

# 미래의 셀룰러 이동통신에 대한 시스템 측면에서의 재 조망

황영주, 고승우, 김성륜  
연세대학교

## 요약

셀룰러 이동통신은 언제 어디서나 저렴한 가격에 무선 통신 서비스를 제공하기 위한 가장 효율적인 방법으로 알려져 있다. 그간 무선 통신의 링크 성능 향상을 위해서 연구자들의 많은 노력이 있었지만, 셀의 크기를 줄여서 단위 면적당 성능을 향상시키는 것에 비해서 그 결과는 미미하였다. 그렇지만, 셀의 크기를 줄이는 Small Cell에서 앞으로 얼마나 Cell의 크기가 줄어들어야 할 것인가? 이 논문은 이와 같은 근본적인 질문에 답하면서, 실제 시스템에서 소홀히 다루어졌던 Relay에 대한 재 조망을 하고자 한다. 즉, Small Cell과 Relay의 적절한 조합을 통해서 미래 이동통신의 다양한 설계 목표 (주파수 효율, 에너지 효율, 저 비용)를 달성할 수 있다는 것을 개념적으로 설명하고자 한다. 미래 셀룰러 시스템은 Macro Cell과 Small Cell이 혼재함과 동시에 Relay가 적절히 조합되어 구성될 수 있다는 시각을 제공하고자 한다.

## I. 서론

최근 Cisco의 Visual Networking Index Forecast Study [1]에 따르면, 글로벌 무선 데이터 트래픽의 양은 2015년까지 현재보다 25~30배 가량 증가할 것이며, 이러한 추세가 계속될 경우 2020년에 이르면 지금보다 약 1000배 가까이 증가할 것이라 예측되고 있다. 이렇게 기하급수적으로 증가하는 무선 트래픽의 수요를 감당하기 위해, 현재의 이동통신 시스템은 어떠한 방향으로 진화되어 나가야 할 것인가? 언제 어디서나 (any-time, anywhere)를 서비스하기 위한 이동통신 시스템은 저렴한 가격으로 공급할 수 있는 것인가? 우리는 이 질문에 대답하기 위해서 끊임없는 노력을 해왔다.

초창기 아날로그 방식의 이동통신이 등장한 이래로, 다양한 종류의 무선통신 기기들과 서비스들이 생겨남에 따라 이동통신 인구 및 각자가 요구하는 데이터 수준은 갈수록 높아져왔

다. 이에 대응하기 위하여 1G, 2G, 3G, 그리고 4G라 불리는 현재까지의 이동통신 기술 및 무선자원관리 (radio resource management)의 진보는 스펙트럼의 효율을 높여 제한된 주파수 자원으로 보다 많은 사람들을 지원하는 것을 그 목표로 해왔다. 데이터 전송속도 (bps/Hz)를 기준으로 하여 그간의 성능 향상 요인을 세분하여 볼 때, 먼저 초창기 800MHz 대역에서 1.8GHz, 2GHz등으로 이동통신에 사용할 수 있는 주파수 대역을 확대해 온 결과로부터, 약 25배의 전송속도 증가가 있었다 [2]. 이는 해당 주파수 대역을 다른 용도로 활용하는 대신 사용하는 것이므로 혁신의 결과라고 보기는 어렵다. 혁신의 결과는 주로 무선 채널의 성능 향상을 위한 여러 공학적인 노력들, 즉 아날로그에서 디지털로의 전환, 멀티 캐리어 (multi-carrier) 기술의 개발, 다중 안테나 (multiple-input multiple-output, MIMO)의 도입 등으로부터 왔으며, 이로부터의 초창기보다 약 5배의 전송속도 향상이 있었다 [2]. 그리고 대부분의 성능향상은 40여 년 전에 발명된 셀룰러 이동통신 (cellular radio system)기술로부터 비롯되어, 셀의 크기를 줄여나감으로써 현재의 셀룰러 기반 이동통신은 초창기에 비해 약 1600배의 전송속도 향상을 이룰 수 있었다 [2, 3].

오늘날의 셀룰러 이동통신 시스템에서 개별 링크의 성능은 이미 Shannon limit에 거의 도달 하였다. 이를 보완하기 위해서 다중 안테나 기술을 도입하고 셀룰러 주파수 대역을 보다 증가시키는 노력이 진행되고 있지만, 그것으로부터 파생되는 성능 향상은 아직 진행 중이다. 따라서 미래의 셀룰러 네트워크는 역시 현재보다 더욱 작은 반경을 갖는 기지국들이 서비스 지역에 촘촘히 배치되어 동작하는 이른바 Small Cell의 형태를 띄게 될 것이며, 이들 간의 효과적인 간섭 제어 및 무선자원관리를 통해 폭발적으로 증가하는 데이터 트래픽을 감당할 수 있을 것이라 기대하고 있다. 실제로 지난 2008~2011년 사이 셀룰러 이동통신과 관련하여 발표되었던 논문들을 보면<sup>1</sup>, Small Cell에 관한 연구가 최근 들어 많은 관심을 끌고 있음을 알 수 있다 (그림 1).

<sup>1</sup> IEEE (미국전기전자공학회) Xplore 기준으로, 셀룰러 네트워크에 관해 서만 발표되었던 학술지 (journal and magazine) 및 학회 (conference publication) 논문들을 대상으로 집계한 결과이다.

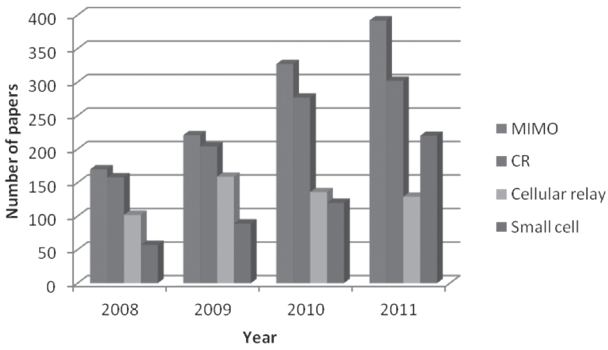


그림 1. 2008–2011년 발표된 논문 편 수 (IEEE Xplore 기준)

그러나 단순히 기지국 숫자의 확대를 통해 시스템의 용량을 증가시키는 것은 오늘날의 셀룰러 시스템을 바탕으로 생각하였을 때, 비용 및 에너지 측면에서 매우 비효율적일 수 있다. 이제까지의 셀룰러 시스템 설계는 사용 가능한 주파수 대역이 충분하고 기지국 설치를 위한 부지 비용 및 위치가 비교적 유연하다는 가정 하에서 이루어져 왔으며, 그 결과 3G와 4G 표준을 바탕으로 하는 현재의 셀룰러 시스템은 주파수 효율은 매우 높지만, 에너지 효율은 매우 낮은 특성을 보이게 되었다 [4]. 그러므로 기하급수적으로 증가하는 데이터 수요를 지원하는 데에 있어, 기지국 숫자를 늘리는 것 (densification)만으로는 실질적인 한계가 존재할 것으로 예측한다. 더 중요한 것은 이와 같은 Small Cell의 크기가 어느 정도까지 작아져야 하는지, 그리고 그에 비례해서 지속적인 성능 (area capacity, bps/Hz/km<sup>2</sup>)의 향상이 있는지에 대한 근본적인 의문에 대한 시스템 관점에서의 대답은 아직 불명확하다.

본 논문에서는 Small Cell에 대한 위와 같은 의문점에 대답해 보고, 이러한 한계를 해결하기 위한 방법 중 하나로 셀룰러 시스템에서의 Relay의 중요성을 재조명하고자 한다. <그림 1>에 나타난 것과 같이, 셀룰러 시스템에서의 Relay에 관한 연구는 2009년을 기점으로 감소하고 있고 다중 안테나 또는 인지 무선 통신 (cognitive radio, CR)에 관한 연구가 여전히 많이 이루어져오고 있다. 그러나 셀룰러 시스템에서의 Relay는 Small Cell과 함께 Macro Cell에 배치되어 동작할 때, 셀룰러 이동통신 설계를 위한 여러 목표 (비용, 에너지 효율, 주파수 효율)을 달성할 수 있는 중요한 변수라는 점에서, 미래의 이동통신 시스템을 위한 유망한 기술적 요소이다.

본 논문에서는 비용, 에너지, 그리고 주파수 효율을 모두 고려하였을 때 Small Cell과 Relay가 어떻게 함께 결합되어야 할지, 앞으로의 셀룰러 이동통신 시스템 설계에 관한 새로운 관점을 제시하고자 한다.

## II. 셀룰러 네트워크에서의 Small Cell 성능

오늘날 우리가 사용하는 이동통신의 전송속도 향상에 가장 크게 기여한 셀룰러 이동통신은, 기지국의 숫자를 늘릴수록 단말과 기지국 간의 거리가 가까워져 무선 채널의 성능이 향상되고 또한 같은 주파수 자원의 재사용 빈도 역시 올라간다는 점을 근거로 하고 있다. 그렇다면 기지국 숫자의 확장이 대체로 어느 정도의 성능향상을 가져올 수 있는가? 이 장에서는 먼저 기지국 숫자 증가에 따른 셀룰러 네트워크의 성능 향상을 알아봄으로써, Small Cell의 이득을 살펴보고자 한다.

기지국 수의 증가와 시스템의 단위 면적당 용량 (area capacity, bps/Hz/km<sup>2</sup>)간의 관계에 대해 그간 많은 연구들이 있었다. 이와 같은 관계의 분석을 재조명하기 위해, 먼저 육각형 모양 (regular hexagonal) 셀들의 격자 형태로 주어지는 종래의 셀룰러 시스템 모델을 생각해보자.

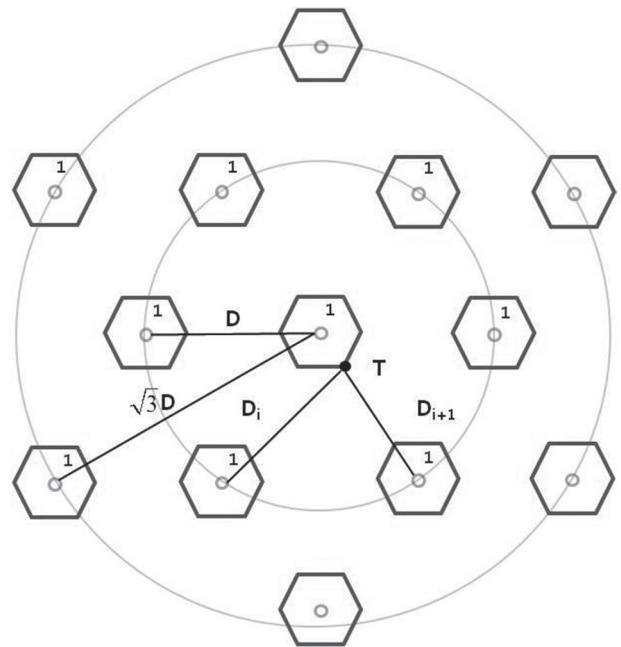


그림 2. 육각형 셀 격자모델에서 동일 채널 셀 계층 [5]

<그림 2>와 같은 셀룰러 시스템에서 순방향 링크 (downlink)의 단위 면적당 전송속도 R과 기지국의 밀도와와의 관계는 다음과 같은 수식으로 정리된다 [5].

$$BS_{density} \propto \sqrt{2^R - 1} \quad (1)$$

위 수식에서 볼 수 있듯이, 셀룰러 시스템의 단위 면적당 전송속도를 늘리기 위해서는 기지국 밀도가 기하급수적으로 증가해야 한다.

그런데 최근에는 이와 같은 수식의 결과와 다른 결론의 연구들이 있었다 [6, 7]. 이들 연구는 지금까지 일반적으로 많이 사용해온 정육각형 셀 모델이 아니라, 물리학 이론에서 사용되는 shot-noise theory를 활용한 확률 기하론 (stochastic geometry)에 근거하여 셀룰러 시스템을 분석하였다. 이러한 확률 기하론을 바탕으로 모델링되는 셀룰러 시스템에서는, 기지국과 사용자 단말의 위치가  $\lambda_{BS}$ 와  $\lambda_{user}$ 의 밀도를 갖는 Poisson point process (PPP)에 따라 각각 랜덤하게 분포되어 있다고 가정한다. 이 때 각 사용자 단말은 가장 가까운 기지국 또는 가장 채널 상태가 좋은 기지국에 접속하게 되고, 그 결과 셀의 모양은 <그림 3>과 같이 Voronoi tessellation [8] 형태를 보이게 된다.

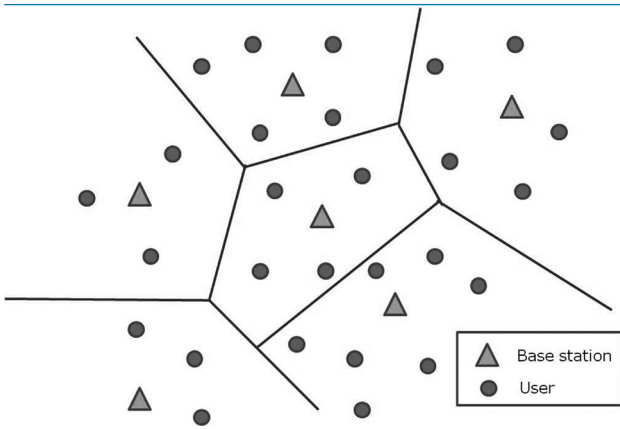


그림 3. 확률 기하론에 의해 모델링된 셀룰러 네트워크

최근의 연구 [6, 7]에 따르면, 간섭 제한적인 (interference-limited) 시스템의 순방향 링크에서 사용자 당 용량은 기지국의 밀도와 독립적이며 따라서 기지국의 숫자가 증가하더라도 간섭에 의한 단말의 통신성능 저하는 일어나지 않는다고 주장하고 있다. 이는 기지국의 밀도가 증가할 때, 전송 신호의 세기와 주변 기지국들로부터의 간섭의 세기가 같은 비율로 증가하게 되어 사용자의 불능 확률 (outage probability)에 영향을 주지 않기 때문이다. 따라서 기지국의 숫자를 늘릴수록 셀룰러 시스템의 단위 면적당 용량은 기지국 밀도에 선형으로 정비례하여 증가한다고 결론 내리고 있다.

그러나 이와 같은 결론은 기지국의 밀도가 사용자 단말의 밀도에 비해 매우 작은 경우에만 해당하는 것으로, pico-, femto- 등 여러 작은 서비스 지역을 가지면서 촘촘하게 배치되는 Small Cell의 개념을 생각하였을 때 기지국 밀도와 서비스 용량에 관한 일반적인 관계를 충분히 설명하지 못하고 있다. 기지국의 숫자가 상당히 증가하는 경우, 때로는 모든 기지국이 아닌 일부의 기지국만 전송하는 상황이 존재할 수 있다는 것이다.

이를 반영하기 위해 순방향 링크의 단위 면적당 셀룰러 시스템의 용량  $R$ 을 다음과 같이 정의해보자.

$$R = \lambda_{BS} \cdot P_{active} \cdot P_{success} \quad (2)$$

$\lambda_{BS}$ 는 기지국의 밀도,  $P_{active}$ 는 한 기지국의 셀 내에 사용자 단말이 존재할 확률, 그리고  $P_{success}$ 는 해당 기지국이 순방향 링크 전송에 성공할 확률 (즉, 1-불능확률)을 가리키며, 위와 같이 정의된 단위 면적당 시스템의 용량은 일종의 단위 면적당 전송 용량 (transmission capacity)과 같다. 한 기지국의 셀 내에 여러 사용자 단말이 존재하는 경우, 기지국은 스케줄링 (scheduling)을 통해 주어진 시점에 하나의 단말을 서비스하게 된다. 우리는 최근에 확률 기하론을 바탕으로 이를 분석한 결과 다음과 같은 수식을 얻었다 [9].

$$R = \frac{\lambda_{BS} \left(1 - (1 + 3.5^{-1} \lambda_{user} / \lambda_{BS})^{-3.5}\right)}{1 + \left(1 - (1 + 3.5^{-1} \lambda_{user} / \lambda_{BS})^{-3.5}\right) k'} \quad (3)$$

여기서  $k' = \sqrt{\gamma^t} (\pi/2 - \arctan(1/\sqrt{\gamma^t}))$ 이고,  $\gamma^t$ 은 순방향 링크에서의 목적 신호 대 간섭 비 (signal-to-interference ratio, SIR)를 가리킨다.

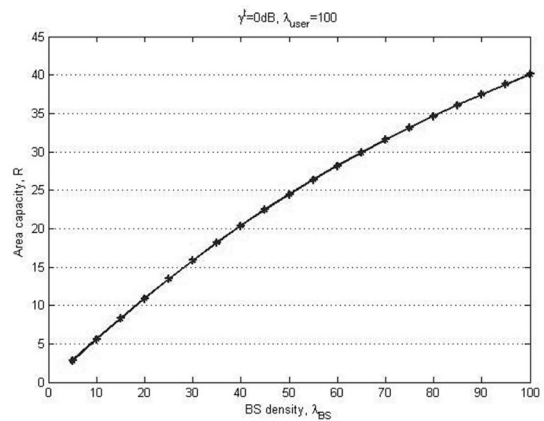


그림 4. 기지국 밀도에 따른 Small Cell 네트워크의 용량

<그림 4>는 수식 (3)에서의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 단위 면적당 시스템 용량의 증가 폭은 기지국의 밀도가 증가할수록 점차 감소하게 되고, 이는 앞서 설명한 [6, 7]에서의 결론과 다르다. 이와 같은 차이는 수식 (2)에서 정의된  $P_{active}$ 로부터 온다. 먼저 기지국의 수가 사용자 단말의 수에 비해 매우 적은 경우에는, 각 기지국의 셀에 매우 높은 확률로 하나 이상의 사용자 단말이 존재하게 되어 모든 기지국들이 순방향 링크 전송을 하게 된다 ( $P_{active} \approx 1$ ). 그러면 기지국의 밀

도가 증가할 때, 기지국과 사용자 단말 간의 전송 거리뿐만 아니라 간섭을 주는 주변 기지국들과의 거리 또한 줄어들게 되어 사용자 단말의 신호 대 간섭비의 통계적 특성은 동일하게 유지되므로, 전송 성공 확률  $P_{success}$ 는 변하지 않는다. 따라서 기지국의 수가 사용자 단말에 비해 매우 적은 경우에는 [6, 7]에서의 결론과 같이 단위 면적당 셀룰러 시스템의 용량이 기지국 밀도에 선형적으로 증가하게 된다.

그러나 기지국의 숫자가 계속해서 증가할수록 하나의 기지국이 서비스하는 셀의 크기는 점차 줄어들어, 어떤 시점에 한 기지국의 셀 내에는 전송을 원하는 사용자 단말이 존재하지 않는 경우가 생길 수 있다. 즉, 전체 기지국 중 일부만이 실제 전송을 하게 된다는 것으로, 한 기지국이 사용자 단말을 서비스하기 위해 순방향 전송을 할 확률  $P_{active}$ 는 기지국 밀도에 따라 감소하게 된다. 동시에 간섭 또한 줄어들어 전송 성공 확률  $P_{success}$ 는 증가하지만,  $P_{active}$ 의 감소가 보다 지배적인 요소가 되어 기지국의 밀도를  $k$ 배 증가시켜도 단위 면적당 시스템의 용량을  $k$ 배 증가시킬 수 없다. 이는 셀룰러 시스템의 서비스 용량을  $k$ 배 늘리기 위해서 기지국의 숫자가  $k$ 배 이상으로 증가해야 한다는 것을 의미한다. 그러므로 기지국의 숫자를 계속해서 늘리는 것은 비용 및 에너지 측면에서 매우 비효율적이다.

다음 장에서는 간섭량을 늘리지 않으면서도 무선 채널의 전송 품질을 향상시킬 수 있는 방법으로 셀룰러 시스템에서의 Relay에 관해 재조명하고자 한다.

### III. 셀룰러 네트워크에서의 Relay 이득

Relay를 활용한 다중홉 전송은 주로 ad-hoc 및 peer-to-peer 네트워크에서 많이 연구되어 왔으나, 이러한 다중홉 전송이 셀룰러 네트워크에 적용될 때 여러 가지 이득을 얻을 수 있다. 먼저, 커버리지 확장을 통해 보다 큰 셀에서 높은 데이터율을 보장할 수 있으며, Relay와 최종 사용자 단말 간의 전송 거리가 매크로 기지국에 대비하여 감소되므로 간섭에 취약한 고주파 대역을 사용하는 셀룰러 시스템에서 유리하다. 또한 기지국과 Relay, Relay와 사용자 단말 간의 동시 전송이 가능하여, 주파수 재사용을 통한 공간 다이버시티 (spatial diversity)로부터 시스템의 용량 증대 역시 피할 수 있다 [10 및 해당 논문의 참고문헌 참조]. 이 장에서는 위와 같은 장점을 갖는 셀룰러 네트워크에서의 Relay가 Small Cell과 함께 Macro Cell에 배치되어 동작하는 경우 얼마만큼의 성능 이득을 보일 수 있는지 알아보도록 한다.

II장의 시스템 모델에서와 같이 기지국과 사용자 단말은 각각  $\lambda_{BS}$ 와  $\lambda_{user}$ 의 밀도를 갖는 PPP의 형태로 네트워크에 분포하고 있다고 가정하고, 순방향 링크 전송이 이루어지는 기지국과 사용자 단말들 사이에 Relay가 존재하는 경우를 생각해 보자. 분석의 편의를 위해 Relay는 기지국과 같은 전송 전력을 사용한다고 가정할 때, 각각의 Relay들은 기지국과 사용자 단말 간의 거리의 중간 지점에 위치하는 것이 최적이다.

기지국은 서비스하고자 하는 셀 내의 사용자 단말을 먼저 스케줄링 (scheduling)한 뒤, 이후 전송 단계에서 Relay를 통해 해당 사용자 단말에게 전송을 하게 되므로, 수식 (2)에서 임의의 기지국이 순방향 전송을 할 확률  $P_{active}$ 는 Relay없이 Small Cell만 존재하는 경우와 동일하게 된다. 그러나, 서비스 받는 사용자 단말에 대한 순방향 링크의 전송 거리는 1/2이 되어 신호 대 간섭비가 증가함과 동시에 Relay로 인한 전송 지연이 발생하게 되는데, 이를 모두 고려하였을 때 전송 성공 확률  $P_{success}$ 는 Small Cell만 존재하는 경우보다 결과적으로 상승하게 된다.

<그림 5>는 셀룰러 네트워크에서 Relay를 사용하는 경우 셀룰러 시스템의 용량 증대 이득이 존재함을 보여준다. 이는 전송 지연으로부터 오는 손실에도 불구하고, 전송 거리 감소로 인한 신호 대 간섭비의 증가가 단위 면적당 용량을 향상시킬 수 있음을 의미한다. 즉, 기지국의 숫자를 줄이고 각 셀에서 Relay를 함께 배치하여 이용하면, 기지국 설치로 인한 비용을 줄이면서도 동일한 성능을 얻을 수 있다는 것이다. 그러나 다중홉 전송에 따른 에러 전파 (error propagation) 등의 문제가 발생할 수 있어, 실제로 시스템의 복잡도가 증가한다는 단점 또한 존재한다. 따라서 셀룰러 시스템의 설계 목적에 따라 Macro Cell과 Small Cell, 그리고 Relay 간의 적절한 조합이 필요하며, 이를 통한 셀룰러 시스템의 새로운 설계가 요구된다.

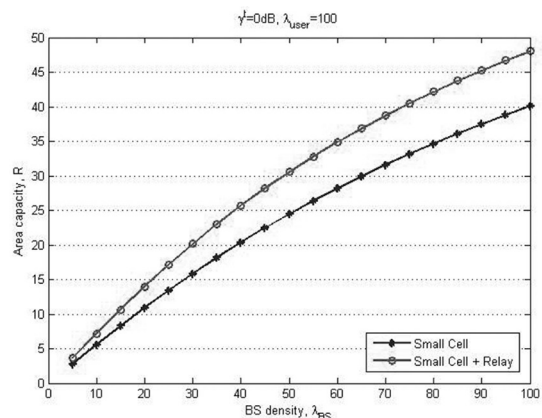


그림 5. 기지국 밀도에 따른 Small Cell + Relay 네트워크의 용량



## IV. 미래 셀룰러 네트워크의 설계: Small Cell + Relay

이제까지의 이동통신 네트워크는 주파수 자원의 효율 증대를 목표로 하면서, 소모되는 에너지 및 네트워크 설치 비용들은 불가피하게 수반되는 것으로 간주해 왔다. 그러나 오늘날 이동통신 네트워크를 설계하는 데에 있어 저 에너지, 저 비용이 주파수 효율에 못지 않게 중요한 요소로 등장하게 되었다. <그림 6>은 이러한 주요 설계 요소들을 나타내고 있으며, 그림 상의 어느 한 지점으로부터 각 꼭지점까지의 거리는 각 제약 조건들에 대한 상대적 중요도를 반영한다 [4]. 즉, 거리가 가까울수록 해당 요소가 더 중요한 제약 조건이 됨을 의미한다.

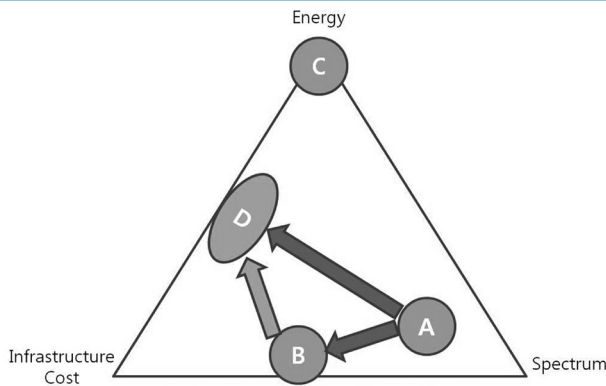


그림 6. 이동통신 네트워크 설계의 제약 조건 [4]

논문 [4]에 의하면, 위의 그림에서 현재의 셀룰러 네트워크는 <그림 6>의 A 지점을 목표로 하여 설계된 것이다. 그러나 급증하는 데이터 트래픽의 수요를 지원하기 위해 보다 많은 기지국을 설치할 경우, 셀의 크기는 지금보다 더욱 줄어들게 된다. 그러면 주파수의 재사용 빈도가 늘어나 주파수 효율은 증가하지만 기지국의 설치와 운용을 위한 비용 (infrastructure cost)이 네트워크 설계에 있어 중요한 제약 조건이 된다 <그림 6의 B>. 한편, 보다 높은 전송 용량을 얻기 위해서 보다 많은 전송 전력을 소모하게 될 경우 온실가스의 배출이 크게 증가하므로 [11], 소비되는 에너지를 가급적 줄이는 것 또한 이동통신 네트워크 설계에 있어 중요한 요소가 된다 <그림 6의 C>.

II장에서 설명한, 많은 수의 기지국이 존재하는 Small Cell 개념의 셀룰러 네트워크는 <그림 6>에서 B 지점을 목표로 한 것이다. 그 이유는 다음과 같다. 기지국의 밀도가 증가할수록, 셀의 크기는 줄어들어 개별 기지국의 전송 전력 소모량은 감소하게 된다. 따라서 에너지 효율은 향상될 수 있지만, 급격히 증가하는 인프라의 설치/운용 비용이 중요한 제약 조건이 되는 것

이다. 반면에 셀룰러 네트워크에서 Small Cell과 함께 Relay를 활용하는 경우, Relay는 기지국과는 달리 유선 백홀 (wired backhaul) 연결을 필요로 하지 않기 때문에 인프라의 설치 및 유지를 위한 비용을 줄일 수 있다. 따라서 III장의 <그림 5>에 나타난 것과 같이, Small Cell에 Relay를 함께 배치하게 되면 Small Cell만 있는 경우보다 기지국 수를 더 줄이면서도 동일한 네트워크 성능에 도달할 수 있어, 인프라 비용 측면에서의 효율이 높아진다. 하지만 다중홉 통신으로 인해 전송 횟수가 증가함에 따라, 네트워크 내에서 전송에 소모되는 전력량이 늘어나므로 에너지 측면에서의 효율이 중요한 제약 조건이 되어, <그림 6>의 C 지점을 네트워크 설계 목표로 하게 된다.

그렇다면 미래의 셀룰러 네트워크는 어떠한 방향으로 설계되어야 할 것인가? 가까운 미래에 TV white space를 이용한 이차적인 주파수 접속 (secondary spectrum access)이 상용화될 것으로 예측됨에 따라 [12], 주파수 효율이 네트워크 설계에 미치는 영향은 이전보다 줄어들게 될 것이다 [4]. 따라서 앞으로의 이동통신 네트워크는 에너지 효율과 인프라 설치/운용 비용을 동시에 고려하는 방향, 즉 <그림 6>의 D 지점을 목표로 하여 설계되어야 할 것이다. 이것은 다음과 같은 최적화 문제로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \min E_{\text{total}} &= E_{\text{infra}} + E_{\text{energy}} \\ \text{s.t. } R &\geq R_{th} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $E_{\text{infra}}$ 와  $E_{\text{energy}}$ 는 인프라 설치/운용 및 네트워크 내의 에너지 소모로부터 각각 비롯되는 비용 (expense)을 가리키며,  $R$ 는 수식 (2)에서 정의한 네트워크의 단위 면적당 용량을, 그리고  $R_{th}$ 는 증가하는 트래픽 수요를 지원하기 위한 미래 시스템의 단위 면적당 최소요구 용량을 의미한다. 즉, 서비스를 위한 최소한의 네트워크 성능을 보장하면서 이를 위해 발생하는 비용은 최소화하는 것이 앞으로의 이동통신 시스템 설계를 위한 목적 함수가 된다 <그림 6의 D>.

<그림 7>은 이러한 최적화 문제를 해결하여 설계되는 미래의 셀룰러 네트워크의 형태를 설명하고 있다. 현재의 셀룰러 시스템에  $\lambda_1$ 의 밀도로 기지국이 설치되어 있다고 가정해보자 <그림 7의 A>. 이 지점으로부터 수식 (4)의 제약 조건에서 주어진 최소요구 용량  $R_{th}$ 에 도달하기 위해서는, 지금보다 더 많은 기지국을 설치하거나 (기지국 밀도  $\lambda_2$ , <그림 7>의 B 방향) 또는 현재 시스템의 모든 셀에 Relay를 설치하는 (<그림 7>의 C 방향) 방법이 있다. 그러나 전자의 경우는  $E_{\text{infra}}$ 가 매우 높아지고  $E_{\text{energy}}$ 는 낮아지게 되는 반면, 후자에서는  $E_{\text{infra}}$ 는 낮지만  $E_{\text{energy}}$ 가 비교적 커지게 된다. 따라서 전체 비용  $E_{\text{total}}$ 을 최소화 할 수 있는 미래 네트워크의 기지국 밀도는 <그림 7>

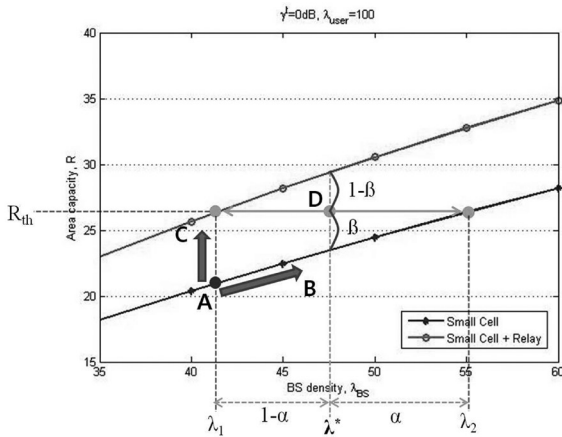


그림 7. Small Cell과 Relay가 조합된 최적 네트워크 설계

의 녹색 선 상에 존재하게 되며, 그 결과 얻어진 최적의 시스템을 D 지점이라 하자. 기지국 수의 확대만을 이용할 경우 현재보다 추가로 설치되어야 할 기지국 수에 대비한 D 지점의 기지국 수  $\alpha = \frac{\lambda^* - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ 는, Relay 설치로 인해 얻을 수 있는 비용 감소 측면에서의 이득을 의미하며 이 때 기지국의 밀도는  $\lambda^* = (1 - \alpha)\lambda_1 + \alpha\lambda_2$ 로 표시할 수 있다. 또한 해당 시스템에서 Relay가 존재하는 Small Cell의 비율을  $\beta$ 로 나타내면, 최적의 시스템에서 Relay가 결합된 Small Cell의 기지국 밀도는  $\lambda_{S+R}^* = \beta\lambda^*$ 로, Relay가 없는 Small Cell의 기지국 밀도는  $\lambda_S^* = (1 - \beta)\lambda^*$ 가 된다.

〈그림 8〉은 이와 같은 네트워크를 도식화하여 나타낸 것이다.

- 1) Small Cell ( $\lambda_S^*$ ): 고주파 대역에서 동작하는 오늘날의 셀룰러 시스템은 전파 특성 상 빌딩, 벽 등 장애물에 의해 음영 손실 (shadowing loss)이 많이 발생하게 된다. 건물 내에 작은 반경의 기지국을 설치, Small Cell을 구성하여 적은 에너지로 이러한 음영 지역을 커버할 수 있다.
- 2) Small Cell + Relay ( $\lambda_{S+R}^*$ ): 이동통신 인구 및 데이터 트래픽의 수요가 매우 높은 도심 지역 (high-density urban area)에서는 추가적으로 설치되는 기지국의 수를 줄이는 대신 각 Small Cell 내에서 Relay를 함께 사용함으로써, 비용과 에너지 효율을 모두 고려할 수 있다.

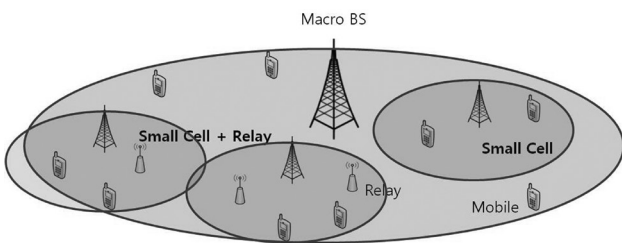


그림 8. 미래 셀룰러 네트워크: Small Cell과 Relay의 공존

위와 같이, 미래의 셀룰러 네트워크는 Small Cell과 Relay가 설계 목적에 따라 알맞게 배치되어 공존하는 형태로 발전해 나가야 할 것이다.

## V. 결론

지금까지의 이동통신 시스템의 성능 향상은 주로 기지국의 수를 늘려 셀의 크기를 줄여나가는 것으로부터 비롯되었다. 무선 데이터에 대한 수요는 과거 어느 때보다 더욱 폭발적으로 증가하고 있으며, 따라서 앞으로의 이동통신 시스템 역시, 더 많은 기지국들이 설치되어 보다 작은 셀 반경을 나타내는 소위 Small Cell의 형태를 보이게 될 것이다. 그러나 오늘날의 셀룰러 시스템을 바탕으로 생각해 보았을 때, 사용자의 용량을 증가시키는 데 있어 기지국의 숫자를 계속해서 늘려나가는 것은 비용적인 측면에서 매우 비효율적이며 실질적으로 한계가 있다. 본 논문에서는 이와 같은 한계를 극복할 수 있는 방법 중 하나로 셀룰러 네트워크에서의 Relay 활용을 재조명하였다. 이동통신 네트워크 설계에 대한 다양한 제약 조건들을 고려하여 Small Cell과 셀룰러에서의 Relay가 목적에 맞게 적절히 결합될 경우, 저 비용, 저 에너지로도 원하는 네트워크 성능을 얻을 수 있다. 이러한 결과는 Small Cell과 Relay가 공존하는 미래 셀룰러 네트워크 설계에 대한 새로운 관점을 제시하고 있으며, 이는 공학적, 경제적 관점에서도 흥미로운 시사점이 될 것이다.

## 참고 문헌

- [1] Cisco, "Cisco visual networking index: forecast and methodology, 2011-2016," ([http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-481360.pdf](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360.pdf))
- [2] M. Dohler, R. W. Heath, A. Lozano, C. B. Papadias, and R. A. Valenzuela, "Is the PHY layer dead?," IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 4, April 2011, pp. 159-165.
- [3] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, "Femtocell networks: a survey," IEEE Commun. Mag., vol. 46, no. 9, September 2008, pp. 59-67.
- [4] S. Tombaz, A. Västberg, and J. Zander, "Energy- and cost-efficient ultra-high-capacity wireless

- access,” IEEE Wireless Commun., vol. 18, no. 5, October 2011, pp. 18–24.
- [5] J. Zander and S.-L. Kim, Radio Resource Management in Wireless Networks, Artech House, Norwood, MA, March 2001.
- [6] J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, “A tractable approach to coverage and rate in cellular networks,” IEEE Tran. Commun., vol. 59, no. 11, pp. 3122–3134, November 2011.
- [7] H. S. Dhillon, R. K. Ganti, F. Baccelli, and J. G. Andrews, “Modeling and analysis of k-tier downlink heterogeneous cellular networks,” IEEE J. Sel. Areas in Commun., vol. 30, no. 3, April 2012, pp. 550–560.
- [8] D. Stoyan, W. Kendall, and J. Mecke, Stochastic geometry and its applications, 2nd Ed., John Wiley and Sons, 1996.
- [9] S. M. Yu and S.-L. Kim, “Downlink capacity and base station density in cellular networks: stochastic geometric approach,” IEEE WiOpt Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks (SpaSWiN 2013), Tsukuba, Japan, 2013 (<http://arxiv.org/pdf/1109.2992.pdf>)
- [10] R. Pabst, B. H. Walke, D. C. Schultz, P. Herhold, H. Yanikomeroglu, S. Mukherjee, H. Viswanathan, M. Lott, W. Zirwas, M. Dohler, H. Aghvami, D. D. Falconer, and G. P. Fettweis, “Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio”, IEEE Commun. Mag., vol. 42, no. 9, September 2004, pp. 80–89.
- [11] Y. Chen, S. Zhang, S. Xu, and G. Y. Li, “Fundamental trade-offs on green wireless networks,” IEEE Commun., Mag., vol. 49, no. 6, June 2011, pp. 30–37.
- [12] Y. J. Hwang, K. W. Sung, S.-L. Kim and J. Zander, “Scenario Making for Assessment of Secondary Spectrum Access,” IEEE Wireless Commun., vol. 19, no. 4, August 2012, pp. 25–31.

## 약 력



황 영 주

2006년 연세대학교 전기전자공학부 공학사  
 2008년 연세대학교 전기전자공학부 공학석사  
 2008년~현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정  
 2013년~현재 삼성전자 네트워크사업부 선임연구원  
 관심분야: Radio resource management, dynamic spectrum sharing and interference networks, device-to-device communications, capacity of wireless networks.



고 승 우

2006년 연세대학교 전기전자공학부 공학사  
 2007년 연세대학교 전기전자공학부 공학석사  
 2007년~현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정  
 2013년~현재 LG 전자 CTO 차세대 통신연구소 선임연구원  
 관심분야: Information-theoretical capacity, mobility control, wireless power transfer.



김 성 룬

1994년 KAIST 공학박사 (Operations Research)  
 1994년~1998년 한국전자통신연구원 무선방송연구소 선임연구원  
 1998년~2000년 스웨덴 KTH (Royal Inst. Tech), 조교수 (Radio Commun. Systems)  
 2000년~2004년 한국정보통신대학교, 조교수, 부교수  
 2004년~현재 연세대학교 전기전자공학부, 부교수, 교수  
 관심분야: Radio resource management, information theory in wireless networks, economics of wireless systems, robotic networks.