

# FDTD 계산과 측정에 의한 휴대폰 SAR 비교

## Comparison of FDTD Computed and Measured SAR of Hand-Held Mobile Phone

홍수원\* · 오학태\* · 박천석\*\*

Soo-Won Hong\* · Hak-Tae Oh\* · Cheon-Seok Park\*\*

### 요 약

SAR 측정시스템에 사용되는 phantom의 FDTD 모델에 휴대폰을 병합시켜 측정시스템과 동일한 상황으로 구현하여 계산한 결과, 측정값과 오차 범위  $\pm 10\%$  내로 접근함을 확인하였으며 또한, Om P. Gandhi의 결과 오차  $\pm 20\%$ 를 개선하였다. 이로써 단지 경험에 의존하거나, 제품의 완성단계에서 별개의 작업으로 SAR을 고려하는 것이 아니라, 설계 단계에서 정량적으로 SAR이 고려된 휴대폰을 개발할 수 있는 방법을 제안하였다. 즉, 제안된 방법을 이용하여 휴대폰의 통화품질 개선과 SAR 저감을 동시에 만족시키는 양질의 휴대폰 개발이 가능할 것으로 기대한다. 특히, 이 방법은 새로운 휴대폰 개발에 소요되는 비용과 시간을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다.

### Abstract

We merged the mobile phone into the FDTD model of the phantom used in the SAR test system, simulated in the same condition of the test system and certified that it was possible to reduce the error within  $\pm 10\%$  improving from Om P. Gandhi's resulting error of  $\pm 20\%$ . In this method we didn't depend on heuristic or perform another work to consider the SAR in the final step but proposed the developing method considering the SAR in design step qualitatively. That is, the proposed method satisfied higher call quality and lower SAR at the same time. In particular, this method can reduce the cost and time for developing the new mobile phone.

### I. 서 론

SAR(Specific absorption rate)은 RF와 MW 영역의 전자파에 의한 위험을 나타내는 척도로 널리 사용되고 있다. ANSI/IEEE C95.1-1992 RF 안전 지침서에 따르면 사용자가 근거리에서 사용하는 RF 장비에 대하여 안전을 유지하려면, 몸 전체에 대해서 평균한 SAR 값이 0.08 W/kg 이하일 것과, 임의의 인체 조직의 SAR 값을 정육면체 모양으로 1 g 평균을 취한 SAR 값이 1.6 W/kg을 초과하지 않을 것, 손, 손목, 발, 발목은 10 g 평균을 취했을 경우에 4

W/kg 이하일 것으로 규제하고 있다.

인체의 SAR 값을 도출하는데 있어서 가장 문제가 되는 것은 직접적인 임상 실험이 불가능하다는 것이다. 실험을 목적으로 전자파를 사람에게 직접 노출시킬 수 없고, 인체 각 부위의 SAR 값도 직접 측정하기가 어렵기 때문에, 문제가 되는 인체 두부의 경우 인체 조직과 같은 전기적 특성을 가지는 매질을 이용한 Phantom 모델을 제작하여 전기장이나 온도 분포를 측정하는 방법<sup>[1]-[3]</sup>과 MRI 데이터를 이용한 해부학적 모델을 이용하여 인체 각 부위의 전자기장을 계산해서 SAR 값을 평가하는 방법<sup>[4]-[6]</sup>

\*전파연구소 전파환경연구과(Dept. of Radio Environment Research, RRL)

\*\*성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부(School of Electrical & Computer Eng., Sungkyunkwan Univ.)

· 논문 번호 : 20000503-049

· 수정완료일자 : 2000년 6월 21일

이 널리 사용된다. 하지만, 이러한 방법들은 휴대폰을 생산하는 입장에서는 크게 도움이 되지 못한다. 왜냐하면, SAR 적합성 시험은 인체두부 모양의 Phantom에 시험대상 휴대폰의 사용주파수에 해당하는 뇌조직의 전기적 특성을 갖는 액체를 채워 넣어 실험하는 것이 일반적인 방법이기 때문이다. 그래서, 현재 새로운 휴대폰을 개발할 때 설계부터 SAR을 고려하지 못하고 단지 경험에 의존하거나, 거의 완성단계에서 SAR 적합성 시험을 통과하기 위해 별개의 작업이 이루어지므로 최적화가 끝난 다른 특성, 예를 들어 통화품질이나 기구 외형이 약화되는 경우가 많아 시간과 금전적 손실이 크다.

따라서 빠른 모델링과 정확한 계산을 위하여 상용 Computer Aided Design (CAD)인 PATRAN을 이용하여 3차원으로 설계한 휴대폰을 1 mm 해상도의 FDTD 모델링으로 직접 변환시키는 방법을 제안하였으며, 이 방법의 우수성을 확인하기 위하여 3차원 과도 원거리 영역 변환법으로 계산한 복사패턴과 무반사실에서 이득비교법으로 측정된 결과를 비교하였을 때 그 차이는 0.5 dB 이내였다<sup>17)</sup>.

위 결과로부터 본 논문에서는 CAD 파일을 Finite Difference Time Domain method (FDTD) model로 변환한 휴대폰과 SAR compliance test에서 사용되는 Phantom을 모델링한 것을 이용하여 측정상황을 컴퓨터 시뮬레이션으로 재연하여, 측정값과의 오차를 분석하였다.

## II. Phantom 모델링

본 논문에서 측정과 계산에 사용된 phantom은 SAR compliance test를 위해 많은 기관들이 SAR 측정 시스템에서 사용하는 제품으로 Schmid & Partners사(swiss)의 DASY3에서 사용되는 Generic Twin phantom<sup>12)</sup>이다. 이 phantom을 선택한 이유는 측정시 사용한 것이며, 이 Generic Twin phantom의 데이터 셸이 Swiss Federal Institute of Technology(ETH)에서 2 mm 해상도로 제공되고 있기 때문에 측정과 계산으로 구한 SAR 값을 직접 상호 비교할 수 있는 장점이 있다.

그런데, 이 수치 phantom은 휴대폰을 왼손으로 사용할 때만 고려할 수 있는 왼쪽 두부(left side

head)이고, 각 위치와 매질에 대한 데이터 형식이 본 논문에서 이용하는 FDTD engine에서 요구하는 형식과 다르기 때문에 일부 수정이 필요하다. 첫째, 현재 대부분의 휴대폰은 정면에서 보았을 때 안테나가 본체의 왼쪽이나 오른쪽 위의 모서리 부근에 장착되어 있기 때문에 동일한 휴대폰이라 할지라도 왼손으로 사용할 때와 오른손으로 사용할 때 안테나와 인체 두부와의 거리가 다르다. 그런데, ETH에서는 왼쪽 두부 데이터만 제공하므로 각각의 사용 상황에서 SAR의 차이를 비교하기 위해서는 오른쪽 두부가 필요하다. 이것은 왼쪽 두부를 임의의 좌표에서 이동이나 회전시켜서 만들 수 없으므로 각 좌표값을 역변환하여 생성하였다. 둘째, 정확한 계산을 위하여 휴대폰 CAD 파일을 1 mm 메시 사이즈의 FDTD 모델로 변환<sup>17)</sup>하므로 2 mm 메시의 phantom 데이터에 1 mm 메시의 휴대폰을 병합시킬 때 메시 사이즈가 다른 이유로 그 경계면에서 내삽이 필요하므로 그 부근에서 상대적으로 큰 오차가 발생할 수 있다. 왜냐하면, 휴대폰이 밀착되는 phantom의 귀 부근에서 SAR의 최대값이 나타나므로 경계면에서의 오차 발생은 계산결과의 신뢰도를 떨어뜨린다. 그래서, 본 논문에서는 phantom 데이터를 1 mm 메시 사이즈의 데이터로 remesh함으로써 휴대폰과 phantom 데이터가 병합될 때 하나의 grid를 사용할 수 있도록 하여 오차발생요인을 감소시켰다. 셋째로, ETH의 phantom data 형식은 4개의 column에 직교좌표의 X, Y, Z 위치와 매질이 순서대로 정의되어 있다. 하지만, 본 연구의 FDTD engine은 6개의 column에 X, Y, Z 위치와 각 좌표에 대한 매질이 정의<sup>17)</sup>되어야 하므로 이러한 형식이 되도록 수정하였다.

## III. 수치해석적 방법과 측정결과의 비교

FDTD 계산을 위한 흡수경계조건은 8층의 PML (perfectly matched layer)<sup>18)</sup>을 적용하였으며, 본 논문에서 사용된 FDTD 셀의 크기는  $1.0 \times 1.0 \times 1.0$  mm 이고, 시간 스텝은  $\Delta t = 1.93$  ps 가 되게 하여 Courant 안정 조건을 만족시켰다.

본 논문에서 사용된 휴대폰의 주파수영역은 약 Tx : 824~849 MHz, Rx : 869~894 MHz이고, 최고

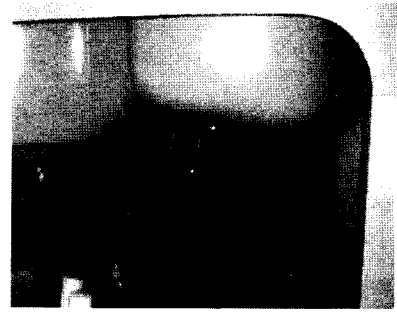
출력(최악의 SAR을 고려함)은 아날로그 방식에 해당하는 600 mW이다. 통신 방식이 디지털인 경우에는 최고 출력이 이보다 작은 200~300 mW이기 때문에, 본 논문에서는 언급하지 않는다. 이러한 이유로 본 논문에서는 복사 전력이 600 mW이고, Tx 주파수 대역의 중심 주파수 835 MHz의 조건으로 계산 및 측정을 하였다.

2장에서 언급하였듯이 휴대폰의 사용 자세에 따라 두부와 휴대폰 안테나와의 거리가 달라지므로 본 논문에서는 2가지 경우의 휴대폰 사용 자세를 고려하였다. 첫째, 휴대폰을 phantom에 수직으로 위치시킨 경우(그림 2 (a)), 둘째, 휴대폰이 귀와 입에 연결될 수 있도록 휴대폰을 35° 기울인 다음 10° 정도 안쪽으로 비틀어 입쪽으로 가까이 갖다 댄 경우(그림 2 (b))<sup>[9]</sup>에 대하여 측정과 계산을 수행하였다.

두 번째 경우가 실제 SAR compliance test를 할 때의 상황이다. 그런데, 휴대폰의 안테나 부분은 전자계의 변화가 심하고 얇은 도선으로 이루어졌기 때문에 계산에 있어서 휴대폰이 FDTD 격자 구조에 비스듬한 경우에는 부정확한 결과를 유발하게 된다. 따라서 phantom을 35° (그림 1 (b))와 10° (그림 1 (c))로 tilt시킨 다음, FDTD 모델로 변환시킨 휴대폰을 수직으로 세운 상태로 phantom과 거리를 3 mm 간격으로 변화시키면서 병합하여 계산하였다. 측정은 Schmid & Partner사(swiss)의 DASY3에서 Generic Twin Phantom( $\epsilon_r=42.5$ ,  $\sigma=0.85$ )에 동일한 휴대폰 4대를 계산과 동일한 조건(그림 1 (a))으로 수행하였다.

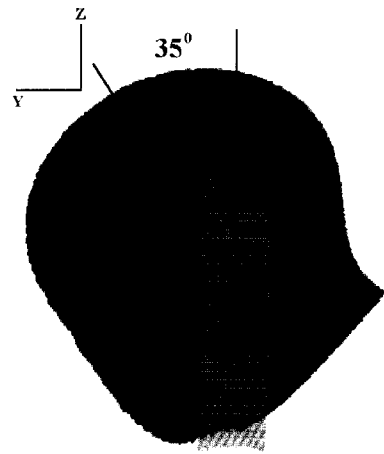
SAR 측정시스템에 대해 간략히 언급하면 0.02 mm의 고정밀 6축 robot과, 광센서 및 액체 내에서의 전기장을 측정할 수 있는 등방성 프로브 그리고 fiberglass 재질의 Generic Twin Phantom으로 구성되어 있다. 측정 주파수 범위는 100 MHz에서 3 GHz까지이며, dynamic range는 2 V/m에서 900 V/m이고 0.2 dB이하의 선형 오차를 갖는다. SAR은 모의인체내의 전기장도를 측정하고 액체의 전기전도도와 질량밀도로부터 계산된다.

RF와 MW 영역의 전자파에 의한 위험을 나타내는 척도로 널리 사용되는 SAR은 식 (1)과 같이 정의된다.



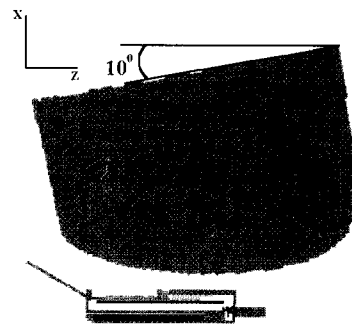
(a) FCC-OET-65에 의거하여 수행 중인 SAR compliance test

(a) SAR compliance test under FCC-OET-65



(b) YZ plane에서 Phantom을 35° tilt시킨 것

(b) Phantom tilted by 35° on YZ plane



(c) XZ plane에서 Phantom을 10° tilt시킨 것

(c) Phantom tilted by 10° on XZ plane

그림 1. 측정과 계산에 의한 SAR compliance test 조건

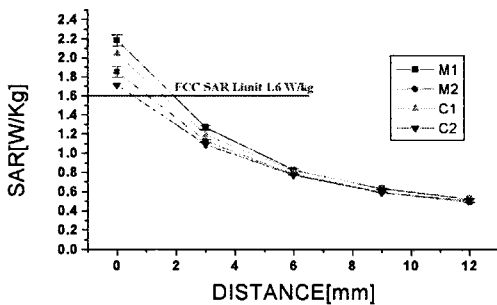
Fig. 1. SAR compliance test condition for measurement and calculation.

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{\sigma (|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2)}{\rho} \quad (1)$$

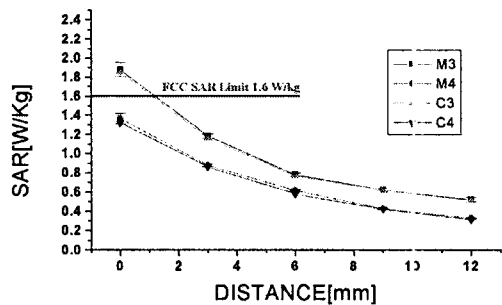
여기서,  $\rho$ 는 조직의 밀도 [ $g/cm^3$ ]이고,  $\sigma$ 는 조직의 전기 전도도 [S/m]이다. 휴대폰에 의한 인체 두부의 SAR은 대단히 불균일하기 때문에 첨두 SAR가 휴대폰에 의한 위험 정도를 잘 나타낼 수 있다. 각 지점에서의 SAR 중 정육면체 형태로 1g 평균을 취한 SAR<sub>1g</sub>의 최고값으로 나타낸다. 이때 1 셀에서의 SAR 값(1 voxel SAR)을 구하는 것은 단순히 공식만 이용하면 될 정도로 간단하지만, 1g 평균 SAR 값과 같이 평균 SAR 값을 구할 경우에는 문제가 복잡해진다. 휴대폰은 귀에 갖다 대는 전자 장비이기 때문에, 대부분 안테나에 가까운 귀 부근에서 SAR의 최고값을 갖는다. 그런데, phantom의 외부는 공기와 접하고 있고, 공기는 질량이 없다. 정육면체의 1g 평균을 취할 경우, 공기 부분이 포함되면 1g 평균 SAR의 정의로는 값을 구할 수 없다. 만약, 공기가 일부 포함되도록 1g 평균 SAR 값을 계산하면, SAR<sub>1g</sub>의 값이 기준치 이상으로 커질 염려가 있고, 공기가 포함된 영역을 제외하게 되면 1 voxel SAR 값이 가장 큰 지점을 빠뜨리고 계산하게 된다. 본

연구에서는 이것에 대한 분명한 공식적인 계산 방법이 나와 있지 않은 관계로 정육면체 내부에 공기가 포함되는 영역을 1g 평균 SAR 계산에서 제외하였다.

위의 방법으로 수행한 SAR의 계산과 측정결과를 그림 2에 나타냈었고, 표 1에서는 그림 2 (b)의 조건 중 phantom에 휴대폰을 밀착시킨 상황에 대한 정량적인 값을 보였다. 그림 2에서 가로축은 휴대폰과 phantom과의 거리이다. 측정에서는 측정오차를 분석하기 위해 동일한 휴대폰 4대가 사용되었다. phantom으로부터 거리가 멀어질수록 SAR이 줄어들면서 측정값의 오차도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 당연한 것으로 휴대폰의 안테나로부터 전자파가 복사될 때 phantom에 의해 영향을 받게 되는데 phantom에 가까울수록 그 영향이 크기 때문이다. 다양한 조건에서 계산의 신뢰도를 확인하기 위하여 오른쪽 귀로 밀착시켜 휴대폰을 사용할 경우 왼쪽 귀에 밀착시킨 경우보다 약 1% 적은 SAR이 나왔다. 물론 본 연구에 사용된 휴대폰의 SAR compliance test는 M3에서 거리가 0 인 조건으로 수행되며, 그 결과는 측정  $1.88 \pm 0.08$  W/kg, 계산 1.85 W/kg으로 FCC SAR Limit 1.6 W/kg 보다 약 0.25



(a) 수직 조건  
(a) vertical condition



(b) 비틀은 조건  
(b) tilted condition

- M1 : Measurement with left head
- M2 : Measurement with right head
- C1 : FDTD with left head
- C2 : FDTD with right head

- M3 : Measurement with left head
- M4 : Measurement with right head
- C3 : FDTD with left head
- C4 : FDTD with right head

그림 2. phantom과 휴대폰의 거리 변화에 따른 SAR

Fig. 2. SAR as distance variation between the mobile phone and phantom.

표 1. 수치해석적 방법과 측정결과의 비교

Table 1. Comparison of experimental and numerical methods (unit : W/kg)

	Comparison of experimental and numerical methods					
	Measurement					FDTD
	Each				Average. $\pm$ SD.	
Right V	1.84	1.79	1.85	1.93	1.85 $\pm$ 0.06	1.71
Left V	2.17	2.12	2.18	2.26	2.18 $\pm$ 0.06	2.04
Right T	1.33	1.31	1.43	1.38	1.36 $\pm$ 0.05	1.32
Left T <sup>†</sup>	1.84	1.79	1.93	1.95	1.88 $\pm$ 0.08	1.85

Right V : vertical condition with right head

Left T : tilted condition with left head

Left V : vertical condition with left head

<sup>†</sup> : SAR compliance test condition

Right T : tilted condition with right head

~0.3 W/kg 높은 값을 가진다. 일반적으로 휴대폰의 안테나가 우측 상단에 있기 때문에 왼손으로 사용할 때보다는 오른손으로 사용할 때 인체 두부와 휴대폰의 안테나와의 거리가 멀어지므로 SAR 값을 낮출 수 있다. 따라서, 일반인이 휴대폰을 사용할 때 사용자의 자세에 따라 두부와 안테나와의 거리를 가능한 멀리 확보할 수 있는 올바른 사용 방법을 택할 필요가 있음을 알 수 있다.

마지막으로 계산과 측정의 오차 또한 phantom으로부터 휴대폰의 거리가 멀어질수록 줄어드는데 그 이유는 lossy dielectric material인 phantom과 휴대폰에서 방사되는 전자파가 coupling을 할 때 가까운 거리에서는 inductive coupling이 지배적이다가 거리가 멀어질수록 capacitive coupling의 영향이 상대적으로 커지기 시작한다<sup>[10]</sup>. 그러므로 가까운 거리에서는 inductive coupling 영향으로 측정값이 계산결과보다 다소 크다. 이 모든 결과를 종합해 볼 때 SAR compliance test에 대한 계산과 측정 오차는 최대  $\pm 10\%$  이내로 일치한다.

#### IV. 결 론

SAR 측정시스템에 사용되는 phantom의 FDTD 모델에 CAD 파일을 변환시킨 휴대폰을 병합시켜 측정시스템과 동일한 상황으로 구현하여 계산하는 것이 측정값과 오차 범위  $\pm 10\%$  내로 가능함을 확인하였으며 또한, Pro-Engineer로 설계한 휴대폰

CAD 파일을 FDTD 입력 데이터로 변환하여 계산한 Om P. Gandhi<sup>[11]</sup>의 결과 오차  $\pm 20\%$ 를 개선하였다. 이로써 단지 경험에 의존하거나, 제품의 완성 단계에서 별개의 작업으로 SAR을 고려하는 것이 아니라, 설계 단계에서 정량적으로 SAR이 고려된 휴대폰을 개발할 수 있는 방법을 제안하였다. 즉, 제안된 방법을 이용하여 휴대폰의 통화품질 개선과 SAR 저감을 동시에 만족시키는 양질의 휴대폰 개발이 가능할 것으로 기대한다. 특히, 이 방법은 새로운 휴대폰 개발에 소요되는 비용과 시간을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다.

이 방법이 유용하게 쓰일 수 있는 경우는 외형의 특성상, 안테나와 인체 두부 사이의 거리가 자연스럽게 멀리 떨어지게 되는 folder type보다는 사용시에 안테나가 인체 두부에 밀착되어 SAR값이 더 높을 것으로 예상되는 bar type이나 flip type의 휴대폰을 개발할 때보다 보다 적극적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

물론, 아직 SAR 측정 방법에 대한 정확한 표준이 정해져 있지 않은 상황이지만 제안된 방법으로 휴대폰을 설계하고 제작한다면 앞으로 발표될 어떠한 측정 방법이나 조건에도 대응할 수 있을 것으로 생각된다.

뿐만 아니라, 본 논문에서 제안한 모델링 방법의 메시 사이즈가 1 mm이므로 파장 단축율을 고려하더라도 더 높은 주파수의 서비스 즉, PCS와 IMT-2000 뿐만 아니라 미래의 이동 통신서비스에 대해

서도 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] Quirino Balzano, Oscar Garay, and Thomas J. Manning, Jr., "Electromagnetic Energy of Simulated Users of Portable Cellular Telephones", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 390-403, Aug., 1995.

[2] Niels Kuster, Ralph Kastle, and Thomas Schmid, "Dosimetric Evaluation of handheld Mobile Communications Equipment with Known precision", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E80-B, pp. 645-652, May, 1997.

[3] Qishan Yu, Magnus Aronsson, Ding Wu, and Om P. Gandhi, "Automated SAR Measurements for Compliance Testing of Cellular Telephones", *Proceeding of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 4, pp. 1980-1983, 1998.

[4] Mark J. Hagmann, Om P. Gandhi, and Carl H. Durney, "Numerical Calculation of Electromagnetic Energy Deposition for a Realistic Model of Man", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-27, no. 9, pp. 804-809, September, 1979.

[5] Niels Kuster, Quirino Balzano, and James C. Lin, *Mobile Communications Safety*, Chapman & Hall, pp. 17-19, 1997.

[6] 홍수원, 김기희, 오학태, "한국인 인체두부모델을 이용한 SAR 계산", 제3회 전자장의 생체영향에 관한 워크숍 발표집, pp. 89-98, 1999. 7.

[7] 홍수원의 4명, "휴대폰의 3차원 CAD 파일을 이용한 FDTD 모델링", 한국전자과학회 논문지, 11(3), pp. 437-444, 2000. 4.

[8] J. P. Bérenger, "A perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic waves", *Journal of Computational Physics*, vol. 114, no. 2, pp. 185-200, Oct., 1966.

[9] Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, FCC OET Bulletin 65 (Edition 97-1).

[10] Michael Burkhardt, Nicolas Chavannes, Katja Pokovic, Thomas Schmid, and Niels Kuster, "Study on the FDTD Performance for Transmitters in Complex Environments", *ICECOM '97, DUBROVNIK*, Oct., 1997.

[11] Om P. Gandhi, Gianluca Lazzi, Adam Tinniswood, and Qi-Shan Yu, "Comparison of Numerical and Experimental Methods for Determination of SAR and Radiation Patterns of Handheld Wireless Telephones", *Bioelectromagnetics*, 20:93-101, pp. 93-101, 1999.

홍 수 원



1995년 2월: 성균관대학교 물리학과(이학사)  
 1997년 2월: 성균관대학교 대학원 물리학과(이학석사)  
 1999년 3월~현재: 성균관대학교 대학원 전자공학과(박사과정)  
 1997년 6월~현재: 정보통신부 전

파연구소 공업연구소

[주 관심분야] 전자파 인체영향, 전자장 수치해석

오 학 태



1986년 2월: 부산대학교 물리학과(이학사)  
 1989년 2월: 부산대학교 물리학과(이학석사)  
 1993년 2월: 부산대학교 물리학과(이학박사)  
 1994년 1월~1996년 1월: 일본 오

오사카 대학 물리학과 객원연구원

1995년 6월~1996년 11월: 공업기술원 전자정보과

1996년 11월~현재: 정보통신부 전파연구소 공업연구소

[주 관심분야] 전자파-인체영향, EMI/EMC

박 천 석



1988년 2월: 서울대학교 전기공학  
과(공학사)

1990년 2월: 한국과학기술원 전기  
전자공학과(공학석사)

1995년 2월: 한국과학기술원 전기  
전자공학과(공학박사)

1995년~현재: 성균관대 전기전자  
및 컴퓨터 공학부 교수

[주 관심분야] 전자장 수치해석, 마이크로파 능동 및 수동  
소자, 안테나