

# 백홀 용량이 제한된 이기종 네트워크에서 QoS를 고려한 셀 선택 기법

양 찬 석\*, 강 충 구<sup>o</sup>

## QoS-Oriented User Association in HetNet with a Backhaul Constraint

Chan S. Yang\*, Chung G. Kang<sup>o</sup>

요 약

셀 커버리지 향상과 단위 면적당 무선 용량의 증대를 위해 셀룰러 이동 통신 시스템에 다양한 크기와 전송전력을 갖는 다수의 네트워크가 혼재하는 이기종 네트워크의 개념이 도입되고 있다. 본 논문에서는 이기종 네트워크의 하향링크에서 모든 셀이 동일한 무선 자원을 공유하고, 일부 소형 셀에서는 백홀 링크의 용량에 제한이 있는 경우를 고려한다. 이 때 모든 사용자의 주어진 트래픽을 정해진 시간 내에 전송해야 하는 QoS요구 사항을 만족시키면서 동시에 전체 시스템에서의 무선 자원 사용량을 최소화 시킬 수 있는 셀 선택 문제를 정식화하고, 그 최적 해를 찾기 위한 분산 알고리즘을 제안한다. 해당 알고리즘은 일부 소형셀의 백홀 링크에서 병목현상이 발생하였을 경우, 백홀 용량에 여유가 있는 인접 셀로 사용자를 오프로딩 하도록 동작함으로써 기존 방식과 대비할 때 제한된 무선 자원 및 백홀 링크 용량에 맞추어 더 많은 사용자의 QoS를 지원할 수 있음을 확인한다.

**Key Words** : HetNet, User Association, Quality of Service (QoS), Backhaul Capacity

ABSTRACT

Heterogeneous network (HetNet) with the various types of cells, e.g., with the different cell size and transmit power, has been introduced to improve the cell coverage and areal capacity in cellular mobile communication system. In this paper, we consider a practical situation in which all cells share the same wireless resource while some of them have a limited backhaul capacity. More specifically, we formulate a cell association problem that utilizes the minimum wireless resource while satisfying the quality of service (QoS) of all users in terms of their transmission time constraint, and propose a distributed algorithm to find the optimal solution. In the event of bottleneck at the backhaul link in some small cells, the proposed algorithm off-loads some users to the adjacent cell with the less congested backhaul capacity. Finally, we verify that the proposed algorithm supports the more numbers of users to satisfy the specified level of QoS than the conventional user association scheme under the limited access and backhaul capacities.

\* This work is supported in part by the Seoul R&BD Program [WR080951, Establishment of Bell Labs in Seoul/Research of Services & Application for Broadband Convergent Networks and their Enabling Sciences].

• First Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Korea University, hello828@korea.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Korea University, ccgkang@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호: KICS2014-09-350, Received September 12, 2014; Revised October 10, 2014; Accepted October 10, 2014

## I. 서 론

셀룰러 이동통신 시스템에서 다양한 서비스의 출현과 트래픽 증가에 따라 최대 전송률을 증가시키는 것뿐만 아니라 단위 면적당 시스템 용량을 늘리기 위한 노력이 지속되고 있다. 기존의 셀룰러 이동 통신에서는 이러한 요구 사항을 만족시키기 위해 링크(link) 관점에서 주파수 효율성(spectral efficiency)을 극대화하는 방향으로 다양한 연구가 진행되어 왔으나, 이러한 관점은 그 이론과 구현의 한계가 존재한다<sup>[1]</sup>. 이를 극복하기 위한 방안으로 매크로셀(macro-cell) 내에 다수의 소형셀(small base station)을 밀도 있게 설치하여 공간적으로 무선 자원의 재사용률을 높임으로써 시스템 용량을 증대시키는 이기종 네트워크(heterogeneous network: HetNet)가 도입 되었고, 이는 5G 이동 통신에서도 단위 면적당 용량 증대를 위한 핵심 기술로 고려될 것이다<sup>[2]</sup>.

이기종 네트워크는 매크로셀 내에 다양한 송신 전력과 커버리지를 갖는 마이크로셀, 피코셀, 릴레이 등의 소형셀들이 동일한 대역에서 동작함으로써 커버리지 향상과 동시에 오프로딩(off-loading)을 통하여 단위 면적당 무선 용량을 증대 시킬 수 있다. 이러한 이기종 네트워크에서는 셀 별로 송신 전력이 다르므로 그림 1에서 보는 바와 같이 셀 별로 커버리지(coverage)가 크게 차이가 난다. 예를 들어, 매크로셀의 경우에는 다른 소형 셀과 비교하여 상대적으로 커버리지가 크므로 다수의 사용자가 집중될 수 있다. 반면 소형셀은 매크로셀에 대비하여 상대적으로 커버리지가 작으므로 접속되는 사용자의 수가 제한될 것이다. 특정 셀에 다수의 사용자가 집중될 경우 제한된

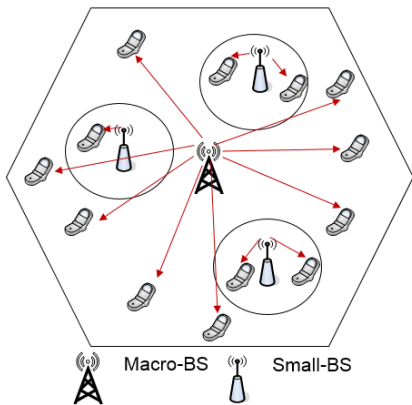


그림 1. 이기종 네트워크 구조  
Fig. 1. Heterogeneous Network structure

무선 자원을 분할하여 할당하게 되므로 사용자당 수율은 떨어지게 된다. 따라서, 사용자 입장에서 신호 품질이 떨어지더라도 부하가 낮은 소형 기지국에서 서비스 받는 것이 수율 측면에서 유리할 수 있다. 따라서 이기종 네트워크에서 각 사용자는 자신에게 할당될 수 있는 무선 자원의 가용성을 고려하여 적절한 셀을 선택해야 한다.

한편 이기종 네트워크에 존재하는 일부 소형셀은 비용 문제로 인해 매크로셀과 같은 대용량의 백홀 링크를 제공 받기 힘들 수 있다<sup>[3]</sup>. 또한 무선 백홀(wireless backhaul)을 사용하는 릴레이 기지국의 경우에는 제한된 무선 자원으로 인해 무선 백홀 용량이 제약될 수 있다. 즉, 셀과 단말간의 병목 현상이 무선 접속 링크(access link)가 아닌 백홀 링크에서 발생할 수 있으며, 이 경우에는 무선 자원 및 백홀 용량을 동시에 고려하면서 적절한 셀 선택 기법이 요구된다<sup>[4]</sup>. 본 논문에서는 이기종 네트워크의 하향링크에서 모든 셀이 동일한 무선 자원(co-channel)을 공유하고, 무선 릴레이(wireless relay)와 같이 일부 소형 셀에서는 백홀 용량(backhaul capacity)의 제한이 있는 경우를 고려한다. 또한 각 사용자 별로 주어진 데이터 트래픽을 일정한 수준의 품질로 처리해야 한다고 가정한다. 모든 사용자의 품질(Quality of Service: QoS)를 만족시키면서 동시에 전체 시스템에서의 무선 자원 사용량을 최소화 시킬 수 있는 셀 선택 문제를 정식화하고, 그 최적 해를 찾기 위한 분산 알고리즘을 구현한다. 즉, 이 알고리즘을 통해 각 사용자들은 개별적으로 자신의 접속할 셀을 선택할 수 있다. 해당 알고리즘은 제한된 무선 자원으로 모든 사용자들의 품질을 일정 수준으로 유지하면서, 동시에 전체 시스템의 무선 자원 사용량을 최소화하도록 동작한다. 또한 일부 소형 셀의 백홀 링크에서 병목현상(bottleneck)이 발생하였을 경우, 백홀 링크의 용량에 여유가 있는 인접 셀로 사용자를 오프로딩(offloading)하도록 동작함으로써 기존 방식과 대비할 때 제한된 무선 자원 및 백홀 용량에 맞추어 QoS를 만족할 수 있는 사용자의 수를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문의 시스템 모델 및 이기종 네트워크에서 사용자의 셀 선택 기법에 관한 기존의 관련 연구들을 살펴본다. III장에서는 제한된 무선 용량과 백홀 용량의 제약을 동시에 고려한 최적화 문제를 정식화하며, 그 해를 찾기 위한 분산 알고리즘을 제시한다. IV장에서 시뮬레이션을 통해 제시한 알고리즘의 성능을 분석하며, 기존의 방식과 그 성능을 비교한다. 마지막으로 V장에서

본 논문의 결론을 맺는다.

문제를 아래와 같이 정식화하였다.

## II. 이기종 네트워크의 시스템 모델 및 기존 연구

### 2.1 시스템 모델

본 논문에서는  $K$ 개의 계층을 갖는 이기종 네트워크에서 하향링크를 고려하며, 시스템 전체 사용자의 수와 기지국의 수를 각각  $M$ 과  $N$ 이라고 하자. 모든 기지국이 동일한 무선 채널을 공유하며, 동일한 셀 내의 접속된 사용자 간에는 자원의 재사용 없이 독립적인(직교적인) 자원이 할당된다고 가정한다. 한편, 각 사용자에게 전송할 트래픽이 항상 존재하는 full buffer model과 그렇지 않고 간헐적으로 발생하는 burst traffic model을 각각 고려할 수 있다. 각 기지국에서의 전체 무선 자원량은 주파수 축으로 대역폭  $B$  (Hz)만큼, 그리고 시간 축으로  $\tau$ 만큼 제한하여  $B \cdot \tau$  (Hz · sec)의 크기로 동일하게 주어지고, 무선 자원을 블록 단위가 아닌 연속적인 값으로 할당 받을 수 있다고 가정한다. 기지국의 백홀 링크 용량은  $C_j$ 로 제한된다고 가정한다(백홀 용량의 제약이 없을 경우에는  $C_j = \infty$ ). 또한 이진 변수  $x_{ij}$ 를 이용하여 사용자  $i$ 와 기지국  $j$ 의 접속 여부를 나타낸다( $x_{ij} = 1$ 이면 사용자  $i$ 는 기지국  $j$ 와 접속되며,  $x_{ij} = 0$ 이면 이들간에는 접속되지 않음). 이때 모든 사용자들의 셀 선택 결과는  $x_{ij}$ 로 구성된 접속 행렬  $\mathbf{X}$ 로 나타낼 수 있다(즉,  $\mathbf{X} = [x_{ij}]_{M \times N}$ ). 기지국  $j$ 에 접속된 사용자  $i$ 의 대역 효율성은  $c_{ij}$  (bps/Hz)라고 하자. 한편, 사용자의 기지국 선택 과정에서 각 기지국과 단말 사이의 채널은 변하지 않는다고 가정한다(즉,  $c_{ij}$ 은 상수).

### 2.2 기존 연구

[5]와 [6]에서는 모든 단말의 트래픽에 대해서 full buffer traffic model을 가정하며, 이때 각 사용자에게 대해 어떤 수준의 서비스 품질도 고려하지 않는다. [5]에서는 사용자  $i$ 가 하향 링크에서 다수의 셀로부터 서비스 받을 수 있다 가정하였다. 또한 비례공정성 (proportional fairness)을 만족시키기 위해 사용자가 할당 받는 무선자원의 양은  $B / \sum_k x_{kj}$ 와 같다. 즉, 총 무선 자원  $B$ 는 셀에 연결된 사용자들간 균등하게 분배되며, 백홀 용량에 대한 제약은 없다고 가정한다 ( $C_j = \infty$ ). 이때 이기종 네트워크에서 비례 공정성을 만족하기 위한 셀 선택 및 자원 할당을 위한 최적화

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{X}} \sum_i \sum_j x_{ij} \log \left( \frac{B \cdot c_{ij}}{\sum_k x_{kj}} \right) \\ & \text{subject to } 0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall i, j \\ & \sum_j x_{ij} = 1, \forall i \end{aligned} \tag{1}$$

(1)에서 목적 함수는 시스템 내의 모든 사용자들에 대해서 log-scale 전송률의 합이며, 정수  $x_{ij}$ 를 0과 1 사이의 실수값으로 완화했다. 여기서,  $\sum_j x_{ij} = 1$ 의 제약 조건은 각 사용자  $i$ 가 단 하나의 기지국에만 접속할 수 있음을 의미한다. [5]에서는 (1)에 대한 해를 구하기 위해 dual decomposition 기법 [8]에 근거한 분산 알고리즘을 제시하였다. 한편, [6]에서는 [5]와 같은 시스템 모델에 대해 비례공정성을 고려하지 않고 채널이 좋은 사용자에게 더 많은 무선 자원을 할당하는 무선 자원 스케줄링 기법을 가정하였다. 즉, 각 사용자는 상대적인 채널 대역 효율성에 비례해서  $(B \cdot c_{ij}) / (\sum_k x_{kj} \cdot c_{kj})$ 만큼의 무선자원을 할당 받게 된다. 이러한 가정 하에 일부 기지국의 백홀 용량 제한을 고려하여 네트워크 용량을 최대화할 수 있는 사용자의 셀 선택을 위한 Heuristic 알고리즘으로 제안하였다. 이때, 일부 기지국은 제한된 백홀 용량 내에서 서비스해야 하므로 셀에 연결된 사용자들에 제공되는 무선 수율의 합을 백홀 용량에 맞게 낮추도록 동작할 것이다. 이와 같이 무선 속도의 합을 낮추기 위해서는 인접 셀의 사용자를 해당 셀로 연결시키게 된다. 즉, 제한된 백홀 용량을 넘지 않기 위해 추가적으로 사용자를 더 연결함으로써 연결된 사용자들의 무선 수율의 합을 낮추도록 동작할 것이다. 한편 인접 셀 관점에서 보면, 사용자 수가 감소함으로써 해당 셀에서 발생한 무선 용량은 증가하므로 이는 목적 함수에 맞게 동작한다고 볼 수 있다. 하지만 실제 서비스에서는 사용자의 데이터가 비연속적으로 불규칙하게 발생하며, 서비스에 따라서는 트래픽이 정해진 수준의 품질로 처리되어야 하는 사용자 서비스 품질 (quality of service: QoS) 요구 사항이 존재할 수 있다. 불규칙한 형태의 트래픽이 발생할 때 이와 같은 QoS 요구사항을 고려하면, 백홀 용량을 만족하기 위해 [6]에서와 같이 셀에 접속되는 사용자의 수를 제어하는 것은 불

가능하다. 즉, 특정 수준의 QoS를 보장해야 하는 사용자의 수가 증가하게 되면 제한된 무선자원 및 백홀 용량으로는 QoS를 보장할 수 없는 상황이 발생할 수 있기 때문이다.

한편 [7]에서는 백홀 용량을 고려하지 않고 비연속적으로 불규칙하게 발생하는 트래픽을 고려하면서 모든 셀 사용자의 QoS를 만족하기 위한 셀 선택 최적화 문제를 무선 자원 관점에서 아래와 같이 정식화하였다.

$$\max_x \sum_i \sum_j x_{ij} \frac{p_i}{c_{ij}} \cdot \log \left( \frac{c_{ij}}{\sum_k x_{kj} \cdot (p_k / c_{kj})} \right) \quad (2)$$

subject to  $0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall i, j$

$$\sum_j x_{ij} = 1, \quad \forall i$$

$$\sum_i x_{ij} \cdot \frac{p_i}{c_{ij}} \leq B\tau, \quad \forall j$$

여기서  $p_i$ 는 사용자  $i$ 의 총 트래픽(bits)을 나타내며,  $x_{ij} \cdot p_i/c_{ij}$ 는 사용자  $i$ 의 트래픽을 처리하기 위해 셀  $j$ 에서 소모되는 시간과 주파수 축에서의 무선 자원량을 의미한다. 그리고  $\sum_i (x_{ij} \cdot p_i/c_{ij}) \leq B\tau$ 의 제약 조건은 각 셀에서 사용 가능한 무선 자원량을 주파수 축으로 대역폭  $B$ 만큼과 시간 축으로  $\tau$ 만큼 제한하고자 한다. 즉,  $B$  (Hz)의 대역폭이 주어졌을 때  $\tau$  (sec)의 지연시간 내에서 주어진 트래픽  $p_i$ (bits)을 지원하고자 한다. 목적함수는 사용자  $i$ 가 셀  $j$ 에서 사용한 무선자원의 양에 대해서 그 효율성(load efficiency)이 가중치로 부가된 값이다. 여기서, 효율성은  $\log \left( c_{ij} / \left( \sum_k x_{kj} (p_k / c_{kj}) \right) \right)$ 으로 주어지며, 이는 무선자원의 양과 대비한 채널의 효율성을 나타내는 것이다. 즉, 이 가중치를 통해 동일한 무선 자원을 사용하더라도 대역 효율성이 좋은 무선 자원에 우선권을 주겠다는 의미이다. 한편 [7]은 [5]에서와 같이 백홀 용량의 제약을 고려하지 않고 dual decomposition 기법에 근거하여 (2)의 해를 구할 수 있는 분산 알고리즘 제시하였다. 즉, 기존의 연구에서는 burst model에서 백홀 용량의 제약이 존재할 때 사용자 QoS를 지원할 수 있는 셀 선택 문제는 고려된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 [5]의 시스템 모델에서 백홀 용량의 제

약을 고려하면서 사용자 QoS를 지원할 수 있는 셀 선택 문제를 살펴보고, 이때 필요한 설계 기준을 제시하고자 한다. 또한 [6]과 같이 full buffer traffic model에서 백홀 용량을 고려한 사용자 셀 선택 기법과 그 특성을 비교 분석하고자 한다.

### III. 백홀 용량 제약을 고려한 QoS 지원을 위한 셀 선택 기법

#### 3.1 문제의 정식화

본 절에서는 burst traffic model에서 제한된 대역폭으로 정해진 시간 내에 사용자 트래픽을 모두 처리할 수 있는 셀 선택 기법을 고려하고자 한다. 이와 같이 주어진 제약 조건을 만족할 수 있는 범위 내에서 사용자 트래픽을 모두 처리하는 것을 사용자의 QoS를 지원하는 것이라고 볼 수 있다. 따라서, QoS를 고려한 제약 조건은 [7]에서와 동일하다. 한편, 셀  $j$ 에 접속된 모든 사용자 트래픽은 셀  $j$ 의 백홀 용량에 의해 제한되므로 모든 셀에서  $\sum_i x_{ij} p_i \leq C_j \tau$ 의 제약 조건을 만족해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 다음과 같이 주어진 백홀 용량과 QoS 제약을 만족하면서 소모되는 무선 자원량을 최소화하는 셀 선택 문제를 정식화한다.

$$\min_x \sum_i \sum_j x_{ij} \frac{p_i}{c_{ij}} \quad (3)$$

subject to  $0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall i, j$

$$\sum_j x_{ij} = 1, \quad \forall i$$

$$\sum_i x_{ij} \frac{p_i}{c_{ij}} \leq B\tau, \quad \forall j$$

$$\sum_i x_{ij} p_i \leq C_j \tau, \quad \forall j$$

위의 문제에서 해당되는 사용자의 QoS를 모두 만족시키고 남은 무선 자원은 best effort 서비스 사용자를 위해 쓰인다고 가정한다. 즉, 각 셀의 전체 무선 자원은 항상 사용된다고 가정한다. 또한 상기 문제의 해를 구하는 과정에서 셀과 사용자 사이의 채널은 변하지 않는다고 가정하자(즉,  $c_{ij}$ 를 상수로 처리함).

$\sum_i x_{ij} \cdot p_i/c_{ij}$ 는 사용자  $i$ 의 총 트래픽  $p_i$ 를 처리하

기 위해 소요되는 무선 자원량의 총 합을 의미하며, 본 문제는 모든 사용자들의 개별 트래픽을 처리하기 위한 무선 자원 사용량의 합을 최소화하도록 셀을 결정함으로써 무선 자원을 최대한 효율적으로 쓰도록 하기 위한 것이다. [7]에서와 같이 각 셀에 접속된 사용자들이 전송해야 할 트래픽을 정해진 전송 시간 내에 처리할 수 있도록  $\sum_i x_{ij} \cdot p_i / c_{ij} \leq B\tau$ 의 제약 조건을 고려한다. 또한, 백홀 용량이 제한되어 있는 셀을 고려하기 위해 셀  $j$ 에서 발생된 트래픽의 총량  $\sum_i x_{ij} \cdot p_i$ 이 전송 지연 시간 동안 백홀 링크에서 제공할 수 있는 용량을 넘지 못하도록 제약 조건을 둔다.

### 3.2 분산 알고리즘

(3)의 최적화 문제는 [5] 및 [7]과 같이 목적함수가 convex임과 동시에 결정 변수  $x_{ij}$ 가 합의 형태로 엮인 2개의 제약 조건,  $\sum_i x_{ij} \cdot p_i / c_{ij} \leq B\tau$ 와  $\sum_i x_{ij} \cdot p_i \leq C_j\tau$ 을 포함한다. 이 경우, [5] 및 [7]과 마찬가지로 dual decomposition 기법을 이용하여 해당 조건을 완화(relaxation)시킴으로써 문제를 쉽게 접근할 수 있다<sup>[8]</sup>. 위의 2가지 제약 조건을 완화시키기 위하여 (3)에 대한 Lagrangian을 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{u}) &= \sum_i \sum_j x_{ij} \frac{p_i}{c_{ij}} + \sum_j \lambda_j \left( \sum_i x_{ij} \frac{p_i}{c_{ij}} - B\tau \right) \\
 &+ \sum_j u_j c_{ij} \left( \sum_i x_{ij} \frac{p_i}{c_{ij}} - \frac{C_j\tau}{c_{ij}} \right) \\
 &= \sum_i \sum_j x_{ij} \frac{p_i}{c_{ij}} (1 + \lambda_j + u_j c_{ij}) \\
 &- \sum_j \lambda_j B\tau - \sum_j u_j C_j\tau
 \end{aligned} \tag{4}$$

(4)에서  $\lambda_j$ 와  $u_j$ 는 Lagrangian multiplier로서, 이들로 구성된 벡터를 각각  $\boldsymbol{\lambda}$ 와  $\mathbf{u}$ 로 나타낸다. 다음과 같이 식(3)의 dual 문제를 정식화할 수 있다.

$$\max_{\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{u}} \min_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{u}) \tag{5}$$

$$\text{subject to } 0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall i, j$$

$$\begin{aligned}
 \sum_j x_{ij} &= 1, \forall i \\
 \lambda_j &\geq 0, \forall j \\
 u_j &\geq 0, \forall j
 \end{aligned}$$

만약 primal 문제 (3)의 해가 feasible 영역에 존재한다면 (5)의 선형 제약 조건에 의해 Slater's condition에 따라 strong duality 가 성립한다. 따라서 (5)에 대한 최적 해는 (3)에 대한 최적 해와 동일하다<sup>[9]</sup>. 다음과 같이 (5)에서의 dual 변수  $\boldsymbol{\lambda}$  및  $\mathbf{u}$ 를 결정하는 문제와  $\mathbf{x}$ 를 결정하는 문제를 각각 고려할 수 있다.

< Master dual problem >

$$\begin{aligned}
 \max_{\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{u}} \sum_i \sum_j x_{ij} \frac{p_i}{c_{ij}} (1 + \lambda_j + u_j c_{ij}) \\
 - \sum_j \lambda_j B\tau - \sum_j u_j C_j\tau
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\text{subject to } \lambda_j \geq 0, \forall j$$

$$u_j \geq 0, \forall j$$

< Sub-problem >

$$\min_{\mathbf{x}} \sum_i \sum_j x_{ij} \frac{p_i}{c_{ij}} (1 + \lambda_j + u_j c_{ij}) \tag{7}$$

$$\text{subject to } 0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall i, j$$

$$\sum_j x_{ij} = 1, \forall i$$

(6)의 해  $\boldsymbol{\lambda}$  및  $\mathbf{u}$ 는 각각 subgradient method를 사용하여 구할 수 있다. 또한 (7)은 제약 조건이  $\sum_j x_{ij} = 1$ 만 존재하므로 각 사용자  $i$ 가 값이 가장 작은 셀  $j$ 를 선택함으로써 그 해를 구할 수 있다. 따라서 아래와 같은 분산 알고리즘을 통해 (3)의 해를 얻을 수 있게 된다.

Dual 문제 (5)는 strong duality를 만족하므로 위의 알고리즘에서 step size  $s$ 가 충분히 작고  $t \rightarrow \infty$ 이면 dual 변수  $\lambda_j(t)$  및  $u_j(t)$ 는 수렴한다<sup>[8]</sup>. 제시한 알고리

---

**QoS & Backhaul Aware Algorithm (QoS-BA)**

---

Initialization:

$t = 0$

$\lambda_j(t), \mu_j(t)$ : arbitrary positive value for all  $j$ .

$s$ : sufficiently small positive value.

---

Step 1) Selects cell  $j$  for each user  $i$  by the following criterion:

$$\arg \min_j \left( \frac{r_i}{c_{ij}} (1 + \lambda_j(t) + u_j(t) c_{ij}) \right)$$

If cell  $j$  is selected for user  $i$ , set  $x_{ij} = 1$ ; else, set  $x_{ij} = 0$ .

Step 2) Each cell updates dual variable as follows:

$$\lambda_j(t+1) \leftarrow \max \left( 0, \lambda_j(t) + s \left( \sum_i x_{ij}(t) \frac{P_i}{c_{ij}} - B\tau \right) \right)$$

$$u_j(t+1) \leftarrow \max \left( 0, u_j(t) + s \left( \sum_i x_{ij}(t) p_i - C_j\tau \right) \right)$$

Step 3)  $t \leftarrow t+1$  and go back to Step 1).

---

Stopping condition:

If  $|\lambda_j(t+1) - \lambda_j(t)| \leq \epsilon$  and

$|\mu_j(t+1) - \mu_j(t)| \leq \epsilon$  for sufficiently small positive value  $\epsilon$ , algorithm stops.

---

은 각 사용자가 변수  $\lambda_j(t)$  및  $u_j(t)$ 에 근거하여 사용자 별로 독립적으로 셀을 결정하도록 동작하므로 분산 알고리즘에 해당한다. 이 때 각 셀은 자신에게 연결된 사용자 정보  $x_{ij}$ 를 이용하여 변수  $\lambda_j(t)$  및  $u_j(t)$ 을 독립적으로 업데이트 한 후(Step 2), 이 값들을 주변의 모든 사용자들에게 브로드캐스팅한다. 각 사용자들은 수신된  $\lambda_j(t)$  과  $u_j(t)$  값을 이용하여  $x_{ij}$ 를 결정한다(Step 1). 각 기지국은  $\lambda_j(t)$  및  $u_j(t)$  값이 수렴할 때까지 이와 같은 Step 1과 Step 2 과정을 반복하게 된다.

(3)의 목적 함수는 무선 자원량의 총 합을 최소화하고자 한다. 이는 전송할 트래픽 양이 매우 적을 때는 해당 알고리즘이 사용자가 신호 세기가 가장 큰 셀을 선택하는 Max SINR 기법과 같이 동작함을 의미한다. 즉, 이러한 상황에서 대부분의 사용자는 매크로셀을 선택하게 될 것이다. 그러나, 트래픽이 증가하게 되어

매크로셀에 사용자가 과도하게 접속하게 될 경우에는 매크로셀의 무선 자원  $B\tau$ 만으로 매크로셀에 연결된 모든 사용자에게 서비스할 수 없는 상황이 발생하게 된다. 즉, 해당 셀  $j$ 의 무선 자원 소모량 값인  $\sum_j x_{ij} p_i / c_{ij}$ 이  $B\tau$ 를 초과하게 된다. 따라서 해당 셀은  $s \left( \sum_j (x_{ij} p_i / c_{ij}) - B\tau \right)$  만큼  $\lambda_j(t)$ 을 증가 시키므로 해당 셀의  $(1 + \lambda_j + u_j c_{ij}) p_i / c_{ij}$  값은 증가하게 된다. 따라서 사용자는 매크로셀이 아닌 다른 셀을 선택하게 된다. 즉, 제시한 알고리즘은 특정 셀에 과도하게 트래픽이 집중되어 무선 자원이 부족할 경우 무선 자원에 여유가 있는 인접 셀로 트래픽을 오프로딩을 하게 된다. 한편, 무선자원에 여유가 있음에도 불구하고 특정 셀에서는 제공되는 백홀 용량이 무선에서 발생한 용량보다 적은 경우가 발생할 수 있다. 즉, 셀  $j$ 에 트래픽이 과도하게 집중되어 제한된 백홀 용량  $C_j\tau$ 로 서비스할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 이때 제시한 알고리즘에 따라 해당 셀은  $s \left( \sum_i x_{ij}(t) p_i - C_j\tau \right)$  만큼  $u_j(t)$ 를 증가시킴으로써 사용자가  $(1 + \lambda_j + u_j c_{ij}) p_i / c_{ij}$  값이 낮은 인접 셀로 오프로딩 하도록 한다. 이는 [6]에서와 같이 full buffer traffic model에서 특정 셀의 백홀 링크에 병목 현상이 발생할 경우 해당 셀에 사용자가 더 집중되는 현상과 대조된다. 해당 알고리즘은 step size  $s$ 가 충분히 작고  $t \rightarrow \infty$ 일 경우 최적의 해로 수렴하나, 이를 위해서는 사용자와 셀 간에 충분한 수의 메시지 교환이 필요할 수 있다는 것을 의미한다.

한편, 시스템 전체의 트래픽이 극단적으로 증가할 경우, 시스템 내의 모든 셀의 무선 자원 또는 백홀 용량으로도 모든 사용자의 QoS를 만족시킬 수 없는 경우가 존재하게 된다. 즉, 시스템의 과부하 상황에서는 적정 해(feasible solution)이 존재할 수 없기 때문에 알고리즘의 해가 수렴하지 않게 된다. 실제 시스템에서는 이와 같은 과부하 상태가 발생하지 않도록 별도의 제어 과정이 수행되므로, 본 논문에서는 항상 적정 해가 존재하는 상황만을 고려했다.

#### IV. 성능 분석

본 절에서는 3절에서 제시한 분산 알고리즘의 성능을 검증하고, 셀 선택 방식의 성능을 비교 분석하고자 한다. 이를 위해 [10]에서 고려한 시뮬레이션 환경을 기본적으로 따른다. 매크로(Macro), 피코(Pico), 릴레이(Relay) 셀이 존재하는 3계층의 이기종 네트워크를

가정한다. 매크로셀과 피코 셀은 백홀 용량의 제약이 없다고 가정하였으며, 릴레이 셀의 백홀 용량은 1Mbps~10Mbps 사이에서 균일한 분포로 발생시켰다. 매크로셀의 커버리지를 1732 (m) \* 1732 (m)의 정사각형으로 모델링하고, 이 커버리지 내에 피코셀과 릴레이 셀이 10개씩 균일한 분포로 랜덤하게 배치되도록 한다. 셀과 사용자간의 채널은 변하지 않는다고 가정하며, 경로 감쇄와 log-normal shadowing만을 고려한다. 이때 매크로셀과 피코 셀의 shadowing은 각각 8dB와 10dB의 표준 편차를 갖는다고 가정한다. 채널 대역폭은 10MHz이며 ( $B=10\text{MHz}$ ), 허용 가능한 전송 시간은 1초로 제한을 두었다. 각 사용자 별로 패킷은 평균 도착률이 4 packets/sec의 Poisson 분포로 발생하며, 각 패킷의 길이는 105bits로 가정한다(따라서, 각 사용자의 평균 전송률은 0.4Mbps). 시뮬레이션 환경을 요약하면 표 1과 같다.

제안하는 QoS-BA 알고리즘과 성능을 비교하기 위한 셀 선택 방식으로서, 사용자가 신호제기가 가장 큰 셀을 선택하는 방식(Max SINR), full buffer traffic model에서 백홀 용량을 고려한 셀 선택 기법(Best Effort Backhaul Aware: BE-BA)<sup>[6]</sup>, 그리고 burst traffic model에서 백홀 용량을 고려하지 않은 셀 선택 기법(QoS Aware: QoS-A)<sup>[7]</sup>을 함께 고려한다. 한편 제시한 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 각기 다른 셀 선택 방식을 사용했을 때, 전체 사용자의 트래픽을 처리하기 위해 요구되는 추가 백홀 용량을 비교하고자 한다. 만약 제한된 무선 자원 및 백홀 용량 내에서

모든 사용자의 트래픽을 처리할 수 있다면 추가적인 지연 시간이 발생하지 않을 것이고, 그렇지 않다면 추가적인 지연 시간이 발생할 것이다. 이를 확인하기 위해 그림 2에서 전체 사용자의 수에 따른 추가적인 백홀 링크의 지연시간을 나타낸다.

그림 2를 보면 제한한 알고리즘은 추가 지연 시간 50ms를 기준으로 약 340명까지 지연 없이 서비스를 제공할 수 있으나, 백홀 용량을 고려하지 않은 알고리즘(MaxSINR, QoS-A)은 사용자가 약 170~190명 이상으로 증가하면 백홀 링크에서 50ms 이상의 지연 시간이 발생함을 알 수 있다. 제안하는 방식은 셀 선택 과정에서 백홀 용량을 고려할 경우에 릴레이 셀에서 백홀 용량을 초과하는 트래픽을 인접 피코 셀로 오프로딩 하도록 동작하게 되기 때문에 더 많은 시스템 용량을 확보할 수 있다. 반면 BE-BA 알고리즘의 경우에는 백홀 용량을 고려하고 있기는 하나, full buffer traffic model을 가정하고 있기 때문에 백홀 링크에서 병목현상이 발생할 경우 해당 셀에서 처리해야 할 무선 링크 용량을 낮추기 위해 인접 셀의 SINR이 낮은 사용자를 자신의 셀로 접속하게 함으로써 백홀 용량을 만족하도록 동작한다. Full buffer traffic model에서는 이와 같이 접속되는 사용자 수에 의해 실제로 처리해야 할 무선 링크의 트래픽 부하가 조절됨으로써 백홀 용량의 제약을 만족하도록 제어하는 것이 적절하나, 본 분석에서 고려하는 burst traffic model에서는 사용자가 추가로 접속될 경우에 해당 셀이 처리해야 할 트래픽이 증가하게 되므로 BE-BA 알고리즘의 경우에 백홀 링크의 추가적인 지연 시간이 다른 셀 선택 방식보다도 훨씬 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

한편, 제안된 알고리즘의 동작 방식에서 나타나는 특성은 그림 2의 추가적인 지연 시간만으로 모두 설

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters

The number of BSs	Macro-BS	1
	Pico-BS	1
	Relay-BS	10
Channel bandwidth( $B$ )	10 MHz	
Transmission constraint( $\tau$ )	1 sec	
Path-loss( $R$ :distance in km)	Macro-BS	$131.1 + 42.8 * \log_{10} R$
	Pico & relay BS	$145.4 + 37.5 * \log_{10} R$
Macro-BS coverage	1732(m) * 1732(m)	
BS transmit power	Macro-BS	46dBm
	Pico & relay BS	37dBm
Noise power	-104dBm	
Log-normal fade shadow	Macro-BS	8dB
	Pico & relay BS	10dB

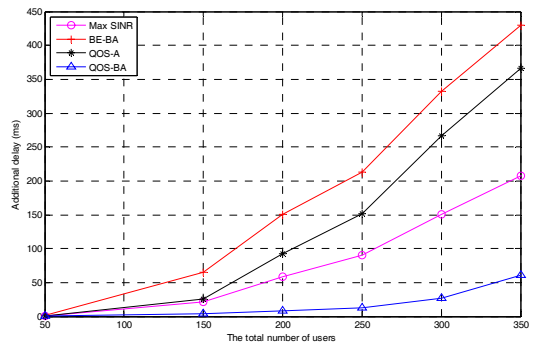
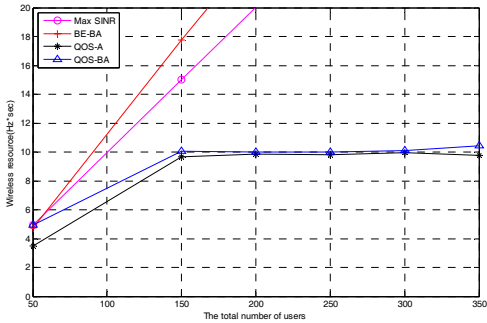


그림 2. 전체 사용자 숫자에 따른 릴레이 백홀에서 추가 지연시간  
Fig. 2. Additional delay as varying the total user numbers

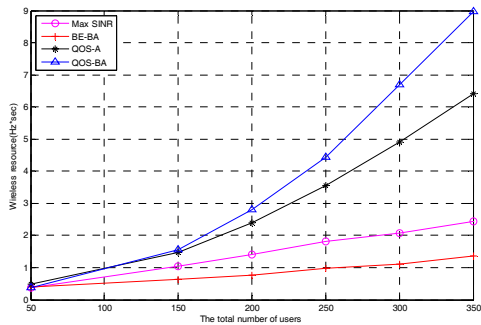
명될 수는 없다. 그림 3은 전체 사용자의 트래픽을 처리하기 위해 요구되는 각 계층 별 평균 무선 자원량을 제시한 것으로, 이를 통해 제안 알고리즘의 또 다른 특성을 살펴보고자 한다.

그림 3에서 제안한 알고리즘은 각 계층과 상관 없이 사용자 전체 숫자가 적을 때는 Max SINR 기법과 동일한 수준의 무선 자원량이 요구된다. 이는 소모되는 무선 자원량의 합을 목적 함수로 하여 최소화하는 것이므로 시스템 트래픽이 적을 때는 제안된 방식이 Max SINR 방식과 동일하게 동작하기 되기 때문이다.

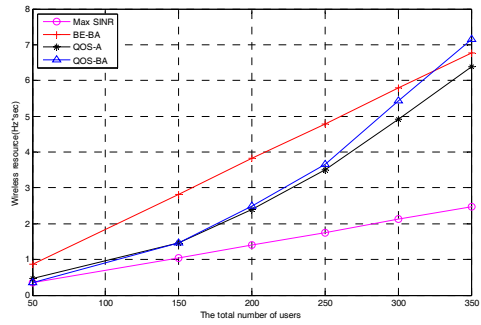
한편 전체 사용자 수가 증가함에 따라 제안한 알고리즘이 QoS-A에 대비하여 피코 셀에서 더 많은 무선 자원량이 요구된다. 이는 제안하는 알고리즘을 적용할 때 일부 릴레이 셀의 백홀 링크에서 병목 현상이 발생할 경우에 트래픽을 인접 피코 셀로 오프로딩 하게 되고, 따라서 피코 셀은 증가된 트래픽을 처리하기 위해 더 많은 무선 자원이 요구되기 때문이다. BE-BA 알고리즘은 백홀 링크 용량이 부족한 셀에서 오히려 더 많은 사용자를 접속 시켜야 하기 때문에 릴레이 셀에서의 무선 자원 사용량은 증가하게 되고, 피코 셀에서



(a) Macro-BS

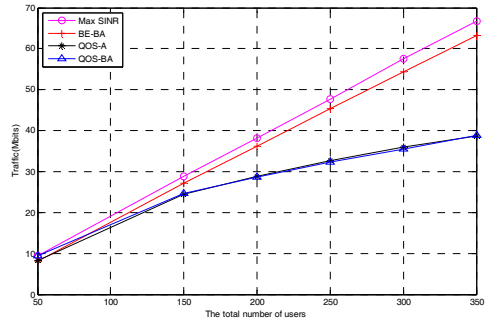


(b) Pico-BS

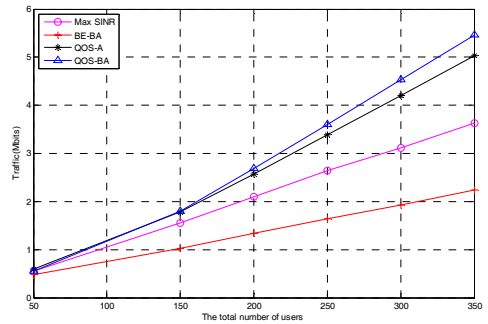


(c) Relay-BS

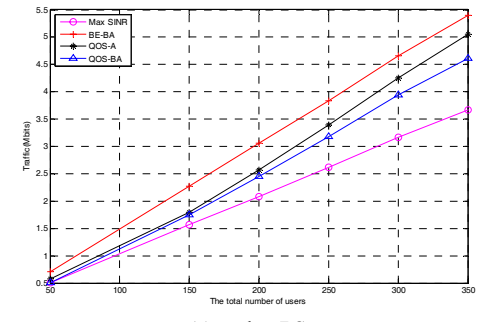
그림 3. 전체 사용자 수에 따른 tier 별 무선 자원 사용량 비교  
Fig. 3. Wireless resource usage of each tier as varying the total user numbers



(a) Macro-BS



(b) Pico-BS



(c) Relay-BS

그림 4. 전체 사용자 수에 따른 tier별 제공된 트래픽 비교  
Fig. 4. Offered load of each tier as varying the total user numbers



의 무선 자원 사용량이 적음을 알 수 있다. 그림 4는 이와 같은 트래픽 오프로딩 현상을 직접적으로 확인하기 위해 전체 사용자의 트래픽을 처리하는 과정에서 각 계층 별로 평균 트래픽 부하를 제시한 것이다.

그림 4에서 제안하는 알고리즘의 경우에는 일정 수준으로 전체 사용자 수가 증가하게 되면 피코 셀에서의 트래픽 제공량이 다른 알고리즘에 대비하여 가장 크고, 릴레이 셀에서의 트래픽 제공량이 다른 알고리즘에 대비하여 가장 적다. 이는 시스템 트래픽 부하가 증가할 경우에 릴레이 셀의 백홀 링크에서 병목 현상이 발생하게 되고, 이 때 제안하는 알고리즘은 릴레이 셀의 트래픽을 백홀 링크 용량에 여유가 있는 인접 피코 셀로 트래픽을 오프로딩 하기 때문이다. 반면 QoS-A 알고리즘의 경우에는 백홀 링크 용량을 고려하지 않았으므로 위와 같은 동작을 하지 않으며, BE-BA 알고리즘의 경우에는 앞서 설명한 바와 같이 full buffer traffic model을 고려하여 설계되었으므로 릴레이 셀에서의 평균 트래픽이 가장 높다는 것을 볼 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 이기종 네트워크의 하향링크에서 백홀 링크 용량이 제한되어 있을 때 사용자 트래픽의 전송 시간에 대한 QoS를 만족하기 위한 최적화 문제를 정식화하고, 이에 대한 해를 분산적으로 구현할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 이 알고리즘은 기존의 알고리즘과 달리 제한된 무선 자원 및 백홀 용량 내에서 더 많은 수의 사용자들에 대해서 QoS를 지원할 수 있음을 확인하였다. 이는 제안된 알고리즘이 기존 방식에 대비하여 여러 셀의 무선 자원을 최대한 활용하였을 뿐 아니라, 백홀 링크에서 병목 현상이 발생할 때 백홀 용량에 여유가 있는 인접 셀로 사용자를 오프로딩 함으로써 가능하였다.

본 장에서 제시한 방식은 burst traffic model를 가정하여 제한된 무선 및 유선 자원으로 주어진 모든 트래픽을 처리하는 관에서 문제를 접근하고, 이에 대한 최적의 해를 분산 알고리즘으로 구현하였다. 이때 백홀 링크의 용량이 제한되어 있을 때 트래픽 모델에 따른 동작 방식을 구체적으로 분석하였다는 점에서 의의가 있다. 한편, 제안한 알고리즘은 최적 해로 수렴하기 위해서 셀과 사용자들간에 정보 교환을 반복해야 하므로 실제 구현 과정에서는 채널 상태의 변화에 따라 최적해를 확보할 수 없는 상황이 발생할 수 있다. 따라서, 정보 교환에 필요한 반복 횟수를 최소화

하면서도 빠른 속도로 최적 해에 근접할 수 있는 준최적 해를 탐색하거나 또는 별도의 정보 교환이 없이도 기지국 선택이 가능한 완전 분산 방식에 대한 연구가 필요하다.

### References

- [1] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, "A survey on 3GPP heterogeneous networks," *IEEE Wirel. Commun. Mag.*, vol. 18, no. 3, Jun. 2011.
- [2] S. Yeh, S. Talwar, W. Geng, N. Himayat, and K. Johnsson, "Capacity and coverage enhancement in heterogeneous networks," *IEEE Wirel. Commun. Mag.*, vol. 18, no. 3, Jun. 2011.
- [3] Ericsson White paper, *It all comes back to backhaul*, Uen 284 23-3166 Rev. B, Aug. 2014.
- [4] S. Chia, M. Gasparroni, and P. Brick, "The next challenge for cellular networks: backhaul," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 10, no. 5, Aug. 2009.
- [5] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, A.-S. M, C. Caramanis, and J. G. Andrew, "User association for load balancing in heterogeneous cellular networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun. Mag.*, vol. 12, no. 6, pp. 2706-2716, Jun. 2013.
- [6] A. De Domenico, V. Savin, and D. Ktenas, "A backhaul aware cell selection algorithm for heterogeneous cellular networks," in *IEEE PIMRC*, pp. 1688-1693, London, Sept. 2013.
- [7] T. Zhou, Y. Huang, and L. Yang, "QoS-aware user association for load balancing in heterogeneous cellular networks," *arXiv preprint arXiv:1312.6911*, Jan. 2014.
- [8] D. P. Palomar and C. Mung, "A tutorial on decomposition methods for network utility maximization," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 8, pp. 1439-1451, Aug. 2006.
- [9] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.

[10] 3GPP TR 36.814 v9.0.0, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; E-UTRA; Further advancements for E-UTRA physical layer aspects*(Release 9), Mar. 2010.

양 찬 석 (Chan S. Yang)



2012년 8월 : 고려대학교 전기  
전자전파공학부 학사  
2014년 8월 : 고려대학교 전기  
전자전파공학과 석사  
2014년 9월~현재 : 고려대학교  
전기전자공학과 박사과정  
<관심분야> 무선통신 시스템

강 총 구 (Chung G. Kang)



1987년 6월 : Univ. of Cali-  
fornia (San Diego), 전자공  
학과 학사  
1993년 3월 : Univ. of Cali-  
fornia (Irvine), 전자 및 컴  
퓨터 공학과 박사  
1992년 7월~1993년 6월 : (미)  
Aerospace Corp. 연구원  
1993년 3월~1994년 2월 : (미) Rockwell International  
연구원  
2000년 9월~2001년 8월 : (미) Center for Wireless  
Communication, UCSD 방문 교수  
1994년 3월~현재 : 고려대학교 전기전자전파공학부  
교수  
2005년 1월~2005년 12월 : 한국통신학회 이동통신연  
구회 위원장  
2006년 1월~현재 : 한국통신학회 상임이사/학술사업부  
회장  
<관심분야> 이동통신 시스템, 무선 네트워크 및 응용  
서비스