

모바일 비디오 서비스에서의 게임이론

서덕영 | 정재윤 | 이용현
경희대학교

요약

게임이론은 경제현상을 분석 또는 예측하는 도구로서 사용되어왔으며, 본고에서는 이를 모바일 비디오 서비스에 적용하는 의의와 방법을 소개한다. 게임이론은 이기적이기도 하고 이타적이기도 한 사람이 개입하는 시스템을 모델링하는데 매우 유용한 방법론을 제공한다. 자원이 항상 제한적인 모바일 환경에서, 많은 자원을 요구하는 비디오 서비스를 제대로 하는 것은 매우 어려운 일이며, 따라서 게임이론을 이용한 실용적이고 현실적인 모델링이 중요하다. 이와 관련하여 그간의 국내외 연구를 정리하고 향후 발전방향을 제시한다.

1. 서론 : 왜 게임인가?

인생은 한 판 게임이라고 한다. 또한, '이걸 너와 나 사이에 게임이라고 생각해보자' 라는 말을 쓰기도 한다. 우리가 '게임'이라는 말에 무엇을 담고 싶어 하는 걸까?

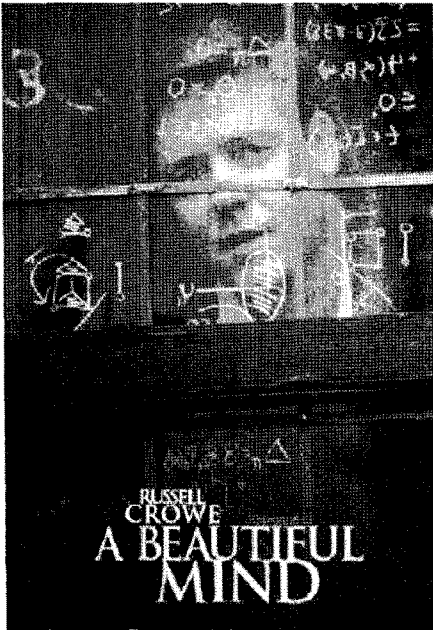
첫째, 게임이라는 말은 욕망을 포장하는 말로 쓰이는 경우가 많다. 우리 가끔 빌 게이츠 같은 부자의 돈의 일부가 내 돈이면 좋겠다는 생각을 한다. 그러나 그 욕망을 드러내 놓는 것은 부끄러워한다. 일본이나 중국에서는 사람이 성숙된 정도를 이러한 욕망을 얼마나 감출 수 있는가로 판단한다고

한다. 게임은 욕망을 드러내놓는 행위라고 할 수 있다. 즉, 고스톱은 상대방의 돈을 내 돈으로 만들고 싶은 욕망을 드러내놓는 것이다. 사람은 이타(利他)적이기도 하지만, 이기(利己)적인 욕심을 가지기도 한다. 특히, 경제 시스템을 해석할 때, 개인이 이타적이라고 생각하면 그 해석은 틀리기 쉽다. 필요는 제한적이지만 욕망은 끝이 없다. 이러한 사람의 욕망을 적절히 해석할 수 있으면 정확하게 사회현상을 바라볼 수 있으며, 나아가 이를 좋은 방향으로 이끌 수 있을 것이다. 이런 게임이라는 용어를 사용함으로써 이러한 욕망을 객관적으로 바라볼 수 있는 준비를 한다.

둘째, 경쟁적인 상황을 좀 긍정적으로 받아들이고 싶을 때 사용한다. 인류가 벌이는 가장 큰 경쟁은 전쟁일 것이다. 전쟁은 대부분 부정적인 평가를 받는다. 인간은 경쟁에서 이기고 싶은 본능을 가지고 있다. 프로 축구나 야구 같은 프로 경기는 이러한 본능의 대리 만족이라는 얘기가 있다. 제임스 던이 '이유없는 반항' 에서 벌이는 chicken game은 이러한 본능이 얼마나 맹목적인가를 보여준다. 서로를 향해 정면으로 달려다가 먼저 핸들을 꺾는 사람이 지는 게임이다. 사람은 합리적이기도 하지만, 비합리적인 경우도 많다. 게임이라는 말을 사용하여 이러한 비합리적인 사람의 본성을 받아들일 수 있는 틀을 제공할 수 있다.

셋째, 일이 아니라 놀이라고 생각하고 싶은 것이다. 직장을 사각의 정글이라고 하는 것은 그 안에서의 욕망의 충돌과 경쟁 관계를 극대화하지만, 게임이라고 하면 좀더 쿨하게 그것을 받아들일 수 있다. 놀이인 것이다. 고스톱판 한 판

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업 [2008-F-005-02, 게임이론을 응용한 Cross-layer 무선 설계기술 연구]의 일환으로 수행하였음.



(그림 1) 영화 "Beautiful Mind"

이 끝나면 다시 패를 돌리며, 그 패는 그 전(前)패와 전혀 무관하듯이 놀이는 리셋이 가능하다. 리셋이 가능하다는 것은 인간의 마음을 어느 정도 편하게 한다.

게임 이론(game theory)은 'Beautiful Mind'라는 영화의 소재가 되었고, 노벨상을 수상한 수학자 John Forbes

Nash가 경제 문제

를 해석하는 과정에서 정립되었다. 이 이론은 인간의 이기적인 욕망과 경쟁적인 경제 현상을 분석하고 예측하는데 매우 유용한 도구이다. 이후 분화된 여러 가지 게임 이론들은 인간을 둘러싼 모든 사회적, 경제적, 교육적 상황을 포괄하고 있다.

II. 어떠한 것이 게임인가?

불확실성은 개인의 의사결정에 영향을 준다. 특히 다른 사람이 어떻게 결정할지 모르는데 그것이 내게 영향을 미친다면 나의 의사결정은 더욱 힘들어진다. 이러한 상황에서 우리는 다른 사람이 어떤 의사결정을 내릴지 "짐작"한 후, 나의 의사결정을 하는데 이처럼 상대방이나 나의 의사결정에 대한 판단 기준으로 "효용(utility)"을 사용한다[5].

효용은 경제학에서 가장 중요한 개념 중의 하나로서 돈이나 자원 등의 실제의 물리적 개념에 의해 느끼는 만족도이다. 특히, 효용은 돈이나 자원에 대하여 단순히 선형적인 관계가 아닌 복잡한 함수 관계에 있으며, 일반적으로 체감하는 증가함수 형태를 가진다. 예를 들어서, 비디오 서비스가

bitrate를 500kbps로 제공할 때보다 1000kbps를 제공할 때 사용자의 체감 품질 또는 PSNR이 증가하는 하지만, 만족도는 두 배보다 적게 증가함을 의미한다.

게임이론은 이와 같이 상호 영향을 미치는 불확실한 경쟁 상황에서 개인들이 전략적 행동들을 수학적으로 분석하는 기법이다[6]. 이 때 모든 참여자는 합리적이고 이기적(selfish)이라고 가정하며, 자신의 이익을 최대화하기 위하여 알려진 모든 정보를 바탕으로 효용함수를 계량적이고 신속하게 계산할 수 있다고 가정한다. 즉, 게임이론은 모든 경쟁 상황을 고려하여 사용자들이 효용을 최대화하는 행위(utility-maximizing behavior)를 분석하는 수리적 도구이다.

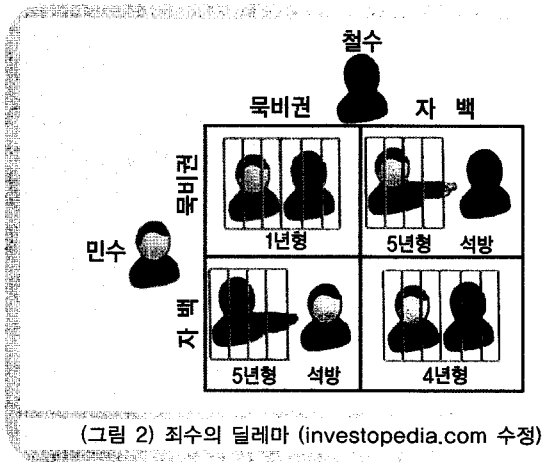
게임은 일반적으로 '게임 참여자(player)', 각 참여자가 선택할 수 있는 '전략집합(strategy)', 참여자가 각 전략을 선택하였을 때 얻는 '효용(utility)'로 구성된다. 효용은 게임이론에서 수익(pay-offs)이라고도 부르는데, 현실에서 효용을 계량화하는 것은 쉽지 않아서 경제학 및 게임이론의 약점으로 지적받고 있다. 예를 들어, 비디오 서비스 게임연구에서 효용으로 자주 사용되는 PSNR은 공학적이고 정량적인 품질 지표로서 적합하지만, 현실에서 사용자가 느끼는 만족도는 개인의 성향이나 멀티미디어 유형(영상통화, 비디오, UCC) 등에 따라 차이가 있을 수밖에 없기 때문에 개개인의 만족도를 정확히 표현한다고 보장하기 힘들다.

게임이론은 게임의 상황에 따라 여러 가지로 분류할 수 있다. 조정을 위한 공통된 규칙이 존재하는지에 따라서 협조적 게임(cooperative game)과 비협조적 게임(non-cooperative game), 게임의 반복여부에 따라서 1회성 게임(one-shot game)과 반복 게임(repeated game), 총량의 변화 유무에 따라서 제로섬 게임(zero-sum game)과 비제로섬 게임(non-zero-sum game), 전략 집합의 범위에 따라서 이산 전략 게임(discrete game)과 연속 전략 게임(continuous game) 등으로 나눌 수 있다[7].

2.1 비협조적 게임과 협조적 게임

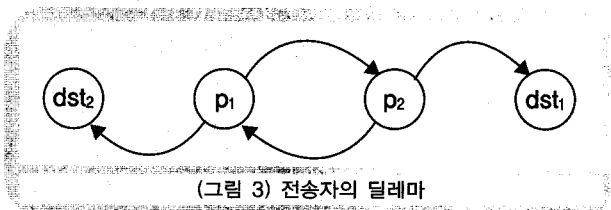
협조적 게임이란 참여자들이 구속력 있는 협약을 맺고 하는 게임으로, 협상게임(bargaining game), 경매게임(auction game), 가격결정(pricing) 등이 있으며, 비협조적 게임은 구속력 있는 협약이 없이 자신의 전략집합 하에서 효용을 극대화하기 위하여 최선의 의사결정을 수립하는 게임이다.

주로 비협조적 게임들이 게임이론의 예로 많이 알려져 있다. 그 중에서도 '죄수의 딜레마(prisoner's dilemma)'는 게임상황을 이해할 수 있는 대표적인 예이다. (그림 2)는 참여자(players)가 2명(철수와 민수)이고, 각자의 전략(strategies)은 2가지(묵비권과 자백), 각 효용(utility)은 각 전략에 따른 형량으로 구성된 죄수의 딜레마를 보여주고 있다.



죄수의 딜레마에서 비협조적이고 합리적인 참여자들은 절대적 우위(strictly-dominated) 전략을 선택한다. 즉, 민수의 경우, 철수가 묵비권을 선택한다면 민수 자신은 자백을 하는 것이 석방이 되므로 우위의 전략이며, 반대로 철수가 자백을 한다면 자신도 자백을 하는 것이 형량을 5년에서 4년으로 줄이므로 우위의 전략이다. 즉, 합리적인 민수는 철수의 결정과 관계없이 항상 자백을 하는 것이 우위의 전략이므로 이를 선택할 것이고, 철수도 마찬가지로 이유로 자백을 선택할 것이다. 결과적으로 이들 선택은 두 명 모두 4년형을 받게 되어, 쌍방이 묵비권을 행사하는 경우인 1년형보다 둘 다 과중한 처벌을 받게 되는 결과를 가져온다.

이러한 결과는 상대방을 신뢰할 수 없는 상황에서 개인의 합리성만을 추구하기 때문인데, 상호 신뢰나 의리 등의 요소가 반영되면 또 다른 결과를 가져올 수도 있다. 이처럼



별 합리성과 전체적 합리성에 차이가 발생하는 현실의 상황은 경쟁적인 가격 인하, 관세장벽 높이기, 어장의 경쟁적 포획, 군비 경쟁 등에서 발견되고 있다[8].

또한, 통신 릴레이에서도 동일한 문제가 발생할 수 있는데, (그림 3)과 같이 두 사용자가 서로 상대방의 데이터를 전달해주어야 하는 상황을 '전송자의 딜레마(Forwarder's dilemma)'라고 부른다.

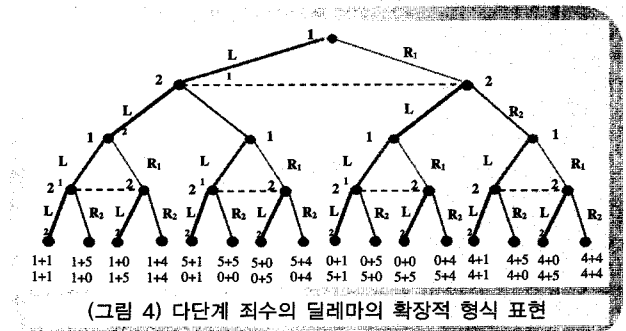
2.2 게임의 반복성과 게임의 표현

또 다른 중요한 게임의 분류로는 단판으로 끝나는 1회성 게임과, 반복하여 수행하는 다단계 게임으로 나눌 수 있다. 만약 동일한 참여자들 사이에 동일한 게임이 여러 차례 반복되는 경우에는 평판이나 신뢰, 또는 미래의 보복(Tit-for-Tat)이 존재하여 의사결정에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

<표 1> 죄수의 딜레마의 전략적 형식 표현

		Player 2	
		L2	R2
Player 1	L1	(1, 1)	(5, 0)
	R1	(0, 5)	(4, 4)

또한, 게임 표현하는 정규화 방식으로 크게 전략적 형식(strategic form)과 확장적 형식(extensive form)이 있는데, 1회성 게임은 편의상 전략적 형식을 사용하고, 다단계 게임은 확장적 형식을 사용하여 게임을 표현한다. 확장적 형식은 의사결정 나무(decision tree, 기계학습의 decision tree와는 다름)를 통하여 쌍방간의 단계적 의사결정 및 그에 따른 효용을 표현한다. <표 1>은 1회성 게임인 죄수의 딜레마의 전략적 형식을 보여주고, (그림 4)는 죄수의 딜레마를 2년의 반복게임으로 확장하였을 때의 확장적 형식을 보여준다.



2.3 게임이론과 최적화 이론

최적화 이론(optimization)은 주어진 제약조건 하에서 목적 함수를 최대 또는 최소로 하는 해를 찾는 기법으로 수리계획법(mathematical programming)이라고도 부른다. 최적화 기법은 제약식(constraints) 및 목적함수(object functions)의 형태에 따라서 최적해를 찾는 방식이 달라지는데, 이에 따라서 선형계획법, 정수계획법, 비선형계획법, 동적계획법, 조합최적화 등으로 구분된다.

게임이론은 게임 참여자의 효용함수를 극대화한다는 측면에서 최적화 기법과 유사하게 보일 수 있다. 또한 일부 게임 유형에서 개별 참여자의 효용을 최대화하기 위하여 부분적으로 최적화 기법을 적용하기도 한다. 그렇지만, 게임 상황에서 사용자들의 제약조건 및 효용함수는 다른 사용자들의 효용함수와 전략적 선택과 맞물려있기 때문에 단일한 수리계획법으로는 접근할 수 없다. “죄수의 딜레마”의 예를 들면, 민수와 철수의 형량의 합을 최소로 하는 해를 찾는다면 최적화 문제이지만, 개별 참여자의 형량을 최소로 하는 행위를 분석하는 것은 게임이론의 범주에 속한다.

특히, 게임 상황에서는 누가 먼저 선택을 하느냐, 게임을 반복하느냐, 정보를 완전히 아느냐, 공통적으로 따르는 규칙(공리)이 존재하느냐 등에 따라서 전혀 다른 접근과정과 해법을 가져오기 때문에, 게임이론에서는 이러한 게임 상황을 분류하고 해결하는 데 중점을 두고 있다. 즉, 최적화 이론이 주어진 제약조건 하에서의 최적해를 찾는다면, 게임이론은 게임의 룰을 분석하여 여러 사용자들의 경쟁적인 상황을 해석하고 모델링하는 기법이라고 할 수 있다.

III. 게임으로 생각해야 하는 이유

실제 문제는 게임 상황인데 그것이 아닌 것처럼 가정한 공학적인 해석은 실패한다. 사람이 개입되는 시스템이나, 사람이 만든 공학적 시스템을 제대로 해석하는데는 게임이론이 유용하다. 예를 들어, 한정되어있는 자원을 여러 사람이 동시에 나누어 쓰는 무선망을 예를 들어보자. 지금까지 이러한 자원 분배 시스템의 문제를 공학적으로 해석할 때, 전지능한(all-mighty) 대형(大兄, big brother)이 존재하고, 모

든 참여자는 전체 시스템의 합목적적인 가치가 최대로 되는 것을 목표로 하는 것을 가정하였다. 그러나, 실상은 그렇지 않다. 만일 내가 10이라는 이익을 얻을 때, 이로 인해 전체 시스템에 100이라는 손실이 발생하는 경우에도, 개인은 내가 이익을 얻는 것을 선택한다. 이러한 개인의 행위를 제대로 모사하지 못한 모사시스템은 실제와 다른 엉뚱한 결론을 내놓게 된다.

공학적인 모사가 실패하는 또 하나의 이유는 가치가 사용하는 자원에 선형적으로 증가한다는 가정 때문이라고 할 수 있다. 인간의 욕망은 대부분 한계효용체감의 법칙(law of diminishing marginal utility)을 따른다. 맛있는 초코렛이나 피자라도 처음 먹을 때 맛있지만, 먹는 양이 늘어날수록 그 감동이 줄어드는 것이다. 이는 멀티미디어 시스템에서도 어느 정도 적용이 된다. 비디오를 전송하는데 사용하는 비트율이 늘어날수록 더 좋은 품질의 비디오를 전송할 수 있다. 그런데 원래의 영상과 차이를 나타내는 공학적인 품질인 PSNR은 한계효용 체감의 법칙을 따른다. 즉, 비트율이 낮을 때는 비트율 증가에 따라 품질도 가파르게 증가하지만, 어느 정도 품질이상이 되면 비트율을 늘리더라도 품질은 그다지 증가하지 않는다. 비디오 서비스에 대한 주관적으로 느끼는 품질은 더욱 이 법칙을 따른다.

이와 같이 게임이론을 사용하면 실제 상황을 좀더 실제적으로 분석할 수 있다는 장점이 있음을 알았다. 그런데 더 적극적으로 생각하면 게임이론을 이용함으로써 전체적인 이익을 더 극대화하는 방법을 모색할 수 있다. 2.4에서 설명되었듯 상벌을 적절히 이용함으로써 이것이 가능한데 이처럼 게임의 룰을 정하는 것을 mechanism design이라고 한다.

마르크스(Marx)는 인간의 욕망을 적나라하게 해부하였다. 마르크스의 이러한 욕망에 대한 탁월한 해석은 아직까지도 경제, 사회, 문화적인 현상을 이해하는데 쓰이고 있다. 그러나 마르크스 이론에 기초한 공산주의는 실패했다. 그것은 mechanism design이 좋지 않았기 때문이다. 자본가에게 권력이 집중되는 현상은 막았지만, 공산당이 부패하고 개인이 무책임해지는 메카니즘이었기 때문이다. 북한에서 ‘덧밭’의 옥수수는 집단농장의 옥수수와 비교해서 알의 크기가 서너배 된다는 것이 이를 시사한다. [14]에서는 자동으로 제어되는 스펙트럼 분배 문제를 다루었지만, 경쟁을 관리하는 mechanism에 따라 전체적인 효율성이 증가될 수 있음을 보

여주고 있다. 모바일 멀티미디어 분배 시스템은 인간이 개입하는 시스템이므로 이러한 mechanism design이 더욱 중요하다.

IV. 비디오 서비스에 적용된 게임이론

본 장에서는 자원이 부족한 상태에서 여러 사람이 참여하는 모바일 통신채널을 통해 많은 자원을 요구하는 멀티미디어 서비스가 보다 효율적으로 제공되는 것을 목표로 한 게임이론이론적 접근을 보여준다. 이와 관련되어 지금까지 진행되어온 연구와 필자들이 진행한 연구를 소개한다.

4.1 지금까지의 연구

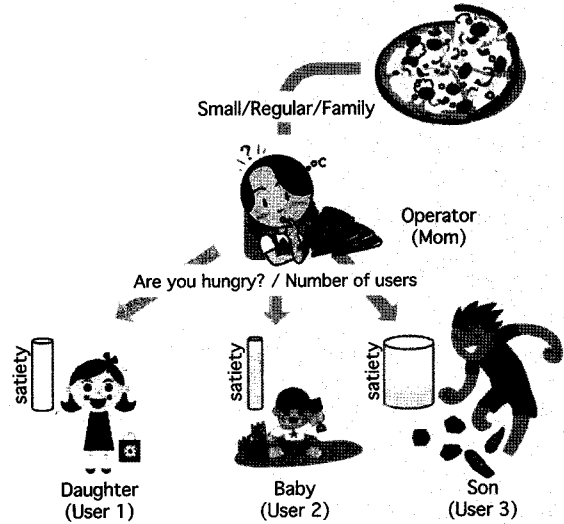
4.1.1 멀티미디어 서비스에 관한 효용함수로서의 서비스 품질(QoS: Quality of Service)

비디오 프레임에 대해 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)로 평가된 비디오 품질을 일정 수준 이상 지속적으로 유지하기 위해 인코더와 채널을 결합시키는 방안이 적용되었으며 [9], 네트워크 채널이 가지는 제약조건 하에서 비디오 시퀀스 중 왜곡된 양을 최소화하는 방안도 연구되었다 [10]. 그러나 여전히 효용함수는 사용자에게 할당된 자원의 실질적인 가치를 정확하게 표현하는데 어려움이 있는데, 그 이유는 할당된 자원(대역폭)을 통해 전송되는 데이터의 유형에 따라서 사용자 만족도가 다를 수 있으며 서비스 지연에 대한 민감도 역시 실시간 전송 환경에서 변동이 심하기 때문이다 [11].

4.1.2 Bargaining game

Bargaining game은 (그림 5)와 같이 세 명의 아이(플레이어)에게 피자(자원)를 나누어 주는 엄마(절대자, 자원 분배자)의 결정(bargaining solution)과 같이 한정적인 자원을 다수의 사용자에게 분배하는 상황에서 적용할 수 있는 게임이다.

Z. Han은 [1]에서 OFDMA 네트워크에서 자원(Sub-carrier)을 할당하는데 있어서 Nash Bargaining Solution을 활용하는 방법을 제시하였다. 이를 통해 시스템 성능(system throughput)의 최대화에 초점을 맞추어 자원을 분배하는 방



(그림 5) Bargaining game의 예

법에 근접한 성능을 내며, 각 사용자에게도 기본적인 수준의 형평성을 제공할 수 있음을 보였다.

H. Park과 M. van der Schaar은 [2]에서 다수의 멀티미디어 서비스를 위한 자원 분배에 있어서 bargaining game을 적용하는 방법을 제시하였다. Bargaining solution을 찾기 위해 각 멀티미디어 서비스의 효용성 함수(utility function, e.g. R-D function)를 기반으로 bargaining set을 구성함으로써 서비스 특징에 적응적인 자원 분배를 실시하였다.

4.1.3 The iterated prisoner's dilemma

Prisoner's dilemma는 normal form game의 한 종류로써 독립적인 각 사용자들의 결정(strategy)에 의해 도출되는 결과를 모델링한다. 독립적인 각 사용자는 자신의 이익을 높이는 방향으로 행동하므로 적절한 penalty(Pay-off function) 정책을 통해 equilibrium (win-win)에 도달하도록 한다.

A. Laufer와 A. Leshem은 [3]에서 간섭이 존재하는 CDMA 네트워크에서 spectrum 할당에 있어서 Prisoner's dilemma game을 활용하는 방법을 제시하였다. 일반적인 경우 독립적인 사용자의 결정으로 얻는 Nash Equilibrium(NE)이 각 사용자에게는 좋지않은 결과를 가져오는 것을 확인하고, 이를 해결하기 위한 pay-off function을 수립 하였다.

Y. Xiao, X. Shan, T. Ren은 [4]에서, IEEE 802.11에서 다수의 사용자가 단일 채널을 공유할 때 Medium Access

Control(MAC) 계층의 동작을 “Two-user prisoner’s dilemma” 게임으로 해석하고, 기존의 back-off기반 DCF 알고리즘이 가지는 문제점을 해결하는 방법으로 NEB, BEB pay-off function을 제안하였다.

4.1.4 무선 자원 할당 게임

Fattahi, Fu, van der Schaar, Paganini은 [12]에서 무선 환경에서 자원 할당을 위한 메커니즘을 제안하였는데, 중앙의 네트워크 조정시스템에 의한 자원 할당 게임을 설계하였다. 다양한 주파수 대의 사용자들에게 적절한 전송 시간을 결합함으로써 배분하는 방식을 통하여 사용자들 및 시스템의 효율을 향상시키고자 하였다.

4.1.5 무선 자원 할당을 위한 서비스 가격 결정

나아가 Fu, Stoenescu, van der Schaar은 [13]에서 멀티미디어 데이터의 무선 자원 할당을 위한 가격 결정 메커니즘에 관한 연구를 제시하였다. 비협력적인 무선 기지국 상황을 가정하여 사용자들이 중앙 서버와 메시지를 주고받으면서 최적 서비스 가격인 Nash Equilibrium에 도달하는 과정을 설계하였다.

4.2 멀티미디어 분배 서비스에 적용된 게임이론

4.2.1 Bargaining game을 이용한 멀티미디어 분배 서비스

모바일 네트워크 시스템에서는 전지전능한 대형이 존재한다. 바로 기지국(base station)이 그것이다. 기지국은 자신이 담당하는 영역(cell area)에 존재하는 모든 사용자들이 원활한 서비스를 제공받을 수 있도록 보장하는 역할을 담당한다. 각 사용자들이 서비스를 제공 받기 위해서는 기지국으로부터 적절한 자원을 할당 받아야 한다. 여기에서 자원은 해당 사용자에게 독점되는 시간(slot) 또는 무선 주파수(sub-carrier)가 될 수 있다. 그렇다면 기존의 모바일 네트워크 환경에 존재하는 기지국들은 어떤 방법으로 자원을 분배하고 있을까?

가장 간단하면서도 보편적으로 자원의 정량적 평등을 보장하는 방법이 있다. 일례로 round robin scheduling을 들 수 있다. 자원을 분배 받는 사용자들을 동일한 간격으로 원형으로 배치하고 중앙에는 등속도로 회전하는 화살표가 존재한다. 각 사용자들은 화살표가 자신의 영역에 속할 때만 서

비스를 제공 받는다. 이러한 방법으로 자원을 할당하는 경우 분배자의 입장에서 공평함을 제공하였기 때문에 마음이 편하다. 그러나 실제로 자원을 할당 받는 사용자들의 입장은 어떨까? 상황에 따라 좀 더 많은 자원을 요구하는 사용자는 불만을 느낀다. 적은 자원으로도 만족할 수 있는 사용자에게 과분한 자원을 분배하는 상황도 발생한다. 그렇다면 사용자의 불만을 초래하는 요소는 무엇일까? 바로 제공받는 서비스의 특징이다. 멀티미디어 서비스를 제공받는 사용자는 연속적인 자원을 요구한다. 같은 멀티미디어 서비스에서도 콘텐츠의 특징에 따라 달라질 수 있다. 또한 파일 전송을 제공받는 사용자는 불연속적이지만 신뢰성 있는 자원을 요구한다. 그러므로 자원 분배자(기지국)가 이러한 상황들을 파악하여 상황에 따른(context aware) 자원을 분배한다면, 사용자의 불만을 최소화 할 수 있을 것이다.

Bargaining game은 앞서 설명된 상황을 잘 묘사하고 있다. 한정적인 자원을 분배함에 있어서 사용자들의 효용성 함수(utility function)를 기초로 하여 가능한 자원의 셋(bargaining set)을 구성한다. 효용성 함수란 할당된 자원을 통해 얻을 수 있는 가치를 나타내는 것으로, 비디오 서비스의 경우, 자원(bitrate)에 따른 화질(PSNR)로 표현된다. 구성된 Bargaining set은 위로 볼록(convex)한 형태를 띠므로, 한 사용자에게 많은 자원을 할당하면 다른 사용자들에게 분배할 자원의 양이 줄게 된다. 그리고 각 사용자들은 게임에 참여하기 위한 기본 전제로, 자원 분배자로부터 최소 자원요구량(disagreement point)만큼의 자원 할당을 약속받는다.

이러한 상황에서 Nash는 Nash Bargaining Solution(NBS)를 증명하였다. Nash bargaining game에서 제시하는 NBS는 가용한 자원을 통해 구성된 bargaining set에서 최대의 효용성을 낼 수 있는 점을 제시한다. NBS의 효용성에 기반한 자원 분배와는 다르게 비율적 형평성(proportional fairness)을 보장하는 bargaining solution으로 Kalai-Smorodinsky Bargaining Solution(KSBS)이 존재한다. 이는 각 사용자들이 도달 할 수 있는 최대 효용성(Utility maximum)에 기초하여 현재 가용한 자원을 분배한다. 언급된 두 가지 Bargaining solution은 각각 서로 다른 면에서 장점을 가지고 있다. 우열의 관점이 아닌 효율성과 형평성의 문제가 된다.

그렇다면 두 가지 방법을 혼합하는 것은 어떨까? 최근의 기업들에서 고정급여 외에 실적에 따른 인센티브를 추가 지

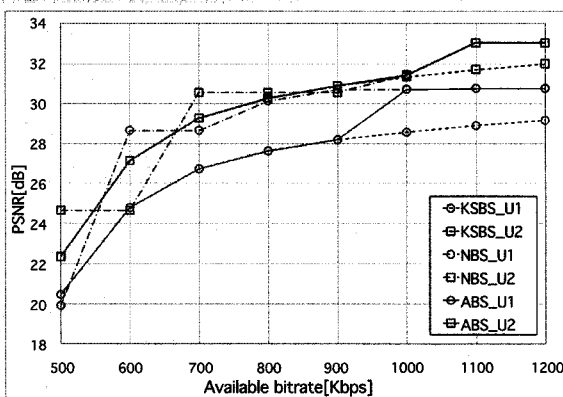
급함으로써 사원들의 사기진작을 꾀하고자 하는 것처럼, 자원을 할당함에 있어서 기본적인 자원의 양만큼은 비율적으로 형평성 있게 제공하고, 잉여 자원에 대하여 효율성에 입각하여 자원을 분배하는 것이다. 이러한 자원 분배 방법을 Adaptive Bargaining Solution(ABS)라고 명하였다. 가용 자원의 양이 기준치(resource threshold)보다 작을 경우, 자원을 분배 함에 있어서 KSBS를 따르고, 기준치를 넘어서는 경우, 기준치 만큼은 KSBS, 나머지에 대해서는 NBS를 통해 자원을 분배함으로써 효율성과 형평성이라는 두 가지 요소를 만족시키고자 한다. 다음의 실험 결과는 이러한 결과를 잘 나타내고 있다.

동일한 영역(cell)에 존재하는 두 명의 사용자가 서로 다른 비디오 서비스를 제공 받고자 기지국으로부터 자원을 분배 받고자 한다. 각 사용자의 효용성 함수는 제공하는 비디오 스트림으로부터 얻을 수 있는 R-D 함수(Rate-Distortion function)가 된다. 가용한 자원의 총량이 변화함에 따라 두 사용자에게 분배되는 자원의 변화는 다음과 같다.

<표 2> NBS, KSBS, ABS 성능비교

Avg. PSNR[dB]			Standard Deviation		
KSBS	NBS	ABS	KSBS	NBS	ABS
28,10	29,31	28,60	0,22	1,17	0,46

(그림 6, 7)에서 U1과 U2는 사용자 1과 사용자 2를 나타낸다. 상단의 점선은 KSBS를 통해 자원을 분배한 결과이고, 1

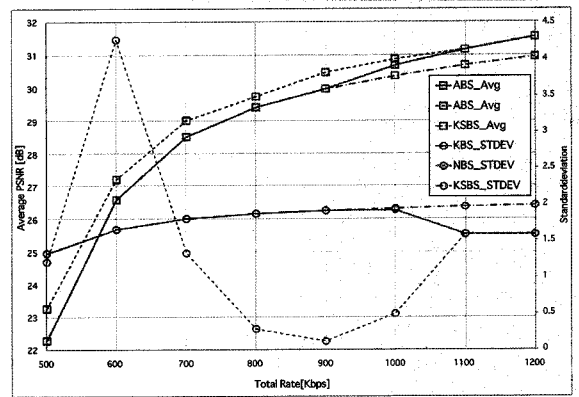


(그림 6) 가용 자원의 변화에 따른 사용자별 품질 변화

점 선택은 NBS를 통해 자원을 분배한 결과이다. KSBS의 경우 가용 자원의 총량이 증가함에 따라 사용자에게 분배되는 자원의 비율이 동일하게 증가하므로 화질도 동일한 비율로 개선되고 있다. NBS의 경우, 효율성에 기반하므로 가용 자원의 변화에 따라 사용자 1, 2의 효용성이 좋은 쪽에 더 많은 자원을 분배한다. 따라서 사용자 1, 2의 화질 변화가 크다. 실선으로 나타난 ABS의 결과는 기준치(900Kbps)를 기점으로 KSBS에서 NBS의 결과로 변화되는 것을 보이고 있다. 하단의 결과에서는 두 사용자의 화질 평균과 편차를 나타내고 있다. 화질 평균(효율성)에 있어서는 NBS가, 화질 편차(형평성)에 있어서는 KSBS가 좋은 성능을 내고 있다. 표에서는 전체 실험에서 얻은 결과를 종합한 것으로, 앞서 설명된 바와 같이 효율성에서는 NBS, 형평성에서는 KSBS가 우위를 점하고 있고, ABS는 각각에서 중간에 위치한다.

4.2.2 멀티미디어 서비스 가격 차별화

무선 환경은 여러 사용자들이 한정된 자원을 두고 경쟁하는 전형적인 게임 상황이다. 4.1절의 관련 연구에서도 제시되었듯이 자신의 효용을 높이고자 하는 사용자들에게 어떻게 한정된 무선 자원을 배분할 것에 관한 연구들이 다수 진행되었다 (Fu et al., 2007; Fattahi et al., 2007). 이 과정에서 사용자들의 행위를 분석하기 위하여 PSNR과 같은 멀티미디어 품질 지표를 사용하거나, 서비스 이용에 지불되는 비용을 고려할 수 있다. 즉, 사용자들은 서비스 품질을 최대함과 동시에 가격을 최소화하고자 한다.



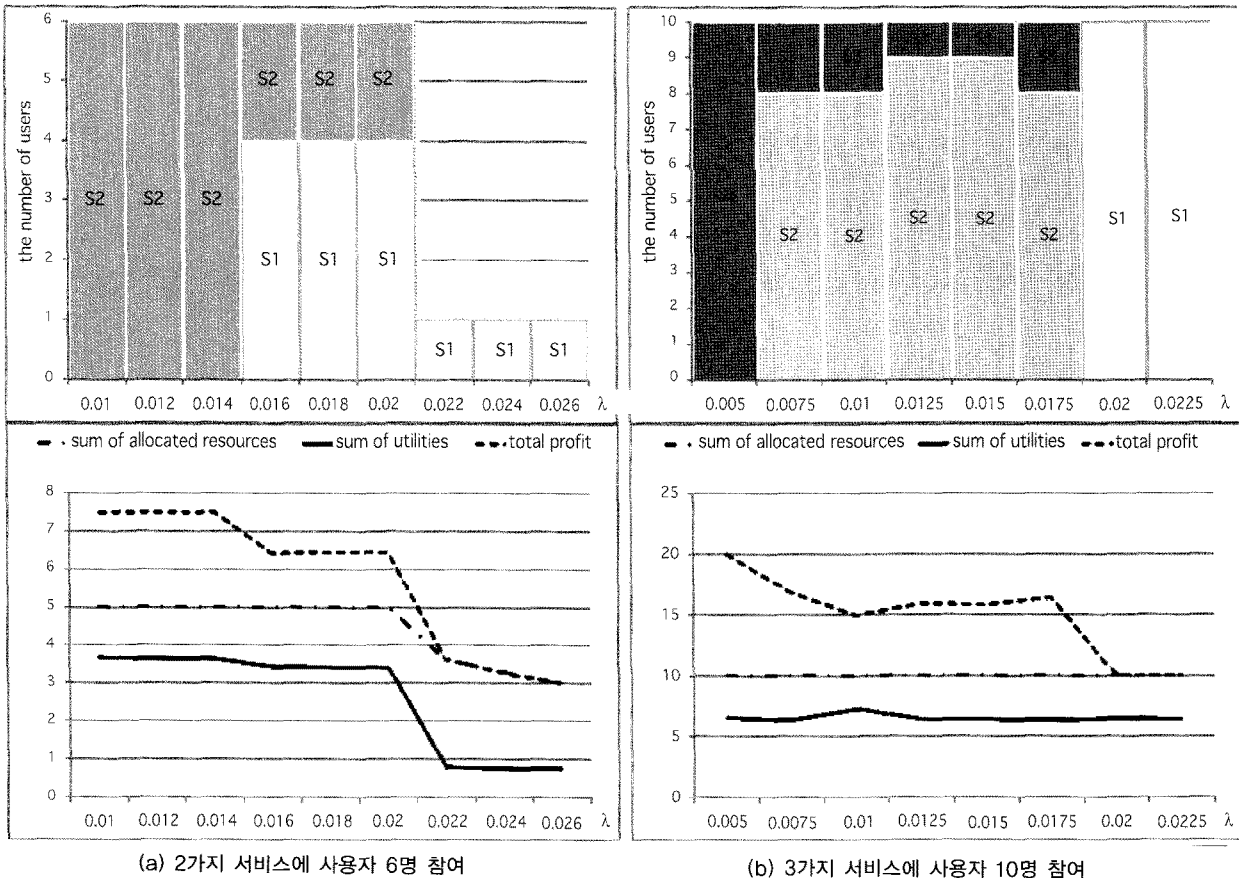
(그림 7) 가용 자원의 변화에 따른 평균 품질 변화 및 표준 편차

우리는 가격 및 품질이 서로 다른 차별화된 멀티미디어 서비스를 제공하는 경우 사용자들이 어떻게 서비스를 선택하는지에 관한 가상 실험을 수행하였으며, (그림 8)은 두 가지 실험을 보여주고 있다. 사용자가 자신의 환경에 맞게 여러 차별화된 서비스 중에서 하나를 선택하면, 서비스 제공자는 KSBS를 적용하여 여러 사용자들에게 무선 자원을 할당하였다.

(그림 8)에서 첫 번째 실험은 두 가지 차별적 서비스(S1, S2)가 있을 때 가격조정 변수 λ 에 따른 사용자 6명의 서비스 이용 상황을 보여준다. 가격조정 변수 λ 이 작은 경우에는 가격이 상대적으로 싸므로 고가 서비스(S2)에 6명이 모두 가입하게 되고, λ 이 커질수록 서비스 가격이 비싸지므로 저가 서비스(S1)로 옮겨가다가 1명만 서비스에 남게 된다. 꺾은

선 그래프는 λ 이 커질수록 총 자원 할당량, 총 효용, 서비스 총수입이 점차 감소하는 과정을 보여준다. 두 번째 실험은 세 가지 차별적 서비스(S1, S2, S3)가 있을 때 λ 에 따른 사용자 10명의 서비스 이용 상황을 보여준다. 마찬가지로 λ 이 커질수록 저가 서비스(S1)로 옮겨가면서 총 자원 할당량, 총 효용, 서비스 총수입이 점차 감소하는 과정을 보여주고 있다.

제시된 실험은 차별화된 서비스를 동시에 제시할 경우, 가격과 품질에 따라서 사용자들이 자신의 서비스 품질 및 이용 가격에 따라서 적절한 서비스를 선택하는 과정을 보여준다. 이는 나아가 무선 서비스 제공자가 서비스 가격과 서비스 품질을 조정함으로써 사용자들의 서비스 분포를 조절할 수 있으며, 제공자 입장에서의 적절한 정책을 수립할 수 있음을 시사하고 있다.



(그림 8) 가격조정 변수 λ 에 따른 서비스 할당 결과
(막대그래프는 서비스별 사용자 분포, 꺾은선그래프는 총 자원 할당량, 총 효용합, 서비스총수입)

V. 결론 및 향후 연구방향



무선통신에 게임이론을 적용하는 연구가 시작된 것은 2천년대 초반이며, 모바일 비디오 서비스에 적용하는 이제 시작단계이다. 앞으로 모바일 채널에서 비디오가 중요한 트래픽이 될 것이라는 점에도, 또한 사람들이 점점 모바일 비디오 서비스에 익숙해지고 있다는 점에서 이 분야의 중요성은 커질 것이다. 더구나, 비디오 서비스에 대한 만족은 인간이 직접 느끼고 판단하는 것이기 때문에 효율 함수를 만드는데 주관적인 지표를 고려한 연구가 필요하다. ITU-T에서는 QoE(Quality of Experience)라는 평가척도를 표준화하고 있다.

앞으로 비디오 서비스를 지원하는 모바일 망의 특성도 점점 다양화해가고 있다. 지금까지는 BE(Best Effort) 기반이지만, 앞으로는 모바일 채널의 지능(intelligence)이 높아짐에 따라 QoS 보장 프로토콜이 점점 일반화되어 갈 것이다. 예를 들어, IEEE802.16(WiBRO, WiMAX)에서는 5가지 정도의 우선순위 단계로 나누고 있다. 이 경우에는 사용자마다 계약에 따라 권한이 달라지게 되므로 새로운 게임의 양상이 된다. 최근 뜨거운 감자인 TV white space와 CR(Cognitive Radio)의 경우에는 한 장소에서도 WLAN, 2G, 3G, WiBRO 등 여러 가지 모바일 채널에 연결될 수 있으며, 사용자는(또는 사용자의 단말기는) 비용과 서비스 품질면에서 가장 적합한 채널을 택한다는 coexistence 개념으로 바뀌고 있다.

비디오 서비스에서도 one-source multi use(OSMU)의 개념에 따라 하나의 비디오 서비스에 대해 다양한 품질을 선택할 수 있다. 본문에서는 SVC를 이용하여 다양한 시공간적 품질을 선택하는 예를 보였지만, 앞으로는 2D와 3D 입체를 선택할 수도 있게 된다. 그 크기도 SD(Standard Definition), HD(High Definition)에서 UHD(Ultra High Definition)으로 커지고 있다.

게임의 재미는 불확실성에서 온다. 결론에서 설명했듯이 앞으로 모바일 비디오 서비스에는 다양한 불확실성이 생기게 된다. 여러분들도 이 게임을 즐기게 되길 바란다.

- [1] Z. Han, Z. Ji and K. J. Ray Liu, "Fair Multiuser Channel Allocation for OFDMA Networks Using Nash Bargaining Solutions and Coalitions," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, pp. 1366-1376, Aug. 2005
- [2] H. Park and M. van der Schaar, "Bargaining Strategies for Networked Multimedia Resource Management," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, pp. 3496-3511, July 2007.
- [3] A. Laufer and A. Leshem, "Distributed coordination of spectrum and the prisoner's dilemma," *First IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 94-100, Nov. 2005.
- [4] Y. Xiao, X. Shan and Y. Ren, "Game theory models for IEEE 802.11 DCF in wireless ad hoc networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, pp. S22-S26, Mar. 2005.
- [5] E. Rasmusen, *Games and Information: an Introduction to Game Theory- 4th edition*, Blackwell Publishing, 2007.
- [6] W. Nicholson, *Microeconomics Theory- 8th edition*, Thomson Learning, 2002.
- [7] wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Game_theory
- [8] 박주현, *게임이론의 이해*, 해남, 2001.
- [9] W. Ding, "Joint encoder and channel rate control of VBR video over ATM [] networks," *IEEE Trans. Circuits Systems for Video Technology*, Vol. 7, No. 2, pp.266-278, 1997.
- [10] Ortega, K. Ramchandran, and M. Vetterli, "Optimal trellis-based buffered compression and fast approximations," *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 3, No. 1, pp. 26-40, 1994.
- [11] M. Felegyhazi and J.-P. Hubaux, *Game Theory in Wireless Networks: A Tutorial*, Lausanne, Switzerland, 2006.
- [12] A. Fattahi, F. Fu, M. van der Schaar, and F. Paganini, "Mechanism-Based resource allocation for multimedia

transmission over spectrum agile wireless networks,”
IEEE Journal on Selected Areas in Communications,
Vol. 25, No. 3, pp. 601-612, 2007.

- [13] F. Fu, T. M. Stoenescu, and M. van der Schaar, “A Pricing Mechanism for Resource Allocation in Wireless Multimedia Applications,” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Process, Vol. 1, No. 2, pp. 264-279, 2007.
- [14] 이덕주, 홍인기, “통신시스템을 분석하기 위한 도구로서의 게임이론,” 본 잡지 본 호에 실려 있음.



약 력



서 덕 영

1980년 서울대학교 핵공학 공학사
1986년 미국 조지아텍 핵공학 공학석사
1990년 미국 조지아텍 전기및컴퓨터공학 공학박사
1990년 ~ 1992년 생산기술연구원 HDTV 개발단 선임연구원
1992년 ~ 현재 경희대학교 전자정보학부
관심분야 : networked video



정 재 윤

1999년 서울대학교 공학사
2001년 서울대학교 공학석사
2005년 서울대학교 공학박사
2005년 ~ 2006년 아인트호벤공대 정보시스템학과 초빙연구원
2006년 ~ 2007년 서울시 유비쿼터스컴퓨팅 원천기술지원센터
2007년 ~ 현재 경희대학교 산업경영학과 전임강사
관심분야 : 기업정보시스템, 인터넷 비즈니스, 유비쿼터스 서비스



이 용 현

2006년 경희대학교 전자공학 공학사
2008년 경희대학교 전자공학 공학석사
2008년 ~ 현재 경희대학교 전자공학 박사과정
관심분야 : networked video, QoS, 게임이론