



### 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

셀룰러 네트워크 시스템에서의 사용자  
스케줄링을 통한 릴레이 기반 부하 분산  
방식에 관한 연구

Relay-Assisted Dynamic Load Balancing through  
User Association in Cellular Networks

2013년 8월

서울대학교 대학원

전기 정보 공학부

유 원 태

셀룰러 네트워크 시스템에서의 사용자  
스케줄링을 통한 릴레이 기반 부하 분산  
방식에 관한 연구

Relay-Assisted Dynamic Load Balancing through  
User Association in Cellular Networks

지도교수 김 성 철

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2013년 8월

서울대학교 대학원

전기 정보 공학부

유 원 태

유원태의 공학석사 학위논문을 인준함

2013년 8월

위 원 장 : \_\_\_\_\_

부위원장 : \_\_\_\_\_

위 원 : \_\_\_\_\_

# 초 록

최근 셀룰러 네트워크 환경은 스마트폰 등 통신기기의 발전과 다양한 무선 서비스의 증가로 인해 이용자들이 급격하게 늘어나고 있으며, 데이터 트래픽이 급속도로 증가하여 통신사업자가 제공할 수 있는 트래픽에 한계가 오고 있는 실정이다. 더욱이 각 사용자들은 셀에 고르게 분포되어 있지 않으므로, 많은 이용자들이 몰려있는 기지국에서는 한정된 자원으로 서비스를 하는데 많은 어려움을 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 서비스 지역을 확대시켜 셀 변두리에 위치해 있는 사용자들의 전송률을 높일 수 있는 릴레이를 통한 기술들이 현재 네트워크에서 이용되고 있다.

본 논문에서는 다중 셀 셀룰러 네트워크에서 셀 간의 부하가 불균형을 이루고 있을 때, 릴레이를 통해 트래픽들을 보다 한적한 기지국으로 분산 시킴으로써 전체 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있는 기법을 제시한다. 각 사용자와 릴레이는 인접한 기지국으로부터의 처리율을 계산하고, 중앙 노드는 그 정보를 통해 핸드오버를 조정하게 된다.

본 논문에서 제시한 핸드오버 알고리즘을 적용한 모의실험을 통해 네트워크 전체 전송률의 손실이 없이 하위 5%의 사용자들의 성능을 향상시킬 수 있으며, 본래 알고리즘의 목적인 네트워크 유틸리티 함수의 값을 최대화할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

주요어: 릴레이 네트워크, 비례 공평, 다중 셀, 셀룰러 네트워크, 부하분산  
학번: 2011-23369

# 목 차

초록 .....	i
목차 .....	ii
그림 목차 .....	iv
표 목차 .....	vii
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 시스템 모델 .....	4
2.1 주파수 자원 할당 .....	6
2.2 링크 모델 .....	7
제 3 장 사용자 할당 문제 .....	10
3.1 일반적인 사용자 할당 문제 .....	10
3.2 Proportional Fair 사용자 할당 문제 .....	13

제 4 장	핸드오버 알고리즘 .....	17
4.1	핸드오버에 의한 유틸리티 변동 .....	17
4.2	핸드오버 알고리즘 .....	23
제 5 장	모의실험 .....	27
5.1	파라미터 설정 .....	27
5.2	제안한 알고리즘의 성능 비교 .....	29
5.3	Universal frequency reuse인 경우와의 성능 비교 .....	42
5.4	셀 간 부하 불균형 변화에 따른 비교 .....	46
제 6 장	결론 .....	59
참고 문헌	.....	62
Abstract	.....	65

## 그림 목차

그림 2.1 트래픽 분산 기법 예시 .....	5
그림 2.2 부분 주파수 재사용 모델 .....	6
그림 5.1 $\alpha=0.25$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 네트워크 환경 .....	29
그림 5.2 $\alpha=0.25$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우의 네트워크 전체 전송률 비교 .....	30
그림 5.3 $\alpha=0.25$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교 .....	30
그림 5.4 $\alpha=0.25$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 .....	31
그림 5.5 $\alpha=0.25$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 .....	31
그림 5.6 $\alpha=0.5$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 네트워크 환경 .....	32
그림 5.7 $\alpha=0.5$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우의 네트워크 전체 전송률 비교 .....	33
그림 5.8 $\alpha=0.5$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교 .....	33
그림 5.9 $\alpha=0.5$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 .....	34
그림 5.10 $\alpha=0.5$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 .....	34
그림 5.11 $\alpha=0.75$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 네트워크 환경 .....	35
그림 5.12 $\alpha=0.75$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우의 네트워크 전체 전송률 비교 .....	36
그림 5.13 $\alpha=0.75$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교 .....	36
그림 5.14 $\alpha=0.75$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 .....	37
그림 5.15 $\alpha=0.75$ , $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 .....	37
그림 5.16 No relay, $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 네트워크 환경 .....	38
그림 5.17 No relay, $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우의 네트워크 전체 전송률 비교 .....	39
그림 5.18 No relay, $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교 .....	39
그림 5.19 No relay, $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 .....	40
그림 5.20 No relay, $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 .....	40
그림 5.21 Universal frequency reuse, $Y_1=100$ , $Y_n=10$ 인 네트워크 환경 .....	42
그림 5.22 Universal frequency reuse 경우의 네트워크 전체 전송률 비교 .....	43

그림 5.23 Universal frequency reuse 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교 .....	43
그림 5.24 Universal frequency reuse 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 .....	44
그림 5.25 Universal frequency reuse 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 .....	44
그림 5.26 $\alpha = 0.25$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 환경 .....	46
그림 5.27 $\alpha = 0.25$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 네트워크 전체 전송률 비교 .....	47
그림 5.28 $\alpha = 0.25$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 네트워크 전체 유틸리티 비교 .....	47
그림 5.29 $\alpha = 0.25$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 .....	48
그림 5.30 $\alpha = 0.25$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 비교 .....	48
그림 5.31 $\alpha = 0.75$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 환경 .....	49
그림 5.32 $\alpha = 0.75$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 네트워크 전체 전송률 비교 .....	50
그림 5.33 $\alpha = 0.75$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 네트워크 전체 유틸리티 비교 .....	50
그림 5.34 $\alpha = 0.75$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 .....	51
그림 5.35 $\alpha = 0.75$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 비교 .....	51
그림 5.36 $\alpha = 0.25$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 6, 13$ )인 네트워크 환경 .....	52
그림 5.37 $\alpha = 0.25$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 6, 13$ )인 경우 네트워크 전체 전송률 비교 .....	53
그림 5.38 $\alpha = 0.25$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 6, 13$ )인 경우 네트워크 전체 유틸리티 비교 .....	53
그림 5.39 $\alpha = 0.25$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 6, 13$ )인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 .....	54

그림 5.40 $\alpha = 0.25$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10 (n \neq 6, 13)$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 .....	54
그림 5.41 $\alpha = 0.75$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10 (n \neq 6, 13)$ 인 네트워크 환경 .....	55
그림 5.42 $\alpha = 0.75$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10 (n \neq 6, 13)$ 인 경우 네트워크 전체 전송률 비교 .....	56
그림 5.43 $\alpha = 0.75$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10 (n \neq 6, 13)$ 인 경우 네트워크 전체 유틸리티 비교 .....	56
그림 5.44 $\alpha = 0.75$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10 (n \neq 6, 13)$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 .....	57
그림 5.45 $\alpha = 0.75$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10 (n \neq 6, 13)$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 .....	57

## 표 목차

표 5.1 $\alpha = 0.25$ , $Y_1 = 100$ , $Y_n = 10$ 인 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교	29
표 5.2 $\alpha = 0.5$ , $Y_1 = 100$ , $Y_n = 10$ 인 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교	32
표 5.3 $\alpha = 0.75$ , $Y_1 = 100$ , $Y_n = 10$ 인 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교	35
표 5.4 No relay, $Y_1 = 100$ , $Y_n = 10$ 인 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교	38
표 5.5 Universal frequency reuse 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교	42
표 5.6 $\alpha = 0.25$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 전송률과 유틸리티 비교	46
표 5.7 $\alpha = 0.75$ , $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 전송률과 유틸리티 비교	49
표 5.8 $\alpha = 0.25$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 6, 13$ )인 경우 전송률과 유틸리티 비교	52
표 5.9 $\alpha = 0.75$ , $Y_6 = Y_{13} = 100$ , $Y_n = 10$ ( $n \neq 6, 13$ )인 경우 전송률과 유틸리티 비교	55

# 제 1 장 서 론

현재 이동통신 시장의 최신 동향을 살펴보면, 스마트폰과 같은 개인휴대 통신기기의 발전과 이를 사용하는 이용자들의 수가 급격하게 증가하고 있다. 또한, 최근 다양하게 생겨나고 있는 무선 서비스와 애플리케이션 등으로 인해 데이터 트래픽이 급속도로 증가하고 있으며, 이는 서비스 품질의 저하를 일으키게 되었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 높은 주파수 사용 효율을 가지고 있으며, 부반송파 분배와 전력 할당 기법 등으로 다중 사용자 다이버시티를 활용할 수 있는 이점을 가진 직교 주파수 분할 다중 접속(OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access)이 현재 모바일 통신 시스템에서 다중 접속 기술로 사용되고 있다. 3GPP LTE(Long Term Evolution)[1], 3GPP2 UMB(Ultra Mobile Broadband), IEEE 802.16/WiMAX(Wireless Interoperability for Microwave Access)[3]와 같은 몇몇의 통신 표준에서는 하향링크 전송 기법으로써 OFDMA를 선택하였다.

일반적으로, 셀룰러 시스템에서 셀 가장자리에 위치해 있는 사용자들은 자신이 서비스를 받고 있는 기지국뿐만 아니라 인접한 다른 기지국으로부터 오는 신호도 받게 되기 때문에, 기지국 근처에 있는 사용자들보다 셀 간 간섭(ICI, Inter-Cell Interference)에 많은 영향을 받게 된다. 특히, 3GPP LTE처럼 모든 기지국에서 같은 주파수 대역을 이용하게 되는 경우, 셀 간 간섭 완화에 대한 문제가 중요 쟁점이 되며 이 문제를 해결하기 위한 여러 기법들이 현재 의논되고 있다.[4] 이런 기법들 중 하나로 부분 주파수 재사용(PFR, Partial Frequency Reuse) 기법이 소개되고 있으며, 3GPP LTE에 적용되었다.[4]-[7] 이 기술은 내부 밴드와 외부 밴드,

두 파트로 나누어진 주파수 대역으로 이루어진다. 내부 밴드는 네트워크의 모든 기지국들이 자신에 근접한 사용자들을 서비스할 때 사용된다. 외부 밴드는 셀 가장자리에 위치해 있는 사용자들에게 분배되며, 각 신호들은 이웃한 셀의 사용자들과 서로 직교한 특징을 가지고 있다.

하지만, 실제 셀룰러 네트워크에서는 사용자들이 셀에 고르게 분포되어 있는 것이 아니라, 사용자들의 이동에 의해 각 기지국이 서비스하는 사용자들의 수가 시간에 따라 자주 변하거나, 특정 지역에 수많은 사용자들이 존재하는 등의 경우가 있다. 혼잡한 셀에서 서비스를 받는 사용자는 다른 사용자들과 한정된 자원을 가지고 경쟁하며 서비스를 받게 되므로 다른 한적한 기지국에 비해 좋지 않은 서비스를 받게 된다. 이러한 셀 간 부하 불균형 문제를 해결하기 위해, 다양한 동적 부하 균형 기법들이 소개되고 있다. 각 셀의 서비스 범위를 조절함으로써 인접한 셀들로 트래픽들을 핸드오버(Hand-over) 시키는 방식[8]이나, 이웃한 한적한 셀들로부터 채널을 빌려 사용자들을 서비스하는 방식[9] 등이 있다.

많은 방식들 중에서도, 통신 시스템의 서비스 범위 증가와 링크 신뢰도 향상을 가지고 오는 협력 릴레이 방식이 OFDMA 네트워크 시스템에서 매력적인 기술로 이용되고 있다. 릴레이 스테이션을 통해 증폭 후 전달(AF, Amplify and Forward)방식이나 복조 후 전달(DF, Decoded and Forward)방식을 통해 셀 가장자리의 사용자들에게 데이터를 보냄으로써 QoS(Quality of service)를 향상시킬 수 있다.[10] 또한, OFDMA 다중 릴레이 네트워크에서 적응적 릴레이 선택 기법은 다이버시티와 다중 이득 향상을 통해 자원 할당 측면에서의 협력 릴레이 통신의 성능을 향상시킬 수 있다. 최근에는 자원 할당을 통해 시스템 처리량의 향상에 중점을 둔 연구들이 활발하게 이루어지고 있다.[11]-[13]

본 논문에서는 다중 셀 셀룰러 시스템에서 셀 간에 불균형하게 퍼져있

는 부하들을 릴레이를 이용하여 분산시킴으로써 전체 네트워크 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 방법에 대해 알아본다. 기존의 네트워크에서는 사용자들이 주변의 기지국을 선택함에 있어 각각의 핸드오버하는 사용자들만의 네트워크 유틸리티 변화량만 고려하였다.[4] 하지만, 본 논문에서는 핸드오버하려는 릴레이나 사용자뿐만 아니라 이로 인해 영향을 받는 다른 사용자들의 전송률 변화까지도 고려하여 중앙노드가 이를 조정하게 된다. 각 릴레이들은 인접 기지국에 의해 발생하게 되는 셀 간 간섭 완화를 위해 부분 주파수 재사용 방식을 사용하며, 각 기지국들은 사용자들의 전송률뿐만 아니라 공평성과의 균형도 고려하여 네트워크 시스템 성능을 높일 수 있는 비례 공평(PF, Proportional Fairness) 알고리즘을 사용하여 자원 할당을 하도록 한다.[14][15]

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성 되어 있다. 2장에서는 릴레이를 사용하는 다중 셀 셀룰러 시스템 모델과 부분 주파수 재사용 방식에 대하여 소개한다. 3장에서는 기존의 사용자 할당 문제와 Proportional Fair 사용자 할당에 대하여 소개한다. 4장에서는 트래픽 분산을 위한 핸드오버 알고리즘을 제안하며, 5장에서 모의실험을 통해 제안한 알고리즘을 검증하도록 하겠다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

## 제 2 장 시스템 모델

본 논문에서는 부분 주파수 재사용 방식을 사용하는 다중 셀 셀룰러 네트워크에 대하여 다루게 된다. 기지국과 릴레이, 사용자들로 이루어진 하향 링크 네트워크를 고려한다. 각 기지국과 릴레이, 단말기의 안테나 개수가 1개인 SISO모델로 설정하며, 기지국은 등방성 안테나(Isotropic antenna)를 사용하여 전 방향으로 전파가 동일하게 전파된다고 가정한다. 릴레이들은 복조 후 전달(DF, Decode and Forward)방식으로 동작하며, 혼잡한 셀들의 트래픽들을 분산시키기 위해 이용된다. 각 릴레이들은 셀 경계에 위치하며, 릴레이와 인접한 기지국 간에는 line-of-sight(LOS) 채널 환경이 확보된다고 가정한다. 또한, 셀 경계에 위치함으로 인해 발생할 수 있는 셀 간 간섭 문제를 해결하기 위해 주파수 재사용 계수가 3인 방식을 사용하게 된다. 그림 2.1은 트래픽 분산 기법을 위한 네트워크 시스템의 예시이다. 사용자들이 많은 혼잡한 셀이 가운데 위치하며, 주위로 비교적 한적한 셀들이 둘러싸고 있다. 혼잡한 셀과 한적한 셀 사이에 있는 릴레이들은 한적한 셀의 기지국에 연동되어 있으며, 자신의 영역내의 트래픽들을 한적한 셀로 분산시키는 역할을 하게 된다.

본 논문에서 제안하는 트래픽 분산 기법을 통한 하향 링크의 성능을 알아보기 위해 기본적으로 몇 가지 가정을 한다. 우선 각 사용자는 기지국으로부터 무한히 데이터를 전송받는다. 각 릴레이와 사용자는 오직 하나의 기지국과 연동을 할 수 있으며, 동시에 두 개 이상의 기지국과 연동이 불가능하다. 또한, 각 릴레이와 사용자는 모든 기지국으로부터의 신호 대 간섭 비(SINR)를 측정하여, 이를 통해 순간 전송률을 계산하게 된다. 각 기지국은 자신과 모든 사용자들의 순간 전송률을 알고 있다. 각 기지국은

한 시간 슬롯마다 내부 밴드로 한명의 사용자, 외부 밴드로는 하나의 릴레이를 서비스하며, 이를 위해 사용하고 있는 모든 부반송파에 전력을 동일하게 분배한다.

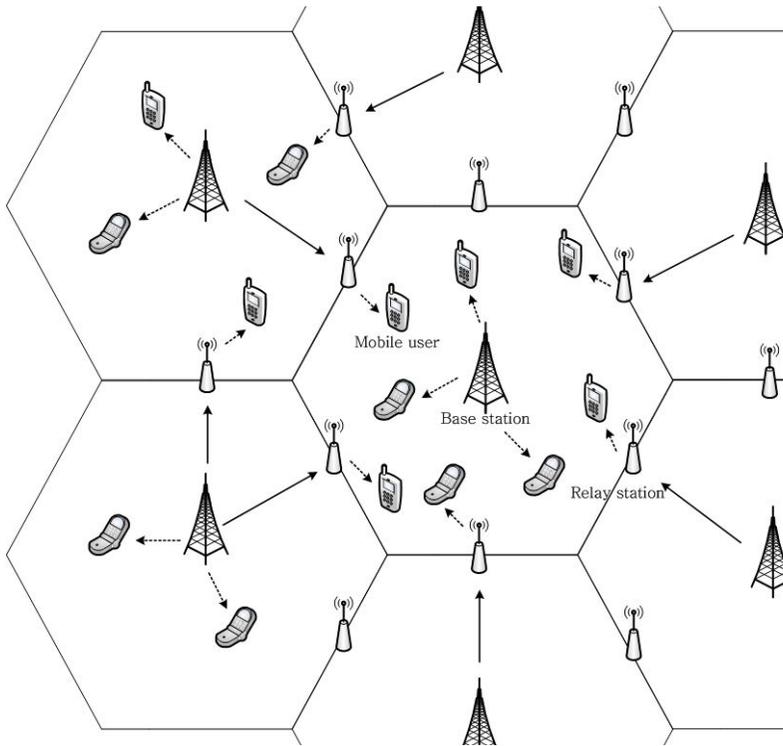


그림 2.1 트래픽 분산 기법 예시

## 2.1 주파수 자원 할당

실제 OFDMA 시스템에서는 기본적인 주파수 재사용 패턴으로써 주로 주파수 재사용 계수가 1이나 3인 경우를 고려하게 된다. 본 논문에서는 그림 2.2와 같은 패턴으로 부분 주파수 재사용 기법을 사용하여 사용자들을 서비스한다. 주어진 주파수 대역을 여러 개의 서브밴드로 나누어 기지국과 릴레이들에게 할당한 후, 스케줄링 알고리즘을 통해 사용자를 서비스하게 된다. 주어진 주파수 대역은 내부 밴드와 외부 밴드, 두 부분으로 나뉘게 된다.

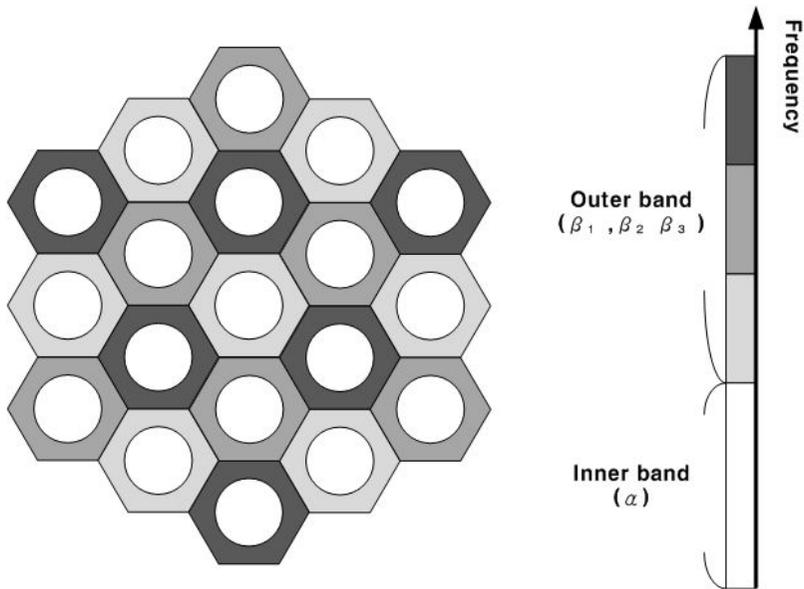


그림 2.2 부분 주파수 재사용 모델

내부 밴드는 재사용 계수가 1인 부분으로, 모든 셀에서 사용하는 주파수 대역으로 기지국이 직접 사용자들을 서비스하는 경우에 사용한다. 외

부 밴드는 주파수 계수가 3으로써, 주파수 대역을 세 부분으로 나누어 그림 2.2와 같은 패턴으로 각각의 셀에 분배하여 릴레이에 신호를 전송하게 되며, 각각의 주파수 대역은 서로 직교하기 때문에 인접한 다른 릴레이나 사용자에게 간섭을 일으키지 않게 된다.

두 부분으로 나누어진 주파수 대역 중 내부 밴드에서 사용하는 주파수 비율을  $\alpha$ , 외부 밴드에서 사용하는 주파수 비율을 각각  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 로 나타내면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\alpha + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1 \quad (\beta_1 = \beta_2 = \beta_3) \quad (2.1)$$

주파수 재사용 기법을 적용하지 않는 경우  $\alpha$ 값이 1이 되고, 모든 주파수 영역에서 주파수 재사용을 하는 경우  $\alpha$ 값이 0이 되게 된다. 따라서  $\alpha$ 값을 변화시킴으로써 내부 밴드와 외부밴드의 영역을 조절할 수 있게 된다.

## 2.2 링크 모델

$N$ 개의 기지국,  $P$ 개의 릴레이와  $K$ 명의 사용자들로 이루어진 하향링크 네트워크를 가정한다. 기지국의 집합을  $N = \{BS_1, \dots, BS_N\}$ , 릴레이의 집합을  $P = \{RS_1, \dots, RS_P\}$ , 사용자의 집합을  $K = \{MU_1, \dots, MU_K\}$ 으로 설정한다. 주파수 밴드의 집합은  $S = \{inner, outer\}$ 로 나타낸다. 시간 슬롯  $t$ 에서 기지국  $n$ 의  $s$ 밴드에서 사용자  $k$ 로의 순간 SINR은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\gamma_{n,k}^s(t) = \frac{h_{n,k}^s(t)P_n^s}{\phi h_{n,k}^s(t)P_n^s + \sum_{j \in L_n^s, j \neq n} h_{j,k}^s(t)P_j^s + N_0^s} \quad (2.2)$$

$h_{n,k}^s(t)$ 는 시간 슬롯  $t$ 에서의 채널 이득으로 경로손실, 로그노말 색도잉, 페이딩 현상을 모두 고려하였다.  $P_n^s$ 는  $n$ 번째 기지국에서  $s$ 밴드에서의 송신 전력이다.  $L_n^s$ 는  $n$ 번째 기지국에서 사용하는  $s$ 밴드와 동일한 주파수 대역을 사용하는 기지국들의 집합이다.  $N_0^s$ 는  $s$ 밴드의 부가적인 백색 가우시안 잡음(AWGN, Additive white gaussian noise)으로 모델링 된다.  $\phi$ 는 직교계수로 송신단과 수신단의 비선형적 특성을 모델링 하는 것으로 최대 SINR 을 제한하게 된다. 식(2.2)와 같이 기지국과 릴레이, 릴레이와 사용자간의 순간 SINR을 구할 수 있으며, 각 링크 사이의 SINR은  $\gamma_p^{n,s}$ ,  $\gamma_{p,k}^s$  로 나타내도록 하겠다. 위 식(2.2)을 이용하여, 시간 슬롯  $t$ 에서 기지국  $n$ 의  $s$ 밴드에서 사용자  $k$ 로의 순간 전송률을 샤논의 공식에 통해 계산할 수 있다.

$$r_{n,k}^s(t) = BW^s \log_2(1 + SINR_{n,k}^s(t)) \quad [bps] \quad (2.3)$$

$BW^s$ 는  $s$ 밴드의 대역폭을 나타낸다. 전체 주파수 대역폭을  $BW$  라고 하였을 때, 내부 밴드의 대역폭은  $\alpha BW$  이며, 각 외부 밴드의 대역폭은  $(1-\alpha)BW/3 = \beta BW$  이 된다.

기지국-릴레이와 릴레이-사용자의 두 단계의 전송 과정에 대하여 시간 자원을 나누어 사용하는 반 이중 릴레이(HDR)를 가정한다.  $s$ 밴드에서 릴레이  $p$ 와 기지국  $n$ 사이의 순간 전송률은  $r_p^{n,s}$ , 사용자  $k$ 와 릴레이  $p$ 사이의 순간 전송률은  $r_{p,k}^s$ 로 나타낸다. 사용자  $k$ 가 릴레이  $p$ 를 통해 기지국  $n$ 의  $s$ 밴드로 신호를 수신하는 경우, 각 링크 사이의 순간 전송률 중에서 작은 값의 절반으로 다음과 같이 계산된다.

$$r_{p,k}^{n,s}(t) = \frac{1}{2} \min(r_p^{n,s}(t), r_{p,k}^s(t)) \quad [bps] \quad (2.4)$$

## 제 3 장 사용자 할당 문제

### 3.1 일반적인 사용자 할당 문제

$N$  개의 기지국과  $K$  명의 사용자들로 이루어진 다중 셀 시스템을 가정한다. 사용자 할당 시스템의 목적은 모든 사용자들의 평균 전송률의 유틸리티 함수들의 합을 최대화하는 것으로써, 전체 네트워크 관점에서 보았을 때 최대화 문제를 식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \sum U_k(\bar{R}_k) \\ & \text{where } \bar{\mathbf{R}} \in \mathcal{R} \end{aligned} \tag{3.1}$$

$U_k(\cdot)$ 는 사용자  $k$ 의 유틸리티 함수로써, 위로 볼록하고 모든 점에서 연속이며 미분 가능하다.  $\mathcal{R}$ 은 모든 성취 가능한 전송률의 집합이다.  $\bar{R}_k$ 는 사용자  $k$ 의 평균 전송률이며,  $\bar{\mathbf{R}}$ 은 네트워크 유틸리티 함수의 합을 최대화하기 위한 전송률 벡터로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\mathbf{R}} = (\bar{R}_1, \bar{R}_2, \dots, \bar{R}_K) \tag{3.2}$$

식(3.1)의 최적의 답을 얻기 위해, 우선 전체 네트워크의 사용자 연동 상태를 알기 위한 표시함수(Indicator function)를  $X_{n,k}^s$ 라고 한다. 즉,  $k$ 번

째 사용자가 기지국  $n$ 의  $s$ 밴드와 연동을 하면  $X_{n,k}^s = 1$  이 되고, 그 외는 0값을 갖게 된다. 각 사용자는 한 시간 슬롯동안 오직 한 밴드를 통해 하나의 기지국과 연동할 수 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{n \in N_s} \sum_{k \in K} X_{n,k}^s = 1, \quad \forall k \in K \quad (3.3)$$

최적의 사용자 할당을 찾기 위해, gradient-based algorithm을 사용하여 매 시간 슬롯마다 사용자 표시함수  $X_{n,k}^s(t)$ 를 결정하는 사용자 할당 문제를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{X(t)} \quad & \sum_{k \in K} U_k'(\overline{R}_k(t-1)) R_k(t) \\ \text{st.} \quad & \sum_{k \in K} X_{n,k}^s(t) = 1, \quad \forall n \in N, \forall s \in S \end{aligned} \quad (3.4)$$

$R_k(t)$ 는 시간 슬롯  $t$ 에서 사용자  $k$ 에 대한 순간 전송률을 나타내며,  $\overline{R}_k(t)$ 는 시간 슬롯  $t$ 까지 사용자  $k$ 의 평균 전송률이며, 다음과 같이 계산된다.

$$\overline{R}_k(t) = \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t R_k(\tau) = \overline{R}_k(t-1) + \mu_t [R_k(t) - \overline{R}_k(t-1)] \quad (3.5)$$

식(3.4)의 사용자 할당 문제를 이용하여 식(3.1)의 유틸리티 함수 합의 최대화 문제를 해결할 수 있다. 기지국  $n$ 은 시간 슬롯  $t$ 에서  $s$ 밴드상의 사

용자들 중 제일 큰  $U_k'(\overline{R}_k(t-1))r_{n,k}^b(t)$  값을 갖는 사용자를 선택하게 되며, 이 사용자를  $k_n^{b*}(t)$ 라 정의하면 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$k_n^{b*}(t) = \operatorname{argmax}_k U_k'(\overline{R}_k(t-1))r_{n,k}^b(t) \quad (3.6)$$

최종적으로 중앙 노드에서의 사용자 할당 알고리즘은 다음과 같다.

$$X_{n,k}^s(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } k = \operatorname{argmax}_{k \in K} U_k'(\overline{R}_k(t-1))r_{n,k}^s(t) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.7)$$

하지만, 위의 사용자 할당 알고리즘은 현실적으로 많은 어려움을 가지고 있다. 식(3.1)에서 볼 수 있듯이, 중앙 노드는 네트워크상의 모든 사용자들의 순간 전송률 정보를 알고 있어야 한다. 백분망을 통해 중앙 노드로 전해질 이 피드백 정보들의 양은 약  $|N||K||S|$ 으로 매우 크다. 중앙 노드는 사용자들로부터 이렇게 수많은 피드백 정보들을 받을 뿐만 아니라, 이 정보들을 통해 알고리즘을 실행하고 그 결과를 각 기지국에 통보해야 한다. 한 시간 슬롯동안 이러한 과정이 이루어지는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다.

## 3.2 Proportional Fair 사용자 할당 문제

3.1장을 통해 다중 셀 셀룰러 시스템에서 유틸리티 함수들의 합을 최대화함으로써 전체 네트워크의 성능을 높이는 문제는 매우 복잡하며, 이를 해결하기 위해 수많은 피드백들과 중앙 노드에서의 그 과정들은 현실적으로 많은 문제들이 있음을 알 수 있었다. 하지만, 실제 시스템에서는 각 사용자들은 기지국들과의 채널 환경을 측정을 통해 제일 좋은 SINR이나 전송률을 보이는 기지국과 연동을 하고 서비스를 받게 된다. 그리고 각 기지국들은 직접 서비스하는 사용자들을 대상으로 개별적으로 스케줄링을 진행하게 된다. 본 논문에서는 전송률과 공정성 사이의 균형을 이루면서 자원 분배가 이루어지는 비례 공평 스케줄링 알고리즘을 사용하였다. 비례 공평 알고리즘은 매 시간 슬롯마다 제일 좋은 환경의 사용자를 선택함으로써 사용자 이득을 얻을 수 있다. 모든 사용자들은 아래와 같은 로그 효용함수를 사용하게 된다.

$$U_k(\overline{R}_k) = \log(\overline{R}_k), \quad \forall k \in K \quad (3.8)$$

각 기지국은 서로 독립적으로 매 시간 슬롯마다 스케줄링 알고리즘을 적용한다. 각 링크 사이의 연동을 나타내는 표시 벡터를  $\mathbf{X}$ 로 나타낸다.  $k$ 번째 사용자가 기지국  $n$ 의  $s$ 밴드와 직접 연동하면  $X_{n,k}^s = 1$  이 되며, 그 외의 모든 경우는 0이 된다.  $s$ 밴드 상에서 릴레이  $p$ 와 기지국  $n$ 간의 표시함수는  $X_p^{n,s}$ 가 되고, 사용자  $k$ 가  $s$ 밴드를 통해 릴레이  $p$ 에 연동하는 경우의 표시함수는  $X_{p,k}^s$ 로 나타낸다. 각 사용자는 하나의 기지국 또는 릴레이

와, 하나의 밴드와 연동을 할 수 있으므로 다음의 식이 성립한다.

$$\sum_{n \in N_p} \sum_{p \in P_s} \sum_{s \in S} X_p^{n,s} X_{p,k}^s + \sum_{n \in N_s} \sum_{s \in S} X_{n,k}^s = 1, \quad \forall k \in K \quad (3.9)$$

표시 벡터  $\mathbf{X}$ 에 따라, 각 기지국  $n$ 은 매 시간 슬롯  $t$ 에서  $s$ 밴드상의 최적의 사용자  $k$ 의 선택을 위해 아래와 같은 비례 공평 스케줄링을 실행하게 된다.

$$k_n^{s*}(t) = \arg \max_{k \in K_n^s} \frac{r_{n,k}^s(t)}{R_k(t-1)} \quad (3.10)$$

$K_n^s$ 는  $s$ 밴드를 통해 기지국  $n$ 과 연동하고 있는 사용자의 집합을 뜻하며 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_n^s = \left\{ k \mid \sum_{p \in P} X_p^{n,s} X_{p,k}^s + X_{n,k}^s = 1, k \in K \right\} \quad (3.11)$$

기존의 비례 공평 알고리즘에 대한 논문에서는, 각 사용자가 연동되어 있는 기지국간의 평균 전송률을 통해 실제 평균 처리율을 계산하였다.[16] 하지만, 사용자의 데이터 전송률은 전송방식, 안테나의 개수, 안테나들의 상관관계 등에 의해 다양하게 나타날 수 있다. 이렇게 다양한 시스템 환경에서의 처리율 추정보다는 조금 더 현실적인 접근에서의 처리율 추정이 필요하다.[17] 기지국  $n$ 에 사용자  $k$ 가 연동되었을 경우의 평균 SINR을

$E[\gamma_k^n]$ 이라고 하고 실제로 기지국에 연동되어 있는 사용자의 수가  $Y_n$ 명일 때, 실제 평균 처리율  $\overline{R_k^n}$ 은 다음과 같은 값으로 수렴한다.

$$\overline{R_k^n} = BW \frac{\log(1 + G(Y_n)E[\gamma_k^n])}{Y_n} \quad (3.12)$$

위의 식(3.12)에서  $G(Y_n)$ 은 다중 사용자 이득(Multi-user diversity)으로써, 다음과 같이 정의된다.

$$G(Y_n) = \sum_{n=1}^{Y_n} \frac{1}{n} \quad (3.13)$$

각 사용자들이 SINR이나 전송률 측정을 통해 제일 좋은 환경을 보이는 기지국을 선택하게 되더라도, 각 기지국들은 개별적으로 자신이 서비스하는 사용자들만을 대상으로 스케줄링을 진행하기 때문에 기지국에 연동되어 있는 사용자들의 수가 많다면 그에 대한 사용자들의 처리율은 떨어질 수밖에 없다. 이는 식(3.12)을 통해 기지국에 연동된 사용자들이 많으면 실제 낼 수 있는 성능보다 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

유틸리티 함수 계산을 위해 각 사용자들의 평균 처리율은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있으며, 편의를 위해  $H_k(Y_n^s, \gamma_{n,k}^s)$ 로 표현한다.

$$\begin{aligned}\bar{R}_k &= H_k(Y_n^s, \gamma_{n,k}^s) \\ &= \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} (X_{n,k}^s + X_p^{n,s} X_{p,k}^s) BW^s \frac{\log(1 + G(Y_n^s) E[\gamma_{n,k}^s])}{Y_n^s}\end{aligned}\quad (3.14)$$

위의 식(3.12), (3.14)를 식(3.1)에 대입하면 네트워크 관점에서 효용함수의 합을 최대화 하는 문제는 다음과 같이 표현이 된다.

$$\begin{aligned}\text{maximize } & \sum \log(\bar{R}_k) \\ \text{where } & \sum_{n \in N} X_{n,k}^s + \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} X_k^{n,s} X_{p,k}^s \leq 1, \forall k \in K \\ & X_p^{n,s} = 0, \forall k \notin N_p\end{aligned}\quad (3.15)$$

첫 번째 제약은 각 사용자는 오직 하나의 기지국이나 릴레이와 연동할 수 있음을 나타낸다. 두 번째 제약은 릴레이는 오직 인접한 기지국들 중 하나에만 연동될 수 있음을 뜻한다. 여기서,  $N_p$ 는 릴레이  $p$ 에 인접한 기지국들의 집합을 나타낸다.

하지만, 네트워크 전체의 사용자들의 평균 처리량 정보를 수집하여 최적의 경우를 구하는 과정은 계산적으로 너무 복잡하며 그에 필요한 피드백 정보들은 중앙 노드가 처리하기에는 너무 많기 때문에 이를 극복하기 위한 알고리즘이 필요하다.

## 제 4 장 핸드오버 알고리즘

### 4.1 핸드오버에 의한 유틸리티 변동

기존의 셀룰러 시스템에서 사용자들은 신호 세기나 SINR을 바탕으로 기지국이나 릴레이와 연동을 하게 된다. 각 사용자들의 핸드오버 또한 마찬가지로 주변 기지국들로부터 오는 신호를 통해 가장 좋은 성능을 보이는 기지국을 선택함으로써 진행이 이루어진다. 하지만 앞선 식 (3.12)을 통해 알 수 있듯이 사용자들의 평균 전송률은 해당 기지국에 속해있는 사용자들의 수에도 영향을 받게 된다. 채널 상태가 좋거나 신호의 세기가 큰 경우라도 기지국에 수많은 사용자가 연동되어 있는 혼잡한 셀의 경우, 한정된 자원을 경쟁해서 써야하기 때문에 실제로 낮은 전송률을 가지게 될 수 있다. 반대로, 낮은 SINR값을 갖더라도 사용자가 적은 인접 기지국과 연동하여 통신을 하는 것이 더 좋은 전송률을 가질 수도 있다. 그렇기 때문에 릴레이 또는 사용자가 현재의 기지국에서 인접한 다른 기지국으로 핸드오버하게 되는 경우, 전체 네트워크의 유틸리티 변화량을 측정하여 네트워크 전체에 어떤 영향을 미치는지 알아야하며, 이 정보들을 비교하여 핸드오버를 결정하게 된다. 이를 통해 혼잡한 기지국의 트래픽들을 비교적 한적한 인접 기지국으로 분산시킬 수 있으며, 동시에 전체 네트워크의 성능을 높여 사용자들에게 비교적 안정적인 서비스를 제공할 수 있게 된다.

#### 4.1.1 릴레이 스테이션의 핸드오버

현재  $RS_p$ 가  $BS_n$ 에 연동되어 있다고 가정한다.  $RS_p$ 가 인접 셀  $BS_i$ 로 이동하는 경우의 네트워크 유틸리티의 변화량은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K_p} \log \frac{H_k(Y_i^s + |K_p|, \gamma_{p,k}^s)}{H_k(Y_n^s, \gamma_{p,k}^s)} + \sum_{\substack{k \in K_n^s \\ \notin K_p}} \log \frac{H_k(Y_n^s - |K_p|, \gamma_{RS,k}^s)}{H_k(Y_n^s, \gamma_{RS,k}^s)} \\ + \sum_{k \in K_i^s} \log \frac{H_k(Y_i^s + |K_p|, \gamma_{RS,k}^s)}{H_k(Y_i^s, \gamma_{RS,k}^s)} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$K_p$ 는  $RS_p$ 에 속해있는 사용자들의 집합이며,  $|K_p|$ 는  $K_p$ 의 모든 사용자들의 수를 나타낸다.  $K_n^s$ 은  $BS_n$ 의 s밴드에 있는 사용자들의 집합을 나타낸다.

proof) 우선 네트워크 유틸리티의 합은 각 사용자들의 유틸리티의 총합으로 나타낼 수 있다. 각 사용자들의 유틸리티는 식(3.14)에 의해 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \log(\overline{R}_k) &= \log(H_k(Y_n^s, \gamma_{n,k}^s)) \\ &= \log\left(\sum_{n \in N_p} \sum_{p \in P_s} \sum_{S \in S} X_{n,k}^s BW^s \frac{1}{Y_n^s} \log\left(1 + \sum_{l=1}^{Y_n^s} \frac{E[\gamma_{p,k}^s]}{l}\right)\right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$RS_p$ 가 인접 셀  $BS_i$ 로 핸드오버하는 과정에서 유틸리티 값이 변화하는 사용자들을 세 가지 집합으로 나눌 수 있다. 첫 번째는  $RS_p$ 에 연동되어 있는 사용자들이며, 두 번째는  $RS_p$ 가 핸드오버 후에  $BS_n$ 의 s밴드에 남아있는 사용자들이다. 세 번째는 핸드오버 전,  $BS_i$ 의 s밴드에 있던 사용자들로 나눌 수 있다.

$RS_p$ 가 핸드오버하기 전과 후의 첫 번째 집합 사용자들의 네트워크 유틸리티 합은 다음과 같다

$$\sum_{k \in K_p} \log H_k(Y_n^s, \gamma_{p,k}^s) = \sum_{k \in K_p} \log BW^s \frac{\log(1 + G(Y_n^s)E[\gamma_{p,k}^s])}{Y_n^s} \quad (4.3)$$

$$\sum_{k \in K_p} \log H_k(Y_i^s + |K_p|, \gamma_{p,k}^s) = \sum_{k \in K_p} \log BW^s \frac{\log(1 + G(Y_i^s + |K_p|)E[\gamma_{p,k}^s])}{Y_i^s + |K_p|} \quad (4.4)$$

$Y_n^s$ ,  $Y_i^s$ 는 각각  $BS_n$ 와  $BS_i$ 의 s밴드에 있는 사용자들의 수를 나타낸다.  $RS_p$ 에 연동되어 있는 사용자들의 핸드오버로 인한 네트워크 유틸리티 변화량은 두 식(4.4)와 (4.3)의 차로 구할 수 있다.

$$\sum_{k \in K_p} \log \frac{H_k(Y_i^s + |K_p|, \gamma_{p,k}^s)}{H_k(Y_n^s, \gamma_{p,k}^s)} = \sum_{k \in K_p} \log \frac{\log(1 + G(Y_i^s + |K_p|)E[\gamma_{p,k}^s])Y_n^s}{\log(1 + G(Y_n^s)E[\gamma_{p,k}^s])(Y_i^s + |K_p|)} \quad (4.5)$$

나머지  $RS_p$ 에 연동되어 있지 않은  $BS_n$ 의 s밴드에 있는 사용자들과  $BS_i$ 의

s밴드에 있는 사용자들도 비슷한 과정으로 네트워크 유틸리티 변화량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sum_{\substack{k \in K_n^s \\ \notin K_p}} \log \frac{H_k(Y_n^s - |K_p|, \gamma_{RS,k}^s)}{H_k(Y_n^s, \gamma_{RS,k}^s)} = \sum_{\substack{k \in K_n^s \\ \notin K_p}} \log \frac{\log(1 + G(Y_n^s - |K_p|)E[\gamma_{RS,k}^s])Y_n^s}{\log(1 + G(Y_n^s)E[\gamma_{RS,k}^s])(Y_n^s - |K_p|)} \quad (4.6)$$

$$\sum_{k \in K_i^s} \log \frac{H_k(Y_i^s + |K_p|, \gamma_{RS,k}^s)}{H_k(Y_i^s, \gamma_{RS,k}^s)} = \sum_{k \in K_i^s} \log \frac{\log(1 + G(Y_i^s + |K_p|)E[\gamma_{RS,k}^s])Y_i^s}{\log(1 + G(Y_i^s)E[\gamma_{RS,k}^s])(Y_i^s + |K_p|)} \quad (4.7)$$

그러므로  $RS_p$ 가 인접 셀  $BS_i$ 로 이동하였을 때의 총 네트워크 유틸리티 변화량은 세 식(4.5-7)의 합으로 나타낼 수 있으며, 결론적으로 식(4.1)과 같다.

#### 4.1.2 사용자의 핸드오버

현재 사용자  $MU_k$ 가  $BS_n$ 에 연동되어 있다고 가정한다.  $MU_k$ 가 핸드오버 후에도 같은 셀, 같은 밴드에 머물러 있는 경우, 네트워크 유틸리티 변화량은 다음과 같다.

$$\log \frac{H_k(Y_n^s, \widetilde{\gamma}_k^{n,s})}{H_k(Y_n^s, \gamma_k^{n,s})} = \log \frac{\log(1 + G(Y_n^s)E[\widetilde{\gamma}_k^{n,s}])}{\log(1 + G(Y_n^s)E[\gamma_k^{n,s}])} \quad (4.8)$$

$\widetilde{\gamma}_k^{n,s}$ 는 핸드오버 후의 SINR을 나타낸다. 만일 같은 셀에 머물러 있지만 다른 밴드로 핸드오버한 경우에는 내부 밴드와 외부 밴드에 있는 사용자들도 고려해야하므로, 네트워크 유틸리티 변화량은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \log \frac{H_k(Y_n^{\bar{s}} + 1, \gamma_k^{n,\bar{s}})}{H_k(Y_n^s, \gamma_k^{n,s})} + \sum_{\substack{u \in K_n^s \\ \neq k}} \log \frac{H_u(Y_n^s - 1, \gamma_k^{n,s})}{H_u(Y_n^s, \gamma_k^{n,s})} \\ + \sum_{u \in K_n^{\bar{s}}} \log \frac{H_u(Y_n^{\bar{s}} + 1, \gamma_k^{n,\bar{s}})}{H_u(Y_n^{\bar{s}}, \gamma_k^{n,\bar{s}})} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$\bar{s}$ 는  $s$ 밴드와 다른 부분의 주파수 밴드를 의미하며, 사용자가 핸드오버하기 전 내부 밴드에 있었다면  $\bar{s}$ 는 외부 밴드를 의미한다.

만일  $MU_k$ 가 다른 기지국으로 핸드오버한 후에  $BS_i$ 으로부터 직접 서비

스를 받는 경우의 네트워크 변화량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \log \frac{H_k(Y_i^{inner} + 1, \gamma_k^{i,inner})}{H_k(Y_n^s, \gamma_k^{n,s})} + \sum_{u \in K_n^s} \log \frac{H_u(Y_n^s - 1, \gamma_u^{n,s})}{H_u(Y_n^s, \gamma_u^{n,s})} \\ + \sum_{u \in K_i^{inner}} \log \frac{H_u(Y_i^{inner} + 1, \gamma_u^{i,inner})}{H_u(Y_i^{inner}, \gamma_u^{i,inner})} \end{aligned} \quad (4.10)$$

만일  $MU_k$ 가 인접한  $RS_p$ 로 핸드오버되어 다른 기지국  $BS_i$ 으로 이동한 경우의 네트워크 변화량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \log \frac{H_k(Y_i^{outer} + 1, \gamma_{p,k}^{i,outer})}{H_k(Y_n^s, \gamma_k^{n,s})} + \sum_{u \in K_n^s} \log \frac{H_u(Y_n^s - 1, \gamma_u^{n,s})}{H_u(Y_n^s, \gamma_u^{n,s})} \\ + \sum_{u \in K_i^{outer}} \log \frac{H_u(Y_i^{outer} + 1, \gamma_u^{i,outer})}{H_u(Y_i^{outer}, \gamma_u^{i,outer})} \end{aligned} \quad (4.11)$$

### 4.1.3 사용자 연동

사용자  $MU_k$ 가  $BS_n$ 에 바로 연동하는 경우, 네트워크 유틸리티 변화량은 다음과 같다.

$$H_k(Y_n^{inner} + 1, \gamma_k^{n,inner}) + \sum_{u \in K_n^{inner}} \log \frac{H_u(Y_n^{inner} + 1, \gamma_u^{n,inner})}{H_u(Y_n^{inner}, \gamma_u^{n,inner})} \quad (4.12)$$

$RS_p$ 를 통해서  $BS_n$ 으로부터 서비스를 받는 경우, 네트워크 유틸리티 변화량은 다음과 같다.

$$H_k(Y_n^{outer} + 1, \gamma_{p,k}^{n,outer}) + \sum_{u \in K_n^{inner}} \log \frac{H_u(Y_n^{outer} + 1, \gamma_{p,u}^{n,outer})}{H_u(Y_n^{outer}, \gamma_{p,u}^{n,outer})} \quad (4.13)$$

4.12와 4.13의 증명은 4.1.1의 증명과 비슷하여 생략하도록 한다.

## 4.2 핸드오버 알고리즘

4.1장에서 릴레이나 사용자가 다른 기지국으로 핸드오버 하거나 새로 연동하는 경우의 네트워크 유틸리티의 변화에 대해 알아보았다. 전체 네트워크의 유틸리티 변화율을 바탕으로 부하 분산을 위한 핸드오버 알고리즘을 제안한다. 우선 알고리즘이 실행되기 위해 필요한 정보의 수집과 교환은 다음과 같이 이루어진다.

- 1) 기지국 : 모든 기지국은 현재 셀 내에 있는 모든 사용자들의 수를 조사한다. 또한, 각 기지국은 이 정보를 인접 릴레이들과 현재 셀과 인접 셀에 있는 모든 사용자들에게 전달한다.
- 2) 릴레이 : 모든 릴레이는 자신과 연동된 사용자들과 인접 기지국과의 평균 SINR을 측정한다. 또한, 자신과 연동된 사용자들의 수를 조사하여, 현재 연동된 기지국에 보고한다.
- 3) 사용자 : 모든 사용자는 인접한 기지국과 릴레이와의 SINR을 측정하며, 이를 토대로 평균 전송률을 계산할 수 있다.

앞의 모든 측정들은 각 기지국별로 이루어지며, 이를 통해 얻어지는 정보는 오직 하나의 셀 내이거나 인접 셀들 사이에서만 교환이 이루어진다. 이런 정보들을 통한 알고리즘의 세부 진행과정은 다음과 같다.

- 1) 릴레이 핸드오버 : 일정 시간마다 모든 릴레이들은 인접 기지국과의 네트워크 유틸리티를 계산하고 이를 각 기지국에 전달한다. 기지국들은

받은 정보들을 통해 네트워크 유틸리티 변화율을 계산하고 중앙 노드로 결과 값을 전달한다. 중앙 노드는 제일 큰 양(+)의 변화율을 보이는 릴레이를 선택하고, 핸드오버를 하도록 알리게 된다. 하지만, 어떤 릴레이도 양(+)의 변화율을 보이지 않는다면, 릴레이 핸드오버는 일어나지 않게 된다.

2) 사용자 핸드오버 : 일정 시간마다 모든 사용자들은 인접한 릴레이와 기지국과의 네트워크 유틸리티 값을 계산하고 각 기지국에 전달한다. 이 정보들을 받은 기지국들은 네트워크 유틸리티 변화율을 계산하고, 그중에서 가장 큰 양(+)의 변화율을 갖는 핸드오버를 선택하며, 이를 중앙 노드에 보고한다. 중앙 노드는 기지국들로부터 받은 데이터를 통해 제일 큰 양(+)의 변화율을 보이는 사용자를 선택하여 핸드오버를 하도록 한다. 만일 양(+)의 변화율을 보이는 사용자가 없다면 그 시간 슬롯에서는 사용자 핸드오버가 일어나지 않는다.

3) 새로운 사용자 연동 : 새로운 사용자가 네트워크에 들어와 인접해 있는 기지국이나 릴레이에 연동하고자 하는 경우, 인접 기지국들은 이들과의 네트워크 유틸리티 변화율을 계산하고, 중앙 노드를 통해 제일 좋은 변화율을 보이는 곳으로 연동하게 된다.

알고리즘을 통해 알 수 있듯이, 각 시간 슬롯 내에서 하나의 릴레이와 한 명의 사용자만이 핸드오버를 할 수 있는데, 이것은 다수의 릴레이와 사용자가 핸드오버하는 경우 발생할 수 있는 진동문제를 해결하기 위함이다. 중앙 노드는 릴레이와 사용자들로부터 받은 네트워크 유틸리티 변화율 값을 비교하는 비교적 단순한 기능을 하게 된다. 이렇게 제안한 알고리즘은

비례 공평 알고리즘을 통한 기존의 문제를 보다 간단히 해결할 수 있다. 이를 통해, 복잡한 계산과정을 줄이고, 수많은 양의 피드백 오버헤드를 줄일 수 있게 된다. 다음 장을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 보도록 하겠다.

## 제 5 장 모의실험

### 5.1 파라미터 설정

모의실험에는 21개의 기지국과 63개의 릴레이로 구성된 다중 셀 셀룰러 네트워크를 설정한다. 각 기지국들은 그림 2.2와 같은 릴레이를 서비스하기 위한 부분 주파수 재사용 패턴을 갖게 된다. 기지국 사이의 거리는 2km이며 셀 반경은 1155m이다. 각 셀에 일정 수의 사용자를 가정하고, 초기 각 사용자들은 경로 손실(Path-loss)을 통해서 기지국이나 릴레이에 연동을 하며, SINR과 각 기지국의 사용자 수 정보를 이용하여 4장의 알고리즘을 통해 네트워크 유틸리티의 합이 증가하도록 핸드오버가 이루어지게 된다. 각 사용자들은 제일 좋은 경로 손실을 보이는 각각 3개의 기지국과 릴레이들을 핸드오버 대상으로 고려하게 된다.

각 기지국과 릴레이, 사용자 사이의 경로 손실 모델은 3GPP TR 25.942의 매크로셀(Macro-cell) 전파 모델을 사용하였다.

$$PL[dB] = 40(1 - 4 \times 10^{-3} h_{BS}[m]) \log_{10}(R[km]) - 18 \log_{10}(h_{BS}[m]) + 21 \log_{10}(f_c[MHz]) + 80 \quad (5.1)$$

$h_{BS}$ 는 기지국 안테나 높이로 15m로 설정하였고,  $R$ 은 각 기지국이나 릴레이, 사용자 사이의 거리를 나타낸다.  $f_c$ 는 반송파 주파수로 2000Mhz이다. 각 기지국의 최대 송신전력은  $P = 43dBm = 20W$ 로, 모든 부반송파에 전력을 동일하게 분배하므로 내부 밴드와 외부 밴드의 송신전력  $p_{IN}$ ,  $p_{OUT}$ 은

다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_{IN} &= \alpha P \\ p_{OUT} &= \frac{1-\alpha}{3} P \end{aligned} \tag{5.3}$$

각 릴레이들은 셀 가장자리에 위치하게 되며, 릴레이와 인접한 기지국 사이의 채널은 line-of-sight(LOS)가 확보되는 Rician 채널 환경으로 가정하며, 그 외에는 nonline-of-sight(NLOS)로서 Rayleigh 채널 환경으로 가정한다.

사용자의 채널 모델은 Rayleigh 페이딩 채널을 생성하는 제이크 페이딩 (Jakes' fading) 모델을 사용하였다. 사용자의 이동속도는 3km/h로 설정하였으며, 기지국과 릴레이, 사용자 사이의 섀도잉(Shadowing)은 표준편차 8인 로그노말 분포를 따른다. 전체 시스템의 대역폭은 10MHz이고 각 시간 슬롯의 길이는 1ms로 설정하였으며, 총 시간 슬롯의 길이는 6000ms이다.

## 5.2 제안한 알고리즘의 성능 비교

우선 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여, 릴레이가 없는 경우와 내부 밴드 비율  $\alpha$  값에 따라 알고리즘을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 성능을 모의 실험하였다.

### 5.2.1 $\alpha = 0.25$ , $Y_1 = 100$ , $Y_n = 10$ 인 경우

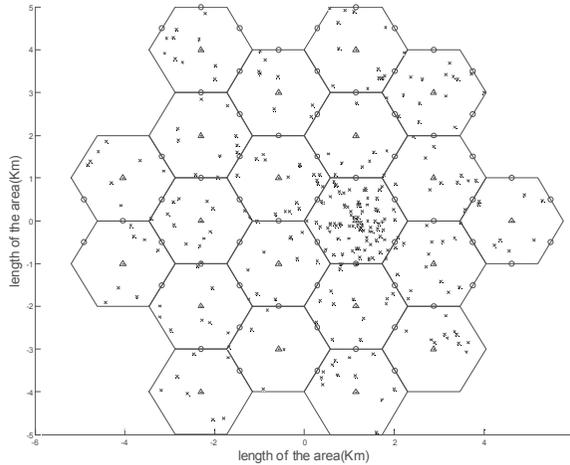


그림 5.1  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 네트워크 환경

	알고리즘 적용	적용하지 않음
전체 전송률	510.42 Mbps	526.67 Mbps
유틸리티 함수의 합	1.4024	1.2678
하위 5% 사용자 전송률	6.7802 Mbps	5.0064 Mbps

표 5.1  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교

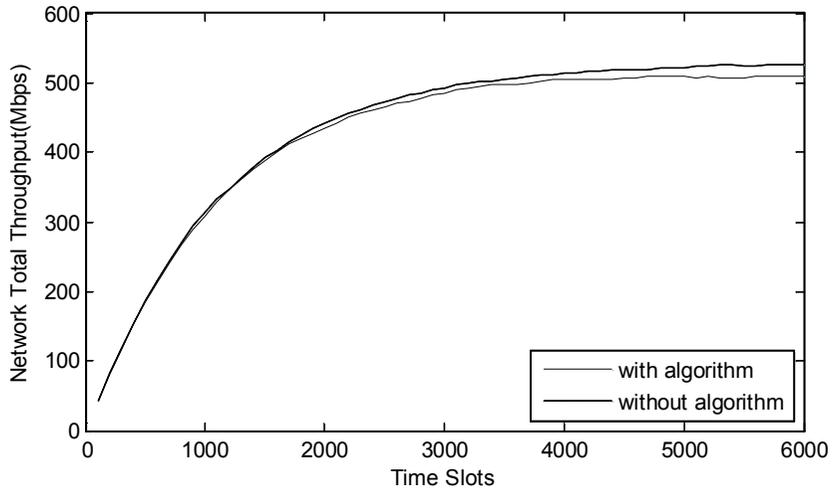


그림 5.2  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우의 네트워크 전체 전송률 비교

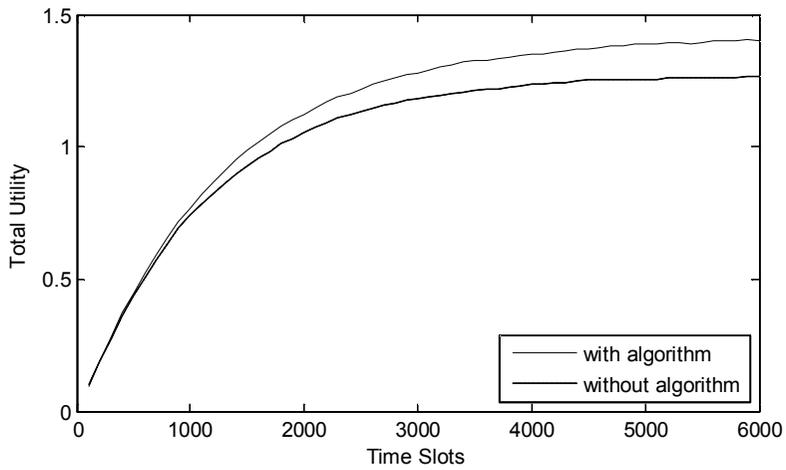


그림 5.3  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교

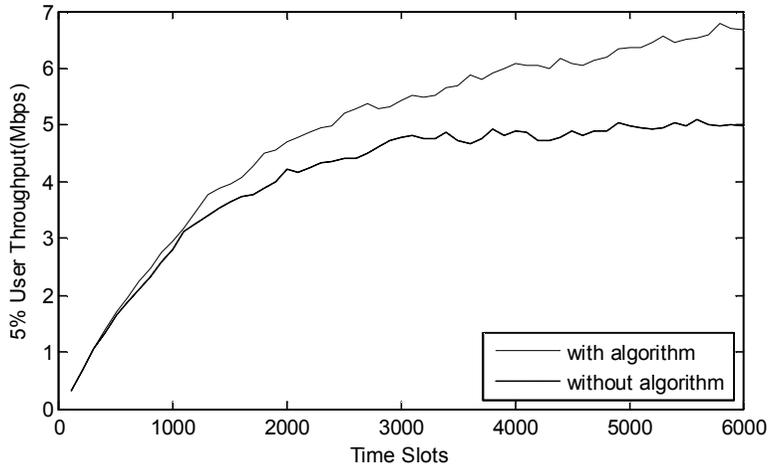


그림 5.4  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률

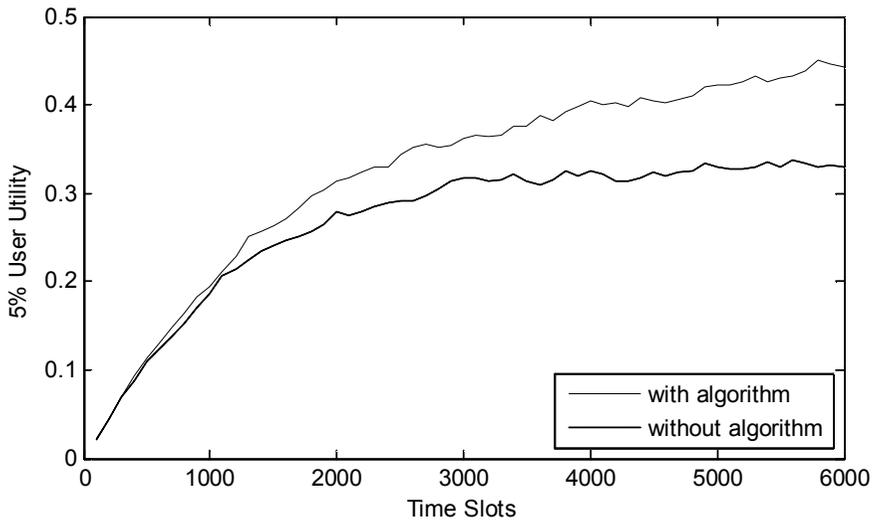


그림 5.5  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티

5.2.2  $\alpha = 0.5$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우

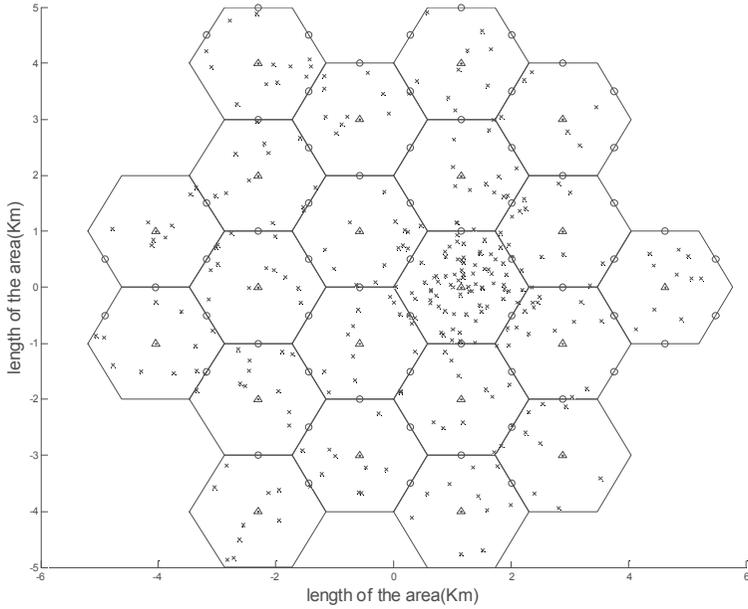


그림 5.6  $\alpha = 0.5$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 네트워크 환경

	알고리즘 적용	적용하지 않음
전체 전송률	753.3216 Mbps	755.3115 Mbps
유틸리티 함수의 합	1.7388	1.4171
하위 5% 사용자 전송률	5.4359 Mbps	3.8978 Mbps

표 5.2  $\alpha = 0.5$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교

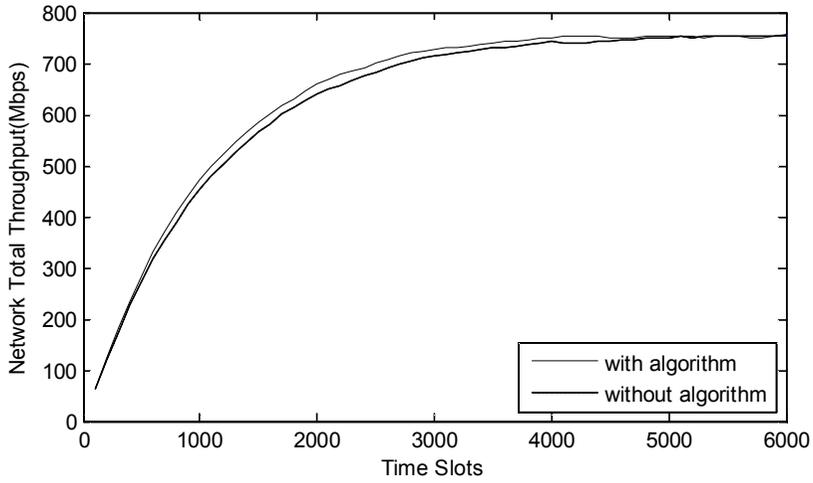


그림 5.7  $\alpha = 0.5$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우의 네트워크 전체 전송률 비교

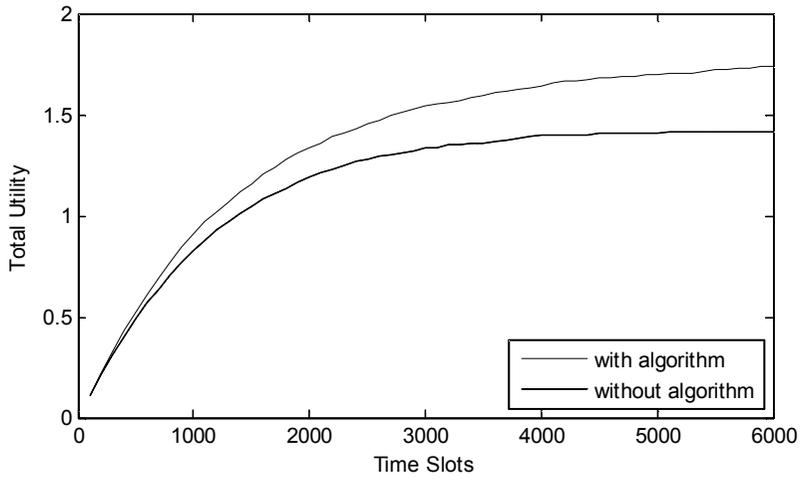


그림 5.8  $\alpha = 0.5$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교

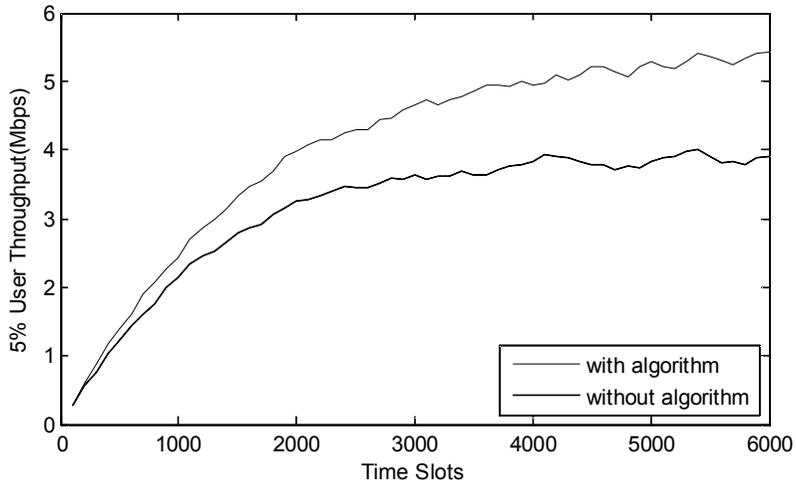


그림 5.9  $\alpha = 0.5$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률

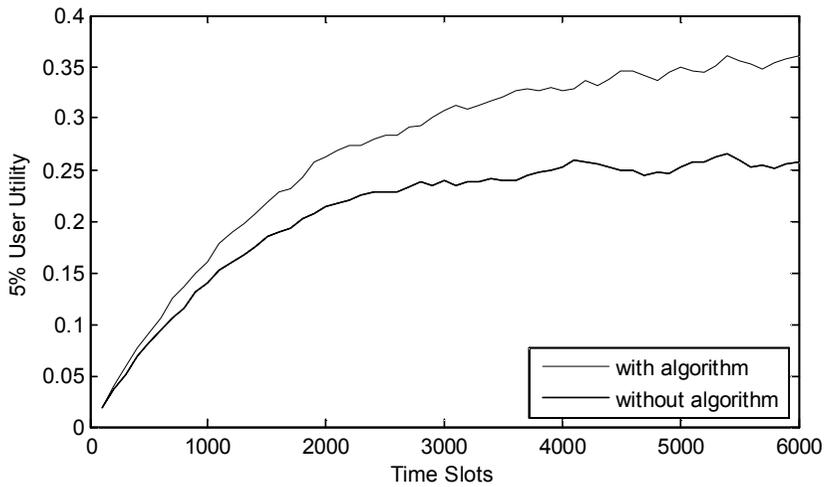


그림 5.10  $\alpha = 0.5$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티

5.2.3  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우

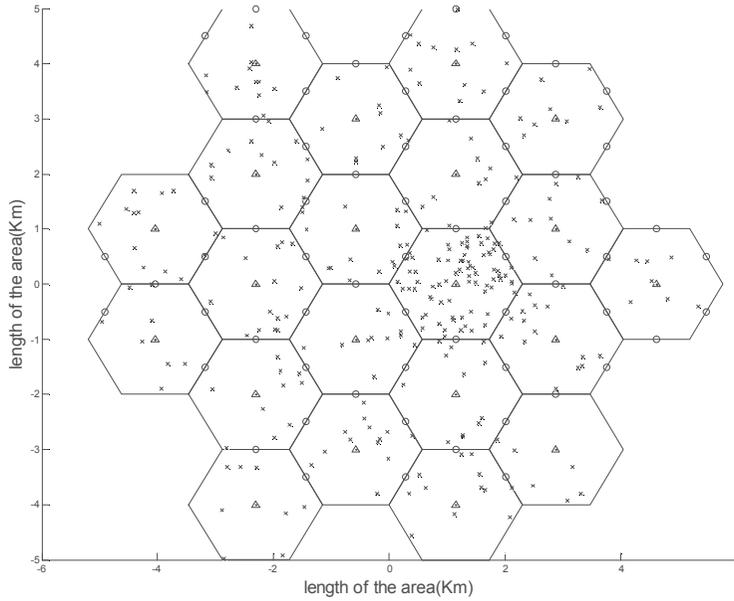


그림 5.11  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 네트워크 환경

	알고리즘 적용	적용하지 않음
전체 전송률	975.1640 Mbps	995.7182 Mbps
유틸리티 함수의 합	1.9796	1.4110
하위 5% 사용자 전송률	2.7323 Mbps	1.8595 Mbps

표 5.3  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교

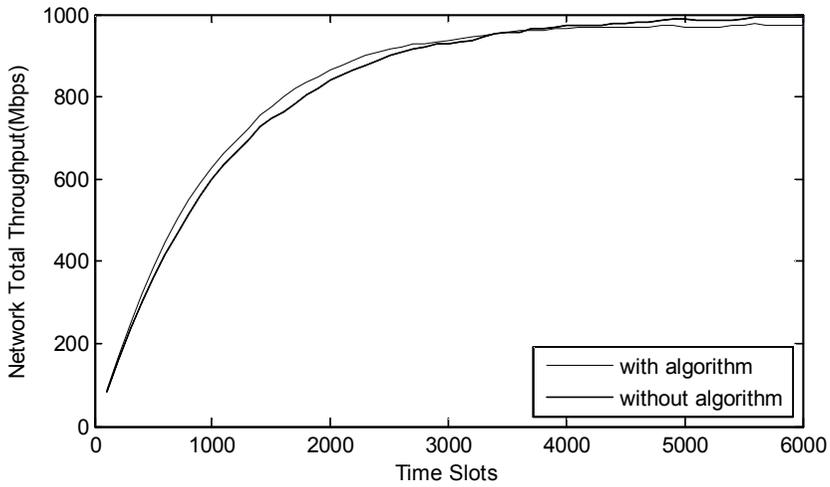


그림 5.12  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우의 네트워크 전체 전송률 비교

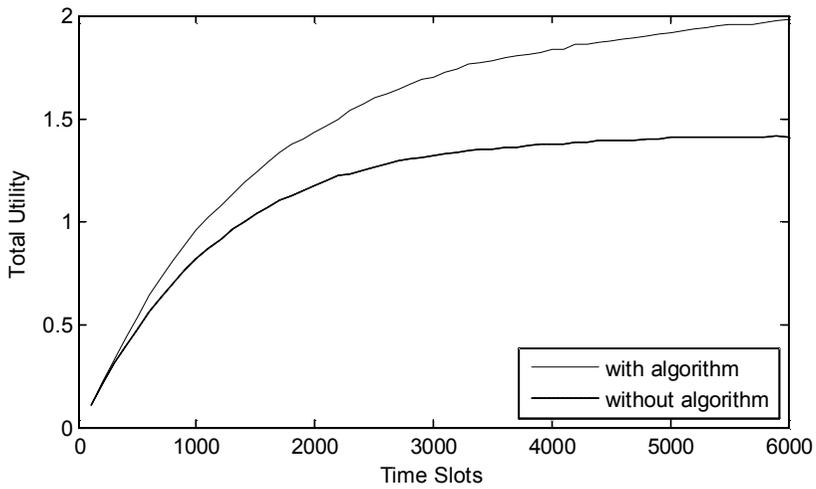


그림 5.13  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교

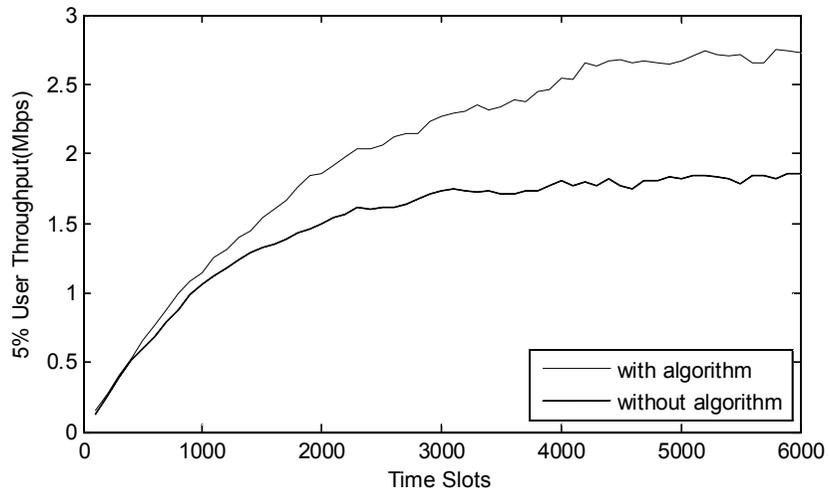


그림 5.14  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률

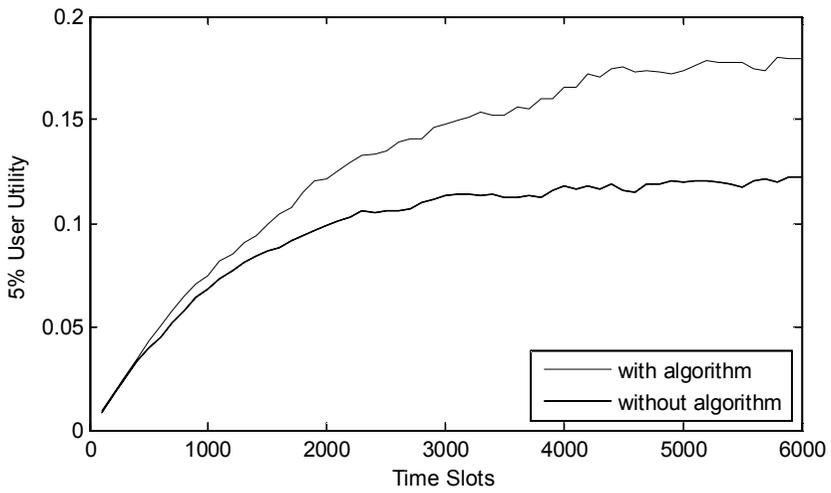


그림 5.15  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티

5.2.4 No relay station,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우

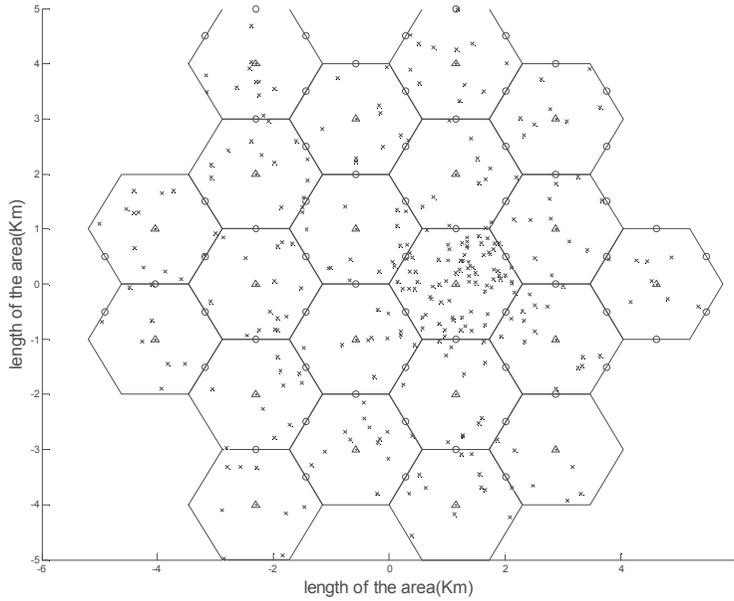


그림 5.16 No relay,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 네트워크 환경

	알고리즘 적용	적용하지 않음
전체 전송률	490.5225 Mbps	493.8995 Mbps
유틸리티 함수의 합	1.2870	1.0184
하위 5% 사용자 전송률	2.5094 Mbps	0.9997 Mbps

표 5.4 No relay,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교

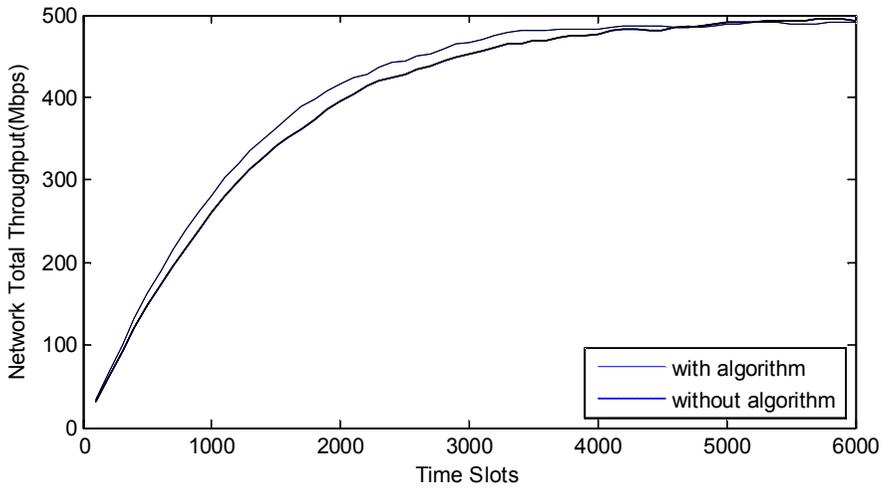


그림 5.17 No relay,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우의 네트워크 전체 전송률 비교

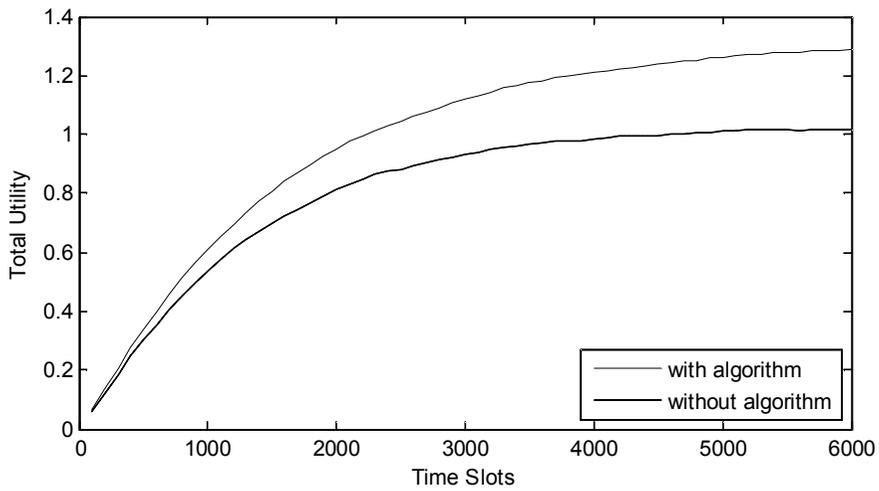


그림 5.18 No relay,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교

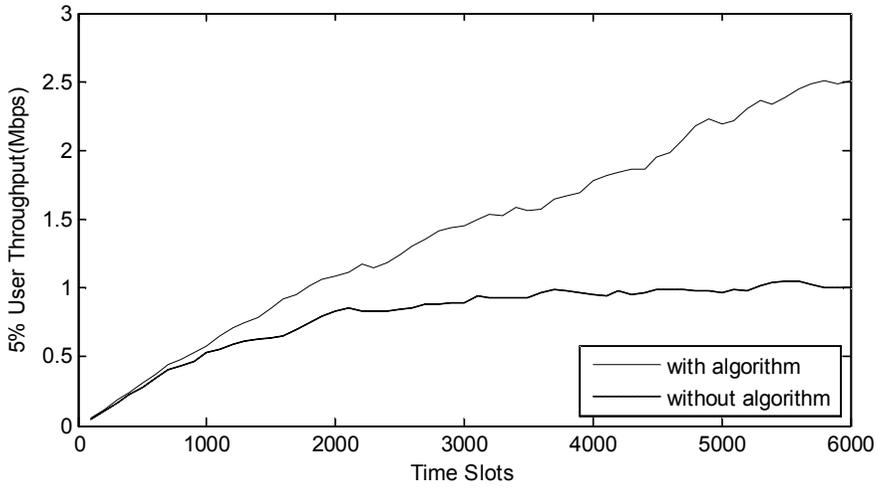


그림 5.19 No relay,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 전송률

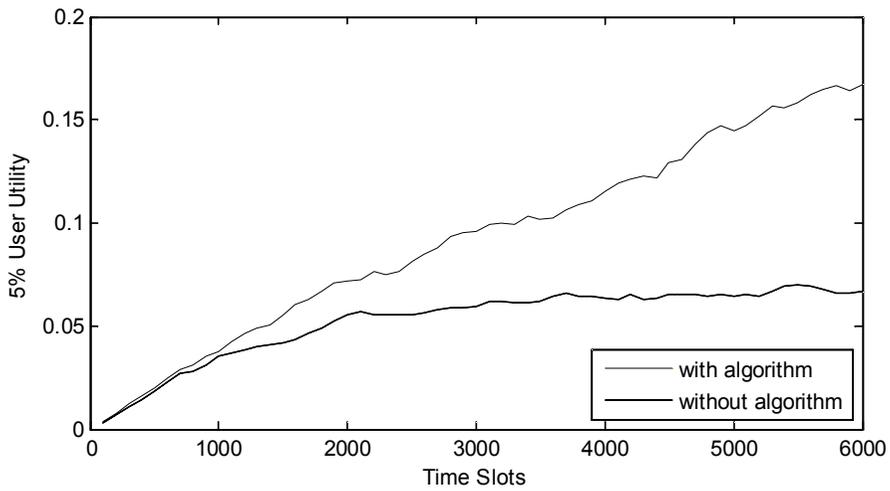


그림 5.20 No relay,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$ 인 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티

위의 5.2.1~5.2.4는 혼잡한 기지국의 사용자가 100명, 나머지 한적한 기지국들의 사용자가 10명인 네트워크 환경에서, 전체 대역폭 대비 내부 밴드의 주파수 비율을 0.25, 0.5, 0.75로 변환하며 알고리즘을 적용시킨 경우와 그렇지 않은 경우, 릴레이가 없는 경우의 성능을 비교한 모의실험 결과이다. 전체적으로 알고리즘을 적용하였을 때, 그렇지 않은 경우보다 전체 네트워크 전송률은 떨어지거나 비슷한 성능을 보였다. 하지만, 릴레이들과 사용자가 비례 공평 스케줄링을 통해 네트워크 전체의 유틸리티 함수의 합을 최대화하려는 목적으로 핸드오버가 진행되었기 때문에, 비록 전체 전송률에서는 약간의 손실이 있더라도, 최종 목적인 유틸리티 함수의 합이 증가하였고, 하위 5%의 사용자들의 성능이 향상된 것을 볼 수 있었다.

대체적으로 알고리즘을 적용하지 않은 경우 4000ms의 시간 슬롯에서 특정 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 하지만, 알고리즘을 적용한 경우에는 전체 네트워크 전송률을 제외한 나머지 부분에서 알고리즘이 시행될 수록 계속해서 증가함을 볼 수 있다.

각 내부 밴드 비율에 따른 성능을 비교하면,  $\alpha=0.25$ 인 경우 전체 전송률이 제일 떨어지지만, 하위 5% 사용자의 전송률은 제일 높은 것을 확인할 수 있다. 보통 셀 가장자리에 위치해있을 하위 5%의 사용자들은 릴레이로부터 서비스를 받게 된다. 따라서 다른 경우에 비해서 더 넓은 외부 주파수 밴드를 사용하여 릴레이를 통해 서비스하게 되므로, 더 높은 전송률을 보이게 되는 것이다.

릴레이가 없는 환경에서 셀 가장자리의 사용자들의 성능은 현저히 떨어지게 되므로, 이로 인해 릴레이가 있는 환경보다 낮은 전체 네트워크 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

### 5.3 Universal frequency reuse인 경우와의 성능 비교

셀 가장자리에 위치한 릴레이나 사용자들은 인접 셀로부터 오는 신호에 의한 셀 간 간섭에 많은 영향을 받게 된다. 이 문제를 완화시키기 위해, 본 논문에서는 부분 주파수 재사용 기법을 사용하였으며, 이를 사용하지 않는 경우와 비교하여 성능을 검증하도록 하겠다.

#### 5.3.1 Universal frequency reuse, $Y_1 = 100$ , $Y_n = 10$ 인 경우

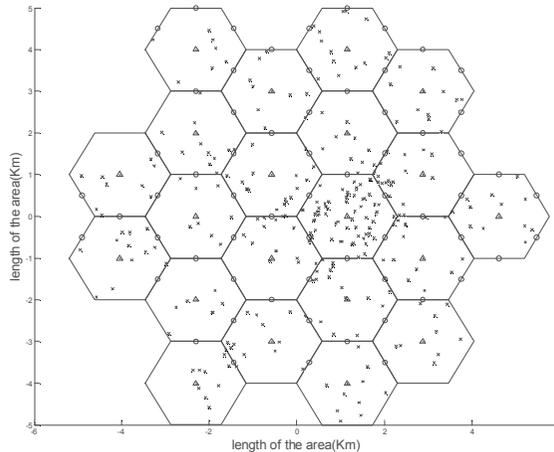


그림 5.21 Universal frequency reuse,  $Y_1 = 100$ ,  $Y_n = 10$  인 네트워크 환경

	알고리즘 적용	적용하지 않음
전체 전송률	469.1274 Mbps	419.0607 Mbps
유틸리티 함수의 합	1.1549	0.9934
하위 5% 사용자 전송률	2.7402 Mbps	2.4590 Mbps

표 5.5 Universal frequency reuse 경우 전체 전송률과 유틸리티 값 비교

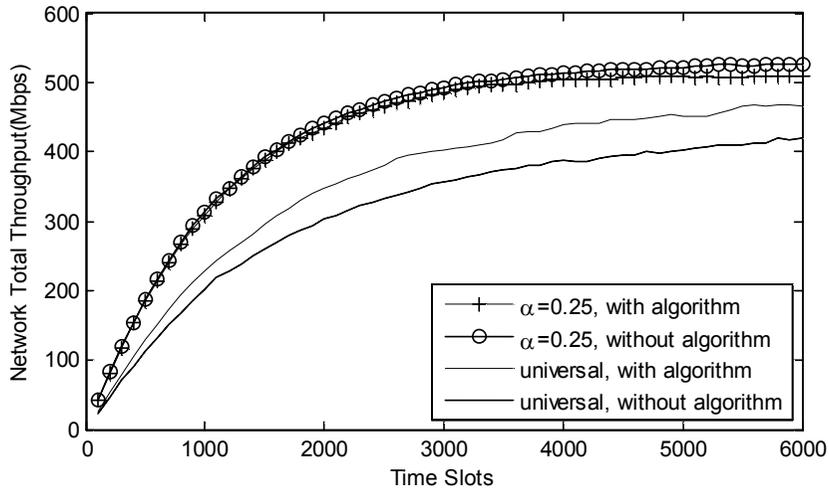


그림 5.22 Universal frequency reuse 경우의 네트워크 전체 전송률 비교

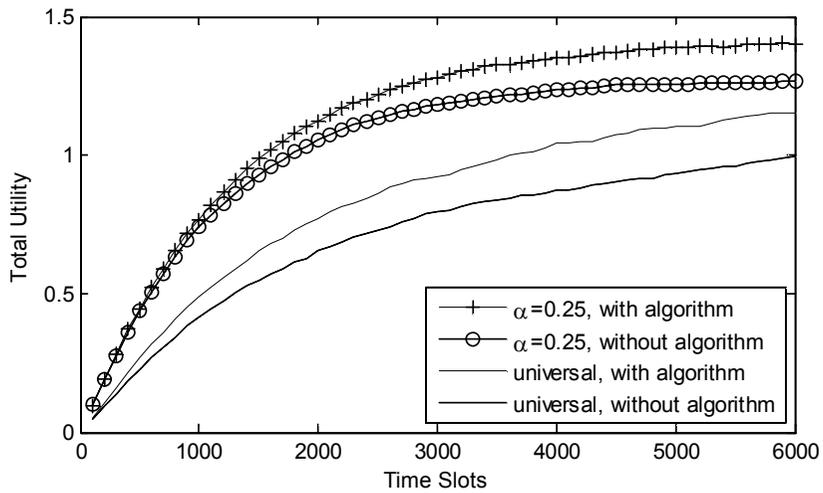


그림 5.23 Universal frequency reuse 경우의 네트워크 전체 유틸리티 비교

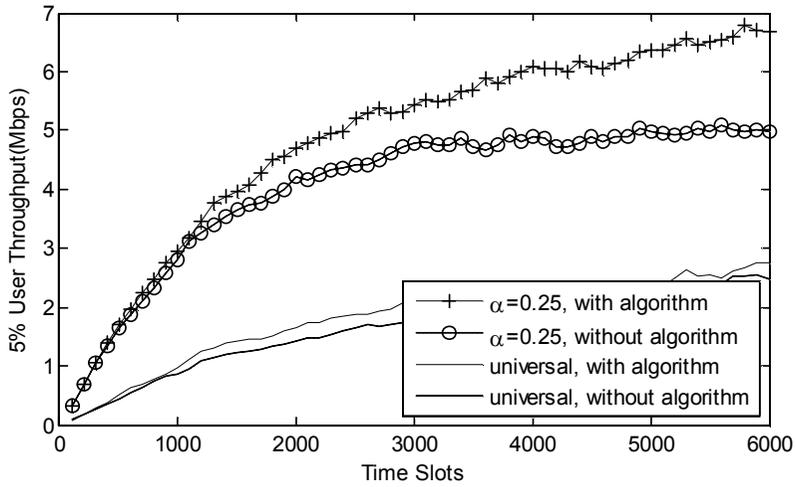


그림 5.24 Universal frequency reuse 경우 하위 5% 사용자들의 전송률 비교

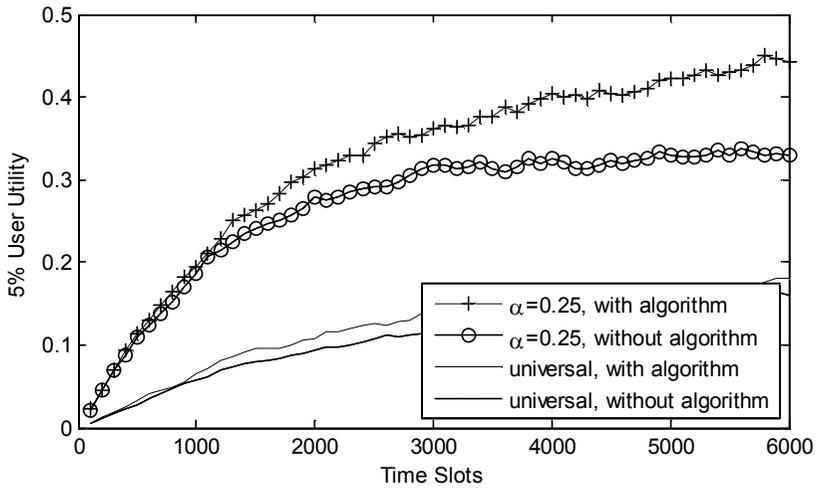


그림 5.25 Universal frequency reuse 경우 하위 5% 사용자들의 유틸리티 비교

부분 주파수 재사용 기법을 사용하지 않는 환경에서는 모든 기지국들과 릴레이들이 데이터 전송에 모든 주파수 대역을 사용함으로써 주파수의 낭비 없이 사용자들에게 서비스를 할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 셀 가장 자리에 위치한 릴레이와 사용자들은 인접한 기지국으로부터 오는 신호에 의한 간섭으로 인해 낮은 SINR을 갖게 되어 낮은 전송률을 보이게 되는 단점이 있다. 이는 위의 성능 비교 실험을 통해서 확인할 수 있었다.

5.3의 모의실험을 통해서, 내부 밴드 비율  $\alpha=0.25$ 인 부분 주파수 재사용 기법을 적용한 환경과 그렇지 않은 환경에서의 성능 비교를 하였다. 마찬가지로 주파수 재사용 계수가 1인 universal frequency reuse 환경에서도 핸드오버 알고리즘을 적용한 경우 전체적인 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 위의 그림 5.12~25를 통해 부분 주파수 재사용 기법을 사용한 경우, 전체 네트워크의 전송률이나 하위 5% 사용자들의 전송률에서 모두 성능이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 특히, 하위 5%의 사용자들의 성능이 크게 향상되었다. 이것으로 기지국이나 릴레이에서 사용하는 주파수 밴드가 작아진 것보다 인접 기지국에서 오는 간섭 신호가 사용자들이 받는 전송률에 더 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

## 5.4 셀 간 부하 불균형 변화에 따른 비교

네트워크 환경을 2-tier로 확장시켜, 혼잡한 셀의 수를 늘린 여러 시나리오에서 기지국간의 부하 불균형 정도에 따른 성능 비교를 하였다.

5.4.1  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우

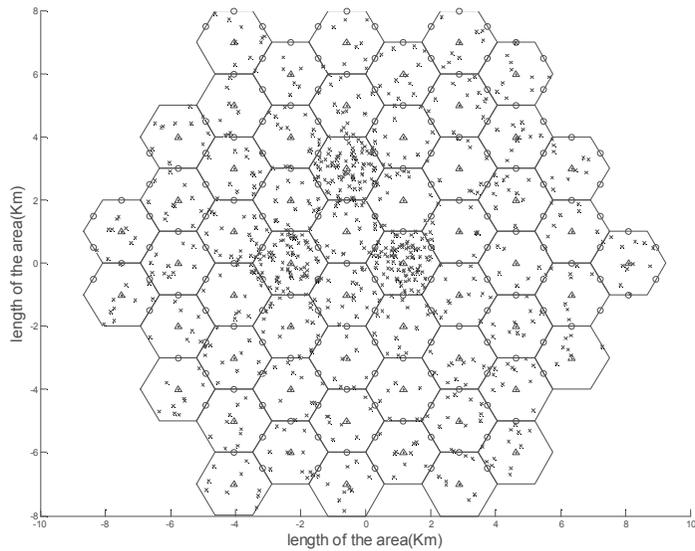


그림 5.26  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 환경

	알고리즘 적용	적용하지 않음
전체 전송률	268.3473 Mbps	269.3736 Mbps
유틸리티 함수의 합	0.1969	0.1656
하위 5% 사용자 전송률	1.5452 Mbps	1.2714 Mbps

표 5.6  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 전송률과 유틸리티 비교

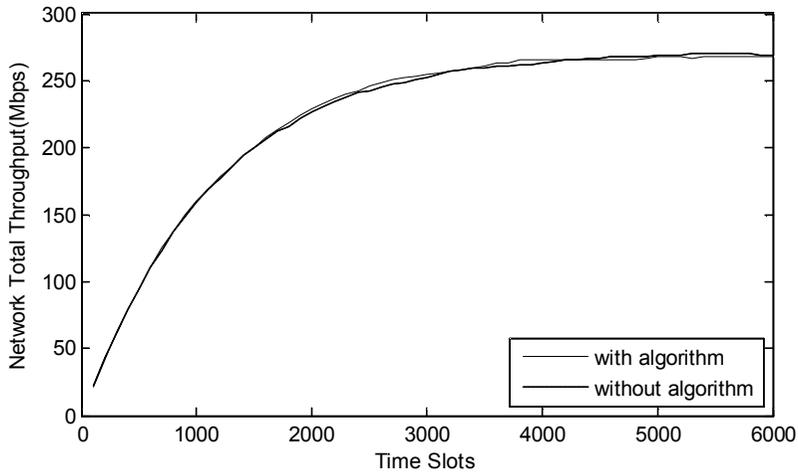


그림 5.27  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우  
네트워크 전체 전송률 비교

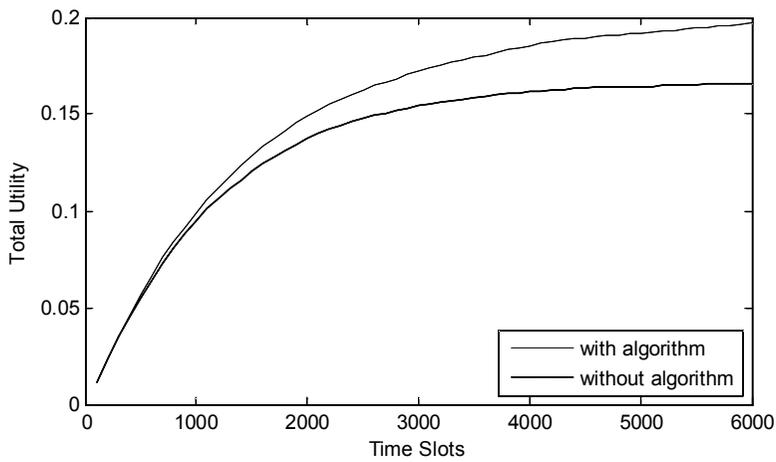


그림 5.28  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우  
네트워크 전체 유틸리티 비교

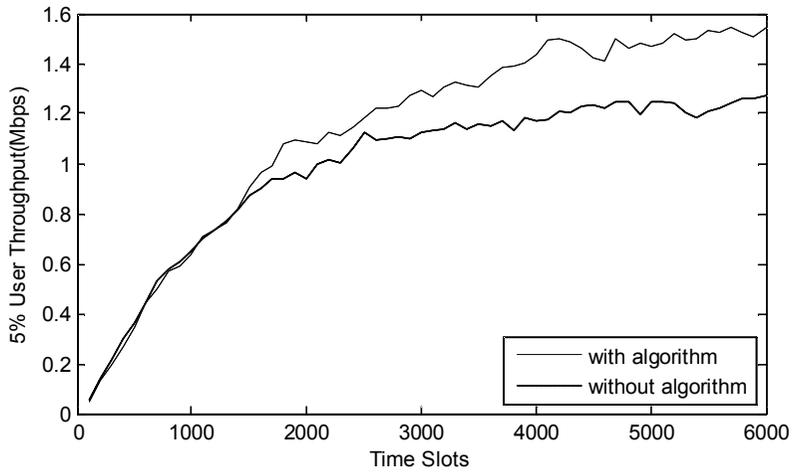


그림 5.29  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우  
하위 5% 사용자들의 전송률

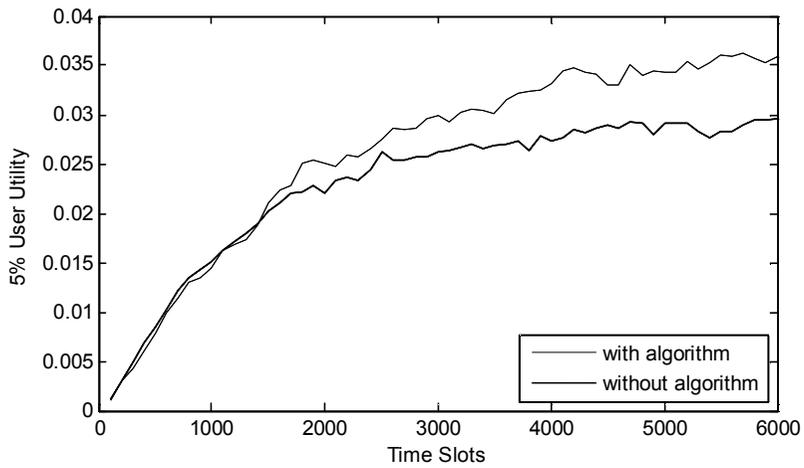


그림 5.30  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우  
하위 5% 사용자들의 유틸리티

5.4.2  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우

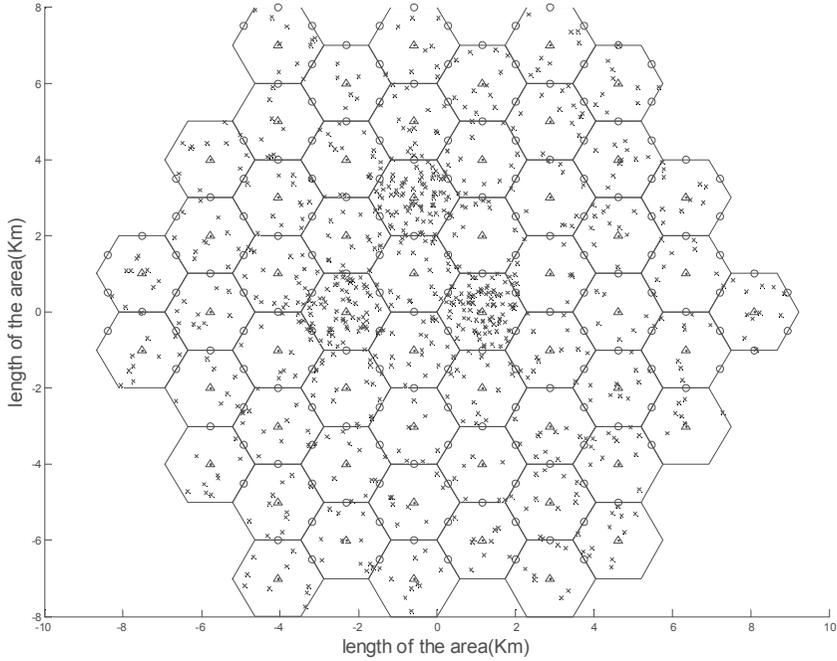


그림 5.31  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 환경

	알고리즘 적용	적용하지 않음
전체 전송률	506.9726 Mbps	504.1631 Mbps
유틸리티 함수의 합	0.1271	0.0893
하위 5% 사용자 전송률	0.4925 Mbps	0.4149 Mbps

표 5.7  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우 전송률과 유틸리티 비교

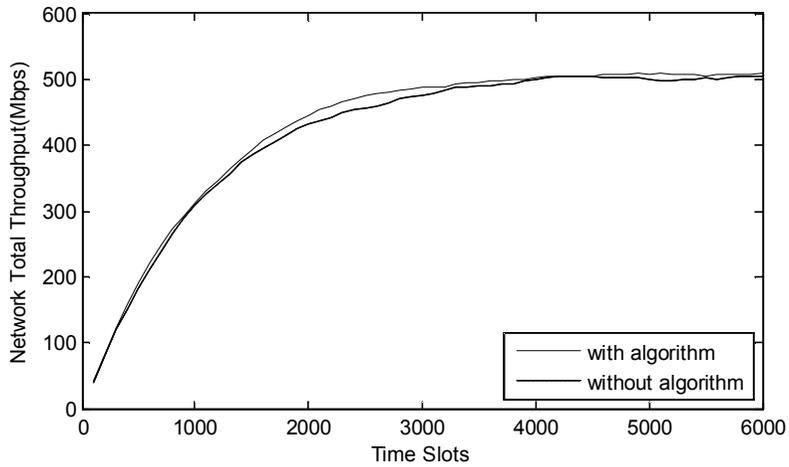


그림 5.32  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우  
네트워크 전체 전송률 비교

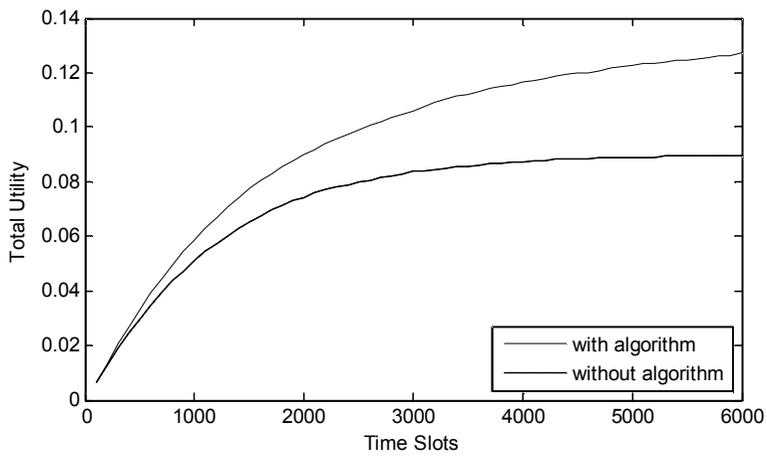


그림 5.33  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우  
네트워크 전체 유틸리티 비교

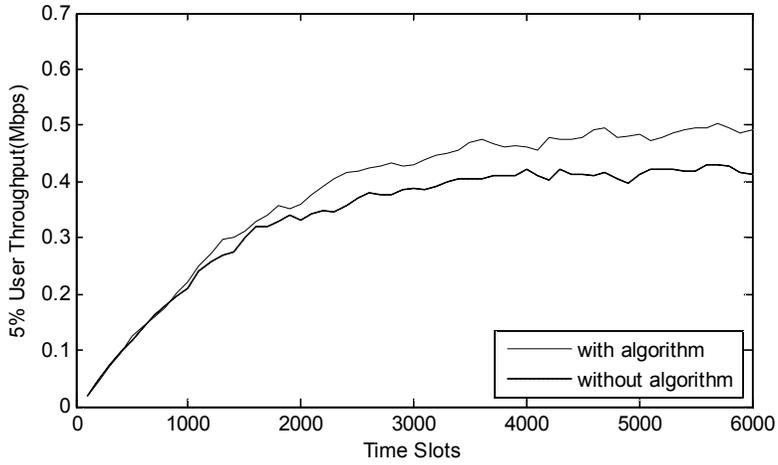


그림 5.34  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우  
하위 5% 사용자들의 전송률

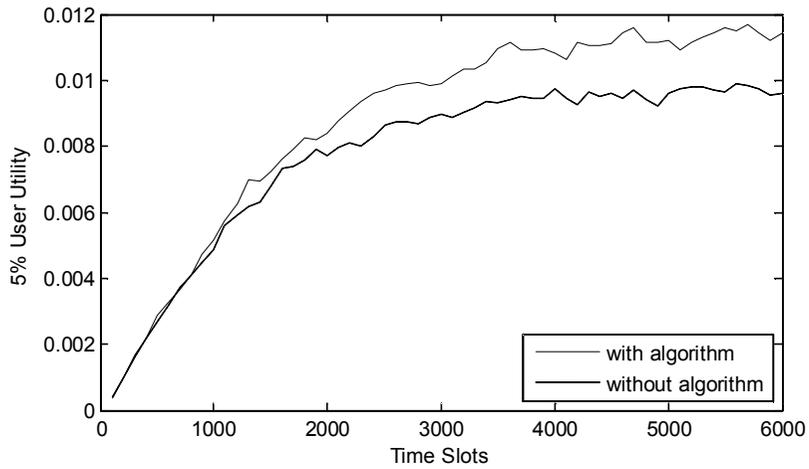


그림 5.35  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_1 = Y_{10} = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 1, 10, 13$ )인 경우  
하위 5% 사용자들의 유틸리티

5.4.3  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우

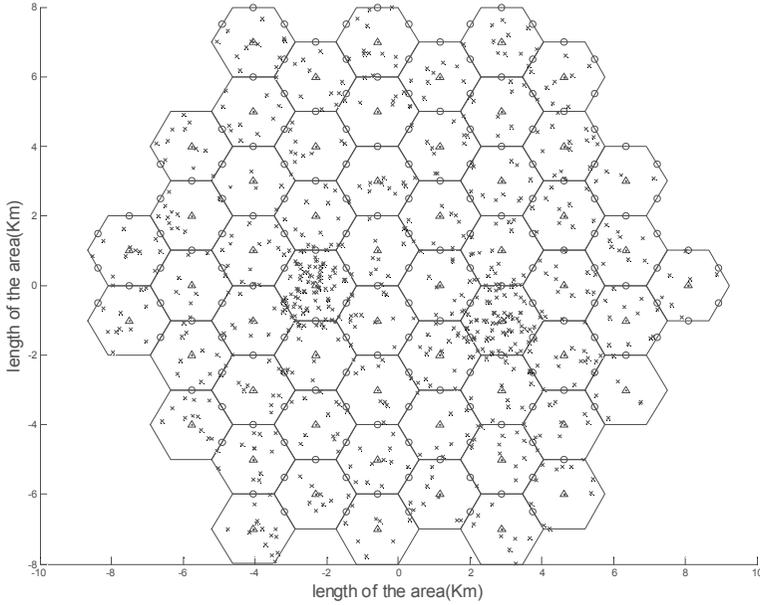


그림 5.36  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 네트워크 환경

	알고리즘 적용	적용하지 않음
전체 전송률	275.2026 Mbps	272.6619 Mbps
유틸리티 함수의 합	0.2402	0.2013
하위 5% 사용자 전송률	1.7218 Mbps	1.2254 Mbps

표 5.8  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우 전송률과 유틸리티 비교

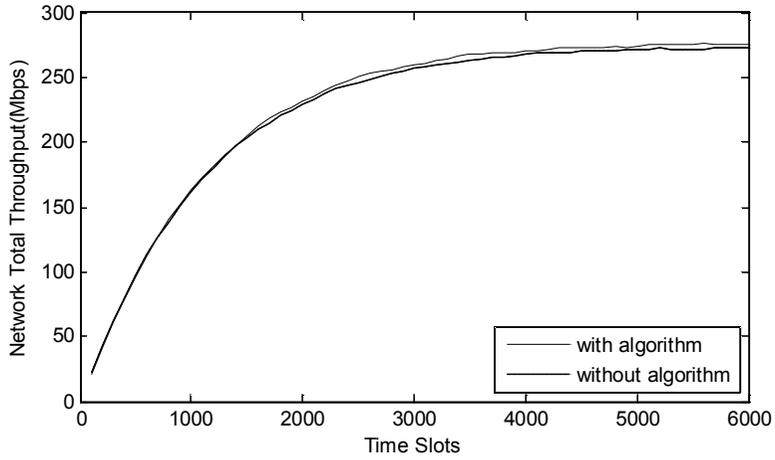


그림 5.37  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우  
네트워크 전체 전송률 비교

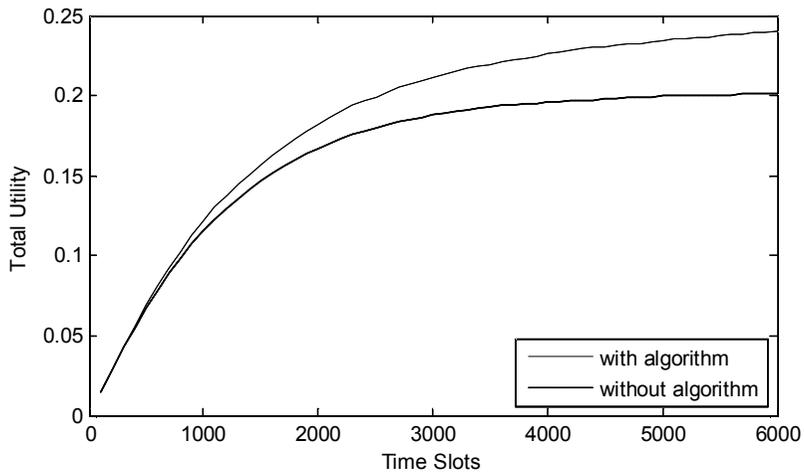


그림 5.38  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우  
네트워크 전체 유틸리티 비교

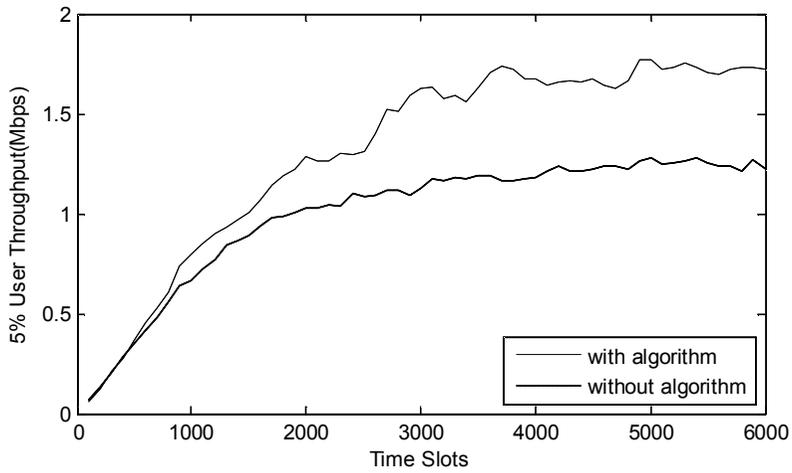


그림 5.39  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우  
하위 5% 사용자들의 전송률

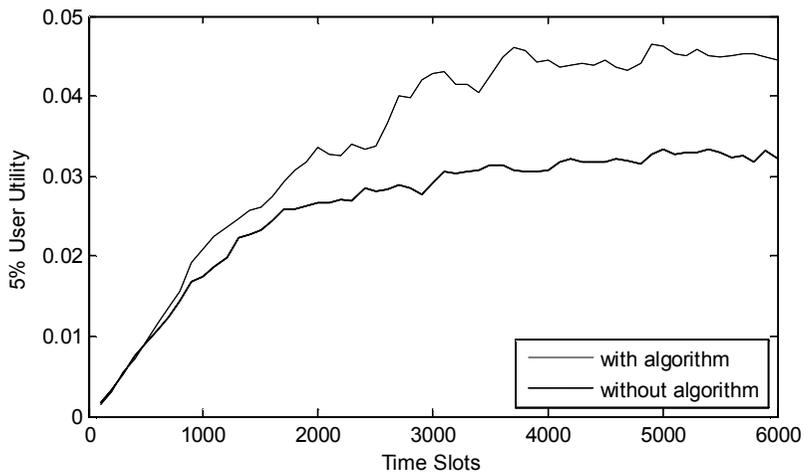


그림 5.40  $\alpha = 0.25$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우  
하위 5% 사용자들의 유틸리티

5.4.4  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우

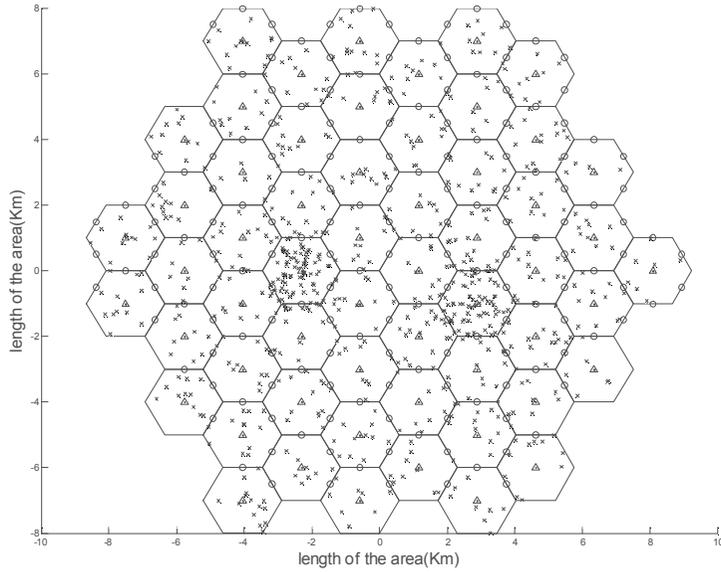


그림 5.41  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 네트워크 환경

	알고리즘 적용	적용하지 않음
전체 전송률	556.9717 Mbps	519.3306 Mbps
유틸리티 함수의 합	0.1688	0.1010
하위 5% 사용자 전송률	0.6389 Mbps	0.4611 Mbps

표 5.9  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우 전송률과 유틸리티 비교

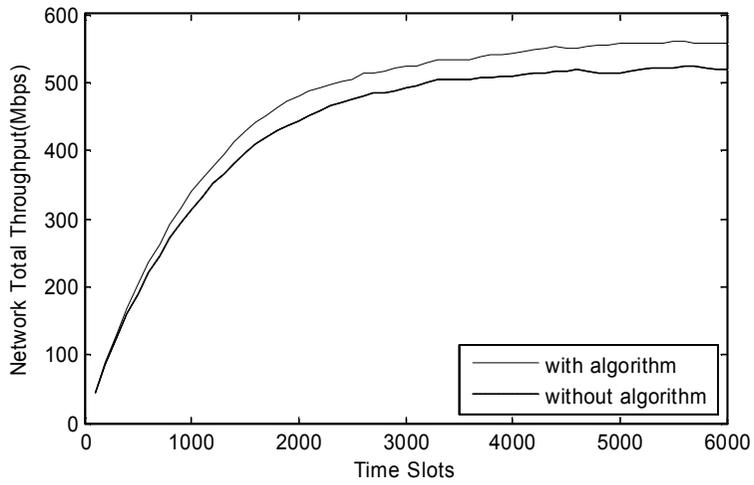


그림 5.42  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우  
네트워크 전체 전송률 비교

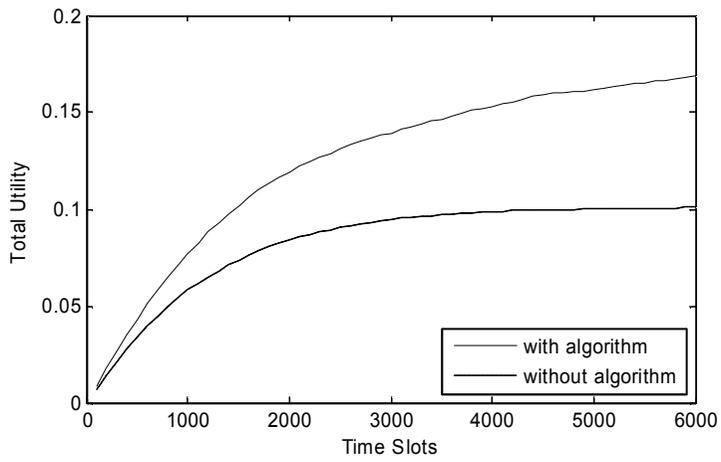


그림 5.43  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우  
네트워크 전체 유틸리티 비교

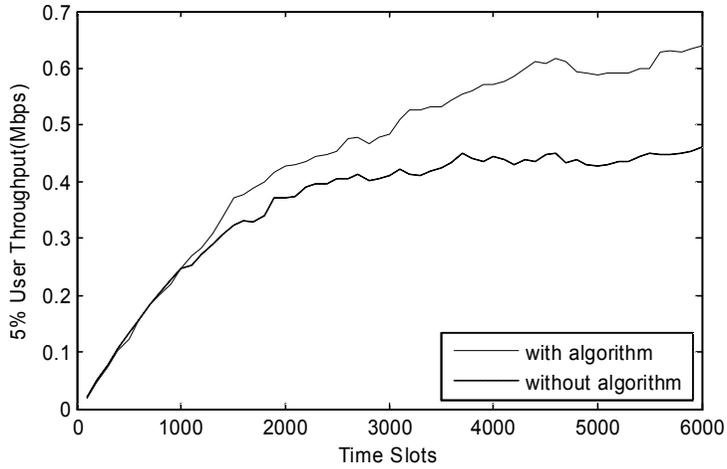


그림 5.44  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우  
하위 5% 사용자들의 전송률

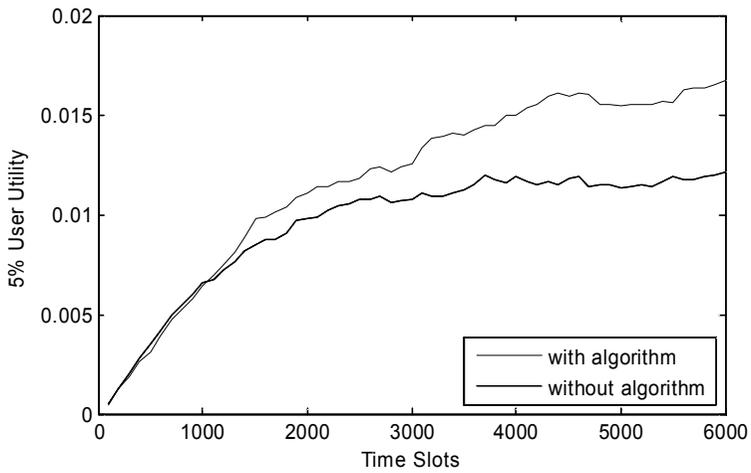


그림 5.45  $\alpha = 0.75$ ,  $Y_6 = Y_{13} = 100$ ,  $Y_n = 10$  ( $n \neq 6, 13$ )인 경우  
하위 5% 사용자들의 유틸리티

위 결과 5.4.1~5.4.2는 전체 네트워크 환경을 2-tier로 확장시킨 후, 같은 외부 밴드를 사용하는 기지국 3곳에 사용자 100명, 나머지 기지국엔 사용자가 10명이 있다고 가정하고 내부 밴드 비율을 0.25와 0.75인 두 경우로 나누어 모의실험을 진행하였다.

그림 5.27과 그림 5.32를 통해 볼 수 있듯이 전체 네트워크 전송률은 알고리즘을 적용하지 않은 경우와 거의 동일함을 보이지만, 그림 5.28과 그림 5.33을 통해 전체 유틸리티 합은 증가함을 알 수 있다. 뿐만 아니라 하위 5%의 사용자들도 핸드오버 알고리즘에 의한 성능 향상을 볼 수 있었다. 이 경우에서도 전체 네트워크 전송률은 특정한 값으로 수렴하지만, 전체 네트워크 유틸리티 합이나 하위 5% 사용자들의 성능은 알고리즘이 시행될수록 계속 증가함을 볼 수 있다. 앞선 모의실험 결과들과 마찬가지로, 내부 밴드 비율  $\alpha=0.25$ 인 경우가  $\alpha=0.75$ 인 경우보다 전체 네트워크 전송률은 떨어지지만, 하위 5%의 사용자 전송률은 더 높은 것을 볼 수 있다.

5.4.3~4.4.4의 모의실험은 서로 다른 외부 밴드를 사용하는 기지국 2곳의 사용자 수를 100명, 나머지 기지국에는 10명으로 가정하고, 내부 밴드 비율이 각각 0.25, 0.75인 경우를 비교하였다.

마찬가지로 알고리즘이 시행됨에 따라 네트워크 전체 유틸리티 합이나 하위 5%의 사용자 성능은 계속해서 향상됨을 볼 수 있다. 또한, 내부 밴드 비율  $\alpha=0.25$ 인 경우가 비록 낮은 네트워크 전체 전송률을 보이지만, 하위 5%의 사용자들은 더 높은 전송률을 갖는 동일한 결과를 보이고 있다.

## 제 6 장 결 론

기존의 셀룰러 네트워크에서는 각 사용자들이 기지국으로부터 받는 신호 대 잡음비(SINR)나 전송률(Throughput) 또는 그 사이의 경로 손실(Path-loss)을 고려하여 기지국을 선택하게 된다. 하지만 실제 셀룰러 네트워크에서는 사용자들이 각 기지국에 고르게 연동되는 것이 아니라, 특정 기지국에 수많은 사용자들이 존재하게 된다. 이러한 문제로 발생하게 되는 부하 불균형 문제로 인해, 혼잡한 셀에서 서비스를 받는 사용자는 한정된 자원 내에서 다른 많은 사용자들과 경쟁하며 서비스를 받게 되어 전송률이 낮아지게 된다. 따라서 비교적 한적한 기지국으로의 핸드오버를 통해 서비스를 받게 된다면 높은 전송률의 서비스를 받을 수 있는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 셀 간 부하 불균형 문제를 해결하기 위해, 다양한 동적 부하 균형 기법들이 소개되고 있다. 그 중에서도 서비스 지역을 확대시킴으로써 셀 가장자리에 위치해 있는 사용자들에게 좋은 서비스를 제공할 수 있는 릴레이를 이용한 기법을 사용하였다.

또한, 부분 주파수 재사용 기법을 사용하여 셀 가장자리에 위치해있는 릴레이나 사용자에게서 발생하게 되는 셀 간 간섭을 완화시켰다. 각 기지국들은 사용자들의 전송률과 그 사이에서의 공평성과의 균형을 고려하여 전체 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있는 비례 공평 알고리즘을 사용하였다.

본 논문에서는 다중 셀 셀룰러 네트워크 환경에서 릴레이를 이용하여 혼잡한 셀에 몰려있는 트래픽들을 한적한 셀로 분산시켜 셀 간의 부하 불균형 문제를 해결하고 전체 네트워크의 유틸리티 함수의 합을 최대화할 수 있는 릴레이와 사용자의 핸드오버 알고리즘을 제시하고 모의실험을 통

하여 기존의 방식과 제안한 알고리즘을 비교함으로써 성능 향상을 증명하였다.

전체 네트워크 사용자들의 유틸리티 함수의 합을 최대화하기 위해 중앙 노드는 모든 사용자들로부터 전송률 정보들을 받게 되고, 이 정보들을 통해서 매 시간 슬롯마다 각 기지국에 서비스할 사용자들을 지정하게 되고 그 정보들을 전송하게 된다. 각각의 기지국들은 이 정보들을 바탕으로 사용자들을 서비스하게 된다. 하지만, 매 시간 슬롯마다 이러한 과정이 반복되어 이루어지는 것은 현실적으로 매우 복잡하고 한계가 있다. 따라서 각 기지국은 개별적으로 스케줄링이 이루어져 사용자들을 서비스하게 되며, 각 사용자가 주변의 기지국으로부터 받는 신호 정보와 각 기지국들의 사용자 수에 대한 정보를 통해 릴레이와 사용자들의 핸드오버를 통제하게 된다. 각 기지국은 릴레이와 사용자가 핸드오버를 하게 될 때의 전체 네트워크의 유틸리티의 변화율을 계산하고, 중앙 노드를 통해 결과 값을 비교하여 제일 좋은 성능을 보이는 릴레이와 사용자의 핸드오버를 허락하게 된다. 다수의 릴레이와 사용자가 핸드오버하게 될 때 발생할 수 있는 진동효과를 방지하기 위하여 각 시간 슬롯에 하나의 릴레이와 한 명의 사용자만이 핸드오버할 수 있도록 한다.

모의실험 결과, 본 논문에서 제시한 핸드오버 알고리즘을 적용한 경우 네트워크 전체 전송률의 손실이 없이, 하위 5% 사용자들의 전송률을 향상시킬 수 있었다. 비록 부분 주파수 재사용 기법을 적용하여 릴레이에서 사용할 수 있는 주파수 대역이 좁아지더라도, 인접 기지국으로부터의 간섭을 줄임으로써 실제 셀 가장자리에 위치해 있는 사용자들이 받는 전송률은 증가하게 되는 것을 알 수 있었다. 또한, 스케줄링에 사용된 비례 공평 알고리즘의 유틸리티 함수로 로그함수가 사용됨에 따라, 전송률이 높은 사용자보다 낮은 사용자들의 전송률 변화가 네트워크 유틸리티에 많은

영향을 끼치게 된다. 즉, 전체적인 네트워크 전송률의 향상이 없더라도 낮은 전송률의 서비스를 받는 사용자가 핸드오버함에 따라 전송률이 높아지게 되면 유틸리티 측면에서 네트워크 성능의 큰 증가를 가져오게 된다. 따라서 네트워크 유틸리티 함수의 합을 최대화하는 알고리즘의 목적에 맞게 알고리즘이 시행되어 핸드오버가 이루어짐에 따라 유틸리티의 합이 증가함을 볼 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] 3GPP TR 25.192 v7.2.0, "Feasibility study for evolved universal terrestrial radio access(UTRA) and universal terrestrial radio access network(UTRAN)," June 2007.
- [2] 3GPP2 C.S0084-001-0 V2.0, " Physical Layer for Ultra Mobile Broadband (UMB) Air Interface Specification," Aug 2007.
- [3] IEEE Std. 802.16e-2005, "Part 16 : air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems," Feb. 2006.
- [4] K. Son, etc, "Dynamic Association for Load Balancing and Interference Avoidance in Multi-Cell Networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 8, no. 7, pp. 3566-3576, July 2009.
- [5] C. S. Chiu and C. Huang, "Combined partial reuse and soft handover in ofdma downlink transmission," in IEEE Vehicular Technology Conference, 2008.
- [6] P. Godlewski, M. Maqbool, and M. Coupechoux, "Analytical evaluation of various frequency reuse schemes in cellular ofdma networks," in perso.telecom-paristech.fr, 2008.
- [7] A. Alsawah and I. Fialkow, "Optimal frequency-reuse partitioning for ubiquitous coverage in cellular systems," in 16th European Signal Processing Conference - publi-etis.ensea.fr, 2008.

- [8] L. Du, J. Bigham, L.Cuthbert, "Towards intelligent geographic load balancing for mobile cellular networks," *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, vol. 33, no.4, pp.480-491 , Nov 2003.
- [9] S. Patra, etc. "Improved Genetic Algorithm for Channel Allocation with Channel Borrowing in Mobile Computing,"*IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 5, no. 7, pp. 884-892, July 2006.
- [10] M. Salem,; A. Adinoyi,; M. Rahman,; H.Yanikomeroğlu, "Fairness-Aware Radio Resource Management in Downlink OFDMA Cellular Relay Networks",*IEEE Trans. Wireless Commun.* pp 1628 1639,2010.
- [11] D. Zhang, Y. Wang, and J. Lu, "Resource allocation in OFDMA based cooperative relay networks,"in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Dec. 2008, pp. 1 - 5.
- [12] T. C. Y. Ng and W. Yu, "Joint optimization of relay strategies and resource allocations in cooperative cellular networks,"*IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 328 - 39, Feb. 2007.
- [13] Z. Tang and G. Wei, "Resource allocation with fairness consideration in OFDMA-based relay networks,"in *Proc. IEEE WCNC*, Apr. 2009, pp. 1 - 5.
- [14] Y. J. Zhang and S. C. Liew, "Proportional fairness in multi-channel multi-rate wireless networks-part II: The case of time-varying channels with application to OFDM system" *IEEE*

- Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 9, pp. 3457 - 467, Sept. 2008.
- [15] N. Ruangchaijatupon and Y. Ji, "Integrated approach to proportional-fair resource allocation for multiclass services in an OFDMA system,"in Proc. IEEE GLOBECOM, Nov. 2009, pp. 1 - 6.
- [16] L. Zhang, C. Jin, and W. Zhou, "Decomposition proportional fairness algorithm for multiuser OFDM systems,"in Proc. IEEE ICC, May 2008, pp. 21 - 25.
- [17] Jeongsik Choi, etc, "User Throughput Estimation for the PF Scheduling Algorithm under MIMO Channel Environments," IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 1, NO. 5, OCT. 2012

# Abstract

In recent cellular network environment, mobile users are increasing quickly with the development of communication devices such as smart phones and an increase of a variety of wireless service, whereby data traffics have increased rapidly, and it is hard for mobile service providers to offer data traffic users want. In real-world, users are not evenly distributed across cells, the base station where many users are associated have a lot of trouble to the service with limited resources. In order to solve the load imbalance problem, relay station which can increase the transmission rate of cell boundary users through the service area expansion have been an attractive technique in the current networks.

In this paper, we propose a adaptive relay scheme which can improve the performance of the overall network by utilizing relay stations to distribute heavy traffic from hot cell to cooler cells when there are the load imbalance between the cells. Each user and relay station calculates the network utility to the neighboring relay stations and base stations, and the central node controls the associations of users and relay stations through information gathered from mobile users and relay stations.

Simulation results show that our proposed algorithm improves the performance of lower 5% users without loss of the total network throughput. We are able to confirm that it is possible to maximize the sum of the network utility which is an object of the algorithm

keywords : Relay network, Proportional fairness, Multi-Cell, Cellular Network, Load balancing

Student Number : 2011-23369