

## 초소형셀 자율무선네트워크 기술

정승\* | 이용\* | 한승재 | 이진성\* | 윤동규\* | 심세민

\*한국과학기술원(KAIST), 연세대학교

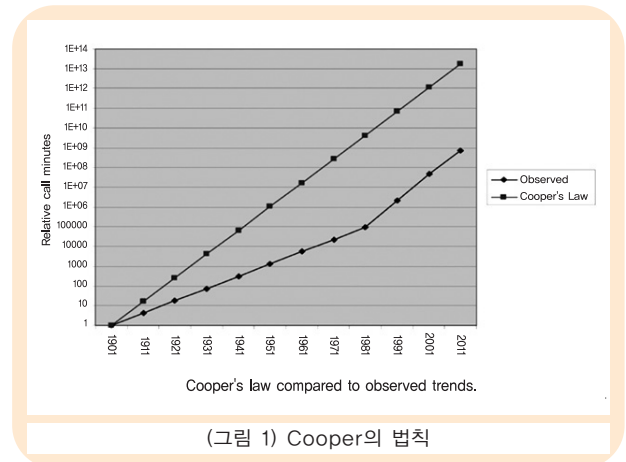
### 요약

휴대 가능한 이동 단말의 광범위한 보급과 무선 인터넷 기술을 근간으로 하는 모바일 컴퓨팅의 급속한 확대는 무선 네트워크 용량의 획기적인 증대를 요구하게 됐다. 본 논문에서는 공간 재사용(Spatial Reuse)을 통한 전송 용량 증대를 달성하기 위해 소형화된 셀 기반의 무선 네트워크 구조를 제안한다. 특히, 이 네트워크를 구성하기 위한 핵심기술을 분산화된 계층 교차 최적화, 초소형셀을 위한 이동성 지원, 무선 네트워크 가상화로 구분, 현재 진행중인 연구 내용을 자세하게 기술하고 이와 관련된 주요 이슈들을 함께 다루도록 한다.

### 1. 서론

오늘날의 모바일 데이터 트래픽은 3G 셀룰라망의 전송용량(capacity)을 뛰어넘어 전례 없는 속도로 증가하고 있다. 많은 연구(e.g., 1, 2)에서 2014년까지 모바일 사용자들이 월 평균현재 사용량의 5.4배에 해당하는 7GB의 트래픽을 소모할 것으로 예상하고 있다. 또한 전세계 모바일 데이터 트래픽의 총량은 월 평균 2009년 대비 약 39배 늘어난 3.6 엑사바이트에 이를 것으로 예측된다. 이러한 폭발적인 트래픽 증가를 충족시키기 위해서, 진보된 PHY 기술이 적용된 차세대 장비로 기존 3G망을 업그레이드하는 것이 현시점에서 대표적인 솔루션이다. 하지만, PHY 기술은 이론적인 한계

점에 점점 다가가고 있기 때문에, 확장성(Scalability) 측면에서 적합하지 않은 방법이다. 추가 주파수 스펙트럼 할당 역시 근본적인 해결책은 될 수 없다. 결국, 셀의 크기를 줄여서 더 많은 소형 셀들을 촘촘히 설치하는 접근 방법이 현실적인 대안으로 고려될 수 있는데, 펨토셀(Femtocell)이 이런 경향을 보여주는 대표적인 예이다. (그림 1)의 Cooper의 법칙에 따르면, Cooper는 무선 주파수 스펙트럼을 통해 전송할 수 있는 Voice Call의 수는 1950년 이래 백만 배 정도로 증가하고, 당분간 이것이 지속될 것이라 예측했다[3]. 이런 증가를 구성하는 가장 큰 요인(약 2700 배에 해당)으로 Cooper는 소형 셀을 통한 스펙트럼의 공간 재사용 (Spatial Reuse)에 의한 효과라고 제안했다. Cooper의 법칙은 Shannon limit으로 대표되는 물리 계층 한계에도 불구하고, 적절하게 배치한 소형화된 셀로 구성된 인프라망 구축이 엄청난 무선 전송용량의 증가를 가져올 수 있음을 시사한다.



그러나, 초소형 셀을 통한 공간 재사용의 이득은 필연적으로 매우 높은 관리 비용을 수반한다. 인프라 망이 소형 셀의 추가로 점점 더 밀집될수록, 셀간 간섭 (Inter-Cell Interference, ICI) 이 더욱 심각해지고, 이를 관리하기 위해 이전보다 더 많은 양의 정보와 계산을 요구하기 때문이다. 따라서 복잡도를 낮추면서 간섭을 효율적으로 관리하는 ICI 관리 기법이 필요하다. 이외에도, 해결해야 할 다양한 기술적 이슈가 있다. 바로, self-configuration, self-optimization, self-diagnosis, self-healing 등과 같이 자율성과 관련된 기술 (self-x)이다. 초소형 셀을 담당하는 기지국(BS)은 기존 장비에 비해 잦은 고장으로 인해 안정성이 떨어질 가능성이 높고, 이동통신 사업자와 같은 네트워크 오퍼레이터에 의해 계획적으로 운용되기보다, 대부분 개인 가입자에 의해 자유롭게 배치 및 운용이 좌우될 경우가 많을 것이다. 이는 마치 Ad-Hoc 방식으로 네트워크가 구성되는 것처럼 생각될 수 있는데, 이렇게 동적인 망 구성에 있어서 앞서 언급한 self-x 특성은 복잡한 네트워크 관리를 필요로 하지 않으면서, 초소형 셀에 의한 전송 용량의 이득을 실현할 수 있도록 완전히 분산화된 형태로 개발되어야 한다.

초소형셀 간 끊김없는 (Seamless) 이동성 지원을 위해서 기존의 셀룰라망에 적합한 이동성 지원 방식에서 벗어날 필요가 있다. 무선인터넷 트래픽의 비약적 증가와 다양한 종류의 이중 무선통신망이 Overlay 되어 혼재하게 되면서, 이동통신망 구조가 기존의 계층적 중앙 집중형 구조를 탈피하여 분산화된 평면구조 네트워크 구조로 진화하고 있다. 예를 들면, 3GPP LTE 망 구조가 이러한 경향을 잘 보여준다. 따라서, 초소형셀 환경에서의 이동성 지원은 새로운 평면형 망 구조에 적합한 분산화된 이동성 지원 프로토콜을 활용하여 각 단말의 특성을 가장 잘 지원할 수 있는 셀로 빠르게 핸드오버 하는 기능을 제공해야 한다.

한편, 요즘 각광받고 있는 네트워크 가상화 기술을 단일 네트워크 인프라로 구성된 초소형셀 자율 네트워크에 접목시킬 수 있다. 네트워크 가상화란 공통의 실제 물리 네트워크 (Physical Network) 위에 여러 개의 논리적인 네트워크 (Logical Network) 들을 독립적으로 운용시키는 기술이다. 예를 들어, 병원에 초소형 셀 무선 네트워크가 설치된 경우를 생각해 보자. 여기에 가상화 기술을 적용한다면 무선 네트워크의 일부는 환자들의 체온 및 맥박을 체크하는 센서들

간의 통신을 위한 네트워크로, 다른 일부는 병원 내의 무선 사무기기들간의 네트워크로 이용하는 등, 서로 독립적인 네트워크가 한 네트워크 안에 공존하는 것처럼 구현할 수 있게 된다.

## II. 본 론

### 1. 분산 계층교차 최적화

초소형셀간 간섭관리(ICI)는 PHY 계층부터 MAC, 라우팅, 트랜스포트 계층까지 모든 계층에서 고려될수 있다. 예를 들면, successive interference cancelation과 interference alignment는 PHY 계층에서 ICI를 관리하는 대표적인 방법이다. MAC을 포함한 상위 계층에서는 ICI 관리와 self-x 문제를 위해 큐 안정성(Queue Stability)을 기반으로 하는 stochastic network utility maximization (NUM) 관점에서 기술할 수 있고, 이는 다음과 같이 주어진다.

$$\max_{R \in \mathcal{A}} \sum_s U_s(R_s) \quad (1)$$

여기서,  $R = [R_s]$  는 네트워크 내의 모든 유저의 long-term average rate을 나타내고,  $\mathcal{A}$  는 네트워크의 long-term rate region으로, 무선 채널의 randomness 가 유한한 상태를 가지고, 이러한 상태의 추이가 stationary distribution을 갖는 irreducible Markov chain으로 모델링이 되면 convex 하다는 것이 알려져 있다.  $U_s$ 는 유저  $s$ 의 만족도를 나타내는 효용 함수(Utility Function)로써, concave하다고 가정한다. 또한 네트워크로 들어오는 외부 입력은 finite mean을 가지는 stochastic process 를 따르고, 각 무선 링크는 독립적인 큐를 관리한다고 가정한다.

위의 NUM 문제 (1)은 아래의 (2)와 같은 트랜스포트 계층 문제와 (3)과 같은 MAC 계층 문제를 함께 해결하는 방법으로 최적의 해를 찾을 수 있다(여기서 모든플로우의전송경로는 고정되었다고 가정한다) [4-6]. 시간  $t$ 에서, 모든 소스 유저  $s$ 는 자신의 instantaneous data rate  $r_s(t)$ 를 다음의 식을 통해 독립적으로 결정한다.

$$r_s(t) = U_s'^{-1} \left( \sum_{l \in L(s)} q_l(t) \right) \quad (2)$$

여기서,  $L(s)$  는 플로우  $s$  의 경로에 존재하는 모든 링크의 집합을 나타내고,  $\sum_{l \in L(s)} q_l(t)$  는 시간  $t$  에서 플로우  $s$  의 종단간 (End-to-End) 큐 길이의 합을 나타낸다. 이러한 형태로 소스노드에서 수행하는 혼잡 제어 알고리즘은 종단간 큐 길이 정보를 소스노드로 전달하는 시그널링을 통해, 분산화된 방식으로 구현할 수 있다. 특히, 모든 링크에서 각 플로우마다 독립적인 큐(Per-flow Queue)를 관리하는 경우에는 종단간 시그널링 정보 교환 없이, 소스 노드의 로컬 정보만을 이용해서 완전히 분산화된 형태의 혼잡 제어를 할 수 있음에 주목하자.

무선 네트워크의 MAC 계층 알고리즘은 네트워크 전체 (Network-wide)에 대한 weighted sum rate을 최대화하는 문제로 아래 (3)과 같이 기술되는데, 이를 실제로 구현하기 위해 많은 엔지니어링 이슈를 포함하고 있다.

$$\max_P \sum_{l \in L(s)} q_l(t) r_l(t, P) \quad (3)$$

여기서,  $q_l(t)$  는 시간  $t$  에서 링크  $l$  의 큐 길이이고,  $P=[P_l]$  는 모든 링크의 power allocation vector이고,  $r_l(t, P)$  는 시간  $t$  에서 네트워크 전체의 채널 상태가 주어졌을 때, power allocation  $P$ 에 의해 링크  $l$  이 달성하는 rate을 나타낸다. 이러한 모델은 셀룰라망에서 ICI 관리를 위한 알고리즘 뿐 아니라, 모든 무선 네트워크에서 관찰할 수 있는 매우 일반적인 문제로서 stochastic NUM으로 모델링하는 경우, 매 시간  $t$  마다 (3)을 만족하는  $P$ 를 반복적으로 구하는 것을 의미한다. 이 문제를 풀기 위해서 네트워크의 모든 정보를 이용해야 하는 centralized operation 뿐 아니라, 매우 높은 복잡도를 가지는 computation이 요구된다. 간단한 예로, 각  $P_l$  이 0 과 최대값을 선택할 수 있는 경우를 고려해보자. 이 때,  $P$ 를 구하는 문제는 충돌이 없이 성공적인 전송을 위해 간섭을 야기하는 모든 링크들이 동시에 activation 되지 않도록 하는 링크 스케줄링으로 볼 수 있다. 이는, 이른바 무선 다중접속 네트워크 연구에서 활발하게 연구 중인 max-weight scheduling (MWS) 문제와 같다[7, 8]. MWS 문제는 weighted

maximum independent set을 구하는 문제를 포함하므로, NP hard 하다는 것이 알려졌다. 좀 더 복잡한, multi-carrier, multi-cell network에서 ICI 관리 문제도 MAC 계층 문제로 표현될 수 있다[9, 10]. 이때, MAC 계층 문제는 유저 스케줄링과 power allocation을 동시에 해결해야 하는 centralized joint optimization 문제가 되고, 유저 스케줄링이 다수의 NP-hard 문제를 포함하고, power allocation이 non-convex optimization을 포함하기 때문에, 이 역시 매우 높은 계산 복잡도를 요구하게 된다.

특히, MWS와 동적 ICI 관리 문제에 대해서 계산 복잡도를 낮추고, 분산화된 알고리즘을 위한 많은 연구들이 진행됐다. [8]에서는 pick-and-compare라 불리는 randomized algorithm을 제안했다. 이 알고리즘은 선형 복잡도를 가지고 MWS를 점진적으로 풀게 되는데, 복잡도의 완화는 심각한 delay와 느린 convergence speed를 초래한다. [11, 12]에서는 분산화된 greedy/maximal scheduling 알고리즘을 제안하는데, 최대 성능에서 약간의 손실을 감수하면서, 근사적으로 스케줄링을 수행한다. 최근에는, CSMA의 주요 변수인 back-off counter와 packet transmission time의 곱이 링크의 큐 길이의 지수 함수에 따라 조절되도록 하는 CSMA 기반 알고리즘이 MWS를 점진적으로 따르는 것을 수학적으로 증명했고 [13-15], 이를 802.11 기반 하드웨어에 프로토타입 구현한 것이 발표되기도 했다[16]. 그럼에도 불구하고, 매우 낮은 복잡도를 가지면서 완전히 분산화된 MWS 알고리즘 개발은 아직 논의되지 않은 많은 다른 이슈들을 포함한 채, 여전히 open problem 이다. 그 중에서 가장 시급한 것은 delay와 관련된 연구이다. MWS는 본질적으로 큐잉을 기반으로 동작하므로 심각한 전송 지연 문제를 겪을 수 있다. 최대 성능 (Throughput optimality) 으로부터 손실을 최소화함과 동시에, delay를 줄이는 연구는 현재 우선순위가 높은 연구 이슈 중의 하나이다. 이에 상대적으로, ICI 관리를 위한 낮은 복잡도의 분산화된 알고리즘은 리서치 커뮤니티로부터 적은 관심을 받아왔고, 일부 주목할만한 논문이 있었을 뿐이다 [9, 10]. 특히, [9]에서는 reference user라는 개념이 도입되어 네트워크 전체의 최적화를 위한 중앙집중형 구조를 분산화하고 계산 복잡도를 줄였지만, 최대 성능을 보장하지 못한다. 알고리즘 개발과 함께 개념 증명 수준의 프로토타입 구현을 통한 성능 분석은 이 분야에 크게 기여할 수 있는 좋은 기회

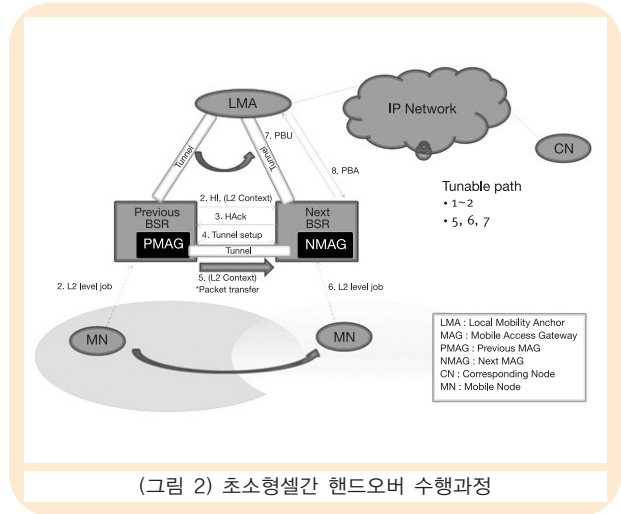
이다. 예를 들면, 802.11 인터페이스 또는 SDR (Software Defined Radio) 기반 하드웨어를 활용할 수 있을 것이다.

초소형셀 네트워크를 위한 ICI관리 기술은 밀집된 WiFi 엑세스망 환경에 낮은 복잡도의 알고리즘을 구현함으로써 달성할 수 있는 전송용량의 이득을 파악하고, 이를 통해 제안하는 알고리즘의 성능 분석 결과로 충분히 활용 가능하다.

## 2. 초소형셀을 위한 이동성기술

초소형셀 이동성 지원연구는 핸드오버 프로토콜 연구와 최적의 핸드오버 대상 셀을 선택하는 알고리즘 연구라는 두 축을 중심으로 진행하고 있다. 제안하는 핸드오버 프로토콜은 PMP(Proxy MIP)을 기반으로 설계되었다. 3GPP LTE와 Mobile WiMAX 는 PMP를 기반의 Layer 3 이동성 제공을 표준화하고 있다. PMP에 기반한 Layer 3 이동성 기술은 평면 구조 무선망에, 특히 이중망에, 적용하기에 많은 장점을 갖는다. 이는 Legacy Network과의 연동을 위해서도 유리하다. 즉, Inter-초소형셀 Handover와 초소형셀 and Legacy Handover를 같은 틀의 Handover 방식으로 수행할 수 있다. 문제는 Layer 3 Handover에 동반되는 높은 핸드오버 latency 이다. Layer 3 Handover는 Layer 2 Handover를 전제로 하고 추가적인 작업이 요구되므로 Handover Performance가 나빠질 수 밖에 없다. 우리는 Layer 3 Handover latency를 최소화 하기 위해서 FMIP (Fast MIP) 기법을 활용한다. 즉, Layer 3 Handover 수행을 Layer 2 Handover가 완료된 후에 수행하는 것이 아니라 Layer 2의 정보를 활용하여 Layer 2 Handover 도중에 적절히 Layer 3 Handover를 시작함으로써 Layer 2 Handover와 Layer 3 Handover의 Latency를 Overlap 시킬 수 있으므로 Handover Latency를 최소화 할 수 있다. 제안하는 이동성 프로토콜은 (그림 2)에 묘사되어 있다. Layer 2 Handover를 수행하면서 Layer 2 상태 정보를 활용하여 미리 Target 초소형셀에 서비스 재개를 위한 Handover 수행을 미리 한 수 있도록 함으로써 미리 Tunnel을 생성하고 서비스를 준비함으로써 Layer 2 Handover를 완료한 이후 최대한 빨리 서비스를 재개할 수 있도록 한다. 제안하는 이동성 프로토콜을 Mobile WiMAX 기반 초소형셀에 적용한 경우가 [19]에 기술되어 있다.

각 단말의 이동 속도 및 트래픽의 특성에 따라 이 단말에 가장 적합한 셀을 선택하는 문제에 대한 연구는 먼저 실시



(그림 2) 초소형셀간 핸드오버 수행과정

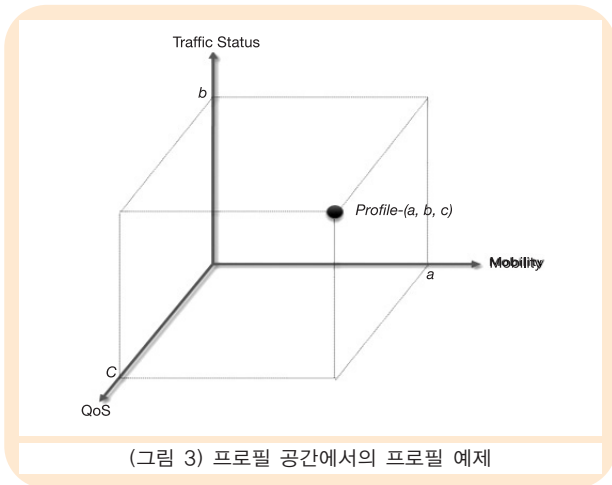
간 트래픽 과 비실시간트래픽 별로 이론적 최적 셀 선택 알고리즘을 개발하는 것부터 시작한다. 이후 실시간 트래픽과 비실시간트래픽을 모두 고려하는, 실제 적용가능한 수준의 복잡도를 가지는 알고리즘으로 발전시켰다. 이는 궁극적으로 다양한 서비스 레벨의 트래픽이 공존하는 경우를 처리하는 실용적 최적 셀 선택 알고리즘으로 진화된다.

셀 선택에 대한 연구는 최적의 성능 도출하는 연구들은 다양한 최적화 이론들을 셀 선택 문제에 적용하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 문제를 단순화하기 위해서 많은 다소 비현실적인 가정을 하고 있고, 그 계산과정이 복잡하여 높은 오버헤드를 동반한다. 따라서 이러한 연구들은 각각의 시나리오에서 성능의 이론적 한계점을 계산함으로써 기대할 수 있는 실제 성능의 범위를 보여준다는 데에 그 의미가 있다. 우리가 개발한 실시간 트래픽과 비실시간트래픽 별로 이론적 최적 셀 선택 알고리즘은 [17] 과 [18]에서 찾아볼 수 있다.

높은 대역폭을 갖는 셀을 선호하는 단순한 Heuristic 방식은 간단하다는 장점을 가지고 있으나 다른 특성들을 충분히 고려하지 못한다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 사용자의 단말의 위치, 네트워크 환경, 그리고 각 서비스가 요구하는 QoS(Quality of Service) 레벨 등과 같이, 성능에 영향을 미치는 다양한 요소들을 고려하는 방식들이 연구되고 있다. 우리는 기존 연구에서 제안하였던 기본적인 형태의 Profile-based Network Selection Framework을 발전시켜서 다양한 형태의 scheme을 탑재할 수 있는 기본 프레임워크의 형태

를 완성하였고, 그 위에서 초소형 셀을 고려하는 이중 무선 망에서의 최적셀 선택 알고리즘을 개발하였다.

Profile-based Network Selection Framework(이하 PNSF)는 네트워크 선택을 하려는 사용자와 그 사용자가 접근 가능한 셀들 각각의 특성과 현재 상태를 반영하는 프로필(profile)을 생성하고, 이 프로필들을 (그림 3)과 같이 프로필 공간(profile space)에 위치시켜서, 사용자와 각 셀 사이의 거리를 측정하여 가장 긴 거리를 가지는 셀을 선택하는 방법을 취하고 있다. 제안하는 방식은 프로필 공간을 적절하게 디자인함으로써 다양한 종류의 트래픽이 공존하는 환경을 지원할 수 있는 특성을 갖는다.

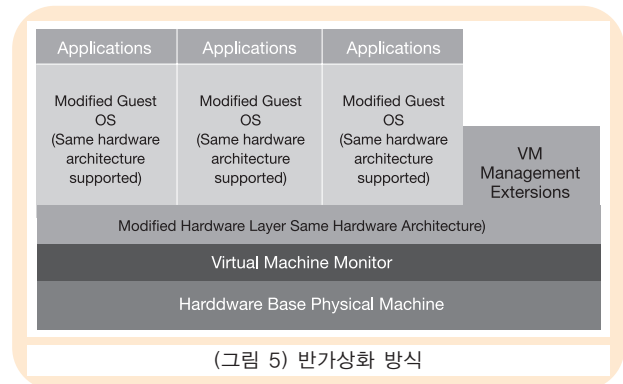
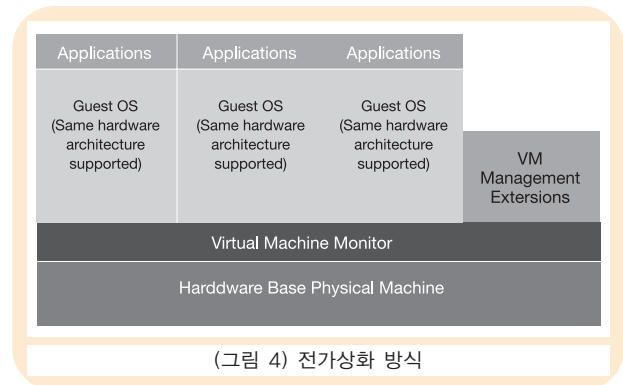


### 3. 무선 네트워크 가상화 기술

네트워크 가상화 기술은 주로 유선 네트워크를 대상으로 연구 되었다. 최근에는, 액세스망 또는 백홀망 등 네트워크 계층 구조(Hierarchical Structure) 전반에서 무선으로 네트워크를 구축함에 따라, 무선 환경에서의 가상화 기술 연구가 본격적으로 진행 되기 시작하였다. 이러한 무선 네트워크 가상화 연구에 대해 크게 두 가지 이슈가 있는데, 하나는 다수의 가상 네트워크들을 하나의 물리 네트워크 위에 체계적으로 어떻게 구현 하는가에 관한 것이고, 다른 하나는 한정된 물리 네트워크 자원을 효율적으로 사용하기 위해 각 가상 네트워크 들에게 어떻게 자원을 할당할 지에 관한 것이다.

첫 번째 이슈인 가상 네트워크 구현은 네트워크의 구성요

소인 노드와 링크를 각각 어떻게 시스템적으로 분할(혹은 가상화) 할 것 인가에 대한 것이다. 일반적으로 네트워크 가상화는 크게 노드 가상화와 링크 가상화로 구별 할 수 있다. 노드 가상화란 노드의 컴퓨팅 자원을 분할 및 추상화하여 노드 자원 집합을 가상 머신 형태로 제공해 주는 것이다. 무선 네트워크 노드 가상화의 경우, 유선 네트워크의 경우와 큰 차이가 없기 때문에 기존 유선 네트워크의 노드 가상화 방법을 그대로 적용시킬 수 있다. 노드 가상화는 크게 전가상화(Full-virtualization)와 반가상화(Para-virtualization)로 나뉠 수 있다. 전가상화는 게스트 OS가 수정 없이 그대로 동작 되도록 하드웨어를 완전하게 에뮬레이션하는 방식으로 가상화 하는 것이다. Guest OS들은 자신이 가상화됐는지를 인지하지 못하며, 하드웨어에 직접 액세스하는 것으로 인식 하지만, 실제로는 하이퍼바이저(Hypervisor)가 하드웨어를 에뮬레이션한 것이다. 여기서, 하이퍼바이저란 호스트 컴퓨터 하드웨어 자원에 대한 다수의 OS의 접근을 제어하는 가상 플랫폼으로 가상 머신 모니터라고도 부른다. 반가상화는 하이퍼바이저가 제공하는 API를 통해서 하드웨어 위에 다



수의 Guest OS를 실행시키는 방식이다. 따라서 Guest OS 들은 하이퍼바이저 API를 이용할 수 있도록 수정되어야 한다.

링크가상화는 무선 링크 자원을 논리적으로 나누어 다수의 가상 링크가 있는 것처럼 가상화 하는 것이다. 무선 링크 가상화 방법은 무선 링크에 대한 매체 접근 (Media Access) 방법과 흡사하다[20]. 기본적으로, 한 무선 링크에 대응 되는 여러 개의 가상 링크들이 서로 다른 시간에 그 무선 링크를 사용하는 TDMA 방식, 무선 링크의 대역 폭을 더 좁은 주파수 대역대로 분할하고, 분할 된 무선 자원을 각 가상링크들에게 분배하는 FDMA 방식이 있다. TDMA방식을 사용할 경우 각 가상 링크 들간의 빠른 문맥교환 (Context Switching) 과 정확한 동기화 (Synchronization)가 요구되며, FDMA 방식을 사용할 경우엔 한정된 직교채널 개수로 인한 확장성 문제가 이슈가 된다.

한편, 노드 가상화와 링크 가상화로 구분하지 않는 무선 네트워크 가상화 방식도 있다. 이는바로 SDMA (Spatial Division Multiple Access) 라는 방식으로 가상 네트워크 들을 물리 네트워크 상에서 공간적으로 구분시켜 서로 간섭 없이 동시에 동작 가능하게 만드는 방법이다. SDMA의 경우 한 물리 노드에는 하나의 가상 노드를, 하나의 물리 링크에는 오직 하나의 가상 링크를 Mapping 시킬 수 있으므로 노드 및 링크 수준이 아닌 네트워크 수준에서 가상화가 이뤄지게 된다. SDMA방식에서는 물리 네트워크의 공간 자원을 효율적으로 사용하기 위해 채널의 정교한 Power Control 이 수반된다.

두 번째 이슈인 물리 네트워크의 한정된 자원을 효율적으로 사용하는 방법과 관련하여 기존 유선 환경에서는 “가상 네트워크 임베딩 (Embedding) 문제”를 정의한다[21]. 이는 구현하고자 하는 가상 네트워크의 노드와 링크를 각각 물리 네트워크의 어떤 노드와 경로에, Mapping 할 것인지, 그리고 Mapping 된 각 물리 네트워크의 노드와 링크는 얼마의 자원을 각 가상 네트워크에 할당해야 하는지 결정하는 문제이다. 간단하게 임베딩은 가상 네트워크의 노드/링크와 물리 노드/경로간의 1:1 Mapping 및 그에 대한 자원할당을 의미한다. 임베딩 문제는 유선 네트워크 환경에서도 NP-Hard 라는 것이 증명됐기 때문에, 무선 네트워크에서는 링크 간에 존재하는 간섭 효과로 인해 훨씬 복잡하게 된다. 이뿐 아니라, 유선 네트워크에서는 특정 가상 네트워크를 물리 네

트워크 위에 임베딩하는 경우, 각 물리 노드 및 링크가 그 가상 네트워크를 지원하기 위한 자원이 충분한지 쉽게 확인할 수 있으나, 무선 네트워크에서는 그렇지 않다. 또한 주어진 가상 네트워크를 임베딩하는 다양한 대안들에 대해 어떤 것이 가장 적합한지 판단하는 것은 쉽지 않다. 예를 들면, 한 가상 네트워크를 임베딩함으로써 물리 네트워크의 사용 가능한 자원량이 감소하게 되는데, 이 감소량이 적을수록 더 좋은 임베딩 방법이라 할 수 있다. 실제로 유선 네트워크에서는 이 값을 쉽게 구할 수 있기 때문에 위의 기준대로 임베딩 대안들을 판별했지만, 무선 네트워크에서는 간섭의 영향에 의해 이를 정확하게 산출하는 것이 매우 어렵다. 따라서 무선 네트워크를 위한 임베딩알고리즘의 성능 분석을 위해서는 적절한성능 지표 (Performance Metric) 를 개발하고, 이를 기반으로 공평한성능 비교가 진행되어야 한다.

### III. 결 론

본 논문에서는 초소형셀 무선 네트워크에서 요구되는 기술을 파악하고, 성능 향상을 위한 우리의 접근 방법을 제시했다. 특히, 네트워크 전체의 sum utility를 최대화하기 위해 해결되어야 할 MAC 계층 문제와, 공간 재사용 효율을 높이기 위해 초소형 셀 환경에서의 ICI 관리 문제를 살펴봤다. 이에 대해, 낮은 복잡도를 갖는 분산화된 알고리즘의 개발은 실제 환경에서 구현 및 실험을 통해 검증이 필요하고, 전송 용량을 최대화하기 위한 효율적인 self-x 네트워크 실현에 있어서 중요한 단계이다. 초소형셀 이동성지원은 유니캐스트 뿐 아니라 멀티캐스트로 확장하는 것과 셀 선택에 있어 단말이 idle 모드상태에서 이동할 때 location update를 최적화하는 “cell reselection” 문제로 확대하고 있다. 또한 무선 채널의 특성과 셀 크기의 소형화를 함께 고려한 무선 네트워크 가상화 기법을 통해 초소형셀 네트워크를 다양한 용도의 인프라 망으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### Acknowledgement

본 연구는 지식 경제부 및 한국 산업 기술 평가 관리원의

산업원천기술 개발사업 (정보통신)의 일환으로 수행하였음.  
[KI002137, 미래형 초소형셀 무선 자율 네트워크 기술 개발]

## 참 고 문 헌

- [1] Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2009-2014, February 2010.  
[http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html).
- [2] T. Kaneshige, AT&T iPhone users irate at idea of usage-based pricing, December 2009.  
<http://www.pcworld.com/article/184589/>.
- [3] W. Webb, *Wireless communications: The future*, Wiley, 2007.
- [4] M. J. Neely, E. Modiano, C. Li, Fairness and optimal stochastic control for heterogeneous networks, In *Proceedings of IEEE Infocom*, 2005.
- [5] A. L. Stolyar, Maximizing queueing network utility subject to stability: greedy primal-dual algorithm, *Queueing Systems* 2005; 50(4):401-457.
- [6] A. Eryilmaz, R. Srikant, Joint congestion control, routing, and mac for stability and fairness in wireless networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 2006; 24(8):1514-1524.
- [7] L. Tassiulas, A. Ephremides, Stability properties of constrained queueing systems and scheduling for maximum throughput in multihop radio networks, *IEEE Transactions on Automatic Control* 1992; 37(12):1936-1949.
- [8] L. Tassiulas, Linear complexity algorithms for maximum throughput in radio networks and input queued switches, In *Proceedings of IEEE Infocom*, 1998.
- [9] K. H. Son, S. H. Lee, Y. Yi, S. Chong, Practical dynamic interference management in multi-carrier multi-cell wireless networks: A reference user based approach, In *Proceedings of WiOpt*, 2010.
- [10] L. Venturino, N. Prasad, X. Wang, Coordinated scheduling and power allocation in downlink multicell OFDMA networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2009; 58(6):2835-2848.
- [11] G. Sharma, N. B. Shroff, R. R. Mazumdar, Joint congestion control and distributed scheduling for throughput guarantees in wireless networks, In *Proceedings of IEEE Infocom*, 2007.
- [12] X. Wu, R. Srikant, Bounds on the capacity region of multi-hop wireless networks under distributed greedy scheduling, In *Proceedings of IEEE Infocom*, 2006.
- [13] L. Jiang, J. Walrand, A distributed CSMA algorithm for throughput and utility maximization in wireless networks, In *Proceedings of Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, 2008.
- [14] S. Rajagopalan, D. Shah, Distributed algorithm and reversible network, In *Proceedings of CISS*, 2008.
- [15] J. Liu, Y. Yi, A. Proutiere, M. Chiang, H. V. Poor, Towards utility-optimal random access without message passing, *Wireless Communications and Mobile Computing* 2010; 10(1):115-128.
- [16] J. S. Lee, J. H. Lee, Y. Yi, S. Chong, A. Proutiere, M. Chiang, Implementing utility-optimal CSMA, In *Proceedings of Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, 2009.
- [17] T. E. Klein, S. J. Han, Assignment strategies for mobile data users in hierarchical overlay networks: performance of optimal and adaptive strategies, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 2004;22(5): 849-861.
- [18] J. S. Park, S. J. Han, Load balancing for video streaming services in hierarchical wireless networks, *Computer Networks* 2008;52(1): 259-274.
- [19] S. Sim, J. Park, S. J. Han, S. Lee, Seamless IP Mobility Support for Flat-Architecture Mobile WiMAX Networks, *IEEE Communications Magazine* 2009; 47(6): 142-149.
- [20] S. Paul, S. Seshan, Virtualization and Slicing of Wireless

Networks, GENI Design Document, Wireless Working Group, 2006.

[21] M. Yu, Y. Yi, J. Rexford, M. Chiang, Rethinking Virtual

Network Embedding: Substrate Support for Path Splitting and Migration, *SIGCOMM Computer Communications Review* 2008; 38(2):17-29.

약 력



정 승

1988년 서울대학교 제어계측공학과 학사  
 1990년 서울대학교 제어계측공학과 석사  
 1995년 The University of Texas at Austin  
 전기 및 컴퓨터공학과 박사  
 1994년 ~ 1996년 AT&T Bell Labs 연구원  
 1996년 ~ 2000년 서강대학교 전기및전자공학과 교수  
 2000년 ~ 현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 교수  
 관심분야: 무선네트워크, 네트워크 최적화, 미래인터넷, 인간이동성 연구



이 응

1997년 서울대학교 컴퓨터공학부 학사  
 1999년 서울대학교 컴퓨터공학부 석사  
 2006년 The University of Texas at Austin  
 전기 및 컴퓨터공학과 박사  
 2006년 ~ 2008년 Princeton University 전자공학과 박사후 연구원  
 2008년 ~ 현재 KAIST 전기 및 전자공학과 교수  
 관심분야: 무선네트워크, 네트워크 이코노믹스, DTN, 친환경 네트워크



한 승 재

1989년 서울대학교 컴퓨터공학 공학사  
 1991년 서울대학교 컴퓨터공학 공학석사  
 1998년 University of Michigan, MI Ph.D.  
 1998년 ~ 1999년 University of Michigan, Ann Arbor, MI ,  
 Post-doctoral Research Scientist  
 1999년 ~ 2005년 Bell Laboratories, Lucent Technologies, Murray Hill, NJ, Member of Technical Staff  
 2005년 ~ 현재 연세대학교 부교수  
 관심분야: Wireless networks, Multimedia networking, Embedded systems, Sensor networks, Telemetric services

약 력



이 진 성

2003년 한국과학기술원 전기 및 전자공학 학사  
 2003년 ~ 현재 한국과학기술원 전기및전자공학 석박사 통합과정  
 관심분야: 무선다중접속네트워크, 계층교차최적화



윤 동 규

2009년 KAIST 전기 및 전자공학 학사  
 2011년 KAIST 전기 및 전자공학 석사  
 2011년 ~ 현재 KAIST 전기 및 전자공학 박사과정  
 관심분야: 네트워크 가상화



심 세 민

2006년 연세대학교 컴퓨터과학과 공학사  
 2006년 ~ 현재 연세대학교 컴퓨터과학과 석박사통합과정  
 관심분야: Wireless Self Organizing Network, Network Protocol Design