

eICIC 가 적용된 이종 셀룰러 망을 위한 부하 분산 기법

홍명훈*, 박승영^oLoad Balancing Scheme for Heterogeneous Cellular Networks
Using e-ICICMyung-hoon Hong*, Seung-young Park^o

요 약

기존의 매크로 셀룰러 망 환경은 공간 재사용의 한계로 인해 최근 급증하는 데이터 트래픽을 제대로 지원할 수 없게 되었다. 이 문제를 극복하기 위해 매크로 셀룰러 망위에 스몰 셀이 설치되어 적극적인 공간 재사용이 가능한 이종 셀룰러 망이 등장하게 되었다. 하지만, 매크로 셀과 스몰 셀 사이의 전송전력 차이로 인해 매크로 셀에 집중된 부하를 스몰 셀로 충분히 분산 시킬 수 없었다. 따라서, 프레임의 일정구간에서 매크로 셀의 전송전력을 차단하는 almost blank subframe (ABS) 와 스몰 셀 커버리지를 확장하여 사용자 부하를 스몰 셀로 강제 분산시키는 cell range expansion을 결합한 enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) 기법이 제안되었다. 그러나, 이러한 eICIC 기법만으로는 효과적인 부하 분산을 달성하기 어렵다. 본 논문에서는 eICIC 기법이 적용된 이종 셀룰러 망 환경에서 비례공정을 향상시키는 부하 분산 기법을 제안한다. 구체적으로 제안된 기법은 탐욕 알고리즘 기반의 사용자의 소속 기지국 전환과 ABS 구간비율 갱신을 재귀적으로 결합하여 부하 분산을 실행한다.

Key Words : eICIC, ABS, cell range expansion, load balance, HetNet

ABSTRACT

Recently, heterogeneous networks consisting of small-cells on top of traditional macro-cellular network has attracted much attention, because traditional macro-cellular network is not suitable to support more demanding mobile data traffic due to its limitation of spatial reuse. However, due to the transmit power difference between macro- and small-cells, most users are associated with macro-cells rather than small-cells. To solve this problem, enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) has been introduced. Particularly, in eICIC, the small-cell coverage is forcibly expanded to associate more users with small-cells. Then, to avoid cross-tier interference from macro-cells, these users are allowed to receive the data during almost blank subframe (ABS) in which macro-cells almost remain silent. However, this approach is not sufficient to balance the load between macro- and small-cells because it only expands the small-cell coverage. In this paper, we propose a load balance scheme improving proportional fairness for heterogeneous networks employing eICIC. In particular, the proposed scheme combines the greedy-based user association and the ABS rate determination in a recursive manner to perform the load balance.

* This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2012R1A1A1001769) and 2013 Research Grant from Kangwon National University (No. 120131440).

• First Author : Kangwon National University, School of Information Technology, hoons@kangwon.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Kangwon National University, School of Information Technology, s.young.park@kangwon.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2014-01-026, Received January 30, 2014; Revised April 4, 2014; Accepted April 22, 2014

I. 서 론

2017 년 모바일 디바이스에서 요구되는 데이터 트래픽은 2012년에 비해 약 13배 증가할 것으로 예상된다^[1]. 하지만, 기존의 매크로 셀룰러 망에서는 공간 재사용의 한계로 인해 기지국과 사용자 사이의 경로감쇠가 상당하여 이러한 용량증가를 감당할 수 없을 것이다. 따라서, 매크로 셀룰러 망 위에 스몰 셀 (예: 마이크로 셀, 피코 셀, 펨토 셀)을 설치하여 기지국과 사용자 사이의 경로감쇠를 줄이고, 결과적으로 용량을 증가시킬 수 있는 이중 셀룰러 망 개념이 등장하였다^[2].

이중 셀룰러 망의 경우, 매크로 셀은 상대적으로 넓은 커버리지 영역을 지원해야 하므로 송신전력이 매우 높다. 따라서, 대부분의 사용자들에게 스몰 셀 기지국에 비해 매크로 셀 기지국에 의한 신호가 더 강하게 수신될 것이므로, 가장 강한 신호가 수신되는 기지국을 소속 기지국으로 선택한다면 대부분의 사용자들이 매크로 셀을 소속 기지국으로 선택하게 되어 매크로 셀과 스몰 셀 사이의 부하 불균형이 발생한다.

이러한 부하 불균형 문제를 해결하기 위해 매크로 셀에 소속된 사용자들을 스몰 셀에 소속되도록 소속 셀을 전환하고 이 때문에 발생하는 간섭문제를 완화시키는 enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) 기술이 도입되었다^[3]. eICIC 기술은 cell range expansion (CRE) 기법과 almost blank subframe (ABS) 기법으로 구성되며, 각 기법은 구체적으로 다음과 같다. CRE 기법은 스몰 셀로부터 사용자에게 수신되는 가장 강한 신호의 강도가 매크로 셀로부터 수신되는 신호의 강도 보다 낮더라도, 두 신호의 차이가 일정한 문턱치 값 이하일 경우 스몰 셀을 소속기지국으로 선택하는 기법이다. 즉, 스몰 셀의 커버리지 영역을 강제로 확장하여 매크로 셀 기지국에 집중된 사용자들을 스몰 셀들로 분산되게 함으로써, 전체 시스템 부하의 균형을 이룰 수 있게 해주는 기법이다. 그러나, CRE 기법을 통해 스몰 셀로 소속 셀을 전환한 사용자는 여전히 매크로 셀 기지국으로부터 수신되는 신호가 가장 강하기 때문에 signal to interference plus noise ratio (SINR) 성능이 저하되는 문제가 발생한다. ABS 기법은 이 문제를 해결하기 위해 적용되는 기법이다. 이는 이중 셀룰러 망을 구성하는 모든 셀의 프레임 구간을 ABS 구간과 non-ABS 구간으로 분할하고, non-ABS 구간동안은 매크로 셀과 스몰 셀이 기존과 같이 동작하고, ABS 구간 동안에는 매크로 셀은 동기화를 위한 최소한의 정보 외에는 어떠한 신호도 전송하지 않도록 한다. 따라서,

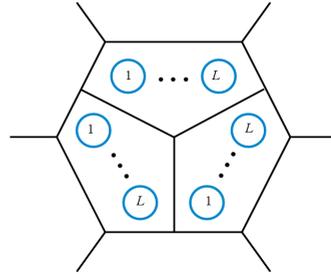


그림 1 이중 셀룰러 망 구조
Fig. 1. Illustration of heterogeneous cellular network structure.

CRE를 통해 스몰 셀로 소속 셀을 전환한 사용자들에게 ABS 구간의 무선 자원들만을 할당한다면 이러한 SINR 성능저하 문제를 해결할 수 있다.

이러한 eICIC 기술과 관련하여 최근 활발한 연구가 진행되고 있다. 구체적으로 eICIC 기법에서 지원하는 ABS 기술의 성능평가를 위한 수학적 모델링을 제시하여 이중 셀룰러 망 분석에 적용하였고^[4], 이중 셀룰러 망 환경에서 간섭완화를 위한 전력제어와 ABS 기술을 혼합운용 함으로써 용량증대가 가능함을 보였다^[5]. 또한, 이중 셀룰러 망 전체의 사용자들의 효용함수의 합을 최대화하는 최적의 ABS 구간비율을 결정하는 알고리즘이 제안되었으며^[6], 전체 사용자 효용함수 합을 최대화 할 수 있도록 최적의 ABS 구간 비율과 스몰 셀 기지국에서 ABS 구간의 자원을 할당 받는 사용자들을 결정하는 알고리즘이 제안되었다^[7,8]. 동적으로 이중 셀룰러 망의 상태가 변화할 때, 그에 따라 적응적으로 ABS 구간비율을 조정하면 시스템의 성능을 안정적으로 유지할 수 있음을 보였다^[9]. 또한, CRE 기법에 사용되는 문턱치 값과 ABS 구간비율에 따라 eICIC 성능이 어떻게 변화하는지 시뮬레이션 결과를 통해 증명한 결과도 발표되었다^[3,10,11]. 최근에는 매크로 셀의 자원 사용율과 인접한 스몰 셀 기지국의 자원 사용율이 균형을 이루도록 CRE 문턱치를 적응적으로 결정한 후, 사용자들의 효용함수의 합을 최대화하는 최적의 ABS 구간을 결정하는 기법이 제안되었다^[12].

그러나 기존의 연구에서는 사용자 부하의 분산을 CRE 문턱치 값만을 이용하여 수행하므로 셀 간 부하 불균형 문제를 해결하는 것에는 한계가 있다. 왜냐하면, 스몰 셀로 소속 셀을 전환할 경우 수율 성능이 증가될 것임에도 불구하고 CRE를 통한 소속 기지국 전환 조건을 만족하지 못해 소속 셀 전환을 할 수 없는 사용자들이 여전히 상당수 존재할 것으로 예상되기 때문이다. 따라서, 전체 사용자들의 비례공정 효용함

수의 합을 최대화하는 최적의 사용자-소속 기지국 조합과 ABS 구간비율을 찾을 수 있다면 기존 연구에서의 성능 한계를 극복할 수 있을 것이다. 그러나, 발생 가능한 사용자의 소속 셀 전환 조합은 사용자 수와 셀의 수에 따라 지수적으로 증가된다. 이와 같이 사용자-소속기지국 조합과 ABS 구간비율을 조정하여 비례공정 효율함수의 합을 최대화하는 문제는 전형적인 배정문제로서 Non-deterministic Polynomial-time (NP) 난해로 알려져 있으며 이러한 문제에 대한 최적해를 구하는 것은 현실적으로 어렵다¹³⁾, 따라서, 본 논문에서는 탐욕 알고리즘 기반의 사용자-소속기지국 전환 과정과 ABS 구간비율을 결정하는 과정을 재귀적으로 결합하여 비례공정 효율함수의 합을 증가시킬 수 있는 준최적기법을 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II 장에서는 eICIC 기술과 시스템 모델에 대해 설명하고, III 장에서는 제안하는 부하 분산 기법을 설명한다. IV 장에서는 제안된 기법의 시스템 레벨 시뮬레이션 결과를 이용하여 성능을 검증하고, 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2.1 이중 셀룰러 망의 구조

본 논문에서는 모든 기지국에서 동일한 무선 자원을 사용하는 time division multiple access (TDMA) 기반의 이중 셀룰러 망을 고려한다. 그림 1은 본 논문에서 고려하는 이중 셀룰러 망의 구조를 나타낸다. 하나의 매크로 셀은 3개의 매크로 섹터 셀로 분할되며, 각 매크로 섹터 셀 영역에는 L 개의 스몰 셀이 존재한다고 가정한다. 또한, 모든 사용자들은 어떤 셀이라도 자유롭게 접속이 가능한 open access 방식으로 운영된다고 가정한다.

그림 2는 ABS 기법을 고려한 매크로 셀과 스몰 셀의 프레임 구조를 나타낸다. 각 프레임은 non-ABS 구간과 ABS 구간으로 분할되며, 전체 프레임에서 ABS 구간이 차지하는 비율을 ABS 구간비율 α ($0 < \alpha < 1$)로 정의한다. 또한, 매크로 셀은 ABS 구간에서 어떠한 신호도 전송하지 않고, 스몰 셀은 모든 프레임 구간에서 신호를 전송한다고 가정한다.

이와 같은 프레임 구조에서, 임의의 매크로 셀에 소속된 각 사용자는 non-ABS 구간의 자원만을 할당 받는다고 가정하자. 그에 반해, 임의의 스몰 셀에 소속된 각 사용자는 non-ABS 구간 혹은 ABS 구간 중 하나를 선택해 해당 구간의 자원만을 할당 받는다고 가

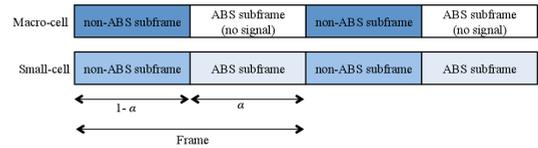


그림 2. ABS 기법을 적용한 프레임 구조
Fig. 2. Illustration of frame structure supporting ABS scheme.

정한다. 즉, non-ABS 구간의 자원을 지원하는 스몰 셀 혹은 ABS 구간의 자원만을 지원하는 스몰 셀에 소속된다는 의미이다. 기호의 단순성을 위해, 전체 기지국들의 집합 \mathcal{B} 는 매크로 셀 기지국들의 집합 \mathcal{M} , non-ABS 구간의 자원을 지원하는 스몰 셀 기지국들의 집합 \mathcal{S} , 그리고 ABS 구간의 자원을 지원하는 스몰 셀 기지국들의 집합 $\hat{\mathcal{S}}$ 로 구성된다고 가정하자 (즉, $\mathcal{B} = \mathcal{M} \cup \mathcal{S} \cup \hat{\mathcal{S}}$). 여기서, \mathcal{S} 와 $\hat{\mathcal{S}}$ 는 물리적으로는 동일한 스몰 셀 기지국들로 구성되어 있으며 단지 non-ABS 구간의 자원을 사용하느냐 ABS 구간의 자원을 사용하느냐에 따라 논리적으로 구분한다. 임의의 사용자의 특정 기지국 소속 여부를 나타내는 변수 $X_{i,k}$ 를 정의한다. 구체적으로 $X_{i,k} = 1$ 일 경우, 사용자 k 가 기지국 i 에 소속되어 있음을 $X_{i,k} = 0$ 일 경우, 그렇지 않음을 나타낸다. 모든 사용자는 반드시 하나의 기지국에만 소속되어 있다고 가정하자. 이는

$$\sum_{i \in \mathcal{B}} X_{i,k} = 1 \tag{1}$$

을 만족한다.

2.2 수신신호 모델

플랫 페이딩 채널 환경이라 가정하며, non-ABS 구간과 ABS 구간의 슬롯 q 에서 사용자 k 가 수신하는 신호는 각각

$$y_k(t) = \begin{cases} \sum_{i' \in \mathcal{M} \cup \mathcal{S}} \sqrt{P_{i'} G_{i',k}} h_{i',k}^q s_{i'}(t) + n_k(t), & q \in \mathcal{Q}_0 \\ \sum_{i' \in \hat{\mathcal{S}}} \sqrt{P_{i'} G_{i',k}} h_{i',k}^q s_{i'}(t) + n_k(t), & q \in \mathcal{Q}_1 \end{cases} \tag{2}$$

이다. 여기서, \mathcal{Q}_0 는 non-ABS 구간의 슬롯 자원 집합, \mathcal{Q}_1 는 ABS 구간의 슬롯 자원 집합, P_i 는 기지국 i 의 송신전력, $s_i(t)$ 는 기지국 i 의 송신신호, $G_{i,k}$ 는 기지국 i 와 사용자 k 사이의 경로감쇄와 음영손실을 포함하는 링크이득, $n_k(t)$ 는 평균 0, 분산 N_0 인 백색 복소

가우시안 잡음, 그리고 $h_{i,k}^q$ 는 q 번째 슬롯에서의 레일리 페이딩 값이며, $E\{h_{i,j}^q\} = C$, $E\{h_{i,j}^q(h_{i',j'}^q)^*\} = \delta(q-q')\delta(i-i')\delta(k-k')$ 을 만족한다. CRE를 고려하여 사용자 k 는 다음과 같은 과정을 거쳐 소속 셀을 결정한다. 사용자 k 는 우선 기지국 π_0, π_1 를 찾는다. 여기서, π 는

$$\lambda_{\pi_0,k} \geq \lambda_{\pi_1,k} \geq \dots \geq \lambda_{\pi_{|\mathcal{M} \cup \mathcal{S}|},k} \quad (3)$$

를 만족하는 permutation 이다. 수식 (3)에서 $\lambda_{i,k} = P_i G_{i,k}$ 이며, $|\mathcal{M} \cup \mathcal{S}|$ 는 집합 $\mathcal{M} \cup \mathcal{S}$ 의 원소의 개수이다. 이때, 다음 조건

$$\pi_0 \in \mathcal{M}, \pi_1 \in \mathcal{S}, \frac{\lambda_{\pi_0,k}}{\lambda_{\pi_1,k}} \leq \Gamma \quad (4)$$

을 만족하지 못하는 경우, 사용자 k 는 매크로 기지국 π_0 를 소속 기지국으로 선택하고, 해당 셀의 non-ABS 구간의 슬롯 자원을 할당 받는다. 여기서, Γ 는 CRE 결정을 위한 문턱치 이다. 따라서, non-ABS 구간의 슬롯 자원을 할당 받는 사용자 k 의 수신신호의 SINR은

$$\gamma_{i,k}^q = |h_{i,k}^q|^2 \bar{\gamma}_{i,k}, \quad i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{S} \quad (5)$$

이다. 여기서, $\bar{\gamma}_{i,k}$ 는 평균 SINR 이며

$$\bar{\gamma}_{i,k} = \frac{P_i G_{i,k}}{\sum_{i' \in \mathcal{M} \cup \mathcal{S}, i' \neq i} P_{i'} G_{i',k} + N_0} \quad (6)$$

로 표현된다. 그에 반해, 조건 (4)를 만족하는 경우, 사용자 k 는 스몰 셀 기지국 π_1 의 ABS 구간의 슬롯 자원을 할당 받는다. 이때, 2.1 절에서 설명한 바와 같이, 사용자 k 가 소속된 기지국은 π_1 와 물리적으로 동일하지만 ABS 구간의 슬롯 자원만을 사용하는 논리적으로 구분되는 기지국이다. 따라서, 해당 수신신호의 SINR은

$$\gamma_{i,k}^q = |h_{i,k}^q|^2 \bar{\gamma}_{i,k}, \quad i \in \hat{\mathcal{S}} \quad (7)$$

이다. 여기서, $\bar{\gamma}_{i,k}$ 는 평균 SINR 이며

$$\bar{\gamma}_{i,k} = \frac{P_i G_{i,k}}{\sum_{i' \in \hat{\mathcal{S}}, i' \neq i} P_{i'} G_{i',k} + N_0} \quad (8)$$

이다. 또한, $\pi_0, \pi_1 \in \mathcal{M}$ 혹은 $\pi_0 \in \mathcal{S}$ 인 경우에는 π_0 를 소속 기지국으로 선택하고, 해당 기지국의 non-ABS 자원을 할당한다.

기지국 i 는 non-ABS 혹은 ABS 구간의 슬롯 q 에서 자신에게 소속된 사용자들 중 다음을 만족하는

$$k^* = \arg \max_{k \in \{k' | X_{i,k'} = 1\}} \frac{\gamma_{i,k}^q}{\bar{\gamma}_{i,k}} \quad (9)$$

사용자 k^* 를 선택하여 슬롯 q 를 할당한다. 즉, 소속 사용자들 중 슬롯 q 에서의 SINR과 평균 SINR의 비가 가장 큰 사용자에게 해당 슬롯을 할당한다. 각 사용자의 SINR을 평균 SINR로 나누어준 확률변수 $\gamma_{i,k}^q / \bar{\gamma}_{i,k}$ 는 지수확률변수이므로^[14], 이 스케줄링 과정은 기지국 i 에 속한 사용자 수 $N_i (= \sum_{k \in \mathcal{U}} X_{i,k})$ 개의 지수확률변수들 중 가장 큰 확률변수를 선택하는 과정과 동일하다. 여기서, \mathcal{U} 는 모든 사용자들의 집합이다. 따라서, ABS 구간비율 α 가 주어졌을 때, 기지국 i 에 소속된 사용자 k 의 평균 수율 $T_{i,k}(\alpha, N_i)$ 는

$$T_{i,k}(\alpha, N_i) = C_i(\alpha) \int_0^\infty \log_2(1 + x \bar{\gamma}_{i,k}) e^{-x} (1 - e^{-x})^{N_i - 1} dx \quad (10)$$

이다^[14]. 여기서, $e^{-x} (1 - e^{-x})^{N_i - 1}$ 는 N_i 개의 지수확률변수들 중 가장 큰 확률변수에 대한 확률밀도함수이며, $C_i(\alpha)$ 는 ABS 구간비율 α 에 따른 non-ABS 및 ABS 구간의 실질 시스템 대역폭으로서

$$C_i(\alpha) = \begin{cases} (1 - \alpha), & i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{S} \\ \alpha, & i \in \hat{\mathcal{S}} \end{cases}$$

이다. 따라서, 수식 (1)을 고려하면 주어진 ABS 구간 비율 α 에 대해 기지국 i 에 소속된 사용자 k 의 수율은

$$R_k(\alpha) = \sum_{i \in \mathcal{B}} X_{i,k} T_{i,k}(\alpha, N_i) \quad (11)$$

이 된다.

III. 제안하는 부하 분산 기법

3.1 부하 분산 기법 알고리즘

서론에서 언급한 바와 같이 이중 셀룰러 망에 eICIC 기술을 도입하여, 매크로 셀에 밀집된 사용자들을 스몰 셀로 분산시켜 기존의 매크로 셀룰러 망에 비해, 전체 사용자 수율 성능을 향상시킬 수 있게 되었다. 그러나, CRE를 이용하여 소속 기지국을 결정하므로 여전히 매우 낮은 수율 성능의 사용자들이 존재할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 사용자들의 소속 기지국 $\{X_{i,k}^*\}$ 과 ABS 구간비율 α 를 조정하여 사용자들의 효용함수 합을 최대화 하는 다음과 같은 문제

$$\{\{X_{i,k}^*\}, \alpha^*\} = \arg \max_{\{X_{i,k}, 0 < \alpha < 1\}} \sum_{k \in \mathcal{U}} U_k(R_k(\alpha)) \quad (12)$$

를 고려한다. 여기서, $U_k(\cdot)$ 는 사용자 k 의 효용함수이다. 효용함수는 목적에 따라 여러 가지 형태를 가질 수 있다. 예를 들면 시스템 수율 즉, 전체 사용자 수율의 합 $\sum_{k \in \mathcal{U}} R_k(\alpha)$ 을 최대화하는 경우, 해당 효용함수는 $U_k(R) = R$ 이 된다. 이 경우, 각 기지국에서 수율이 가장 높은 사용자들에게 모든 자원을 할당한다면 전체 사용자 수율의 합을 최대화 할 수 있을 것이다. 그러나, 이 경우에는 시스템 수율을 최대화할 수 있어도 사용자들 간의 공정성은 만족 시켜줄 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 시스템 수율과 사용자들 간의 공정성의 균형을 유지하기 위해 비례공정 효용함수 $U_k(R) = \log R$ 를 적용하여 비례공정 효용함수의 합 (즉, 사용자 수율의 로그의 합) $\sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha)$ 을 최대화하는 최적화 문제를 고려한다¹⁵⁾.

이 문제의 최적해를 구하기 위해서는 발생 가능한 모든 $\{X_{i,k}\}$ 와 α 에 대해 비례공정 효용함수의 합 $\sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha)$ 를 계산해야 한다. 그러나, 주어진 α 에 대해 발생 가능한 모든 $\{X_{i,k}\}$ 조합의 개수는 $|\mathcal{B}|^U$ 이므로 사용자 수와 기지국의 수가 증가하는 경우 지수적으로 조합의 개수가 증가된다. 이러한 문제는 전형적인 배정문제로서 NP 난해 문제로 알려져 있으며¹³⁾, 이 문제에 대한 최적해를 구하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 준최적해를 구하는 부하 분산 기법을 제안한다. 구체적으로 각 기지국에서 탐욕 알고리즘 기반의 소속 기지국 전환 과정 (즉, 각 기지국의 소속 사용자들 가운데 소속 기지국 전환 시 가장 높은 비례공정 효용함수 합이 증가가 예

상되는 사용자를 선택하여 소속 기지국을 전환한다.)과 비례공정 효용함수 합을 최대화하는 ABS 구간비율 α 를 결정하는 과정을 재귀적으로 결합하여 준최적해를 찾는다.

제안하는 기법의 동작은 다음과 같다. 먼저, 임의의 사용자 k 가 전환 가능한 기지국들의 집합을 \mathcal{C}_k 라 정의한다. 구체적으로 \mathcal{C}_k 는 사용자 k 에 대해 하향링크 수신신호의 SINR이 γ_{th} 보다 큰 기지국들의 집합으로서

$$\mathcal{C}_k = \{i \mid \bar{\gamma}_{i,k} \geq \gamma_{th}\} \quad (13)$$

로 정의한다. 이와 같이 생성된 $\{\mathcal{C}_k\}$ 를 바탕으로 i) 사용자의 소속 기지국 전환, ii) ABS 구간비율 갱신으로 구성된 부하 분산 기법을 실행한다.

사용자의 소속 기지국 전환 : 주어진 ABS 구간비율 α 에 대해, 기지국 i 에 소속된 각 사용자 k 는 M 프레임 주기로 다음 과정을 수행한다. \mathcal{C}_k 에 속한 기지국들 중에서

$$i_k^* = \arg \max_{i' \in \mathcal{C}_k \setminus \{i\}} \Delta_{i,i'}^k \quad (14)$$

를 만족하는 기지국 i_k^* 를 찾는다. 여기서, $\Delta_{i,i'}^k$ 는 기지국 i 가 사용자 이동 과정을 수행하기 전과 수행 후의 로그 수율 합의 차로써

$$\Delta_{i,i'}^k = \left[\begin{aligned} & \sum_{k' \in \{k'' \mid X_{i,k''}=1\} \setminus \{k\}} \log T_{i,k'}(\alpha, N_i - 1) \\ & + \sum_{k' \in \{k'' \mid X_{i',k''}=1\} \cup \{k\}} \log T_{i',k'}(\alpha, N_{i'} + 1) \\ & - \sum_{k' \in \{k'' \mid X_{i,k''}=1\}} \log T_{i,k'}(\alpha, N_i) \\ & - \sum_{k' \in \{k'' \mid X_{i',k''}=1\}} \log T_{i',k'}(\alpha, N_{i'}) \end{aligned} \right] \quad (15)$$

이다. 기지국 i 에 소속된 모든 사용자들에 대하여 $\{i_k^*\}$ 가 구해지면, 이들 중에서 가장 높은 수율 증가가 예측되는 사용자 k^{\S} 를 찾는다. 즉, 사용자 k^{\S} 는

$$k^{\S} = \arg \max_{k \in \{k' \mid X_{i,k'}=1\}} \Delta_{k,i_k^*}^k \quad (16)$$

를 만족한다. 이때, $\Delta_{i,i^*,k^{\S}}^{k^{\S}} > 0$ 이면, $X_{i,k^{\S}}$ 와 $X_{i^*,k^{\S}}$ 를

$$X_{i,k^{\S}} = 0, X_{i^*,k^{\S}} = 1 \quad (17)$$

와 같이 갱신한다. M 프레임이 경과하면 각 기지국에서 사용자 이동 과정이 1회 완료되며, 이러한 과정을 각 기지국에서 Q 회 실행한다. 해당 과정이 완료되면 아래에 설명하는 ABS 구간비율 갱신 과정을 실행한다.

ABS 구간비율 갱신 : ($Q \times M$) 프레임이 경과하여 모든 기지국에서 사용자 이동 과정이 Q 회 실행되면, 다음을 만족하는

$$\alpha^* = \arg \max_{0 < \alpha' < 1} \sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha') \quad (18)$$

α^* 를 찾고 ABS 구간비율 α 를 α^* 로 갱신한다. 갱신된 ABS 구간비율을 적용한 상태에서 다시 사용자의 소속 기지국 전환을 수행한다. 이와 같은 과정을 비례공정 효용함수의 합 $\sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha)$ 의 증가 값이 ϵ 이하일 때까지 반복한다. 여기서, ϵ 는 수렴여부를 판단하는 매개변수로서 매우 작은 값으로 설정한다.

그림 3은 제안된 알고리즘의 흐름도를 보여준다. \tilde{R} 은 전체 알고리즘이 반복 될 때마다 갱신되는 $\sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha^*)$ 값을 저장하기 위한 변수이며, C_i 는 각 기지국 i 의 사용자 이동 횟수를 저장하기 위한 변수이다. 알고리즘이 시작되면 \tilde{R} 값은 $-\infty$, 모든 기지국 각각에 대한 변수 C_i 는 0으로 초기화 한다. 다음으로, 특정 프레임에서 기지국 i 에 소속된 각 사용자 k 에 대해 수식 (14)를 만족하는 기지국 i_k^* (즉, 사용자 k 가 소속 기지국을 이동할 때 가장 높은 수율 증가가 예상되는 기지국)을 찾는다. 이후 기지국 i 에 소속된 사용자 가운데 수식 (16)을 만족하는 사용자 k^{\S} (즉, 소속 셀 전환 시 예상 효용함수 합의 수율 증가 값이 가장 높은 사용자)를 찾고, $\Delta_{i,i^*,k^{\S}}^{k^{\S}} > 0$ 의 조건을 만족할 경우 수식 (17)과 같이 사용자 k^{\S} 의 소속 기지국을 i_k^{\S} 로 전환 시키고 C_i 값을 1 증가시킨다. 반대로 해당 조건을 만족하지 못할 경우 기지국 i 의 사용자 이동은 일어나지 않고 C_i 값만 1을 증가시킨다. 이 과정을 모든 기지국들의 C_i 값이 Q 가 될 때까지 M 프레임을 주기로 반복된다. 이 과정이 완료되면 전체 사용

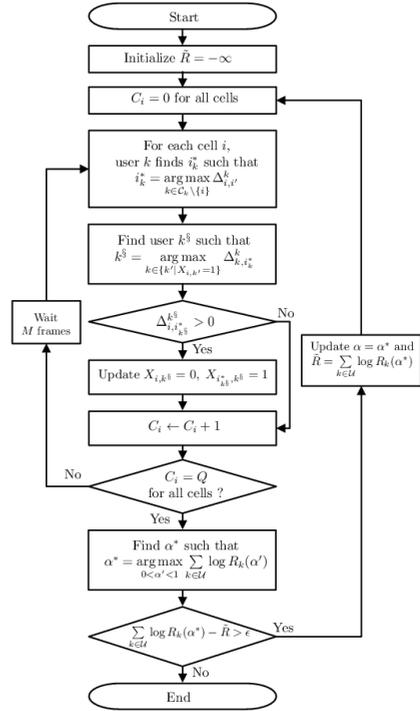


그림 3. 제안 기법 흐름도
Fig. 3. Flow chart of the proposed scheme.

자의 로그 사용자 수율 합 $\sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha')$ 을 최대화하는 α^* 를 찾고, $\sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha^*)$ 과 \tilde{R} 을 비교한다. $\sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha^*) - \tilde{R} > \epsilon$ 의 조건을 만족할 경우, α 와 \tilde{R} 을 각각 α^* 와 $\sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha^*)$ 로 갱신하고 C_i 를 0으로 초기화한 후에 다시 사용자 이동 과정을 수행한다. 이에 반해 해당 조건을 만족하지 않는다면 $\sum_{k \in \mathcal{U}} \log R_k(\alpha^*)$ 값이 수렴했다고 판단하고 알고리즘을 종료하게 된다.

3.2 동작예제

제안된 알고리즘의 동작을 설명하기 위해 기지국 0과 1로 구성된 시스템을 고려하자. 또한, 전체 사용자 수 7명 중에 사용자 0~4는 기지국 0에 소속되어있고, 사용자 5와 6은 기지국 1에 소속되었다고 가정하자. 표 1(a)~(c)는 기지국 0에 소속된 사용자들 가운데 소속 셀 전환 시 가장 높은 수율 증가가 예측되는 사용자의 소속 기지국을 기지국 1로 전환하는 과정을 나타낸다. 먼저 표 1(a)는 ABS 구간비율 α 가 주어졌을 때 기지국 0에 소속된 전체 사용자 수율 값 및 사용자 전환을 수행하기 위해 필요한 사용자 수율 예측 값들을 나타낸다. 구체적으로 두 번째 열부터 다섯 번째

표 1. 제안 기법 동작 예제
Table 1. Operation example of the proposed scheme.

(a) User throughput at cell 0 before the user association update.

User	User throughput at cell 0			$\Delta_{0,1}^k$
	Present	Other user is associated with cell 1	Corresponding user is associated with cell 1	
0	7	7.6	7.2	1.0433
1	5	6	4.4	0.7872
2	10	10.4	9.5	1.0069
3	3	3.8	3.7	1.0707
4	0.5	1	1.5	1.5028

(b) User throughput at cell 1 before the user association update.

User	User throughput at cell 1	
	Present	Other user in cell 0 is associated with cell 1
5	7	6.5
6	5	4.7

(c) User throughput and associated cell after the user association update.

User	Associated cell	User throughput
0	0	7.6
1	0	6
2	0	10.4
3	0	3.8
4	1	1.5
5	1	6.5
6	1	4.7

열들은 각각 현재 사용자 수율, 자신이 아닌 다른 사용자 1명이 기지국 1로 소속 기지국을 전환하였을 때 예측되는 자신의 수율, 자기 자신이 기지국 1로 소속 기지국을 전환하였을 때 예측되는 자신의 수율, 그리고 그 경우에 해당되는 수식 (15)의 $\Delta_{0,1}^k$ 값을 나타낸다. 표 1(b)는 기지국 1에 소속된 전체 사용자의 수율 및 기지국 0에 소속된 사용자가 기지국 1로 소속 기지국을 전환 하였을 경우 예측 되는 사용자 수율 값들을 나타낸다. 구체적으로 두 번째 열은 현재 자신의 수율, 세 번째 열은 기지국 0으로부터 사용자 1명이 기지국 1로 이동해 왔을 경우의 자신의 수율을 나타낸다. 하나의 예로, 사용자 0이 기지국 1로 소속 셀을 전환하는 경우를 고려하자. 표 1(a)로부터 사용자 0은 7.2의 수율 값을 가질 것으로 예상할 수 있으며, 기지국 0에 소속된 나머지 사용자 1~4들은 사용자 수가 한명 감소됨으로 인해 현재 수율 값들보다 약간 증가된 수율 값들을 가질 것으로 예측할 수 있다. 또한, 표 1(b)로부터 기지국 1에 소속된 사용자 5, 6들은 사용자 수가 한 명 증가됨으로 인해 기존의 수율 값들보다 약간 감

소된 수율 값들을 가질 것으로 예상할 수 있다.

표 1(a)를 이용하여, 특정 사용자 이동이 수행되기 전과 후의 기지국 0과 1의 전체 사용자 수율의 로그의 합을 비교하여 각 사용자에게 대해 수식 (15)의 $\Delta_{0,1}^0$ 값을 계산 한다. 예를 들어, 사용자 0의 $\Delta_{0,1}^0$ 값은

$$\begin{aligned} \Delta_{0,1}^0 &= (\log 6 + \log 10.4 + \log 3.8 + \log 1) \\ &\quad + (\log 6.5 + \log 4.7 + \log 7.2) \\ &\quad - (\log 7 + \log 5 + \log 10 + \log 3 + \log 0.5) \\ &\quad - (\log 7 + \log 5) \\ &= 1.0433 \end{aligned}$$

이다. 이와 관련하여 기지국 0에 소속된 사용자들의 $\Delta_{0,1}^k$ 값들을 표 1(a)의 마지막 열에 나타내었다. 이로 부터 가장 높은 수율 증가가 예상되는 사용자는 $\Delta_{0,1}^k$ 값이 가장 큰 사용자 4임을 알 수 있다. 따라서, 사용자 4를 기지국 1로 소속 셀을 전환 시키면 소속 셀 정보와 수율 정보는 표 1(c)와 같이 갱신된다. 여기서, 기지국 0에 소속된 사용자 0~3들의 수율은 기지국 0의 소속 사용자가 1명 감소하였으므로 표 1(a)의 세 번째 열에 해당되는 수율 값을 갖게 되고, 기지국 1에 소속된 사용자 5, 6은 사용자가 1명 증가하였으므로 표 1(b)의 세 번째 열에 해당되는 수율 값을 갖게 된다. 또한, 소속 기지국을 기지국 1로 이동한 사용자 4는 표 1(a)의 네 번째 열에 해당하는 수율 값을 갖게 된다. 이와 같은 과정을 모든 기지국에 대해 사용자 이동 과정을 Q회 수행한다. 이러한 과정이 완료되면 전체 사용자의 수율 정보를 이용하여, 로그 사용자 수율 합이 최대가 되는 새로운 α^* 를 찾아 이를 $\alpha = \alpha^*$ 로 갱신하며, 갱신된 α 를 이용하여 다시 사용자 소속 기지국 전환을 수행한다.

IV. 시스템 레벨 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 환경

본 논문에서 제안하는 기법의 성능을 검증하기 위해 매크로 셀과 스몰 셀로 구성되는 이중 셀룰러 망에 대한 시스템 레벨 시뮬레이션을 수행하였다. 제안하는 기법의 성능을 평가하기 위해 여러 가지 시스템 모델들을 적용할 수 있으나, 본 논문에서는 3GPP에서 이중 셀룰러 망에 적용할 기술들의 성능을 평가하기 위한 목적으로 도입한 모델을 참고하여 시스템 모델을 구성하였다^[16]. 본 논문에서 사용한 시스템 모델이 여러 실질적인 상황들을 반영한 일반적인 시스템 모델

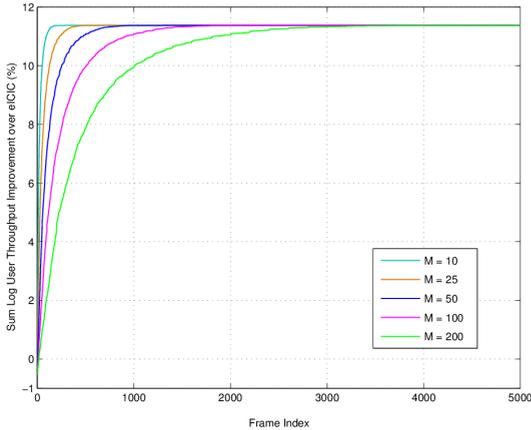


그림 4. eICIC 기법 (CRE = 15dB) 대비 제안 기법(Q = 1)의 로그 사용자 수율 합 향상율의 수렴도
 Fig. 4. Convergence of sum log user throughput improvement of the proposed scheme with Q = 1 over eICIC with CRE = 15dB.

이라고는 할 수 없지만 기존 기법의 성능을 비교, 평가하기 위한 목적으로 사용하였다.

전체 시스템에는 19개의 육각형 구조의 매크로 셀들이 존재하며, 각 매크로 셀은 3 섹터 영역으로 분할된다. 즉, 총 57개의 매크로 셀 섹터가 존재한다. 별도의 언급이 없는 한 각각의 매크로 셀 섹터 영역 내에 L = 4개의 스몰 셀이 임의의 위치에 분포한다고 가정한다. 여기서, 매크로 셀 간 거리는 500m, 매크로 셀과 스몰 셀 간 최소 거리는 75m, 각 스몰 셀 간 최소 거리는 40m 이다. 각 매크로 셀 섹터 영역에 설치된 각 스몰 셀에는 매크로 셀 섹터 영역에 존재하는 전체 사용자들 중 4명의 사용자들이 해당 스몰 셀의 반경 40m 이내의 거리에 균일하게 분포한다. 또한, 매크로 셀과 사용자 간 최소 거리와, 스몰 셀과 사용자 간 최소 거리는 각각 35m, 10m 이다.

일반적으로, 이중 망에서는 스몰 셀의 전송 전력이 증가할수록 해당 스몰 셀의 하위 백분위 사용자 수율이 증가하는 경향이 있는 것으로 알려져 있다^[17]. 하지만 스몰 셀의 전송 전력을 매크로 셀의 전송 전력 수준까지 증가시킨다면 매크로 셀과 스몰 셀 사이에 극심한 간섭이 발생하여 오히려 이중 망의 전체 수율 성능이 저하된다^[18]. 따라서, 스몰 셀은 일반적으로 매크로 셀보다 낮은 전송 전력을 사용해야 한다. 구체적으로 본 논문에서는 3GPP에서 이중 셀룰러 망에 적용할 기술들의 성능을 평가하기 위한 목적으로 도입한 모델을 참고하여 매크로 셀과 스몰 셀의 전송 전력을 각각 46dBm, 37dBm으로 적용하여 9dB의 전송전력 차이가 나도록 설정하였다^[16]. 또한, 매크로 섹터 셀은

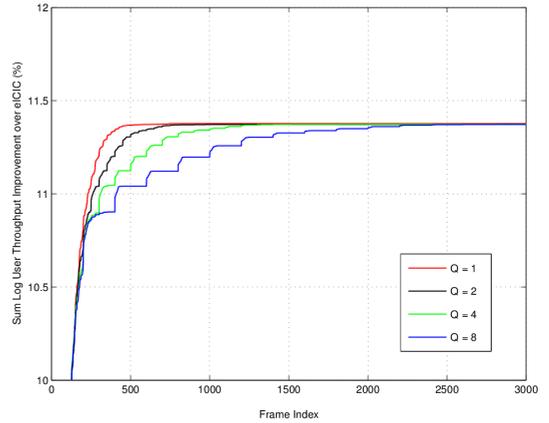


그림 5. eICIC 기법 (CRE = 15dB) 대비 제안 기법(M = 25)의 로그 사용자 수율 합 향상율의 수렴도
 Fig. 5. Convergence of sum log user throughput improvement of the proposed scheme with M = 25 over eICIC with CRE = 15dB.

표 2. 수렴하기 위해 소요되는 ABS 구간비율 갱신 횟수 및 프레임 수

Table 2. Summary of numbers of frames and ABS rate updates to converge.

Q	1	2	4	8
No. of frames to converge	750	1080	1720	3220
No. of ABS rate updates to converge	30	21	18	17

수평 방사각 70°, 수직 방사각 10°, 하향 경사각 15°, 높이 32m, 18dBi 이득 값을 가지는 방향성 안테나를 사용하며, 스몰 셀은 5dBi 의 이득 값을 가지는 전방향성안테나를 사용한다. 사용자의 경우, 안테나 높이는 1.5m 이며, 0dBi 의 이득 값을 가지는 전방향성 안테나를 사용한다.

모든 셀은 주파수 재사용률 1, 프레임 길이 10msec, 유효대역폭 9MHz인 orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) 를 사용한다. 180kHz 대역폭의 physical resource block (PRB) 단위로 자원을 할당하며^[19], 각 PRB 별로 독립적인 스케줄러를 적용한다고 가정한다. 또한, 각 PRB를 구성하는 모든 부반송파는 동일한 플랫폼 페이딩을 겪고, PRB 별로 통계적으로 독립적인 페이딩을 겪는다고 가정한다^[20]. 백색잡음 밀도는 -173dBm/Hz이며, 잡음 지수는 7dB 이라 가정한다. 또한, 사용자들의 소속 기지국 전환이 가능한 기지국들을 구성하기 위한 문턱치 γ_{th} 는 0dB를 적용한다.

기지국과 사용자 사이의 거리가 d (킬로미터)일

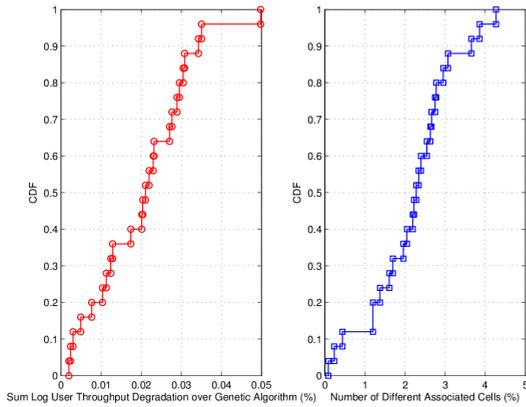


그림 6. 유전자 알고리즘 대비 제안 기법($M = 25, Q = 1$)의 로그 사용자 수율 합 감소율 및 사용자-소속 기지국 변화율의 누적확률분포 함수
 Fig. 6. Empirical cumulative distribution functions of sum log user throughput degradation over genetic algorithm and number of different associated cells ($M = 25, Q = 1$)

때, 매크로 셀 기지국과 사용자 사이, 스몰 셀 기지국과 사용자 사이의 경로 감쇄 모델은 각각 $PL_m(d) = 128.1 + 37.6 \log_{10}(d)$ (dB)과

$PL_s(d) = 140.7 + 36.7 \log_{10}(d)$ (dB)을 적용한다. 각 셀 사이의 음영 상관 값은 0.5 이며, 이때 각 매크로 셀을 구성하는 3개의 매크로 섹터 셀들의 음영 상관 값은 1이라 가정 한다.

성능 측정을 위해 독립적으로 발생시킨 100개의 스몰 셀 및 사용자 분포들에 대한 성능을 평균 하였다. 여기서, 각 분포는 57개의 매크로 섹터 셀, 228개의 스몰 셀, 3420명의 사용자로 구성된다. 제안 기법과의 공정한 성능비교를 위해 eICIC 기법은 주어진 CRE 문턱치 값을 기준으로 사용자-소속 기지국을 결정한 후, 로그 사용자 수율 합 (즉, 비례공정 효율함수 합)을 최대화 하는 ABS 구간비율을 결정하여 적용 하였다^{6,9)}.

4.2 제안 기법의 수렴 특성

그림 4는 임의의 스몰 셀 및 사용자 분포에서 eICIC 기법 (CRE = 15dB)의 로그 사용자 수율 합 (즉, 비례공정 효율함수의 합) 대비 제안 기법 ($Q = 1$)의 로그 사용자 수율 합의 향상율을 보여준다. 구체적으로, 첫 번째 프레임에서 eICIC 기법(CRE=15dB, $\alpha = 0.5$)를 적용한 이후, 제안 기법을 적용하여 시간에 따른 로그 사용자 수율 합의 향상율을 보였다. 각 기지국의 사용자 전환 실행 주기 M 값에 관계없이 로그 수율 합의 일정한 값에 수렴하지만, M 이 감소할수록 빠르게 수렴함을 알 수 있다.

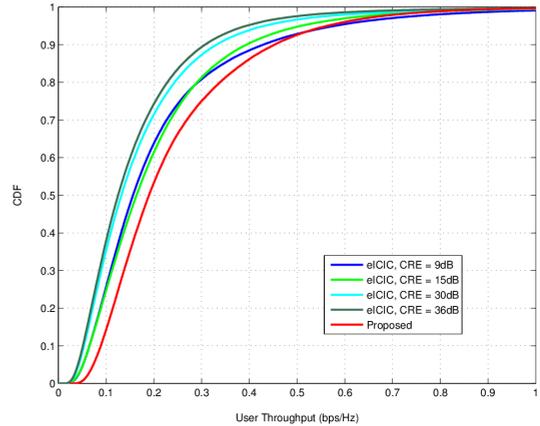


그림 7. 사용자 수율의 누적확률분포 함수($M = 25, Q = 1$)
 Fig. 7. Empirical cumulative distribution function of user throughput($M = 25, Q = 1$)

그림 5는 그림 4와 동일한 조건에서 $M = 25$ 일 때, Q 값에 따른 수렴 속도의 차이를 나타낸다. Q 값이 작을수록 수렴이 더 빠르게 일어남을 확인할 수 있다. Q 는 ABS 구간비율을 갱신하기 전, 각 기지국에서 사용자 전환 과정을 실행하는 횟수이므로, Q 값이 작다는 것은 ABS 구간비율을 자주 갱신한다는 것을 의미한다. 또한, 그림에서 확인할 수 있듯이 ABS 구간비율을 자주 갱신할 경우 수렴속도가 빨라지는 이점이 존재한다. 그러나 사용자의 소속 기지국 전환이 해당 사용자 주변의 기지국들과의 정보 교환을 통해 수행되는데 반해 ABS 구간비율 갱신은 전체 사용자의 수율 정보를 기반으로 수행되므로 너무 자주 ABS 구간 비율을 갱신하게 될 경우 시스템의 부담이 증가한다는 단점이 존재한다.

이와 관련하여 표 2는 Q 값에 따라 수렴하는데 소요되는 프레임 수와 ABS 구간비율 갱신 횟수를 나타내었다. $Q = 8$ 의 경우, $Q = 4$ 인 경우와 비교하여 수렴하는데 약 1.9배의 프레임이 더 소요되는 반면, ABS 구간비율의 갱신 횟수는 거의 차이가 없다. 하지만, $Q = 1$ 인 경우와 비교했을 때, 수렴하는데 소요되는 프레임은 약 4배 정도 증가했으나, ABS 구간비율 갱신 횟수는 50%가 감소했다. 따라서, 시스템의 부담을 줄이면서 적절한 수렴 속도를 보이는 Q 값을 적용할 필요가 있음을 알 수 있다.

4.3 최적해 관련 논의

3.1 절에서 논의한 바와 같이, 사용자 수와 기지국 수가 증가하면 발생 가능한 사용자-소속 기지국 조합이 수는 지수적으로 증가하며, 최적해를 찾기 위해서

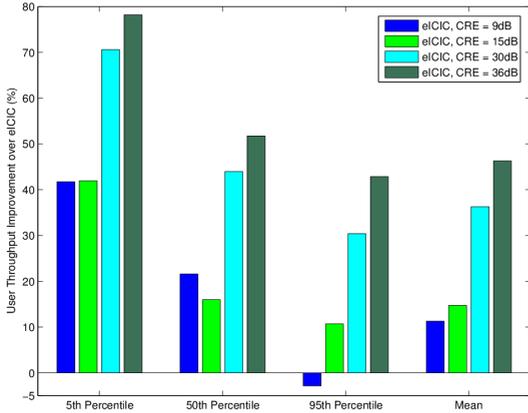


그림 8. eICIC 기법 대비 제안 기법($M = 25, Q = 1$)의 사용자 수율 향상율
 Fig. 8. User Throughput performance improvement over eICIC($M = 25, Q = 1$)

는 모든 조합을 확인해야하므로 최적해를 구하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 최적해를 구하는 대신 경험적으로 최적해에 가까운 해를 구할 수 있는 것으로 알려진 유전자 알고리즘을 적용하고^[21], 그 결과를 제안 기법과 비교하였다. 덧붙여, 유전자 알고리즘은 자연세계의 진화과정에 기초한 계산 모델로서 생물의 진화를 모방한 진화연산의 대표적인 기법이며, 전역 탐색 알고리즘으로서 최적화 문제를 해결하는 기법중의 하나로 알려져 있다^[21]. 본 논문에서 유전자 알고리즘은 다음과 같이 동작한다. 제한된 개수의 임의의 사용자-소속 기지국 조합을 생성하고 각 조합에 대해 로그 사용자 수율 합 (즉, 비례공정 효율함수 합)을 계산한다. 이때, ABS 구간비용 값은 주어진 조합에 대해 로그 수율 합을 최대화하는 값을 선택한다. 이러한 조합들 중 로그 수율 합이 큰 소수의 조합만을 다음 세대에 생존하는 조합으로 선택한다. 다음 세대에는 생존한 조합들, 생존한 조합들을 이용하여 생성한 조합들, 그리고 새로 생성되는 임의의 조합들에 위와 같은 과정을 다시 수행한다. 이러한 과정을 지속적으로 반복하여 최적에 가까운 조합을 찾아낸다.

그림 6은 유전자 알고리즘에 대한 제안 기법의 로그 사용자 수율 합의 감소율 및 사용자-소속 기지국 조합의 차이에 대한 누적확률분포 함수를 보여준다. 여기서, 유전자 알고리즘의 결과는 독립적으로 생성된 25개의 사용자 및 스몰 셀 기지국 분포에 대하여 10,000 세대 동안 실행하여 얻은 결과이다. 두 기법의 사용자-소속 기지국 조합의 차이가 최대 5%까지 발생하는데 비해 로그 사용자 수율 합의 감소율은 최대 약 0.05% 이내 이므로, 제안 기법이 유전자 알고리즘의

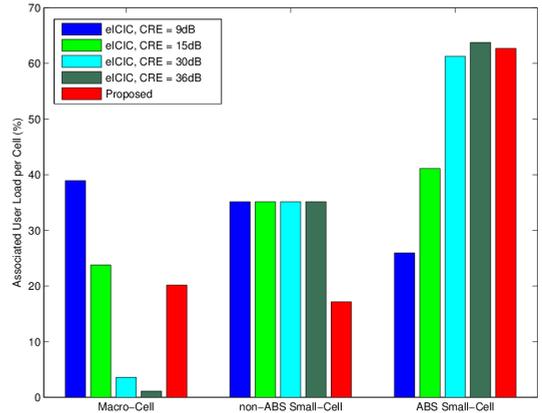


그림 9. 셀 종류별 소속 사용자 비율
 Fig. 9. Associated user load per cell

성능에 상당히 근접했음을 알 수 있다. 그 이유는, 제안 기법의 경우 초기부터 가장 높은 로그 사용자 수율 합이 예상되는 사용자부터 소속 기지국 전환을 수행하므로, 유전자 알고리즘에 의한 추가적인 로그 사용자 수율 합의 증가는 크지 않기 때문이다.

4.4 사용자 수율 성능 비교

본 절에서는 eICIC 기법과의 비교를 위해, 매개변수 $M = 25$ 와 $Q = 1$ 을 제안 기법에 적용하였다. 그림 7은 제안 기법과 다양한 문턱치 값을 적용한 eICIC 기법들의 사용자 수율에 대한 누적확률분포 함수를 보여준다. 4.1 절에서 언급한 바와 같이 eICIC 기법은 로그 사용자 수율 합이 최대가 되도록 ABS 구간비용을 적응적으로 적용했다. 이 그림을 통해, 모든 CRE 문턱치 값에 대한 제안 기법이 대부분의 사용자 수율 성능을 향상시킬 수 있으나, 높은 사용자 수율 영역에서는 제안 기법의 수율 성능이 eICIC 기법의 수율 성능에 비해 약간 열화되었음을 확인할 수 있다.

그림 8과 그림 9는 각각 다양한 CRE 문턱치 값을 적용한 eICIC 기법과 제안 기법의 5 번째, 50 번째, 95 번째 백분위 사용자, 평균 사용자 수율 향상율과 셀 종류별 평균 사용자 비율을 보여준다. 그림 8에서, 제안 기법은 eICIC 기법(CRE = 9dB)에 비해 하위 5 번째, 50 번째, 백분위 사용자 및 평균 사용자 수율 관점에서 약 42%, 22%, 11%로 각각 증가했으며, 하위 95 번째 백분위 사용자 수율은 약 3% 감소했다. CRE 문턱치 값이 9dB인 eICIC 기법을 제외한 경우, 제안 기법은 eICIC 기법에 비해 하위 5 번째, 50 번째, 95 번째 백분위 사용자 및 평균 사용자 수율 관점에서 최소 약 42%, 16%, 11%, 15%의 증가율을 각각 보였다. 또한, 그림 8을 통해서 CRE = 15dB부터, CRE 문턱

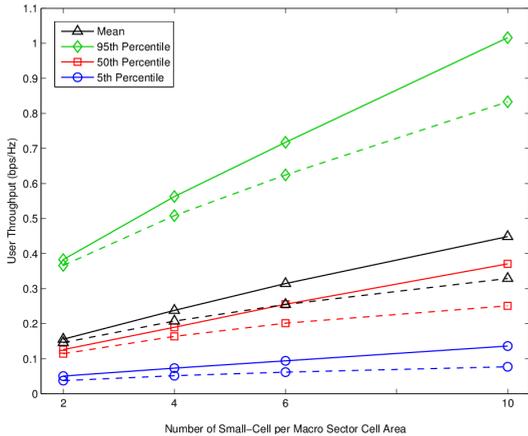


그림 10. 매크로 섹터 셀 당 스몰 셀 개수에 따른 eICIC 기법(CRE = 15dB, 점선) 및 제안 기법(M = 25, Q = 1, 실선)의 수율 성능
 Fig. 10. User throughput performance versus number of small-cells per macro sector cell area. Solid and dashed lines represent the proposed scheme with Q = 1 and M = 25 and eICIC scheme with CRE = 15dB respectively

치 값이 증가할수록 eICIC 기법의 수율성능이 열화되는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 그림 9에서, 제안 기법은 eICIC 기법과 비교하여 최대 약 50%의 매크로 사용자를 스몰 셀로 분산시킴으로써, 매크로 셀의 부하를 감소시켰음을 알 수 있다. 특히, eICIC 기법 (CRE = 36dB)은 제안 기법에 비해 더 많은 사용자를 ABS 구간을 사용하는 스몰 셀로 분산시켰으나, 그림 8의 결과로부터 수율 성능은 오히려 크게 감소하였음을 확인할 수 있다. 이 경우와 같이 CRE 문턱치 값이 극단적으로 증가하게 되면 매크로 셀에서 스몰 셀로 소속 셀을 전환하는 사용자가 크게 증가하여, 오히려 스몰 셀에 너무 많은 사용자가 집중되는 현상이 발생한다. 이로 인해 매크로 셀을 소속 셀로 선택 했을 때, 좋은 수율 성능을 가질 수 있는 다수의 사용자들도 CRE에 의해 강제로 ABS 구간을 사용하는 스몰 셀로 소속 셀을 전환함으로써, 수율 성능이 저하되고, 동시에 매크로 셀에 의한 간섭을 피하고 수율성능 향상을 위해 ABS 구간을 사용하는 스몰 셀로 소속 셀을 전환한 사용자들도 동일한 기지국에 소속된 사용자들의 증가로 인해 오히려 수율성능이 더 감소된다.

또한, CRE 문턱치 값에 따라 eICIC 기법의 매크로 셀과 ABS 구간을 사용하는 스몰 셀의 사용자 비율은 변화하지만 non-ABS 구간을 사용하는 스몰 셀 사용자의 비율은 일정함을 알 수 있다. 그 이유는 CRE 문턱치 값이 증가할수록 ABS 스몰 셀로 소속 셀을 전

환하는 사용자는 증가하게 되지만, 스몰 셀 기지국으로부터 수신신호가 가장 강하게 수신되는 사용자들은 CRE 값에 의한 영향을 받지 않으므로 해당 사용자 비율의 변함이 없기 때문이다.

그림 10은 매크로 섹터 셀 영역 당 스몰 셀 기지국 개수 L에 따른 제안 기법과 eICIC 기법 (CRE = 15dB)의 사용자 수율 성능을 보여준다. 여기서 실선과 점선은 각각 제안 기법과 eICIC 기법의 성능을 나타낸다. 이 그림을 통해, L 값이 증가함에 따라 제안 기법의 사용자 수율 성능이 eICIC 기법의 사용자 수율 성능보다 더 빠르게 증가함을 확인할 수 있다. 구체적으로 L 값이 2에서 10으로 증가하는 동안 하위 5번째 백분위 사용자의 수율은 eICIC 기법 105%, 제안 기법 169% 증가했으며, 하위 50 번째 백분위 사용자의 수율은 eICIC 기법 120%, 제안 기법 190%로 증가했다. 그리고 하위 95 번째 백분위 사용자 수율에서는 eICIC 기법 127%, 제안 기법 165%의 증가율을 보이고 있으며, 평균 사용자 수율 관점에서는 eICIC 기법 125%, 제안 기법 188% 증가율을 나타내었다. 이를 통해서, L 값이 증가할수록 제안 기법이 사용자 부하를 더욱 효과적으로 분산시킬 수 있음을 의미한다.

V. 결 론

본 논문에서는 eICIC 기법이 적용된 이중 셀룰러 망에서 매크로 셀에 집중된 사용자 부하를 스몰 셀로 분산시켜, 사용자들에게 비례적으로 공정하게 서비스를 제공하는 부하 분산 기법을 제안하였다. 기존의 eICIC 기법에서는 CRE 만을 이용하여 사용자 부하를 분산시켰기 때문에 그 성능에 한계가 있었다. 이를 해결하기 위해 제안된 기법은 탐욕 알고리즘 기반의 소속 기지국 전환과 ABS 구간비율 갱신을 재귀적으로 결합하여 전체 사용자 수율의 비례공정을 향상시켰다. 구체적으로, 시스템 레베 시뮬레이션을 통해 제안된 기법이 기존의 eICIC 기법에 비해 5 번째 백분위 사용자 수율이 최소 약 42% 이상 증가했음을 확인하였다. 또한, 스몰 셀 기지국이 증가함에 따라 사용자 부하를 더욱 효과적으로 분산시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 모든 사용자의 위치가 정적이라는 가정 하에 연구되었다. 따라서, 사용자의 위치가 실시간으로 변화하는 환경을 고려한 연구가 추가적으로 필요할 것이다.

References

- [1] Cisco, Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2012-2017, Cisco white paper, Feb. 2013.
- [2] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, "LTE-advanced: Next-generation wireless broadband technology," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 10-22, Jun. 2010.
- [3] B. Soret, H. Wang, K. I. Pedersen, and C. Rosa, "Multicell cooperation for LTE-Advanced heterogeneous network scenarios," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 27-34, Feb. 2013.
- [4] S. Y. Kim, H. W. Lee, and S. W. Ryu, "Analytical evaluation of almost blank subframes for heterogeneous networks," *J. KICS*, Vol. 38, no. 4, pp. 240-246, Apr. 2013.
- [5] H. J. Kim, Y. H. Jo, J. C. Lim, and D. H. Hong, "Interference mitigation by joint employment of power control and almost blank subframes in heterogeneous networks," *J. KICS*, vol. 39, no. 1, pp. 62-64, Jan. 2014.
- [6] S. Lembo, P. Lunden, O. Tirkkonen, and K. Valkealahti, "Optimal muting ratio for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in HetNets," in *Proc. IEEE ICC*, Budapest, Hungary, pp. 1145-1149, Jun. 2013.
- [7] J. Pang, J. Wang, D. Wang, G. Shen, Q. Jiang, and J. Liu, "Optimized time-domain resource partitioning for enhanced inter-cell interference coordination in heterogeneous networks," in *Proc. IEEE Wirel. Commun. Net.*, Shanghai, China, pp. 1613-1617, Apr. 2012.
- [8] L. Jiang and M. Lei, "Resource allocation for eicic scheme in heterogeneous networks," in *Proc. IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, Sydney, Australia, pp. 448-453, Sept. 2012.
- [9] S. Vasudevan, R. N. Pupala, and K. Sivanesan, "Dynamic eICIC - a proactive strategy for improving spectral efficiencies of heterogeneous LTE cellular networks by leveraging user mobility and traffic dynamics," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 10, pp. 4956-4969, Oct. 2013.
- [10] S. E. Kim, K. S. Kim, and E. K. Hon, "Analysis on interference control in heterogeneous networks," *J. KICS*, vol. 38, no. 3, pp. 268-276, Mar. 2013
- [11] Y. Wang, B. Soret, and K. I. Pedersen, "Sensitivity study of optimal eICIC configurations in different heterogeneous network scenarios," in *Proc. IEEE Commun.*, Ottawa, ON, pp. 6792-6796, Jun. 2012.
- [12] A. Tall, Z. Altman, and E. Altman, "Self organizing strategies for enhanced ICIC (eICIC)," submitted to WiOpt 2014, Jan. 2014, from <http://arxiv.org/pdf/1401.2369v1.pdf>
- [13] T. F. Gonzalez, *Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics*, Chapman & Hall, 2007.
- [14] Y. Choi and S. Bahk, "Cell-throughput analysis of the proportional fair scheduler in the single-cell environment" in *Proc. IEEE VTC*, vol. 56, no. 2, pp. 766-778, Mar. 2007.
- [15] P. Viswanath, D. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277-1294, Jun. 2002.
- [16] 3GPP TR 36.814 v9.0.0, "Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)," Technical Report 3GPP, Mar. 2010.
- [17] Y. Wang and K. I. Pedersen, "Performance analysis of enhanced inter-cell interference coordination in LTE-advanced heterogeneous network," in *Proc. IEEE VTC*, Yokohama, Japan, pp. 1-5, May 2012.
- [18] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, "A survey on heterogeneous networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 10-21, Jun. 2011.
- [19] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA based Radio Access*, Wiley, 2009.
- [20] P. Svedman, S. K. Wilson, L. J. Cimini, Jr., and B. Ottersten, "Opportunistic beamforming and scheduling for OFDMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 5, pp. 941-952, May 2007.
- [21] S. N. Sivanandam and S. N. Deepa, *Introduction*

to Genetic Algorithm, Springer, 2007.

홍 명 훈 (Myung-hoon Hong)



2013년 2월: 강원대학교 전자
통신공학과 졸업
2013년 3월~현재: 강원대학교
전자통신공학과 석사
<관심분야> 무선 네트워크, 이
동통신, LTE

박 승 영 (Seung-young Park)



1997년 2월: 고려대학교 전파공
학과 졸업
1999년 2월: 고려대학교 통신시
스텝학과 석사
2002년 8월: 고려대학교 전파공
학과 박사
2002년 11월~2003년 3월: 고려
대학교 BK21 정보통신사업단 박사후연구원
2003년 4월~2005년 12월: 삼성전자종합기술원 책임
연구원
2006년 1월~2007년 2월: 미국 퍼듀대학교 박사후연
구원
2012년 1월~2013년 1월: 미국 퍼듀대학교 방문교수
2007년 3월~현재: 강원대학교 전자통신공학과 부교수
<관심분야> 이동통신, 다중안테나/다중사용자 통신,
무선자원관리