

게임이론을 이용한 유한 전략 집합을 갖는 전력제어 알고리즘

Power Control Algorithm with Finite Strategies: Game Theoretic Approach

김주협*, 장연식**, 이덕주***, 홍인기*

Ju-Hyup Kim*, Yeon-Sik Jang**, Deok-Joo Lee*** and Een-Kee Hong*

요 약

본 논문에서는 무선통신에서 유한개의 전략집합을 갖는 전력제어 문제를 게임이론을 통하여 분석하였다. 기존의 게임이론을 이용한 전력제어에서는 개방루프 제어에서와 같이 초기전송 전력을 결정하는 연속적인 게임 모델에 국한된 반면, 본 논문에서는 폐루프 전력제어에서와 정해진 전력제어 step size 만큼 전력을 올리거나 내리는 전력제어 문제를 게임 이론의 전형적인 모델 중의 하나인 죄수 딜레마 모형을 이용하여 분석하였다. 분석결과 전력을 올리는 전략이 내쉬 균형을 증명하였고, 따라서 이와 같은 상황에서는 모든 단말기가 자신의 전력을 향상시키려고 시도하기 때문에 전체 시스템 측면에서는 효율적이지 못하다. 본 논문에서는 인접 셀 간 간섭이 심각한 환경에서 효율적인 전력제어 알고리즘을 구현하기 위하여 게임모형의 효용함수를 새롭게 정의하였고, 그 결과 모든 단말이 자신의 효용함수를 최대화하려고 노력한다고 하더라도 자신의 송신 전력이 일정한 수준으로 유지될 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

Abstract

The purpose of this paper is to analyze the power control problem in wireless communications with game theoretic approach. The major contribution of the present paper is that we formulated the problem as a game with a finite number of strategies while most of the previous game theoretic power control literatures modeled with continuous game in which there are infinite number of strategies. It should be noted that the closed-loop power control would be performed in a discrete manner, power up or down from the present level of power with fixed power control step size. We model the current closed-loop power control scheme with the famous Prisoner's dilemma model and show that the power-up strategy is Nash equilibrium. That is, every mobile tries to increase their power and approach to their maximal power. Thus, the outcome of current power control (Nash equilibrium) is inefficient. In order to attain efficient power control for the environment where ICI(Inter-Cell Interference) is severe, we developed a new payoff function in which the penalty mechanism is introduced and derived conditions under which power-down becomes Nash equilibrium strategy for all players. Furthermore we examined the trajectory of equilibrium power when the power control game will be played repeatedly.

Key words : Power Control, Game Theory, Nash Equilibrium

* 경희대학교 전자정보대학

** 서울대학교 공과대학 산업공학과

*** 경희대학교 테크노공학 대학

· 교신저자 (Corresponding Author) : 홍인기

· 투고일자 : 2009년 1월 7일

· 심사(수정)일자 : 2009년 1월 7일 (수정일자 : 2009년 2월 16일)

· 게재일자 : 2009년 2월 28일

I. 서 론

최근에 음성 뿐 아니라 멀티미디어 서비스를 무선으로 전송하는 멀티미디어 무선통신 서비스에 대한 수요가 증가함에 따라 제한된 무선자원을 효율적으로 사용하는 것이 중요한 이슈가 되고 있다. 특히 전력제어는 무선 네트워크의 시스템 성능을 결정짓는 매우 중요한 문제 중의 하나로, 전력자원 사용의 효율성을 높이고 또한 전체 시스템 성능을 결정하는 중요한 핵심 기술 중의 하나이다 [1]-[2].

또한 최근에 상용화된 Wibro 시스템이나 향후 전개될 IEEE 802.16m/ 16j [3]-[4]나 3GPP LTE 시스템 [5]과 같이 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술을 근간으로 하는 시스템에서는 셀 내의 간섭보다 셀간 간섭이 성능에 더 심각한 영향을 미치게 되어 이를 고려할 수 있는 전력제어 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [6]-[7].

효율적인 전력제어 방법을 찾기 위해서는 무선 네트워크 운용과정에서 발생하는 중요한 특성들이 적절히 고려되어야 하며, 거기에는 다음과 같은 특성들이 포함되어야 할 것이다. 첫째, 무선네트워크에 있어서 동일채널간섭(CCI:Co-Channel Interference)이나 채널의 시변성(Time-Varying Nature) 등과 같은 기술적 특성이 고려되어야 한다. 예를 들어 무선 네트워크의 전송속도를 높이고, 서비스의 품질(QoS: Quality of Service)을 좋게 하기 위해서는 신호 대 잡음 및 간섭 (SINR:Signal-to-Interference plus-Noise Ratio)을 높이도록 노력하여야 하며, 높은 SINR을 얻기 위해서 각각의 단말기는 보다 많은 양의 전력으로 송신하려고 할 것이다. 그러나 전력을 상승시킨 단말기는 자신의 SINR을 높이는 대신 주변의 다른 단말기에 많은 간섭을 일으키게 된다. 즉, SINR을 높이기 위해 한 단말기가 사용전력을 높이게 되면 그 결과 다른 단말기에 간섭을 주게 되고, 주변의 다른 단말기들은 이러한 간섭값 증가에 대응하기 위하여 각자 자신들의 송신 전력을 올리려고 할 것이다. 결국 자신의 전력을 높였지만, 거기에 대응하기 위한 다른 단말기들의 전력 상승으로 자신이 겪는 간섭값이 다시 커지게 되어 전력상승을 통하여 얻을 수 있는 SINR의 이득은 거의 없거나, 혹은 오히려 SINR이 떨어지는 현상

이 발생하기도 한다. 또한 높은 전력으로 송신하게 되면 전력 소모가 커 배터리 소모가 크다는 단점이 있다.

둘째, 무선 네트워크의 분산적 운용에 대한 특성이 고려되어야 한다. 무선 네트워크에서는 여러 명의 단말기 사용자가 존재하고, 단말기 사용자는 다른 단말기 사용자의 상황에 대한 정보를 가지고 있지 않다. 그리고 각 단말기 사용자들이 선택하는 전력은 자신의 단말기 성능뿐만 아니라 간섭과정을 통해서 다른 단말기 사용자의 효율에도 영향을 끼치게 된다. 이때 분산적으로 운용되는 무선 네트워크 혹은 동일한 제어 범위(이를 테면 동일 기지국)내에 있지 않은 단말기들은 각자의 사용전력에 대한 의사결정을 내릴 때 각자 자신의 단말기의 효율을 최대화하기 위해 이기적으로 행동을 하는 것이 가장 이성적인(rational) 의사결정이라 할 수 있다. 따라서 전체 네트워크의 성능을 위해서 자기 단말기의 성능을 포기하는 의사결정은 분산적인 네트워크 하에서는 비이성적인 의사결정으로서, 아무런 대가나 인센티브가 없이 이를 기대하는 것은 불가능하다는 것이다.

앞에서 설명한 두 가지의 특성을 고려해 볼 때, 무선 네트워크의 전력제어 문제는 각 단말기 사용자들의 사용전력에 관한 의사결정을 통해서 얻게 되는 효율이 상호간에 영향을 주게 되는 전형적인 게임 이론적 상황이라고 할 수 있다. 특히 분산적으로 운용되는 무선 네트워크 하에서 모든 단말기들은 자신의 효율만을 극대화하기 위한 노력과 행동만을 하게 될 것이므로 전력제어 문제는 전형적인 비협조적 게임모형의 적용분야라고 생각할 수 있다. 따라서 이러한 상황에 처해 있는 단말기 사용자들은 자신의 전력을 제어하는데 있어서 게임이론으로 분석되는 전략적인 의사결정을 최적의 의사결정으로 간주하는 것이 타당할 것이다.

이와 같은 전력제어 문제의 게임이론적인 특성은 수년전부터 연구자들에 의해 인식되었으며, 최근 들어 비협조적 전력제어 게임모형에 대한 활발한 분석들이 이루어지고 있는 실정이다. 이들 중 대표적인 논문들을 살펴보면 다음과 같다. Mackenzie & Wicker(2001)는 무선 네트워크의 전력제어를 전력을 올려 자신의 SINR을 높이려고 하는 플레이어에 대해

서 기지국이 제제를 가하는 심판의 역할을 하도록 하여 전력제어를 할 수 있도록 모델링을 한 refereed 게임과, 기지국이 심판의 역할에서 벗어나 플레이어들이 스스로 협력을 할 수 있도록 하는 훈련을 통해 전력제어를 해결할 수 있도록 모델링을 한 반복게임(repeated game)을 통해 해결하고자 하였다 [8]. 한편 Teerapabkajorndet and Krishnamurthy(2003)은 무선 네트워크의 전력제어를 불충분한 정보(incomplete information)하의 비협조적 전력제어 게임으로 모델링하여 해결하고자 하였다 [9].

Han and Liu(2005)는 무선 네트워크의 전력제어를 사용자 수준과 시스템 수준으로 나누어 서, 사용자 수준에서는 플레이어들이 자신의 효용을 극대화하기 위해서 서로 경쟁하는 비협조적 전력제어 게임으로 모델링하고, 시스템 수준에서는 제한된 최대전송전력 하에 전체 무선네트워크 시스템의 수율(throughput) 극대화를 추구하는 비협조적 게임으로 모델링하였다 [10].

최근에 Chengnian and Zhang(2007)은 무선 네트워크의 전력제어를 반복적인 비협조적 게임으로 모형화 하고, 균형점까지 도달하는 과정을 가상플레이(fictitious play)에 의한 학습과정으로 가정하여 분석하였다 [11].

기존의 연구들을 살펴보면, 무선 네트워크의 전력제어에 대한 게임 이론적 접근은 많지만, 주로 연속적인 게임모형으로 접근하여 내쉬 균형을 찾고자 하였다. 이러한 접근 방식은 여러 사용자가 자신의 송신 전력을 결정할 때의 문제를 해결하기 위한 것이라고 할 수 있다. 즉, 기존의 모든 게임 이론을 이용한 전력제어 연구들은 개방루프(open-loop) 전력제어에서와 같이 자신의 초기 전송 전력을 설정하는 분야에 대해서 다루었다 [12]-[14]. 이렇게 각자의 전송 전력이 결정되었다 하더라도, 무선 채널은 시간에 따라 그 특성이 계속해서 변하게 되고, 또한 새로운 단말기가 통화를 시도하고 일부 단말기는 통화를 끝내기도 하여 전체적인 무선 환경은 계속해서 변화한다. 따라서 이러한 변화에 대응하기 위해서 폐루프(closed-loop) 전력제어에서와 같이 지속적인 전력제어가 이루어지는데, 이러한 전력제어는 주기적으로 정해진 전력 양 만큼 올리거나 혹은 내리는 과정을

계속 반복하고 있다.

본 논문에서는 이러한 반복적으로 정해진 양만큼의 전력을 올리고 내리는 전력제어에 게임이론을 적용하였다. 즉, 기존의 연구들과는 달리 유한개의 전략을 가지는 이산적인 게임 모형의 관점에서 모형을 개발하고 분석하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 무선네트워크의 전력제어 문제를 게임이론의 [15], 죄수의 딜레마 모형을 응용하여 모형화하고 내쉬 균형을 도출하여 분석하는 것을 목적으로 한다. 특히 전력사용의 효율성을 확보하기 위하여 게임 참가자인 단말기 사용자들이 자신의 전력을 낮추는 전략을 내쉬 균형 전략으로 만들기 위한 메커니즘을 이득함수 변경의 관점에서 설계하였다. 분석결과 자신의 전력을 낮추는 전략 내쉬 균형이 되는 조건을 도출하였고, 모의실험을 통하여 게임이 반복적으로 시행되는 경우 게임 상황의 전개과정에 대해 분석하였다.

II. 비협조적 전력제어의 비효율성

2-1 게임 모형

분석의 편의를 위하여 2대의 단말기만으로 이루어진 무선 네트워크 상황을 고려해보자. 즉, 본 논문에서는 전력제어 게임 참가자를 2대의 단말기로 한정하기로 하며, 참가자 집합은 $N = \{1, 2\}$ 와 같다. 한편 각 단말기의 현재 전력수준을 p_j , $j = 1, 2$ 라 하자. 이때 일정한 시간간격 내에서 이루어지는 전력제어는 현재의 전력수준에서 일정한 수준 (Δp)만큼을 올리거나 낮출 수 있는 대안만을 가지고 있다고 가정한다. 따라서 각 단말기의 전략변수는 전력을 올리는 것(U)과 낮추는 것(D) 두 가지 경우만 존재하게 되며, 전략집합은 $S_i = \{U, D\}$, $i = 1, 2$ 와 같다.

한편 각 단말기 사용자의 효용함수(U_i)는 SINR로 설정하기로 하며, 단말기 i 의 SINR은 식 1과 같이 정의된다.

| | | MS 2 | |
|------|------|--|--|
| | | Up | Down |
| MS 1 | Up | $\frac{ h_{11} ^2(p_1 + \Delta p)}{ h_{21} ^2(p_2 + \Delta p)}, \frac{ h_{22} ^2(p_2 + \Delta p)}{ h_{12} ^2(p_1 + \Delta p)}$ | $\frac{ h_{11} ^2(p_1 + \Delta p)}{ h_{21} ^2(p_2 - \Delta p)}, \frac{ h_{22} ^2(p_2 - \Delta p)}{ h_{12} ^2(p_1 + \Delta p)}$ |
| | Down | $\frac{ h_{11} ^2(p_1 - \Delta p)}{ h_{21} ^2(p_2 + \Delta p)}, \frac{ h_{22} ^2(p_2 + \Delta p)}{ h_{12} ^2(p_1 - \Delta p)}$ | $\frac{ h_{11} ^2(p_1 - \Delta p)}{ h_{21} ^2(p_2 - \Delta p)}, \frac{ h_{22} ^2(p_2 - \Delta p)}{ h_{12} ^2(p_1 - \Delta p)}$ |

그림 1. 전력제어 게임행렬
Fig. 1. Matrix of power control game

$$\Gamma_i = \frac{|h_{ii}|^2 p_i}{\sum_{k \neq i} |h_{ki}|^2 p_k} \quad (1)$$

여기서 p_i 는 단말기 i 의 전송전력, h_{ki} 는 k 단말기와 i 기지국까지의 채널을 나타낸다.

위에서 설정한 바와 같이 게임 참가자가 2명이므로 선택 가능한 전략의 수도 2개이므로 전형적인 2×2 행렬 게임으로 표현할 수 있다. 식 1의 효용함수를 참가자가 2명인 경우에 전력을 현재수준($p_j, j = 1, 2$)에서 올리거나(+ Δp) 낮추는 (- Δp) 상황으로 적용시키면 그림 1과 같은 게임행렬을 얻게 된다.

2-2 분석

우선 단말기 1의 입장에서 살펴볼 때 아래 식 2, 3에 의하면 단말기 2가 U를 선택하던 D를 선택하던 자신의 입장에서는 U를 선택하는 것이 D를 선택하는 경우보다 효용이 높다는 사실을 확인 할 수 있다.

$$\frac{|h_{11}|^2(p_1 + \Delta p)}{|h_{21}|^2(p_2 + \Delta p)} \geq \frac{|h_{11}|^2(p_1 - \Delta p)}{|h_{21}|^2(p_2 + \Delta p)} \quad (2)$$

$$\frac{|h_{11}|^2(p_1 + \Delta p)}{|h_{21}|^2(p_2 - \Delta p)} \geq \frac{|h_{11}|^2(p_1 - \Delta p)}{|h_{21}|^2(p_2 - \Delta p)} \quad (3)$$

따라서 단말기 1의 입장에서 전력을 올리는 전략(U)이 낮추는 전략(D)보다 우월한 전략(dominating strategy)임을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 단말기

2의 입장에서도 동일하게 적용되는 사실임을 식 4와 5를 통해서 쉽게 확인할 수 있다.

$$\frac{|h_{22}|^2(p_2 + \Delta p)}{|h_{12}|^2(p_1 + \Delta p)} \geq \frac{|h_{22}|^2(p_2 - \Delta p)}{|h_{12}|^2(p_1 + \Delta p)} \quad (4)$$

$$\frac{|h_{22}|^2(p_2 + \Delta p)}{|h_{12}|^2(p_1 - \Delta p)} \geq \frac{|h_{22}|^2(p_2 - \Delta p)}{|h_{12}|^2(p_1 - \Delta p)} \quad (5)$$

따라서 전력을 올리는 전략(U)이 두 단말기의 입장에서 모두 우월한 전략이 되고, 그 결과 서로 전력을 올리는 (U, U)가 내쉬 균형을 이룬다는 사실을 알 수 있다. 이와 같이 두 참가자가 동일한 우월전략을 가지게 됨으로서 내쉬 균형이 결정되는 상황은 죄수의 딜레마 게임과 동일한 상황이다. 즉, 전력제어 게임 상황은 죄수의 딜레마 게임과 동일한 상황으로 모형화가 됨을 확인할 수 있는 것이다.

죄수의 딜레마 게임이 가지고 있는 문제점은 우월 전략이라는 강한 개념의 전략으로 선택되는 균형점의 결과가 비효율적인 결과를 초래한다는 사실인데, 전력제어 게임도 유사한 결과가 도출된다는 사실을 다음에 설명하는 내용으로부터 확인할 수 있다.

본 절에서 모형화한 바와 같이 SINR을 효용함수로 설정하고 게임 상황을 진행시키게 되면 모든 단말기 사용자는 자신들의 우월전략인 ‘U’, 즉 전력을 올리는 전략을 취하는 것이 최적의 선택이 된다는 사실이 분석되었다. 따라서 무선 네트워크 내에 있는 각 단말기 사용자들이 게임이론에서 가정하는 이성적인 참가자라면 결국 모두가 전력을 높이는 결과를 초래

하게 될 것이다.

즉, 모든 단말기 사용자가 더 높은 효율을 얻기 위해서 전송전력을 높일 경우, 이를 위해 더 많은 배터리의 소모가 일어나게 된다. 또한 자신의 SINR을 높이기 위해 전송전력을 높임으로써 다른 단말기 사용자의 신호에 대한 간섭이 증가하게 되고, 이에 대응하기 위해 다른 단말기 사용자 또한 전송전력을 높이게 되는 것이다. 이와 같은 상황이 반복적으로 일어나게 되면 계속 전력을 높이게 됨으로써, 이로 인해 전반적인 네트워크의 성능은 상당히 낮아지게 되고 결과적으로 전력사용의 낭비를 초래하여 전력제어에 있어서 비효율성을 벗어나지 못하게 되는 것이다.

위와 같은 상황을 간단한 수치예제(H[dB]=[120.12 122.44; 122.44 120.12], p1=40[mW], p2=70[mW], Δp = 1[dB])를 통해서 살펴본 결과를 그래프로 도시해보면 다음 그림 2와 같다.

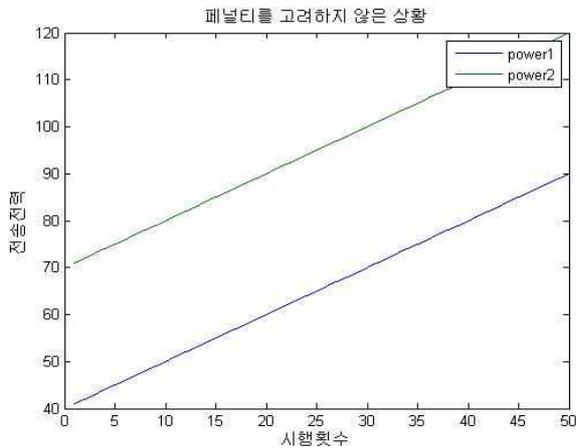


그림 2. 페널티를 고려하지 않은 상황의 전력변화 추이
Fig. 2. Variation of power level (without penalty function)

그림 2에서 확인할 수 있듯이 게임을 반복적으로 수행할수록 단말기 모두가 전송전력을 높이는 (Up, Up) 전략을 계속해서 선택하여 전송전력이 계속 상승하는 결과를 볼 수 있다.

결국 두 단말기 사용자 모두가 전송전력을 높이는 전략을 선택하게 되는 상황은 비효율적인 것으로서 바람직하지 않다. 따라서 단말기 사용자의 전력사용에 있어서 전력제어의 효율성을 확보하기 위해서는 단말기 사용자들이 전송 전력을 낮추는 전략을 선택할 수 있도록 하는 메커니즘을 만들 필요가 있다.

III. 페널티 효용함수를 이용한 무선 네트워크의 전력제어 게임 모형

3-1 게임 모형

본 절에서는 단말기 사용자들이 자발적으로 전력을 낮추는 전략을 취하도록 유도하기 위하여 앞 절의 게임모형에서 효용함수를 새롭게 변경해 보고자 한다. 즉, 전력을 높이는 전략을 취하는 경우 얻게 되는 효용에는 기존의 SINR에 일정한 페널티를 부여하고, 반대로 전력을 낮추는 경우에는 일정한 보상을 해주는 형태의 새로운 효용함수를 설정하기로 한다. 이와 같은 상황을 반영하여 식 1에서 나타난 단말기 사용자의 효용함수를 식 6, 7과 같이 새롭게 정의하였다.

$$\Gamma'_i(U) = \frac{|h_{ii}|^2 p_i}{\sum_{k \neq i} |h_{ki}|^2 p_k} - \alpha(p_i) \quad (6)$$

$$\Gamma'_i(D) = \frac{|h_{ii}|^2 p_i}{\sum_{k \neq i} |h_{ki}|^2 p_k} + \alpha(p_i) \quad (7)$$

위 식 6을 보면, 단말기 사용자가 전송전력을 올리는 경우에는 원래의 효용 SINR에서 α(p_i) 만큼의 페널티를 부과 받게 되어 효용이 α(p_i) 만큼 감소하게 된다. 여기에서 페널티는 자신의 전력수준의 함수인 α(p_i)로 설정한다. 반대로 식 7에 의하면 전송전력을 낮추게 되면 보상을 받게 되어 α(p_i) 만큼의 효용이 증가하게 된다. 위 효용함수를 참가자가 2명인 경우에 전력의 현재수준(p_j, j = 1, 2)에서 올리거나(+Δp_u) 낮추는 (-Δp_d) 상황으로 적용시키면 그림 3과 같은 게임행렬을 얻게 된다.

3-2 분석: 페널티 함수가 상수인 경우

그림 3의 게임행렬에 의하면 어떤 전략이 내쉬 균형이 될 것인가는 페널티 변수인 α(p_i) 값이 어떤 값인지에 따라 결정되어진다. 따라서 본 연구에서는 각 셀이 내쉬 균형 결과가 되어지는 α(p_i) 값의 조건을 도출하고자 한다. 특히 본 절에서는 페널티 함수가

| | | MS 2 | |
|------|------|--|--|
| | | Up | Down |
| MS 1 | Up | $\frac{ h_{11} ^2(p_1 + \Delta p)}{ h_{21} ^2(p_2 + \Delta p)} - \alpha,$ $\frac{ h_{22} ^2(p_2 + \Delta p)}{ h_{12} ^2(p_1 + \Delta p)} - \alpha$ | $\frac{ h_{11} ^2(p_1 + \Delta p)}{ h_{21} ^2(p_2 - \Delta p)} - \alpha,$ $\frac{ h_{22} ^2(p_2 - \Delta p)}{ h_{12} ^2(p_1 + \Delta p)} + \alpha$ |
| | Down | $\frac{ h_{11} ^2(p_1 - \Delta p)}{ h_{21} ^2(p_2 + \Delta p)} + \alpha,$ $\frac{ h_{22} ^2(p_2 + \Delta p)}{ h_{12} ^2(p_1 - \Delta p)} - \alpha$ | $\frac{ h_{11} ^2(p_1 - \Delta p)}{ h_{21} ^2(p_2 - \Delta p)} + \alpha,$ $\frac{ h_{22} ^2(p_2 - \Delta p)}{ h_{12} ^2(p_1 - \Delta p)} + \alpha$ |

그림 3. 패널티를 고려한 상황에서의 전력제어 게임 행렬

Fig. 3. Matrix of power control game with penalty

$\alpha(p_i) = \alpha$ 로서 상수인 경우에 α 의 범위를 구하였다.

우선 내쉬 균형의 정의를 이용하면 (D, D)가 내쉬 균형이 되기 위해서는 단말기 1의 입장에서는 식 8이 만족하여야 하고, 단말기 2 입장에서는 식 9가 만족되어야 한다.

$$\frac{|h_{11}|^2(p_1 - \Delta p)}{|h_{21}|^2(p_2 - \Delta p)} + \alpha \geq \frac{|h_{11}|^2(p_1 + \Delta p)}{|h_{21}|^2(p_2 - \Delta p)} - \alpha \quad (8)$$

$$\frac{|h_{22}|^2(p_2 - \Delta p)}{|h_{12}|^2(p_1 - \Delta p)} + \alpha \geq \frac{|h_{22}|^2(p_2 + \Delta p)}{|h_{12}|^2(p_1 - \Delta p)} - \alpha \quad (9)$$

위 식 8, 9를 정리하면 다음과 같은 식 10, 11을 얻을 수 있다.

$$\alpha > \frac{|h_{11}|^2 \Delta p}{|h_{21}|^2(p_2 - \Delta p)} \quad (10)$$

$$\alpha > \frac{|h_{22}|^2 \Delta p}{|h_{12}|^2(p_1 - \Delta p)} \quad (11)$$

한편 (U, U)가 내쉬 균형이 되기 위해서는 단말기 1의 입장에서는 식 12가 만족하여야 하고, 단말기 2 입장에서는 식 13이 만족되어야 한다.

$$\frac{|h_{11}|^2(p_1 + \Delta p)}{|h_{21}|^2(p_2 + \Delta p)} - \alpha \geq \frac{|h_{11}|^2(p_1 - \Delta p)}{|h_{21}|^2(p_2 + \Delta p)} + \alpha \quad (12)$$

$$\frac{|h_{22}|^2(p_2 + \Delta p)}{|h_{12}|^2(p_1 + \Delta p)} - \alpha \geq \frac{|h_{22}|^2(p_2 - \Delta p)}{|h_{12}|^2(p_1 + \Delta p)} + \alpha \quad (13)$$

그리고 식 12, 13을 정리하면 식 14, 15와 같다.

$$\alpha < \frac{|h_{11}|^2 \Delta p}{|h_{21}|^2(p_2 + \Delta p)} \quad (14)$$

$$\alpha < \frac{|h_{22}|^2 \Delta p}{|h_{12}|^2(p_1 + \Delta p)} \quad (15)$$

이와 같은 방식으로 네가지 전략조합 (U, U), (U, D), (D, U), (D, D)에 대해서 각 전략조합이 내쉬 균형이 되는 α 값의 범위를 구하여 정리해 놓은 결과가 그림 4이다.

그림 4에 의하면 α 의 범위는 각 단말기에 따라 다음과 같이 크게 3가지로 구분할 수 있다.

$$\alpha < \frac{|h_{ii}|^2 \Delta p}{|h_{ji}|^2(p_j + \Delta p)} \quad (16)$$

$$\frac{|h_{ii}|^2 \Delta p}{|h_{ji}|^2(p_j + \Delta p)} < \alpha < \frac{|h_{ii}|^2 \Delta p}{|h_{ji}|^2(p_j - \Delta p)} \quad (17)$$

| | | MS 2 | |
|------|------|--|--|
| | | Up | Down |
| MS 1 | Up | $\alpha < \frac{ h_{11} ^2 \Delta p}{ h_{21} ^2 (p_2 + \Delta p)},$ $\alpha < \frac{ h_{22} ^2 \Delta p}{ h_{12} ^2 (p_1 + \Delta p)}$ | $\alpha < \frac{ h_{11} ^2 \Delta p}{ h_{21} ^2 (p_2 - \Delta p)},$ $\alpha > \frac{ h_{22} ^2 \Delta p}{ h_{12} ^2 (p_1 + \Delta p)}$ |
| | Down | $\alpha > \frac{ h_{11} ^2 \Delta p}{ h_{21} ^2 (p_2 + \Delta p)},$ $\alpha < \frac{ h_{22} ^2 \Delta p}{ h_{12} ^2 (p_1 - \Delta p)}$ | $\alpha > \frac{ h_{11} ^2 \Delta p}{ h_{21} ^2 (p_2 - \Delta p)},$ $\alpha > \frac{ h_{22} ^2 \Delta p}{ h_{12} ^2 (p_1 - \Delta p)}$ |

그림 4. 내쉬 균형이 되는 상수 α 의 범위
fig. 4. Range of constant α for Nash equilibrium

$$\alpha > \frac{|h_{ii}|^2 \Delta p}{|h_{ji}|^2 (p_j - \Delta p)} \quad (18)$$

게임이 반복적으로 시행되는 경우, α 값이 두 단말기에 대해서 모두 식 16을 만족하는 경우에는 두 명의 단말기 사용자가 (U, U)이라는 전략을 선택하다가 일정 시점에 도달하게 되면, (D, U) 전략 또는 (U, D) 전략을 선택하는 영역으로 들어가게 된다. 한편 α 값이 식 18을 만족할 정도로 큰 경우에는 두 명의 단말기 사용자가 (D, D) 전략을 선택하다가 일정 시점에 도달하게 되면, (D, U) 전략 또는 (U, D) 전략을 선택하게 된다.

α 값이 식 17를 만족하게 되어 한번 (D, U) 전략을 선택하게 되면 계속해서 (D, U) 전략만을 선택하게 되며, 반대로 (U, D) 전략을 선택하게 되는 경우에도 (U, D) 전략만을 계속해서 선택하게 된다. 이는 게임의 횟수를 거듭할수록 α 값의 하한조건은 더 작아지고 α 값의 상한조건은 더 커지기 때문이다. 따라서 이 경우 한쪽의 전송전력이 0으로 다른 쪽은 무한대 발산하게 되는 문제점이 발생한다.

따라서 α 가 상수인 경우에는 결과적으로 (D, U) 전략 또는 (U, D) 전략에서 빠져나오지 못하고 발산을 하게 되는 문제점이 발생하게 된다. 위와 같은 상황을 간단한 수치예제($H[\text{dB}] = [120.12 \ 122.44; 122.44 \ 120.12]$, $p_1 = 40[\text{mW}]$, $p_2 = 70[\text{mW}]$, $\Delta p = 1[\text{dB}]$)를 통

해서 살펴본 결과를 그래프로 도시해보면 그림 5와 같다.

그림 5에서 전력변화를 살펴보면, 처음에는 모두 전력을 올리는 전략을 결정한 후 게임이 반복적으로 수행되면서 일정한 시점까지는 단말기 1, 2 모두 전력을 올리는 전략을 선택한다. 하지만 일정기간 이후에 단말기 2는 전력을 올리는 전략을 고수하지만 단말기 1은 전력을 낮추는 전략으로 변경하게 된다. 이후 게임이 반복되더라도 동일한 전략을 고수하게 되어 종국에는 전력을 낮추는 전략을 취한 단말기 2의 전송전력이 0이 되는 결과를 볼 수 있다.

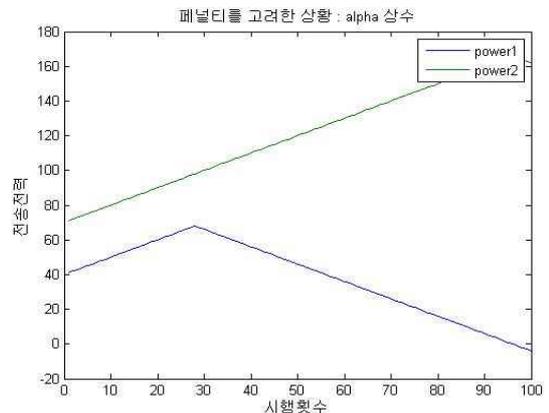


그림 5. 페널티를 고려한 상황의 전력변화 추이 1 (α 상수)

Fig. 5. Variation of power level with penalty 1 (constant α)

그림 6에서 수치예제 ($H[\text{dB}]=[120.12 \ 122.44; 122.44 \ 120.12]$, $p_1=40[\text{mW}]$, $p_2=70[\text{mW}]$, $\Delta p = 1 [\text{dB}]$)의 전력변화를 살펴보면, 처음에는 모두 전력을 내리는 전략을 결정한 후 게임이 반복적으로 수행되면서 일정한 시점까지는 단말기 1, 2 모두 전력을 내리는 전략을 선택한다. 따라서 이 경우, 전력제어에 있어서 효율적인 상황을 보여주게 된다. 그러나 이 경우에도 마찬가지로 일정기간 이후에 단말기 2는 전력을 낮추는 전략을 고수하고 단말기 1만 전력을 올리는 전략으로 변경하게 된다. 이후 게임이 반복되더라도 동일한 전략을 고수하게 되어 그림 5와 마찬가지로 종국에는 단말기 2의 전송전력이 0이 되어버리는 문제점을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있다.

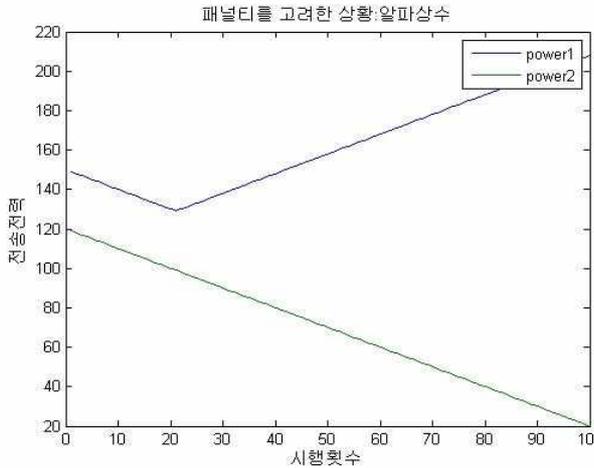


그림 6. 패널티를 고려한 상황의 전력변화 추이 2 (α 상수)

Fig. 6. Variation of power level with penalty 2 (constant α)

3-3 분석: 패널티 함수가 변하는 경우

$\alpha(p_i)$ 를 패널티 함수라고 하고, 각 단말기가 도달하고자 하는 전력수준을 p_1^* , p_2^* 라 하자. 이와 같이 궁극적으로 도달하고자 하는 전력수준이 존재한다면 현재 전력수준이 p_i^* 보다 높으면 전송 전력을 낮추고, 반대의 경우에는 전송 전력을 높이도록 유도하는 메커니즘이 바람직한 전력제어 설계라고 볼 수 있을 것이다. 하지만 앞 절에서 보았듯이 SINR 기준으로 각자의 효용을 극대화하는 방향으로 전력제어를 하면, 전력이 한 방향으로 발산하게 된다. 본 절에서는

각 개인이 자기 효용을 극대화 하는 방향으로 게임을 진행하면, 결국 궁극적으로 도달하고 자하는 전력에 수렴하도록 페널티 함수를 설계하였다.

단순화를 위하여 전송 전력을 높이거나 낮추는 경우, 전력의 변화량을 같다고 가정하자. 이때, 현재 수준전력 $p_i > p_i^*$ 에서 식 19를 만족하면 전송전력을 Δp 만큼 낮추는 전략(D)이 내쉬 균형 전략이고, 현재 수준전력 $p_i < p_i^*$ 에서 식 20을 만족하면 전송전력을 Δp 만큼 올리는 전략(U)이 내쉬 균형 전략이 된다.

$$\alpha(p_i) > \frac{|h_{ii}|^2 \Delta p}{|h_{ji}|^2 (p_j - \Delta p)} \quad \text{for } p_i > p_i^* \quad (19)$$

$$\alpha(p_i) < \frac{|h_{ii}|^2 \Delta p}{|h_{ji}|^2 (p_j + \Delta p)} \quad \text{for } p_i < p_i^* \quad (20)$$

따라서 위 조건을 동시에 만족하는 페널티 함수를 찾을 수 있다면 전송전력은 p_i^* 근처에서 U, D를 반복하면서 원하는 전력수준을 크게 벗어나지 않고 전력제어를 할 수 있게 된다.

실제로 $\alpha(p_i)$ 함수를 아래와 같은 선형 식으로 설정하자.

$$\alpha(p_i) = a + bp_i \quad (21)$$

상수 a 와 b 를 아래 식 22, 23을 만족하도록 선택하면 게임모형의 내쉬 균형을 반복적으로 선택하면 각 단말기의 전력수준이 궁극적으로 원하는 전력수준에 수렴하는 전력제어를 구현할 수 있게 된다.

$$a + bp_i > \frac{|h_{ii}|^2 \Delta p}{|h_{ji}|^2 (p_j - \Delta p)} \quad \text{for } p_i > p_i^* \quad (22)$$

$$a + bp_i < \frac{|h_{ii}|^2 \Delta p}{|h_{ji}|^2 (p_j + \Delta p)} \quad \text{for } p_i < p_i^* \quad (23)$$

위 조건을 만족하는 임의의 a, b 값을 설정하면 각 플레이어는 자기의 효용함수에 따라 게임을 하면 결국 궁극적인 전력 수준에 도달하게 된다.

위와 같은 상황을 간단한 수치예제 ($a=[0.0145$ $0.0256]$, $b=[-0.5581, -0.9875]$, $H[\text{dB}]=[120.12$ $122.44;$ 122.44 $120.12]$, $p_1=40[\text{mW}]$, $p_2=70[\text{mW}]$, $\Delta p = 1$ $[\text{dB}]$)를 통해서 살펴본 결과를 그래프로 도시해보면 그림 7과 같다.

그림 7의 전력변화를 살펴보면, 게임을 반복적으로 수행할 경우 단말기 1은 U 전략과 D 전략을 번갈아 사용한다. 단말기 2는 일정 시점까지는 D 전략을 고수하지만, 전송전력이 원하는 전력수준 부근에 도달하면 U 전략과 D 전략을 번갈아 사용한다. 따라서 Player 1, Player 2 모두 원하는 전력수준 부근에 도달하면 U 전략과 D 전략을 번갈아 사용하여 전송전력이 수렴하는 것을 볼 수 있다.

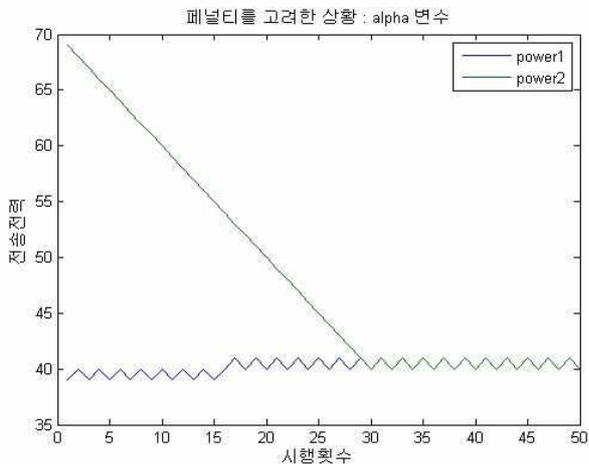


그림 7. 페널티를 고려한 상황의 전력변화 추이(α 변수)

Fig. 7. Variation of power level with penalty (variable α)

IV. 결 론

본 연구에서는 무선 네트워크에서 페루프 전력제어에서와 같이 유한개의 전략집합을 갖는 의 전력제어를 게임이론을 통하여 모형화 하였고, 그 결과 전력을 올리는 것이 내쉬 균형임을 증명하였다. 따라서 이러한 환경에서의 내쉬 균형은 전체 시스템 효율을 떨어뜨리기 때문에 전송 전력을 페널티로 작용하게 하는 새로운 효용함수를 정의하여, 각각의 단말이 자신의 효용함수를 최대화 하려고 시도한다 하더라도

자신의 송신전력을 일정 수준으로 유지할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 경희대학교 연구년 지원에 의한 결과임.

참 고 문 헌

- [1] R. D. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 13, pp. 1341-1347, 1995.
- [2] J. Zander, "Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 41, pp. 57-62, Feb. 1992.
- [3] R. Srinivasan et al. "Draft IEEE 802.16m evaluation methodology," *IEEE 802.16m-07/02*, 2007.
- [4] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed BroadbandWireless Access Systems," *IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society*, October 2004.
- [5] <http://www.3gpp.org/Highlights/LTE/LTE.htm>.
- [6] Russell M. and Stuber G.L., "Interchannel interference analysis of OFDM in a mobile environment", *VTC, 1995 IEEE 45th*, vol.2, pp. 820-824. Jul. 1995.
- [7] Y. Zhao, J. Leclercq, and S. Haggman, "Intercarrier interference compression in OFDM communication systems by using correlative coding," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, pp. 214-216, Aug. 1998.
- [8] MacKenzie, A. B. and Wicker, S. B., "Game Theory in Communications : Motivation, Explanation, and Application to Power Control", *Global Telecommu. Conf., GLOBECOM '01. IEEE*, vol. 2, pp. 821-826, 2001.
- [9] Teerapabkajorndet, W. and Krishnamurthy, P. "A Game Theoretic Model for Power Control in Multi-rate Mobile Data Networks" *Proceedings of*

IEEE International Conf. on Commu. 2003, vol. 1, pp.56-60, 2003.

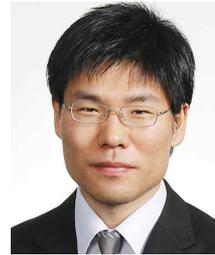
- [10] Zhu, H. and Liu, K. J. R., "Noncooperative Power-Control Game and Throughput Game Over Wireless Networks", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 53, no. 10, pp.1625-1629, 2005.
- [11] Chengnian, L., Qian, Z., Bo L., Huilong Y., and Xiping G., "Non-Cooperative Power Control for Wireless Ad Hoc Networks with Repeated Games", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 25, no. 6, pp.1101-1112, 2007.
- [12] Fangmin, X., Luyong, Z., Zheng, Z. and Qilian, L., "Adaptive Power Control for Cooperative UWB Network Using Potential Game Theory", *Proceedings of WCNC 2007, IEEE Communications Society*, pp.1620 - 1624, 2007.
- [13] Guihua, K., Lizhong, X., and Zuyi, S., "An Efficient Power Control Algorithm Combining Game Theory with Multiuser Detection in Wireless Networks", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 53, no. 10, pp.1885-1894, 2005.
- [14] Meshkati, F., Poor, H. V., Schwartz, S. C. and Mandayam, N. B., "An Energy -Efficient Approach to Power Control and Receiver Design in Wireless Data Networks", *IEEE Trans. on Commu.*, vol. 53, no. 11, pp.1885-1894, 2005.
- [15] A. Rasmusen, "Games and information 4th ed.", *Blackwell publishing*, 2007.

김 주 협 (金柱協)



2008년 2월 : 경희대학교 전파통신 공학과 (공학사)
 2008년 3월~현재 : 경희대학교 전자전파공학과 석사과정
 관심분야 : OFDM 시스템, MIMO 시스템, 전력제어, 게임이론

장 연 식 (張淵植)



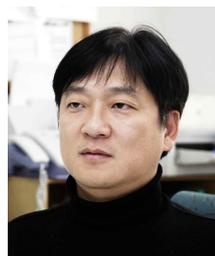
2004년 2월 : 연세대학교 정보산업 공학과 (공학사)
 2004년 3월~현재 : 서울대학교 산업공학과 석박사통합과정
 관심분야 : 게임이론, 시스템 최적화, 리스크관리

이 덕 주 (李德柱)



1988, 1990, 1995 : 서울대학교 산업공학과 공학사, 석사, 박사
 1996년 4월~1997년 8월 : 일본 와세다 대학 Post-Doc.
 2004년 1월~2006년 12월 : 대한산업공학회 홍보이사, 교육이사
 2000년 3월~현재 : 경희대학교 공과대학 산업경영학과 부교수
 관심분야 : 통신경제, 게임이론, 기술경영

홍 인 기 (洪仁基)



1989, 1991, 1995년: 연세대학교 전기공학과 공학사, 석사, 박사
 1995년 11월~1999년 2월 : SK 텔레콤 중앙연구원, 선임연구
 1997년 2월~1998년 2월: NTT DoCoMo, 교환연구원
 2003년 1월~현재 : 한국향행학회 이사
 1999년 1월~현재 : 한국통신학회, 대한전자공학회 이사
 1999년 3월~현재 : 경희대학교 전자정보대학 전자전파 공학과 부교수
 관심분야 : 이동통신 시스템 물리채널, Game 이론, Cross-layer Engineering, 스펙트럼 엔지니어링