

공극을 가지는 인비저블 쿡탑의 부하 모델링 방법

전중운**, 오원현*, 박성민**,
제이텍코리아*, 홍익대학교**

Load Modeling Method for Invisible Cooktops with an Air Gap

Jong-Woon Jeon**, Won-Hyun Oh*, Sung-Min Park**

*JTEK Korea, **Electronic & Electrical Engineering Hongik University

ABSTRACT

본 논문에서는 식탁 또는 조리대 상판 아래에 부착되어 공극을 가지는 인비저블 쿡탑의 모델링 방법을 제안한다. 일반적인 유도가열 시스템의 부하 모델링은 전계 등가회로 분석을 이용하지만 제안하는 부하 모델링 방법은 자계 회로 분석을 이용한다. 따라서 용기가 가지는 부하와 공극이 가지는 부하를 분리할 수 있고, 유도가열 시스템 시뮬레이션에 다양한 조건을 부여하여 수행할 수 있다.

1. 서 론

인비저블 쿡탑이란 식탁 또는 조리대 상판 아래에 부착되는 유도가열 시스템이다. 유도가열 시스템에서 에너지를 전달하는 자기력은 워킹코일로부터 출발하여 세라믹 유리, 공기 등 다양한 매질을 통과하고 최종적으로 용기 바닥 면에 와전류손을 발생시켜 발열시킨다. 일반적으로 세라믹 내열 유리를 통해 워킹코일과 용기 사이 경계를 이루도록 하지만 인비저블 쿡탑은 테이블 상판 바로 아래에 부착되어 자기장이 상판을 통과하는 방식을 가지고 있다. 본 논문에서는 공진형 Half-Bridge 회로를 사용하고 테이블 상판의 재질과 두께를 별도의 부하 모델링을 통하여 기존 용기 부하에 추가하는 방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 유도가열 시스템의 공극 부하 분석

일반적인 유도가열 시스템과 달리 인비저블 쿡탑에서는 용기 재질에 따르는 부하 분석뿐만 아니라 워킹코일-용기 바닥면 사이의 매질에 따르는 부하 분석도 필요하다. 워킹코일-용기 바닥면 사이에는 대리석, 각종 목재, 유리 등 다양한 가구 상판들이 있으며, 자주 쓰이는 상판 재료의 투자율은 표 1과 같다. 자연에 존재하는 암석들은 성분 함량, 밀도 등에 따라 수 많은 종류를 가지고 있으므로 투자율을 수치로 보편화하기 어렵다. 반면 가구에 많이 쓰이는 대리석은 주로 방해석 또는 백운석 입자로 구성되어 있으므로 자성 물질이 거의 없다. 따라서 비투자율은 공기와 비슷하게 형성된다. 그림 1과 같이 바닥면 사이에 공기 또는 테이블 상판이 위치해 있을 경우 용기 바닥면의 자계 세기를 H_c , 바닥면의 지름을 l_c 라 하고 상판 또는 공기의 자계 세기를 H_g , 워킹코일-용기 사이 거리를 l_g 라 하고 워킹코일의 감긴 횟수 N 과 워킹코일에 공급되는 전류 i 로 표현하면 식(1)과 같다.

$$Ni = Hl_c + H_g l_g = R_c \phi_c + R_g \phi_g \quad (1)$$

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (2)$$

표 1. 대표적인 테이블 상판 재료의 투자율

Material	Air	Wood	Marble	SUS430	Carbon Steel
Relative permeability	1	1.00000043	1	1000 - 1800	100

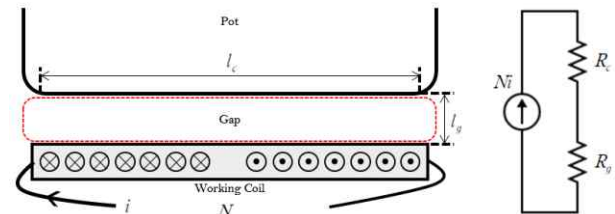


그림 1. 인비저블 쿡탑의 가열 단면도(좌)와 자기 등가 회로(우)

자기저항에 대한 일반 식(2)를 식(1)에 대입하여 해석하면, 워킹코일에서 인가하는 기자력 Ni 는 유도가열 시스템의 전체 부하가 결정하고, 특히 용기의 자기 특성에 영향을 받는다. 또한 공극 또는 특정 매질에서의 투자율과 이격 거리, 단면적에도 영향을 줄 수 있다. 이때 용기 바닥면의 지름 l_c 는 워킹코일 면적을 점유하는 용기를 사용하여 워킹코일-용기 이격 거리만으로 공극이 형성되도록 구성하고, 용기의 크기 및 가열 위치도 일정하다고 가정한다.

2.2 기존 유도가열 시스템의 용기 부하 모델링

대부분의 인덕션 쿡탑 제품들은 4mm 두께의 세라믹 내열 유리를 사용하고 있다. 세라믹 내열 유리뿐만 아니라 실리콘 패드 등과 같은 부속품 또한 기생 자기 저항으로 해석하거나 일정한 릴럭턴스로 설정함으로써 유도가열 시스템의 부하 모델링이 가능하다.

기존 유도가열 시스템에서 다양한 구성에 대한 모델을 변수화하려면 먼저 용기의 컨덕턴스를 계산해야 한다. 워킹코일이 형성한 자기장이 용기 바닥에 와전류손을 일으킬 때 표피효과에 따르는 영향을 받는다.^[1] 이를 활용하여 용기의 컨덕턴스 G 를 구할 수 있다. f 를 동작 주파수, μ 를 용기의 투자율, σ 를 전도율이라 한다면 침투깊이 δ 는 식(3)과 같이 표현하고, 컨덕턴스 G 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

$$G = \frac{\sigma \delta}{2\pi} = \frac{\sigma}{2\pi \sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

식(3)과 식(4)를 통해 재료의 전도율과 투자율을 안다면 다양한 용기의 부하를 모델링하여 회로에 적용할 수 있음을 알

표 2. 대표적인 인덕션 용기 재료의 전도율

Material	Air	SUS430	Carbon steel
Conductivity	$3 \times 10^{-15} \sim 8 \times 10^{-15}$	1.67×10^6	6.99×10^6

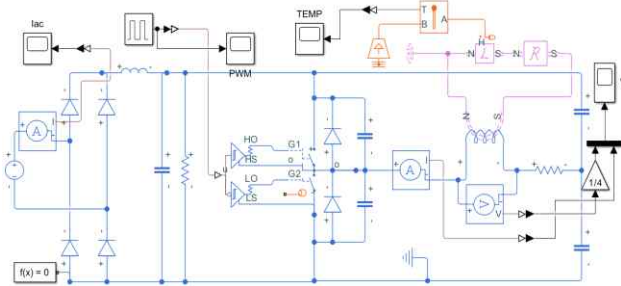


그림 2. MATLAB 시뮬레이션 회로 구성

수 있다. 유도가열 시스템에 사용하고자 하는 용기를 특정하고 해당 용기의 재료에 대한 투자율과 전도율을 표 1과 표 2를 이용하여 식(3)과 식(4) 대입하면 침투 깊이와 컨덕턴스를 구할 수 있다. 또한 공극이 가지는 자기 저항과 달리, 용기가 가지는 등가 자기 저항 R_p 와 컨덕턴스 G 는 요리 냄비의 표면적과 무관하다.^[2]

공극을 이루는 공기 또는 나무, 대리석 등과 달리 용기에 주로 쓰이는 주철이나 페라이트계 스테인리스 등은 투자율과 전도율이 크고, 침투 깊이가 작게 나타난다. 따라서 금속 표면에 와전류손이 발생하고 컨덕턴스 계산을 통해 용기를 모델링할 수 있다.

2.3 실험을 통한 워킹코일 부하 측정

그림 2는 유도가열 시스템에 주로 사용되는 Half-Bridge 회로를 MATLAB Simulink를 활용하여 구현한 회로이다. 시뮬레이션 회로는 용기 부하와 공극 부하를 수치화하여 대입할 수 있게 구현하였다. 실험은 실제 인덕션 쿡탑 3500W 모델과 시뮬레이션을 같은 조건으로 동작시키고 비교하여 타당성을 검증한다. 검증된 시뮬레이션에 공극을 크게 가지는 인비저를 쿡탑의 조건을 부여하여 워킹코일에 인가되는 부하량을 분석한다.

검증에 사용한 용기 부하는 페라이트계 스테인리스 430을 바닥면에 가지고 있고 직경은 25cm인 부하이며, 공극 부하는 실제 인덕션 쿡탑 제품이 가지는 공극 8mm를 설정하였다. 또한 두 시스템의 실험 조건은 표 3과 같다. 실제 인덕션 쿡탑 모델은 출력 전류량을 추종하여 제어하는 방식으로 동작 주파수가 고정되어 있지 않다. 하지만 24kHz는 공진주파수에 가까운 대역이므로 시스템을 최대 출력으로 동작시켰을 때 24kHz $\pm 3\%$ 부근에서 동작함을 확인하였다. 이때 실제 모델에서는 입력전류가 약 15A를 유지하며 동작하였고, 시뮬레이션의 워킹코일 턴 수 파라미터를 조정하여 실제 모델과 유사한 입력전류가 흐르도록 설정하였다.

3. MATLAB 시뮬레이션 결과

그림 3은 실제 모델에서 워킹코일 양단의 전압과 전류를 나타내고, 그림 4는 시뮬레이션에서 워킹코일 양단의 전압과 전류를 나타낸다. 각각 동작 주파수를 약 24kHz로 고정하고 전압과 전류가 피크에 도달했을 때 파형을 확대하여 비교한 모습이다. 전압과 전류의 위상차와 파형의 형태가 실제 모델과 시뮬레이션 모델 사이에 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다.

그림 5는 기존 유도가열 시스템에 테이블 상판을 두었다는 가정하에 일반적인 MDF 목재 18mm 두께와 기기의 기본 공극

표 3 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value	Unit
AC Voltage Source(rms)	220	V
AC Source Frequency	60	Hz
Switching Frequency	24	kHz
Resonant Capacitor	1	μF
Snubber Capacitor	100	μF

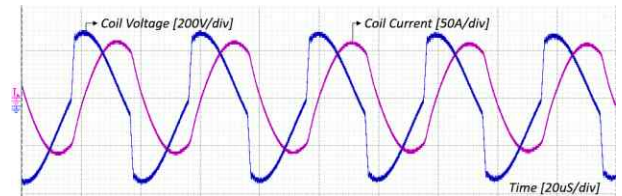


그림 3. 실제 모델 파형 (3.5kW 워킹코일 전압, 전류 계측 파형)

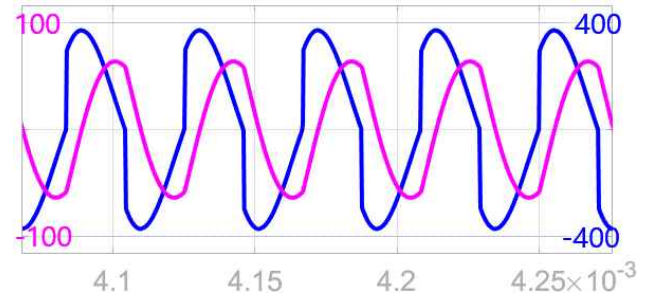


그림 4. 시뮬레이션 워킹코일 전압(파란색), 전류(보라색) 동작 파형

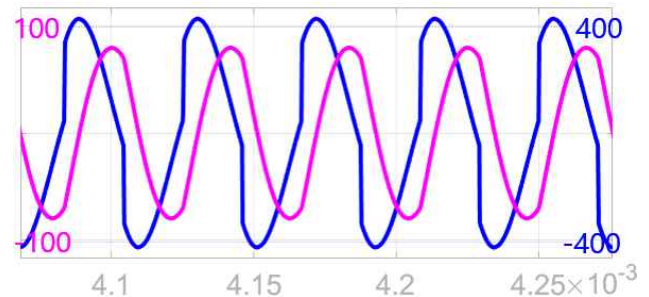


그림 5. 시뮬레이션 (26mm 이격 시) 워킹코일 전압, 전류 동작 파형

8mm를 더하여 총 26mm의 공극을 가졌을 때 워킹코일에 걸리는 전압, 전류 그래프이다. 그림 4와 5의 비교를 통하여 26mm 이격 거리를 가지는 인비저를 쿡탑에서 워킹코일에 걸리는 부하가 전압은 약 $13.63 V_{peak}$, 전류는 $15.91 A_{peak}$ 로 각각 14.6%, 24.8% 커진 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 인비저를 쿡탑의 용기 부하와 공극 부하 모델링 방법을 제안하였고, 실제 인덕션 쿡탑 제품 계측 데이터와 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 결과가 크게 다르지 않음을 검증하였다. 이를 통해 다양한 테이블 상판 재료들을 인비저를 쿡탑에 적용하여 시뮬레이션할 수 있으며, 실제 설계 및 구현에 요구되는 소자의 전기적 특성을 예상할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Baci, Ionel H., et al. "Advanced simulation of load variation in induction heating systems." 2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology. IEEE, 2009.
- [2] Siakavellas, Nicolaos J. "Two simple models for analytical calculation of eddy currents in thin conducting plates." IEEE transactions on magnetics 33.3 (1997): 2245-2257.