

전자파 흡수율(SAR) 시뮬레이션 기법과 5G 주파수 대역에서의 인공 치아가 삽입된 인체 머리 모델의 전자파 흡수율 시뮬레이션 결과 Simulation Methods of Electromagnetic Wave Specific Absorption Rate (SAR) and the Simulation Results of Human Head Model with Dental Implants in 5G Frequency Band

김 창 균*, 이 성 수*★

Chang-Gyun Kim*, Seongsoo Lee*★

Abstract

It becomes important to analyze the effects of electromagnetic wave on human body, as various wireless equipments are widely used in daily life. SAR (specific absorption rate) is a parameter of the effects of electromagnetic wave on human body. However, it considers only human tissues, and it is difficult to evaluate the effects of electromagnetic wave when metal artifacts are inserted such as dental implants. This paper introduces a method to simulate SAR, and gets its simulated results. Simulated SAR of human head model with dental implants in 30 GHz 5th generation mobile communications (5G) frequency band is 2.50×10^{-3} W/kg in maximum and 8.58×10^{-7} W/kg in average. These values are absolutely below 1.6 W/kg Korean domestic SAR limit.

요 약

다양한 무선기기가 일상화됨에 따라 전자파가 인체에 미치는 영향에 대해 분석할 필요성이 증가하고 있다. 전자파가 인체에 미치는 영향을 나타내는 파라미터가 전자파 흡수율(SAR: specific absorption rate)인데, 이는 단순히 인체 조직만 대상으로 하고 있어 인공 치아 등의 금속 인공물이 삽입된 경우에는 전자파가 미치는 영향을 평가하기가 쉽지 않다. 본 논문에서는 SAR을 시뮬레이션하기 위한 방법을 소개하고 실제로 SAR을 시뮬레이션 하였다. 30 GHz 5세대 이동통신(5G) 주파수 대역에서 인공 치아가 삽입된 인체 머리 모델의 SAR은 최고치 2.50×10^{-3} W/kg, 평균치 8.58×10^{-7} W/kg으로 국내 허용 기준치 1.6 W/kg에 절대적으로 못 미침을 알 수 있다.

Key words : Specific Absorption (SAR), Electrmagnetic Compatibility (EMC), 5th Generation Mobile Communications (5G), Human Head, Dental Implant

* School of Electronic Engineering, Soongsil University

★ Corresponding author

E-mail : sslee@ssu.ac.kr, Tel : +82-2-820-0692

※ Acknowledgment

“This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korean government (Motie: Ministry of Trade, Industry&Energy, HRD Program for Software-SoC convergence) (No. N0001883).” Manuscript received Aug. 20, 2018; revised Sep. 6, 2018. accepted Sep. 7, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

스마트폰, 노트북 등의 다양한 무선기기가 일상화됨에 따라 전자파가 인체에 미치는 영향을 걱정하는 사람들이 많아졌다. 전자파가 인체에 미치는 영향을 나타내는 파라미터는 전자파 흡수율(SAR : specific absorption rate)인데, 인체의 단위 중량당 흡수되는 에너지를 나타낸다. 유럽전기기술표준위원회(CENELEC), 국제비전리방사방호위원회(ICNIRP), 미국전기전자기술자협회(IEEE)에서는 표 1의 SAR 허용치를 제시하였으며[1]-[3], 이에 따라 각국도 표 1과 같이 신체 부위에 따라 0.08~4 W/kg의 허용치를 규정하고 있다[4]. SAR 측정 방법은 IEC 62209-1[5]로 규정되어 있다.

그러나 SAR은 단순히 인체 조직만 대상으로 하고 있어 인공 치아 등의 금속 인공물이 삽입된 경우에는 전자파가 미치는 영향을 평가하기가 쉽지 않다. 금속 인공물은 그 자체로는 인체 조직이 아니므로 전자파를 흡수해도 인체에 위해를 끼치지 않는으나 전자파 흡수에 의해 발생하는 열이 주변 인체 조직에 영향을 미칠 수도 있다.

이러한 문제점을 분석하기 위해서는 인체 조직에 인공 치아가 삽입된 형태를 모델링하고 이를 전자기적으로 시뮬레이션해서 SAR을 계산하여야 한다. 본 논문에서는 SAR을 시뮬레이션하는 방법을 소개하고, 인공 치아가 들어간 인체 머리 모델을 대상으로 SAR 시뮬레이션을 수행하였다.

II. 시간 영역 유한차분법을 통한 전자파 흡수율의 계산 방법

시간 영역 유한차분법(FDTD : finite difference time domain)는 식 (1)-(6)의 맥스웰 방정식을 수치적으로

로 해석하여 전기장 및 자기장을 계산하는 기법으로, 레이더, 전자레인지, 안테나 등과 같이 다양한 전자기 시뮬레이션에 널리 사용되고 있다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \cdot D = \rho_e \tag{4}$$

$$B = \mu H \tag{5}$$

$$D = \epsilon E \tag{6}$$

E : Electric field

H : Magnetic field

D : Electric flux density

B : Magnetic flux density

J : Current density

t : Time

ρ_e : Electric charge density

FDTD에서는 맥스웰 방정식을 식 (7), (8)처럼 전기장 및 자기장의 편미분 방정식으로 변환한다.

$$\nabla \times \check{E} = -\mu \frac{\partial \check{H}}{\partial t} \tag{7}$$

$$\nabla \times \check{H} = \epsilon \frac{\partial \check{E}}{\partial t} + \sigma \check{E} \tag{8}$$

식 (7), (8)은 x, y, z 방향으로 식 (9)-(14)와 같은 유한 차분 공식으로 변환할 수 있다. 그 다음에는 시간 간격에 따라 전기장과 자기장의 값을 교차 계산하고 시간 영역에서 전자기파 전파 해석을 위해 특정 공간에서 연속 전자기장의 데이터 샘플과 시간 간격으로 계산한다[6].

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \tag{9}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \tag{10}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \tag{11}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \tag{12}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y \tag{13}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \tag{14}$$

Table 1. Specific absorption rate (SAR) limits.

표 1. 전자파 흡수율(SAR) 허용치

	Whole Body	Head and Trunk	Limbs
CENELEC [1]	0.08	2	4
ICNIRP [2]	0.08	2	4
IEEE [3]	0.08	2	4
KR Domestic	0.08	1.6	4
EU Domestic	0.08	2	4
US Domestic	0.08	1.6	4

FDTD에서는 그림 1과 같은 YEE 그리드를 사용하며, 모든 H는 4개의 E로 둘러싸여 있고 모든 E는 4개의 H로 둘러싸여 있다. FDTD에서는 전체 공간을 많은 수의 YEE 그리드로 나누어 반복으로 계산하는데, 계산이 충분히 진행되면 그리드의 각 점에서 E, H가 안정된 값으로 수렴한다.

그리드의 각 점에서 E가 결정되면, 해당 위치에서 SAR은 식 (15)와 같이 정의된다[7]. 이때의 SAR은 YEE 그리드의 각 점(i, j, k)에 대해서 구해지며, 이를 평균하면 계산하고자 하는 인체 조직의 평균 SAR을 얻을 수 있다.

$$SAR(i, j, k) = \frac{\sigma(i, j, k)}{2\rho(i, j, k)} |E|^2 \quad (15)$$

$$= \frac{\sigma(i, j, k)}{2\rho(i, j, k)} (|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2)$$

$\sigma(i, j, k)$: Electric conductivity

$\rho(i, j, k)$: Mass density of the tissue

III. 인공 치아가 삽입된 인체 머리 모델의 전자파 흡수율 계산 결과

본 논문에서는 XFDTD[8]라는 FDTD 해석 도구를 사용하여 해석하였다. XFDTD는 해석 대상 물체의 3차원 데이터를 입력하면 식 (9)-(14) 및 식 (15)를 기반으로 전자기 시뮬레이션을 수행한다.

본 논문에서는 곧 상용화될 예정인 5세대 이동통신(5G) 주파수 대역에서 인공 치아가 삽입된 인체 머리 모델의 SAR을 계산하였다.

인체 머리 모델을 작성하기 위해서는 각 조직의 전도도와 밀도 분포를 알아야 하기 때문에 그림 2와 같이 XFDTD에서 제공하는 데이터를 사용하였다. 인공 치아는 그림 3과 같이 직접 모델을 작성하여 인체 머리 모델에 삽입하였다.

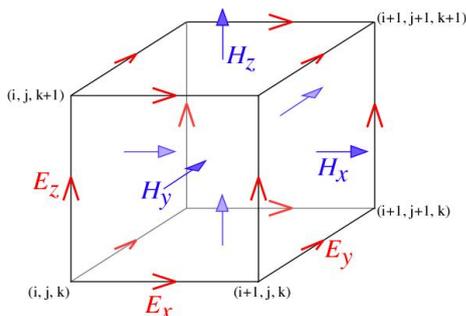


Fig. 1. YEE Grid.
그림 1. YEE 그리드

5G 주파수 대역은 아직 국제 표준으로 정해지지 않았으나[9] 본 논문에서는 삼성 등 5G 장비 공급자가 가장 많이 선택하고 SHF(super high frequency)와 EHF(extremely high frequency)의 경계이기도 한 30 GHz로 가정하였다. 이 대역의 방사 전력도 아직 국제 표준으로 정해지지 않았으나 다양한 문헌에서 대체적으로 예상하고 있는 단말기 방사 전력인 25 mW로 가정하였다.

FDTD에서는 YEE 그리드의 크기에 따라 정밀도와 수행 시간이 큰 차이를 보인다. 그리드 크기를 작게 할수록 정밀도는 높아지지만 수행 시간이 길어진다. 그리드 크기는 파장보다 상당히 작아야 하므로 본 논문에서는 30 GHz 파장의 1/200인 49.97 μ m로 가정하였다.

그림 4와 그림 5는 XFDTD를 사용한 SAR 계산 결과로, 인체 머리 모델 내의 평균 SAR은 8.58×10^{-7} W/kg이며, 최대 SAR은 1g 단위별로 2.50×10^{-3} W/kg, 10g 단위별로 4.00×10^{-4} W/kg이다. 이 값은 국내 허용 기준치 1.6 W/kg에 비해 절대적으로 못미침을 알 수 있다.

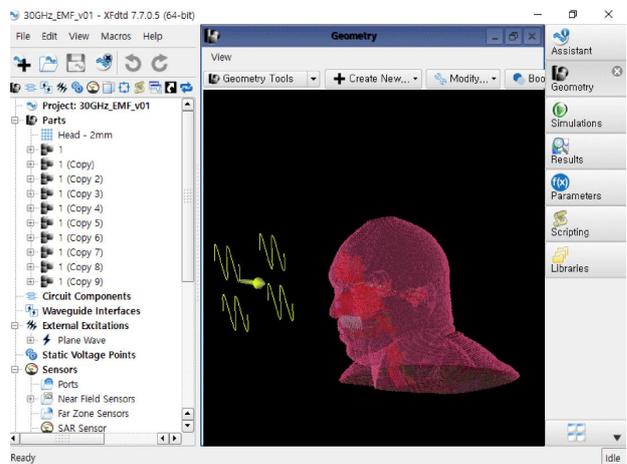


Fig. 2. XFDTD analysis tool and human head model.
그림 2. XFDTD 해석 도구와 인체 머리 모델

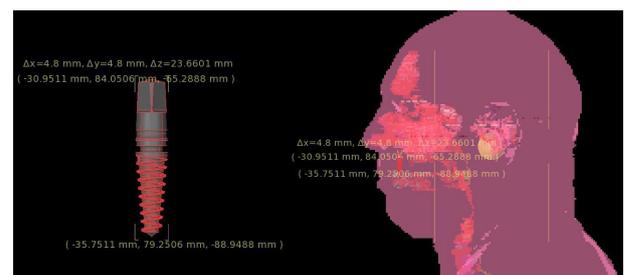


Fig. 3. Dental implant model.
그림 3. 인공 치아 모델

IV. 결론

본 논문에서는 FDTD 기법을 사용하여 SAR을 계산하는 기법을 설명하고, 인공 치아가 삽입된 인체 모델에서의 SAR을 계산하였다. 5G 주파수 대역에서 계산된 SAR은 평균 8.58×10^{-7} W/kg, 최대 2.50×10^{-3} W/kg으로, 국내 허용 기준치보다 매우 작았다. 인공 치아 등을 삽입한 사람의 경우 이동통신 단말기 등을 사용할 때 전자파에 의한 영향을 걱정하는 경우가 많으나 실제로는 별 문제가 없다는 것을 알 수 있었다.

현재 사용하고 있는 LTE의 경우, 주파수 대역이 낮지만 출력이 5G보다 훨씬 크기 때문에 SAR이 증가할 가능성이 있다. 인체에 위대한 수준은 아닐 것으로 예상되지만 다수의 인공 치아를 삽입한 경우 등에 대해서는 인체에 미치는 영향을 연구해볼 필요성이 있을 것으로 보인다.

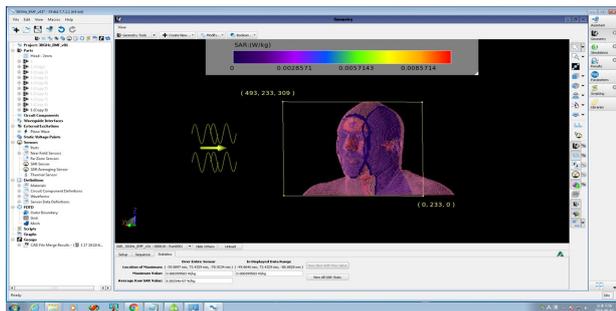


Fig. 4. SAR calculation in 5G frequency band.
그림 4. 5G 주파수 대역에서의 SAR 계산

Quantity	30000 MHz
SAR Sensor (Raw)	
Maximum Value	0.1526 W/kg
Location of Maximum	(-32.987 mm, 83.426 mm, -75.936 mm)
Average Value	8.592e-07 W/kg
Total Power Dissipated	8.014e-06 W
Total Tissue Mass	9.339 kg
SAR Averaging Sensor (10g Average)	
Maximum Value	0.0003996 W/kg
Location of Maximum	(-39.89 mm, 73.433 mm, -78.923 mm)
Average Raw SAR Value	8.592e-07 W/kg
Total Power Dissipated	8.014e-06 W
Total Tissue Mass	9.339 kg
SAR Averaging Sensor (1g Average)	
Maximum Value	0.002498 W/kg
Location of Maximum	(-30.912 mm, 79.429 mm, -72.948 mm)
Average Raw SAR Value	8.592e-07 W/kg
Total Power Dissipated	8.014e-06 W
Total Tissue Mass	9.339 kg
Net Input Power	<unknown>
Power Scaling Factor	1

Fig. 5. SAR calculation results in 5G frequency band.
그림 5. 5G 주파수 대역에서의 SAR 계산 결과

References

[1] CENELEC ENV 50166-2:1995, “Human exposure to electromagnetic fields - high frequency (10 KHz to 300 GHz),” https://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:558100099529401:::FSP_ORG_ID:1258483 (DOI 없음)

[2] ICNIRP, “ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electronic, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz),” *Health Physics*, vol.74, no.4, pp.494-522, 1998. DOI:10.1097/HP.0b013e3181aff9db

[3] ANSI/IEEE C95.1-2005, “IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz,” <https://ieeexplore.ieee.org/document/1626482>. DOI: 10.1109/IEEESTD.2006.99501

[4] National Radio Research Agency, “Specific absorption rate (SAR) limits,” https://www.rra.go.kr/ko/license/D_b_benchmark.do (DOI 없음)

[5] IEC 62209-1:2016, “Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Part 1: Devices used next to the ear (Frequency range of 300 MHz to 6 GHz),” <https://webstore.iec.ch/publication/25336> (DOI 없음)

[6] Intel, “Intel developer zone” <https://software.intel.com/en-us/articles/fdtd-algorithm-optimization-on-intel-xeon-phi-coprocessor> (DOI 없음)

[7] F. Kaburcuk and A. Elsherbeni, “SAR and temperature rise distributions in a human head due to a multi-frequency antenna source,” *Proceedings of International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium*, pp. 1-2, 2018. DOI:10.23919/ROPACES.2018.8364205

[8] <https://www.remcom.com/xfdtd-3d-em-simulation-software/> (사이트 안들어가짐)

[9] B. Kim and Y. Moon, “A study on LC-VCO and wide bandwidth ILFD for advanced wireless communication system,” *Journal of the IEIE*, vol. 54, no.11, pp.1618-1622, Nov. 2017. DOI:10.5573/ieie.2017.54.11.100