

극저주파 자기장에 의한 인체 두부 및 복부에서의 와전류 해석

명성호*, 김상범**, 이동일**, 한인수***, 박종근***
 *한국전기연구원, **전력연구원, ***서울대학교

Eddy Current Calculation of Human Body by ELF 60Hz Magnetic Field

Myung Sung Ho*, Kim Sang Beom**, Lee Dong IL**, Han In Soo***, Park Jong Keun***
 KERI*, KEPRI**, Seoul National University***

Abstract - 본 논문에서는 인체 조직모델을 전기적 성질을 가지고 있는 정육면체 셀로 가정하여 각 인체조직을 Impedance Network로 모델링하여 Maxwell Equation을 간단한 Circuit Equation으로 전환하는 방법을 이용하여 인체 와전류를 계산하였다. 인체에 유도되는 와전류 해석 예로써는 인체의 두부 및 복부 단면 모델을 사용하여 각 조직의 전도도에 따른 조직에 유도되는 전류를 계산하였다.

다양한 조직이 붙어 있는 경우의 경계면에서도 각 셀(Cell)의 크기를 좀 더 작게 한다든지 할 수 있다.

Impedance Method는 정적 상태(Steady State)에서의 문제를 풀게 되므로, 페이서(Phasor)를 이용하게 된다. 각각 Loop상에서, 복소전류를 정의하여 식(1) 및 식(2)와 같은 회로방정식을 쓴다.

$$EMF_{i,j} = Z_x^{i,j}(I_{i,j} - I_{i+1,j}) + Z_y^{i,j+1}(I_{i,j} - I_{i+1,j}) + Z_x^{i+1,j}(I_{i,j} - I_{i-1,j}) + Z_y^j(I_{i,j} - I_{i,j-1}) \quad (1)$$

1. 서 론

최근에는 Finite Difference Time Domain과 Moment Method 등을 이용하여, 유도전류 계산을 하고 있으나 이러한 방법들은 많은 계산 시간과 메모리 할당을 필요로 할 뿐만 아니라, 주로 RF나 HF에서의 계산에 이용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 인체 조직모델을 전기적 성질을 가지고 있는 정육면체 셀로 가정하여 각 인체조직을 Impedance Network로 모델링하여 Maxwell Equation을 간단한 Circuit Equation으로 전환하는 방법을 이용하여 유도 전류를 계산 하고자 한다.

$$EMF_{i,j} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{B}_{i,j} \cdot \vec{n} ds \quad (2)$$

위의 식을 만족하는 각 루프에 대한 회로 방정식이 구해지고, 이로 인해 구해지는 행렬은 거의 대각행에만 원소가 존재하고, 나머지 부분은 0인 (Diagonally Dominant)행렬이 된다. 이 행렬식을 풀 때는 역행렬 이용하여 풀 수도 있겠지만, 큰 시스템인 경우에는 그렇게 구하기는 무리이다. 따라서, 이런 대각행이 주를 이루는 행렬인 경우에는 SOR(Successive OverRelaxation)을 이용하여 풀면 간편하다. 이 방법은 각각의 루프(Loop)의 전류값의 초기치를 대입한 후, 계속 재귀방정식(Updated Equation)을 풀어 재귀를 해도 거의 같은 값에 도달하면, 그 값이 해가 되는 것이다.

아래의 그림 3은 인체를 나타내는 조직을 2차원 회로망화 하여 나타낸 것이다.

Impedance Method는 Maxwell equation을 간단한 Circuit Equation으로 바꾸어 구하는 TLM의 한 방법이라 할 수 있다. 낮은 주파수의 경우에는 파장이, 인체의 크기에 비해 훨씬 크기 때문에, 이 방법은 내부의 전류 밀도나 유도 전기장을 구하는 데 매우 효과적이라고 할 수 있다. 시간에 따라 변하는 자기장이 인체 조직에 조사될 때, 우리는 인체는 본래 비자화성이라는 사실을 이용하게 된다. 이유인 즉, 인체의 μ 값은 공기의 μ 값과 거의 동일하기 때문이다. 이런 비자화성은 조사되는 자기장이 인체에 의해 약간의 변화를 무시할 수 있는 근거가 된다고 할 수 있다. 이 방법에서 인체 조직에 따른 복소전도도 $\sigma + j\omega\epsilon$ 값으로부터 회로망을 구성하여, 그에 따른 유도전류값을 계산하게 된다. 왜냐하면, 인체의 Impedance는 저항성분과 콘덴서성분으로 구성할 수 있기 때문이다.

적용 예로써 인체에 유도되는 와전류 해석 예로써는 인체의 두부 및 복부 단면 모델을 사용하여 각 조직의 전도도에 따른 조직에 유도되는 전류를 계산하였다.

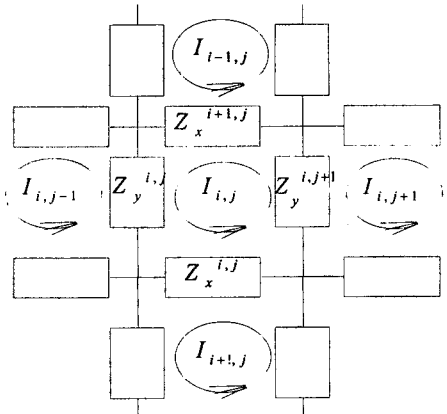


그림 3. 인체를 2차원 회로망화하여 나타낸 단면

SOR(Successive OverRelaxation)에 관한 식은 다음과 같다.

$$I_{i,j}^{n+1} = aK_{i,j} + (1-a) I_{i,j}^n \quad (3)$$

2. Impedance Method 알고리즘

Impedance Method는 Maxwell equation을 간단한 Circuit Equation으로 바꾸어 구하는 TLM(Transmission Line Modelling)의 한 방법이라 할 수 있다. 낮은 주파수의 경우에는 파장이, 인체의 크기에 비해 훨씬 크기 때문에, 이 방법은 내부의 전류 밀도(Current Density)나 유도 전기장(Induced Electric Field)을 구하는 데 매우 효과적이라고 할 수 있다.

Impedance Method를 적용시 각 셀(Cell)의 크기나 모양은 제한이 없으며 정확히 계산할 부분이 있다면, 여러 가지 모양으로 촘촘히 계산할 수도 있고, 서로 다른

여기에서

$$K_{i,j} = \frac{Z_x^i I_{i+1,j} + Z_y^{i+1} I_{i+1,j+1} + Z_x^{i+1} I_{i-1,j} + Z_y^i I_{i,j-1} + EMF_{i,j}}{Z_x^i + Z_y^{i+1} + Z_x^{i+1} + Z_y^i}$$

식(3)에서 n은 재귀횟수(Iteration Number), a는 Relaxation Factor이다. 대부분의 Over Relaxation에서는 a값이 1과 2사이가 된다.

그리고 각 셀(Cell)에 대해서, $\sigma + j\omega\epsilon$ 값을 얻을 수 있으며 실제 Impedance 값은 아래 식과 같이 구해질 수 있다.

$$Z^{i,j} = \left(\frac{1}{\sigma^{i,j} + j\omega\epsilon^{i,j}} \right) \frac{\Delta X_i}{\Delta X_m \Delta X_n} \quad (4)$$

위의 식에서 $Z^{i,j}$ 는 x방향으로 흐르는 전류에 대한 i, j번째 셀(Cell)의 Impedance를 뜻하며 $\sigma^{i,j}$ 와 $\epsilon^{i,j}$ 는 i, j번째 셀(Cell)의 전도도(Conductivity)와 유전율(Permittivity)을 나타낸다. ΔX_i 과 ΔX_m 은 각각 X_i , X_m 방향의 셀(Cell) 크기를 나타낸다. 그리고, ΔX_n 은 layer의 깊이(depth)이다.

한편, 계산하고자 하는 주파수 대역이 Power Frequency(50/60 Hz) 범위이므로, $j\omega\epsilon$ 항은 σ 항에 비해서, 현저히 작기 때문에 무시될 수 있으므로 식(4)는 아래와 같이 식(5)로 바뀌어진다.

$$R^{i,j} = \frac{1}{\sigma^{i,j}} \frac{\Delta X_i}{\Delta X_m \Delta X_n} \quad (5)$$

와전류 밀도를 구하는 절차는 다음과 같다.

- Step 1. 각각의 루프 전류를 SOR(Successive Over Relaxation) 방법으로 구한다.
- Step 2. 셀(Cell)의 각 모서리에 흐르는 전류를 두 선에 흐르는 전류를 더함으로써, 각각의 선전류를 계산한다.
- Step 3. 각 방향의 두 선전류를 더하여 평균값을 구하여 셀(Cell)을 대표하는 선전류 성분을 구한다.
- Step 4. 각 선전류 성분을 전류 방향에 수직인 면적으로 나누면, 조직의 와전류 밀도가 구해진다.

3. Impedance Method를 이용한 와전류 계산 예

3.1 인체 복부에서의 와전류 계산

1μT의 수직 평등 자기 분포하에서 인체 복부에 유기 되는 와전류 밀도를 해석하였다. 해석 대상 모델은 그림 2와 같이 간을 중심으로 한 복부 단면을 사용하였으며 이 때 Cell의 단면은 1/2inch 씩 나누었다. 인체 복부에 위치하는 장기의 전도도는 다음 표 1을 사용하였다

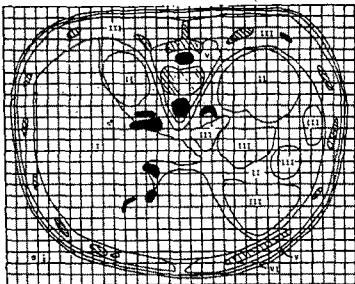


그림 2. 간을 중심으로 한 단면

표 1. 50/60 Hz에서의 각 조직의 전도도

조직(Tissue)	50/60Hz
	σ (S/m)
1. Liver	0.13
2. Kidney	0.16
3. Muscle	0.52
4. Bone (뼈)	0.04
5. Fat	0.04
6. Skin	0.11
7. Blood(혈액)	0.6

수치적으로 구한 와전류 밀도 결과를 그림 3에 등전류 밀도 분포도로 나타내었다.

$J_T = \sqrt{J_x^2 + J_y^2}$ 의 최대값은 15.48×10^{-3} [mA/m²] 이었다.

와전류의 값은 이론적으로 중심에서 표면으로 갈수록 증가한다. 그러나, 그림 3의 결과를 보면 대부분의 분포가 내부로 들어갈수록 전류밀도가 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 와전류값은 각 조직, 예를 들어, Blood조직만을 생각했을 때, 조직의 경계에 와전류값이 존재하고, 내부에 비해 비교적 큰(Dominant)값을 갖는다고 할 수 있다. 그러나, Blood같이 전도도가 큰 조직 위에 그 보다 전도도가 낮은 조직이 주위에 있을 때에는 전도도가 큰 조직에 의한 와전류 성분만 두드러지게 된다. 즉, 전도도가 큰 조직 표면의 값이 비교적 크게 나오므로 그 근처의 와전류 값을 대표하게 된다. 그와 반대로, 전도도가 큰 조직이 작은 조직의 바깥을 둘러싸고 있는 경우에는, 큰 조직의 경계면에서 비교적 큰 값을 갖는다고 할 수 있다. 이러한 전도도의 문제뿐만 아니라 동심원의 모델이 아닌, 비대칭으로 전도도가 다른 조직이 붙어있는 경우에는, 와전류 값이 대칭으로 생기는 것이 아니라, 비대칭으로 생기는 것을 알 수 있다. 이런 경우에는, 한 쪽으로 몰려있는 부분의 와전류 값이 두드러지게 된다.

본 논문에서 사용한 간을 중심으로 한 단면에서는, 중앙 쪽에 Blood조직과 Kidney를 둘러싸고 있는 비교적 Kidney보다 전도도가 높은 Muscle부분에서 와전류밀도의 값이 크게 나옴을 알 수 있다. 그리고, 또한, 전도도가 낮은 바깥부분에서는 와전류 값이 작고, 안으로 갈수록 커짐을 알 수 있다.

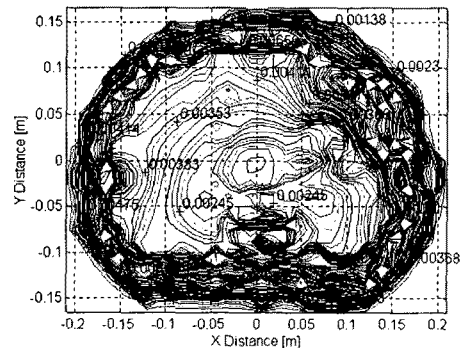


그림 3. 등 와전류 밀도 분포도(단위 mA/m²)

3.2 인체 두부에서의 와전류 계산

1μT의 수직 평등 자기 분포하에서 인체 두부에 유기 되는 와전류 밀도를 해석하였다. 해석 대상 모델은 그림 4와 같은 두부 단면을 사용하였으며 이 때 Cell의 단면은 1/2inch 씩 나누었다. 인체 복부에 위치하는 장기의 전도도는 다음 표 2를 사용하였다

표 2. 50/60 Hz에서의 인체 두부 조직의 전도도

조직(Tissue)	50/60Hz
	σ (S/m)
1. Brain	0.12
2. Bone	0.04
3. Skin	0.11
4. Eye	1.66
5. Blood	0.6

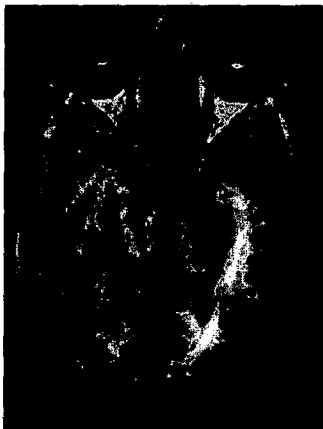
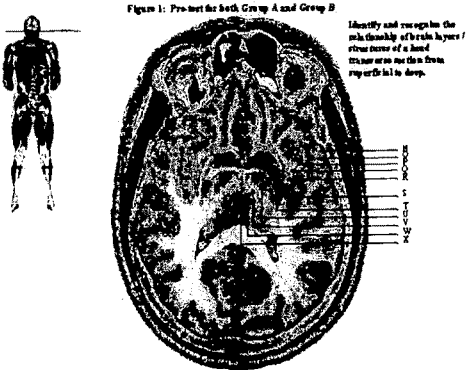


그림 4. 인체 두부 단면

인체 두부 모델에서 수치적으로 구한 와전류 밀도 결과를 그림 5에 등전류 밀도 분포도로 나타내었다.

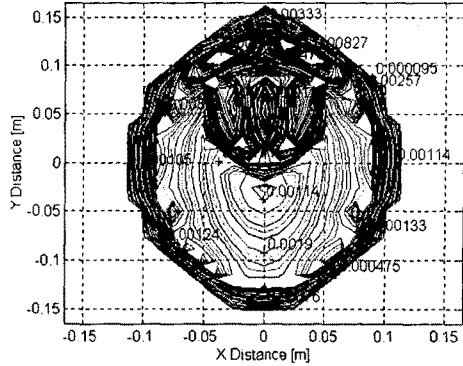
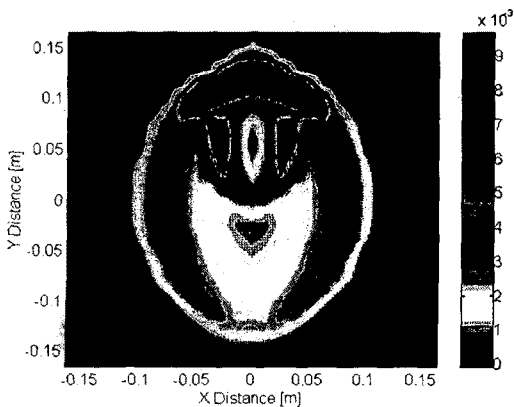


그림 5. 인체 다매질 뇌 모델에서의 와전류 분포

와전류 밀도의 계산 결과 최대값은 $9.59 \times 10^{-3} [\text{mA}/\text{m}^2]$ 이었다. 그림 5의 결과를 보면 인체 눈 부분에서 와전류 밀도값이 크다는 것을 알 수 있는데 이는 눈의 전도도가 1.66 [S/m]로써 다른 부분에 비해 크기 때문이며 또한, 혈액이 모여있는데 비강 부분에서도 와전류 밀도값이 큼을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 Impedance Method를 적용하여 각 조직의 전도도에 따른 조직에 유도되는 전류를 계산하였다. 계산 결과 간을 중심으로 한 모델에서 전도도가 높은 Blood와 Kidney를 둘러싸고 있는 Muscle부분에서 전류밀도값이 높게 나오고, Fat나 Bone같이 전도도가 낮은 모델에서는 전류밀도값이 낮게 나올 수 있었으며 조직사이의 기하학적 배치에 따라서 전류밀도가 영향을 받았다. 또한, 인체 두부 모델에서 수치적으로 구한 와전류 밀도의 최대값은 $9.59 \times 10^{-3} [\text{mA}/\text{m}^2]$ 로써 인체 눈 부분에서 와전류 밀도값이 크다는 것을 알 수 있는데 이는 눈의 전도도가 1.66 [S/m]로써 다른 부분에 비해 크기 때문이며 또한, 혈액이 모여있는데 비강 부분에서도 와전류 밀도값이 큼을 알 수 있었다.

현재 고도로 발달한 계산기를 가지고서도 생체와 같이 복잡한 구조, 특성의 계산을 정확히 행하는 것은 모델화에 한계가 있으며, 현재 3차원의 계산에는 이르렀으나, 이것은 각 장기의 특성(도전율)을 일정한 부분으로 분할한 계산에 지나지 않는다. 향후 혈관과 조직의 막을 고려한다면 전류분포는 바뀌게 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Takuma, 數値電界 計算法, 1980, Corona.
- [2] Electric Power Research Institute, Transmission Line Reference Book 345 kV and Above," 2nd Ed. chap. 8, (1982).
- [3] Charles Polk, Elliot Postow, "Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields", CRC Press
- [4] Matthew, N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press
- [5] Z. Yan, B. L. Qin, X. Lin, R. Y. Weng, G. Gela "Calculation and measurement of field parameters during live-line maintenance," IEEE Trans. on PWRD, vol. 6, no. 3, pp. 1187-1191, July, 1991.
- [6] Sung Ho Myung, "Analysis of magnetic field distribution around electric power facilities", CRIEPI/KEPRI/KERI Joint Workshop on Electric & Magnetic Field Effects, May 26-27 (1999).
- [7] JCNIRP, " Guidelines On limiting Exposure to Non-Ionizing Radiation", Reference Book, (1999).