

PCS 대역 세포실험용 전자파 노출 장치 개발

Development of A Electromagnetic Exposure System for *In Vitro* Experiments at PCS Band

박민영 · 고채옥 · 성미진* · 김정란 · 백정기

Min-Young Park · Chae-Ok Ko · Mi-Jin Sung* · Jeong-Lan Kim · Jeong-Ki Pack

요 약

본 논문에서는 국내 PCS 대역인 1,762.5 MHz의 세포실험용 전자파 노출 장치를 설계 및 제작하였다. 노출 장치는 도파관의 $\lambda_g/4$ 지점에 위치한 $\lambda_g/8$ 모노폴 안테나에 의해 TE₁₀₂ 모드로 동작되며, 노출 장치 내부에 내부 직경이 8.5 cm인 petri dish 1개를 노출시킬 수 있다. 세포실험용 전자파 노출 장치는 구형 공진기형으로 수치 해석 기법 중 하나인 FDTD 방법을 사용하여 SAR을 해석하였고 온도 프로브(model 790, Luxtron Corp.)를 이용해 측정하였다.

Abstract

In this paper, a rectangular-cavity-type exposure system for *in vitro* experiments has been developed for the biological effect studies of radio frequency fields from handheld wireless telephones. It is fed with a $\lambda_g/8$ monopole antennas at the $\lambda_g/4$ position of the top plate in order to excite fundamental TE₁₀₂ mode and it allows the uniform exposure of one 8.5 cm(inner diameter) petri dish. SARs inside the exposed medium have been characterized by numerical simulations, using the FDTD method and by experimental dosimetry with fiberoptic temperature probes (model 790, Luxtron Corp.).

Key words : Exposure System, *In Vitro*, Sar, Biological Effects

I. 서 론

최근 개인 휴대 통신의 발달과 이동 통신 전화기의 급속한 보급으로 인체가 전자파에 노출될 확률이 높아지고 있다. 이에 따라 국내외적으로 전자파의 인체 노출에 대한 규정을 확립하려는 움직임과 그 근거 마련을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전자파에 의해 인체에 발생하는 여러 작용 중에 열적 작용을 대변하는 SAR(Specific Absorption Rate)은 FCC(Federal Communications Commission), ICNIRP(Inter-

national Commission on Nonionizing Radiation Protection)와 같은 여러 기구들에서 전자파에 의한 인체 노출량을 규제하는 근거로 채택하고 있다. 인체보호 기준에서 다루고 있는 전자기장의 주파수 대역은 0~300 GHz 대역이며, 이러한 넓은 주파수 영역 중 전력선 주파수(50/60 Hz)와 이동통신 주파수(800~900 MHz, 1.5~2.0 GHz) 대역이 일반인의 관심이 집중되고 있는 주파수 대역으로 인체 영향 연구도 이 주파수 대역에 치중되고 있다.

전자기장의 인체 영향에 대한 연구는 크게 세포

「본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(EMERC)의 연구 결과로 수행되었음(IITA-2005-(C1090-0502-0014)).」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio and Science Engineering, Chungnam University)

* (주)팬텍(Pantech)

· 논문 번호 : 20060228-015

· 수정완료일자 : 2006년 4월 5일

실험 연구, 동물 실험 연구, 역학 연구, 인간을 대상으로 한 자원자 연구로 나눌 수 있으며, 이 중에서 세포 실험과 동물 실험을 포함하는 생체 실험 연구를 위해서는 노출 장치가 필요하다. 이러한 전자파 인체 영향 연구의 일환으로 본 논문에서는 국내 이동통신 주파수 대역 중 1.5~2.0 GHz(PCS) 대역에 대한 세포 실험용 전자파 노출 장치를 설계, 제작하였다.

II. 세포 실험용 전자파 노출 장치 설계

2-1 노출 장치의 요구 조건 및 노출 시스템

노출 장치의 일반적인 요구 조건은 노출 장치의 노출량을 조절할 수 있어야 하며, 실험에서 요구되는 노출량의 범위를 충분히 만족시킬 수 있도록 설계되어야 한다. 이러한 노출 장치는 외부 전자기장의 영향을 받지 않고, 다른 실험 장치 및 실험자에게 영향을 미치지 않도록 적절히 차폐되어야 한다. 또한 세포 실험용 노출 장치의 경우 적절한 환기 장치 및 온도, 습도를 조절할 수 있는 기능이 있어야 한다. 이러한 조건을 고려하여 설계된 세포 실험용 전자파 노출 장치의 사양은 다음과 같으며, 그림 1은 노출 시스템의 전체적인 구성을 보이고 있다.

- 설계 주파수 : 1,762.5 MHz(PCS)
- 형태 : 구형 공진기형(TE₁₀₂ 모드)
- 급전부 : 모노폴 안테나
- Petri dish : 8.5 cm(inner diameter)
- 환기 및 CO₂ 농도 유지, 냉각 기능
- 신호 발생원 : CDMA Source(출력 및 노출시간 제어)

증폭기와 감쇠기를 거친 CDMA Source(PCS)의 출력이 모노폴 안테나에 의해 노출 장치에 공급되고, 컴퓨터로 노출 시간 및 노출량을 제어할 수 있

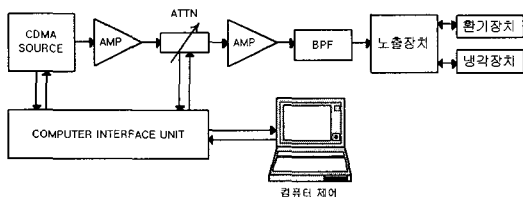


그림 1. 노출 시스템

Fig. 1. Block diagram of the exposure system.

다. CDMA Source의 출력 범위는 0.01~5.0 W(추가 증폭기 사용시 최대 30 W)이고 0.01 W 간격으로 제어 가능하며 출력 스펙트럼은 중심 주파수가 1,762.5 MHz이다. 또한 노출 장치 내의 CO₂ 농도 및 습도를 유지하기 위한 환기 장치로써 인큐베이터가 사용되며, 배양액의 온도가 상승하는 것을 방지하기 위해 냉각수를 순환시키는 냉각 장치도 포함되어 있다.

2-2 세포 실험용 노출 장치 설계

그림 2는 세포 실험용 노출 장치의 전체적인 구조이다. 노출 장치의 양측면에 환기용 노즐이, 앞면에 냉각수 순환용 노즐이 위치하며, petri dish는 전기장의 세기가 최대가 되는 급전부 반대편 끝에서 노출 장치의 길이 방향으로 $\lambda_g/4$ 만큼 떨어진 곳에 놓이고, 급전부인 안테나는 $\lambda_g/8$ 떨어진 곳에 위치하도록 설계하였다. 앞에서 언급된 설계 주파수, 즉 공진 주파수(1,762.5 MHz)와 노출 장치 내부에 여기될 공진 모드(TE₁₀₂)로부터 노출 장치의 폭과 높이, 그리고 길이를 결정할 수 있다^[1].

Petri dish의 크기, SAR 분포, 인접 모드 사이의 주파수 간격 등을 고려하여 공진기를 설계하였으며 이런 절차에 의해 설계된 노출 장치의 최종 크기는 115 mm×80 mm×24 mm이고 안테나의 직경은 0.8 mm, 길이는 22 mm이다. 그림 3은 제작된 PCS 대역 세포 실험용 노출 장치의 사진으로 측면의 환기용 노즐과 뒷면의 냉각수 순환용 노즐의 위치 및 모습

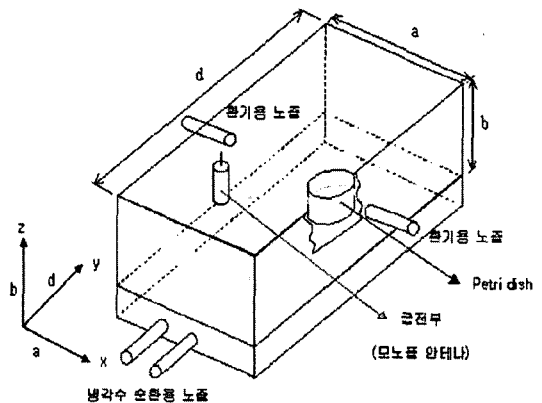


그림 2. 세포실험용 전자파 노출 장치

Fig. 2. In vitro exposure setup.

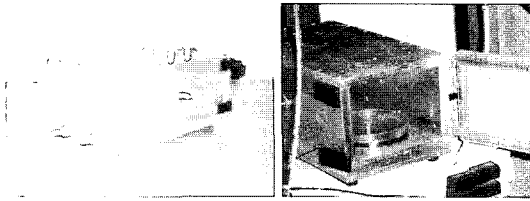


그림 3. 제작된 PCS 대역 세포실험용 노출 장치
Fig. 3. Manufactured *in vitro* exposure system.

표 1. 제작된 노출 장치의 공진 특성
Table 1. Resonant characteristics of the exposure setup.

배양액의 유무 및 양	f_0 [MHz]	RL[dB]
No dish	1,790.0	19.9
Only dish	1,782.5	25.8
배양액 10cc	1,770.1	14.1
배양액 18cc	1,762.5	13.8

을 확인할 수 있다. 표 1은 제작된 노출 장치 내 배양액의 유무 및 배양액의 양에 따른 공진 특성 측정 결과를 정리한 것이다.

2-3 전기장 및 SAR 분포 시뮬레이션

본 논문에서는 전자파 노출 장치 내의 전기장 및 SAR 분포를 FDTD 기법을 사용(XFDTD, Remcom Inc.)하여 해석하였다^{[2],[3]}. Petri dish의 소재는 polystyrene이며, 배양액의 유전 특성은 open-ended coaxial probe(HP85070B dielectric probe)를 사용하여 측정하였다. 이 프로브를 사용한 측정은 먼저 비이커에 증류수를 담고 calibration을 수행한 후 측정하고자 하는 배양액 내부에 프로브를 삽입하여 측정한다. 이때 비이커의 크기는 벽면의 반사를 무시할 수 있을 정도로 충분히 커야 한다. 표 2는 petri dish와 배양액의 유전상수를 나타낸다.

표 2. 매질의 유전상수
Table 2. Dielectric constants of the material.

전기 상수 [1,762.5 MHz]	Polystyrene	배양액
상대 유전율(ϵ_r)	2.6	79.5
도전율(σ)	0	2.0

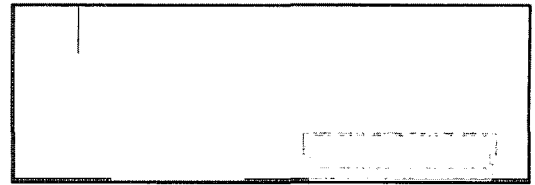


그림 4. 모델링된 노출 장치 단면도
Fig. 4. Side view in modeling of exposure setup.

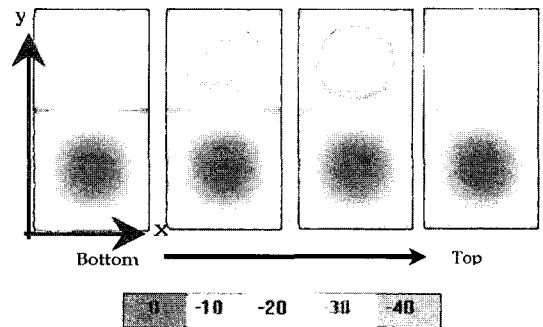


그림 5. 세포실험용 노출 장치의 전기장 분포
Fig. 5. Electric field distribution of an *in vitro* exposure setup.

시뮬레이션에 사용된 cell size는 $x=y=z=1$ mm이며, 배양액의 양은 18 cc로 직경이 8.5 cm인 petri dish에서 4 mm 높이에 해당하는 양으로 FDTD 해석을 위한 cell size는 1 mm이므로 4개 층으로 이루어진다. 급전부는 delta-gap feeding 방법을 사용하였고, 안테나는 thin wire로 모델링 하였다. 특히 petri dish 밑바닥은 공기층이 삽입이 되어 있으므로 고려하여 모델링하였다. 그림 4는 모델링된 노출 장치의 단면이며 그림 5는 노출 장치에서의 전기장 분포를 시뮬레이션한 결과이다.

그림 5는 petri dish 내 배양액의 바닥 층으로부터 맨 위 층까지 4개의 층(그림 2의 xy 평면에 평행인 면)을 포함하는 공진기 내부 평면상의 전기장 분포를 보인 것이다. 그림에서 가로 방향은 x축, 세로 방향은 y축 방향을 나타내며, y축 방향의 윗 부분에 petri dish가 놓여 있다. 그림 5에서 x축 방향으로 1개의 공진, y축 방향으로로는 2개의 공진이 형성되어 노출 장치 내부에 TE₁₀₂ 모드가 잘 여기되고 있고, petri dish 내부에서 전기장이 매우 고르게 분포함을 알 수 있다. 따라서 전기장 세기와 밀접한 관련이

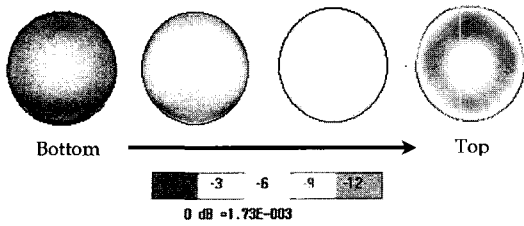


그림 6. 배양액 내부에서의 SAR 분포
Fig. 6. SAR distribution in the culture fluid.

있는 SAR 역시 petri dish 전 영역에서 매우 균일한 분포를 가질 것이라고 예상할 수 있다. 여기서 SAR 은 Specific Absorption Rate 즉, 전자파 흡수율로, 생체 조직에 흡수되는 단위 질량당 에너지율을 의미하며, 식 (1)과 같이 정의된다.

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

여기서 ρ 와 σ 는 각각 배양액의 밀도와 도전율을 나타내고, E 는 전기장 세기의 첨두치를 나타낸다. 그림 6은 PCS 대역 노출 장치에서의 SAR 분포를 각 층(1 mm 간격) 별로 나타내어 보인 것이다. 중심과 가장자리 사이인 petri dish 중간 지역의 SAR 분포가 높아지고, 중심 부분의 SAR은 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 실제 배양될 세포의 두께는 매우 얇으므로 두께에 따른 SAR 변화는 무시할 수 있다.

III. 세포 실험용 노출 장치 SAR 측정

3-1 온도 프로브를 이용한 배양액의 SAR 측정

본 논문에서는 노출 장치 삽입시 내부 전자기장에 크게 영향을 끼치지 않는(nonperturbing) 작은 온도 프로브(Luxtron Fiberoptic Thermometer Model 790)를 사용하여 배양액의 온도를 측정하였고, 식 (2)를 이용하여 온도 상승에 의한 SAR을 계산하였다.

$$SAR = C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \approx \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

C_p : 조직 비열 [J/kg°C]

T : 노출에 의한 온도 상승 [°C]

t : 노출시간 [sec]

온도 프로브에 의한 SAR 측정은 순수하게 전자

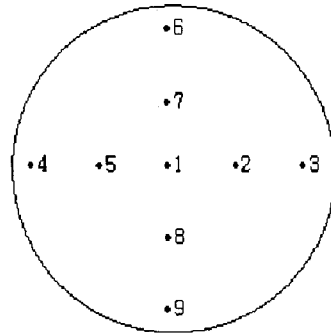


그림 7. Petri dish내 온도 상승 측정 위치
Fig. 7. Measured position of temperature rise in petri dish.

파에 의한 배양액의 온도 상승만을 측정하여 SAR 값을 얻어야 하는 것이므로, 가열된 배양액의 열이 외부로 전도되거나 확산되지 않도록 가능한 짧은 시간 동안 고출력의 전자파에 배양액을 노출시키는 것이 중요하다. 이를 위해 30 W의 출력에서 180초간 노출하였으며, 그림 7과 같이 배양액 밑부분의 중심(p1)과 중간(p2, 5, 7, 8), 가장자리(p3, 4, 6, 9) 위치에서 온도 상승을 측정하여 측정 데이터를 기록하였다. 그림 8은 노출 장치 동작 후 시간의 변화에 따른 petri dish 위치에 대한 온도 상승을 보여주고 있다.

3-2 시뮬레이션과 측정에 의한 SAR 비교 분석

표 3은 시뮬레이션과 측정에 의한 SAR 결과를 나타낸 것이다. 표 3에 주어진 수치는 단위 입력 전력에 대한 SAR 값[W/kg/W]을 나타낸다. 실제 측정시 온도 프로브는 바닥에 놓이게 되지만 센서 부분은 약간 바닥에서 떨어진 부분에 위치하므로 시뮬레이션 값은 배양액의 바닥 층부터 위의 3까지를

표 3. 시뮬레이션과 측정에 의한 SAR 값 비교
Table 3. Comparison of the simulated and the measured SAR values.

위치	SAR [W/kg/W]	
	Simulated	Measured
Center(p1)	7.9	5.1
Middle(p2, 5, 7, 8)	10.4	10.7
Edge(p3, 4, 6, 9)	5.2	5.5

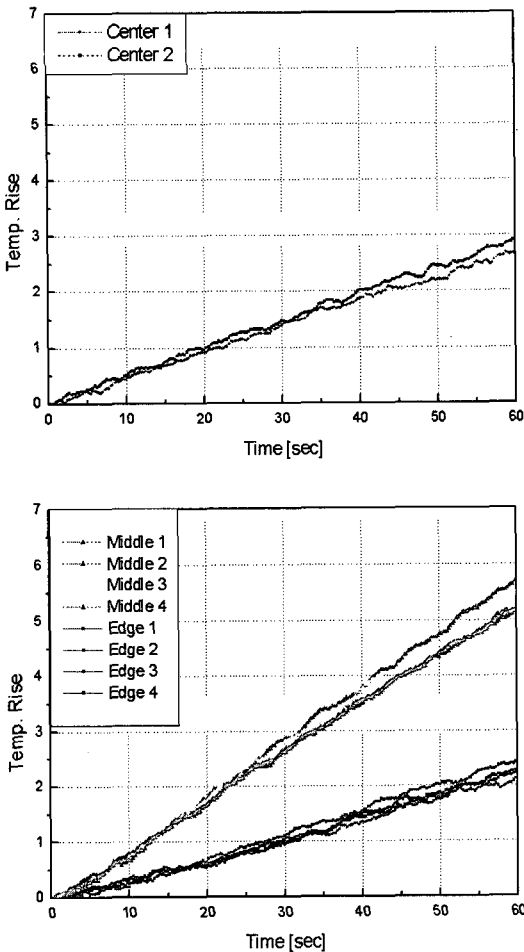


그림 8. 배양액의 온도 상승 그래프
Fig. 8. Temperature rise in a culture medium.

평균한 값이다. 표 3으로부터 시뮬레이션과 측정에 의한 평균 SAR이 상당히 잘 일치함을 알 수 있다.

표 4는 증폭기와 감쇄기를 거친 CDMA 소스의 출력 전력이 안테나에 의해 노출 장치에 공급되는 실제 시스템에서 CDMA 신호원의 출력에 따른 안테나 입력 전력 및 petri dish 각 부분, 즉 중앙, 가운데 및 가장자리 위치에 대한 SAR 값의 평균값을 주어진 신호원 출력에 대해 표 3의 측정치 결과로부터 환산한 결과이다. 안테나 입력 전력은 소스의 최종 출력단과 안테나 사이의 케이블 손실을 고려한 노출용 체임버(공진기)에 공급되는 전력을 의미한다.

최대 신호원 출력인 30 W의 경우 petri dish 가운데 부분의 SAR 값은 약 220 W/kg으로서 충분히 크며, 신호원 출력이 1 W일 때는 가운데 부분의 SAR

표 4. 입력 전력에 따른 노출량
Table 4. SAR values for given input powers.

신호원 출력 [W]	안테나 입력 전력 [W]	SAR [W/kg]		
		Center	Middle	Edge
30	21.14	167.01	219.86	109.93
20	14.09	111.34	146.58	73.29
10	7.05	55.67	73.29	36.64
5	3.52	27.84	36.64	18.32
1	0.70	5.57	7.33	3.66

값이 약 7 W/kg이 된다. 참고로 한국의 인체 보호 기준인 1.6 W/kg을 얻기 위해서는 0.22 W의 신호원 출력(가운데 부분 기준), 0.15 W의 안테나 입력 전력이 필요하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 국내 PCS 대역인 1,762.5 MHz의 세포 실험용 전자파 노출 장치를 설계 및 제작하였으며, 노출 장치의 공진 특성 및 SAR 분포의 측정을 통해 확인하였다. 세포 실험용 전자파 노출 장치는 구형 공진기형으로 수치 해석 기법 중 하나인 FDTD 방법을 사용하여 설계하였다. 노출 장치는 모노폴 안테나에 의해 TE₁₀₂ 모드로 동작되며, 노출 장치 내부에 내부 직경이 8.5 cm인 petri dish 1개를 노출시킬 수 있다. 앞에서 기술된 바와 같이 본 노출 장치는 petri dish 가운데 부분을 기준으로 최대 220 W/kg의 SAR 값이 가능하고 우리나라의 인체 보호 기준인 1.6 W/kg 이하 레벨도 가능하다. 이 장치는 현재 서울대학교 의과대학에서 세포 실험 연구에 사용되고 있다.

참 고 문 헌

[1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley, 1998.
 [2] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equation in isotropic media", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 302-307, May 1966.
 [3] K. S. Kunz, R. J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, 1993.

[4] C. K. Chou, H. Bassen, and Q. Balzano, "Radio frequency electromagnetic exposure: tutorial review on experimental dosimetry", *Bioelectromagnetics*, vol. 17, pp. 195-208, 1996.

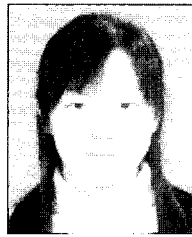
[5] T. Toivo, "Water cooled waveguide exposure chamber for *In vitro* studies at 900 MHz", *Proceeding of BEMS Meeting*, pp. 124-127, 2000.

박 민 영



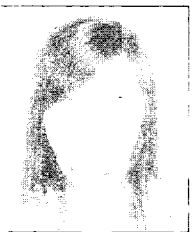
2004년 2월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)
2004년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 전자파 전파, 전자파 산란, 전자파 인체 영향

김 정 란



2006년 2월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)
[주 관심분야] 전자파 인체 영향

고 채 옥



2004년 2월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)
2004년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 전자파 전파, 전자파 산란, 전자파 인체 영향

백 정 기

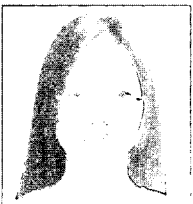


1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 9월: Virginia Tech. 전자파 전파 (공학석사)
1988년 9월: Virginia Tech. 전자파 전파 (공학박사)
1978년 3월~1983년 2월: 국방과학

연구소

1988년 10월~1989년 2월: 한국전자통신연구원
1989년 3월~1995년 2월: 동아대학교 전자공학과 부교수
1995년 2월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
2004년 3월~현재: 충남대학교 전자파환경기술연구(EM-ERC) 센터장
[주 관심분야] 전자파 전파, 전자파 산란, 전자파 인체 영향

성 미 진



2002년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2002년 3월~현재: (주)팬택 연구원
[주 관심분야] 전자파 인체 영향, 휴대폰 설계 및 제작