

우선순위를 가진 인터넷 서비스
종량제와 증가제 사용에 대한 증거들
Some evidence on time- and
priority-dependent pricing
in differentiated Internet Services

경영정보학과, 경영대학
건국대학교, 서울, 광진구 화양동 1
Tel: +82-2-450-3608, Fax: +82-2-3436-6610,
E-mail: yjaekim@gmail.com

김용재

Abstract

인터넷 서비스가 차별화되어야 한다는 논의는 인터넷이 본격적으로 상용화된 1990년대 중반부터 꾸준히 제기되어 왔다. *Tragedy of commons*라고 불리는 인터넷 혼잡현상은 지속적인 기술발전으로 인해서, 상당부분 해결되었으나, 최근 들어서는, Web 2.0의 등장을 통해 동영상 파일이 차지하는 비중이 늘어나면서, P2P를 통한 파일교환이 전체 인터넷 트래픽의 상당 부분을 차지하면서, 또한 실시간 비디오, VoIP 등의 인터넷 응용 프로그램 등에서 전송상의 지연을 포함한 QoS 보장을 요구하게 되면서, 또한 통신사업자의 망중립성에 관한 논의가 진행되면서, 인터넷 서비스를 차별화하고 통제하려는 연구의 중요성이 증대되고 있다. 본 연구는 인터넷 서비스를 차별화하기 위한 수단으로 기존에 제시되어온 가격과 우선순위라는 2개의 차원에서, 그리고 가격제도로써 증가제와 종량제의 차원에서 배경을 검토해 본 다음, 우선대기열 이론과 혼잡성 제어 이론을 통해서, 차별화된 서비스가 전체 시스템에 어떤 구체적으로 효익을 가져 오는지를 검토하며, 우선순위와 사용시간에 따라 차별화되는 종량제가 현실에서 발견되지 않는 이유에 대한 이론적인 근거를 제시하고, 종량제를 채택했을 경우에 발생하는 문제점과 종량제 사용에서 발생하는 한계들을 논의하면서, 현실적으로 종량제와 차별가격을 도입할 때 발생할 수 있는 문제점들을 밝혀본다.

Keywords:

Pareto-improving transition; Priority- and time-dependent pricing; Incentive-compatible

1. Introduction

최근 인터넷 상에서 망중립성(net neutrality)에 대한 논의가 불거지면서, 인터넷 서비스를 차별화하기 위한 논의가 새롭게 각광을 받고 있다. Web 2.0이 활성화되면서 사람들은 동영상을 더욱 활발하게 나누고 있으며, P2P를 통한 파일공유가 인터넷을 통해서 활성화되었고, 또한 IPTV와 같이 대용량전송을 요구하는 인터넷 응용프로그램이 등장하면서, 인터넷을 통제하고 인터넷 서비스를

차별화하려는 요구들이 최근 미국과 한국 등의 몇 나라에서 시도되었다. 그러나, 그런 움직임들은 대중의 지지를 얻지 못했거나 다른 인터넷 서비스 공급자들의 격렬한 반대에 직면해서 현재는 소강상태에 있다. 차별화된 인터넷 서비스를 반대하는 이들은 가격이나 인터넷 전송 상에서의 차별은 사회적으로 소외된 계층에 불리하며, 정보화로 인해서 소득계층을 더욱 벌릴 수 있다고 주장한다. 나아가 사용자에게 자유로운 무제한의 서비스를 제공하는 것이 인터넷의 원래 취지였다고 하면서, 인터넷 서비스를 차별화하려는 움직임에 제동을 걸고 있다. 일반인들과 시민단체들의 반대는 또한 인터넷 서비스 제공자—예를 들어, 인터넷 포털, VoIP—들에 의해서도 제기되었고, 이들 역시 계속해서 진화하고 있는 인터넷은 성숙한 시장이 아니기 때문에 규제와 가격 및 서비스 차별을 허용하는 정책은 허용을 반대한다. 미국에서 발생했던 것처럼, 타회사의 VoIP가 자신의 망을 통과하는 것을 거절하는 사례가 한국에서는 아직 발생하지 않았지만, 망중립성을 둘러싼 논의는 VoIP나 IPTV와 같이 안정적인 실시간 전송량을 요구하는 인터넷 응용프로그램들이 시장에 나오면서, 앞으로 인터넷 차별화에 대한 연구는 지속적으로 요구될 것 같다.

인터넷 서비스를 차별화하려는 노력과 연구는 1990년 초에 인터넷이 폭발적으로 증가하면서, 시급한 문제로 관심을 받았으며, 당시에 많은 사람들은 망혼잡성의 증가로 인터넷이 인터넷 백본망이 광 스위칭기술의 적극적인 도움을 받아서 확충되면서, 예상되었던 대부분의 문제는 실제로 현실화되지 못했으며, 현재에도 인터넷 백본망의 혼잡현상은 큰 문제가 되지 않고 있다. 그러나 새롭게 시장에 소개되는 응용프로그램들로 인해서 망혼잡과 이를 통제하기 위한 방법들은 계속해서 관심대상이 되고 있다.

응용프로그램에 따라 인터넷 망 사용을 통제하는 방법은 크게 사용량에 따라 증가하는 종량제와 사용량에 관계없이 일정한 비용을 내는 증가제의 차원에서, 그리고 이와 독립적으로 특정 인터넷 서비스를 다른 인터넷 서비스보다 더 우선순위를 주어서 처리하는 방식의 두 차원에서 접근할 수 있다. 그리고 가격이 회계적인 의미에서 투자비용을 회수하기 위해서 부과하는 차원인가 아니면 망의

혼잡성(congestion externality)이 유발시키는 외부효과를 반영하는 비용인자로 대별될 수 있다. 물론 이들 구분 사이에 존재하는 중간가격체계가도 있다.

본 연구는 망의 혼잡성에서 발생하는 외부효과를 상쇄하는 가격정책을 우선순위 대기열에 도입한 (Mendelson and Whang 1990, MW90)가 제시했던 가격체계에 대해서 살펴보자. 이 연구에 의하면, 사용자가 다른 우선순위의 사용자로 가장해서 시스템에 들어가지 않기 위해서(즉 incentive-compatible이 유지되기 위해서), 우선순위가 i 인 사용자의 사용시간 t 에 따라 증가하는 2차 함수, 즉 $p_i(t) = At + Bt^2$ 의 형태(A, B 는 상수)가 되어야 한다. 사용자의 효용함수가 위험중립적일 때, 이 가격함수체계에 의한 답은 시스템가치를 최대로 만드는 1차조건을 만족시키며, 동시에 혼잡성에서 발생하는 외부효과를 상쇄시킨다. Mendelsohn & Whang (1989)의 이 연구는 발표 당시에도 그리고 그 이후에도 큰 영향을 주었고, 그 이후 정말 많은 수의 논문들이 이 논문을 인용하고 있다.

하지만 우리가 현실에서 목격하는 인터넷 사용자 요금의 대부분은 사용량에 비례하지 않은 종가제이며, 사용량에 비례한다고 하더라도 사용시간 t 에 따라 1차로 증가하는 $p_i(t) = At + B$ 의 형태가 대부분이며, 사용량에 따라 2차로 증가하는 함수형태를 찾아볼 수 없다. 그렇다면 (MW90)가 제시한 incentive-compatible한 최적인 가격함수가 잘못된 것일까? 이 연구에서는 그 질문에 대한 몇 가지 가능한 답을 제시하며, 왜 사용자들에게 제시된 가격체계가 현실에서는 2차가 아닐까에 대한 추측을 해 본 다음, 향후의 연구과제를 고려한다.

2. 모델

우리는 (MW90)의 모델을 그대로 사용한다. 즉 어떤 인터넷 망 사업자의 망으로 들어오는 사용자를 N 개의 우선순위로 구분하자. 예를 들어, VoIP를 최우선순위로, 이메일이나 P2P를 최하위로 놓을 수 있다. 그렇다면 우선순위가 i 인 사용자들의 일정시간에 도착하는 프로세스를 Poisson이라고 가정하고, 도착평균비율(arrival rate)을 λ_i 라고 하자. 또 (MW90)의 프레임워크를 따라서 $V_i(\lambda_i)$ 가 우선순위가 i 인 사용자들이 얻는 가치의 함이라고 가정하자. 가치함수가 최적화를 위한 일반적인 가정을 만족한다고 할 때, 우선순위가 i 인 사용자가 시스템에 입장하는 순간의 한계가치는 $\partial V_i(\lambda_i)/\partial \lambda_i$ 가 되며, 이것은 또한 우선순위 i 인 사용자가 시스템에서 얻는 가치이기도 하다. 전체가치함수는 이런 우선순위가 i 사용자들 모두가 얻은 가치를 더한 함수 즉 $V(\lambda)$ 가 되며, 각각의 우선순위별로

합하면 시스템전체의 가치함수는 $V(\lambda) = \sum_{k=1}^N V_k(\lambda_k)$

이 된다. 여기서 $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_N)$ 는 전체 시스템으로 들어오는 우선순위가 i 사용자의 도착비율을 의미한다.

이제 각 사용자가 도착순서로 네트워크 전송이 허용된다고 하고, 대기시간을 제외한 순수한 전송시간의 1차, 2차 모멘트를 각각 c_i 와 $c_i^{(2)}$ 를 가진 일반분포라고 하자. 만약 네트워크가 우선대기열이 없는 M/G/1으로 운영되고 있다면,

$S_i = \sum_{k=1}^i \lambda_k c_k$, $\bar{S}_i = 1 - S_i$, and $\Lambda_i = \sum_{k=1}^i \lambda_k c_k^{(2)}/2$ 일 때,

평균체류시간은 $ST_i^1(\lambda) = \Lambda_N / \bar{S}_N + c_i$ 이

된다(Kleinrock 1976). Mendelson and Whang (1990)의 모델을 따라서, 사용자의 대기비용을 가격으로 환산한 함수를 v_i (우선순위가 i 사용자의 단위시간 비용을 사용한 전체비용함수를

$\sum_{k=1}^N v_k \lambda_k ST_k^1(\lambda)$ 라고 하자. 이제 순가치함수

$\sum_{k=1}^N (V_k(\lambda_k) - v_k \lambda_k (\Lambda_N / \bar{S}_N + c_k))$ 를 최대화하는

최적도착률 벡터를 $\lambda^* = (\lambda_1^*, \dots, \lambda_N^*)$ 라고 하면, 이 벡터에 대한 일차조건은 $\partial V_i(\lambda_i)/\partial \lambda_i =$

$v_i ST_i^1(\lambda) + \sum_{k=1}^N v_k \lambda_k \partial ST_i^1(\lambda)/\partial \lambda_k$ 이 된다. 우변의

둘째 항목은 우선순위가 i 사용자가 유발시키는 외부효과와 크기와 같으며, 이를 상쇄하기 위한 가격을 의미한다. 즉

$p_i^*(\lambda^*) = \sum_{k=1}^N v_k \lambda_k \partial ST_i^1(\lambda^*)/\partial \lambda_k$ 이 성립한다. 그러나

우선대기열이 없는 경우에도 incentive-compatible하기 위해서는 가격함수는 하더라도 사용시간 t 에 따라 2차로 증가하는

$p^1(t) = \left(\frac{t^2}{2S_N^*} + \frac{\Lambda_N^* t}{S_N^{*2}} \right) \sum_{k=1}^N v_k \lambda_k^*$ 이 되어야 한다(여기서

$\bar{S}_i^* = 1 - \sum_{k=1}^i \lambda_k^* c_k$ 와 $\Lambda_i^* = \sum_{k=1}^i \lambda_k^* c_k^{(2)}/2$ 을 의미, Kim and

Mannino 2002).

만약 이 시스템을 차별적인 대우를 허용하는 non-preemptive 우선대기열로 전환된다면, 우선순위가 i 인 사용자에 대한 (서비스 시간 c_i 를 포함한) 평균체류시간은 $ST_i(\lambda) = \Lambda_N / \bar{S}_i \bar{S}_{i-1} + c_i$ 이 된다 (Keinlock 1976).

전체대기비용은 $TC(\lambda) = \sum_{k=1}^N v_k \lambda_k (\Lambda_N / \bar{S}_k \bar{S}_{k-1} + c_k)$ 로

나오며 순가치함수는 $\sum_{k=1}^N (V_k(\lambda_k) - v_k \lambda_k ST_i(\lambda))$ 로

나온다. 이 함수를 최적화하는 도착률 벡터를 $\underline{\lambda}^{\square} = (\lambda_1^{\square}, \dots, \lambda_N^{\square})$ 라고 하면 최적화를 위한 1차조건 $\partial V(\underline{\lambda}) / \partial \lambda_i = v_i ST_i(\lambda)$

$$+ \left\{ \sum_{k=1}^N \frac{v_k \lambda_k c_i^{(2)}}{2S_{k-1} S_k} + \frac{v_i \lambda_i c_i \Lambda_N}{S_{i-1} S_i^2} + \sum_{k=i+1}^N \left(\frac{v_k \lambda_k c_i \Lambda_N}{S_{k-1}^2 S_{kj}} + \frac{v_k \lambda_k c_i \Lambda_N}{S_{k-1} S_k^2} \right) \right\}$$

가 성립한다. 이때 (MW90)의 결론을 따르면 incentive-compatible한 가격체계는 우선순위와 사용시간에 대한 함수가 되어야 한다.

$$p_i(t) = t \left(\frac{v_i \lambda_i^{\square} \Lambda_N^{\square}}{S_{i-1}^{\square} S_i^{\square 2}} + \sum_{k=i+1}^N \left(\frac{\Lambda_N^{\square} v_k \lambda_k^{\square}}{S_k^{\square} S_{k-1}^{\square 2}} + \frac{\Lambda_N^{\square} v_k \lambda_k^{\square}}{S_{k-1}^{\square} S_k^{\square 2}} \right) \right) + \frac{t^2}{2} \left(\sum_{k=1}^N \frac{v_k \lambda_k^{\square}}{S_{k-1}^{\square} S_k^{\square}} \right)$$

3. 가격차별화의 효용에 관한 이론적 근거들

무차별 서비스 시스템에서 차별화된 서비스 시스템으로 전환했을 때의 효과를 나타내는 2개의 정리를 소개한다.

정리 1 (대기비용)

만약 도착률 벡터가 고정되어 있다면, 우선순위가 없는 M/G/1에서 우선순위가 있는 대기열로 전환될 때 전체 대기비용은 감소한다. (Mitran 1998).

따라서 순시스템 가치는 증가한다. 이제 전체 시스템의 순가치가 증가할 때, 사용자 개인들이 시스템 사용에서 얻는 가치는 다음 정리에서 예측할 수 있다.

정리 2 (한계사회비용)

만약 각 우선순위에 대해서 도착률이 고정되어 있다면, 사용자가 무차별 시스템에서 지불하는 전체비용(대기비용과 가격의 합)은 차별화된 시스템으로 전환될 때 감소한다. 즉,

$$v_i ST_i(\lambda) + \sum_{k=1}^N \frac{v_k \lambda_k c_i^{(2)}}{2S_{k-1} S_k} + \frac{v_i \lambda_i c_i \Lambda_N}{S_{i-1} S_i^2} + c_i \sum_{k=i+1}^N \left(\frac{v_k \lambda_k \Lambda_N}{S_{k-1}^2 S_k} + \frac{v_k \lambda_k \Lambda_N}{S_{k-1} S_k^2} \right) < v_i ST_i^1(\lambda) + \left(\frac{c_i^{(2)}}{2S_N} + \frac{\Lambda_N c_i}{S_N^2} \right) \sum_{k=1}^N v_k \lambda_k$$

그러나 실제 문제를 풀어보면, 어떤 사용자 계층의 전체비용 오히려 전환 이후에 감소하는 것으로 나온다. 예를 들어 2개의 우선순위(계층)이 있을 때,

각 사용자 계층의 한계가치함수를 $V_1(\lambda_1) = 9 - 20\lambda_1$ 와 $V_2(\lambda_2) = 12 - 30\lambda_2$ 라고 할 때 $v_1 = 2, v_2 = 1, c_1 = 0.1, c_2 = 2, c_1^{(2)} = 2c_1^2$, and $c_2^{(2)} = 2c_2^2$ 로 다른 매개변수의 값을 주어졌을 때,

1차조건 $\partial V_i(\lambda_i) / \partial \lambda_i = v_i ST_i^1(\lambda) + \sum_{k=1}^N v_k \lambda_k \partial ST_i^1(\lambda) / \partial \lambda_i$ 과

$$\partial V(\lambda) / \partial \lambda_i = v_i ST_i(\lambda)$$

$$+ \left\{ \sum_{k=1}^N \frac{v_k \lambda_k c_i^{(2)}}{2S_{k-1} S_k} + \frac{v_i \lambda_i c_i \Lambda_N}{S_{i-1} S_i^2} + \sum_{k=i+1}^N \left(\frac{v_k \lambda_k c_i \Lambda_N}{S_{k-1}^2 S_{kj}} + \frac{v_k \lambda_k c_i \Lambda_N}{S_{k-1} S_k^2} \right) \right\}$$

을 만족하는 전환 이전과 이후의 최적도착률 벡터는 각각 $\underline{\lambda}^+ = (0.3754, 0.1110)$ and $\underline{\lambda}^{\square} = (0.3718, 0.1517)$ 이 되며, 결국 우선순위 1인 사용자의 전체비용과 가격은 증가한다. 따라서 우선순위 1인 사용자는 전환 이후에 순가치는 감소하게 되며, 이 전환에 반대를 표시할 것이다.

이 문제를 해결하기 위한 방법은 다른 연구(Kim, Lee, and Lm 2008)에서 찾아 볼 수 있지만, 이 연구는 실사 사용시간에 2차 형태로 증가하는 가격체계가 현실에서 찾아 볼 수 없다는 데 주안점을 둔다.

4. Incentive-compatible 가격시스템이 꼭 필요할까?

(MW90)에 의하면, 우선순위 i 인 사용자의 평균 가장 핵심적인 사항은 서비스 시간이 다른 사용자가 시스템에 있을 경우, incentive-incompatible 한 경우가 발생하기 때문에 사용시간 t 에 관한 2 차 형태의 가격시스템이 필요하다고 한다. 그러나 현실에서는 사용시간에 대한 1 차 형태의 가격시스템이 훨씬 더 흔하게 보인다. 이 연구는 다음과 같이 여러 매개변수에서 관찰된 추측을 제시하며, 현실성을 검토한다.

추측 1: 사용자에 대한 평균 서비스 시간이 차이가 나더라도 incentive-compatible 한 영역이 있으며, 이때는 (MW90)가 제시한 사용시간 t 에 관한 2 차 형태의 가격시스템 대신 증가제를 사용해도 좋다.

추측 2: 사용자에 대한 평균 서비스 시간이 차이가 크면 클수록, 인센티브 문제로 다른 사용자 계층으로 전환할 가능성이 높아진다. 따라서 이 경우에는 (MW90)가 제시한대로, 사용시간 t 에 관한 2 차 형태의 가격시스템을 도입해야 한다.

그렇다면 현실에서 사용시간 t 에 관한 2 차 형태의 가격시스템이 없는 이유를 어떻게 설명할 수 있을까? 인터넷 망을 정의하는 TCP/IP 계층(또는 그 하부네트워크 계층까지라도)은 큰 크기의 파일을 전송할 때, 패킷 전송을 우선으로 한다. 패킷의

크기는 초기나 말기의 몇 개를 제외하고는 데이터 전송을 위한 패킷 내부의 데이터 영역을 완전히 채워서(fully populated) 전송하게 된다. 그렇다면, 패킷 하나 당의 전송시간은 어떤 응용프로그램을 사용하든지 점근적으로(asymptotically) 하나의 가치에 접근하게 된다. 한편 정산을 쉽게 하기 위해서, 네트워크 사업자는 대부분 패킷 당 전송에 따른 요금을 부과하길 원하며, 사용자도 마찬가지로 보다 간단한 요금구조를 원한다. 따라서 현실에서는 응용프로그램의 하부 네트워크 계층에서 발생하는 패킷 전송 서비스 처리 시간은 같은 분포를 가지며, 이는 바로 (MW90)가 제시했던 사용시간 t 에 영향을 받지 않는 종가제를 의미한다. 하지만, 언제 어떤 조건 밑에서 종가제로 전환되어야 할지에 대해서 좀더 깊이 있는 연구가 필요하다고 할 수 있다.

References

- [1] Balachandran, K. and Radhakrishnan, S. (1994). "Extensions to class dominance characteristics," *Management Science* 40, 10, 353-360.
- [2] Cocchi, R., Estrin, D., Shenker, S., and Zhang, L. (1993). "Pricing in computer networks: Motivation, formulation, and example," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1, 6, 614-629.
- [3] Dovrolis, C. and Ramanathan, P. (1999). "A Case for Relative Differentiated Services and the Proportional Differentiation Model," *IEEE Network* 13, 5, 26-34.
- [4] Edell, R. and Varaiya, P. (1999). "Providing Internet Access: What We Learn from INDEX," *IEEE Network* 13, 5, 18-25.
- [5] Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- [6] Hahn R. and Wallsten S. (2006). "The Economics of Net Neutrality," <http://www.bepress.com/ev/vol3/iss6/art8/>
- [7] Kim Y. and Mannino, M. (2003). "Optimal incentive-compatible pricing for M/G/1 Queues," *Operations Research Letters* 31, 6.
- [8] Kim, Y., S. Lee, and J. Lim, "A genetic-algorithm for managing network better," *unpublished working paper*, 2008.
- [9] Kleinrock, L. (1976). *Queueing Systems, Vol. II: Computer Applications*, John Wiley & Sons, Inc.
- [10] Kwak, JH., "On network neutrality issues in the US," <http://www.kisdi.re.kr/imagdata/pdf/10/1020061003.pdf>
- [11] Laxton, Jr. W., "The End of Net Neutrality," www.law.duke.edu/journals/dltr/articles/2006dltr0015.html
- [11] Mendelson, H. and Whang, S. (1990). "Optimal Incentive-compatible Priority Pricing for the M/M/1 Queue," *Operations Research* 38, 5
- [12] Mitrani I. (1998). *Probabilistic Modelling*, Cambridge University Press,
- [13] Naor, P. (1969). "The Regulation of Queueing Size by Levying Tolls," *Econometrica* 37, 1.
- [14] Pigou, P. (1920). *The Economics of Welfare*, Macmillan, First Edition, Lo