

게임이론을 이용한 클러스터 간 주파수 간섭 문제 연구

준회원 신현철*, 이동열*, 정회원 이채우*

A Study about Frequency Interference among Clusters with Game Theory

Hyun-Chul Shin*, Dong-Yul Lee* Associate Members, Chae-Woo Lee* Regular Member

요약

클러스터링 프로토콜의 클러스터 간 주파수 간섭에서 클러스터 멤버는 자신의 전송률을 유지 또는 증가시키기 위해 많은 양의 에너지를 소비하여 노드 수명이 급격히 감소하는 문제가 있다. 이에 서로 다른 주파수를 사용하는 FDM 기반의 자원할당 정책이 요구된다. 본 논문에서는 클러스터 간 주파수 간섭 문제를 해결하기 위해 게임의 참여자간 자원협상문제를 다루는 게임이론을 사용하여 클러스터 간 합리적인 파워 전략을 제시하였다. 특히 각 클러스터가 이기적으로 주파수 자원을 점유하려는 경우를 가정한 비협조게임과 협상을 통해 주파수를 나누어 사용하는 협조게임의 관점에서 각각 분석하였다. 또한 시뮬레이션을 사용하여 협조게임과 비협조게임에서의 노드의 수명시간을 비교하였다.

Key Words : Game Theory, Nash Bargaining Solution, Sensor Network, Cooperative Game, Cluster

ABSTRACT

In the clustering protocol, lifetime of the cluster members radically decrease because frequency interference between clusters make every cluster member consume a lot of energy to maintain or increase its transmission rate. In this paper, we analyze the frequency interference among the clusters with the game theory which deals with resource bargaining problems between players, and present a rational power allocation strategy. Both the cases that each cluster tries to selfishly occupy and cooperatively share the resource are analyzed in terms of non-cooperative and cooperative games. In simulation, we compare the cooperative game with non-cooperative game in terms of the node lifetime.

1. 서론

무선 센서 네트워크는 주변 환경 변화 정보를 감지하고 수집 및 처리하여 원하는 유저나 장소에 제공하는 것을 목적으로 한다. 이 네트워크는 환경 변화 정보 등을 감지하여 전송하는 센서 노드와 센서 노드들이 전송한 정보를 수집하여 외부의 이종 네트워크로 정보를 전송, 즉 게이트웨이 역할을 하는 싱크 노드로 구성된다. 이러한 센서 노드와 싱크 노드는 소형으로 원하는 환경정보를 쉽고 간편하게

수집 할 수 있기 때문에 헬스, 군사, 홈 네트워크, 환경 감시, 공장 관리, 재난 감시 등의 다양한 응용에 적용될 수 있다^[1].

무선 센서 네트워크는 그 특성으로 인해 전략적인 목적으로 지리적으로 접근이 어려운 곳에 위치하거나 잦은 위치 변화가 필요한 곳에 사용될 수 있다. 따라서 무선 센서 노드로의 에너지 공급은 상당히 제한적이다. 이로 인해 제한된 에너지 자원을 효율적으로 사용하기 위한 연구는 센서 네트워크에서 가장 큰 쟁점 중에 하나이며, 다양한 연구들이

* 아주대학교 전자공학과 Multimedia Networking 연구실({nameshc, dreamhunting, and cwlee}@ajou.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-11-557, 접수일자 : 2009년 11월 3일, 최종접수일자 : 2010년 2월 9일

이루어져 왔다^{[2],[3]}. 또한 넓은 공간에서 센서 네트워크가 활용되기 위해 다중 홉 연결이 요구되기 때문에 에너지 소모를 고려한 라우팅 프로토콜이 필요하다. 센서 네트워크에서 이를 고려한 라우팅 프로토콜은 클러스터 기반 라우팅 프로토콜이 있고 대표적인 클러스터링 기법으로는 LEACH^[4], TEEN^[5], APTEEN^[6] 등이 있다.

클러스터 기반 라우팅 프로토콜은 한 클러스터 내에서 정보를 전달하는 클러스터 멤버와 이를 수집하는 클러스터 헤드로 구성되며, 기본 동작 과정은 다음과 같다. 미리 선정된 클러스터 헤드에 의해 먼저 국소적 클러스터가 형성된다. 이후 클러스터 멤버들은 클러스터 헤드에게 정보를 전달하고, 클러스터 head는 수집한 정보를 축약하여 싱크노드에 전송한다. 이러한 계층구조로 인하여 무분별한 플러딩을 막을 수 있기 때문에, 클러스터 기반 라우팅 프로토콜은 에너지 관리에 상당히 효율적인 프로토콜로 알려져 있다. 일반적으로 클러스터를 기반으로 하는 네트워크의 통신방식은 클러스터 내부에서는 TDMA기반으로 클러스터 멤버와 헤드 간에 통신이 이루어진다. 이러한 통신방식은 클러스터간의 주파수 할당에 대한 고려가 없어서 클러스터 간 주파수 간섭에 취약한 단점이 있다.

현재까지 클러스터 기반 라우팅 프로토콜에 관련하여 이루어진 대부분의 연구는 클러스터링 형성 방법 또는 클러스터 헤드 선정에 집중되어 있었다^{[4],[6]}. 그러나 각 클러스터들이 동일한 주파수 영역을 공유 할 경우에 발생하는 주파수 간섭 문제와 주파수 영역을 공유하지 않을 경우의 클러스터간의 주파수 할당 방법의 문제 또한 존재한다. 이러한 문제가 존재하지만 기존의 연구에서는 이 부분에 대한 연구가 매우 부족한 실정이다. 위의 클러스터간의 주파수 할당 문제는 한정된 자원 경쟁의 문제로 볼 수 있다. 이러한 문제를 다루는데 있어서, 게임 이론의 내쉬 협상이론은 최적의 자원 할당을 얻어내는 방법으로 알려져 있다^{[7],[8]}. 본 논문에서는 게임이론의 내쉬 협상이론을 사용하여 클러스터간의 주파수 자원 할당 문제를 풀어 보고자한다.

게임이론에서는 게임의 참여자들 간에 사전 협약이 없는 비협조 게임과 사전 협약이 존재하는 협조 게임 두 가지로 이해 충돌 문제에 대한 해결방법을 제시한다. 먼저 게임의 참여자가 이기적이어서 자신의 이득만을 최대화하려고하는 비협조 게임에서의 해결 방법은 다음과 같다. 비협조 게임에서 게임의 참여자들은 다른 참여자의 이득에 대한 고려 없이

자신의 이득만을 높이기 위한 이기적인 전략만을 사용하여 게임을 진행한다. 이러한 비협조 게임방식은 결국 상대방의 전략들에 대한 자신의 최대 이득을 가져오는 전략을 선택하게 되고, 이러한 전략을 내쉬 균형(Nash Equilibrium)이라 한다. 비협조 게임의 특성으로 인해, 게임의 참여자가 협상이 가능하지 않아 이기적이라는 가정 하에서 해를 얻어내는데 있어, 비협조 게임은 중요하게 인식되고 있다. 현재 비협조 게임에서 문제를 해결하는 방법으로^{[9]-[12]}들을 비롯하여 많은 방법들이 제안되고 있다.

비협조게임에서는 참여자들이 전체의 이득을 신경 쓰지 않고 참여자 자신의 이득만을 최대화하려고 하는 특성으로 인해 최적의 결과를 가져오지 못할 수 있어, 총 이득의 입장에서 이득의 손실을 가져 올 수 있다. 그러나 게임의 참여자들이 사전에 서로 협상을 하여 협약을 맺음으로써, 참여자들이 서로 협조관계에서 게임을 진행하는 협조게임에서는 협상을 통해 측면지불을 만들어 내어 비협조게임보다 더 많은 이득을 참여자들에게 제공할 수 있다^[13]. 협조게임의 대표적인 방법으로 자원 분배 문제를 다루는 내쉬 협상 이론이 있다. 내쉬 협상 이론은 자원할당 방법에 있어 최적의 해로 알려져 있으며, 협조게임에서 내쉬 협상이론을 보여주는 대표적인 예로^[14]가 있다.

본 논문에서는 클러스터 기반 라우팅 프로토콜을 게임이론에 근거하여 분석하였다. 먼저 비협조게임에서 각각의 노드가 이기적이어서 모든 주파수 영역을 사용할 경우에 노드들의 파워 할당 전략을 얻어 내었다. 이후 협조게임에서는 노드들이 자신들의 정보를 협상을 통해 교환할 수 있다는 가정 하에서 최적의 이득을 가져오는 주파수 할당 전략을 얻어 내었다. 이 때 협조게임에서는 주파수 자원을 나누어 사용하기 때문에 협조게임의 노드 수명 최적화 문제는 파워 주파수 결합 결정 문제와 같다. 비협조 게임의 경우 결정 변수와 효용함수의 관계가 선형이어서 쉽게 해를 구할 수 있었지만 협조게임의 경우 비선형적 관계에 있고 두 개의 변수를 가져 해를 구하기가 쉽지 않아 최적화 알고리즘을 통해서 해를 찾았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 II장에서는 게임 이론의 비협조 게임과 협조 게임, 그리고 그들의 해인 내쉬 균형과 내쉬 협상 해에 대해서 간략하게 설명하였다. 제 III장에서는 클러스터 기반 라우팅 프로토콜과 본 논문에서 다룬 시스템 모델에 대하여 설명하였다. 제 IV장에서는 게임이론을

사용하여 클러스터 기반 라우팅 프로토콜을 분석하였다. 제 V장에서는 간단한 모델을 가정한 후, 협조게임에서 해를 찾는 과정을 보여주었으며, 또한 협조게임과 비협조게임의 해를 비교하였다. 마지막으로 제 VII장에서는 본 논문을 정리하고 결론을 도출한다.

II. 게임 이론

이번 장에서는 크게 협조 게임과 비협조 게임으로 나뉘는 게임 이론에 대하여 간단히 설명하고, 각 게임에서 최적의 해를 결정하는 방법에 대하여 설명한다.

2.1 비협조 게임과 내쉬 평형

게임이론에서의 게임은 기본적으로 게임에 참여하는 참여자, 각 참여자가 행동할 수 있는 전략, 참여자의 전략 선택에 의해 얻는 이득을 표현하는 유틸리티 함수로 구성된다. 이와 동일하게 구성되는 비협조 게임은 게임 참여자 간에 사전 협약 없이 다른 참여자의 이득을 고려하지 않고 자신의 이득을 최우선하여 전략을 선택하는 게임을 말한다^{15),16)}. 이러한 비협조 게임에서는 자신만의 이득을 최우선하기 때문에 다른 참여자의 전략 선택이 나의 이득에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 영향으로 나와 다른 참여자들은 전략을 수정하여 이득을 최대 하려 할 것이고 궁극적으로 모든 참여자가 이득이 최대라고 생각하는 전략을 유지하게 될 것이다. 이와 같은 방법으로 얻어진 해를 내쉬 균형이라 하고 정의는 다음과 같다. N 명의 참여자들과 J 개 전략 ($S = (s_1, \dots, s_j)$)이 존재할 때, 참여자 i 의 이득 u_i 에 대하여 다음과 같은 조건이 만족되는 경우를 내쉬 균형에 도달 했다고 한다.

$$u_i(s_j) \geq u_i(s_1, \dots, s_{j-1}, s_{j+1}, \dots, s_j) \quad \forall s_j \in S \quad (1)$$

여기서 $u_i(s)$ 와 $u_i(s_1, \dots, s_{j-1}, s_{j+1}, \dots, s_j)$ 는 i 번째 참여자가 j 번째 전략을 사용했을 때의 이득과 i 번째 참여자가 j 번째 전략 이외의 전략들을 사용했을 때의 이득을 의미한다. 즉 식 (1)로부터 내쉬 균형은 사용자가 가진 전략 중에서 최대의 이득을 가져오는 전략을 의미한다.

2.2 협조 게임과 내쉬 협상의 해

참여자 자신만의 이득만을 추구하는 비협조 게임

과는 달리 협조 게임에서는 참여자들 간에 사전에 서로의 의견을 조율하여 협약을 맺고, 이를 지킴으로써 게임 참여자는 전체의 이득을 최대로 하는 전략을 선택하는 게임이다. 협조 게임에서의 내쉬 협상의 해는 4개의 공리(파레토 최적, 선형 변환에 대한 불변성, 관련성 없는 대안들에 대한 불변성, 대칭성)를 만족한다. 이와 같은 공리가 만족될 때 다음과 같은 해를 얻을 수 있다¹⁷⁾.

$$\begin{aligned} NBS &= \arg \max NBP = s^* \\ &= \arg \max_{\substack{s_i \in S \\ f_i \in S}} \prod_{i=1}^N (u_i(s_i) - u_i(f_i)) \end{aligned} \quad (2)$$

$$s^* = \{s_1^{NB}, s_2^{NB}, \dots, s_i^{NB}, \dots, s_N^{NB}\} \quad \forall s_i^{NB} \in S$$

여기서 NBP 는 내쉬 협상 곱(Nash Bargaining Product)을 나타내며, NBP 를 최대로 만드는 전략의 집합을 내쉬 협상의 해(NBS: Nash Bargaining Solution)라 한다. S 는 참여자들이 선택할 수 있는 전략의 집합을, s^* 는 참여자들이 협약이 성립 되었을 때의 전략들의 집합을 의미하는 내쉬 협상을 나타낸다. 여기서 s_i^{NB} 는 내쉬 협상 해에서 i 번째 유저의 전략을 의미한다. 또한 s_i 와 f_i 는 각각 협상이 성공했을 경우와 결렬 되었을 경우의 참여자 i 의 선택을 의미한다. 또한 $u_i(s_i)$ 와 $u_i(f_i)$ 는 위의 각 경우에서 참여자 i 의 이득을 의미한다. 만약 각각의 참여자들이 $u_i(s_i) > u_i(f_i)$ 를 모두 만족한다면 내쉬 협상 해 s^* 는 s_i 에서 존재한다. 그러나 만약 그렇지 않다면 참여자 i 의 이득은 $u_i(s_i) \leq u_i(f_i)$ 이기 때문에, 협상이 결렬되었을 때의 이득 $u_i(f_i)$ 에서 최대가 되므로 내쉬 협상 해는 f_i 가 된다.

III. 관련 연구

본 장에서는 본 연구에서 기반하고 있는 클러스터링 프로토콜의 배경지식과 시스템 모델을 기술한다. 클러스터링 프로토콜에서는 기본 동작과 발생하는 간섭에 대해서 간략하게 설명한다. 시스템 모델에서는 최악의 결과를 가져오는 이기적인 행동을 방지하기 위한 소스 속도 제어에 대해 먼저 설명한 후, 무선 노드들의 사용하는 노드의 평균 수명과 자원간의 관계를 기술한다.

3.1 무선 센서네트워크에서의 클러스터링

클러스터 기반 라우팅 프로토콜을 사용하는 무선 센서 네트워크는 여러 개의 클러스터로 구성된다. 이러한 네트워크에서의 클러스터는 정보를 전달하는 멤버 노드와 이들을 제어하는 클러스터 헤드 노드로 구성되고 각각의 역할은 다음과 같다. 멤버 노드는 해당 지역에서 발생한 정보를 감지하며 자신을 관리하는 클러스터 헤드로 데이터를 전송하는 역할을 한다. 반면 클러스터 헤드는 클러스터 내의 각 멤버 노드에게 ID 및 무선 자원을 할당하고, TDMA 기반 프레임 관리하며, 각 노드들의 TDMA 슬롯을 예약 및 할당한다.

클러스터링의 동작 과정은 다음과 같다. 우선 미리 선정된 클러스터 헤드에 의해 인접한 지역에 클러스터가 형성된다. 클러스터가 형성되면, 클러스터 헤드는 해당 멤버들의 데이터 전송 순서를 지시하는 TDMA 스케줄 메시지를 방송하고 여러 개의 프레임을 구성한다. 각 프레임은 다수의 타임 슬롯으로 구성되고, 각 클러스터 멤버는 자신의 타임 슬롯 동안에만 데이터를 클러스터 헤드에 전송한다. 기본적으로 센서 네트워크의 인접한 지역에 위치해있는 멤버 노드는 유사한 정보를 갖는 특성이 있기 때문에, 멤버 노드들은 유사한 데이터를 전송하게 된다. 따라서 이러한 데이터를 전송받은 클러스터 헤드는 해당 멤버 노드들로부터 수집된 데이터를 축약하고 이 데이터를 외부 네트워크와 연결된 싱크 노드까지 전송한다. 이 때 클러스터 헤드와 싱크 노드와의 통신은 FDMA 방식을 기반으로 하여 별도의 주파수 대역을 사용한다¹⁸⁾.

이와 같이 클러스터 기반 라우팅 프로토콜은 유사한 데이터를 집약하고 클러스터 단위로 상위 계층과 통신하기 때문에 에너지 소모를 줄일 수 있다. 이러한 이유로 인해서, 이 방식은 에너지의 효율을 우선으로 하는 무선 센서 네트워크에 대표적으로 이용되고 있다. 하지만 각 클러스터들은 주파수를 공유하여 사용하기 때문에 주파수 영역을 공유 시 클러스터 간 상호 주파수 간섭이 발생한다. 이러한 간섭은 전송률 감소의 원인이 되고, 일정 전송률을 유지하기 위해서는 더 많은 전력을 요구하기 때문에 에너지 소모량이 증가하게 된다. 따라서 클러스터간의 주파수 배분은 에너지 효율에 있어서 중요한 문제가 된다.

3.2 소스 속도 제어

본 논문에서는 각 클러스터 내에 클러스터 헤드

와 클러스터 멤버가 미리 선정 되어 있고, 선정된 클러스터 멤버와 클러스터 헤드는 원 흡으로 통신한다고 가정한다. 또한 각 클러스터 안에서 클러스터 멤버와 헤드 간의 통신은 TDMA 방식을 기반으로 이루어진다. 이 때 노드 i 의 파워 p_i 와 N 개의 인접클러스터에 의해 링크 i 로의 간섭파워 p_j 에 대하여 클러스터 멤버 i 와 헤드 간의 링크 i 의 채널 용량 C_i 은 다음과 같다.

$$C_i(\mathbf{P}, W_i) = W_i \log_2(1 + SINR) = W_i \log_2 \left(1 + \frac{|h_{i,i}|^2 p_i}{\sum_{j \neq i} |h_{i,j}|^2 p_j + N_0 W_i} \right) \quad (3)$$

여기서 $SINR$ 은 신호 대 간섭 및 잡음 비율을 의미한다. W_i 는 노드 i 의 주파수 대역폭, N_0 는 열 잡음 전력 밀도이다. $h_{i,i}$ 은 클러스터 헤드 i 가 해당 멤버 노드 i 와 통신할 때의 채널 이득이며, $h_{i,j}$ 는 클러스터 헤드 i 가 인접 클러스터의 멤버 노드 j 와 통신 되었을 경우의 채널 이득이다. 마지막으로 $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_N]^T$ 는 모든 노드의 파워 전략 집합을 나타낸다. 또한 각각의 클러스터 멤버는 활성화 되어 데이터를 전송 할 때 같은 크기의 시간 슬롯을 할당 받는다. 이 때 링크 i 의 한 슬롯에서의 시간을 ν_i 라 한다면, 링크 i 에서의 데이터 전송률 x_i 는 다음을 만족해야 한다.

$$\nu_i C_i(\mathbf{P}, W_i) \geq x_i, \quad \forall i \quad (4)$$

여기서 $\sum_{\forall i} \nu_i \leq 1$ 이다. 여기서 소스 속도 제어를 만족하기 위해 요구되는 유저 i 의 채널 용량은 $C_i(\mathbf{P}, W_i) = x_i / \nu_i$ 임을 쉽게 관찰할 수 있다.

3.3 자원 할당과 노드 수명

무선 센서 노드들의 에너지 소모 요인은 센싱, 수신, 송신 하는 과정에서의 에너지 소모가 있다¹⁹⁾. 그 중에서 클러스터 기반 라우팅 프로토콜에서는 클러스터 멤버와 클러스터 헤드 간에 원 흡으로 통신이 이루어지기 때문에, 클러스터 멤버는 송신이 가장 자주 일어나므로 송신하는 통신 과정에서의 에너지 소모가 가장 중요하다고 할 수 있다. 이러한 상황에서 노드 i 의 할당된 주파수 W_i 에 대하여 평균 전력은 다음과 같다.

$$p_i = \frac{(I_i + N_0 W_i)(2^{v_i C_i / W_i} - 1)}{|h_{i,i}|^2} \quad (5)$$

여기서 I_i 는 링크 i 의 수신기에서 다른 클러스터로부터 수신한 파워의 세기를 의미한다. 이로부터 노드 i 의 배터리 에너지 E_i 에 대하여 노드 i 의 수명 $\tau(i)$ 은 다음과 같다.

$$\tau(i) = \frac{E_i}{p_i} = \frac{E_i |h_{i,i}|^2}{(I_i + N_0 W_i)(2^{v_i C_i / W_i} - 1)} \quad (6)$$

(6)으로부터 노드 수명은 파워와 주파수 같은 자원의 크기에 의존한다는 것을 알 수 있다. 파워와 주파수는 한정 되어있기 때문에 적절한 자원할당이 요구된다.

IV. 문제 정의

4.1 문제 접근 방법

본 장에서는 클러스터 기반 라우팅 프로토콜에서 센서 노드들의 수명을 최적화하기 위한 클러스터들의 주파수 대역폭 할당 게임을 제안한다. 게임에 앞서, 우리는 이 게임의 구성요소인 참여자, 전략집합, 유틸리티 함수를 다음과 같이 설정한다. 한 네트워크에서 같은 시간 동안 클러스터 헤드에 송신하고 있는 각각의 노드 i 를 참여자로 하고 총 N 개의 노드가 있다고 설정한다. 이때 노드의 수명은 다음과 같은 효용 함수 U_i 로 표현될 수 있다.

$$U_i = \frac{E_i}{p_i} \quad (7)$$

여기서 에너지 E_i 는 노드 i 에서의 초기 에너지이고, p_i 는 노드 i 의 평균 송신전력을 의미한다. 이로부터 앞서 설명한 바와 같이 노드 수명을 최적화하는 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\max \sum_{i=1}^N \log U_i \quad (8)$$

그러나 노드 수명을 최적화하는 문제는 앞서 설명한 바와 같이 극단적인 결과를 가져올 수밖에 없다. 즉, 어떠한 제약도 없기 때문에 모든 노드는 자신의 수명을 최대로 하기 위해서 송신전력을 0으로

하는 결과에 이르게 될 것이다. 이는 곧 0의 전송률을 가져온다. 이에 본 논문에서는 앞서 설명한 소스 속도제어 제약이 있는 상황에서 (8)을 다루어 보고자 한다. 이때 노드의 수명은 파워에 의존하고 소스 속도를 만족하는 최소 파워는 주파수의 함수이기 때문에 노드 수명 최대화의 문제는 주파수 자원할당문제로 볼 수 있다. 본장에서는 이러한 주파수 자원할당문제를 비협조게임과 협조게임으로 다루어 보고자 한다.

4.2 비협조 게임의 노드 수명 최적화

비협조게임에서 각 노드는 다른 유저의 이득을 고려하지 않고 자신의 이득을 증가시키는 전략을 선택하기 때문에, 요구되는 파워소모를 줄이기 위해 더 많은 주파수 대역을 사용하려고 한다. 즉 각 노드들은 네트워크의 총 주파수 대역 W 을 점유한다. 따라서 비협조 게임에서의 노드 i 의 유틸리티 함수 $U_i^c(p_i^c)$ 를 갖는 노드 수명 최적화 문제는 다음과 같이 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^N \log U_i^c \\ \text{s.t.t.} \quad & \nu_i C_i(\mathbf{P}^c, W) \geq x_i, \quad \forall i \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $U_i^c = \frac{E_i}{p_i^c}$ 이며, E_i 와 p_i^c 는 각각 노드 i 의 초기 에너지와 비협조게임에서의 파워 전략을 의미한다. $C_i(\mathbf{P}^c, W)$ 는 현재 슬롯과 주파수 영역 W 에서 데이터를 전송하는 N 개 노드에 대하여, 링크 i 에 전송 중인 파워들의 집합 $\mathbf{P}^c = [p_1^c, p_2^c, \dots, p_N^c]^T$ 로 인한 채널 용량을 의미한다.

이 문제는 채널 용량을 x_i 이상으로 제공하도록 파워를 제공하면서 동시에 최소의 파워를 찾는 것을 요구한다. 이러한 문제는 곧 모든 i 에 대하여 $x_i = \nu_i C_i(\mathbf{P}^c, W)$ 를 만족하는 \mathbf{P}^c 를 찾는 문제라고 위로부터 쉽게 예측 할 수 있다.

Theorem 1: 노드들의 파워 전략의 집합을 \mathbf{P}^c 라고 할 때, 비협조게임에서 현재 슬롯의 최적의 파워 전략은 N 개의 노드에 대하여 다음과 같다.

$$\mathbf{P}^c = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{X} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{X} 와 \mathbf{T} 는 계산상의 편의를 위해 사용된 $N \times 1$ 크기의 열벡터와 $N \times N$ 크기의 행렬이며, 정

의는 다음과 같다. $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_N]^T$ 이며, 임의의

$i (1 \leq i \leq N)$ 에 대하여 $X_i = 2^{\frac{x_i}{\nu_i W}} - 1$ 이다.

$\mathbf{T} = [t_1, t_2, \dots, t_N]^T$ 이며 i 에 대하여 $t_i = [t_1^i, t_2^i, \dots, t_N^i]$

이다. 또한 임의의 $j (1 \leq j \leq N)$ 에 대하여 t_j^i 는 $i \neq j$ 일 경우 $-\alpha_{i,j}\beta_j X_i$ 이며, $i = j$ 일 경우에는 β_i

가 된다. 여기서 $\alpha_{i,j} = \frac{|h_{i,j}|^2}{|h_{j,j}|^2}$, $\beta_i = \frac{|h_{i,i}|^2}{WN_0}$ 이다.

Proof: 노드 i 에 대하여, $x_i = \nu_i C(\mathbf{P}^c, W)$ 는 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i &= \nu_i W \log_2 \left(1 + \frac{SNR_i}{1 + \sum_{\forall j \neq i} \alpha_{i,j} SNR_j} \right) \\ \Leftrightarrow 2^{x_i/\nu_i W} &= 1 + \frac{SNR_i}{1 + \sum_{\forall j \neq i} \alpha_{i,j} SNR_j} \quad (11) \\ \Leftrightarrow X_i \left(1 + \sum_{\forall j \neq i} \alpha_{i,j} SNR_j \right) &= SNR_i \\ \Leftrightarrow X_i &= SNR_i - X_i \sum_{\forall j \neq i} \alpha_{i,j} SNR_j \\ \Leftrightarrow X_i &= X_i \left[-\alpha_{i,1} \dots -\alpha_{i,i-1} \frac{1}{X_i} -\alpha_{i,i+1} \dots -\alpha_{i,N} \right] \begin{bmatrix} SNR_1 \\ SNR_2 \\ \vdots \\ SNR_N \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서 $X_i = 2^{\frac{x_i}{\nu_i W}} - 1$, $SNR_i = \frac{|h_{i,i}|^2 p_i^c}{WN_0}$ 이다. 이로부터 N 개의 노드로 확장함으로써 쉽게 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{1,2} X_1 & \dots & -\alpha_{1,N} X_1 \\ -\alpha_{2,1} X_2 & 1 & \dots & -\alpha_{2,N} X_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_{N,1} X_N & -\alpha_{N,2} X_N & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SNR_1 \\ SNR_2 \\ \vdots \\ SNR_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

이는 다시 다음과 같이 전개 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{1,2} X_1 & \dots & -\alpha_{1,N} X_1 \\ -\alpha_{2,1} X_2 & 1 & \dots & -\alpha_{2,N} X_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_{N,1} X_N & -\alpha_{N,2} X_N & \dots & 1 \end{bmatrix} \text{diag}(\beta_1, \dots, \beta_N) \begin{bmatrix} p_1^c \\ p_2^c \\ \vdots \\ p_N^c \end{bmatrix} \quad (13)$$

따라서 파워 전략 벡터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_1^c \\ p_2^c \\ \vdots \\ p_N^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 & -\alpha_{1,2}\beta_2 X_1 & \dots & -\alpha_{1,N}\beta_N X_1 \\ -\alpha_{2,1}\beta_1 X_2 & \beta_2 & \dots & -\alpha_{2,N}\beta_N X_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_{N,1}\beta_1 X_N & -\alpha_{N,2}\beta_2 X_N & \dots & \beta_N \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 $1 \leq i, j \leq N$ 에 대하여 $\alpha_{i,j} = \frac{|h_{i,j}|^2}{|h_{j,j}|^2}$,

$$\beta_i = \frac{|h_{i,i}|^2}{WN_0}. \blacksquare$$

4.3 협조 게임의 노드수명 최적화

지금까지 비협조게임에서의 최적의 파워 할당 전략을 구하였다. 이제 내쉬 협상 해를 사용하여 협조 게임이 가져오는 이득과 비교해보고자 한다. 협조 게임에서는 비협조 게임과는 다르게 주파수를 나누어서 사용한다. 이에 파워와 주파수 자원을 결합한 전략이 요구된다. 따라서 다음과 같은 최적화 문제가 만들어진다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{\forall i} \log(U_i(p_i) - U_i^c) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{\forall i} \rho_i \leq 1, \quad \forall i, \\ & U_i(p_i) \geq U_i^c, \quad \forall i, \\ & \nu_i C_i(\rho_i, p_i) \geq x_i, \quad \forall i \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 U_i^c 는 앞 절에서 얻은 비협조 게임에서의 노드 i 의 노드 수명을 가리키며, 또한 $U_i(p_i)$ 는 협조게임에서 평균 파워 p_i 를 갖는 노드 i 의 노드 수명으로 $\frac{E_i}{p_i}$ 이다. 또한 ν_i 는 i 번째 노드에 할당된

시간을 의미하며, $C(\rho_i, p_i)$ 는 주파수 대역 ρ_i 와 평균파워 p_i 를 갖는 노드 i 의 전송용량을 가리킨다. 위의 문제에 대하여, 만약 모든 노드들이 사용하지 않는 주파수 대역이 존재한다면, 그 주파수 대역을 사용함으로써 각 노드의 파워를 줄일 수 있다. 이는 (15)의 제약 조건에서 파레토 최적이기 위해서는 $\sum_{\forall i} \rho_i = 1$ 을 만족해야 함을 의미한다. 또한 마지막

제약 조건에서도 최소 파워를 위해서는 $x_i = \nu_i C_i(\rho_i, p_i)$ 임을 의미한다. 따라서 우리는 각 노드의 파워 p_i 는 ρ_i 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$p_i(\rho_i) = \frac{WN_0 \rho_i}{|h_{i,i}|^2} (2^{\frac{x_i}{\nu_i W \rho_i}} - 1) \quad (16)$$

이로부터 위의 파워 주파수 자원 결합문제는 다음과 같이 주파수 할당 문제로 변환된다.

$$\begin{aligned} & \max \sum_{\forall i} \log(U_i(p_i(\rho_i)) - U_i^c) \\ & \text{s.t.t.} \sum_{\forall i} \rho_i = 1, \quad \forall i, \\ & \quad U_i(p_i(\rho_i)) \geq U_i^c, \quad \forall i \end{aligned} \quad (17)$$

이 문제는 아직도 제약조건이 있는 문제로서, 이 문제를 풀기 위해서 다음과 같은 dual 문제로 변환하여 문제를 다룰 수 있다.

$$\max_{\mu \geq 0} L(\lambda, \mu, \rho) \quad (18)$$

여기서,

$$\begin{aligned} L(\lambda, \mu, \rho) = & \sum_{\forall i} \log(U_i(\rho_i) - U_i^c) \\ & + \lambda \left(1 - \sum_{\forall i} \rho_i \right) + \sum_{\forall i} \mu_i (U_i(\rho_i) - U_i^c). \end{aligned} \quad (19)$$

이때, $\rho = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N\}$, $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N\}$ 이며, λ 와 μ 는 라그랑주 상수와 집합이다. 이로부터 k 의 간격을 갖는 Gradient method를 사용하여 다음과 같은 알고리즘을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_i(t+1) &= \rho_i(t) + k \nabla_i L(\lambda, \mu, \rho) \\ &= \rho_i(t) + k \left\{ \frac{(U_i(\rho_i(t)))'}{(U_i(\rho_i(t)) - U_i^c)} - \lambda(t) + \mu_i(t) (U_i(\rho_i(t)))' \right\} \\ \lambda(t+1) &= \lambda(t) + \alpha \left(1 - \sum_{\forall i} \rho_i(t) \right) \\ \mu_i(t+1) &= [\mu_i(t) + \beta (U_i(\rho_i(t)) - U_i^c)]^+ \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 $U_i = \frac{E_i}{p_i(\rho_i)}$ 이고, U_i^c 는 노드 i 의 비협조 게임 이득이다. 또한 α, β 는 상수로 λ 와 μ_i 를 업데이트할 때의 가중치이고, $U_i(\rho_i(t))'$ 는 다음과 같다.

$$U_i(\rho_i(t))' = \frac{A_i}{\rho_i^2(t) \left(2^{\frac{B_i}{\rho_i(t)}} - 1 \right)} \left(\frac{B_i 2^{\frac{B_i}{\rho_i(t)}} \ln 2}{\rho_i(t) \left(2^{\frac{B_i}{\rho_i(t)}} - 1 \right)} - 1 \right) \quad (21)$$

이 때 $A_i = \frac{|h_{i,i}|^2 E_i}{WN_0}$, $B_i = \frac{x_i}{\nu_i W}$ 이다.

우리는 위와 같은 알고리즘을 제시함으로써 협조 게임 문제를 다루었다.

V. 모의 실험

이번 장에서는 세 개의 클러스터가 존재할 때, 노드 수명을 최대화 하는 클러스터 간 주파수 할당 게임을 분석한다. 우리는 각 클러스터에 한 개의 클러스터 헤드와 4개의 멤버 노드가 $100 \times 100 m^2$ 안에 그림 1과 같이 배치될 경우를 가정하여 협조 게임과 비협조 게임 문제를 다루었다.

게임에 앞서, 이 모의실험에서는 그림 1과 같이 고정된 헤드 노드 및 멤버 노드가 위치하고, 이미 클러스터가 구성되었을 경우를 가정한다. 또한 싱크 노드가 노드의 모든 정보를 알고 있고, 헤드 노드는 TDMA 방식으로 멤버 노드와 통신하고 멤버 노드와의 통신 스케줄은 이미 정해져 있다고 가정한다. 따라서 그림 1에서 각 클러스터에서 같은 번호의 멤버 노드는 같은 슬롯 동안에 각 클러스터 헤드와 통신하게 된다. 모의실험에서 사용된 파라미터는 표 1에 나타내었다.

그림 2는 협조 게임과 비협조 게임에서의 각 클러스터 당 노드 수명을 비교한다. 여기서 가로축은

클러스터 번호를 세로축은 노드 수명을 가리킨다. 이때 노드 수명은 각 클러스터에서 가장 빨리 죽는 노드를 기준으로 노드 수명을 비교하였다. 가로축에서 각 클러스터 별 왼쪽 막대는 IV장으로부터의 결과에 근거한 비협조 게임에서의 노드 수명을 가리킨다. 각 클러스터 별 오른쪽 막대는 협조 게임에서의 노드 수명을 가리키는데 이는 IV장에서 제시된



그림 1. 모의실험을 위한 노드 배치 및 클러스터 구성
Fig 1. Nodes Placement and Clusters Organization for the Simulation

표 1. 모의실험 인수
Table 1. Simulation Parameters

Item	Value
필드 사이즈	100 x 100 m ²
노드의 개수	15 개
각 노드의 초기 에너지 (E _i)	1 x 10 ¹⁵ J
네트워크 전체 주파수 대역폭 (W)	83.5 x 10 ⁶ Hz
각 노드의 데이터 전송률 (x _i)	100 x 10 ³ bps
열잡음 전력 밀도 (N ₀)	0.1198 W/Hz
한 슬롯의 시간 할당량 (v _i)	0.25
스텝 사이즈 (k)	0.05
업데이트 가중치 (α)	-2.5
업데이트 가중치 (β)	0.01
초기 ρ값 (ρ ₀)	0.1

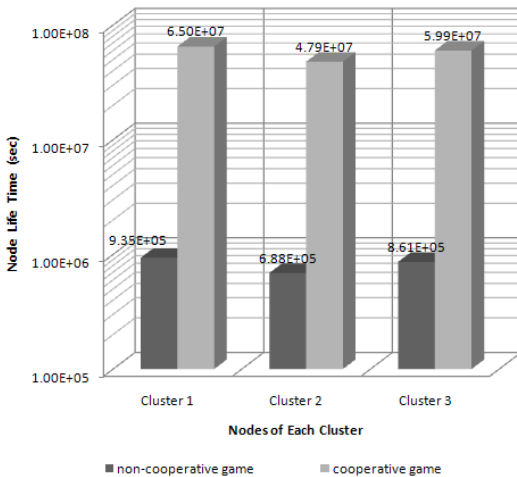


그림 2. 협조 게임과 비협조 게임에서의 노드 수명 비교
Fig 2. Comparing Node Lifetime of the Cooperative Game and the Non-cooperative Game

Gradient method algorithm의 결과에 근거하여 얻은 값으로, 그림 3에 이 알고리즘을 사용하여 주파수 할당 값을 찾는 과정을 나타내었다. 이때의 스텝 간격 k 는 0.05, 업데이트 가중치 α 와 β 는 각각 -2.5, 0.01이다. 또한 노드 1에 대한 초기의 주파수 할당량 ρ_i 을 동일하게 0.1부터 시작하였다. 그림 3의 결과는 제안한 모델에서 노드 1에 대한 주파수 할당량을 보여주며, 클러스터 1,2,3에서 각각 약 0.34, 0.26, 0.40으로 수렴함을 확인 할 수 있다.

모의실험 결과, 협조 게임을 통해 노드 수명을 최대화하도록 주파수 대역을 할당받는 방식이 비협조 게임을 통해 주파수를 모두 점유하는 방식보다

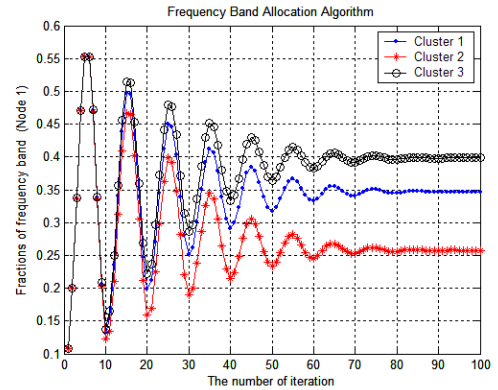


그림 3. 협조게임에서의 주파수 할당 알고리즘 (노드 1)
Fig 3. The Frequency Allocation Algorithm in the Cooperative Game (Node 1)

약 70배 노드 수명을 연장할 수 있음을 확인 할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 클러스터 간 주파수 간섭 문제를 게임이론을 사용하여 분석하였다. 우리는 클러스터의 특성에 따라 비협조게임과 협조게임으로 나누어 간섭문제를 다루었다. 비협조게임의 경우 단순히 파워 할당 문제이기 때문에 쉽게 해를 구할 수 있었다. 그러나 협조게임의 경우 파워 주파수 자원 결합 문제로 복잡하였다. 이를 주파수 할당문제로 변형한 후에도 제약조건이 있는 비선형 최적화 문제이기 때문에 최적화 알고리즘을 적용하여 내쉬 협상의 해를 찾을 수 있었다. 마지막으로, 모의실험을 통하여 협조 게임과 비협조 게임에서 알고리즘의 구현 가능성 및 효과를 입증할 수 있었다. 후후 연구에서는 이 결과들을 토대로 중앙 제어 방식 및 분산 제어 방식 기반의 최적화 알고리즘에 대해서 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] I. A Akildiz, W. Su, Y. S. Subramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE commun. Mag., Vol.40, No.8, pp.102-114, Aug., 2002.
- [2] j. N. Al-Karaki, and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," IEEE Commun. Mag., vol. 11, no.

- 6, pp.6-28, Dec., 2004.
- [3] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," Proc. of the IEEE Wireless Communications, Vol.1, pp.660-670, Oct., 2002.
- [4] W. Heinzelman; A. Chandrakasan ; H. Balakrishnan "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks" in Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000, Page(s):3005-3014.
- [5] A. Manjeshwar; D.P. Agrawal, "TEEN : Arouting protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks" Parallel and Distributed Processing Symposium., Proc. 15th International 23-27 Apr.2001 Page(s) : 2009-2015.
- [6] A. Manjeshwar; D.P. Agrawal, "APTEEN : A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in wireless Sensor Networks" Parallel and Distributed Processing Symposium., roceedings International, IPDPS Apr. 2002 Page(s) : 195-202.
- [7] J. Nash, "he bargaining problem," Econometrica, Vol.18, pp.155-62, Apr., 1950.
- [8] J. Nash, "wo-person cooperative games," Econometrica, Vol.21, pp.128-40, Jan. 1953.[9] G. Scutari, D. Palomar, and S. Barbarossa, "Synchronous iterative water-filling for Gaussain frequency-selective interference channles: A unified framework,"in IEEE SPAWC-2006, 2006. Klaus Finkenzeller, RFID Handbook-Second Edition, Jone Wiley & Sons, 2003.
- [9] G. Scutari, D. Palomar, and S. Barbarossa, "Synchronous iterative water-filling for Gaussain frequency-selective interference channles: unified framework,"in IEEE SPAWC-2006, 2006. Klaus Finkenzeller, RFID Handbook-Second Edition, Jone Wiley & Sons, 2003.
- [10] W. Yu, W. Rhee, S. Boyd, and J.M. Cioffi, "Iterative waterfilling for Gaussian vector multiple-access channels," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.50, No.1, pp.145-52, 2004.
- [11] A. Laufer and A. Leshem, "Distributed coordination of spectrum and the prisoner' dilemma,"in Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks - DySPAN 2005, pp.94 -100, 2005.
- [12] A. Laufer, A. Leshem, and H. Messer, "Game theoretic aspects of distributed spectral coordination with application to DSL networks." arXiv:cs/0602014, 2005.
- [13] Binmore, Fun and Games: A Text on Game Theory. Lexington, MA: D.C. Health, 1992.
- [14] P. Nuggehalli, M. Sarkar and R.R. Rao "QoS and Selfish Users: A MAC Layer Perspective", in Proceedings of the 2007 IEEE GLOBECOM, pp.4719-4723, 2007.
- [15] G. Owen, Game theory. Academic Press, third ed., 1995.
- [16] T. Basar and G.J. Olsder, Dynamic non-cooperative game theory. Academic Press, 1982.
- [17] 이동열, 이채우 "RFID 리더 주파수 간섭에 대한 게임 이론 관점에서의 해석", 전자공학회 논문지 (TC), 46(5), pp.36-47, 2009년 5월.
- [18] B. Krishnamachari, "The impact of data aggregation in wireless sensor networks," 22th International Conference of Distributed Computing Systems Workshops, 2002.
- [19] H. Nama, M. Chiang, and N. Mandayam, "Utility-lifetime Trade-off in Self-regulating Wireless Sensor Networks: A Cross-Layer Design Approach," in Proc. IEEE ICC Jun, 2006.

신 현 철(Hyun-chul Shin)

준회원



2009년 8월 아주대학교 전자공학부 학사 졸업

2009년 9월~현재 아주대학교 전자공학과 석사

<관심분야> Game Theory, Wireless Sensor Network

이 동 열(Dong-Yul Lee)

준회원



2008년 2월 아주대학교 전자공학부 학사 졸업
2009년 3월~현재 아주대학교 전자공학과 석/박사 통합과정
<관심분야> Game Theory, Wireless LAN, Mesh Network.

이 채 우(Chae-Woo Lee)

정회원



1985년 2월 서울대학교 제어계측 학사 졸업
1988년 8월 한국과학기술원 전자공학과 석사 졸업
1995년 8월 University of Iowa 박사 졸업
1985년 1월~1985년 12월 (주) 금성통신 연구원
1988년 9월~1999년 3월 한국통신 선임연구원
1999년 3월~2001년 9월 Lucent Technologies Korea 이사
2001년 9월~2002년 2월 한양대학교 겸임교수
2002년 3월~현재 아주대학교 전자공학과 부교수
<관심분야> 광대역 통신망, Traffic Engineering, Ubiquitous Networking.