

# Study on Characteristic Analysis of Induction Type Heating Device for Anti-icing in Railway Switch

철도 분기기의 설빙 방지를 위한 유도방식 히팅 장치의 특성 분석 연구

Geochul Jeong · Woo-Young Ji · Jin-Chul Kim · Chan-Bae Park · Jae-Bum Lee · Ju Lee · Hyung-Woo Lee

정거철\* · 지우영\*\* · 김진출\* · 박찬배\* · 이재범\* · 이 주\*\* · 이형우†

## Abstract

In this paper, a study was conducted on an induction type heating device to remove snow and ice that may cause obstacles and malfunctions of the railway switch. In the induction heating device, an ohmic loss is the heat source. Ohmic loss and heat transfer change greatly depending on the shape and material of the heating device and condition of the atmosphere. Since the loss must be accurately calculated to conduct the thermal analysis properly, it is necessary to analyze the electromagnetic and thermal characteristics and to interlock of electromagnetic and thermal analysis. Therefore, the electromagnetic and thermal analysis was conducted using finite element method (FEM). By the performance test of the prototype, verification of the simulation was conducted.

## Key Words

Railway switch, Induction heating, Finite-element method (FEM), Multi-physics

## 1. 서론

철도 분기기는 레일의 분기부에서 선로를 전환하여 열차의 진행 방향을 결정하는 장치로 철도 인프라 중에서 매우 중요한 장치이다[1]. 그림 1은 분기기의 개념도와 실제 분기기의 사진을 나타낸다. 텡레일이 스위칭로드에 의해 이동하여 기본 레일에 밀착하거나 떨어져서 열차의 진행방향을 결정하는 방식으로 분기한다. 혹한기에 강설로 인해 기본 레일과 텡레일 사이의 공간에 눈과 얼음이 쌓일 경우 텡레일이 기본 레일에 충분히 밀착하지 못하는 상황이 발생하여 열차 지연 또는 탈선으로 인한 큰 사고를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제를 방지하기 위한 제설 방식으로 제빙액, 온풍, 전기적 히팅 방식 등을 사용하며 현재 국내에서는 전열선 방식의 히팅 장치를 사용하고 있다[2]. 전열선 방식의 히팅 장치는 구조가 간단하고 설치가 용이한 장점을 가지지만 전기적, 열적 효율이 좋지 않은 단점을 가지고 있다. 전열선에서 발생한 열이 히팅 장치를 전체적으로 가열시키면서 레일과의 접촉부를 통해 대부분의 열이 온도와 열저항이 낮은 레일로 전달되어 열적 손실이 크게 발생한다. 반면 유도방식 히팅 장치는 전열선 방식에 비해 복잡한 구조를 가지지만 코일에 입력한 전기적 에너지가

유도가열 방식으로 피가열체로 전달되어 국부적인 가열이 가능하여 열적 효율이 높은 장점을 가진다[3, 4].

전기적 히팅 장치는 전기적 입력을 열적으로 출력하는 시스템으로 장치 내부에서 발생한 전기적 손실이 열원으로 작용하게 된다. 따라서 히팅 장치의 발열 성능을 분석하기 위해서는 먼저 전자기적 특성 해석이 필수적이다. 맥스웰 방정식으로 표현되는 대부분의 전자장 문제는 간단하고 특수한 경우에만 이론해를 구할 수 있기 때문에 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법으로 수치해를 구하는 유한요소법을 주로 사용한다. 유한요소법은 해석 영역을 유한개의 요소로 분할하여 공간에 대한 맥스웰 미분 방정식의 해를 구하는 방법이다. 보다 정확한 해석 결과를 위해서 3차원의 맥스웰 방정식 수치 해석 소프트웨어를 사용하며 전자기 필드의 공간적 분포에 대한 해석 결과를 얻을 수 있다. 따라서 Z파라미터와 전계 및 자계, 전류밀도, 전력 손실 등 다양한 물리량을 계산할 수 있다.

발열 성능 분석을 위한 열해석 방법으로는 열에너지의 이동을 이용하는 열전달(Heat Transfer) 해석법과 유체역학의 지배 방정식에 근거한 열유동(Heat Flow) 해석법이 존재한다. 먼저 열전달 해석법은 전도(Conduction), 대류(Convection), 복사(Radiation)의 방정식을 고려하여 열유동 해석보다 비교적 간단

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

E-mail: krhwlee@ut.ac.kr

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

\* Dept. of Railroad Engineering, Korea National University of Transportation, Korea.

<https://orcid.org/0000-0002-8206-7844>

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

Received : September 4, 2020 Revised : September 12, 2020 Accepted : September 28, 2020

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 레일 분기기  
Fig. 1 Railway switch

하여 연산시간을 크게 단축시킬 수 있다. 반면에 유체역학의 지배방정식을 이용한 열유동 해석법은 연속방정식(Continuity Equation), 운동방정식(Equations of Motion), 에너지방정식(Energy Equation)을 동시에 고려하여 열유체의 유동 현상을 해석하는 방법으로 많은 요소들을 고려하여 복잡하고 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있지만 열전달 해석법보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 이점을 가지고 있다[5].

본 논문에서는 철도 분기기의 설빙으로 인해 발생하는 장애 방지를 위한 유도방식 히팅 장치의 전자기적 및 열적 특성 분석을 진행하였다. 먼저 유도방식 히팅 장치의 기본적인 원리 분석 및 기본 모델을 설계를 진행하였다. 그리고 제작된 시제품의 실제 형상을 고려하여 실측 사이즈로 유한요소법을 이용한 해석모델을 설계하였으며 전자계 해석을 통해 손실 값을 계산하였다. 열 해석에서는 계산된 손실 값이 열원으로 작용하여 실험과 동일한 상황의 조건에서 시뮬레이션을 진행하였다. 실제 동절기 분기기 조건에서의 실험 진행이 매우 어렵기 때문에, 실험실 수준에서의 시제품 성능 실험을 진행하고 최종적으로 유도방식 히팅 장치의 발열 성능 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 확인하였다.

## 2. 유도방식 히팅 장치

### 2.1 유도방식 히팅 장치 원리

본 논문의 연구대상인 유도방식 히팅 장치의 주요 원리는 유도가열 기술로 이미 여러 산업에 널리 사용되고 있는 신뢰성 높은 기술이다[6]. 유도가열 기술의 주요 원리는 암페어의 법칙과 페러데이의 전자기 유도 법칙이다. 암페어 법칙은 코일에 전류가 흐를 때, 코일 주변으로 자계가 생성되는 법칙이며 식 (1)에 나타내었다. 여기서  $H$ 는 자계 세기[A/m],  $N$ 은 코일의 턴 수,  $i$ 는 코일에 흐르는 전류[A],  $R_m$ 은 자기저항[A/Wb],  $\phi$ 은 자속[Wb]이다.

$$\oint H \cdot dl = Ni = R_m \phi \tag{1}$$

코일에 교류를 인가하면 교번자계가 생성되며 도체에 쇄교자속이 작용할 경우 페러데이 법칙 식 (2)에 의해 자속의 변화를 방해하는 방향으로 유도기전력이 발생한다. 여기서  $e$ 는 유도기전력[V],  $\lambda$ 는 쇄교자속[Wb]이다.

$$e = - \frac{d\lambda}{dt} = - N \frac{d\phi}{dt} \tag{2}$$

도체에 교류에 의해 생성된 교번자계가 쇄교할 경우 유도기전력이 발생하며 맴돌이 전류인 와전류가 흐르게 된다. 따라서 전류를 인가한 코일뿐만 아니라 자속이 쇄교하는 도체에서도 유도기전력에 의해 전류가 흐르게 되며 도체에 전류가 흐르게 되면 줄의 법칙에 의해 전류의 제곱과 저항의 크기에 비례하는 손실이 발생한다. 여기서 발생하는 전기적 손실은 옴 손실이며 열에너지를 발생시키는 열원이 된다.

### 2.2 유도방식 히팅 장치 설계 및 제작

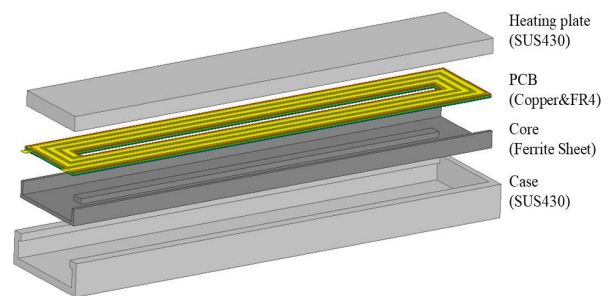


그림 2 유도방식 히팅 장치의 개념도  
Fig. 2 Concept of induction type heating device

히팅 장치는 그림 1에서와 같이 기본레일과 텅레일 사이에서 기본레일의 저부와 복부의 경계 부분에 부착되며 공간이 매우 제약적이므로 두께는 5mm, 너비는 18mm 이내로 제한된다. 유도방식 히팅 장치를 구성품별로 분리하여 개념도를 그림 2에 나타내었다. 아래부터 케이스, 코어, PCB 코일, 히팅판

으로 구성된다. 케이스는 부식성과 전자기적 차폐를 고려하여 스테인레스 계열의 SUS430 재질로 선정하였으며 가전 인덕션 레일의 전용 조리 용기에도 사용되는 재질이다. 케이스는 레일측에 부착되는 부분이며 다른 구성품들이 케이스 내에 위치한다. 코어는 제작성을 고려하여 Ferrite sheet로 구성하였고 코일에서 발생하는 자속이 히팅판에 쇄교 하도록 E-type 형상으로 설계하였다. 유도 코일은 공간적 제약으로 인한 사이즈 제한으로 리츠 와이어의 사용이 불가하여 얇은 PCB기판에 구리 동박으로 구성되었으며 Spiral 형태로 3Turn의 4Layer 구조로 설계하였고 1Arms의 전류 제한을 가진다. 히팅판은 케이스와 같은 SUS430 재질로 코일에서 발생한 교번 자계에 의해 와전류가 형성되어 발열하는 피가열체이다. 표 1은 각 구성품별 전자계 및 열 재질 데이터를 나타낸다.

표 1 유도방식 히팅 장치의 구성품별 재질 데이터  
Table 1 Material data of the induction type heating device

	Relative permeability	Conductivity [S/m]	Mass density [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal Conductivity [W/m·°C]	Specific Heat [J/kg·°C]
SUS430 Stainless Steel (Case& Heating Plate)	2000	1,702,130	7719.35	26	460
Copper (PCB Coil)	1	58,000,000	8,933	400	385
Ferrite sheet (Core)	100	0.01	4,600	4	750
FR4 (PCB)	1	0	1,900	0.294	1,150

여기서 PCB 코일의 사이즈 제약으로 인한 낮은 전류 제한치 때문에 입력 또한 제한되며 이를 해결하기 위해서는 히팅 장치의 저항이 증가해야 한다. 유도방식 히팅장치는 1차측인 PCB 코일과 2차측인 히팅판이 코어를 통해 자기적으로 연결되어 있는 형태로 변압기와 유사하다. 따라서 변압기와 같이 2차측의 회로를 1차측으로 환산한 등가회로를 생각해 볼 수 있다. 변압기와 달리 2차측인 히팅판은 코일 형태가 아니며, 히팅판의 와전류가 흐르는 저항에서의 손실이 모두 열로 소비된다. 여기서 2차측의 저항 증가는 등가회로의 저항을 증가시키며 침투깊이의 영향을 받는다. 침투깊이는 식 (3)과 같으며  $\delta$ 는 침투깊이  $f$ 는 주파수  $\sigma$ 는 도전율 그리고  $\mu$ 는 투자율이다.

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

주파수가 높아져 침투깊이가 감소하면 와전류가 흐르는 면

적이 감소하고, 그에 따라 저항이 증가하게 되며 히팅판에 더욱 더 국부적인 가열이 가능하다. 하지만 고주파를 사용할 경우 유도가열에 유리하지만, 고주파를 사용하는 철도 궤도회로 및 신호에 간섭을 야기할 수 있다. 따라서 기존에 사용되는 철도 주파수의 현황을 파악하고, 유도장애와 간섭이 발생하지 않는 주파수를 선정해야 한다. 국내 ATS장치 중 ATS S-1은 125kHz~131kHz의 주파수를 사용하기 때문에 홀수배의 주파수로 인한 간섭이 없도록 유도방식 히팅장치의 주파수는 250kHz로 선정하였다[3].

유도방식 히팅 장치의 기본설계를 수행한 후 유도방식 히팅 장치의 성능 실험 및 시뮬레이션 검증을 위하여 시제품을 제작하였다. 그림 3은 제작된 유도방식 히팅 장치 시제품의 각 구성품 사진을 나타낸다. 시제품의 기본레일과 텅레일 사이의 공간 제약으로 인해 너비는 15mm, 두께는 4.5mm, 길이는 500mm 이다. 제작성과 제작 공차 등으로 인해 기본설계 모델과는 오차를 가진다. 인덕션스에 영향을 미치는 주요 원인인 공극이 코어와 히팅판 사이에서 불균형하게 발생하였으며, 케이스는 제작성으로 인해 양옆 모서리 부분이 라운딩 형태로 제작되었다. 히팅 장치의 전체 형상은 실측을 하였고 불균형한 공극은 실측 후 평균적인 값을 계산하였으며 히팅 장치 특성 분석을 위한 해석모델에 반영하였다.

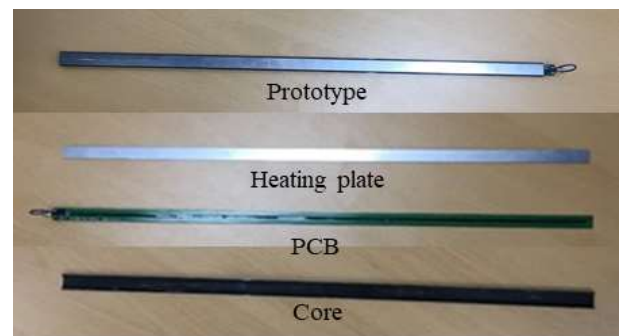


그림 3 유도방식 히팅 장치 시제품  
Fig. 3 Induction type heating device prototype

### 3. 유도방식 히팅 장치 특성 분석

유도방식 히팅 장치는 각 구성품의 형상과 재질에 따라 전자기적 및 열적 파라미터가 민감하게 반응하기 때문에 시제품의 실측 사이즈와 재질 데이터를 적용한 모델을 사용하여 해석을 진행하였다. PCB 코일에 전기적 에너지를 입력하면 히팅판에서 열에너지로 변환되는 시스템이기 때문에 전자계와 열 해석을 모두 진행하였으며 모두 유한요소법을 사용하였다. 전자계 해석을 통해 계산된 옴 손실을 열 해석에서 열원으로 적용시키기 위해 두 해석을 연동하였으며 시제품의 실험 환경과 같은 조건을 설정하여 열 해석을 진행하였다. 시제품의 특성 분석을 위한 실험은 실험실 규모에서 진행하였으며 시뮬레



이선 결과와 함께 나타내었다.

### 3.1 전자계 특성 분석

전자계 해석은 250kHz 고주파의 해석에 적합한 상용 프로그램(Ansys HFSS)을 사용하였다. Z파라미터의 해석을 위해 히팅 장치의 PCB 코일 입력 측에 Terminal구조의 급전 설정을 하여 각 구성품들의 형상과 재질에 따라 요소별로 전자장계를 계산하게 된다. 따라서 PCB 코일 전원의 입력 측에서의 전체 등가회로의 저항, 인덕턴스 등의 전기학적 파라미터 값을 계산하였으며 표 2에 시제품 측정 결과와 함께 정리하였다. 여기서의 등가저항은 PCB코일의 저항, 그리고 히팅판을 포함하여 코일과 전기학적으로 연결되어있는 각 구성품의 모든 저항이 1차 측으로 환산되어 나타나는 등가 값이다. 이는 특정 전류를 코일에 흘려 주었을 때, 전류의 제곱과 등가저항에 의해 계산되는 손실 값이 히팅판에 전체적으로 발생하는 것을 의미한다. 파라미터 값을 구한 후, 동작 주파수인 250kHz, 1Arms의 교류를 인가하고 저항에서 발생하는 옴 손실 값을 구성품별로 계산하여 표 3에 정리하였다. 대부분의 손실이 히팅판에서 발생하였으며, 코어와 PCB(FR4)에서는 거의 발생하지 않았다. Case에서 발생한 손실은 대부분 E-type 코어의 양 끝 부분에서만 발생하였고 다른 부분에서는 자속이 쇄교하지 않아 손실이 거의 발생하지 않았다.

표 2 실험 및 시뮬레이션 전기학적 파라미터 비교

Table 2 Electromagnetic parameters results of experiment and simulation

	Prototype	Simulation Model	Unit
Resistance	18.087	17.84	[Ω]
Inductance	25.37	45.5	[μH]

표 3 히팅 장치 각 구성품별 옴 손실

Table 3 Ohmic loss for each heating device component

Ohmic Loss [W]	Heating Plate	Case	Core
	11.1053	2.31	0.395
	PCB(Coil)	PCB(FR4)	Total
3.983	0.045	17.84	

전자계 해석은 주파수 응답 해석을 진행하였으나 열 해석은 시간에 따른 Transient 해석을 진행해야 하므로 해석 시간과 Mesh의 개수가 매우 크게 증가하여 축소 모델을 이용한 해석이 필요하다. 유도방식 히팅 장치는 코일이 감기는 양 끝 단부를 제외하고는 길이 방향으로 동일한 형상이므로 500mm 전체 모델의 1/7축소 모델을 사용하여 해석을 진행하였다. 그림 4는 전체 모델과 축소 모델 히팅판의 표면손실밀도 분포이다. 해당 표면은 히팅판 외측이 아닌 교번자계가 쇄교하는 내측 표면이다. 중앙부의 표면손실밀도는 거의 일치하는 것을

확인할 수 있다. 따라서 같은 표면손실밀도 분포를 가지는 중앙 부분은 두 모델이 단위 길이 당 동일한 전력을 열로 소비하기 때문에 동일한 발열 성능을 가진다.

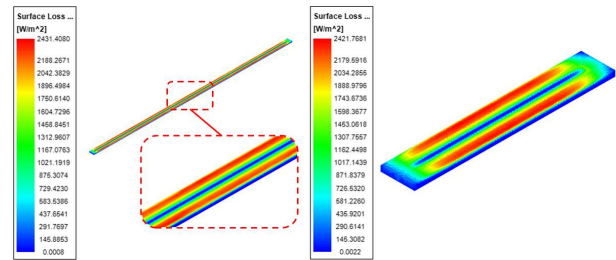


그림 4 전체 및 축소 모델 히팅판의 표면손실밀도 분포  
Fig. 4 Surface loss density distribution of heating plate

### 3.2 열 특성 분석

실제 흑한기의 분기기 현장에 적용한 유도발열 방식 히팅 장치의 발열 성능 실험이 매우 어려우므로, 시제품의 발열 실험은 16℃ 상온의 실내 공간에서 진행하였으며 250kHz 1Arms의 교류를 인가하여 300초 경과 시까지 히팅판 표면의 온도를 측정하였다. 측정에는 TE-M1 PRO 열화상 카메라 모델을 사용하였다. 히팅판은 금속 재질로 방사율이 낮아 열화상 카메라에서 온도가 낮게 측정되므로 방사율이 높은 절연 테이프를 부착한 후 측정하였다. 그림 5는 열화상 카메라를 이용한 시제품 히팅판 표면의 온도 측정 사진을 나타낸다.

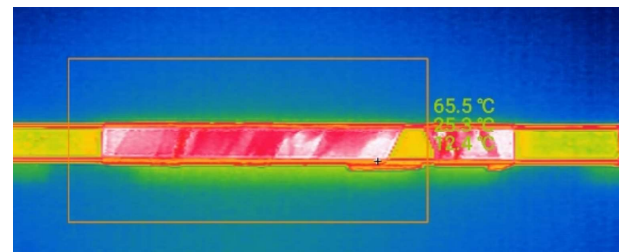


그림 5 열화상 카메라 온도 측정 사진 (300초 경과 시)  
Fig. 5 Temperature measurement using thermal imaging camera (time at 300s)

Transient 열 해석은 상용프로그램 (Ansys Icepak)을 사용하였다. 전자계 해석을 통해 얻은 옴 손실 결과 데이터를 열 해석과 연동하여 열원으로 설정하였다. 실험과 동일한 16℃의 초기 및 대기 온도로 설정하여 해석을 진행하였다. 그림 6은 300초 경과 시 히팅 장치의 온도 분포를 나타낸다. (a)온도분포 측면도를 통해 히팅 장치와 주변 공기의 온도 분포를 확인할 수 있다. (b)에는 케이스와 히팅판의 표면 온도분포를 각각 나타내었다. 히팅 장치에 전체적으로 열이 전달되는 전열선 방식과 달리, 유도방식 히팅 장치는 피가열체인 히팅판에서 대부분 발열이 일어나며 케이스 부분과 확연한 온도 차이를 가지는 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 실험과 시뮬레이션 결과인 히팅판 표면의 시간에 따른 온도상승 그래프를 나타내며

시뮬레이션과 실험의 결과가 0.35~4.85%의 오차를 가지며 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

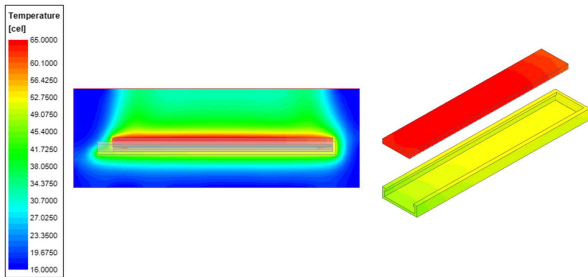


그림 6 히팅 장치 온도분포 (300초 경과 시)  
Fig. 6 Temperature distribution of the heating device

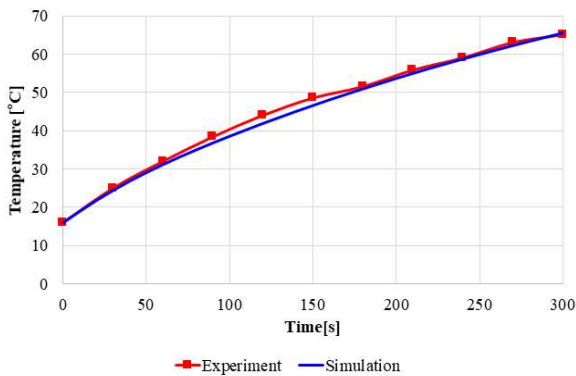


그림 7 시뮬레이션 및 실험 히팅판 온도 상승 그래프  
Fig. 7 Temperature rise graph of simulation and experiment

## 5. 결론

본 논문에서는 철도 분기기의 설빙 방지를 위한 유도방식 히팅 장치의 전자기적, 열적 특성을 분석하였다. 유도가열 방식의 원리를 사용하여 히팅판에서 국부적으로 발열하는 유도방식 히팅장치의 기본설계를 진행하였고, 실제 제작된 시제품의 오차 분석을 진행하였다. 실제 동절기 분기기 환경에서의 실험이 난해하므로 실내 공간에서 시제품의 실험을 진행하였다. 해석 모델을 제작 오차를 고려하여 시제품의 3D 실측모델로 구성하였으며 전자계 해석은 유한요소법을 통해 맥스웰 미분 방정식의 해를 구하는 방법을 사용하였고 열 해석은 유한요소법을 통해 유체역학의 지배방정식의 해를 구하는 열유동 해석 방법을 사용하였다. 전자계 해석을 통해 임피던스 파라미터와 옴 손실을 계산하였고 손실 데이터를 열 해석과 연동하여 열원으로 설정하고 실험 환경과 같은 대기 조건으로 Transient 열 해석을 진행하였다.

온도 분포를 통해 유도방식 히팅 장치의 발열이 히팅판에 국부적으로 집중되는 것을 확인할 수 있었으며, 실험과 시뮬레이션의 시간에 따른 온도상승 그래프가 거의 일치하는 것을 확인하였다. 이를 통하여 유도방식 히팅 장치의 발열 특성 분

석 및 시뮬레이션의 검증이 진행되었다. 본 논문의 특성 분석 연구를 통해 여러 형상과 재질의 유도방식 히팅 장치에 대해 다양한 대기의 온도와 유속 등의 조건에서 발열 성능을 예측할 수 있을 것을 기대한다.

### Acknowledgements

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 20RTRP-B146022 -03)

### References

- [1] 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.
- [2] D. W. Jang and T. H. Jeon, "Design of improved switch point heating system for low power and simplified equipment," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 27, no. 1, pp. 61-67, 2013.
- [3] Hyeong-Seok Oh, Chan-Bae Park, Seung-Hwan Lee, and Hyung-Woo Lee, "Study on 200W-Class Heating System of Induction Heating Type to Melt Snow in Railway Turnout," Journal of the Korean Society for Railway, vol. 22, no. 10, pp. 762-767, 2019.
- [4] Hyeong-Seok Oh, Chan-Bae Park, Seung-Hwan Lee, Jae-Bum Lee, Tae-Hyung Kim, and Hyung-Woo Lee, "A study on de-icing for railway turnouts using 250kHz-200W-class induction heating system," AIP Advances, vol. 9, no. 12, 125229, 2019.
- [5] John C. Tannehill and Dale A Anderson, "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer," Taylor & Francis, 1997.
- [6] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.

### 저자소개



#### 정거철 (Geochul Jeong)

2012년~2013년 한국철도기술연구원 위촉연구원.  
2015년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
2020년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).  
2020년~현재 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 연구교수



#### 지우영 (Geochul Jeong)

2019년 한국교통대 대학원 철도차량운전시스템공학과 졸업(석사).  
2019년~현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정.

**김진출 (Jin-Chul Kim)**

한국교통대학교 철도전기전자공학과 재학(학사).

**박찬배 (Chan-Bae Park)**

2003년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사).  
2013년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사).  
2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원.  
2007년~2015년 한국철도기술연구원 선임연구원.  
2015년~현재 한국교통대학교 철도공학부 철도운전  
시스템전공 부교수.

**이재범 (Jae-Bum Lee)**

2010년 고려대 전기전자전파공학부 졸업(학사).  
2016년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 졸업  
(박사).  
2016년~2019년 한국철도기술연구원 선임연구원.  
2019년~현재 한국교통대학교 철도공학부 철도전기  
전자전공 조교수.

**이 주 (Ju Lee)**

988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
1989년~1993년 국방과학연구소 연구원.  
1997년 일본 큐슈대학교 System정보과학연구과  
졸업(박사).  
1997년 한국철도기술연구원 선임연구원.  
1997년~현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.

**이형우 (Hyung-Woo Lee)**

2000년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
2003년 Texas A&M University 전기공학과 졸업  
(박사).  
2006년~2013년 한국철도기술연구원 선임연구원.  
2013년~현재 한국교통대학교 철도공학부 철도차량  
시스템전공 교수