

인덕션 레인지 전력전자기술동향

1. 서론

최근 유도 가열(Induction Heating; IH) 기술을 활용한 인덕션 레인지는 높은 가열 효율, 빠른 가열 속도, 안전성 등의 장점으로 가스 레인지를 대체할 수 있는 차세대 조리기로 각광받고 있다¹⁾. 그림 1은 인덕션 레인지의 기본 구성 요소를 나타낸다. 크게 교류 전원을 직류로 변환하는 단상 정류기, 유도 가열 코일과 공진형 커패시터를 갖는 공진형 컨버터, 부하 용기로 구성되며, 스위칭 주파수에 따라 공진탱크의 임피던스를 가변하여 가열 전력을 제어한다. 그림 2는 인덕션 레인지에 범용적으로 적용되고 있는 하프 브릿지 직렬 공진형 컨버터(Half-Bridge Series Resonant Converter; HB-SRC)를 나타낸다. HB-SRC는 스위칭 소자의 수가 작고, 하드웨어 설계와 제어 알고리즘이 간단하다는 장점이 있다. 또한 인덕션 전용 용기를 사용할 경우 낮은 공진 전류를 이용하여 높은 효율을 얻을 수 있다.

그러나, 한국과 같은 인덕션 레인지 시장의 도입기에는 주방 가열 용기로 인덕션 전용 용기 외에 약 자성체인 스테인레스(ST304) 용기, 비 자성체인 알루미늄 용기 등 다양한 재질의 용기가 사용되므로 인덕션 전용 용기 대비 높은 스위칭 전

류가 발생하여 스위칭 소자 온도를 빠르게 상승시킨다. 이러한 핵심소자의 발열에 의한 신뢰성 문제를 해결하기 위해서는 고사양의 스위칭 소자를 사용하거나 고 성능의 방열 시스템을 개선하는 등의 해결 방법이 있으나 원가 상승 및 공간적 제약 등의 제한적 요소로 인해 현실적으로는 STS430과 같은 강 자성체 용기에 대해서는 정상 출력으로 제어하고, ST304와 같은 약 자성체 용기는 출력을 제한하여 사용하고 알루미늄과 같은 비 자성체 용기는 가열하지 않는 것이 업계의 일반적인 대응 방법이다. 따라서 약 자성체 용기의 경우에는 가열은 되겠으나 조리 시간이 늦어지고 적정 온도에 도달하지 않아 사용상의 불편을 초래하고 비 자성체 용기의 경우는 처음부터 가열하지 않아 사용이 불가하다는 단점이 있다.

본 원고에서는 약 자성체 및 비 자성체 용기에서 가열성능이 저하되거나 가열되지 않는 문제점을 극복하기 위해 약 자성체는 물론 알루미늄과 같은 비 자성체 용기까지 가열 가능하게 하는 공진형 컨버터 기술에 대해 고찰하고, 최근 연구되고 있는 영 벡터를 이용한 부하 적응형 스위칭 변조 방식에 대해 소개하고자 하며 이를 총칭하여 올 메탈 인덕션 기술이라 하고 다음의 내용을 소개하고자 한다.

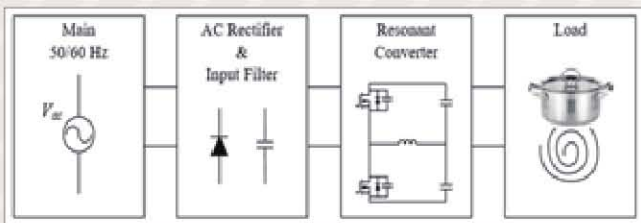


그림 1 인덕션 레인지 블록 다이어그램

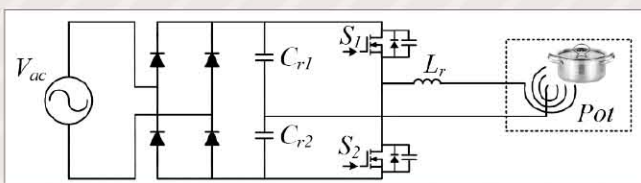


그림 2 하프 브릿지 직렬 공진형 컨버터

2. 올 메탈 인덕션 기술

일반적으로 유도 가열 모델은 변압기 모델로써 유도 가열 코일은 변압기 1차측, 용기는 변압기 모델 2차측으로 근사화된다. 그림 3은 변압기 모델로 근사화된 유도 가열 부하 모델을 나타낸다. 유도 가열 모델의 등가 임피던스는 유도 가열 코일의 턴 수와 용기 저항에 의해 결정된다.

$$R_{eq} = n^2 \times R_{pot} \quad (1)$$

여기서 R_{eq} 는 유도 가열 코일과 용기의 합성 등가저항, n 은 유도 가열 코일 턴 수, R_{pot} 은 용기 저항이다. 그림 4는 16턴

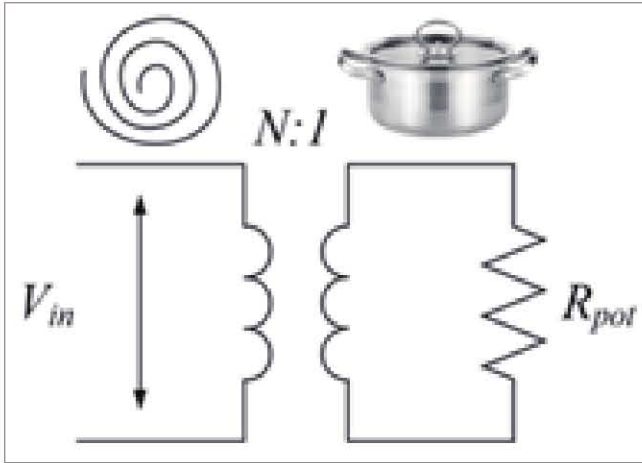


그림 3 유도 가열 컨버터의 부하 등가 회로

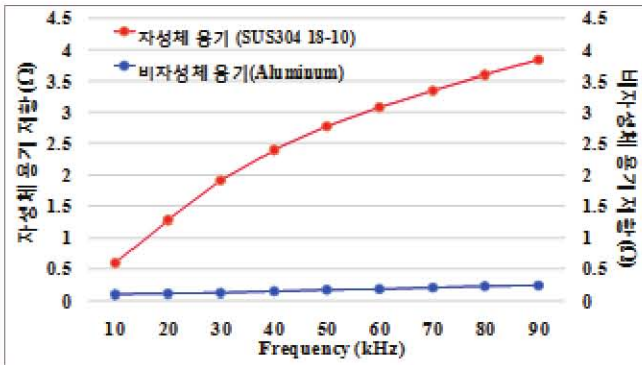


그림 4 16턴 유도 가열 코일에서 동작 주파수에 따른 용기 재질별 등가 저항

유도 가열 코일에서의 스위칭 주파수에 따른 용기별 부하 등가 저항을 나타낸다. 강 자성체 용기는 인덕션 전용 용기인 All-Clad사의 스테인레스 합금(ST430) 용기이고, 비 자성체 용기는 알루미늄 용기이다. 그림 4에서 보듯이 16턴 유도 가열 코일에서 강 자성체 용기 대비 비자성체 용기의 저항이 현저히 낮음을 알 수 있다. 비 자성체 용기와 같이 낮은 저항을 갖는 용기 재질은 낮은 부하 임피던스를 형성하므로 공진형 컨버터의 스위칭 소자에 높은 전류를 흐르게 한다. 이 때문에 비 자성체 용기에서는 스위칭 소자를 보호하기 위해 출력이 제한되어야 하므로 가열 시간이 길어지거나 적정 온도에 도달할 수 없게 된다. 따라서 높은 스위칭 전류에 의한 소자 신뢰성 관점으로 주요 가정용 인덕션 레인지 업체들은 강 자성체 용기인 인덕션 전용 용기의 사용을 추천하고 있고, 비 자성체 용기를 사용하는 경우 초기 용기 판단을 통해 출력을 제한하거나 가열을 지원하지 않기 때문에 인덕션 레인지를 구매 시 인덕션 전용 용기들을 추가로 재구매해야 하는 불편함이 있다. 올 메탈 인덕션 기술은 인덕션 전용 용기의 재구매 없이 기존에 소비자가 사용하던 금속 용기를 가열 가능하게 하는 기술이다.

2.1 플 브릿지 인덕션 레인지

올 메탈 기술을 구현하기 위해서는 높은 부하 등가 임피던스와 높은 전압이득이 요구된다. 수식 (1)에서 보듯이 비 자성체와 같은 낮은 용기 저항을 갖는 재질은 높은 코일 턴수를 갖는 유도 가열 코일을 사용하여 부하 등가 임피던스를 높여주어야 한다. 하지만 코일 턴 수가 증가할수록 기존의 용기를 가열할 수 있는 최대 출력이 감소한다. 수식 (2)는 유도 가열 컨버터의 전달 전력 수식을 나타낸다.

$$P_{transfer} = \frac{V_{coil}^2}{R_{eq}} = \frac{(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times G_v \times V_{in})^2}{n^2 \times R_{pot}} \quad (2)$$

여기서, $P_{transfer}$ 는 유도 가열 컨버터의 전달 전력, V_{coil} 은 유도 가열 코일에 인가되는 전압, G_v 는 직렬 공진형 컨버터의 전압이득, V_{in} 은 입력전압을 나타낸다. 따라서, 올 메탈 기술은 비 자성체 용기 가열을 위해 코일 턴 수를 증가시켜 높은 부하 등가 임피던스를 얻음으로써 스위칭 소자에 낮은 부하 전류를 인가시켜 신뢰성을 확보하는 것과 동시에 기존의 강 자성체 용기에서 고 출력을 구현할 수 있도록 보다 높은 전압이득을 동시에 얻어야 하는 기술적 업 그레이트가 요구된다.

공진형 컨버터의 구조는 크게 3가지로 구분된다.

- (1) Single-ended Resonant Converter, SERC
- (2) Half-Bridge Series Resonant Converter, HB-SRC
- (3) Full-Bridge Series Resonant Converter, FB-SRC

SERC의 경우 높은 스위치 내압 문제로 인해 2 kW 이상 고 출력 인덕션 레인지를 구현하기 어렵고, 비자성체 용기의 경우 출력 제어를 위한 스위칭 주파수가 높아지기 때문에 하드 스위칭이 발생하기 쉬우므로 저 출력용으로 적용이 가능하다. HB-SRC는 구성과 설계가 간단하고 SERC와 같이 높은 스위치 내압 문제가 없지만, 올 메탈 기술의 요구사항인 높은 전압이득을 출력할 수 없어 Active PFC 없이는 구현이 어렵다. 따라서, 기존에 개발된 올 메탈 기술들은 FB-SRC 구조를 채택한다.

FB-SRC는 높은 전압이득, 다양한 스위칭 변조 방식, 낮은 스위치 내압 등으로 SERC, HB-SRC의 제약사항을 극복할 수 있다. 하지만 스위치의 수가 증가하고 설계의 복잡도가 올라

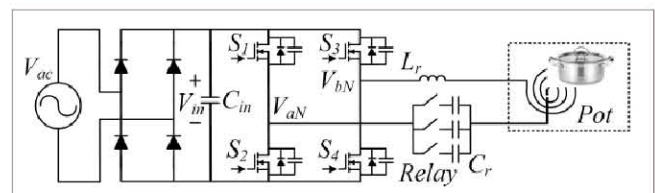


그림 5 플 브릿지 직렬 공진형 컨버터

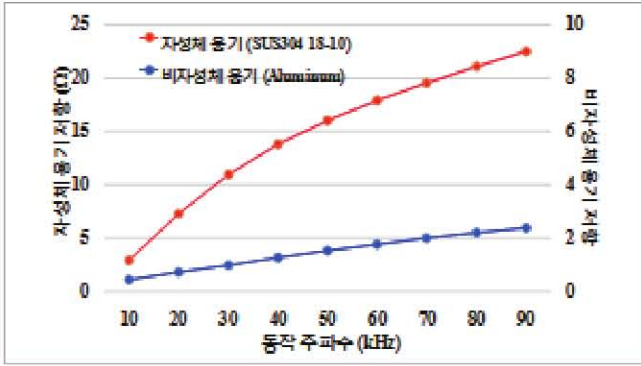


그림 6 36턴 유도 가열 코일에서 동작 주파수에 따른 용기 재질별 등가 저항

가는 단점을 가지고 있다. 그림 5는 FB-SRC의 회로 다이어그램을 나타낸다. 자성체 용기를 3 kW까지 가열할 수 있는 범위에서 FB-SRC 전압이득 기준으로 코일 턴 수를 증가시키면 36턴까지 증가시킬 수 있다. 그림 6은 36턴 유도 가열 코일에서 측정된 동작 주파수에 따른 용기 재질별 등가 저항을 나타낸다. 유도 가열 코일을 36턴까지 증가시켰을 때 비자성체 용기의 등가 저항이 30 kHz 대역에서 1 Ω 이상으로 증가함을 알 수 있다. 하지만 그림 4를 참고하면, HB-SRC 인덕션 레인지를 기준으로 2 Ω 이상이 되어야 기존 인덕션 레인지 설계 수준으로 구현이 가능함을 알 수 있다.

이를 극복하기 방안으로 스위칭 주파수를 증가시켜 높은 부하 등가 임피던스를 형성할 수 있다. 그림 6에서 70~90 kHz 영역에서 그림 2의 16턴 코일에서 측정된 자성체 용기의 저항 수준임을 확인할 수 있다. 하지만 스위칭 주파수가 증가하게 되면 스위칭 손실에 의한 발열 문제가 발생하므로 IGBT 소자의 경우 70kHz 이상 적용하기가 어렵다. 따라서, 올 메탈 기술은 기존 IGBT소자를 적용하면서 IH 코일에 인가되는 전류의 주파수를 증폭시키는 방법으로 3고조파 변조법, 부하 적응 변조기술과 같은 방식이 연구되고 있다.

2.2 3고조파 변조 방식

대표적인 올 메탈 기술로는 3고조파 변조 방식이 있다^[2]. 3고조파 변조 방식은 기존의 직렬 공진형 컨버터의 공진탱크를 3고조파 필터로 구성한다. 이렇게 되면 스위칭 동작이 20 kHz로 동작하더라도 코일에 인가되는 전류 주파수는 60 kHz가 인가된다. 그림 7은 3고조파 방식 직렬 공진형 컨버터

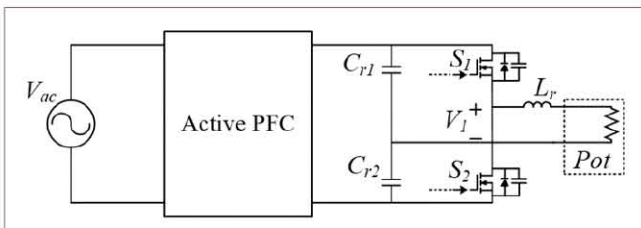


그림 7 3고조파 방식 직렬 공진형 컨버터

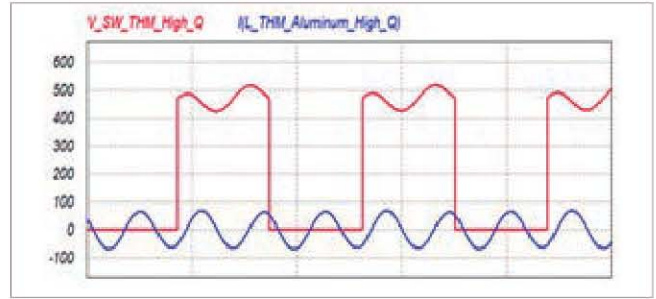


그림 8 3고조파 방식의 코일 전압 및 전류

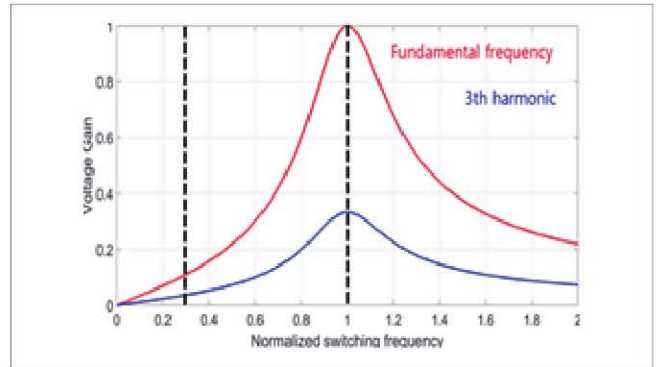


그림 9 3고조파 방식 전압이득

를 나타낸다. 3고조파 변조 방식은 Active PFC와 하프 브릿지 직렬 공진형 컨버터로 구성되어 있다. 그림 8은 3고조파 필터를 통과한 코일 전류 파형을 보여준다. 이는 스위칭 주파수를 증가시키지 않았으므로 스위칭 손실도 기존 1고조파 필터링과 같은 수준으로 유지할 수 있고, 비자성체 용기의 합성 등가 저항 또한 충분히 높일 수가 있다.

하지만 3고조파 방식은 1고조파 성분 이외의 고조파 성분을 모두 제거함으로써 필터링된 신호의 전압이득은 1/3으로 감소한다. 그림 9는 1차 고조파 필터와 3차 고조파 필터를 통과한 전압이득을 나타낸다. 그림 9에서 보이듯이, 비자성체 용기의 합성 등가 저항은 충분히 높였지만 전압이득이 낮아 고전력 가열이 불가능한 한계점이 있다. 이를 보완하기 위해서 3고조파 방식은 Active PFC가 사용된다. 따라서, 3고조파 방식은 PFC로 인한 제품 단가가 상승한다는 단점을 가지고 있다.

2.3 부하 적응형 변조 방법

(Load Adaptive Modulation; LAM)

LAM 기술은 올 메탈 기술의 높은 단가를 개선하기 위한 적절한 해결책이다. LAM 방식은 고조파 필터링 동작으로 고주파 전류를 만드는 것과는 달리 영 벡터를 이용하여 구형파 형태를 그대로 유지하며 1고조파 필터를 통과한다. 이는 1고조파 이외에도 다른 고조파 성분을 모두 포함하고 있으므로 3고조파와 달리 전압이득의 감소가 없다. 영벡터의 사용으로

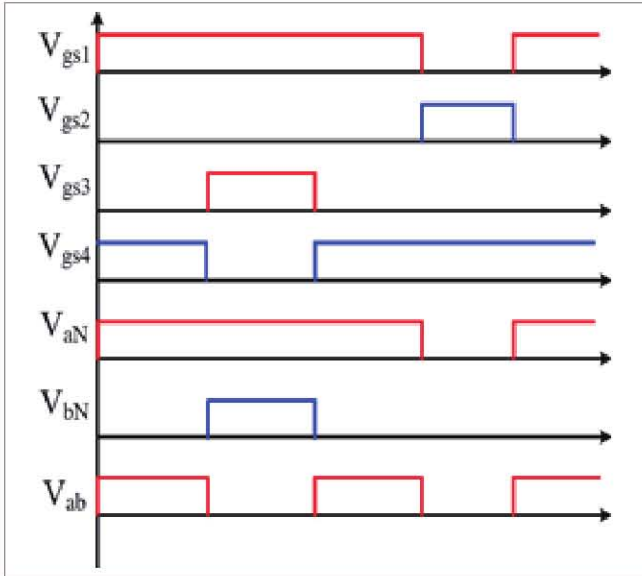


그림 10 Frequency Doubler Mode of Load Adaptive Modulation

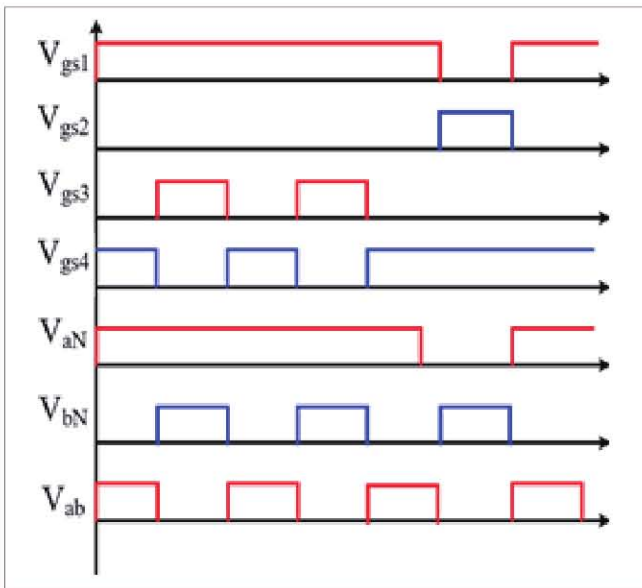


그림 11 Frequency Tripler Mode of Load Adaptive Modulation

정류기 회로의 전압이득이 1/2로 줄어들지만 높아진 부하 임피던스와 하프 브릿지 수준의 전압이득으로 비자성체 용기에 대해 2 kW 이상 전력으로 가열이 가능하다^[3].

LAM 방식은 그림 5과 같이 일반적인 풀 브릿지 직렬 공진형 컨버터를 이용한다. LAM 방식은 풀 브릿지 구조만으로 비자성체 용기와 자성체 용기를 모두 가열할 뿐만 아니라 코일에 인가되는 전류 주파수를 2배 혹은 3배 유동적으로 증폭시킬 수 있으므로 다중화구 코일간 소음을 해결하는 해결책으로도 연구되고 있다. 그림 9는 LAM 방식의 비자성체 용기 가열을 위한 스위칭 변조 방식인 2 체배 주파수 모드의 파형을 나타낸다. 그림 10에서 보이듯이 전력 전달 구간에 영 벡터를 삽입하여 2분할을 함으로써 코일에 인가되는 전류 주파수는

2배가 된다. 증가된 주파수는 부하 등가 임피던스를 높이고 비자성체 용기 가열을 가능하게 한다. 그림 11은 3 체배 주파수 모드의 파형을 나타낸다. 마찬가지로 영 벡터를 활용하여 전력 전달 구간을 3분할함으로써 코일 동작 주파수를 3배로 증폭시킨다.

LAM 방식은 코일 동작 주파수를 2배 혹은 3배로 유동적으로 제어가능한 장점을 가지고 있다. 하지만 LAM 방식 또한 3 kW 혹은 4 kW 이상의 고전력 가열을 위해서는 Active PFC가 필요하다. 그리고 영 벡터의 좁은 듀티폭은 고주파 동작으로 갈수록 스위칭 동작이 불안정해지는 단점을 가지고 있다. 고주파 동작에서 좁은 듀티폭은 스위칭 동작의 상승 시간과 하강 시간에 민감해지므로 인덕션 레인지 설계 시 스위칭 디바이스의 성능의 요구 수준 및 설계의 복잡도가 높아진다.

3. 결론

앞에서 설명한 바와 같이 인덕션 기술은 빠른 가열 성능, 청결성과 안전성 등의 사용 편리성 측면에서 상당한 강점을 가진 조리기기의 가열 기술인 반면 가열 가능한 용기가 제한적이라는 극명한 단점을 가지고 있다.

현재까지 국내 조리기기 시장은 가스레인지에서 전기레인지 특히 인덕션 전기레인지로 세대가 교체되는 과도기에 놓여있어 인덕션 시장 전체가 확장되는 보급 위주의 사업 경쟁으로 인해 고 효율, 고 출력과 같이 인덕션의 장점을 극대화하는 기술력을 통해 시장을 선점하려는 방향으로 업체의 기술경쟁이 이루어져 왔다. 하지만, 인덕션 레인지 보급과 수요가 증가함에 따라 경쟁사와의 차별화를 통해 경쟁사 대비 시장 점유율을 높이기 위한 기술개발이 필요하고 국내 용기 시장의 특성 상 다양한 용기에 대한 가열성능 확보는 피할 수 없는 기술개발의 방향이 되고 있음을 부정할 수 없다. 따라서 향후 업계의 기술개발의 방향은 한계에 도달한 인덕션의 장점인 고출력 경쟁에서 탈피하고 인덕션의 약점인 가열 가능한 용기 커버리지를 확대하고자 하는 기술 개발과 용기의 온도감지를 통한 자동요리 구현과 같은 사용편리성 향상하기 위한 차별화 기술 개발로 업계의 기술개발의 방향이 전환될 것이라 확신한다.

본 원고에서는 기본적인 인덕션 레인지 기술 이론을 설명하고, 차세대 인덕션 기술인 올 메탈 기술에 대해 소개하였다. 대표적인 올 메탈 기술로 3고조파 방식과 LAM 방식의 기술 특징과 장단점을 분석하였다. 향후 인덕션 레인지 시장은 소개된 기술들의 목적 및 기능을 완성도 있게 구현하여 선제적으로 시장을 점유하는 것이 중요할 것이다. ■

참고문헌

- [1] O. Lucía, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdío, "Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 5, pp. 2509-2520, May 2014.
- [2] H. Sadakata et al., "Latest practical developments of triplex series load resonant frequency-operated high frequency inverter for induction-heated low resistivity metallic appliances in consumer built-in cooktops," in 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs, CA, pp. 1825-1832, 2010.
- [3] H. Park and J. Jung, "Load-adaptive modulation of a series-resonant inverter for all-metal induction heating applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 9, pp. 6983-6993, Sep. 2018.
- [4] A. Boadi, Y. Tsuchida, T. Todaka, and M. Enokizono, "Designing of suitable construction of high-frequency induction heating coil by using finite-element method," in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 10, pp. 4048-4050, Oct. 2005.
- [5] I. Millan, D. Puyal, J. M. Burdio, J. Acero, and S. Llorente, "Resonant inverter topology for all-metal domestic induction heating," 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, pp. 913-918, 2007.

한진욱(韓鎭旭) LG전자 Cooking 제어개발팀 팀장

2016년 경북대 제어시스템공학과 졸업(석사).
2009년~현재 LG전자 Cooking 제어개발팀 책임연구원.



강계룡(姜桂龍) LG전자 Cooking 제어개발팀 책임연구원

2003년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 2019년 경북대 제어시스템공학과 졸업(공학박사).
2003년~현재 LG전자 Cooking 제어개발팀 책임연구원.



정시훈(鄭視薰) LG전자 Cooking 제어개발팀 연구원

2019년 UNIST 전기전자공학과 졸업(석사).
2019년~현재 LG전자 Cooking 제어개발팀 연구원.

