

소형셀 네트워크 성능 분석을 위한 새로운 평가 방법

임연근*, 채찬병^o

A Novel Performance Evaluation Methodology for Small Cell Networks*

Yeon-Geun Lim*, Chan-Byoung Chae^o

요약

3D-ray tracing tool은 신호의 반사, 투과, 그리고 회절까지 고려하여 3차원 공간에서 더욱 정확한 네트워크 성능을 분석하기 위한 소프트웨어이다. 통신표준에서는 통신 자원을 효율적으로 제공하기 위해 소형셀을 포함한 Heterogeneous Networks (HetNets)을 도입하고 있다. 매크로셀에 비해 좁아진 커버리지를 사용하는 소형셀 환경에서는 3D 공간에서 성능분석이 중요해 졌다. 또한 지형구조와 건물의 배치 그리고 3D 빔포밍(beamforming) 기술 등의 사용으로 인해 네트워크 환경이 복잡해지기 때문에 기존의 2차원 수학적 모델들을 이용하여 성능을 분석하기에는 어려움이 따른다. 본 논문에서는 소형셀 네트워크 성능을 더욱 효율적으로 분석하기 위한 3D-ray tracing tool을 활용한 성능평가 방법을 소개한다. 성능평가 결과 기존의 방법보다 3D-ray tracing tool을 활용한 성능평가 방법이 소형셀 환경에서 더욱 적합하다는 결론을 내렸다.

Key Words : Small cell, 3D-ray tracing tool, performance evaluation method.

ABSTRACT

A 3D-ray tracing tool is a software considering reflection, penetration, and diffraction of the signals to provide accuracy. To provide communication resources effectively, communication standards adopt Heterogeneous Networks (HetNets) that includes small cells. A 3D performance evaluation methodology becomes more and more important since the coverage of the small cell networks is narrower than that of the macro cell networks. It is difficult to directly apply conventional 2D mathematical models due to the complexity of small cell network; since they have many considerations such as topography, placement of buildings and 3D beamforming techniques. In this paper, we introduce an effective performance evaluation methodology for small cell networks using 3D-ray tracing tool. From simulation results, we conclude that new performance evaluation methodologies by using 3D-ray tracing tool is more suitable than conventional methodology for small cell networks.

I. 서론

통신표준에서는 통신 자원을 효율적으로 사용하기 위해 Heterogeneous Networks (HetNets)을 도입하고

있다²⁾. HetNets에서는 기존의 매크로셀에 피코셀(picocell)과 펨토셀(femtocell)과 같은 소형셀을 이용하여 시스템의 용량을 증가시키지만 매크로셀과 소형셀 간의 간섭문제 그리고 소형셀과 소형셀 간의 간섭

* 본 연구결과의 일부는 한국통신학회 2012년도 추계종합학술발표회에 발표되었습니다.^[1]

※ 본 연구는 미래부가 지원한 2013년 정보통신-방송(ICT)연구개발사업의 연구결과로 수행되었음

• First Author : 연세대학교 글로벌융합공학부 융합통신망연구실, yglim@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : 연세대학교 글로벌융합공학부 융합통신망연구실, cbchae@yonsei.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2013-12-528, 접수일자 : 2013년 10월 15일, 심사일자 : 2013년 12월 5일, 최종논문접수일자 : 2013년 12월 12일

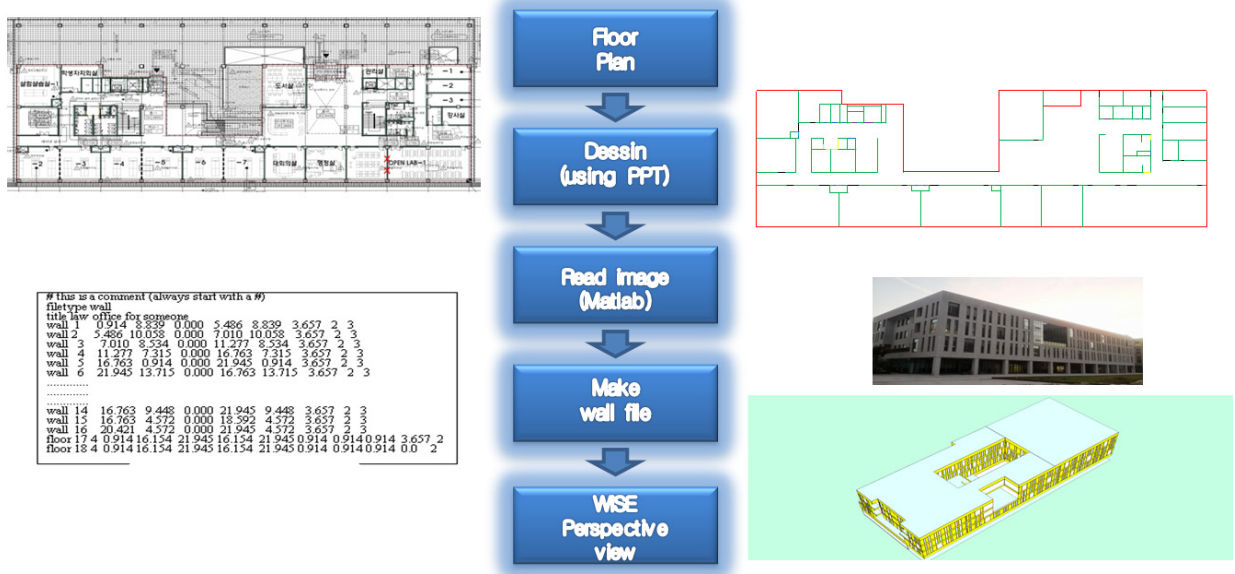


그림 1. 연세대학교 진리관 C동 모델링 과정
 Fig. 1. Modeling procedure for the building, Yonsei University Veritas C

문제로 인해 더 많은 기술적 논의가 필요하다.

다중 셀(multi-cell) 환경의 시스템 성능을 분석하기 위해서 기존에는 2차원 평면상에서 육각형 셀(hexagonal cell) 모델이나 보로노이(Voronoi) 셀 모델을 사용하였다. 사용자가 기지국으로부터 받는 신호의 세기는 기지국과 사용자 사이의 거리에 가장 큰 영향을 받는데 매크로셀은 커버리지가 넓기 때문에 사용자의 높이가 기지국과 사용자 사이의 거리에 주는 영향은 매우 작다. 따라서 2차원 기반 셀 모델에 다양한 path-loss 모델들을 사용하여 셀의 커버리지(coverage)와 신호 대 간섭 및 잡음 비(SINR, signal-to-interference-plus-noise-ratio)등을 측정할 수 있었다. 다수의 소형셀과 고층빌딩들이 밀집된 지역에서는 비교적 좁은 커버리지와 낮은 위치에 설치되는 기지국 환경으로 인해 높이가 고려된 3차원 공간에서 성능을 평가하는 것이 정확성에 있어서 더욱 중요해졌다. Indoor path-loss 모델^[3]에서는 높이를 고려하여 large scale fading을 계산할 수 있지만 지역마다 건물 구조와 배치가 다른 실제 모델에 적용하기가 힘들고 측정값과 시뮬레이션 값의 차이도 크다. 특히 소형셀에서는 3차원 공간을 최대한 활용하기 위해 3D 빔포밍(beamforming)을 고려하고 있는데, 기존의 2차원 기반 수학적 모델을 이용하여 3D 빔포밍 성능을 소형셀에서 분석하기엔 많은 어려움이 따른다.

정밀한 소형셀의 채널을 측정하기 위해 측정 장

비를 이용한 연구가 이루어져왔다^[4]. 하지만 소형셀의 채널은 주변 지형 및 건물의 구조에 많은 영향을 받기 때문에 매번 모든 소형셀에 측정 장비를 활용하는 것은 힘들다. 3D-ray tracing tool은 실제 측정값과 tool을 이용한 시뮬레이션 값이 잘 일치하는 것으로 알려져 있다^[5]. 논문 [5]은 벨연구소에서 개발한 3D-ray tracing tool인 Wireless System Engineering (WiSE)을 사용한 성능분석을 포함하고

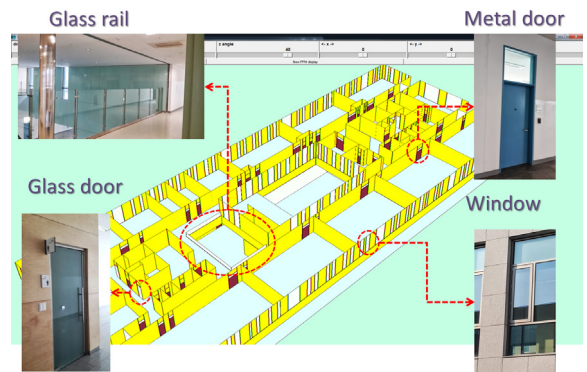


그림 2. 연세대학교 진리관 C동 2층 내부
 Fig. 2. Second floor interior of Yonsei University Veritas C

있다. 건물 내의 가구들의 배치를 고려하면 실제 측정값과 WiSE를 이용한 Rician K-factor와 path-loss와의 차이가 거의 일치함을 보였다. 따라서 3D-ray tracing tool을 사용하면 매번 측정 장비를 활용하지 않고도 소형셀 성능평가가 가능하다. 본 논문에서는

복잡해진 소형셀 네트워크에서 더욱 효과적이고 정확한 3D-ray tracing tool을 소개하고 어떻게 활용이 가능한지 연구하였다. 또한 2차원과 3차원에서의 성능분석 차이를 통해 3D-ray tracing tool의 필요성을 강조하였다.

II. 본 론

2.1. 3D-ray tracing tool 소개

본 논문에서는 벨연구소에서 개발한 WiSE를 3D-ray tracing tool로 사용하였으며 특징은 다음과 같다 :

a) 원하는 안테나패턴(pattern) 사용가능 :

안테나 파일(antenna file)을 만들어 2차원 수학적 모델에서 적용하기 힘든 3D 빔포밍과 같은 복잡한 시뮬레이션을 간단하게 시행할 수 있다.

b) 원하는 지형 및 건물 모델링 가능 :

벽 파일(wall file)을 만들어 건물 구조 및 재료까지 고려한 시뮬레이션이 가능하다. 기지국에서 방사된 신호(radiated signal)는 large scale fading을 겪고 벽에 반사, 투과, 그리고 회절 된다.

c) 3차원 분석 :

원하는 위치에 기지국 및 유저를 배치하여 높이까지 고려된 3차원 공간의 모든 지역에서 수신파위를 측정 할 수 있다. 또한, 양각(elevation)까지 고려된 3차원 angle of arrival (AoA), angular spread (AS) 등의 채널 파라미터를 측정할 수 있다.

위의 특징을 잘 활용하면 원하는 지형 모델링이 가능하며, 3D 빔포밍과 디지털 빔포밍 등이 포함된 실측에 가까운 시스템 레벨 시뮬레이션이 가능하다. 본 논문에서는 연세대학교의 진리관 C동을 모델링하여 indoor-to-indoor 환경에서의 시뮬레이션을 진행하였고, 규칙적 지형에서 outdoor-to-indoor 환경에서의 시뮬레이션을 진행하였다.

2.2. 3D-ray tracing tool 지형예제

2.2.1. Indoor-to-indoor 환경(연세대학교 공과대학 진리관 C동)

3D-ray tracing tool의 장점은 원하는 지형 및 건물 모델링이 가능하다는 점이다. 그림 1은 연세대학교에 있는 진리관 C동 건물을 Matlab 프로그래밍을 통해서 모델링하는 과정을 나타낸 그림이다. 실측에 가까운 모델링을 위해서 건물의 평면도를 사용하였으며 평면도를 Matlab 함수로 읽어 오기 위해 파워

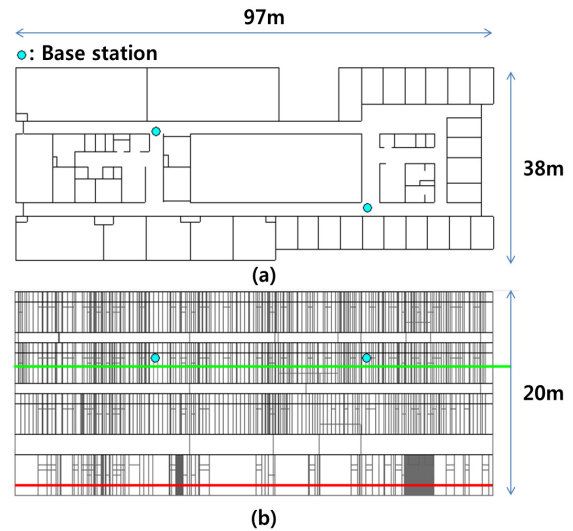


그림 3. 2개의 기지국이 설치된 Indoor to indoor 환경 : (a) top view, (b) elevation view
Fig. 3. Indoor to indoor environment with 2 BSs: (a) top view, (b) elevation view

포인트(PPT)를 이용하여 데생(dessin)을 하였고 벽의 재질을 고려하여 벽의 색을 다르게 하였다. 데생으로 그린 이미지파일을 Matlab으로 읽어서 3D-ray tracing tool의 벽 파일 포맷(format)에 맞추어 출력하게 된다. 위의 방법은 tool의 사용자가 원하는 지형을 모델링하는 방법 중 하나이며, 캐드(CAD) 등 다양한 어플리케이션(application)의 활용으로 모델링이 가능하다.

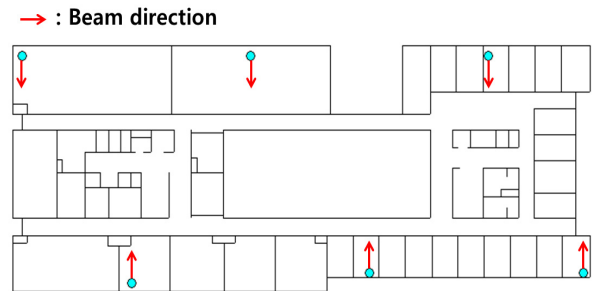


그림 4. 방향성 안테나 빔 방향
Fig. 4. Beam direction for directive antenna

3D-ray tracing tool은 건물 벽 재질마다 신호감쇄정도를 정할 수 있고 실제 시뮬레이션에 반영되기 때문에 실측에 가까운 성능 분석이 가능하다. 그림 2는 완성된 건물의 2층 내부 모습이다. 노란색은 콘크리트, 하얀색은 유리, 갈색은 금속 재질을 나타내며 이를 활용하여 유리난간, 유리문, 철문, 창문을 모델링하였다. 2층 내부의 유리난간을 통해 건물의 1층이 내려다 보일 정도로 모델링이 잘되었음

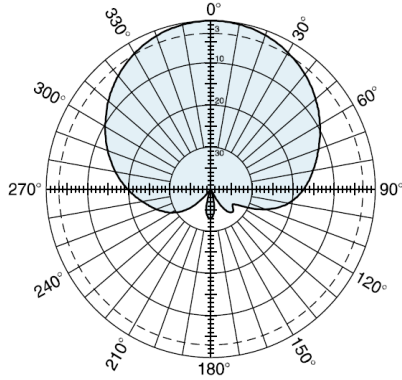


그림 5. Kathrein 안테나 패턴
Fig. 5. Patten of Kathrein antenna

을 확인할 수 있다. 건물은 총 4층이며 도넛형태를 가진다. 그림 3에서 (a)는 건물 위에서 내려다본 평면도이고 그림 3(b)은 건물의 옆에서 본 elevation view이다. Indoor-to-indoor 환경에서 2차원과 3차원 모델의 비교 시뮬레이션을 위해 완성된 건물 내부에 2개의 소형기지국을 설치하였다. 또한 방향성 안테나 환경의 성능평가를 위해 그림 4의 환경에서 6개의 기지국에 화살표 방향으로 빔의 방향을 설정하였다. 그림 5의 안테나 패턴은 미국의 Kathrein사에서 제공하는 패턴을 사용하였다⁶⁾.

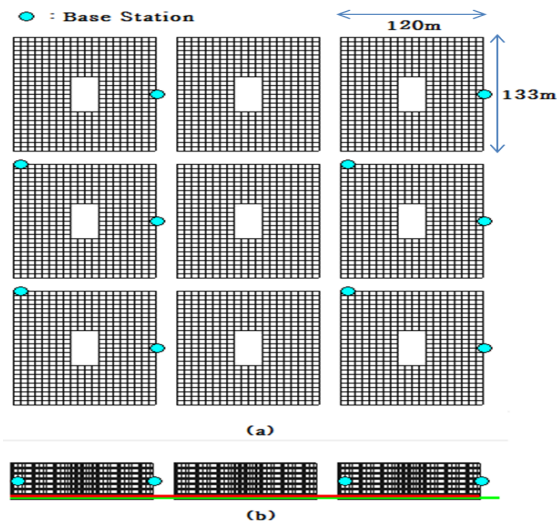


그림 6. 3×3 규칙 지형 : (a) top view, (b) elevation view
Fig. 6. 3×3 regular environment: (a) top view, (b) elevation view

2.2.2. Outdoor-to-indoor 환경(3X3 규칙 지형)

그림 6은 tool에서 제공한 벽 파일이며, 유럽 지형에서 흔히 볼 수 있는 도넛모양의 건물이 규칙적으로 배치된 환경이다. 총 7층 건물(층간높이 : 3m)이며 그림의 하늘색 원은 기지국이며 검은색 선은 벽과 창문이다. 그림 6(a)은 평면도이고 그림 6(b)은 elevation view이다. Outdoor-to-indoor 환경 시뮬레이션을 위해 9개의 건물에 10개의 기지국을 설치하였다. 3D-ray tracing tool의 출력파일을 통해 large scale fading이 고려된 수신 파워를 측정하고 Matlab을 이용해 전체 9개의 건물 중 가운데 건물의 SINR을 계산하였다.

III. 성능 평가

성능평가는 균일분포(uniform distribution)사용자를 가정하여 indoor-to-indoor 환경과 outdoor-to-indoor 환경에서 각각 시뮬레이션을 하였다. 유저는 가장 수신감도가 좋은 기지국으로 부터 서비스 받는다. 3D-ray tracing tool과 2차원 수학적 모델의 성능차이를 비교하기 위해서 3D-ray tracing tool에서는 그리드(grid)마다 수신파워를 측정하였고 SINR은 Matlab을 활용하여 측정하였다. 3D-ray tracing tool에서 사용한 상세 파라미터는 표 1에 소개되어 있다. 표 1에서 bounce는 신호의 최대 반사 횟수를 의미한다. 2차원 수학적 모델에서는 indoor path-loss 모델[3]을 사용하여 path-loss를 계산하여 수신과

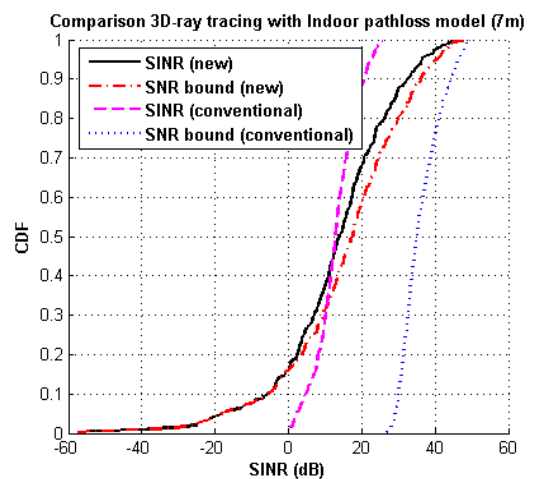


그림 7. 3D-ray tracing tool과 indoor path-loss model의 비교 (2 기지국, 성능평가 높이 : 7m, indoor to indoor)
Fig. 7. Comparison 3D-ray tracing tool with indoor path-loss model (2 BSS, simulation height: 7m, indoor to indoor)

위 및 SINR을 측정하였다. 성능분석을 위한 건물은 도넛형태이기 때문에 건물의 가운데에 위치한 그리드는 제외하였다. Indoor path-loss model의 수식은 아래와 같다.

$$L_p = \overline{L}_p(d_0) + 10\gamma \log(d) + L_f(n) + X_\sigma \text{ (dB)}. \quad (1)$$

3.1. Indoor-to-indoor 환경(연세대학교 공과대학 진리관 C동)

Indoor-to-indoor 환경에서는 (1)에서 office 파라미터인 reference path-loss at the first meter ($\overline{L}_p(d_0) = 38$), path-loss exponent ($\gamma = 3.0$), signal attenuation through n th floor ($L_f(n) = 15 + 4(n-1)$), shadowing effect ($X_\sigma = 10$)을 사용하였다. 3D-ray tracing tool과 indoor path-loss model의 성능 비교를 위해 건물 3층의 천장인 13.5m 위치에 2개의 소형 기지국을 설치하여 한층 아래인 2층의 7m 높이에서 성능을 분석하였다. 또한 방향성 안테나와 등방성 안테나의 비교를 위해 13.5m 위치에 6개의 소형 기지국을 설치하여 13.5m 높이에서 각각 방향성 안테나와 등방성 안테나의 성능평가를 실시하였다.

그림 7은 2개의 기지국이 설치된 indoor-to-indoor 환경에서의 SINR의 CDF이다. SINR 커브는 인접 셀을 신호를 간섭신호 처리하였고 SNR bound 커브는 인접셀 간섭신호를 고려하지 않은(즉, 이론적으로 가능한 최대치) 그래프이다. 그림 7에서 3D-ra

y tracing tool의 결과가 실제 측정값과 거의 일치(약 6 dB 이내 차이를 보인다고 보고됨[5])한다는 점에서 indoor path-loss 모델을 이용한 결과는 실제 측정값과 거리가 멀다는 것을 확인할 수 있다. 2차원 수학적 모델에서는 셀의 커버리지가 보로노이 셀의 형태를 보이기 때문에 SINR과 SNR bound의 기울기가 동일한데 이는 실제 지형에서의 셀 커버리지를 잘 반영하지 못함을 보여준다.

그림 8은 6개의 기지국이 설치된 indoor-to-indoor 환경에서의 SINR의 CDF이다. 각각의 기지국에서 방향성 안테나와 등방성 안테나를 사용했을 때 성능을 비교하였다. 방향성 안테나를 사용한 기지국이 더 좋은 SINR 환경을 제공함을 확인할 수 있다. 2차원 수학적 모델에서는 기지국에서 사용하는 안테나 패턴을 적용하여 평가하기 힘들지만 3D-ray tracing tool을 사용하면 손쉽게 비교가 가능하다. 또한 빔포밍 알고리즘을 적용한다면 그림 8에서 보다 더 나은 성능을 얻을 수 있을 것이며 이는 2차원 수학적 모델에서보다 더 쉽게 구할 수 있다.

3.2. Outdoor-to-indoor 환경(3X3 규칙 지형)

Outdoor-to-indoor 환경에서는 residential 파라미터인 reference path-loss at the first meter ($\overline{L}_p(d_0) = 38$), path-loss exponent ($\gamma = 3.0$), signal attenuation through n th floor ($L_f(n) = 4n$), shadowing effect ($X_\sigma = 8$)을 사용하였다. 건물의 4층인 11.5m에 10개의 소형 기지국을 설치하여 각각 3m와 11.5m의

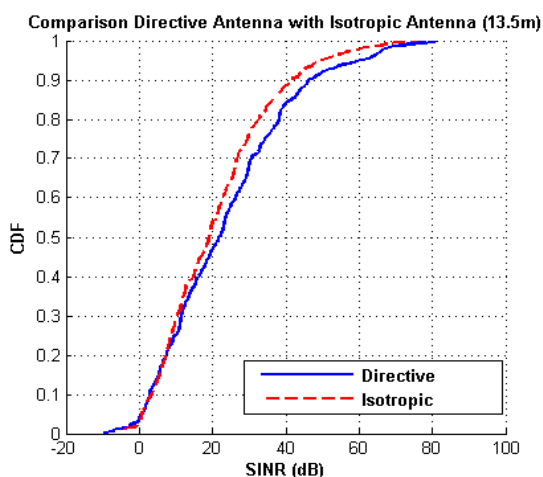


그림 8. 방향성 안테나와 등방성 안테나의 비교 (6 기지국, 성능평가 높이 : 13.5m, indoor to indoor)
Fig. 8. Comparison directive antenna with isotropic antenna (6 BSs, simulation height: 13.5m, indoor to indoor)

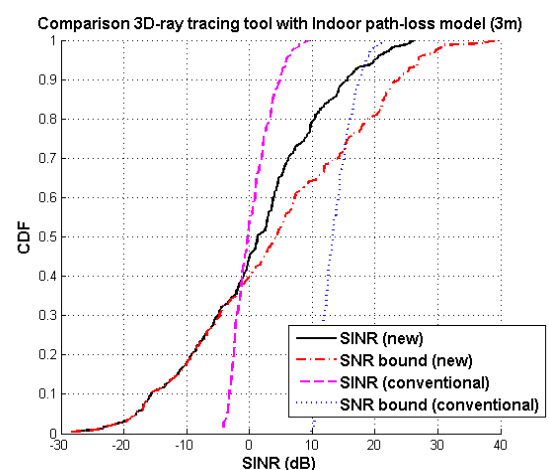


그림 9. 3D-ray tracing tool과 indoor path-loss model의 비교 (10 기지국, 성능평가 높이 : 3m, outdoor to indoor)
Fig. 9. Comparison 3D-ray tracing tool with indoor path-loss model (10 BSs, simulation height: 3m, outdoor to indoor)

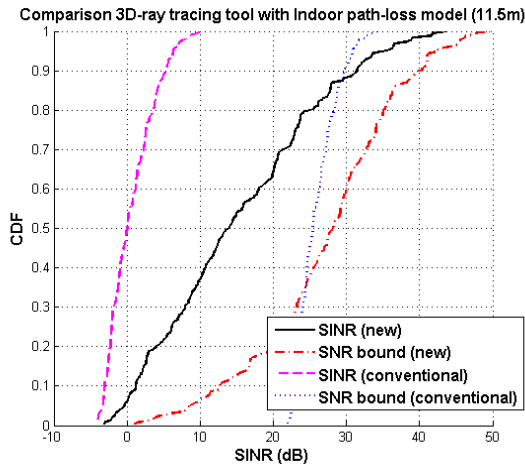


그림 10. 3D-ray tracing tool과 indoor path-loss model의 비교 (10 기지국, 성능평가 높이 : 11.5m, outdoor to indoor)
 Fig. 10. Comparison 3D-ray tracing tool with indoor path-loss model (10 BSs, simulation height: 11.5m, outdoor to indoor)

높이에서 성능을 분석하였다.

그림 9와 그림 10은 각각 3m와 11.5m의 outdoor-to-indoor 환경에서의 SINR의 CDF이다. 3D-ray tracing tool의 결과에서 3m보다 11.5m에서 SNR 커브와 SINR 커브의 차이가 더 큰데 이는 기지국의 높이가 11.5m에 위치해 있기 때문에 3m 지점은 타 기지국의 간섭이 감쇄가 많이 되었음을 의미한다. 즉, 3m 지점(잡음 제약 환경 : noise limited environment)에서는 11.5m 지점(간섭 제약 환경 : interfer

표 1. 성능평가 파라미터
 Table 1. Simulation parameter

	Indoor to indoor	Outdoor to indoor
BS height	13.5m	11.5m
Grid size	3m×3m	7m×7m
BS power	20mW	100mW
Noise floor	-174dBm/Hz	
Bounce	4	
BS ant.	Isotropic/Directive	
Frequency	2.4GHz	
Bandwidth	10MHz	

ence limited environment) 대비 간섭보다 잡음의 영향을 더 많이 받는다. 하지만 2차원 수학적 모델은 잡음 제약 환경과 간섭 제약 환경을 잘 표현하지 못하므로 3차원 공간 해석과 거리가 멀다는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 소형셀 네트워크에서 사용가능한 새로운 성능평가 방법인 3D-ray tracing tool을 소개하고, 성능평가를 실시하여 2차원 수학적 모델과 비교하였다. 3D-ray tracing tool을 사용하면 안테나 방사패턴을 정할 수 있고, 원하는 지형을 모델링할 수 있으며, 3차원 채널 분석 및 사후처리를 통해 다양한 시뮬레이션을 진행할 수 있는 장점이 있다. 또한, 정확성측면에서도 실측과 6dB 이내로 건물내부의 가구 배치 등을 고려하면 상당히 정확한 도구이다. 연세대학교 진리관 C동 건물을 모델링하여 indoor-to-indoor 환경에서 성능평가를 실시하였고, 규칙적 지형으로 확장하여 outdoor-to-indoor 환경에서 성능평가를 실시하였다. 성능평가 결과 소형셀 환경에서는 보로노이 셀과는 다르게 지형에 영향을 많이 받으며 3차원 공간에서 높이에 따라 성능차이가 남을 확인할 수 있었다. 따라서 매크로셀에서 소형셀 네트워크 환경으로 셀의 커버리지가 좁아지면서 2차원 채널 분석보다 3차원 채널 분석이 더 중요해지고 있는 만큼 기존의 성능평가 방법에서 벗어나 3D-ray tracing tool을 활용한 새로운 성능평가 방법이 더욱더 중요해질 것이다. 향후 실제 안테나 빔 패턴을 고려하여 다중 셀 환경에서 간섭 제어 알고리즘설계[7]-[9] 및 하이브리드 빔포밍 알고리즘 설계[10]에 3D-ray tracing tool을 활용할 계획이다.

References

[1] Y.-G. Lim, M. K. Jeong, K. S. Kim, D. K. Kim, and C.-B. Chae, "New performance evaluation methodology for small cell networks," in *Proc. Korea Inform. Commun. Soc. (KICS) Fall Conf.*, pp. 276-277, Seoul, Korea, Nov. 2011.

[2] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE: The UMTS Long Term Evolution from theory to practice*, 2nd Ed., WILEY, 2010.

- [3] V. K. Garg, *Wireless Communications and Networking*, Morgan Kaufmann, 2007.
- [4] S. S. Ghassemzadeh, R. Jana, C. W. Rice, W. Turin, and V. Tarokh, "Measurement and modeling of an ultra-wide bandwidth indoor channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 10, pp. 1786-1796, Oct. 2004.
- [5] R. Valenzuela, D. Chizhik, and J. Ling, "Measured and predicted correlation between local average power and small scale fading in indoor wireless communication channels," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. Spring*, vol. 3, pp. 2104-2108, Ottawa, Canada, May 1998.
- [6] Kathrein Scala Division, *65° Pannel antenna*, retrieved Oct., 15, 2013, from <http://www.kathrein-scala.com/catalog/742215.pdf>.
- [7] C.-B. Chae, I. Hwang, R. W. Heath, and V. Tarokh, "Interference aware-coordinated beamforming in a multi-cell system," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 10, pp. 3692-3703, Oct. 2012.
- [8] V. Cadambe and S. Jafar, "Interference alignment and the degrees of freedom of the K user interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.
- [9] S. Jafar, "Blind interference alignment," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 6, no. 3, pp. 216-227, June 2012.
- [10] N. Celik, W. Kim, M. Demirkol, M. Iskander, and R. Emrick, "Implementation and experimental verification of hybrid smart-antenna beamforming algorithm," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 280-283, Dec. 2006.

임 연 근 (Yeon-Geun Lim)



2012년 3월~현재 연세대학교
글로벌융합공학부 석박사
통합과정

채 찬 병 (Chan-Byoung Chae)



2011년 3월~현재 연세대학교
글로벌융합공학부 조교수