

Validation of The Heating System for Saving Energy with Induction Heating Technology on Railway Switch

유도가열 기술을 활용한 에너지 저감형 분기기 히팅시스템의 유효성 검증

Hyeong-Seok Oh · Dong-Kyun Kim · Chan-Bae Park · Jae-Bum Lee · Ju Lee · Hyung-Woo Lee

오형석* · 김동균** · 박찬배** · 이재범** · 이주* · 이형우†

Abstract

Recently, when railways are opened in winter, the number of railway accidents tends to increase. Conventional rail heaters in railway switches consist of bus wires. Although it has the advantage of being simple and convenient, it consumes a lot of power, but the disadvantage is that it takes a long time to melt. In this paper, a commonly used Induction Heating(IH) technology is applied to the heating system of a railway switch to improve this. The electric power of the induction heater was targeted to be reduced compared to the conventional one. At the same time, induction heaters are designed in a similar size to replace rail heaters. The inverter is designed to meet the operating frequency and output required by the induction heater. Based on this, multi-physics analysis and experiments using the prototypes were performed. In addition, it was confirmed that there is an energy-saving effect through frequency control compared to the conventional system.

Key Words

Railway switch, Saving Energy, Induction Heating(IH), Frequency-control

1. 서론

철도 교통은 타 교통에 비해 비교적 외부 환경에 강건한 특성의 교통 시스템이나, 강우, 강풍, 강설 등 극단적인 기상 조건에는 지속해서 장애 및 피해가 발생하고 있다 [1]. 철도는 선로에 의지하여 주행하는 교통 시스템이며, 철도차량의 방향을 전환하는 선로 구조물을 분기기라고 한다 [2]-[4]. 분기기는 대용량 교통수단으로서 철도차량 운행에 매우 중요한 구조물이다. 그림 1은 분기기의 구조를 보여준다. 분기기는 텅레일이 주레일에 접촉하여 철도차량의 방향을 결정하며, 그림 1로부터 확인할 수 있다. 반복적인 분기 동작으로 텅레일과 주레일 사이에 설빙이 형성되면, 정상적인 분기기의 임무를 수행할 수 없게 된다. 최근 겨울철 분기기 관련 철도 피해가 증가하는 추세이며, 이러한 철도 선로 피해는 나아가 철도 차량의 지연 및 탈선과 같은 대규모 피해로 이어질 수 있으므로 철도의 원활한 운영을 위해 해결해야 하는 문제이다 [1]-[3], [5].

분기기의 설빙 방지/제거를 위해 화학적, 기계적, 전기적 방식이 있으며, 현재 우리나라는 전열선을 이용한 전기적 방안을

채택하고 있다 [4]. 전열선 방식은 구조적으로 단순하고, 분기기에 설치가 쉽다는 장점이 있지만, 전기적/열적 효율이 좋지 않다 [6]. 기존 전열선 방식의 레일 히터는 400W/m의 소비전력을 가지나, 상대적으로 부피가 큰 레일이 전도된 열을 대기 중으로 방사하므로, 부피 측면과 열적 측면에서 단점 [7]을 가지며, 그림 2는 레일 히터의 위치와 이의 동작을 보여준다. 기존 히팅시스템의 단점을 해결하기 위해 본 논문에서는 유도가열 기술을 적용하였다. 유도가열 기술은 산업에서 다양한 응용 분야에 적용되고 있어 신뢰성이 높고, 화석연료를 대체함과 동시에 가열효율이 높은 기술이다 [8], [9]. 특히, 피가열체의 국부적인 가열이 가능한 유도가열 기술의 장점을 채택하여 분기부 설빙 제거를 위한 유도가열 히팅시스템을 개발하였다 [4]. 본 논문에서는 주파수 제어를 통한 에너지 절감 수행 내용과 실험을 통해 유도가열 히팅시스템의 기존 시스템 대비 소비전력 절감을 다룬다.

† Corresponding Author : School of Railroad Engineering, Korea National University of Transportation, Korea.

E-mail: krhwlee@ut.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-6072-8277>

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

<https://orcid.org/0000-0002-9413-5541> <https://orcid.org/0000-0003-0251-6492>

** School of Railroad Engineering, Korea National University of Transportation, Korea.

<https://orcid.org/0000-0003-1688-2506> <https://orcid.org/0000-0002-2648-3456>

<https://orcid.org/0000-0001-9010-0029>

Received: Sep. 02, 2022 Revised: Sep. 13, 2022 Accepted: Sep. 19, 2022

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

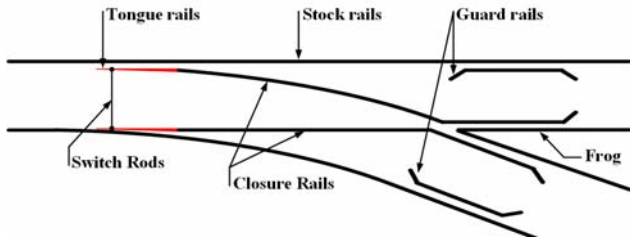


그림 1 철도 분기기의 구조
Fig. 1 The railway switch

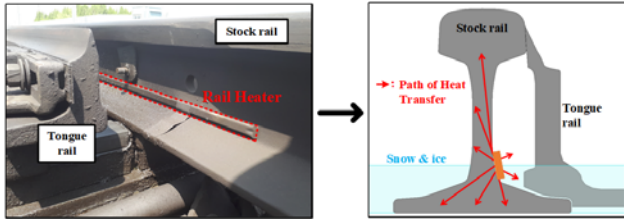


그림 2 레일 히터와 응설 과정
Fig. 2 Rail heater and its operation

2 유도가열 히팅시스템 설계

유도가열 기술은 전류와 자기장의 관계를 나타내는 암페어의 주회 법칙, 자기장의 변화가 기전력을 발생시킨다는 페러데이 전자기 유도 법칙에 근거한다. 그리고 교류의 주파수에 의해 전류밀도가 변하는 표피효과를 활용한다. 본 논문에서 제안하는 유도가열 히팅시스템의 부하 즉, 유도 히터는 1차 측 코일과 2차 측 피가열체 형태로 설계가 요구된다. 또한, 이러한 유도가열 기술을 적용하기 위해 고주파수의 전압을 유도 히터에 공급해야 한다. 따라서 유도가열 히팅시스템용 전원부 설계 또한 요구된다. 전체적인 유도가열 히팅시스템의 구조는 다음과 같다; 제안하는 유도가열 히팅시스템의 구조도는 그림 3과 같다. 구조는 크게 전원부와 유도 히터로 구성되며, 전원부는 단상 220V 입력단과 정류단, 전력 품질 개선을 위한 부스트 PFC 컨버터, 그리고 ZVS 성취가 가능하여 부하 측으로 최대 전력 전달에 유리한 공진형 인버터로 이루어져 있다.

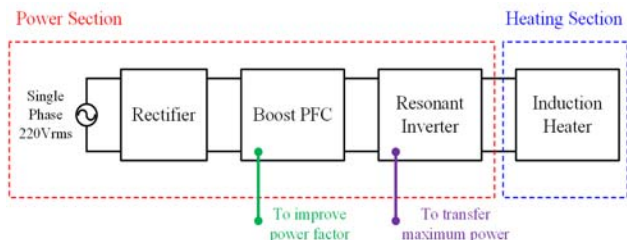


그림 3 유도가열 히팅시스템 구조도
Fig. 3 Structure of the induction heating(IH) system

2.1 800W급 부스트 PFC 컨버터 설계 및 제어

유도 히터의 효과적인 발열을 목적으로, 부스트 PFC 컨버터가 정류단과 공진형 인버터 사이에 위치하게 된다. 역률 개선

을 목적으로 그림 4와 같은 800W급 부스트 PFC 컨버터의 설계를 수행하였다. 단상 입력 전원의 실효 값이 220V에 해당하므로, PFC 컨버터 입력 전압은 그림 4와 같이 최대 311V에 해당하는 값을 가지며, 출력 전압은 입력 전압보다 높은 값인 350V로 선정하였다. 이와 관련된 세부 사항은 표 1을 통해 확인할 수 있다.

자성체와 커패시터 설계를 위해, 먼저 인덕턴스와 커패시턴스를 도출하였다. PFC 컨버터의 인덕터의 경우 선정한 스위칭 주파수(60kHz)와 입력 전류 리플(전류 최대 값의 30%)을 고려하여 945uH의 인덕턴스 값을 도출하였다. 인덕터로 High Flux 재질의 OD358 코어를 선정하였으며, 제작 후 LCR 미터 측정 결과 961uH의 인덕턴스 값을 갖는 것을 확인하였다. 커패시터의 경우, PFC 컨버터의 역률을 1이라 가정 한 후에 전압 스트레스(350V)와 출력 전압 리플(출력 전압의 3%)을 고려하여 577uF의 커패시턴스 값을 도출하였다. 이러한 조건들을 고려하여 커패시터로 Rubycon社의 450UFG560MBN40X50 (450V/560uF) 소자를 선정하였다.

정류단 및 부스트 PFC 컨버터의 전력 반도체 소자를 선정하였으며, 다음과 같은 조건들을 고려하였다. 정류 다이오드의 경우 입력 전압(단상 220V) 및 전류 스트레스를 고려하여 Vishay社의 BU1006-M3_45 (600V/10A) 소자를 채택하였으며, 스위치 소자의 경우 정류된 전압 및 전류 스트레스를 고려하여 STMicroelectronics社의 STP11N60DM2 (650V/10A) 소자를 선정하였다. 또한, 다이오드 소자의 경우 정류된 전압 및 전류 스트레스를 포함하여 낮은 순방향 전압을 갖는 Rohm社의 SCS206AGHR (650V/6A) 쇼트키 다이오드 소자를 선정하였다.

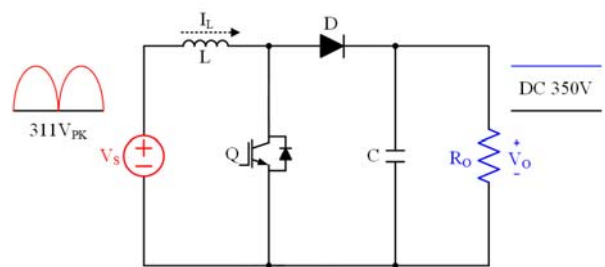


그림 4 부스트 PFC 컨버터 회로도
Fig. 4 Circuit of boost PFC converter

표 1 부스트 PFC 컨버터 설계 사양

Table 1 Design specifications for boost PFC converter

| Item | Value | Unit |
|-----------------------|-------|------|
| Output Power | 800 | W |
| Input maximum Voltage | 311 | V |
| Output Voltage | 350 | V |
| Input maximum Current | 5.14 | A |
| Output Current | 2.29 | A |

부스트 PFC 컨버터의 경우 인덕터 전류의 위상과 정류 다이오드를 통과한 입력 전압의 위상이 일치되어야 하므로, 그림 5

과 같은 제어 블록 다이어그램이 요구된다. 먼저 입력 전압(V_{in} , 단상 220V)과 인덕터 전류(I_L), 그리고 출력 전압(V_o) ADC 센싱이 필요하다. 전압 제어기의 DC 출력과 센싱한 입력 전압의 곱이 인덕터 전류 지령 값($I_{L,ref}$)을 생성하게 된다. 이후에 순시적으로 변화하는 입력 전압에 맞추어 요구되는 출력 전압 지령 값($V_{o,ref}$)을 얻기 위해 시비를 제어기가 수행된다. 따라서 인덕터 전류 측면에서는 AC 전류 제어가 요구되며, 출력 전압 측면에서는 정전압 제어가 요구된다.

이를 위해서는 먼저, 정확한 ADC 센싱이 이루어져야 한다. 인덕터 전류 지령의 경우, 센싱한 입력 전압 값과 PI 제어기 출력의 곱으로 계산되므로 올바른 전압 값을 읽지 못할 경우 전류 지령 값이 표 1과 같은 설계 사양 값을 만족시키지 못하기 때문에 요구되는 정전압 제어가 불가능하다. 따라서 적절한 값을 센싱받기 위해, 출력 전압의 경우 선정된 스위칭 주파수(60kHz)의 1/5에 해당하는 값을 저역통과필터의 차단 주파수로 선정하였다. 또한 입력 전압의 경우, 평활한 값을 센싱받기 위해 선정된 스위칭 주파수의 1/100에 해당하는 값을 선정하였으며, 인덕터 전류의 경우 지연을 최소화하기 위해 스위칭 주파수의 5배에 해당하는 값을 차단 주파수로 선정하였다.

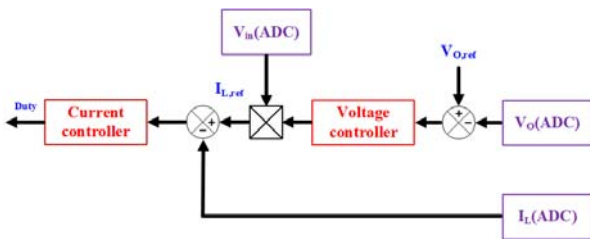


그림 5 부스트 PFC 컨버터 제어 블록 다이어그램
Fig. 5 Control block diagram of boost PFC converter

제어기 설계를 위해 대역폭을 선정하였으며, 전류 제어기의 경우 빠른 동특성을 위해 대역폭을 1.5kHz로 설계하였다. 전압 제어기 대역폭의 경우, 단상 입력 전원이 220V/60Hz인 점을 고려하여 24Hz의 대역폭을 목표로 하였으나 제어의 안정성과 요구되는 출력 전압 리플을 만족하기 위해 보수적으로 3Hz의 대역폭을 갖도록 설계하였다.

그림 6는 800W급 부스트 PFC 컨버터의 부하 조건에 따른 실험 파형을 나타낸다. 그림 6 (a)~(d)의 실험 파형은 무부하 조건부터 전부하 조건에 해당하는 부하 조건 별 입력 전압(단상 220V)과 인덕터 전류 파형이며, 각각 파란색과 녹색으로 표현되어 있다. Division의 경우 입력 전압은 200V, 인덕터 전류의 경우 2A에 해당하며, Time base는 5ms 조건에서 실험하였다. 무부하 조건에서 전부하 조건으로 갈수록 CCM 구간으로 동작하는 구간이 늘어남에 따라, 인덕터 전류가 입력 전압과 동일한 위상을 가지므로 역률이 1에 가까운 값을 가지는 것을 확인하였다. 또한, 그림 6 (d)와 같이, 전 부하 조건에서 인덕터 전류의 최대 값이 6A를 초과하지 않는 것을 알 수 있다. 따라서

설계한 인덕터의 전류 리플 값의 유효성 또한 검증하였다.

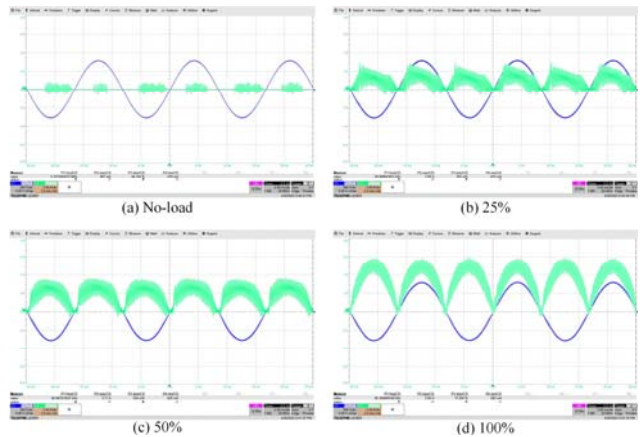


그림 6 부하 조건에 따른 PFC 실험 파형
Fig. 6 Waveform of PFC by load condition

2.2 공진형 인버터 설계 및 제어

공진형 인버터의 경우 부하에 해당하는 유도 히터가 요구하는 고주파수의 전압 공급을 위해, $\pm V_s$ 의 극전압이 요구된다. 이를 위해 플브릿지 구조를 채택하였으며, 부스트 PFC 컨버터의 출력인 DC 350V를 입력으로 한다. 효과적인 발열을 위해서 공진형 인버터 내 전력 반도체 소자의 손실을 줄이는 것이 필수적이며, 스위칭 손실에서 큰 비중을 차지하는 턴-온 손실을 크게 저감할 수 있는 그림 7과 같은 공진형 인버터가 요구된다.

인버터 스위치의 경우 다음과 같은 동작이 수행된다. 먼저 S_1 과 S_4 가 턴-온되고, 이로 인해 S_2 와 S_3 에는 입력 전압인 350V에 해당하는 전압 스트레스가 인가되게 된다. 이후, 데드타임으로 인해 모든 스위치가 OFF되며, 부하 측으로 흐르는 전류(I_{Load})에 의해 S_2 와 S_3 의 출력 기생 커패시터에 충전되어 있던 전압을 0V로 방전시키게 된다. 이후 스위치 S_2 와 S_3 의 턴-온 동작이 수행됨에 따라 인버터 스위치의 영전압 스위칭이 성취되어, 스위칭 손실을 저감시킬 수 있다. 인버터 스위치의 경우 전압(350V) 및 전류 스트레스를 고려하여, Infineon社의 IPW60R280P6FKSA1 (600V/13.8A) 소자를 선정하였다. 또한 인버터의 스위치의 경우 최대 320kHz에 해당하는 고주파 구동으로 인해, 발열에 취약한 단점을 가진다. 이를 해결하기 위해, DC 5V를 전원으로 하는 Delta社의 AFB0405LA-A (4000RPM) 팬을 채택하였다.

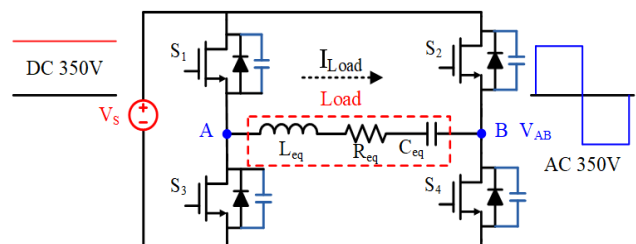


그림 7 공진형 인버터 회로도
Fig. 7 Circuit of resonant inverter

유도 히터의 경우 PCB에 흐르는 부하 전류에 의해 와전류손이 발생하게 되며, 이로 인해 발열 현상이 일어나게 된다. 높은 온도로 발열할수록 동절기 분기기 용설 방지에 효과적이거나, PCB가 버틸 수 있는 온도를 고려하여 본 논문에서는 50℃로 온도제어를 수행하고자 한다. 유도 히터 온도 센싱을 위해 NTC 서미스터인 Tewa社의 TT6-100KC3L-5-AUR를 채택하였으며, 해당 센서의 경우 -30℃에서 120℃도 조건에서 사용 가능하다.

온도 제어를 위해 PI 제어를 설계하였으며, 동작 원리는 다음과 같다; 분기기의 설빙 제거를 위해서는 유효 전력을 최대한으로 증가시킬 수 있는, 등가 저항분만 임피던스에 투영되는 공진점에서의 동작이 필수적이다. 이때의 스위칭 주파수가 250kHz이며, 히팅판에서 발열이 시작되어 목표로 했던 설빙 제거가 가능하다. 이후 히팅판의 온도가 50℃에 도달할 경우, 부하에 흐르는 전류를 줄이기 위해 공진형 인버터의 극전압과 부하 전류의 위상을 키우기 위해 스위칭 주파수를 증가시키게 된다. 이로 인해 온도가 포화되고, 히팅판이 겨울철 외기 온도에 의해 식을 경우에는 다시, 스위칭 주파수를 공진점에 가깝게 제어하게 된다. 일련의 제어 동작 수행을 통해 목표로 하는 50℃ 온도 제어가 가능하며 이를 주파수 제어를 적용한 실험을 통해 확인하고자 한다.

전원부 보드의 경우 그림 8과 같이 부스트 PFC 컨버터와 공진형 인버터가 하나의 보드 내에 위치하게 된다. 전원부의 경우 초충 회로를 위한 계전기, 부스트 PFC 컨버터의 스위치, 공진형 인버터의 스위치, 그리고 보호 회로를 포함하여 9개의 PWM이 요구된다. 또한, ADC의 경우 단상 입력 전압과 인덕터 전류, 컨버터 출력 단의 전압 및 전류, 그리고 히팅판의 온도를 포함하는 ADC 센싱이 요구된다. 이러한 조건들을 고려하여, 마이크로컨트롤러로 현재 철도차량분야에서 활발히 사용 중인 TI社의 TMS320F28335 칩셋을 선정하였다.

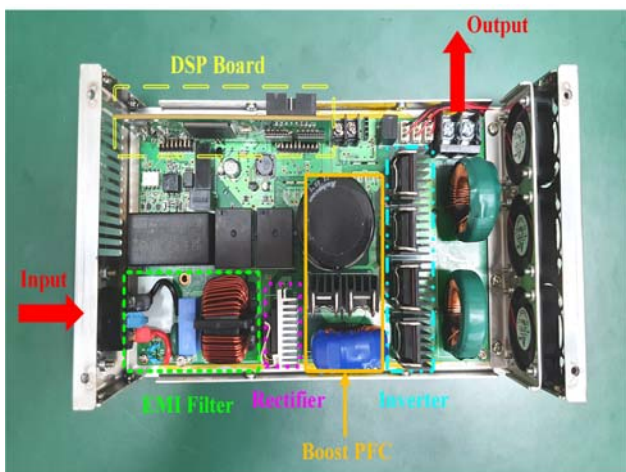


그림 8 전원부 시제품
Fig. 8 Photo of the power section in the IH system

2.3 유도 히터의 설계 및 해석

유도 히터는 크게 PCB와 코어, 그리고 히팅판으로 구성되어 있다. 유도 히터의 가열 원리는 다음과 같다; 앙페르 주회 법칙에 근거하여 PCB에 흐르는 전류로 인해 자속이 발생한다. 코어를 통해 히팅판으로 전달된 쇠교자속은 페라데이 전자기 유도법칙에 의해 히팅판에 유도기전력이 발생하고, 히팅판 표면에 와전류가 흘러 와전류손이 발생하게 된다 [10]. 이로 인해 히팅판의 가열이 이루어진다.

유도 히터는 지속적으로 연구됐다 [7], [10]-[11]. 그러나 이전의 연구는 유도 히터의 경향성을 파악하기 위해 설계되었고, 이는 상용품에는 비교적 적합하지 않은 형태이다 [7], [10]. 또한, 모듈형 유도 히터를 방수 커넥터로 직렬 연결하였으므로 커넥터 부근의 설빙 제거에 어려움이 있다 [11]. 따라서 본 논문에서 제안하는 유도 히터는 이전 유도 히터의 단점을 보완하는 동시에 상용품에 적합하도록 개선한 유도 히터를 제안한다. 그림 9는 개선된 유도 히터의 단면도를 나타낸다. 유도 히터는 1차 측인 PCB(coil), 2차 측인 히팅판(workpiece), E-type 형태의 페라이트 코어(core), 공극과 동시에 방수 목적의 수축 튜브, 그리고 이들을 고정하기 위한 에폭시(Epoxy)로 구성된다. PCB는 총 길이 500mm이고 12턴 spiral 형태로 설계하였으며, 1.6m의 히팅판 위에 3개 직렬로 연결하였다. 코어는 PL-F1의 페라이트 재질이며 각 PCB에 안착되도록 E-type 형태로 설계하였다. PCB와 코어를 고정하기 위함과 동시에 공극을 유지하기 위해 0.6mm 두께의 수축 튜브를 적용하였다. 제안하는 유도 히터는 단일화된 제품의 형태로 유지되어야 하며, 확장된 히팅판의 양측과 단부에 에폭시로 몰딩작업이 필요하다. 해당 유도 히터에 적용한 에폭시는 Resin과 Hardner를 일정 비율로 섞은 EC-1012M/EH-10/EH-20M을 사용하였다. 해당 에폭시는 -40℃에서 160℃의 온도 범위에서 본래의 형태를 유지하기 때문에 동절기 극한의 온도와 히터의 가열에도 수축/팽창/박리과 같은 변형이 없다.

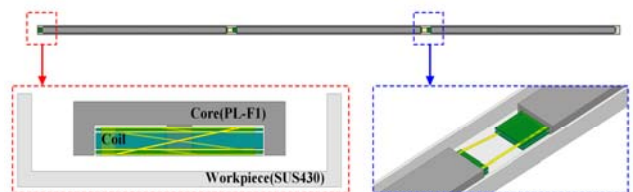


그림 9 개선된 유도 히터의 구조
Fig. 9 Construction of the improved induction heater

앞서 설계한 유도 히터의 검증을 위해 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 유도 히터의 전자기 해석을 수행하였다. 표 2는 시뮬레이션을 위한 유도 히터의 재질 데이터를 나타낸다. 히팅판은 인덕션 레인지용 조리기구에 사용되는 페라이트계 스테인레스강인 SUS430을 적용하였다. 코어는 유도가열 히팅 시스템의 동작 주파수인 250~ 320kHz 범위에 만족하는 PL-F1 페라이트를 사용하였다.

표 2 유도 히터의 재질 특성

Table 2 Property of materials in the induction heater

| Materials | Relative Permeability | Mass Density | Conductivity |
|-----------|-----------------------|----------------------|--------------|
| | [-] | [kg/m ³] | [S/m] |
| SUS430 | 2,000 | 7,719.35 | 1,702,130 |
| PL-F1 | 1,921 | 4,700 | 0.066667 |
| Copper | 0.999991 | 8,933 | 58,000,000 |
| FR4 | 1 | 1,900 | ≈0 |

그림 10은 히팅판의 표면 손실 분포를 나타낸다. 1차 측인 PCB 패턴 형상과 유사하게 2차 측 히팅판에 표면 손실이 나타나고, 이로부터 히팅판의 가열이 정상적으로 이루어짐을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

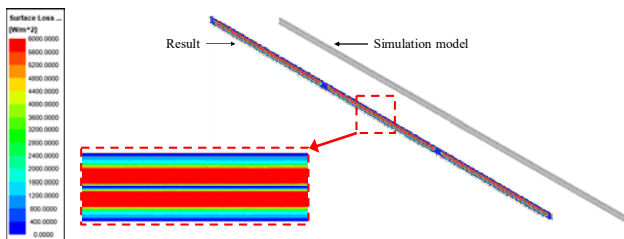


그림 10 히팅판의 표면 손실 분포

Fig. 10 Surface-Loss density distribution of workpiece

표 3은 유도 히터의 구성품의 손실 및 이의 비율을 나타낸다. 히팅판의 손실비는 유도 히터에서 약 85%를 차지하므로, 히팅판에서 대부분의 발열이 발생한다는 사실을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

표 3 유도 히터의 재질 특성

Table 3 Property of materials in the induction heater

| Item | Loss [W] | Ratio [%] |
|---------------|----------|-----------|
| | @250kHz | |
| Heating Plate | 185.647 | 85% |
| PCB + etc. | 33.917 | 15% |

3. 실험

유도 히터 공진 튜닝을 위해 시제품의 파라미터를 측정하였다. 측정은 네트워크 분석기(KEYSIGHT E5061B)를 사용하였다 [12]. 유도 히터의 인덕턴스는 약 413uH이고 각 PCB에 1.nF의 2012 사이즈의 커패시터를 부착하여 공진 주파수를 236kHz로 튜닝하였다. 그림 11은 유도히터의 주파수별 임피던스 파형을 나타낸다. 공진 주파수는 236kHz에 위치하며 동작 주파수 범위인 250kHz에서 320kHz 사이는 인덕터와 같이 주파수의 상승에 따라 증가하는 임피던스 형상을 보인다. 식 (1)은 임피던스에 따른 전류 위상각을 나타낸다. 가열을 위한 주파수인

250kHz에서 온도 제어를 위한 주파수인 320kHz로 제어될 때, 식 (1)에 의하여 전류 파형은 인덕턴스 영역으로 위상이 지연되고, 이로 인해 유도 히터의 전류가 감소한다.

$$\phi = \tan^{-1}\{(X_L - X_C)/R\} \quad (1)$$

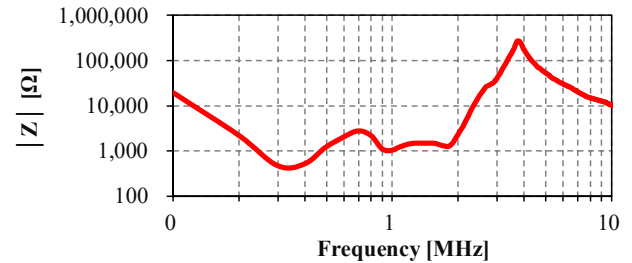


그림 11 주파수에 따른 임피던스 파형

Fig. 11 Impedance Waveform by frequency

유도가열 히팅시스템의 전원부와 유도 히터 시제품의 실험을 수행하였다. 그림 12는 실험 환경을 보여준다. 입력은 단상 220V/60Hz 상용전원을 사용하였다. 그림 13의 (a)는 스위칭 주파수 250kHz, (b)는 스위칭 주파수 320kHz로 동작할 때 인버터 출력의 전압/전류 파형이다. 오실로스코프에서 확인 가능한 인버터 출력 전압의 division은 200V이며, 출력 전류의 경우 2A 조건에서 실험 결과를 측정하였다. 그림 13 (a)와 (b)의 인버터 출력전압의 크기가 부스트 PFC 출력단의 전압과 유사한 값을 가지며, 인버터 동작을 통해 양/음으로 교번하는 구형파 극전압 파형을 확인하였다. 추가적으로 스위칭 주파수의 증가로 인해 식 (1)과 그림 11에 근거하여 위상이 지연되는 것을 확인하였으며, 250kHz 동작 시 출력 전류 I_{load} 는 0.736Arms이고 이때 부하 소비전력은 약 144W/m이다. 또한, 320kHz 동작 시 출력 전류 I_{load} 는 0.326Arms이고 이때 부하 소비전력은 약 63W/m이다. 표 4는 기존 레일 히터 대비 유도 히터의 소비전력과 비교 수치를 나타낸다. 유도가열 히팅시스템은 기존 400W/m 대비 가열 동작 구간(Heating mode)에서 기존 대비 약 2.8배, 유도 히터가 목표 온도인 50°C에 도달하였을 때 동작하는 저전력 구간(Keeping up mode)에서 약 6.3배 감소된 소비전력을 확인하였다. 따라서 온도 제어를 통한 주파수 제어로 인해 유도 히터의 소비전력 저감 유효성을 실험으로 검증하였다.

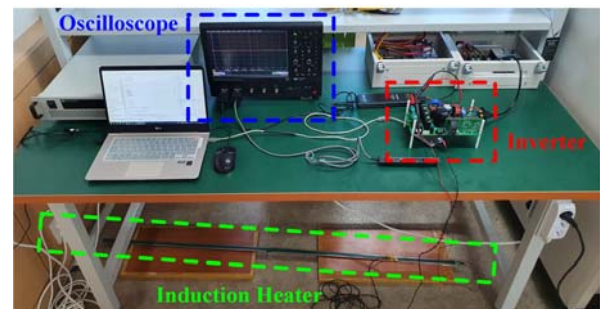
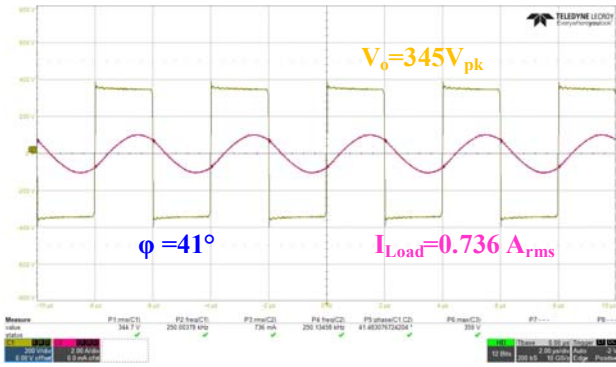
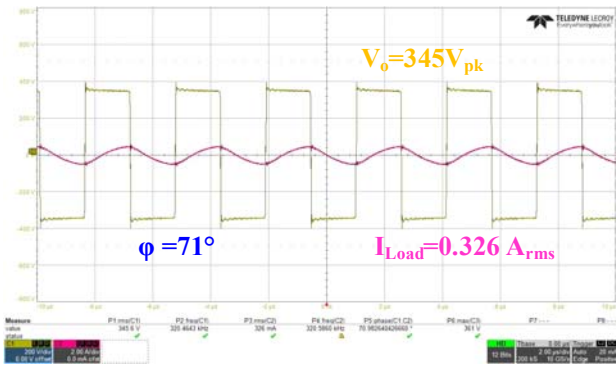


그림 12 실험 환경

Fig. 12 Photo of testbed



(a) 250kHz



(b) 320kHz

그림 13 주파수별 인버터 전압/전류 파형

Fig. 13 Voltage/current waveform by frequency

표 4 레일 히터 및 유도 히터의 비교

Table 4 Comparison of a conventional rail heater and the induction heater

| Item | Power [W/m] | Ratio [%] | |
|--------------------------|------------------|-----------|--------|
| Conventional rail heater | 400 | 100% | |
| The induction heater | @Heating mode | 144 | 36% |
| | @Keeping up mode | 63 | 15.75% |

4. 결론

기존 철도 분기기 히팅시스템의 소비전력 저감을 위한 유도 가열 히팅시스템의 설계/제어/실험을 수행하였다. 히팅시스템에 기존 전열선 방식이 아닌 유도가열 기술을 적용 및 검토하였고, 유도가열 기술의 장점을 최대한 활용할 수 있도록 시스템을 설계하였다. 역률 개선을 통해 상용화에 크게 기여할 수 있는 부스트 PFC 컨버터의 설계/제어, 부하의 파라미터 변동에도 강인한 특성을 갖는 공진형 인버터의 설계/제어를 수행하였다. 또한, 유도 히터의 온도 제어를 위해 온도 제어기를 설계하였고, 인버터의 가변 주파수 제어를 수행하였다. 기존에 수행된 유도 히터 개발 연구에서 발견되는 단점을 보완하고, 상용화에 용이하도록 개선한 유도 히터의 설계/해석을 수행하고, 실험 장비를 이용한 측정을 통해 성능을 확인하였다. 실제 시

제품을 제작하여 실험을 수행하였으며, 유도 히터의 온도에 따른 주파수 제어를 통해 기존 대비 소비전력 저감의 유효성을 검증하였다. 본 연구는 유도가열 히팅시스템의 동절기 실험에서 유도 히터의 실제 용설 성능 검증에 이바지할 것으로 사료한다.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (Grant 22RTRP-B146022-05).

References

- [1] H. B. Kwon, "Current status of affairs and preventive technology of railway damage in winter," Railway Journal, vol. 18, no. 12, pp. 26-43, Dec 2015.
- [2] O. F. Eker, F. Camci, A. Guclu, H. Yilboga, M. Sevkli, and S. Baskan, "A simple state-based prognostic model for railway turnout systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 5, pp. 1718-1726, 2011.
- [3] S. Dindar, S. Kaewunruen, M. An, and A. Gigante-Barrera, "Derailment-based Fault Tree Analysis on Risk Management of Railway Turnout Systems," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng, vol. 245, no. 4, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/245/4/042020.
- [4] H. S. Oh, C. B. Park, S. H. Lee, J. B. Lee et al. "A study on de-icing for railway turnouts using 250kHz-200W-class induction heating system," AIP Advances, vol. 9, no. 12, Dec. 2019, doi:10.1063/1.5129857.
- [5] D. S. K. S, "Assessment of Turnout-Related Derailments by Various Causes." In: P. J, J. G, (eds) "Recent Developments in Railway Track and Transportation Engineering. GeoMEast," Sustainable Civil Infrastructures. Springer, pp. 27-39, July. 2017, doi: 10.1007/978-3-319-61627-8_2
- [6] G. J, W. Y. Ji, J. C. Kim, et al., "Study on Characteristic Analysis of Induction Type Heating Device for Anti-icing in Railway Switch," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 69, no. 10, pp. 1555-1560, Oct. 2020.
- [7] H. S. Oh, W. Y. Ji, J. B. Lee, et al., "Analytic Heat Performance of an Induction Heating Type of Device for Snow melting in Railway Turnouts," Journal of The Korean Society for Railway, vol. 24, no. 7, pp. 658-665, July. 2021.
- [8] B. K. Kang, S. M. Lee, J. W. Park. "A Study on the Parameter Optimization of Inverter for Induction Heating Cooking Appliance," The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 58, no. 1, pp. 77-85, Jan. 2009
- [9] S. S. Choi, M. S. Goh, I. D. Kim, "Design of Control Circuit of Induction Heating Power Supply for Forging

Applications Using Current-Source PWM Rectifier and Inverter,” The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 68, no. 8, pp. 972-981, Aug. 2019.

- [10] J. C. Kim, W. Y. Ji, C. B. Park, et al., “Design Considering the Impedance of Induction Heating System for 200W-class Railway Turnout,” Journal of The Korean Society for Railway, vol. 23, no. 11, pp. 1124-1132, Oct. 2020.
- [11] H. S. Oh, et al., “Anti-icing System on Railway Turnouts using Induction Heating Technology for Energy Saving,” 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), pp. 342-347, Aug. 2022.
- [12] Keysight Technologies, E5061B ENA Vector Network Analyzer, Colorado Springs, CO, USA, Available: <https://www.keysight.com/> (Accessed 27 August 2022)

저자소개



오형석 (Hyeong-Seok Oh)

He received the B.S. and M.S. degrees from Korea National University of Transportation, Gyeonggi-do, Korea in 2018 and 2020, respectively, and is currently pursuing the Ph.D. candidate in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, Korea. His research interests include design and analysis of high-frequency device and applications of device drive such as induction systems.



김동균 (Dong-Kyun Kim)

He received B.S. degree from Korea National University of Transportation, Gyeonggi-do, Korea, in 2021. His research interests high-efficiency dc/dc converters.



박찬배 (Chan-Bae Park)

He received the M.S. degree in electrical engineering from Seoul National University, Seoul, Korea, in 2003 and the Ph.D. degree in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2013. From 2003 to 2006, he had worked as Senior Engineer in the Digital Appliance R&D Center at Samsung Electronics. From 2007 to 2015, he had worked as Senior Researcher at the Korea Railroad Research Institute. Since 2015, he has been an Associate Professor at the Korea National University of Transportation, Uiwang-si, Korea. His research interests include design and analysis of various electric machines for electric vehicles and railways.



이재범 (Jae-Bum Lee)

He received the B.S. degree in electrical engineering from Korea University, Seoul, South Korea, in 2010, and the M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, South Korea, in 2012 and 2016, respectively. From 2016 to 2019, he was a Senior Researcher with the Korea Railroad Research Institute, Uiwang, South Korea. He is currently an Assistant Professor with the Korea National University of Transportation, Uiwang. His main research interests include high-voltage/power transformer design, high-efficiency ac/dc and dc/dc converters, and digital control method in high-power vehicles, such as electric vehicles and rolling stock and medium power, such as electronic equipment.



이 주 (Ju Lee)

He received the M.S. degree from Hanyang University, Seoul, South Korea, in 1988, and the Ph.D. degree in electrical engineering from Kyusyu University, Japan, in 1997. In 1997, he joined Hanyang University, where he is currently a Professor with the Department of Electrical and Bio-Engineering. His main research interests include electric machinery and its drives, electro-magnetic field analysis, transportation systems, such as hybrid electric vehicles and railway propulsion systems. He is a member of the IEEE Industry Applications Society, the Magnetics Society, and the Power Electronics Society.



이형우 (Hyung-Woo Lee)

He received the B.S. and M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1998 and 2000, respectively, and the Ph.D. degree from Texas A&M University, College Station, TX, in 2003, all in electrical engineering. In 2004, he was a Post-doctoral Research Assistant in the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Cornell University, Ithaca, NY. In 2005, he was a contract Professor at the BK division of Hanyang University, Seoul, Korea. From 2006 to 2013, he has been a Senior Researcher at the Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Korea. Since 2013, he has been a Professor at the Korea National University of Transportation, Uiwang, Korea. His research interests include design, analysis and control of motor/generator, power conversion systems, and applications of motor drives such as Maglev trains, conventional railway propulsion systems, and modern renewable energy systems.