

Exposure Assessment of EMF Basic Restrictions for Domestic Induction Cooktop

Won-Yong Jang, Jong-Won Park, Jae-Hyeok Park, and Jin-Kyu Byun*

School of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

Nam Kim

School of Information and Communication Engineering, Chungbuk University, Cheongju 28644, Korea

(Received 30 November 2021, Received in final form 30 December 2021, Accepted 5 January 2022)

In this paper, the magnetic field of the domestic induction cooktop is measured according to the IEC standard and the values are compared with exposure limits in the international EMF (Electromagnetic Field) safety guidelines. Also, the equivalent coil of the induction cooktop is derived based on the measured magnetic field distribution using the magnetic dipole moment equation. The magnetic field by the equivalent coil is greater than the measured values at all distances considered and the conservative exposure assessment of the basic restrictions is possible. Next, the current density induced in the human model by the equivalent coil is calculated using the simulation software at various distances for the exposure assessment of the EMF basic restrictions. The exposure index of the induced current density with respect to the exposure limit in the ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) 1998 guideline was less than 0.369 for all the cases considered.

Keywords : EMF exposure assessment, equivalent coil, induction cooktop, induced current density, magnetic field measurement

유도가열 조리기의 EMF 기본한계 노출량 평가

장원용 · 박종원 · 박재혁 · 변진규*

숭실대학교 전기공학부, 서울시 동작구 상도로 369, 06978

김남

충북대학교 정보통신공학부, 충북 청주시 서원구 충대로 1, 28644

(2021년 11월 30일 받음, 2021년 12월 30일 최종수정본 받음, 2022년 1월 5일 게재확정)

본 논문에서는 유도가열 조리기 주변의 다양한 위치에서 IEC 표준에 따라 자기장을 측정하고 EMF(Electromagnetic Field, 전자기장) 인체보호기준의 노출 제한값과 비교하였다. 또한 측정된 자기장 분포와 자기 쌍극자 모멘트 수식을 이용하여 유도가열 조리기의 등가 코일을 도출하였다. 등가 코일에 의한 자기장은 고려한 모든 위치에서 실측한 자기장보다 크며 따라서 등가 코일과 인체 모델을 이용한 보수적인 기본한계 인체노출량 평가가 가능하다. 다음으로 EMF 기본한계 노출량 평가를 위해 등가 코일로부터 다양한 거리에 위치한 인체 모델에 유도되는 전류밀도를 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 국제비전리복사방호위원회) 1998 인체보호기준의 기본한계 노출 제한값 대비 인체전류밀도의 노출지수는 고려한 모든 경우에서 0.369 이하로 나타났다.

주제어 : EMF 노출량 평가, 등가 코일, 유도가열 조리기, 유도전류밀도, 자기장 측정

I. 서 론

최근 가정에서 유도가열 조리기(인덕션 레인지)의 보급과 사용이 늘어나고 있다. 유도가열 조리기는 전자기 유도현상을 이용하여 용기를 직접 가열하므로 산소 소모와 폐가스 배출이 거의 없고 에너지 효율은 높은 등의 장점이 있으나 20~100 kHz 대역 자기장을 이용하고 인체와 비교적 가까운 거리에서 거의 매일 사용되므로 인체안전성을 보장하기 위한 EMF(Electromagnetic Field, 전자기장) 인체노출량 평가 기법의 확립이 필수적이다. 이에 따라 국외에서는 유도가열기기의 EMF 인체노출량 평가와 관련된 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. Kos 등은 IEC(International Electrotechnical Commission, 국제전기기술위원회) 62233 표준을 기반으로 유도가열 조리기의 자기장을 측정하고 등가 코일을 이용하여 어린이와 임산부 모델을 포함하는 다양한 인체 모델 내부의 유도전류밀도와 유도전기장을 계산하고 ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 국제비전리복사방호위원회) 1998, 2010 노출 기준과 비교하였다. 또한 공간평균기법을 적용하여 산업용 유도가열기기에 대해 직업인 노출량 평가를 수행하였다[1,2]. Christ 등은 16 종의 유도가열 조리기에 대해 Narda STS의 EHP-200 프로브를 이용하여 자기장을 측정하고 등가 코일을 도출하여 다양한 연령대의 인체 모델에 대해 인체유도전류밀도를 계산하고 ICNIRP 1998 기준과 비교하였다[3].

ICNIRP 등의 국제기구에서 제정한 전자기장 인체보호기준에서 정의하고 있는 노출 기준은 크게 기본한계(basic restrictions)와 기준레벨(reference levels)로 나눌 수 있다. 기본한계는 신경세포 자극, 조직 온도 상승 등 인체에 실질적 영향을 줄 수 있는 물리량이며 인체 내부에서 발생하는 유도전류밀도, 유도전기장, SAR(Specific Absorption Rate, 전자파흡수율) 등이 포함된다. 기준레벨은 실용적인 노출량 평가를 위해 인체가 위치할 자유공간에서 측정된 전기장/자기장 강도, 전력 밀도 등 기본한계보다 측정이 용이한 물리량으로 정의된다. 이러한 기준레벨은 그 적용이 간단하여 전자기장 인체노출량 평가에 널리 쓰이고 있다. 그러나 확립된 인체영향을 근거로 정해진 근본적인 노출 기준은 기본한계이기 때문에 어떤 노출 상황에서 기준레벨이 노출 제한값을 초과하는 경우에는 별도로 기본한계를 측정하거나 계산하여 그 값이 노출 제한값보다 작을 경우 인체보호기준을 만족한 것으로 판정한다[4,5].

유도가열 조리기에 의한 EMF 기본한계(인체유도전류밀도) 노출량 평가는 인체 내부에서 발생하는 해당 물리량의 특성 때문에 계측기를 이용해 직접 측정하고 평가하는 것이 어렵다. 따라서 인체유도전류밀도는 수치해석 기반의 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 계산하고 그 결과를 바탕으로 노출량

을 평가하는 접근방법을 취하는 것이 일반적이다. 국내에서는 유도가열 조리기가 널리 사용되고 있음에도 불구하고 EMF 인체노출량 평가는 자유공간에서 자기장을 측정하여 기준레벨 노출 제한값과 비교하는 방법으로 시행하고 있으며[6] 근본적인 노출 기준인 기본한계 노출량 평가 연구는 활발히 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 국내에서 시판되고 있는 유도가열 조리기 주변의 다양한 위치에서 자기장을 측정하고 EMF 인체보호기준의 기준레벨 노출 제한값과 비교하였다. 또한 측정된 자기장 분포와 자기 쌍극자 모멘트 수식을 이용하여 유도가열 조리기의 등가 코일을 도출하였다. 고려한 모든 거리에서 등가 코일에 의한 자기장이 실측한 자기장보다 크도록 하여 보수적인 인체노출량 평가가 가능하게 하였다. 다음으로 EMF 기본한계 노출량 평가를 위해 등가 코일로부터 다양한 거리에 위치한 인체 모델에 유도되는 전류밀도를 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 해석하였다. 그리고 해석 결과로부터 인체의 주요 조직과 기관별 전류밀도를 계산하고 인체보호기준의 기본한계 노출 제한값과 비교하였다.

II. 유도가열 조리기의 자기장 측정

1. 유도가열 조리기 자기장 측정 절차

본 절에서는 국내에서 시판되고 있는 C사의 가정용 유도가열 조리기에 대해 IEC 62233 국제표준과 『국립전파연구원 고시 제2019-3호』에서 제시하고 있는 주파수 400 kHz 이하 유도가열 조리기의 자기장 측정 절차를 적용하여 자기장 측정 시험을 진행하였다[6,7]. 측정 표준에서는 일반적인 사용 위치인 유도가열 조리기 경계로부터 수평 거리 $d = 30$ cm에

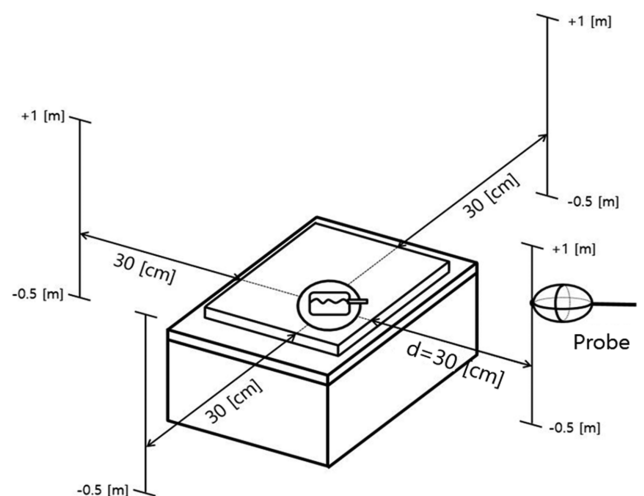


Fig. 1. Measuring distances for induction cooktops as shown in the international standard [7].

서 노출량을 평가하도록 하고 있으나(Fig. 1) 본 연구에서는 worst-case 노출상황을 고려하기 위해 $d=10\sim30$ cm에서 5 cm 간격으로 자기장을 측정하였다.

측정 절차는 다음과 같다. i) 프로브에 영향을 줄 수 있는 다른 전자기장 발생원을 정리한다. ii) 유도가열 조리기 코일과 프로브의 중심을 정렬한다. iii) 유도가열 조리기와 프로브 간의 수평거리 d 를 고정한다. iv) 유도가열 조리기에 표시된 최대 크기의 용기에 물을 2 L 채우고 유도가열 조리기 코일의 정중앙에 위치시킨다. v) 유도가열 조리기의 출력을 최대로 설정하고 가열을 시작한다. 유도가열 조리기가 안정될 때까지 30초 대기 후 프로브가 허용하는 최소 평균 시간을 적용하여 자기장을 측정한다. vi) 프로브가 위치할 수 있는 가장 낮은 위치에서 측정을 시작하고 프로브의 높이 h 를 5 cm 씩 증가시키면서 iv), v)의 과정을 반복하며 최대 지속밀도가 측정되는 높이 h 를 기록한다. vii) 수평거리 d 를 조정하고 iii) 부터 과정을 반복한다.

2. 유도가열 조리기 자기장 실측

본 연구에서는 지름이 20 cm인 용기를 사용하였으며 측정 기기는 Narda사의 EHP-200 자기장 프로브를 이용하였다. 유도가열 조리기에서 측정되는 자기장은 28 kHz 대역에서 기본파가 발생하였으며 홀수와 짝수 고조파가 모두 측정되었다. 모든 고조파의 크기는 기본파 대비 10% 또는 그 미만으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 자기장 측정, 등가 소스 모델링에서 고조파는 무시하고 기본파의 영향만 고려하였다. 유도가열 조리기 자기장 측정 시험 설정은 Fig. 2와 같으며 하나의 프로브 위치에 대해 3회 측정을 실시하였다. Table I에 수평거리 d 에 따른 최대 지속밀도와 노출지수(exposure index)를 나타내었다. 노출지수는 ICNIRP 1998 인체보호기준에서 지정하고 있는 일반인의 지속밀도 기준레벨 노출 제한값(28 kHz에서 6.25 μ T) 대비 실제 측정된 지속밀도의 비율을 나타낸다. IEC 62233 표준에서 자기장 측정 기준 위치로 지정하고 있는 거리 $d=30$ cm에서 노출지수는 0.245였다. Worst-case 노출상황을 고려하여 측면 거리 $d=10$ cm에서 측정된 지속밀도는 인체보호기준을 초과하는 것으로 나타났으나 이러한 노출상황은 극히 제한적이며 대부분의 실제 사용 환경에서는 지속밀도 기준레벨을 만족하는 것으로 나타났다.

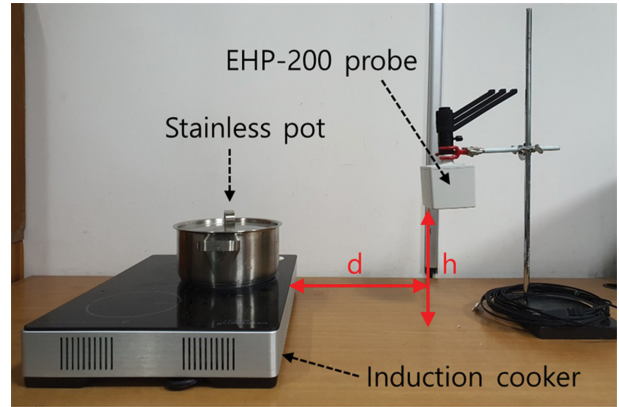


Fig. 2. (Color online) Setup for magnetic field measurement of an induction cooktop.

그럼에도 불구하고 기준레벨을 초과하는 일부 상황에 대해서는 1장에서 설명한 바와 같이 등가 코일과 인체모델을 이용하여 인체전류밀도를 해석하고 기본한계 노출량을 확인할 필요가 있는 것을 알 수 있다.

III. 유도가열 조리기 등가 코일 계산

본 장에서는 유도가열 조리기에서 측정된 자기장 분포로부터 등가 코일을 도출하는 과정에 대해 설명한다. 유도가열 조리기의 등가 소스를 원형 코일로 가정할 경우 Fig. 3에 나타난 원형 코일에 의한 측정점 p 에서의 지속밀도는 $r \gg r'$ 일 경우 자기 쌍극자 모멘트로부터 다음과 같이 근사할 수 있다[8].

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 |\vec{m}|}{4\pi r^3} (2\cos\theta \vec{a}_r + \sin\theta \vec{a}_\theta) \tag{1}$$

여기서 μ_0 는 자유공간 투자율, r 은 코일 중심으로부터 측정점 p 까지의 거리, θ 는 z 축의 양의 방향으로부터 코일 중심과 p 가 이루는 직선까지의 각, \vec{a}_r , \vec{a}_θ 는 각각 r 과 θ 방향의 단위벡터이다(Fig. 3). $|\vec{m}| = IS$ 는 원형 코일의 자기 쌍극자 모멘트 $|\vec{m}|$ 의 크기로 원형 코일이 차지하는 면적 S 와 코일에 흐르는 전류 I 를 곱한 값이다.

(1)로부터 그 중심이 원형 코일의 중심과 일치하고 반지름이 r 인 구의 표면에서 지속밀도의 크기는 다음 식과 같이 나

Table I. Magnetic flux density and exposure index according to the horizontal distance from the induction cooker.

Horizontal distance d (cm)	Magnetic flux density (μ T)	Vertical height h (cm)	Exposure index (ICNIRP 1998)
10	14.206	10	2.273
20	3.995	10	0.639
30	1.533	10	0.245

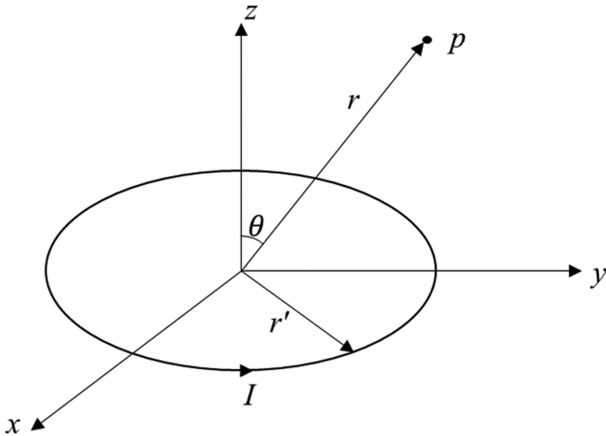


Fig. 3. Circular coil and measurement point p for equivalent source calculation.

타낼 수 있다[9].

$$|\vec{B}| = \frac{k\mu_0|\vec{m}|}{4\pi r^3} \quad (1 \leq k \leq 2) \tag{2}$$

여기서 계수 k 는 구 표면 위 측정점의 θ 값에 따라 변하며 1 이상, 2 이하의 값을 갖는다. 대부분의 경우 현장에서 자속밀도를 측정할 경우 그 크기만 측정하고 \vec{a}_r , \vec{a}_θ 방향의 벡터 성분은 따로 측정하지 않는 경우가 많다. 따라서 실측한 자기장의 크기를 기반으로 등가 원형 코일의 자기 쌍극자 모멘트 크기 $|\vec{m}|$ 을 근사적으로 도출하기 위해 (2)로부터 유도한 다음 식을 이용한다.

$$|\vec{m}| = \frac{4\pi r^3 |\vec{B}|}{k\mu_0} \tag{3}$$

(3)을 실측한 자속밀도의 크기 $|\vec{B}|$ 에 직접 적용하기 위해서는 r 과 k 값을 결정해야 한다. 유도가열 조리기의 경우 실제 코일의 방향과 수평 위치를 예측할 수 있으므로 코일의 높이만 알면 측정점의 r 값과 k 값을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 실제 코일이 조리기 상판 표면에서 1.0 cm 아래쪽에 있다고 가정하였다(조리기 바닥으로부터 7.5 cm 높이). 또한 k 는 (1)과 (2)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$k = \sqrt{1 + 3\cos^2 \theta} \tag{4}$$

각각의 측정점에 대해 (3)과 (4)를 이용해 $|\vec{m}|$ 을 계산하고 코일의 면적이 S 로 주어지면 코일에 흐르는 전류는 $I = |\vec{m}|/S$ 로 계산할 수 있다. 각 측정점마다 $|\vec{m}|$ 과 I 값이 다르게 나오므로 보수적인 노출량 평가를 위해 여러 측정점에서 도출된 $|\vec{m}|$ 과 I 값 중에서 최댓값을 선정하여 등가 코일을 모델링하였다. 실제 유도가열 조리기의 코일은 원형 코일 하나로

이루어져 있지 않고 팬케이크 형태의 코일을 사용한다. 이 경우 반지름이 일정한 범위 내에 있는 유한 개의 동심 원형 코일을 이용하여 소스를 모델링하면 각 코일에 흐르는 전류는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$I = \frac{|\vec{m}|}{\pi \sum_{i=1}^n (r'_i)^2} \tag{5}$$

여기서 r'_i 는 i 번째 원형 코일의 반지름이고 n 은 전체 원형 코일의 개수이다.

등가 코일에서 발생하는 자기장 분포와 실제 유도가열 조리기에서 측정된 자기장 분포를 비교하기 위해 COMSOL Multiphysics 소프트웨어의 AC/DC 모듈을 이용하여 등가 코일의 자기장을 해석하였다[10]. 축대칭 모델링을 이용하여 총 10개의 원형 코일로 등가 소스를 모델링하였으며 코일의 중심으로부터 반지름 r'_i 는 10개의 코일에 대해 1 cm부터 10 cm까지 1 cm 간격으로 설정하였다. Table I에서 측정된 자속 밀도와 (3), (5)를 이용해 $|\vec{m}|$ 과 I 를 구하면 그 최댓값은 $d = 10$ cm에서 측정된 최대자속밀도로부터 $|\vec{m}| = 2.74 \text{ A}\cdot\text{m}^2$, $I = 22.62 \text{ A}$ 로 계산된다. Fig. 4에 거리에 따른 실측 자기장과 COMSOL에서 등가 코일로 계산한 자기장을 비교하였다. 모든 구간에서 등가 코일의 자기장이 실측 자기장보다 14.4% 이상 큰 것을 확인할 수 있다.

등가 코일의 자기장과 실측 자기장이 정확하게 일치하지 않는 것은 원형 코일을 이용한 간단한 등가 코일 모델링이 실제 유도가열 조리기 내부의 자기 차폐 재료와 조리기 위에 놓인 용기의 효과를 고려하지 못해 발생하는 것으로 추정된다. 일반적으로 차폐 재료와 조리 용기 등 강자성체를 고려

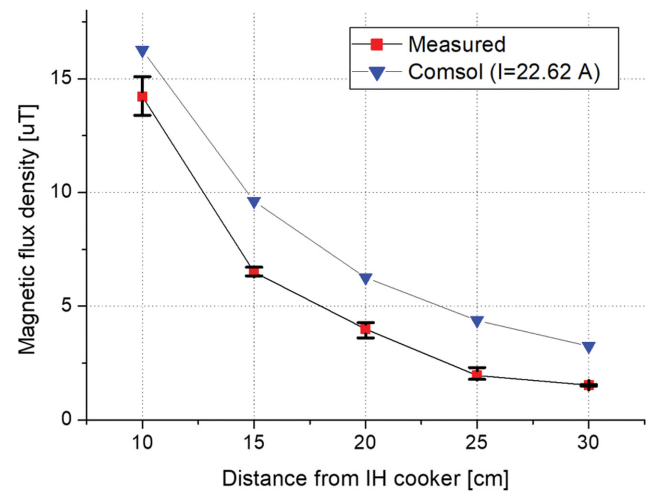


Fig. 4. (Color online) Comparison of magnetic flux density distribution of induction cooktop (measured and calculated from equivalent coil).

할 수 있는 전자기장 해석 소프트웨어에서는 조직별로 세분화된 해부학적 인체 모델의 적용이 어렵기 때문에 균일하거나 간략화된 조직분포를 가진 등가 인체 모델을 사용해야 한다. 반대로 조직별 물질상수를 상세하게 설정한 고해상도 해부학적 인체 모델의 적용이 용이한 Sim4Life 소프트웨어의 자기 준정적 솔버(magneto quasi-static solver)에서는 강자성체와 도체를 동시에 모델링하기 어렵기 때문에 간략화된 등가 코일을 사용해야 한다[1,3,11]. 일반적인 전자기 해석이 아닌 기본한계 인체노출량 평가에서는 자기장 발생원(코일) 주변의 세부적인 자기장 분포보다 인체 모델링과 실제 인체가 위치할 공간의 자기장 분포가 더 중요하다[8]. 따라서 본 논문에서는 앞에서 도출한 등가 코일을 Sim4Life 소프트웨어와 조직을 세분화한 해부학적 인체 모델에 적용하여 기본한계 인체노출량 평가를 수행하였다. 또한 인체가 위치할 공간에서 등가 코일에 의해 계산된 자기장이 실제 자기장보다 크므로 실제 상황에 비해 보수적인 노출량 평가가 가능함을 알 수 있다.

IV. 유도가열 조리기의 기본한계 노출량 평가

1. 인체 모델 및 시뮬레이션 설정

본 장에서는 앞장에서 도출한 등가 코일과 인체 모델을 이용한 유도가열 조리기의 기본한계 노출량 평가에 대해 설명한다. 3차원 인체 모델은 Ella cV3.1을 사용하였다. 이 모델은 키 163 cm, 몸무게 57.3 kg, 나이 26살인 여성의 MRI 영상을 기반으로 제작되었으며 총 72개의 조직으로 구성되어 있다[12]. 인체 모델은 크기 $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ 의 복셀(voxel)로 분할하였으며 전체 해석영역의 복셀 개수는 $d = 10 \text{ cm}$ 일 경우 약 60,439,000개이다. 3장에서 설명한 바와 같이 인체유도전류밀도 계산을 위한 시뮬레이션 소프트웨어는 해부학적 3차원 인체 모델의 적용이 용이한 Sim4Life를 사용하였으며 솔버(solver)는 IF(intermediate frequency, 중간주파수) 대역까지 적용가능하고 인체 모델의 조직별 전기 전도도를 설정할 수 있는 자기 준정적 솔버(magneto quasi-static solver)를 사용하였다[11]. 또한 등가 코일의 전류는 3장에서 도출한 $I = 22.62 \text{ A}$ 로, 주파수는 유도가열 조리기의 기본과 동작 주파수인 28 kHz로 설정하였다.

자기장 실측에 사용한 유도가열 조리기에서 코일은 지면을 기준으로 85 cm 높이에 위치하며 유도가열 조리기의 경계면은 코일의 중심을 기준으로 22 cm 떨어진 곳에 위치해 있다. 시뮬레이션에서는 이를 고려하여 인체 모델의 위치를 Fig. 5와 같이 설정하였다. 유도가열 조리기의 경계면으로부터 인체 모델까지의 거리 d 는 10~30 cm까지 5 cm 간격으로 변화시키며 총 5회의 해석을 시행하였다.

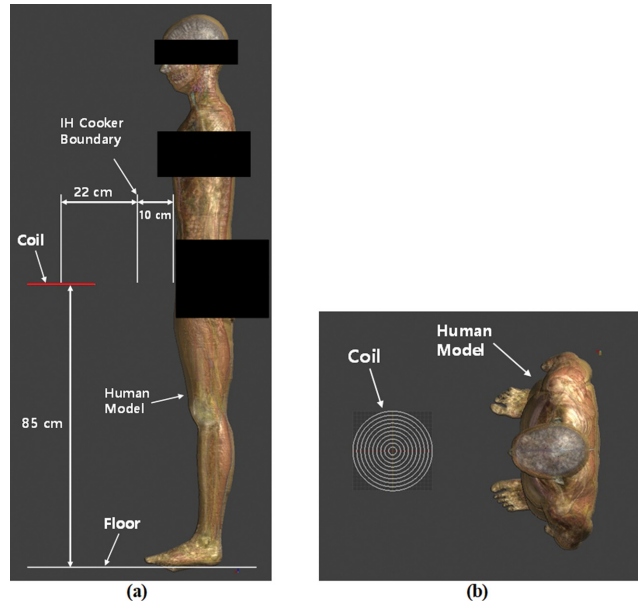


Fig. 5. (Color online) Simulation setup of the equivalent coil and human model for the induced current calculation when $d = 10 \text{ cm}$. (a) side view. (b) top view.

2. 기본한계 노출량 평가 결과 분석

수치해석 시뮬레이션을 통해 인체유도전류밀도를 계산할 경우 조직별 인체유도전류밀도의 최댓값은 시뮬레이션 소프트웨어의 종류나 인체모델을 분할할 때 사용하는 요소망의 크

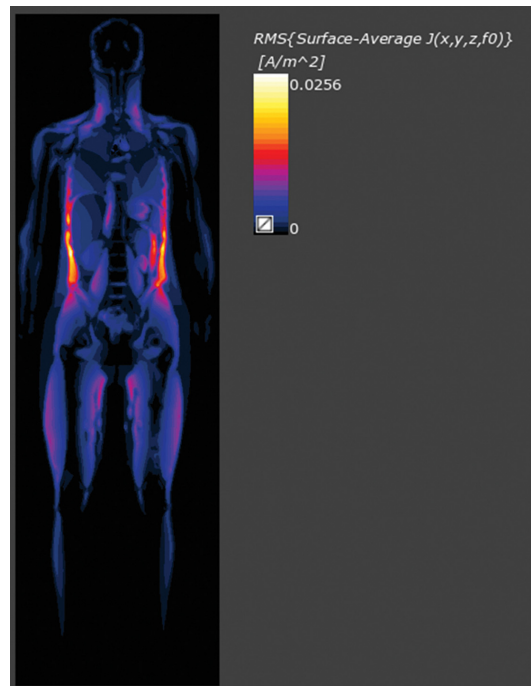


Fig. 6. (Color online) Induced current distribution in the human model when $d = 10 \text{ cm}$ (coronal plane at 10.5 cm from the model front boundary).

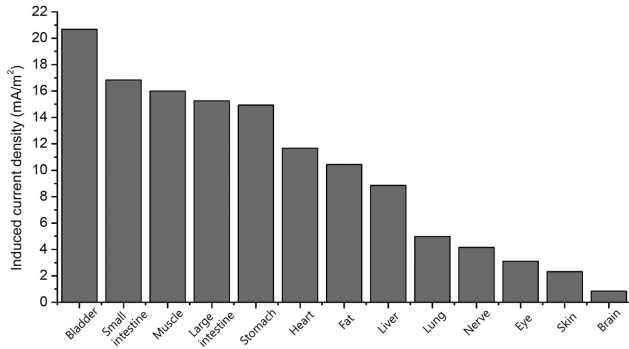


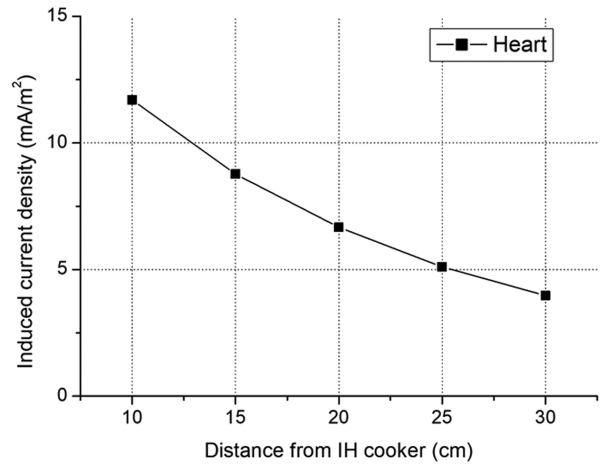
Fig. 7. Induced current density (99th percentile) of various tissues in the human model ($d = 10$ cm).

Table II. Induced current density (99th percentile) and exposure index in the various tissues of the human model ($d = 10$ cm).

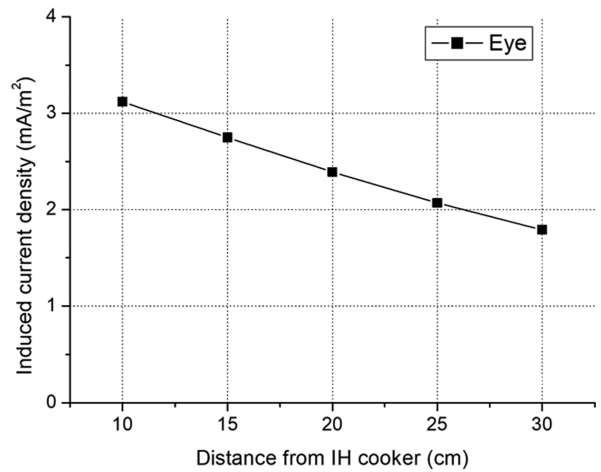
Tissue	Induced current density (mA/m ²)	Exposure index (ICNIRP 1998)
Bladder	20.67	0.369
Small intestine	16.85	0.301
Muscle	16.00	0.286
Large intestine	15.26	0.273
Stomach	14.94	0.267
Heart	11.67	0.208
Fat	10.44	0.186
Liver	8.85	0.158
Lung	4.98	0.089
Nerve	4.15	0.074
Eye	3.12	0.056
Skin	2.32	0.041
Brain	0.84	0.015

기나 품질에 따라 현저하게 달라질 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해 유도전류밀도의 최댓값 대신 99 백분위수(99th percentile) 또는 999 천분위수를 노출량 평가에 사용하는 것이 일반적이다[5,13]. 여기서 백분위수란 전체 데이터를 오름차순으로 정렬하였을 때 백분율로 나타낸 특정 위치의 값이다. 따라서 본 논문에서는 인체의 주요 조직과 기관별로 유도전류밀도 데이터를 추출하고 99 백분위수를 계산해 노출량 평가에 이용하였다. 조리기 경계에서 인체 모델까지의 거리 $d = 10$ cm일 때 인체 모델 전면 경계에서 거리가 10.5 cm인 단면(관상면)에서 ICNIRP 1998 기준에 따라 계산한 유도전류밀도의 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 유도전류밀도가 높은 부분은 다음 3가지 조건 중 적어도 하나를 만족하는 것을 알 수 있다. i) 코일에 가까운 부분(방광). ii) 유도전류의 경로가 커지는 부분(옆구리). iii) 전기전도도가 높은 부분(근육).

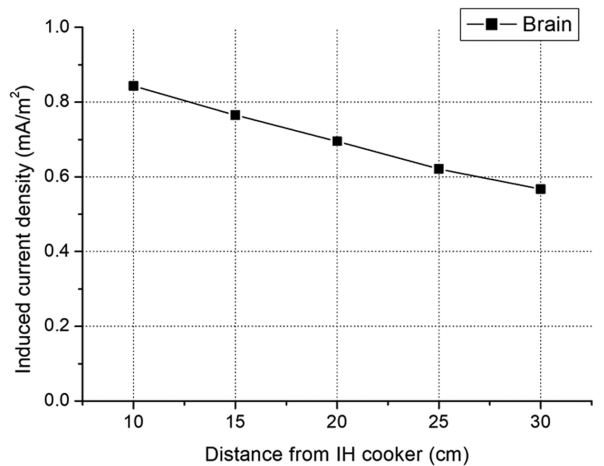
Fig. 7과 Table II에 $d = 10$ cm에서 주요 인체 조직별 유도전류밀도의 99 백분위수와 노출지수를 나타내었다. 인체전류밀도의 노출지수는 자속밀도의 노출지수와 마찬가지로



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Induced current density (99th percentile) of various tissues in the human model according to the distance from the induction cooker d . (a) heart. (b) eye. (c) brain.

ICNIRP 1998 인체보호기준에서 지정하고 있는 일반인의 유도전류밀도 기본한계 노출 제한값(28 kHz에서 $J = 56$ mA/m²)

대비 실제 계산된 유도전류밀도의 비율을 나타낸다. 기관별로 비교했을 때 방광, 소장, 심장의 유도전류밀도가 눈, 피부, 뇌에 비해 상대적으로 높았다. 주요 조직 중에서는 등가 코일에 가까운 방광이 유도전류밀도가 가장 높았고 유도전류밀도와 노출지수는 각각 20.67 mA/m², 0.369였다.

다음으로 유도가열 조리기로부터의 거리에 따른 인체유도전류밀도의 변화를 분석하기 위해 거리 d 에 따른 심장, 눈, 뇌의 유도전류밀도 99 백분위수의 추이를 Fig. 8에 나타내었다. 거리 d 가 증가함에 따라 유도전류밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 $d=30$ cm일 때의 유도전류밀도는 $d=10$ cm일 때의 유도전류밀도를 기준으로 심장, 눈, 뇌에서 각각 66.02, 42.74, 32.74% 감소하였다. 일반적으로 가까운 거리에서 유도전류밀도가 높은 기관일수록 거리가 멀어짐에 따라 유도전류밀도의 감소율이 더 크게 나타났으며 이는 거리가 멀어질수록 인체 모델 전체에 입사하는 자기장이 더 균일해지기 때문인 것으로 추측된다.

2장에서 설명한 기준레벨 노출량 평가(자유공간에서 지속밀도 측정)와 본 4장에서 제시한 기본한계 노출량 평가(인체 모델의 유도전류밀도 해석)를 비교하면 $d=10$ cm에서 지속밀도 기준레벨 노출지수가 2.273으로 인체보호기준을 초과하였던 것에 비해 $d=10$ cm에서 유도전류밀도 기본한계 노출지수는 주요 조직별로 보았을 때 가장 높은 방광에서 0.369로 인체 보호기준을 만족하는 것을 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 기준레벨과 기본한계 중 기본한계가 더 근본적인 노출 기준이므로 기준레벨(실측 지속밀도)이 노출 제한값을 초과하더라도 기본한계(인체전류밀도)가 노출 제한값보다 작으면 인체 보호기준을 만족하는 것으로 판정한다. 따라서 본 논문에서 평가한 유도가열 조리기는 IEC 62233 표준 측정 기준인 30 cm 거리에 인체가 위치하는 경우는 물론이고 측정 기준보다 가까운 10 cm 거리에 인체가 위치하는 경우에도 인체 보호기준을 만족하는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 가정용 유도가열 조리기의 기본한계 인체노출량 평가를 위해 유도가열 조리기 주변의 다양한 위치에서 자기장을 측정하고 이를 기반으로 자기 쌍극자 모멘트 수식을 이용하여 유도가열 조리기의 등가 코일을 도출하였다. 그리고 시뮬레이션 소프트웨어에 등가 코일을 적용하여 다양한 거리에서 인체 모델의 유도전류밀도를 해석하였다. 주요 기관

별 유도전류밀도는 등가 코일과 가깝고 유도전류의 경로가 커지는 방광에서 가장 높았으며 거리 $d=10$ cm에서 주요 기관과 조직의 유도전류밀도는 0.84~20.67 mA/m²로 계산되었다. 이는 인체보호기준에서 제시하고 있는 제한값 대비 노출지수로 환산했을 때 0.015~0.369 수준이었다. 또한 측정 표준에서 노출량 평가 기준 위치로 지정하고 있는 수평 거리 $d=30$ cm에서는 유도전류밀도 0.57~5.63 mA/m², 노출지수 0.010~0.101으로 나타났다. 본 논문에서 도출한 유도가열 조리기의 기본한계 인체노출량 평가 결과는 향후 IF 대역 생활환경 노출 매트릭스 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

References

- [1] B. Kos, B. Valič, D. Miklavčič, T. Kotnik, and P. Gajšek, *Phys. Med. Biol.* **56** (2011).
- [2] B. Kos, B. Valič, T. Kotnik, and P. Gajšek, *Phys. Med. Biol.* **57** (2012).
- [3] A. Christ, R. Guldimann, B. Bühlmann, M. Zefferer, J. F. Bakker, G. C. van Rhoon, and N. Kuster, *Bioelectromagnetics* **33** (2012).
- [4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), *Health Phys.* **74**, 4 (1998).
- [5] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), *Health Phys.* **99**, 6 (2010).
- [6] National Radio Research Agency Notice 2019-3 (2019).
- [7] International Standard IEC 62233, Geneva (2005).
- [8] International Standard IEC 62311, Geneva (2019).
- [9] K. Yamazaki and T. Kawamoto, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **43**, 2 (2001).
- [10] COMSOL Inc. (<https://www.comsol.com>).
- [11] Sim4Life by ZMT. (<https://zmt.swiss>).
- [12] M. C. Gosselin, E. Neufeld, H. Moser, E. Huber, S. Farcito, L. Gerber, M. Jedensjo, I. Hilber, F. Di Gennaro, B. Lloyd, E. Cherubini, D. Szczerba, W. Kainz, and N. Kuster, *Phys. Med. Biol.* **59**, 18 (2014).
- [13] P. Dimbylow, *Phys. Med. Biol.* **50**, 6 (2005).