

# 인지무선 네트워크에서 효율적인 채널 사용을 위한 협력센싱 클러스터링 게임

장성진\*, 윤희석\*, 배인산\*, 종신회원, 김재명\*\*

## Cooperative Sensing Clustering Game for Efficient Channel Exploitation in Cognitive Radio Network

Sungjeen Jang\*, Heesuk Yun\*, Insan Bae\* *Lifelong Member*, JaeMoung Kim\*\*

### 요 약

인지무선 네트워크에서 스펙트럼 센싱은 우선사용자에게 간섭을 주지 않기 위해 기본적으로 수행해야 하는 단계이다. 스펙트럼 센싱에 요구되는 샘플 수는 2차 사용자의 성능에 직접적으로 영향을 주기 때문에, 2차 사용자의 성능과 우선사용자에 대한 간섭은 트레이드오프 관계에 있다. 스펙트럼 센싱에 필요한 샘플 수는 요구되는 오검출 확률, 검출확률 및 우선 사용자의 최소 요구 SNR로부터 얻어진다. 우선 사용자 센싱에 요구되는 SNR은 2차 사용자의 전송반경과 관련 있기 때문에, 2차사용자들을 모아 센싱집합으로 구성하고 요구되는 전송영역을 최소화시킴으로써 스펙트럼 센싱에 요구되는 우선사용자의 SNR을 완화시킬 수 있다. 따라서 스펙트럼 센싱에 필요한 최소 샘플 수를 줄임으로써 인지무선 네트워크의 전송량을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 이를 위해 센싱집합인 클러스터링을 통해 게임이론으로 클러스터의 크기에 따라 얻는 이득과 손실을 트레이드오프로 디자인하고, 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 성능을 확인한다.

**Key Words** : CRN(Cognitive Radio Network), Cooperative Sensing, Coalition Game, Energy Detection, Coalition Header, Utility Function

### ABSTRACT

In cognitive radio network (CRN), spectrum sensing is an elementary level of technology for non-interfering to licensed user. Required sample number for spectrum sensing is directly related to the throughput of secondary user and makes the tradeoff between the throughput of secondary user and interference to primary user. Required spectrum sensing sample is derived from required false alarm, detection probability and minimum required SNR of primary user (PU). If we make clustering and minimize the required transmission boundary of secondary user (SU), we can relax the required PU SNR for spectrum sensing because the required SNR for PU signal sensing is related to transmission range of SU. Therefore we can achieve efficient throughput of CRN by minimizing spectrum sensing sample. For this, we design the tradeoff between gain and loss could be obtained from clustering, according to the size of cluster members through game theory and simulation results confirm the effectiveness of the proposed method.

## I. 서 론

이동통신의 발달에 따라 무선 스펙트럼에 대한 요구가 폭발적으로 증대되면서 인지무선기술(CR : Cognitive Radio)은 사용할 수 있는 대역폭을 가능한 효율적으로 사용하기 위해 고려되는 대표적인 기술이다[1]. 미연방통신위원회(FCC)

는 보고서에서 시간적으로나 지역적으로 상당량의 스펙트럼이 비어있다고 기술하였다[2]. CR기기는 우선사용자(PU : Primary User)가 동작하지 않는 동안에 스펙트럼 센싱을 수행하여 접근하는 방법으로 주변환경을 탐색하는 기기이다. 이러한 CR시스템을 현실화하는 데에는 우선사용자에게 간섭을 미치지 않기 위해, PU의 사용을 검출하는 스펙트럼센

\* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2015-H8501-15-1019)

\*인하대학교 정보통신공학부 무선전송연구실 (sungjeen\_jang@inha.edu, heesuk@inha.edu, baecsan@inha.edu),

\*\*인하대학교 정보통신공학부 (jaekim@inha.ac.kr), 교신저자 : 김재명

접수일자 : 2015년 1월 27일, 수정완료일자 : 2015년 2월 13일, 최종 게재확정일자 : 2015년 2월 24일

싱, 스펙트럼사용의 통계분석 및 시간적으로 변하는 주변환경에 대해 접근하는 방법 등에 대해 많은 연구가 필요하다[3][4].

인지무선네트워크(CRN)에서 SU는 스펙트럼센싱, 대역에 대한 접근 및 전력사용과 같은 성능을 최적화하기 위해 지능적인 능력이 요구된다. 과거의 최적화 연구에서는 사용자간 상호관계에 대한 연구가 크게 고려되지 않았다. 하지만 최근의 게임 이론은 CRN에서 효율적이고, 자가구성하며, 분산적으로 상호작용을 하는 시스템에서 많이 고려되는 접근방법이다. CRN과 관련하여 많은 게임이론 연구가 수행되었는데, 전력최적화 기법으로써 Miao는 채널상태 및 회로전력을 에너지, 스펙트럼의 트레이드오프에 대해 고려하여 전송전력을 적응적으로 할당하여 에너지 효율성을 최대화하였다[5][6]. Nadkar는 FDMA를 사용하는 다중사용자 다중채널 CRN에서 오버레이 스펙트럼 공유모델에 대한 전력제어 게임을 고려하였다.[7] Jayaweera는 전력제어게임에서 동적인 스펙트럼 임차방법을 제안하였다[8]. Saad는 분산적인 스펙트럼센싱과 관련하여 연립(Coalition)게임을 제안하여, 에드혹 네트워크 및 셀룰러 네트워크에서 SU들간에 PU의 정보를 교환하는 것을 제안하였고[9][10], 또한 SU와 연립집합대표(Coalition Header)간에 미검출 및 오검출 확률의 정보교환 오류를 고려한 연립게임을 제안하였다[11][12].

그러나 SU의 센싱과 전송량을 동시에 고려하는 연구는 많지 않다. SU의 시간프레임은 센싱시간과 전송시간으로 구성되기 때문에 PU에 대한 비간섭 조건과 SU의 성능에 대한 트레이드오프에 직접적으로 연관된다. 스펙트럼센싱시간은 센싱을 위해 필요한 최소요구 PU SNR, 오검출 및 미검출 확률로부터 계산된다. Lee는 채널에 대한 통계학적 정보를 사용하여 최적의 스펙트럼센싱 시간을 제안하였고[13], Liang은 센싱시간 및 전송량에 대한 트레이드오프를 고려하여 효율적인 전송이 가능하도록 하였다[14]. 이러한 연구들은 센싱시간 및 전송량에 대한 최적의 트레이드오프를 달성하였지만, 각 사용자들의 관계나 상대적인 위치는 고려하지 않았다.

본 논문에서는 화재경보 및 수위체크 등을 위한 주변환경 정보를 송신하는 에드혹 네트워크를 위한 SBS(Secondary Base Station)과 SU들로 구성된 CRN으로 가정하였다. SU의 송신반경은 PU로부터 수신된 신호를 얼마나 센싱할 수 있는지와 관련 있기 때문에, 연립집합대표를 통해 송신하고자 하는 정보 및 센싱정보를 수집하도록 하면 SU의 전송반경 및 센싱시간을 줄일 수 있다. 이를 위해 연립집합대표를 선택하는 방법과 선택된 대표가 연립집합 크기에 따른 트레이드오프를 고려하여 연립을 구성하는 방법에 대해 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템모델과 트레이드오프에 대해서 소개하고, 3장에서는 연립집합대표를 선택하는 방법 및 연립알고리즘을 제안한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과 및 이에 대한 분석을 하고, 5장에서 결론을 짓는다.

## II. 시스템 모델

### 1. 에너지 검출

SU는 수신된 신호  $r(t)$ 에 대해 두 가지 가정을 사용하여 PU가 채널을 점유하고 있는지의 여부를 결정한다.[14][16][17]

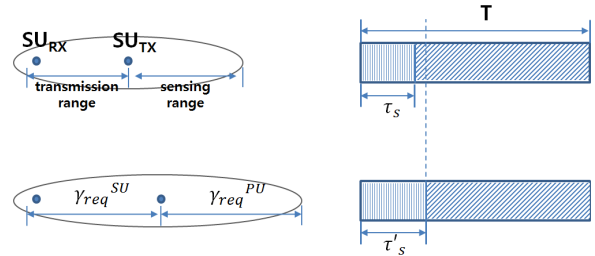


그림 1. CRN의 프레임구조 및 센싱영역과 전송영역

$$r(t) = \begin{cases} hs(t) + n(t), & H_1 \\ n(t), & H_0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $s(t)$ 는 PU가 송신한 신호,  $h$ 는 PU 송신기로부터 SU 수신기로 들어오는 채널이득, 그리고  $n(t)$ 는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)를 나타낸다.

스펙트럼 센싱을 에너지검출로 고려하면, 센싱을 위한 테스트 샘플은 식 (2)와 같다.

$$T(r) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |r(t)|^2 \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 샘플의 개수이고, 센싱 시간 및 샘플링 주파수와 연관되어 있다( $N = \tau_s f_s$ ).

검출확률  $P_d$ 와 오검출확률  $P_f$ 는 PU를 검출하는 성능변수로 이 중  $P_f$ 는 식 (3)과 같다.

$$P_f(\lambda, \tau_s) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2}\right) \sqrt{\tau_s f_s}\right) \quad (3)$$

여기서  $\sigma_u^2$ 는 잡음변수,  $\lambda$ 는 검출문턱값, 그리고  $Q(\cdot)$ 는 Q함수를 나타낸다.

따라서 센싱시간  $\tau_s$ 는 식 (4)와 같다.

$$\tau_s = \frac{1}{f_s} \left\{ \frac{Q^{-1}(\bar{P}_f) - Q^{-1}(\bar{P}_d) \sqrt{2\gamma + 1}}{\gamma} \right\}^2 \quad (4)$$

여기서  $\bar{P}_f$ 는 요구 오검출확률,  $\bar{P}_d$ 는 요구 검출확률 ( $\bar{P}_d > 0.9, \bar{P}_f < 0.1$  in IEEE 802.22 WRAN)을 나타내고,  $\gamma$ 는 센싱을 수행할 때 PU로부터 수신받은 SNR을 나타낸다.

## 2. 센싱 및 전송량의 트레이드오프

CRN의 프레임 구조는 그림 1과 같이 센싱슬롯과 데이터 전송슬롯으로 구성된다. 따라서 PU가 on/ff일 경우 SU의 평균 전송성능은 식 (5)/(6)으로 계산될 수 있다.

$$R_0(\tau_s) = \frac{T - \tau_s}{T} C_0 \{1 - P_f(\lambda, \tau_s)\} P(H_0) \quad (5)$$

$$R_1(\tau_s) = \frac{T - \tau_s}{T} C_1 \{1 - P_f(\lambda, \tau_s)\} P(H_1) \quad (6)$$

여기서  $C_0$ 는 PU가 없을 때의 커패시티,  $C_1$ 는 PU가 존재할 때의 커패시티를 나타내고, SU의 총평균전송성능은 식 (7)과 같다.

$$R(\tau) = R_0(\tau_s) + R_1(\tau_s) \quad (7)$$

그러나 식 (7)은 요구검출확률  $\bar{P}_d$ 가 거의 1에 가깝기 때문에 낮은 값을 갖게 된다. 따라서 식 (7)은 식 (8)에 근사하게 된다.

$$\tilde{R}(\tau_s) \approx C_0 P(H_0) \left( \frac{T - \tau_s}{T} \right) (1 - P_f) \quad (8)$$

따라서, PU에 대한 간섭을 줄이면서도 SU의 전송성능을 보장하기 위한 최적화 방법이 필요하다. 센싱시간과 관련된 변수로는 식 (4)에서 확인할 수 있듯이 세 가지가 있으나 CRN에서의 요구조건에 의해 오검출확률과 검출확률은 제어가능한 변수가 아니다. Hove는 스펙트럼센싱을 위한 최소 요구 PU SNR을 SU의 전송가능한 전력과 연관지었다[18]. SNR에 따른 센싱시간의 변화율은 식 (9)와 같다.

$$\frac{\partial \tau_s}{\partial \gamma} = \frac{2 - \{Q^{-1}(\bar{P}_f)\}^2 - \{Q^{-1}(\bar{P}_d)\}^2 + \sqrt{2\gamma+1} [Q^{-1}(\bar{P}_d)Q^{-1}(\bar{P}_f) - \{Q^{-1}(\bar{P}_d)\}^2]}{\gamma^3} < 0 \quad (9)$$

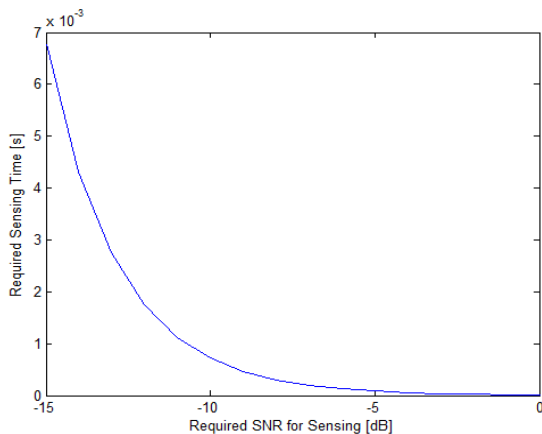


그림 2. 샘플링 주파수 1MHz에서 PU 요구 SNR에 따른 센싱시간 변화

그러므로, 최소요구 PU SNR을 줄이기 위해 SU의 전송전력을 줄이게 되면 센싱시간을 줄이게 되어 SU의 전송성능을 증가시킬 수 있다. 그림 2는 PU의 요구 SNR을 완화시킴에 따른 센싱시간을 나타낸다.

## III. 연립게임을 통한 연립집합의 형성

### 1. 연립집합형성을 위한 연립대표 선택방법

II장에서 설명되었듯이, SU의 전송반경을 줄이기 위해 연립집합대표를 선정해야 하고 이를 통해 센싱을 위해 요구되는 PU의 SNR을 완화시켜 센싱시간을 줄여야 한다. 우선, SU들로 이뤄진 전체 CNR의 성능에 따라 요구되는 연립집합대표의 개수를 정의한다. 여기서 BS는 하나가 존재하고 센서로서 동작하는 SU들은 해당지역에서 데이터를 수집하는 것으로 가정하였다. 또한 이들 센서들은 2차원 영역에서 균일분포로 랜덤하게 존재하는 것을 가정하였다. 그러면 이러한 네트워크에서 각각의 SU가 갖는 유틸리티 함수는 식 (10)으로 정의할 수 있다.

$$U_{total}^{avr}(N_{CS}) = (1 - P_f)^{N_{CS}} \left[ \frac{T - \tau_s^{\max}(\gamma_{req}^{PU})}{TN_{CS}} \right] \frac{1}{\gamma_{req}^{SU}} \quad (10)$$

여기서,  $N_{CS}$ 는 평균적인 연립집합의 크기이고, 연립집합크기가 증가할수록 연립집합의 개수가 감소하기 때문에 대략적으로  $N_{CS} = N_{node}/N_{CN}$ 로 정의하였다. 간단한 시스템을 위해 OR-rule 기반의 협력센싱[19]을 가정하였으며, TDMA기반의 전송제어를 가정하였다. 센싱시간은 요구되는 센싱SNR에 따른 함수이고, SU는 다른 SU들이 센싱하는 시간에 전송할 수 없기 때문에, 연립집합에서 SU들의 센싱시간 중 최대값을 갖게 한다. 식 (10)에서  $\gamma_{req}^{SU}$ 는 SU의 요구 전송 SNR로써 전송전력소비에 해당하기 때문에 유틸리티 함수의 분모에 위치하고, 식을 간단하게 만들기 위해 커패시티는 고려하지 않았다.

주어진 네트워크에서 연립집합대표의 수  $N_{CN}$ 을 정의한 후에 이 정보는 네트워크에 존재하는 모든 SU들에게 전파되고 각각의 SU는 그 자신이 연립집합대표가 될지의 여부를 결정한다[20]. 연립집합대표가 될 확률은 식 (11)과 같이 정의하였다.

$$P_{CH} = P_{coalition} \frac{E_{residual}}{E_{\max}} \quad (11)$$

여기서  $P_{coalition}$ 은  $N_{CN}/N_{node}$  이고,  $E_{residual}$ 은 해당 기기에서 현재 남아있는 전력예상값,  $E_{\max}$ 는 최대전력값을

나타낸다. 따라서 연립집합대표의 여부는 해당기기의 전력 효율에 따라 달라진다.

## 2. 연립 게임 알고리즘

III장의 1절에서 서술한 바와 같이, 연립집합대표를 선정한 뒤 각각의 연립집합대표는 주변의 SU들을 모아 연립집합을 구성하게 된다. 이를 위해 연립집합을 구성하는데 따른 이득과 손실에 대한 트레이드오프를 고려하여 유틸리티함수를 구성해야 한다. 이러한 유틸리티 함수를 식 (12)으로 정의하였다.

$$U_i(S) = \sum_{j=1}^{M_i} (1 - P_f)^{N_{GS}} \frac{T - T_j^{max}}{TN_{GS}} \frac{C_j}{\gamma_{req}^{SU_j}} \quad (12)$$

여기서  $S$ 는 연립집합,  $i$ 는 각각의 연립집합대표의 번호,  $j$ 는 하나의 연립집합 내에서 SU의 번호, 그리고  $C_j$ 는 연립집합대표와 각 SU의 커패시터를 나타낸다( $C_j = \log(1 + \gamma_{req}^{SU_j})$ ). 식 (10)과 유사하게 오검출확률, 센싱시간, 그리고 SU간에 전송을 위한 요구 SNR이 고려되었고 추가적으로 커패시터를 고려하였다. 연립집합의 개수가 증가할수록 커패시터 또한 증가하지만, 각 센싱시간 내에서 PU와 SU를 구별할 수 없어 연립집합 내의 센싱구간은 동일해야하기 때문에 이에 따라 센싱시간 또한 증가한다. 따라서 집합 내 SU의 증가에 따라 전송기회가 감소하게 된다. 추가적으로 특정 SU가 연립집합에 포함되지 않거나 한 연립집합 내에 두 개의 연립집합대표가 선택되는 경우를 식 (13)과 같이 고려할 필요가 있다.

$$CH_i^j = \operatorname{argmax}_j \{ \Delta u(S_i^j) \}, \quad (14)$$

where  $n_{CS_i} \geq 2$  or  $n_{CS_i} = 0$

즉,  $i$ 번째 연립집합에서 대표의 수( $n_{CS_i}$ )가 두 개 이상이거나 0인 경우 연립집합대표는 유틸리티 값을 최대로 만드는 대표로 선택한다.

[21]에서와 같이 연립게임이론의 몇 가지 정의는 다음과 같다.

정의 1 : 협력 알고리즘은 (N,V) 순서쌍으로 정의되어있다. N은 player의 집합이고, V는  $S \subseteq N$  인 S들의 모든 연립집합이다. V(S)는 각각의 player가  $S_i$  S에서 얻을 수 있는 이득이다.

정의 2 : 각각의 N개의 player가 참여하는  $S_i$ 는  $\Pi = \{S_1, \dots, S_M\}$  로 정의되며 각각의 연립집합은 공통원을 갖지 않는다.

정의 3 : N 집합의 player  $i \in N$  에 대해, 선호 관계나 순서가 존재한다. player  $i \in N$  가 주어진 두 연립집

합  $S_1 \subseteq N, S_2 \subseteq N, i \in S_1, i \in S_2, S_1 \succ_i S_2$  이다. 그리고  $S_2 \subseteq N$  player  $i \in S$  이면 플레이어 I는 연립집합  $S_1$ 을 더 선호한다.

정의 4 : 교환법칙 (Switch rule)

주어진  $\Pi = \{S_1, \dots, S_M\}$  에 대해  $S_i$ 는 현재의 연립집합을 떠나거나 다른 연립집합에 참여할 수 있다. 즉,  $S_i$ 는 다른 연립집합의 멤버가 되어 이득을 증가시킬 수 있다면 다른 연립집합에 참여할 수 있다.

정의 5 : 내시 균형 (Nash-stable)

만약 내시 균형 상태라면 현재의 연립집합에서 다른 연립집합으로 이동하지 않는다.

따라서, 어떤 연립집합대표나 SU도 현재 소속된 연립집합을 벗어남으로써 이득을 얻을 수 없을 때의 연립집합 구성  $\Pi$ 의 상태는 내시균형이다. 이에 따른 연립집합구성 알고리즘은 표 1과 같다.

표 1. 제안된 연립게임 알고리즘

01. 네트워크 유틸리티를 최대로 하는 연립집합대표의 수를 계산
02. SU 자신이 연립집합대표의 여부를 선택
03. while 연립집합대표의 유틸리티가 증가
04. 각 연립집합대표에 가까운 SU들을 집합에 포함
05. 연립집합대표는 유틸리티함수를 계산
06. if 유틸리티함수가 증가
07. SU를 연립집합에 포함
08. else
09. SU를 연립집합에서 제거
10. end
11. end

## IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션에서 사용된 변수들은 다음과 같다. 검출확률과 오검출확률은 각각 0.9와 0.1로 가정하였고, 프레임길이는  $T = 100ms$ , 샘플링주파수는  $f_s = 1MHz$ , 최대전송전력은  $P = 10mW$ , 경로손실지수는  $\mu = 3$ , 잡음분산값은  $\sigma^2 = -90dBm$ 으로 가정하였다. 그리고, BS의 반경은 300m이고, 이 반경 내에 SU들이 존재하는 것으로 가정하였고, BS는 해당 네트워크에 SU들의 개수를 알고 있고 이를 통해 필요한 연립집합대표의 계수를 계산한다. 그림 3은 식 (10)를 사용하여 연립집합대표의 수에 따른 BS의 네트워크 유틸리티 함수를 보여준다. 연립집합개수가 증가할수록 유틸리티함수도 증가하다가 특정값 이상에서 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이를 통해 유틸리티함수가 최대가 되는 연립집합대표의 수를 구할 수 있다.

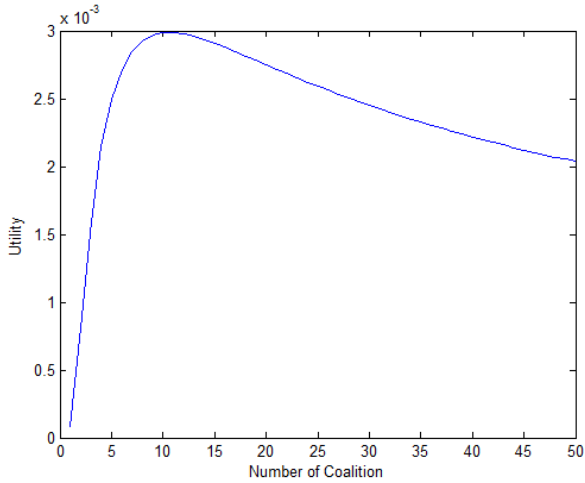


그림 3. 네트워크의 유틸리티함수

그림 4는 연립게임을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우, BS의 최대반경은 300m, SU의 수는 50개, 샘플링주파수는 1MHz로 가정하였을 때의 평균센싱시간을 보여준다. 비연립 게임의 경우 평균센싱시간은 일정값을 가지지만, 연립게임의 경우 게임의 반복회수가 증가함에 따라 연립집합크기가 증가하면서 센싱시간이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

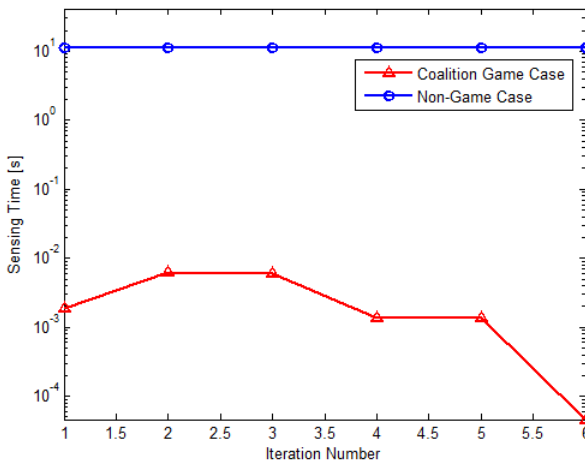
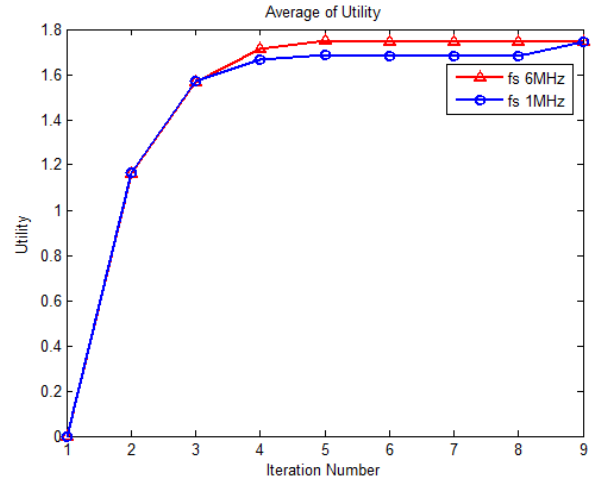


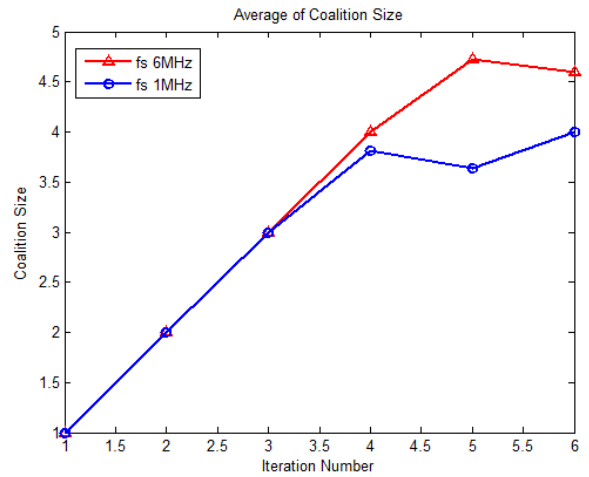
그림 4. 연립게임 대 비연립게임의 평균센싱시간

그림 5는 샘플링주파수를 각각 6MHz와 1MHz로 하였을 때, 게임의 반복횟수에 따른 유틸리티함수, 연립집합크기, 센싱시간의 추이를 나타낸다. 샘플링주파수가 높을 때 요구되는 센싱시간이 짧고, 따라서 더 높은 유틸리티 값과 더 큰 연립집합크기를 갖게 된다.

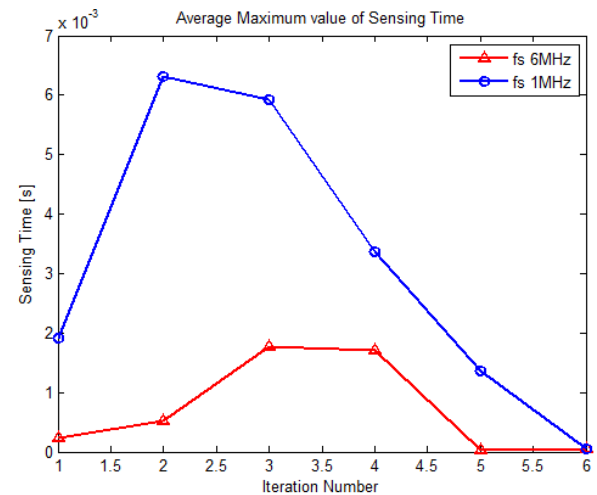
그림 6은 각각 노드 수가 50개, 100의 경우에 대한, 게임의 반복횟수에 따른 유틸리티함수, 연립집합크기, 센싱시간의 추이를 나타낸다. 노드 수가 많을수록 요구되는 센싱시간이 더 짧아지고, 연립집합크기는 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 연립집합크기가 클수록 연립집합 내의 각 SU의 시간자원이 나눠지게 되어 유틸리티함수 값은 더 작게 된다.



(a) 반복게임에 따른 유틸리티 변화

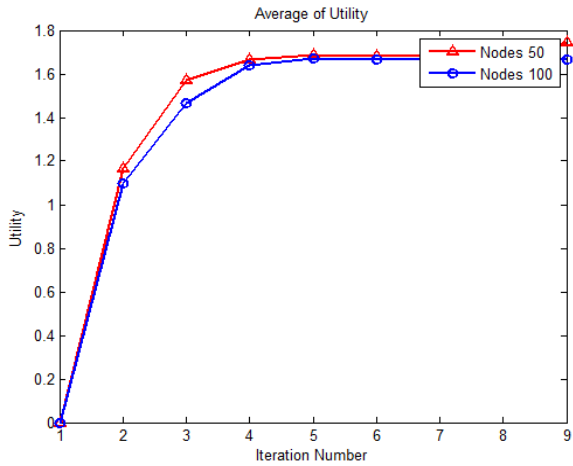


(b) 반복게임에 따른 연립집합크기 변화

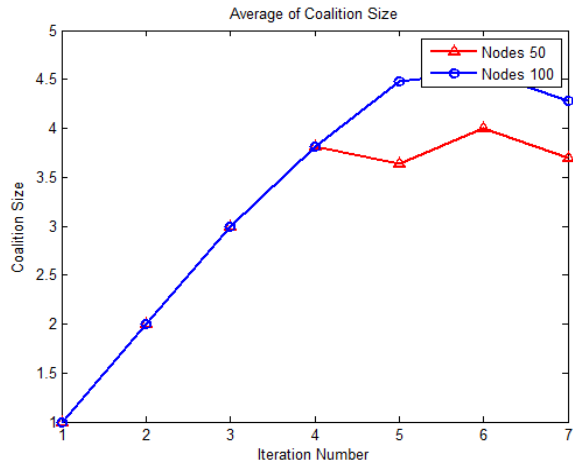


(c) 반복게임에 따른 센싱시간 변화

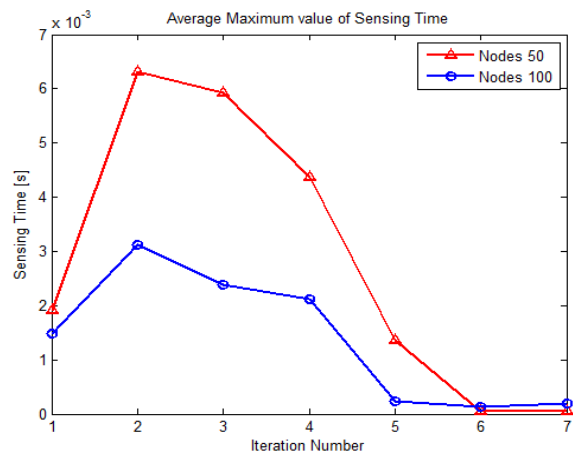
그림 5. 유틸리티, 연립집합크기, 센싱시간 (fs @6MHz/1MHz)



(a) 반복게임에 따른 유틸리티 변화



(b) 반복게임에 따른 연립집합크기 변화



(c) 반복게임에 따른 센싱시간 변화

그림 6. 유틸리티, 연립집합크기, 센싱시간 (SU개수 50/100개)

### V. 결론

본 논문은 CRN 환경에서 SU들의 협력센싱을 위한 연립 집합게임을 제안하였다. 센싱시간은 요구 검출확률, 오검출

확률 및 수신PU SNR로 계산된다. SU가 넓은 영역에 대해 전송하고자 하면 PU를 센싱하기 위한 요구 수신 SNR은 상당히 낮아지게 되어 센싱시간이 늘어나게 된다. 따라서 본 논문에서는 연립집합대표를 선정하고, 각 연립집합 대표가 주변 SU들을 모아 각각의 연립집합을 구성하도록 하였고 이를 통해 센싱시간을 줄여 전송량을 확보할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 샘플링주파수, SU기기의 수, BS의 최대반경, 프레임에 따른 유틸리티, 연립집합크기, 요구되는 센싱시간을 보임으로써 제안된 알고리즘의 성능이 게임의 반복횟수에 따라 향상되는 것을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] Mitola, J., Maguire, G.Q., Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal," *Personal Communications, IEEE*, vol.6, no.4, pp.13-18, Aug 1999
- [2]"Spectrum policy task force," *Federal Communications Commission, Tech. Rep.*, 2002.
- [3] D. Niyato, E. Hossein, and Z. Han, *Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [4] A. Wyglinski, M. Nekovee, and T. Hou, *Cognitive Radio Communications and Networks: Principles and Practice*. New York: Academic, 2009
- [5] Guowang Miao, Himayat, N., Li, G.Y., "Energy-efficient link adaptation in frequency-selective channels," *Communications, IEEE Transactions on*, vol.58, no.2, pp.545-554, February 2010
- [6] Guowang Miao, Himayat, N., Li, G.Y., Talwar, S., "Distributed Interference-Aware Energy-Efficient Power Optimization," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.10, no.4, pp.1323-1333, April 2011
- [7] Nadkar, T., Thumar, V., Tej, G. P S, Merchant, S.N., Desai, U.B., "Distributed Power Allocation for Secondary Users in a Cognitive Radio Scenario," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.11, no.4, pp.1576-1586, April 2012
- [8] Jayaweera, S.K., Tianming Li, "Dynamic spectrum leasing in cognitive radio networks via primary-secondary user power control games," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.8, no.6, pp.3300-3310, June 2009
- [9] Saad, W., Zhu Han, Rong Zheng, Hjørungnes, A., Basar, T., Poor, H.V., "Coalitional Games in Partition Form for Joint Spectrum Sensing and Access in Cognitive Radio Networks," *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol.6, no.2, pp.195-209, April 2012
- [10] Saad, W., Zhu Han, Basar, T., Hjørungnes, A., Ju Bin Song, "Hedonic Coalition Formation Games for Secondary Base Station Cooperation in Cognitive Radio Networks," *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE*, vol., no., pp.1-6, 18 April 2010
- [11] Saad, W., Zhu Han, Debbah, M., Hjørungnes, A., Basar, T.,

"Coalitional Games for Distributed Collaborative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," INFOCOM 2009, IEEE , vol., no., pp.2114-2122, 19 April 2009

[12] Saad, W., Zhu Han, Basar, T., Debbah, M., Hjorungnes, A., "Coalition Formation Games for Collaborative Spectrum Sensing," Vehicular Technology, IEEE Transactions on , vol.60, no.1, pp.276-297, Jan. 2011

[13] Won-Yeol Lee, Akyildiz, I.F., "Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks," Wireless Communications, IEEE Transactions on , vol.7, no.10, pp.3845,3857, October 2008

[14] Ying-Chang Liang, Yonghong Zeng, Peh, E.C.Y., Anh Tuan Hoang, "Sensing-Throughput Tradeoff for Cognitive Radio Networks," Wireless Communications, IEEE Transactions on , vol.7, no.4, pp.1326-1337, April 2008

[15] Beibei Wang, Liu, K.J.R., Clancy, T.C., "Evolutionary cooperative spectrum sensing game: how to collaborate?," Communications, IEEE Transactions on , vol.58, no.3, pp.890-900, March 2010

[16] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. Peh, and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks," in Proc. IEEE ICC 2007, pp. 5330-5335, Glasgow, Scotland, June 2007

[17] H. V. Poor, An Introduction to Signal Detection and Estimation, 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1994

[18] Hoven, N., Saha, A., "Power scaling for cognitive radio," Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, 2005 International Conference on , vol.1, no., pp.250-255 vol.1, 13-16 June 2005

[19] Ghasemi, A., Sousa, E.S., "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on , vol., no., pp.131-136, 8-11 Nov. 2005

[20] Younis, O., Fahmy, Sonia, "HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks," Mobile Computing, IEEE Transactions on , vol.3, no.4, pp.366-379, Oct.-Dec. 2004

[21] R. B. Myerson, Game Theory, Analysis of Conflict. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1991

## 저자

### 장 성 진(Sungjeon Jang)



- 2007년 2월 : 인하대학교 전자공학과 졸업
- 2009년 2월 : 인하대학교 정보통신공학과 석사졸업
- 2009년 6월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신공학과 박사과정

<관심분야> : 이동통신, 간섭정렬, MIMO, LTE

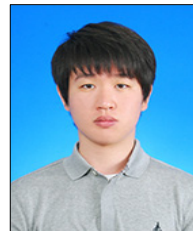
### 윤 희 석(Heesuk Yun)



- 2013년 2월 : 가천대학교 전자공학 학사졸업
- 2013년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신공학 석사과정

<관심분야> : 인지무선기술, 무선통신

### 배 인 산(Insan Bae)



- 2012년 8월 : 인하대학교 정보통신공학 학사졸업
- 2012년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신공학 석사과정

<관심분야> : 간섭정렬, MIMO

### 김 재 명(Jaemoung Kim)



- 1974년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
- 1981년 8월 : 미국남가주대학교(USC) 전자공학과 (공학석사)
- 1987년 8월 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)

- 1974년 3월 ~ 1979년 6월 : 한국 과학기술 연구소
- 1982년 10월 ~ 2003년 3월 : 한국전자통신연구원
- 2003년 4월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신공학부 교수, 통신우성우주산업연구회 회장역임 및 기술자문으로 다수 활동중
- 2014년 6월 ~ 현재 : 인하대학교 지능형 스펙트럼 엔지니어링 연구센터(ITRC) 센터장

<주 관심분야> : 차세대 무선통신, UWB, 인지무선기술