DBpia

공유 링크에서의 대역폭 기반 비선형 요금제

정회원 조 문 교*, 박 명 철**, 최 문 기**

Bandwidth-based Nonlinear Pricing on a Shared Link

Moonkyo Cho*, Myeong-cheol Park**, Mun-Kee Choi** ***Regular Members***

요 약

네트워크 서비스의 요금제는 경제적 효율성과 더불어 네트워크의 혼잡 제어라는 목적도 가지고 있다. 사용자들에 의해 공유되는 링크를 기반으로 네트워크 서비스를 제공하는 독점 공급자는 링크의 대역폭 제약 하에서 수익을 극대화하면서 사용자가 요구한 대역폭을 보장할 수 있는 요금제를 필요로 한다. 이 경우 비선형 요금제는 서비스 제공자의 목적과 사용자들의 다양한 요구를 만족시킬 수 있는 효율적인 요금제이다. 본 연구에서는 대역폭을 제공하는 네트워크 서비스에서 공유 링크의 대역폭 제약이 존재할 때 비선형 요금제가 어떻게 적용될 수 있는지 효용함수와 사용자 수요 특성의 확률 분포를 중심으로 살펴보고, 사용자의 수요 특성이 멱급수 법칙을 따르는 경우 비선형 요금제의 결과로 단위 대역폭당 가격이 일정한 선형 요금제가 나타날 수 있음을 보인다. 또한 사용자의 수요 분포에 대한 불완전한 정보를 가진 서비스 제공자가 네트워크의 혼잡도로부터 최적 요금제를 찾는 방법을 소개하고, 연구 결과에 근거하여 인터넷의 발전 방향과 인터넷 요금제의 관계를 생각한다.

Key Words : Nonlinear pricing, Price schedule, Quantity discount, Power law, Congestion

ABSTRACT

Pricing a network service aims for congestion control of the network as well as economic efficiency. A monopolistic supplier providing users with a network service on a shared link needs a pricing schedule that maximizes revenue under the link's bandwidth constraint and guarantees the bandwidth purchased by the users. In that case, nonlinear pricing is an efficient scheme which meets both requirements. This study reviews how nonlinear pricing can be applied to the network service under the constraint and shows that the nonlinear pricing may result in a fixed unit price of bandwidth as linear pricing when demand characteristics of the users follow a power law. Also, the way how the provider with incomplete information on the demand distribution seeks for the optimal pricing from the degree of the network congestion is introduced and the relationship between the development direction of the Internet and internet pricing is considered based on the results of the study.

Ⅰ. 서 론

공유되는 네트워크의 혼잡을 적절히 제어하면서 서비스 제공자의 이익을 높이기 위해서는 효과적인 요금제가 필요하다. 네트워크 서비스에서는 초기 설비투자의 부담이 크기 때문에 자연 독점이 나타나기 쉽고, 이 경우 독점적 서비스 제공자는 효과적인 요금제로 수익을 극대화하기 위해 규제 정책과 사용자의 요구에 부합하는 수량 할인(quantity discount)의 방식으로 요금제를 구현한다. 더 나은 서비스 또는

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2007-C1090-0701-0014)
* 한국정보통신대학교 IT경영학부 박사과정 (slowtime@icu.ac.kr),
** 한국정보통신대학교 IT경영학부 교수 ({mcpark, mkchoi}@icu.ac.kr)
논문번호 : KICS2007-09-425, 접수일자 : 2007년 9월 18일, 최종논문접수일자 : 2007년 10월 19일

www.dbpia.co.kr

더 넓은 대역폭을 구매할수록 상품의 단위가격이 낮아지는 이런 요금제는 가격차별화의 한 가지 방식으로, 전용회선 서비스나 여러 등급을 갖는 인터넷 접속 서비스에서 쉽게 관찰된다. 차별화된 서비스에 따른 다양한 요금을 제시하고 사용자로 하여금 자신에게 적합한 것을 선택하도록 하는 이런 방식은 비선형 요금제(nonlinear pricing)의 일반적인 형태라고 할 수 있다.

비선형 요금제가 독점 공급자에게 더 큰 이익을 제공하기는 하지만 기술적인 한계와 실제 요금제 구현의 복잡함 때문에 사용자가 자신의 대역폭 또는 서비스 수준을 임의로 선택할 수 있는 완전한 비선형 요금제는 찾아보기 힘들다. 또한 선택할 수 있는 몇 가지 단계만을 가지고서도 완전한 비선형 요금제에 버금가는 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이러한 방식의 요금제를 구현하기 위해서는 완전한 형태의 연속적인 비선형 요금제에 대한 분석이 필수적이다.

비선형 요금제는 경제학 분야에서 최적 과세 방식으로 처음 제시되었고[1], 수요자에 대한 불완전한 정보를 갖는 독점 공급자의 요금표(price schedule) 설정 문제로 발전하여[2], 하나 이상의 수요 특성 유형을 갖는 상품을 포함하는 다양한 분야에 적용되고 있다[3]. 그러나 네트워크 서비스에서는 대역폭을 상품으로 판매하는 경우라 하더라도 대역폭이 임의로 분할될 수 없다는 특성과 현실적으로 서비스 수준의 한계가 존재한다는 점 때문에 비선형 요금제가 적용되기 어려웠다. 그러나 통신 기술의 발전으로 충분한 대역폭과 서비스 품질을 보장할 수 있게 되면서 네트워크 자원을 효율적으로 제공하고 다양한 사용자의 요구를 받아들이기 위해서는 비선형 요금제를 적극적으로 적용할 필요가 있다.

한편, 네트워크 자원을 효율적으로 사용자들에게 분배하기 위해 필요한 네트워크의 혼잡(congestion) 제어와 공정성(fairness)에 대한 연구는 통신 분야에서 지속적으로 연구되고 있다. 서비스 제공자는 네트워크의 혼잡을 제어하기 위해 혼잡 요금을 부과하거나 요금을 동적으로 변화시키면서 네트워크로의 진입을 제어하여 다양한 사용자들의 요구를 최대로 만족시키고 수익을 극대화한다. 요금이 네트워크의 상태에 따라 동적으로 바뀌는 요금제로는 MacKie-Mason과 Varian의 smart market 모델[4]이 대표적이고, 정적인 요금제 하에서 자원을 효율적으로 분배하는 방식으로는 Odlyzko가 제안한 Paris Metro Pricing[5]이 잘 알려져 있으며, 동적 요금제와 정적 요금제의 특성을 현실적인 네트워크 구조의 문제와 결합시킨 edge pricing은 기존의 최적화 관점에서 탈피하여 기술 발전에 따른 유연한 요금제를 제시하고 있다[6]. 또한 네트워크 자원의 제약 하에서 다양한 사용자들의 요구를 동시에 만족시키려면 자원 배분에서 공정성을 유지할 필요가 있는데, 최대-최소 공정성, 비례적 공정성 등은 이런 목적으로 네트워크 서비스의 요금제에 도입되고 있다[7]. 그러나 요금제의 경제적 효율성과 적용의 단순성이라는 두 측면을 사용자 선택의 여지를 폭넓게 허용하면서 동시에 만족시키기는 어렵다.

통신 네트워크는 복잡한 형태를 가질 수 있지만 기본적으로 특정 용량의 자원을 갖는 단일 링크의 결합으로 이루어져 있으며 일차적인 자원의 제약은 링크의 대역폭이다. 따라서 이 논문은 네트워크 서비스에 비선형 요금제를 적용하기 위한 연구의 출발점으로, 대역폭이 제한된 단일 링크에서 어떻게 비선형 요금제가 구현되는지 그리고 사용자들의 수요 특성이 확률분포로 반영될 때 요금제는 어떤 모습을 띠게 되는지를 알아본다. 특히 일부 사용자들의 대역폭 수요 특성이 나머지 다수 사용자들의 수요에 비해 두드러지게 나타나는 경우를 멱급수 법칙을 따르는 Pareto 분포로 가정하여, 비선형 요금제 하에서 대역폭의 단위가격이 일정한 선형적인 요금 구조가 나타날 수 있음을 보인다. 또한 사용자의 수요 특성에 대한 충분한 정보가 없을 때 네트워크의 혼잡 정보로부터 최적의 요금제를 구현하는 방법을 알아보고, 끝으로 인터넷 요금제에 대한 논의는 인터넷의 발전 방향에 대한 연구와 함께 이루어져야 함을 지적한다.

Ⅱ. 대역폭 기반 비선형 요금제

시장을 분할할 수 없는 상황에서 독점 공급자는 이질적인 사용자들에게 동일한 비선형 요금제의 요금표를 제시하고 상품을 판매한다. 수요자는 주어진 요금표에서 자신의 구매량을 조절함으로써 구매 효용에서 요금을 제외한 순효용(소비자 잉여)을 극대화한다. 이런 과정을 공유되는 단일 링크의 대역폭 기반 네트워크 서비스에 적용한다.

비선형 요금제를 설명하기 위해 사용되는 변수와 함수들은 다음과 같다.

x: 사용자가 구매하여 사용하는 대역폭

w: 사용자의 수요 특성을 나타내는 확률변수

www.dbpia.co.kr

$U(x,w)$: w에 해당하는 사용자가 대역폭 x에서 얻는 편익을 나타내는 효용함수, 대역폭의 한계효용은 $u(x,w)=\frac{\partial U}{\partial x}(x,w)$

$P(x)$: 대역폭 x에 대해 서비스 제공자가 정한 요금으로 모든 사용자에게 공통으로 적용, 대역폭의 한계가격은 $p(x)=P'(x)$

$D(p,w)$: w에 해당하는 사용자가 한계가격 p에서 구매하는 양을 나타내는 수요함수

$x(w)$: w에 해당하는 사용자의 최적 대역폭 구매량

$w(x)$: 최적 구매량으로 x를 선택하는 사용자의 수요 특성 확률변수

일반적으로 사용자의 효용이 준선형(quasilinear)이라고 가정하면 사용자는 공급자가 제시한 요금제 $P(x)$에 대해 순효용 $U(x,w)-P(x)$를 극대화하는 대역폭 x를 선택한다. 따라서 사용자의 최적 선택에서 w와 x가 서로 대응하게 되므로 $x(w)$와 $w(x)$를 생각할 수 있고, 최적 조건으로 대역폭의 한계효용과 한계가격이 같아야 하기 때문에

$$u(x,w(x))=p(x) \tag{1}$$

가 성립한다. 그 결과, w에 해당하는 사용자는 대역폭 $x(w)$를 사용하면서 요금 $P(x(w))$를 지불하게 된다. 한편, 개별 사용자의 효용함수는 개별 수요함수 $D(p,w)$에 대응하는데, $u(D(p,w),w)=p$이므로 함수 u와 D는 서로 역함수 관계에 있다.

주어진 서비스의 잠재적 사용자 $i=1,2,\dots,n$들이 높은 숫자일수록 더 큰 수요를 가지도록 정렬되어 있고 사용자 i의 대역폭 구매량이 x_i, 효용이 $U_i(x_i)$라면, 사용자의 자기선택(self-selection)이 가능할 경우 서비스 제공자는 각각의 사용자에 대해 다음과 같은 유인부합적(incentive compatible) 요금 P_i를 부과한다. (사용자 i는 요금표의 요금 조합 $\{x_i, P_i\}$에서 가장 큰 순효용을 얻는다.)

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^{i}(U_j(x_j)-U_j(x_{j-1})) \\ &= U_i(x_i)-\sum_{j=1}^{i-1}(U_{j+1}(x_j)-U_j(x_j)) \end{aligned} \tag{2}$$

사용자의 수요 특성이 연속확률변수 w로 표현된다면 그 확률분포는 누적분포함수 $F(w)$로 나타낼 수 있다. 사용자는 효용이 지불될 요금 이상인 경우에만 서비스에 참여한다는 점을 고려하여 식 (2)를 연속화하면 다음과 같다. 단, $w<w(0)$이면 그 사용자는 서비스에 참여하지 않고 요금은 0이 된다.

$$\begin{aligned} P(x) &= \int_0^x u(t,w(t))dt \\ P(x(w)) &= U(x(w),w)-\int_{w(0)}^{w}\frac{\partial U}{\partial w}(x(t),t)dt \end{aligned} \tag{3}$$

이 때, 독점 공급자의 이윤은 비용함수 $C(x)$와 $f(w)=F'(x)$를 이용하여

$$\text{Profit}=\int_{w(0)}^{w_{\max}} f(w)(P(x(w))-C(x(w)))dw \tag{4}$$

으로 나타낼 수 있으며, 이를 극대화하는 $x(w)$는 다음을 만족한다.

$$u(x(w),w)-\frac{\overline{F}(w)}{f(w)}\frac{\partial u}{\partial w}(x(w),w)=c(x(w)) \tag{5}$$

단, $c(x)=C'(x)$, $\overline{F}(w)\equiv 1-F(w)$이다. 이 식은 비선형 요금제의 일반적 조건이 되며[3], $u(x(w),w)\geq c(x(w))$임을 알 수 있다 (등호는 $w=w_{\max}$일 때 성립). 여기서 $\frac{\overline{F}(w)}{f(w)}$는 위험률(hazard rate) $\rho(w)\equiv f(w)/\overline{F}(w)$의 역수이며, w의 확률분포에 의해 정해진다.

비선형 요금제에서 위의 결과가 성립하기 위해서는 효용함수가 몇 가지 조건을 만족해야 한다. 먼저, 한계효용은 체감하므로 $\partial U/\partial x>0$이고 $\partial^2 U/\partial x^2<0$이다. 그리고 사용자들을 수요 특성에 따라 정렬할 수 있기 위해서는 (또는, 사용자들의 수요함수가 교차하지 않기 위해서는), $x>0$인 모든 x에 대해 $w<w'$이면 $U(x,w)<U(x,w')$이고 $u(x,w)<u(x,w')$이다. 다시 말해 $\partial U/\partial w>0$이고 $\partial^2 U/\partial x\partial w>0$이다. 이 조건은 Spence-Mirrlees 조건, 또는 단일교차조건(single crossing property)으로 알려져 있다.

Ⅲ. 용량 제약과 사용자 수요에 따른 요금제 구현

대용량의 링크가 이미 고정적으로 설치된 상황에서 이를 사용자들에게 서비스하는 경우를 생각해 보자. 서비스 제공을 위한 가변 비용을 무시하면, 이윤에서 비용 부분이 없어지는 대신에 전체 공급량, 곧 링크의 용량 제약이 다음과 같은 제약식으로 나타난다.

www.dbpia.co.kr

$$\int_{w(0)}^{w_{\max}} f(w)x(w)dw = K \qquad (6)$$

여기서 링크 용량 K는 개별 사용자에게 할당되는 대역폭의 기대값을 의미하며, 사용자 집단의 크기가 N일 때 링크의 물리적인 전체 대역폭은 KN으로 표현된다. 그리고 비선형 요금제의 조건에서 한계비용 $c(x)$는 제약식의 라그랑지 승수 λ로 다음과 같이 대체된다.

$$u(x(w),w) - \frac{\overline{F}(w)}{f(w)}\frac{\partial u}{\partial w}(x(w),w) = \lambda \qquad (7)$$

사용자들의 대역폭 구매량의 총합이 링크의 용량을 넘지 않기 위해서는 작은 용량의 링크일수록 자원의 잠재가격 λ가 더 커지고 요금 역시 높은 수준이 될 것으로 예상할 수 있다.

몇 가지 형태의 효용함수와 수요 분포에 대해 위의 문제가 어떻게 적용되는지 알아보기 전에, 유효한 서비스를 위한 최소 대역폭과 이에 따른 S형 효용함수[8]를 고려해 보자. 사용자가 효용을 느낄 수 있는 최소한의 대역폭을 $x_0 \equiv \max\{x|U(x,w)=0\}$라고 정의하면 모든 w에 대해 $U(x_0,w)=0$이고, 효용함수에 대한 여러 가지 조건들은 $x > x_0$에서 성립해야 한다. 따라서 식 (3), (4), (6)에서도 0 대신에 x_0를, 그리고 $w(0)$ 대신 실제 사용자들의 w의 최소값을 의미하는 $w_0 \equiv \max\{w_{\min}, w(x_0)\}$를 적용해야 한다. 이 때, 실제 사용자의 구매량 x는 언제나 x_0보다 크며, $P(x_0)=0$이다. 이 경우 효용함수는 최소한의 서비스를 위한 상품 또는 자원의 구매량이 존재하는 경우를 나타낼 수 있으며, S형 효용함수를 부분적으로 대신할 수 있다.

비선형 요금제의 적용과 분석을 위해서는 w의 확률분포와 효용함수의 형태를 정하는 것이 중요하다. 많은 연구에서 확률변수 w가 특정한 기본 효용함수와 결합된 $U(x,w)=wV(x)$의 형태를 공통적으로 가정하고 있다. 예를 들어 로그 효용함수 $U(x,w)=w\log x$는 네트워크의 공평성과 효율성 측면에 대한 연구에서 사용되며[7], $U(x,w)=wx^{\alpha}$ $(0<\alpha<1)$ 형태의 곱셈(multiplicative) 효용함수는 단순하기 때문에 분석이 쉽다. 그리고 다음의 일반화된 곱셈 효용함수[9]는 로그 효용함수와 곱셈 효용함수를 포괄하며, 최소 대역폭 개념을 적용하기에도 적당하다.

$$U(x,w) = w\frac{x^{\beta}-1}{\beta}\ (\beta<1) \qquad (8)$$

이 효용함수는 $\beta=0$인 경우 미분계수를 이용하여 극한을 구하면 로그 효용함수가 된다. 또한 $U(1,w)=0$이므로 $x_0=1$이고, 서비스를 위한 최소 대역폭 $x_{\min}$과 실제 서비스되는 대역폭 x_{real}이 존재할 때 $x \equiv x_{\text{real}}/x_{\min}$으로 적용할 수 있다[10]. 그리고 수요의 가격탄력성이 $\eta = 1/(\beta-1)$이므로 현실적으로 측정할 수 있는 가격탄력성으로부터 효용함수를 쉽게 추정할 수 있다는 장점도 갖는다.

한편, 경제학적 접근에서는 비선형 요금제에 필요한 조건을 만족하는 단순한 선형 수요함수와, 이에 대응하는 효용함수를 다음과 같이 정의하기도 한다.

$$\begin{aligned} D(p,w) &= mp + w\ (m<0) \\ U(x,w) &= -\frac{wx}{m} + \frac{x^2}{2m}\ (0 \le x \le w) \end{aligned} \qquad (9)$$

이처럼 $\partial u/\partial w$가 상수로 나타나는 효용함수는 (선형 수요함수에서는 $\partial u/\partial w = -1/m$) $\partial u/\partial w = \delta$, $u(x,w) = \delta w + d(x)$로 일반화할 수 있다.

3.1 Uniform 분포를 따르는 사용자 수요 특성

확률변수 w가 a와 b 사이에서 uniform 분포를 따른다고 가정하면 위험률은 $\rho(w) = 1/(b-w)$이다. 이 확률변수를 $U(x,w)=wV(x)$ 형태의 효용함수와 함께 식 (7)과 식 (1)에 적용하면 다음의 결과를 얻는다 (단, $v(x) = V'(x)$).

$$\begin{aligned} w(x) &= \frac{1}{2}\left(\frac{\lambda}{v(x)} + b\right) \\ p(x) &= \frac{1}{2}(\lambda + bv(x)) = \frac{1}{2}(\lambda + u(x,b)) \\ P(x) &= \frac{1}{2}(\lambda(x-x_0) + bV(x)) \\ &= \frac{1}{2}(\lambda(x-x_0) + U(x,b)) \end{aligned} \qquad (10)$$

곱셈 효용함수에 위의 결과를 적용하면 $w_0 = \max\{a, b/2\}$이다. 즉, $w_0 = b/2$라면 전체 중 일부의 사용자만 서비스에 참여하고, $w_0 = a$라면 모든 사용자가 서비스를 이용한다. 그리고 $x(w)$와 w_0를 제약식 (6)에 대입하여 정리하면 λ를 구할 수 있다.

$$\lambda = \begin{cases} \alpha(b^{\gamma}A(\alpha))^{1-\alpha}, & w_0 = b/2 \\ \alpha((b^{\gamma} - (2a-b)^{\gamma})A(\alpha))^{1-\alpha}, & w_0 = a \end{cases} \qquad (11)$$

www.dbpia.co.kr

단, $A(\alpha)=\frac{1-\alpha}{2K(b-a)(2-\alpha)}$, $\gamma=\frac{2-\alpha}{1-\alpha}$이다.

일반화된 곱셈 효용함수 (8)에서는 $w_0=\max\{a,(\lambda+b)/2\}$이고,

$$\lambda=\begin{cases}((b^\gamma-\lambda^\gamma)A(\beta))^{1-\beta}, & w_0=\frac{\lambda+b}{2}\\ ((b^\gamma-(2a-b)^\gamma)A(\beta))^{1-\beta}, & w_0=a\end{cases} \tag{12}$$

이다 (단, $\gamma=\frac{2-\beta}{1-\beta}$). $w_0=(\lambda+b)/2$인 경우는 λ를 closed form으로 나타낼 수 없으나 K가 충분히 클 경우에는 $\lambda^\gamma\approx 0$임을 고려하여 근사값으로 $(b^\gamma A(\beta))^{1-\beta}$를 이용할 수 있다.

한편, $\partial u/\partial w$가 상수인 효용함수에 uniform 수요 분포를 적용하면 식 (10)에서와 마찬가지로

$$p(x)=\frac{1}{2}(\lambda+u(x,b)) \tag{13}$$

가 성립함을 알 수 있다. Uniform 분포와 이들 효용함수의 결합에서처럼 식 (13)이 성립하는 경우에는 $p'(x)=\frac{1}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}(x,b)$이고, 효용함수의 조건에서 $\partial^2 U/\partial x^2<0$이므로 $p'(x)<0$로 수량 할인이 항상 나타난다. 사용자 수요의 분포로 uniform 분포를 가정하는 것은 현실과는 거리가 있지만 사용자들의 수요 특성이 어떤 범위 안에서 다양하고 균일하게 분포된 경우를 나타낼 수 있다.

3.2 멱급수 법칙을 따르는 사용자 수요 특성

멱급수 법칙(power law), 즉 Pareto 분포는 Zipf's law의 연속형이다. Power law는 자연과 사회의 부익부 빈익빈("The rich get richer.") 현상의 결과로 다양한 분야에서 발견되고 있으며[11], Zipf's law는 CDN (Content Delivery Network)과 IPTV 등에서 특정 컨텐츠의 요구 빈도를 모형화하기 위해 널리 이용된다[12]. 네트워크 서비스에서도 사용자가 현재 서비스에서 넓은 대역폭을 사용할수록 새로운 애플리케이션을 더 많이 도입하는 등의 이유로 더 넓은 대역폭을 요구하는 과정이 계속된다면, 사용자의 수요 특성에서 멱급수 법칙이 나타날 수 있다. 인터넷이 WWW 트래픽 위주의 동질적인 환경에서 다양한 애플리케이션들의 요구에 맞춰 사용자가 적절한 대역폭을 선택하는 환경으로 변화한다면 멱급수 법칙의 가능성은 더 높아질 것이다.

사용자의 수요 특성 확률변수 w의 확률밀도함수와 누적분포함수가 다음과 같이 Pareto 분포를 따른다고 가정한다 (단, $k>1, w_m>0, w\ge w_m$).

$$f(w)=\frac{kw_m^k}{w^{k+1}},\ F(w)=1-\left(\frac{w_m}{w}\right)^k \tag{14}$$

w의 확률분포로부터 위험률은 $\rho(w)=k/w$이다. 이때, 효용함수가 $U(x,w)=wV(x)$의 형태라면 식 (7)과 식 (1)에서 다음 결과를 얻는다.

$$w(x)=\frac{k\lambda}{(k-1)v(x)} \tag{15}$$
$$p(x)=\frac{k\lambda}{k-1}=p,\ P(x)=p(x-x_0)$$

즉, 이 비선형 요금제는 한계가격이 상수 p인 선형적인 요금 구조로 나타난다.

이 결과의 의미를 더 자세히 알아보기 위해 일반화된 곱셈 효용함수 (8)에 적용해 보면 $w_0=\max\{w_m,k\lambda/(k-1)\}$이며 λ는 다음과 같다. (단, 제약식 (6)을 만족하기 위해서는 $k(1-\beta)>1$이어야 한다.)

$$\lambda=\begin{cases}w_m\frac{k-1}{k}(B(\beta))^{1/k}, & w_0=\frac{k\lambda}{k-1}>w_m\\ w_m\frac{k-1}{k}(B(\beta))^{1-\beta}, & w_0=w_m\ge\frac{k\lambda}{k-1}\end{cases} \tag{16}$$

여기서 $B(\beta)=\frac{k(1-\beta)}{K(k(1-\beta)-1)}$이다. 그리고 각각의 부등식 조건은 $B(\beta)>1$과 $B(\beta)\le 1$로 다시 쓸 수 있다. 따라서 단위 대역폭당 가격 p는 식 (15)에 의해 다음과 같다.

$$p=\begin{cases}w_m(B(\beta))^{1/k}, & B(\beta)>1\\ w_m(B(\beta))^{1-\beta}, & B(\beta)\le 1\end{cases} \tag{17}$$

참고로, 곱셈 효용함수에서는 $w_0=w_m$로 모든 사용자가 서비스를 이용하고 $p=\alpha w_m(B(\alpha))^{1-\alpha}$이다.

이와 같이 Pareto 분포와 $U(x,w)=wV(x)$ 형태의 효용함수가 결합되면 링크 대역폭 자원의 한계가격 p는 효용함수의 인수와 사용자 수요 특성 분포의 인수에 의해 사용량 x와 무관하게 결정되어 모든 사용자에게 동일하게 적용된다. 따라서 서비스 제공자의 총 수익의 최대값은 Kp이다.

www.dbpia.co.kr

한편, 선형 수요함수를 포함하는, $\partial u/\partial w$가 상수인 효용함수에 Pareto 분포를 적용하면 $p(x)$는 식 (7)과 식 (1)로부터 다음과 같다.

$$p(x) = \frac{k\lambda - d(x)}{k-1} \tag{18}$$

그런데 $u(x,w) = \delta w + d(x)$이므로 효용함수의 조건 $\partial^2 U/\partial x^2 < 0$에서 $d'(x) < 0$이다. 따라서 $p'(x) = -\frac{d'(x)}{k-1} > 0$이므로 이 경우에는 수량 할증(quantity premium)이 나타난다. 이렇듯 사용자의 수요 특성에 따라 비선형 요금제에서도 수량 할인이 나타나지 않거나 오히려 수량 할증이 나타날 수 있다. 그러나 소수의 사용자가 많은 요금을 내면서 대역폭의 대부분을 사용하는 경우에는 서비스 환경 변화에 따른 요금제의 안정성이 낮다.

Ⅳ. 네트워크 혼잡 제어와 요금제의 개선

네트워크 서비스에서는 공급량 제약 또는 제한된 자원의 공유로 인해 사용자가 원하는 구매량을 다 사용하지 못하거나 반대로 자원이 남는 경우가 생길 수 있으므로 요금제를 통한 혼잡 제어가 필수적이다. 따라서 서비스 제공자는 실제 자원의 양과 요구량의 예상되는 차이를 요금제에 반영하여 사용자의 요구량을 조절한다. 그러나 사용자에 대해 제한된 정보만을 가지고 있는 서비스 제공자는 동적인 요금제에서 사용자들의 집단적 반응을 지속적으로 관찰함으로써 사용자에 대한 더 많은 정보를 얻을 수 있으며, 이에 따라 요금제를 최적화할 수 있다. 즉, 공급량 제약을 만족시켜 자원 사용의 혼잡을 피하고 약속된 서비스 수준(QoS)을 보장하여 사용자의 불만과 기회주의적인 행동을 방지한다. 이 경우 네트워크의 혼잡 정보를 신속하게 수집하고 공개하는 것은 가격 안정화에 필수적이다[13].

단일 링크의 대역폭을 공유하는 비선형 요금제에서 서비스 제공자는 사용자의 수요 분포에 대한 정확한 정보를 갖고 있지 않더라도 링크의 혼잡도라는 최소한의 정보만을 측정하여 효율적인 비선형 요금제를 구현할 수 있다. 예를 들어, 일반화된 곱셈 효용함수와 uniform 사용자 수요 특성 분포가 결합된 상황에서의 비선형 요금제를 생각해 보자. 서비스 제공자는 서비스 초기에 확률변수의 범위로 $(\hat{a}, \hat{b})$라는 부정확한 정보를 가지고 다음과 같은 요금표를 구현한다.

$$P(x) = \frac{1}{2}\left(\hat{\lambda}(x-1) + U(x, \hat{b})\right) \tag{19}$$

서비스를 받지 않는 사용자가 존재하는 경우 $(w_0 > a)$만을 생각하면, 공급자는 식 (10), (12), (6)으로부터 아래의 식들을 얻을 수 있다.

$$\hat{x}(w) = \left(\frac{2w - \hat{b}}{\hat{\lambda}}\right)^{1/(1-\beta)}, \ \hat{w}_0 = \frac{\hat{\lambda} + \hat{b}}{2} \tag{20}$$

$$\hat{\lambda} \approx \hat{b}^{2-\beta}\left(\frac{1-\beta}{2K(\hat{b}-\hat{a})(2-\beta)}\right)^{1-\beta} \tag{21}$$

$$\int_{\hat{w}_0}^{b} f(w)\hat{x}(w)dw = \hat{K} \tag{22}$$

여기서 $\hat{K}$는 총 대역폭 요구량이자 현재 요금제에 대한 사용자들의 반응을 의미한다. 만약 $\hat{K} < K$이면 자원이 낭비되고 있는 것이며, 반대로 $\hat{K} > K$라면 혼잡으로 인해 사용자들이 요구한 만큼의 서비스를 이용하지 못하고 있는 것이다. $\hat{K} = K$가 성립하도록 요금제를 조절하기 위해 식 (20)과 (21)을 식 (22)에 대입하면 다음과 같은 근사식을 얻는다.

$$\frac{\hat{b} - \hat{a}}{b - a}\left(\frac{2b - \hat{b}}{\hat{b}}\right)^{\frac{2-\beta}{1-\beta}} \approx \frac{\hat{K}}{K} \tag{23}$$

식 (23)에는 미지수가 둘(a와 b)이므로 $(\hat{a}, \hat{b})$를 적절히 변화시켜 비선형 요금제를 한번 더 적용하면 측정된 결과로부터 연립방정식을 세워 a와 b를 구할 수 있다. 이론적으로는 어떠한 사용자 수요 특성의 확률분포도 비선형 요금제를 여러 번 적용하면 구할 수 있으며, 이 때 관찰해야 할 정보는 링크의 혼잡도 $r \equiv \hat{K}/K$ 뿐이다. 따라서 효용함수의 형태만 결정되면 사용자 수요 특성의 확률분포는 비선형 요금제에 대한 사용자들의 반응을 관찰하여 알아낼 수 있다.

일반화된 곱셈 효용함수에서 사용자의 수요가 Pareto 분포를 따르는 경우, 서비스 제공자가 부정확한 정보 $(\hat{w}_m, \hat{k})$로부터 요금제를 개선해 나가는 과정을 살펴보자. $w_0 > w_m$으로 서비스를 받지 않는 사용자가 존재한다면, 서비스 제공자는 다음과 같은 요금표를 구현한다.

www.dbpia.co.kr

$$\hat{x}(w) = \left(\frac{w}{\hat{p}}\right)^{1/(1-\beta)},\ \hat{w}_0 = \hat{p} \tag{24}$$

$$\hat{p} = \hat{w}_m \left(\hat{B}(\beta)\right)^{1/\hat{k}} \tag{25}$$

$$\int_{\hat{w}_0}^{\infty} f(w)\hat{x}(w)dw = \hat{K} \tag{26}$$

여기서 $\hat{B}(\beta) = \dfrac{\hat{k}(1-\beta)}{K(\hat{k}(1-\beta)-1)}$이다. 식 (24)와 (25)를 식 (26)에 대입하면 다음의 식을 얻는다.

$$\left(\frac{p}{\hat{p}}\right)^k = \frac{\hat{K}}{K} = r \tag{27}$$

마찬가지로 두 번의 적용을 통해 측정 결과를 연립하면 $r_1 = \hat{K}_1/K$, $r_2 = \hat{K}_2/K$라고 할 때, 다음과 같이 k와 p를 구할 수 있으며 w_m도 식 (17)로부터 계산할 수 있다.

$$k = \frac{\log(r_1/r_2)}{\log(\hat{p}_2/\hat{p}_1)},\ p = \hat{p}_1 r_1^{1/k} = \hat{p}_2 r_2^{1/k} \tag{28}$$

그리고 이렇게 얻은 p와 w_m의 값이 거의 같다면 모든 사용자가 서비스를 이용하는 경우($w_0 = w_m$)라고 생각할 수 있으며, 같은 방법으로 사용자 수요의 정확한 분포에 접근할 수 있다.

V. 결 론

본 연구는 기존의 비선형 요금제를 네트워크 서비스에 자원 제약을 고려하여 적용했다는 점에서 중요성을 갖는다. 비선형 요금제는 대개 수량을 셀 수 있는 상품에 적용되어 수량 할인의 형태를 띠게 되나, 본 연구에서는 이를 네트워크 서비스의 QoS를 일차적으로 결정하는 대역폭에 적용하고 비용함수 대신 공유 링크의 자원 제약을 도입하였다. 그 결과, 일반적으로는 수량 할인이 나타나지만 사용자들의 수요 분포를 Pareto 분포로 가정한 경우를 비롯하여 특정한 조건에서는 대역폭당 단위가격이 고정되는 선형 요금제가 나타남을 알 수 있었다.

또한 서비스 제공자가 사용자의 수요 특성에 대한 정확한 정보를 갖고 있지 않더라도 비선형 요금제를 적용한 결과로 나타나는 네트워크의 혼잡도를 측정하여 요금제를 최적화시킬 수 있다는 점을 보였다. 이는 네트워크 서비스 관리의 측면에서 비선형 요금제를 동적인 가격 조절을 통한 혼잡 제어 방식으로 활용한 것으로써, 요금제의 개선 과정을 통해 혼잡을 제어하고 사용자 수요의 정확한 분포를 알아가면서 독점적 서비스 제공자가 이윤을 최대화할 수 있음을 의미한다.

인터넷에 기반한 새로운 서비스가 등장할 때, 초기에는 정액 요금제로 수요를 이끌어 내고 서비스의 확산과 함께 사용량에 따른 요금제를 적용하여 수익을 극대화하는 것은 일반적인 모습이다. 그러나 대역폭 등의 자원 제약이 존재한다면 종량 요금제는 혼잡 제어의 역할도 수행할 필요가 있으며, 본 연구에서 제시된 자원 제약 하의 비선형 요금제는 서비스 사용 촉진과 혼잡 제어를 동시에 만족시킬 수 있다.

예를 들어 최근 확산되고 있는 FTTH 인터넷 서비스의 경우, 한 회선의 대역폭이 개별 사용자가 사용하기에는 너무 크기 때문에 실제로는 아파트 단지 등의 범위에서 대역폭이 공유되고 있다. 이 경우 대역폭에 따른 서비스 차별화를 위해 비선형 요금제를 적용할 수 있다. 마찬가지로, 다양한 규모의 서버를 유치하고 있는 인터넷 데이터센터의 경우, 한정된 대역폭을 효율적으로 사용하기 위해 서버의 전용(dedicated) 대역폭에 따른 비선형 요금제를 적용할 수 있다. 어떤 경우든 사용자(서버)의 대역폭 수요 분포가 멱급수 법칙을 따른다면 단위 대역폭 당 가격이 일정한, 단순한 선형 요금제가 나타날 가능성이 있다.

효용함수와 사용자 수요 특성을 일반화시켰을 경우 분석적인 해를 구하기 어렵기 때문에 단순한 형태로 가정한 점은 본 연구에서 보완되어야 할 부분이다. 특히, 서비스 가입자의 사용 패턴과 수요 특성이 실제로 어떤 분포를 따르고 있는지는 요금을 고려한 실증적이고 엄밀한 연구가 필요하다. '다수의 소량 사용자와 소수의 대량 사용자'라는 결과[14]는 정액 요금제의 비효율성을 증명할 수는 있으나 효율적인 요금제를 제시하기에는 부족하다.

과거의 다른 통신 서비스와 마찬가지로, 인터넷 서비스의 대역폭 사용량은 지속적으로 늘어나고 사용 요금은 더 낮아질 것이다[15]. 인터넷 애플리케이션의 다양화와 함께 사용자들의 수요 분포가 멱급수 법칙을 따르게 된다면 인터넷 요금제는 선형적인 대역폭 기반 요금제로 진화할 것이라고 예상할 수 있다. 다만, 자원의 제약이 어떤 형태로 존재하는가에 따라 대역폭이 아닌 전송량 또는 사용 시간 기반 요금제가 나타날 가능성도 있다.

www.dbpia.co.kr

그러나 반대로 사용자의 특성이 서로 비슷해지는 방향으로 인터넷 환경이 변화한다면, 비선형 요금제의 필요성은 점점 줄어들고 독점적인 서비스 제공자는 정액 요금제와 유사한 단순한 요금제로도 전체 효용의 많은 부분을 이윤으로 가져올 수 있다. 따라서 인터넷 요금제에 대한 논의는 인터넷 환경의 변화와 서비스의 발전에 대한 거시적 관점에서 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

〔1〕 J. A. Mirrlees, "An Exploration in the Theory of Optimum Income Taxation," *The Review of Economic Studies*, 38(2), pp. 175-208, April 1971.

〔2〕 E. Maskin, J. Riley, "Monopoly with Incomplete Information," *The RAND Journal of Economics*, 15(2), pp. 171-196, Summer 1984.

〔3〕 R. B. Wilson, *Nonlinear Pricing*, Oxford University Press, pp. 125-163, 1993.

〔4〕 J. K. MacKie-Mason, H. R. Varian, "Pricing the internet," in *Public Access to the Internet*, MIT Press, pp. 269-314, 1995.

〔5〕 A. M. Odlyzko, "Paris metro pricing for the internet," in *Proceedings of the 1st ACM Conference on Electronic Commerce*, pp. 140-147, November 1999.

〔6〕 S. Shenker, D. Clark, D. Estrin, S. Herzog, "Pricing in Computer Networks: Reshaping the Research Agenda," *ACM Computer Communication Review*, 26(2), pp. 19-43, April 1996.

〔7〕 F. P. Kelly, A. K. Maulloo, D. K. H. Tan, "Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability," *Journal of the Operational Research Society*, 49(3), pp. 237-252, March 1998.

〔8〕 S. Shenker, "Fundamental Design Issues for the Future Internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13(7), pp. 1176-1188, September 1995.

〔9〕 L. Massoulié, J. Roberts, "Bandwidth Sharing: Objectives and Algorithms," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 10(3), pp. 320-328, June 2002.

〔10〕 X. Wang, H. Schulzrinne, "Comparative study of two congestion pricing schemes: auction and tâtonnement," *Computer Networks*, 46(2004), pp. 111-131, September 2004.

〔11〕 M. E. J. Newman, "Power laws, Pareto distributions and Zipf's law," *Contemporary Physics*, 46(5), pp. 323-351, 2005.

〔12〕 L. Breslau, P. Cao, L. Fan, G. Phillips, S. Shenker, "Web caching and Zipf-like distributions: Evidence and implications," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '99*, pp. 126-134, March 1999.

〔13〕 A. Ganesh, K. Laevens, R. Steinberg, "Congestion pricing and user adaptation," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2001*, pp. 959-965, April 2001.

〔14〕 R. Edell, P. Varaiya, "Providing Internet Access: What We Learn From INDEX," *IEEE Network*, 13(5), pp. 18-25, September /October 1999.

〔15〕 A. Odlyzko, "Internet pricing and the history of communications," *Computer Networks*, 36(2001), pp. 493-517, August 2001.

조 문 교 (Moonkyo Cho) 정회원

1997년 8월 서울대학교 사회학과 졸업

2002년 2월~현재 한국정보통신대학교 IT경영학부 석박사통합과정

<관심분야> 통신경영, 네트워크 요금제, 그리드 컴퓨팅

박 명 철 (Myeong-cheol Park) 정회원

1976년 2월 서울대학교 산업공학과 졸업

1978년 2월 서울대학교 경영학과 석사

1990년 2월 The University of Iowa 경영학 박사(MIS)

1998년 3월~현재 한국정보통신대학교 IT경영학부 교수

<관심분야> 통신경영, 경영전략, 정보기술

www.dbpia.co.kr

최 문 기 (Mun-Kee Choi) 정회원

1974년 2월 서울대학교 응용수학과 졸업

1978년 2월 KAIST 산업공학과 석사

1989년 5월 North Carolina State University 경영과학 박사

1999년 3월~현재 한국정보통신대학교 IT경영학부 교수

2006년 11월~현재 한국전자통신연구원 원장

<관심분야> 네트워크 경영, 인터넷 응용경영, 네트워킹 기술

www.dbpia.co.kr