

채널 고정 할당 방식에서 채널 할당 순서 최적화(응용 부문)

Channel Assignment Sequence Optimization under Fixed Channel Assignment Scheme

¹한정희(Junghee Han), ²이영호(Youngho Lee), ²김성인(Seong-in Kim), ²김영진(Yongjin Kim)

¹강원대학교, 경영학과
강원도 춘천시 효자2동

¹College of Business Administration, Kangwon National University
Hyoja-2Dong, Chunchon-Shi, Kangwon-Do, Korea

²고려대학교, 산업정보시스템공학과
서울 성북구 안암동

²Department of Industrial Information System Engineering, Korea University
Anam-Dong, Sungbuk-Gu, Seoul, Korea

Abstract

In this paper, we consider a channel ordering problem that seeks to minimize the total interference in mobile radio networks. If a base station receives connection request from a mobile user, one of the empty channels that are fixed to the base station is assigned to the mobile user. Among several channels available, we can choose one that seems to make least interference with other channels assigned to adjacent base stations. However, a pair of channels that are not separated enough do not generate interference if both of them are not simultaneously used by mobile users. That is, interference between channels may vary depending on the channel assignment sequence for each base station and on the distribution of mobile users. To find a channel assignment sequence that seems to generate minimum interference, we develop an optimization model considering various scenarios of mobile user distribution. Simulation results show that channel assignment sequence determined by the scenario based optimization model significantly reduces the interference provided that scenarios and interference costs are properly generated.

Keywords: Channel assignment, Optimization, Simulation

1. 서론

1.1 채널 할당 순서 결정 문제

이동통신 시스템에서 채널 할당 방법은 크게 FCA(Fixed Channel Assignment)와 DCA(Dynamic Channel Assignment)로 구분할 수 있다. FCA는 기지국간 채널 재사용 거리(reuse distance)를 고려하여 필요한 수의 채널을 각 기지국에 고정적으로 할당하는 방식이다. 채널 재사용 거리란 채널 사용 효율을 높이기 위해 동일한 채널을 여러 기지국에서 사용할 때 발생하는 채널간 간섭(interference)을 방지하기 위해 동일 채널이 재사용될 수 있는 임의의 두 기지국간 최소 거리를 의미한다. 즉, 채널 재사용 거리는 두 기지국 사이의 거리 및 지형적인 조건에 따라 기지국 쌍(pair)마다 다르게 정의된다. FCA는 각 기지국이 자신에게 할당된 채널 중에서 임의의 빈 채널을 가입자에게 할당하므로 호 수락 관리(call admission control)가 간편하고 인접 기지국에서 어떤

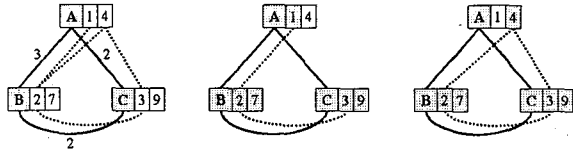
채널을 사용 중인지 파악할 필요가 없으므로 기지국마다 독립적인 호 수락 관리가 가능하다는 장점이 있다. 한편, FCA의 단점은 기지국간 채널 재사용 거리를 조사하고 기지국마다 가입자 밀도를 예측하여 각 기지국에서 필요한 수의 채널을 사전에 할당해야 하므로, 무선 네트워크 설계(cell planning) 단계에서 많은 노력이 요구된다는 점이다. 또한, FCA는 각 기지국에 채널을 고정적으로 할당하므로 특정 기지국에 가입자가 집중될 경우에는 인접 기지국에 여분의 채널이 존재하더라도 호 차단(call blocking)이 발생하는 문제가 있다. 이 같은 FCA의 문제점을 해결하기 위해 개발된 채널 할당 방법이 바로 DCA다.

DCA는 가입자의 접속 요구시 해당 기지국인 채널 Pool에서 가장 ‘적합한’ 채널을 찾아 가입자에게 할당하고 접속이 해제되면 채널을 회수하여 다시 채널 Pool에 반납하는 방식으로, 모든 기지국이 모든 채널을 공유하므로 가입자가 특정 기지국에 집중되는 상황에서도 호 차단율을 감소시키는 효과가 있다. 여기서, ‘적합한’ 채널이란 채널간 간섭이 가장 적은 채널, 즉, 수신 잡음이 가장 적은 채널을 의미한다. 수신 잡음이 가장 적은 채널을 선택하기 위해서는 모든 채널에 대해서 수신 잡음을 실시간으로 측정해야 하므로 채널 할당 절차가 복잡해지며 기지국과 단말기의 부하가 증가한다. 또한, 모든 기지국이 모든 채널을 공유함으로써 호 차단율을 개선한다는 DCA의 장점에 대해서도 다음과 같은 회의적인 견해가 보고되고 있다 [8], [10]-[12], [23], [28]. 즉, 기지국의 채널 용량은 각 기지국에 설치된 RF(Radio Frequency) 포트 수(채널 카드에서 동시에 처리 가능한 채널 수)와 같은 기지국의 물리적인 제한에 의해 결정되는 것이지만, 채널 할당 방법(FCA 또는 DCA)의 문제가 아니라는 것이다. 왜냐하면, 모든 기지국이 모든 채널을 공유하려면 각 기지국에 모든 채널을 처리할 수 있는 충분한 수의 채널카드를 장착해야 하기 때문이다. 이때 발생하는 과도한 설비 투자 비용도 문제점으로

지적된다. DCA의 또 다른 문제점은 가입자의 접속 요구시 모든 채널의 수신 잡음을 실시간으로 측정하고 주변 기지국의 채널 할당 정보를 수집하는 것이 이론적으로는 가능하지만, 이와 관련된 현실적인 문제를 해결하는 것이 쉽지 않다는 것이다. 가령, 기지국과 단말기는 채널별로 수신되는 잡음의 양을 모두 측정하여 기지국은 기지국 제어기(base station controller)에, 그리고 단말기는 기지국을 경유하여 기지국 제어기에 보고하게 되는데, 기지국과 단말기는 계측기가 아니므로 채널별 수신 잡음의 측정 오차가 상당히 클 수 밖에 없다. 또한, 수시로 채널 환경을 측정하게 되면 시그널링 오버헤드(signaling overhead)가 크게 증가하여 무선 용량이 감소하며 기지국과 단말기의 부하가 증가하게 된다. 채널별 수신 잡음의 측정 오차 문제를 해결하기 위해 단일 단말기에 계측기 수준의 전파 측정 모듈을 장착하게 되면 가격도 문제지만 노트북 컴퓨터 크기의 단말기는 휴대가 불가능해진다. 만일, 무선 용량 감소 및 시스템 과부하 문제를 해결하기 위해 채널별 수신 잡음 측정 간격을 늘리면 채널 환경이 빠르게 변화하는 도심 지역에서 이 같은 측정치는 채널 할당 시점의 채널 환경 지표가 아니라 단지 과거 데이터에 불과할 뿐만 아니라, 가입자의 접속 요구시에 할당한 적합한 채널이 시간이 지남에 따라 무선 환경 변화로 부적합한 채널로 바뀔 수도 있다. 이 같은 DCA의 현실적인 문제점 때문에 운용이 간편하면서도 채널 환경 변화에 영향을 받지 않는 FCA에 대한 연구가 다시 주목 받고 있다. FCA 및 DCA에 관한 기존 연구는 1.2절에서 자세히 설명하기로 한다.

이 논문에서는 FCA를 기반으로 가입자의 접속 요구시 채널간 간섭을 최소화하기 위해 각 기지국에 이미 할당되어 있는 채널을 어떤 순서로 사용(즉, 가입자에게 할당)할 것인가를 결정하는 방법을 개발한다. 즉, 이미 필요한 수의 채널이 각 기지국에 할당되어 있는 상황에서, 기지국간 채널 재사용 거리와 다양한 가입자 분포 시나리오를

고려하여 간섭을 최소화하는 기지국별 채널 할당 순서를 미리 결정한다. 아래에는 이 논문에서 제시하는 채널 할당 순서 결정 문제를 예제를 통하여 설명한다.



(a) 채널 할당, (b) 채널 사용 순서: 사례 1, (c) 채널 사용 순서: 사례 2

<그림 1> 채널 할당 순서 예제

<그림 1(a)>와 같이 기지국 A, B, C 에는 각각 채널 {1, 4}, {2, 7}, {3, 9}가 할당되어 있다. 기지국간 채널 재사용 거리는 기지국 A 와 기지국 B, 기지국 A 와 기지국 C 및 기지국 B 와 기지국 C 사이에 각각 3, 2, 2 로 정의되어 있다. 또한, 기지국 A, B, C 에서 각각 1 명, 2 명, 2 명의 가입자가 존재한다고 가정하자. 따라서, 기지국 A 는 채널 1 과 채널 4 중에서 하나의 채널만을 사용하게 되며, 기지국 B 와 기지국 C 는 각각 2 개의 채널을 모두 사용하게 된다. <그림 1(b)>에 나타낸 바와 같이 기지국 A 가 가입자의 접속 요구시 빈 채널중에서 낮은 번호의 채널을 먼저 할당하는 규칙을 사용한다면, 기지국 A 는 1 번 채널을 가입자에게 할당하게 되므로 기지국 B 의 2 번 채널과 간섭을 일으키게 된다. 한편, <그림 1(c)>에 나타낸 바와 같이 기지국 A 가 가입자의 접속 요구시 빈 채널중에서 높은 번호의 채널을 먼저 할당하면, 기지국 A 는 4 번 채널을 사용하게 되므로 기지국 B 의 2 번 채널 및 기지국 C 의 3 번 채널과도 간섭을 일으키게 된다. 여기서 주목할 점은 <그림 1(b)>의 경우, 기지국 A 와 기지국 B 사이의 채널 재사용 거리가 3 이므로 기지국 A 의 1 번 채널과 기지국 B 의 2 번 채널 사이에는 심각한 간섭이 발생할 수 있다는 것이다. 반면, <그림 1(c)>의 경우, 기지국 A 의 4 번

채널과 기지국 B 의 2 번 채널 및 기지국 C 의 3 번 채널간에는 간섭이 발생하지만, 기지국 A 와 기지국 C 사이의 채널 재사용 거리가 2 인 점을 고려하면 간섭의 강도가 <그림 1(b)>에 나타낸 기지국 A 의 1 번 채널과 기지국 B 의 2 번 채널간 간섭의 강도보다 약하다고 볼 수 있다. 이상 살펴본 바와 같이 각 기지국에 미리 할당된 채널을 가입자에게 할당하는 순서에 따라서 채널간 간섭의 양이 달라질 수 있다. 위 예제에서는 간략한 설명을 위해 기지국 A, B, C 에 각각 1 명, 2 명, 2 명의 가입자가 존재하는 시나리오만을 고려하였으나, 기지국마다 최적의 채널 할당 순서를 사전에 결정하기 위해서는 기지국별로 다양한 가입자 분포 시나리오를 고려할 필요가 있다.

위 예제를 통해서 알 수 있듯이 이 논문에서 다루는 채널할당 순서 결정 문제는 이미 필요한 수의 채널이 각 기지국에 할당되어 있고, 기지국별 채널할당에 상호 간섭을 일으킬 수 있는 채널 쌍(pair)이 존재할 때, 각 기지국에 배정된 채널을 가입자에게 할당하는 순서를 기지국별로 최적화함으로써 실제 운용시 나타날 수 있는 채널 간섭을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 특히, 주목할 점은 가입자의 접속 요구가 발생할 때마다 실시간으로 채널할당 순서를 최적화하는 것이 아니라, 다양한 가입자 분포를 고려하여 기지국마다 배정된 채널들을 대상으로 실시간 할당 순서를 사전에 결정하고, 실제 가입자의 접속 요구시에는 기지국마다 미리 결정된 채널 할당 순서에 따라 빈 채널을 검색하여 가장 첫번째 발견되는 빈 채널을 해당 가입자에게 할당한다는 것이다.

채널간 간섭을 줄이기 위한 방법으로는 본 연구에서 제시하는 채널 할당 순서 최적화 외에도 채널을 재할당하는 방법을 고려할 수 있다[1]. 채널 재할당은 일반적으로 기지국 증설과 같은 이동통신 네트워크의 구조가 변화함에 따라 채널간 이격거리 조건을 만족할 수 없는 경우에 행해진다. 그러나,

채널 재할당은 통화중인 가입자에게 장애를 초래할 수 있으므로 신중한 선택이 필요하다. 따라서, 이 논문에서는 기지국에 할당된 채널을 재배치하지 않고, 이미 각 기지국에 할당된 채널들을 사용하는(즉, 가입자에게 할당하는) 순서를 최적화함으로써 채널간 간섭을 최소화하는 방법을 개발한다. 한편, 이 논문에서 제시하는 채널 할당 순서 최적화 기법은 채널 재할당을 통해서도 채널간 간섭을 완전히 배제할 수 없는 경우에 추가적으로 채널간 간섭을 감소시키기 위한 방안으로 활용할 수 있다.

1.2 기존 연구

DCA 는 크게 집중형(centralized)과 분산형(distributed)으로 구분할 수 있다. 두 가지 방법 모두 모든 기지국이 채널을 공유한다는 점과 채널별 수신 잡음을 측정한다는 점에서는 동일하지만, 채널 선택 기능을 한 곳에서 수행하는가 또는 각 기지국이 독립적으로 수행하는가의 차이가 있다. 즉, 집중형 DCA 는 각 기지국마다 채널별 수신 잡음의 양을 측정 한 후 이 정보를 한 곳에서 수집하여 가장 적합한 채널을 해당 기지국에 통보한다. 따라서, 집중형 DCA 는 이론적으로 호 차단율이나 통화 품질 측면에서 가장 좋은 수행도를 제공한다. 집중형 DCA 알고리즘 중에서는 Sivarajan 의 다수[24]가 개발한 MAXAVAIL 알고리즘이 호 차단율 측면에서 수행도가 가장 우수한 것으로 알려져 있다. 한편, 분산형 DCA 는 각 기지국이 채널별 수신 잡음의 양을 측정하고 주변 기지국들의 채널 할당 정보를 참고하여 해당 기지국이 독립적으로 채널을 할당하는 방식이다. Cheng 과 Chuang 의 연구에서는 채널 할당 규칙에 따라 분산형 DCA 알고리즘을 다음과 같이 구분하였다[8].

- Least Interference (LI) 알고리즘: 수신 잡음이 가장 적은 채널을 할당한다(Chuang, [9]).
- Least Interference below Threshold (LIT) 알고리즘:

수신 잡음이 가장 적은 채널을 할당한다는 점에서 LI 알고리즘과 동일하다. 그러나, LIT 알고리즘은 모든 채널의 수신 잡음이 임계치 이상이면 채널을 할당하지 않는다.

- Highest Interference below Threshold (HIT) 알고리즘: 수신 잡음이 임계치 이하인 채널중에서 수신 잡음이 가장 큰 채널을 할당한다(Bernhardt, [4], [5]).
- Marginal Interference (MI) 알고리즘: 수신 잡음이 임계치 이하인 채널중에서 수신 잡음이 가장 큰 채널을 할당한다. 만일, 모든 채널의 수신 잡음이 임계치 이상이면 수신 잡음이 가장 적은 채널을 할당한다. 즉, LIT 알고리즘과 HIT 알고리즘을 혼합한 방법이다 (Cheng 과 Chuang, [8]).
- Lowest Frequency below Threshold 알고리즘: 수신 잡음이 임계치 이하인 채널중에서 채널 번호가 가장 낮은 채널을 할당한다(Everitt 와 Macfadyen, [14], Everitt 와 Manfield, [15]). 이 방법은 채널 span 을 줄이는 데 적합하다.

FCA에 관한 연구는 문제의 목적함수에 따라 다음과 같은 몇 가지 형태로 구분할 수 있다. 첫번째 형태는 기지국간 채널 재사용 거리를 만족하는 최소의 채널 수를 구하는 문제로서, Hale은 이 문제를 최초로 그래프 색칠(graph coloring) 문제로 표현하였다[19]. Gamst와 Rave의 연구[17], Hao의 다수의 연구[20] 및 Sung과 Wong의 연구[25] 등이 모두 이 문제를 다루었다. Chang과 Kim의 연구[7], Fischetti의 다수의 연구[16] 및 Marthar와 Mattfeldt의 연구[23]에서는 기지국간 채널 재사용 거리 조건을 만족하면서 각 기지국에 할당할 수 있는 채널의 개수를 최대화하는 문제를 다루었으며, 기지국간 채널 재사용 거리 조건을 만족하는 최소의 채널 span을 구하는 문제(Baybars, [3], Giortzis와 Turner, [18]) 등 매우 다양한 형태의 채널 할당 문제가 연구되었다. 이 논문에서 제시하는 채널 할당 순서 최적화 문제와 가장 밀접한 관련이 있는 채널 할당 문제는 채널간 간섭을 최소화하면서 각 기지국에 미리 정해진

수의 채널을 할당하는 문제이다. Hao와 다수는[20] 채널 수를 최소화하는 문제 뿐만 아니라 채널간 간섭을 최소화하는 문제를 해결하기 위해 타부 서치(tabu search) 알고리즘을 개발하였다. Tiourine와 다수[26] 역시 이 두 가지 문제에 대해서 타부 서치 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)의 성능을 비교하였으며, 선처리(preprocessing) 기법과 분지한계(branch-and-bound) 기법을 이용하여 최적해를 구하였다. 채널 간섭을 최소화하는 채널 할당 문제에 대한 연구는 위에서 언급한 내용 외에도 Borndörfer와 다수의 연구[6], Koster와 다수의 연구[21] 및 Warners와 다수의 연구[27] 등 수 없이 많으며, Aardal 와 다수의 연구[2]에 잘 정리되어 있다.

채널간 간섭을 최소화하기 위한 채널 할당 문제에 관한 기존 연구에서는 각 기지국에 할당된 모든 채널을 가입자가 사용하는 상황을 전제로 한다. 그러나, 실제 운용시에는 모든 기지국이 자신에게 할당된 채널을 모두 사용하는 상황만 발생하는 것은 아니다. 모든 기지국에서 가입자가 포화상태라면 채널 할당 순서에 관계없이 채널간 간섭이 발생하지만, 그렇지 않다면 각 기지국에 미리 할당된 채널들을 가입자에게 할당하는 순서에 따라 인접 기지국간 채널 간섭의 양이 달라질 수 있다. 즉, FCA에 관한 기존 연구는 모든 기지국에 충분한 가입자가 존재한다는 가정하에 채널간 간섭을 최소화하기 위해서 각 기지국에 어떤 채널들을 할당할 것인가를 결정하지만, 이 연구에서는 기지국마다 접속을 시도하는 가입자수가 변화하는 상황에서 채널간 간섭을 최소화하기 위해서 각 기지국에 미리 할당된 채널들을 어떤 순서로 가입자에게 할당할 것인가를 결정한다. 앞서 소개한 바와 같이 채널간 간섭을 최소화하기 위해 ‘실시간’으로 기지국에 어떤 채널을 할당할 것인가에 관한 연구는 DCA에 관한 기존 연구에서 소개한 바와 같이 무수히 많으나, 각 기지국에 이미 할당된 채널을 어떤 순서로 가입자에게 할당할 것인가를 오프라인에서

결정하는 문제는 이 연구에서 처음 다루어지는 것으로 파악된다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 가입자 분포의 다양한 시나리오를 고려하여 각 기지국에 고정 할당된 채널의 가입자 할당 순서를 결정하기 위한 수학적모형을 개발한다. 제3장에서는 제2장에서 개발한 수학적모형의 최적해 또는 근사해가 제시하는 채널 할당 순서에 따라 시뮬레이션을 실시하고 결과를 분석한다. 제4장에서는 이 연구의 결론을 맺는다.

2. 수학적 모형

다양한 가입자 분포 시나리오를 고려하여 최적의 채널 할당 순서를 결정하는 선형 정수계획법(linear integer programming) 모형을 개발하기 위해 다음과 같은 기호를 정의한다.

[집합]

- N : 기지국의 집합,
- $F(i)$: 기지국 $i \in N$ 에 할당된 채널의 집합,
- S : 시나리오의 집합(각 시나리오는 기지국별 가입자 수로 표현된다).

[파라메타]

- $r(i, j)$: 인접한 두 기지국 $i, j (> i) \in N$ 간의 채널 재사용 거리,
- $d(s, i)$: 시나리오 $s \in S$ 에 표현된 기지국 $i \in N$ 의 가입자 수,
- h_{sik} : $d(s, i) = k$ 이면 1, 그렇지 않으면 0.

[변수]

- x_{ikf} : 기지국 $i \in N$ 의 $k(= 1, \dots, |F(i)|)$ 번째 채널을 $f \in F(i)$ 로 설정하면 1, 그렇지 않으면 0,
- y_{ijgs} : 시나리오 $s \in S$ 에서 인접한 두 기지국 $i, j (> i) \in N$ 에 각각 할당된 채널 $f \in F(i)$ 와 채널 $g \in F(j)$

사이에 간섭이 발생하면 1, 그렇지 않으면 0. 즉, $y_{ifgs} = 1$ 의 의미는 다음 조건을 모두 만족함을 나타낸다.

(1) $|f - g| < r(i, j)$: 인접한 두 기지국 $i, j (> i) \in N$ 에 각각 할당된 두 채널 $f \in F(i)$ 와 $g \in F(j)$ 의 거리가 두 기지국 $i, j (> i) \in N$ 의 채널 재사용 거리 $r(i, j)$ 보다 작다.

(2) $d(s, i) \geq \arg\{k = 1, \dots, |F(i)|: x_{ikf} = 1\}, f \in F(i)$: 채널 $f \in F(i)$ 가 기지국 $i \in N$ 의 k 번째 채널로 설정되고 시나리오 $s \in S$ 에 따라 기지국 $i \in N$ 에 k 명의 가입자가 존재하므로, 기지국 $i \in N$ 에서 채널 $f \in F(i)$ 가 사용된다.

(3) $d(s, j) \geq \arg\{l = 1, \dots, |F(j)|: x_{jlg} = 1\}, g \in F(j)$: 채널 $g \in F(j)$ 가 기지국 $j \in N$ 의 l 번째 채널로 설정되고 시나리오 $s \in S$ 에 따라 기지국 $j \in N$ 에 l 명의 가입자가 존재하므로, 기지국 $j \in N$ 에서 채널 $g \in F(j)$ 가 사용된다.

기지국간 채널 재사용 거리가 0보다 큰 인접한 두 기지국 쌍의 집합을 $E = \{(i, j): i, j (> i) \in N, r(i, j) > 0\}$ 로 나타내면, 이 논문에서 제시하는 채널 할당 순서 결정 문제는 다음과 같은 수학적 모형으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Minimize } \sum_{(i, j) \in E} \sum_{f \in F(i)} \sum_{g \in F(j)} \sum_{s \in S} c_{ifgs} y_{ifgs}$$

Subject to

$$\sum_{f \in F(i)} x_{ikf} = 1 \quad i \in N, k = 1, \dots, |F(i)|, \quad (1)$$

$$\sum_{k=1, \dots, |F(i)|} x_{ikf} = 1 \quad i \in N, f \in F(i), \quad (2)$$

$$h_{sik} x_{ikf} + h_{sjl} x_{jlg} \leq y_{ifgs} + 1 \quad (i, j) \in E, k = 1, \dots, |F(i)|,$$

$$l = 1, \dots, |F(j)|, f \in F(i), g \in F(j), s \in S: |f - g| < r(i, j), \quad (3)$$

$$x_{ikf} \in \{0, 1\} \quad i \in N, k = 1, \dots, |F(i)|, f \in F(i),$$

$$y_{ifgs} \in \{0, 1\} \quad (i, j) \in E, f \in F(i), g \in F(j), s \in S:$$

$$|f - g| < r(i, j).$$

위 수학적 모형의 목적식은 기지국간 채널 재사용

거리를 만족하지 못할 경우 발생하는 채널간 간섭 비용을 최소화한다. 제약식 (1)과 (2)는 각 기지국에 할당된 채널들은 모두 할당 순서가 중복되지 않게 정해져야 함을 나타낸다. 제약식 (3)은 인접한 두 기지국에 각각 할당된 채널 중에서 기지국간 채널 재사용 거리를 만족하지 못하는 임의의 두 채널이 모두 가입자에게 할당될 경우에는 채널간 간섭이 발생함을 나타낸다.

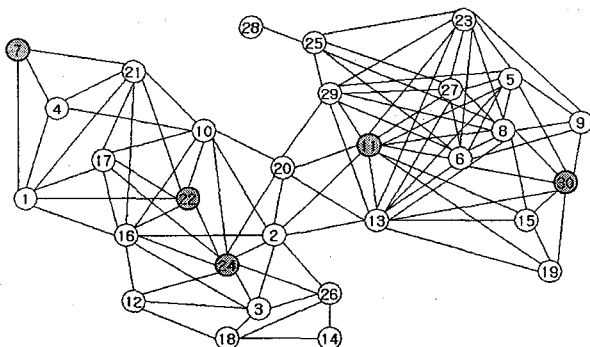
위와 같은 수학적 모형을 통해 각 기지국에 할당된 채널의 할당 순서를 결정할 때에는 기지국별 가입자 분포 시나리오 구성 및 채널간 간섭 비용 산정 방법이 매우 중요하다. 왜냐하면, 가입자의 접속 요구가 발생할 때마다 실시간으로 위에 제시한 수학적 모형의 최적해를 구하는 것이 아니라 오프라인에서 기지국별로 최적의 채널 할당 순서를 결정한 후, 실제 운용시에는 오프라인에서 결정된 채널할당 순서에 따라 가입자에게 채널을 실시간으로 할당해야 하기 때문이다. 또한, 채널간 간섭 비용이 동일하더라도 수학적 모형에서 고려하는 시나리오 구성에 따라 채널 할당 순서가 달라질 수 있으며, 마찬가지로 동일한 가입자 분포 시나리오에 대해서도 채널간 간섭 비용 산정 방법에 따라 채널 할당 순서가 달라질 수 있기 때문이다. 만일, 수학적 모형에 표현된 시나리오의 수가 너무 적거나 특정 형태의 가입자 분포만 고려한다면, 위 수학적 모형의 최적해가 바람직한 채널 할당 순서를 결정한다고 볼 수 없다. 한편, 기지국마다 지나치게 많은 가입자가 존재하는 시나리오만을 고려한다면 채널 할당 순서에 따른 채널간 간섭 비용이 유효한 차이를 나타내지 못할 수도 있다. 뿐만 아니라, 다양한 가입자 분포를 모두 고려하기 위해 지나치게 많은 시나리오를 생성하게 되면 위 수학적 모형의 최적해를 구하는 것이 불가능해질 수도 있다. 시나리오 구성 방법 및 채널간 간섭 비용 설정 방법은 제3장에서 자세히 설명한다.

3. 실험 및 결과 분석

이 논문의 실험에서는 시나리오 구성 방법(즉, 시나리오의 개수 및 기지국별 가입자 분포)과 채널간 간섭 비용을 변화시켜가며 제 2 장에서 제시한 수학적 모형의 다양한 근사해 및 최적해를 구하고, 이 때 결정된 채널 할당 순서에 따라 시뮬레이션을 실시하여 채널간 간섭을 경험하는 호의 비율을 기준으로 수행도를 평가한다.

3.1 채널 할당 순서 결정

다음과 같은 조건하에서 제 2 장에서 제시한 수학적 모형의 다양한 근사해 및 최적해를 구한다. <그림 2>에는 이 논문의 실험에 사용된 네트워크의 구조를 나타내며, 실험에 사용된 네트워크 및 시나리오는 다음과 같이 생성한다.



<그림 2> 샘플 네트워크

- (1) 기지국의 개수: 30 개
- (2) 채널의 개수: 50 개(1~50)
- (3) 동일 기지국내 채널간 거리: 1 채널
- (4) 기지국간 채널 재사용 거리: 0 ~ 3 채널(기지국간 거리에 반비례하도록 설정함)
- (5) 인접 기지국의 개수: 1 ~ 12 개 (평균 7 개)
- (6) 기지국별 채널 할당: 각 기지국에 미리 할당하는 채널의 수($F(i)$)와 채널 구성($F(i)$)에 따라 채널간 간섭의 양은 달라진다. 만일, 각 기지국에 할당된 채널이 기지국간 채널 재사용 거리를 모두

만족한다면 채널 할당 순서에 관계없이 채널간 간섭은 발생하지 않는다. 따라서, 이 논문의 실험에서는 다음 절차에 따라 채널을 할당하며, 동일 기지국내에서 채널간 간섭은 발생하지 않도록 하였다.

단계 1. 임의의 기지국을 선택하여 해당 기지국내의 채널간 거리 및 인접 기지국간 채널 재사용 거리를 만족하는 가장 낮은 번호의 채널을 할당한다. 어떤 기지국에도 더 이상 새로운 채널을 할당할 수 없을 때까지 이 과정을 반복한다.

단계 2. 임의의 기지국을 선택하여 동일 기지국의 채널간 거리를 만족하면서 인접 기지국에 할당된 채널과 중복되지 않는 가장 낮은 번호의 채널을 할당한다. 이 과정을 $5 \times |M|$ 회 반복한다.

(7) 채널간 간섭 비용: 이 논문의 실험에서는 채널간 간섭 비용을 다음과 같이 두 가지 형태로 설정하였다.

(a) $c_{ifgs} = r(i, j) / \{(f - gi + 1) \times (d(s, i) + d(s, j))\}$: 채널간 간섭 비용은 인접한 두 기지국이 동시에 사용하는 두 채널간 거리 및 인접한 두 기지국의 가입자 수에 반비례하도록 하였는데, 그 이유는 임의의 두 채널간 이격거리가 짧을수록 더 많은 간섭이 발생하며, 가입자가 포화상태 일 때 발생하는 채널간 간섭은 피할 수 없지만 가입자가 적을 때 발생하는 채널간 간섭은 최소화해야 하기 때문이다.

(b) $c_{ifgs} = r(i, j) \times (d(s, i) + d(s, j)) / (f - gi + 1)$: 7a)의 방법과는 달리 인접한 두 기지국의 가입자 수에 비례하여 채널간 간섭 비용이 증가한다.

(8) 시나리오 생성: 시나리오 구성에 따른 수행도를 비교하기 위해 다음과 같은 두 가지 방법에 따라 시나리오를 생성하였다.

(a) 10 개의 시나리오를 생성하며, 이 때 각 기지국의 가입자 수는 다음과 같다: $d(s, i) \sim \text{Uniform}[\lfloor F(i)/2 \rfloor, \lceil F(i) \rceil]$.

(b) 30 개의 시나리오를 생성하며, 이 때 각

기지국의 가입자 수는 다음과 같다: $d(s, i) \sim \text{Uniform}[\lfloor F(i)/3, \lfloor F(i) \rfloor]$. 즉, 이 경우에는 8a)와 비교할 때 시나리오의 개수 및 가입자 수의 변동폭이 증가했다.

(9) 채널 할당 순서 결정: 2 가지 시나리오 구성 방법 및 2 가지 채널간 간섭 비용 설정 방법의 4 가지 조합에 대해서 수학모형의 최적해 및 다수의 근사해를 다음과 같이 생성하였다. 수학모형의 최적해는 CPLEX 9.0[13]을 이용하여 구하였으며, 각 기지국에 할당된 채널 중에서 가장 낮은 번호를 우선 할당하는 방법을 초기해로 삼고 각 기지국마다 임의의 두 채널을 선택하여 할당 순서를 교환(*swap*)하는 방법을 반복 수행하여 다양한 품질의 근사해를 구하였다.

3.2 시뮬레이션

각 기지국은 가입자의 접속 요구시 수학모형을 통해 결정된 채널 할당 순서에서 가장 먼저 발견되는 빈 채널을 가입자에게 할당한다. 이 때 발생하는 채널간 간섭을 측정하기 위해 다음과 같은 환경에서 시뮬레이션을 실시하였다.

- (1) 가입자의 접속 시간: 평균이 120 초인 지수분포를 따른다.
- (2) 기지국별 가입자 접속 시도 간격: 평균이 $R \times 120 / \lfloor F(i) \rfloor$ 초인 지수분포를 따른다. 여기서, R 은 가입자 밀도를 조정하기 위한 파라메타로서, 이 논문의 실험에서는 $R = 1, 3, 5, 7$ 의 값을 사용하였다. 즉, R 값이 작을수록 그리고, 각 기지국에 미리 할당된 채널의 개수가 많을수록 단위 시간동안 보다 많은 가입자가 접속을 시도한다고 가정한다. 즉, 각 기지국에 미리 할당한 채널의 개수는 해당 기지국의 가입자 밀도를 고려하여 결정되었다고 가정한다.
- (3) 시뮬레이션 시간: 시뮬레이션 시작 시점에는 각 기지국에 가입자가 존재하지 않으며 채널 점유율의 평균이 더 이상 증가하지 않는 시점을 육안으로 확인하여, 이 때부터 가입자 접속 시도가

2,000,000 회 발생할 때까지 시뮬레이션을 실시하였다.

(4) 수행도 척도: 채널이 할당된 호 중에서 인접 기지국에서 사용중인 채널과 간섭이 발생하는 호의 비율을 기준으로 수행도를 평가하였다. 즉, 접속에 성공한 호 가운데 통화 품질의 저하를 경험하는 호가 적을수록 바람직한 채널 할당 순서라고 판단하였다. 호 차단율을 수행도 척도로 고려하지 않은 이유는 채널 간섭량의 임계치를 설정하지 않을 때의 호 차단율은 채널 할당 순서에 의해서 결정되는 요소가 아니라 기지국별로 할당된 채널의 수와 가입자 분포에 의해 결정되기 때문이다. 또한, 간섭량에 의한 통화 품질의 저하 정도는 주관적인 판단 기준일 뿐만 아니라 전파전파(*radio propagation*) 모형을 표현한 물리 레이어(*physical layer*) 수준의 시뮬레이션을 실시하여야 추정 가능성이므로 이 논문에서는 수행도 척도로서 고려하지 않는다.

(5) 시뮬레이션 반복: 시뮬레이션을 5 회 반복하여 수행도의 평균을 산출하였다.

3.3 결과 분석

이 논문의 실험에서는 다음과 같은 4 가지 조건하에서 수학모형의 다양한 근사해 및 최적해를 구하고, 시뮬레이션을 실시하여 해의 개선 정도(X 축)에 따라 수행도(Y 축)를 분석한다.

- Case 1: 7(a) 및 8(a) 적용. 즉, $c_{ijfs} = r(i, j) / \{(f - g) + 1\} \times (d(s, i) + d(s, j))$, $|S| = 10$, $d(s, i) \sim \text{Uniform}[\lfloor F(i) \rfloor / 2, \lfloor F(i) \rfloor]$ 의 조건을 적용하였으며, 시뮬레이션 결과는 <그림 3>에 나타낸다.
- Case 2: 7(b) 및 8(a) 적용. 즉, $c_{ijfs} = r(i, j) / \{(f - g) + 1\} \times (d(s, i) + d(s, j))$, $|S| = 30$, $d(s, i) \sim \text{Uniform}[\lfloor F(i) \rfloor / 3, \lfloor F(i) \rfloor]$ 의 조건을 적용하였으며, 시뮬레이션 결과는 <그림 4>에 나타낸다.
- Case 3: 7(a) 및 8(b) 적용. 즉, $c_{ijfs} = r(i, j) \times (d(s, i) + d(s, j)) / (f - g + 1)$, $|S| = 10$, $d(s, i) \sim \text{Uniform}[\lfloor F(i) \rfloor / 2,$

$|F(i)|$ 의 조건을 적용하였으며, 시뮬레이션 결과는 <그림 5>에 나타낸다.

- Case 4: 7(b) 및 8(b) 적용. 즉, $c_{ijgs} = r(i, j) \times (d(s, i) + d(s, j)) / (j - gi + 1)$, $|S| = 30$, $d(s, i) \sim \text{Uniform}[|F(i)|/3, |F(i)|]$ 의 조건을 적용하였으며, 시뮬레이션 결과는 <그림 6>에 나타낸다.

<표 1>에는 <그림 2>에 표시한 30 개 기지국 중에서 임의로 5 개(7 번, 11 번, 22 번, 24 번, 30 번) 기지국을 선택하여 제 2 장에서 제시한 수학모형을 이용하여 구한 최적의 채널 할당 순서를 나타낸다.

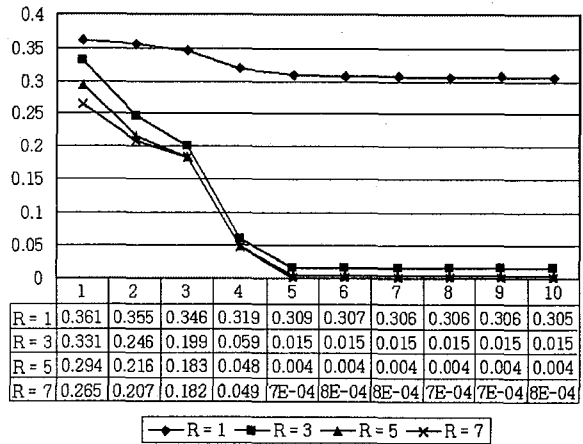
<표 1> 최적의 채널 할당 순서

기지국	Case	주파수 사용 순서 (왼쪽에서 오른쪽으로)
7	1	44, 45, 36, 23, 18, 35, 24, 26, 6, 4, 27, 12, 13, 39
	2	44, 45, 36, 35, 18, 24, 23, 26, 27, 6, 4, 13, 12, 39
	3	44, 45, 36, 4, 18, 35, 24, 26, 23, 6, 27, 12, 13, 39
	4	44, 45, 36, 35, 18, 24, 26, 4, 23, 27, 6, 12, 13, 39
11	1	2, 7, 20, 22, 26, 28, 37, 41, 44
	2	2, 7, 20, 22, 26, 28, 37, 41, 44
	3	2, 7, 20, 22, 26, 28, 37, 41, 44
	4	2, 7, 20, 22, 26, 28, 37, 41, 44
22	1	9, 10, 45, 27, 18, 36, 31, 40
	2	9, 10, 45, 27, 18, 36, 40, 31
	3	9, 18, 45, 27, 10, 36, 40, 31
	4	9, 10, 45, 27, 36, 18, 31, 40
24	1	8, 16, 44, 24, 26, 34, 38, 42, 20
	2	8, 16, 44, 24, 26, 34, 42, 20, 38
	3	8, 16, 44, 24, 26, 34, 42, 20, 38
	4	8, 16, 44, 24, 26, 34, 42, 20, 38
30	1	46, 6, 7, 41, 40, 37, 25, 26, 31, 22, 16, 14, 5
	2	46, 6, 7, 25, 40, 37, 41, 26, 31, 16, 14, 22, 5
	3	46, 6, 7, 26, 40, 37, 25, 41, 5, 22, 14, 16, 31
	4	46, 6, 7, 25, 40, 41, 37, 26, 16, 14, 31, 22, 5

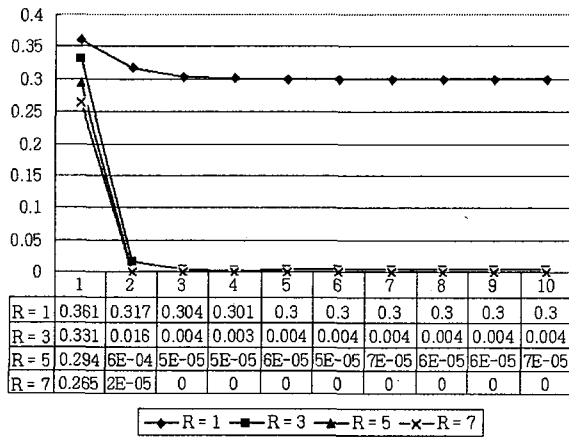
Case 1 과 Case 2 의 특징은 가입자 밀도가 높을 때보다 가입자 밀도가 낮을 때 발생하는 채널간 간섭 비용을 높게 설정하였다는 것이고, Case 3 과 Case 4 의 특징은 가입자 밀도가 낮을 때보다 가입자 밀도가 높을 때 발생하는 채널간 간섭 비용을 높게 설정하였다는 것이다. 한편, Case 1 과

Case 3 에서는 10 개의 시나리오만을 고려하였으며, Case 2 와 Case 4 에서는 30 개의 시나리오를 고려하였으며 각 시나리오마다 기지국별 가입자 분포의 변동폭을 증가시켰다. <그림 3 - 6>에서 X 축의 의미는 다음과 같다.

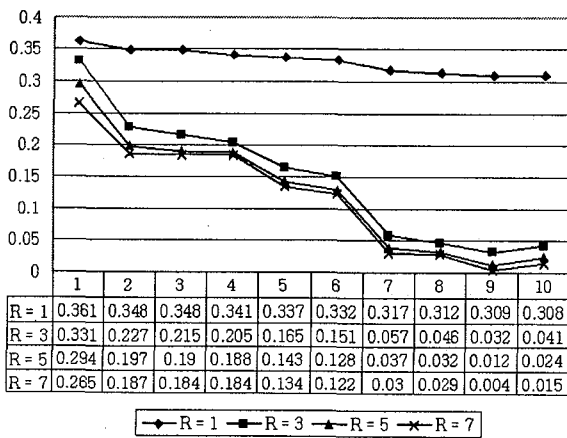
- $X = 1$: 낮은 번호의 채널을 먼저 사용하는 채널 할당 순서를 나타낸다.
- $X = 10$: 수학모형의 최적해가 제시하는 채널 할당 순서를 나타낸다.
- $X = 2, \dots, 9$: 낮은 번호의 채널을 우선적으로 할당하는 방법($X = 1$)으로부터 수학모형의 해를 개선해가는 과정에서 추출한 근사해를 나타낸다. 즉, X 축의 우측으로 갈수록 수학모형의 해가 개선됨을 나타내며, X 축의 간격은 일정하지 않다. 즉, $X = 1$ 부터 $X = 6$ 까지는 비교적 일정한 간격을 유지하도록 근사해를 구하였으며, 다시 $X = 6$ 부터 $X = 10$ 까지 비교적 일정한 간격을 유지하도록 근사해를 구하였다. 여기서, $X = 6$ 은 최적해($X = 10$)를 기준으로 할 때, 초기해($X = 1$)의 개선 정도가 약 80%에 해당하는 근사해를 나타낸다.



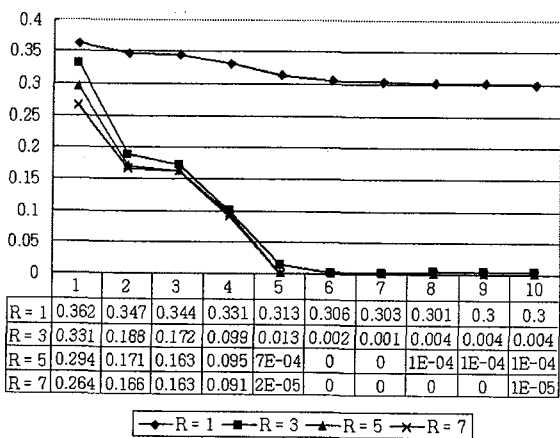
<그림 3> 시뮬레이션 결과: Case 1



<그림 4> 시뮬레이션 결과: Case 2



<그림 5> 시뮬레이션 결과: Case 3



<그림 6> 시뮬레이션 결과: Case 4

<그림 3 - 6>에서 공통적으로 나타나는 현상은 채널간 간섭 비용 설정 방법 및 시나리오 구성 방법에 관계없이 수확모형의 해를 개선함에 따라 시뮬레이션을 통해 확인한 수행도 역시 전반적으로

개선된다는 것이다. 그러나, 근사해가 어느 정도 개선되고 나면 더 이상 해를 개선하더라도 수행도의 개선이 거의 없으며, 오히려 최적해보다 최적해 주변 근사해의 수행도가 우수한 경우도 발생하였다. 가령, <그림 3>에서 $R = 7$ 인 경우에는 $X = 10$ 일 때 통화 품질 저하를 경험하는 호의 비율이 8×10^{-4} 인 반면 $X = 5, 8$ 또는 9 일 때 통화 품질 저하를 경험하는 호의 비율은 7×10^{-4} 이다. 이 같은 현상은 <그림 4 - 6>에서도 나타난다. 그러나, 이 같은 현상은 <그림 3, 4>보다 <그림 5, 6>에서 두드러진다. 특히, <그림 5>에서 $R = 7$ 인 경우에는 $X = 10$ 일 때 통화 품질 저하를 경험하는 호의 비율이 0.015 인 반면 $X = 9$ 일 때 통화 품질 저하를 경험하는 호의 비율은 0.004 에 불과하다. 또한, <그림 6>에서는 $R = 5$ 또는 7 인 경우 최적해가 아닌 근사해에서 통화 품질 저하를 경험하는 호의 비율이 0 인 경우도 발생하였다. 이와 같이 근사해가 최적해보다 우수한 수행도를 보이는 경우가 발생하는 이유는 여러 가지 측면에서 해석할 수 있다. 우선, 실시간으로 변화하는 가입자 분포를 제한된 시나리오만을 고려한 정적 최적화 모형(deterministic optimization model)으로 표현할 때 발생하는 불가피한 변동 요소가 나타났다고 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고, 근사해가 최적해보다 우수한 수행도를 보이고 또한 그 차이가 <그림 5, 6>에서 크게 나타나는 점은 불합리한 채널 간섭 비용의 산정 방법이 큰 역할을 했을 것으로 여겨진다. 물론, 가입자 밀도에 반비례하여 채널 간섭 비용이 발생하도록 한 경우에도 <그림 3, 4>에서 알 수 있듯이 수확모형의 최적해가 항상 가장 좋은 수행도를 제공하지는 않는다. 그러나, <그림 5, 6>에서 관측된 수행도 차이와 비교할 때 그 차이는 미미한 수준이다. 따라서, 채널간 간섭 비용은 가입자 밀도에 반비례하게 설정하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한, 가입자 밀도가 높은 경우에는($R = 1$), 이미 예상하였듯이 수확모형의 해를 개선하여도 수행도가 크게 개선되지 않는다. 앞서 살펴본 바와 같이 수확모형의 최적해가

항상 가장 좋은 수행도를 보이는 것은 아니지만, 최적해를 구하는 것은 다음과 같은 이유에서 여전히 중요하다고 판단된다.

(1) 낮은 번호의 채널을 우선적으로 사용하는 채널 할당 방법($X = 1$)과 이 방법을 지속적으로 개선한 근사해($X = 2, \dots, 9$) 또는 최적해($X = 10$)의 수행도를 비교하면, 낮은 번호의 채널을 우선적으로 할당하는 채널 할당 방법은 결코 바람직하지 않다.

(2) 낮은 번호의 채널을 우선적으로 사용하는 채널 할당 방법 역시 수확모형의 근사해이며, 수확모형의 최적해가 제공하는 수행도와 실제로 가장 좋은 수행도의 차이는 채널간 간섭 비용을 가입자 밀도에 반비례 하도록 설정하면 그 차이는 미미할 뿐만 아니라 전반적으로 해가 개선됨에 따라 그 차이도 줄어든다.

한편, 최적해만을 기준으로 비교한다면 채널간 간섭비용 설정 방법에 따른 수행도는 큰 차이를 보인다. 가령, $X = 10$ 일 때 <그림 3, 5>의 $R = 3, 5, 7$ 인 경우를 비교하면 채널간 간섭 비용을 가입자 밀도에 반비례하도록 설정할 때의 수행도가 가입자 밀도에 비례하도록 설정할 때의 수행도보다 월등히 우수함을 알 수 있다($R = 3$ 인 경우 2 배 이상, $R = 5$ 인 경우 6 배 이상, $R = 7$ 인 경우 18 배 이상). 이 같은 현상은 $X = 10$ 일 때 <그림 4, 6>의 $R = 5, 7$ 인 경우에서도 확인할 수 있다. 최적해에서 나타나는 이 같은 수행도 차이는 채널간 간섭비용의 설정 방법이 매우 중요함을 나타낸다.

또한, 시나리오 개수 및 구성 방법에 따른 수행도 차이를 비교하면, 시나리오의 수가 많을수록 그리고 시나리오간 기지국별 가입자수의 변동폭을 증가시키는 것이 바람직함을 알 수 있다. 즉, 10 개의 시나리오만을 고려한 <그림 3>의 결과와 30 개의 시나리오를 고려한 <그림 4>의 결과를 최적해 기준으로 비교하면, $R = 1$ 인 경우를 제외하면 보다 다양한 시나리오를 고려하여 채널 할당 순서를 결정함으로써 최적해의 수행도가 크게 개선되었다($R = 3$ 인 경우 4 배, $R = 5$ 인 경우 57 배). 또한, 10 개의 시나리오만을 고려한 <그림 5>의

결과와 30 개의 시나리오를 고려한 <그림 6>의 결과를 최적해 기준으로 비교하더라도, $R = 1$ 인 경우를 제외하면 보다 다양한 시나리오를 고려하여 채널 할당 순서를 결정함으로써 최적해의 수행도가 크게 개선됨을 알 수 있다($R = 5$ 인 경우 240 배, $R = 7$ 인 경우 1,500 배). 시뮬레이션의 오차를 어느 정도 고려하더라도 2,000,000 회에 이르는 충분한 수의 회를 발생시켰으며 이 같은 시뮬레이션을 5 회 반복한 수행도의 평균값이라는 점을 감안하면, 시나리오 수의 증가와 함께 가입자 밀도의 변동폭을 증가시킴으로써 보다 다양한 시나리오를 수확모형에 표현하는 것이 바람직하다고 여겨진다.

4. 결론

이 논문에서는 FCA 방식에 따라 각 기지국에 할당된 채널들 중에서 인접 기지국간 채널 재사용 거리를 만족하지 못하는 채널 조합이 존재할 때, 채널간 간섭을 최소화하기 위해 각 기지국의 채널 사용 순서를 결정하는 문제를 제시하였다. 또한, 최적의 채널 할당 순서를 결정하기 위해 기지국별 다양한 가입자 분포 시나리오를 고려한 수확모형을 개발하였으며, 수확 모형을 통해 구한 채널 할당 순서가 실제 운용시 채널간 간섭을 줄이는 효과를 분석하기 위해 다양한 조건에서 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과를 분석하여 다음과 같은 특성을 발견하였다. 첫째, 가입자 분포에 대한 시나리오를 적절히 구성한다면 수확모형의 해를 개선함으로써 실제 운용시에도 채널간 간섭을 효과적으로 줄일 수 있다. 즉, 수확모형의 최적해 또는 최적해에 가까운 근사해를 구하여 채널 할당 순서를 결정하는 것이 실제 운용시에도 채널간 간섭을 줄이는 데 효과적이다. 둘째, 적절한 시나리오를 구성하기 위해서는 수확모형 구성 단계에서 채널간 간섭 비용을 각 기지국의 가입자 밀도에 반비례하도록 설정하는 것이 바람직하다. 셋째, 타당한 수확모형을 구축하기 위해서는 많은

수의 시나리오를 고려할 필요가 있으며, 또한 시나리오마다 기지국별 가입자 밀도의 변동폭을 증가시킴으로써 보다 다양한 시나리오를 수학모형에 표현하는 것이 바람직하다.

추후 연구과제로는 이 논문에서 제시한 수학모형의 최적해를 보다 빠른 시간동안 구할 수 있는 최적화 기법을 개발하는 것과 전파전파 모형 등 물리 레이어 수준의 시뮬레이션을 실시하여 호 차단율을 분석하는 것이다.

참고문헌

- [1] 한정희, “주파수 재할당 문제 해결을 위한 타부서치 알고리즘 개발”, 「대한산업공학회지」, 제31권(2005), pp. 1-9.
- [2] Aardal, K., Hoesel, S., Koster, A., Mannino, C. and Sassano, A., “Models and solution techniques frequency assignment problems,” (2001), *ZIB Report* 01-40.
- [3] Baybars, I., “Optimal assignment of broadcasting frequencies,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 9 (1982), pp. 257-263.
- [4] Bernhardt, C., “Time-slot management in digital portable radio systems,” *IEEE Trans. Veh. Tech.*, (1991), pp. 261-272.
- [5] Bernhardt, C., “Time-slot reassignment in a frequency reuse TDMA portable radio systems,” *IEEE Trans. Veh. Tech.*, (1992), pp. 296-304.
- [6] Borndörfer, R., Eisenblätter, A. Grötschel, M and Martin, A., “The orientation model for frequency assignment problem,” (1998), Tech. Report TR 98-01, *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin*.
- [7] Chang, K. and Kim, S., “Channel allocation in cellular radio networks,” *Computers and Operations Research*, Vol. 24(1997), pp. 849-860.
- [8] Cheng, L. and Chuang, J., “Performance evaluation of distributed measurement-based dynamic channel assignment in local wireless communications,” *IEEE Select. Areas Commun.*, Vol. 14(1996), pp. 698-710.
- [9] Chuang, J., “Autonomous adaptive frequency assignment for TDMA portable radio systems,” *IEEE Trans. Veh. Tech.*, (1991), pp. 627-653.
- [10] Chuang, J., “Performance issues and algorithms for dynamic channel assignment,” *IEEE Select. Areas Commun.*, Vol. 11(1993), pp. 955-963.
- [11] Chuang, J. and Sollenberger, R., “Spectrum resource allocation for wireless packet access with application to advanced cellular internet service,” *IEEE Select. Areas Commun.*, Vol. 16(1998), pp. 820-829.
- [12] Cimini, J., Foschini, J. and Miljanic, Z., “Call blocking performance of distributed algorithms for dynamic channel allocation in microcells,” *IEEE Tran. Commun.*, Vol. 42(1994), pp. 2600-2607.
- [13] CPLEX Division, *CPLEX 9.0 Users' Manual*, (2004), ILOG Inc.
- [14] Everitt E. and Macfadyen, W., “Analysis of multicellular mobile radio telephone system with loss,” *Br. Telecom. Tech. J.*, Vol. 1(1983), pp. 37-45.
- [15] Everitt E. and Manfield, D., “Performance analysis of cellular mobile communication system with dynamic channel assignment,” *IEEE Select. Areas Commun.*, (1989), pp. 1172-1180.
- [16] Fischetti, M., Lepschy, C., Minerva, G., Romanin-Jacur, G. and Toto, E., “Frequency assignment in mobile radio systems using branch-and-cut techniques,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 123(2000), pp. 241-255.
- [17] Gamst, A. and Rave, W., “On frequency assignment in mobile automatic telephone systems,” *Proc. of GLOBECOM '82 IEEE*, (1982), pp. 309-315.
- [18] Giortzis, I. And Turner, F., “Application of mathematical programming to the fixed channel assignment problem in mobile radio networks,” *IEE Proceedings-Commun.*, Vol. 144(1997), pp. 257-264.
- [19] Hale, K., “Frequency assignment: theory and application,” *Proc. of IEEE*, Vol. 68(1980), pp. 1498-1573.

- [20] Hao, J., Dorne, R. and Galinier P., "Tabu search for frequency assignment in mobile radio networks," *Journal of Heuristics*, Vol. 4(1990), pp. 47-62.
- [21] Koster, A., Hoesel, M and Kolen, J., "The partial constraint satisfaction problem: facets and lifting theorems," *Operations Research Letters*, Vol. 23(1998), pp. 89-97.
- [22] Marthar, R. and Mattfeldt, J., "Channel assignment in cellular radio networks," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 42(1993), pp. 647-656.
- [23] Qiu, X., Chawla, K., Chuang, J. and Sollenberger, N., "Network-assisted resource management for wireless data networks," *IEEE Select. Areas Commun.*, Vol. 19(2001), pp. 1222-1234.
- [24] Sivarajan, N., McEliece, J. and Ketchum, W., "Dynamic channel assignment in cellular radio," *Proc. IEEE Veh. Tech. Conf.*, (1990), pp. 631-637.
- [25] Sung, W. and Wong W., "Sequential packing algorithm for channel assignment under cochannel and adjacent channel interference constraint," *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, Vol. 46(1997), pp. 676-686.
- [26] Tiourine, R., Hurkens, C. and Lenstra, J., "Local search algorithm for the radio link frequency assignment problem," *Telecommunication Systems*, Vol. 13(2000), pp. 293-314.
- [27] Warners, P., Terlaky, T., Roos, C. and Jansen, B., "A potential reduction approach to the frequency assignment problem," *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 78(1997), pp. 251-282.
- [28] Whitehead, J., "Distributed packet dynamic resource allocation for wireless networks," *Proc. 46th Vehicular Tech. Conf.*, Vol. 1(1996), pp. 111-115.