

# RF 전자기장 생체 영향 실험에서 통계적 방법을 통한 전자기장 노출 불확실성 분석

최성호<sup>0</sup>\*, 김 남\*

shchoi@osp.chungbuk.ac.kr

The analysis of RF dosimetric uncertainties by using  
statistical method at in-vivo and in-vitro experiments

Sungho Choi · Nam Kim  
Chungbuk National University

## Abstract

This paper shows the dosimetric uncertainties of electromagnetic field at in-vivo and in-vitro experiments. For more accurate consequences of these researches, we have tried to find out any correlations among output power, power density and specific absorption rate(SAR) with the results of in-vivo, in-vitro tests and SAR reports of cellular phone and PDA. In the case of in-vivo tests, the power density has close statistical correlations with SAR value and in the event of in-vitro tests, the output power has considerable statistical correlations with SAR containing duty factor. On the other hand, we found that both power density and output power don't have any close correlations with SAR. And, we obtained fitted regression form among frequency, power density and SAR containing duty factor through multiple linear regression analysis.

Key Words : Bioelectromagnetics, Specific absorption rate, Health risk, Dosimetric uncertainty

## I. 서 론

전자기장의 인체 유해성 연구를 위해 인체, 동물 및 세포를 대상으로 다양한 분석 및 실험 방법이 시도되고 있다. 현재까지 많은 연구 결과가 보고되었으며, 이를 통한 과학적 검토 또한 활발히 진행되고 있다. 세포 및 동물 실험 결과는 SAR을 제한치로 하는 인체 보호기준의 중요한 판단 근거이나, 실험의 재현성 문제와 상반된 연구 결과로 인해 신뢰성에 대한 의문이 제기되고 있다. 그 중, 실험 대상에게 정확히 의도된 양의 전자기장을 노출시켰는지의 여부는 연구 성과의 신뢰성을 평가하는 중요한 요소로 판단되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 지금까지 보고된 RF 전자기장을 사용한 동물 및 세포 실험에서의 전자기장 노출량에 대한 불확실성을 분석하여 과학적 재검토의 참고 자료로 사용하고자 한다. 이를 위해, 전자파 흡수율(SAR)을 전자기장 노출량의 단위로 사용한 약 100 편의 동물 및 세포 연구 논문과 미국 연방 통신 위원회인 FCC에 제출된 20 개의 휴대폰 및 PDA에 대한 전자파 흡수율 시험 성적서를 대상으로 SAR 측정 방법, 전자기장 노출 장비, 출력 전력, 전력 밀도 등 18개 항목을 조사한 후, 통계 기법인 상관 분석 및 회귀 분석을 실시하였다.

## II. 동물 및 세포 실험의 전자기장 노출

SAR(Specific absorption rate)은 전자기장 내에 있는 생체조

직의 단위질량 당 흡수되는 에너지를 나타내는 용어로서, 식 (1)과 같이 나타낸다<sup>[1]</sup>.

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad [W/kg] \quad (1)$$

여기에서  $\sigma$ 는 조직의 전기전도도,  $\rho$ 는 조직의 밀도이며, E는 실효전자기장강도를 나타낸다. 그 중, E는 실효전자기장강도로써 Joule의 법칙에 의해 전력 밀도와 비례관계를 갖으며, Durney등은 전자기장 노출량 연구를 통해 전자기장의 주파수, 전력 밀도가 SAR과 선형적 관계를 가지고 있음을 나타내었다<sup>[2]</sup>. SAR 값은 주로 전력의 변화량, 생체 팬텀의 온도 변화량, 생체 내부 온도 변화량등과 같은 다양한 방법을 통해 계산할 수 있다. 식 (2)는 흡수 전력의 양을 나타내는 식으로, SAR 값은 생체 질량 당 흡수된 전력의 양을 통해 계산된다. 여기서,  $P_E$ 는 흡수된 전력,  $P_I$ 는 입력 전력,  $P_O$ 는 출력 전력,  $P_R$ 은 반사 전력을 나타낸다.

$$P_E = P_I - P_O - P_R \quad (2)$$

현재 인체의 SAR은 IEEE, IEC등의 국제적인 표준화 작업을 통해, 인체 SAM 팬텀의 전자기장 값으로 측정하고 있으나<sup>[3]</sup>, 전자기장의 방사로 인한 생체 내 영향 및 반응 기작의 연구를 목적으로 하는 동물 및 세포 실험은 연구자에 의한 다양한 방법으로

표 1. SAR 측정에 영향을 줄 수 있는 요소

Table 1. Factors affecting on SAR measurement

전자기장 환경	실험 대상 특성
안테나 종류	조직 밀도
전력 밀도	
출력 전력	조직의 전기전도도
주파수	
duty factor	실험 대상 무게
실험 대상과의 거리	

로 SAR 값을 결정하고 있다. 표 1은 SAR 값에 영향을 줄 수 있는 요인을 나타낸 것이다. 다양한 전자기장 노출 방법과 SAR 측정 및 계산 방법을 사용해 생체 실험을 하기 때문에 전자기장 노출량의 불확실 가능성을 예상할 수 있다. 다양한 전자기장 노출 방법과 SAR 측정 및 계산 방법을 사용해 생체 실험을 하기 때문에 전자기장 노출량의 불확실 가능성을 예상할 수 있다.

### III. 전자기장 노출 및 측정의 다양성 분석

#### 3.1 동물, 세포 실험의 조사 항목과 데이터

RF 전자기장에 노출된 동물 및 세포 연구 자료는 한국전자파학회 전자장과 생체 관계 연구회에서 발간한 '국제 EMF 프로젝트 DB 자료'와 Bioelectromagnetics, Radiation research 등 관련 학술지를 바탕으로 조사하였으며<sup>[4]</sup>, 인체의 SAR 측정 결과는 휴대폰과 PDA 제조 업체가 FCC의 인증을 받기 위해 제출한 SAR 시험 성적서를 사용하였다<sup>[5]</sup>. 조사 항목은 실험에 사용한 전자기장의 주파수, duty factor, 출력 전력, 전력 밀도, SAR, 전자기장 노출에 사용한 안테나의 종류, SAR 측정 방법, 실험 대상의 무게, 일반 시험 환경 항목등이다. 전자기장 노출 조건 항목에서 사용된 CSAR(Calculated specific absorption rate)은 실험을 통해 구해진 SAR을 노출에 사용한 전자기장의 duty factor로 나눈 값으로써, 주파수, 출력 전력 등 전자기장 노출 조건들과 SAR의 다중 회귀 관계를 분석함에 있어, 독립 변수의 수를 줄이기 위해 사용하였다.

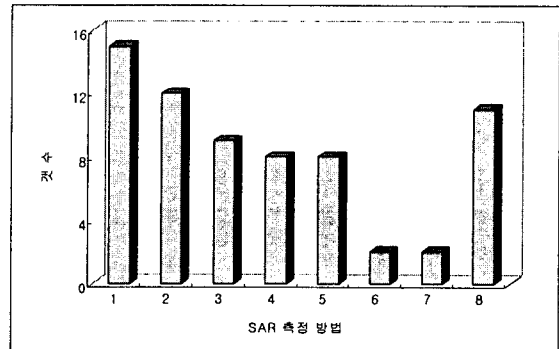
#### 3.2 전자기장 노출 다양성 분석

동물 및 세포 실험에 사용된 전자기장 노출 장비와 SAR 결정 방법에 대한 조사를 통해, 전자기장 노출 및 측정 환경의 다양성을 분석하였다. 그림 1은 SAR 결정 방법에 대해 나타낸 것으로써, 동물 실험에서는 온도 변화율 측정 방법이, 세포 실험에서는 FDTD 모델링을 이용한 SAR 예측이 가장 많았다. 다음의 결과를 통해, 동물 실험의 경우, 온도 프로브의 측정 오차가 SAR 값의 가장 큰 불확실성 요인이 될 수 있음을 예측할 수 있다.

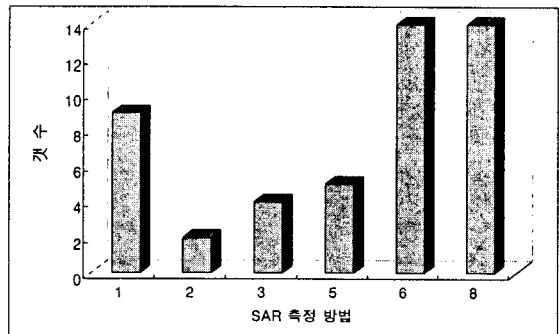
표 2. 대상 연구 조사 항목

Table 2. Items for research

구분	조사 항목
일반 항목	논문 제목
	게재 논문지명
	출판연도
일반 실험 조건	실험 온도
	실험 습도
	조명 사용 시간
전자기장 노출 조건	SAR 결정 방법
	전자기장 노출 장비
	전자기장 주파수
	전자기장 펄스 형태
	duty factor
	출력 전력
	전력 밀도
	전자파 흡수율(SAR)
	duty factor를 고려한 전자파 흡수율
	노출 시간
실험 대상 조건	실험 대상 모델명
	실험 대상 무게



(a) 동물 실험



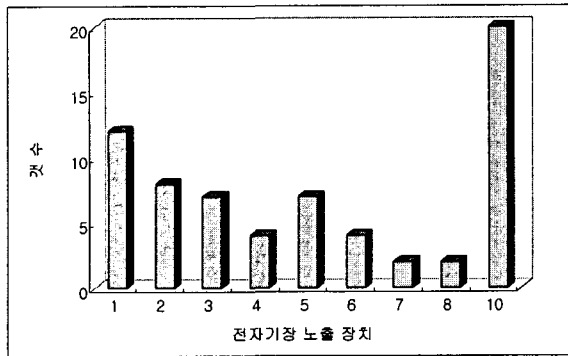
(b) 세포 실험

1. Temp. Measurement
2. Calorimetry
3. Thermography
4. E-field measurement
5. Power measurement
6. Computing & Modeling
7. Calculation
8. Not explained.

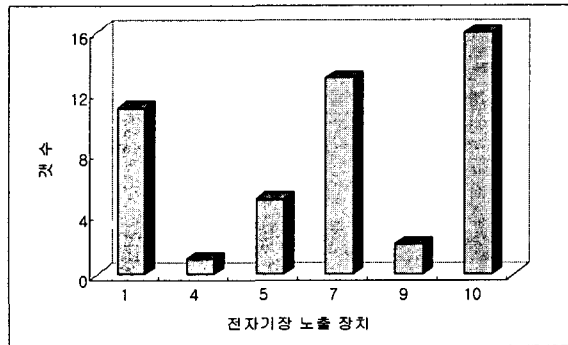
그림 1. 동물 및 세포 실험의 SAR 결정 방법

Fig. 1. SAR determination method of in-vivo and in-vitro test

세포 실험은 FDTD 모델링이라는 동일한 기법을 사용함으로써, 상대적으로 불확실성은 낮을 수 있으나, 모델링의 근거가 되는 연구 자료에 대한 의존도가 높기 때문에 근거 자료의 신뢰성에 대한 연구가 필요하다. 그리고, 상당수의 연구에서 전자기장 실험 조건을 정확히 명시하지 않았는데, 이는 전자기장 노출량의 측정 및 계산이 어렵기 때문에 판단되며, 이를 극복하기 위해서는 관련 연구를 시행함에 있어, 생체 연구와 전자기장 노출량 관련 전문가의 공동 연구가 필요할 것으로 보여진다. 그림 2는 동물 및 세포 실험에 사용된 전자기장 노출 방법을 나타낸 것이다. Guy 등에 의해 고안된 Cylindrical waveguide은 이후 여러 연구에서 참조 및 사용되어 졌지만<sup>6)</sup>, 전체적으로 다양한 안테나가 사용됐음을 알 수 있다. 이와 같이 전자파 노출 특성에 영향을 끼칠 수 있는 안테나의 종류가 다양하기 때문에, 일정한 주파수와 전력이 사용된 실험 조건에서도 SAR 값은 달라 질 수 있음을 예측할 수 있다.



(a) 동물 실험



(b) 세포 실험

- |                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| 1. Waveguide        | 6. GTEM Cell       |
| 2. Dipole antenna   | 7. TEM Cell        |
| 3. Monopole antenna | 8. Mobile phone    |
| 4. Loop antenna     | 9. Crawford Cell   |
| 5. Horn antenna     | 10. Not explained. |

그림 2. 동물 및 세포 실험에서의 전자기장 노출 방법  
Fig. 2. Exposure method of electromagnetic field at in-vivo and in-vitro test

#### IV. 전자기장 노출량 불확실성 분석

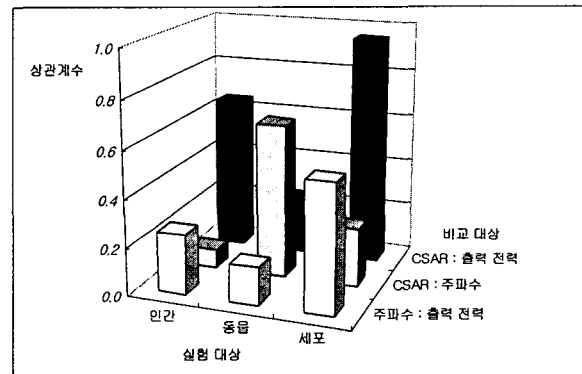
##### 4.1 상관 분석

동물 및 세포 실험에서 조사된 항목을 대상으로 통계 패키지인 SAS를 이용하여 각 항목별 상관 관계를 분석하였으며, 전체 결과는 표 3에 나타내었다. 사전에 실시한 이론적인 분석을 통해, 전자기장 요소가 SAR, CSAR 등과 상관 관계가 높을 것으로 예상하였으며, 일반적인 항목의 경우는 전자기장 요소에 비해 상대적으로 상관 관계가 낮을 것으로 판단하였다. 그림 3은 주파수, 출력 전력, CSAR의 상관 계수를 나타낸 것으로서, 세포 실험에서의 CSAR과 출력 전력의 상관 관계가 가장 높은 것을 알 수 있다. 이는 다양한 전자기장 노출 조건 및 측정 환경에서도 SAR 값과 실효 전자기장 강도의 비례관계가 존재함을 의미한다. 또한, 인체 팬텀 실험에서는 출력 전력과 CSAR, 동물 실험에서는 전력 밀도와 SAR이 강한 상관관계를 보임을 알 수 있다.

표 3. 항목 별 상관 관계 분석

Table 3. Correlation analysis of variable factors

분석 항목	동물 실험 SAR	세포 실험 SAR
출판연도	-0.0695	-0.3425
SAR 결정 방법	0.0277	-0.0738
전자기장 노출 장비	-0.2700	-0.3021
실험 대상 모델명	-0.0438	-0.0364
노출 시간	0.1301	-0.0626
실험 대상 무게	0.2126	*



비교 대상	인간	동물	세포
CSAR : 출력 전력	0.647	0.237	0.951
CSAR : 주파수	0.079	0.156	0.247
주파수: 출력 전력	0.252	0.156	0.532

그림 3. 전자기장 발생 요소의 상관 관계 분석  
Fig. 3. Correlation analysis of factors irradiating electromagnetic field

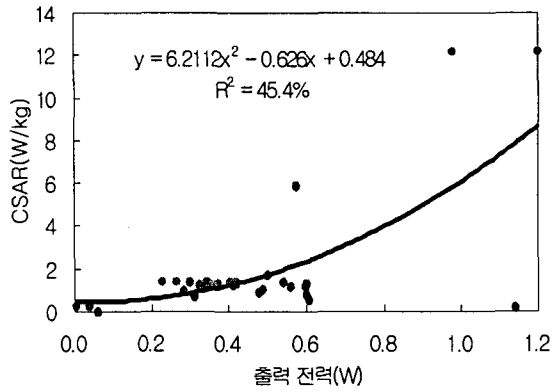


그림 4. 인체 팬텀 실험에서 출력전력과 CSAR 회귀선  
Fig. 4. Fitted regression line for human phantom between output power and CSAR

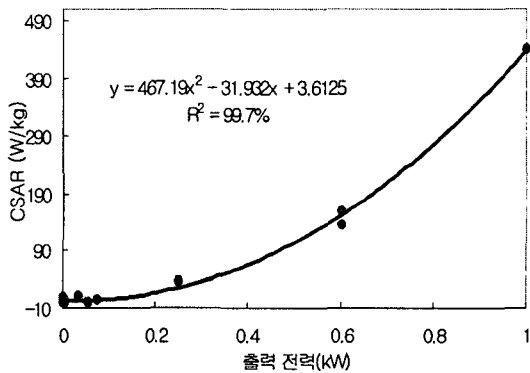


그림 5. 세포 실험에서 출력전력과 CSAR의 회귀선  
Fig. 5. Fitted regression line for in vitro experiment between output power and CSAR

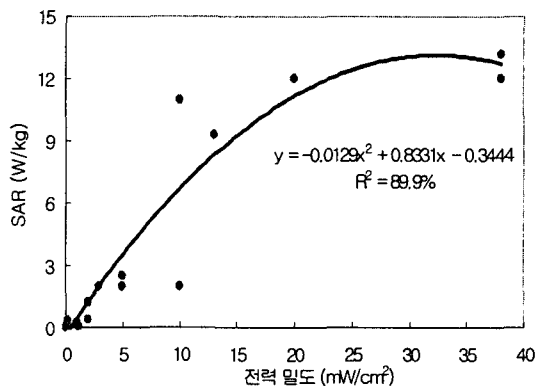


그림 6. 동물 실험에서 전력 밀도와 SAR의 회귀선  
Fig. 6. Fitted regression line for in vivo experiment between power density and SAR

그러나, 일반 항목, 일반 실험 조건, 실험 대상 조건, 전자기장 노출 조건의 SAR 결정 방법, 전자기장 노출 장비의 경우에는 SAR과 통계적으로 유의한 상관 관계를 발견할 수 없었다. 이상과 같은 분석을 통해, 이론적 예측과 실험 결과가 일치함을 알 수 있으며, 통계적 분석 방법의 신뢰성을 확인 할 수 있다.

## 4.2 회귀 분석

상관 분석 결과를 바탕으로 단순선형회귀분석을 실시하였다. 그림 4는 휴대폰의 출력 전력에 따른 인체 SAR 측정 결과를 분석한 것으로 출력 전력이 duty factor를 고려한 CSAR과 통계적으로 유의한 회귀 관계를 보임을 알 수 있다. 그림 5는 세포 실험에서 사용한 전자기장의 노출 특성에 대한 것으로, 출력 전력과 CSAR이 통계적으로 유의한 회귀관계를 보였다. 그림 6에서는 동물 실험의 전력 밀도와 SAR의 회귀 관계를 구할 수 있었다. 출력 전력과 전력 밀도가 duty factor에 의해 구분되는 이유는 전력 밀도가 전자기장 노출 장치의 출력 전력, 전자기장의 주파수, duty factor에 의해 결정되는 값이기 때문으로 볼 수 있다.

실험에 사용된 전력 밀도와 출력 전력이 CSAR, SAR과 유의 확률 0.001 이하의 회귀 관계를 갖는 것은 실험에 사용된 전자기장 노출과 SAR 계산 결과를 신뢰할 수 있음을 의미한다. 따라서, 전자기장 노출 및 실험 환경, SAR 계산 방법이 다양한 동물 및 세포 실험에서도 실효전자기장과 SAR의 선형적 관계가 존재함을 확인할 수 있다. 실험에 사용한 전자기장의 주파수, 출력 전력을 독립변수로, duty factor를 고려한 CSAR 값을 종속변수로 한 다중회귀분석 결과는 식 3, 4, 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{인체의 CSAR} = 0.0013 \times (\text{Frequency}) + 8.502 \times (\text{output power}) - 3.301 \quad (\text{P-Value} < .0001, R^2 = 50.1 \%) \quad (3)$$

$$\text{동물의 CSAR} = 0.0013 \times (\text{Frequency}) + 0.061 \times (\text{output power}) + 1.614 \quad (\text{P-Value} < .0001, R^2 = 69.3 \%) \quad (4)$$

$$\text{세포의 CSAR} = -0.003 \times (\text{Frequency}) + 0.366 \times (\text{output power}) + 3.458 \quad (\text{P-Value} < .0001, R^2 = 90.5 \%) \quad (5)$$

회귀식에 사용된 독립변수는 인체, 동물, 세포에서의 조직 밀도, 전기 전도도와 같은 고유한 특성은 제외시키고, 실험에 사용된 전자기장 요소로만 구성되어 있다. 이것은 실험에 사용한 주파수, duty factor, 출력 전력, 전력 밀도등과 같은 전자기장 요소만을 가지고도 통계적으로 SAR 값을 예측할 수 있음을 의미한다.

## 4.3 전자기장 노출 불확실성 분석

최적화된 회귀 분석 결과를 바탕으로, 인체, 동물, 세포 실험에서 발생한 전자기장 노출 불확실성을 분석하였다. 표 4는 유의 확률 0.05 이하로 최적화된 회귀식과 그에 따른 R<sup>2</sup>(결정 계수)을

표 4. 적합된 회귀식과 결정 계수

Table 4. Fitted regression form and coefficient of determination

대상	적합된 회귀식	결정계수 (R <sup>2</sup> , %)	유의 확률
인체 SAR	-0.00017(Frequency) + 0.732(Output power) + 0.538(Duty factor) + 0.502	27.4	0.037
인체 CSAR	2.7009(Output power) - 5.414(Duty factor) + 5.492	63.3	0.0001
동물 SAR	-0.000053(Frequency) + 0.0974(Output power) + 0.26095(Exposure time) + 0.4185	47.0	0.015
	0.3735(Power density) + 0.5914	80.1	0.0001
동물 CSAR	출력 전력과 통계적으로 유의한 회귀식 없음		
	전력 밀도와 통계적으로 유의한 회귀식 없음		
세포 SAR	8.2954(Duty factor) + 0.0316(Output power) - 1.5566	33.8	0.045
	전력 밀도와 통계적으로 유의한 회귀식 없음		
세포 CSAR	0.4568(Output power) - 1.2449(Exposure time) + 2.290	97.7	0.0001
	전력 밀도와 통계적으로 유의한 회귀식 없음		

나타낸다. 결정 계수는 회귀식에 의해 설명될 수 있는 기여율이며, 그 값을 바탕으로 불확실성 정도를 판단할 수 있다. 즉, 높은 결정 계수 값을 갖는 경우 전자기장 노출의 불확실성이 낮다고 예측할 수 있으며, 그 반대의 경우도 적용될 수 있다. 표 4의 회귀 분석 결과, 인체의 경우는 SAR, CSAR 모두가 출력전력과 회귀식을 얻을 수 있었으나, 동물 실험에서는 SAR과 출력 전력, 전력 밀도의 회귀식을, 세포 실험에서는 출력 전력과 SAR, CSAR의 회귀식만을 얻을 수 있었다. 통계적으로 유의한 회귀 관계가 전력 밀도, 사용 전력 모두에서 확인 될 수 없다는 점과 낮은 결정 계수 값은 전자기장 노출량의 불확실 가능성을 반증하는 것으로 볼 수 있다.

### V. 결론

본 연구에서는 RF 전자기장을 사용한 동물 및 세포 실험에서 전자기장 노출에 대한 신뢰성을 분석하였다. 이를 위해, 전자기장 요소인 출력 전력, 전력 밀도와 SAR의 관계를 상관 분석, 회귀 분석과 같은 통계적 방법을 이용하여 평가하였고, 다양한 동물 및 세포 실험에서 발생하는 전자기장 노출량과 SAR의 강한 상관 및 회귀 관계를 확인할 수 있었다. 따라서, 다수의 동물 및 세포 실험 방법의 신뢰성 평가를 할 경우, 각각의 실험 장치 및 방법에 대한 해석 또는 측정 기법의 분석 이전에 본 연구 방법을 실시하여 대상 연구군의 특성을 고찰한다면 보다 효율적인 평가를 실시할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 모든 전자기장 요소가 SAR과 상관 관계를 갖지 않는 점과 전자기장 노출 방법 및 SAR 계산 방법이 다양한 점은 전자기장 노출량의 불확실성을 평가하는데 있어, 가장 먼저 연구되어야 할 과제 일 것이다.

그러나, 인체 팬텀을 통한 SAR 측정과는 달리 동물 및 세포 실험은 매우 다양한 방법으로 실시되기 때문에, 정확한 신뢰성 평가를 위한 방법의 구현이 상대적으로 어렵다. SAR 값

을 구하기 위해 실험전자기장으로 표현되는 물리적 환경과 실험 대상의 조직 밀도, 전기 전도도로 표현되는 생물적 특성이라는 두 가지 요소를 사용하는 점은 불확실성 발생의 가장 근본적 이유으로써, 다양한 인체, 동물, 세포 실험 결과를 통한 전자기장 노출의 종합적인 건강 위해성 평가를 위해서는 전자기장과 생체와의 관계를 좀더 효율적으로 정량화하고 판단할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] 정보통신부 고시 제2000-93호, "전자파흡수율 측정기준", 2000.
- [2] C. H. Durney and H. Massoudi, *Radiofrequency radiation handbooks 4th ed.*, USAF school of Aerospace Medicine, 1986.
- [3] IEEE Std. 1528-200\*, *Draft recommended practice for determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body due to wireless communications device: experimental techniques*, IEEE Standards Coordinating Committee 34, 2003.
- [4] 한국전자파학회 전자기장파 생체관계연구회, "국제 EMF 프로젝트 DB 자료 원본", 2002.
- [5] <https://gulfoss2.fcc.gov/prod/oet/cf/eas/index.cfm>
- [6] A. W. Guy, J. Wallace, and J. A. McDougall, "Circular polarized 2450 MHz waveguide system for chronic exposure of small animals to microwaves", *Radio Sci*, vol. 16, no. 6s, pp. 63-74, 1979.