

기지국용 판넬 안테나(4×2 Dipole Array)의 근역장 분석

Analysis of Near Field for Base Station Panel Antenna(4×2 Dipole Array)

이덕로 · 박주덕* · 최재익* · 김 남**

Dugro Lee · Juderk Park* · Jaec Choi* · Nam Kim**

요 약

본 논문에서는 cellular 이동통신용 기지국 안테나와 같이 사용되는 파장에 비해 비교적 부피가 큰 해석 대상체의 근거리장에서 전력 밀도를 계산한 내용을 다루었다. 현재 국내에서 cellular 이동통신 기지국용 안테나로 널리 사용되는 판넬형 섹터 안테나를 모델링하고 FDTD 계산법으로 reactive 근거리장의 전자계 분포를 계산하였으며 near to far 변환 통하여 원거리장의 안테나 이득을 구하였다. 그리고 radiating 근거리장의 전력밀도를 계산하기 위하여 원거리장의 이득을 이용하여 gain-based 모델을 적용하였다. 끝으로 radiating 근거리장의 전력 밀도 계산 결과와 ICNIRP guideline의 전력밀도에 대한 일반인 및 직업인의 노출 제한 값을 고려하여 인증 거리 (compliance distance)를 산출하였다. Gain based 모델을 이용한 계산 결과를 표면주사(surface scanning) 방식을 이용한 전력밀도의 측정 결과와 비교한 결과 주방사 방향의 중심 위치에서 계산된 값은 gain based model을 이용할 경우 -14.55 dBm이고, 측정된 값은 -15.75 dBm으로 케이블 및 커넥터의 손실을 감안하면 매우 정확한 것으로 나타났다.

Abstract

In this paper, power density in near field is calculated about analytic object which has comparatively large volume in considering used wavelength such as cellular base station antenna. Panel sector antenna which is used widely in domestic cellular wireless communication system is modeled and electromagnetic field distribution in reactive near field region is calculated by FDTD(Finite Difference Time Domain) method. After that, antenna gain in far field region is obtained by near to far transformation. Power spectral density in radiated near field is calculated in applying to gain-based model with antenna gain in far field. Finally, compliance distance is obtained in considering the result from radiated near field calculation and basic restrictions on occupational and general public exposure limits in ICNIRP guideline. In the center of main radiating position, the result from gain-based model is -14.55 dBm and the result from surface scanning method is -15.75 dBm. When the losses from cables and connectors used in measurement are considered, the results from gain-based model and surface scanning method are nearly coincident.

Key words : FDTD, Antenna Modeling, Near Field, Compliance Distance

I. 서 론

최근 이동통신환경은 다중 매체의 통합화에 따라 통신업체간 경쟁이 치열해지고, 디지털 융합을 통한

언제 어디서나 통신을 가능케 하는 환경을 충족시키기 위하여 다양한 시스템이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 도심 지역을 중심으로 한 cell당 가입자 수는 증가하고 있는 추세이며, 한 셀 내의 가입자 수는

SK텔레콤 중부 Network 본부(Middle Regional Network Division, SK Telecom)

*한국전자통신연구원 전자파환경연구팀(EME Team, Radio Technology Research Group, ETRI)

**충북대학교 전기전자공학부(Dept. of Computer & Communication Engineering, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20040223-020

· 수정완료일자 : 2004년 4월 26일

채널 용량의 한계 때문에 제한적이다. 따라서 한 cell 에서 수용하는 범위(coverage)의 반경은 점점 작아지고 있고 기지국의 수는 늘어나고 있다. 이로 인하여 이동통신에 종사하는 직업인들 및 인근 지역에 거주하는 일반인들에 대하여 이동통신 기지국 안테나로부터 방사되는 전자파의 노출에 대한 우려가 점점 커지고 있다. 이동통신 기지국의 경우 도심 지역과 교외지역을 비교하여 볼 때 수용할 수 있는 가입자 수의 차이는 있지만 coverage의 반경을 고려할 때 채널당 안테나의 출력은 수십 W에 이른다.

ICNIR(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)의 전자기파 노출에 대한 인체 보호지침에서는 직업인 및 일반인에 대한 전자파 흡수율 및 전력밀도의 제한 값을 명시하고 있다^[1]. 인체 전신에 대한 노출 환경을 고려하여야 하는 기지국 안테나의 노출에 대하여 전자파 흡수율로서 제한 값을 설정하는 방식은 계산 및 측정방법에 제약이 따르므로 유럽의 EN50383 등의 기초 기준을 중심으로 전자기장의 세기 또는 전력밀도를 제한값으로 채택하고 있다^[2]. 표 1에 본 논문에서 예로 적용한 기지국용 판넬 안테나의 사용주파수 대역에 해당하는 직업인 및 일반인에 대한 ICNIR의 기준 레벨을 나타내었다. 주파수 900 MHz에 대하여 일반인 및 직업인에 적용되는 전력밀도의 기준 레벨은 각각 4.5 [W/m²]와 22.5 [W/m²]이다.

이동통신 단말기의 근거리장에서 전자기장의 세기를 구하는 해석방법과 비교하여 볼 때, 기지국 안테나와 같이 사용되는 파장에 비해 크기가 큰 해석 대상체에 대한 근거리장 계산은 FDTD 계산법과 같은 total field 계산법을 적용하면 시간과 컴퓨터 자원의 측면에서 많은 비용이 들어간다. 본 논문에서는 근거리장 영역을 안테나의 중심으로부터 관측점까지의 거리에 따라 reactive 근거리장 영역과 radiating

근거리장 영역으로 구분하여 안테나로부터 가장 가까운 위치에 존재하는 reactive 근거리장 영역에 대해서만 FDTD 계산법을 적용하였으며, 원거리장의 안테나 이득은 near to far 변환을 통하여 계산하고 측정된 값과 비교하여 보았다. 그리고 계산된 원거리장의 안테나 이득을 gain based 모델의 수식에 적용하여 radiating 근거리장 영역의 전력밀도를 계산하였다. 최종적으로 계산된 전력밀도와 ICNIR guideline의 기준레벨을 고려하여 제한 인증 거리 (compliance distance)를 산출하여 표면 주사(surface scanning) 방식으로 측정된 전력밀도와 비교하였다.

II. 안테나의 모델링 및 FDTD 계산

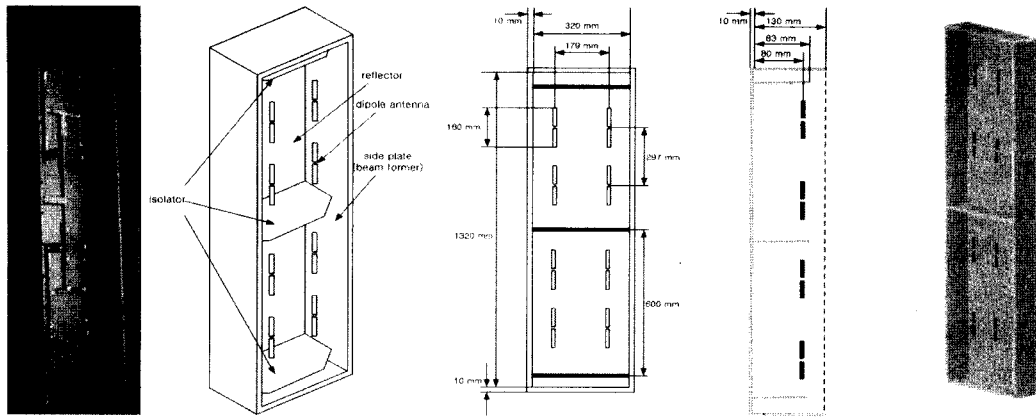
2-1 안테나 모델과 해석 조건

그림 1(a)에 본 논문에서 수치해석을 위해 사용한 판넬 안테나를 나타내었다. 사용된 안테나는 국내에서 824~894 MHz 주파수 대역에서 cellular 이동 전화 서비스를 위해 널리 사용되고 있는 모델로서 대역폭은 70 MHz, 이득은 13.5 dB 이상으로 동작하며 수직편파를 이용하고 최대 허용전력은 350 W 정도이다. 그림 1(b)와 같이 내부에 다이폴 안테나가 4×2로 배열되어 있고 다이폴 간의 상호간섭을 줄이기 위한 isolator, 수평방향의 빔폭을 조절하는 측면 판넬(side panel), 전방향으로 이득을 높이기 위한 후면 반사판(reflector)으로 구성되어 있다. 그림 1(e)는 FDTD 해석 기법을 적용하기 위하여 이산화한 모양을 나타내고 있다. FDTD 수치해석을 위해 공간 이산화 간격은 3 mm로서 균일하게 하였으며, 각 다이폴 안테나의 중심에 voltage source 방식을 이용하여 급전하였다. 그림 1(a)와 같이 실제 안테나는 각 다이폴 안테나에 동일한 위상이 급전되도록 후면 반사판에 근접하게 급전선이 설계되어 있다. 본 논문에서는 각

표 1. 400 MHz에서 2,000 MHz까지의 주파수 범위에서 전자기장의 노출에 대한 일반인 및 직업인의 기준 레벨
Table 1. ICNIR reference levels for occupational and non-occupational exposure to electromagnetic fields in the frequency range 400 to 2,000 MHz.

적용 대상	전기장의 세기(V/m)	자기장의 세기(A/m)	전력 밀도(W/m ²)
일반인	1.375 $f^{1/2}$	0.0037 $f^{1/2}$	$f/200$
직업인	3 $f^{1/2}$	0.008 $f^{1/2}$	$f/40$

f는 주파수(단위 MHz)



(a) 안테나 사진 (b) 안테나 구조 (c) 안테나 정면크기 (d) 안테나 측면크기 (e) 수학적 모델
 (a) Antenna picture (b) Antenna structure (c) Antenna front size (d) Antenna side size (e) Numerical model

그림 1. 기지국용 판넬 안테나(4×2 다이폴 배열)의 구조 및 수치해석 모델
 Fig. 1. Structure of the base station antenna(4×2 dipole array) and numerical model.

8개의 다이폴 안테나에 동위상으로 voltage source를 인가하여 계산을 수행하였다. 경계조건은 PML(perfect matched layer)로서 해석 대상체의 모델과 20 cell 이상의 이격을 두어 경계로부터의 반사를 최소화하였다.

2-2 주파수 특성 및 방사패턴

그림 2에 안테나의 반사계수를 나타내었다. 계산된 결과와 측정된 결과를 비교하면 중심 주파수 850 MHz 부근에서 매우 유사하게 나타난다. -10 dB 대역폭은 90 MHz 정도로서 상용의 이동통신 서비스를 위해 요구되는 70 MHz 이상일 조건을 만족하고 있다.

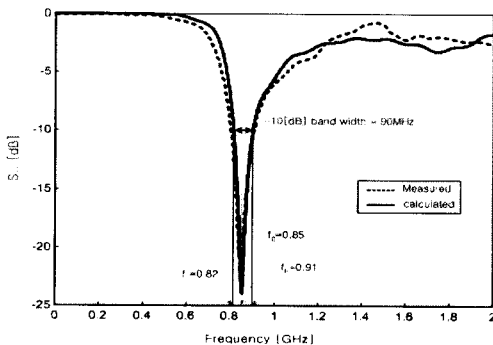
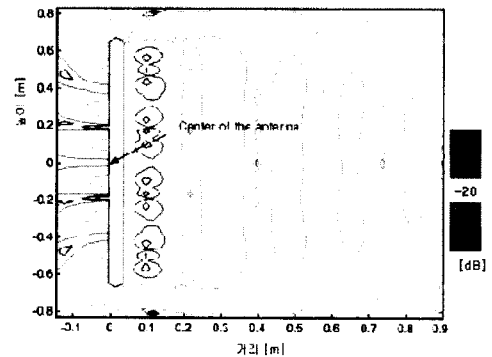
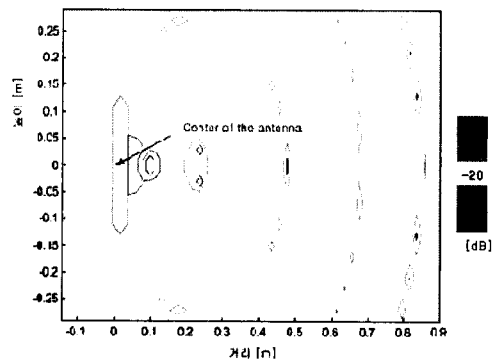


그림 2. 기지국용 판넬 안테나(4×2 다이폴 배열)의 반사계수
 Fig. 2. Reflection coefficient characteristic of the panel antenna(4×2 dipole array).



(a) 수직 평면
 (a) Vertical plane



(b) 수평 평면
 (b) Horizontal plane

그림 3. Reactive 근거리장에서의 전기장 세기 분포
 Fig. 3. Distribution of electromagnetic field density in the reactive near field.

그림 3에 근거리장에서 전기장 세기의 분포를 상대적으로 크기로 나타내었다. 안테나의 중심으로부터 주 방사방향으로 90 cm까지 FDTD 해석방법으로 코드를 작성하여 계산하였고, 입력된 신호는 sinusoidal wave 형태의 CW(continuous Wave), 경계조건은 PML 8층, 총 계산된 cell의 개수는 360(수직방향) × 200(수평방향) × 600(전방)개로서 사용된 컴퓨터 재원은 2.4 GHz dual CPU, 2 Gbyte RAM이다. 계산에 소요된 시간은 대략 86시간 32분 정도로서 이동통신 단말기의 해석과 비교하여 매우 많은 시간과 높은 컴퓨터 재원을 필요로 한다.

그림 4에 근거리장의 해석결과를 near to far 변환을 통하여 얻은 결과와 원거리장의 안테나 이득을 측정된 결과를 나타내었다. 이동통신 서비스에서 현재 이용되고 있는 송신주파수대역 894 MHz에 대하여 나타낸 결과이다. 수직평면상에서 계산결과와 측정결과와의 Main lobe는 거의 일치하고 있으나 Side

lobe에서 오차가 발생하고 있다. 이는 안테나 제작시 기지국 품질향상을 위하여 인접기지국 신호에 영향을 주지 않도록 Upper-side lobe를 인위적으로 제거하였기 때문에 발생하는 현상이다. 수평평면에서의 결과는 시뮬레이션 결과가 측정 결과에 가깝게 양호한 해석이 이루어졌다.

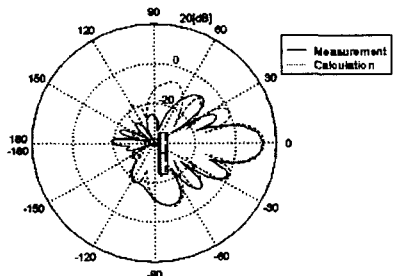
III. Radiating 근거리장의 전력밀도 계산

안테나의 근역장은 안테나의 크기(판넬형 섹터 안테나에서는 안테나의 길이) D 와 사용되는 파장에 따라 reactive 근거리장과 radiating 근거리장으로 구분된다. 안테나의 중심으로부터 관측지점까지의 거리 R , 사용되는 파장 λ 에 대하여 $R < \lambda/4$ 인 조건을 만족하는 영역에 대하여 reactive 근거리장 영역으로 $\lambda/4 < R < 2D^2/\lambda$ 인 조건에 대하여 radiating 근거리장 영역으로 구분한다. 그러나 이동통신 단말기와 같이 사용파장에 비해 비교적 크기가 작은 대상체에 대한 해석에서는 $2D^2/\lambda$ 인 거리가 $\lambda/4$ 이내의 거리에 포함되므로 근거리장을 구분할 필요가 없다^[3]. 또한 FDTD 계산법과 같은 total field 계산 방법으로 근거리장 내의 전자계 계산을 수행할 때 계산하여야 하는 mesh의 수가 적으므로 컴퓨터의 계산 용량과 계산시간에 대하여 크게 제약받지 않는다. 이동통신 기지국용 안테나의 경우는 안테나 길이가 수 m에 달하므로 FDTD와 같이 한 파장에 대하여 $\lambda/20 \sim \lambda/10$ 정도의 이산화 간격을 필요로 하는 방식의 계산에서는 매우 많은 변수의 계산을 요구한다.

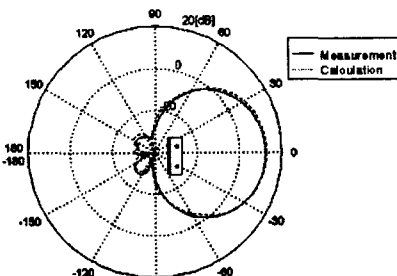
이동통신 기지국에 대한 인체노출을 예측하는 한 단하고 정확한 2가지 모델이 제시되었다^{[5],[6]}. 첫 번째 모델은 synthetic model로 식 (1)과 같이 안테나 배열에서 하나의 단위 셀에 대한 near field가 계산되고 안테나 전체에 대한 near field는 단위 셀을 수평적으로 천이된 field를 겹침으로서 유도된다. 천이는 단위 셀 간의 거리에 대응된다.

$$E(R, \theta, \phi) \cong \sqrt{30P_{in}G(\theta, \phi)} / R \quad (1)$$

여기에서 P_{in} 은 안테나의 입력전력을 나타내며 R 은 안테나의 위상중심으로부터 관찰점까지 거리이다. 하지만 식 (1)은 안테나로부터 $R < 2D^2/\lambda$ 의 거리에서는 유효하지 않다. 식 (1)에서 안테나에 근접하



(a) 수직 평면
(a) Vertical plane



(b) 수평 평면
(b) Horizontal plane

그림 4. 기지국용 판넬 안테나(4×2 다이폴 배열)의 이득(계산 및 측정 결과)
Fig. 4. Gain of the panel antenna(4×2 dipole array) in far field region(calculated and measured results).

계 되면 모든 전력은 한 점(point source)으로부터 방사된다고 가정하였기 때문에 배열 안테나의 경우 각 안테나 간의 공간 이격에 따른 위상차 때문에 Radiated near field의 계산시 오차가 발생된다. 그래서 위상과 크기를 고려한 Gain based model을 이용하여 안테나의 radiated near field를 계산해 보았다. Gain based model은 synthetic model로부터 유도되며 안테나의 near field는 천위 셀로부터 계산된 far field의 합으로 근사화 된다. 하나의 단위셀에 대한 파장의 차수로 안테나로부터 약 2파장 떨어진 지점에서의 radiated near field에 근사화 된다. 이 방법은 계산시간과 메모리에 대한 제한이 적어 인체노출에 대한 예측시 매우 편리하다. 이에 대한 수식은 식 (2)와 같다.

$$E(R, \theta, \phi) \cong \sum_{i=1}^{N_{cells}} \frac{\sqrt{30P_{celli}} G_{cell}(\theta_i, \phi_i)}{R_i} e^{j(kR_i, \phi_i)} \rho(\theta_i, \phi_i) \quad (2)$$

P_{celli} 는 i 번째의 단위 cell의 입력전력이며, ϕ_i 는 위상천이, R_i 는 i 번째의 dipole로부터 관찰점까지의 거리이다. $\rho(\theta_i, \phi_i)$ 는 i 번째의 dipole의 중심을 원점으로 하는 구형 좌표시스템에서 관찰점 방향으로 단위 벡터이다.

그림 5는 FDTD 해석을 통해 계산된 원거리장의 이득을 gain based model에 적용하여 compliance distance를 계산한 결과이다. 각 유닛에 입력되는 파형의 위상차가 없고 동일 크기로 가정하였다. 즉 위상차에 의한 전기적인 기울임을 고려하지 않았다. 15 m까지의 거리에 대하여 나타내었고 FDTD 계산

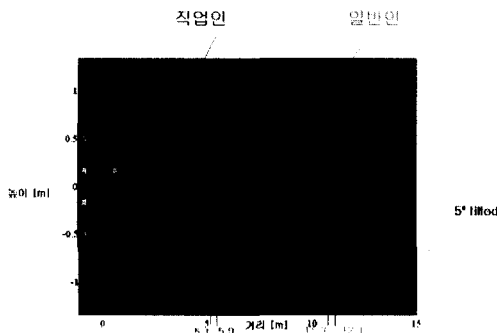
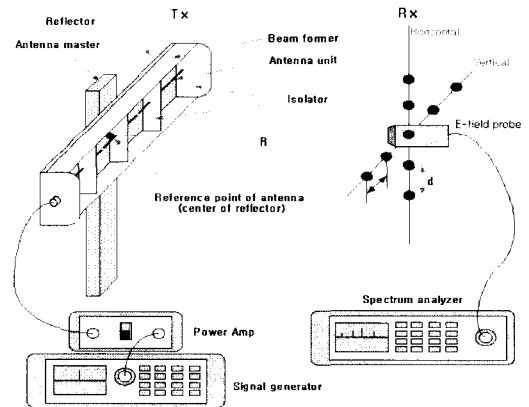


그림 5. Compliance distance 계산
Fig. 5. Calculation of compliance distance.

에 사용된 동일한 재원을 이용하여 계산에 소요된 시간은 수분 이내로서 매우 빠른 계산이 가능하다. ICNIRP Guideline의 노출 제한 값을 고려하여 compliance 거리를 나타내면 일반인의 경우 안테나로부터 12.1 m, 직업인의 경우 5.9 m로 나타났으며, 안테나에 대하여 5도의 경사 방향에 대하여 compliance 거리는 일반인의 경우 11.3 m, 직업인의 경우 5.1 m 정도로 나타난다.

IV. 전기장의 세기 측정

Gain based model을 이용한 compliance distance의 계산결과를 검증하기 위하여 그림 6과 같은 실험 설비로 전력밀도를 측정하였다. Signal generator 및



(a) 측정 연결도
(a) Cable running and measurement equipment set-up



(b) 측정 모습
(b) The picture of measurement

그림 6. 전력밀도 측정 실험 설비
Fig. 6. System setup for power density measurement.

power amp를 이용하여 안테나에 주파수가 894 MHz 이고 전력이 50 W인 신호를 입력하였다. 기준점으로부터 측정점까지의 거리 R 은 3 m, 측정점의 이동 거리 d 는 0.2 m 단위로 이동하면서 측정 프로브에 Spectrum analyzer를 연결하여 안테나로부터 방사되는 전기장의 세기를 측정하였다. 측정에 사용된 프로브는 ORBIT/FR사의 AL-PRB-975 모델이며 높이가 12.4 cm, 넓이가 24.8 cm, 사용되는 주파수 대역은 0.7~1.2 GHz, Wave guide type은 WR975 이득이 0.85 GHz에서 6.35 dB, 0.9 GHz에서 6.6 dB이다.

그림 7은 Huygen's principle을 이용하여 reactive near field를 감싸는 가상의 폐곡면으로부터 radiating near field의 값을 구한 결과와 gain based model을 이용하여 계산한 결과, 그리고 측정을 통하여 얻어진 결과를 비교한 것이다. 그림 7(a)는 수평방향으로 측정안테나를 이동하면서 측정된 값이고, (b)는 수직방

향 측정안테나를 이동시키면서 측정된 것이다. 주방사방향의 중심 위치에서 계산된 값은 Huygen's principle을 이용할 경우 -13.14 dBm, gain based mode을 이용할 경우 -14.55 dBm이고, 측정된 값은 -15.75 dBm으로 나타났다. Huygen's principle을 이용할 경우, radiating 영역의 한 지점을 계산하기 위하여 참조하여야 하는 reactive 영역에서 폐곡면의 값들이 늘어나면서 round-off error가 커져서 좀 더 큰 값을 나타낸다^[4]. 측정에서 커넥터 및 케이블 등으로부터 발생하는 손실을 감안하면 측정된 값과 gain-based model을 이용한 계산값은 매우 유사한 것으로 나타났다. 이러한 값들은 안테나의 입력 전력을 50 W로 환산하여 안테나의 전방향으로 일반인 적용 기준에 대하여 12 m 근처에서 직업인 기준으로 6 m 근처에서 compliance 거리가 설정됨을 나타내는 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 cellular 이동통신용 기지국 안테나와 같이 사용되는 파장에 비해 비교적 부피가 큰 해석 대상체의 근거리장 해석을 위하여 FDTD 계산법과 gain based 모델을 이용한 해석의 내용을 다루었다. 국내에서 널리 사용되고 있는 기지국용(4x2 다이폴 배열) 판넬 안테나를 모델링하여 reactive 근거리장 및 원거리장의 계산을 수행한 후 gain based model을 적용하여 radiating 근거리장을 해석한 결과는 측정을 통하여 검증한 결과와 유사한 것으로 나타났다. 해석 공간이 넓을 경우 FDTD 방식의 해석 방식과 비교하여 시간과 컴퓨터 자원에 대한 제약이 적은 유용한 방법임이 입증되었다.

출력을 50 W로 가정하고 ICNIRP 인체보호 지침의 노출 제한 값을 고려하여 compliance 거리를 계산한 결과, 직업인과 일반인에 대하여 각각 5.9 m, 12.1 m로 나타났다. 대부분의 이동통신 기지국용 안테나가 철탑이나 건물 옥상 등의 높은 위치에 존재하는 점을 감안하면 지면에서 compliance 거리는 보다 더 먼 거리로 나타난다.

참 고 문 헌

[1] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic

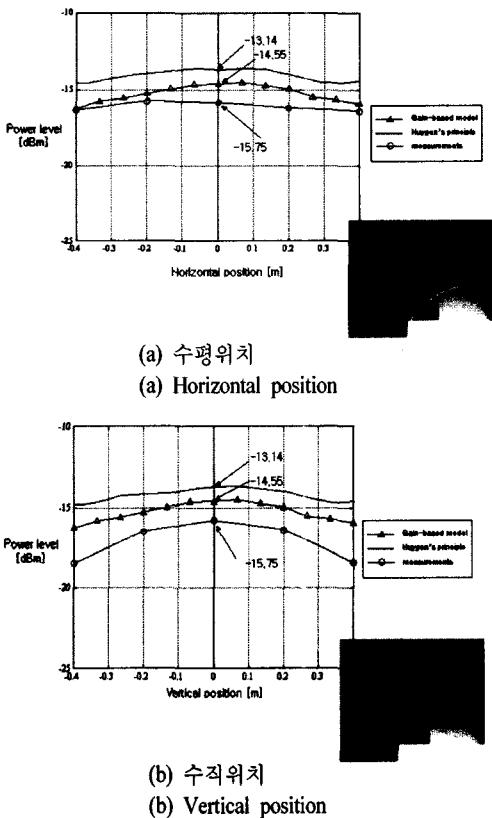


그림 7. 전력밀도 계산 및 측정 결과 비교
Fig. 7. Comparison between the calculation and the measurement in power spectral density in near field from antenna.

Fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*. vol. 74, no. 4, pp. 494-522, Apr. 1998.

[2] CENELEC, "Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and terminal stations for wireless telecommunications system(110 MHz~40 GHz)", The European Standard EN 50383, 2002.

[3] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design, second edition*, New York: Haper & Row, pp. 138-142, 1997.

[4] Allen Taflove, *Advanced in Computational Electrodynamics: The finite-Difference Time-Domain Me-*

thod, Boston & London, Artech House, 1998.

[5] A. Faraone, Y. T. Roger, K. H. Joyner and Q. Balzano, "Estimation of the average power density in the vicinity of cellular base-station collinear array antennas", *IEEE Trans on VT*, vol. 49, pp. 984-996, May 2000.

[6] Z. Altman, B. Begasse, C. Dale, A. Karwowski, J. Wiart, W. Man-Fai and L. Gattoufi, "Efficient models for base station antennas for human exposure assessment", *Electromagnetic Compatibility, IEEE Trans. on EMC*, vol. 44, no. 4, pp. 588-592, Nov. 2002.

이 덕 로



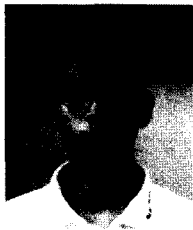
1996년 2월: 충북대학교 전기공학과 (공학사)
 2001년 3월~현재: 충북대학교 정보통신공학과 대학원 재학중
 1997년 1월~현재: SK텔레콤 중부 Network 본부 근무
 [주 관심분야] 이동통신 시스템 및 전파전파, 전자파 인체의 영향

최 재 익



1981년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 고려대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1995년 2월: 고려대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1983년 2월~현재: 한국전자통신연구원 전자파환경연구팀 팀장
 [주 관심분야] 위성통신/이동통신 안테나 및 RF 기술 등

박 주 덕



1997년: 충북대학교 정보통신공학과 (공학사)
 1999년: 충북대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2000년~현재: ETRI 전자파환경연구팀 연구원
 [주 관심분야] EMF, SAR, Antenna design

김 남



1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
 1992년 8월~1993년 8월: 미 Stanford 대학교 방문교수
 2000년 3월~2001년 2월: 미 California Technology Institute(Caltech) 방문교수
 1989년~현재: 충북대학교 전기전자공학부 교수, 컴퓨터 정보통신연구소
 [주 관심분야] 이동통신 및 전파전파, 마이크로파 전송선로 해석, EMI/EMC 및 전자파 인체보호 규격