

인지라디오 네트워크에서 전력과 부반송파 할당을 위한 휴리스틱*

백 천 현**

An Heuristic for Joint Assignments of Power and Subcarriers in Cognitive Radio Networks

Chunhyun Paik**

■ Abstract ■

With the explosively increasing demand in wireless telecommunication service, the shortage of radio spectrum has been worsen. The traditional approach of the current fixed spectrum allocation leads to spectrum under-utilization. Recently, CR (Cognitive Radio) technologies are proposed to enhance the spectrum utilization by allocating dynamically radio resources to CR Networks. In this study, we consider a radio resource(power, subcarrier) allocation problem for OFDMA-based CRN in which a base station supports a variety of CUs (CRN Users) while avoiding the radio interference to PRN (Primary Radio Network). The problem is mathematically formulated as a general 0-1 IP problem. The optimal solution method for the IP problem requires an unrealistic execution time due to its complexity. Therefore, we propose an heuristic that gives an approximate solution within a reasonable execution time.

Keywords : Cognitive Radio Network, OFDMA System, Radio Resource Assignment, Heuristic

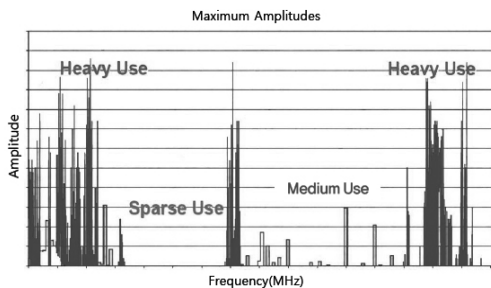
논문접수일 : 2012년 01월 10일 논문수정일 : 2012년 05월 25일 논문게재확정일 : 2012년 06월 01일

* 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구과제사업의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2009-327-B00180).

** 동의대학교 산업경영공학과

1. 서 론

방송·통신 기술의 발전으로 관련 서비스들이 성장함에 따라 무선 주파수자원에 대한 수요는 그동안 지속적으로 증가해 왔다. 특히, 유비쿼터스 정보화 시대의 도래를 앞두고 무선 주파수자원에 대한 수요는 최근 들어 폭발적으로 증가하고 있는 실정이다. 무선 주파수는 정보통신 사회에서 가장 중요하고 유한한 한 국가의 자원으로, 이를 효율적으로 활용할 수 있는 기술의 확보는 미래 정보통신 기술의 성공을 가늠할 수 있는 핵심요소로 인식되고 있다. 현재 제공되고 있는 대부분의 정보통신 서비스는 고정적이고 독점적으로 할당된(인가된) 특정 주파수대역을 점유하는 방식으로 이루어져 왔다. 이러한 주파수운용 방식하에서 현재와 같은 추세로 서비스 종류 및 사업자들이 증가하는 경우 가까운 장래에 국가 주파수자원은 포화상태에 도달할 것으로 예상되고 있다. 이러한 주파수 부족 문제를 해결하기 위한 활동의 일환으로 미국 FCC(Federal Communications Commission)는 각종 정보통신 서비스에 고정적으로 할당되어 있는 무선 주파수자원의 활용도를 조사하였다. 이 조사 결과에 따르면 평균적인 주파수자원 이용효율은 30%미만인 것으로 나타났다(<그림 1> 참조).



〈그림 1〉 미국에서의 주파수 스펙트럼 이용현황 (FCC, 2002)[4]

인지라디오(Cognitive Radio, CR) 기술은 특정 정보통신 서비스를 위해 고정적으로 할당된 주파수대역의 낮은 이용 효율을 개선하고 새로운 정보

통신 서비스의 도입을 촉진하기 위해 SDR(Software Defined Radio) 기술의 개념을 도입 발전시킨 것으로, 단말기 및 네트워크의 지능화를 통해 사용되지 않은 주파수대역을 동태적이고 적응적으로 인지하여 주파수자원 이용효율을 극대화하기 위한 기술이다[5].

CR 기술은 특정 정보통신 서비스 네트워크(주 라디오 네트워크(Primary Radio Network, PRN))의 사용자(Primary User, PU)에게 할당된 주파수(또는 채널)자원이 특정시간, 특정지역에서 사용되지 않는 경우(이를 “spectrum hole”이라고 한다) CRN(CR Network)의 사용자(Cognitive User, CU)가 이 무선자원을 활용해 정보를 주고 받는 기술이다. 이 같은 CRN의 운용을 위해서 요구되는 가장 기본적인 요소는 먼저, CU가 PRN의 PU들이 사용하지 않은 주파수자원을 발견하는 “discovery of spectrum opportunities”와 그리고 발견된 주파수자원을 효율적으로 CRN의 CU에게 할당하는 “efficient(또는 optimal) use of spectrum opportunities”로 구분할 수 있다. 전자와 관련된 기술을 채널센싱(channel sensing)기술이라고 하는데, PRN 및 CRN의 변조방식 등에 따라 파일럿검출, 에너지검출 등 다양한 방식이 제안되었는데 그동안 이루어진 CR 기술에 대한 연구들은 이 분야에 관련된 내용이 대부분을 차지한다[7, 8, 11, 12, 16]. 이들 연구는 CR 통신프로토콜의 새로운 개념과 절차 및 성능평가에 관한 내용을 주로 담고 있어 정보통신공학 관련 연구에 해당된다. 그러나 채널센싱에 따라 발견된 무선자원(주파수, 전력)을 CRN의 CU에게 효율적으로 할당하는 분야에 대한 연구는 채널센싱에 관련된 연구에 비해 매우 미진한 상태이어서 이에 대한 연구가 매우 절실한 실정이다.

채널센싱 및 무선자원할당 관련 통신절차에 관한 기능은 MAC 프로토콜이 담당하게 되는데, MAC 프로토콜은 중앙제어노드가 이러한 기능을 수행하는 중앙 집중적 MAC 프로토콜과 중앙제어노드가 없이 개별 CU들이 협업적으로 이를 수행하는 분산 MAC 프로토콜로 구분된다[17]. 대표적인 중앙

집중적 MAC 프로토콜로는 IEEE 802.22 WRAN (Wireless Regional Area Network)이 있는데, 이는 특정 지역에서 사용되고 있지 않는 TV방송 대역을 활용하여 도시 외곽지역에서 무선 데이터 서비스 제공을 목적으로 제안된 프로토콜이다. IEEE 802.22 WRAN 외에도 기존 무선 LAN(WLAN)과 CR 기술을 접목한 WLAN+CR 등이 있다. 한편, 별도의 네트워크 인프라 없이 CU간의 통신이 가능한 애드혹(Ad-hoc)+CR은 분산형 MAC 프로토콜을 채용한 경우이다.

본 연구는 차세대 무선통신 시스템(IEEE 802.22 WRAN 포함)에서 채용하고 있는 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 무선 액세스방식 하에서, CR 기술에 대한 연구 중 미진한 분야인 CRN의 가용 무선자원의 최적 할당을 위한 최적화 모형 및 해법에 관한 연구이다. OFDMA 시스템에서는 주어진 주파수대역을 상호직교성(orthogonality)이 유지되도록 수백 개의 부반송파(sub-carriers)로 나누고, 사용자(또는 호) 특성에 맞게 부반송파(또는 이들의 묶음)를 사용자별로 할당한다[6]. OFDMA 기반 무선 시스템의 가장 중요한 자원(resource)은 가용 부반송파와 전력(power)이 된다 [1, 2]. 이러한 OFDMA 시스템의 특성은 FDMA(TDMA)에서는 채널(반송파, carrier)만이 그리고 CDMA에서는 전력만이 무선자원으로 여겨진 것과는 뚜렷이 구분된다. 그리고 FDMA(TDMA)에서는 하나의 호에 한 개의 채널만이 할당되는 것에 반해 OFDMA에서는 복수개의 부반송파가 하나의 호에 할당될 수 있다는 점도 OFDMA의 중요한 특징 중 하나이다.

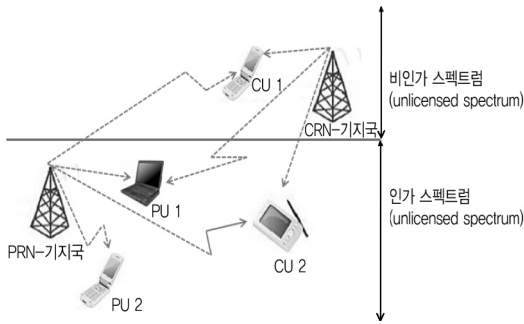
WiMAX 등 기존 OFDMA 시스템에서의 무선자원(부반송파, 전력) 할당문제[2, 3, 13, 15]와는 달리 CRN에서는 다음과 같은 중요한 제약이 존재한다. CRN은 PRN의 주파수 자원을 빌려서 사용하기 때문에 CRN의 CU에게 할당되는 주파수로 인해 PRN의 PU들이 (간섭으로 인해) 정보전송에 지장을 받아서는 안된다. 이 같은 제약을 충족시키기 위한 방안으로는 PRN에서 할당된 부반송파를 전적으로 제외

하고 나머지를 CRN에 할당하는 방식과 PRN에서 할당된 부반송파라 하더라도 간섭(interference) 수준이 기준이하가 되면 PRN에서 할당된 부반송파도 CRN에 할당할 수 있는 방식으로 구분된다. 전자의 경우 주파수사용 효율에 매우 낮은 것으로 나타나 후자의 경우가 최근 주목을 받고 있다[10, 14, 18]. Mitran[14]은 CRN에서의 부반송파 및 전력 할당을 위한 최적화 모형과 근사해법을 제시하였는데, 각 CU의 차별적인 QoS(Quality of Service)에 대한 제약이 모형에 반영되지 않았다. 또한 Zho[18]가 제시한 모형에서는 각 CU의 QoS 제약을 모형에 반영하고는 있으나 전파(radio propagation)환경에 따른 데이터 전송률(throughput)이 변조수준에 따라 이산값으로 결정되는 현실과는 달리 이론적인 값인 연속적인 값을 가정하고 있다. 기존 연구에서는 수립된 최적화 모형의 복잡성으로 인해 최적해에 대한 근사값을 구하는 휴리스틱을 제시하였다. 본 연구에서는 CRN에서 CU의 차별적인 QoS 요구수준을 모형에 반영하고 이산적인 데이터 전송률을 전제하는 현실적인 CRN 무선자원 최적화 모형을 수립하고 이에 대한 근사해법을 제시한다.

2. 인지라디오 네트워크와 최적화 모형

PRN에 할당된 주파수대역(인가 스펙트럼)의 주파수자원을 활용해 PU들은 서비스를 제공받는다. PRN을 위해 할당된 인가 스펙트럼은 CRN 입장에서는 비인가 스펙트럼이 되고 CRN의 CU들은 PRN의 PU들에 대한 서비스 제공에 방해가 되지 않는 조건하에서 PRN의 인가 스펙트럼의 주파수자원을 사용할 수 있다(<그림 2> 참조).

본 연구는 OFDMA 방식 하의 PRN 및 CRN을 대상으로 하며, 멀티미디어 서비스의 비대칭적인 특성상 시스템용량에 보다 중요한 하향링크(down-link)를 대상으로 한다. OFDMA 시스템에서는 주어진 주파수 대역을 상호직교성이 유지되도록 수백 개의 부반송파로 나누고, 각 CU는 이들의 전파 환경 및 요구전송률(QoS)에 따라 복수개의 부반송



〈그림 2〉 CRN과 PRN의 구성 예

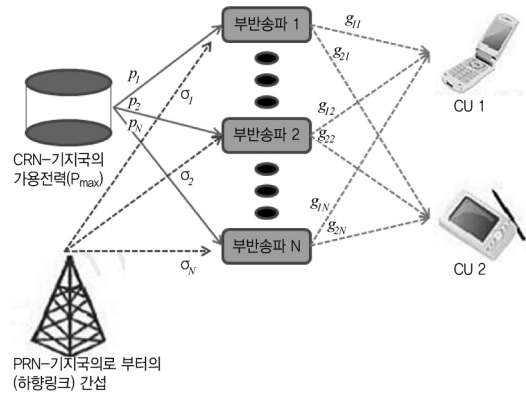
과를 동시에 할당 받을 수 있다. OFDMA 시스템에서 부반송파 자원과 더불어 중요한 것이 전력자원이다. 본 연구에서는 특정 CRN-기지국에 의해 관장되는 서비스 영역을 대상으로 하며(IEEE 802.22 WRAN의 경우 반경이 약 30km임), 이 기지국에 할당된 전력의 양은 P_{max} (watt)이고, 가용 부반송파의 수는 N 개 그리고 CRN내의 CU의 수는 M 개라고 가정한다.

부반송파 j 가 CU i 에 할당될 때, 부반송파 j 에 의해 전송될 수 있는 이론적인 데이터 전송률(bits)은 다음과 같이 결정된다[6].

$$\log_2 \left(1 + \frac{g_{ij} p_j}{\sigma_j} \right) = \log_2 \left(1 + \gamma_{ij} p_j \right), \quad \gamma_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sigma_j}, \quad (1)$$

여기서 g_{ij} 는 CU i 와 부반송파 j 간의 채널이득(channel gain)을 p_j 는 부반송파 j 에 할당된 전력의 양 그리고 σ_j 는 열잡음(thermal noise)과 PRN에서 부반송파 j 로의 간섭의 합을 의미한다(〈그림 3〉 참조). 결국, 각 부반송파가 실어 나를 수 있는 단위시간 당 비트의 수는 g_{ij} 로 대표되는 CRN 내에서의 전파환경과 부반송파에 할당된 전력량 그리고 PRN으로 부터의 간섭 수준에 의해 결정됨을 알 수 있다. 그런데, 식 (1)에 의한 데이터 전송률은 이론적인 값이고, 실제 $p_j \gamma_{ij}$ (신호대 잡음비, SNR) 값에 따른 데이터 전송률은 적응적 변조/코딩(AMC : Adaptive Modulation and Coding)기술에 의해 단속적(discrete)으로 결정된다. 즉, SNR 값에 따

른 변조 수준은 단계함수(step function)이기 때문에, 변조수준에 따라 SNR 값이 취할 수 있는 전체 영역은 중복되지 않는 E 개의 영역으로 구분되고, 각 영역의 경계값(boundary point)을 e_m 라 하면, $e_m \leq p_j \gamma_{ij} < e_{m+1}$ 인 모든 SNR은 동일한 변조수준 m 이 적용된다(동일한 변조수준은 동일한 데이터 전송률을 의미함).



〈그림 3〉 OFDMA 기반 CRN에서의 무선자원 할당과 간섭

해석적인 접근법의 용이성으로 인해(데이터 전송률이 전력함수의 연속함수로 표현되므로) 대부분의 연구에서는 이론적인 데이터 전송률 식 (1)을 사용하였으나, PRN에 대한 매우 엄격한 간섭요건을 충족해야 하는 CRN에서 이론적인 데이터 전송률을 사용하는 것은 매우 심각한 간섭을 초래할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 AMC에 의해 이산적으로 결정되는 현실적인 데이터 전송률을 대상으로 한다. 이를 위해, 부반송파 j 와 CU i 간에 채널이득이 주어졌을 때, 변조수준 e 의 데이터 전송률 z_e ($e=1, \dots, E$)을 위한 최소 전력수준을 $f_{ij}(e)$ 으로 표기하기로 한다. 부반송파 j 와 CU i 간에 채널이득 g_{ij} 가 주어진 상태에서, 부반송파 j 를 통해 데이터 전송률 z_e 를 전송하기 위해 요구되는 최소 전력수준 $f_{ij}(e)$ 는 변조방법에 따라 결정되는 기준 SNR 값의 범위에 따라 결정된다.

본 연구는 OFDMA 기반 CRN에서 무선자원을 PRN에 대한 간섭을 고려하여 최적 할당하는 최적

화 모형 및 근사해법을 제안한다. 최적화 모형의 목적함수는 기존 연구에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 형태인 시스템 데이터 전송률의 최대화이다[3, 13]. 기존 연구에서 사용하고 있는 또 다른 목적함수 형태는 개별 CU들의 데이터 전송률에 대한 특정 효용함수를 사용하는 것이다[15]. 기존 연구에서 제시된 여러 가지 효용함수 형태 중 실질적인 의미를 갖는 것은 소위 proportional fair라는 형태인데, 이는 전과환경이 상이한 사용자들 간에 자원할당 형평성(fairness)를 고려하기 위함이다. 그런데 각 사용자(CU)들의 최소 요구 전송률(QoS) 조건을 제약식에 반영하는 본 연구의 모형은 사용자들 간의 자원할당 형평성을 통해 QoS 조건을 소극적으로 고려하는 효용함수를 사용하는 방법에 비해 보다 엄격하게 사용자들의 QoS 조건을 충족시킬 수 있다.

CRN의 무선자원 할당문제는 CU 각각에 할당될 어질 부반송과와 부반송과별 전력수준(또는 변조수준)을 결정하는 것으로 정의되며 다음과 같은 의사결정변수 x_{ije} 를 도입한다. 일단 x_{ije} 가 결정되면, AMC에 의한 조건으로부터 각 부반송과에 할당되는 전력량은 $f_{ij}(e)$ 가 됨에 유의한다.

$$x_{ije} = \begin{cases} 1, & \text{만약 부반송과 } j \text{가 } CU \text{ } i \text{에 변조수준 } e \text{로 할당,} \\ 0, & \text{그렇지 않으면.} \end{cases}$$

$(i = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, N, \quad e = 1, \dots, E)$

● 목적함수(Objective Function)

본 연구의 목적함수는 기존 연구에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 형태인 시스템 데이터전송률의 최대화로 아래와 같이 정식화 된다.

$$Max_{x_{ij}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E z_e x_{ije} \tag{2}$$

● 제약조건(Constraints)

본 연구의 최적화 모형에 포함되는 제약식들은 다음과 같다.

- 부반송과 할당조건 :

$$\sum_{i=1}^M \sum_{e=1}^E x_{ije} \leq 1, \quad j = 1, \dots, N. \tag{3}$$

OFDMA 시스템에서 각 부반송과는 하나의 사용자(CU)에게만 할당될 수 있다[6]. 즉, 하나의 부반송과를 여러 CU들이 공유할 수 없다. 하지만 하나의 CU는 동시에 복수개의 부반송과를 할당 받는 것은 가능하다. 제약식 (3)은 이러한 사실을 반영하는 것으로 각 부반송과는 하나의 쌍(pair) (i, e) 을 초과하여 할당될 수 없음을 의미한다.

- CRN-기지국 가용전력량 조건 :

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E f_{ij}(e) x_{ije} \leq P_{\max} \tag{4}$$

제약식 (4)의 부등식 왼쪽 부분은 CRN 내 모든 CU들에 할당된 전력량의 합을 의미한다. 이 값은 CRN-기지국의 가용 전력량 P_{\max} 를 초과할 수 없다.

- CU별 요구전송률(QoS) 조건 :

$$\sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E z_e x_{ije} \geq R_i, \quad i = 1, \dots, M \tag{5}$$

다양한 멀티미디어 서비스를 지원하는 CRN에서 데이터 전송률에 대한 요구수준은 CU들이 요구하는 서비스 종류에 따라 구분될 수 있다. 제약식 (5)는 CU별 요구 데이터 전송률 R_i 를 만족시키도록 무선자원 할당을 요구하는 QoS 제약식이다. 이 QoS 제약식은 목적함수 (2) 하에서 전과환경이 유리한 CU들이 무선자원을 독점할 수 있는 가능성을 완화시킬 수 있다.

- PRN에 대한 간섭 제약조건 :

$$f_{ij}(e) x_{ije} \leq T_j \quad \forall i = 1, \dots, M, \tag{6}$$

$j = 1, \dots, N, \quad e = 1, \dots, E.$

CRN은 PRN의 주파수자원을 빌려 쓰는 입장으

로 CRN의 무선자원 운용이 PRN에 영향을 주어서는 안된다. PRN에 대한 CRN으로부터 허용할 수 있는 간섭수준에 대한 조건은 다음과 같이 유도될 수 있다[5].

$$\frac{g_{oj}f_{ij}(e)x_{ije}}{kB} \leq \Gamma_j, \forall i, j, e. \quad (7)$$

식 (7)에서, g_{oj} 는 부반송파 j 와 PRN-기지국과의 채널이득, k 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant), B 는 부반송파의 대역폭, 그리고 Γ_j 는 간섭수준에 대한 임계값(threshold)을 나타낸다. 식 (7)에서 $T_j = \Gamma_j \cdot kB/g_{jo}$ 로 치환함으로써 제약식 (6)을 유도할 수 있다. 아래에서는 T_j 를 부반송파 j 의 전력한계값으로 부르기로 한다. 이 상으로부터 CRN의 무선자원 최적할당 모형(P1)은 다음과 같이 요약된다.

모형 (P1)

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x_{ije}} \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E z_e x_{ije} \\ \text{s.t} \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{e=1}^E x_{ije} \leq 1, j=1, \dots, N \\ & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E f_{ij}(e)x_{ije} \leq P_{\max} \\ & \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E z_e x_{ije} \geq R_i, i=1, \dots, M \\ & f_{ij}(e)x_{ije} \leq T_j, \forall i, j, e \\ & x_{ije} \in \{0, 1\}, \forall i, j, e \end{aligned} \quad (8)$$

최적화 모형 (P1)은 CU들과 PRN 간의 간섭조건과 CRN에서 가용할 수 있는 무선자원 용량제약을 만족하면서, CU들의 QoS 조건을 만족하는 최적 무선자원을 할당하는 문제이다. 따라서 모형 (P1)의 실행가능해가 없는 경우 CU들에 대한 무선자원할당이 이루어지지 못하게 되어, 무선자원 할당이 어떤 식으로는 이루어져야 하는 현실시스템에 모형 (P1)을 이용하는데 한계가 있게 된다. 아래에서 제시된 모형 (P2)는 제약식 (5)를 가능한 만족시키되 제약식 (5)를 위반이 허용되는 “soft constraint”로

그리고 그 외 다른 제약식 (3), 제약식 (4), 제약식 (6), 제약식 (8)은 반드시 만족시켜야 하는 “hard constraint”로 구분한 모형이다. soft constraint인 QoS 제약식을 모형에 반영하기 위해 아래와 같이 각 CU의 요구 QoS를 만족시키지 못한 정도를 나타내는 위반변수(violation variable) v_i 를 도입한다.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E z_e x_{ije} + v_i \geq R_i, i=1, \dots, M \quad (9)$$

$$v_i \geq 0, i=1, \dots, M \quad (10)$$

벌칙요소(penalty term) $\delta_i(v_i)$ 는 제약식 (5)을 위반하는 비용을 나타낸 것으로 이를 모형 (P1)의 목적함수에 반영하고 제약식 (5)를 제약식 (9), 제약식 (10)으로 대체한 모형 (P2)는 다음과 같다.

모형 (P2)

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x_{ije}} \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E z_e x_{ije} - \sum_{i=1}^M \delta_i(v_i). \\ \text{s.t} \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{e=1}^E x_{ije} \leq 1, j=1, \dots, N \\ & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E f_{ij}(e)x_{ije} \leq P_{\max} \\ & \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E z_e x_{ije} + v_i \geq R_i, i=1, \dots, M \\ & f_{ij}(e)x_{ije} \leq T_j, \forall i, j, e \\ & x_{ije} \in \{0, 1\}, \forall i, j, e, v_i \geq 0, i=1, \dots, M \end{aligned}$$

CRN의 무선자원 운용이 PRN에 영향을 주어서는 안된다는 엄격한 전제때문에 CRN에서의 무선자원 할당은 다음과 같은 상황이 고려되어야 한다. 먼저, OFDMA 기반 PRN에서는 전파환경의 변화에 대응하기 위해 PU들에게 할당된 부반송파 및 전력 할당은 수 ms에서 수 십 ms마다 갱신되게 된다. 이러한 PRN의 무선자원 할당 상화변화는 CRN에서 가용할 수 있는 부반송파 수 및 각 부반송파별 가용 전력(제약식 (6))에 영향을 줄 수 있다. 따라서 CRN의 무선자원 할당은 PRN 변화에 대응할

수 있도록 PRN의 전파환경 갱신주기만큼 충분히 신속히 이루어져야 한다. 또한, CRN은 PRN의 무선자원을 빌려서 사용하기 때문에 CU들의 QoS를 만족시켜야 하는 강제성 정도가 PU들의 QoS에 만족 정도에 비해 약한 편이다. 즉, CRN에서의 무선자원 할당은 시스템 데이터 전송률과 CU들의 QoS 만족 수준을 희생하더라도 실행시간의 감축에 보다 무게를 두어야 한다. 또한 앞에서 모형 (P2)에서 언급했듯이, 현실에서 이용되기 위해서는 실행가능해가 존재하지 않은 경우에도 무선자원 할당 결과를 산출할 수 있어야 한다.

3. 근사해법

CRN의 무선자원 최적 할당문제 (P1)은 일반적인 0-1 정수계획 문제로, 전통적인 최적화 해법인 B&B(branch-and-bound)를 이용해 문제 (P1)의 최적해(optimal solution)를 구할 수 있다. 목적함수 (2)와 제약식 (4) 및 식 (8)만을 고려하면, 할당문제 (P1)는 NP-complete라 알려져 있는 전통적인 0-1 knapsack 문제가 되는 사실을 감안할 때, 거의 실시간으로 운용되는 CRN에 최적화해법을 현실에서 이용하는 것은 한계가 있다. 변수의 수가 (MNE)개이고 제약식 (8)을 제외한 제약식의 수가 ($N+M+1+MNE$)인 문제 (P1)을 현실 응용에 유사한 문제 규모의 여러 입력자료(data instances)를 이용해 최적화 도구인 cplex로 PC(4GB 메모리 2.67 GHz Quad-Core 인텔 CPU)상에서 시험적으로 실행해 본 결과, 입력자료에 따라 PRN 무선할당 주기에 비해 상당한 실행시간이 소요되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 언급된 CRN 무선자원 할당 특성에 부합되도록 현실응용이 가능한 근사해법(approximate solution)을 제시한다.

아래에서 제시하는 근사해법은 다음과 같이 4개의 하위모듈로 구성되어 있다 : [초기 전력할당], [부반송파(SC) 할당], [Rate 할당] 그리고 [SC 이동]. 아래에서 부반송파의 수와 CU의 수를 나타내는 기호 N 과 M 을 부반송파(SC, Subcarrier) 및 CU의

집합을 나타내는 기호로도 편의 상 사용하기로 한다. 한편, 기호 p_j , $j=1, \dots, N$ 은 SC j 에 할당된 전력량을 나타낸다.

[초기 전력할당]

[단계 1] If $\sum_{j=1}^N T_j \leq P_{\max}$, set $p_j = T_j$, $j=1, \dots, N$.

[단계 2] If $\sum_{j=1}^N T_j > P_{\max}$,

2.1 allocate $p_j = P_{\max}/N$

2.2 set $A = \{j | p_j > T_j, j=1, \dots, N\}$

$B = \{j | p_j \leq T_j, j=1, \dots, N\}$

2.3 calculate $\Delta_j = (p_j - T_j)$, $j \in A$ and allocate

$p_j = p_j - \Delta_j$, $j \in A$

2.4 set $Z = \sum_{j \in A} \Delta_j$

while $\min_{j \in B} (T_j - p_j) < Z/B$

find $k = \operatorname{argmin}_{j \in B} \{T_j - p_j\}$

allocate $p_k = T_k$

update $B = B - \{k\}$, $Z = Z - (T_k - p_k)$

end while

2.5 for $j=1$ to N

if $j \in B$ then allocate $p_k = p_k + Z/B$

[초기 전력할당] 절차에서는 각 SC의 전력한계값(T_j)을 고려하면서 모든 SC들에게 전력을 가능한 균등하게 할당한다. $\sum_{j=1}^N T_j \leq P_{\max}$ 경우에는 각 SC의 전력한계값만이 할당되는데, 그 이상의 전력 할당은 PRN에 간섭을 일으키기 때문이다([단계 1]). $\sum_{j=1}^N T_j > P_{\max}$ 의 경우는 일단 모든 SC들에게 균등하게 전력을 할당한 후, 자신의 전력한계값을 초과한 SC의 전력은 그렇지 못한 SC들에게 가능한 균등하게 할당한다. 위 절차에 의해 각 SC에게 할당된 전력량은 제약식 (4)와 제약식 (6)을 만족한다. 일단, 모든 SC들에게 전력이 할당되면, 각 SC는 다음의 절차에 의해 CU들에게 할당된다.

[SC 할당]

[단계 1] $A = \{1, 2, \dots, N\}$, $Q_i = \emptyset$, $q_i = 0$,

$S = \{1, \dots, M\}$, $T = \emptyset$.

A : CU에 할당되지 않은 SC들의 집합,

Q_i : CU i 에 할당된 SC들의 집합

q_i : CU i 의 현재 전송률,

S : 요구전송률(QoS)을 만족하지 못한 CU들의 집합

T : SC 할당이 불가능한 CU들의 집합

[단계 2]

2.1 If $S \neq \emptyset$, find $l = \operatorname{argmax}_{i \in S-T} \{(R_i - q_i)/R_i\}$.

만약 tie가 발생하면, 랜덤하게 선택

2.2 If $S = \emptyset$, find $l = \operatorname{argmax}_{i \in M-T} \left\{ \sum_{j \in A} g_{ij} / |A| \right\}$.

만약 tie가 발생하면, 랜덤하게 선택

[단계 3] Find $k = \operatorname{argmax}_{\{c_{ij}(p_j), j \in A\}}$.

만약 tie가 발생하면, g_{ij} 가 가장 큰 j 를 선택

If $c_{lk}(p_k) = 0$, $T = T + \{l\}$ and go to [단계 2].

$c_{ij}(p_j)$: 전력 p_j 가 할당된 SC j 가 CU i 에 할당되는 경우의 최대 전송률

[단계 4] Update $Q_i = Q_i + \{k\}$, $q_i = q_i + c_{ik}(p_k)$,

$A = A - \{k\}$.

[단계 5] If $q_i > R_i$, then $S = S - \{l\}$.

[단계 6] If $A \neq \emptyset$ and $S \neq \emptyset$ then go to [단계 2-1].

If $A \neq \emptyset$ and $S = \emptyset$ then go to [단계 2-2].

If $A = \emptyset$, stop.

위 절차에서 할당된 전송률과 요구전송률과의 차이가 SC 할당을 위한 CU의 선택기준으로 우선적으로 사용된다. 선택된 CU에게 할당되는 SC는 현재 SC에 할당된 전력수준으로 제공될 수 있는 최대 전송률이 가장 큰 것이 선택된다. 여기서 최대 전송률이 기준으로 사용되는 이유는 아직 각 SC의 변조수준이 결정되어 있지 않기 때문이다. 모든 CU의 요구전송률 조건이 충족되었거나 요구

전송률이 만족되지 않은 CU들에게 SC할당이 더 이상불가능한 경우 CU들의 선택순서는 아직 할당되지 않은 SC와의 채널이득과의 관계를 기준으로 이루어는데 이 때의 선택 기준은 평균적인 채널이득이 우수한 CU가 SC 자원을 우선적으로 할당받을 수 있게 한다. 위 절차의 목적은 각 CU에게 N 개의 SC를 할당하기 위한 절차로 각 SC의 변조수준은 결정되어 있지 않음에 유의한다. 각 SC의 변조수준은 아래의 절차에 의해 결정된다. 따라서 위 절차에서 각 SC에 할당되는 전력과 전송률은 아래 절차에서 결정되는 변조수준에 의해 달라질 수 있다.

[Rate 할당]

e_{ij} : CU i 에서 SC j 의 변조수준, $e_{ij} = 1, \dots, E$

Δ : 누적 전력 할당량, q_i : CU i 의 현재 전송률

[단계 1] Set $\Delta = 0$, $q_i = 0$, $i = 1, \dots, M$,

$e_{ij} = 0$, $j \in Q_i$, $i = 1, \dots, M$

[단계 2] for $i = 1, \dots, M$

2.0 $H = \emptyset$

2.1 Find $k = \operatorname{argmax}_{j \in Q_i - H} \{g_{ij}\}$

2.2 If $R_i - q_i > 0$,

find $l_1 = \operatorname{argmax}_l \{f_{ik}(l) \leq p_k, l = 1, \dots, E\}$

and $l_2 = \operatorname{argmin}_l \{R_i - q_i \leq z_l, l = 1, \dots, E\}$,

where $l_2 = \infty$ if $R_i - q_i > z_E$.

set $l = \min\{l_1, l_2\}$.

If $R_i - q_i \leq 0$,

if $f_{ik}(1) \leq p_k$, set $l = 1$,

otherwise go to 2-4

2.3 Update $e_{ik} = l$, $q_i = q_i + z_l$, $\Delta = \Delta + f_{ik}(l)$.

2.4 If $\Delta > P_{\max}$, then stop. Otherwise,

$H = H + \{k\}$. If $H \neq Q_i$, go to 2-1.

end for

[단계 3] Set $H_i = \emptyset$, $i = 1, \dots, M$ $U = \emptyset$.

while $\Delta < P_{\max}$

- 3.1 If $\max\{(R_i - q_i)/R_i, i \in M - U\} > 0$
- 3.1.1 Set $l = \operatorname{argmax}\{(R_i - q_i)/R_i, i \in M - U\}$
- 3.1.2 Find $k = \operatorname{argmax}\{g_{ij}, j \in Q_i - H_l\}$
- 3.1.3 If $f_{lk}(e_{lk} + 1) \leq p_k$ and $e_{lk} + 1 \leq E - 1$
and $\Delta + f_{lk}(e_{lk} + 1) \leq P_{\max}$
update $e_{lk} = e_{lk} + 1, q_l = q_l + (z_{e_{lk}} - z_{e_{lk}-1}),$
 $\Delta = \Delta + f_{lk}(e_{lk}) - f_{lk}(e_{lk} - 1)$
Otherwise, $H_l = H_l + \{k\}$. If $Q_l - H_l \neq \emptyset$
go to 3.1.2, otherwise $U = U + \{l\}$
- 3.2 Otherwise, set $H_i = \emptyset, i = 1, \dots, M$
- 3.2.1 Find $k_i = \operatorname{argmax}\{g_{ij}, j \in Q_i - H_i\},$
 $i = 1, \dots, M$
- 3.2.2 Find $l = \operatorname{argmax}\{g_{ik_i}, i \in M\}$.
- 3.2.3 If $f_{lk_i}(e_{lk_i} + 1) \leq T_{k_i}, e_{lk_i} + 1 \leq E - 1,$
 $\Delta + f_{lk_i}(e_{lk_i} + 1) \leq P_{\max}$ then update
 $e_{lk_i} = e_{lk_i} + 1, q_l = q_l + (z_{e_{lk_i}} - z_{e_{lk_i}-1}),$
 $\Delta = \Delta + f_{lk_i}(e_{lk_i}) - f_{lk_i}(e_{lk_i} - 1).$
Otherwise, $H_i = H_i + \{k_i\}$.
- end of while

[Rate 할당] 절차에서는 각 CU에게 할당된 SC들의 변조수준을 결정하는 것으로 변조수준은 SC에게 할당된 전력수준 범위안에서 이루어진다. 먼저 [단계 2]는 SC별로 초기 변조수준을 결정하는 과정인데, CU별로 (CU i) 자신에게 할당된 SC중에서 채널이득이 가장 우수한 SC를 선택한다. 선택된 SC(k)의 변조수준은 할당된 전력수준 하의 최대 변조수준과 CU i 의 전송률(q_i)를 요구전송률(R_i)까지 올리기에 필요한 변조수준 중 작은 값으로 결정된다. 이는 요구전송률이 만족되지 않은 경우에는 가능한 높은 변조수준을 한 번에 할당하여야 한 단계씩 변조수준을 할당하는 과정에서 소요되는 실행시간을 가능한 줄이려는 목적이다. [단계 3]에서는 [단계 2]에서 결정된 변조수준을 한 단계씩 높이고 있는데, 요구전송률 조건을 만족하지 못한 CU가 존재하는 경우에는 할당된 현재의 전송량과 요구전송률과의 차이가 큰 CU가 우선적으로

선택된다. 모든 CU들의 요구전송률 조건이 만족된 후에는 채널이득이 우수한 CU들이 우선적으로 선택된다.

[SC 이동(Move)]

$c(j)$: SC j 가 할당된 CU

[단계 0] Set $H = \emptyset$ and $U = \emptyset$.

[단계 1] Set $J = \{j | q_{c(j)} - z_j \geq R_{c(j)}, j \in N - H\}$.

[단계 2] If $J \neq \emptyset$ then

set $k = \operatorname{argmax}\{f_{c(j)j}(z_j)/z_j, j \in J\}$ and
 $U = \{i | (R_i - q_i) > 0, i \in M\}$.
Otherwise, stop.

[단계 3]

3.1 If $U \neq \emptyset$ $l = \operatorname{argmax}\{(R_i - q_i)/R_i, i \in U\}$
otherwise, $l = \operatorname{argmax}\{g_{ik}, i \in M\}$.

3.2 Set $e^* = \operatorname{argmax}\{f_{lk}(\zeta) \leq \min(f_{c(k)k}(e_{c(k)k}),$
 $\zeta = 1, \dots, E)\}$.

3.3 If $e^* > e_{c(k)k}$, update $q_l = q_l + z_{e^*},$

$q_{c(k)} = q_{c(k)} - z_{c(k)}, Q_l = Q_l + \{k\},$

$Q_{c(k)} = Q_{c(k)} - \{k\}, \Delta = \Delta - f_{c(k)k}(e_{c(k)k}) + f_{lk}(e^*),$

$e_{lk} = e^*, e_{c(k)k} = 0,$ and $c(k) = l.$

[단계 4] $H = H + \{k\}$ and go to [단계 1].

[SC 재할당(move)] 절차에서는 각 CU에게 할당되어 있는 SC를 다른 CU로 이동하여 목적함수 값을 향상시킨다. 위 절차의 [단계 1]에서 집합 J 는 현재 할당되어 있는 CU에서 제거되어도 요구전송률 조건을 만족시키는 SC들의 집합이다. 집합 J 에 속한 SC 중에서 단위 데이터전송 당 소요 전력이 가장 많은 SC(k)가 선택된다. 선택된 SC는 요구전송률 조건을 만족하지 못하는 CU가 있는 경우 우선하여 해당 CU가 선택되고 그렇지 않은 경우에는 채널이득이 가장 우수한 CU 중에서 하나가 선택된다. 선택된 CU에서 가능한 변조수준과 현재의

변조수준을 비교하여 목적함수 향상에 기여하는 경우 해당 SC는 새로운 CU로 이동된다.

[초기전력 할당]과정에서 각 SC에게 할당되는 전력수준은 제약식 (4)와 제약식 (6)을 만족한다. 휴리스틱의 [SC 할당] 절차에서 각 SC는 제약식 (3)이 만족되도록 하나의 CU에만 할당된다. [Rate 할당] 및 [SC 이동(Move)] 절차에서 각 CU에게 할당된 SC의 변조수준은 [초기전력 할당]에서 결정된 SC별 전력량 범위내에서 결정되기 때문에 휴리스틱의 해는 QoS 요구조건(제약식 (5))를 제외한 모든 제약식을 만족하게 된다. 휴리스틱에서는 무선자원할당을 위한 CU의 선택순서를 결정함에 있어 QoS 요구조건 위반정도가 큰 CU에게 우선순위를 주는 것으로 QoS 요구조건을 반영시키려는 최선의 노력(best effort)을 하지만 QoS 요구조건 충족을 강제하지는 않는다.

4. 실험 결과

제시된 휴리스틱의 성능 검증을 위한 실험을 위해 다음과 같은 가정이 도입되었다. PRN 기지국과 CRN 기지국은 동일한 곳에 위치하며 PRN 기지국의 서비스 영역은 반경(r_p)이 60km 그리고 CRN 기지국의 서비스 영역은 반경(r_c)이 30km인 원형(circular) 형태라 가정한다. V 개의 PU와 M 개의 CU의 위치(x좌표와 y좌표)는 랜덤(random)하게 결정하였다. 기지국과의 거리가 d_i 인 사용자(PU 또는 CU) i 와 부반송파 j 간의 채널이득(g_{ij})은 경로손실(path loss)과 페이딩(fading)의 결합 즉, $g_{ij} = |h_{ij}|^2 (d_0/d_i)^\eta$ 으로 하였다. 여기서, h_{ij} 는 κ -factor 라이시안(Ricean) 페이딩으로 κ 은 -10dB로 설정하였다. 그리고 η 는 경로손실 지수 그리고 d_0 는 far-field crossover distance로 본 실험에서는 $\eta=3$ 그리고 $d_0=50m$ 로 가정하였다[14].

N 개의 부반송파 각각은 PU들에게 랜덤하게 할당되며, CRN에서 부반송파 j 에게 할당될 수 있는 전력한계값(T_j)은 PRN 기지국에서의 수신전력의 세기가 기껏해야 노이즈전력($N_0 = -100dB$)수준이

되는 가장 큰 값으로 설정하였다. 따라서 부반송파 j 가 ($j=1, \dots, N$) CU에게 할당되는 경우 그것에 할당되는 전력 수준은 T_j 이하가 되어야 PU에게 간섭을 주지 않게 된다. 부반송파 j 와 CU i 간에 채널이득 g_{ij} 하에서, 변조수준 e 의 데이터 전송률 z_e ($e=1, \dots, E$)을 위한 최소 전력 수준은 다음과 같이 결정된다 : $f_{ij}(e) = \gamma_e N_0 / g_{ij}$, 여기서 γ_e 는 변조수준 e 를 위한 SNR으로 본 실험에서는 5가지 종류의 변조수준(즉, $E=5$)을 가정한다. 5가지 변조수준의 데이터 전송률은 $z_1=1, z_2=2, z_3=3, z_4=4, z_5=5$ 이고 이들 각각에 대응되는 SNR은 $\gamma_1=10dB, \gamma_2=14.77dB, \gamma_3=18.45dB, \gamma_4=21.76dB$, 그리고 $\gamma_5=24.91dB$ [14]. CU의 요구전송률 수준은 3, 5, 7, 10, 15 등 5가지가 있으며 CU i 의 QoS(R_i)는 이들 중에서 랜덤하게 결정된다.

본 실험에서는 4GB 메모리 PC(2.67 GHz Quad-Core 인텔 CPU)상에서 C++로 코딩된 휴리스틱과 최적화 도구인 CPLEX를 이용해 근사해와 최적해를 각각 구하였다. 주어진 입력자료에 대해 모형 (P1)의 실행가능해가 존재하는 경우에는 모형 (P1)을 이용해 최적해를 구했으며, 그렇지 않은 경우에는 모형 (P2)를 이용해 최적해를 구하였다. 모형 (P2)에서 제약식 (5)의 위반에 따른 비용요소($\delta_i(v_i)$)는 다음과 같이 설정하였다 : $\delta_i(v_i) = 10v_i, i=1, \dots, M$

<표 1>은 $P_{max} = 50W$ 가 주어진 상태에서 부반송파의 수(N), PU의 수(V) 그리고 CU의 수(M)에 대한 다양한 조합에 대해 최적해와 본 연구에서 제시된 휴리스틱에 의한 근사해의 목적함수값과 실행시간을 보여준다. <표 1>의 4번째 열의 수가 0인 경우는 모형 (P1)의 실행가능해가 존재하는 경우로, 이에 대한 실행시간은 모형 (P1)을 이용해 최적해를 구하는데 소요된 시간을 의미한다. 반면에 4번째 열의 수가 0이 아닌 경우(예 : (N, M, V) = (150, 50, 30))는 모형 (P1)의 실행가능해가 존재하지 않아 모형 (P2)를 이용해 최적해를 구한 경우로 실행시간 역시 모형 (P2)에 관한 것이다. 이 때 최적 목적함수 값은 모형 (P2)의 목적함수에서 벌칙요소항목을 제외한 값이다. 그리고 4번째 열의

수는 모형 (P2)의 최적해에서 0보다 큰 값을 갖는 위반변수(v_i)의 수를 의미한다. 한편, 7번째 열은 휴리스틱에 의해 구한 근사해에서 QoS 조건(제약식 (5))를 충족하지 못한 CU들의 수를 그리고 마지막 열은 최적해와 근사해의 차이(gap = (최적해-근사해)/최적해×100)를 나타낸 것이다.

표에서 보듯이, 대부분의 입력자료에 대해 최적해와 근사해의 차이는 13% 이내로 나타났다. 앞에서 언급했듯이 제시된 휴리스틱은 실행가능해를 보장하지는 않는다(QoS 조건). 하지만 실행가능해가 존재하는 경우, QoS 조건을 만족하지 못한 CU들의 비율은 대부분의 입력 자료에 있어 10%이내로 비교적 제한적인 수의 CU들만이 QoS 조건을 위반하였다. 한편, 실행가능해가 존재하지 않은 경

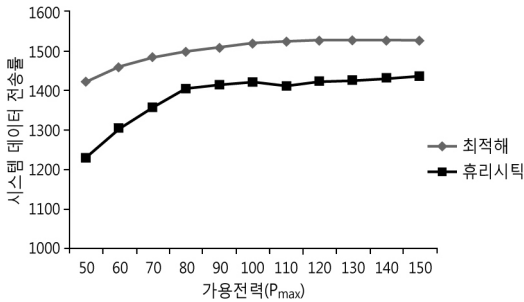
우, 모형 (P2)의 최적해에 비해 근사해의 경우가 비교적 많은 수의 CU들이 QoS 조건을 만족하지 않았다. 하지만 모형 (P2)의 실행시간은 모형 (P1)에 비해 매우 많은 실행시간이 소요됨을 알 수 있다.

OFDMA 현실 시스템에서는 프레임 길이(5ms-50ms)마다 PRN PU들의 전파환경(채널이득)이 갱신되고 이는 다시 CRN CU들의 전력한계값(T_j)에 영향을 미치게 된다. 따라서 PRN에 대한 간섭이 엄격히 통제되어야 하는 CRN의 무선자원할당에 있어 가장 중요한 요소는 무선자원 할당에 소요되는 시간(즉, 해법의 실행시간)이 된다. 본 연구에서 제시된 휴리스틱은 최적해법에 비해 실행시간이 매우 짧아 PRN의 전파환경 변화를 신속히 반영할 수 있는 장점이 있다.

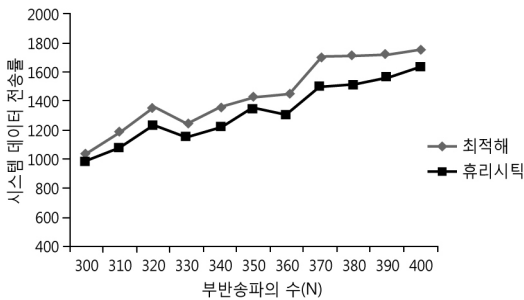
〈표 1〉 근사해와 최적해의 비교

(N, M, V)	최적해			근사해			Gap (%)
	Obj	time(초)	QoS 위반한 CU의 수	Obj	time(초)	QoS 위반한 CU의 수	
(150, 20, 30)	629	0.51	0	557	0.03	2	11.45
(150, 30, 30)	492	1.72	0	464	0.03	3	5.69
(150, 30, 50)	508	2.13	0	454	0.04	3	10.71
(150, 50, 30)	549	2.74	16	496	0.02	20	9.67
(200, 50, 30)	717	2.16	0	660	0.03	2	7.89
(200, 50, 50)	670	2.55	0	597	0.03	4	10.85
(200, 50, 100)	639	2.98	0	573	0.04	3	10.28
(200, 100, 50)	635	18.10	33	612	0.07	35	3.62
(250, 50, 50)	870	3.01	0	764	0.05	0	12.23
(250, 50, 100)	533	3.15	0	472	0.04	3	11.46
(250, 100, 50)	674	11.37	27	604	0.08	34	10.39
(300, 50, 50)	1101	2.98	0	1021	0.04	1	7.25
(300, 50, 100)	1033	3.09	0	983	0.05	1	4.84
(300, 50, 200)	1207	3.14	0	1097	0.05	2	9.11
(300, 100, 100)	1013	11.00	24	881	0.09	29	12.99
(350, 50, 50)	1424	4.26	0	1312	0.06	0	7.84
(350, 50, 100)	1423	3.75	0	1351	0.06	0	5.07
(350, 100, 100)	1065	13.25	3	929	0.07	8	12.77
(350, 50, 200)	1541	4.96	0	1376	0.06	0	10.70
(400, 50, 50)	1877	3.99	0	1709	0.10	0	8.95
(400, 100, 50)	1223	5.46	0	1105	0.11	0	9.65
(400, 50, 100)	1757	4.89	0	1564	0.09	0	10.97
(400, 100, 200)	1137	27.21	6	1082	0.15	9	4.80

<그림 4>와 <그림 5>는 CRN 기지국의 가용 전력(P_{max})과 부반송파의 수(N) 변화에 따른 모형(P1)의 최적해와 근사해의 변화 모습을 보여주고 있다. 이들 그림으로부터, 무선자원(가용전력, 부반송파)이 증가함에 따라 시스템 전송률이 증가하는 추세를 확인할 수 있다.



<그림 4> CRN 기지국 가용전력(P_{max}) 변화에 따른 최적해와 근사해 비교(N, M, V) = (350, 50, 100)



<그림 5> 부반송파의 수(N) 변화에 따른 최적해와 근사해 비교(N, M, V) = (-, 50, 100), P_{max} = 50

5. 결 론

본 연구는 인지라디오 네트워크(CRN)에서 무선 자원 할당에 관한 연구이다. CRN은 주 라디오 네트워크(PRN)에서 사용 중인 무선자원을 활용하는 것으로, 무선자원 할당에서 자신을 위해 허용된 무선자원을 독점적으로 이용하는 PRN과는 차이가 있다. CRN에서 무선자원의 할당은 PRN에서 대한 간섭이 원칙적으로 금지되기 때문에 CRN의 무선

자원 할당 방식은 이 같은 조건이 엄격히 반영되어야 한다. 본 연구에서는 CRN의 운용 특성에 부합되는 최적화 모형 및 휴리스틱을 제시하고 현실성 있는 실험을 통해 제시된 휴리스틱의 유효성을 검증하였다. 그러나 본 연구결과는 CRN의 전파환경과 가용무선 자원이 특정하게 주어진 상황(snapshot)만을 전제로 이루어졌기 때문에 확률적으로 변화하는 전파 및 트래픽변화 특성을 반영하고 있지 못하다. 따라서 트래픽의 확률적 특성 그리고 동태적인 전파환경 갱신주기(예 : 프레임 길이) 상황하의 추후 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 백천현, “핸드오프호를 고려한 OFDMA 무선 통신시스템의 확률적 트래픽 모형”, 『한국경영과학회지』, 제36권, 제3호(2011), pp.45-59.
- [2] 백천현, “광대역 OFDMA 무선통신 시스템의 호 접속제에 관한 연구”, 『대한산업공학회지』, 제34권, 제4호(2008), pp.445-459.
- [3] 정용주, 외 2인, “다중사용자 OFDM 광대역 무선인터넷 시스템의 자원할당 방법”, 『한국경영과학회지』, 제32권, 제3호(2007), pp.33-46.
- [4] Federal Communications Commission, “Spectrum policy task force,” Rep. ET Docket, 2002.
- [5] Federal Communications Commission, “Cognitive radio technologies proceeding,” Rep. ET Docket, No.03-108, 2003.
- [6] Liu, H. and G. Li, “OFDM-Based Broadband Wireless Networks,” John Wiley and Sons, Inc. 2005.
- [7] Cabric, D., A. Tkachenko, and R.W. Brodersen, “Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection,” Proc. of IEEE MILCOM, 2006.
- [8] Cao, L. and H. Zheng, “Distributed spectrum allocation via local bargaining,” Proc of IEEE

- Communications Society on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks SECON, 2005.
- [9] Chang, N.B.G and M. Liu, "Optimal channel probing and transmission scheduling for opportunistic spectrum access," Proc. of the ACM MobiCom Conference, 2007.
- [10] Cheng, P., Z. Zhang, H. Huang, and P. Qiu, "A distributed algorithm for optimal resource allocation in cognitive OFDMA systems, Proc," of *IEEE International Conference on Communications*, (2008), pp.4718-4723.
- [11] Haykin, S., "Cognitive radio : brain-empowered wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.23(2005), pp.201-220.
- [12] Huang, S., X. Liu, and Z. Ding, "Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks," *Proc. of IEEE Infocom*, (2008), pp. 1427-1435.
- [13] Kulkarni, G., S. Adlakha, and M. Srivastava, "Subcarrier allocation and bit loading algorithm for OFDMA-based wireless networks," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol.4, No.6(2005), pp.652-662.
- [14] Mitran, P., L. Le, C. Rosenberg, and A. Girad, "Resource allocation for downlink spectrum sharing in cognitive radio network," *IEEE VTC-2008-fall*, (2008), pp.1-5.
- [15] Song, G. and Y. Liu, "Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-Part 1 : Theoretical framework," *IEEE Trans, Wireless Commun*, Vol.4, No.2(2005), pp.614-624.
- [16] Urgaonkar, R. and M.J. Neely, "Opportunistic scheduling with reliability guarantees in cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol.8, No.6(2009), pp.766-777.
- [17] Zhao, Q., L. Tong, A. Swami, and Y. Chen, "Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks : A POMDP framework," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.25, No.3(2007), pp.589-600.
- [18] Zhou, X., G.Y. Li, D. Li, D. Wang, and A.C. Soong, "Probability-based resource allocation in cognitive radio network," *IEEE Globecom*, (2009), pp.1-6.