

RF 전자기장 생체 영향 연구 문헌에서 노출량 메타분석을 위한 통계적 기법

The Statistical Technique for Dosimetric Meta-Analysis at *in-vivo* and *in-vitro* Papers about Bioeffects of RF Electromagnetic Field

최 성 호 · 김 남*

Sung-Ho Choi · Nam Kim*

요 약

본 논문에서는 RF 전자기장을 사용한 동물 및 세포 실험에서 전자기장 노출량의 정확성을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 이를 위해 전자파 흡수율(SAR)을 전자기장 노출량의 단위로 사용한 동물 및 세포 연구 논문과 휴대폰 및 PDA에 대한 전자파 흡수율 시험 성적서를 대상으로 출력 전력, 전력 밀도 등과 SAR의 상관 관계 및 회귀 관계를 분석하였다. 동물 실험의 경우 전력 밀도와 SAR이, 세포 실험의 경우 출력 전력이 duty factor를 고려한 SAR과 통계적으로 유의한 상관 관계를 보였다. 회귀분석에서의 노출 불확실성을 평가하기 위해 결정계수값을 분석하였다. 각각의 실험장치 및 방법에 대한 해석 또는 측정 기법의 분석 이전에 본 연구 방법을 실시하여 대상 연구군의 특성을 고찰한다면 보다 효율적인 전자기장 노출 신뢰성 평가를 실시할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

This paper proposed the estimating method of electromagnetic dosimetric reliability 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. We analysed the coefficient of determination to estimate the dosimetric uncertainty. If we use this method before evaluating techniques of measurement and analysis at both *in-vivo* and *in-vitro* experiments, we will conduct more accurate reliability test.

Key words : Bioelectromagnetics, Specific Absorption Rate, Health Risk, Dosimetric Reliability

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

충북대학교 정보통신공학과(Dept. of Computer and Communication Eng., Chungbuk National University)

*충북대학교 전기전자컴퓨터공학부, 컴퓨터 정보통신 연구소(Dept. of Computer and Communication Eng., Research Institute for Computer and Information Communication, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20030930-131

· 수정완료일자 : 2003년 11월 11일

판단되고 있다.

영국 국립방사선방호위원회(NRPB)의 2003년 보고서에서 전자기장에 의한 생체 영향 연구 분석을 통해 전자기장 노출의 불확실성과 이로 인해 잘못 도출될 수 있는 실험 결과의 문제점을 지적하였다^[1]. 한편, WHO에서는 2006년 환경건강 평가서(EHC: Environmental health criteria)를 통해 RF 전자기장의 인체 유해성 여부에 대해 발표할 예정으로, 관련 연구 논문에 대한 과학적 재검토 작업이 활발히 진행되고 있다^[2].

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 20개의 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 회귀분석을 실시하였다.

II. 동물 및 세포 실험의 전자기장 노출

SAR(Specific absorption rate)은 전자기장 내에 있는 생체조직의 단위질량 당 흡수되는 에너지를 나타내는 용어로서, 식 (1)과 같이 나타낸다^[3].

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

여기에서 σ 는 조직의 전기전도도, ρ 는 조직의 밀도이며, E 는 실효전자기장강도를 나타낸다. 그 중, E 는 실효전자기장강도로서 Joule의 법칙에 의해 전력 밀도와 비례관계를 가지며, Durney 등은 전자기장 노출량 연구를 통해 전자기장의 주파수, 전력 밀도가 SAR과 선형적 관계를 가지고 있음을 나타내었다^[4]. SAR 값은 주로 전력의 변화량, 생체 팬텀의 온도 변화량, 생체 내부 온도 변화량 등과 같은 다양한 방법을 통해 계산할 수 있다. 식 (2)는 흡수 전력의 양을 나타내는 식으로, SAR 값은 생체 질량당 흡수된 전력의 양을 통해 계산된다. 여기서, P_E 는 흡수된 전력, P_I 는 입력 전력, P_O 는 출력 전력, P_R 는 반사 전력을

나타낸다.

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

IEEE에서는 project 1529를 통해 FDTD 기법을 이용하여 휴대폰의 SAR을 계산하는 연구를 진행하고 있다. 식 (3), (4)는 전자기장의 지향성과 이득을 표현한 식으로써, $D(\theta, \varphi)$ 는 지향성, $S(\theta, \varphi)$ 는 원거리 전자기장의 전력 밀도, $G(\theta, \varphi)$ 은 이득, P_{rad} 는 방사전력, P_{in} 은 전자기장의 순방향 입력 전력을 나타낸다. 다음의 식을 통해, 전자기장의 지향성과 이득은 전자기장의 전력밀도와 노출 장비의 사용 전력을 통해 얻을 수 있음을 알 수 있다^[5].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{S(\theta, \varphi)}{P_{rad}/(4\pi R^2)} \quad (3)$$

$$G(\theta, \varphi) = \frac{S(\theta, \varphi)}{P_{in}/(4\pi R^2)} \quad (4)$$

$$S = \frac{E_i^2}{Z_0} \quad (5)$$

또한, 식 (5)는 전자기장 강도와 전력 밀도의 관계를 나타낸 식으로써, FDTD를 이용한 모델링에서 전자기장 노출 장비의 사용 전력과 전력 밀도가 실효 전자기장 강도의 특성을 설명할 수 있는 중요한 요소로 사용됨을 알 수 있다. 여기서, S 는 전력 밀도, E_i 는 선택된 원거리 전자기장 강도, Z_0 는 자유공간의 특성 파동 임피던스를 의미한다.

현재 인체의 SAR은 IEEE, IEC 등의 국제적인 표준화 작업을 통해, 인체 SAM 팬텀의 전자기장 값으로 측정하고 있다^[6]. 다이폴 안테나와 인체 SAM 팬텀을 이용한 국부 SAR 측정 유효성 시험과 같은 단일 시험 환경에서는 SAR 값이 전자기장 노출 장치의 사용 전력과 이로부터 발생하는 전력 밀도에 비

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	

례하게 되며, 전자기장 불확실성의 경우 주요 오차 발생 요인이 측정 시스템 오차로 구분될 수 있다. 그러나, 세포 및 동물 실험의 경우, 표 1과 같은 다양한 요인의 실험 조건 및 측정 환경으로 인해 노출량을 예측하기가 어려우며, 재생 반복 실험을 통해 전자

기장 노출량을 측정해 보지 않고는 신뢰성을 평가하기가 매우 어렵다.

잘못된 전자기장 노출량 계산 방법으로 부정확한 SAR 값이 도출될 경우, SAR 값과 생체 변화 특성 사이의 해석에 있어서 큰 문제점을 야기할 수 있

표 2. 분석에 사용된 동물 실험 논문

Table 2. *In vivo* papers used for analysis.

저자	게재 논문지	권, 호, 페이지, 발표 연도	저자	게재 논문지	권, 호, 페이지, 발표 연도
Zenon et al.	Bioelectromagnetics	vol. 21, no. 3, pp. 151-158, 2000	Testylier et al.	Bioelectromagnetics	vol. 23, no. 4, pp. 249-255, 2002
Bartsch et al.	Radiation research	vol. 157, no. 2, pp. 183-190, 2002	Imaida et al.	Jpn. J. Cancer Res.	vol. 89, pp. 995-1002, 1998
Pemela et al.	Radiation research	vol. 156, no. 5, pp. 495-502, 2001	Adey et al.	Cancer Research	vol. 60, pp. 1857-1863, 2000
Paivi et al.	Radiation research	vol. 156, no. 6, pp. 775-785, 2001	Imaida et al.	Carcinogenesis	vol. 19, no. 2, pp. 311-314, 1998
Bernard et al.	Radiation research	vol. 155, no. 4, pp. 572-583, 2001	Imaida et al.	Carcinogenesis	vol. 22, no. 11, pp. 1837-1841, 2001
Baoming et al.	Bioelectromagnetics	vol. 21, no. 1, pp. 52-56, 2000	Lai et al.	Wireless Networks	vol. 3, pp. 471-476, 1997
Michal et al.	Bioelectromagnetics	vol. 21, no. 8, pp. 566-574, 2000	Kizilay et al.	Auris Nasus Larynx	vol. 30, no. 3, pp. 239-245, 2003
Carmela et al.	Radiat Environ Biophys	vol. 39, pp. 131-136, 2000	Dubreuil et al.	Behavioural brain Research	vol. 145, no. 1-2, pp. 51-61, 2003
Fritze et al.	Acta Neuropathol	vol. 94, pp. 465-470, 1997	Dasdag et al.	Bioelectromagnetics	vol. 24, no. 3, pp. 182-188, 2003
Giichiro et al.	Bioelectromagnetics	vol. 21, no. 5, pp. 364-371, 2000	Nakamura et al.	Reproductive Toxicology	vol. 14, pp. 235-240, 2000
Hironori et al.	Bioelectromagnetics	vol. 24, no. 4, pp. 223-230, 2003	Lin et al.	Bioelectrochemistry and Bioenergetics	vol. 47, pp. 259-264, 1998
Anane et al.	Bioelectromagnetics	vol. 24, no. 3, pp. 211-213, 2003	Seaman et al.	Physiology & Behavior	vol. 65, no. 2, pp. 263-270, 1998
Vijayalaxmi et al.	INT. J. RADIAT. BIOL	vol. 77, no. 11, pp. 1109-1115, 2001	Repachoiil et al.	Radiation research	vol. 147, no. 5, pp. 631-640, 1997
Mausset et al.	Brain Research	vol. 912, pp. 33-46, 2001	Salford et al.	Bioelectrochemistry and Bioenergetics	vol. 30, pp. 313-318, 1993
Finnie et al.	Pathology	vol. 33, pp. 338-340, 2001	Higashikubo et al.	Radiation research	vol. 152, no. 6, pp. 665-671, 1999
Cobb et al.	Bioelectromagnetics	vol. 21, no. 7, pp. 524-537, 2000	Toler et al.	Radiation research	vol. 148, no. 3, pp. 227-234, 1997
Jauchem et al.	Bioelectromagnetics	vol. 21, no. 3, pp. 159-166, 2000	Chou et al.	Bioelectromagnetics	vol. 13, pp. 469-496, 1992
Lu et al.	Physiology & Behavior	vol. 65, pp. 753-761, 1999	Salford et al.	Microscopy Research and technique	vol. 27, pp. 535-542, 1994
Dasdag et al.	Urol Res	vol. 27, pp. 219-223, 1999	Ward et al.	Bioelectromagnetics	vol. 3, pp. 371-383, 1982
Vijayalaxmi et al.	INT. J. RADIAT. BIOL	vol. 75, no. 1, pp. 115-120, 1999	Ward et al.	Bioelectromagnetics	vol. 6, pp. 131-143, 1985
Frei et al.	Bioelectromagnetics	vol. 19, no. 1, pp. 20-31, 1998	Chagnaud et al.	INT.J.RADIAT.BIOL	vol. 75, no. 1, pp. 111-113, 1999
Jauchem et al.	Bioelectromagnetics	vol. 18, no. 4, pp. 335-338, 1997	Szudzinski et al.	Dermatological research	vol. 274, no. 3-4, pp. 303-312, 1982
Lai et al.	Bioelectromagnetics	vol. 18, no. 6, pp. 446-454, 1997	Szmigielski et al.	Bioelectromagnetics	vol. 3, pp. 179-191, 1982
Nakamura et al.	Reproductive Toxicology	vol. 17, no. 3, pp. 321-326, 2003	Elekes et al.	Bioelectromagnetics	vol. 17, pp. 246-248, 1996
Zook et al.	International Congress series	vol. 1236, pp. 137-139, 2002	Wu et al.	Bioelectromagnetics	vol. 15, pp. 531-538, 1994
Mickley et al.	Physiology & Behavior	vol. 63, no. 5, pp. 855-865, 1998	Veyret et al.	Bioelectromagnetics	vol. 12, pp. 47-56, 1991
Fritze et al.	Neuroscience	vol. 81, no. 3, pp. 627-639, 1997	Smialowicz et al.	Bioelectromagnetics	vol. 3, pp. 467-470, 1982
Morrissey et al.	Neuroscience	vol. 92, no. 4, pp. 1539-1546, 1999	Jauchem et al.	Bioelectromagnetics	vol. 19, no. 5, pp. 330-333, 1998
Swicord et al.	Bioelectromagnetics	vol. 20, no. 1, pp. 42-47, 1999	Mason et al.	Bioelectromagnetics	vol. 18, no. 3, pp. 277-283, 1997
Takahashi et al.	Cancer Research	vol. 62, pp. 1956-1960, 2002	Vollrath et al.	Bioelectromagnetics	vol. 18, no. 5, pp. 376-387, 1997
Jauchem et al.	Radiation research	vol. 155, no. 2, pp. 369-377, 2001	Wilson et al.	Bioelectromagnetics	vol. 23 no. 2, pp. 127-131, 2002

나, 많은 세포 및 동물 실험 연구 결과의 경우 전자기장 노출 및 측정 조건, 실험 대상의 특성과 같이 SAR 값의 도출을 위해 필요한 자료를 제대로 명시하지 않기 때문에 신뢰성 평가에 어려움을 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 통계적 평가 방법을 통해 지금까지 보고된 RF 전자기장을 사용한 동물 및 세포 실험에서의 전자기장 노출량에 대한 신뢰성을 평가하는 방법을 제안하였다.

Ⅲ. 전자기장 노출 및 측정의 다양성 분석

3-1 동물, 세포 실험의 조사 항목과 데이터

RF 전자기장에 노출된 동물 및 세포 연구 자료는

한국전자과학회 전자장과 생체 관계 연구회에서 발간한 '국제 EMF 프로젝트 DB 자료'^[7]와 Bioelectromagnetics, Radiation Research 등 관련 학술지를 바탕으로 조사하였으며, 인체의 SAR 측정 결과는 휴대폰과 PDA 제조 업체가 FCC의 인증을 받기 위해 제출한 SAR 시험 성적서를 사용하였다^[8]. 조사 항목은 실험에 사용한 전자기장의 주파수, duty factor, 출력 전력, 전력 밀도, 인체 팬텀의 경우 국부 SAR, 동물 및 세포 실험의 경우 전신 SAR, 전자기장 노출에 사용한 안테나의 종류, SAR 측정 방법, 실험 대상의 무게, 일반 시험 환경 항목 등이다.

전자기장 노출 조건 항목에서 사용된 CSAR(Calculated Specific Absorption Rate)은 실험을 통해 구해진

표 3. 분석에 사용된 세포 실험 논문

Table 3. *In vitro* papers used for analysis.

저자	게재 논문지	권, 호, 페이지, 발표 연도	저자	게재 논문지	권, 호, 페이지, 발표 연도
Maes et al.	Folia Biologica	vol. 46, pp. 175-180, 2000	Maes et al.	Mutation research	vol. 393, pp. 151-156, 1997
d'Ambrosio et al.	Bioelectromagnetics	vol. 23, no. 1, pp. 7-13, 2002	Maes et al.	Electro-and Magnetobiology	vol. 14, no. 2, pp. 91-98, 1995
Tice et al.	Bioelectromagnetics	vol. 23, no. 2, pp. 113-126, 2002	Ivaschuk et al.	Bioelectromagnetics	vol. 18, no. 3, pp. 223-229, 1997
Antonopoulos et al.	Mutation research	vol. 395, pp. 209-214, 1997	Li et al.	Radiation research	vol. 151, pp. 710-716, 1999
Vijayalaxmi et al.	INT. J. RADIAT. BIOL	vol. 72, no. 6, pp. 751-757, 1997	Litovitz et al.	Bioelectromagnetics	vol. 14, pp. 395-403, 1993
Vijayalaxmi et al.	Radiation research	vol. 156, no. 4, pp. 430-432, 2001	Czerska et al.	Bioelectromagnetics	vol. 13, pp. 247-259, 1992
Gajda et al.	Bioelectromagnetics	vol. 23, no. 8, pp. 592-598, 2002	Elizabeth et al.	Radiation research	vol. 126, pp. 65-72, 1991
Maes et al.	Bioelectromagnetics	vol. 22, no. 2, pp. 91-96, 2001	Elizabeth et al.	Radiation research	vol. 117, pp. 531-537, 1989
Mashevich et al.	Bioelectromagnetics	vol. 24, no. 2, pp. 82-90, 2003	Cleary et al.	Bioelectromagnetics	vol. 11, pp. 47-56, 1990
Harvey et al.	Cell Biology International	vol. 23, no. 11, pp. 739-748, 1999	Dutta et al.	Bioelectromagnetics	vol. 5, pp. 71-78, 1984
Cleary et al.	Bioelectrochemistry and Bioenergetics	vol. 39, pp. 167-173, 1996	Wolke et al.	Bioelectromagnetics	vol. 17, pp. 144-153, 1996
Peinnequin et al.	Bioelectrochemistry	vol. 51, pp. 157-161, 2000	Somosal et al.	Scanning Microscopy	vol. 7, no. 4, pp. 1255-1261, 1993
Linz et al.	Bioelectromagnetics	vol. 20, no. 8, pp. 497-511, 1999	Maes et al.	Bioelectromagnetics	vol. 14, pp. 495-501, 1993
Cleary et al.	Bioelectromagnetics	vol. 18, no. 7, pp. 499-505, 1997	Ciaravino et al.	Environmental Mutagenesis	vol. 9, pp. 393-399, 1987
Lai et al.	Bioelectromagnetics	vol. 18, no. 6, pp. 446-454, 1997	Meltz et al.	Radiation research	vol. 110, pp. 255-266, 1987
Cain et al.	Bioelectromagnetics	vol. 18, no. 3, pp. 237-243, 1997	Meltz et al.	Bioelectromagnetics	vol. 11, pp. 149-157, 1990
Velizarov et al.	Bioelectrochemistry and Bioenergetics	vol. 48, pp. 177-180, 1999	Brown et al.	Radiation research	vol. 108, pp. 12-22, 1986
Cao et al.	Bioelectrochemistry and Bioenergetics	vol. 37, pp. 131-140, 1995	Gandhi et al.	Radiation research	vol. 28, pp. 223-234, 1989
Li et al.	Radiation research	vol. 156, no. 3, pp. 328-332, 2001	Somosal et al.	Scanning Microscopy	vol. 5, no. 4, pp. 1145-1155, 1991
Malyapa et al.	Radiation research	vol. 148, no. 6, pp. 608-617, 1997	Moros et al.	Bioelectromagnetics	vol. 20, no. 2, pp. 65-80, 1999
Malyapa et al.	Radiation research	vol. 148, no. 6, pp. 618-627, 1997	Schirmacher et al.	Bioelectromagnetics	vol. 21, no. 5, pp. 338-345, 2000
Phillips et al.	Bioelectrochemistry and Bioenergetics	vol. 45, pp. 103-110, 1998			

표 4. 분석에 사용된 FCC의 SAR 시험 성적서
Table 4. SAR reports of FCC used for analysis.

FCC ID	SAR 측정 업체	FCC ID	SAR 측정 업체	FCC ID	SAR 측정 업체
A3LSCHA612	Samsung Electronics co., Ltd.,	OVFKWC-7135	Kyocera Wireless Corp	A3LSPHI700	Pctest Engineering laboratory, Inc.
BEJPDA-PE2030A	Cetecom Inc.	ABLSH-G1000	Celltech Labs Inc.	Q3OODM-QB04	PSB Corporation Pte Ltd
GMLNPD-4AW	Test & Certification Center	A3LSTHN395	Samsung Electronics co., Ltd.,	A3LSPHI500	Pctest Engineering laboratory, Inc.
GKRPA3274U-IETC	Compliance Certification Services	NM8FALCON	Digital EMC co., Ltd.,	CJ6DCE46036A	Pctest Engineering laboratory, Inc.
NM8SN	Intertek Testing Services	P5J-SKCA	Radio Frequency Investigation Ltd.,	P8D-C62881	Met Laboratoryes, Inc.
LJPRH-20	Nokia Corporation	O8FBW	Celltech		

표 5. 대상 연구 조사 항목
Table 5. 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 SAR
	노출 시간
실험 대상 조건	실험 대상 모델명
	실험 대상 무게

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

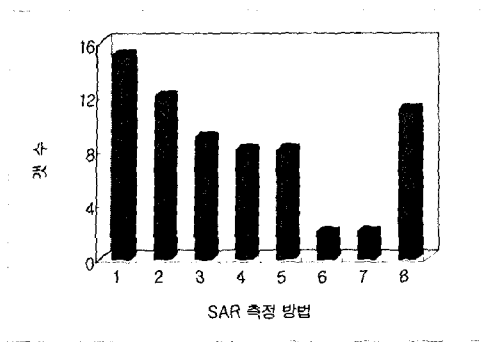
동물 및 세포 실험에 사용된 전자기장 노출 장비와 SAR 결정 방법에 대한 조사를 통해, 전자기장 노

출 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. 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 때문으로 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 waveguide는 이후 여러 연구에서 참조 및 사용되어졌지만^[9], 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 달라질 수 있음을 예측할 수 있다.

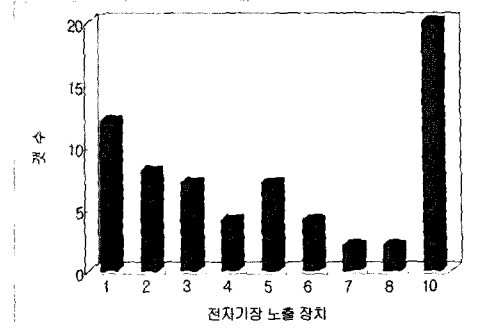
IV. 전자기장 노출량 불확실성 분석

4-1 상관 분석

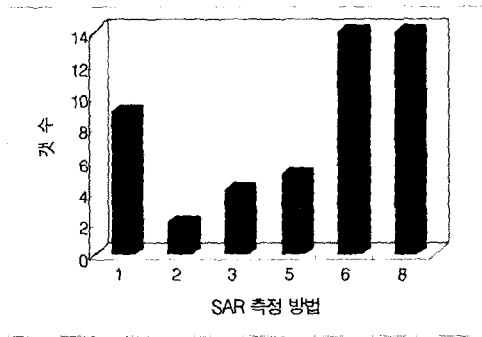
동물 및 세포 실험에서 조사된 항목을 대상으로



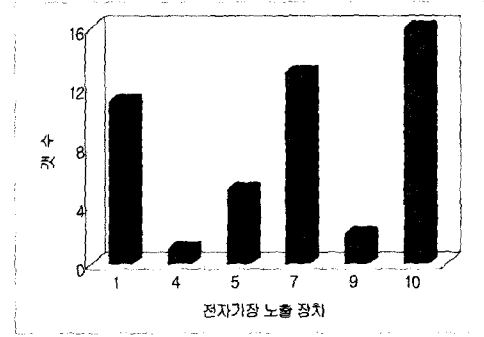
(a) 동물 실험
(a) *In vivo* test



(a) 동물 실험
(a) *In vivo* test



(b) 세포 실험
(b) *In vitro* test



(b) 세포 실험
(b) *In vitro* test

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

- | | |
|---------------------|-------------------|
| 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 1. 동물 및 세포 실험의 SAR 결정 방법

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

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

통계 패키지인 SAS를 이용해 항목별 상관 관계를 분석하였다.

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,

표 6. 항목 별 상관 관계 분석

Table 6. 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	*

동물 실험에서는 전력 밀도와 SAR이 강한 상관관계를 보임을 알 수 있다.

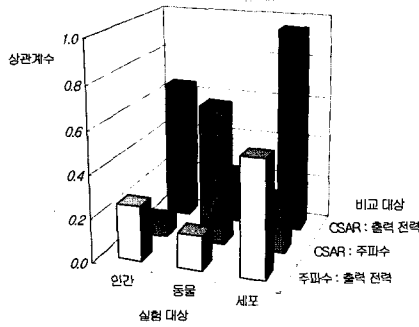


그림 3. 전자기장 발생 요소의 상관 관계 분석
Fig. 3. Correlation analysis of factors irradiating electromagnetic field.

그러나, 표 6에서 볼 수 있듯이, 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 확인할 수 있다.

4.2 회귀분석

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 회귀관계와 낮은 결정계수 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 실효전자기장과 SAR의 선형적 관계가 존재하나, 전자기장 노출 조건의 다양함으로 인해 위의 회귀식을 통해서 설명할 수 없는 연구 결과가 상당수 있음을 알 수 있다. 그 이유는 다양한 휴대폰 안테나의 방사특성이 출력 전력과 전자기장 노출량 값의 관계에 큰 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 따라서, 각각의 연구 논문의 전자기장 노출 신뢰성을 평가할 때 회귀식으로 설명되는 결과와 그렇지 않은 결과를 구분하여, 각각의 실험 장치에 대한 전자기장 노출 방법, SAR 측정 방법 등을 분석한다면 더욱 효과적인 전자기장 노출 신뢰성 평가 결과를

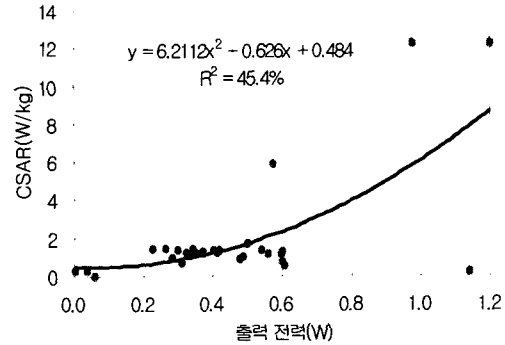


그림 4. 인체 팬텀 실험에서 출력전력과 CSAR 회귀선
Fig. 4. Fitted regression line for human phantom between output power and CSAR.

얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그림 5는 세포 실험에서 사용한 전자기장의 노출 특성에 대한 것으로 매우 높은 상관 계수 값을 보임을 알 수 있다. 이는 세포 실험의 경우 '전자기장의 노출 다양성 분석'에서 설명한 것과 같이 많은 세포 실험에서 FDTD 기법이라는 동일한 SAR 결정 방법을 사용했기 때문에 예측할 수 있다. 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 유의확률 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 방

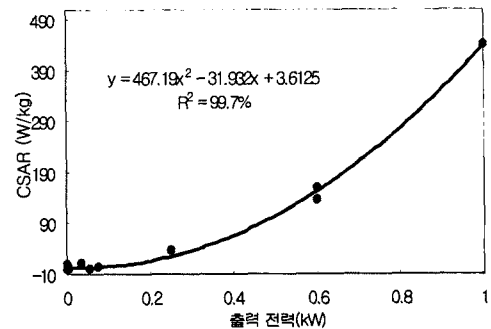


그림 5. 세포 실험에서 출력전력과 CSAR의 회귀선
Fig. 5. Fitted regression line for *in vitro* experiment between output power and CSAR.

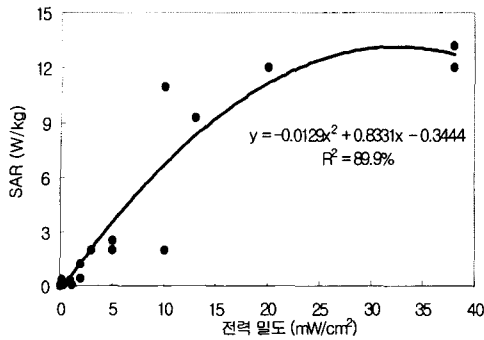


그림 6. 동물 실험에서 전력 밀도와 SAR의 회귀선
Fig. 6. Fitted regression line for *in vivo* experiment between power density and SAR.

법이 다양한 동물 및 세포 실험에서도 실효전자기장과 SAR의 선형적 관계가 존재함을 확인할 수 있다. 그러나, 높은 회귀 관계와는 달리 낮은 결정계수를 가지는 것을 통해 다양한 실험 환경으로 인한 불확실성 또한 존재함을 알 수 있었으며, 실험 결과의 회귀식 포함 여부를 바탕으로 신뢰성 평가를 할 경우 매우 유용한 분석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

실험에 사용한 전자기장의 주파수, 출력 전력을 독립변수로, duty factor를 고려한 CSAR 값을 종속변수로 한 다중회귀분석 결과는 식 (6), (7), (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{인체 CSAR} &= 0.0013 \times (\text{Frequency}) + 8.502 \times (\text{output power}) - 3.301 \\ & \quad (\text{P-Value} < .0001, R^2 = 50.1 \%) \quad (6) \end{aligned}$$

표 7. 적합된 회귀식과 결정계수

Table 7. Fitted regression form and coefficient of determination.

대상	적합된 회귀식	결정계수(R ² , %)	유의확률
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		

$$\begin{aligned} \text{동물 CSAR} &= 0.0013 \times (\text{Frequency}) + 0.061 \times (\text{output power}) + 1.614 \\ & \quad (\text{P-Value} < .0001, R^2 = 69.3 \%) \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{세포 CSAR} &= -0.003 \times (\text{Frequency}) + 0.366 \times (\text{output power}) + 3.458 \\ & \quad (\text{P-Value} < .0001, R^2 = 90.5 \%) \quad (8) \end{aligned}$$

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

4.3 전자기장 노출 불확실성 분석

최적화된 회귀분석 결과를 바탕으로, 인체, 동물, 세포 실험에서 발생된 전자기장 노출 불확실성을 분석하였다. 표 7은 유의확률 0.05 이하로 최적화된 회귀식과 그에 따른 R²(결정계수)을 나타낸다. 결정계수는 회귀식에 의해 설명될 수 있는 기여율이며, 그 값을 바탕으로 불확실 정도를 판단할 수 있다. 즉, 높은 결정계수 값을 갖는 경우 전자기장 노출의 불확실성이 낮다고 예측할 수 있으며, 그 반대의 경우도 적용될 수 있다. 표 7의 회귀분석 결과, 인체의 경우는 SAR, CSAR 모두가 출력전력과 회귀식을 얻을 수 있었으나, 동물 실험에서는 SAR과 출력 전력,

전력 밀도의 회귀식을, 세포실험에서는 출력 전력과 SAR, CSAR의 회귀식만을 얻을 수 있었다. 통계적으로 유의한 회귀 관계가 전력 밀도, 사용 전력 모두에서 확인될 수 없다는 점과 낮은 결정계수 값은 전자기장 노출량의 불확실 가능성을 반증하는 것으로 볼 수 있다.

V. 결 론

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, 회귀분석과 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 실험장치 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 과제일 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 값을 구하기 위해 실효전자기장으로 표현되는 물리적 환경과 실험 대상의 조직 밀도, 전기 전도도로 표현되는 생물적 특성이라는 두 가지 요소를 사용하는 점은 불확실성 발생의 가장 근본적 이유로서, 다양한 인체, 동물, 세포 실험 결과를 통한 전자기장 노출의 종합적인 건강 위험성 평가를 위해서는 전자기장과 생체와의 관계를 좀더 효율적으로 정량화하고 판단할 수 있는 방법에

대한 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. F. Mckinlay, S. G. Allen, *Proposals for limiting exposure to electromagnetic fields(0~300 GHz)*, NRPB consultation document, pp. 83-84, 2003.
- [2] <http://www.who.int/peh-emf/project/>
- [3] 정보통신부 고시 제2000-93호, "전자파흡수율 측정기준", 2000년.
- [4] C. H. Durney, H. Massoudi, *Radiofrequency radiation handbooks* 4th ed., USAF school of Aerospace Medicine, 1986.
- [5] C. A. Balanis, *Antenna theory*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [6] IEEE Std. 1528-200×, Recommended practice for determining the peak spatial-average specific absorption rate(SAR) in the human head from wireless communications device: measurement techniques, *IEEE Standards Coordinating Committee* 34, 2003.
- [7] 한국전자과학회 전자기장과 생체관계연구회, 국제 EMF 프로젝트 DB 자료 원본, 2002년.
- [8] <https://gullfoss2.fcc.gov/prod/oet/cf/eas/index.cfm>
- [9] 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.
- [10] 권중화, 이애경, 최형도, "GTEM 셀과 전자파 반-무반사실 사이의 상관관계 알고리즘 비교·분석", *한국전자과학회 논문지*, 13(2), pp. 188-195, 2002년.
- [11] 조용성, 김윤신, 송혜향, 홍승철, "직업성 전자기장 노출과 백혈병 발생에 관한 메타분석", *대한예방의학회지*, 33(1), pp. 125-133, 2002년.

주석 1) 유의확률 : 통계적 가설검정에 있어 데이터에 의해 얻어진 검정통계량에 의한 제1종 오류의 확률을 의미한다. 회귀분석과 같은 통계적 분석을 할 경우 값이 일반적으로 유의수준 0.05 또는 0.01 보다 작으면 모회귀계수의 추정값으로 사용할 수 있음을 의미한다.

2) 회귀분석 : 사회현상이나 자연현상을 설명하는데 있어서 관련된 변수들간의 상호관련성을 찾으려고 할 때, 이들 변수들간의 함수관계를 추구하는 통계적 방법으로 주로 예측에 사용된다.

3) 결정계수 : 회귀분석에서 회귀식의 적합도를 재는 척도로 사용된다.

최 성 호



자과 환경 측정

2000년 2월: 한국외국어대학교 환경학과 (이학사)

2000년 1월~2001년 12월: (주)에코솔루션 근무

2002년~현재: 충북대학교 정보통신공학과 석사과정

[주 관심분야] 전자파 인체 영향, 전

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 정보통신 연구소

[주 관심분야] 이동통신 및 전파전파, 마이크로파 전송선로 해석, EMI/EMC 및 전자파 인체보호 규격