게임이론과 그 응용

김승욱
서강대학교

요 약

수학을 기반으로 경제학에서 널리 사용되던 게임이론이 최근 네트워크 디자인 분야에서 중요한 수단으로 활용되고 있다. 통신 네트워크에서 게임이론의 응용 분야로는 혼잡 제어, 네트워크 라우팅, 네트워크 부하균형, 통신보안, 대역폭 가격선정, 무선 협력통신, 트래픽 컨트롤, 전력제어, 자원 할당과 서비스 품질 보장 등 다양한 분야가 존재한다. 본 고에서는 최근 주목받고 있는 게임이론의 기본개념과 발전해온 역사, 그리고 대표적인 게임모델들에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

Ⅰ. 서 론

일생을 살다보면 우리는 자신의 행동뿐만 아니라 타인의 행동까지 고려해서 결정을 내려야 할 경우를 수없이 많이 보게 된다. 이러한 경우의 공통점은 상호간의 행동이 서로 영향을 주는 관계이며, 이러한 상황을 게임이 있는 상황 (game situation)이라고 한다. 다른 말로 표현하면 게임적인 상황이란 나의 선택이 타인에게 영향을 미치고 그로 인한 타인의 행동 변화가 다시 나의 결과에 영향을 미치게 되는 상황을 말하는데 결국 행동의 결과가 상호의존적인 상황이라 할 수 있다. 이런 상황하에서는 상대방의 행동에 대한 예측이나 기대를 바탕으로 나의 행동을 결정하는 전략적 행동이 합리적인 행동이 된다. 다양한 예를 확장시켜 생각해 볼 때 우리는 일상생활에서 의식적이든 무의식적이든 게임의 상황에 참여하고 있으며 인간의 사회적 행태와 경제사회의 현상을 파악하는데 게임적인 상황을 이해하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다[1].

게임이론이란 이러한 게임이 있는 상황에서 어떻게 합리적으로 전략적인 행동을 취해야 하는 것인가를 연구하는 합리적 행동이론이다. 따라서, 게임이론에서는 경쟁주체가 상대방의 행동을 고려하며 자신의 이익을 효과적으로 달성하기 위한 최선 전략을 어떻게 합리적으로 결정할 것인가를 수학적으로 분석하고 자신의 선택이 어떻게 상대방의 결정에 영향을 미치고 역으로 상대방의 전략이 자신에게 어떤 영향을 미치는가를 감안해 게임의 참여자가 결정을 내리는 것에 대해 이론적으로 설명한다. 게임이론에서는 이해가 대립하는 상황에서의 합리적 행동의 기준으로서 종래 생각해오던 최적화의 원리 중 그 어느 것에도 볼 수 없던 새로운 접근방식을 제안하고 있으며 게임이론 그 자체가 수학을 기반으로 사회과학적 방식으로 답을 찾아가는 형식을 취한다[2][3][4].

기존의 사회과학 이론인 행동이론 (behavioral theory)에서는, 주로 이론의 결과가 어느 정도 실제의 행위자가 하는 행동과 일치하는가, 또 그로 인하여 얼마나 정확히 장래의 행동을 예측할 수 있는 것인가에 중점을 둔다. 이에 비해, 게임이론에서는 행위자의 행동을 다른 방식으로 해석한다. 일반적으로 게임이론에서는 해석방식에 따라 기술적 해석 (descriptive interpretation)과 규범적 해석 (normative interpretations)이 존재한다. 기술적 해석에서는 게임이론을 행동 이론과 같이 실제의 인간 행동과의 일치를 구하는데 중점을 둔다. 즉, 주어진 게임 상황에서, '합리적 인간이라면 어떻게 행동할 것인가'를 예측하려 하는 것이라고 볼 수 있고 게임의 균형을 찾는 것으로 경기자의 행동을 예측할 수 있다고 생각한다. 하지만 경기자들이 어떻게 균형으로 도달할 것인가에 대한 문제는 여전히 미해결 문제로 남아있다. 규범적 해석에서는 게임이론을 경기자의 행위를 예측하는 수단으로 보지 않고 어떻게 행동해야 하는지에 중점을 둔다. 그러므로, 게임이론의 적용을 통해 얻은 결과가 그렇지 않았을 때의 결과보다 더 나은지에 관심을 둔다 [5].

부분적 한계에도 불구하고 오늘날 게임이론은 경쟁과 협력을 논의하기 위한 최선의 방법론을 제공한다. 현대에 와서 게임이론은 경제학 (재화의 효율적 분배, 경매, 독과점분석), 경영학 (본인-대리인의 문제, 기업간 경쟁과 협력문제), 재정학 (자산가격 결정문제), 정치학(투표자 행위분석, 투표거래, 정책의 제휴, 정치협상모델, 군축), 사회학 (사회교환이론), 법학(독점 금지법, 파산법), 컴퓨터 공학(네트워크 자원관리, 보안, 통신제어), 언어학 (진화적 언어학습), 군사학 (전쟁전략), 생물학 (진화게임이론), 순수 철학(죄수의 딜레마에 기반한 인식론과 윤리

철학), 심리학, 종교학, 물리학 (퀀텀 게임) 등 예술과 문학, 의학 분야를 제외한 전 분야에 적용되고 있다. 따라서 이제 게임이론은 단순한 이론 (theory)으로 존재하기 보다는 수많은 이론들이 모여 다양한 분야에 일반적으로 적용가능한 보편적인 방법론으로 진화하였기에 게임 패러다임 (game paradigm)이라 불리기도 한다.

Ⅱ. 게임이론의 역사

게임이론의 기원은 기원전 바빌로니아 시대까지 거슬러 올라갈 수 있다. 당시 씌여진 바빌로니안 탈무드에서는 재산분배 문제에 대해 자세히 서술하고 있는데 최근 연구에 의해 탈무드에 나타난 상속에 관한 계약결혼문제 (marriage contract problem)의 해법이 현대에 제안된 협력게임의 해법과 완전히 일치하다는 것이 증명되었다[2]. 이와함께, 중국의 고문서들과 역사적인 각종 문헌들에서 게임이론의 기본개념을 적용한 많은 사례가 발견되고 있다. 이와 같은 이유는 게임이론이 지능적인 행동으로 직접적인 경쟁을 하는 인간의 흥미로운 활동과 연관되기 때문에 자신이 처한 상황을 게임모델로 구성하여 적용해 봄으로써 각자의 지능적 능력을 시험해보고 개선할 수 있으며 그로인해 얻게되는 이익을 평가할 수 있기 때문이다.

근대에 들어서 게임이론의 연구는 1838년에 쿠르노 (Cournot, 1838), 버틀란드(Bertland)등의 학자에 의하여 시작되었다. 그들은 과점분야에서 기업이 어떻게 생산량 및 가격을 결정하는가 하는 문제에 초점을 맞추어 분석하였으나, 아주 특수한 경우에 국한된 모형만 제안하였기에 이를 게임이론의 일반적 시초로 보기에는 무리가 있다. 1871년에는 다윈(Darwin)이 자연도태가 균형인 성비가 되도록 맞추는 역할을 할 것이라고 주장하였는데 이는 나중에 진화게임 이론의 단초가 되었다. 1881년에는 에지워스 (Edgeworth)가 둘 간의 거래의 결과를 결정하는 문제의 해로써 계약 곡선을 제안하였고 이 핵심개념을 일반화하였다. 1921년에서 1927년동안 보렐 (Borel)은 보수행렬이 대칭일 때 두 명의 제로섬 행렬 게임의 최소-최대화 이론을 증명하였고, 1928년에는 폰 노이만 (von Neumann)이 기존의 최소-최대화 이론을 그만의 방식으로 설명하고 브라쉐 (Brouwer)의 고정점 이론에 기반해 표준 게임 방법을 제안했다. 그는 이를 기반으로 두 명의 제로섬 게임에서 혼합 전략이 허용될 때 많은 순수 전략 중 단 하나의 합리적인 보수벡터해가 존재함을 보였다. 1930년에는, 덴마크 수학자 쥬덴 (Zeuthen)이 고정점 이론에 기반해 협상 문제에 대한 기본적인 해법을 제안했다. 그 후, 하샤니 (Harsanyi)는 그것이 내쉬 협상 해와 같음을 보였다. 현실적 시장분석 모델로는 1934년에 독일의 경제학자 슈타켈버그 (Stackelberg)가 제안한 두 명의 서로 다른 결쟁자에 기반한 계층적 전략게임 모델이 있다[2].

위에서 서술한 것처럼 게임이론에 대한 다양한 노력과 많은 기여자들의 학문적 공헌이 있었음에도, 1944년 폰 노이만과 모르겐슈테른 (Morgenstern)이 '게임의 이론과 경제적 행태 - 'Theory of Games and Economic Behavior'라는 제목의 책을 출간하기 전까지는 실제로 고유한 학문분야로 존재하지 않았다. 이 책은 두 명의 제로섬 게임에서 상호간의 지속적 해법을 찾는 방법을 포함하고 있고, 또한 불확실한 상황에서 결정할 수 있는 기대효용이론(expected utility theory)을 분석한 책으로도 잘 알려져 있다[1][2].특히 경제학에 있어서의 수리적 이론을 이용해 게임이론을 정립함으로써 사회 과학자들의 흥미를 끌기 좋은 형식으로 구성되어 있어서 삽시간에 경제학, 정치학 그리고 사회학 분야에 걸쳐 큰 영향을 끼치게 되었다. 이후 1950년대는 게임이론 연구의 황금기로 코어(core)의 기본개념과 확장형 게임, 가상게임, 반복게임, 매칭게임과 샤플리 밸류 (Shapley value)등이 제안되었다[6]. 코어란 경기자가 어떠한 연합 (coalition)을 이루어도 더 좋은 조합이 되지 못하는 해의 집합이고 샤플리 밸류는 연합의 해집합 중 공평성이 고려된 하나의 유일한 해를 의미한다. 샤플리 밸류는 미국의 수학자 샤플리 (Shapley)에 의해 처음 제안되었는데 그는 먼데러 (Monderer)와 함께 확률적 게임과 잠재적 게임의 개념을 개발하기도 했다[2]. 또한, 이 시기에 죄수의 딜레마에 대한 개념이 소개되었고 이에 따라 모든 게임의 경기자들이 이성적으로 행동하는 해인 균형점 (Equilibrium) 전략을 찾는 방식에 대한 많은 연구결과가 발표되었다. 제안된 방법들 중 가장 유명한 것은 존 내쉬 (John Nash)가 제안한 내쉬 균형으로 이는 비협력 게임의 분석을 가능하게 하는 매우 일반적인 기법이되었다. 내쉬는 또한 협상 이론과 위협과 약속들이 충분히 구속력있고 강제로 시행될 수 있는 검증된 협력 게임에도 큰 기여를 하였다. 또, 이 시기에, 게임이론이 처음으로 철학과 정치학에 적용되기 시작하였다[1][2]. 1954년에 슈빅 (Shubik)과 이삭 (Isaacs)에 의해 개발된 다양한 게임모델들이 정치학에 적용되었는데 이는 국가간 군비경쟁의 이론적 배경이 되었으며 1955년에는, 브라이스와이트 (Braithwaite)가 철학에 처음 게임이론을 적용하였다.

1961년에 비커리 (Vickrey)는 새로운 유형의 봉인 입찰 경매인 차가경매 (second-price auction) 방식에 대한 이론적 근거를 제시하였다. 차가경매에서 입찰자들은 다른 사람들의 입찰가를 모르는 상태에서 자신의 입찰가를 제출하고, 가장 높은 입찰가를 가진 사람이 입찰받지만 지불금은 두 번째로 높은 금

액으로 결정한다[9]. 1965년에는 젤턴 (Selten)이 모든 부분 게임에서 경기자들의 전략이 내쉬 균형을 구성한다는 부분게임 완전 균형개념 (sub-game perfect equilibrium)을 제안하였고 1967년에는 하샤니가 경제게임 모델에서 완전 정보와 베이지안 게임의 기본 개념을 개발하였다. 이 연구는 경제학과 게임이론의 주요 주제가 되는 정보 경제학의 이론적 초석이 되었다. 특히 젤튼과 하샤니는 확장형 게임에 필요한 새로운 개념을 많이 고안해 냈는데, 기본적인 게임에서 경기자들이 상대방 보상을 모르는 경우를 불완전정보하의 게임이라 정의하고 이 문제를 베이지안 내쉬균형개념을 도입하여 해결함으로 게임이론의 새로운 지평을 열었다. 이후, 게임이론의 연구는 급속한 진전을 보게 되어 메커니즘 디자인 (mechanism design), 비선형 가격차별, 최적 경매, 공공경쟁에서 선호를 나타내는 문제, 그리고 협상모형 등에 활용되었고, 완전균형 (perfect equilibrium), 축차적 균형 (sequential equilibrium)등 새로운 개념들이 많이 등장하게 되었다[2]. 1969년에는 슈메이들러 (Schmeidler)가 코어의 개념을 확장하여 공평성을 추가한 해인 중핵 (Nucleolus)의 개념을 제시하였고 셸링 (Schelling)은 게임 경기자들이 다수의 해 중 하나를 선택할 때 무언의 합의를 갖게 된다는'관심의 초점'이라는 개념을 도입해서 게임모형을 설명하였다.

1970년대에 들어와서 게임이론은 생물학에 적용되기 시작하였다. 1972년에 스미스 (Smith)는 진화 게임 모델과 진화 안정 전략(ESS)의 개념을 제안하였다[10][11]. 진화 게임은 반복적인 상호작용의 분석을 위한 동적 프레임워크와 합리적 해의 개념을 제공하였다. 1973년에 스펜서 (Spence)는 구인시장에 적용가능한 신호게임 모델을 제안하였고 이는 차후, 스크린 게임으로 확장되었다. 1974년에 아우만 (Aumann)은 게임모델에서 내쉬 균형보다 더욱 일반적인 해법인 상관 균형 (correlated equlibrium)의 개념을 제안하였고 1975년에 칼라이 (Kalai)와 스모로딘스키 (Smorodinsky)는 새로운 협상게임의 해법을 제안하였다[12]. 1960-1970년대에 걸쳐 후르비츠 (Hurwicz), 머스킨 (Maskin) 그리고 마이어슨 (Myerson)은 메커니즘 디자인의 기본개념을 제시하였는데 기본적인 아이디어는 경기자들이 각자의 개인 정보를 정직하게 밝히는 것이 우위전략이 되도록 게임의 룰을 정의하는 것으로 향후 다양한 게임모델 개발의 기초가 되었다[13][14]. 1982년에 루빈스타인 (Rubinstein)은 비협력적인 협상을 고려하여 대안제시 협상게임의 해를 고안하였고 동시에 이 모델에서 부분게임 완전 균형이 유일하게 존재함을 보였다. 1988년에는 하샤니와 젤턴이 균형들 사이의 적용 가능한 일반적인 선택 이론을 제안하였는데 어떤 비협력이나 협력 게임에도 특정 균형점을 선택하는 기준이 되었다.

게임이론은 1994년에 내쉬, 젤튼 그리고 하샤니가 노벨 경제학상을 수상하면서 학문적으로 특별한 관심을 받기 시작했다. 그 이후로, 많은 게임 이론가들이 노벨 경제학상을 수상하였다 (1996, 2001, 2005, 2007, 2012년). 1990년대 말, 게임이론은 이동 통신 산업에서 스펙트럼 대역 사용을 위한 권한을 할당하는 경매를 디자인하는데 실제로 적용되어 그 효율성을 입증 받았고, 오늘날에는 인간을 포함한 무인 경기자들 (컴퓨터, 동물, 에이전트, 통신기기)을 위한 다양한 게임모델들이 개발되어 사용되고 있다.

Ⅲ. 게임이론의 구분 및 적용

게임이론에서 상정하는 게임의 종류는 그 기준에 따라 여러가지로 나뉠 수 있다[2]. 첫째, 게임이 동시에 일어나는지 혹은 순차적으로 일어나는지에 따라 동시게임과 순차게임으로 나눈다. 동시게임이란 각 선수들이 한 번의 전략을 선택한 후 게임이 끝나는 경우를 의미하며, 순차게임은 각 선수가 전략을 선택한 후 그 결과를 보고 다시 전략을 선택하는 과정을 수회에 걸쳐 행한 후에 나타난 결과에 따라 보상을 받는 게임을 말한다. 동시게임은 1회 게임(one-shot game) 또는 정적 게임(one stage game)이라 할 수 있고 순차 게임에서 동일한 게임을 여러번 반복해서 하는 경우를 특히 반복게임(repeated game)이라 한다[15][16]. 둘째, 게임에서 상대방과의 협조가능성에 따라 협조게임과 비협조 게임으로 나눌 수 있다. 협조게임은 게임에 참여하는 경제주체들 전체 혹은 일부가 연합(coalition)을 이루어 그들 사이에 강제가 아닌 자발적으로 구속력 있는 계약(binding agreement)을 맺을 수 있는 상황을 분석한다. 구속력 있는 계약이란 한 경제주체가 그 계약을 위반할 경우, 법과 같이 권위있는 제 삼자에게 호소하여 다른 경제주체들이 계약 내용을 위반한 사람을 처벌할 수 있는 것을 말한다. 비협조적 게임은 게임의 규칙에서 허용하는 구속력 있는 계약은 맺을 수 있지만, 게임의 규칙에 있지 않는 어떤 다른 계약도 구속력을 가지지 못하는 경우를 의미한다. 협조적 게임 이론은 다중 사용자들이 어떻게 하면 한정된 자원을 효율적이고 공평하게 공유할 수 있는지에 초점을 맞추며, 비협조적 게임 이론은 여러 의사 결정자들이 서로 영향을 미치는 환경에서 상호 영향에 따른 성능을 분석하고 그로부터 합리적인 의사 결정을 유도하는데 초점을 맞춘다. 셋째, 보수의 합이 제로가 되는지 아닌지의 여부에 따라 제로섬게임과 비 제로섬 게임으로 나눌 수 있다. 제로섬 게임은 각 선수가 어떤 전략을 택하든지 그 결과로서 보상의 합이 0이 되는 경우의 게임을 말하며, 한 사람이 좋으면 그만큼 상대 사

람은 나쁜 결과를 초래하는 게임이므로 협상이 이루어질 수 없는 특징이 있다. 이러한 제로섬 게임이 아닌 모든 게임은 비제로섬 게임이 된다. 넷째, 게임에 대한 정보, 특히 상대방 전략에 대한 정보를 완전히 알 수 있는지 여부에 따라 완전정보게임과 불완전정보게임으로 나뉜다. 완전 정보게임은 선수, 전략집합, 전략에 따른 보상 등 각 선수에 대한 모든 사항을 알고 시작하는 게임을 말하며, 불완전 정보게임은 이러한 사항 중 적어도 하나는 모르는 경우의 게임으로서 특히 상대방의 보상을 모른다고 가정하는 경우가 일반적이다.

본 고에서는 다양하게 존재하는 게임이론의 모델 중 대표적으로 널리 사용되는 진화게임, 네쉬협상게임, 샤플리 밸류 그리고 메커니즘 디자인에 대해 간략히 알아본다.

1. 진화게임이론 (Evolutionary Game Theory)

주어진 환경에서 보다 적합한 유전자를 가진 개체가 그렇지 않은 개체보다 더 많은 자손을 갖게 됨으로써, 시간이 지남에 따라 그 환경에 적합한 유전자를 가진 개체의 수가 점점 늘어나게 되는 과정을 묘사한 게임이론이 진화게임이론(Evolutionary game theory)이다. 이 이론에서 분석되는 게임모형은 경기자가 속한 집단의 구조와 함께 경기자 자신이 속한 집단으로부터 선발되고 결합되는 방식도 고려하는 집단게임모형 (population game model)이라는 점에서 보다 복잡한 구조를 갖는다. 진화게임이론은 게임이론을 이용해 각 개체들의 전략에 따라 다른 개체와 상호작용을 통해 개체수의 변화를 나타낸다. 이러한 상호작용 속에서 보다 우월한 전략을 보유한 개체의 묘사를 통해 시간이 지남에 따라 전략이 어떻게 서로 영향을 주는가에 초점을 두고 있다. 진화게임은 진화적 안정전략(Evolutionary Stable Strategy)과 부모의 전략선택을 자식은 유전적으로 그대로 물려받는다는 원리에 기초한 가변 복제량(Replicator Dynamic)으로 설명가능하다[10][11].

진화적으로 안정된 전략이란 개체군의 대다수 구성원에 의해 일단 수용되면 다른 대체 전략이 능가할 수 없는 전략이다. 바꿔 말하면 개체로서 최선의 전략은 개체군의 대부분이 행하고 있는 전략이라는 것이다[10]. 이 해 개념은 한 생물집단에 돌연변이 (mutation)가 언제든지 나타날 수 있는데, 만일 그 생물집단이 안정적인 균형 상태에 있다고 한다면 기존의 개체가 선택하고 있는 전략은 어떠한 돌연변이가 나타나 새로운 전략보다 더 높은 보수를 얻는다는 의미에서 우월한 전략이어야 한다는 사실에 착안하고 있다. 즉 게임을 할 때 우수한 전략이 결국은 살아남는다는 원칙이 확립되었고, 게임을 반복시키면 주어진 정보와 계산능력이 제한되어 있더라도 경험을 통한 학습을 이용하여 진화과정을 설명할 수 있다.

게임에 참여한 경기자 대부분이 선택한 안정된 전략을 s^*, 임의의 돌연변이전략 s에 대하여 돌연변이 비율 ε이라고 한다. $J(s^*|s)$는 s전략에 대응하여 s^*전략을 선택한 보수함수로 정의한다면 다음과 같은 식을 만족한다.

$$J(s^*|(1-\varepsilon)s^*+\varepsilon s) > J(s|(1-\varepsilon)s^*+\varepsilon s) \tag{1}$$

여기서 $(1-\varepsilon)s^*+\varepsilon s$는 돌연변이가 일어난 후의 집단 내 전략분포를 나타내고 있다. 즉, 비율 $(1-\varepsilon)$의 경기자가 전략 s^*를 선택하고, 비율 ε의 경기자가 전략 s를 선택하고 있는 상태이다. 따라서 돌연변이 전략보다 높은 보수함수를 취하고 있기 때문에 진화적으로 안정된 전략이라고 말할 수 있다. $\varepsilon \ll 1$ 임의로 이것을 다시 표현하면

$$J(s^*|s^*) > J(s|s^*) \tag{2}$$

전략 s^*에 대한 최선의 대응 전략은 s^*임을 의미한다. 식 (2)는 집단 내의 모든 경기자가 전략 s^*를 선택하고 있을 때 그 집단에 속한 한 경기자에게 최선의 대응전략은 같은 전략 s^*임을 의미한다.

$$J(s^*|s^*) = J(s|s^*)\ and\ J(s^*|s) > J(s|s) \tag{3}$$

식 (3)로 표현된 두 번째 조건은 어떤 돌연변이 전략 s가 진화적 안정전략 s^*에 대하여 최적대응일 경우에는 전략 s를 상대로 게임을 할 경우에 s^*가 s보다 우월한 전략임을 의미한다.

이것은 매(Hawk)와 비둘기(Dove) 게임을 통해 살펴볼 수 있다 [2]. 매와 비둘기 게임은 두 종류의 새들이 만나는 게임으로서, 두 동물이 일정한 가치 를 놓고 경쟁하고 있다고 가정한다. 매는 공격을 상징하고 비둘기는 평화를 상징한다.

1) 비둘기끼리 만나면 서로 평화를 추구해 $\frac{V}{2}$ 을 얻는다.
2) 만약 매와 매가 만나면 서로 상처를 입히므로, 그 결과 서로 $\frac{V-C}{2}$ 을 얻는다.
3) 마지막으로 매와 비둘기가 만나면 비둘기가 매 에게 양보하게 되어 매는 V를 얻는 반면 비둘기 는 0을 얻는다.

이를 표로 나타내면 〈표 1〉과 같다.

여기서 논하는 것은 매와 비둘기 전략 중 어느 것이 진화적으로 안정된 전략인가 하는 것이다. $V > C$ 인 경우, 매의 전략이 ESS 이지만, 불행히도 $V < C$ 인 경우에는 매의 전략과 비둘기

표 1. 매와 비둘기 게임

	Hawk(H)	Dove(D)
Hawk(H)	$(\frac{V-C}{2}, \frac{V-C}{2})$	$(V, 0)$
Dove(D)	$(0, V)$	$(\frac{V}{2}, \frac{V}{2})$

의 전략 중 어느 것도 ESS 가 아니다. 만일 전부 비둘기로만 구성되어 있는, 다시 말해서 구성원 모두가 늘 비둘기의 전략만 취하는 집단에 매 한 마리가 돌연변이에 의해 또는 이웃 집단으로부터 건너와 나타나면, 그 매는 모든 싸움에서 승리할 것이고 그로 인해 다음 세대에는 더 많은 매들이 나타날 것이다. 반대로 처음에는 매들만 있던 집단도 시간이 차면서 차츰 비둘기가 많아질 수도 있다. 따라서 순전히 매나 비둘기의 전략만을 고집하는 것은 ESS 가 될 수 없다. 한 종류의 수가 많아질수록 다른 쪽이 살아남을 가능성이 커질 수 있기 때문이다. 따라서 둘 모두 섞여있는 혼합 전략 $s^* = pH + (1-p)D$ 이 ESS 이다.

게임이 끝나고, 이에 따라 모든 구성원들이 자신의 전략과 상대방의 전략에 따라 보수를 획득하게 되면 이를 기초로 전략을 수정하며 진행하게 된다. 가변 복제량은 다음과 같은 과정을 통해 진행된다. 하나의 전략을 선정하였을 때, 첫째로는 다른 경기자가 선택한 전략이 다르고, 두 번째로 다른 경기자가 선택한 전략이 자신이 얻은 보수보다 크다면, 다른 경기자의 전략을 배워 자신의 다음 전략으로 삼는다. 즉, 어떤 전략이 집단의 평균 보수보다 높은 보수를 얻으면 그 전략의 집단 내에서의 비율은 증가하고, 그 반대의 경우에는 이 비율이 감소하게 된다. 이러한 과정을 통해 어떤 전략이 주어진 환경 하에서 더 상대적으로 높은 보수를 얻는 경향이 있다면 그 전략을 사회에 전파시켜 나가게 된다. 다양한 전략들의 개체군에 대한 진화과정을 묘사한 것이 가변 복제량이며, 과정의 반복으로 어느 전략의 비율도 바뀌지 않는 것을 동태적 균형(dynamic equilibrium)이라고 한다[11].

먼저 각 경기자에게 n개의 순수전략이 허용되고 게임의 보수함수가 $(n \times n)$ 행렬 A로 주어진 대칭적 게임에서, 각 경기자가 순수전략만 선택한다고 가정할 때 유도되는 가변 복제량은 다음과 같은 미분 방정식으로 정의된다.

$$\dot{x}_t(t) = \dot{x}_t(t) \times \{Ax(t) - x(t) \times Ax(t)\}, i = 1,2, \ldots, \quad (4)$$

여기서, $x_i(t)$는 시간 t에서 순수전략 i의 집단 내에서의 비율을, $x(t)$는 $x_i(t)$를 성분으로 갖는 $(n \times 1)$ 벡터로서 순수전략의 집단 내에서의 분포를 나타낸다. 그리고 $\dot{x}_t(t)$는 $x_i(t)$의 시간에 대한 미분, 즉 $x_i(t)$의 시간에 따른 변화율을 의미한다. $Ax(t)$는 순수전략 i의 기대보수를 뜻하고 $x(t) \times Ax(t)$는 집단 내 모든 전략의 평균보수를 의미하므로, 가변 복제량에 따르면 경기자집단 내에서 각 순수전략의 비율의 성장률은 그 순수전략의 기대보수와 집단 내 모든 전략의 평균보수와의 차가 된다. 즉, 어떤 전략이 집단의 평균보수보다 높은 보수를 얻으면 그 전략의 집단 내에서의 비율은 증가하고, 그 반대의 경우는 이 비율이 감소하게 된다.

1.1 진화게임이론의 응용

진화게임이론은 무선네트워크의 적응적 전력제어 기법에 응용될 수 있다. 일반적으로 서비스 QoS 제공 및 신뢰성 있는 전력제어 개발을 위해 주변 노드들의 수 또는 채널 상황에 따라 변화하는 무선 환경을 게임이론을 통해 모델링 할 수 있다. 이와 같은 기법에서는 각 노드들의 다중 홉 통신 과정에서 발생하는 간섭(interference) 정의하여 서로간의 상관관계를 추론하고 시간의 변화에 따른 환경을 예측한다. 무선네트워크의 전력제어를 하는데 있어서 진화게임이론을 적용하면, 실행 가능한 전략들 중에 전략들의 평균 보수함수보다 좋은 전략에 대한 실행 확률을 높여줌으로서 우수한 전략으로 점차적으로 진화해 나가는 과정을 설계해 낼 수 있어 노드들 간의 에너지 효율을 높이면서 네트워크의 총 통신량을 증가시킬 수 있다[11].

2. 협조적 게임 이론에서의 협상 문제와 해법

게임 이론의 한 분야인 협조적 게임 이론 (cooperative game theory)은 사용자들의 효율적이며 공평한 자원 분할에 초점을 맞추고 있다. 특히 협조적 게임 이론의 협상 해법 (bargaining solutions)은 각 사용자들만의 서로 다른 상황을 고려할 수 있기 때문에, 사용자들간 요구 사항이 편차가 큰 경우에서의 자원 관리에 유용하게 사용될 수 있다. 협상 문제는 이익 상충 관계에 있는 다수의 사용자가 자신들의 이익 또는 효용 (utility)를 극대화 하려고 하기 때문에 발생하며, 서로의 의견을 조율하여 사용자들이 어떠한 합의점 (agreement point)에 도달했을 때, 이 합의점을 협상 문제의 해법이라고 한다[8].

공리적 협상 해법은 협상 문제에 대한 해법이 여러 가지의 공리(axioms)를 만족시키는 점에서 결정된다고 설명한다. 여러 공리는 협상 문제에 참여하는 이성적인(rational) 사용자들이 모두 만족할 수 있는 조건들을 특징 짓는데, 그 공리들을 만족하는 협상 문제의 해법은 공유된 자원의 사용 측면에서 효율적이며 자원의 할당을 통하여 얻게 되는 각 사용자들의 효용은 공평하다. 대표적인 공리적 협상 해법은 존 내쉬가 제시한 내쉬

협상 해법 (NBS), 칼리이-스모로딘스키 협상 해법 (KSBS)을 비롯하여 평등협상 해법(EBS), 비례적 협상해법(PBS) 등이 있다[2][8].

협상 문제에 두 명의 경기자가 있고, 유한한 자원을 공유하고 있다고 가정하자. 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)을 이룬다. 이 유효 효용 집합 중 파레토 최적이며 합의 실패점에서의 효용보다 더 큰 효용 집합을 협상 집합 (bargaining set)이라고 한다. 공리적 협상 해법은 이 효용 집합 중에서 하나의 효용쌍 (utility pair)을 결정한다. 그 중에서 NBS는 다음의 공리 1을 통해 효율성을, 공리 2, 3, 4를 통해 공평성을 특징 지으며, 전체 시스템의 효용을 극대화 할 수 있는 장점이 있다[2][3][8].

공리1. 파레토 최적 (Pareto Optimality) : 협상해는 효율성을 만족해야 한다. 즉, 협상해 상태에서는 두 경기자 가운데 한 사람에게 더 많은 보수를 주려면 다른 사람의 보수는 반드시 줄어든다.

다중 사용자 환경에서는 각 사용자들이 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 합의점을 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 해법을 결정하기 위해서는 추가적인 조건들이 필요하다. 이 추가적인 조건들은 각 공리적 협상 해법마다의 독특한 공평성 (Fairness)에 의하여 결정된다. 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[8].

공리 2. 선형 변환에 대한 불변성 (Independence of Linear Transformations): 두 경기자의 보수가 어떤 단위로 측정되든지 간에 협상해가 변해서는 안 된다.

예를 들어, 경기자의 보수 x가 2x+1이라는 단위로 측정되어도 협상해는 동일해야 한다.

공리3. 관련성 없는 대안들에 대한 불변성 (Independence of irrelevant alternatives): 선택가능 대안들이 줄어들더라도 원래의 협상해를 포함하고 있는 이상 새로운 협상문제의 해는 여전히 기존의 협상해와 똑같아야 한다.

예를 들어, 경기자의 선택사양이 X, Y, Z가 있을 때 X를 선택하였다면, X와 Y 두 가지 선택사양만 주어졌을 때에도 마찬가지로 X가 선택되어야 한다.

공리4. 대칭성(Symmetry) : 두 경기자의 신분을 바꾸더라도 협상해가 달라져서는 안 된다.

예를 들어, 경기자 A와 B의 선택 유효 효용 집합을 S, 합의 실패점에서의 효용을 d라고 하고, f_A를 경기자 A의 협상해법 함수, f_B를 경기자 B의 협상해법 함수라 하자. 두 경기자의 신분을 바꾼 선택 유효 효용 집합을 S', 합의 실패점에서의 효용을 d'라할 때, $f_A(S,d) = f_B(S',d')$, $f_B(S,d) = f_A(S',d')$가 성립해야 한다.

공리 1, 2, 3, 4에 의해 결정되는 NBS는 내쉬 곱을 최대화 한다고 알려져 있으며, n명의 경기자가 있을 때의 내쉬 곱 $G(X_1, X_2, \dots, X_n)$는 (3.1)과 같이 정의된다.

$$G(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^{n} (X_i - d_i)^{a_i} \qquad (5)$$

X_i는 자원할당에 따른 경기자 i의 효용이고, d_i는 최악의 경우 협상이 무위로 끝날 때 참가자들이 각자 얻게 되는 합의 실패점 (disagreement point)에서 경기자 i의 효용이다. 그리고 a_i는 경기자 i의 협상에서 경기자들간의 상대적인 힘의 차이를 표현한 협상력 (bargaining power)으로 모든 경기자들의 협상력이 동일할 경우는 생략이 가능하다. 협상력이 서로 같은 경우 같은 자원에 대해 상대적으로 낮은 효용을 갖고 있거나 합의 실패점에서 얻는 효용이 상대적으로 큰 경기자에게 그렇지 않은 경기자에 비해 많은 자원이 할당되며, 협상력이 서로 다른 경우 협상력이 상대적으로 큰 경기자에게 그렇지 않은 경기자에 비해

많은 자원이 할당된다. 즉, 경기자들의 상태(효용함수, 합의 실패점에서의 효용, 협상력)를 고려하여 전체 시스템의 효용을 극대화할 수 있도록 총 자원이 각 경기자에게 최적으로 분배되는 것이다[8].

2.1 협조적 게임이론 응용

내쉬 협상 해법을 응용한 대표적 사례로는 이동 셀룰러 네트워크 환경에서 한정된 자원인 무선대역폭을 효율적으로 사용하기 위한 대역폭 예약 기법이 있다. 셀룰러 네트워크에서 데이터는 일반적으로 음성 데이터와 같은 Class Ⅰ (실시간) 데이터와 멀티미디어 데이터와 같은 Class Ⅱ (비실시간) 데이터로 구분된다. 또한, 서비스의 종류에 따라 핸드오프 서비스와 신규 서비스로 구분한다. 이와 같은 구분은 QoS 제어를 위해 대역폭을 할당하는 우선순위를 정하는데 사용되는데, 서비스의 연속성을 고려해서 신규 서비스보다는 핸드오프 서비스에, 비실시간 트래픽보다는 지연에 민감한 실시간 트래픽에 높은 우선순위를 부여한다. 이 후, NBS를 응용하여 최적의 대역폭 예약량을 결정하는 알고리즘을 설계할 수 있다. 현실적으로 무선 대역폭은 한정되어 있으므로 트래픽의 양이 일정 수준 넘어가게 되면 모든 서비스를 수용할 수 없게 된다. 이와 같은 상황에서 여러 종류의 트래픽이 각기 다른 QoS를 요구할 경우 NBS를 이용하게 되면 각 트래픽에 얼마만큼씩 할당하는 것이 전체 시스템의 효용을 극대화하는지 결정할 수 있다. 먼저 효용함수의 차이를 통해 핸드오프 서비스와 신규 서비스에 할당되는 자원의 양을 결정하고 이후 각 서비스 내에서 협상력의 차이를 통해 실시간 트래픽(음성 트래픽)과 비실시간 트래픽(멀티미디어 트래픽)에 할당되는 자원의 양을 결정한다. 이때, 어떠한 효용함수와 협상력을 적용하느냐에 따라 다양한 QoS를 반영하여 응용될 수 있다[8].

3. 샤플리 밸류(Shapley Value)

효율성과 균등성, 그리고 경기자의 기여에 따른 차등 분배의 조건을 만족하는 분배 방식으로는 샤플리 밸류가 있다[6]. 샤플리 밸류에 의한 분배는 모든 경우에 대해 반드시 하나의 분배점을 찾을 수 있는 것과 협력에 참여한 각 경기자는 협력에 기여한 정도에 따라 분배를 받음으로써 모든 참여자가 만족할 수 있는 장점을 갖는다. 이 두 가지 조건으로 인해 다른 분배 방법보다 합리적인 분배방법으로 인정된다. 이 외에 중핵 (nucleolus)[2]과 같은 분배 방법이 있는데, 중핵은 분배 받는 각 경기자가 분배에 따라 발생할 수 있는 최대 불만족의 크기를 최소화하고자 하는 방법이다. 슈메이들러는 그의 논문에서 중핵에 의한 분배가 효율적이고, 모든 경기자가 합리적이라고 받아드릴 수 있으며, 안정적이라고 주장했으나 메지도 (Megiddo)에 의해 중핵에 의한 분배가 전체로는 일정하지 않다는 것이 증명되었다[2]. 샤플리 밸류는 다른 어떤 방법에 비해 합리적이고 인정되는 수익 분배 방법 중에 하나이다. 샤플리 밸류를 계산하기 위해서 밸류 함수는 다음과 같다.

$$\Phi(v) = \sum_{S\subset A, i\in A} \frac{(|S|-1)!\times(n-|S|)!}{n!} \times (v(S) - v(S-i)) \quad (6)$$

n은 전체 경기자수이고, $|S|$는 집합 S의 개수를 말한다. $v(S)$는 경기자 i가 협력했을 때의 특성함수값이고, $V(S-i)$는 경기자 i를 제외한 나머지 경기자들이 협력했을 때 특성함수값이다. 따라서 $v(S)-v(S-i)$는 경기자 i가 협력했을 때 기여하는 크기와 같고, $\frac{(|S|-1)!\times(n-|S|)!}{n!}$는 각 협력하는 조합의 확률에 해당한다. 따라서 샤플리 밸류는 전체 협력에 각 경기자 가 기여할 것으로 예상되는 기대 값이라 말할 수 있다[2][6].

3.1 샤플리 밸류 응용

샤플리 밸류 기법은 데이터를 다중 라우팅 경로들에게 분배하는데 응용될 수 있다. 단일 라우팅 경로를 이용하여 데이터를 전송하는 것보다 다중 라우팅 경로를 이용하여 데이터를 전송하면 데이터를 전송할 때 참여하는 노드수가 증가하여 몇몇 노드에 데이터가 집중되는 트래픽 혼잡현상을 줄일 수 있는 장점이 있다. 다중 라우팅 경로들을 게임의 경기자라고 가정하면, 한 소스 노드에서 데이터를 전송할 때 다수의 라우팅경로들은 보다 적은 에너지 소비를 통해 소스 노드의 모든 데이터를 전송시키고자 협력을 할 수 있다. 데이터 분배를 위해 다수의 라우팅 경로들의 능력을 특성함수를 이용하여 정의하고 샤플리 밸류를 통해 데이터의 량을 분배할 수 있는데 이 때 라우팅 경로들의 전송 능력 각기 다르기 때문에 똑같이 데이터를 분배 받는 것이 아니라, 전송 능력에 따라 각기 다른 데이터의 전송량을 분배 받는다. 이와 같은 협력적 분배를 통해 노드들의 에너지 소비를 고르게 함으로써 부하균형이 좋아져 전체 네트워크의 수명을 증가시킬 수 있다[6].

4. 메커니즘 디자인(Mechanism Design)

메커니즘 디자인은 미시경제와 게임 이론의 한 분야로써 자신의 의사에 따라 전략적인 선택을 할 수 있는 이기적인 에이전트들로 하여금 어떻게 시스템이 원하는 결과를 도출하도록 할 것인가에 대한 연구이다. 최근 메커니즘 디자인은 전자 상거래 시장의 설계나 분산 스케줄링 문제 그리고 복합적인 자원 할당 문

제 등 많은 응용 분야에 이용되고 있다[9][13][14].

메커니즘 디자인의 궁극적인 목표는 에이전트들이 합리적인 선택을 하고 서로 상호작용하여 시스템 전체의 특성들을 반영하는 함수를 최적화 하는 방향으로 가도록 시스템을 만드는 것이다. 일반적으로 게임을 설계하는 사회적 설계자는 게임 참가자인 에이전트들의 개별 정보를 가지고 있지 않다. 따라서 정보를 가지고 있지 않은 사회적 설계자가 에이전트들을 상대로 게임을 설계할 때, 그 게임의 결과가 사회적 설계자 자신이 원하는 대로 나오도록 하는 방법이 메커니즘 디자인이다[9].

메커니즘 디자인에 대한 간단한 예로는 공동 소유 목장을 분배하는 문제가 있다. 한 마을에 현명한 재판관에게 갑과 을이 찾아와 지금까지 공동으로 소유했던 목장을 공평하게 절반씩 나누고 싶다고 한다. 문제는 목장을 어떻게 나눠야 할지를 놓고 서로 의견이 다르다는 점이다. 어떤 소는 다른 소보다 건강하고, 어떤 땅은 다른 땅보다 더 비옥해 동물 수나 면적으로 공평하게 나누는 것 자체가 어렵다. 재판관은 다음 방식을 제안한다. 먼저, 갑이 공동의 재산을 원하는 대로 둘로 나눈다. 그 다음은 을에게 둘로 나뉜 재산 가운데 하나를 선택할 수 있는 권리를 주는 것이다. 이 방식대로라면 을은 둘로 나뉜 재산 가운데 어느 쪽이든 선택할 수 있고, 이 사실을 잘 아는 갑은 최대한 공평하게 재산을 나눌 것이다. 그 목장의 재산에 대해 가장 많은 정보를 가지고 있는 사람은 당사자인 갑과 을이지, 재판관이 아니다. 재판관으로서는 갑과 을이 가장 많은 정보를 가지고 있다는 사실에 기반을 두고 이 문제를 풀 수밖에 없다. 갑과 을이 각자 자신의 정보를 사실대로 내놓을 수밖에 없는 게임을 만드는 것이다. 이런 게임을 만드는 데 관계된 연구가 바로 메커니즘 디자인이다. 이와 같은 게임을 설계할 때 에이전트들이 반드시 게임에 참가해야 하고, 그들이 가진 정보를 제대로 제공해야 한다. 그렇기 때문에 올바르게 게임을 설계하기 위하여 게임 참가와 정보 제공에 대한 인센티브가 필요하다[9].

메커니즘 디자인에서의 정보는 에이전트의 선호도에 관한 개별 정보(θ)로 에이전트의 타입(type)이라고 하고 각 에이전트가 얻을 수 있는 가능한 결과값들의 집합(ϑ) 중 하나인 결과값(o)에 대해 얼마만큼의 금전적인 가치를 부여할 것인가에 대한 정의이다. 사회적 설계자에 의해 게임이 설계되면 에이전트는 이득을 얻기 위하여 자신의 타입을 사회적 설계자에게 알려주게 된다. 이 때 에이전트는 더 많은 이득을 얻기 위하여 자신의 타입을 거짓으로 보고할 가능성이 있는데 이런 상황을 포함하는 타입을 기호 $\bar{\theta}$를 통해 나타낸다. 이렇게 사회적 설계자에게 알려진 타입($\bar{\theta}$)을 바탕으로 메커니즘에 의하여 결과값이 도출된다. 메커니즘 디자인은 에이전트 i의 보고에 따라 동작하게 되고 에이전트 i는 효용($u_i(\theta, o)$)을 얻게 된다. 위에서 언급한 메커니즘 디자인을 설계할 때 필요한 시스템 전체의 특성들은 사회적 선택 함수에 내포되어 있다. 이 사회적 선택 함수는 각각의 가능한 에이전트 타입에 대해 목표하는 결과값을 정의한다[9].

VCG 메커니즘 (Vickrey–Clarke–Groves Mechanism)은 메커니즘 디자인의 한 종류로 비커리(1961)에 의해 제안된 비커리 경매기법을 기반으로 크라크 (Clarke) 와 그로브(Groves)가 구체화한 메커니즘이다. VCG 메커니즘을 이해하기 위해 VCG 메커니즘 디자인에서 중요하게 다루어지는 개념을 소개한다. 먼저 소개할 것은 직접 표출 메커니즘 (DRM : direct–revelation mechanism) 이다. DRM은 에이전트들이 자신의 타입을 알리는 메커니즘으로 에이전트들은 자신의 이익을 위해 거짓을 말하는 것을 허용하는 메커니즘이다. 두 번째 개념인 유인합치성 (IC : Incentive–compatible)은 에이전트가 자신의 타입을 사실대로 말하는 것이 최선의 결과를 얻을 수 있는 전략이라는 것을 의미한다. 유인합치성은 에이전트가 자신의 개인적인 정보를 진실되게 말하도록 하여 에이전트의 자기 중심적인 행동을 극복할 수 있도록 해준다. 이와 같은 메커니즘 디자인의 유인합치성은 전략 증명(Strategy–proof)이라고 하는 특성으로 설명되는데 이 전략 증명은 모든 에이전트들에 대해서 다른 에이전트들이 어떤 전략을 선택하는지에 상관없이 최고의 결과를 얻을 수 있는 우세 전략이 사실대로 말하는 것인 메커니즘을 말한다. 전략 증명은 다음과 같은 수식으로 정의된다[9][13][14].

$$\begin{aligned} &u_i(f(\theta_i, \theta_{-i}), \theta_i) \geq u_i\big(f\big(\tilde{\theta}_i, \theta_{-i}\big), \theta_i\big) \\ &\quad where \quad \forall\theta_i, \tilde{\theta}_i \neq \theta_i, \forall\theta_{-i}, \theta_{-i} \\ &\qquad\qquad = (\theta_1, \dots, \theta_{i-1}, \theta_{i+1}, \dots, \theta_N) \end{aligned} \tag{7}$$

수식 (7)에서 f는 사회적 선택 함수이고 θ_{-i}는 에이전트 i를 제외한 모든 에이전트들이 메커니즘에 알린 타입이다. 에이전트들이 다른 에이전트들의 전략 선택에 상관없이 에이전트 자신이 최선의 값을 얻는 전략을 선택하면 되므로 다른 에이전트들의 전략 선택에 대하여 모델링을 할 필요가 없기 때문에 이 전략 증명은 유용하게 사용된다[9][13][14].

VCG 메커니즘은 모든 에이전트의 전체 효용 즉, 사회적인 복지를 최대화 하는 결과를 선택하여 사회적 선택 함수(f)를 최대화하는 전략 증명 메커니즘이다. VCG 메커니즘에서 말하는 결과값은 가능한 선택들(K) 중 하나인 k와 이러한 선택을 통해 에이전트들이 얻을 수 있는 이득 ($p = (p_1, \dots, p_N)$)으로 나타낼 수 있고 에이전트가 자신의 타입을 사회적 설계자에게 알리면 사회적 설계자는 공적인 목적에 따라 결과값을 최적화하고 각 에이전트에게 이득을 준다. 에이전트들이 자신의 타입을 진실하게 사회적 설계자에게 알렸을 때 결과값과 이득이 사회적인 최적화를 이루게 된다[13][14].

VCG 메커니즘의 대표적인 예로 자원 할당 문제를 들 수 있다. 해결 해야 할 문제가 자원 할당인 경우, 에이전트가 선택할 수 있는 선택의 집합을 각 에이전트가 고려할 수 있는 모든 가능한 자원 할당으로 나타낼 수 있다. 이런 경우 에이전트가 얻을 수 있는 효용은 할당되는 자원에 대한 가치($v_i\ (k, \theta_i)$)와 자신이 그 할당되는 자원에 대해 지불한 비용(p_i)의 차로 생각할 수 있기 때문에 차가 경매기법을 응용하여 자원 할당 문제가 해결가능하고 이 때 에이전트의 효용 함수는 다음과 같다.

$$u_i(k, p_i, \theta_i) = v_i(k, \theta_i) - p_i \tag{8}$$

여기서 u_i는 타입이 θ_i인 에이전트 i의 결과값에 따른 효용, $v_i\ (k, \theta_i)$는 타입이 θ_i인 에이전트 i에 대한 할당량 k의 가치를 정의한다. VCG 메커니즘은 에이전트들의 가치 측정도를 입력으로 받아 모든 에이전트에 대한 전체 효용 즉, 사회적 복지인 $\sum_i v_i\ (k, \tilde{\theta}_i)$을 최대화하는 선택 k^*을 구현한다[9].

자신이 매긴 가치와 실제 지불하는 금액의 차이를 지불하는 방식의 VCG 메커니즘에 의하여 에이전트가 실제 지불해야 할 비용은 자신이 메커니즘에 참가하여 시스템 전체가 얻는 효용과 자신이 참가하지 않았을 때의 시스템 전체의 효용의 차를 지불하면 된다. 그러므로 실제 지불 금액(p_i)은

$$\begin{aligned} p_i &= V(N) - V(N \backslash i) \\ where\ V(N) &= max_{k \in K} \sum_i v_i \left(k, \tilde{\theta}_i\right)\ and\ \ V(N \backslash i) \\ &= max_{k \in K} \sum_{j \neq i} v_j\ (k, \tilde{\theta}_j) \end{aligned} \tag{9}$$

이 된다. 여기서 $V(N)$은 알려진 k^* 총합이고 $V(N \backslash i)$는 에이전트 i를 제외하고 알려진 k^*의 총합이다[13][14].

4.1 메커니즘 디자인 응용

최근들어, 무선 네트워크 노드들의 라우팅 경로를 찾는 연구가 많이 이루어졌다. 특히, 리액티브 라우팅 프로토콜을 기반으로 하여 최근 에드 혹 네트워크 구성에 관한 응용 연구가 활발히 진행되고 있는데 VCG 메커니즘을 응용하면 에너지 효율적이고 QoS가 보장되는 라우팅 알고리즘들을 개발 할 수 있다. 이런 응용 기법들은 데이터 전송을 할 때 이기적인 행동을 하는 노드들에게 인센티브를 제공하여 협조적인 행동을 하도록 유도하는 것이 주된 목적이다. 기존에 제안된 기법에서는 데이터 중계를 통해 각 노드에게 축적된 인센티브를 활용하는 방안이 부족하였고 QoS에 대한 사용자의 요구 사항을 만족하기 힘들었는데 최근 VCG 메커니즘을 응용한 알고리즘들은 이를 보장하기 위해 중계를 통해 얻은 인센티브를 사용하여 네트워크 내에서 대역폭 예약을 수행하고 이를 통해 우선순위가 높은 서비스의 QoS를 보장하도록 개발되었다[9].

Ⅳ. 결 론

본고에서는 게임이론의 기본 개념과 역사, 그리고 대표적인 게임모델인 진화게임, 네쉬협상게임, 샤플리 밸류 그리고 메커니즘 디자인에 대해 살펴 보았다. 게임 이론은 경쟁하는 상황에서의 의사결정에 관한 학문으로서 한편의 의사결정이 다른 편의 결정에 영향을 미치는 경쟁상황을 수학적 모델을 통하여 연구하는 학문이다. 주로 경제, 정치분야에서 주로 사용되었던 게임이론의 방법론들이 최근들어 공학분야의 여러 문제에 활발이 적용되기 시작하면서 새로운 융합학문 분야를 창출하고 있다. 게임이론은 자체적으로 존재하는 부분적 한계에도 불구하고 앞으로 다양한 분야의 문제를 해결하는데 적절한 도구로 이용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 김완진, 경제적 합리성과 게임이론, 철학사상 제20호, pp.23-44 , 2005.

[2] Zhu Han, Dusit Niyato, Walid Saad, Tamer Başar and Are Hjørungnes, Game Theory in Wireless and Communication Networks, Cambridge University Press 2011

[3] Sungwook Kim, "Cellular Network Bandwidth Management Scheme by using Nash Bargaining Solution", IET Communications, vol.5, no.3, pp.371-380, 2011.

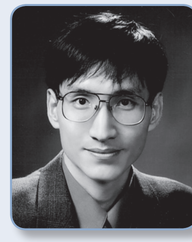
[4] Sungwook Kim, "Biform Game based Cognitive Radio Scheme for Smart Grid Communications", Journal of Communications and Networks, , vol.14, no.6, pp.614-618, 2012.

[5] M.Wooldridge, "Does Game Theory Work?", IEEE Intelligent Systems, 27(6), pp.76-80, 2012.

[6] 이기섭, 김승욱, 에드 혹 네트워크에서의 에너지 효율에 기반을 둔 다중경로 선택 기법, 한국통신학회논문지 제35권 제5호, pp.734-740, 2010.

[7] Sungwook Kim, “Adaptive Online Voltage Scaling Scheme based on the Nash Bargaining Solution”, ETRI Journal, vol.33, no.3, pp.407-414, 2011.
[8] 최윤호, 김승욱, 멀티미디어 셀룰러 네트워크상에서 내쉬 협상해법을 이용한 대역폭 관리기법, 정보과학회논문지 : 정보통신 제37권 제6호 pp.415-419, 2010.
[9] 이진형, 김승욱, 메커니즘 디자인 접근방식에 기반을 둔 애드혹 네트워크 라우팅 기법, 정보과학회논문지 : 정보통신 제37권 제3호 (2010년 6월) pp.198-203, 2010.
[10] Sungwook Kim, “An Adaptive Online Power Control Scheme based on the Evolutionary Game Theory”,IET Communications, vol.5, no.18, pp.2648 - 2655, 2011.
[11] 김덕주, 김승욱, "진화게임이론을 이용한 적응적 전력제어 알고리즘", 정보과학회논문지 : 정보통신 제37권 제3호, pp. 228-233, 2010.
[12] Sungwook Kim, “Dynamic Online Bandwidth Adjustment Scheme Based on Kalai-Smorodinsky Bargaining Solution”, IEICE Transactions on Communications, Volume E93.B, Issue 7, pp.1935-1938, 2010.
[13] Sungwook Kim, “An Online Bandwidth Allocation Scheme Based on Mechanism Design Model”, IEICE Transactions, vol.96-B, no.1, pp. 321-324, 2012.
[14] Sungwook Kim, “Adaptive Ad-hoc Network Routing Scheme by Using Incentive-based Model”, Ad hoc & Sensor Wireless Networks, vol.15, no.2, pp.107-125, 2012.
[15] Sungwook Kim, “A Repeated Bayesian Auction Game for Cognitive Radio Spectrum Sharing Scheme”, Computer Communications, vol.36, no.8, pp.939-946, 2013.
[16] Sungwook Kim, “Game theoretic Multi-Objective Routing Scheme for Wireless Sensor Networks”, Ad Hoc & Sensor Wireless Networks 10(4), pp.343-359, 2010.

약 력



김 승 욱

1993년 서강대학교 전자 계산학과 학사
1995년 서강대학교 전자 계산학과 석사
2003년 Syracuse University, Computer Science 박사
2004년~2004년 2004.1. - 2005.2. Post Doc. The Center for Advanced Systems and Engineering (CASE), Syracuse, NY. U.S.A
2005년~2006년 중앙대학교 컴퓨터공학부 전임강사
2006년~2010년 서강대학교 컴퓨터공학과 조교수
2010년~현재 서강대학교 컴퓨터공학과 부교수
관심분야: 게임이론, 이동통신, 멀티미디어 통신, 네트워크 자원관리, QoS.