

슈타켈버그 모델을 이용한 적응적 네트워크 가격 결정 기법에 대한 연구

(Adaptive Network Pricing Scheme based on the Stackelberg Model)

정 우 석 [†] 김 승 욱 ^{**}
(Woosuk Jung) (Sungwook Kim)

요 약 무선 네트워크상에서 자원의 단위가격을 결정하는 문제는 매우 중요한 문제이다. 기존의 기법들은 네트워크 운영자 중심 혹은 사용자 중심의 방법들이었기 때문에 최근에는 운영자와 사용자 모두를 만족시킬 수 있는 새로운 기법이 요구되었다. 본 논문에서는 네트워크에서 제공하는 대역폭을 사용하여 정보를 전송하는 유저들이 얻는 이익과 네트워크 운영자가 얻는 이익을 포함한 사회 전체적인 이익인 사회적 편익(social welfare)을 최대화 할 수 있는 적응적 가격 결정 기법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 게임이론의 일종인 슈타켈버그 게임과 수요-효율 그래프를 사용하여 현재 네트워크 상황에 적합한 최적 가격을 결정하도록 설계하였고, 성능분석을 통해 제안된 기법이 기존의 가격결정 기법에 비해 우수한 성능을 가지는 것을 확인하였다.

키워드 : 무선 네트워크, 가격결정, 자원할당, 슈타켈버그 게임

Abstract In this paper, we formalize a new adaptive online price control scheme based on the Stackelberg game model. By using the hierarchical interaction strategy, control decisions in each mechanism act cooperatively and collaborate with each other to satisfy conflicting performance criteria. In addition, our dynamic online approach is practical for real network implementation. With a simulation study, the proposed scheme can adaptively adjust the network price to approximate an optimized solution under widely diverse network situations.

Key words : Wireless network, pricing, resource allocation, Stackelberg game

1. 서 론

현재 노트북 컴퓨터를 비롯한 휴대용 통신 장비들의 보급이 생활화 되면서 어디에서나 인터넷과 같은 네트워크에 접속할 수 있는 환경이 요구되고 있으며, 그에 따라서 무선 네트워크의 유지 및 관리 기법에 대한 관심도 빠르게 증가하고 있는 상황이다. 이를 위해 무선

네트워크에서의 대역폭 할당 문제, 전송 파워의 컨트롤 문제, 또는 네트워크상에서의 서비스 가격 결정 문제 등 무선 네트워크의 관리 기법에 대한 연구가 각 분야에서 활발히 진행되어 오고 있다[1,2]. 특히 가격 결정 문제는 네트워크가 공급자와 소비자가 존재하는 하나의 시장이라는 점에서 볼 때 매우 중요한 문제라고 할 수 있다.

네트워크 내에 존재하는 의사결정자는 크게 시스템 운영자와 시스템을 사용하는 사용자들로 나눌 수 있다 [1-3]. 네트워크 운영자는 그 역할에 따라 정부나 공공기관의 경우처럼 사회 전체적인 이익을 높이기 위해서 네트워크를 운영하는 경우와, 개인 사업체와 같이 자신의 이익을 추구하고 자신에게 돌아오는 이익이 극대화될 수 있도록 네트워크를 운영하는 경우의 두 가지로 나눌 수 있다[4]. 이 논문에서 다루고자 하는 것은 네트워크 운영자가 기본적으로 이기적이지만 동시에 사회적 편익(social welfare)도 어느 정도 고려하는 경우이다. 여기서 사회적 편익이라는 것은 네트워크에서 제공하는 대역

[†] 비 회 원 : 서강대학교 컴퓨터공학과
jws8042@naver.com

^{**} 종 신 회 원 : 서강대학교 컴퓨터공학과 교수
swkim01@sogang.ac.kr
논문접수 : 2009년 9월 15일
심사완료 : 2010년 2월 1일

Copyright©2010 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지 : 정보통신 제37권 제2호(2010.4)

폭을 사용하여 정보를 전송하는 유저들이 얻는 이익과 네트워크 운영자가 얻는 이익을 포함한 사회 전체적인 이익을 의미한다[4]. 이때 사용자들 또한 이기적인 성격을 가지며 각자 자신의 이익을 극대화시키길 원한다.

본 논문에서 핵심적으로 다루고 있는 이론이 게임이론(game theory)[5]이다. 특히, 여러 유형의 게임이론 중에서도 슈타켈버그 모형[5]은 네트워크 운영자와 사용자의 입장을 동시에 고려할 수 있다는 장점이 있기에 가격 결정 모델에 매우 유용하게 적용될 수 있다. 슈타켈버그 모형이란 게임의 상황에서 한 참가자가 다른 참가자들에 비해 더 많은 정보를 가지고 있는 게임을 말하며 그 참가자는 자신이 가지고 있는 우월한 정보를 바탕으로 게임에서 리더의 입장이 된다. 네트워크의 상황에서 네트워크 운영자는 사용자들에 비해 더 많은 정보를 가지며 가격에 대한 최종결정권을 가지기 때문에 슈타켈버그 모형에서의 리더와 같은 역할을 수행하게 된다[1,4,5].

본 논문에서 제시하고 있는 기법의 특징은 슈타켈버그 게임을 이용해 사용자와 네트워크 운영자의 입장을 함께 고려한 가격 정책을 제시한다는 점이다. 또한 기존의 네트워크 운영자가 자신의 이익만을 우선적으로 고려하는 것과는 달리, 본 논문에서의 네트워크 운영자는 자신의 이익을 고려하는 동시에 자기 이익을 크게 저하시키지 않는 범위 내에서 사회 전체적 편익도 고려하여 가격을 결정하도록 하였다.

2. 제안 기법

게임이론의 여러 형태 중에서 슈타켈버그 모형은 어느 한 참가자가 다른 참가자들보다 많은 정보를 가진 리더(leader)가 되어 자신의 전략에 대한 상대의 반응을 예측하여 먼저 의사결정을 내리는 게임이다. 그러면 나머지 참가자들은 리더가 내린 결정을 보고 그 상황에서 자신에게 가장 이익이 되는 행동을 취한다. 이들을 리더에 대해 추종자(follower)라고 부른다. 추종자는 리더의 결정을 보고 그에 대해 자신에게 최대의 이익이 돌아오게끔 결정을 내린다. 따라서 리더는 자신의 선택에 대한 추종자의 반응을 미리 계산에 넣고 자신의 최적전략을 결정하고, 추종자는 리더의 전략을 관찰한 후 그에 대한 자신의 최적전략을 선택한다[1,4,5].

슈타켈버그 모형을 적용했을 때 더 많은 정보를 가진 네트워크 운영자는 리더의 입장에, 그렇지 않은 사용자들은 추종자의 입장에 각각 대응시킬 수 있다. 네트워크 운영자는 리더로서 대역폭의 단위가격을 결정하여 사용자들에게 자신이 결정한 가격을 알려준다. 그리고 사용자들은 추종자로서 네트워크 운영자가 전파한 단위가격을 보고 그에 따라 자신의 이익을 극대화시킬 수 있는

양의 대역폭을 요구하게 된다. 이 과정에서 운영자는 사용자들이 단위가격에 따라 얼마의 대역폭을 요구할 것인지 미리 알고 있으며, 예상되는 사용자들의 대역폭 요구량을 고려하여 자신에게 최대의 이익이 되는, 혹은 사회적 편익이 최대화되는 단위가격을 설정하게 된다. 본 논문에서 주어진 슈타켈버그 게임은 네트워크 운영자의 문제를 상위문제로 가지고 사용자의 문제를 하위문제로 가지는 바이레벨 문제가 된다[4]. 이 바이레벨 문제를 해결하여 사용자와 네트워크 운영자가 모두 만족할만한 단위가격을 결정하는 것이 본 논문의 목표이다.

2.1 하위문제

사용자의 문제는 유틸리티 함수를 정의한 후 자신의 유틸리티를 극대화할 수 있는 대역폭 요구량을 결정하는 것이다. 즉, 다음에 주어진 문제를 극대화하는 사용자 i 의 대역폭 요구량 x_i 를 결정하는 것이 목표이다 [1,2,6]:

$$\max U_i^{net} = \max(U_i - x_i \times p_i) \quad (1)$$

사용자 i 의 대역폭 요구량 x_i 와 네트워크에 의해 주어진 가격 p_i 에 대한 유틸리티 u_i 는 다음과 같다[2,7]:

$$u_i(x_i) = w_i \times \log x_i \quad (2)$$

이때 w_i 는 사용자 i 가 네트워크에 지불하고자 하는 금액 또는 대역폭에 대한 민감도를 의미한다[2,6,8]. 식 (1)의 전체 이익에서 네트워크에 지불해야 하는 비용을 제외한 순이익은 다음과 같다:

$$U_i^{net}(x_i) = w_i \times \log x_i - x_i \times p_i \quad (3)$$

따라서 사용자 i 의 목표는 네트워크에 의해 자신에게 주어진 가격 p_i 에 대해 식 (3)의 식을 극대화하는 대역폭 요구량을 결정하는 것이다[2,6,8].

$$\max U_i^{net}(x_i) = \max(w_i \times \log x_i - x_i \times p_i) \quad (4)$$

$$s.t. \ x_i \times p_i \leq b_i$$

이때 식 (4)의 식에서 b_i 는 사용자 i 가 지불할 수 있는 총예산을 의미한다[2].

사용자의 대역폭에 대한 수요는 단위가격 p 에 영향을 받는다. w_i 가 사용자 i 가 네트워크에 지불하고자 하는 금액이므로, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$w_i = p \times x_i \quad (5)$$

따라서 사용자 i 의 대역폭 요구량은 다음과 같다[2]:

$$x_i = \frac{w_i}{p} \quad (6)$$

식 (6)에 의해, 모든 사용자들의 네트워크에 대한 총 대역폭 요구량을 알 수 있다[2]:

$$\sum_{i=1}^n x_i = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{p} \quad (7)$$

2.2 상위문제

상위 문제는 다시 사회적 편익 최대화와 네트워크 이윤 극대화의 두 가지 문제로 나누어진다. 네트워크 운영자의 2가지 목적함수 중에서 먼저 사회적 편익 극대화 문제를 고려하기로 한다. 사회적 편익이 극대화되는 가격은 수요곡선과 효율곡선이 만나는 지점에서 결정된다[4]. 먼저 사회적 편익을 최대화하는 가격을 결정하기 위해 본 논문에서는 수요-효율 그래프를 다룬다[4,5]. 수요-효율 그래프는 경제학에서 사용하는 수요-공급 그래프의 개념과 거의 유사하다. 두 곡선이 교차하는 지점에서 사회적 편익이 최대가 된다.

수요-효율 그래프에서는 수요-공급 그래프의 공급곡선 대신에 효율곡선[4]을 사용한다. 수요-공급 그래프와의 차이점으로 수요-효율 그래프에서 세로축은 소비자가 부담하게 되는 비용(cost)을 말하며, 이는 가격, 지연 시간, 안정성 등 다양한 것이 될 수 있다. 기본적인 형태는 수요-공급 그래프의 형태와 유사하지만 수요-효율 그래프가 이보다 좀 더 확장된 개념이라고 할 수 있다.

사용자들의 대역폭 요구량이 네트워크 용량을 넘어서게 되면 혼잡이 초래되고 이에 따라 자중손실[4]이라고 부르는 추가 비용이 발생하게 된다. 따라서 네트워크 운영자는 혼잡 제어를 위하여 총 대역폭 공급량이 자신의 용량 한계를 넘어서지 않도록 가격을 통해 조절한다. 즉, 대역폭 총 공급량이 증가할수록 네트워크 운영자는 단위가격을 올려 사용자들의 대역폭 요구량을 감소시킨다. 따라서 수요곡선은 가격에 반비례하므로 우하향하는 형태를 띠게 되며, 효율곡선은 총 공급량에 비례하여 우상향하는 형태를 띤다. 경제학적 관점에서는 수요곡선을 적분한 값이 총이윤이 되고, 이는 수요곡선의 아랫부분의 면적과 같다. 또한, 공급곡선을 적분한 값은 총비용이 되며 이는 공급곡선의 아랫부분의 면적과 같다. 따라서, 수요곡선과 공급곡선 사이의 면적이 총이윤에서 총비용을 뺀 값인 순이윤이 되며, 이 값이 최대가 될 때 사회적 편익이 최대가 된다고 할 수 있다. 경제학에서의 수요-공급 그래프와 마찬가지로[4], 수요-효율 그래프에서 사회적 편익이 최대가 되는 지점은 수요곡선(D^{-1})과 효율곡선(pf) 사이의 면적(A)이 최대가 되는 부분이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다:

$$\operatorname{argmax} \int_0^x D^{-1}(y)dy - \int_0^x P(x)dx \quad (8)$$

네트워크 운영자는 용량을 넘지 않는 선에서 균형점을 발생시킬 수 있도록 가격을 통해 효율곡선의 기울기를 조정한다.

네트워크 운영자의 두 가지 목표 중 다른 하나인 네트워크 이익 최대화를 고려하면, 네트워크 운영자의 순이윤은 총이윤(단위가격 × 총 대역폭 할당량)에서 총비

용(효율곡선의 아래 부분 면적)을 뺀 값이다[4]. 이를 위해 다음 식을 만족하는 p 값을 찾는다:

$$\operatorname{argmax} p \times x - \int_0^x P(x)dx \quad (9)$$

이때 주의해야 할 점은 네트워크 운영자가 가격을 조절할 때마다 사용자들의 수요함수가 바뀔 수 있다는 점이다. 따라서 식 (9)의 식에 의해 새로운 가격 p 를 찾았을 때의 수요곡선의 모양은 사회적 편익이 최대가 될 때의 곡선의 모양과 다를 수 있다.

따라서 네트워크 운영자에 의해 가격이 바뀔 때마다 그에 따라 변경된 수요함수를 반영하여 단위가격을 계산하여야 한다.

그림 1과 같이, 식 (8)과 (9)를 통해 사회적 편익이 최대화되는 단위가격 p_1 과 네트워크 이윤이 극대화되는 단위가격 p_2 를 각각 찾았으면, 이제 두 값 사이에서 적절한 균형점인 p^* 값을 찾는다.

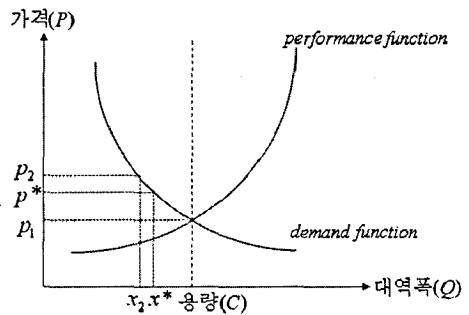


그림 1 네트워크 균형 가격(p^*)

사회적 편익이 최대화되는 가격인 p_1 과 네트워크 이익이 최대화되는 가격인 p_2 에서의 네트워크 이윤을 나타내는 식은 각각 아래와 같다:

a) 사회적 편익이 최대화되는 가격에서의 네트워크 이윤

$$p_1 \times C - \int_0^C P(x)dx \quad (10)$$

b) 네트워크 이익이 최대화되는 가격에서의 네트워크 이윤

$$p_2 \times x_2 - \int_0^{x_2} P(x)dx \quad (11)$$

본 논문에서는 네트워크 운영자의 두 가지 목적을 함께 고려하여 적절한 가격을 결정하는 문제를 해결하기 위해 가중치법(weighted sum method)을 사용한다. 목적함수가 두 개이므로 이를 각각 H_1 , H_2 라 하면 가중치법은 다음 식으로 나타낼 수 있다:

$$\min \alpha \times H_1(x) + (1 - \alpha) \times H_2(x) \quad (12)$$

이때 식 (12)의 식에서 α 는 가중치를 뜻하고 x 는 각 목적함수의 최적 해를 뜻한다. 본 논문에서는 네트워크

의 경제적 상황에 따라 각기 다른 가중치를 부여하는 방법을 고려한다.

i) case 1: 네트워크 운영자의 목표가 보다 많은 이익을 추구하는 것이거나 현재 네트워크의 경제적 상황이 불만족스러운 경우 네트워크의 이익 극대화에 더 큰 가중치를 부여한다.

ii) case 2: 네트워크 운영자가 돈을 버는 것에 큰 관심이 없거나 현재 경제적 상황이 만족스러운 경우 사회적 편익 최대화에 더 큰 가중치를 부여한다.

따라서 현재 처한 네트워크의 상황에 따라 가중치를 조절해가면서 그때의 목표에 가장 적합한 단위가격을 선택한다. 두 목적함수 사이에서 다음과 같은 방법으로 적절한 중간값을 선택한다. 가중치법을 사용하여 p_1 (사회적 편익을 최대화하는 단위가격)과 p_2 (네트워크 이윤을 극대화하는 단위가격) 사이의 단위가격 값들인 m_1, m_2, \dots, m_n 을 구할 수 있다.

우선 어떤 경우이든 단위가격은 네트워크 이익(NR)만을 고려하거나 사회적 편익(SW)만을 고려하지 않는다고 가정한다. 즉, SW에서의 가격 p_1 이나 NR에서의 가격 p_2 는 최종가격으로 선택되지 않는다. 또한 현재 네트워크의 경제적 상황에 따라 목적함수에 부여하는 가중치가 달라진다.

네트워크 운영자는 단위가격을 결정하기에 앞서 자신의 현재 경제적 상황을 점검한다. 즉, 만약 n 번째 사이클에서의 단위가격을 결정하려고 한다면 먼저 $n-1$ 번째 사이클까지의 자신의 총수익을 계산한다. 본 시스템에서 설정한 네트워크 운영자의 만족값이 네트워크가 자신의 이익만을 고려했을 때 최대로 벌어들일 수 있었던 수익의 δ 배($0 \leq \delta \leq 1$) 이상이라고 하고, 네트워크의 이윤이 α 수치 사이에서 유지된다면 네트워크 운영자는 n 번째 가격 결정에서 NR에 부여된 가중치를 임의의 작은 값 $\Delta\theta$ 만큼 낮추고, SW에 부여된 가중치는 $\Delta\theta$ 만큼 올려서 사회적 편익에 대한 가중치를 높인다. 만약 네트워크의 이윤이 δ 배미만으로 내려갔을 경우 네트워크는 보다 많은 이익을 내기 위해 NR에 부여된 가중치를 다시 $\Delta\theta$ 만큼 올리고, SW에 부여된 가중치를 $\Delta\theta$ 만큼 내려서 자신의 수익률을 높인다. 결국 본 다목적 최적화 문제에서 가중치 α 는 다음 계산에 따라 결정된다:

$$\frac{R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1}}{R_1^* + R_2^* + \dots + R_{n-1}^*} < \delta, \text{ then } \alpha = \alpha + \Delta\theta \quad (13)$$

$$\text{otherwise, } \alpha = \alpha - \Delta\theta$$

R_i 는 i 번째 시행 시 실제로 얻는 이윤값, R_i^* 는 i 번째 시행 시 얻을 수 있는 네트워크의 최대 이윤값을 나타낸다. 각 단계 시행한 값을 모두 더해서 서로 비교하

여 그 비율이 용인할 수 있는 값이면 사회적 편익을 우선시하고, 용인할 수 있는 값을 벗어나면 네트워크 이윤을 우선시하여 다음 단계를 수행한다.

3. 실험 결과 및 분석

본 시뮬레이션 모델에서 가정하고 있는 사항들은 다음과 같다.

- 본 시뮬레이션의 네트워크 환경은 하나의 셀을 가지는 CDMA 시스템이다.
- 네트워크 시스템 안에서 하나의 링크 대역폭을 공유하는 사용자의 수를 최초 5명에서 시작하여 50명까지 5명씩 늘려가면서 실험을 반복한다.
- 본 네트워크상에서 사용자들에게 할당할 수 있는 대역폭 총 용량은 10Mbps라고 가정한다.
- 임의의 가중치 변동값 $\Delta\theta$ 는 0.1로 가정한다.
- 계산의 편의를 위하여 본 네트워크상의 사용자들의 지불용의 금액 w 는 1000으로 모두 같다고 가정한다.

본 논문의 가격 결정 기법과 비교할 기법들은 각각 PPNU 기법[1]과 ICA 기법[2]이다. 그림 2에서 본 논문에서 제안하고 있는 기법이 두 비교 기법과 비교하여 일정 간격 이내의 이익을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 ICA 기법과 비교하였을 때는 후반으로 갈수록 그 차이가 줄어드는 모습을 보인다. 이는 매회 가격 결정 때마다 현재의 네트워크 상황을 체크하여 미리 설정해 놓은 목표치 아래로 이익이 떨어지지 않도록 가중치를 조절해주고 있기 때문이다.

그림 3에서는 각 기법에서의 사용자 이윤을 비교하고 있다. 그래프에서 나타나듯이 사용자 이익의 측면에서 제안된 기법과 비교 기법들과의 차이가 확연히 드러남을 확인할 수 있다.

그림 4에서는 세 논문에서 각각 제시하고 있는 기법

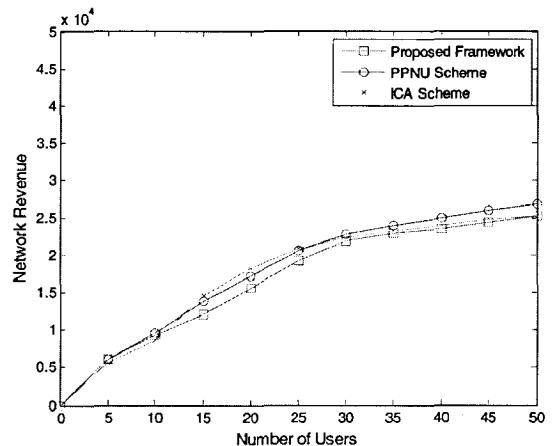


그림 2 사용자 수의 증가에 따른 네트워크 이익의 변화

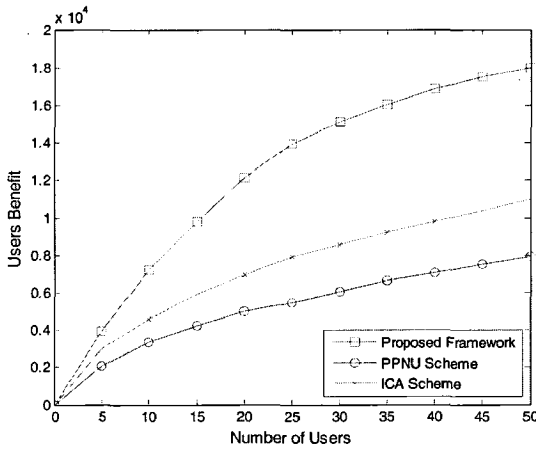


그림 3 사용자 수의 증가에 따른 총 사용자 이익의 변화

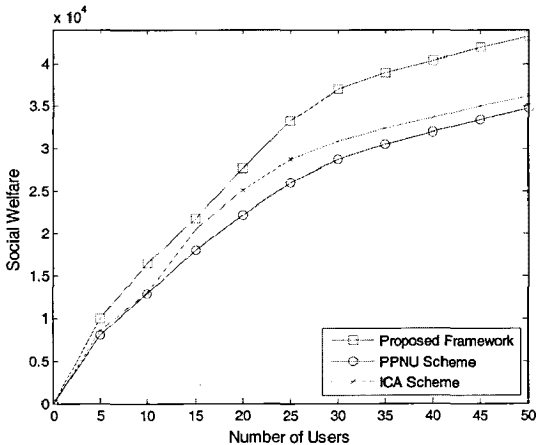


그림 4 유저 수의 증가에 따른 사회적 편익의 변화

을 통해 계산된 가격에서의 사회적 편익을 비교 분석하였다. 사회적 편익은 네트워크 상에서 발생하는 이익의 총량을 의미한다. 본 논문에서 가장 중점적으로 향상시키고자 했던 것이 사회적 편익으로, 그림 4의 결과에서 보듯이 PPNU 기법과 ICA 기법과의 비교에서는 본 논문에서의 기법이 확연히 우월함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 슈타켈버그 게임과 수요-효율 그래프를 이용하여 사용자와 네트워크의 이익을 함께 고려한 가격 및 자원 할당 모델을 제안하였다. 성능평가를 통해 기준에 발표되었던 가격 결정 기법들인 PPNU 기법[1]과 ICA 기법[2]을 적용한 것보다 사회적 편익이 눈에 띄게 향상됨을 알 수 있었다. 특히 네트워크의 입장에 매우 유리한 PPNU 기법에 비하면 월등한 차이를 보이며 ICA 기법과 비교해도 확연히 뛰어난 성능을 보였다.

또한 두 목적함수 사이에서 네트워크의 상황과 목표를 고려하여 가중치를 어떻게 부여하느냐에 따라 유저의 입장 또는 네트워크 운영자의 입장을 목적에 알맞게 반영할 수 있으므로 실생활에서 요구될 수 있는 여러 가지 상황에 맞게 탄력적으로 운영할 수 있는 기법이라고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Nan Feng, Siun-Chuon Mau, and Narayan B. Mandayam, "Pricing and Power Control for Joint Network-Centric and User-Centric Radio Resource Management", *IEEE Transaction on Communications*, vol.53, no.7, pp.1114-1118, 2005.
- [2] Xin Wang, Henning Schulzrinne, "Incentive-Compatible Adaptation of Internet Real-Time Multimedia," *IEEE JSAC*, vol.23, no.2, pp.417-436, 2005.
- [3] Mark Felegyhazi and Jean-Pierre Hubaux, "Game Theory in Wireless Networks: A Tutorial," *EPFL Technicreport*, LCA-REPORT-2006-002, 2006.
- [4] Kan-Boeong Kim, "Development of confusion toll based on Stackelberg Game," Seoul National university, KIISE Korea Computer Congress vol.27, no.4 2004.
- [5] Dong-kn Han, *Game Theory*, Keongmunsa, 1997.
- [6] Frank Kelly, "Charging and Rate Control for Elastic Traffic," *European Transactions on Telecommunications*, vol.8, pp.33-37, 1997.
- [7] Yuan Xue, Baochun Li and Klara Nahrstedt, "Price-based Resource Allocation in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.5, no.4, pp.347-364, 2003.
- [8] F. Kelly, A. Maulloo, and D. Tan, "Rate Control in Communication Networks: Shadow Prices, Proportional Fairness and Stability," *Journal of the Operational Research Society*, no.49, pp.237-252, 1998.



정우석

2007년 8월 서강대학교 컴퓨터공학과 졸업. 2009년 8월 서강대학교 컴퓨터공학과 대학원 졸업. 관심분야는 무선 네트워크, 게임이론, 네트워크 가격정책, 무선 네트워크 자원관리



김승욱

2004년 12월 Syracuse University, computer science 박사. 2005년 중앙대학교 컴퓨터공학부 전임강사. 2006년~2009년 서강대학교 컴퓨터공학과 조교수. 2010년~현재 서강대학교 컴퓨터공학과 부교수. 관심분야는 QoS, 실시간 제어처리, 셀룰러 네트워크 자원관리