

와이브로 시스템에서 펌토셀/매크로셀간 간섭 분석

성유석^o, 김영훈, 김성철

서울대학교 전기공학부, 뉴미디어통신공동연구소

Femtocell/Macrocell Interference Analysis in WiBro System

Yu-Suk Sung^o, Young-Hoon Kim, and Seong-Cheol Kim

Department of Electrical Engineering and INMC, Seoul National University

{sfamily,kebi,sckim}@maxwell.snu.ac.kr

요 약

펌토셀을 도입함으로써 이동통신시스템의 실내 커버리지를 확장하고 시스템 용량을 증대시킬 수 있다. 펌토셀이 효과적으로 동작하기 위해서는 펌토셀과 매크로셀간의 전파 간섭에 대한 분석이 필요하다. 본 논문에서는 와이브로 시스템에 펌토셀을 적용하는 경우 발생할 수 있는 간섭 영향을 살펴본다. 펌토셀과 매크로셀간의 동기가 유지된 경우를 가정하여, 펌토셀이 매크로셀과 동일한 채널에서 동작하는 경우와 인접 채널에서 동작하는 경우에 대하여 시스템 레벨 시뮬레이션을 수행하여 평균 셀 throughput 을 구하고 펌토셀과 매크로셀간 간섭 영향 특성을 분석한다.

1. 서론

집과 사무실과 같은 실내에서의 무선 통신 트래픽이 점점 더 증가하면서, 실내에서 보다 높은 속도와 안정적인 무선 통신 서비스를 제공하기 위한 방안으로 펌토셀(femtocell) 개념이 최근에 등장하였다. 펌토셀은 100 조분의 1 을 의미하는 펌토(femto)와 이동전화 통화가능지역 단위를 말하는 셀(cell)의 합성어로 가정이나 사무실 등 실내에서 사용되는 초소형 이동통신용기지국으로, 이동전화와 인터넷을 연결하여 저렴한 비용으로 유무선 융합서비스를 제공하는 기술이다 [1]. 펌토셀은 무선랜 중계기 (Access Point: AP)와 비슷한 역할을 하지만 인터넷 접속이 아닌 이동전화 접속을 위한 중계기 역할을 한다는 점에서 차이가 있으며 단순히 전파를 중계하는 것이 아니라 기지국(Base Station)과 마찬가지로 자체 용량을 갖고 있으며 무선으로 연결되지 않고 초고속 인터넷과 연결해 사용할 수 있다는 점에서 기존의 이동전화 옥내 중계기와도 구별된다.

펌토셀은 실내 커버리지를 확대하여 향상된 서비스 품질을 제공하는 것 이외에도 다양한 이점을 가지고 있다 [표 1]. 이러한 다양한 이점으로 인해 펌토셀에 관한 관심이 증가하여 이미 몇몇 제조업에서는 시제품을 제작하였고, 3GPP 나 3GPP2 와 같은 표준화 단체에서도 펌토셀 관련 연구를 진행하기 시작하였다[2,3]. 연구 아이টে็ม으로는 시스템 구조,

표 1. 펌토셀 도입에 따른 이점[1]

구분	이점
서비스 운영자	<ul style="list-style-type: none">서비스 커버리지 (coverage) 확대백홀 (backhaul) 트래픽 감소용량 (capacity) 증가가입자 전환율 (churning rate) 감소
서비스 사용자	<ul style="list-style-type: none">향상된 실내 서비스 품질기존 단말 이용 가능배터리 사용 시간 증대

이동성, 전파 관련 이슈, 운용 및 유지, 자가 최적화, 네트워크 동기화, 핸드오버 절차, 간섭 제어 등 여러가지가 있다.

펌토셀이 적절하게 동작하기 위해서는 앞서 언급한 모든 문제들이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 전파 간섭 문제에 초점을 맞추어, 와이브로 시스템에 펌토셀을 도입함으로써 발생하는 펌토셀/매크로셀간 간섭 영향을 시스템 레벨 시뮬레이션을 통하여 분석한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 시뮬레이션을 위한 시스템 모델과 시뮬레이션 구조에 대하여 설명한다. 3 장에서는 간섭 시나리오에 따른 시뮬레이션 결과를 보이고 그에 대한 분석을 수행한다. 마지막으로 4 장에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

2.1. 시스템 레이아웃

시뮬레이션을 위한 시스템 레이아웃은 그림 1 과 같다. 매크로셀 반경은 500 m, 펌토셀 반경은 10 m 로 가정한다. 매크로셀은 총 19 개로, 2 차 tier 까지 의 간섭을 고려하도록 하고, 각 매크로셀에는 동일한 수의 매크로셀 사용자를 무작위 분포시킨다. 또 한 펌토셀 AP 는 매크로셀마다 동일한 개수를 분포 시키는데 시뮬레이션 시간을 줄이기 위해 1 차 tier 까지만 펌토셀 AP 를 분포시킨다. 각 펌토셀에는 4 명의 펌토셀 (실내) 사용자를 분포시킨다. 성능 분석은 중앙에 위치한 매크로셀에 대해서만 이루어진다.

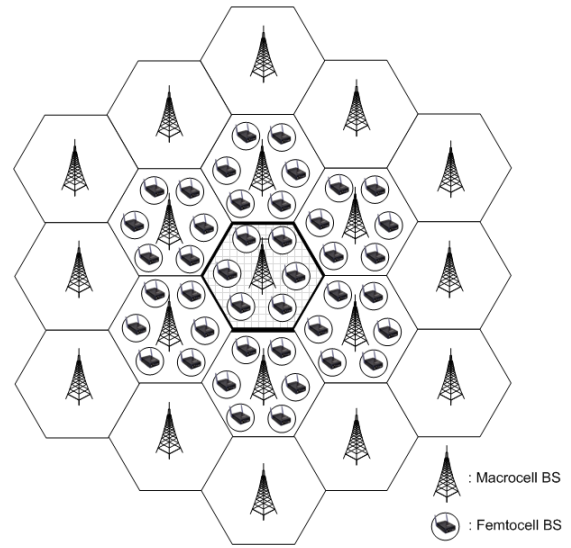


그림 1. 시스템 레이아웃

2.2. OFDMA 프레임 구조

OFDMA 프레임 구조는 그림 2 와 같다. 한 프레임은 42 개의 OFDMA 심볼로 구성되는데, 하향과 상향의 비는 27:15 이다. 하향과 상향 서브프레임 각각 3 개의 심볼 길이를 오버헤드로 갖는다고 가정을 하면, 실제 데이터가 실릴 수 있는 길이는 하향의 경우 24 개의 심볼, 상향의 경우 12 개 심볼이 된다. 1 개의 심볼은 총 840 개의 부반송파로 이루어지는데, 파일럿을 제외한 데이터 부반송파의 수는 하향의 경우 720 개, 상향의 경우 560 개이다. 각 사용자는 부반송파가 이루는 서브채널과 OFDMA 심볼로 이루어진 시간-주파수의 2 차원 상에서 자원할당이 이루어진다. 기지국 또는 AP 에 연결된 사용자는 모두 한 프레임 내에서 동일한 크기의 자원을 할당받는 것을 가정한다.

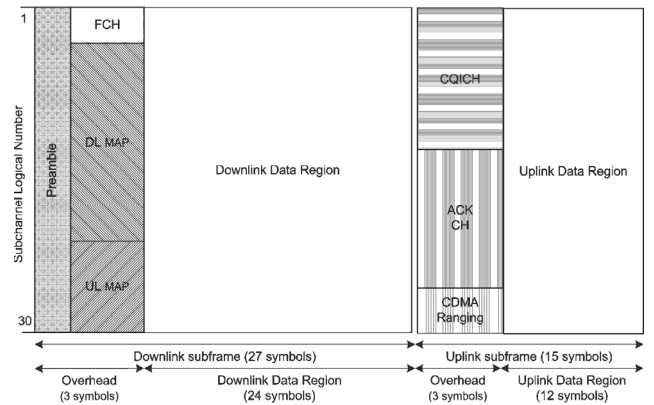


그림 2. OFDMA 프레임 구조

2.3. 채널 모델

매크로셀 기지국, 펌토셀 AP, 사용자 단말 사이의 링크에 따라 적용되는 경로 손실 모델은 표 2 와 같다. 기지국, 펌토셀 AP, 사용자 단말의 위치가 결정되면 표 2 에 따라 모든 링크 사이의 경로 손실을 구하게 된다. 단말은 최소 경로 손실을 갖는 기지국 또는 AP 와 연결된다고 가정한다.

주파수 선택 특성을 반영하기 위한 다중경로 모델은 ITU-R 모델을 적용한다. 매크로셀 사용자의 다중경로 프로파일 분포는 Ped-B 3km/h: 60%, Veh-A 30km/h: 30%, Veh-A 120km/h: 10%를 갖도록 한다. 펌토셀 사용자 다중경로 프로파일 분포는 Ind-B 3km/h: 80%, Ind-B 0km/h: 20%를 따른다.

기타 기지국, 단말기 등의 최대 출력, 안테나 이득, 잡음 지수 등은 일반적인 와이브로 시스템 파라미터를 가정한다. 다중안테나는 고려하지 않으며 주파수 재사용 지수는 1 이다.

표 2. 경로 손실 모델

링크	경로 손실 모델	쇄도잉	투과손실
매크로셀 사용자 ↔ 매크로셀 기지국	Modified COST231 Hata Model [4]	8 [dB]	없음
펌토셀 사용자 ↔ 매크로셀 기지국	Modified COST231 Hata Model	8.9 [dB]	$N(12, 8)$ [dB]
펌토셀 사용자 ↔ 펌토셀 AP	ITU-R Indoor office test environment model [5]	12 [dB]	인접 AP 사이: $N(12, 8)$ [dB]
매크로셀 사용자 ↔ 펌토셀 AP	ITU-R Outdoor to indoor and pedestrian test environment model [5]	10 [dB]	$N(12, 8)$ [dB]

표 3. MCS 레벨에 따른 필요 SINR (BLER=10%) [7]

Modulation	Code Rate	필요 SINR Threshold [dB]	Modulation Efficiency [bits/sym/subcarrier]
QPSK	1/12	-6.0	0.17
	1/6	-4.3	0.25
	1/4	-1.2	0.50
	1/2	1.8	1.0
	3/4	4.8	1.5
16QAM	1/2	7.1	2.0
	3/4	10.8	3.0
64QAM	1/2	11.7	3.0
	2/3	14.8	4.0
	3/4	16.0	4.5
	5/6	17.7	5.0

2.4. 간섭 시나리오

본 논문에서는 매크로셀과 펠토셀간 동기가 완벽하게 유지되었다고 가정하고 하향과 상향에 대하여 각각 독립적으로 시뮬레이션을 수행한다. 펠토셀은 동작 방식과 동작 주파수 대역에 따라 4 가지의 형태로 운용 가능하다.

먼저 펠토셀 동작 방식에는 인증된 사용자만 펠토셀에 연결될 수 있는 closed access 방식과 주위의 어떠한 사용자도 연결될 수 있는 open access 방식 두 가지가 있다.

펠토셀 동작 주파수 대역은 매크로셀과 동일한 주파수 대역을 사용(동일채널)하거나 인접 주파수 대역을 사용(인접채널)할 수 있다. 인접채널에서 동작하는 경우 간섭은 동일채널에 비하여 인접채널간섭비 (adjacent channel interference ratio; ACIR) 만큼 줄어들게 된다. 시뮬레이션에서 가정한 각각의 ACIR 값은 ACIR_BS = 37.5 [dB], ACIR_AP = 25.5 [dB], ACIR_MS = 26 [dB] 이다.

2.5. 성능 분석 방법

각 사용자는 할당된 자원에 따라 부반송파별 SINR 을 우선 계산한다. 할당받은 버스트 내의 부반송파별 SINR 을 단순히 평균을 취하면 주파수 선택 특성을 반영하지 못하므로 유효 SINR 을 다음 식 (1) 에 의해서 계산한다 [6].

$$\gamma_{eff} = 2^{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log_2(1+\gamma_n)\right)} - 1 \quad (1)$$

여기서 γ_n 은 부반송파별 SINR 이고, N 은 사용자가 할당받은 버스트의 총 부반송파 개수이다.

유효 SINR 이 구해지면 표 3 의 필요 SINR 값과 비교하여 각 사용자의 MCS 레벨을 결정한다. 상향의 경우 16QAM 까지만 지원한다. 부반송파 하나는 MCS 레벨에 따라 modulation efficiency 만큼의 bit 를 전송할 수 있다고 가정하고 사용자가 할당받은 버스트는 BLER(block error rate)를 고려하여 사용자 throughput 을 구한다. 셀 throughput 은 셀 내의 사용

표 4. 매크로셀 하향 (closed) 셀 throughput [단위: Mbps]

매크로셀 사용자 수	펠토셀 동작 주파수	매크로셀 당 펠토셀 AP 개수			
		0	10	20	30
10	동일 채널	5.90	5.60	5.43	5.31
	인접 채널		5.74	5.71	5.76
20	동일 채널	5.75	5.38	5.29	5.05
	인접 채널		5.53	5.53	5.44

표 5. 펠토셀 하향 (closed) 셀 throughput [단위: Mbps]

매크로셀 사용자 수	펠토셀 동작 주파수	매크로셀 당 펠토셀 AP 개수		
		10	20	30
10	동일 채널	12.81	12.50	12.10
	인접 채널	14.60	13.93	13.41
20	동일 채널	12.93	12.57	12.24
	인접 채널	14.59	13.97	13.48

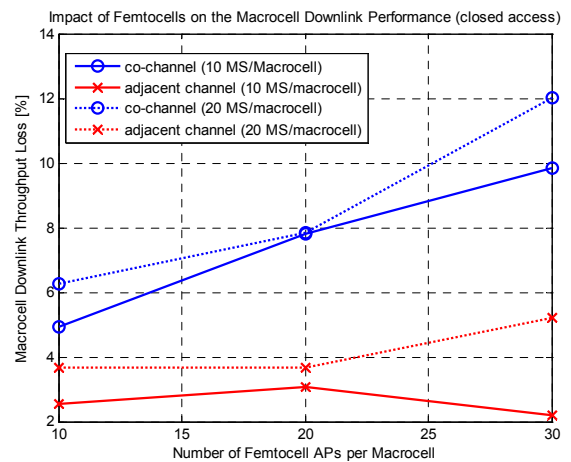


그림 1. 매크로셀 하향 성능 영향 (open access)

자 throughput 을 모두 더함으로써 얻어지는데, 여러 번의 시뮬레이션을 반복적으로 시행하여 평균 셀 throughput 을 구한다.

3. 간섭 분석 결과

3.1. 하향 링크 간섭 분석 결과 (closed access)

먼저 펠토셀이 closed access 방식으로 동작하는 경우에 대하여 살펴보았다. 펠토셀 밀도에 따른 매크로셀 하향 성능은 표 4 와 같다. 펠토셀이 동일채널에서 동작하는 경우, 펠토셀 AP 개수가 증가함에 따라 매크로셀 사용자에게 주는 간섭량이 증가하여 매크로셀 throughput 이 감소하는 경향을 나타낸다. 반면에 펠토셀이 매크로셀 인접 채널에서 동작하는 경우에는, ACIR 로 인하여 펠토셀 AP 로부터의 간섭이 상대적으로 줄어들어 동일채널 경우보다 매크로셀 throughput 이 큰 것을 알 수 있으며, 펠토셀 밀도에 따른 영향은 작은 편이다.

펠토셀 하향 성능은 표 5 와 같다. 펠토셀 밀도가 증가함에 따라 인접 펠토셀 AP 로부터의 간섭이 증가하여 펠토셀 throughput 이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 펠토셀이 인접 채널에서 동작하면 매크

로셀 BS로부터의 간섭이 감소하여 동일 채널 경우보다 throughput이 크게 나타난다.

펍토셀이 매크로셀 성능에 어느 정도 영향을 미치는지 알아보기 위하여 펍토셀이 존재하지 않는 경우 대비 전체 매크로셀 throughput의 감소 정도를 그림 3에 나타내었다. 동일 채널 동작시에는 적게는 5%, 많게는 12% 정도까지 매크로셀 throughput이 감소하게 된다. 인접 채널 동작시에는 대략 4% 미만의 감소율을 보인다.

3.2. 상향 링크 간섭 분석 결과 (closed access)

펍토셀이 closed access 방식으로 동작하는 경우 펍토셀 밀도에 따른 매크로셀 및 펍토셀 상향 성능은 각각 표 6, 표 7과 같다. 매크로셀 throughput은 펍토셀 단말로 인하여 약간 감소하는 것을 알 수 있다. 펍토셀이 동일 채널에서 동작하는 경우가 인접 채널에서 동작하는 경우보다 감소율이 크다. 펍토셀 수가 많아지면서 펍토셀 간 간섭이 증가하여 펍토셀 throughput이 감소하는 모습을 보인다.

펍토셀로 인한 매크로셀 상향 throughput 감소 정도를 그림 4에 나타내었다. 전체적으로 5% 미만의 감소율을 보였는데, 시뮬레이션에서는 단말이 최고 MCS level을 받을 수 있도록 초기 전송 전력을 결정한 후에 전력 제어를 따로 하지 않았다. 따라서 실제 환경에서는 펍토셀이 매크로셀 상향에 주는 간섭량이 더 적게 나타날 것으로 예상된다.

3.3. 하향 링크 간섭 분석 결과 (open access)

펍토셀이 open access 방식으로 동작하는 경우 펍토셀 밀도에 따른 매크로셀 및 펍토셀 상향 성능은 각각 표 8, 표 9와 같다. Closed access 상황과는 반대로 open access에서는 펍토셀이 존재하는 경우에 매크로셀 throughput이 오히려 증가하였는데, 이는 매크로셀 BS에서 상대적으로 멀리 위치해 있는 사용자는 주변의 펍토셀 AP에 연결되게 되고, 매크로셀 BS는 근접한 매크로 사용자만을 서비스하게 되므로, 전체적으로 매크로셀 로드가 줄어들고 좋은 수신 품질을 유지할 수 있기 때문이다. 매크로셀 사용자수가 10명인 경우 펍토셀 AP 개수가 10, 20, 30으로 변함에 따라 매크로셀 BS로 서비스받는 사용자 수는 평균 4.28명, 2.8명, 1.77명으로 감소하였다. Open access의 경우 매크로 사용자 주변의 펍토셀 AP가 간섭원이 되지 않으므로 펍토셀 동작 주파수 대역에 따른 매크로셀 성능 영향은 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

Open access에서 하향 펍토셀 throughput은 closed access에 비하여 펍토셀 AP에 연결되는 사용자 수가 증가하게 되어 전체적으로는 약간 감소하나, 여 매크로셀 throughput보다는 훨씬 큰 값을 나타낸다. 펍토셀이 매크로셀 BS에 가까이 위치하는 경우 간섭 영향이 크게 나타나므로, 펍토셀 동작 주파수에

표 6. 매크로셀 상향 (closed) 셀 throughput [단위: Mbps]

매크로셀 사용자 수	펍토셀 동작 주파수	매크로셀 당 펍토셀 AP 개수			
		0	10	20	30
10	동일 채널	2.02	1.93	1.96	1.95
	인접 채널		1.94	1.98	1.99
20	동일 채널	1.99	1.88	1.91	1.90
	인접 채널		1.89	1.92	1.93

표 7. 펍토셀 상향 (closed) 셀 throughput [단위: Mbps]

매크로셀 사용자 수	펍토셀 동작 주파수	매크로셀 당 펍토셀 AP 개수		
		10	20	30
10	동일 채널	2.87	2.68	2.51
	인접 채널	3.46	3.32	3.19
20	동일 채널	2.67	2.47	2.30
	인접 채널	3.48	3.36	3.18

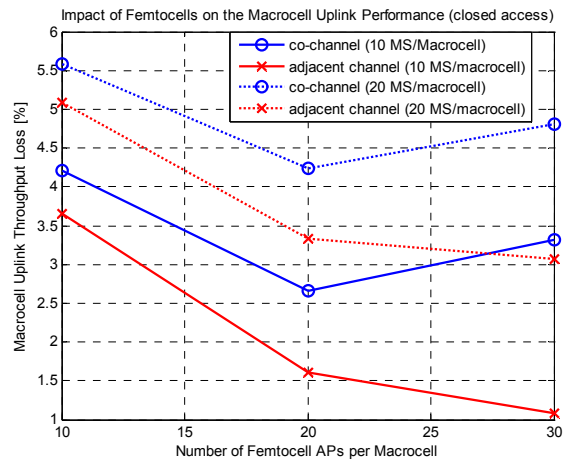


그림 4. 매크로셀 상향 성능 영향 (closed access)

따른 성능 차이가 나타난다.

펍토셀이 존재함으로써 존재하지 않는 경우 대비 전체 매크로셀 throughput의 증가 정도를 그림 5에 나타내었다. 이 결과를 통해 볼 때 매크로셀 로드가 큰 지역에 open access로 동작하는 펍토셀을 도입함으로써, 전체 시스템의 성능을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

3.4. 상향 링크 간섭 분석 결과 (open access)

펍토셀이 open access 방식으로 동작하는 경우의 펍토셀 밀도에 따른 매크로셀 상향 성능과 펍토셀 상향 성능 표 10, 표 11과 같다.

펍토셀이 매크로셀과 동일 채널에서 동작하는 경우 매크로셀 상향 throughput은 펍토셀이 없는 경우에 비하여 감소하였고, 인접 채널에서 동작하는 경우에는 증가하는 모습을 보인다.

펍토셀로 인한 매크로셀 상향 throughput의 증가 또는 감소 정도를 그림 6에 나타내었다. 펍토셀이 동일 채널 동작시에는 20~50% 정도의 매크로셀 상향 throughput 감소율을 보이고, 인접 채널 동작시에는 20~60% 정도의 증가율을 보인다.

표 8. 매크로셀 하향 (open) 셀 throughput [단위: Mbps]

매크로셀 사용자 수	펨토셀 동작 주파수	매크로셀 당 펨토셀 AP 개수			
		0	10	20	30
10	동일 채널	5.90	8.23	9.49	8.72
	인접 채널		8.23	9.49	8.74
20	동일 채널	5.75	9.49	10.77	10.58
	인접 채널		9.50	10.77	10.59

표 9. 펨토셀 하향 (open) 셀 throughput [단위: Mbps]

매크로셀 사용자 수	펨토셀 동작 주파수	매크로셀 당 펨토셀 AP 개수		
		10	20	30
10	동일 채널	10.74	11.18	11.26
	인접 채널	12.56	12.71	12.51
20	동일 채널	9.98	10.34	10.42
	인접 채널	12.00	11.98	11.86

표 10. 매크로셀 상향 (open) 셀 throughput [단위: Mbps]

매크로셀 사용자 수	펨토셀 동작 주파수	매크로셀 당 펨토셀 AP 개수			
		0	10	20	30
10	동일 채널	2.02	1.33	1.06	0.96
	인접 채널		2.30	2.29	2.21
20	동일 채널	1.99	1.60	1.25	0.87
	인접 채널		3.16	3.22	2.42

표 11. 펨토셀 상향 (open) 셀 throughput [단위: Mbps]

매크로셀 사용자 수	펨토셀 동작 주파수	매크로셀 당 펨토셀 AP 개수		
		10	20	30
10	동일 채널	3.04	2.95	2.86
	인접 채널	3.29	3.11	2.97
20	동일 채널	2.98	2.79	2.58
	인접 채널	3.24	2.99	2.75

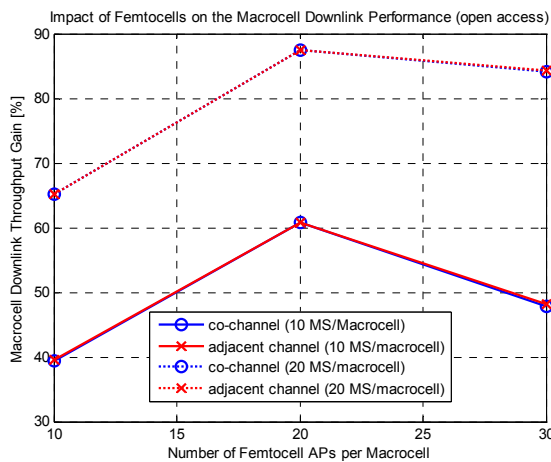


그림 5. 매크로셀 하향 성능 영향 (open access)

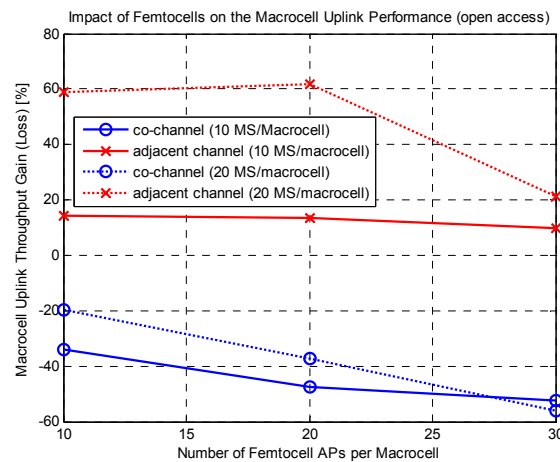


그림 6. 매크로셀 상향 성능 영향 (open access)

4. 결론

본 논문에서는 와이브로 시스템에 펨토셀을 도입하는 경우 고려해야 될 펨토셀/매크로셀간 간섭 분석이 이루어졌다. 시스템 레벨 시뮬레이션 결과를 통해 펨토셀의 동작 모드와 동작 주파수 대역, 매크로셀 로드 에 따라 두 네트워크 사이의 간섭이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 경향성을 파악하여 실제 펨토셀 구축 시 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 펨토셀과 매크로셀간 시간 동기가 정확히 이루어진 것을 가정하고 간섭 분석을 수행하였다. 그러나 실내에 설치되는 펨토셀의 경우는 동기를 위한 GPS 신호 수신에 어려움이 두 네트워크간의 동기가 이루어지지 않아 추가적인 간섭이 발생할 수 있다. 보다 완벽한 펨토셀/매크로셀간 간섭 분석을 위하여 이와 같은 추가적인 간섭 시나리오에 대한 분석이 이루어져야 할 것이다.

이 논문은 두뇌한국 21 사업과 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발사업 [2008-F-007-01, 3 차원 환경에서 지능형 무선 통신 시스템 연구] 에 의하여 지원되었음

5. 참고 문헌

- [1] 박상현, "유무선 융합서비스 발전을 위한 정책 방향과 이슈: 펨토셀을 중심으로," *Telecommunications Review*, 제 18 권, 제 4 호, pp. 571-582, 2008 년 8 월
- [2] 3GPP, "3G Home NodeB Study Item Technical Report," 3GPP TR 25.820, ver. 8.0.0, Mar. 2008.
- [3] 3GPP2, Femto Cell workshop, http://www.3gpp2.org/public_html/FEMTO, Oct. 2007.
- [4] IEEE 802.16m-07/037r2, "Draft IEEE 802.16m Evaluation Methodology," Dec. 2007.
- [5] ITU-R recommendation M.1225, "Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000," 1997.
- [6] J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, 2007.
- [7] IEEE C802.16m-08/809r1, "MCS for IEEE 802.16m CTC," Jul. 2008.