

구형 다층매질로 모델링된 인체두뇌에서의 전자파에 의한 전력흡수 특성

배 철훈, 김채영

경북대학교 전자전기공학부

00009

Power Absorption Characteristics of a Spherically Multilayered Human Head Structure Irradiated by an Electromagnetic Wave

Cheol Hoon Bae, Che Young Kim

Dept. of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook National Univ.

Abstract - 구형 다층매질로 모델링된 인체의 두뇌부분에 평면파가 입사할 때의 전력흡수 특성을 조사하였다. 사용된 두 주파수인 912MHz 및 2450MHz에서의 조직내의 흡수전력분포를 각각 계산하였다.

1. 서론

최근 전자파에 의한 인체영향에 대한 대중적 관심이 고조되고 있으며 전자파 유해론에 대한 논란이 일고 있다. 특히 국내 이동통신 수요의 비약적인 증가와 함께 휴대폰이 방출한 전자파에 대한 인체의 유해성에 관한 의문이 발생하게 되었다. 이에 대한 학술적 근거를 마련하기 위해서는 인체에 흡수된 전자파 전력을 먼저 계산하여야 한다. 본 논문에서는 인체의 머리부분을 유전체로 도전율이 각기 다른 6층의 구형 다층 손실유전체로 모델링하고 평면전자파 입사시 각 영역에서의 전력흡수특성을 제시한다. 입사평면파의 주파수는 국내에서 최근 시비스를 개시한 CT-2 사용주파수인 912MHz 및 가정용 전자레인지(microwave oven)의 사용주파수인 2450MHz를 택하였다. 전자파에 의한 생체작용에는 열작용, 자극작용 및 기타의 작용이 있지만 본 논문에서는 열작용에 관해서만 국한해서 언급하기로 한다.

2. 본론

2.1. 구형 다층구조에서의 산란해석

2.1.1. 구조

그림 1에 원점에 중심을 가진 (N-1)개의 동심인 구형다층구조를 직각 및 구좌표계와 함께 나타내었다. 평면파는 전장 및 자장이 각각 x, y 방향의 직선편파를 취하고 있고 양의 z방향으로 진행된다. 가장 안쪽에 위치한 구부터 차례로 p = 1, 2, 3, ..., (N-1)로 표기하였고 p = N 은 동심구층을 둘러싸고 있는 매질로서 자유공간으로 가정된다.

2.1.2. 전장 및 자장의 표현

구형 다층구조의 산란해석시는 입사파 및 산란파를 각 영역에 적합한 벡터 구면 고조파로 나타내고, 각 영역의 전개계수를 결정하기 위해 경계조건을 이용한다. 입사평면파의 구좌표계에서의 무한급수 전개식은 참고문헌 [1]의 것을 이용하였다. 각 영역에서의 일반적인 전자기장 표현식은 식 (1)과 같으며 여기서 e^{-iωt} 항은 생략되었다.

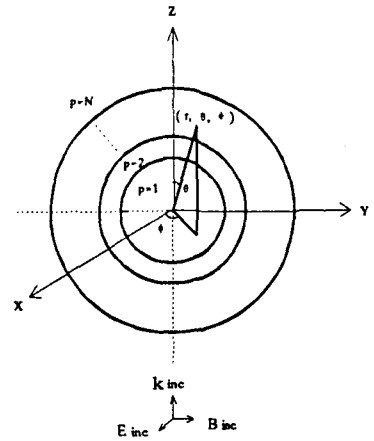


그림 1. 구형 다층구조에 입사된 평면파

$$E_p = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_{np} m_{01n}^{(1)} - i b_{np} m_{e1n}^{(1)} + \alpha_{np} m_{01n}^{(3)} - i \beta_{np} m_{e1n}^{(3)}] \quad (1a)$$

$$B_p = -\frac{k_z}{\omega} E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_{np} m_{e1n}^{(1)} + i a_{np} m_{01n}^{(1)} + \beta_{np} m_{e1n}^{(3)} + i \alpha_{np} m_{01n}^{(3)}] \quad (1b)$$

단

$$m_{e1n}^{(1)} = \pm \frac{1}{\sin \theta} j_{np} P_n^1 \left(\frac{\cos \phi}{\sin \theta} \right) \partial - j_{np} \frac{\partial P_n^1}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \phi}{\cos \theta} \right) \partial$$

$$m_{01n}^{(1)} = n(n+1) \frac{j_{np}}{k_p r} P_n^1 \left(\frac{\sin \phi}{\cos \theta} \right) \partial + \frac{1}{k_p r} [k_p r j_{np}] \frac{\partial P_n^1}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \phi}{\cos \theta} \right) \partial \pm \frac{1}{\sin \theta} \frac{1}{k_p r} [k_p r j_{np}] P_n^1 \left(\frac{\cos \phi}{\sin \theta} \right) \partial$$

이다. 여기서 E_p 및 B_p 는 각각 p번째 영역의 전장벡터 및 자장

벡터를 의미한다. 위 식 (1)에서 식의 간단한 표현을 위해 다음의 변수를 정의하였다.

$$j_{np} = j_n(k_p r), \quad h_{np} = h_n^{(1)}(k_p r), \quad P_n^{-1} = P_n^{-1}(\cos \theta)$$

그리고 미분항과 관련하여 다음의 연속관계를 이용하였다. 여기서 '은 $k_p r$ 에 관한 미분을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \eta_{np} &= \frac{1}{k_p r} [k_p r j_{np}] \\ &= \frac{1}{2n+1} [(n+1)j_{n-1,p} - nj_{n+1,p}] \\ \zeta_{np} &= \frac{1}{k_p r} [k_p r h_{np}] \\ &= \frac{1}{2n+1} [(n+1)h_{n-1,p} - nh_{n+1,p}] \\ \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{\partial P_n^{-1}}{\partial \theta} &= \frac{n}{n+1} \frac{P_{n+1}^{-1}}{\sin \theta} - \frac{n+1}{n} \frac{P_{n-1}^{-1}}{\sin \theta} \end{aligned}$$

$\theta = 0^\circ, 180^\circ$ 에서 발생하는 특이점을 해결하기 위하여 Legendre 다항식을 이용한 다음의 식을 사용한다.

$$\begin{aligned} \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{P_n^{-1}(\cos \theta)}{\sin \theta} &= \frac{n(n+1)}{2} \\ \lim_{\theta \rightarrow \pi} \frac{P_n^{-1}(\cos \theta)}{\sin \theta} &= \frac{(-1)^n n(n+1)}{2} \end{aligned}$$

식 (1)에서 m, n 함수의 위치차 (1), (3)은 각각 정재파 및 외부 진행파를 나타내고 있으며 (3)의 위치차가 붙은 m, n 함수는 식 (1)의 $m_{\rho, n}^{(1)}, n_{\rho, n}^{(1)}$ 에서 j_{np} 대신 h_{np} 로 대체하면 된다.

그림 1에 나타난 구형다층구조 외부에서의 평면파 입사의 경우 가장 안쪽의 구인 $p=1$ 영역에는 정재파만이 존재하므로 제 1종 구형 베셀함수만이 적용가능한 해가 된다. 나머지 $p=2, 3, \dots, N$ 영역에서는 정재파 및 외부진행파가 존재하므로 제 1종 구형베셀함수 및 제 1종 구형한켈함수가 영역 p 의 해가 된다.

2.1.3. 전개계수의 유도

전개계수 $a_{np}, b_{np}, \alpha_{np}, \beta_{np}$ 가 구해지면 식 (1)로부터 모든 영역의 전자장이 구해진다. 이 전개계수의 결정은 경계조건에 의하여 영역 p 와 $(p+1)$ 사이의 경계에서의 경계조건 즉 전지장 접선성분의 연속성은 다음의 식으로 표현된다.

$$(E_p)_\theta = (E_{p+1})_\theta, \quad (E_p)_\phi = (E_{p+1})_\phi \quad (2a)$$

$$(B_p)_\theta = (B_{p+1})_\theta, \quad (B_p)_\phi = (B_{p+1})_\phi \quad (2b)$$

식 (1)에 m, n 함수를 대입하고 식 (2)를 적용하면 다음의 연립 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \sum_n (A_{n,p} \frac{P_n^{-1}}{\sin \theta} + B_{n,p} \frac{\partial P_n^{-1}}{\partial \theta}) \\ = \sum_n (A_{n,p+1} \frac{P_n^{-1}}{\sin \theta} + B_{n,p+1} \frac{\partial P_n^{-1}}{\partial \theta}) \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \sum_n (A_{n,p} \frac{\partial P_n^{-1}}{\partial \theta} + B_{n,p} \frac{P_n^{-1}}{\sin \theta}) \\ = \sum_n (A_{n,p+1} \frac{\partial P_n^{-1}}{\partial \theta} + B_{n,p+1} \frac{P_n^{-1}}{\sin \theta}) \end{aligned} \quad (3b)$$

식 (3)에서 $S_{n,p} = A_{n,p} - A_{n,p+1}, T_{n,p} = B_{n,p} - B_{n,p+1}$ 를 정의하면 다음의 식이 유도된다.

$$\sum_n (S_{n,p} \frac{P_n^{-1}}{\sin \theta} + T_{n,p} \frac{\partial P_n^{-1}}{\partial \theta}) = 0 \quad (4a)$$

$$\sum_n (S_{n,p} \frac{\partial P_n^{-1}}{\partial \theta} + T_{n,p} \frac{P_n^{-1}}{\sin \theta}) = 0 \quad (4b)$$

결국 경계조건은 다음의 두 쌍의 연립방정식으로 귀결된다.

$$\begin{bmatrix} a_{n,p} \\ \alpha_{n,p} \end{bmatrix} = [Q_{n,p+1}^{-1}] \begin{bmatrix} a_{n,p+1} \\ \alpha_{n,p+1} \end{bmatrix} \quad (5a)$$

$$\begin{bmatrix} b_{n,p} \\ \beta_{n,p} \end{bmatrix} = [R_{n,p+1}^{-1}] \begin{bmatrix} b_{n,p+1} \\ \beta_{n,p+1} \end{bmatrix} \quad (5b)$$

여기서,

$$Q_{np}^{11} = (\Delta_{np})^{-1} [\zeta_{n,p} j_{n,p+1} - (\frac{k_{p+1}}{k_p}) h_{n,p} \eta_{n,p+1}]$$

$$Q_{np}^{12} = (\Delta_{np})^{-1} [\zeta_{n,p} h_{n,p+1} - (\frac{k_{p+1}}{k_p}) h_{n,p} \zeta_{n,p+1}]$$

$$Q_{np}^{21} = (\Delta_{np})^{-1} [(\frac{k_{p+1}}{k_p}) j_{n,p} \eta_{n,p+1} - \eta_{n,p} j_{n,p+1}]$$

$$Q_{np}^{22} = (\Delta_{np})^{-1} [(\frac{k_{p+1}}{k_p}) j_{n,p} \zeta_{n,p+1} - \eta_{n,p} h_{n,p+1}]$$

$$R_{np}^{11} = (\Delta_{np})^{-1} [(\frac{k_{p+1}}{k_p}) \zeta_{n,p} j_{n,p+1} - h_{n,p} \eta_{n,p+1}]$$

$$R_{np}^{12} = (\Delta_{np})^{-1} [(\frac{k_{p+1}}{k_p}) \zeta_{n,p} h_{n,p+1} - h_{n,p} \zeta_{n,p+1}]$$

$$R_{np}^{21} = (\Delta_{np})^{-1} [j_{n,p} \eta_{n,p+1} - (\frac{k_{p+1}}{k_p}) \eta_{n,p} j_{n,p+1}]$$

$$R_{np}^{22} = (\Delta_{np})^{-1} [j_{n,p} \zeta_{n,p+1} - (\frac{k_{p+1}}{k_p}) \eta_{n,p} h_{n,p+1}]$$

단, $\Delta_{np} = j_{np} \zeta_{np} - h_{np} \eta_{np}$ 이다.

여기서 $\alpha_{n1} = \beta_{n1} = 0$ 및 $a_{nN} = b_{nN} = 1$ 을 이용하고 다음의 변수를 정의하면

$$[Q_{nT}^{\rho}] = \prod_{\rho=1}^N [Q_{n\rho}^{-1}]; \quad [R_{nT}^{\rho}] = \prod_{\rho=1}^N [R_{n\rho}^{-1}]$$

식 (6)을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} a_{n1} \\ 0 \end{bmatrix} = [Q_{nT}^{-1}] \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha_{nN} \end{bmatrix} \quad (6a)$$

$$\begin{bmatrix} b_{n1} \\ 0 \end{bmatrix} = [R_{nT}^{-1}] \begin{bmatrix} 1 \\ \beta_{nN} \end{bmatrix} \quad (6b)$$

식 (6)으로부터 미지수 $a_{n1}, b_{n1}, \alpha_{nN}, \beta_{nN}$ 이 결정되며 식 (5)로부터 모든 전개계수들이 결정된다.

2.1.4. 전력흡수 특성

구 내부의 평균 흡수전력밀도는 다음의 식에 의해 계산된다.

$$P_a = P_i - P_s \quad (7)$$

여기서 P_i 는 입사파의 전력밀도, P_s 는 산란파의 전력밀도로서 다음과 같다.

$$P_i = \frac{2\pi}{k_N^2} \frac{\epsilon_N}{\mu_N} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (\alpha_{n,N} + \beta_{n,N})$$

$$P_s = \frac{2\pi}{k_N^2} \frac{\epsilon_N}{\mu_N} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|\alpha_{n,N}|^2 + |\beta_{n,N}|^2)$$

2.2. 인체 두뇌구조에의 적용

2.2.1. 모델링

인체의 두뇌는 표 1에 나타난 것처럼 6층의 구형다층구조의 손실 유전체로 근사할 수 있다. 각 층의 비유전율 및 도전율은 주파수에 따라 달라지는데 본 논문에서 다루는 두 주파수 912MHz 및 2450MHz에 대한 복소 비유전율을 표 1에 나타내었다. 아울러 인체두뇌를 최외각 반경 10cm의 구로 가정하고 각 영역의 두께를 나타내었다. 각 영역의 비투차율은 인체조직의 특성을 고려하여 모두 1로 가정하였다.

표 1. 인체두뇌의 구형 6층모델링

영역	복소 비유전율		두께 (cm)
	912 MHz	2450 MHz	
뇌	34.42 + i15.49	32.78 + i15.37	6.98
CSF	80.85 + i14.05	77.00 + i13.94	1.10
경뇌막	51.40 + i25.08	47.52 + i11.42	0.80
백	5.56 + i0.856	5.00 + i0.857	0.70
지방층	5.56 + i0.856	5.00 + i0.857	0.27
피부	51.40 + i25.08	47.52 + i11.42	0.15

2.2.2. 수치해석 결과 및 검토

그림 2 및 그림 3에 각각 912MHz, 2450MHz의 평면파 입사시 x, y, z축을 따른 흡수전력 분포를 나타내었다. 입사전력은 두 주파수에 대해 공통으로 $P_i = 1 [mW/cm^2]$ 이며 각 영역의 상대적인 흡수전력분포를 파악하기 위해 z축상의 최대흡수전력으로 정규화하였고 대수척도를 이용하였다. 두 주파수에 대해 공통적으로 최대전력흡수는 최외각층인 피부조직에서 발생하고 있다. 각 그래프의 윗부분에 나타난 평균흡수전력값의 비교에서 볼때 912MHz의 주파수가 2450MHz에 비해 상대적으로 인체두뇌조직에 더 많이 흡수됨을 알 수 있다. 두 그래프의 비교에서 현격한 차이는 중심부인 뇌영역에서의 흡수량인데 이는 2450MHz 주파수 자체가 가지는 상대적인 저투과성과 관련지어 이해될 수 있다. 흡수된 전자파 에너지는 조직내의 주열발생을 야기하는데 위의 결과로써 조직내의 뜻하지 않은 열생성에 의한 인체장에는 2450MHz에 대해 상대적으로 더 커짐을 알 수 있다.

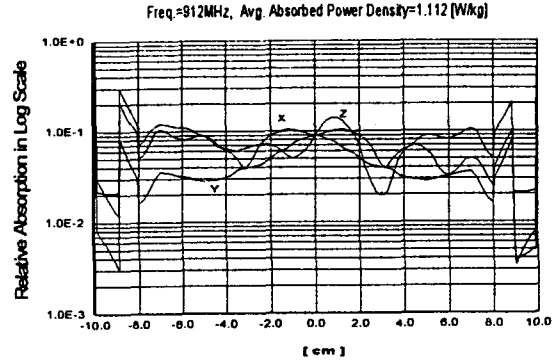


그림 2. 912MHz에 대한 인체두뇌의 흡수전력분포

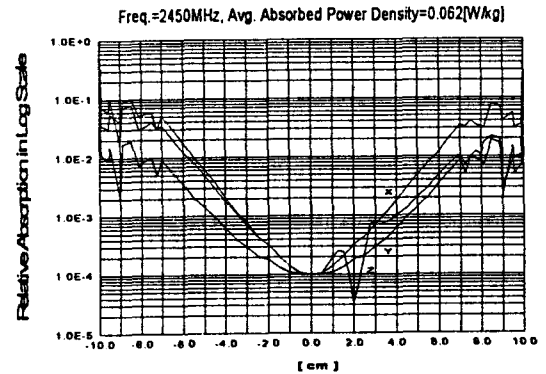


그림 3. 2450MHz에 대한 인체두뇌의 흡수전력분포

3. 결론

동심인 구형다층매질에 평면파 입사시의 전자기장 계산법을 제시하였다. 이를 이용하여 인체두뇌에서의 전자파에 의한 전력흡수특성을 해석하였는데 논의된 두 주파수 912MHz, 2450MHz에 대해 전자가 인체두뇌에 더 많은 흡수를 일으키게 되며 따라서 조직내의 열생성에 의한 영향이 더 커짐을 알 수 있었다. 해석 결과가 나타내듯 전자파에 의한 인체두뇌에서의 흡수는 입사주파수에 밀접한 관련이 있음을 볼 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*. New York : McGraw-Hill, 1941. sec.9.25.
- [2] A. R. Shapiro, R. F. Lutomirski and H. T.Yura, "Induced fields and heating within a cranial structure irradiated by an electromagnetic plane wave." *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-19, pp.187-196, Feb. 1971.
- [3] J. C. Lin, "Interaction of two cross-polarized electromagnetic waves with mammalian cranial structures." *IEEE Trans. Biomedical Eng.*, vol.BME-23, pp.371-375, Sept. 1976.
- [4] A. L. Aden and M. Kerker, "Scattering of electromagnetic waves from two concentric spheres." *J. Appl. Phys.*, vol.22, pp.1242-1246, no.10, 1951.
- [5] W. C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1990.