게임이론을 응용한 무선설계 기술

홍인기 | 이덕주
경희대학교

요 약

본 고에서는 최근 들어 분산적이고 자율적인 통신네트워크가 등장하면서 이러한 시스템을 분석하기 위한 도구로서 주목받고 있는 게임이론을 응용한 무선 설계 기술에 대한 소개를 목적으로 하고 있다. 게임이론의 기본적인 개념을 소개하고, 게임이론을 적용한 무선 설계 기술 중 인접셀 간섭을 줄이기 위한 전력제어 방식에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

I. 서 론

Von-Neumann 과 Morgenstern에 의해 1944년 출판된 "Game theory and Economic Behavior" 라는 기념비적인 책으로부터 출발한 '상호 경쟁적인 주체들간의 전략적 의사결정 문제에 관한 이론체계' 라 할 수 있는 게임이론은 책의 제목이나 저자들의 전공분야로부터 판단할 수 있듯이 그 분석대상을 전형적인 사회과학적 시스템인 '경제' 로 두고 그에 대한 체계적인 이해를 위해서 연구, 발전되어온 과학적 방법론이다. 사실 게임이론은 영화 Beautiful mind의 주인공이기도 한 프린스턴 대학의 Nash교수에 의해 균형해의 존재조건이 밝혀진 이후 대부분 경제학자들에 의해 연구되어왔으며, 실제로 1994년 노벨재단은 게임이론을 중요한 학문적 성과로 평가하면서 게임이론의 확립 및 발전에 중요한 마일스톤을 제공한 Nash, Selten, Harsanyi 등의 세명의 학자에게 노벨상을 수여하기로 결정을 하는데, 이때 수여한 노벨상의 분야도 노벨경제학 상이었다. 따라서 이러한 사실을 보더라도 게임이론이라는 분석 방법론 또는 더 넓게는 학문분야는 사회과학의 범주에 들어가는 것이었다.

그러나 최근 들어 게임이론의 적용분야는 경제학이나 정치학 등의 사회과학 분야에 머무르지 않고 그 범위를 자연과학 분야인 생물학이나 생태학에까지 확장되어 가고 있다. 특히 본고에서 주목하고자 하는 것은 전통적인 자연과학 또는 공학분야였던 통신시스템과 경제학 중심의 분석 도구였던 게임이론이 최근 들어 활발히 접목되고 있다는 사실이다. 그렇다면 통신시스템의 어떤 변화가 경제학적 방법론인 게임이론의 관점을 필요로 하였을까?

일반적인 통신 시스템에서는 통신 주체들을 적절히 제어해야 하는 대상으로 생각하고 효율적인 제어 방식에 관해서 연구가 진행되어 왔다. 이때 다른 통신 주체들에 의한 영향은 피할 수 없는 현상으로 간주하고, 이를 적절히 추정한 후 이를 극복하기 위한 기술 개발이 주된 관심사였다. 그러나 통신 서비스에 대한 요구가 급격히 늘어가고 그에 따른 기술 발전이 가속화 되면서, 성능 개선을 꾀할 수 있는 여지가 남은 분야 중의 하나로 타 통신 주체들의 영향을 평균적인 추정치를 바탕으로 하는 것을 넘어서 통신 주체들간의 상호

본 고는 게임이론을 무선통신에 적용하기 위한 기술에 대한 소개로 이미 한국통신학회지 '정보와 통신' 2009년 7월호 '게임이론응용' 특집편에 소개된 바 있다. 여기서는 '통신시스템을 분석하기 위한 도구로서의 게임이론[11]' 편에 실린 내용을 발췌하였으며 전력제어에 응용한 예는 한국항행학회 2009년 2월 논문지에 실린 '게임이론을 이용한 유한 전략 집합을 갖는 전력제어 알고리즘[12]' 의 내용을 요약 정리하였다.

영향을 분석하여 그에 따른 해결책을 찾는 연구들이 새롭게 관심을 받게 되었다. 또한 동일한 제어 범위에 존재하지 않는 통신 주체들은 제어할 수는 없더라도 그 영향을 고려해야 하는 경우, 예를 들어 셀룰러 시스템에서 인접셀에 있는 통신 주체들을 적절히 제어할 방법은 없지만 인접셀 간섭과 같은 그 영향이 크게 나타남에 따라 이들 영향을 분석하여야 할 필요가 발생하기 시작하였다.

게임이론은 1990년대 중반부터 일부 선구적인 연구자들에 의해 이와 같은 통신시스템 분석에 있어서 새로운 요구사항을 해결하기 위한 방법론으로 관심을 받고 적용되기 시작하였으며, 이젠 통신시스템 분석의 중요한 연구분야 중 하나로 자리를 잡게 되었다.

본 고에서는 통신시스템을 분석하기 위한 도구로서 게임이론의 기본적인 개념을 소개하고, 게임이론을 통신시스템에 적용한 한 예로써 게임이론을 적용한 인접셀 간섭 완화 기법에 대하여 소개한다.

II. 게임이론의 기본적 이해

1. 게임이론에서 다루는 상황

게임이라고 하는 것은 하나 이상의 사람들이 모여서 각자의 어떤 의사결정을 통해서 승패를 가르는 것이다. 따라서 게임이 성립되기 위해서는 게임 참가자(또는 선수)들과 게임의 규칙이 있어야 한다. 그리고 여기서 게임의 규칙이라는 것은 참가자들이 취할 수 있는 행동과 해서는 안될 것들 그리고 게임의 승패를 결정짓는 방법을 규정한다. 게임이론의 기본 구조도 그 이름에 걸맞게 일반적인 게임의 기본틀 속에서 바라보면 쉽게 이해할 수 있다.

게임이론에서는 "여러 (경제)주체가 모여서 의사 결정을 내리고, 그 결과에 의해서 정해진 보수를 얻는 상황"을 게임상황(game situation)이라고 부른다. 이러한 게임 상황을 분석하기 위한 도구인 게임 이론의 구성요소로는 경기자(players), 전략집합(strategy set), 그리고 효용함수(utility function) 또는 보수(payoff)의 세 가지가 있다. 여기서 경기자는 게임상황에서 의사결정을 하는 주체로서 일반적인 게임에 있어서 참가자에 대응되는 개념이다. 그리고 전략집합은 경기자가 게임 중에 의사결정을 내릴 수 있는 선택의 범위를 의미하는 것이고, 보수는 각 경기자가 전략을 선택하여 최종적으로 게임상황이 종료되었을 때 얻는 효용의 크기를 의미하는 것으로서, 이는 일반적인 게임에 있어서 게임의 규칙과 승패를 가르는 방법에 대응되는 개념으로 이해할 수 있다.

이러한 게임상황의 실제적인 예는 현실 속에서 많이 찾아볼 수 있다. 그 중 게임이론에서 가장자주 언급되는 대표적인 몇 가지 상황을 살펴보자. 게임이론이라는 용어가 나오기도 전인 1838년 프랑스의 경제학자 쿠르노(Cournot)는 둘 이상의 기업들이 모여있는 과점시장(oligopoly)에서 동일한 제품을 가지고 경쟁을 하는 상황을 모형화하고 분석하였는데 후세에 경제학에서는 이를 쿠르노경쟁상황이라고 부르고 있다. 쿠르노 모형에서는 과점시장에서 개별기업이 자신의 이윤을 극대화하는 산출량을 결정하고자 할 때, 경쟁기업의 산출량을 미리 예상하고 이를 반영하여 산출량을 결정하여야 함을 보여 주고 있다.

한편 동일한 시장상황에서 산출량이 아니라 가격을 전략변수로기업이 경쟁하는 상황을 버트랭(Bertrand)모형이라고하고, 두 기업이 동일한 조건을 가지고 있는 상황이 아니라 한 기업이 다른 기업에 비해 시장에서 선도적인 위치에 있는 경우에 이러한 선도기업과 추종기업간의 경쟁상황을 다루는 모형은 스택켈버그(Stackelberg) 모형이라고 부르고 있다. 쿠르노, 버트랭, 스택켈버그 세가지 모형 모두 게임이론을 이용하여 기업들의 최적 전략을 도출할 수 있다.

조금다른 상황의 예로 다음과 같은 경우를 생각해 보자. 현재 두 명의 공범 용의자가 서로 격리되어 범죄 행위에 대한 자백을 추궁받고 있다. 이때 두 공범 용의자가 모두 자백을 하지 않고 버틴다면 증거 불충분으로 풀려날 수 있다. 한편 경찰에서는 만일 한사람은 범죄행위를 끝까지 자백하지 않았으나 다른 방에 있는 공범 용의자가 범죄를 자백해 버린다면 자백을 하지 않은 사람에게는 범죄 행위에 대한 처벌뿐만 아니라 거짓 진술에 대한 가중처벌까지 합한 중형을 내릴 것이며, 반면에 순순히 자백한 사람에게는 정상을 참작하여 본래 형량보다 적은 처벌을 내려 주겠다는 조건을 제시하고 있다. 즉, 내가 받을 형량은 내가 자백을 하느냐의 여부뿐만 아니라 다른 방에 있는 공범 용의자가 어떤 행동을 취하느냐에 의해서 결정되는 상황인 것이다. 이때 나는

형량을 최대한 줄이기 위해서 과연 어떤 결정을 내려야 좋을 것인가? 이와 같은 경우가 전형적인 게임상황 중의 하나로서 게임이론에서는 이러한 상황을 "죄수의 딜레마(prisoners' dilemma)" 모형이라고 부르고 널리 응용되고 있다. 물론 게임이론을 이용하면 각자의 최적 전략을 찾을 수 있다.

예전에 제임스딘이 출연한 영화 중에 '이유없는 반항' 이라는 영화를 보면 한밤중에 도로의 양쪽에서 두 명의 경쟁자가 자신의 차를 몰고 정면으로 돌진하는 게임을 하는 장면이 나온다. 이 게임에서는 충돌 직전에 핸들을 꺾는 사람이 겁쟁이, 즉 치킨으로 몰려 명예롭지 못한 사람으로 취급받고 끝까지 정면으로 돌진한 사람만이 이게임의 승자가 된다. 그러나 어느 한 쪽도 핸들을 꺾지 않을 경우에는 결국 충돌함으로써 양쪽 모두 사고를 당하게 되며 심한 경우에는 목숨을 잃을수도 있게 된다. 과연 젊은이들의 치기로밖에는 도저히 이해불가능한, 위험천만한 규칙의 게임이라고 할 수 있다. 그런데 이 상황도 잘 보면 내가 영웅이 되느냐 치킨이 되느냐 아니면 자동차 사고 피해자가 되느냐는 나의 의사결정 뿐만 아니라 상대방이 얼마나 무모한 의사결정을 내리느냐에 달려있음을 알 수 있다. 현실에서 '치킨게임' 이라고 부르는 이 상황은 게임이론 관점에서도 전형적인 게임상황으로서 역시 '치킨게임' 모형이라고 부르고 있다. 치킨게임 모형은 제임스 딘의 자동차 경주만을 의미하는 것이 아니라 게임의 전략 유형과 보수 구조가 이러한 형태의 상황을 모두 포함하는 의미로서, 예를 들어 냉전시대의 미국과 소련간 핵무기 경쟁상황이 전형적인 치킨게임의 유형에 포함되는 상황으로 볼 수 있다.

이외에도 어린아이들이 일상적으로 많이 행하는 가위바위보, 동전 맞추기 에서부터 각종 경매, 국가간의 협상 등에 이르기까지 우리는 실로 게임상황의 현실에 둘러싸여서 살고 있다고 해도 과언이 아닐 정도로 게임이론에서 다루고 있는 상황은 우리 주변에서 쉽게 발견할 수 있다.

여기에서 주목하여야 할 부분은 이러한 게임 상황에서는 자신의 의사결정이 자신 뿐만 아니라 다른 경기자의 결과에도 영향을 미치고, 또한 상대 경기자의 행동 또한 자신의 보수에 영향을 미치게 되는 상호 의존성의 존재이다. 이런 상호의존성으로 인해 각 주체는 의사결정을 할 때, 다른 주체의 의사결정이 자신의 효용에 미치는 영향까지 고려한 전략적 사고(strategic consideration)를 행해야 한다. 결국 게임이론은의사결정에 있어서 상호 의존성이 존재하는 전략적 상황에서의 최적 전략을 결정하는 방법과 그 특성을 분석하는 이론인 것이다.

게임이론은 크게 협조적 게임이론(cooperative game theory)과 비협조적 게임이론(non-cooperative game theory)으로 나누어진다. 협조적 게임이론은 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 권위 있는 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. 본 고에서는비협조적 게임을 중심으로 기본적 개념을 설명하기로 한다.

2. 게임상황의 표현방법 : 모형화

경쟁적인 참가자들간에 상호 의존적인 상황에서 최적의 전략적 의사결정을 구하기 위한 이론인 게임이론은 기본적으로 수학에 기반을 두고 있다. 따라서 게임이론을 이용하여 어떤 게임상황을 분석한다라는 사실은 그 상황에 대해서 게임이론의 관점에서 수리적인 모형화를 하고, 그 모형에 대한 해를 구한 후 그 해에 대한 특성을 분석하는 일반적인 수리적 분석의 과정을 거치는 것을 의미한다.

그러면 게임이론을 이용한 모형화란 구체적으로 어떤 작업을 의미하는가? 이는 다름이 아니라 앞 절에서 언급한 게임이론의 세가지 구성요소, 즉 참가자와 전략집합 그리고 효용함수를 명확하게 정의함을 의미한다. 특히 게임이론에서는 명확한 정의를 위하여 수학적 표현을 사용하게 된다.

사실 게임의 모형화는 게임상황이 시간에 따른 동태성을 가지고 있느냐의 여부에 따라 정태적인 상황을 표현하는 전략형(strategic form) 게임과 동태적인 상황을 표현하는 전개형(extensive form) 게임으로 구분할 수 있는데, 전략형만을 중심으로 게임의 모형화를 소개해 보자.

우선 경기자가 n 명인 경우 경기자 집합은 $N = \{1,2,..., n\}$과 같이 표현할 수 있다. 그리고 경기자 i 가 선택할 수 있는

여러 가지 대안인 전략집합을 S_i 라 하자. 그리고 각 경기자 n 명의 전략집합에 대한 카르테시안 곱(Cartesian product) 집합을 $S=S_1\times S_2\times\cdots\times S_n$ 이라 하자. 그러면 원소 $s\in S$ 는 각 경기자가 자신의 전략 집합에서 하나의 전략을 선택하여 나열한 것을 의미하는 것이 되며, 이를 전략 프로파일(strategy profile)이라고 부른다.

각 경기자 i 가 각자의 전략을 선택하여 최종적으로 경기가 종료되었을 때 경기자가 얻는 효용의 크기인 보수는 $u_i : S\rightarrow R$ 의 함수가 되며, 이를 효용함수라고 부른다. 결국 효용함수는 자신이 자신의 전략집합 중에서 선택한 전략 $s_i\in S_i$ 뿐만 아니라, $s_{-i}\in\times_{j\neq i}S_j$ 로 표기하는 자신의 전략을 제외한 다른 경기자들이 선택한 전략 프로파일에 의해 그 값이 결정되는 함수이다. 이렇게 세가지 구성요소가 정의되면 하나의 전략형 게임 $G=\left\langle N,S,\{u_i\}_{i\in N}\right\rangle$ 가 모형화되는 것이다.

이해를 돕기 위하여 앞에서 언급한 죄수의 딜레마 게임을 모형화해보자. 이 예를 보면 두명의 공범 용의자가 경기자이므로 경기자 집합은 $N=\{1,2\}$ 가 되고, 각 용의자들이 선택할 수 있는 전략은 자백을 하는 것과 자백을 하지 않고 범죄행위를 부인하는 두가지가 있으므로 $s_i=$ {자백, 부인}로 표현할 수 있다. 한편 만일 둘 다 자백을 하면 5년 동안 수감되어야 하고, 둘 다 부인하면 증거 불충분으로 6개월의 구치소 수감만 하면 된다고 하자. 또한 한 사람은 자백을 하고 또 다른 사람은 거짓으로 버티면 거짓을 한 사람은 가중 처벌되어 9년을 수감되어야 하는 반면에 자백을 한 사람은 정상이 참작되어 3년만 수감되면 된다고 하자. 이러한 상황을 효용함수로 표현하기 위한 가장 좋은 방법은 행렬식 표현을 활용하는 것으로서, 위 예를 행렬로 표현해 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

	용의자 2 범죄 부인	용의자 2 범죄 자백
용의자 1	용의자 1: 6개월	용의자1: 9년
범죄 부인	용의자 2: 6개월	용의자2: 3년
용의자 1	용의자1: 3년	용의자2: 9년
범죄 자백	용의자 1: 5년	용의자 2: 5년

(그림 1) 죄수의 딜레마 게임 행렬

이와 같이 게임의 구성요소 세가지를 명확히 정의한 후 이를 적절히 표현하면 그것이 게임의 모형화가 되며, 특히 경기자가 두명 또는 세명이고 전략의 개수가 유한개인 경우 (그림 1)과 같이 하나의 행렬에 세가지 구성요소를 모두 편리하게 표현할 수 있다.

다음으로 전략집합이 무한집합인 경우의 모형화 예를 앞에서 언급한 쿠르노 게임을 이용하여 예시해 보자. 설명의 편의를 위해 기업이 두 개만 존재하는 복점(duopoly) 시장을 가정하자. 그러면 경기자 집합은 $N=\{1,2\}$ 가 된다. 한편 변수 q_i 를 기업 i 가 선택하는 산출량이라고 하면 쿠르노 경쟁에서는 산출량이 전략변수가 되며, 두 기업의 전략집합은 $S_1=S_2=[0,\infty]$ 의 무한집합이 된다.

기업의 경우 이윤극대화가 목적이므로 이윤을 효용함수로 사용한다. 그리고 이윤함수를 도출하기 위하여 $C_i(q)$를 기업 i의 비용함수, $p=f(Q)$ 를 시장의 수요함수로 표현하자. 여기에서 Q는 시장의 총 산출량으로서 복점시장에서는 q_1+q_2와 같게 되며, p는 시장 가격이 된다. 그러면 쿠르노 게임의 효용함수인 각 기업의 이윤함수는 다음과 같이 도출된다.

$$\pi_i=(q_1,q_2)=q_i\cdot f(q_1+q_2)-C_i(q_i) \qquad (1)$$

쿠르노 게임의 효용함수를 보면 수요함수를 통해서한 기업의 선택이 다른 기업의 이윤에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 즉, 기업1이 q_1 을 선택했을 때, 기업 2가 q_2 를 어떻게 선택하느냐에 따라 시장가격 $p=f(q_1+q_2)$ 가 달라지고, 또 그에 따라 기업1의 이윤도 달라진다. 이 예에서 알 수 있듯이 쿠르노 게임의 경우에는 전략변수가 실수값을 갖는 변수가 되고, 효용함수도 실변수 함수로 모형화되고 있다.

3. 게임이론에 있어서 해의 개념 : 균형

게임이론이 게임상황에 대한 적절한 분석체계가 되기 위해서는 특정 상황에서 경기자들이 어떤 전략을 선택하는 것이 바람직한가에 대한 해답을 제시할 수 있어야 할 것이다. 그 해답이란 수학을 기반으로 하는 여타 이론에서의 해(solution)에 대응하는 개념으로서, 게임이론에서는 이를 균형 (equilibrium)이라고 부르고 있다.

직관적으로 생각할 때 주어진 게임상황에서 가장 바람직한 전략이란 경기자가 선택할 수 있는 전략집합의 원소 중에서 자신의 효용을 가장 극대화하는 것으로 정의하면 될 것이다. 그런데 경쟁자가 존재하지 않는 상황 하에서의 최

적화 문제와 달리 게임이론에서 해의 개념이 복잡해지는 이유는 내가 제어할 수 없는 상대 경기자의 선택이 나의 효용에 영향을 미치기 때문이다. 즉, 내 입장에서만 최적이어서는 상대방이 그걸 용납할 이유가 없을 것이고, 따라서 그러한 전략은 게임상황에서는 해가 될 자격이 없는 것이다. 상호 작용성이 존재하는 게임상황에서 해가 되기 위해서는 나와 상대방이 모두 만족할 수 있는 그런 상태를 보장하는 전략들이어야 하는 것이고, 그렇기 때문에 게임이론에서는 최적해(optimal solution)이라는 표현보다는 균형이라는 표현이 해의 개념으로 더욱 적절한 것이다.

이러한 관점에서 게임상황에서의 해의 의미인 균형이라는 개념을 엄밀하게 정의하면 어떤 내용이 될까? 우선 합리적인(rational) 사람이라면 누구나 가장 쉽게 바람직한 전략으로 인정할 수 있는 우월전략(dominant strategy)의 개념부터 살펴보자.

다른 경기자들이 어떤 전략을 선택하든 간에 상관없이 한 경기자에게 항상 가장 높은 보수를 보장하는 전략이 있다면 그 전략을 선택하는 것이 바람직하다는 주장에 이의를 제기할 사람이 없을 것이다. 게임이론에서는 그러한 전략을 그 경기자의 우월전략(dominant strategy)이라고 부른다. 이를 엄밀하게 정의하면 다음과 같다.

- **우월전략** : 전략 s_i^*가 다른 모든 전략 $s_i \in S_i$ 에 대하여, 그리고 상대 경기자들의 모든 전략프로파일 $s_{-i} \in \times_{j \neq i} S_j$ 에 대하여, $u_i = (s_i^*, s_{-i}) \geq u_i(s_i, s_{-i})$ 이면 s_i^*를 경기자 i 의 우월전략이라고 부른다.

한 경기자에게 우월전략이 존재하고, 그 경기자가 합리적이라면 당연히 그는 우월전략을 선택할 것이다. 그러나 문제는 우월전략이 모든 게임상황에서 모든 경기자에게 존재한다는 보장이 없다는 사실이다. 즉, 우월전략이라는 개념이 게임의 해 개념으로서 매우 강력한 성질임에는 분명하나 이런 전략이 어떤 게임에는 존재하고 어떤 게임에는 존재하지 않는다면 일반적인 해의 개념이 가져야 할 필요조건 중에 하나라 할 수 있는 존재성 (existence property)의 조건을 충족시키지 못하다는 치명적인 약점을 가지고 있는 것이다. 그렇다면 우월전략이 존재하지 않는 게임에서는 어떤 전략을 선택하는 것이 바람직할 것인가? 이에 대한 해답을 제시하는 것이 유명한 내쉬 균형이라는 개념이다. 우선 내쉬 균형의 정의부터 살펴 보자.

- **내쉬균형** : 주어진 전략형 게임 $G = \langle N, S, \{u_i\}_{i \in N} \rangle$ 에서 어떤 전략프로파일 $s^* = (S_1^*, \ldots, S_n^*)$가 모든 경기자 i 에 대하여, 그리고 모든 전략 $s_i \in S_i$ 에 대하여 $u_i(S_i^*, S_{-i}^*) \geq u_i(S_i, S_{-i}^*)$가 성립하면 그 전략을 내쉬균형이라고 부른다.

내쉬균형이 가지고 있는 최적성과 합리성은 다음과 같이 설명할 수 있다. 내쉬 균형의 정의에 의하면 상대방이 내쉬균형 전략을 선택한다면 나도 내쉬균형 전략을 선택하는 것이 나의 효용을 극대화하는 최선의 대응(best response)이며, 이러한 관계가 모든 경기자들에게 똑같이 적용되고 있음을 알 수 있다. 따라서 적어도 상대방이 내쉬균형을 선택할 것으로 예측한다면 나도 내쉬균형을 선택할 것이며, 그러한 사실을 아는 상대방 또한 내쉬균형을 선택하는 것이 최적의 선택이 되는, 일종의 연쇄적 관계가 성립할 것이라는 것이다. 다시 말해서 상대방이 내쉬전략을 선택한다면 내가 다른 전략을 선택할 유인이 없다(no incentive to deviate)는 것이다. 이는 내쉬균형이 일관적인 예측가능성과 자기강제성(self-enforcing) 이라는 합리적인 해가 가져야 할 중요한 성질을 가지고 있다는 사실을 말해주고 있다.

실제로 Nash에 의해 내쉬균형 개념이 정립되고 그 존재성에 대한 정리가 증명되면서 비로소 게임이론은 제법 그럴듯한 해의 개념을 가지게 되었으며, 자기 완결적인 하나의 이론으로 대접을 받게 되었다고 볼 수 있다. 그렇다면 내쉬균형은 게임이론의 해 개념으로 완벽한 성질을 가지고 있는 것인가? 아쉽게도 그렇지는 못하다.

내쉬균형 개념의 첫번째 문제점에는 우선 전략의 개수가 유한개인 경우에는 전략집합의 원소중에 하나만을 선택가능한 전략으로 상정한다면 - 게임이론에서는 이를 순수전략(pure strategy)이라고 표현한다 - 내쉬균형이 존재하지 않을 수도 있다는 것이다. Nash 교수는 이 문제를 해결하기 위해서 '전략집합의 원소들에 대한 확률분포'라는 혼합전략

(mixed strategy)이라는 새로운 개념을 도입한 후에야 내쉬 균형의 존재성을 증명할 수 있었다. 뿐만 아니라 내쉬 균형은 게임에 따라서 유일하지 않을 수 있다는 문제점도 있다. 노벨상 공동 수상자인 Selten 교수를 비롯한 많은 학자들이 이 문제를 해결하기 위하여 여러 개의 내쉬균형 전략들 중 보다 합리적인 전략만을 취사선택하는 균형전략의 개선(refinement)에 대해서 연구를 수행하였다.

또한 내쉬균형전략이 항상 사회적으로 바람직한 상태, 소위 파레토(Pareto) 효율적인 상태를 도출시키지는 못한다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 성질은 특히 통신시스템과 같은 공학적 시스템에 게임이론을 적용하고자 하는 경우, 시스템 전체의 최적화를 추구하는 공학적 시스템의 해로서 내쉬균형전략이 자격이 없을 수 있다는 치명적인 약점이 될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 원하는 방향의 내쉬균형전략 결과를 유도하기 위한 게임 메커니즘을 설계하는 방법이나 또는 공학적 시스템과 같이 반복적으로 시행되는 게임에 있어서 학습에 관한 내용 등의 연구가 최근들어 활발히 진행되고 있다. 이에 대한 자세한 내용은 본 고의 범위를 벗어나므로 관심있는 독자는 별도의 전문적인 문헌[2, 3]을 이용하기 바란다.

4. 게임이론의 통신시스템 적용 분야

통신시스템 운용과 관련된 문제들 중에서 가장 먼저 게임상황적 특성을 포착하고 게임이론을 적용한 분석을 시도하기 시작한 분야들 중에는 네트워크 라우팅(routing), 혼잡제어(congestion control)또는 흐름제어(flow control) 분야를 꼽을 수 있다 [1]. 특히 인터넷의 TCP프로토콜 하에서의 혼잡제어 문제는 약 10년전부터 활발하게 게임이론을 응용한 분석이 이루어지고 있는 분야이다.

또한 무선 네트워크, 특히 최근의 Ad-hoc 네트워크의 특성이 전형적인 게임상황의 범주에 포함된다는 사실에 주목하고, 그러한 네트워크의 전반적인 운용문제를 게임이론을 통해서 해결하고자 하는 연구들이 많이 발표되고 있다 [5, 7]. 구체적으로 무선네트워크 또는 Ad-hoc네트워크 하에서의 전력제어(power control), 간섭회피(interference avoidance), MAC(Medium access control) 등의 문제는 현재 게임이론을 적용한 논문들이 빠른 속도로 발표되고 있는 분야로 꼽을 수 있다.

스펙트럼과 같은 통신 자원의 할당문제(resource sharing) 문제들도 전형적인 게임상황적 문제로서, 특히 이 분야는 본 고에서는 다루지 못한 협조적 게임이론의 응용이 활발히 이루어지고 있다. 뿐만 아니라 최근들어 네트워크의 정보보안(information security) 문제나 peer-to-peer 시스템에서의 파일 공유문제 등을 기술적으로 해결하는 방법 이외에 게임이론을 통하여 경제적 메커니즘에 의해서 해결하고자 하는 연구들이 시도되고 있다.

III. 페널티 효용함수를 이용한 무선통신 전력제어 게임

1. 전력제어 게임모델

각 단말의 목표 송신전력을 구하는 전력제어 상황은 다음과 같은 게임으로 모델링 할 수 있다.

$$G = \langle N, P, \pi(P) \rangle$$

여기서 N = {1,2,..., N}은 게임에 참여하는 플레이어의 집합(player set), 즉 단말들을 의미한다. 각 단말은 통신을 위해 필요한 송신전력을 결정할 수 있으며 전략집합(strategy set)은 $\mathbf{P}=[0, p_{max}]$ 가 된다. 이 때 p_{max} 는 시스템에서 한 단말기가 송신할 수 있는 최대전력을 의미한다. 단말기의 효용함수(utility function)은 식(2)와 같이 수신 SINR에서 페널티를 뺀 함수로 정의하였다. 각 단말의 송신전력을 증가시킴에 따라 수신 SINR이 증가하고 또한 시스템의 용량도 증가하지만, 증가된 송신전력이 다른 단말에게는 간섭으로 작용하고 또한 자신의 배터리 수명이 짧아지기 때문에 송신전력이 높을수록 페널티를 크게 받는 것으로 정의하였다.

$$\pi_j(p) \frac{|h_{jj}|^2 p_j}{\sum_{i \neq j} |h_{ij}|^2 p_i + \sigma^2} - \alpha(p_j), j = 1, \ldots, N \quad (2)$$

이 때 $p_j \in \mathbf{P}$ 이고, p_j는 j 번째 단말이 선택할 수 있는 송신전력이다. h_{ij} 는 i 번째 단말에서 기지국 j 까지의 경로이득, σ^2 는 열잡음 전력, $\alpha(p_j)$ 는 j 번째 단말이 전력 p_j 를 선택함

에 따라 받게 되는 페널티이다.

2. 페널티 효용함수의 내쉬균형

식(2)의 효용함수를 통해 다음과 같은 정리를 이끌어 낼 수 있다.

<정리 1> 수신 SINR함수 $f = p_j \in \mathbf{P} \to \mathrm{R}$ 는 준오목 (quasi-concave) 함수이다.

(증명) 다음과 같은 수신 SINR 함수의 송신전력 집합을 고려하자.

$$U = \left\{ p_j : f(p_j) \geq k, p_j \in \mathbf{P} \right\} \tag{3}$$

송신전력 집합의 원소 중에서 임의의 두 전략 프로파일 p'와 p''을 선택하자. 그리고 SINR의 정의에 따라 식을 변형하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} |h_{jj}|^2 p_j' &\geq k\left(\sum_{i\neq j} |h_{ij}|^2 p_i' + \sigma^2\right) \\ |h_{jj}|^2 p_j'' &\geq k\left(\sum_{i\neq j} |h_{ij}|^2 p_i'' + \sigma^2\right) \end{aligned} \tag{4}$$

다음과 같은 전략 프로파일 p'와 p''의 볼록 조합(convex combination) p^o을 고려하자.

$$p^o = \beta p' + (1-\beta)p'', 0 \leq \beta \leq 1 \tag{5}$$

전략 집합은 볼록 집합(convex set)이기 때문에 $p^o \in \mathbf{P}$ 이다. 식(4)와 식(5)를 결합하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &|h_{jj}|^2 p_j^o = |h_{jj}|^2 (\beta p' + (1-\beta)p'') \\ &\geq \beta k\left(\sum_{i\neq j} |h_{ij}|^2 p_i' + \sigma^2\right) + (1-\beta)k\left(\sum_{i\neq j} |h_{ij}|^2 p_i' + \sigma^2\right) \\ &= k\left(\sum_{i\neq j} |h_{ij}|^2 \left[\beta p_i' + (1-\beta)p_i''\right]\sigma^2\right) \end{aligned} \tag{6}$$

따라서 SINR은 준오목함수이다.

두 준오목함수를 더하거나 뺀 함수는 준오목함수라는 결과를 이용하면 다음의 정리를 얻을 수 있다.

<정리 2> 효용함수를 구성하는 페널티함수 $\alpha(p_j)$가 p_j에 대해서 준오목함수이면 효용함수는 준오목함수이다.

한편 정리 2를 이용하면 전력제어 게임에서 내쉬균형의 존재성에 대한 정리를 얻을 수 있다.

<정리 3> 페널티 효용함수를 이용한 무선통신 전력제어 게임에서 페널티 함수가 준오목함수이면 항상 내쉬균형이 존재한다.

(증명) 전략집합 $p_j = [0, P_{max}]$ 이 공집합이 아니고 볼록 집합이며 컴팩트집합(compact set)인 성질을 가지고 있는 유클리디안 공간 $\mathbf{R}^N$ 의 부분집합이라는 사실은 자명하다. 그리고 효용함수가 연속함수라는 사실도 자명하며, 정리 2에 의해서 페널티함수 $\alpha(p_j)$가 준오목함수이면 효용함수는 준오목함수이다. 따라서 전력제어 게임은 내쉬균형의 존재조건을 만족한다[3].

따라서 식(2)의 효용함수를 구성하는 페널티 함수를 준오목함수로 설정하면 전력제어 게임은 정리 3에 의해서 항상 내쉬 균형이 존재하게 된다. 또한 효용함수 극대화의 일계조건을 이용하게 되면 다음과 같은 내쉬균형 전략 $p^* = (p_1^*, \cdots, p_N^*)$을 구할 수 있게 된다[3].

$$\frac{\partial \pi_j}{\partial p_j}(p^*) = \frac{|h_{jj}|^2}{\sum_{i\neq j} |h_{ij}|^2 p_i + \sigma^2} - \frac{\partial \alpha}{\partial p_j}(p_j^*) = 0, \quad j = 1, \ldots, N \tag{7}$$

3. 목표 송신전력 설정 알고리즘

항상 내쉬균형이 존재하는 효용함수를 얻기 위해서는 정리 3에 따라서 페널티 함수가 반드시 준오목함수의 형태를 가져야 한다. 2차 함수와 로그 함수는 준오목함수의 대표적인 예이다. 페널티 함수가 송신전력의 2차 함수, 즉 $\alpha(p_j) = cp_j^2$ 이면 식(7)을 이용하여 내쉬균형 전략을 식(8)과 같은 N차 연립방정식의 근으로 나타낼 수 있다.

$$p_j^* = \frac{|h_{jj}|^2}{2c}\left(\frac{1}{\sum_{i\neq j} |h_{ij}|^2 p_i^* + \sigma^2}\right), \quad j = 1, \cdots, N \tag{8}$$

만약 페널티 함수가 송신전력의 log함수, 즉 $\alpha(p_j) = c\log(p_j)$ 이면 내쉬균형 전략을 식(9)와 같은 N차 연립방정식의 근으로 나타낼 수 있다.

$$p_j^* = \frac{c}{|h_{jj}|^2}\left(\sum_{i \neq j} |h_{ij}|^2 p_i^* + \sigma^2\right), \quad j = 1, \cdots, N \tag{9}$$

각 단말기의 목표 송신전력 p_j^* 을 구하기 위해서는 식(8) 또는 식(9)에 해당하는 N 차 연립방정식의 해를 구해야 한다. 또한 각 기지국은 자신이 관리하는 단말 외에도 타 셀에 존재하는 단말의 경로이득 h_{ij} 을 모두 추정할 수 있어야 한다. 만약 시스템에 존재하는 전체 사용자가 N 명 있다고 가정하면, 각 기지국들은 매 순간마다 N 개의 단말과의 경로이득을 추정해야 하며 사용자가 늘어날수록 기지국의 부담은 더욱 커지게 된다. 즉, 이러한 방법은 복잡도가 높고 효율성도 떨어지는 단점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 단말의 목표 송신전력 p_i^* 를 N 차 연립방정식을 푸는 대신, (8)식과 (9)번식의 $\sum_{i \neq j} |h_{ij}|^2 p_i^*$ 을 간섭값에 대한 추정치로 대체하였다.

만약 각 기지국들이 자신이 관리하는 단말과의 경로이득과 다른 단말에 의한 간섭의 합, 열잡음을 추정할 수 있으면 N 차 연립방정식의 풀이과정 없이도 단말의 목표 송신전력을 바로 구할 수 있게 된다. 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

〈단말의 목표 송신전력 구하는 알고리즘〉

1) 단말의 초기 송신전력을 0에서 p_{max} 사이의 임의의 값으로 설정한다.
2) j 번째 기지국에서 자신이 관리하는 j 번째 단말까지의 경로이득 h_{jj} 을 파일럿 신호등을 이용하여 추정하고 수신 SINR γ_j을 측정한다.
3) j 번째 단말의 수신 SINR을 추정된 경로이득과 송신전력의 곱, 즉 수신 전력으로 나눈다.

$$\frac{\gamma_j}{|h_{jj}|^2 p_j} = \frac{1}{\sum_{i \neq j} |h_{ij}|^2 p_i + \sigma^2} \tag{10}$$

이 때 식(10)의 역수는 추정 간섭값이다.

4) 임의의 상수 c, 추정된 경로이득 및 과정 3에서 구한 추정 간섭값을 이용하여 j번째 단말의 목표전력을 구한다.

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제시한 알고리즘을 통해 구한 각 단말의 목표 송신전력에 맞추어 전력제어를 수행했을 때의 효과를 WiMAX 표준 규격에 맞춘 시스템 레벨 시뮬레이션 과정을 통해 살펴보았다[9], [10]. 단말과 기지국간의 전송 방식 및 액세스 방식은 OFDM 및 OFDMA를 이용하였고, 2-tier wrap-around 다중 셀 모델을 고려하였다. 하나의 셀은 3개의 섹터로 구분되는 3-sector 모델을 사용하였고, 셀 반경은 1km로 하였다. 각 단말은 각 섹터 마다 균일하게 분포하도록 하였다. 단말의 기본 전력제어는 개방루프와 폐루프 전력제어를 이용하였다[9]. 단말과 기지국 사이의 경로이득은 path-loss와 log-normal shadowing을 함께 고려하였고, 모든 채널은 완벽하게 추정할 수 있다고 가정하였다.

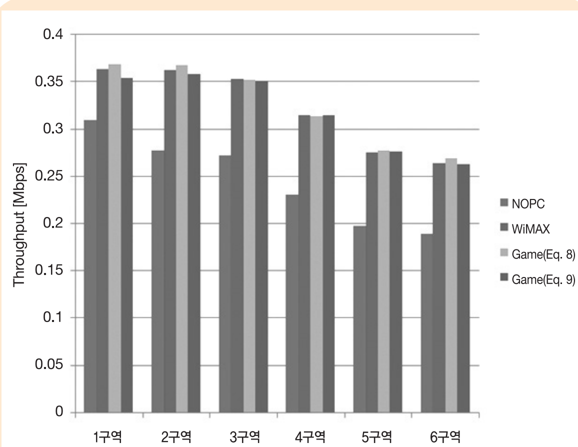
〈표 1〉에 그 결과를 요약하여 정리하였다. 이 때, NOPC는 전력제어를 하지 않은 경우, WiMAX는 기존의 WiMAX 전력제어를 적용한 경우, Game(Eq. 8)은 목표 송신전력을 설정할 때 식(8)을 적용 한 경우(c=2), Game(Eq. 9)는 목표 송신전력을 설정할 때 식(9)를 적용 한 경우(c=10)를 각각 나타낸다. 제안한 전력제어의 성능은 전력제어를 하지 않은 경우보다 약 30% 향상되었고, 기존의 WiMAX 전력제어보다 약간 우수하거나 비슷한 성능을 보였다. 식(8)을 적용한 방식의 평균 수율(throughput)은 기존의 전력제어 방식과 비교했을 때 낮은 송신전력으로 비슷한 평균 수율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었고, 식(9)를 적용한 방식은 기존 방식에 비하여 적은 송신 전력으로 약 0.7% 높은 평균 및 셀 경계 지역의 평균 수율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

(그림 2)는 셀을 중심으로부터 5개의 균일한 면적으로 나누었을 때, 해당 면적에 포함된 단말기들 수율의 합을 평균을 내어 구한 것이다. 구역 1이 셀 중앙에서 가장 가까운 곳이고, 구역 5가 셀 경계지역이다. 구역 6은 거리상으로는 타 셀에 포함되어야 하지만 쉐도잉(shadowing) 효과에 의해 자신의 셀/섹터에 송신하는 단말들을 포함 한 것이다. 셀 경계 지역에 속한 단말은 하나의 단말이 두 개 이상의 섹터로부터 수신하는 신호의 전력 차가 5dB 이내에 있는 것으로 정의하였다. 제안한 전력제어의 성능은 모든 구역에서 전력제어를 하지 않은 경우 보다는 높은 수율을 보이고, 기존 WiMAX의 전력제어와 비슷하거나 약간 좋은 수율을 보이는 것으로 나타났다.

제안한 알고리즘을 적용하여 전력제어를 수행할 때 각 단말들은 내쉬균형 전략에 의해서 자신의 효용함수를 최대로 하기 때문에 별다른 제어 신호가 필요 없어 구현이 간단하다는 장점이 있다. 또한 별도의 인접 기지국간 정보 교환 없이도 간섭 영향을 피하기 위하여 단말들이 서로 경쟁적으로 송신 전력을 높이는 racing 현상을 줄이는 장점이 있다.

〈표 1〉 전력제어 종류에 따른 시스템 성능 비교

	NOPC	WiMAX	Game Eq. 8	Game Eq. 9
Avg. Interference Per Sub-Carrier [dBm]	-104.87	-116.73	-117.14	-118.05
Avg. Tx Power [dBm]	23	19.95	19.86	19.43
Avg. Sector Throughput [Mbps]	1.474	1.93	1.945	1.913
Avg. Cell Edge Throughput [Mbps]	0.741	1.041	1.058	1.038



(그림 2) 전력제어 종류에 따른 구역별 수율

Ⅳ. 결 론

본 고에서는 게임이론에 대한 기본적인 소개와 게임이론이 적용될 수 있는 분야에 관하여 알아보았다. 또한 게임이론을 적용한 무선 설계 기술의 한 예로써 인접셀 간섭을 줄이기 위한 전력제어 방식에 대하여 기술하였다. 게임이론을 적용한 무선 설계 기술의 가장 큰 장점은 각자의 단말이 자신의 이익을 최대로 하기 위하여 동작하는 가운데, 상호간의 영향을 고려하여 전체 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다는 점이다. 모든 단말을 중앙 통제적으로 조절할 수 있는 상황이라면 최적화 이론을 적용해서 시스템 성능 향상을 꾀하는 것이 맞지만, 인접셀 간섭과 같이 동일 통제 범위 밖의 개체들의 상호 영향을 고려한 문제 해결 등에서는 게임이론이 가장 효과적인 방법이 될 수 있다.

만일 당신이 통신분야의 전문가라면 이미 게임이론이, 더 이상 다른 분야에 특화된 이론이라고 치부해 버리기에는, 통신시스템을 분석하기 위한 도구로서 깊게 자리잡고 있다는 사실을 주목할 필요가 있겠다.

참 고 문 헌

[1] Altman, E., Boulogne, T., El-Azouzi, R., Jimenez, T. and Wynter, L., “A survey on networking games in telecommunications”, Computers & Operations Research, Vol. 33, 2006, pp.286-311

[2] Fudenberg, D. and Levine, The Theory of Learning in Games, The MIT Press, Cambridge, 1998

[3] Fudenberg, D. and Tirole, J., Game Theory, MIT Press, Cambridge, 1991

[4] Ji, Zhu and Ray Liu, K. J., “Dynamic spectrum sharing: a game theoretic overview”, IEEE Communications Magazine, May 2007, pp.88-94

[5] MacKenzie, A. B. and R., DaSilva, Game theory for Wireless Engineers, Morgan & Claypool Publishers, 2006

[6] Siegfried, T., A Beautiful Math, Joseph Henry Press, Washington D.C., 2006

[7] Srivastava, V., Neel, J., MacKenzie, A. B., Menon, R., DaSilva, L. A., Hicks, J. E., Reed, J. H. and Gilles, R. P., “Using game theory to analyze wireless ad hoc networks”, IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 7, No. 4, 2005, pp.46-56

[8] 왕규호, 게임이론, 박영사, 2005

[9] IEEE Std. 802.16-2004: IEEE Standard for Local and

metropolitan area networks ?Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, June 2004.

[10] IEEE 802.16m-08/004r 3, "IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)", July 2008.

[11] 이덕주, 홍인기, "통신시스템을 분석하기 위한 도구로서의 게임이론", 한국통신학회지 정보와 통신 26권7호, 2009년 7월, pp.3-9

[12] 김주협, 장연식, 이덕주, 홍인기, "게임이론을 이용한 유한전략집합을 갖는 전력제어 알고리즘", 한국항행학회 논문지 13권 1호, 2009년 2월, pp.87-96

약 력

홍 인 기

1989년 연세대학교 전기공학과 학사
1991년 연세대학교 전기공학과 석사
1995년 연세대학교 전기공학과 박사
1995년 ~ 1999년 SK Telecom 중앙연구원 선임연구원
1997년 ~ 1998년 NTT DoCoMo 연구원
1999년 ~ 현재 경희대학교 전자정보대학 교수
관심분야 : 무선 및 이동통신, 게임이론, Corss-layer 설계

이 덕 주

1988년 서울대학교 공학사
1990년 서울대학교 공학석사
1995년 서울대학교 공학박사
1996년 ~ 1997년 일본 와세다 대학교 Post-Doc.
2000년 ~ 현재 경희대학교 산업경영공학과 부교수
관심분야 : 통신경영, 게임이론, 기술경영