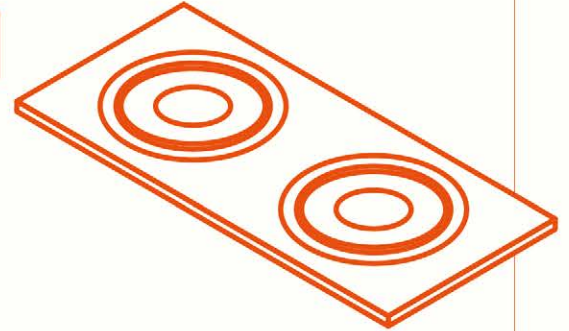




GaN HEMT 기반 Anyplace 유도 가열 시스템 설계 및 제어



1. 소개

최근 가전 제품은 사용자의 안정성 및 편리성은 물론 위생 관리까지 갖춘 제품으로 발전되고 있다. 이러한 추세로 기존의 가스 가열 방식보다 안전하고 청결성이 좋으며 발열이 빠른 유도 가열(Induction Heating, IH) 방식의 인덕션 쿡탑이 전 세계적으로 각광을 받고 있다. 기존 가정에서 사용되고 있는 인덕션 쿡탑은 그림 1(a)와 같이 상판 위 원형으로 표기된 조리 영역 아래 워킹코일이 존재하며 해당 영역에서만 가열이 가능하다는 단점이 있다^[1]. 따라서, 이러한 단점을 보완하고 사용자의 편의성을 높이기 위해 그림 1(b)와 같이 쿡탑 상판 위 모든 영역에서 용기의 크기, 개수 및 형상에 상관없이 조리가 가능한(Anyplace Induction Cooking Zone, AICZ) 기술이 최근 연구되고 있다^{[2][4]}.

AICZ 기술 구현을 위해서는 다수의 워킹코일 및 인버터가 요구되며, 워킹코일-인버터 연결방식은 그림 2와 같이 주로

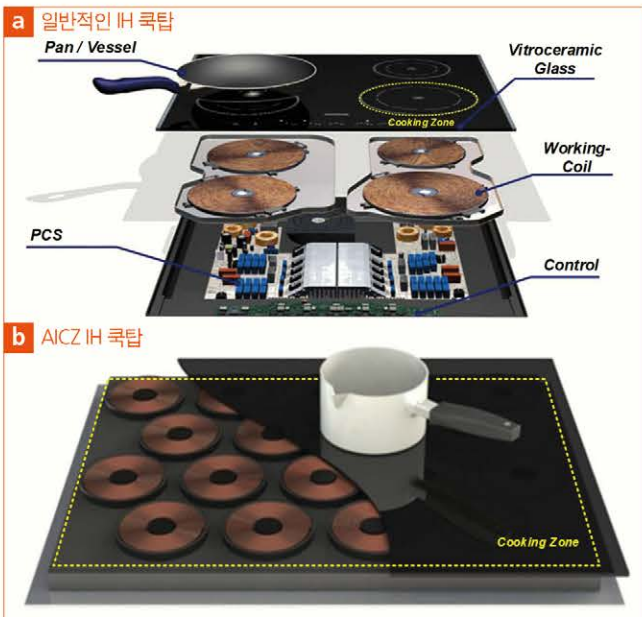


그림 1 가정용 IH 쿡탑 구조 비교

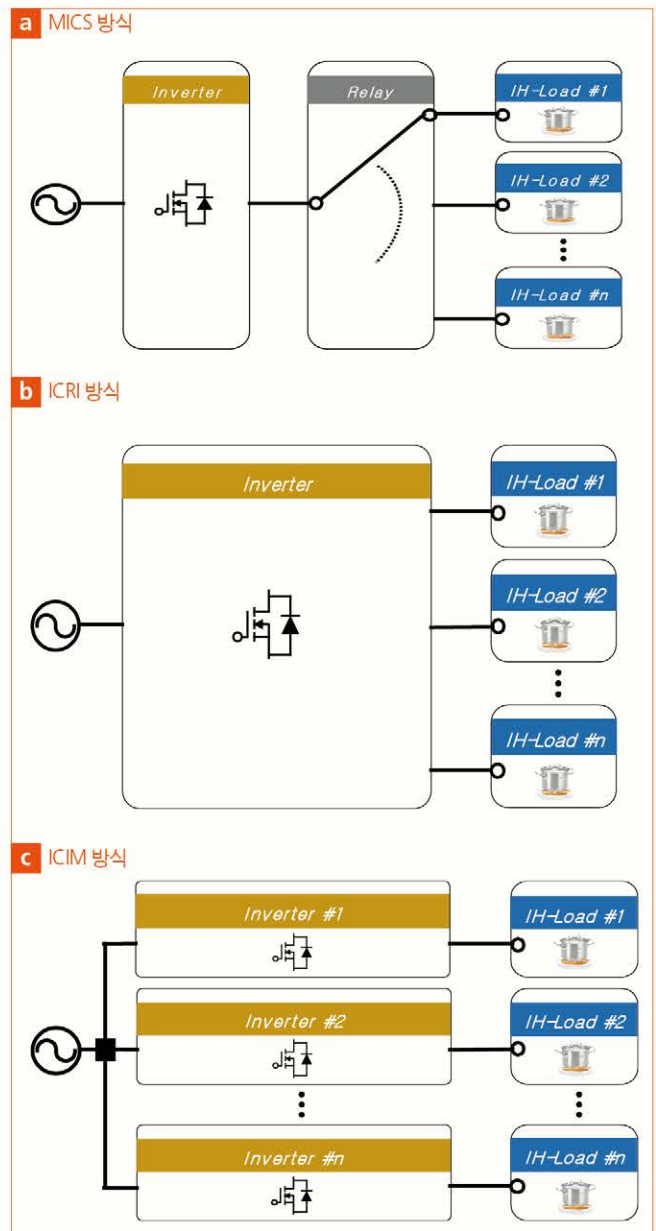


그림 2 AICZ 기술 기반 인버터-코일 연결 방식

세 가지 방식이 있다. 릴레이 스위치를 사용하여 워킹코일 간 연결을 제어하거나(Multiple-output inverter to coils simultaneously, MICS) 하나의 인버터로 여러 워킹코일을 연결하거나(Inverter-coil relay interconnect, ICRI) 인버터를 각 워킹코일에 배치하는(Inverter-coil integrated module, ICIM) 방식이다. 세 가지 방식은 비용, 성능, 소음 및 제어 복잡성 등의 장·단점이 각각 존재하므로 AICZ 시스템 구현 시 최적 설계가 요구된다. 또한 워킹코일 형상, 개수 및 크기는 AICZ 시스템의 성능을 결정짓기 때문에 최적의 크기와 턴 수를 분석하여 설계해야 한다.

본 연구에서 다루는 AICZ 시스템의 구현 방식은 빠른 제어 속응성 및 고성능을 달성하기 위해 ICIM 방식의 인버터-워킹코일 통합 일체형 모듈을 적용하여 총 22개의 워킹코일과 인버터로 구성된 전체 시스템을 제안하였다. 또한 다수의 인버터로 적용함에 있어 전력밀도 향상 및 고효율화를 위해 Wide Band Gap(WBG) 소자인 GaN HEMT 스위치를 적용하였다. 따라서, GaN HEMT를 적용한 고주파 인버터를 통해 워킹코일의 턴 수 및 높이를 최소화하였으며 사각 코일 형상을 적용하여 쿡탑 상판 면적 대비 90.63%에 달하는 조리영역을 확보하였다. 또한 AICZ 시스템 제어는 다중 통신이 가능한 CAN 통신 방식을 활용하여 여러 개의 인버터 모듈을 동시 제어하였다. 구현된 제어 알고리즘은 주파수 제어를 통한 전력제어 및 실시간 용기 판별 알고리즘과 다수의 용기 동시 가열 및 가열 중 용기 이동 등을 포함한다. 최종적으로 설계된 AICZ 시스템은 인버터 모듈 하나당 최대 94.26%의 IH 효율을 달성하였고 다양한 용기 개수 및 크기의 가열 실험을 통해 GaN HEMT가 적용된 인버터-워킹코일 일체형 AICZ 시스템의 성능을 검증하였다.

2. AICZ 시스템 구현

제안하는 AICZ 쿡탑 시스템은 그림 3과 같이 총 22개의 사각 워킹코일로 구성되며, 워킹코일과 인버터가 일체형으로 통합되는 ICIM 방식을 적용한다. AICZ 시스템에서 상판 플레이트 면적 대비 유도 가열이 가능한 워킹코일의 총 면적 비율로 풀이되는 면적 사용률은 조리 가능한 영역을 얼마나 밀도 있게 설계했는지를 보여주는 지표이다. 따라서 사각 코일 형상을 적용하여 쿡탑 상판 면적 대비 90.63%에 달하는 조리영역을 확보하였으며 90mm 수준의 소형 용기를 감지하고 가열하기 위하여 115x115mm 사각 워킹코일을 그림 4와 같이 설계

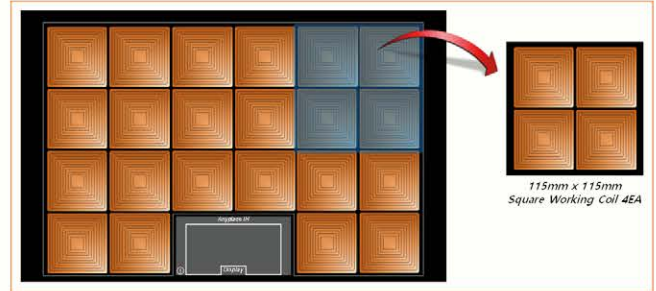


그림 3 제안하는 가정용 AICZ 쿡탑 시스템의 구조



그림 4 AICZ 쿡탑용 워킹코일



그림 5 AICZ 시스템의 가열 부하 케이스

하여 제작하였다. 또한 ICIM 방식은 인버터를 각 워킹코일에 1:1로 배치해야 하기 때문에 고효율 및 고전력밀도화가 요구되므로 고주파 스위칭이 가능한 GaN HEMT 소자의 사용이 적합하다.

AICZ 쿡탑 시스템의 여러 가지의 부하 케이스들은 4개의 ICIM 모듈로도 모두 구현할 수 있기 때문에 실험의 편리성을 위하여 그림 5와 같이 4개의 워킹코일을 적용한 3.2kW 프로토타입을 제작하여 실험을 진행한다. 인버터 토폴로지는 워킹코일의 등가 인덕턴스 L_{eq} 성분을 그대로 활용하여 공진 네트워크를 구현가능한 하프 브리지 구조의 GaN HEMT 기반 직렬 공진형 인버터를 적용하였다. 설계된 워킹코일을 기반으로 IH 피가열체 부하들의 등가 파라미터값을 분석한 결과는 그림 6과 같다. 측정 파라미터 결과값들처럼 주파수가

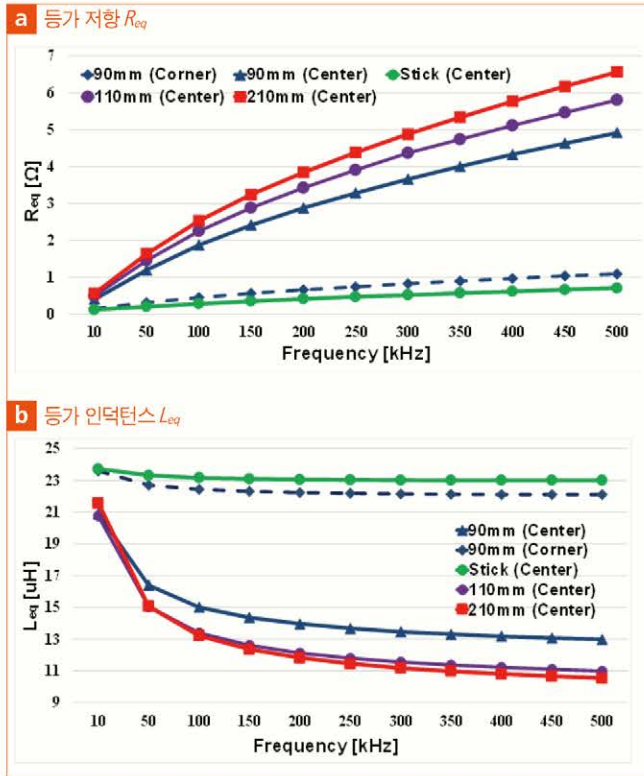


그림 6 용기 및 주파수에 따른 파라미터 측정 결과

증가하거나 용기가 워킹코일 정중앙에 위치할수록 등가저항 R_{eq} 가 증가하고 L_{eq} 는 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 피가열체 부하인 용기 크기가 증가하는 경우 단순한 용기의 저항 증가뿐만 아니라 워킹코일 관점에서는 겹치는 전체 면적이 증가하므로 결합률의 증가로 해석할 수 있다. 또한, 용기가 중앙에서 멀어질 경우 L_{eq} 의 증가로 인해 공진 주파수가 감소하기 때문에 공진형 인버터의 동작 주파수를 감소시켜 최대 전력을 만족하도록 제어 알고리즘과 여러 개의 피가열체 용기가 위치했을 시 다중 부하를 병렬적으로 운전할 수 있는 제어 전략이 필요하다.

3. 시스템 제어 전략

AICZ 쿡탑 시스템은 기존의 단독 인버터 방식의 일반적인 IH 쿡탑과 달리 실시간 다중 부하 제어를 위하여 병렬 고속 통신 기반으로 디지털 전력 제어를 수행하며, 인버터 모듈의 사고 시 빠른 감지가 요구된다. 따라서 여러 대의 인버터 모듈을 효과적으로 제어할 수 있는 통신 방식과 상호 간 데이터 충돌 방지를 위한 대책이 필요하다. 따라서 AICZ 시스템의 병



그림 7 AICZ 시스템 다중 부하 제어 방식

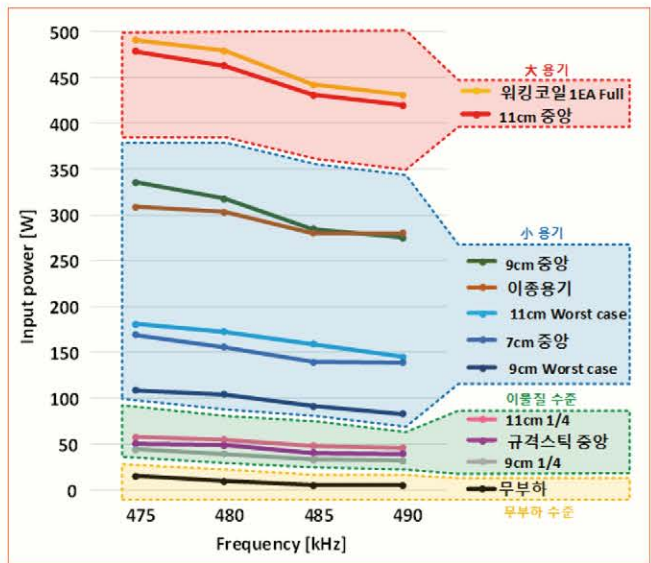


그림 8 초기 용기 판별 구간(용기 종류에 따른 전력량)

렬 제어는 다수의 인버터 모듈을 직관적으로 제어할 수 있는 CAN 통신 방식을 그림 7과 같이 적용하였다.

본 논문에서 제안하는 AICZ 쿡탑 시스템의 초기 용기 판별 알고리즘은 용기가 워킹코일에 위치했을 때 입력 전력을 센싱하여 판단하는 것을 기초로 한다. 또한 소모 전력을 줄이기 위하여 초기 용기 감지 시 Pulse Density Modulation(PDM) 방식을 적용하였으며 알고리즘 분석을 용이하게 하기 위해 PWM 신호가 들어가고 있는 주기 기준으로 해석한다. 그림 8은 제안하는 AICZ 쿡탑 시스템에서 490kHz의 초기 구동 주파수 부근에서 피가열체에 따른 부하별 전력을 나타내며 이들은 전력량에 따라서 크게 4가지로 구분되어 진다. 이러한 정보들을 바탕으로 초기에 피가열체 용기 상태를 식별하고, 식별된 정보를 기반으로 전력 Curve-Fitting Method(CFM) 모델링을 이용하여 제어 알고리즘을 설계한다. CFM 알고리즘은 주파수에 따른 전력 변화량을 기반으로 피가열체 용기의 형상, 위치 및 크기를 식별할 수 있다. 또한 워킹코일과 가열 용기의 마그네틱 결합 영역을 식별하고 가열 시작 전에 이물질 감지(foreign-object detection, FOD) 및 가열 기능 물질

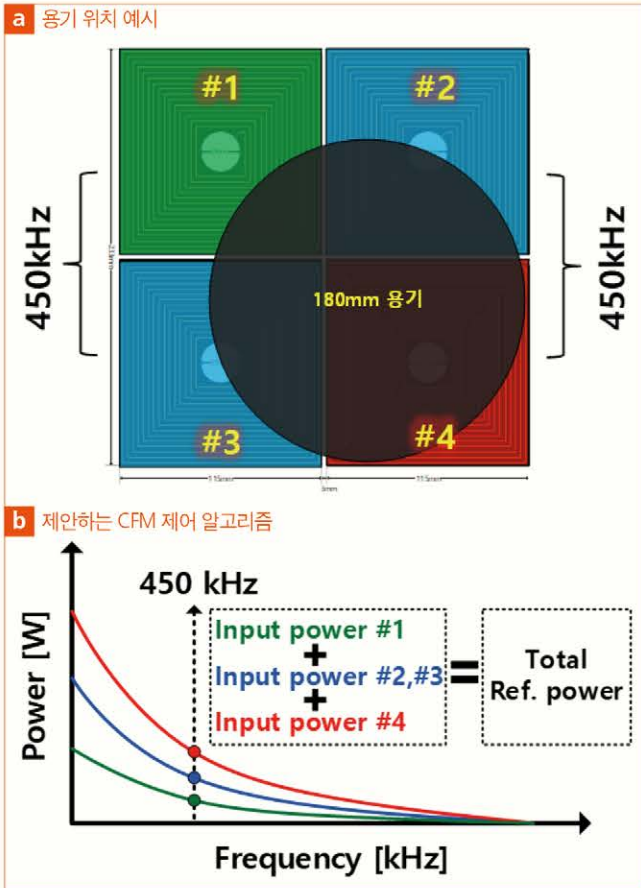


그림 9 그룹 가열 상황의 AICZ 쿡탑 제어 알고리즘

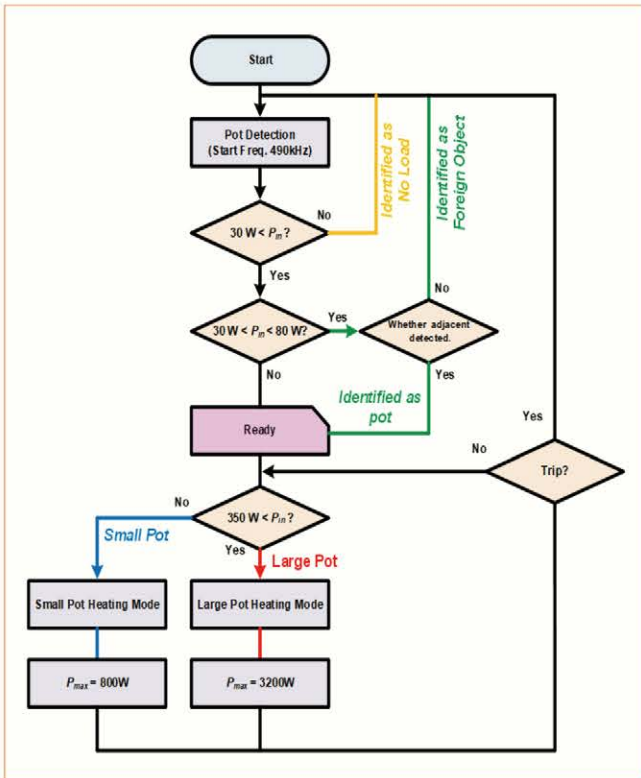


그림 10 제안하는 AICZ 시스템의 제어 알고리즘 블록도

인지 판단한다. 전력 CFM 제어 방식은 조그마한 전력 변동을 매우 신속하게 반응할 수 있으며, 제어 민감도는 전력 피팅(Fitting) 비율을 조절함으로써 쉽게 변경 가능하다는 장점이 있다.

그림 9는 부하 유형 및 주파수에 따른 CFM 알고리즘 기반 IH 전력 곡선을 나타낸다. 그림 9(a)의 예시 상황과 같이 180mm의 용기가 코일 4개 위에 각각 다른 점유율을 가지며 위치했을 시 9(b)처럼 각 인버터의 전력 곡선은 서로 다르게 형성되며, 각 인버터의 입력 전력 총합이 지령 전력과 동일해질 때까지 마스터는 각 슬레이브에게 지령 주파수를 전달함으로써 최종적으로 지령 전력에 수렴하여 주파수 동기화 그룹 가열을 수행할 수 있다. 따라서 제안하는 AICZ 시스템은 그림 10과 같이 CFM 제어 알고리즘을 기반으로 초기에 가열 모드를 분류하고 공진 부하 변동을 실시간으로 감지한다. 다수의 크고 작은 용기들을 동시에 가열할 시 CAN 통신을 통해 각 ICIM 모듈의 개별 전력값과 전체 AICZ 쿡탑 시스템의 통합 전력값을 실시간으로 모니터링할 수 있다.

4. 실험 검증

제안하는 AICZ 쿡탑 시스템의 성능을 검증하기 위해 제작된 워킹코일 일체형 ICIM 방식의 1.2kW급 GaN HEMT 기반 인버터 프로토타입은 그림 11(a)와 같다. 실험 환경은 11(b)와 같으며 IH 실험 시 각 용기들의 수부하량 및 실험 환경은 IEC 60335-2-9 기준으로 하였다¹⁵⁾. 무부하 상황에서 지속적으로 PDM 방식 기반 용기 감지를 수행할 때 소비되는 전력은 정류기 손실을 포함하여 인버터 하나당 1W 수준으로 매우 낮은 편이다. 제안하는 AICZ 쿡탑 시스템의 성능을 검증하기 위하여 그림 12와 같이 대표적인 3가지 케이스로 IH 실험을 진행하였다. 제안한 전력 CFM 방식 기반 이동 가열 시험 결과는 그림 12(a)와 같으며, 오실로스코프 파형은 #1 워킹코일에서 시작하여 시계 방향으로 회전하면서 #3 워킹코일까지 용기를 이동시키면서 전력을 측정된 파형을 나타낸다. 측정된 전류 변화량에서 볼 수 있듯이 용기가 벗어나고 인접 워킹 코일에 동일한 용기가 위치 시 CFM 제어 기반으로 신속하게 전력이 승계되어 이동 가열이 수행되는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 12(b)는 210mm 직경의 대용기 가열 상황을 나타내며, 4개의 ICIM 모듈이 정상적으로 용기 1개를 감지하여 정상적으로 가열이 수행되는 것을 보여준다. 그림 12(c)는 다수

a ICIM 워킹코일-인버터 모듈 시작품



b 시스템 Test-bed

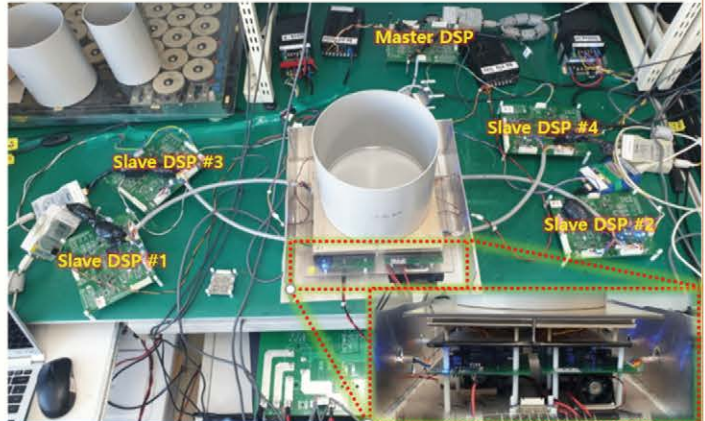
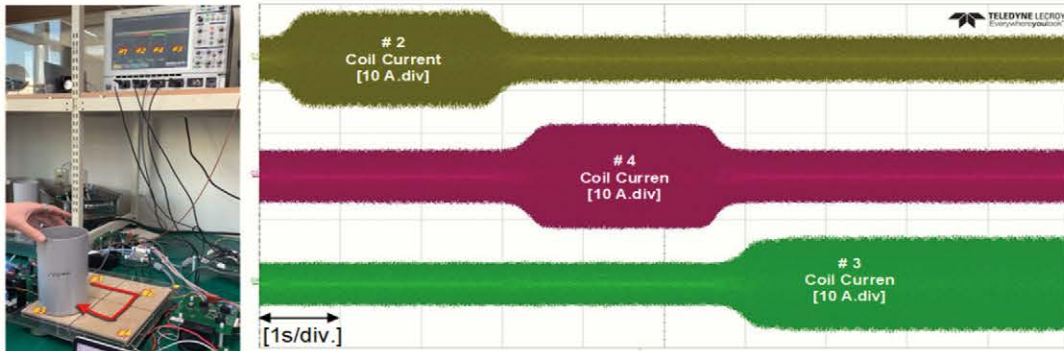
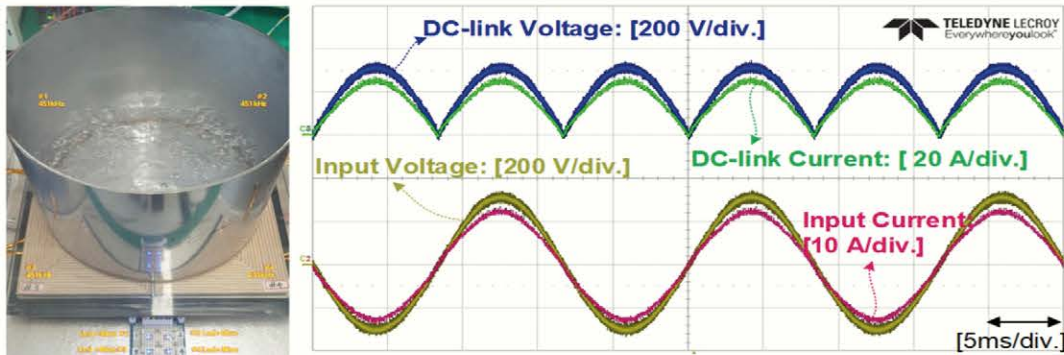


그림 11 AICZ 쿼터 시스템 프로토타입 및 실험 환경

a 이동 가열(@1000W)



b 태 용기 가열(@2000W)



c 4EA 용기 동시 가열(@3200W)

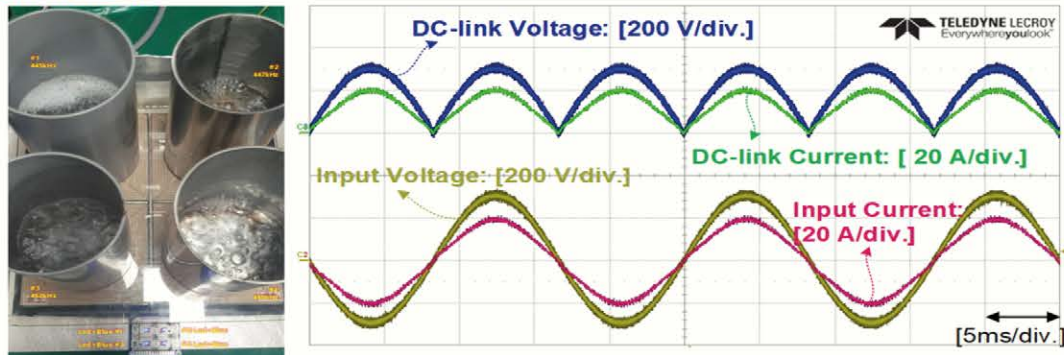



그림 12 AICZ 시스템의 IH 실험 파형

의 용기를 동시 가열하는 케이스이며 90mm 용기 4개를 모든 워킹코일 중앙에 위치시켜 각각의 용기에 IH 전력을 다르게 하여 개별 가열 제어를 수행한 실험 환경 및 주요 파형을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 ICIM 방식의 워킹코일-인버터 일체형 모듈이 적용된 AICZ 쿡탑 시스템의 설계 및 제어 방법에 대해 다루었다. 인버터 모듈은 워킹코일 개수와 동일한 수의 인버터가 요구되어 시스템 부피가 상대적으로 크다는 ICIM 방식의 단점을 보완하기 위하여 고속 스위칭이 가능한 GaN HEMT 소자를 적용하여 일체형 모듈을 설계하였다. 또한 AICZ 사용률을 극대화시키고 전체 시스템 성능을 향상시키기 위한 워킹코일의 크기, 형상 및 턴 수를 설계하였으며 다중 부하 제어를 위하여 CAN 통신을 적용하여 시스템을 구성하였다. 제안하는 제어 알고리즘은 주파수 제어를 통한 입력 전력 제어 및 실시간 용기 판별 알고리즘과 다수의 용기 동시 가열 및 이동 가열 제어가 가능하다는 장점이 있다. 제안하는 AICZ 시스템 및 제어 알고리즘은 3.2kW 프로토타입의 IH 실험을 통해 검증하였다. 본 연구에서 제안한 결과는 최근 프리미엄 인덕션 가전제품으로 연구되고 있는 AICZ 쿡탑 제품의 설계자로 하여금 기술 적용 방식의 선택 폭을 넓힐 수 있을 것으로 예상된다. 또한 향후 연구될 All-Metal IH 기반의 AICZ 시스템 구현에 있어 토폴로지와 제어 알고리즘이 적용 및 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 

참고/문/헌

- [1] O. Lucia, J. Acero, C. Carretero, and J. M. Burdio, "Induction heating appliances: toward more flexible cooking surfaces," *IEEE Trans. Ind. Electron. Mag.*, Vol. 7, No. 3, pp. 35-47, Sep. 2013.
- [2] J. Serrano, J. Acero, I. Lope, C. Carretero, and J. M. Burdio, "A flexible cooking zone composed of partially overlapped inductors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 65, No. 10, pp. 7762-7771, Oct. 2018.
- [3] O. Luca, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdio, "Induction Heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 61, No. 5, pp. 2509-2520, May. 2014.
- [4] J. Serrano, I. Lope, J. Acero, C. Carretero, J. M. Burdio, and R. Alonso, "Design and optimization of small inductors on extra-thin PCB for flexible cooking surfaces," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 53, No. 1, pp. 371-379, Jan./Feb. 2017.
- [5] Safety standards for household electrical products: IEC 60335-2-9, figure 103 and 104.

