

# 전자파 잔향실에서의 임신한 랫에 대한 SAR 통계적 분석

## Statistical Analysis of SAR for Pregnant Rats in a Reverberation Chamber

전상봉<sup>1</sup> · 이애경<sup>2</sup> · 최형도<sup>3</sup> · 백정기<sup>\*4</sup>

Sangbong Jeon<sup>1</sup> · Ae-kyoung Lee<sup>2</sup> · Hyung-Do Choi<sup>3</sup> · Jeong-Ki Pack<sup>\*4</sup>

### 요 약

*In-vivo* 실험용 전자파 잔향실에서의 노출조건을 설정하기 위하여 다수의 임신한 랫이 900 MHz CDMA(code division multiple access) 전자파에 노출되는 조건에서의 SAR(specific absorption rate)에 대한 통계적 분석을 수행하였다. SAR 분석은 전자파 잔향실 내의 부하 조건에 해당하는 임신 랫의 마릿수를 반영하였으며, 임신 랫의 SAR뿐만 아니라, 태아에게 노출되는 SAR을 포함하여 계산하였다. 이를 위해서 한 마리 임신 랫에 대한 SAR을 계산하고, 20마리 임신 랫에 대한 평균 SAR과 비교 분석하였다. 또한, 20마리 임신 랫에 대한 위치별 SAR 값에 대한 편차 및 평균 노출값을 구했다. 20마리 개체 간의 전신 SAR의 편차는 0.24 dB 수준으로 낮게 나타났으며, 태아의 SAR은 임신 랫의 전신 SAR에 대비하여 0.8 dB 이내로 나타남을 보였다.

### Abstract

A statistical analysis of the specific absorption rate(SAR) was performed on a number of pregnant rats exposed to 900 MHz of code division multiple access(CDMA) electromagnetic field, to establish the exposure conditions in a reverberation chamber(RC) for *in vivo* experiments. The SAR analysis reflected the number of pregnant rats corresponding to the loading conditions in the RC and calculated including SARs exposed to the embryos as well as SARs in the pregnant rats. For this purpose, the SAR of one pregnant rat was calculated and compared with the average SAR for 20 pregnant rats. In addition, deviation and average exposure values were obtained for the SAR values according to the location for the 20 pregnant rats. The deviation of the whole-body SAR among the 20 rats was low, at 0.24 dB. The SAR of embryos was less than 0.8 dB, compared with the whole-body SAR of the pregnant rats.

Key words: Specific Absorption Rate, Electromagnetic Field, Animal Study, *In-Vivo*

### I. 서 론

전자파에 대한 일반 대중의 우려는 지속적으로 증가하고 있으며, 특히 5세대 이동 통신서비스로 인해서 더욱

커지고 있다. 미국의 NIEHS(National Institute Of Environmental Health Science)의 NTP(National Toxicology Program) 연구에서는 CDMA(code division multiple access)와 GSM(global system for mobile) 통신 방식의 휴대 전자파 영향

「본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음.[2019-0-00102, 복합 전파환경에서의 국민건강 보호기반 구축].」

한국전자통신연구원 전파위성연구본부(Radio & Satellite Research Division, ETRI)

\*충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University)

1: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0001-8059-9700>), 2: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-002-8082-4194>),

3: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-2652-7524>), 4: 명예교수(<https://orcid.org/0000-0003-3185-6939>)

· Manuscript received August 6, 2020 ; Revised August 16, 2020 ; Accepted September 7, 2020. (ID No. 20200806-004S)

· Corresponding Author: Sangbong Jeon (e-mail: sbjeon@etri.re.kr)

에 대한 발암 및 독성 연구를 위해서 장기 동물 노출 실험을 수행하였다<sup>[1],[2]</sup>. 대규모의 시설 및 연구비가 투입되고 잘 설계된 연구였지만, 연구결과에 대한 몇가지 문제점들이 전문가들로부터 지적되었다<sup>[3]</sup>. 특히, 수컷 랫에 대한 연구결과를 바탕으로 휴대 전화의 발암 가능성을 주장하였으나, 이에 대한 반론 또한 크다. 따라서, 국제적인 전문가들은 NTP 후속 연구에 대한 필요성을 제기하였고, 이러한 필요성에 따라 한국과 일본은 국제 공동 연구를 진행하기로 합의하였으며, 현재 사전 실험이 진행 중이다.

대규모로 진행된 NTP 연구에서는 동물이 임신된 날로부터 5일째 노출을 처음 시작하여 2년 동안 전자파에 노출함으로써 태아 시기부터 생애 전 주기에 걸쳐 실험을 수행하였다. 발암 및 독성 연구를 위한 동물 실험에서는 노출량을 결정하는 것이 무엇보다 중요하다. NTP 연구의 경우, 한 마리에 대해서 랫의 성장에 따른 체중을 고려하여 SAR(specific absorption rate)을 계산하였으며, 이를 근거로 전자파 노출량을 결정하였다<sup>[4]</sup>. 그러나, 대규모 동물 실험에서는 노출되는 동물의 개체 수가 전신 SAR에 영향을 미치므로 랫의 수에 대한 고려가 필요하다. 또한 임신한 랫부터 노출이 이루어지기 때문에 태아에 대한 영향도 검토가 필요하다. 물론, 동물 실험의 전자파 노출에서 직접적으로 태아 기준이 전자파 노출량을 결정하지 않더라도, 노출되는 전자파가 태아에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 분석은 필요하다.

본 논문에서는 한일 공동으로 추진하고 있는 NTP 타당성 국제 공동 연구의 전자파 잔향실 내의 노출 조건을 설정하기 위해 선행적으로 전자파 잔향실 내의 실제 부하 조건을 고려하여 임신한 랫의 마릿수에 대한 영향을 조사하고, 위치별 임신 랫의 SAR 뿐만 아니라, 태아에게 노출되는 SAR을 계산하였다.

## II. 본 론

동물의 전자파 노출 실험을 위한 장치로서 전자파 잔향실이 널리 사용되고 있다. 전자파 잔향실은 전자파 적합성 분야에서 주로 이용<sup>[5]</sup>되었으나, 특정 부피 내에서 통계적으로 균일한 전자기장 분포를 제공하고, 동물이 케이지 내에서 자유롭게 움직일 수 있는 공간을 제공한다는 측면에서 동물 노출 장치로서의 훌륭한 장점이 있다.

하지만, 특정 영역 내에서 전자기장이 균일하게 분포하더라도 노출되는 부하 조건, 즉 랫의 마릿수나 체중 등에 의해 흡수되는 에너지가 달라질 것이다. 따라서, 랫에 흡수되는 SAR을 알기 위해서는 실제 노출되는 개체 수를 고려하여 SAR을 분석할 필요가 있다. 일반적으로 SAR은 측정을 통해 얻기 어렵기 때문에, 해부학적 동물 모델을 사용하여 수치적 계산을 통해 얻는다. 본 연구에서는 임신 랫의 상용 수치 모델<sup>[6]</sup>을 이용하여 20마리의 랫에 대해 계산을 수행하였으며, 여기서 20마리 랫을 사용한 이유는 이전 NTP 연구의 사전 실험(28일 실험)과 동일하게 하기 위함이다.

SAR 계산을 위해 전자파 잔향실의 이상적인 입사 전자기장 모델은 모든 방향에서 입사되는 것이지만, 계산적 한계를 고려하여 결정된다. 이전의 NTP 연구의 경우, 90도 간격의 12-평면과 방법을 이용하였으나<sup>[4]</sup>, 본 연구에서는 잔향실의 이상적 모델에 가깝도록 45도 간격으로 평면파가 입사되는 52-평면과 방법을 이용하였다. 그림 1은 전자파 잔향실을 시뮬레이션하기 위한 52-평면파를 보여주며, 여기서 그림 1(a)는 E-편파, (b)는 H-편파를 나타낸다.

그림 2는 20마리의 임신 랫이 전자파 잔향실 내에 배치되는 위치를 나타낸다. 여기서 랫은 서로 마주 보는 배치를 하여 계산하였다. 물론 살아있는 랫의 경우, 자유롭게 움직이기 때문에 다양한 임의의 배치가 이루어져야 하지만, 본 연구에서는 잔향실 내에 급수가 이루어지는 금속으로 구성된 자동급수 장치가 케이지 사이로 지나가고 랫의 음수 상황을 고려하여 서로 마주 보는 배치로 SAR 분포를 비교하였다.

한편, 랫 간의 간격은 전자파 잔향실의 실험 영역 내에서 가능한 한 멀게 배치하여 전신 평균 SAR 값에 대한

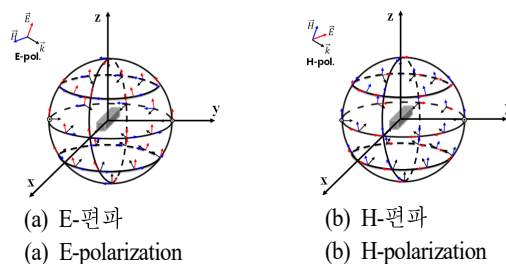


그림 1. 전자파 잔향실을 시뮬레이션하기 위한 52-입사 평면파

Fig. 1. 52-incident plane wave for simulating an RC.

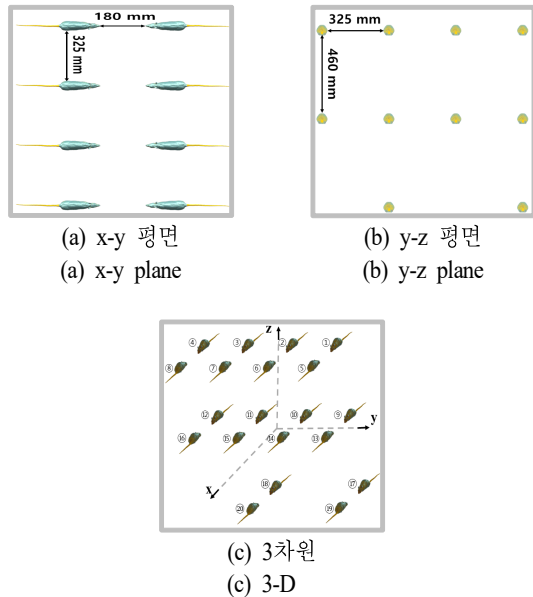


그림 2. 임신 랫의 배치도

Fig. 2. Pregnant rat's arrangement.

개체 간 편차를 분석하였다. 이때, 주파수 900 MHz 사인 파를 사용하였으며, 입력 전기장강도 1 V/m(실효값)이고, 임신 랫은 체중이 300 g인 임신 랫 모델을 사용하였다. 계산에 사용된 프로그램은 상용 툴인 Sim4Life 이다<sup>[7]</sup>. 그림 3은 한 마리 임신한 랫에 대한 SAR 분석 결과이다. 그림 3(a)의 경우, 임신 랫의 중간 단면에 대한 SAR 분포로서 랫의 중앙에서 높지만 대체로 전신의 SAR이 고른 것을 관찰할 수 있다. 또한, 임신 랫의 태아에 대한 SAR 분포는 그림 3(b) 처럼 어미 배속에서 12마리 태아 간의 SAR 차이가 있음을 알 수 있다. 한 마리 랫에 대한 태아의 경우, 임신한 랫의 뇌 및 심장 조직에 비해 SAR 값은 낮지만, 전신 평균 SAR보다는 큰 것을 알 수 있다.

표 1은 랫이 한 마리일 경우와 랫이 그림 2와 같이 20마리가 있을 경우의 SAR을 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 한 마리 조건보다 20마리 조건에서 평균 전신 SAR은 0.37 dB 낮게 나오며, 태아를 포함한 뇌, 심장 조직에서 각각 0.22 dB, 0.39 dB, 0.45 dB가 낮게 나오는 것을 알 수가 있다. 예를 들어, 전신 평균 SAR 4 W/kg의 노출에 대해 한 마리 랫과 20마리 랫을 비교할 때, 실제 20마리 랫 실험에서는 4 W/kg에 못 미치는 평균 3.67 W/kg의 노출이 이루어짐을 의미한다. 따라서, 동물 마릿수가

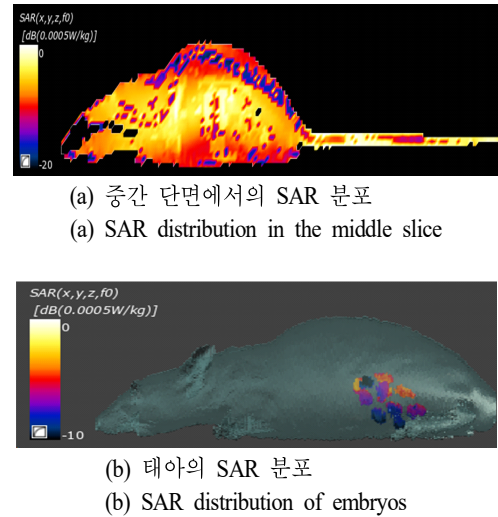


그림 3. SAR 분포

Fig. 3. SAR distribution.

표 1. 1마리 랫과 20마리 랫의 SAR 비교

Table 1. Comparison of 1 rat and 20 rats SARs.

	1 rat [ $\mu\text{W/kg}$ ]	20 rats (avg.) [ $\mu\text{W/kg}$ ]	Diff. [dB]
wbSAR	85.9	78.9	0.37
Embryo	100.4	95.3	0.22
Brain	133.9	122.5	0.39
Heart	153.3	138.4	0.45

늘어남에 따라 동일한 SAR을 얻기 위해서는 더 높은 입력 전력이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 동물 노출 실험을 위한 노출량을 결정할 때는 입력에 대해서 개체 수를 반드시 고려하여야 할 것이다.

그림 4에서는 어미 개체 간의 전신 SAR 및 태아, 뇌, 심장에 대한 SAR 통계 분포를 나타내었다. 각 개체 간의 전신 및 조직의 편차는 각각 0.24 dB(어미 전신 평균 SAR, 78.9  $\mu\text{W/kg}$ ), 0.41 dB(태아 전신 평균 SAR, 95.3  $\mu\text{W/kg}$ ), 0.17 dB(뇌 조직 평균 SAR, 122.5  $\mu\text{W/kg}$ ), 0.39 dB(심장 조직 평균 SAR, 138.4  $\mu\text{W/kg}$ ) 내로 나타난다. 이러한 편차는 개체 간의 유한한 거리로 인한 음영효과에 의해서 발생한다. 사실, 개체 간의 음영효과가 발생하지 않도록 동물 노출 장치는 설계되어야 하나, 제한된 공간과 비용 등을 고려하면 개체 간의 거리를 무한히 넓게 둘 수는 없다. 따라서, 동물 노출 장치 설계 시에는 최적의 개체 간

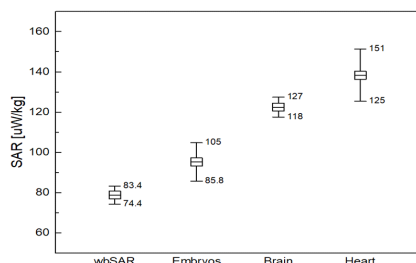


그림 4. wbSAR 및 태아, 뇌, 심장에 대한 SAR 통계 분포

Fig. 4. Distribution of SAR statistics for wbSAR, embryos, brain, and heart.

거리를 고려하여 설계하여야 한다. 앞서 언급한 바와 같이 실험 영역 내에서 랫 간의 간격을 가능한 한 멀리 배치되도록 하여 음영효과를 최소화하였다. 이를 위해 랫 간의 간격을 180 mm×325 mm×460 mm로 하여 각 개체 위치에 따른 SAR 분포를 분석한 결과, 전신 평균 SAR의 경우, 20마리의 랫은 평균 SAR 대비  $\pm 5.7\%$  내에서 각 개체의 SAR 값들이 분포됨을 알 수 있었다. 심장의 경우에는 다른 SAR에 비해서 편차가 조금 높게 나타나는 것은 심장 조직이 상대적으로 크기 때문이다. 또한, 전신 평균 SAR과 태아의 SAR을 비교해 보면, 태아의 SAR은 전신 평균 SAR 대비 대략 0.8 dB 높게 나타나고 있다. 일반적으로 전자파 적합성 분야에서 잔향실에 요구하는 시험 영역의 균일도가  $\pm 3$  dB임을 고려하면 상기 편차가 상대적으로 크지 않다<sup>[5]</sup>. 그럼에도 불구하고, 동물 실험에서는 가능한 편차를 줄이는 노력이 필요하고, 실제 실험 시에는 각 개체의 위치를 주기적으로 변경하여 누적 노출시 편차를 줄일 수 있도록 실험 조건을 설정해야 한다.

### III. 결 론

본 논문에서는 동물 실험에서 요구되는 전자파 노출량을 결정하기 위해 SAR 분석을 수행하였다. 실제 조건을 반영하기 위해 전자파 잔향실 내의 부하 조건에 맞추어 개체 수를 반영하여 노출시켜야 한다. 즉, 랫 마릿수의 증가는 흡수 손실 증가로 노출량을 일정하게 유지하기 위해서는 전자파 잔향실의 입력 전력을 높여야 한다. 랫 간격이 180 mm×325 mm×460 mm 조건에서 20마리 랫의 SAR 분석 결과, 개체 간의 SAR는 0.24 dB 정도 수준을 보였다. 잔향실에서 누적 노출에 따른 편차를 줄이기 위

해서는 랫 간의 간격을 고려한 케이지의 위치뿐만 아니라, 일정한 주기에 따른 배치 간의 순환이 반드시 고려되어야 할 것이다.

본 연구결과를 바탕으로 한국과 일본이 공동으로 추진하고 있는 NTP 타당성 연구를 위한 노출 실험 시 케이지 간격, 동물의 순환 방법 등을 상호 일치시켜 누적 편차를 줄이는 방안 및 생애 전 주기 동안 시기별 노출량과 누적 노출량을 평가할 수 있는 기반을 마련하였다.

### References

- [1] NTP, "Toxicology and carcinogenesis studies in Hsd: Sprague Dawley SD rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency(900 MHz) and modulations(GSM and CDMA) used by cell phones," *Research Triangle Park, NC National Toxicology Program*, NTP TR-595, 2018.
- [2] NTP, "Toxicology and carcinogenesis studies in B6C3F1/N mice exposed to whole body radio frequency radiation at a frequency(1,900 MHz) and modulations(GSM and CDMA) used by cell phones," *National Toxicology Program, Research Triangle Park, NC*, NTP TR-596, 2018.
- [3] ICNIRP NOTE, "Critical evaluation of two radiofrequency electromagnetic fields animal carcinogenicity studies published in 2018," *Health Physics*, vol. 118, no. 5, pp. 525-532, May 2020.
- [4] Y. Gong, M. H. Capstick, S. Kuehn, P. F. Wilson, J. M. Ladbury, and G. Koepke, "Life-time dosimetric assessment for mice and rats exposed in reverberation chambers of the two-year NTP cancer bioassay study on cell phone radiation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 6, pp. 1798-1808, Dec. 2017.
- [5] IEC 61000-4-21, Ed.2.0 "Electromagnetic compatibility (EMC) - part 4-21: Testing and measurement techniques-reverberation chamber test methods," 2011.
- [6] IT'IS Foundation, "Pregnant rat V1.0." 2020. Available: <https://itis.swiss/virtual-population/animal-models/animals/female-sprague-dawley-rat-275g-3/pregnant-rat-v1-0>
- [7] ZMT Zurich MedTech, "Sim4Life," 2020. Available: <https://zmt.swiss/sim4life>