

펌토셀 통신 시장 진입과 스펙트럼 공유 기술(Spectrum Sharing Scheme) 결정

전언지, 박재옥*

이화여자대학교, 연세대학교*

요약

본고에서는 신규 통신사업자가 펌토셀 시장에 진입할 것인지 여부와 진입한다면 어떤 펌토셀 공유 기술(Spectrum Sharing Scheme)을 선택할 것인지를 장기적인 문제로 분석한다. 그리고 이와 관련된 신규 사업자의 가격 결정 전략과 사용자의 펌토셀 통신 서비스 가입 결정을 각각 중기, 단기적인 문제로 분석한다. 신규 사업자가 펌토셀 시장에 진입하여 독점사업자로 운영하는 경우와 기존의 통신사업자와 복점으로 경쟁하는 경우를 고려하고, 각 시나리오에서 이윤을 극대화하고자 하는 신규 통신사업자의 최적 의사결정에 대해 논한다.

I. 서론

현재 무선통신 기술이 LTE-A까지 발전하면서 점점 높은 주파수를 사용하고 있고 그에 따른 신호의 페이딩이 심각하다. 특히 실내에서는 데이터 트래픽 요구량이 많고 페이딩에 의한 신호의 감쇄가 심하기 때문에, 실내 무선 통신 서비스 연결을 향상시키기 위해 통신사업자들이 임의로 데이터 트래픽이 많은 곳에 와이파이 존(WiFi Zone)을 설치하였지만 이마저도 포화상태이다. 이에 대한 해결책으로 통신사업자들은 최근 펌토셀 통신 시장의 큰 잠재력을 주목하고 있다. 본고에서는 새로운 통신사업자가 펌토셀 시장에 진입할 것인지 진입한다면 어떠한 펌토셀 기술을 선택해서 수익을 극대화할 것인지 경제적인 관점에서 게임이론을 이용하여 그 해법을 제시한다.

II. 본론

펌토셀(Femto Cell)은 가정이나 건물 내에 베이스 스테이션(Home Base Station)을 설치하여 건물 내부의 무선 통신 서비스를 지원하는 스몰셀(Small Cell)을 말하는데, 펌토셀은 매크

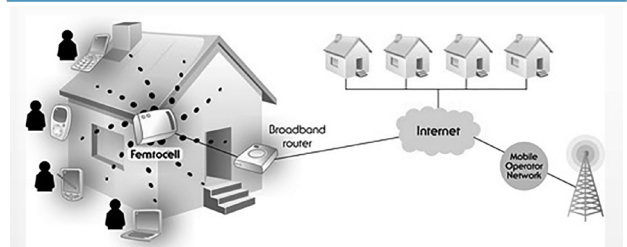


그림 1. 펌토셀(출처: www.smallcellforum.org)

로셀(Macro Cell)의 커버리지 안에 추가적으로 설치되고 같은 주파수를 사용하기 때문에[2] 매크로셀과 펌토셀 간의 간섭 문제가 발생한다. 따라서 매크로셀과 펌토셀 간의 간섭을 줄이기 위해 스펙트럼을 공유하는 기술들이 있는데 이것을 스펙트럼 공유 기술 또는 펌토셀 기술(Spectrum Sharing Scheme or Femto Cell Technology)이라 한다. 스펙트럼 공유 기술은 크게 세 가지로 나누어진다.

첫 번째는 오직 펌토셀을 위한 스펙트럼이 분리되어 있는 ‘Split’기술과, 두 번째는 매크로셀과 펌토셀이 같은 스펙트럼을 사용하기 때문에 서로 간섭이 생기는 ‘Common’기술, 그리고 세 번째는 매크로셀이 사용하는 스펙트럼의 일부분을 펌토셀에게 할당하는 ‘Partially Shared’기술이다. 세가지 기술은 효율적인 스펙트럼 사용과 간섭 측면에서 고려했을 때 각각의 장단점이 있고 어떤 기술을 선택하느냐에 따라서 얻을 수 있는 최대한의 수익이 다르게 결정되기 때문에, 펌토셀 시장에 진입하려는 신규 통신사업자 입장에서는 수익을 결정하는 가장 중요한 요소이다.

따라서 본고는 신규 펌토셀 통신사업자가 펌토셀 시장에 진입할 것인지 진입한다면 어떤 펌토셀 기술을 선택할 것인지를 문제를 경쟁상대가 없는 신규 통신사업자의 독점적 펌토셀 시장과 펌토셀 서비스를 이미 지원하고 있는 경쟁 통신사업자가 있는 복점 펌토셀 시장으로 나누고 모델링한다.

1. 3단계 의사 결정 프로세스(Three-stage Decision Making Process)

본고는 펌토셀 시장을 분석하기 위해 3단계 의사 결정 프로세스(Three-stage Decision Making Process)를 고려한다. 우선 첫 번째로 신규 통신사업자는 장기적인 관점에서 펌토셀 시장 진출 여부와 펌토셀 기술을 선택하고, 중기적인 관점에서 기존의 통신사업자와 신규 통신사업자는 가격이나 시장 점유율에 대한 결정을 내리게 되는데 항상 자신의 이윤을 최대화하는 방향으로 결정을 내린다. 세 번째로 단기적인 관점에서 펌토셀 사용자들은 자신의 효용을 최대화하는 펌토셀 사업자를 결정한다. 이렇게 단계적인 순서로 결정을 하는 과정을 더 자세히 살펴보자.

스펙트럼 공유 기술들을 동적으로 사용할 수 있는 동적 스펙트럼 관리(Dynamic Spectrum Management) 기술에 대한 제안은 있지만, 스펙트럼 공유 기술에 따라 네트워크 기반 시설뿐 아니라 단말기에 요구하는 기술이 달라지기 때문에 스펙트럼 공유 기술을 바꾸게 되면 많은 비용이 발생하게 된다. 따라서 스펙트럼 공유 기술은 한 번 설치를 하고 나면 바꾸기가 어렵기 때문에 통신사업자에게 장기적인 관점의 결정사항이 된다[3].

반면, 통신사업자들은 펌토셀에 대한 네트워크 기반 시설을 모두 갖춘 후에는 펌토셀 서비스 가격을 자신의 이윤이 최대가 되도록 중기적인 관점에서 변동적으로 설정할 수 있다. 사용자는 통신사업자가 가격을 바꾸는 주기보다 훨씬 짧은 주기로 펌토셀 서비스의 가입을 결정하기 때문에 단기적인 관점에서 고려한다. 결과적으로 각 펌토셀 기술의 장기적인 수익성을 비교하고 평가하기 위해서 통신사업자는 이용 가능한 기술에 대해서 최대한의 수익을 예측할 수 있어야 한다. 그리고 사용자들의 서비스에 대한 수요에 기반하여 그에 따른 최적의 가격을 정하게 된다.

본고는 첫 번째로 사용자가 어떤 사업자의 펌토셀을 사용할 것인지 단기적인 관점의 사용자 가입 동학(User Subscription Dynamics)에 대해서 분석하고, 사업자의 수익을 최대화하는 가격 또는 시장 점유율 결정 전략을 중기적인 관점에서 고려한다. 그리고 마지막으로 잠재적인 신규 통신사업자는 앞의 결정에 대한 분석을 바탕으로 펌토셀 시장 진출 여부와 펌토셀 기술 선정을 장기적인 관점에서 결정할 수 있다. 특히 본고는 사용자의 펌토셀 가입 동학을 고려할 때, 동적 사용자 환경에서 균형을 가지는 조건에 대해서 분석하기 때문에 더욱 정확한 결과를 제공한다.

1.1 QoS 함수에 대한 균형점

무선 통신 네트워크에서는 같은 주파수를 쓰는 사용자가 많아질수록 그만큼 충돌이 많이 발생하게 되고, 같은 주파수 간의 간섭도 충돌현상이기 때문에 스펙트럼 관리가 중요하다[5]

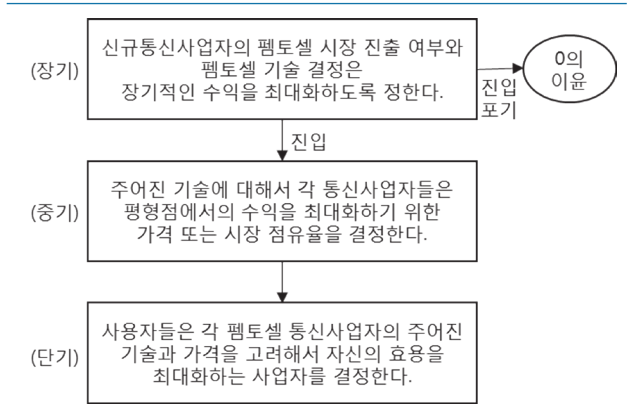


그림 2. 3단계 의사 결정 프로세스

[6]. 경제적인 관점에서 충돌현상은 부정적 네트워크 외부효과(Negative Network Externality)[11]로 분류할 수 있기 때문에, 충돌 현상을 고려하기 위해 본고는 신규 통신사업자가 펌토셀 서비스를 제공하는 경우에 사용자의 수에 따른 QoS를 증가하지 않는 함수로 정한다. 뒤에서 더 자세히 살펴보겠지만 QoS 함수를 가입자의 수에 따라서 증가하지 않는 함수로 정하게 되면 특정한 조건하에서 균형이 존재함을 보일 수 있다.

2. 모델링

본고에서는 펌토셀 통신 시장을 분석하기에 앞서 펌토셀 통신사업자와 사용자의 모델을 제시한다.

2.1 통신사업자에 대한 모델

기존의 통신사업자 S_1 가 있고 잠재적인 신규 통신사업자 S_2 가 있는 펌토셀 시장을 고려해보자. 본고는 신규 통신사업자의 펌토셀 시장 진출 여부와 펌토셀 기술 선정에 초점을 맞추기 때문에 기존의 통신사업자는 이미 펌토셀 기술을 설치해 놓은 상태라 가정한다. 반면에 신규 사업자가 펌토셀 시장에 진출하기로 결정했다면 이용 가능한 펌토셀 기술 $\{T_1, T_2, \dots, T_L\}$ 중에서 장기적인 수익을 최대화할 수 있는 기술 T_i 을 선택할 것이다.

기존의 통신사업자는 주파수 대역과 같은 네트워크 자원을 충분히 확보하고 있는 상태이지만 신규 통신사업자는 새롭게 펌토셀 시장에 진출하는 것이기 때문에 기존의 사업자보다는 적은 자원을 가지고 펌토셀 서비스를 제공하는 상황을 가정한다. 따라서 기존 통신사업자는 사용자 수가 증가해도 아주 천천히 QoS 함수가 감소되기 때문에 결국 일정한 상수 함수로 가정해도 실제 QoS 함수와 비슷한 정확한 결과를 얻을 수 있다. 반면에 사용자 증가에 따른 충돌 현상으로 인하여 신규 사업자의 QoS 함수 감소속도는 기존 사업자의 그것보다 훨씬 빠르다고 가정한다[7][9].

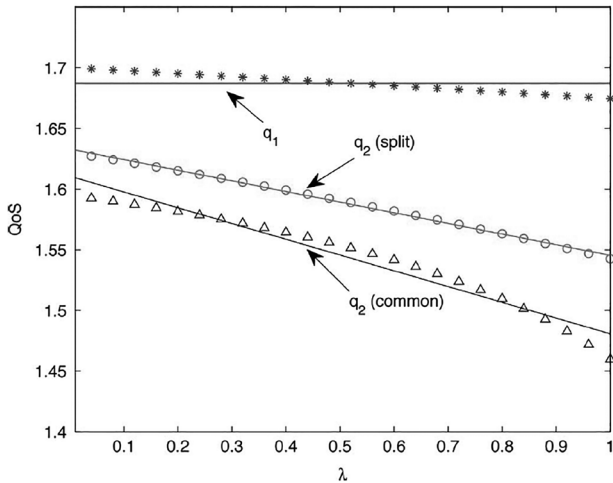


그림 3. QoS(단위: 비트/초) 함수와 근사값. 실제 QoS 함수를 표시하고, 근사화한 QoS 함수를 실선으로 나타냄

본고는 $\lambda_i (i=1,2)$ 를 각 통신사업자 S_i 의 사용자 점유율이라 놓는다. 그러면, λ_1 과 λ_2 는 $\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$ 과 $\lambda_1 + \lambda_2 \leq 1$ 를 만족시킨다. 또한 $q_i (i=1,2)$ 를 각 통신사업자가 제공하는 QoS라 놓으면, q_1 은 λ_1 에 대해 독립적이지만, q_2 는 λ_2 에 대해 감소하는 관계이다. 따라서 신규 통신사업자가 기술 T_i 를 선택했을 때 QoS를 $q_2 = g_i(\lambda_2)$ 로 나타내기 위해서, $[0,1]$ 의 범위를 가지는 함수 $g_i(\cdot)$ 를 정의한다.

QoS 함수를 결정할 때는 처리율(Throughput)이나 지연(Delay) 등 여러 가지 요소들을 고려할 수 있지만 본고에서는 각 사용자의 처리율에 의해서 QoS가 결정되는 것으로 정한다.

2.2 사용자에 대한 모델

첫 번째, 사용자들은 하나의 연속체로 모델링 되고 이러한 모델링은 엄청나게 많은 수의 사용자들이 있는 실제 상황에서 더 정확한 해석을 가능하게 한다. 두 번째, 사용자는 항상 최대 하나의 통신사업자에게만 펌토셀 서비스를 받는다[4][6]. 세 번째, 같은 통신사업자의 QoS q_i 에 대해서도 다양한 사용자들이 QoS에서 받는 이익은 서로 다르기 때문에, 각 사용자 QoS에 대한 가치평가를 QoS 평가 변수 α_k 로 나타내고, 이를 이용하여 사용자의 다양성을 고려한다.

앞의 가정들을 통해서 사용자가 펌토셀 사업자를 결정하는 가장 중요한 결정 요소를 사용자의 효용 $u_{k,i}$ 로 나타낼 수 있다. 어떤 사업자 i 를 선택해서 펌토셀 서비스를 받을 때 사용자 k 가 얻는 효용은

$$u_{k,i} = \alpha_k q_i - p_i$$

이다. p_i 는 사업자 i 가 펌토셀 서비스 사용에 대해 부과하는 가격이고, $\alpha_k q_i$ 는 QoS q_i 와 QoS 평가 변수 α_k 의 곱으로서 사용

자가 펌토셀 서비스로부터 얻는 이익을 나타낸다. 사용자가 펌토셀 서비스에 가입하지 않으면 0의 효용을 얻는다고 가정한다. 합리적인 사용자들은 당연히 가장 높은 효용을 제공하는 펌토셀 사업자를 선택하고 모든 사업자가 0 미만의 효용을 제공하면 가입하지 않을 것이다.

3. 독점적 펌토셀 시장(Monopoly Femto Cell Market)

기존의 통신사업자가 없는 신생 펌토셀 시장에 신규 통신사업자가 진출하는 모델을 분석한다. 신생 펌토셀 시장에 신규 사업자가 진출하면 경쟁자 없이 펌토셀 서비스를 독점 제공한다. 사용자 가입 동학에 대한 분석을 바탕으로 신규 펌토셀 사업자가 최대한의 이익을 얻을 수 있는 펌토셀 기술을 결정할 수 있다.

3.1 사용자 가입 동학(User Subscription Dynamics)

신규 사업자의 독점적 펌토셀 시장에서 사용자는 신규 사업자의 펌토셀 서비스를 이용하거나 아니면 서비스를 아예 이용하지 않는 두 가지 선택이 가능하다. 사용자들은 보통 사업자의 QoS에 대한 기대(Expectation)를 바탕으로 서비스 가입 여부를 결정한다. 따라서 사용자들이 신규 사업자의 QoS에 대한 기대를 바탕으로 어떻게 가입 결정을 내리는지 동적 모델(Dynamic Model)을 통해 살펴보기로 한다.

사용자는 펌토셀 가입 결정을 내리는 현재의 순간 t 에 QoS에 대한 기대 $\bar{q}'_{2,k}$ 를 바탕으로, 자신의 효용을 최대화하기 위한 가입 결정을 내린다. 대표적인 예로 지난 기의 QoS $g(\lambda_2^{t-1})$ 와 이번 기의 QoS가 같을 것 $\bar{q}'_{2,k} = g(\lambda_2^{t-1})$ 이라고 예상하는 적응적 기대(Adaptive Expectation)의 한 형태를 생각한다. 만약 사용자 k 의 시간 t 에서의 기대가 $\alpha_k \bar{q}'_{2,k} \geq p_2$ 를 만족한다면 t 기에 신규 통신사업자의 펌토셀 서비스를 사용하기로 결정할 것이다. 편의상 가입비 등의 신규 가입에 따른 전환비용(Switching Cost)은 없다고 가정한다.

결과적으로 동적 사용자 모델에서 신규 사업자의 펌토셀 사용자 점유율이 오랫동안 안정적인 상태 λ_2^* 를 유지하고, 이 점에서 사용자 점유율이 얼마인지 알아내는 것이 우리의 목표이다.

첫 번째 단계로 동적 사용자들의 펌토셀 가입 결정에 대한 균형점 λ_2^* 을 정의한다. 균형점이라 함은 사용자들이 기대 하에서 가입 결정을 하면 그 기대가 정말로 실현되는 점으로서, 일단 균형점에 도달하게 되면 사용자들은 서비스 가입에 대한 변동 없이 안정적인 상태를 유지한다. 신규 사업자의 QoS 함수 $g(\lambda_2)$ 가 증가하지 않는다는 가정하에 임의의 가격 p_2 에 대해서 균형점이 유일하게 존재함을 보일 수 있다. QoS 함수 $g(\lambda_2)$ 가 선형적으로 감소하는 함수이고 사용자들의 QoS에

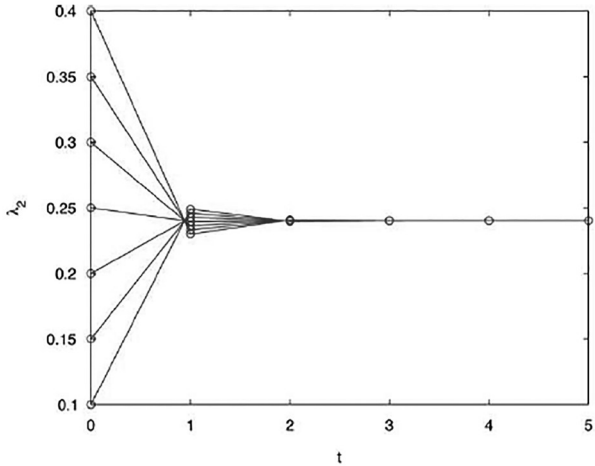


그림 4. 독점적 펨토셀 시장에서 사용자 가입 동학의 수렴

대한 가치평가 α_k 가 균등하게 분포한다면 균형점을 수식으로 표현할 수 있다. 선형적으로 감소하는 QoS 함수를 선형 근사 (Linear Approximation)를 통해 수식화하면 실제 QoS 함수를 적용했을 때와 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

다음으로 사용자들이 자신의 기대 하에서 동적으로 가입 결정을 내릴 때 결과적으로 우리가 구한 균형점에 도달할 수 있을 것인지에 대한 문제를 생각해볼 수 있다. 만약 QoS 함수가 사용자 수에 민감하게 반응하여 아주 빠르게 감소한다면 한 기에는 가입자수가 적고 그 다음 기에는 가입자수가 폭등하는 상황이 반복하여 균형점에 도달할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 사용자 가치평가의 분포가 주어질 때 QoS 함수가 충분히 천천히 감소한다면 사용자의 동적 가입 결정 과정이 유일한 균형점에 수렴하는 것을 보일 수 있다. <그림 4>을 보면 시작점이 달라도 결국 균형점으로 수렴하게 되고 균형점에서 사용자 점유율이 어떤 값인지 그래프를 통해 확인할 수 있다.

3.2 수익의 극대화

사용자 가입 동학의 균형점을 구하는 과정을 마치고, 다음으로 신규 통신사업자의 독점 펨토셀 시장에서 수익을 극대화시키기 위한 최적의 가격을 찾는 문제를 생각하자. 사업자가 선택한 기술이 수익에 가장 큰 관련이 있는 것은 당연하다. 신규 사업자의 수익 $R_2(p_2)$ 은 선택한 펨토셀 기술의 균형점에서 구한 가격 p_2 와 p_2 에서의 균형 시장 점유율 $\lambda_2^*(p_2)$ 를 이용해서

$$R_2(p_2) = p_2 \lambda_2^*(p_2)$$

로 나타낼 수 있다. p_2 의 범위는 $[0, \beta g(0)]$ 이고, β 는 모든 사용자 중에서 가장 최대의 QoS 가치평가 변수 값을 나타낸다.

대략적으로 추측하면 신규 펨토셀 통신사업자에게 서비스 받

는 사용자의 수가 많을수록 수익이 최대가 될 것으로 보이지만 결코 그렇지 않다. 왜냐하면 신규 통신사업자는 스펙트럼이 충분하지 않기 때문에 사용자가 늘어날수록 충돌이 증가하게 되고, 그에 따른 QoS의 저하가 생기기 때문에 신규 사업자는 펨토셀 통신 서비스 가격 p_2 을 낮출 수 밖에 없다. 따라서 무조건 많은 사용자를 확보하는 것이 중요한 것이 아니라 수익이 극대화되는 최적의 펨토셀 사용자 점유율을 찾아야 수익이 극대화되는 가격 p_2^* 및 그 가격에서의 균형점 λ_2^{**} 을 구할 수 있다.

본고에서는 주어진 효용함수의 형태 하에서 펨토셀 가입의 여부 또는 어떤 사업자를 선택하든 무관심한 사용자의 QoS 가치 평가 변수 α 를 정하고[8][9], 그 이상의 가치평가를 가지는 사용자들에 대해서 펨토셀 가입에 대한 수요를 계산할 수 있다[3][8]. 사용자들의 가치평가 변수에 대한 분포함수가 균일하다는 가정 하에 신규 사업자의 독점적 펨토셀 통신 시장에서 최적의 사용자 점유율($0 < \lambda_2^{**} \leq 1/2$)과 신규 사업자의 수익이 극대화되는 최적의 가격 p_2^* 에 대한 범위

$$(\beta/2)g(1/2) \leq p_2^* < \beta g(0)$$

를 구할 수 있다. <그림 5>를 보면 신규 사업자의 사용자 점유율이 절반 정도 ($\lambda_2 = 0.5$)가 될 때 최대의 수익을 얻을 수 있고 그 점에서 멀어질수록 수익이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

QoS 함수가 빠르게 감소하면 그에 따라서 펨토셀 서비스에 대한 최적의 가격도 감소하기 때문에 QoS 함수의 감소율을 적당히 유지하면서 절반 정도의 사용자 점유율을 유지하는 것이 신규 사업자가 최상의 이득을 얻을 수 있는 균형점이다[10].

최대의 수익에 대한 균형점은 신규 사업자가 펨토셀 시장에 진입할 것인지 그리고 진입한다면 어떠한 기술을 선택할 지 결정할 때 가장 중요한 요소이다. 따라서 신규 사업자가 펨토셀 시장에 대한 충분한 조사를 통해 사용자의 QoS 가치평가에 대

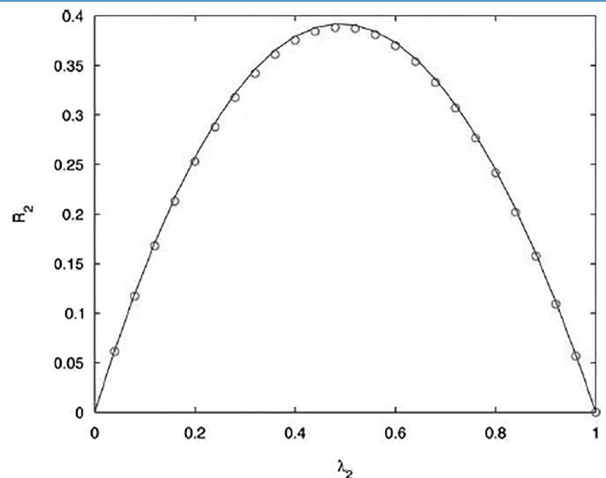


그림 5. 독점적 펨토셀 시장에서 신규 사업자의 시장 점유율에 따른 수익

한 정보를 획득하여 이를 분석한다면 더욱 정확한 수익의 최상 점을 구해낼 수 있다.

4. 복점 펌토셀 시장(Duopoly Femto Cell Market)

기존의 통신사업자가 통신 서비스를 제공하고 있는 펌토셀 시장에 신규 사업자가 진입해서 함께 경쟁하는 상황에 대해 분석해보자. 즉 두 개의 통신사업자가 서로 경쟁하는 복점체제의 펌토셀 시장이고, 역시 동적 사용자를 고려한다.

4.1 사용자 가입 동학(User Subscription Dynamics)

복점 펌토셀 시장에서 사용자는 기존의 통신사업자를 선택하거나, 신규 사업자를 선택하거나, 아예 펌토셀 서비스에 가입하지 않는 세 가지 선택이 가능하다. 복점 펌토셀 시장에서는 QoS 당 가격 (p_1/q_1 와 p_2/q_2^{t-1}) 을 구하고 기존의 사업자와 신규 사업자의 QoS 당 가격을 비교해서 사용자가 사업자를 선택하는 것이 최적임을 보일 수 있다. 당연히 동일한 QoS에 대해서 더 낮은 가격을 제시하는 사업자를 사용자들은 선호할 것이고(예를 들어, $p_1/q_1 > p_2/q_2^{t-1}$ 인 경우에 사용자들은 S_2 를 선택), 이러한 가정을 바탕으로 동적 사용자들이 더 이상 결정을 바꾸지 않고 사용자 점유율이 안정적으로 유지되는 균형점 (λ_1^*, λ_2^*)을 찾을 수 있다.

처음에 신규 사업자가 기존 사업자가 있는 펌토셀 시장에 진입할 때는 기존 사업자보다 QoS 당 가격을 더 낮게 제시하여서 사용자를 유치해야 한다. 만약에 신규 사업자의 QoS 당 가격이 기존의 사업자와 같거나 더 높게 되면 사용자들은 기존의 통신사업자에게만 몰리기 때문에 신규 사업자는 절대 수익을 낼 수 없기 때문이다. 따라서 기본적으로 이 조건을 만족시킨 후에 QoS 함수가 너무 빠르게 감소하지 않는 조건이 충족된다면, 독점적 시장에서 살펴봤듯이 두 펌토셀 사업자가 모두 운영을 하는 안정적인 균형점 (λ_1^*, λ_2^*)으로 수렴하게 된다.

4.2 수익의 극대화

경제학에서 적은 수의 사업자간의 경쟁을 게임이론을 통해서 분석할 때 주로 베르트랑 경쟁(Bertrand Competition)이나 쿠르노 경쟁(Cournot Competition)을 이용해서 접근한다[10]. 게임 이론의 관점에서 내쉬 균형(Nash Equilibrium(NE))을 이용하여 주어진 상황을 분석한다. NE는 모든 참여자가 자신의 행동을 바꾸어도 더 이상의 이득이 없는 즉, 우리가 찾고자 하는 수익의 최상점(균형점)을 말한다.

베르트랑 경쟁에서는 사업자들이 가격을 먼저 결정한 후에 정해진 가격에 대한 수요에 따라 공급량이 정해지는 것이고, 반면

에 쿠르노 경쟁은 사업자들이 공급량을 독립적으로 결정한 후에 정해진 공급량에 대한 수요에 따라서 가격이 결정되는 것이다. 신규 사업자가 독점하는 펌토셀 시장에서는 가격을 먼저 정하든 공급량을 먼저 정하든지 결과적으로 등장하는 수익에 대해서 전혀 영향을 미치지 않는다. 그러나 사업자가 둘 이상이 되면 경쟁구도가 생기게 되고, 복점 펌토셀 시장의 사업자 간의 경쟁에서는 서로의 전략이 수익에 영향을 미치기 때문에 가격과 공급량 중에 어떤 것을 전략변수로 할 지가 중요한 요소가 된다.

예를 들어 동일한 상품을 생산하는 두 개의 회사가 있다고 가정해보자. 두 회사가 가격을 먼저 결정하게 되면 가격 경쟁이 일어나서 두 회사는 결국 같은 가격을 유지하는 균형점으로 수렴하게 되고, 그 균형점은 아주 낮은 가격으로 정해지기 때문에 베르트랑 경쟁에서는 둘 다 수익을 얻을 수 없게 된다. 반면에 쿠르노 경쟁을 통한 균형점에서는 두 회사 모두 수익을 얻을 수 있다. 예에서 알 수 있듯이 본고에서도 펌토셀 통신 시장에 두 가지 접근을 모두 적용할 수 있으나, 편의상 쿠르노 경쟁을 하는 펌토셀 시장에 초점을 맞춘다.

기존의 통신사업자와 신규 통신사업자가 경쟁하는 펌토셀 시장에서 수익이 극대화되는 균형점을 찾기 위해 쿠르노 경쟁을 비협력 게임

$$g_C = \{S_i, R_i(\lambda_1, \lambda_2), \lambda_i \in [0, 1] | i = 1, 2\}$$

으로 모델링하면, NE를 만족하는 시장 점유율의 균형점 ($\lambda_1^{**}, \lambda_2^{**}$)을 찾을 수 있다.

기존 통신사업자가 펌토셀 시장 점유율을 낮추는 전략 $-\lambda_1$ 을 썼다고 가정해보자. 그러면 당연히 신규 사업자에게 사용자들이 몰리게 될 것이고 이에 따라 신규 사업자의 펌토셀 사용자 점유율은 높아지지만, 충돌 현상에 의해서 사용자들이 느끼는 QoS는 급속도로 나빠지게 된다. 따라서 신규 사업자는 낮은 QoS에 대해 가격을 낮출 수 밖에 없고 결국 수익은 점점 작아지게 된다. 그러나 복점 펌토셀 시장에서도 몇 가지 조건이 만족된다면 수익이 극대화되는 시장 점유율의 균형점을 찾을 수 있다.

QoS에 대한 사용자들의 가치평가 지표가 균등하게 분포하면서 신규 사업자의 QoS 함수가 사용자의 수에 따라서 선형적으로 감소한다고 가정하자. 이러한 특정 조건이 만족되면 기존의 통신사업자와 신규 통신사업자의 시장 점유율은 각각 펌토셀 시장의 절반 이하를 유지하는 NE가 유일하게 존재하고, 이는 최적 대응 동학(Best Response Dynamics)을 통해 도달할 수 있음을 보일 수 있다.

최적 대응(Best Response)을 통해 NE를 구하는 방법에 대해

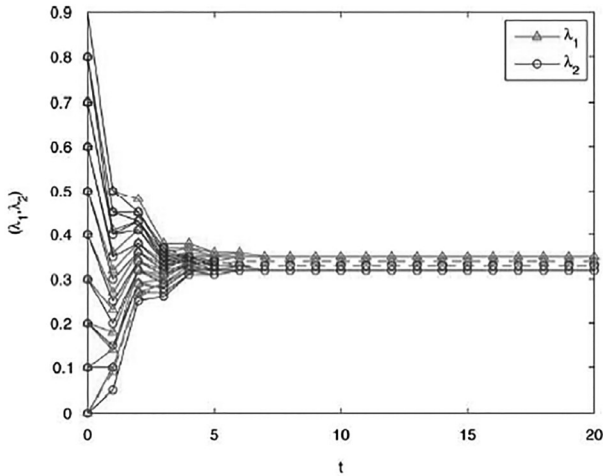


그림 6. 복점 펠토셀 시장의 최적 대응 동학을 통한 시장 점유율의 수렴

서 간단히 설명해보자. 두 명의 사업자가 있을 때, 어떤 사업자가 다른 사업자의 주어진 전략을 고려해서 최상의 결과를 얻을 수 있도록 자신의 전략을 정하고 나머지 다른 사업자도 같은 방식으로 최선의 전략을 선택한다면 주어진 가정 하에서는 최종적으로 NE에 도달하게 된다.

만약 사업자가 경쟁자와 시장에 관한 정보가 없더라도 지난 기의 시장 점유율에 대한 정보만을 이용하여 최적 대응을 구할 수 있고, 이 과정을 반복하여 NE에 도달할 수 있기 때문에 유용하다. <그림 6> 를 보면 시작점이 달라도 시간이 지날수록 각 사업자의 시장 점유율이 수렴하는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 앞의 결론에서 알 수 있듯이 두 사업자의 시장 점유율 (λ_1, λ_2) 이 둘 다 0.5 이하로 절반 이하의 값을 유지하는 점으로 수렴한다.

5. 펠토셀 시장 진출과 펠토셀 기술 선택

지금까지의 분석을 바탕으로 신규 사업자는 펠토셀 시장에 진입할 것인지, 진입한다면 어떠한 기술을 선택할 것인지에 관한 문제를 사용자의 단기적 가입결정과 자신의 중기적 시장점유율 결정을 고려해서 수익을 최대화할 수 있도록 결정할 수 있다. 여기서 신규 사업자가 모든 펠토셀 기술의 수명을 알고 있다고 가정하면 각 기술들의 단위 기간 당 설치 비용 $k_l \geq 0$ 을 계산할 수 있다.

단위 기간 당 평균 수익은 펠토셀 기술을 통해 벌어들인 수익에서 지출 비용을 뺀 값 $R_{2,l}^* - k_l$ 으로 나타낼 수 있기 때문에, 단위 기간 당 최대 평균 수익은 우리가 앞에서 구한 최대의 수익을 가지는 균형점에서의 값과 같다. 따라서 신규 사업자는 각각의 펠토셀 기술에 대해서 단위 기간 당 최대 평균 수익을 아래와 같이 계산하여

$$\max_{T_l \in \{T_1, T_2, \dots, T_L\}} (R_{2,l}^* - k_l)$$

수익이 최대가 되는 기술을 선택할 수 있다.

III. 결론

본고에서는 펠토셀 시장에 신규 통신사업자가 진입할 것인지 그리고 진입한다면 어떠한 펠토셀 기술을 선택할 것인지를 장기적인 결정 문제로 분석하였다. 신규 사업자의 장기적인 결정을 위해서는 사업자의 중기적인 가격 결정 과정과 사용자의 단기적인 펠토셀 서비스 가입 결정 과정을 분석해야 했다. 구체적으로 신규 사업자만 있는 독점적 펠토셀 시장과 기존의 통신사업자와 신규 사업자가 경쟁을 하게 되는 복점 펠토셀 시장으로 구분하였다.

각 시나리오를 동적 사용자 모델로 정의하고 사용자들이 더 이상 변동하지 않는 시장 점유율을 유지하는 균형점으로 수렴하는 조건들을 제시하였다. 그리고 통신사업자들의 수익이 극대화되는 균형점을 구하기 위해서 각 시나리오에 대한 최적의 시장 점유율과 수익의 최상점에 도달하기 위한 조건들을 살펴 보았다.

특히, 복점 펠토셀 시장에서는 각 사업자들을 비협력 게임의 참여자로 가정하고, 자신의 수익을 최대화하는 시장 점유율을 결정하도록 모델링하였다. 그리고 조건들이 충분히 만족될 때 유일한 균형점 NE가 존재하는 것을 증명하였다. 따라서 이러한 결과들을 통해서 본고는 신규 통신사업자가 펠토셀 시장에 진입할 것인지 여부와 진입한다면 어떤 펠토셀 기술을 선택할 것인지 구체적인 수치분석을 통해 가이드라인을 제시하였다.

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었으며(NIPA-2013-H0301-13-1002, NIPA-2013-H0301-13-1008), 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2010-0009717). 본 논문은 [1]에서 출판된 내용의 일부를 포함하고 있음.

참고 문헌

[1] S. Ren, J. Park, and M. van der Schaar, "Entry and

spectrum sharing scheme selection in femtocell communications markets,” in IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.21, no.1, pp. 218– 232, Feb. 2013.

- [2] J. D. Hobby and H. Claussen, “Deployment options for femtocells and their impact on existing macro-cellular networks,” Bell Labs Tech. J., vol. 13, no. 4, pp. 145– 160, 2009.
- [3] N. Shetty, S. Parekh, and J. Walrand, “Economics of femtocells,” in Proc. IEEE GLOBECOM, Dec. 2009, pp. 6616– 6621.
- [4] M. Manshaei, J. Freudiger, M. Felegyhazi, P. Marchbach, and J. P. Hubaux, “On wireless social community networks,” in Proc. IEEE INFOCOM, Apr. 2008, pp. 1552– 1560.
- [5] D. Acemoglu and A. Ozdaglar, “Competition and efficiency in congested markets,” Math. Oper. Res., vol. 32, no. 1, pp. 1– 31, 2007.
- [6] A. Zemlianov and G. de Veciana, “Cooperation and decision making in a wireless multi-provider setting,” in Proc. IEEE INFOCOM, Mar. 2005, vol. 1, pp. 386– 397.
- [7] C. K. Chau, Q. Wang, and D. M. Chiu, “On the viability of Paris metro pricing for communication and service networks,” in Proc. IEEE INFOCOM, Mar. 2010, pp. 929– 937.
- [8] S. Shakkottai, R. Srikant, A. Ozdaglar, and D. Acemoglu, “The price of simplicity,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 26, no. 7, pp. 1269– 1276, Sep. 2008.
- [9] D. Acemoglu, A. Ozdaglar, and R. Srikant, “The marginal user principle for resource allocation in wireless networks,” in Proc. IEEE CDC, 2004, vol. 2, pp. 1544– 1549.
- [10] M. J. Osborne and A. Rubinstein, A Course in Game Theory. Cambridge, MA: MIT Press, 1994.
- [11] J. Tirole, The Theory of Industrial Organization. Cambridge, MA: MIT Press, 1988.

약 력



전 언 지

2013년 이화여자대학교 공학사
 2013년~현재 이화여자대학교 멀티미디어 통신 및
 네트워크 연구실 연구원
 관심분야: 게임이론을 이용한 협상 해법,
 LTE-A 관련 무선통신 기술 알고리즘



박 재 옥

2003년 연세대학교 경제학사
 2005년 미국 University of California,
 Los Angeles (UCLA), M.A.
 2009년 미국 University of California,
 Los Angeles (UCLA), Ph.D.
 2009년~2011년 미국 University of California,
 Los Angeles (UCLA), 전자공학과 박사
 후 연구원
 2011년~현재 연세대학교 경제학부 조교수
 관심분야: 게임이론을 이용한 네트워크 자원의 효율
 적 활용방법 고안, 네트워크 경제