

논문 2013-50-2-2

인터넷 최대 접속 속도의 제한이 서비스 제공자의 수입과 서비스 가격의 결정에 미치는 영향

(The Impact of Access Rate Regulation on ISP Revenue and Pricing)

이 승 호*, 서 승 우*

(Seung-Ho Lee and Seung-Woo Seo)

요 약

인터넷 서비스 제공자들은 차등화 서비스를 제공하기 위한 정책적인 수단으로, 혹은 일부 악의적인 사용자들로 인한 회선의 독점적 사용을 막기 위한 수단으로 각 사용자의 최대 데이터 전송 속도를 일정 수준 이하로 제한하고 있다. 이 논문에서는 이러한 최대 접속 속도의 제한이 서비스 제공자의 수입과 서비스 가격 결정에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 우리는 먼저 최대 접속 속도의 제한을 고려한 현실적인 인터넷의 서비스 품질 모델을 제안하고, 각 사용자에 대한 최대 접속 속도의 제한이 사용자들의 서비스 가입 결정에 어떻게 영향을 미치는 지 분석한다. 또한 그에 따라 변화하는 서비스 제공자의 수입이 안정성을 보장 받기 위한 조건을 유도하여, 수입을 최대화하기 위한 가격 결정 방법을 최적화 문제로 나타낸다.

Abstract

Internet service providers regulate the maximum data transmission rate of each user as a means to provide a tiered Internet access service or to avoid the monopoly of a few greedy users. In this paper, we aim to analyze the impact of this access rate regulation on the revenue of Internet service provider and the pricing strategy. We first propose a service quality model taking into account the access rate regulation, and analyze how the regulation affects the service subscription decision of users. In addition, we derive a sufficient condition that guarantees the stability of the revenue, and formulate an optimization problem that finds the optimal price to maximize the revenue.

Keywords: 차등화 서비스, 최대 접속 속도 제한, 사용자 가입 모형, 서비스 제공자 수입, 가격 결정 방법

I. 서 론

유무선 데이터 전송 기술의 발전과 초고속 통신망의 보급으로 인터넷 트래픽의 종류는 다양해지고 그 규모 역시 엄청나게 증가하고 있다. 이에 따라 인터넷 서비

스 제공자(ISP)들은 다양한 사용자들의 요구를 만족시키기 위해 인터넷 접속 서비스를 품질에 따라 차등화하여 제공하고 있으며, 서비스 품질을 구분하기 위한 수단으로 최대 데이터 전송 속도를 사용하고 있다. 예를 들어, 사용자들은 인터넷을 이용하기 위해 최대 100Mbps를 보장하는 프리미엄 요금제와 50Mbps를 제공하는 라이트 요금제 중 하나를 선택하여 사용할 수 있다. 인터넷 서비스 제공자들은 가입자들에게 제공되는 모뎀의 설정을 변경하거나 회선 자체의 대역폭을 조정하여 각 사용자의 최대 데이터 전송 속도를 서비스 조건에 맞도록 제한하고 있다. 한편, 이러한 최대 데이

* 정회원, 서울대학교

(Seoul National University)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012-000918).

접수일자: 2012년10월26일, 수정완료일: 2013년1월20일

터 전송 속도의 제한은 악의적인 사용자로 인한 회선의 독점적 사용을 막을 수 있는 용도로도 활용될 수 있다.

지난 10여 년 간 많은 연구들이 이러한 인터넷 접속 서비스 및 차등화 서비스의 경제성에 대해 분석해 왔다.^[1-8] 다양한 서비스 모델과 사용자 모델, 가격 모델 등이 새롭게 제안되었고, 그에 따른 사용자들의 QoS 및 인터넷 서비스 제공자의 수입 등에 대한 다양한 분석이 이루어졌다. 하지만, 대부분의 연구들은 인터넷 서비스의 경제성 분석의 기초가 되는 서비스 품질 모델은 최대한 단순화시켜 적용하고 있으며, 실제로 서비스 제공자들이 행하고 있는 최대 데이터 속도의 제한은 분석 모델에 반영하지 않고 있다.

이 논문에서는 기존 연구들에서 간과해온 최대 데이터 전송 속도의 제한에 초점을 맞추어 연구를 진행한다. 우리는 먼저 최대 데이터 전송 속도의 제한을 고려한 현실적인 인터넷의 서비스 품질 모델을 제안하고, 이러한 전송 속도의 제한이 사용자들의 서비스 가입 결정에 미치는 영향을 분석한다. 또한 서비스 품질과 인터넷 서비스 제공자의 수입 및 가격의 상관관계에 대해 분석하고, 서비스 제공자의 수입을 최대화하는 최적의 가격 결정 방법을 찾는다. 마지막으로 실제 환경을 고려한 예를 통해, 본 논문에서 제안하는 분석 방법 및 결과의 실효성을 검증한다.

II. 모 델

1. 접속 속도

인터넷의 서비스 품질은 처리량(throughput), 지연(delay), 신호잡음(jitter), 손실율(loss rate) 등 다양한 성능 평가요소들에 의해 결정된다. 하지만, 네트워크에 대한 전문적인 지식이 부족한 일반 사용자의 입장에서 인터넷의 서비스 품질을 평가하기 위한 가장 쉽고 실용적인 방법은 인터넷의 데이터 전송 속도 즉, 접속 속도이다. 이러한 이유에서 실제로 거의 대부분의 국내 인터넷 서비스 제공자들은 최대 접속 속도를 내세워 인터넷 접속 서비스를 제공하고 있다.

일반적으로 각 사용자의 평균 데이터 전송 속도는 전체 대역폭을 사용자 수로 나눈 값으로 정의된다. 한 인터넷 서비스 제공자가 한 지역에 총 C_i 의 대역폭을 할당하고 있다고 가정해보자. 이 지역에서 그 인터넷 서비스에 가입한 사용자 수가 총 n_i 명이고, 그 중 실시간

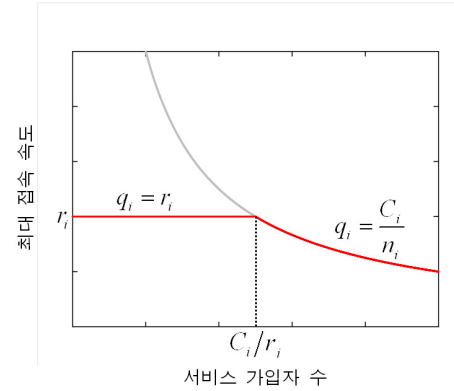


그림 1. 가입자 수에 따른 접속 속도의 변화

Fig. 1. Access rate for the number of subscribers.

접속 사용자의 비율이 m 이라고 할 때, 각 사용자의 평균 데이터 전송 속도는 다음과 같다.

$$q_i = \frac{C_i}{mn_i} \quad (1)$$

실시간 접속 사용자의 비율 m 은 사용자들의 인터넷 접속 환경 및 습관과 관련되어 있는 값이기 때문에, 통계적으로 구할 수 있는 상수로 간주한다. 우리는 복잡한 분석을 피하기 위해, 실시간 접속자의 비율을 1로 고정하고,* 모든 사용자들이 지속적으로 일정한 트래픽을 발생시킨다고 가정한다. 그러면 평균 데이터 전송 속도 q_i 는 최대 접속 속도와 같아지고, 그 값은 $q_i = \frac{C_i}{n_i}$ 로 주어진다.

한편, 인터넷 서비스 제공자들은 자신들의 차등 접속 서비스를 제공하기 위한 정책적인 수단으로, 혹은 일부 사용자들의 무분별한 대역폭 독점을 막기 위한 수단으로 각 사용자의 최대 접속 속도를 일정 수준 이하로 제한한다. 이 때 제한된 접속 속도를 r_i 이라고 하면, 수식 (1)에서 주어진 접속 속도 q_i 는 다음과 같이 조건부 함수로 다시 정리할 수 있다.

$$q_i = \begin{cases} r_i & \text{if } n_i \leq \frac{C_i}{r_i} \\ \frac{C_i}{n_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

* 실시간 사용자 수와 가입자 수를 구분하는 것이 수식의 복잡도만을 증가시키기 때문에, 우리는 이 논문에서 $m=1$ 이라 가정하고 분석을 수행했다. 수식에 m 을 포함시키더라도 결과에 큰 영향을 미치지 않음을 확인했다.

그림 1은 실시간 사용자 수에 따른 각 사용자의 최대 접속 속도의 변화를 나타낸다. 실시간 사용자 수가 일정한 값 C_i/r_i 이상인 경우, 각 사용자의 접속 속도는 할당된 대역폭 C_i 에 비례하고 사용자 수 n_i 에 반비례한다. 이 때, 물리적인 회선의 용량을 나타내는 C_i 는 쉽게 변화시킬 수 없는 변수이므로, 각 사용자의 접속 속도는 실제로 가입자 수 n_i 에 많은 영향을 받게 된다. 반면, 사용자 수가 C_i/r_i 이하로 내려갈 경우, 접속 속도는 더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 유지하게 된다.

2. 사용자 모델

이 논문에서 우리는 사용자들의 다양성을 고려하기 위해, 각 사용자가 같은 서비스 품질에 대해서 서로 다른 평가를 내릴 수 있다고 가정한다. 이를 위해, 우리는 먼저 사용자의 인터넷 접속 품질에 대한 평가값 v_j 를 정의한다. v_j 는 사용자 j 가 인터넷 접속 서비스에 대한 가입 여부를 결정하는 기준 평가값이고, 0보다 큰 값으로 주어진다. 즉, 사용자 j 는 한 인터넷 서비스 i 의 가치에 대해 $v_j q_i$ 로 평가한다. 우리는 사용자들의 평가값을 나타내는 변수 v 는 일정한 확률분포를 갖는다고 가정하고, 이 때 v 에 대한 cdf(cumulative distribution function)와 pdf(probability density function)를 각각 $F_v(x) = \Pr[v \leq x]$, $f_v(x) = \Pr[v = x]$ 로 나타낸다. 서로 다른 사용자들에 대한 v 의 값은 서로 독립이며, 동일한 분포를 갖는다. (즉, i.i.d.) 이 논문에서 우리는 v 에 대한 일반적인 확률분포와 함께, 평균 μ , 분산 σ^2 을 갖는 정규분포를 따르는 경우에 대해서도 분석한다.*

이제 우리는 한 인터넷 접속 서비스에 대한 각 사용자의 유틸리티(utility)를 정의할 수 있다. 사용자 j 가 인터넷 서비스 i 에 가입했을 때, 그의 유틸리티는 다음과 같다.

$$u_{ij} = v_j q_i - p_i \quad (3)$$

이 때, p_i 는 인터넷 접속 서비스 i 에 대한 가격이다. p_i 는 서비스 제공자에 의해 결정되며, 시간과 서비스 품질에 대해 변하지 않는다고 가정한다.

사용자 j 는 유틸리티 값 u_{ij} 를 기반으로 인터넷 접속 서비스 i 에 대한 가입 여부를 결정한다. 즉, u_{ij} 가 0보다 큰 값을 갖게 되면, 사용자 j 는 그 서비스에 대해 긍정적인 평가를 내리게 되며, 선택 가능한 또 다른 서비스가 없는 경우, 그 서비스에 가입한다. 만약 조건이 서로 다른 여러 가지의 서비스들이 존재하는 경우, 사용자는 가장 높은 유틸리티 값을 갖는 서비스를 선택한다. (즉, $k = \operatorname{argmax}_i u_{ij}$ 일 때, 사용자 j 는 서비스 k 를 선택한다.) 반면, 0보다 큰 유틸리티 값을 갖는 서비스가 없을 경우, 사용자는 아무 서비스에도 가입하지 않는다. 우리는 한 사용자가 서비스 i 를 선택할 확률을 g_i 라 정의한다.

이러한 사용자 유틸리티 모델은 많은 경제 논문에서 널리 사용되고 있다.^[9~11] 몇몇 논문에서는 혼잡 외부효과(congestion externality)를 강조하기 위해 부정적(negative) 형태의 유틸리티 모델이 사용되고 있지만,^[8, 12~13] 그것들은 쉽게 긍정적(positive) 형태로 변경될 수 있다.

3. 수입 모델

각 사용자의 이성적 선택은 전체 가입자 수를 결정한다. 한 지역의 잠재적 가입자 수 혹은 전체 세대수가 N 이라 할 때, 서비스 i 에 대한 가입자 수는 다음과 같다.

$$n_i = N g_i \quad (4)$$

이 때, g_i 는 최대 접속 속도와 서비스 가격 등에 의해 영향을 받는 값이다.

인터넷 서비스 제공자의 서비스 i 에 대한 총 수입 R_i 는 다음과 같이 가입자 수와 서비스 가격의 곱으로 결정된다.

$$R_i = n_i p_i \quad (5)$$

우리는 다음 장에서 최대 접속 속도의 제한이 인터넷 서비스 제공자의 수입에 어떻게 영향을 미치는 지 자세히 분석하고, 주어진 접속 속도의 제한 값에 대해 서비스 제공자의 수입을 최대화하기 위한 최적의 가격 결정 방법을 도출해낸다.

* v 는 $v > 0$ 에서 정의되는 값이기 때문에, 우리는 정규분포의 평균 μ 와 분산 σ^2 가 $F_v(0) \simeq 0$ 를 만족시키도록 설정했다.

Ⅲ. 분석

1. 사용자 가입 모형

먼저 사용자들의 가입 모형에 대해 논의해보자. 각 사용자의 시간에 따른 가입 결정을 모델링하기 위해, 우리는 이산 시간 유틸리티 모델(discrete time utility model)을 고려한다. 각 사용자는 현재 서비스의 품질(접속 속도)에 기초해서 다음 기간에도 서비스를 계속 이용할지 여부를 결정하기 때문에, 시간 구간 t 에서 각 사용자의 유틸리티는 다음과 같이 구간 $t-1$ 에서의 접속 속도의 함수로 표현된다.

$$u_j(t) = v_j q(t-1) - p \quad (6)$$

단일 서비스 환경이므로, 우리는 혼동을 피하기 위해 수식에서 i 를 제거했다.

사용자 j 는 $u_j(t) > 0$ 일 때, 서비스에 가입한다. 확률 변수 v 는 i.i.d.이므로, 서비스에 대해 양의 값을 갖는 사용자의 비율은 다음과 같이 주어진다.

$$g(t) = \sum_{x=p/q(t-1)}^{\infty} f_v(x) = 1 - F_v\left(\frac{p}{q(t-1)}\right) \quad (7)$$

그러면 시간 구간 t 에서의 가입자 수는 다음과 같다.

$$n(t) = Ng(t) = N\left(1 - F_v\left(\frac{p}{q(t-1)}\right)\right) \quad (8)$$

수식 (2)에서 알 수 있듯이, 가입자 수는 최대 접속 속도를 결정한다. 그러므로 시간 t 에서의 접속 속도는 다음과 같은 방식으로 업데이트된다.

$$q(t) = \begin{cases} r & \text{if } n(t) \leq C/r \\ C/n(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

수식 (8)와 (9)로 나타나는 사용자의 가입 모형은 시간이 지남에 따라 반복된다. 그리고 서비스 가입자 수도 하나의 일정한 값으로 수렴할 때까지 시간에 따라 변동한다. 가입 모형이 평형 상태(equilibrium state)에 다다랐을 때 서비스의 최종 가입자 수를 n^* 라고 하면, n^* 는 그 값에 따라 다음과 같이 두 가지 서로 다른 형태로 표현될 수 있다.

$$n^* = \begin{cases} h_R(p) & \text{if } n^* \leq C/r \\ h_D(n^*, p) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

이 때, $h_R(p)$ 와 $h_D(n^*, p)$ 는 각각 다음과 같다.

$$h_R(p) = N(1 - F_v(p/r)), \quad (11)$$

$$h_D(n^*, p) = N(1 - F_v(p n^* / C)) \quad (12)$$

우리는 수식 (10)을 이용해 주어진 서비스 가격에 대한 최종 가입자 수를 구할 수 있다.

만약 $n^* \leq C/r$ 이고, $h_R(p) \leq C/r$ 이면, 서비스 가입 모형은 서비스 가격에 상관없이 항상 다음을 만족시키는 한 점에 수렴한다.

$$h_R(p) = n^* \Rightarrow F_v(p/r) = 1 - \frac{n^*}{N} \quad (13)$$

반면, $n^* > C/r$ 이고, $h_D(n^*, p) > C/r$ 이면, 서비스 가입 모형은 다음을 만족시키는 한 점으로 수렴한다.

$$h_D(n^*, p) = n^* \Rightarrow F_v(p n^* / C) = 1 - \frac{n^*}{N} \quad (14)$$

하지만 서비스 가격이 위의 두 조건을 만족하지 못하는 경우, 가입자 수는 한 점으로 수렴하지 않는다. 우리는 특정 가격 조건에서 서비스 가입 모형이 무한히 진동하는 현상을 발견했다. 이러한 현상은 기본적으로 접속 속도가 두 가지 서로 다른 영역으로 구분이 되어 있고, 일정한 값으로 제한된 접속 속도에 의해 결정되는 다음 시간 구간의 가입자 수가 항상 일정할 수밖에 없다는 사실에 기인한다. 우리는 이러한 서비스 가입 모형의 진동 조건을 다음과 같이 정리할 수 있다.

정리 1. 인터넷 접속 서비스의 최대 접속 속도가 r 로 제한될 때, 만약 서비스 가격이 다음의 조건을 만족시키게 되면, 서비스의 가입자 수는 시간이 지남에 따라 한 점으로 수렴하지 않고 무한히 진동한다.

$$\tilde{n} > \frac{C}{r} \quad \text{그리고} \quad h_D(\tilde{n}, p) \leq \frac{C}{r}$$

여기에서 $\tilde{n} = h_R(p)$.

위의 수식을 전개하면, 우리는 다음과 같이 가입자 수가 한 점으로 수렴하기 위한 서비스 가격의 조건을 도출해낼 수 있다.

$$p < \frac{C}{\tilde{n}} F_v^{-1} \left(1 - \frac{C}{Nr} \right) = p_l \text{ 혹은}$$

$$r F_v^{-1} \left(1 - \frac{C}{Nr} \right) = p_h \leq p \quad (15)$$

즉, 서비스 가격 p 가 위의 조건을 만족시키면, 서비스 가입자 수는 몇 번의 변동 이후 수식 (13) 혹은 (14)의 한 점으로 수렴하게 된다.

그림 2는 서비스 가입자 수가 진동하는 원리를 보여준다. 만약 제한된 접속 속도 r 로 야기된 다음 시간 구간의 가입자 수 \tilde{n} 이 감소 영역에 속하고, \tilde{n} 에 의해 결정된 새로운 접속 속도가 이후의 가입자 수를 또다시 제한 영역에 포함되도록 만들게 되면, 서비스 가입자 수는 이 두 값 사이를 무한히 진동하게 된다. 가입자 수의 수렴을 위한 서비스 가격의 두 조건, 즉 $p \geq p_h$ 과 $p < p_l$ 은 각각 가입자 수의 변동이 이 그림에서 제한 영역과 감소 영역 내에서만 이루어지도록 하는 조건을 의미한다.

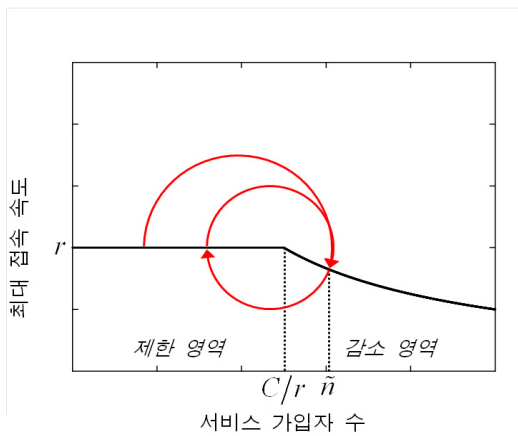


그림 2. 서비스 가입자 수의 진동 원리
Fig. 2. The mechanism of the oscillation in user subscription dynamics.

2. 최적 가격 결정 방법

다음으로 인터넷 서비스 제공자의 수입을 최대화하기 위한 최적 가격 결정 방법에 대해 살펴보자. 수식 (5)에서 주어진 서비스 제공자의 수입은 사용자의 가입 모형을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = n^* p \quad (16)$$

즉, 서비스 제공자의 수입은 일정 시간이 지나 사용

자의 가입이 안정된 이후에 결정된다. 우리는 여기에서 서비스 가입자 수는 특정 가격 조건에서만 한 점으로 수렴하는 것을 상기해볼 필요가 있다. 그러므로 서비스 제공자의 수입도 같은 조건, 즉 수식 (15)에 명시된 가격 조건 하에서만 하나의 안정된 값이 보장된다는 것을 알 수 있다.

서비스 제공자의 수입을 최대화하는 최적의 가격을 찾기 위해, 우리는 수식 (15)에 주어진 가격 조건에 대해 더욱 자세히 살펴볼 필요가 있다. 먼저 서비스 가격이 $p < p_l$ 를 만족하는 경우, 즉 그림 2의 감소 영역에서 가입자 수가 최종 수렴되는 경우, 다음과 같은 특징을 보인다.

정리 2. 만약 최종 가입자 수가 $n^* > C/r$ 이고 $n^* = N(1 - F_v(pn^*/C))$ 를 만족하면, $R = n^* p$ 로 주어지는 인터넷 서비스 제공자의 수입은 $F_v(\cdot)$ 에 상관없이 증가함수이다.

이 영역에서 서비스 제공자의 수입이 증가함수이므로, 최대 수입은 서비스 가격이 경계값일 때 ($p = p_l$) 발생한다. 이 정리로부터 우리는 서비스 제공자의 수입과 최적의 가격에 대해 다음과 같은 결과를 또다시 유도할 수 있다.

정리 3. 인터넷 서비스 제공자 수입의 최대값은 항상 서비스 가격이 제한되는 영역에서 발생한다.

이 정리는 다소 직관적이지 못하다. 서비스 가격을 제한하는 것은 서비스 품질에 대한 가입자의 기대 성능을 저하시키기 때문에, 제한하지 않았을 때보다 가입자 수를 상대적으로 감소시키는 결과를 야기할 것이기 때문이다. 그럼에도 불구하고 제한 영역에서 최대 수입이 발생하는 것은, 더 높은 수입을 발생시킬 것으로 예상되는 그림 2의 변곡점 부근의 가격 조건이 가입자 수의 진동을 유발하기 때문이다. 정리 2와 3에 대한 증명은 부록에 자세히 기술되어 있다.

우리는 위의 정리들로부터 최대 수입을 발생시키기 위한 가격 조건을 제한 영역으로 한정할 수 있다. 그러므로 우리는 다음과 같이 단일 인터넷 서비스 환경에서 서비스 제공자의 수입 최대화 문제를 정의할 수 있다.

문제 1. 서비스 제공자 수입 최대화 문제

maximize

$$R = Np \left(1 - F_v \left(\frac{p}{r} \right) \right)$$

subject to

$$p \geq r F_v^{-1} \left(1 - \frac{C}{Nr} \right)$$

이 문제는 사용자의 인터넷 접속 품질에 대한 평가값을 나타내는 확률 변수 v 가 평균 μ , 분산 σ^2 을 갖는 정규분포를 따르는 경우 다음과 같이 구체화된다.

문제 1-1. 서비스 제공자 수입 최대화 문제 (정규분포)

maximize

$$\frac{Np}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{p/r - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right)$$

subject to

$$p \geq r \left(\mu + \sigma \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2C}{Nr} \right) \right)$$

여기에서 $\operatorname{erf}(x)$ 는 가우시안 에러 함수(Gaussian error function)로 다음과 같이 정의된다.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (17)$$

가우시안 에러 함수와 그 역함수는 다음과 같이 테일러 급수(Taylor series)로 변환된다.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{10} - \dots \right) \quad (18)$$

$$\operatorname{erf}^{-1}(x) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(x + \frac{\pi}{12} x^3 + \frac{7\pi^2}{480} x^5 + \dots \right) \quad (19)$$

수식 (18)과 (19)를 사용하면, 우리는 문제 1-1을 다항식 형태로 단순화할 수 있고, 높은 차수 항을 제거하여 몇 가지 의미 있는 값들에 대한 근사치를 얻을 수 있다. 먼저 경계값 p_h 는 다음과 같은 근사치를 갖는다.

$$p_h = r \left(\mu + \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(\left(1 - \frac{2C}{Nr} \right) + \frac{\pi}{12} \left(1 - \frac{2C}{Nr} \right)^3 \right) \right) \quad (20)$$

다음으로 우리는 문제 1의 목적함수를 미분하여 제한 영역에서 수입이 극대값을 갖는 가격 \hat{p} 를 구할 수 있다.^[14] \hat{p} 는 다음의 조건을 만족한다.

$$1 - F_v \left(\frac{\hat{p}}{r} \right) - \frac{\hat{p}}{r} f_v \left(\frac{\hat{p}}{r} \right) = 0 \quad (21)$$

마찬가지로 우리는 다음 수식의 낮은 차수 항을 계산해 \hat{p} 의 근사치를 구할 수 있다.

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! 2^k} \left(\frac{\hat{p}/r - \mu}{\sigma} \right)^{2k} \left(\hat{p}/r + \frac{\hat{p}/r - \mu}{2k+1} \right) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \quad (22)$$

인터넷 서비스 제공자의 수입을 최대화시키는 최적 가격은 수식 (20)과 (22)에서 주어진 p_h 와 \hat{p} 중 하나의 값으로 나타난다. 주어진 조건에서, 만약 p_h 가 \hat{p} 보다 작다면, 서비스 제공자의 수입은 서비스 가격이 \hat{p} 일 때 나타나고, 반대로 p_h 가 \hat{p} 보다 크다면, 서비스 가격이 p_h 일 때 수입이 최대가 된다. 이를 이용하면, 우리는 문제 1-1에서 주어진 최적화 문제를 직접 풀지 않아도 최적 가격을 구할 수 있다.

IV. 실험

이번 장에서 우리는 간단한 예를 통해 앞 장에서 분석한 사용자의 가입 모형과 최적 가격 결정 방법에 대해 살펴볼 것이다. 다음의 모든 실험은 MATLAB을 이용했다.

우리는 한 인터넷 서비스 제공자가 총 1000 세대가 살고 있는 지역에 10Gbps의 대역폭을 가진 광 회선을 이용해 인터넷 접속 서비스를 제공한다고 가정한다. 사용자들의 서비스 품질에 대한 평가값은 평균 3, 표준편차 1의 정규분포를 따른다.

먼저 사용자의 서비스 가입 모형을 살펴보기 위해, 우리는 각 사용자의 최대 접속 속도를 15Mbps로 제한하고 서비스 가격을 각각 \$40, \$36로 정했을 때 시간에 따른 가입자 수의 변화를 그림 3과 4에 나타내었다. 시간이 0일 때 초기 가입자 수는 0에서 1000명까지 100명 단위로 변화시키며 실험을 반복했다.

서비스 가격이 \$40일 때는 (그림 3) 초기 가입자 수와 상관없이 사용자의 서비스 가입이 몇 번의 변동 후

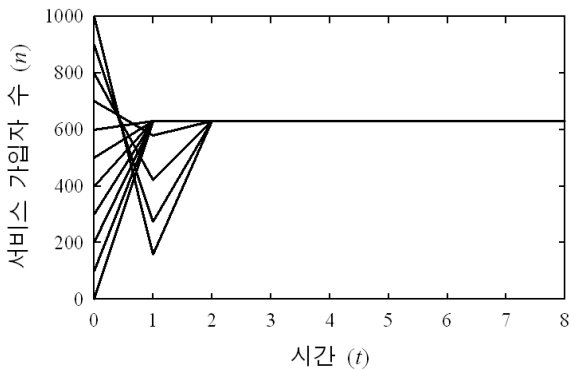


그림 3. 시간에 따른 가입자 수 변화 ($p = \$40$)
Fig. 3. User subscription dynamics when $p = \$40$.

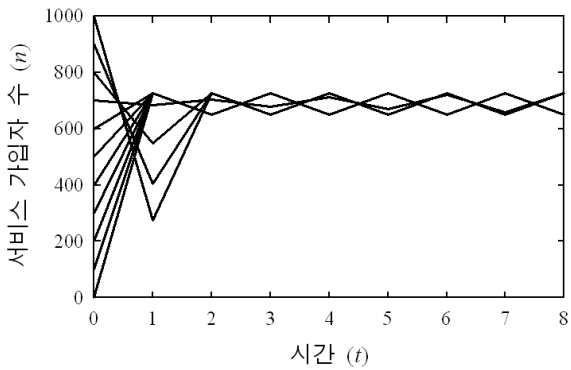


그림 4. 시간에 따른 가입자 수 변화 ($p = \$36$)
Fig. 4. User subscription dynamics when $p = \$36$.

약 600명에서 안정화되었지만, 서비스 가격이 \$36일 때는 (그림 4) 가입자 수가 한 점으로 수렴하지 않고 700명 전 후의 두 값 사이를 무한히 진동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞 장에서 분석한 대로 사용자의 인터넷 접속 속도가 두 개의 서로 다른 영역으로 구분되어 있다는 점에서 기인한다.

다음으로 우리는 그림 5에서 몇 가지 서로 다른 값으로 접속 속도를 제한했을 때, 서비스 가격에 따른 서비스 제공자의 수입의 변화를 나타내었다. 그림에서 점선으로 표시된 부분은 서비스 제공자의 수입이 한 점으로 안정화되지 않고 진동하는 영역을 나타낸다. 제한 접속 속도가 12Mbps일 때는 진동 하는 영역 없이 모든 가격에서 안정된 수입이 보장되었지만, 다른 제한 접속 속도(15, 20, 30Mbps)에서는 특정한 가격 범위에서 수입이 안정화되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경우, 진동하는 영역을 중심으로 오른쪽 그래프는 접속 속도

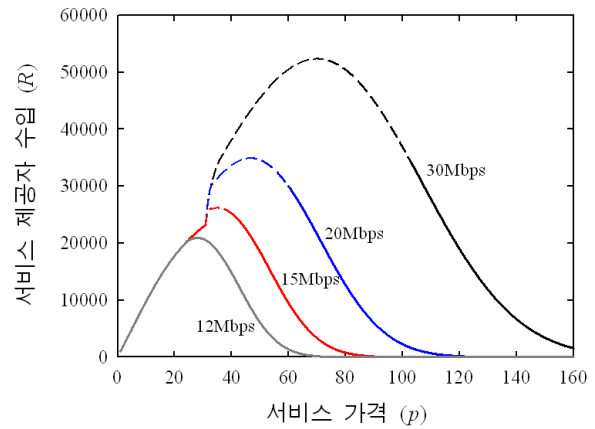


그림 5. 가격에 따른 서비스 제공자의 수입 변화
Fig. 5. ISP revenue according to access price.

가 제한되는 영역과 관련되어 있고, 왼쪽 그래프는 가입자 수에 따라 접속 속도가 감소하는 영역과 관련되어 있다. 정리 3에서 분석한 대로 서비스 제공자의 수입은 접속 제한 속도에 상관없이 제한 영역에서 최대값을 발생시키는 것을 확인할 수 있다. 또한 이 때 최대 수입을 발생시키는 최적 가격은 제한 접속 속도가 12Mbps일 때는 꼭지점(\hat{p})에서, 나머지 제한 속도에서는 경계값(p_h)에서 나타난다. 그래프에 나타난 서비스 제공자의 최대 수입과 최적의 서비스 가격은 수식 (20)과 (22)의 낮은 차수 두 항목에 대해서 계산한 근사치와 상당히 일치함을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

우리는 이 논문에서 인터넷 서비스 제공자들이 정책적인 목적으로 행하고 있는 각 사용자에 대한 최대 접속 속도의 제한이 실제로 사용자들의 서비스 가입 결정에 어떻게 영향을 미치는 지를 분석했다. 또한 그에 따라 변화하는 서비스 제공자의 수입이 안정성을 보장 받기 위한 조건을 유도해냈으며, 수입을 최대화하기 위한 가격 결정 방법을 간단한 최적화 문제로 나타냈다.

비록 이 논문에서는 단일 서비스 환경에서의 접속 속도 제한이 사용자의 가입 모형과 서비스 제공자 수입에 미치는 영향을 분석하고 있지만, 기본적인 분석 방법 및 결과는 더 복잡한 차등화 서비스 모델이나 서로 다른 서비스 제공자들 간의 경쟁 모델을 분석하기 위한 기초로서 사용될 수 있다는 점에서 큰 의의가 있을 것

이다. 우리는 현재 본 논문에서 제안한 서비스 품질 모델을 토대로 한 차등화 서비스의 경제성 분석에 대한 연구를 수행하고 있다.

부 록

1. 정리 2의 증명

우리는 간단한 그래프를 이용해 이 정리를 증명한다. 수식 (10)에 의해, 감소 영역에서 수렴하는 최종 가입자 수는 $n^* = N(1 - F_v(pn^*/C))$ 로 주어진다. 이는 n^* 이 $y = x$ 과 $y = N(1 - F_v(px/C))$ 의 두 그래프가 만나는 접점임을 의미한다. (그림 6)

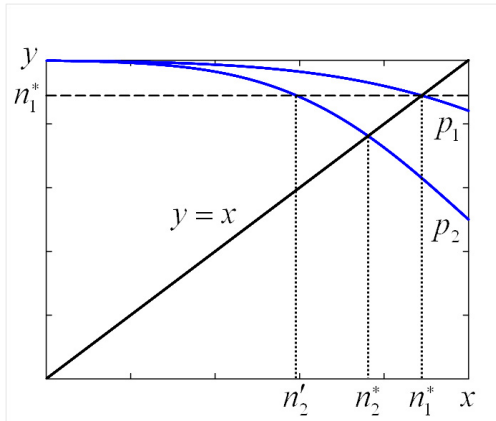


그림 6. 정리 2 증명
Fig. 6. Proof of Lemma 2.

$\alpha > 1$ 인 α 에 대해 $p_2 = \alpha p_1$ 을 만족시키는 서비스 가격 p_1 과 p_2 를 가정해보자. 먼저 가격이 p_1 일 때의 최종 가입자 수를 n_1^* 이라고 하면, n_1^* 은 두 그래프의 접점 값을 의미하고, 다음 식을 만족한다.

$$n_1^* = N(1 - F_v(p_1 n_1^*/C)) \tag{23}$$

다음으로 p_2 에 대한 그래프 $y = N(1 - F_v(p_2 x/C))$ 는 p_1 에 대한 그래프보다 급격히 감소하는 형태를 보이게 되므로, n_2^* 은 n_1^* 에 비해 작은 값을 갖게 된다. 여기서, p_2 에 대한 감소 그래프와 $y = n_1^*$ 의 수평선이 만나는 접점값을 n_2' 라 하면, n_2' 는 다음의 조건을 만족한다.

$$n_1^* = N(1 - F_v(p_2 n_2'/C)) \tag{24}$$

수식 (23)과 (24)로부터 우리는 다음 식을 얻게 된다.

$$p_1 n_1^* = p_2 n_2' \Rightarrow n_1^*/\alpha = n_2' \tag{25}$$

한편, p_2 에 대한 감소 그래프는 단조 감소하기 때문에, n_2^* 은 항상 다음 부등식을 만족한다.

$$n_2^* > n_2' = n_1^*/\alpha \tag{26}$$

그러므로 우리는 $R = n^* p$ 로 주어지는 서비스 제공자의 수입에 대해 다음과 같은 부등식이 성립함을 확인할 수 있다.

$$R_2 = n_2^* p_2 > n_1^* p_1 = R_1 \tag{27}$$

즉, 우리는 서비스 제공자의 수입은 $F_v(\cdot)$ 에 상관 없이 증가함수임을 증명했다.

2. 정리 3의 증명

만약 제한 영역의 경계값 p_h 에서의 서비스 제공자의 수입이 감소 영역에서 최대 수입을 발생시키는 경계값 p_l 에서의 수입보다 크다면, 우리는 서비스 제공자의 최대 수입이 제한 영역에서 발생함을 증명할 수 있다.

먼저, 가격이 p_h 일 때의 최종 가입자 수는 C/r 이기 때문에, 서비스 제공자의 수입은 다음과 같다.

$$R(p_h) = CF_v^{-1}\left(1 - \frac{C}{Nr}\right) \tag{28}$$

하지만, 가격이 p_l 일 때는 가입자 수는 한 점으로 수렴하지 않고 C/r 과 \tilde{n} 사이를 무한히 진동하기 때문에 서비스 제공자의 수입도 하나의 값으로 존재하지 않는다. 따라서 우리는 p_l 보다 아주 작은 값을 갖는 p_l^- 에서의 수입을 생각해볼 수 있다. p_l^- 은 진동 영역에 속하지 않고, 한 점 $n^*(p_l^-)$ 에 수렴하게 되는데, 이 때 $n^*(p_l^-)$ 는 분명히 다음 조건을 만족한다.

$$C/r < n^*(p_l^-) < \tilde{n} \tag{29}$$

그러므로 p_l 에서 서비스 제공자의 수입은 항상 다음 부등식을 만족한다.

$$R(p_l) \approx n^*(p_l^-) p_l = \frac{n^*(p_l^-)}{\tilde{n}} CF_v^{-1}\left(1 - \frac{C}{Nr}\right) < R(p_h) \tag{30}$$

즉, 우리는 서비스 제공자의 최대 수입이 항상 제한 영역에서 발생함을 증명했다.

참 고 문 헌

- [1] R. B. Wilson, *Nonlinear Pricing*, Oxford University Press, 1997.
- [2] K. T. Talluri and G. V. Ryzin, *The Theory and Practice of Revenue Management*, Springer, 2005.
- [3] L. He and J. C. Walrand, "Pricing Differentiated Internet Services," in IEEE INFOCOM, 2005.
- [4] G. Kesidis, A. Das, and G. de Veciana, "On Flat-rate and Usage-based Pricing for Tiered Commodity Internet Services," in IEEE CISS, 2008.
- [5] Q. Lv and G. N. Rouskas, "An Economic Model for Pricing Tiered Network Services," in IEEE ICC, 2009.
- [6] G. N. Rouskas and N. Baradwaj, "On Bandwidth Tiered Service," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 17, no. 6, pp. 1780-1793, 2009.
- [7] A. Odlyzko, "Paris Metro Pricing for the Internet," in Proceedings of the ACM Conference on Electronic Commerce, 1999.
- [8] C.-K. Chau, Q. Wang, and D.-M. Chiu, "On the Viability of Paris Metro Pricing for Communication and Service Networks," in IEEE INFOCOM, 2010.
- [9] D. Besanko, S. Gupta, and D. Jain, "Logit Demand Estimation Under Competitive Pricing Behavior: An Equilibrium Framework," *Management Science*, vol. 44, no. 11, pp. 1533-1547, 1998.
- [10] S. Ren, J. Park, and M. van der Schaar, "User Subscription Dynamics and Revenue Maximization in Communications Markets," in IEEE INFOCOM, 2011.
- [11] V. Valancius, C. Lumezanu, N. Feamster, R. Johari, and V. V. Vazirani, "How Many Tiers? Pricing in the Internet Transit Market," in ACM SIGCOMM, 2011.
- [12] R. Gibbens, R. Mason, and R. Steinberg, "Internet Service Classes Under Competition," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 12, pp. 2490-2498, 2000.
- [13] D. Ros and B. Tuffin, "A Mathematical Model of the Paris Metro Pricing Scheme for Charging

Packet Networks," *Computer Networks*, vol. 46, no. 1, pp. 73-85, 2004.

- [14] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.

저 자 소 개



이 승 호(정회원)
2007년 서울대학교 전기공학부
학사 졸업.
2007년~현재 서울대학교
전기컴퓨터공학부 박사.
<주관심분야 : 네트워크 경제학,
가상 네트워크, 네트워크 보안>



서 승 우(정회원)-교신저자
1987년 서울대학교 전기공학
학사.
1989년 서울대학교 전기공학
석사.
1993년 펜실베이니아 주립대학교
전기공학 박사.
1993년~1994년 펜실베이니아 주립대학교 컴퓨터공
학과 조교수.
1994년~1996년 프린스턴대학 전기공학과 및
POEM 연구소 연구원.
1996년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수.
<주관심분야 : 지능형 자동차 IT, 정보보안>