

다중 사용자 환경에서 협동적 게임 이론(Cooperative Game Theory)의 협상 해법(Bargaining Solutions)을 이용한 멀티미디어 통신 및 네트워크 자원 관리

박형곤

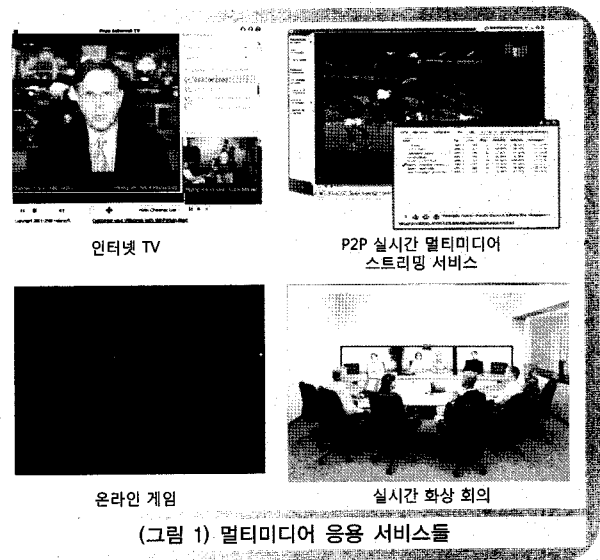
Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)

요 약

협동적 게임 이론 (cooperative game theory)은 다중 사용자들이 어떻게 하면 한정된 자원을 효율적이고 공평하게 공유할 수 있는지에 초점을 맞추며 이론적인 바탕을 제공한다. 본고에서는 다수의 멀티미디어 사용자들이 협동적 게임 이론중 협상 해법 (bargaining solutions)을 이용하여 어떻게 통신 및 네트워크 자원을 효율적이고 공평하게 공유할 수 있는지 알아본다. 또한, 이러한 협상 해법들을 바탕으로 한 자원 공유가 멀티미디어 사용자에게 어떠한 의미를 갖는지 알아보도록 한다. 마지막으로, 이러한 게임 이론을 이용한 자원 관리가 다양한 형태의 통신 및 네트워크에 어떻게 사용될 수 있으며, 미래의 활용 가능성을 알아보도록 한다.

1. 서 론

온라인 멀티미디어 게임, 멀티미디어 스트리밍 서비스, 화상 전화 및 온라인 화상 회의등의 멀티미디어 응용 서비스는 최근 들어 많은 주목을 받고 있다 (그림 1). 이러한 응용 서비스는 종종 한정된 자원을 다수의 사용자가 공유하게 되는데, 기존의 자원 관리 전략들은 멀티미디어 사용자들의 서비스 품질 (Quality of Service, QoS)을 고려하거나, 각 사용자들의 이종성 (heterogeneity)을 고려한 차별적인 자원 할당을 하는데에 한계를 가지고 있었다. 또한, 다중 사용자 환경에서의 공평하고 효율적인 자원 관리에서도 한계를 가



(그림 1) 멀티미디어 응용 서비스들

지고 있었다. 다중 멀티미디어 사용자들에 대한 기존의 자원 관리 전략들의 단점을 보완하기 위하여, 게임 이론 (game theory)을 바탕으로 한 자원 관리 전략들이 제시 되어 왔다. 게임 이론은 오래전부터 경제학, 경영학, 사회학, 그리고 정치학 분야에서 발전 및 응용되어 왔으며, 생물학, 인터넷을 포함한 컴퓨터 공학등의 분야에도 널리 응용되고 있다. 게임 이론은 각 사용자의 관점을 중심으로 문제에 접근하고, 사용자간 상호작용에 관심을 두기 때문에, 게임이론을 바탕으로 한 해법들은 분산적이고 (distributed), 특히 다중 사용자 환경에서 효과적이다. 또한 사용자들간 상호작용을 분석하고 각 사용자들의 최선의 전략을 알아낼 수 있으며, 그 전략을 사용하는 사용자들이 어떠한 효과를 얻을 수 있는지도 예측할 수 있다 [1].

게임 이론의 한 분야인 협동적 게임 이론 (cooperative game theory)은 사용자들의 효율적이며 공평한 자원 분할에 초점을 맞추고 있다. 특히 협동적 게임 이론의 협상 해법 (bargaining solutions)은 각 사용자들만의 독특한 이종성을 고려할 수 있기 때문에, 사용자들의 서비스 요구 사항의 편차가 큰 멀티미디어 응용 서비스의 자원 관리에 유용하게 사용될 수 있다. 따라서 본 고에서는 협동적 게임 이론의 협상 해법은 무엇이며, 다양하게 제시된 협상 해법이 멀티미디어 응용 서비스에서는 어떻게 자원 관리 전략으로 사용되는지 알아 보도록 한다.

본 고의 구성은 다음과 같다. II장에서는 협상 문제와 협상 해법에 대한 특징을 살펴 보고, III장에서는 공리적 협상 해법에 대해 알아 본다. IV장에서는 대표적인 공리적 협상 해법들과 그들의 멀티미디어 응용 서비스에의 활용예를 알아보고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 협상 문제 (Bargaining Problems)와 협상 해법 (Bargaining Solutions)

1. 협상 문제

협상 문제는 이해 관계가 상충되는 사용자들이 자신의 이익을 극대화 하기 위하여 서로의 의견을 조율하는 과정을 뜻하며, 사용자들이 어떠한 합의점 (agreement point) 에 도달했을 때, 이 합의점을 협상 문제의 해법이라고 한다. 예를 들어, 개인들간에 집을 사고 파는 과정은 집을 팔고자 하는 사람과 그 집을 사려고 하는 사람과의 협상 문제로 볼 수 있다. 왜냐하면, 판매자는 최대한 높은 가격으로 집을 팔고자 하지만, 동시에 구매자는 최대한 낮은 가격으로 사고자 하기 때문이다. 따라서, 협상 문제는 이익 상충 관계에 있는 다수의 사용자가 자신들의 이익 또는 효용 (utility)을 극대화 하려고 하기 때문에 발생한다.

이러한 협상 문제는 다수 사용자가 사용하는 통신 및 네트워크 환경에서도 쉽게 발견할 수 있다. 예를 들어, 하나의 유/무선 인터넷 공유기를 여러 컴퓨터가 사용하는 경우, 각각의 컴퓨터들은 그 공유기에 할당된 한정된 자원 (예: 대역폭)을 공유하게 된다. 하지만, 각각의 컴퓨터들은 자신들에

게 할당되는 자원을 최대화 하려고 하기 때문에, 협상 문제가 발생하게 된다. 게다가, 만일 각각의 컴퓨터들이 수행하는 응용 프로그램이 다른 경우 (예: 다른 종류의 멀티미디어 서비스), 할당되는 자원의 중요도는 각 컴퓨터마다 다를 수 있다. 따라서, 협상 문제는 이러한 모든 조건을 고려하여 해결되어야 하며, 그 해결점은 협상 문제에 대한 해법이 된다. 다음절에서는 이 협상 해법에 대한 공리적인 접근을 알아 보도록 하고, 그 해법의 특징을 고찰해 보도록 한다.

2. 협상 해법

II.1 절에서 예를 들어 살펴보았던 판매자와 구매자의 협상 문제를 다시 생각해 보자. 만일 판매자와 구매자가 협상 과정을 통하여 일정한 가격에 의견 합의를 보았다면, 그들은 협상 문제의 '해법' 을 찾았다고 볼 수 있다. 하지만, 어떠한 가격에 의견 수렴을 하지 못했다면, 그들은 협상에 대한 합의점을 찾을 수 없게되고, 이는 협상을 통하여 아무런 이익을 얻지 못했다는 것을 의미한다 (이 경우 참여자들의 이익 또는 효용은 0이다). 따라서, 협상 문제의 해법은 협상 문제에 대한 참여자들의 합의점이고, 이 경우 '어떠한 점에서 참여자들이 합의를 하는가?' 라는 질문에 대한 답이 우리의 주된 관심사이다. 이 질문에 대한 답을 하기 위하여 게임 이론은 크게 두가지의 방법론을 제시한다 - 공리적 (axiomatic) 접근과 확장형 게임 (extensive-game)을 이용한 접근이다. 본고에서는 공리적인 접근에 초점을 맞추지만 (III 장), 확장형 게임을 이용한 접근 방법에 대한 내용은 [1]에서 찾을 수 있다.

III. 공리적 협상 해법 (Axiomatic Bargaining Solutions)

공리적 협상 해법은 협상 문제에 대한 해법이 여러가지의 공리 (axioms)를 만족시키는 점에서 결정된다고 설명한다. 여러 공리는 협상 문제에 참여하는 이성적인 (rational) 사용자¹⁾들이 모두 만족할 수 있는 조건들을 특징 짓는데, 그 공리들을 만족하는 협상 문제의 해법은 공유된 자원의 사용 측면에서 1) 효율적 (efficient) 이며 자원의 할당을 통하여

얻게 되는 각 사용자들의 효용은 2) 공평 (fair)하다. 그러면 이 두 조건에 대하여 조금 더 자세히 살펴 보도록 하자.

- 파레토 최적 (Pareto Efficiency/Optimality)

다중 사용자 환경에서는 각 사용자들의 이종성을 분산적으로 고려하기 위하여, 정해진 시스템의 효용을 최대화 하는 자원 할당이 아닌 각 사용자의 효용을 최적화 하는 자원 할당 방법이 유용할 수 있다. 이 경우, 각 사용자에게 할당된 자원 (또는 그에 해당하는 각 사용자의 효용)이 '파레토 최적' 이면 효율적인 자원 할당이라고 할 수 있는데, 이는 파레토 최적인 자원 할당에서는 (한정된 자원을 이용하여) 더 이상 모든 사용자들의 효용을 '동시에' 개선시킬 수 없기 때문이다. 만일 사용자들이 동시에 개선되는 다른 효용 합의 점을 찾을 수 있다면, 이성적인 사용자들은 그 다른 합의점에서 합의를 할 것이다. 따라서, 이성적인 사용자들은 파레토 최적인 자원 할당점에서 협상 문제에 대한 해법을 찾을 것이며, 이러한 점들의 집합을 협상 집합 (bargaining set) 이라고 부른다. 일반적으로 협상 집합의 크기는 무한대이기

때문에, 유일한 (unique) 하나의 협상점 - 즉 협상 해법 - 을 결정하기 위해서는 추가적인 조건들이 필요하다. 이 추가적인 조건들은 각 공리적 협상 해법의 독특한 공평성 (Fairness)에 의하여 결정된다.

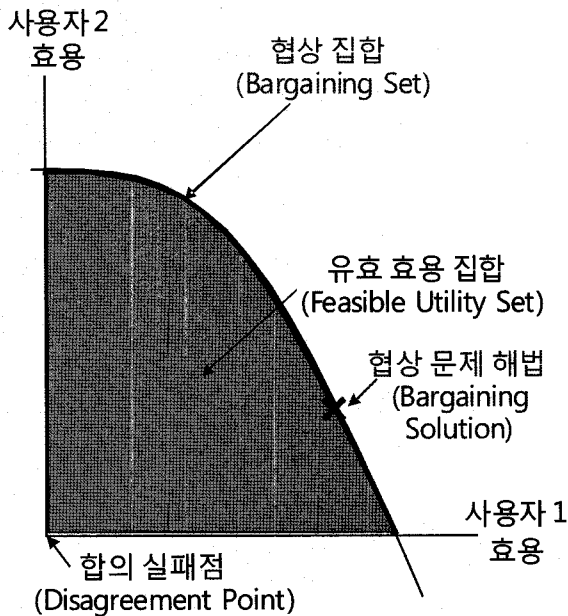
- 공평성 (Fairness)

한정된 자원은 각 사용자들에게 공평하게 공유되고 할당되어야 한다. 이러한 공평한 자원 할당은 각 사용자에게 협상에 참여하여 합의에 이르게 하는 보상 (incentive)으로 작용한다. 또한, 공평성은 각 사용자들의 이종적 특성을 고려하여 정의될 수 있기 때문에, 다양한 필요조건을 만족시키며 여러 자원 할당 문제에 적합하게 변형 및 응용되어 사용될 수 있다.

위의 두 조건들은 협상 해법의 공리들에 의하여 정의되기 때문에, 공리적 협상 해법에 의하여 결정된 합의점은 파레토 최적이며 공평성을 이루는 유일한 자원 할당점을 결정한다.

(그림 2)는 공리적 협상 해법에 관한 간단한 예를 보여준다. 이 협상 문제에는 두 명의 사용자가 있고, 유한한 자원을 공유하고 있다. 자원 할당의 모든 경우에 대해 각 사용자는 자신의 효용 함수 (utility function)에 따라 자신의 효용을 결정할 수 있고, 결정된 효용들은 유효 효용 집합 (feasible utility set)²⁾을 이룬다. 이 유효 효용 집합중 파레토 최적이며 합의 실패점에서의 효용보다 더 큰 효용 집합을 협상 집합이라고 한다. 공리적 협상 해법은 이 효용 집합중에서 하나의 효용쌍 (utility pair)을 결정한다.

대표적인 공리적 협상 해법은 Nash가 제시한 Nash협상 해법 (Nash Bargaining Solution, NBS) [3], Kalai 와 Smorodinsky 가 제시한 Kalai-Smorodinsky 협상 해법 (Kalai-Smorodinsky Bargaining Solution, KSBS) [4]을 비롯하여 Egalitarian bargaining solution (EBS), Proportional bargaining solution (PBS) 등이 있다. 각각의 협상 해법은 그 특유의 공평성을 정의하는데, 본고에서는 NBS와 KSBS의 공리들을 자세히 살펴 보고, 특히 그 공리들이 멀티미디어 응용 서비스에서는 어떠한 영향을 미치는지 살펴 보기로 한다.



(그림 2) 두명 사용자 협상 문제의 공리적 협상 해법의 예

01_ 이성적인 사용자들은 협상이 결렬되었을 때의 효용점 (합의 실패점, disagreement point)보다 더 큰 효용을 얻었을 때에만 협상 문제에서 합의를 한다.
 02_ 본고에서는 유효 효용 집합은 볼록(convex)하다고 가정한다.

IV. 공리적 협상 해법과 멀티미디어 응용 서비스

이번 절에서는 NBS와 KSBS의 공리를 살펴보고, 각 해법이 다양한 분야에 응용된 경우와, 특히 다중 멀티미디어 사용자 환경에서 어떻게 응용이 될 수 있는지 알아 보도록 한다.

1. NBS

NBS는 다음의 공리를 만족한다.

- a) 파레토 최적 (Pareto Optimality)
- b) 선형 변환에 대한 불변성 (Independence of Linear Transformations)
- c) 관련성 없는 대안들에 대한 불변성 (Independence of irrelevant alternatives)
- d) 대칭성 (Symmetry)

공리 a)는 협상 해법이 협상 집합에서 결정됨을 뜻하고, 공리 b), c) 그리고 d)는 NBS의 공평성을 특징 짓는다. 각 공리들에 대한 자세한 내용과 특징은 [4]에 설명되어있다. 위의 공리들에 의해 결정되는 NBS는 Nash Product 를 최대화 한다고 알려져 있다. n 명의 사용자가 있을때의

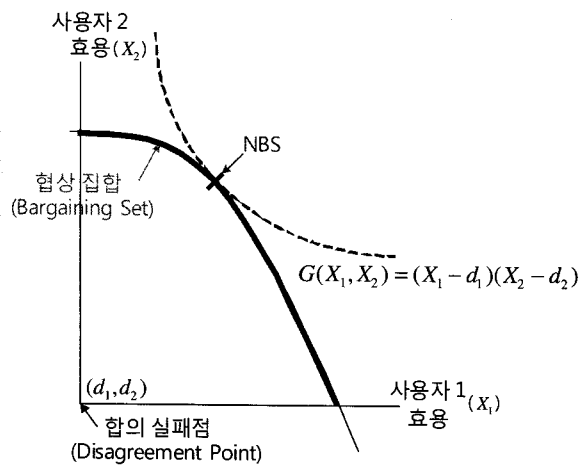
Nash Product $G(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$G(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n (X_i - d_i)^{a_i}.$$

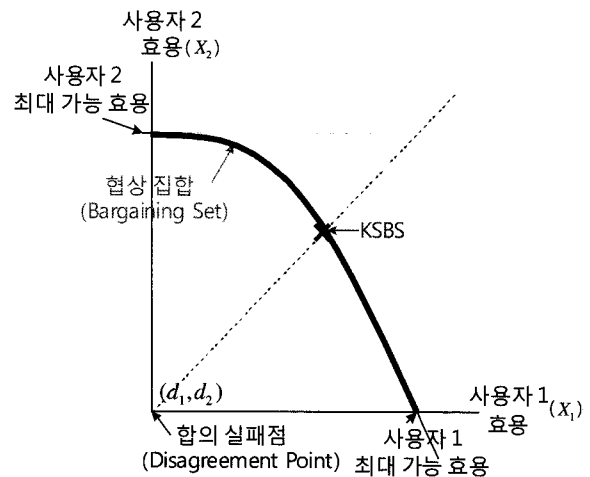
여기에서, X_i, d_i, a_i 는 각각 사용자 i 의 효용, 합의 실패점에서의 효용, 그리고 협상력을 뜻한다. 따라서, NBS는 협상 집합과 Nash Product가 만나는 한 점에서 결정된다. (그림 3)은 두명의 사용자에 대한 NBS를 예로 들고 있다.

NBS는 협상 문제로 모형화가 가능한 여러 분야에서 다양하게 사용되어 왔다. [5]에서는 NBS를 이용하여 일반 유선 통신망에서 흐름 제어를 최적화 하였고, [6]에서는 NBS를 이용하여 직교 주파수 분할 다중 접속 방식(OFDMA) 바탕의 무선 통신망에서 다수의 사용자들에게 공평하고 효율적인 채널 할당 방법을 제안하였다. 또한 [7]에서는 NBS를 비디오 압축 기술에 이용하여 그 효율성을 높였다.

최근에는 다중 멀티미디어 사용자의 자원 할당을 위하여 NBS가 사용되었으며 [4], NBS를 바탕으로 한 자원 할당 전략은 [4]에서 보인 것과 같이 전체 시스템의 효용을 극대화할 수 있다. 하지만, 전체 시스템의 효용을 극대화 하기 위한 자원 할당은 특정한 사용자 (특히 자기 중심적인 (self-interested) 사용자)에게 매우 불만족스러울 수도 있기 때문에, 이에 대안으로 KSBS를 이용한 자원 할당이 제시되었다.



(그림 3) 두명의 사용자에 대한 NBS (협상력은 모두 1로 가정)



(그림 4) 두명의 사용자에 대한 KSBS

2. KSBS

KSBS는 NBS의 공리 c)를 제외하고는 같은 공리에 의해 정의된다. KSBS는 NBS의 공리 c)와는 달리 개별적 단조성 (Individual Monotonicity)을 갖는데, 이는 유효 효용 집합이 어떤 사용자에게 이득이 되는 방향으로 증가하면, KSBS를 바탕으로 한 자원 할당은 그 사용자에게 언제나 이득이 된다는 것을 의미한다. 이 공리는 NBS와는 다른 KSBS만의 공평성을 정의하며, KSBS역시 협상 집합에서 유일한 한 점을 결정한다. (그림 4)는 두명의 사용자에 대한 KSBS를 예로 들고 있다. 이 예에서 볼 수 있듯이, KSBS는 각 사용자의 최대 가능 효용 (maximum achievable utility)을 고려하여 결정된다. 이 특성 때문에, KSBS를 바탕으로 한 자원 할당은 NBS를 바탕으로 한 자원 할당과는 다르게, 각 멀티미디어 사용자들이 (자신들이 얻을 수 있는 최상의 품질에서) 같은 품질 저하를 느낄 수 있도록 자원 할당을 한다 [4]. 따라서, KSBS는 자기중심적 (self-interested)인 사용자들로 구성된 네트워크인 경우에 NBS보다 좀 더 공평하고 적절한 자원 관리 방법으로 사용될 수 있다.

KSBS는 NBS와 마찬가지로 다양한 분야에서 자원 할당 전략으로 사용되어 왔다. [4]에서는 NBS와 함께 다중 멀티미디어 사용자의 효율적이고 공평한 자원 할당 전략으로 사용되었으며, KSBS만의 독특한 자원 할당 전략은 비디오 디코딩 시스템의 자원 관리와 [8] 음성 통신 시스템의 자원 관리 [9]에 사용되었다. 또한 [10]에서는 자기 중심적인 멀티미디어 사용자들이 KSBS를 이용하여 Cognitive 무선 네트워크 자원을 공유하는 방법을 알아보았다.

3. 기타 공리적 협상 해법들 - EBS, PBS

NBS 또는 KSBS와 마찬가지로, EBS 또는 PBS처럼 다른 공평성을 제시하는 공리적 협상 해법이 존재한다. EBS는 각 사용자의 효용이 같도록 자원 할당을 하고, PBS는 각 사용자들의 효용이 주어진 비율에 따라 결정되도록 자원 할당을 한다. 따라서 EBS는 PBS의 특수한 경우라고 생각할 수도 있다. 이러한 EBS와 PBS의 특성들은 동등 계층 (Peer-to-Peer) 네트워크 [11]와 자원 관리 브로커 (resource brokers)를 바탕으로 한 무선 네트워크에서 멀티미디어 사용자의 자원 관리 [12]에 사용이 되었다.

V. 결 론

본고에서는 다중 멀티미디어 사용자 환경에서 효율적이고 공평한 자원 관리를 위한 협동적 게임 이론의 협상 해법을 제시하였다. 한정된 자원을 공유한 다중 사용자 환경에서의 자원 할당 문제는 협상 문제로의 모형화가 가능하고, 그 협상 문제에 대한 해법을 공리적인 접근을 통하여 구할 수 있음을 알아 보았다. 특히, 이미 잘 알려진 다양한 공리적 협상 해법들이 멀티미디어 통신 및 네트워크 자원 관리에 어떻게 사용될 수 있으며, 할당된 자원이 멀티미디어 응용 서비스에서는 어떠한 의미를 갖는지 알아 보았다.

전형적인 통신 및 네트워크 시스템에서의 자원 관리는, 프로토콜 및 규칙을 미리 디자인하고, 이를 사용자 (또는 이동성 기기)들이 수동적이고 기계적으로 따르는 형태로 발전되어 왔다. 하지만, 점차 각 사용자들의 저장, 연산 및 통신 능력이 발전하고, 원하는 서비스가 다양화 되면서, 사용자간에 효율적이고 공평한 자원 관리 전략도 중요해지고 있다. 따라서, 게임 이론을 바탕으로 한 자원 관리 전략은 앞으로 다중 사용자 환경을 바탕으로 한 다양한 분야에서 널리 이용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Binmore, *Fun and Games: A Text on Game Theory*. Lexington, MA: D.C. Heath, 1992.
- [2] H. Park and M. van der Schaar, "Bargaining Strategies for Networked Multimedia Resource Management," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 7, pp. 3496-3511, Jul. 2007.
- [3] J. Nash, "The bargaining problem," *Econometrica*, vol. 18, pp. 155-162, 1950.
- [4] E. Kalai and M. Smorodinsky, "Other solutions to Nash's bargaining problem," *Econometrica*, vol. 43, no. 3, pp. 513-518, May 1975.
- [5] R. Mazumdar, L. G. Mason, and C. Douligeris, "Fairness

- in network optimal flow control: Optimality of product forms," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 39, no. 5, pp. 775-782, May 1991.
- [6] Z. Han, Z. Ji, and K. J. R. Liu, "Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using Nash bargaining solutions and coalition," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 8, pp. 1366-1376, Aug. 2005.
- [7] I. Ahmad and J. Luo, "On using Game Theory for Perceptually Tuned Rate Control Algorithm for Video Coding," *IEEE Tran. Circuits and Systems for Video Technol.*, vol. 16, no. 2, Feb. 2006, pp. 202-208.
- [8] N. Mastrorarde and M. van der Schaar, "A Bargaining Theoretic Approach to Quality-Fair System Resource Allocation for Multiple Decoding Tasks," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 18, no. 4, pp. 453-466, Apr. 2008.
- [9] Bengt J. Borgstrom, M. van der Schaar, and A. Alwan, "Rate Allocation for Noncollaborative Multiuser Speech Communication Systems Based on Bargaining Theory," *IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Process.*, vol. 15, no. 4, pp. 1156-1166, May 2007.
- [10] H. Park and M. van der Schaar, "Coalition based Resource Negotiation for Multimedia Applications in Informationally Decentralized Networks," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 11, no. 4, pp. 765-779, Jun. 2009.
- [11] H. Park and M. van der Schaar, "Coalition-based Resource Reciprocation Strategies for P2P Multimedia Broadcasting," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 54, no. 3, pp. 557-567, Sept. 2008.
- [12] H. Park and M. van der Schaar, "Congestion Game Modeling for Brokerage based Multimedia Resource Management," *Int. Packet Video Workshop 2007 (PV 2007)*, Nov. 2007, pp. 18-25.

약 력



2004년 포항공과대학교 공학사
 2006년 UCLA 공학석사
 2008년 UCLA 공학박사
 2009년 ~ 현재 EPFL 박사후 연구원
 관심분야 : 게임 이론을 이용한 멀티미디어 통신 및 유선 / 무선 / P2P 네트워크 자원 관리, 분산 시스템 자원 관리

박 형 곤

