OFDMA 무선통신시스템의 호접속 제어를 위한 SMDP 기반 최적화모형

백천현^{1*} · 정용주²

¹동의대학교 산업경영공학과 / ²부산외국어대학교 e-비즈니스

SMDP-Based Optimization Model for Call Admission Control in an OFDMA Wireless Communication Systems

Chunhyun Paik¹ · Yongjoo Chung²

¹Department of Industrial and Management, Dongeui University

²Department of E-Business, Busan University of Foreign Studies

This study addresses the call admission control(CAC) problem for OFDMA wireless communication systems in which both subcarriers and power should be considered together as the system resources. To lessen the excessive allocation of radio resources for protecting handoff calls, the proposed CAC allows the less data rate than their requirements to handoff calls. The CAC problem is formulated as a semi-Markov decision process(SMDP) with constraints on the blocking probabilities of handoff calls. Some extensive experiments are conducted to show the usefulness of the proposed CAC model.

Keyword: call admission control, OFDMA, handoff calls, SMDP

1. 서론

주파수 사용효율을 높여 광대역 무선서비스를 제공하는 OFDMA(orthogonal frequency division multiplexing access)기술은 차세대 무선시스템의 핵심 기술 중 하나로 인식되고 있다. OFDMA에서는 주어진 주파수대역을 상호직교성이 유지하면서 보다 좁은 대역폭의 부반송파(subcarrier)로 나누고, 무선전파(radio propagation)환경과 서비스 사용자의 특성을 고려하여 부반송파 또는 이들의 묶음을 사용자에게 할당한다(Liu and Li, 2005). OFDMA 시스템에서 각 기지국(base station)이 가용할 수 있는 부반송파의 수 및 전력(power)의 양은 인접 기지국들에 할당된 부반송파 간 주파수간섭(frequency interference)과 트래픽밀도(traffic intensity) 등이 고려되어 결정된다. 이렇게 무선자원으로서 부반송

파 및 전력 모두가 고려되어야 한다는 점에서 OFDMA 시스템은 주파수자원(carrier)만이 고려되는 FDMA(TDMA) 그리고 전력만이 무선자원으로 여겨지는 CDMA 시스템과 구분된다.

그동안 OFDMA 시스템의 무선자원(부반송파, 전력)에 관련된 연구의 대부분은 시스템에서 무선자원을 요청하는 사용자(또는 호)의 수가 확정적으로 주어진 상태에서 시스템자원의 사용효율 최대화를 위한 최적화 모형과 그에 대한 해법 등에 관한 연구에 집중되었다(Bohge, 2007; Mohanram and Bhashyam, 2005; Song and Li, 2005; Wong *et al.*, 1999; Zhang, 2008). 최근 들어서 트래픽 엔지니어링 또는 호접속제어(CAC, call admission control) 등에서 활용할 목적으로 OFDMA 기반 무선시스템의 확률적 트래픽모형에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다(Chen and Chen, 2006; Paik, 2011; Paik and Suh, 2011). Paik and Suh(2011)

이 논문은 2011학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2011AA158).

*연락처 : 백천현 교수, 614-714 부산광역시 부산진구 엄광로 176 동의대학교 산업경영공학과,

Fax : 051-890-2627, E-mail : chpaik@deu.ac.kr

투고일(2012년 07월 12일), 심사일(1차 : 2012년 07월 26일, 2차 : 2012년 07월 31일), 게재확정일(2012년 08월 02일).

에서는 OFDMA 시스템의 무선자원인 부반송파와 전력자원 모두가 고려된 확률적 트래픽 모형을 처음으로 제시하였다. 이 연구에서는 소위 채널이득(channel gain) 패턴이라는 개념을 도입해 일반적으로 연속적인 값을 갖는 채널이득 및 소요 전력량을 이산화하여 OFDMA 기반 시스템의 트래픽행태를 정확해(exact solution)가 존재하는 복수종류-복수자원 손실(multi-class multi-resource loss) 모형으로 정립하였다. 한편 Paik(2011)에서는 핸드오프호(handoff calls)의 보호방안이 모형에 반영되도록 기존 연구 Paik and Suh(2011)에서 제시된 확률적 트래픽모형을 일반화하였다.

통신시스템의 성능요건이 충족되도록 무선자원을 경쟁적으로 요구하는 서비스 사용자들에게 자원할당을 통제하는 것을 호접속제어(CAC)라고 한다. 무선자원의 희귀성으로 인해 무선시스템의 CAC는 시스템 성능 및 서비스 품질에 매우 중요한 역할을 담당한다. OFDMA 기반 셀(또는 기지국)에 도착하는 호접속시도(call attempts) 각각에 대해 호접속 여부를 결정하는데, CAC에 의해 접속거절이 되는 경우에 봉쇄(blocking)가 발생한다. 접속시도를 요구하는 호는 특정 셀에서 새로이 통화를 시작하는 신규호(new call)와 인접셀에서 이미 접속 상태에 있던 호가 셀로 이동하면서 발생하는 핸드오프호(handoff call)로 구분된다. 핸드오프호는 신규호와 달리 통화중인 호이기 때문에 신규호에 비해 호접속에 우선순위(priority)를 부여하는 것이 일반적이다(Hong and Rappaport, 1986).

OFDMA 기반 시스템에서 핸드오프호를 고려하는 CAC에 대한 연구는 매우 미약한 실정이다. Hong *et al.*(2006)과 Mohanram and Bhashyam(2005)에서는 핸드오프호를 위해 부반송파만을 예약(reservation)하는 방안을 제시하였고, Ming-ju *et al.*(2007)에서는 OFDMA 시스템에서의 핸드오프호 처리에 대한 절차를 논의하였으며, Paik(2008)은 부반송파와 전력할당에 신규호와 핸드오프호를 차별하는 방안을 제시하였다. 그런데 이들 연구 모두는 트래픽의 동태적 특성이 반영되어 있지 않고 시스템내 호의 수가 확정적으로 주어진 경우를 대상으로 한다. 확률적 트래픽 모형에 기반한 CAC는 Paik(2011)에서 처음으로 제시되었다. 이 연구에서는 가상자원(virtual resource)을 도입하여 확률적 트래픽 모형이 확정적해를 유지하면서 무선자원의 일정 부분이 핸드오프호만에 의해 독점적으로 사용되는 방식을 제안하였다. 하지만 핸드오프호의 주어진 GoS(Grade of Service)수준을 만족시키면서 시스템 성능을 최적화하는 가상자원의 규모를 결정하는 방법은 제시되지 않았다. 또한 위 연구에서 언급된 바와 같이, 동일한 전송속도를 위해 요구되는 전력량이 셀 경계지역에서 발생하는 핸드오프호의 경우가 신규호에 비해 크기 때문에 가상자원을 통한 핸드오프호의 보호는 무선자원을 과도하게 핸드오프호에게 할당하는 결과를 초래하게 되고 이는 신규호의 봉쇄 가능성을 급격히 높여 시스템 전체 성능을 악화시키는 문제를 초래할 가능성이 있다.

본 연구에서는 Paik and Suh(2011)에서 제시된 채널이득 및 전력자원을 이산화하는 확률적 트래픽모형을 토대로, 시스템성

능을 최적화하면서 핸드오프호의 GoS 요구수준을 만족시키는 SMDP(Semi-Markovian Decision Process)기반 CAC 최적화모형을 제시한다. SMDP는 동태적 특성을 가진 다양한 정보통신시스템의 최적통제(optimal control)를 위해 유용한 접근법으로 알려져 있다(Rong *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2002). 본 연구에서 제시되는 CAC에서는 신규호 및 핸드오프호의 접속제어와 더불어 핸드오프호의 요구전송량 제어를 통해 신규호와 핸드오프호의 무선자원 점유의 형평성(fairness)를 제공하면서도 시스템 성능을 최적화한다. 본 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 2장에서는 트래픽 모형 및 호접속제어에 대해 소개한다. 다음 장에서는 SDMP 기반 최적 CAC 모형을 제시한다. 제 4장에서는 시스템 및 트래픽 환경에 대한 다양한 입력자료를 대상으로 제시된 최적화모형의 실험결과를 검토한다. 마지막으로 결론에서는 본 연구의 의의 및 향후 연구방향을 제시한다.

2. 트래픽 모형과 호접속제어(CAC)

OFDMA 기반 셀룰러시스템에서 특정 셀의 하향링크(downlink)만을 대상으로 한다. 셀에는 M 개의 부반송파가 그리고 전력은 P (watt)가 가용 무선자원으로 할당되어 있다. 셀에 도착하는(또는 호접속을 요구하는) 호의 종류는 신규호와 핸드오프호로 구분되고, 이들 각각은 요구전송속도에 따라 협대역(narrow band)과 광대역(wide band)로 다시 나누어져 호의 종류는 총 4가지가 된다. 각 부반송파의 평균 전송속도는 R (bps)로 일정하고(Chen and Chen, 2006; Paik and Suh, 2011), 협대역 및 광대역 트래픽의 요구전송속도는 각각 $b_n R$ 그리고 $b_w R$ 이라고 가정한다($b_n \leq b_w$). 즉, 협대역(광대역) 트래픽의 요구전송속도를 충족시키기 위해서는 $b_n(b_w)$ 개의 부반송파가 할당되어야 한다. 신규호에 할당되는 부반송파에서 전송속도 R 을 위한 전력수준은 p_n 그리고 핸드오프호의 경우는 p_h 이다. 예를 들어, 광대역 핸드오프호 접속을 위해서는 b_w 개의 부반송파와 이들 반송파 각각에 p_h 만큼의 전력할당이 필요하여 총 $b_w p_h$ 만큼의 전력할당이 필요하다. 부반송파와 호의 무선전파환경과 변조방식으로 결정되는 요구전력 수준은 일반적으로 정수값을 가지지 않는다. 그러나 기존 연구(Paik, 2011; Paik and Suh, 2011)에서 제시되었듯이, 정수값으로 변환이 가능하기 때문에 본 연구에서는 p_n 과 p_h 모두 정수값이라고 가정한다. 한편 일반적으로 $p_n \leq p_h$ 이 성립되는데, 셀경계 지역에서 발생하는 핸드오프호가 특정 전송속도를 위해 요구하는 전력량은 신규호에 비해 큰 것이 일반적이기 때문이다.

협대역 신규호, 광대역 신규호, 협대역 핸드오프호, 광대역 핸드오프호 각각을 편의상 호 종류 1, 2, 3, 4로 표기한다. 호 종류 i ($= 1, 2, 3, 4$)는 도착률이 λ_i 인 상호 독립적인 포아송과정(Poisson process)에 따라 셀에 도착하고, 호 종류에 관계없이 통화중에 셀에 머무는 시간(sojourn time)은 평균이 $1/\mu$ (초)인 지수분포(exponential distribution)를 따른다고 하자. 각 호 종류의

접속시에는 요구하는 부반송파 수만큼 그리고 각 부반송파에 요구되는 전력이 동시에 할당되며, 통화완료 시에 할당된 무선자원은 동시에 해제(release)된다. 이상의 가정하에서 시스템의 트래픽행태는 Paik and Suh(2011)에서 제시된 복수종류-복수자원 손실모형의 단순화된 형태가 되어 각 호 종류의 봉쇄확률을 구할 수 있다. 하지만, 아래와 같이 핸드오프호의 전송속도 감소가 허용되는 트래픽 모형은 더 이상 복수종류-복수자원 손실모형의 조건을 만족하지 못한다.

본 연구에서는 시스템 상태에 따른 신규호와 핸드오프호에 대한 호접속 여부와 더불어 핸드오프호의 요구전송량 감소를 통해 신규호 및 핸드오프호의 봉쇄확률을 향상시키고 신규호와 핸드오프호간 무선자원 점유의 공평성을 제고하기 위해 다음과 같은 가정을 도입한다(<Figure 1>).

- 핸드오프호의 도착
 - 협대역(광대역) 핸드오프호는 시스템에 요구반송파 수인 b_n (광대역의 경우 b_w)개의 부반송파 할당을 요구한다.
 - 이것이 CAC에 의해 거절되면, $b_n - 1$ (광대역의 경우 $b_w - 1$)개의 부반송파를 요구한다(전송속도 감소).
 - 만약 이것마저도 CAC가 거절하면, 해당 핸드오프호는 봉쇄되고 그렇지 않으면 $b_n R \rightarrow (b_n - 1)R$ (광대역의 경우 $b_w R \rightarrow (b_w - 1)R$)로의 전송속도 감소를 감수하고 호접속을 수행한다. 전송속도(할당된 부반송파의 수)가 감소되면 할당되는 전력 양 역시 감소한다.
- 신규호의 도착
 - 협대역(광대역) 신규호는 원 전송속도를 위해 필요한 수만큼의 부반송파 할당을 요구한다.
 - 이것이 CAC에 의해 거절되면, 전송속도 감소 없이 해당 신규호는 봉쇄된다. 그렇지 않으면 요구된 부반송파를 할당한다.

Figure 1. Summary for the Proposed Call Admission Control

이상과 같이 본 연구에서 제시된 CAC는 셀 경계지역에 발생하여 동일한 전송속도(엄격히 말하면 변조수준)를 위해 요구

되는 전력의 양이 신규호에 비해 큰 핸드오프호에게 자신의 전송속도 수준의 희생을 통해 호접속 성공기회를 높여준다. 제시된 CAC는 단위 전송속도당 필요 전력이 많은 핸드오프호와 신규호와의 무선자원 할당의 형평성도 함께 고려되는 효과가 있다.

위에서 제시된 트래픽 모형 및 CAC는 다음과 같이 일반화될 수 있다. 먼저, 핸드오프호와 신규호로 구분된 트래픽 종류는 Paik and Suh(2011)에서와 같이 셀내에서 호의 발생 위치에 따른 전파환경 특성을 반영하여 보다 세분화될 수 있다. 또한 협대역과 광대역 등 두 가지로 구분하고 있는 요구 전송속도 또한 다양한 전송속도로 구분할 수 있다. 한편, 한 개의 부반송파로 제한된 핸드오프호의 전송속도 감소 수준 역시 다양한 전송속도 감소로 일반화될 수 있다. 하지만 이러한 일반화는 시스템 상태공간(state space)과 아래에서 소개되는 SDMP의 행동공간(action space)의 확대를 초래하여 문제의 규모가 커지는 문제가 발생한다.

3. SMDP 기반 최적 호접속제어 모형

SMDP는 소위 균등화(uniformization)라는 절차를 통해 연속시간 마야코비안 확률시스템(continuous time Markovian system)을 동등한(equivalent)한 확률적 행태를 가진 이산시간 평균비용 마야코비안 의사결정과정(discrete time average cost Markovian decision process)으로 분석하는 방법으로, 해법으로는 정책반복(policy iteration), 가치반복(value iteration)과 LP(linear programming) 등이 있다(Heyman and Sobel, 1984; Tijms, 1986). 본 연구에서는 호 종류별로 봉쇄확률에 대한 제약(GOS)을 모형에 반영할 수 있는 LP방법을 대상으로 한다.

SMDP의 상태변수 x_i 는 시스템에 접속 중인 (즉, 통화 중인) 호 종류 i 의 수라고 하자($i = 1, \dots, 4$). 위에서 언급했듯이, 호 종류 3과 4 각각은 협대역 및 광대역 핸드오프호를 의미하는 것으로 원 요구전송속도에 필요한 무선자원이 할당된 핸드오프호의 수를 의미한다. CAC에 의해 전송속도가 감소되어 호접속이 허락된 협대역 및 광대역 핸드오프호의 수를 각각 x_5 그리고 x_6 라고 하자. 그러면, 앞서 제시된 트래픽 모형하의 셀시스템 행태에 대한 상태변수 $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 는 다음과 같은 상태공간(state space) E 를 가진다.

$$E = \left\{ x = (x_i) \mid \sum_{i=1}^6 b_i x_i \leq N, \sum_{i=1}^6 q_i x_i \leq P_{\max}, x_i \geq 0, i = 1, \dots, 6 \right\} \quad (1)$$

여기서, $b_1 = b_3 = b_n$, $b_2 = b_4 = b_w$, $b_5 = b_n - 1$, $b_6 = b_w - 1$,

$$q_i = \begin{cases} b_i p_n, & i = 1, 2 \\ b_i p_h, & i = 3, 4, 5, 6. \end{cases}$$

호(신규호 또는 핸드오프호)의 호접속 요구가 도착하거나

통화중인 호의 통화완료가 발생하면 시스템의 상태는 변하게 된다. 본 연구의 CAC에서는 새로운 호접속시도의 도착시점을 CAC의 의사결정시점(decision epoch)으로 설정하고, 매 의사결정시점마다 다음 의사결정시점에서 호접속제어를 어떻게 할 것인지에 대한 행동(action)을 결정한다. 의사결정시점의 행동 $a = (a_1, \dots, a_6)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{만약, 호 종류 } i \text{의 호접속을 수락하면,} \\ 0, & \text{그렇지 않으면.} \end{cases} \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, 6$$

그런데, 본 연구에서 제시된 CAC에서 핸드오프호의 전송속도 감소는 원 전송속도 요구가 거절된 핸드오프호에 한하여 이루어지므로 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{만약 } a_{i-2} = 1, \\ 1 \text{ 또는 } 0, & \text{만약 } a_{i-2} = 0. \end{cases}, \quad i = 5, 6 \quad (3)$$

그러면 가능한 행동들의 집합인 행동공간(action space) A 는 다음과 같이 정의된다.

$$A = \{a = (a_i) | a_i = 0 \text{ 또는 } 1, i = 1, \dots, 6, \text{ 단, 조건 (3) 만족}\} \quad (4)$$

시스템의 상태가 x 일 때 실행가능한 행동(admissible action)들의 집합을 A_x 라고 표시하면, A_x 는 시스템 상태가 x 일 때 상태공간 E 에 속하지 않은 상태로의 전이(transition)가 일어나지 않는 행동들의 집합을 의미하는 것으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$A_x = \{a \in A | \text{만약 } x + e_i \notin X, a_i = 0; \text{ 만약 } x = (0, 0, 0, 0, 0, 0), a \neq (0, 0, 0, 0, 0, 0)\} \quad (5)$$

시스템 상태가 $x = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 일 때, 행동 $a = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 이 허용되면, 상태 $x = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 에서 시스템이 영원히 머물게 될 가능성을 식 (5)에서 배제하고 있음에 유의한다. 이렇게 시스템 상태 x 와 이 때 취할 수 있는 행동들의 집합 A_x 가 결정되면, 본 연구의 CAC가 반영된 트래픽 모형의 안정상태(steady state) 행태는 다음과 같이 확장된 상태공간 E_D 를 갖는 SMDP로 표현될 수 있다.

$$E_D = \{(x, a) | x \in E, a \in A_x\}. \quad (6)$$

현재 상태가 $x \in E$ 이고 하나의 행동 $a \in A_x$ 가 선택되어질 때, 새로운 상태로 전이가 이루어지기 전까지 현재의 상태 x 에서 머무는 기대시간(expected sojourn time)을 $\tau_x(a)$ 라고 표시하자. $\tau_x(a)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\tau_x(a) = \left[\sum_{i=1}^4 (x_i \mu + a_i \lambda_i) + \sum_{i=3}^4 \{(1 - a_i) a_{i+2} \lambda_i + x_{i+2} \mu\} \right]^{-1}. \quad (7)$$

모든 $(x, a) \in E_D$ 에 대해 $\tau_x(a) > 0$ 이 만족되며, 현재 시스템 상태가 $x \in E$ 이고 행동 $a \in A_x$ 가 선택되어질 때, 상태 $y \in E$ 로의 전이가 이루어질 확률 $P_{xy}(a)$ 는 다음과 같다.

$$P_{xy}(a) = \begin{cases} \lambda_i a_i \tau_x(a), & \text{만약 } y = x + e_i, i = 1, 2, 3, 4 \\ \lambda_i (1 - a_{i-2}) a_i \tau_x(a), & \text{만약 } y = x + e_i, i = 5, 6 \\ x_i \mu \tau_x(a), & \text{만약 } y = x - e_i, i = 1, \dots, 6 \\ 0, & \text{그렇지 않으면.} \end{cases} \quad (8)$$

$\pi_x(a)$ 를 시스템의 상태가 $x \in E$ 일 때 행동 $a \in A_x$ 가 선택되어진 의사결정시점의 장기비율(long-run fraction)이라고 하자. 그러면, 협대역 및 광대역 핸드오프호의 봉쇄확률 BPh_{-n} 과 BPh_{-w} 은 다음과 같이 구해진다.

$$BPh_{-n} = \sum_{x \in E} \sum_{a \in A_x} (1 - a_3)(1 - a_5) \pi_x(a). \quad (9)$$

$$BPh_{-w} = \sum_{x \in E} \sum_{a \in A_x} (1 - a_4)(1 - a_6) \pi_x(a). \quad (10)$$

또한 협대역 및 광대역 신규호의 봉쇄확률 BPh_{-n} 과 BPh_{-w} 은 각각 다음과 같다.

$$BPh_{-n} = \sum_{x \in E} \sum_{a \in A_x} (1 - a_1) \pi_x(a). \quad (11)$$

$$BPh_{-w} = \sum_{x \in E} \sum_{a \in A_x} (1 - a_2) \pi_x(a). \quad (12)$$

그리고 무선자원 부반송파와 전력자원의 사용효율(utilization) U_s 와 U_p 는

$$U_s = \frac{\sum_{x \in E} \sum_{a \in A_x} x b \pi_x(a)}{N}, \quad (13)$$

$$U_p = \frac{\sum_{x \in E} \sum_{a \in A_x} x q \pi_x(a)}{P_{\max}}, \quad (14)$$

여기서, $b = (b_1, \dots, b_6)$, $q = (q_1, \dots, q_6)$.

위에서 정의된 SMDP에 대해 무선자원간의 가중평균(weighted average) 사용효율을 최대화시키는 최적정책(optimal policy) (즉, 의사결정변수($\pi_x(a)$, $x \in E$, $a \in A_x$)의 최적해)를 결정하는 선형계획(LP)문제는 아래와 같이 모형화 된다.

$$\text{Max } w U_s + (1 - w) U_p \quad (15)$$

s.t.

$$\sum_{x \in E} \sum_{a \in A_x} \pi_x(a) = 1 \quad (16)$$

$$\sum_{a \in A_y} \frac{\pi_y(a)}{\tau_y(a)} = \sum_{x \in E} \sum_{a \in A_x} P_{xay} \frac{\pi_x(a)}{\tau_x(a)}, y \in E \quad (17)$$

$$BPh_n \leq GoS_h \quad (18)$$

$$BPh_w \leq GoS_h \quad (19)$$

$$\pi_x(a) \geq 0, x \in E, a \in A_x \quad (20)$$

첫 번째 제약식 (16)은 확장된 상태공간 E_D 에 포함된 상태들의 안정상태 확률의 합은 1이 되어야 함을 나타낸다. 그리고 제약식 (17)은 균형 방정식(balance equation)을 나타낸다. 제약식 (18)과 식 (19)는 각각 협대역 및 광대역 핸드오프의 봉쇄확률(GOS)에 대한 제약식이다. 주어진 최적화 문제는 의사결정 변수의 수가 $|E_D| = |S| \cdot |A|$ 그리고 비음수조건식 (20)을 제외한 제약식의 수가 $|E| + 4$ 개인 LP 모형이 된다.

위 LP 모형 중, 제약식 (18)과 식 (19)를 확률적 제약식(probabilistic constraints)이라고 부르는데, 이 같은 제약식이 포함되지 않은 LP 모형의 최적해($\pi_x^*(a) (x \in E, a \in A_x)$)로부터 도출되는 최적 CAC 정책은 다음과 같이 확정적 CAC 정책(deterministic CAC policy) 형태를 가지게 된다(Tijms, 1986). 상태 x 에서 최적 CAC 정책 $R^*(x)$ 는 만약 $\sum_{a \in A_x} \pi_x^*(a) > 0$ 이면, $\pi_x^*(a) > 0$ 을 만족하는 행동 중에서 임의의 행동 $a^* \in A_x$ 를 선택한다. 만약 $\sum_{a \in A_x} \pi_x^*(a) = 0$ 이면, $P_{xay} > 0$ 이고 $\sum_{a \in A_y} \pi_y^*(a) > 0$ 인 행동 $a^* \in A_x$ 를 선택한다. 이 같은 방법에 의해 결정된 $R^* = \{R^*(x) | x \in E\}$ 가 최적 CAC 정책이 된다.

한편, 제약식 (18)~(19)와 같은 확률적 제약식이 포함되는 경우에는 아래와 같이 확률적 CAC 정책(randomized CAC policy)을 얻을 수 있다(Tijms, 1986).

$$R^*(x) = \begin{cases} \frac{\pi_x^*(a)}{\sum_{a \in A_x} \pi_x^*(a)}, & \text{만약, } \sum_{a \in A_x} \pi_x^*(a) > 0, a \in A_x \\ \text{임의로 결정, 그렇지 않으면.} \end{cases} \quad (21)$$

4. 실험

본 연구에서 제시된 SMDP 기반 최적 CAC 모형의 실험 결과를 분석하기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다. 신규호 및 핸드오프호의 협대역과 광대역 트래픽은 각각은 2개 그리고 5개의 부반송파를 요구한다. 즉, $b_n = 2$, $b_w = 5$. 그리고 신규호에 할당되는 부반송파의 평균적인 전력수준(p_n)은 5(watt)이고 핸드오프에 할당되는 부반송파의 전력수준(p_h)은 8이라고 가정한다.

셀 전체의 호(신규호 및 핸드오프호) 도착율 λ 에서 핸드오프호가 차지하는 비율을 r 로 표시하면, 신규호와 핸드오프호의 셀 도착율은 각각 $\lambda(1-r)$ 그리고 λr 이 된다. 또한 신규호

(또는 핸드오프호)의 도착율은 다시 협대역 및 광대역 트래픽으로 1/2씩 나누어진다고 가정한다. 호의 평균 통화시간($1/\mu$)은 호종류와 관계없이 150초로 설정한다. 한편, 셀 시스템의 트래픽밀도(traffic intensity)는 편의상 $\rho = \hat{g}\lambda / (N\mu)$ 로 설정하였는데, 여기서 $\hat{g}$ 은 3.17로 본 모형에서 고려되는 모든 트래픽종류들의 평균 부반송파 요구 수를 나타낸다. 아래에 주어진 모든 실험은 CPLEX를 통해 구했으며 이 때 부반송파에 대한 사용효율 가중값(w)은 0.5로 그리고 핸드오프호의 비율 r 은 0.1로 설정하였다.

Table 1. Example of optimal CAC ($N = 10$, $P_{\max} = 30$, $\rho = 0.1$, $GoS_h = 1.0$)

$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$	$a^* = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)$	활동공간의 수($ A_x $)
(0, 0, 0, 0, 0, 0)	(1, 1, 1, 0, 0, 0)	11
(0, 0, 0, 0, 1, 0)	(1, 0, 0, 0, 1, 0)	6
(0, 0, 0, 0, 2, 0)	(1, 0, 0, 0, 0, 0)	4
(0, 0, 0, 0, 3, 0)	(0, 0, 0, 0, 0, 0)	1
(0, 0, 1, 0, 0, 0)	(1, 0, 0, 0, 1, 0)	4
(0, 0, 1, 0, 1, 0)	(0, 0, 0, 0, 0, 0)	1
(0, 1, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 0, 0)	1
(1, 0, 0, 0, 0, 0)	(1, 0, 1, 0, 0, 0)	6
(1, 0, 0, 0, 1, 0)	(1, 0, 0, 0, 1, 0)	4
(1, 0, 0, 0, 2, 0)	(0, 0, 0, 0, 0, 0)	1
(1, 0, 1, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 0, 0)	1
(2, 0, 0, 0, 0, 0)	(1, 0, 0, 0, 1, 0)	4
(2, 0, 0, 0, 1, 0)	(0, 0, 0, 0, 0, 0)	1
(3, 0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 0, 0)	1

<Table 1>은 시스템 상태공간의 규모($|E|$)가 작은 모형을 대상으로 SMDP 기반 LP 최적화모형의 실행결과에 따른 최적 CAC에 대한 예를 보여주고 있다. 이 예에서는 무선자원의 제한으로 광대역 핸드오프호에 대한 상태변수(x_4, x_6)가 모두 0임에 유의한다. <Table 1>의 결과는 $GoS_h = 1.0$ 으로 설정한 것으로 (즉, 식 (18)과 식 (19)가 중복(redundant) 제약식이 되어) 최적정책 R^* 는 확정적인 형태를 가지게 된다. <Figure 2>~<Figure 4>에 주어진 실험결과 역시 $GoS_h = 1.0$ 로 설정하고 핸드오프호의 전송속도 감소를 허용한 경우를 대상으로 한다. <Figure 2>에서는 트래픽밀도의 변화에 따른 4가지 호종류의 봉쇄확률을 보여준다. 그림에서 보듯이, 요구 무선자원이 큰 광대역 트래픽의 봉쇄확률이 협대역의 봉쇄확률보다 큰 것을 알 수 있다. 한편, 모든 트래픽밀도에 대해 광대역 핸드오프호의 봉쇄확률(BPh_w)이 광대역 신규호의 봉쇄확률(BPh_n)보다 큰 값을 가지는데, 이는 현재의 N 과 $P_{\max}$ 하에서는 광대역 핸드오프에 요구되는 전력수준이 광대역 신규호에 그것에 비해 상대적으로 너무 커 전송속도 감소로는 이러한 차이가 상쇄되지 않음을 나타낸다. 하지만 요구 부반송파의 수가 광

대역보다 상대적으로 적은 협대역의 경우는 핸드오프호의 전송속도 감소가 할당에 필요한 전력수준의 감소를 가져와 신규호의 봉쇄확률과 비교하여 근소하게나마 작은 값을 가진다.

Figure 2. Blocking probabilities of four types of calls versus traffic intensity ($N=30$, $P_{\max}=50$, $r=0.1$, $GoS_h=1.0$)

(a) Handoff calls

(b) New calls

(c) The value of objective function

Figure 3. Comparisons between the case with transmission rate reduction and the case without ($N=30$, $P_{\max}=50$, $GoS_h=1.0$)

<Figure 3>은 핸드오프호의 전송속도 감소를 허용하는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하고 있다. <Figure 3>(a)와 <Figure 3>(b)는 핸드오프호와 신규호의 봉쇄확률 차이를 보여주고 있는데, 전송속도 감소가 허용되지 않은 경우의 봉쇄확률에서 허용된 경우의 봉쇄확률을 차감한 값을 나타내고 있다. 그림에서 확인되듯이, 핸드오프호의 전송속도 감소를 허용함으로써 핸드오프호의 봉쇄확률은 감소되고 신규호의 봉쇄확률은 증가된다. 그런데 봉쇄확률의 차이는 광대역보다는 협대역의 경우가 핸드오프 및 신규호 모두 경우에서 크게 되는데, 이는 하나의 부반송파에 대응되는 전송속도 감소의 효과가 요구 부반송파의 절대적인 수가 큰 광대역보다는 작은 협대역에서 더 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, <Figure 3>(c)는 전송속도 감소를 허용하는 경우의 최적 목적함수값 자체와 그리고 감소를 허용하는 경우의 목적함수값에서 그렇지 않은 경우의 최적 목적함수값을 차감한 값을 보여준다. 실험에서 가정한 트래픽밀도 모두에서 전송속도 감소가 허용된 경우의 최적 목적함수값이 큰 값을 가지는데, 이는 핸드오프호에 할당되는 부반송파의 수는 감소되지만 호접속의 수를 증가시킴으로써 무선자원의 사용효율이 높아지게 된 것에 기인한다.

(a) The number of subcarriers ($P_{\max}=50$)

(b) The amount of power ($N=30$)

Figure 4. Blocking probabilities versus N and $P_{\max}$ ($\rho=0.1$, $GoS_h=1.0$)

<Figure 4>는 가용 무선자원의 수 변화에 따른 봉쇄확률의 변화를 나타낸다. 먼저, 전력자원은 고정된 채 부반송파 자원의 증가에 따른 결과를 보여주는데, 일정 수준 이상의 부반송파 자원이 증가는 오히려 봉쇄확률의 증가를 초래한다. 이는 Paik

(2011)에서 지적되었듯이, 두 종류의 무선자원(부반송파, 전력) 중 사용밀도가 상대적으로 작은 자원의 증가는 사용밀도가 큰 자원의 사용밀도를 더욱 증가시키게 되는 것에 기인한다. 이 사실은 호접속에 복수의 자원이 동시에 요구되는 OFDMA 시스템에서 호 봉쇄확률을 감소시키기 위해서는 복수 자원간의 사용밀도를 가능한 한 균등하게 할 필요가 있음을 시사한다.

<Figure 5>는 광대역 및 협대역 핸드오프호의 GoS 수준을 $0.02 (GoS_h = 0.02)$ 로 설정하고, 트래픽 밀도 변화에 따른 최적 목적함수값과 호 종류별 봉쇄확률을 보여준다. 트래픽 밀도가 매우 낮은 경우에는 신규호의 봉쇄확률이 핸드오프호의 봉쇄확률보다 작은 경우가 있으나, 트래픽 밀도가 증가함에 따라 핸드오프호의 봉쇄확률을 GoS 수준으로 만족시키기 위해 신규호의 봉쇄확률은 증가한다. 어떤 경우에도 광대역 호의 봉쇄확률은 협대역 호의 그것 보다는 크다. <Figure 6>는 핸드오프호의 GoS 수준 변화에 따른 호의 봉쇄확률을 보여준다. 그림에서 보듯이 GoS 수준이 큰 경우에도 광대역 핸드오프호의 봉쇄확률은 GoS 수준에 맞추어지는 반면 협대역 핸드오프호의 경우에는 GoS 수준보다 작은 봉쇄확률을 나타내고 있다. 하지만 일정 수준 이하의 GoS 수준에서는 협대역 핸드오프호의 봉쇄확률 역시 GoS 수준과 같아진다. GoS 수준 증가에 따라 급속히 증가하는 광대역 신규호의 봉쇄확률과는 다르게 협대역 신규호의 봉쇄확률은 근소하게나마 감소할 수도 있음을 보여주고 있다.

Figure 5. Blocking Probabilities and Objective Function Values Versus Traffic Intensity ($N=30$, $P_{max}=100$, $GoS_h=0.02$, $r=0.1$)

Figure 6. Blocking probabilities of handoff calls versus GoS ($N=30$, $P_{max}=100$, $\rho=0.1$, $r=0.1$)

5. 결 론

본 연구에서는 OFDMA 무선통신 시스템의 확률적 트래픽 모형을 기반으로 최적 호접속제어를 위한 SDMP 기반 최적화 모형을 제시하였다. 제시된 모형에는 OFDMA 시스템에 도착하는 호접속을 위해 부반송파와 전력자원을 동시에 고려해야 하는 특성과 호 봉쇄확률로 대변되는 GoS 수준에서 핸드오프호와 신규호를 차별화하는 방안을 포함하고 있다. 또한 핸드오프호의 전송속도 감소를 허용함으로써, 동일한 데이터 전송률 제공을 위해 보다 많은 전력을 요구하는 핸드오프호에 무선자원이 과도하게 할당되는 현상을 완화하였다. 핸드오프호의 GoS를 요구수준 이하로 유지하는 제약을 만족하고 무선자원의 사용효율을 최대화하는 최적 호접속제어 모형의 유효성을 보이기 위한 실험이 다양한 입력자료에 대해 수행되었다.

본 연구와 관련하여 다음과 같은 사항에 대한 추가 연구가 필요하다. 핸드오프호의 전송속도 감소의 단계를 일반화하여 광대역 호와 협대역 호의 감소수준을 차별화시킬 필요가 있다. 또한 전송속도 감소가 허용된 핸드오프호의 비율을 제어하는 방안을 모형에 포함시키는 방식에 대한 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- Bohge, M. et al. (2007), Dynamic resource allocation on OFDM systems : an overview of cross-layer optimization principles and techniques, *IEEE Network*, January/February, 53-59.
- Chen, J.-C. and Chen, W.-S. E. (2006), Call blocking probability and bandwidth utilization of OFDM subcarrier allocation in next-generation wireless networks, *IEEE Communication Letters*, 10(2), 82-84.
- Heyman, D. P. and Sobel, M. J. (1984), *Stochastic Models in Operation Research Vol. II : Stochastic Optimization*, New York: McGraw-Hill.
- 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*, 35(3) 77-92.
- Hong, X. et al. (2006), A connection-level call admission control using genetic algorithm for multi-class multimedia services in wireless networks, *Int. J. of Mobile Communications*, 4(1), 1-14.
- Liu, H. and Li, G. (2005), *OFDM-Based Broadband Wireless Networks*, John Wiley and Sons, Inc.
- Mangrulkar, M. and Deshmukh, C. N. (2011), An efficient handoff scheme for multimedia traffic in OFDMA system, *Int. J. of Scientific & Engineering Research*, 2(8), 1-9.
- Ming-ju, L. et al. (2007), Handover with resource pre-allocation in the OFDMA systems, *The J. of China Universities of Posts and Telecommunications*, 14(4), 27-52.
- Mohanram, C. and Bhashyam, S. (2005), A sub-optimal joint subcarrier and power allocation algorithm for multiuser OFDM, *IEEE Communication. Letters*, 9(8), 685-687.
- Paik, C. H. (2008), Study on the call admission control in the broadband OFDMA wireless communication systems, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 34(4), 445-459.
- Paik, C. H. (2011), Queueing traffic model of giving a priority to handoff calls in

- OFDMA wireless communication systems, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, 36(3), 45-59.
- Paik, C. H. and Suh, Y. S. (2011), Generalized queueing model for call blocking probability and resource utilization in OFDM wireless networks, *IEEE Communication Letters*, 12(7), 767-769.
- Rong, B. *et al.* (2008), Call admission control optimization in WiMAX Networks, *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, 37(4), 2509-2522.
- Singh, S. S, Krishnamurthy, V., and Poor, V. (2002), Integrated voice/data admission control for wireless DS-CDMA Systems, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 50(6), 1483-1495.
- Song, G. and Li, Y. (2005), Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-Part I : Theoretical framework, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 4(2), 614-624.
- Tijms, H. C. (1986), *Stochastic Modeling and Analysis: A Computational Approach*, Chichester, U.K., Wiley.
- Wong, C. Y., Cheng, R. S., Lataief, K. B., and March, R. D. (1999), Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, power allocation, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 17(10), 1747-1757.
- Zhang, Y. (2008), Call admission control in OFDM wireless multimedia networks, in *Proc. of IEEE ICC 2008*, 4154-4159.

백천현

연세대학교 경영학과 학사
한국과학기술원 경영과학 석사
한국과학기술원 경영과학 박사
현재 : 동의대학교 산업경영공학과 교수
관심분야 : 통신시스템 분석, 최적화이론,
온실가스 감축모형

정용주

연세대학교 경영학과 학사
한국과학기술원 경영과학 석사
한국과학기술원 산업경영 박사
현재 : 부산외국어대학교 e-비즈니스학과
교수
관심분야 : 이동통신시스템 최적화, 온실
가스 감축모형