 인 경우에 전력 사용효율(PU)은 부반송파 사용효율(SU)에 비해 상대적으로 매우 큰 값을 가진다. 이는 현재의 트래픽밀도($\rho = 0.5$) 및 채널계인 패턴 하에서 호 접속을 위해 전력 자원의 부족 가능성이 부반송파 자원의 부족 가능성에 비해 더 큰 것을 의미한다. 이 상황에서 가용 부반송파의 수를 증가시키는 것은 전력자원의 부족 현상을 더

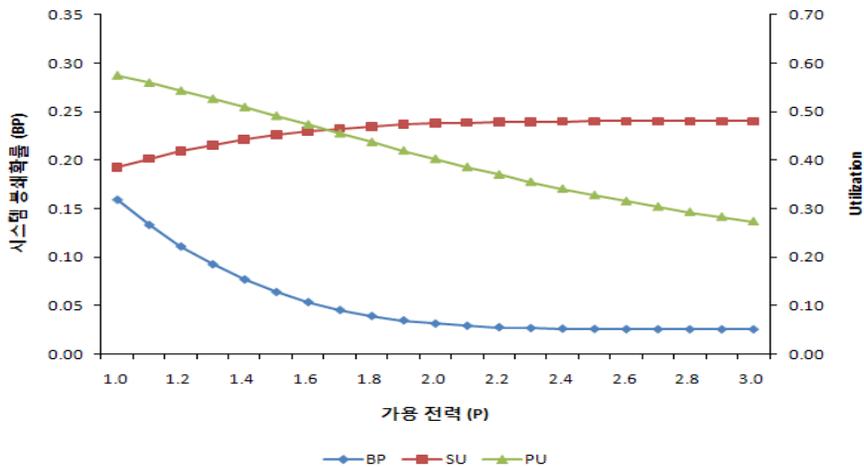
욱 가중시켜 전체적인 호 접속 성공 가능성을 저하시키게 된다. [그림 8]은 부반송파를 증가시키는 [그림 7]과는 달리 전력자원(P)의 증가에 따른 시스템 성능척도들을 보여주고 있는데, 상대적으로 부족한 자원인 전력자원의 증가는 부반송파의 증가와는 달리 시스템 봉쇄확률을 감소시킴을 확인할 수 있다.

[그림 9]~[그림 15]는 핸드오프를 고려한 트래픽모형에 대한 실험결과로 $(a_1, a_2, a_3) = (1/3, 1/3, 1/3)$ 으로 가정한다. 먼저, [그림 9]는 핸드오프에

대한 자원할당이 신규호와 동등하게 이루어지는 상황에서(즉, $M = M1, P = P1$) 트래픽밀도에 따른 신규호와 핸드오프호의 봉쇄확률을 보여주고 있다. 실험에서 상정한 모든 트래픽밀도에 대해서 핸드오프호의 봉쇄확률이 신규호의 봉쇄확률에 비해 크게 나타나고 있다. 물론, 이러한 현상은 부영역 3뿐만 아니라 상대적으로 채널게인이 큰 부영역 1과 2에서 발생하는 신규호와는 달리 핸드오프호의 경우는 상대적 채널게인의 값이 가장 작은 부영역 3에서만 발생하여 요구되는 전력의 양이 가장 크기 때문



[그림 7] 부반송파 수(M) 변화에 따른 시스템 봉쇄확률($\rho=0.5$)

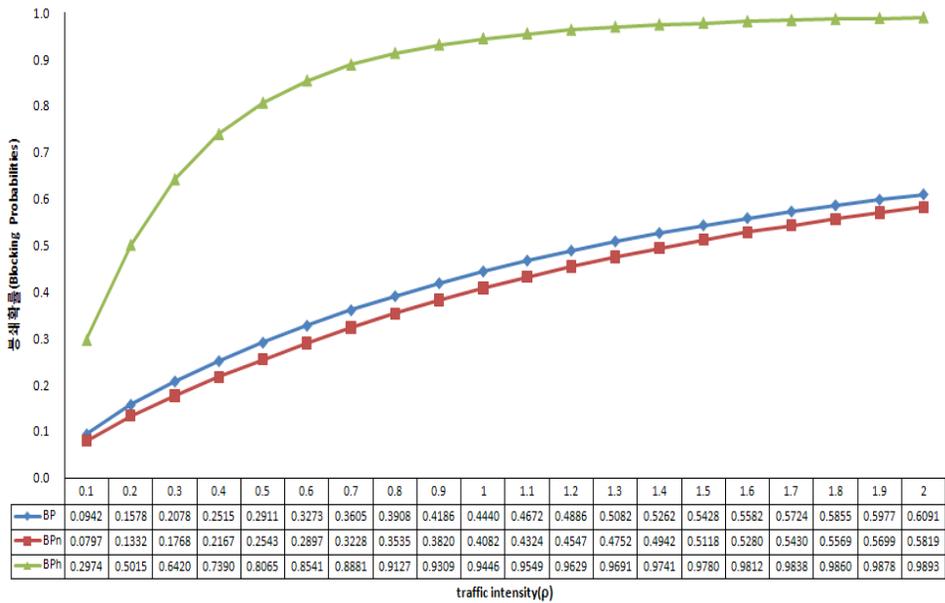


[그림 8] 가용전력량(P)에 따른 시스템 봉쇄확률($\rho=0.5$)

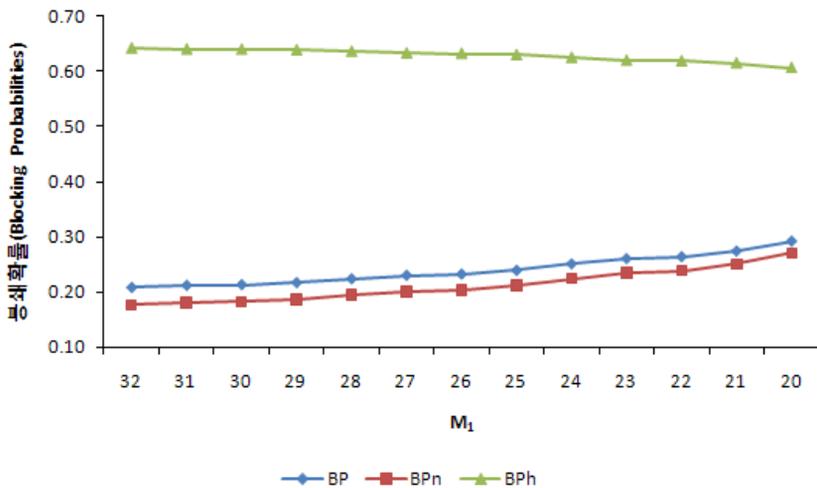
에 발생한다. 따라서 핸드오프호에 대한 별도의 보호방안이 없는 경우, 두 종류 호의 봉쇄확률이 동일한 FDMA(또는 TDMA)와는 달리 [9]OFDMA에서는 일반적으로 핸드오프호의 봉쇄확률은 신규호의 그것에 비해 크게 된다.

[그림 10]과 [그림 11]은 트래픽밀도 $\rho = 0.5$ 하에

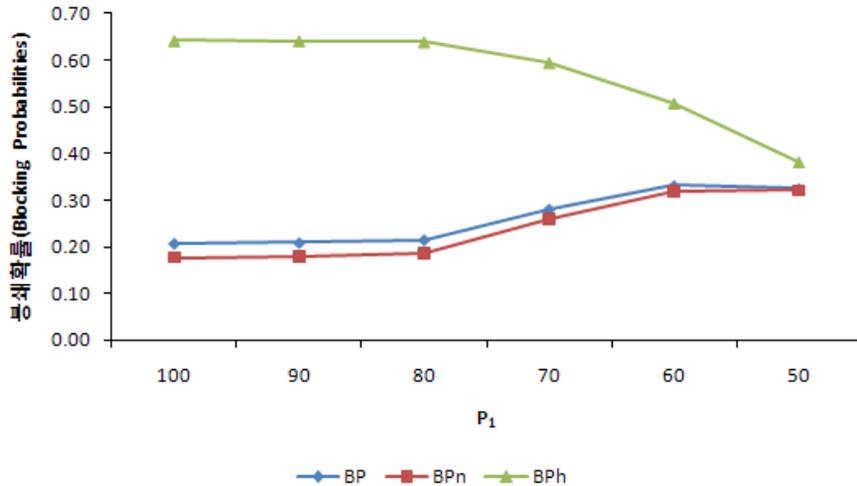
서 가상 부반송파의 수 M_1 과 가상 전력량 P_1 의 변화에 따른 신규호, 핸드오프호 그리고 전체 시스템 봉쇄확률의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이, 가상 부반송파의 수 또는 가상 전력의 양이 감소됨에 따라(즉, 핸드오프호가 독점적으로 사용할 수 있는 자원의 양을 증가) 핸드오프호(신규호)의 봉쇄



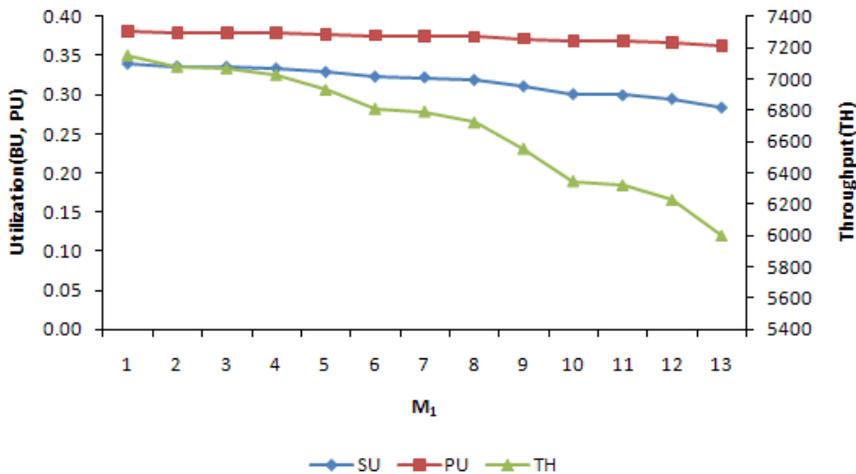
[그림 9] 트래픽 밀도에 따른 신규호 및 핸드오프호의 봉쇄확률($P = P_1, M = M_1$)



[그림 10] 가상 부반송파의 수(M_1)변화에 따른 신규호 및 핸드오프호의 변화



[그림 11] 가상 가용전력량(P_1)변화에 따른 신규호 및 핸드오프호의 변화



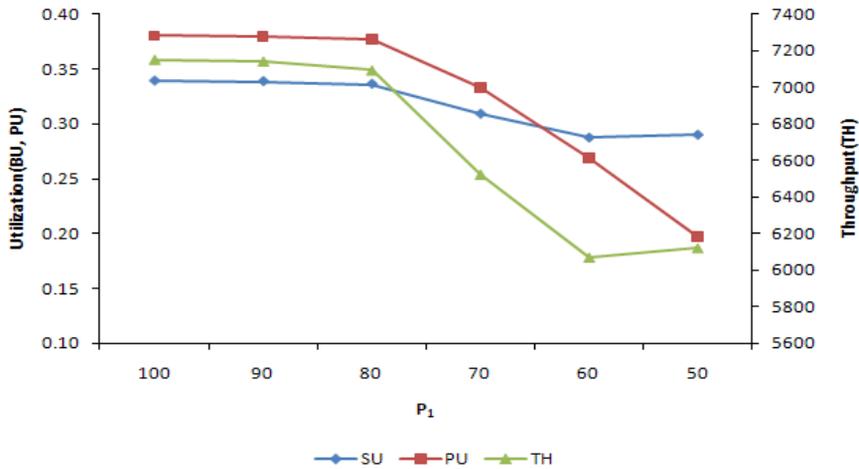
[그림 12] 가상 부반송파의 수(M_1)변화에 따른 자원 사용효율과 시스템 데이터 전송률

확률은 감소(증가)함을 알 수 있다. 하지만 봉쇄확률의 감소 정도는 전력자원의 경우가 더 큰데, 이는 전력자원이 사용효율이 부반송파자원이 사용효율에 비해 더 크기 때문이다. 이러한 사실은 호들의 지리적 위치에 따른 전파전파 특성 그리고 요구 전송속도 등에 따라 핸드오프호 보호를 위해 보다 효과적인 자원의 종류가 달라질 수 있음을 시사한다.

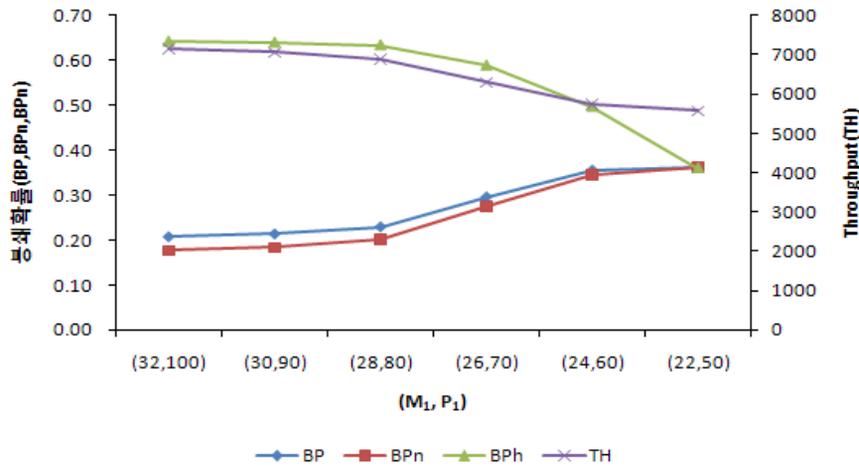
[그림 12]와 [그림 13]은 가상자원의 변화에 따른 부반송파 및 전력의 사용효율의 변화와 시스템 데

이터전송률(throughput, TH)의 변화를 보여준다. 가상자원 M_1 또는 P_1 의 감소는 시스템 자원의 일부를 핸드오프호에게 독점적으로 할당하게 되어 자원의 사용효율과 시스템 데이터 전송률이 감소되는 것을 보여준다.

마지막으로 [그림 14]는 가상자원 M_1 과 P_1 의 동시변화에 따른 봉쇄확률과 시스템 데이터 전송율의 변화를 보여준다. 결국 최적 호제어는 시스템 데이터 전송율의 감소를 가능한 최소화 하면서 지정된



[그림 13] 가상 가용전력량(P_1)변화에 따른 자원 사용효율과 시스템 데이터 전송률



[그림 14] 가상자원(M_1 and P_1)의 변화에 따른 시스템 봉쇄확률

신규호 및 핸드오프호의 봉쇄확률을 지정된 값 이하가 되도록 가상자원의 값 M_1 과 P_1 을 결정하는 문제가 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 OFDMA 무선시스템의 해석적인 트래픽모형을 제시하였다. OFDMA 시스템의 특성을 반영한 트래픽모형에 대한 연구는 매우 미진한 상태로, OFDMA 시스템의 가장 중요한 자원인 부반송

파와 전력을 동시에 고려한 모형이라는 점에서 본 연구는 기존 연구와 차별된다. 제시된 트래픽모형의 또 장점은 해석적으로 정확한(exact) 확률 성능 척도를 구할 수 있다는 점이다. 이로 인해 OFDMA 시스템의 트래픽 엔지니어링에 매우 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 실험을 통해 밝혀진 트래픽 밀도, 트래픽의 지리적 분포, 가용부반송파의 수 그리고 가용전력량 등 다양한 트래픽 또는 시스템 파라메타에 따른 성능척도(봉쇄확률, 자원 사용효율, 데이터전송률)의 변화행태 특성은 최

적 호제어 및 자원할당에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구와 관련하여 다음과 같은 사항에 대한 추가 연구가 필요하다. 먼저, 제시된 모형에서는 채널게인 패턴이 매우 중요한 역할을 담당한다. 따라서 셀의 반경, 전파전파 모형 등 현실적인 무선환경을 고려하여 채널게인 패턴을 해석적으로 유도할 수 있는 체계적인 방법론에 대한 연구가 필요하다. 다음으로, 핸드오프호 보호 방안과 관련하여 신규호에 자원할당을 제약하는 본 연구에서 제시된 방법론과 더불어 신규 및 핸드오프호의 전송속도를 통제하는 방법 등이 있다. 이러한 특성을 반영한 모형 및 이를 이용한 최적 핸드오프 보호 방식에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 백천현, "CDMA 이동통신 시스템에서 신호전파 특성과 트래픽의 지리적 분포가 반영된 해석적인 소프트블록킹 확률 모형", 『Telecommunication Review』, 제17권, 제3호(2007), pp.507-521.
- [2] 백천현, "광대역 OFDMA 무선통신 시스템의 호 접속제어에 관한 연구", 『대한산업공학회지』, 제34권, 제4호(2008), pp.445-459.
- [3] Abrardo, A., G. Giambene, and D. Sennati, "Capacity evaluation of a mixed-traffic WCDMA system in the presence of load control," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol.52, No.3(2003), pp.490-501.
- [4] Bohge, M. et al., "Dynamic resource allocation on OFDM systems : an overview of cross-layer optimization principles and techniques," *IEEE Network*, (January/February, 2007), pp. 53-59.
- [5] Chen, J.-C. and W.-S. E. Chen, "Call blocking probability and bandwidth utilization of OFDM subcarrier allocation in next-generation wireless networks," *IEEE Communication Letters*, Vol.10, No.2(2006), pp.82-84.
- [6] Choudhury G.L., K.K. Leung, and W. Whitt, "An algorithm to compute blocking probabilities in multi-rate multi-class multi-resource loss models," *Advances in Applied Probability*, Vol.27, No.4(1995), pp.1104-1143.
- [7] Cho, J. and D. Hong, "Statistical model of downlink interference for the performance evaluation of CDMA systems," *IEEE Communication Letters*, Vol.16(2002), pp.494-496.
- [8] Dean, T. and P. Flemin, "Trunking efficiency in multi-carrier CDMA systems," *Proc. of 56th Vehicular Technology Conference*, (2002), pp.156-160.
- [9] Hong, D. and S.S. Rappaport, "Traffic model and performance analysis for cellular radio telephone systems with prioritized and non-prioritized handoff procedures," *IEEE Vehicular Technology*, Vol.VT-35, No.3(1986), pp. 77-92.
- [10] Liu, H. and G. Li, *OFDM-Based Broadband Wireless Networks*, John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- [11] Mohanram, C. and S. Bhashyam, "A sub-optimal joint subcarrier and power allocation algorithm for multiuser OFDM," *IEEE Communication Letters*, Vol.9, No.8(2005), pp.685-687.
- [12] Niyato, D. and E. Hossain, "Connection admission control algorithms for OFDM wireless networks," *IEEE Globecom*, (2005), pp. 2455-2459.
- [13] Paik, C.H. and Y.S. Suh, "Generalized queueing model for call blocking probability and resource utilization in OFDM wireless networks," *IEEE Communication Letters*, Vol.15, No.7 (2011), pp.767-769.

- [14] Pla, V., J. Martinez-Bauset, and V. Casares-Giner, "Comments on Call blocking probability and bandwidth utilization of OFDM subcarrier allocation in next-generation wireless networks," *IEEE Communication Letters*, Vol.12, No.5(2008), p.349.
- [15] Pinsky, E. and A.E. Conway, "Computational algorithms for blocking probabilities in circuit-switched networks," *Annals of Operations Research*, Vol.35(1992), pp.31-41.
- [16] Rong, B. et al., "Call admission control optimization in WiMAX Networks," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, Vol.37, No.4(2008), pp.2509-2522.
- [17] Song, G. and Y. Li, "Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-Part I: Theoretical framework," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.4, No.2(2005), pp.614-624.
- [18] Wong, C.Y., R.S. Cheng, K.B. Lataief, and R.D. March, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, power allocation," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.17, No.10(1999), pp.1747-1757.
- [19] Zhang, Y., "Call admission control in OFDM wireless multimedia networks," in *Proc. of IEEE ICC*, (2008), pp.4154-4159.