인체 통신에 따른 인체 주변에서의 전기장 분포 계산 및 전송 손실 연구

Calculation of the Electromagnetic Fields Distribution around the Human Body and Study of Transmission Loss Related with the Human Body Communication

주영준 · 김윤명*

Young-Jun Ju · Youn-Myoung Gimm*

요약

인체 통신이란 사람의 몸통이나 피부를 전송 매질로 하여 데이터를 송수신하는 통신 방식을 의미한다. 본 논문에서는 인체 피부 표면에 닿아 있는 자유 공간을 전송 매체로 하여 데이터를 전달하는 전송 방식에 대하여, 10~30 MHz 주파수 범위에서 5 MHz 간격으로 5개의 주파수에 대하여 송수신부 사이의 전기장 분포에 대하여 수치 해석하였다. 채널 손실 계산은 총 29종의 조직으로 구성되어 있는 한국형 남성 표준 인체 모델에 상용의 툴을 사용하여 실행하였다. 계산 주파수에 따른 인체 조직의 도전율과 비유전율을 해석 파라미터로 입력하여 송수신부로 간주되는 손등 위에서 전기장 분포를 계산하였다.

손등에 부착된 송신기에 의한 전자파비흡수율(SAR: Specific Absorbition Rate) 값을 계산한 후, 국제비전리복사 방호위원회(ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) 인체 보호 기준과 비교하였다. 또한, 수치 해석으로 구한 전기장을 선(線)적분하여 인접한 극판들 사이의 전압들을 계산하였고, 송신부와 수신부의 전압의 비(比)를 채널 손실로 정의하였다. 수치 해석 결과, 10~30 MHz 주파수 대역에서 채널 손실의 범위는 약 (75 ± 1) dB로 주파수에 따른 채널 손실의 변화가 크지 않았다.

Abstract

Human body communication means transmitting and receiving data through human body medium or through free space along with the human body skin. Electric field distribution around the human body between the transmitter and the receiver were calculated at five different frequencies with 5 MHz interval between 10 MHz and 30 MHz. Commercial electromagnetic simulation tool was used for the calculation of E-field distributions applying the Korean standard male model including 29 different kinds of human tissues.

After calculating specific absorption rate(SAR) values on back of the hand, it was compared with International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection(ICNIRP) human protection guideline. While conductivities(σ) and relative permittivities(ϵ_r) of the human tissues for each frequency were input as the analyzing parameters, electric field intensities near both hands were integrated along the integral line between the nearby electrodes for the calculation of the transmitting and receiving voltages whose ratio was defined as channel loss. The calculated channel losses were

「이 연구는 2010학년도 단국대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음.」

단국대학교 대학원 전자전기공학부(Department of Electronics and Electrical Engineering, Graduate School, Dankook University)

*단국대학교 공과대학 전자전기공학부(School of Electronics and Electrical Engineering, College of Engineering, Dankook University)

· 논문번호 : 20120203-013

· 교신저자 : 김윤명(e-mail : gimm@dku.edu)

· 심사일자 : 2012년 2월 23일 · 수정완료일자 : 2012년 2월 23일

about (75 ± 1) dB and showed nearly flat response all through the evaluated frequencies.

Key words : Human Body Communication, E-Field Distribution, RF Channel Loss, Human Exposure to Electromagnetic Field

I. 서 론

인체를 매질로 하여 데이터를 전달하는 것을 인체 통신이라 지칭한다. 최초 연구는 인체 등의 유전체에 유도되는 정전기장을 이용하여 통신을 실행하는 방법으로, 이 방법은 T. G. Zimmerman^[1]이 소개한 기술에서 발달되었으며, 또한 상기 기술은 미국내 특허로 등록(US5,796,827) 되어 있다^[2]. 이 특허에서는 주파수가 상당히 저주파 대역으로서 많은 정보를 제공하지 못하는 단점이 있다. 또, 다른 인체 통신 방식으로는 인체 피부를 통신 매체로 사용하여 데이터를 전송하는 방식이 있다. 전력 소모가 많고 가격이 비싼 블루투스에 비해 이 방식은 전력 소모가 적고, 데이터 전송률이 높아 응용 분야가 많을 것으로 예상된다.

본 논문은 인체 피부 표면에 송수신 전극을 부착하여 데이터를 전달하는 인체 통신 방식에 대하여, 전자계 수치 해석 프로그램인 Remcom社의 XFDTD 5.0을 이용해 10~30 MHz 주파수 대역에서, 5 MHz 간격으로 5개의 주파수에서 채널 손실을 수치 해석하였다. 프로그램 상에서 송신기 전극을 오른손 손등에 대고, 왼손 손등에 수신기 전극을 댈 때, 양쪽 손등 주변에 유도되는 전기장 세기를 수치 해석으로 구하고, 계산된 전기장 세기를 거리 적분하여 전압을 계산하여 두 손등 사이에 인가되는 전압의 비(比)를 구하여 인체 통신의 경로 손실(channel loss)로 정의하였다.

전자파가 인체에 미치는 건강상의 영향에 대한 고려로 국제 및 국내적으로 전자파 인체 보호 기준이 제정되어 있다^[3]. 인체 통신을 수행함에 있어서 인체 주변이나 인체 내부의 전자기장이 인체 보호 기준에 적합한지를 판정하여야 한다. 국내의 경우, 방송통신위원회고시 제 2009-27호인 전자파 인체 보호기준(2009년 11월 5일)이 있으며^[4], 국제적으로 IC-NIRP(International Commission on Non-ionizing Radiation Protection)의 기준이 있다^[5].

표 1. 10 MHz~10 GHz 대역에서 ICNIRP의 시변 전자기장 강도 기본 제한 기준

Table 1. Basic restrictions for time varying electric and magnetic fields for frequencies up to 10 GHz.

기준	주파수 범위	몸과 몸통의 전류 밀도 [mA/m ²] (rms)	전신(全身)에 대한 평균 SAR [W/kg]	국부(머리, 몸통)에 대한 10g 평균 SAR [W/kg]	사지(四肢)에 대한 10g 평균 SAR [W/kg]
직업인	10 MHz 이상 ~10 GHz 미만	-	0.4	10	20
일반인	10 MHz 이상 ~10 GHz 미만	-	0.08	2	4

국내의 전자파 인체 보호 기준은 ICNIRP의 기준과 동일하며, 일반인과 직업인으로 구분하여 전자파 노출 기준을 제한하고 있다. 표 1은 10 MHz 이상~10 GHz 미만 범위에서의 일반인과 직업인에 대한 ICNIRP의 전자기장 노출 안전 기준치이다.

본 논문에서는 인체 통신 수치 해석 결과들을 표 1의 일반인에 대한 ICNIRP 안전 기준과 비교하고자 한다.

II. 인체 통신 수치 해석

2-1 한국형 남성 표준 인체 모델

인체 통신에 대한 수치 해석을 수행하기 위하여 한국형 남성 표준 인체 모델을 사용하였다. 한국형 남성 표준 인체 모델은 한국전자통신연구원(ETRI)에서 개발한 것으로 그림 1과 같으며, 신체 특성을 표 2에 나타내었다^[6].

2-2 모의 계산 조건

표 2. 한국형 남성 표준 인체 모델의 특성

Table 2. Characteristics of Korean standard male body model.

인체 모델 특성	데이터
키	176 cm
체중	67.0 kg
픽셀 크기	3 mm
인체 조직 종류	29종
제작자	한국전자통신연구원 (ETRI)
제작 년도	2006년도

(a) 한국형 남성 표준 인체 모델 (인체 내부) (b) 한국형 남성 표준 인체 모델(3D)
(a) Korean standard male model (inner body) (b) Korean standard male model(3D)

그림 1. 수치 해석적 한국형 남성 표준 인체 모델
Fig. 1. Korean standard numerical male model.

인체 통신의 개념도는 그림 2와 같다. 그림 2의 인체의 양(兩) 손등에 송신부와 수신부의 전극을 부착하였다.

그림 2에서 송신기의 신호 극판(signal plate)을 표준 인체의 오른쪽 손등에 부착하였으며, 수신기의 신호 극판을 왼손 손등에 부착하였으며, 송수신 회로의 대지판(大地板, ground plane) 전극은 공기 중에 그냥 두었다.

$Z(\omega)$ 들은 공기를 통하여 극판과 인체 또는 극판과 대지(大地) 사이에 존재하는 개념상의 임피던스이다. $Z_1(\omega)$ 와 $Z_3(\omega)$ 는 송·수신기 회로의 대지판들과 인체 사이의 임피던스를 나타내며, $Z_2(\omega)$ 와 Z_4

그림 2. 인체 통신 개념도

Fig. 2. Concept of human body communication.

(ω)는 송·수신기의 회로의 대지판들과 대지 사이의 임피던스를 나타낸다. 이 임피던스들은 인체 통신의 물리적인 이해를 돕기 위한 것이며, 수치 해석에서는 감안되지 않는다. 또한, 수치 해석에서는 인체 영향만의 결과를 얻기 위하여 대지가 포함되지 않았으며, 수치 해석은 FDTD(Finite Difference Time Domain) 방법에 기반한 상용 프로그램인 XFDTD 5.0을 사용하였다.

그림 3에서는 수치 해석을 위한 송신부에, 내부 임피던스가 0 옴이며, 크기가 1 V(peak)의 정현파 1 주기를 10~30 MHz 주파수 범위에서 5 MHz 간격으로 5개의 주파수를 차례로 급전하는 입력값들을 나타내었고, 그림 4에서는 송수신 전극들의 기하학적

그림 3. XFDTD 수치 해석에서 송신부의 입력값들

Fig. 3. Program input values at the transmitter port for XFDTD.

그림 4. 손등에 부착한 송·수신부 구조와 인체의 횡 단면

Fig. 4. Cross sectional view of the transmitter and receiver structures attached to both hands, and of their corresponding human body at equal height from the ground plane.

배치를 도시하였다. 손등에 부착한 송신부의 두 극판 사이의 거리는 12 mm이며, 극판들은 20 mm(가로) × 20 mm(세로) × 3 mm(두께) 크기의 도체판이다. 수신기도 송신기와 같은 방식으로 두 극판으로 구성하였고, 두 극판 사이를 공기로 하였다.

2-3 인체의 전기적 상수값

인체 통신의 수치 해석은 29종의 인체 조직의 전기적 상수값인 도전율과 유전상수를 주파수에 따라 달리하여 입력하였다^[7]. 그 중 송·수신부 극판이 접촉하는 습(濕) 피부 표면의 주파수에 따른 전기상수를 표 3에 나타내었다. 인체를 구성하는 모든 조직에서 주파수의 증가에 따라 도전율은 증가하며, 비(比)유전율은 감소한다.

2-4 시뮬레이션 결과 및 전기장 인체안전 평가

표 3. 계산되는 주파수 대역에서 습(濕) 피부의 도전율 및 비(比) 유전율

Table 3. Conductivities and relative permittivities of wet skin at the calculated frequencies.

주파수 [MHz]	도전율(σ) [S/m]	비(比)유전율 (ϵ_r)
10	0.43	244.20
15	0.47	144.82
20	0.48	125.09
25	0.49	109.61
30	0.50	97.97

표 4. 송신 전극이 부착된 손등(back of the hand)에서 여러 전기적 값들의 계산치

Table 4. Various electrical values at each test frequency on the back of the hand where one of the transmitting electrodes is attached.

주파수 [MHz]	입력 전압 [V]	입력 전력 [mW]	최대 point SAR [W/kg]	최대 1 g 평균 SAR [W/kg]	최대 10 g 평균 SAR [W/kg]	사지 (四肢)에 대한 ICNIRP 일반인 기준 (10 g 평균) [W/kg]
10	1 V (peak)	55	0.632	0.102	0.045	4 [W/kg]
15		237	0.313	0.049	0.022	
20		401	0.317	0.050	0.023	
25		553	0.347	0.055	0.025	
30		704	0.381	0.061	0.027	

수치 해석 프로그램을 이용해서 SAR 값과 전기장 분포를 구하였다^[8]. 전기장과 SAR 값은 송신부가 부착된 부위에서 가장 크게 나타났다. 주파수에 따른 SAR_{rms} 값을 계산하면 표 4와 같다. 10 MHz~10 GHz의 주파수 대역에서의 ICNIRP guideline의 사지(四肢)에 대한 10 g 평균 SAR 값은 4 W/kg으로 정해져 있다.

10~30 MHz 대역에서 최대 10 g 평균 SAR 값의 평균치는 0.028 W/kg이다. ICNIRP 기준의 10 g 평균 SAR 값 (4 W/kg)을 만족시키는 송신기 전극들 사이의 평균적 전압을 계산하면, $\sqrt{4/0.028}=11.9$ V(peak)까지 만족한다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 30 MHz에서의 시간 변화에 따른 전계 분포를 나타내고 있다.

그림 5에서 알 수 있듯이 신호의 전달이 인체 밖의 자유 공간에서 인체 외피를 따라가면서 수신부에 전달되는 형태임을 잘 보여 주고 있다. 또한, 신호는 송신 이후에서 1.912 ns [그림 5(f)]에서 수신부에 최초로 도달함을 확인할 수 있다. 인체 내부의 전류는 주로 표피에서만 흐름을 알 수 있다. 또한, 그림 5에서 알 수 있듯이 인체 표피 상에서 전기장 강도가 가장 큰 곳은 송신부의 신호 전극이 부착된 손등 위라는 것을 알 수 있다.

(a) $t=0$ ns에서 전계 분포
(a) Distribution of E-field at $t=0$ ns

(b) $t=0.387$ ns에서 전계 분포
(b) Distribution of E-field at $t=0.387$ ns

(c) $t=0.768$ ns 경과후의 전계 분포
(c) Distribution of E-field at $t=0.768$ ns

(d) $t=1.149$ ns에서 전계 분포
(d) Distribution of E-field at $t=1.149$ ns

(e) $t=1.530$ ns에서 전계 분포
(e) Distribution of E-field at $t=1.530$ ns

(f) $t=1.912$ ns에서 전계 분포
(f) Distribution of E-field at $t=1.912$ ns

그림 5. 30 MHz에서 송신 시작 후의 시간의 경과에 따른 전계 분포로서, 인체 피부 바깥의 공기를 통하여 에너지 전달이 일어남을 잘 보이고 있다.

Fig. 5. Distribution variation of E-field of 30 MHz along with the elapsed time, which shows wave propagation through the air outside of the human body.

10~30 MHz 대역에서 구해진 전기장을 이용하여 송신부와 수신부 양 극판들 사이의 전압을 구하기 위해 식 (1)과 같이 두 극판 사이의 각 점의 전기장을 거리 적분하여 송신부와 수신부에 유지되는 전압을 계산하였다.

$$V_{peak} = - \int_{P_{gnd}}^{P_{sig}} \vec{E}(\vec{r}; t = max. amplitude) \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

P_{sig} : 송·수신부의 신호 극판, P_{gnd} : 송·수신부의 대지 극판

식 (1)에서 적분 경로는 대지 극판의 중심점에서 신호 극판의 중심점까지의 직선 경로를 선택하였다.

송신부와 수신부의 두 극판 사이의 전압의 비(比)를 식 (2)와 같이 계산하여 채널 손실로 하였고, 그 결과를 표 5에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{채널 손실} &= -10 \log_{10} |S_{12}|^2 \text{ [dB]} \\ &= -20 \log \left(\frac{\text{수신부 두 극판 사이의 순시 최대 전압}}{\text{송신부 두 극판 사이의 순시 최대 전압}} \right) \text{ [dB]} \quad (2) \end{aligned}$$

표 5. 10 MHz와 30 MHz 사이의 주파수 대역에서 송신부와 수신부 전압과 양손 사이의 채널 손실

Table 5. Voltages of the transmitter and the receiver, and channel loss between two hands in 10 ~30 MHz frequency band.

주파수 [MHz]	송신부 양(兩) 극판간의 첩두 전압 [V]	수신부 양(兩) 극판간의 첩두 전압 [μ V]	Channel loss [dB]
10	0.999	175.6	75.10
15	0.999	176.8	75.04
20	0.999	158.9	75.97
25	0.999	175.5	75.11
30	0.999	200.1	73.96

그림 6. 송신 주파수에 따른 양(兩) 손 사이의 계산된 채널 손실

Fig. 6. Calculated channel losses between both hands of the different transmitting frequencies.

그림 6은 송신 주파수에 따른 양(兩) 손 사이의 계산된 채널 손실을 나타내며, 그림에서 알 수 있듯이 20 MHz에서 최대의 채널 손실을 나타내었지만, 주파수에 따른 채널 손실의 변화는 심하지 않음을 알 수 있다.

그림 6의 결과는 인체 통신과 관련된 여타 논문^[9]과 비교될 수 있다. 참고문헌 [9]에서는 100 kHz ~ 100 MHz 사이의 광대역 특성을 연구한 바, 10 MHz ~ 100 MHz 대역에서는 주파수에 따른 양 손목 사이의 채널 손실의 범위는 약 (60 ± 1) dB에 걸쳐져 있다. 본 논문과 주파수 특성은 유사하며, 채널 손실의 크기가 15 dB의 차이가 나지만, 그 차이의 주(主) 원인으로서는 두 논문에서의 전극의 크기 차이라고 생각된다.

Ⅲ. 결 론

주파수 10~30 MHz 사이에서 양손을 송·수신부로 하는 인체 통신에 있어서 주파수에 따른 전기장의 분포도를 구하여 신호 전송 방식을 확인하였다. 수치 해석 결과, 전기장 분포는 주파수에 따라 크게 달라지지는 않았다. 송신 전극판이 20 mm(가로) × 20 mm(세로) × 3 mm(두께)의 크기일 때, 10~30 MHz 대역에서는 평균 11.9 V(peak) 또는 8.42 V(rms) 이하의 전압을 인가하면 ICNIRP의 사지(四肢)에 대한 10 g 평균 SAR 안전 기준치인 4 W/kg 이하가 된다. 또한, 10~30 MHz 대역에서 두 손 사이의 채널 손실의 범위는 약 (75 ± 1) dB로써 주파수에 따라 큰 변화가 없음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] T. G. Zimmerman "Personal area network : Near-field intrabody communication", *IBM System Journal*, vol. 35, no. 3&4, pp. 609-617, 1996.
- [2] 권찬용, "특허로 살펴본 인체 통신의 시대, 어디까지 와 있는가?", *Biotechnology Special Zine*, 2007년 1호, 2007년 11월.
- [3] 변진규, 이에경, "전자파 인체 보호 기준의 국제 표준화 동향", *한국전자과학회지 전자파기술*, 17 (4), pp. 19-23, 2006년 11월.
- [4] 방송통신위원회고시, 제2009-27호 전자파 인체 보호기준, 2009년 11월.
- [5] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection(ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields(up to 300 GHz)", *Health Physics Society, Health Physics Journal*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, Apr. 1998.
- [6] Ae-kyoung Lee, Woo Young Choi, Min Suk Chung, Hyung-do Choi, and Jae-ick Choi, "Development of Korean male body model fokeeju@kongju.ac.krr computational dosimetry", *ETRI Journal*, vol. 28, no. 1, pp. 107-110, Feb. 2006.
- [7] <http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Appendix A. html>

- [8] Yoon-Myoung Gimm, Dong-Yeol Lee, Yu-Ri Lee, and Young-Jun Ju, "Calculation of the electromagnetic fields and SAR distribution around the human body and transmission loss related with the human body communication", *Proceeding of the Bioelectromagnetics Society 33rd Annual Meeting, Presentation no. 03-6*, Jun. 2011.
- [9] Namjun Cho, Jerald Yoo, Seong-Jun Song, Jeabin Lee, Seonghyun Jeon, and Hoi-Jun Yoo, "The human body characteristics as a signal transmission medium for intrabody communication", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 55, no. 5, pp. 1080-1086, May 2007.

주 영 준

2002년 2월: 단국대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)
 2004년 2월: 단국대학교 전자컴퓨터공학과 (공학석사)
 2004년 2월~현재: 단국대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전자파 인체영향, 무선전력전달, EMI/EMC 등

김 윤 명

1975년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1977년 2월: 한국과학원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1990년 9월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1977년 2월~1980년 2월: 금성정밀공업주식회사(現 LIG 넥스원) 중앙연구소 연구원
 1980년 3월~현재: 단국대학교 전자전기공학부 교수
 2000년 6월~현재: (주)EMF Safety 대표이사
 [주 관심분야] 전자계의 인체영향측정, 무선전력전달 등