

사용자 위치정보를 사용하지 않는 헬퍼 간 중첩 커버리지 영역을 위한 펌토-캐싱 파일 분배 기술

심재남*, 민병윤*, 김동구^o

Femto-Caching File Placement Technique for Overlapped Helper Coverage Without User Location Information

Jae-Nam Shim*, Byoung-Yoon Min*, Dong Ku Kim^o

요약

모바일 데이터 트래픽(data traffic)의 증가로 인해 스몰셀(Small Cell) 가용을 이용한 여러 기술들이 해결책으로 제시되고 있다. 하지만 이러한 기술은 백홀(backhaul) 용량의 증가가 필수적이고 이가 충족되지 않을 경우 성능 한계가 기인한다. 이를 바탕으로 기지국 내 헬퍼(helper)라는 백홀 용량이 없거나 작은 대신 저장 매체 용량을 지닌 스몰셀을 이용해 백홀 용량을 저장 매체 용량으로 대체하여 사용자의 데이터 다운로드 지연값을 줄이는 펌토 캐싱(Femto-Caching)이 제시되었다^[1]. 본 논문은 사용자 위치 정보를 이용하는 실제적인 시나리오에서 각 헬퍼에 파일 분배 전략 방법을 제시함으로써 기존 연구를 확장하였다. 시뮬레이션을 통해 헬퍼간 커버리지(Coverage)가 겹치는 상황과 헬퍼의 커버리지가 증가하는 상황에 대해 사용자의 데이터를 헬퍼로부터 받을 수 있는 기회가 증가함을 통해 성능을 검증하였다.

Key Words : Caching, File Placement, Delay Minimization, HetNet, Small Cell Network

ABSTRACT

Due to explosive growth of mobile data traffic, many kind of techniques based on small cell is proposed as solution for phenomenon. However, those techniques essentially demands increase of backhaul capacity and causes performance degradation if not satisfied. Based on that, the approach applying the storage capacity in place of backhaul capacity, which is known as femto-caching, is proposed to reduce data downloading delay of users in system^[1]. In this paper, we expanded previous research by proposing file placement strategy with distribution of user position, which is more practical scenario. Simulation results verify that our proposed scheme has better performance gains mainly because when coverage of helpers are overlapped, users get more opportunity to connect various helpers which enables users to download a variety kind of files from helpers, not base station.

* 본 연구는 한국연구재단 논문연구과제(95-0100-23-04-3) 지원 및 한국대학교 논문연구소 관리로 수행되었습니다.

※ 본 연구는 한국연구재단의 지원(5세대 이기종 셀룰러 네트워크와 도시교통 네트워크를 연동시키는 데이터-운송 중계기 그린라디오 무선접속 기술개발, 과제번호:2012R1A2A 2A01047554)으로 수행되었음. 또한 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터육성지원사업/IT융합고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2014-H0301-14-1012)

♦ First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, jaenam@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, dkkim@yonsei.ac.kr, 종신회원

* School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, minby33@yonsei.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2014-09-353, Received September 15, 2014; Revised November 18, 2014; Accepted November 18, 2014

I. 서 론

최근 다양한 스마트 기기의 폭증에 따라 무선 데이터 트래픽이 지수적 증가를 보이고 있고 이는 향후 2020년까지 데이터 트래픽이 현재의 1000배 수준으로 증가할 것으로 전망하고 있다.^[1] 이러한 현상은 고해상도 동영상 스트리밍 서비스와 소셜 네트워크를 이용한 다양한 서비스에 있고, 이들 또한 매년 배로 증가하는 트래픽을 생산한다.^[2] 차세대 이동통신 시스템에서는 이를 해결하기 위한 방안으로 스몰셀 시스템, 다중안테나 시스템, 코딩 기술과 간섭 관리 기술 등을 제시하고 있다.

스몰셀을 가용한 기술들은 해결되지 않은 여러 문제점이 있음에도 차세대 이동통신 기술의 주역으로써 주목받고 있다.^[4] 스몰셀이 작아지고 밀집화 됨에 따라 셀의 커버리지가 중첩되는 지역이 넓어져 인접 셀의 간섭이 강해지는 문제점이 있다. 또한 시간, 주파수 등 자원 분배에 민감한데 그 이유는 대부분의 스몰셀 시스템은 이종모뎀 네트워크(Heterogeneous Network)와 같이 기지국(eNodeB in LTE)과 중첩된 형태를 보이기 때문이다. 또한 밀집된 스몰셀의 성능은 각 스몰셀에 광섬유 등을 이용한 고용량 백홀의 가용이 필수적이지만 이는 비현실적이다. 즉 모든 스몰셀 네트워크는 고비용 기반 시설이 뒷받침되지 않으면 성능 한계에 맞닥뜨리는 것이 자명하다.

펠토-캐싱은 앞서 언급한 백홀의 부담을 덜고 네트워크의 전송 지연 성능을 향상시키는 해결책으로 제시되었다^[11]. 펠토-캐싱에 의한 서비스는 데이터가 백홀을 거치지 않고 전처리에 따른 지연이 없기에 전송 지연을 효과적으로 줄일 수 있다. 기지국과 밀집된 헬퍼(스몰셀)가 중첩되어 있는 경우, 선행 연구에서 주장하는 바는 사용자의 데이터 요청에 대한 분포를 이용해 헬퍼의 저장매체에 서비스할 데이터를 미리 저장함으로써 백홀 용량을 저장매체 용량으로 대체하는 것이다. 이는 피코셀(Pico Cell) 같은 스몰셀의 종류로 생각할 수 있지만 셀간 협력과 없이 무선으로 정보를 저장하고 서비스할 수 있는 능력이 있다는 점이 다르다.

CISCO사에 따르면 전체 데이터 트래픽의 66%가 동영상 스트리밍 서비스이고 21%가 인터넷 브라우징에서 기인한다.^[15] 본 연구에서는 VoD(Video on Demand)와 웹브라우징 사용자의 요청에 우선순위가 존재한다는 공통점을 사용한다. 이 두 서비스에 있어 중요한 공통점이 존재하는데, 이는 몇몇 사용자의 요청이 잦은 파일이 트래픽의 대부분을 차지하며 이들

은 완전히 비동기적으로 재사용된다는 것이다. 이를 콘텐츠의 비동기적 재사용이라 한다. 이러한 특징을 데이터 트래픽에 적용하면 어떤 종류의 파일이 언제 어디서 사용될 것인가를 예측할 수 있다. 이러한 굉장히 예측 가능한 요청과 그 분포를 모델링 하는 데에는 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히^[6]에서는 지프의 법칙이 웹브라우징의 콘텐츠 전달과 VoD 서비스에 적용될 수 있다는 것을 실험적으로 확인하였다.

사전에 헬퍼에 어떤 데이터를 저장할 것인지가 상당히 중요함에도 위에서 언급한 기존 연구에서는 각 헬퍼에 지프 분포 순서에 따라 근사적으로 동일한 파일을 저장하는 것이 최적화된 해답이라는 것을 보였다. 본 논문에서는 기존 파일 분배 방식을 수정하고 발전된 파일 분배 전략을 제안한다. 제안하는 방식은 이웃하는 헬퍼간 중첩된 헬퍼 커버리지를 사용해 다양한 데이터를 헬퍼로부터 받을 수 있는 기회를 높인다. 이는 전송 지연을 줄임으로써 더 나아진 QoE(Quality of Experience)를 보장함을 의미한다. 제안한 파일 분배 전략은 헬퍼가 밀집된 분포를 가지는 것과 같이 중첩된 커버리지 영역이 상당한 경우 기존 방식에 비해 월등한 성능을 보인다. 본 논문은 이 점에 집중하여 기존 연구에 비해 향상된 성능을 입증하였다.

본 논문은 아래와 같이 구성되었다. II 장에서 헬퍼가 존재하는 시스템 모델이 소개되었다. 기존 연구의 파일 분배 방식은 III에 나타내었고, 제안하는 향상된 파일 분배 방식은 IV에 기술하였다. 시뮬레이션을 이용해 V 장에서 성능 비교가 이루어졌고 VI장에서 요약과 하며 마친다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 H 개의 헬퍼가 기지국의 커버리지 내에 위치한 셀룰라 네트워크를 고려한다. 모든 헬퍼와 기지국은 서로 다른 영역의 주파수를 사용한다. 사용자는 기지국의 커버리지 내에 균등하게 분포해 있고 그 수는 U다. 셀 레이아웃은 그림 1에 나타난다.

사용자는 정의된 확률분포 P_j 에 따라 전체 파일 라이브러리 F에서 무작위적으로 파일을 요청한다. 사용자의 파일 요청 확률분포는 지프 분포이다^[6]. P_j 는 내림차순으로 정렬되어 있다. 즉, 파일의 인덱스가 낮은 파일일수록 요청될 확률이 높다.

기지국은 모든 파일의 라이브러리를 가지고 있어 시스템 내 사용자에게 모든 파일을 서비스 할 수 있

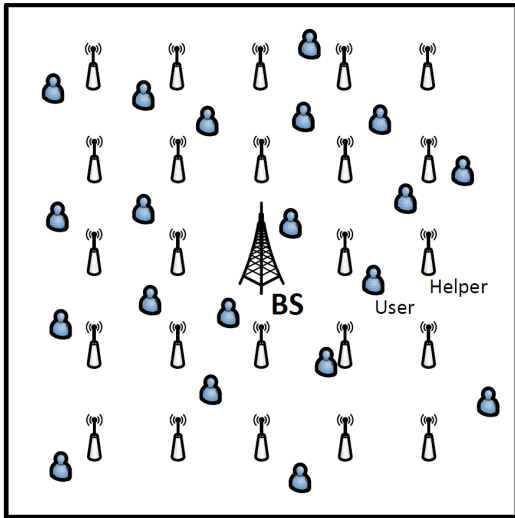


그림 1. 기지국, 헬퍼와 사용자의 레이아웃. 사용자는 균일하게 분포하고 헬퍼는 격자 구조를 가진다.
Fig. 1. Base station, helper and user layout. Users are distributed uniformly and helpers are in grid position.

다. 각 헬퍼는 저장매체 용량이 M 으로 한정적이고 자신의 저장매체에 저장된 파일만을 사용자에게 서비스할 수 있다. 사용자가 요청하는 파일이 커버리지 내 헬퍼의 저장매체에 없는 경우 기지국으로부터 서비스 받는다. 이 시스템에서 헬퍼가 커버리지보다 가까이 설치 되는 경우 헬퍼의 커버리지는 중첩될 수 있으며 따라서 일부 사용자는 다수의 헬퍼에 연결될 수 있다. 사용자 입장에서 다수의 헬퍼에 연결된 경우, 지연값이 가장 작은 헬퍼를 선택하여 해당 헬퍼로부터 서비스 받는다.

$F \times H$ 행렬 \mathbf{X} 는 헬퍼에 저장된 파일의 인덱스로 정의한다. 헬퍼 h 가 파일 f 를 가지고 있는 경우 \mathbf{X} 의 f 번째 행과 h 번째 열은 1이고, 그렇지 않은 경우 0이다. 각 헬퍼는 유한한 크기의 저장매체 용량 M 을 가지고 있으므로 \mathbf{X} 는 각 열에 M 개의 1을 가지고 있다. 사용자의 파일에 대한 요청의 분포는 시간에 따라 바뀌지 않는다. 이 경우 파일 분배 전략은 행렬 \mathbf{X} 의 각 열의 norm 값이 M 인 것을 조건으로 MH 개의 1을 채우는 combinatorial 최적화 문제가 된다.

기지국과 헬퍼는 동일한 대역폭을 사용하며 커버리지 내 사용자의 수에 따라 분할하여 사용한다. 헬퍼의 커버리지가 기지국의 커버리지에 비해 작으므로 헬퍼의 지연값은 기지국의 그것에 비해 작다.

시스템 내 헬퍼의 집합 P 는 가능한 모든 헬퍼의 하위 집합으로 정의한다. 즉, $P = \{\{1\}, \{2\}, \{1,2\}, \dots, \{1,2, \dots, H\}\}$ 이다. P 의 원

소는 N 으로 표현한다. N 의 모든 헬퍼 원소들에 대해 동시에 서비스 받을 수 있는 영역을 A_N 로 나타내고, 그 지역의 넓이는 λ_N 으로 나타낸다.

III. 기존 연구의 파일분배 방식

기존 연구의 파일 분배 알고리즘의 목적은 사용자들의 평균적인 다운로드 지연값의 합을 최소화 하는데 있다. 특정 순간 사용자의 위치에 따라 사용자 u 의 다운로드 지연값은 다음과 같다.

$$\bar{D}_u = \sum_{j=1}^{|\mathcal{H}|-1} \omega_{(j),u} \sum_{f=1}^F \left[\prod_{i=1}^{j-1} (1 - x_{f,(i),u}) \right] x_{f,(j),u} P(f) + \omega_{0,u} \sum_{f=1}^F \left[\prod_{i=1}^{|\mathcal{H}|-1} (1 - x_{f,(i),u}) \right] P(f) \tag{1}$$

여기서 $\mathcal{H}(u)$ 는 사용자 u 에 연결된 모든 송신기의 집합이고 기지국과 모든 헬퍼를 포함한다. 편의를 위해 기지국의 인덱스는 0으로 지정하였고 $(j)_u$ 는 사용자 u 의 j 번째로 낮은 지연값을 주는 헬퍼이다. $x_{f,(j)_u}$ 는 지표 함수로 파일 f 가 헬퍼 $(j)_u$ 에 저장되어 있는지 여부를 나타낸다.

(1)의 첫째 항과 둘째 항은 각각 사용자 u 의 커버리지 내에 있는 헬퍼와 기지국으로부터 기인한 평균적인 다운로드 지연값을 나타낸다. 첫째 항은 사용자가 요청한 파일이 헬퍼의 저장매체에 존재하는 경우의 평균적인 다운로드 지연값을 나타낸다. 따라서 (1)은 사용자 u 의 평균적인 다운로드 지연값을 나타내고 이를 바탕으로 기존의 파일 분배 전략은 사용자의 평균적인 다운로드 지연값의 합을 최소화 하는 것이 목적적이고 이는 (2)에 나타난다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{u=1}^U (\omega_{0,u} - \bar{D}_u) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{f=1}^F x_{f,h} \leq M, \forall h \\ & \mathbf{X} \in \{0,1\}^{F \times H} \end{aligned} \tag{2}$$

[1]에서 최적화 문제 (2)는 연산 복잡도가 매우 높은 NP-complete임을 증명하였고 그 해결책으로 복잡도가 낮은 suboptimal한 greedy 알고리즘을 제시하였다.

보편적으로 헬퍼 저장매체의 갱신 주기는 시간 슬롯에 비해 굉장히 크다. 기존의 파일 분배 전략은 사

용자의 이동성과 공정성 등으로 인한 스케줄 된 사용자의 변화에 따라 성능이 감소할 수 있다. 즉 기존의 파일 분배 전략은 특정 시간의 사용자의 위치에 따라 파일을 분배했기에 평균적인 시간 관점에서 최적이지 아니다.

IV. 제안하는 파일 분배 방식

II장에서 언급한 바와 같이 모든 송신기는 자신의 커버리지 내의 사용자에게 주파수를 직교하게 할당한다. 다운로드 지연값은 커버리지 내 사용자의 수에 비례하기 때문에 헬퍼로부터 기인한 다운로드 지연값은 기지국으로부터 기인한 것보다 작다. 이 점에서 착안하여 본 논문에서는 헬퍼로부터 서비스 받는 사용자의 수를 최대화 하는 파일 분배 전략을 제시한다. 게다가, 제안하는 알고리즘은 헬퍼 커버리지 내 사용자의 평균적인 수를 고려하기에 사용자가 균등하게 분포되지 않은 경우에 손쉽게 적용 가능하고 기존 파일 분배 방식에 비해 시평균 관점에서 더 작은 다운로드 지연값을 준다.

시스템 내 헬퍼로부터 서비스 받는 사용자의 수는 다음과 같이 나타낸다.

$$U_p = \sum_{N \subset P} \sum_{f=1}^F \alpha_{f,N} P_f \int_{R_N} \lambda(\mathbf{p}) d\mathbf{p} \quad (3)$$

R_N 는 헬퍼 집합 N 의 커버리지에 따른 점들의 집합을 나타낸다. 따라서 A_N 는 R_N 의 넓이가 된다. 즉, $\int_{R_N} \lambda(\mathbf{p}) d\mathbf{p} = A_N$ 이고 \mathbf{p} 는 위치 벡터를 나타낸다. $\mathbf{A}_{f,N}$ 는 0과 1로 이루어진 $F \times |N|$ 행렬을 나타낸다. $\mathbf{X}_{f,h}$ 와 비슷하게 헬퍼 $h, h \in N$ 가 파일 f 를 가지고 있는 경우, f 번째 행의 해당 열 $\mathbf{A}_{f,N}$ 는 1이고, 아닌 경우 0이다. $\alpha_{f,N}$ 는 $\mathbf{A}_{f,N}$ 의 지표함수이다. 이를 이용하여 헬퍼 집합 N 에 저장된 파일 인덱스를 나타낸다.

$$\alpha_{f,N} = \begin{cases} 1, N \text{의 헬퍼에 파일 } f \text{가 존재} \\ 0, N \text{의 헬퍼에 파일 } f \text{가 부재} \end{cases} \quad (4)$$

따라서 U_p 는 헬퍼로부터 서비스 받는 사용자의 수를 나타내고 제안하는 최적화 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max \quad & U_p \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{f=1}^F x_{f,h} \leq M, \forall h \end{aligned} \quad (5)$$

본 문제에서 헬퍼간 공통된 커버리지가 없는 경우 자명한 해를 갖는 것에 주목할 필요가 있다. 즉, 헬퍼 간 커버리지가 겹치지 않는 경우 사용자의 요청이 많은 순서대로 파일을 저장하는 것이 최적화의 해가 된다. 문제는 커버리지가 겹치는 경우에 발생하는데, 두 개의 헬퍼에 대한 파일 분배 전략을 예시로 시작한다.

4.1 두 헬퍼에 대한 파일 분배 전략

그림 2에서 1번과 2번 헬퍼의 커버리지가 겹치기 때문에 단일 1번 헬퍼로부터 서비스 받는 영역과 단일 2번 헬퍼로부터 서비스 받는 영역, 그리고 1, 2번 헬퍼로부터 서비스 받는 영역은 각각 $A_{(1)}, A_{(2)}, A_{(1,2)}$ 이다.

모델의 간략화를 위해 이 예제에서는 사용자가 범위 A_N 에 균등하게 분포 한다 가정하였다. 이를 사용하면 사용자의 분포 λ_N 를 고려하지 않아도 된다. 본 알고리즘은 N 의 영역에 존재하는 평균적인 사용자의 수를 A_N 대신 사용하기에 사용자의 분포가 불균등한 경우 직접 적용 가능하다.

λ_N 가 상수 c 라면, 헬퍼로부터 서비스 받는 평균적인 사용자의 수 $U_p = cU'_p$ 으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} U'_p = & \sum_{f=1}^F x_{f,1} A_{(1)} P_f + \sum_{f=1}^F x_{f,2} A_{(2)} P_f \\ & + \sum_{f=1}^F \alpha_{f,(1,2)} A_{(1,2)} P_f \end{aligned} \quad (6)$$

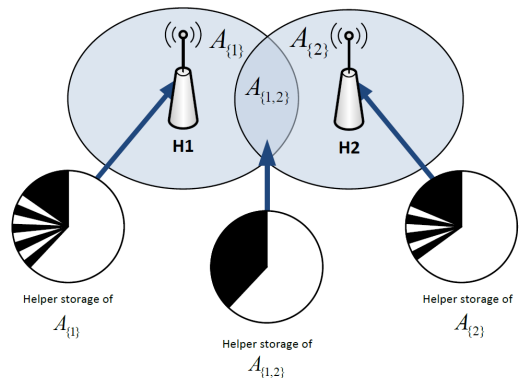


그림 2. 두 헬퍼에 대한 예시
Fig. 2. Example for Two Helper Case

위 수식에 보였듯 사용자를 각각 1번과 2번 헬퍼로부터 서비스 받는 사용자와 1번과 2번 헬퍼로부터 동시에 서비스 받는 사용자로 나누었다. 중첩된 커버리지 영역에 존재하는 사용자에게는 기본적으로 두 가지의 잠재적 이득이 존재한다. 첫째는 두 헬퍼가 모두 요청 파일을 지니고 있을 경우 지연없이 더 작은 헬퍼로부터 서비스를 받을 수 있다는 것이고, 둘째는 두 헬퍼 중 한 헬퍼만 요청 파일을 저장하고 있는 경우 서비스를 받을 수 있다는 것이다. 즉 해당 영역의 사용자들은 저장매체의 크기가 M 보다 큰 가상의 헬퍼로부터 서비스를 받는 형태이다.

두 헬퍼의 저장매체에 동일하게 M 개의 사용자의 요청이 갖은 순서대로 파일을 저장하고 있다고 가정하자. 그러면 (6)의 첫째 항과 둘째 항은 최대가 되지만 셋째 항은 위에서 언급한 두 번째 이득을 잃으므로 최대값을 갖지 못한다. 두 헬퍼가 모두 서로 다른 파일을 저장하고 있는 경우 (6)의 셋째 항은 최대값을 가진다. 하지만 첫째와 둘째 항은 상대적으로 사용자의 요청 빈도가 높지 않은 파일을 저장하기에 최대가 되지 않는다. 따라서 헬퍼로부터 서비스 받는 세 영역의 전반적인 사용자 수를 증가시키기 위해 파일 분배를 효율적으로 수행해야 한다.

간단한 방법으로 두 헬퍼 저장매체의 일정량 부분은 파일은 요청 빈도가 높은 순서대로 동일하게 저장하고 나머지 부분은 파일 요청 빈도가 높은 순서대로 두 헬퍼 저장매체에 번갈아 가며 저장하는 것이다. 이 경우 헬퍼로부터 서비스 받는 사용자의 수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 U'_p &= \sum_{f=1}^{M-E} P_f A_{(1)} + \sum_{f=1}^{M-E} P_f A_{(2)} \\
 &+ \sum_{f=M-E+1, f/2 \in \mathbb{Z}}^{M+E} P_f A_{(1)} \\
 &+ \sum_{f=M-E+1, f/2 \notin \mathbb{Z}}^{M+E} P_f A_{(2)} + \sum_{f=1}^{M+E} P_f A_{(1,2)}
 \end{aligned} \tag{7}$$

(7)의 E 는 중첩된 커버리지에서 기인한 헬퍼간 저장 파일 인덱스의 차이를 나타내고 있다. 즉 $M-E$ 개의 요청 빈도가 높은 순서의 파일들은 두 헬퍼의 저장매체에 동일하게 저장하고 이후 $2E$ 개의 파일 인덱스는 각 헬퍼의 저장매체에 번갈아 한 개씩 저장한다. 따라서 $A_{(1,2)}$ 의 사용자는 $M+E$ 만큼의 가상적으로 확장된 저장매체를 갖는 헬퍼로부터 서비스 받는다.

위 파일 분배 전략은 헬퍼의 위치가 격자구조일 때에 적용 가능하다. 이는 사용자가 균등하게 분포하는

경우에 한정적으로 두 단계로 구분된다. 헬퍼 클러스터 설정과 헬퍼 클러스터 내 파일 분배가 그것이다.

4.2 격자 구조 헬퍼에 대한 파일 분배 전략

제안하는 파일 분배 전략은 헬퍼 위치에 관계없이 적용 가능하다. 하지만 이는 기존 파일 분배 알고리즘과 동일한 전체 시스템에 대한 최적화가 필요하다는 단점이 존재한다. 본 절에서는 헬퍼의 위치가 격자 구조일 경우를 고려한다. 사용자의 위치가 균등하게 분포한다는 점을 이용하면 전체 시스템을 최적화 하는 대신 다음의 두 단계를 적용할 수 있다.

1) 헬퍼 클러스터의 설정 : 헬퍼 클러스터는 헬퍼의 집합으로 이루어진 단위 클러스터이다. 클러스터는 자신의 복제로 전체 시스템을 구성한다. 헬퍼간 중첩되는 커버리지가 없는 경우 헬퍼 클러스터는 단일 헬퍼가 된다. 그렇지 않을 경우 헬퍼 클러스터는 공통된 커버리지 영역을 가지는 헬퍼의 집합으로 구성된다. 중첩된 커버리지 영역에 관계된 최대 헬퍼 수가 2인 경우 인접 두 헬퍼가 헬퍼 클러스터가 된다. 그림 3은 최대 겹치는 헬퍼 수가 3인 격자 헬퍼 구조를 나타낸다. 커버리지가 공유하는 최대 헬퍼 수가 4인 경우에

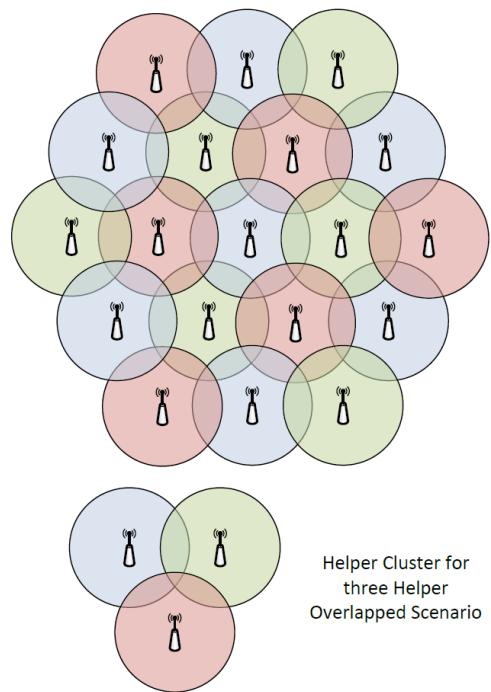


그림 3. 격자 헬퍼 구조에 대한 헬퍼 클러스터. 최대 겹치는 커버리지 수는 3
 Fig. 3. Helper Cluster for Grid Helper Position. Maximum number of overlapped coverage is three.

는 인접한 네 개의 헬퍼가

2) 헬퍼 클러스터 내 파일 분배 : 헬퍼 클러스터 스템을 완료한 후 헬퍼 클러스터에 (5)를 적용하여 파일을 분배한다. 격자 헬퍼 구조는 헬퍼 위치 패턴이 반복적이므로 헬퍼 클러스터 파일 분배는 한 번 계산하여 전체 시스템에 반복적으로 적용한다. 특히 커버리지가 겹치는 최대 헬퍼 수가 두 개인 경우 (7)을 직접 헬퍼 클러스터에 적용한다.

V. 실험 결과

본 논문은 변의 길이가 350m인 사각형 셀 구조를 고려한다. 기지국과 헬퍼는 각각 3bps/Hz, 5bps/Hz의 주파수 효율로 서비스하며 20MHz의 서로 다른 동일한 크기의 대역폭을 사용한다. 따라서 사용자와 헬퍼 간 간섭은 존재하지 않는다. 헬퍼는 셀 영역 안에 균등한 격자 구조로 분포하고 모든 사용자는 위치 분포에 따라 분포 한다. 시스템 내 각 사용자 위치의 분포는 모두 동일한 분포를 가정하고 전체 사용자 수는 300으로 고정 하였다. 사용자의 파일 요청에 대한 분포는 모든 사용자 간 동일한 분포를 가지며, 이는 0.56의 지표값의 지프 분포이다. 이를 이용한 사용자의 파일 요청은 메시지 독립적으로 발생한다. 사용자는 동시에 복수의 헬퍼로부터 서비스 받을 수 없는 Uncoded 펌토 캐싱을 가정한다. 실험은 총 10^3 단위 시간에 걸쳐 수행하였다. 헬퍼에 저장된 파일은 갱신하지 않으며 사용자의 위치는 매 시간 독립적으로 발생한다. 실험 결과는 전송율을 기준으로 나타낸다. 지연값을 전송율의 역수로 정의하였기에 높은 전송율은 낮은 지연값을 의미한다. 실험결과와 기준(baseline)은 헬퍼가 없는, 기지국만 존재하는 환경을 나타낸다.

그림 4에서 헬퍼 수 증가에 따른 평균 사용자 다운로드 지연값을 나타내고 있다. 헬퍼의 연결 가능 범위는 70m로 고정하였고, 시스템 내 그 수는 16부터 100까지로 변화한다. 제안한 알고리즘이 기존의 것에 비해 헬퍼의 수가 증가함에 따라 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 헬퍼의 수가 100인 경우 0.5Mbps의 성능 이득을 확인할 수 있다.

그림 5는 헬퍼의 연결 가능 범위가 70에서부터 150으로 증가함에 따른 평균 사용자 다운로드 지연값을 나타낸다. 이 경우 헬퍼의 수는 16으로 고정하였다. 기존의 알고리즘과 본 논문에서 제안한 알고리즘을 비교해 보았을 때, 헬퍼의 연결 가능 범위가 150m인 경우 평균 사용자 다운로드 전송율 측면에서 600Kbps

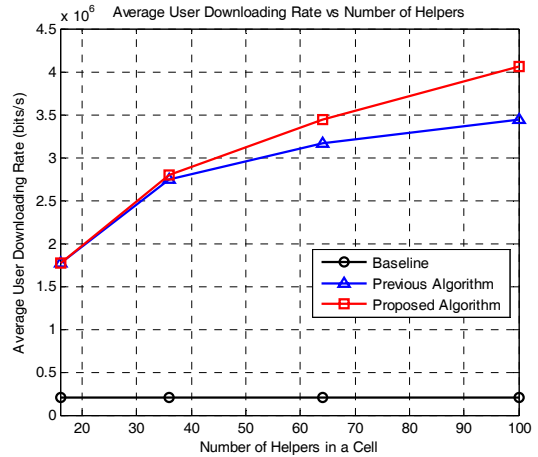


그림 4. 시스템 내 헬퍼 수에 따른 평균 사용자 다운로드 지연값
Fig. 4. Average User Downloading Rate vs. Number of Helpers in System

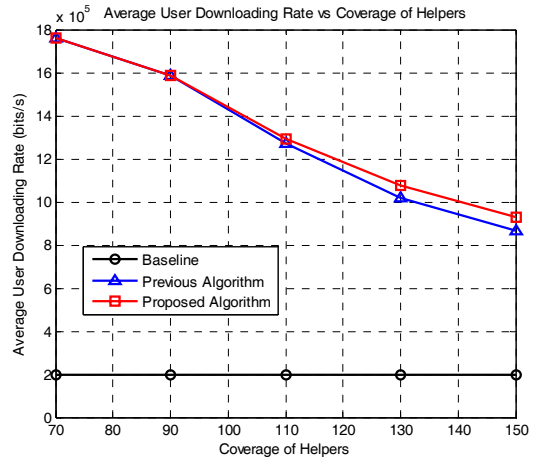


그림 5. 시스템 내 헬퍼의 커버리지 변화에 따른 평균 사용자 다운로드 지연값
Fig. 5. Average User Downloading Rate vs. Coverage of Helpers

의 성능 이득을 보인다.

두 시뮬레이션 결과에서 공통적으로 본 논문이 제안한 알고리즘이 헬퍼 수의 증가 혹은 연결 가능 범위 증가에 따른 헬퍼간 중첩된 연결 가능 범위를 통해서 성능 이득이 나타났다. 헬퍼의 연결 가능 범위가 겹치지 않는 경우 혹은 충분히 겹쳐지지 않은 경우, 기존 알고리즘과 비한 성능 이득은 보이지 않는다. 이는 헬퍼 저장매체 용량에 맞게 사용자의 선호도 분포 상 높은 순서대로 파일을 저장하는 것이 두 경우에 대해 공통적인 해결책이기에 자명한 결과이다.

VI. 요약 및 결론

본 논문에서는 선행연구로부터 영감을 받은 펠토 캐싱에서의 개선된 파일 배치 전략에 대해 소개하였다. 펠토 캐싱은 사용자가 헬퍼와 대형 기지국으로부터 서비스 받는 네트워크 구조이다. 여기서 헬퍼라 함은 백홀이 없거나 저용량 백홀을 가지지만 대신에 저장 매체 용량을 지닌 펠토 기지국이다. 데이터 트래픽을 지프 분포로 모델링함으로써 서비스 제공자들은 사용자들에게 인기 있는 자료들을 예측하고 이들을 헬퍼에 미리 저장하여 사용자들로 하여금 대형 기지국과 통신을 하기 보다는 가까운 헬퍼로부터 파일을 캐시할 수 있게 한다. 이것이 펠토캐싱이라 명명된 이유이다. 이에 고려해 볼 문제점은 각각 헬퍼에 파일을 저장하는 전략이다.

선행연구 [1]에서, 시스템 내 전체 사용자의 지연값을 최소화하는 헬퍼의 파일 배치 전략이 제시되었고 이는 그리디(greedy) 알고리즘을 기반으로 한다. 본 논문에서는 주어진 셀 배치, 사용자의 위치분포와 파일 요청 분포를 이용해 헬퍼로부터 서비스 받는 사용자의 수를 최대화하는 것을 목적으로 식을 세워 접근하였다. 이에 추가적으로 전체 시스템의 최적화 없이 헬퍼의 격자 구조 위치에 적용할 수 있는 두 단계의 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 헬퍼들의 연결 가능 범위가 중첩되는 경우 기존 알고리즘에 비해 성능이득을 보였고, 이를 가상 모의실험으로 증명하였다.

앞으로의 연구 방향은 크게 두 가지가 있다. 헬퍼로 인한 기지국의 데이터 오프로딩(off-loading) 효과의 수학적인 분석과 향상된 헬퍼 파일 분배 전략이다. 헬퍼 파일 분배 전략은 저복잡도로 더욱 광범위한, 즉 헬퍼의 위치가 규칙적이지 않은 경우 적용 가능한 알고리즘이 필요하다. 또한 헬퍼와 기지국 간 자원 할당 문제 역시 고려할 만한 문제다.

References

[1] K. Shanmugam, N. Golrezaei, A. Dimakis, A. Molisch, and G. Caire, "FemtoCaching: Wireless content delivery through distributed caching helpers," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no.12, pp. 8402-8413, Dec. 2013.

[2] Cisco, *Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2012-2017*, retrieved, from http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html.

[3] *Analysis of the impact of traffic growth on the evolution of Internet access*, White Paper delivered to the US FCC by the Corporate CTO Organization, Bell Labs, Alcatel-Lucent, 2010.

[4] V. Chandrasekhar, J. Andrews, and A. Gatherer, "Femtocell networks: A survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, 2008.

[5] [Online]. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html

[6] L. Adamic and B. Huberman, "Zipf's law and the Internet," in *Glottometrics*, pp. 143-150, 2002.

심재남 (Jae-Nam Shim)



2012년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학과 공학사
 2012년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합 과정
 <관심분야> Femto-Caching, 5세대 이동통신 시스템

민병윤 (Byoung-Yoon Min)



2010년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학과 공학사
 2010년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합 과정
 <관심분야> MANET, VANET, 차량 중계 통신 기술, 5세대 간섭활용기술

김 동 구 (Dong Ku Kim)



1983년 2월 : 한국항공대학교 통
신공학과 졸업

1985년 : U.S.C. Dept. of Electr-
onical Engineering 석사

1992년 : U.S.C. Dept. of Electr-
onical Engineering 박사

1994년~현재 : 연세대학교 공과

대학 전기전자공학과 정교수

<관심분야> 5세대 이동통신 시스템, 협력 MIMO 기술,
무선 이동 Relay 기술, Compressive Sensing, 소형
셀 기술