

협력 게임 이론을 이용한 대역폭 할당 기법의 성능 비교

박재성[†] · 임유진^{††}

요약

게임 이론은 다수의 사용자에게 공유 자원을 효율적이고 공정하게 분배할 수 있는 이론적 기반을 제공하므로 이를 대역폭 할당에 이용하려는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 게임 이론에 의한 대역폭 할당 기법들은 적용한 게임 기법들에 따라 동일 조건에서 할당하는 대역폭이 달라진다. 그러나 현재까지 네트워크 분야에서는 게임 이론의 수학적 근거만을 차용하고 있으며 이들이 대역폭 할당 문제에 적용될 때 각 기법 별 특성에 대한 정량적 비교 분석은 이루어지고 있지 않다. 이에 따라 본 논문에서는 다수의 노드가 대역폭을 공유하는 경우 파산(Bankruptcy) 게임 이론과 협상(Bargaining) 게임 이론을 이용하여 통신 노드의 입력율에 따른 각 노드 별 대역폭 할당 기법들의 특성을 비교 분석하고 이에 따른 향후 연구 방향을 제시한다.

키워드 : 대역폭 할당, 파산 게임 이론, 협상 게임 이론

Performance Comparison among Bandwidth Allocation Schemes using Cooperative Game Theory

Park Jaesung[†] · Lim Yujin^{††}

ABSTRACT

Since the game theory provides a theoretical ground to distribute a shared resource between demanding users in a fair and efficient manner, it has been used for the bandwidth allocation problem in a network. However, the bandwidth allocation schemes with different game theory assign different amount of bandwidth in the same operational environments. However, only the mathematical framework is adopted when a bandwidth allocation scheme is devised without quantitatively comparing the results when they applied to the bandwidth allocation problem. Thus, in this paper, we compare the characteristics of the bandwidth allocation schemes using the bankrupt game theory and the bargaining game theory when they applied to the situation where nodes are competing for the bandwidth in a network. Based on the numerical results, we suggest the future research direction.

Keywords : Bandwidth Allocation, Bankruptcy Game Theory, Bargaining Game Theory

1. 서론

한정된 자원을 다수의 사용자에게 공정하고 효율적으로 분배하는 문제는 경제학 분야의 오래된 문제이며 협력 게임 이론은 이와 같은 문제를 해결함에 있어 공정성과 효율성을 보장하는 이론적 기반을 제공한다. 공유 자원 분배 문제는 네트워크 관점에서 다수의 노드 사이에 대역폭을 효율적이며 공정하게 할당하는 문제와 유사하기 때문에 최근 들어 게임 이론을 이용한 네트워크 대역폭 관리와 관련된 연구들

이 활발하게 진행 중이다.

이들 연구들은 협력 게임 이론 중 협상 게임 이론과 파산 게임 이론을 적용하여 다수의 노드에게 공유 대역폭을 할당하는 방법을 제안하고 있다[1]-[2]. 이들 기법들은 대역폭을 공유하는 다수의 노드 혹은 사용자의 대역폭 요구량에 따라 가능한 모든 대역폭 분배 결과 중에서 효율적이고 공정한 분배 결과를 찾는 것을 목적으로 한다. 그러나 각 게임 기법들이 정의하는 효율성과 공정성은 상이하기 때문에 동일 환경에서도 적용한 게임 기법에 따라 분배 결과는 달라질 수 있다. 그러나 현재까지는 특정 게임 이론을 대역폭 관리 기법에 적용하는 방법에 관한 연구만이 이루어지고 있으며 서로 다른 게임 이론을 동일 환경에서 대역폭 관리에 적용한 경우 분배 결과의 특성에 대한 정량적 비교는 이루어지고 있지 않다.

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0017251).

† 정 회 원 : 수원대학교 인터넷정보공학과 조교수

†† 정 회 원 : 수원대학교 정보미디어공학과 조교수(교신저자)

논문접수: 2010년 10월 6일

수정일: 1차 2011년 1월 28일, 2차 2011년 3월 25일

심사완료: 2011년 3월 25일

이에 따라 본 논문에서는 다양한 게임 기법을 대역폭 관리 문제에 적용할 경우 경합하는 노드의 대역폭 요구량에 따른 각 기법들의 대역폭 할당 특성을 비교 분석한다. 특히 본 논문에서는 파산 게임과 협상 게임을 적용한 대역폭 할당 기법들의 특성을 공정성 측면에서 정량적으로 비교 분석한다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 파산 게임과 협상 게임을 통한 대역폭 할당 기법들을 정의하고 3장에서는 수치적 분석을 통해 각 기법들의 특성을 분석한 후 4장에서 결론을 맺는다.

2. 협력 게임을 이용한 대역폭 할당 방안

2.1 파산 게임 이론을 통한 대역폭 할당 방법

파산 이론은 자원을 배정 받으려는 사용자들의 요구량의 합이 자원의 양보다 많은 경우 자원 분배 문제를 다루고 있으며 자원을 분배하는 방법에 따라 다양한 분배 규칙을 적용할 수 있으나 대역폭 할당에는 CEA (Constrained Equal Allocation) 기법과 [3] 탈무드 (Talmud) 기법이 [4] 주로 이용된다. n개의 노드가 대역폭 C를 공유하며 노드 i의 자원 요구량, 즉 트래픽 입력율이 di인 경우 CEA와 Talmud 기법에 의해 노드 i에 할당되는 대역폭 ci는 다음과 같이 결정된다.

• CEA 기법의 경우 노드 i에 할당되는 양은 di이하이며 모든 node는 최소한 동일한 최소 할당량을 보장 받는다. 즉,

$$c_i^{CEA} = \min\{c_i, x\} \tag{1}$$

이며 여기서 최소 할당량 x는 $\sum \min\{c_i, x\} = C$ 가 되도록 선정된다.

• Talmud 기법의 경우 자원 할당을 위해 di가 아닌 $\sum (d_i/2)$ 를 이용하여 전체 자원량 C와 비교하여 각 노드에게 d/2만큼의 자원을 할당한 후 나머지 자원은 각 노드의 손실량이 동일해지도록 할당한다. 즉,

$$c_i^{Talmud} = \begin{cases} \min\{c_i/2, y\} & \text{if } \sum_{i=1}^n (c_i/2) \geq C \\ c_i - \min\{c_i/2, z\} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

이며 파라미터 y, z는 각각 $\sum \min\{c_i/2, y\} = C$, $\sum [c_i - \min\{c_i/2, z\}] = C$ 에 의해 결정된다.

2.2 협상 이론을 통한 대역폭 할당 방법

협상 게임에서는 참여자들의 유용성을 선호 함수로 정량화하며 이로 인한 선호도는 분배 받은 자원의 양에 비례하여 증가한다. 협상 게임의 결과는 각 사용자들의 선호 함수

로 구성되는 목적 함수를 최적화함으로써 구해지며 목적 함수를 구성하는 방법에 따라 네쉬 협상 해 (NBS: Nash Bargaining Solution), Raiffa, modified-Thomson 기법들이 대표적으로 제안되었다. 그러나 노드의 패킷 손실율이나 처리율 (throughput) 최적화를 위한 대역폭 할당 문제에 있어서 이들은 유사한 성능은 보이지 때문에 [5] 본 논문에서는 NBS만을 비교 대상으로 선정하였다.

NBS는 전략적 협상 방법 혹은 공리적 방법으로 구할 수 있다[6]. 전략적 협상 방법은 일련의 협상 과정에 많은 시간이 소요되기 때문에 전략적 협상 방법을 실시간 자원 할당 기법에 적용하기에는 적합하지 않다. 반면에 공리적 방법은 참여자들 사이의 협상과정을 고려하지 않고 모든 참여자들이 수용 가능한 공정성 특징을 가지는 일단의 공리들에 의해 결정되는 해를 찾는 방법으로 대역폭 할당 문제에 주로 이용되고 있다. 참여자 i에 할당된 대역폭을 ci로 표기하고 이로 인한 선호 함수를 ui(ci)라고 표기하면 NBS에 의한 대역폭을 공유 노드들에게 할당되는 대역폭은 다음 식이 최대일 때의 (ci, ..., cn)으로 주어진다[6].

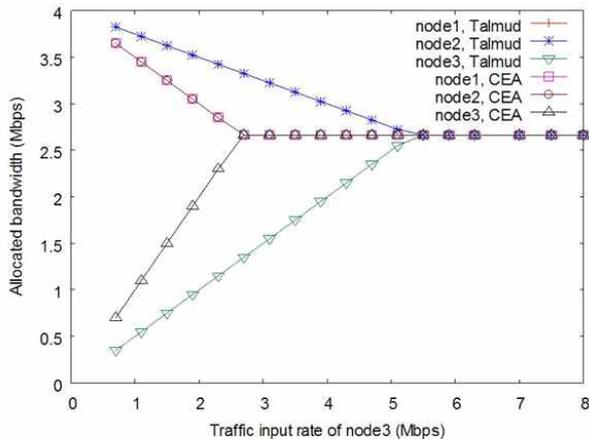
$$\prod_{i=1}^n (u_i) \tag{3}$$

대역폭 할당 문제에 있어 노드의 선호 함수로는 처리율 (ci/di)을 직접 이용하는 경우와 [2] 로그 함수를 이용한 $\log(1+c_i/d_i)$ 형태가 [7] 주로 이용되고 있기 때문에 본 논문에서는 이 둘을 모두 비교 대상으로 선정하였다.

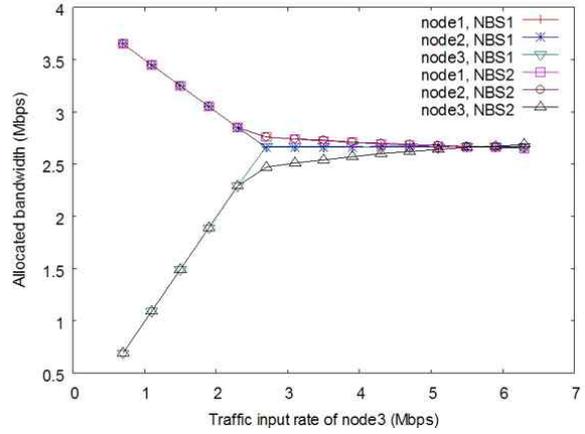
3. 수치적 분석을 통한 성능 평가

본 절에서는 수치적 분석을 통해 각 게임 이론 기법들이 공유 대역폭을 다수의 노드에게 할당할 때 이들을 공정성 측면에서 비교 분석한다. 실험을 위해 3개의 송신 노드가 대역폭이 8Mbps인 수신 노드에게 데이터를 전송하는 단일 홉 환경을 구성하였다. 입력 노드의 입력율이 대역폭 할당에 미치는 영향을 비교하기 위해 입력 node1과 node2의 입력율을 C의 70% (5.6Mbps) 혹은 20%(1.6Mbps)로 고정시킨 후 node3의 입력율을 0.7Mbps에서 7.0Mbps로 변화시키면서 각 기법들이 각 노드에게 할당하는 대역폭과 공정성 정도를 비교하였다. 각 기법별 공정성 특성을 정량적으로 비교하기 네트워크에서 주로 사용하는 공정성 척도인 다음과 같은 Jain's 공정성 색인 (FI: Fairness Index)를 이용하였다.

$$FI = \frac{(\sum_{i=1}^n c_i/d_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (c_i/d_i)^2} \tag{4}$$

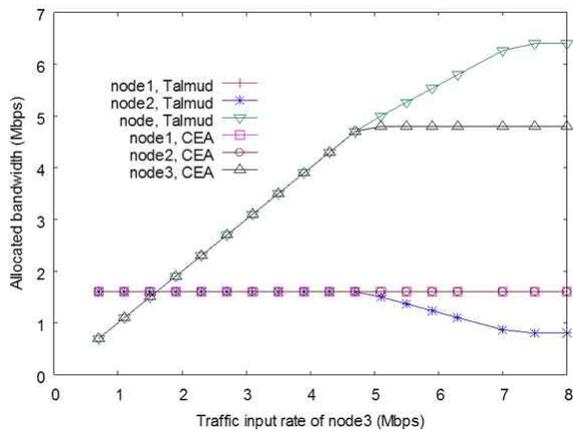


(a) Talmud, CEA

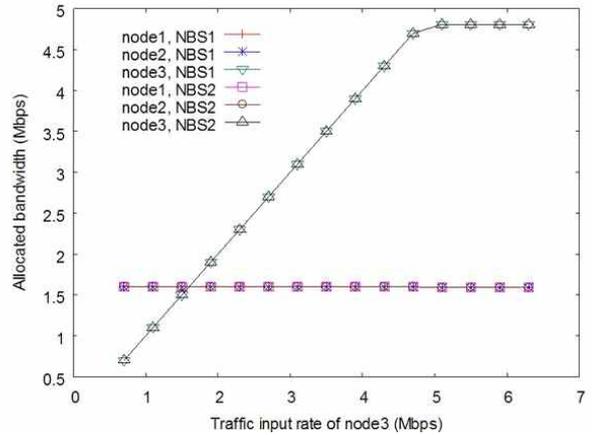


(b) NBS1, NBS2

(그림 1) 노드별 할당 대역폭 $(d_1, d_2) = (5.6\text{Mbps}, 5.6\text{Mbps})$

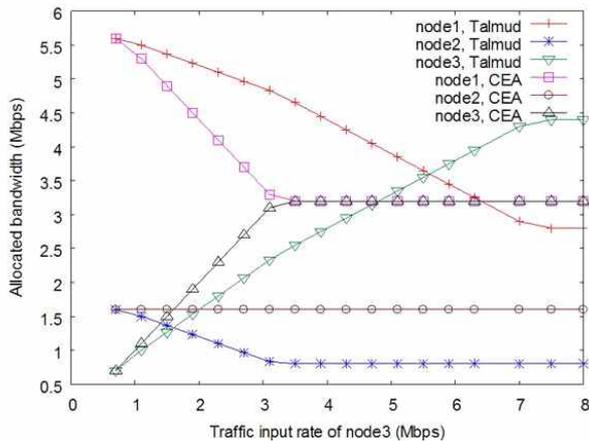


(a) Talmud, CEA

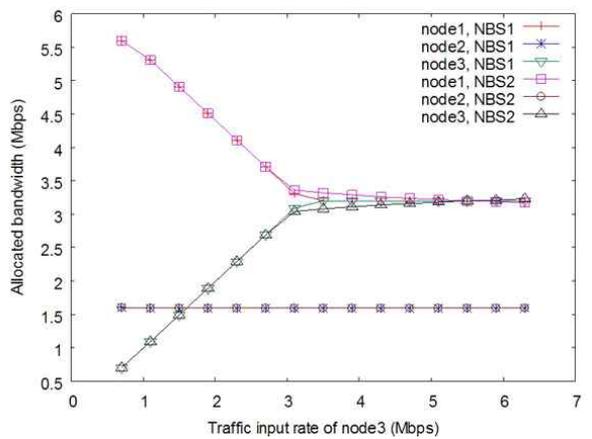


(b) NBS1, NBS2

(그림 2) 노드별 할당 대역폭 $(d_1, d_2) = (1.6\text{Mbps}, 1.6\text{Mbps})$



(a) Talmud, CEA



(b) NBS1, NBS2

(그림 3) 노드별 할당 대역폭 $(d_1, d_2) = (5.6\text{Mbps}, 1.6\text{Mbps})$

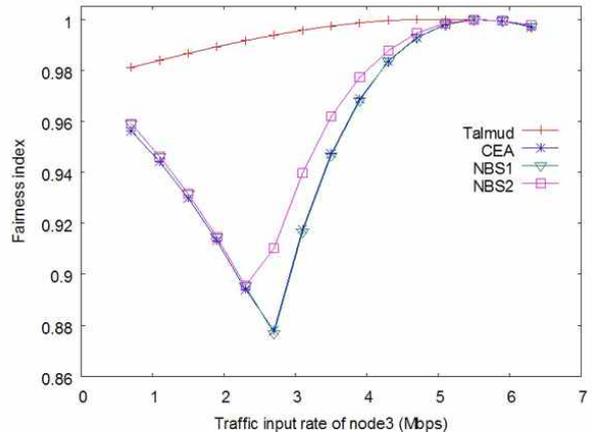
FI가 1에 가까울수록 해당 기법의 공정성이 크다는 것을 의미한다[8].

(그림 1~그림 3)에 각 기법에 의해 송신 노드에 할당되는 대역폭의 양을 도시하였으며 그림에서 NBS1은 선호 함수가 (c_i/d_i) 인 경우의 결과를 나타내며 NBS2는 선호 함수가 $\log(1+c_i/d_i)$ 인 경우의 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 경우에 대해 Talmud 기법 이외의 CEA, NBS1, NBS2는 거의 유사한 특성을 보였다. 또한 NBS의 경우 선호 함수를 선형적으로 선정한 경우와 로그함수로 선정한 경우 각 노드에게 할당되는 대역폭은 거의 차이가 없었다.

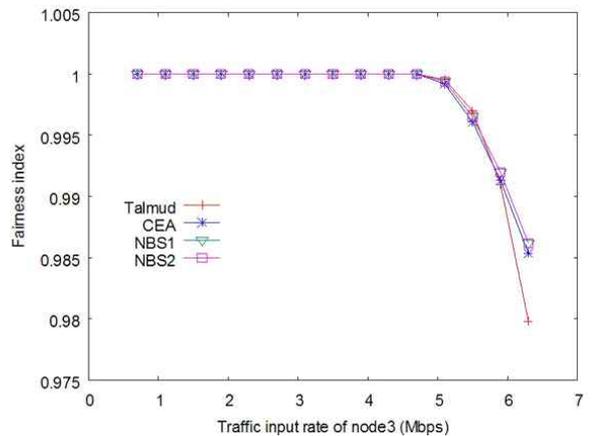
node1과 node2의 트래픽 입력율이 모두 높은 경우 (그림 1) 각 기법들은 대칭성 (symmetry) 특성에 의해 node3의 입력율과 무관하게 입력율이 같은 node1과 node2에게 동일한 양의 대역폭을 할당한다. 또한 d_3 이 일정량 이상 증가하면 모든 입력 노드에게 동일한 대역폭이 할당된다. 그러나 CEA, NBS1, NBS2의 경우 d_3 이 d_1, d_2 보다 작은 2.7Mbps 보다 클 때 node1, node2, node3은 전체 대역폭의 1/3을 균등하게 할당받는다. 반면에 Talmud 기법을 적용한 경우 node3의 입력율이 d_1, d_2 와 동일하게 5.6Mbps인 경우 입력 노드들이 전체 대역폭을 균등하게 할당 받으며 $d_3 < 5.6$ Mbps인 경우 입력율이 높은 node1과 node2에 보다 많은 대역폭이 할당된다. FI는 (c_i/d_i) 에 의해 결정되므로 (그림 4)에 보인 바와 같이 이 경우 $d_3 < 2.7$ Mbps일 때 CEA, NBS1, NBS2의 FI는 감소하며 $d_3 \geq 2.7$ Mbps일 경우 FI는 다시 증가한다. 그러나 node1과 node2의 트래픽 입력율이 모두 높은 경우 Talmud 규칙을 적용하는 경우 FI가 d_3 에 무관하게 1에 근접하여 노드들 사이에 가장 공정하게 대역폭을 할당한다는 것을 볼 수 있다.

node1과 node2의 트래픽 입력율이 낮고 수신 노드가 혼잡하지 않은 경우 ($d_3 < 4.8$ Mbps) 각 대역폭 할당 기법들은 각 노드의 트래픽 입력율 만큼 대역폭을 할당한다 (그림 2). 그러나 $d_3 > 4.8$ Mbps로 트래픽 입력율의 합이 $C=8$ Mbps를 초과하는 경우 CEA, NBS1, NBS2는 평형 상태로 수렴하여 node1, node2, node3에 할당되는 대역폭은 변하지 않는다. 그러나 Talmud 기법의 경우 $d_i/2$ 를 기준으로 대역폭을 할당하므로 d_3 값의 증가로 인해 입력율이 낮은 node1과 node2에 할당되는 대역폭은 $d_1/2=d_2/2=0.8$ Mbps가 될 때 까지 감소되고 이에 따른 여분의 대역폭이 node3에 할당되며 이후 d_3 가 증가해도 각 노드에게 할당되는 대역폭은 변하지 않는다. 이로 인해 (그림 5)에 보인 바와 같이 node1과 node2의 트래픽 입력율이 낮은 상태에서 d_3 값이 증가할수록 Talmud 기법의 FI는 타 기법들 보다 조금 작지만 0.97이상으로 거의 1에 가깝다.

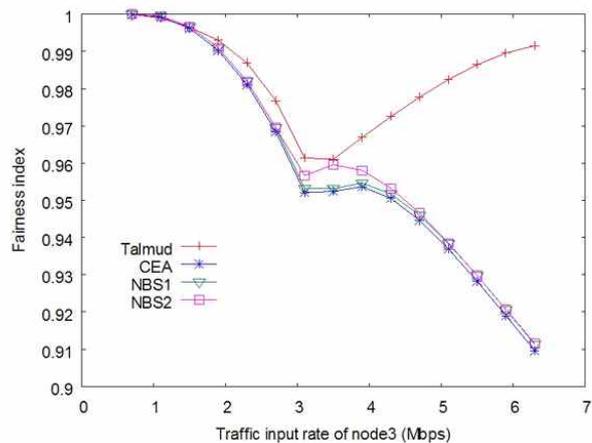
(그림 3)은 node1의 입력율이 5.6Mbps로 높고 node2의



(그림 4) Fairness index, $(d_1, d_2) = (5.6\text{Mbps}, 5.6\text{Mbps})$



(그림 5) Fairness index, $(d_1, d_2) = (1.6\text{Mbps}, 1.6\text{Mbps})$



(그림 6) Fairness index, $(d_1, d_2) = (5.6\text{Mbps}, 1.6\text{Mbps})$

입력율이 1.6Mbps로 낮은 경우 각 대역폭 할당 기법에 의해 송신 노드들에게 할당되는 대역폭을 d_3 을 변화시키면서 도시하였다. $d_3 \geq 0.8$ Mbps로 혼잡이 발생된 경우 CEA,

NBS1, NBS2는 입력율이 낮은 node2의 입력율 1.6Mbps를 보장한다. 또한 이들 기법들은 node2에 할당하고 남은 대역폭 6.4Mbps를 node1과 node2의 입력율에 비례하여 두 노드에게 할당하며 d_3 가 3.2Mbps 이상이 되면 평형상태로 수렴하여 node1과 node3에게는 남은 대역폭의 반인 3.2Mbps를 균등하게 할당한다. 반면 Talmud 기법의 경우 $0 \leq d_3 \leq 3.2$ Mbps인 경우 node2에 할당되는 대역폭은 d_2 에서 $d_2/2$ 로 선형적으로 감소되며 $d_3 > 3.2$ Mbps인 경우 node2에 할당되는 대역폭은 $d_2/2 = 0.8$ Mbps로 고정된다. 같은 구간에서 node3에 할당되는 대역폭은 타 기법들에 비해 느리게 증가되며 이는 이 구간에서 각 노드의 입력율이 아닌 노드의 입력율의 반을 이용한 균등한 대역폭 할당이 이루어지기 때문이다. Talmud 기법은 또한 $d_3 > 3.2$ Mbps인 경우 node2에는 $d_2/2$ 인 대역폭을 보장하지만 node1에 할당되는 대역폭은 $d_1/2 = 2.8$ Mbps이 될 때까지 계속 감소되며 그로 인한 여분의 대역폭이 node3에 할당되고 node1에 $d_1/2$ 의 대역폭이 할당된 이후 d_3 가 증가해도 각 노드에게 할당되는 대역폭은 변하지 않는다. 따라서 이 경우에도 (그림 6)에서 보는 바와 같이 FI는 Talmud 기법이 가장 높으며 특히 $d_3 > 3.5$ Mbps의 경우 타 기법들의 FI는 감소하는 반면 Talmud 기법의 FI는 증가한다.

4. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 과산 게임 이론과 협상 게임 이론을 이용한 대역폭 할당 기법들이 송신 노드들의 트래픽 입력율에 따라 대역폭을 할당하는 방법과 그로 인한 공정성 정도를 정량적으로 비교 분석하였다. 비교한 모든 기법들은 특정 노드의 입력율이 과도하게 증가하더라도 일정한 평형 상태에 도달하여 입력율이 높은 노드에 의해 입력율이 낮은 노드에 대역폭이 할당되지 않는 문제를 발생시키지 않는다. 그러나 평형상태에 접어드는 노드 간 입력율의 비율은 Talmud 기법과 타 기법 사이에 차이를 보이며 이로 인해 FI 측면의 공정성에서는 Talmud 기법이 타 기법보다 우수했다.

그러나 Talmud 기법은 입력율의 반을 기준으로 대역폭을 할당하므로 입력율이 높은 노드에 의해 입력율이 낮은 노드들에게 할당되는 대역폭이 작아질 수 있다. 따라서 송신 노드들의 입력율의 상대적인 높낮이에 따라 할당 기준을 동적으로 적용시키거나 할당 기법을 NBS 등으로 변경하는 혼합 기법의 개발이 요구된다.

- [1] Dusit Niyato and Ekram Hossain, "A Cooperative Game Framework for Bandwidth Allocation in 4G Heterogeneous Wireless Networks," IEEE international conference on communications, pp.4357~4362, 2006.
- [2] Haikel Yaiche, Ravi R. Mazumdar, and Catherine Rosenberg, "A Game Theoretic Framework for Bandwidth Allocation and Pricing in Broadband Networks," IEEE/ACM Trans. on networking, Vol.8, No.5, pp.667~678, 2000.
- [3] William Thomson, "Axiomatic and Game-theoretic Analysis of Bankruptcy and Taxation Problems: a Survey," Mathematical social science, Vol.45, pp.249~297, 2003.
- [4] Robert J. Aumann and Maschler Michael, "Game Theoretic Analysis of a Bankruptcy Problem from the Talmud," Journal of economic theory, Vol.36, pp.195~213, 1985.
- [5] Zbigniew Dziong and Lome G. Mason, "Fair-efficient Call Admission Control Policies for Broadband Networks - A Game Theoretic Framework," IEEE/ACM Trans. on networking, Vol.4, No.1, pp.123~136, 1996.
- [6] Martin J. Osborne and Ariel Rubinstein, A course in game theory, The MIT Press, pp.117~132, 1994.
- [7] Hongxia Shen and Tamer Basar, "Differentiated Internet Pricing using a Hierarchical Network Game Model," IEEE American Control Conference, pp.2322~2327, 2004.
- [8] R. Jain, D. Chiu and W. Hawe, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Systems," Technical Report DEC TR-301, 1984.



박재성

e-mail : jaesungpark@suwon.ac.kr

1995년 연세대학교 전자공학과(학사)

1997년 연세대학교 전자공학과(공학석사)

2001년 연세대학교 전기, 전자공학과
(공학박사)

2001년~2002년 University of Minnesota
PostDoc. Research Faculty

2002년~2005년 LG전자 선임연구원

2005년~현 재 수원대학교 인터넷정보공학과 조교수

관심분야: 이동성 관리 기술, 멀티미디어 전송 기술, 차세대
네트워크 등

참고 문헌



임 유 진

e-mail : yujin@suwon.ac.kr

2000년 숙명여자대학교 전산학과(박사)

2000년 서울대학교 박사후연구원

2000년~2002년 UCLA 박사후연구원

2003년~2004년 삼성종합기술원 전문

연구원

2004년~현 재 수원대학교 정보미디어학과 조교수

관심분야: 애드혹 네트워크, 센서 네트워크, 이동통신, 라우팅

프로토콜