Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 1, 2026, pp. 34~44
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.1.34

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

수소 정제를 위한 유도 가열 흡착탑의 전자기-열 연성 해석 및 실험적 고찰

권수인[1] · 따와남[2] · 엄성용[3†] · 최경민[2†]

[1](주)하이드로파 에너지솔루션사업부 기술연구소, [2]부산대학교 기계공학부, [3]부산대학교 첨단냉동공조에너지센터

Electromagnetic–Thermal Coupled Analysis and Experimental Investigation of an Induction-Heated Adsorption Tower for Hydrogen Purification

SOOIN KWON[1], DAVAANYAM DORJ[2], SEONGYONG EOM[3†], GYUNGMIN CHOI[2†]

[1]Energy Solutions Business Division Technology Research Center, HydroFa Co., Ltd., Noksan-ri Factory C403, 32 Noksan Industrial Complex 382-ro 14beon-gil, Gangseo-gu, Busan 46757, Korea
[2]School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea
[3]Center for Advanced Air-conditioning Refrigeration and Energy, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

[†]Corresponding author :
eom912@pusan.ac.kr
choigm@pusan.ac.kr

Received 6 January, 2026
Revised 16 January, 2026
Accepted 19 January, 2026

Abstract >> This study investigates an induction-heating regeneration module for a hydrogen dryer to enable faster desorption than conventional jacket heating. Experiments at 30–57 kHz and 1.0–5.0 kW quantified the time required for the center location on the tower surface (TC1) to reach 250 °C and the maximum temperature difference among multiple surface locations (ΔT_{max}). Higher input power significantly accelerated heating, while temperature uniformity depended strongly on operating frequency. Among the tested conditions, 57 kHz at 2.5 kW provided a favorable balance, reaching 250 °C in 189 s with ΔT_{max} = 29.3 °C. Coupled electromagnetic–thermal analysis confirmed that eddy currents were concentrated near the tower surface and that total heat flux increased near the tower ends due to axial heat conduction toward unheated sections. These results indicate that appropriate frequency–power selection and staged power control are essential to balance productivity and thermal stability.

Key words : Hydrogen Purification(수소 정제), Induction Heating(유도 가열), Adsorption Tower(흡착탑), Electromagnetic-Thermal Analysis(전자기-열 해석), Regeneration(재생)

1. 서 론

탄소 중립 실현을 위한 그린 수소 생산 시, 수분 및 불순물 제거를 통한 고순도화 기술은 시스템의 성능과 내구성 확보를 위해 필수적이다. 특히 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)와 같은 고신뢰 응용 분야

2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

에서는 수소의 품질이 시스템의 성능과 내구성에 치명적인 영향을 미치므로, 이를 방지하기 위한 정제 및 제습 공정이 필수적이다. 국제 표준인 ISO 14687 및 SAE J2719 등에서도 수소 연료 내 수분을 포함한 불순물 농도에 대한 엄격한 관리 기준을 제시하고 있다[1,2].

수전해 기반 수소 생산 공정에서의 품질 제어 및 효율 향상은 지속적인 연구 주제였다. Bacquart 등[3]은 공정 지식 기반의 불순물 평가를 통해 전해 및 정제 단계에서의 품질 확보 전략을 강조하였으며, TSA (Temperature Swing Adsorption) 기반의 정제 공정이 품질 기준 만족에 유효함을 입증한 연구 결과도 보고된 바 있다[4]. 그러나 수소 건조 및 정제 공정은 시스템 전체 운영 비용과 직결되며, 공정 구성에 따라 에너지 효율 개선의 여지가 크다는 점이 지적되어 왔다[5]. 즉, 수전해 시스템의 주변 보조 기기 (Balance of Plant, BOP) 최적화는 스택 효율뿐만 아니라 가스 컨디셔닝에 소요되는 에너지까지 포괄해야 하며, 특히 제습 공정의 소비 전력 절감과 운전 시간 단축은 수소 생산 단가를 낮추는 핵심 설계 목표가 된다[6,7].

수전해 시스템의 제습 공정에는 흡착탑(Adsorption Tower)이 널리 활용되는데, 공정의 전체 효율은 흡착제가 포화된 이후 수행되는 재생(Regeneration) 단계에 의해 좌우된다[8]. 기존의 재생 방식은 주로 외부 열원(가열 공기, 스팀, 재킷 히터 등)을 이용한 간접 가열 방식을 채택하고 있다. 그러나 이 방식은 열전달 매체를 거치는 과정에서 열손실이 발생하고 승온 속도가 느리며, 탑 내부 온도 분포의 불균일성으로 인해 재생 품질의 편차를 유발한다. 이는 결과적으로 재생 시간을 지연시키고 흡착제 활용률을 저하시켜 시스템 가동률과 전체 효율을 감소시키는 원인이 된다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 유도 가열(Induction Heating) 기술을 흡착탑 재생 공정에 적용하고자 한다. 유도 가열은 교류 자기장을 이용하여 금속 구조물에 와전류(Eddy Current)를 유도하고, 이때 발생하는 줄열(Joule Heat)로 피가열체를 직접 가열하는 방식이다[8]. 열전달 매체가 불필요하여 열손실이 적고 빠른 응답 특성으로 공정 시간을 단축할 수 있으며, 입력 전력 및 주파수 제어를 통해 정밀한 온도 관리가 가능하다는 장점이 있다[9]. 선행 연구들[10-12]을 통해 충진층(Packed Bed) 내 유도 가열 적용 가능성과 전자기장 분포 해석이 수행된 바 있으며, 산업 공정의 전동화 관점에서도 유망한 기술로 평가받고 있다[13]. 하지만 기존 연구들은 주로 촉매나 흡착제가 충진된 상태에서의 반응 효율 검증에 집중하여, 흡착탑 용기 자체의 전자기-열 복합 거동에 대한 해석적 검증과 물리적 오차 요인에 대한 체계적 고찰은 상대적으로 부족한 실정이다.

실제 재생 공정은 다공성 매체 내 유효 열물성, 접촉 열저항, 유동을 동반한 대류 및 복사 열전달, 수분 흡·탈착열 등 복합적인 요인이 동시에 작용하여 해석의 불확실성이 매우 높다. 따라서 복잡한 충진층 해석으로 확장하기에 앞서, 유도 가열 흡착탑의 금속 구조물 자체에서 발생하는 발열 및 열전도 거동을 우선적으로 규명하고, 전자기-열 연성 해석 모델의 신뢰성을 확보하는 단계가 선행되어야 한다.

이에 본 연구는 수전해 시스템용 유도 가열 흡착탑 개발을 위한 기초 연구로서, 전자기-열 연성 해석과 동일 조건의 실험을 병행하여 해석 모델의 정합성을 검증하고 오차 원인을 고찰한다. 구체적으로 Ansys Maxwell을 이용한 전자기장 해석과 Transient Thermal 해석을 연동하여 주파수(30, 40, 57 kHz) 및 소비 전력(1.0, 2.5, 5.0 kW) 변화에 따른 승온 특성을 예측하였다. 아울러 내부 유동과 흡착제가 없는 조건에서 제작된 시제품의 온도 프로파일을 열전대로 계측하여 해석 결과와 비교·분석하였다.

2. 실 험

2.1 실험 장치 및 방법

2.1.1 유도 가열 실험장치 구성

본 연구에서는 유도 가열을 이용한 흡착탑의 가열 및 재생 특성을 평가하기 위하여 유도 가열 시스템

과 흡착탑 시험체를 자체 제작하였다. 유도 가열 실험 시스템은 고주파 전원 장치, 워크 코일, 흡착탑 시편 및 DAQ로 구성되며(Fig. 1), 본 실험에서는 전원 공급 장치에서 설정된 고주파 교류 전류를 코일에 인가하여 흡착탑 금속 구조물에 와전류(Eddy current)를 유도하고, 이에 따른 저항성 줄열(Joule heat) 발생을 통해 시험체를 직접 가열하는 방식을 채택하였다. 전원 공급 장치는 고주파 인버터 방식을 적용하여 주파수와 출력을 독립적으로 제어할 수 있도록 설계되었으며, 본 연구에서는 30, 40, 57 kHz의 주파수 조건과 1.0, 2.5, 5.0 kW의 출력 범위에서 실험을 수행하였다. 또한, 본 연구는 전자기-열 연성 해석 모델의 기초 검증을 주목적으로 하므로, 복잡한 변수를 배제하기 위해 흡착탑 내부 유동이 없고 흡착제가 충진되지 않은 Empty vessel 조건에서 실험을 수행하였다. 목표 온도(250°C[14]) 도달 이후에는 IR 온도계 기반 표면 온도 피드백을 이용하여 PID 제어로 온도를 유지하였다. 또한 열전대는 국부 온도 이력을 정량 계측하고, 열화상 카메라(FLIR E60)는 표면 전체 온도 분포와 열적 거동을 시각화하여 공간적 온도 불균일성의 경향을 확인하는 참고 자료로 활용하였다.

2.1.2 흡착탑 시험체 및 코일 사양

흡착탑 시험체와 코일의 사양은 Table 1과 같다. 흡착탑은 SUS316 스테인리스 스틸 소재로 제작되었으며, 직경 60 mm, 높이 450 mm, 두께 5 mm의 원통형 구조를 갖는다. 유도 가열을 위한 워크 코일은 직경 8 mm의 동관을 사용하여 흡착탑 외벽을 감싸는 나선형 구조로 제작되었으며, 총 권선 수는 12회이다. 장시간 고출력 운전 시 코일 자체의 온도 상승으로 인한 임피던스 변화와 실험 재현성 저하를 방지하기 위해, 코일 내부에 냉각수를 순환시키는 수냉 방식을 적용하였다. 부식 방지를 위해 증류수를 사용하였으며, 유량 4 L/min, 입구 온도 25°C 조건을 유지하였다. 흡착탑은 코일 중심축에 수직 정렬하고 지그를 통해 15 mm의 공극을 일정하게 유지하였다.

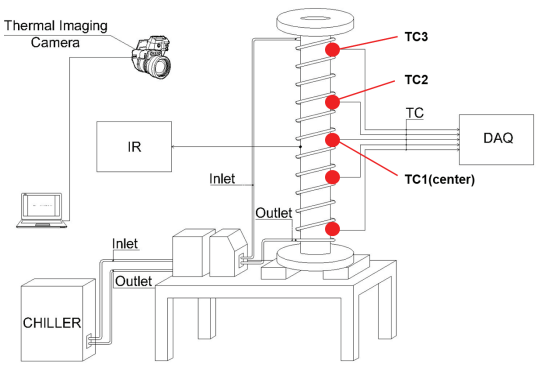

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental induction-heating test setup and instrumentation. Axial locations of thermocouples (TC1–TC3) attached on the outer surface of the adsorption tower along the induction coil section

2.1.3 실험 절차 및 조건

유도 가열 시 발생하는 흡착탑 표면의 축방향 온도 분포를 측정하기 위해, K-type 열전대를 코일이 위치한 구간을 따라 온도는 총 5개 지점에서 계측하였으며, 결과는 대표 3개 지점(TC1–TC3)을 제시하였다. 데이터는 1 s 간격으로 수집하고, 각 조건은 3회 반복하였다. 실험 결과의 분석 및 해석 모델 검증을 위한 지표로는 목표 온도 도달 시간과 승온 구간(0–250°C)으로 정의하였다.

2.2 수치해석 모델 및 방법

2.2.1 해석 프로세스 및 지배 방정식

Maxwell 주파수영역 해석으로 산출한 전자기 손

Table 1. Experimental conditions for the induction-heated adsorption tower

Parameter	Value
Material	Stainless Steel 316 (SUS316)
Vessel Dimensions	60 mm (Dia.)× 450 mm Thickness : 5 mm
Coil Material	Water-cooled Copper tube (Dia. 8 mm)
Turn Count / Air Gap	12 turns / 15 mm
Power / Frequency	1.0, 2.5, 5.0 kW 30, 40, 57 kHz
Target Temperature	250°C (with PID control logic)

실(체적 열원)을 Transient Thermal에 맵핑하는 단방향 연성 해석을 수행하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 흡착탑과 나선형 코일의 3차원 모델링 형상을 보여준다. 전자기장 해석에서 도체 내에 유도되는 와전류 밀도 J는 옴의 법칙에 의해 다음과 같이 정의된다[15].

$$J = \sigma \cdot E \quad (1)$$

여기서 σ는 전기전도도, E는 전기장이다. 이에 따라 단위 체적당 발생하는 줄열(Joule heat) q는 다음과 같이 계산된다.

$$q = \frac{1}{\sigma} |J|^2 \quad (2)$$

열해석에서는 다음의 과도 열전달 방정식을 지배방정식으로 사용하였다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \quad (3)$$

여기서 ρ, c_p, k는 각각 소재의 밀도, 비열, 열전도도이며, q는 Maxwell 해석으로부터 도출된 열원 항이다.

2.2.2 형상 모델링 및 격자 생성

해석 도메인은 실험 시편과 동일한 치수의 3차원 형상으로 모델링하였으며, 해석의 정확도 향상을 위해 코일 주변과 표면 효과(Skin effect)가 발생하는 흡착탑 표면 영역에 조밀한 격자를 생성하였다. 코일 주변 및 흡착탑 표면에 조밀 격자를 적용하고, 격자 의존성 테스트로 적정 격자를 선정하였다. 표피 효과 모사를 위해 SUS316 표면에 inflation layer를 적용하였다. 주파수 57 kHz에서의 이론적 표피 깊이인 1.81 mm를 기준으로, 에너지의 약 80% 이상이 집중되는 표면 근처의 계산 정밀도를 높이기 위해 1.2 mm 두께 내에 총 5개의 레이어를 배치하였다[9].

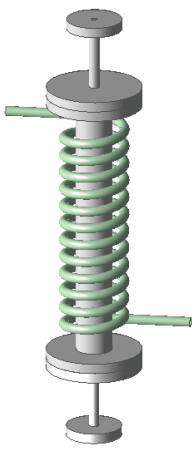

Fig. 2. 3D geometric model of the adsorption tower with a helical induction coil

2.2.3 경계 조건 및 물성치

전자기장 해석에서는 실험과 동일한 주파수(30, 40, 57 kHz)를 인가하였으며, 코일(Copper)과 흡착탑(SUS316)의 전자기적 물성(전기전도도, 투자율)을 적용하였다. 열해석에서는 SUS316의 열물성(밀도, 비열, 열전도도)을 Table 2와 같이 입력하였다.

흡착탑의 외부 표면에는 대기와의 자연 대류 조건을 적용하였으며, 이때 대류 열전달 계수 h는 자연대류의 일반적인 범위인 10 W/m^2·K를 적용하고, 주변 온도는 25°C로 설정하였다[16].

3. 결과 및 고찰

3.1 위치별 승온 거동 및 온도 균일도

본 장에서는 주파수(30, 40, 57 kHz) 및 입력 전력

Table 2. Numerical simulation parameters and constant material properties

Parameter	Value / Property
Ambient/Initial Temperature	25°C
Convection Coefficient	10 W/m^2·K
SUS316 Density	7,980 kg/m^3
SUS316 Specific Heat	500 J/kg·K
SUS316 Thermal Conductivity	13.6 W/m·K
Skin Depth	1.81 mm (at 57 kHz)
Mesh (Inflation Layers)	5 layers within 1.2 mm thickness

(1.0, 2.5, 5.0 kW) 조건에서 수행한 유도가열 실험 결과와 전자기–열 연성 해석 결과를 비교·분석하였다. 실험 결과의 정량 비교를 위하여 두 가지 지표를 정의하였다. 첫째, 열전대 TC1(Center) 지점의 온도가 목표 재생 온도 250°C에 도달하는 데 소요된 시간을 의미한다. 둘째, 최대 온도 편차(ΔT_{max})는 승온 시작 시점부터 250°C까지의 구간 동안, 위치 TC1–TC3에서 측정된 표면 온도의 순간 최대·최소 온도차의 최댓값으로 정의하여 균일도를 평가하였다. Fig. 3–5의 시간에 따른 온도 결과에서는 모든 주파수 조건에서 중앙 지점(TC1)보다 TC2에서 더 높은 온도가 반복적으로 관찰되었다. 이는 코일 배치(권선/단부 영향)에 의해 축방향 발열이 비균일해지면서 특정 위치의 국부 발열이 강화되었기 때문으로 해석되며, 관련 전자기 손실 분포는 3.2절에서 상세히 논의한다.

Fig. 3은 30 kHz 조건에서 온도 거동을 보여준다. 1.0 kW에서 5.0 kW로 증가함에 따라 t_{target}은 529 s에서 188 s, 89 s로 급격히 단축되어 가열 성능이 크게 향상되었다. 반면, ΔT_{max}는 각각 43.9°C, 47.3°C, 45.8°C로 전력 증가에 따라 유사한 수준을 유지하였다. 이는 30 kHz 대역의 상대적으로 깊은 표피 깊이(Skin depth)로 인해 유도 자기장이 코일 구간에 안정적으로 분포하고, 급속 가열 시에도 시험체 내부의 열전도가 열 확산을 충분히 보상했기 때문이다.

Fig. 4는 40 kHz 조건에서 전력 변화에 따른 위치별 온도 응답을 나타낸다. t_{target}는 479 s (1.0 kW), 174 s (2.5 kW), 88 s (5.0 kW)로 전력 증가에 따라 뚜렷이 감소하였다. 특히 ΔT_{max}는 49.0°C (1.0 kW)에서 5.0 kW 조건에서는 37.8°C로 크게 낮아졌다. 이는 40 kHz 주파수 대역과 5.0 kW 전력 조합에서 주파수에 따른 표피깊이/발열 분포 특성과 시험체의 열확산(열전도) 시간척도 간의 균형이 형성되어, 축방향 온도 불균일이 효과적으로 완화되었음을 시사한다[8,14]. 결과적으로 40 kHz 대역은 시간과 온도 균일도를 동시에 확보할 수 있는 유리한 운전 영역임을 알 수 있다.

Fig. 5는 57 kHz 고주파수 조건에서의 결과를 보여준다. 1.0 kW 저전력 조건에서는 ΔT_{max}가 23.9°C로 전체 조건 중 가장 낮은 값을 나타내어 매우 우수한 균일도를 보였다. 이는 단위 시간당 발생하는 줄열(Joule heat)이 적어 승온 속도가 완만해짐에 따라, 시험체 내부 열전도에 의한 축방향 열 확산이 평준화될 수 있는 충분한 시간이 확보되었기 때문이다[9,14]. 반면, 57 kHz에서 전력을 2.5 kW로 증가시키면 t_{target}는 189 s로 크게 단축되나 ΔT_{max}가 29.3°C로 증가하였다. 더 나아가 5.0 kW 조건에서는 t_{target}가 102 s로 급격히 단축되는 대신 ΔT_{max}가 46.1°C까지 급증하여,

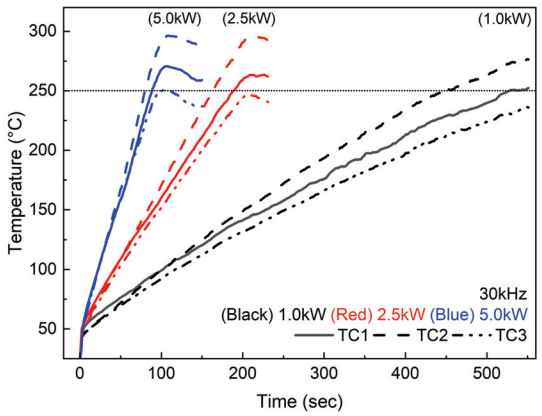

Fig. 3. Temperature histories measured at the tower surface for different power levels at 30 kHz. Solid, dashed, and dash–dot lines denote TC1, TC2, and TC3, respectively

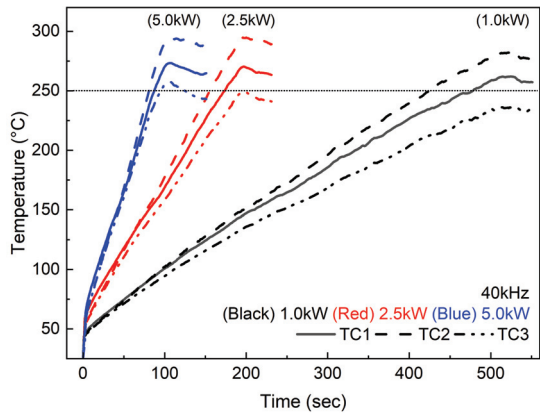

Fig. 4. Temperature histories measured at the tower surface for different power levels at 40 kHz. Solid, dashed, and dash–dot lines denote TC1, TC2, and TC3, respectively

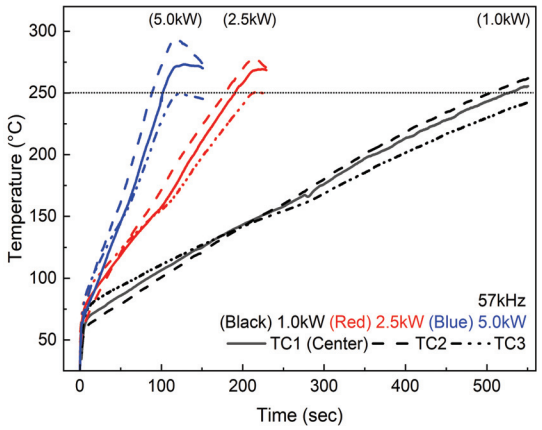

Fig. 5. Temperature histories measured at the tower surface for different power levels at 57 kHz. Solid, dashed, and dash–dot lines denote TC1, TC2, and TC3, respectively

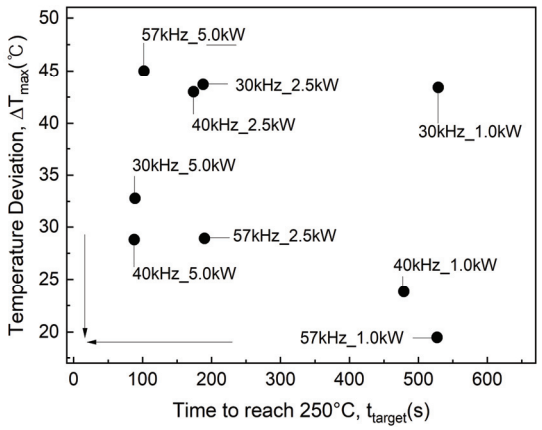

Fig. 6. Correlation map illustrating the trade-off between heating time (t_{target}) and temperature uniformity (ΔT_{max})

승온 구간에서 매우 큰 열구배가 발생하는 불안정성이 관찰되었다. 이는 주파수가 증가할수록 표피 효과(Skin effect)에 의해 와전류가 소재의 침투 깊이 내에 집중되는데, 이때 고전력을 인가할 경우 코일 인접부의 급격한 국부 발열량이 소재의 축방향 열전도 능력을 상회하여 열구배가 심화된 것이다. 특히 고주파수 대역에서는 표피 깊이가 얇아짐에 따라 에너지 집중도가 높아지므로, 정밀한 전력 제어가 동반되지 않을 경우 열적 불안정성이 증대될 수 있다[9,12]. 또한 고주파수 대역일수록 코일 단부 효과(End effect)에 의한 자기장 세기 불균일이 발생하게 되었고, 이러한 불균일이 발열 분포에 민감하게 영향을 미쳐 위치별 온도 불균일이 확대된 것으로 해석된다. 따라서 57 kHz 대역에서 고전력 급속 가열을 적용할 경우, 코일 사이의 간격 조정을 통한 불균일 해소 또는 승온 구간에서 전력을 단계적으로 조절하는 다단 가열 프로파일 등의 온도 제어 전략이 필요하다.

Fig. 6은 t_{target}와 ΔT_{max}의 상관관계를 나타낸 맵으로, 좌하단(짧은 도달시간 + 낮은 편차)에 위치할수록 생산성과 균일도를 동시에 만족하는 이상적인 운전 영역으로 해석할 수 있다. 전반적으로 전력 증가에 따라 t_{target}는 큰 폭으로 감소하여 생산성이 향상되었으나, 온도 균일도(ΔT_{max})는 주파수에 따라 상이한 경향을 나타냈다. 저주파(30–40 kHz)에서는 전력 증가에도 ΔT_{max}가 유사하거나 감소하는 경향을 보인 반면, 57 kHz에서는 저전력에서 우수한 균일도를 보이다가 고전력에서 급격히 악화되었다. 본 연구 조건에서는 40 kHz, 5.0 kW와 57 kHz, 2.5 kW 조건이 상대적으로 빠른 도달 시간과 허용 가능한 온도차를 가지는 조건임을 알 수 있다. 실제 수전해 BOP 관점에서 흡착탑 재생은 목표 온도(250°C) 5분 이내 도달과 동시에, 과도한 ΔT_{max}로 인한 국부 과열 및 열손실 증가를 억제해야 한다. 5.0 kW와 같은 고피크 운전은 인버터 용량 및 전원 설비 요구를 증가시키기 때문에 Fig. 6의 결과를 기준으로 57 kHz, 2.5 kW 조건은 250°C 도달 시간을 5분 이내로 만족하면서도 균일도가 허용 범위 내에서 유지되는 균형점으로 해석된다. 따라서 본 연구에서는 생산성(도달시간)과 열적 안정성(균일도), 그리고 피크전력/제어 용이성까지 고려한 대표 조건으로 57 kHz, 2.5 kW를 선정하였다.

3.2 수치해석 결과: 발열 분포 및 온도 응답 특성

3.2.1 전자기 해석 결과(와전류/줄열 분포)

전자기 해석에서는 코일 여기 조건에 의해 흡착탑 금속 외벽에 유도되는 와전류 밀도 J와 그에 대응하는 Ohmic loss를 해석하였고, 57 kHz, 2.5 kW 조건

의 해석결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7(a)–(c)는 금속 외벽에 유도되는 와전류 밀도 크기 J의 분포를 전체 및 단면(A–A)에서 나타낸 결과이며, 계산 결과 최대 1.8×10^7 A/m^{2}의 전류 밀도가 표면 근방에 집중되고 코일 권선 위치를 따라 J가 주기적으로 증감됨을 확인하였다. Fig. 7(d)에서 Ohmic loss의 최대값은 1.2×10^8 W/m^{3}이고, J가 집중되는 구간에서 손실밀도가 함께 증가하며 권선 위치를 따라 띠(band) 형태의 고손실 영역이 반복적으로 형성됨을 보여준다. 해당 손실 분포는 이후 열해석에서의 열유속/온도 분포와 연계하여 해석한다.

3.2.2 열해석 결과

전자기 해석에서 도출된 Ohmic loss 분포를 열해석의 열원으로 연계하여 과도(transient) 열해석을 수행하였다(단방향 연성). Fig. 8(a)는 191 s에서의 전체 축방향 온도 분포이고, 온도 분포는 유효 가열 구간을 중심으로 상승하며, Fig. 7(d)에서 손실밀도가 상대적으로 큰 구간과 대응하여 국부 고온 영역이 형성될 수 있음을 보여준다. Fig. 8(b)와 (c)는 동일 시점의 온도 컨투어를 통해 A–A(TC1 대응) 및 B–B(TC3 대응) 단면 온도장을 보여준다. A–A(TC1) 단면은 약 241–250°C 범위로 목표 온도 근방에 도달한 반면, B–B(TC3) 단면은 약 182–187°C 범위를 보여 축방향 위치에 따른 온도차가 크게 나타났다. 이러한 축방향 온도 비균일은 실험에서 정의한 ΔT_{max} 변화 경향을 해석적으로 뒷받침한다. 전자기 해석에서 확인된 J 및 Ohmic loss의 공간적 비균일성이 열해석에서의 열유속 분포와 온도장에 반영되며, 고주파 조건에서는 표면 집중 및 권선/단부 영향으로 축방향 열구배가 증가할 수 있다.

Total heat flux는 온도구배에 의해 유도되는 열유속의 크기를 나타내므로, 온도 분포뿐 아니라 열전달의 지배 경로와 국부 열전달 강도를 파악하는 데 유용하다. Fig. 8(d)의 열유속 분포 분석 결과, 가열 코일 구간의 양 끝단(End effect 발생 지점) 인근에서 최대 53,055 W/m^{2}의 높은 열유속 강도가 관찰되었다. 이는 Fig. 7(d)에서 확인된 Ohmic loss의 국부 피크 지점 자체보다는, 에너지가 집중된 가열 영역과 비가열 영역(상·하단 구조물) 사이의 급격한 온도 구배에 의해 축방향 열전달이 강화된 결과로 해석된다. 이러한 분포는 내부에서 발생한 유도 줄열이 단순 표면 방산에 그치지 않고, 인접한 미가열 구간으로 빠르게 전도되어 확산됨을 시각적으로 뒷받침한다.

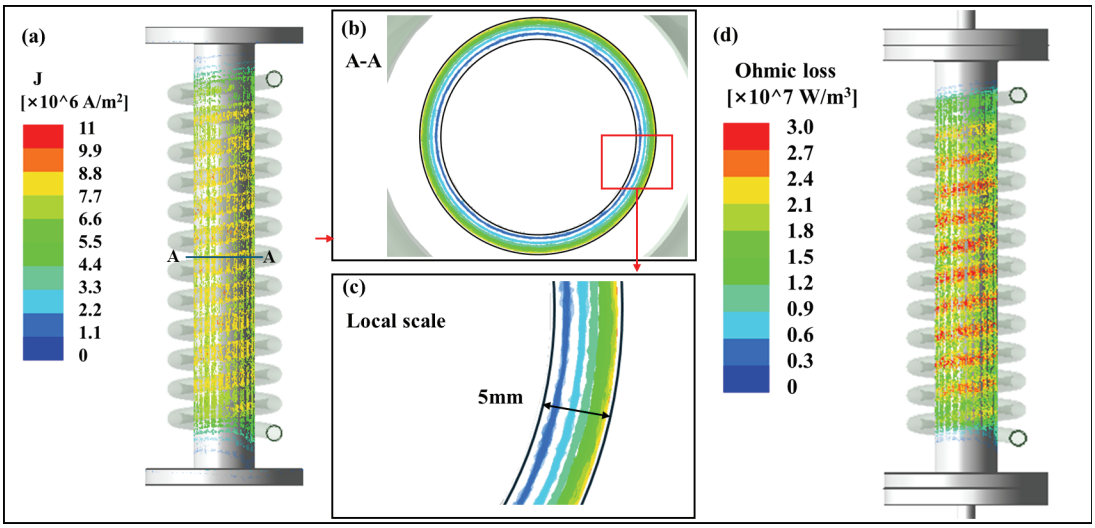

Fig. 7. Eddy current density magnitude (|J|) distribution at the representative condition (57 kHz, 2.5 kW): (a) overall view of the adsorption tower, (b) cross-sectional view along A–A, and (c) magnified view of the hotspot region near the surface. (a), (b) and (c) share the same color scale, and (d) ohmic loss density contour showing Joule-heating generation tendency along the coil turns

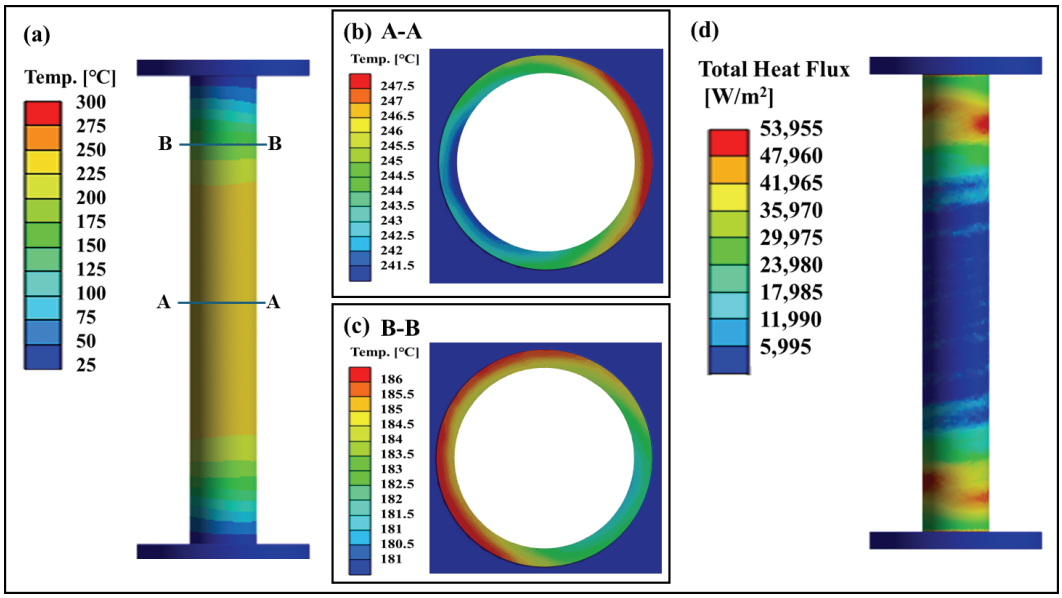

Fig. 8. Simulated temperature contours at 57 kHz and 2.5 kW at t = 191 s (snapshot): (a) axial temperature field of the tower, and cross-sectional temperature distributions at (b) A–A (TC1) and (c) B–B (TC3) planes. (d) total heat-flux distribution on the tower surface at the same time (t = 191 s)

3.3 실험-해석 비교 및 정량 검증

본 절에서는 유도가열 실험에서 계측된 온도 이력(TC1–TC3)과 수치해석 결과를 비교하여, 해석 모델의 재현성과 적용 한계를 정량적으로 검증하였다. 해석은 전자기 해석에서 산출된 Ohmic loss 분포를 열해석의 열원으로 연계하는 단방향 방식으로 수행하였으며, 열해석 결과로 온도장 분포를 도출하였다. 비교는 열전대 부착 위치에 대응되는 해석 표면 좌표에서 온도를 추출하여 동일 시간축에서 중첩하는 방식으로 수행하였고, 정량 지표로는 TC1(Center)의 목표 온도 도달 시간과 승온 구간에서의 위치 간 최대 온도 편차를 사용하였다. 조건별 비교 결과는 Table 3에 정리하였으며, Fig. 9는 57 kHz, 2.5 kW조건의 TC1와 TC3 위치에서의 시간에 따른 온도변화를 나타내었다. 해석결과는 실험에서 관찰되는 승온 기울기(온도 상승 속도)와 목표 온도 도달 시점의 경향을 전반적으로 재현하였지만 초기 온도 상승 구간에서 차이를 보임을 알 수 있다. 또한 시간에 따라 온도 차이가 커지는 경향도 유사하였지만 해석결과에서 실험보다 그 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 온도 차이가 시간에 따라 커지는 경향은 전자기 해석에서 확인되는 Ohmic loss의 축방향 비균일성(Fig. 7(d))이 열해석에서의 열이동 강도로 반영되고, 최종적으로 온도 분포(Fig. 8)에 나타나는 축방향 온도구배 및 단면별 온도 차이로 연결되기 때문이다. 특히 57 kHz, 1.0 kW 조건에서는 승온 시간이 길어 축방향 열전도에 의한 열 확산과 외부 열손실(자연대류/복사), 상·하단 구조물을 통한 축방향 열전달의 영향이 누적되면서 실험에서는 온도장이 상대적으로 완화될 수 있다. 반면 본 해석에서는 자연대류 계수의 대표값 적용, 코일–시험체 간극/정렬 공차 미반영, 물성의 온도의존성 단순화 등의 이상화로 인해 전자기 손실의 공간적 비균일성이 상대적으로 크게 반영되어 ΔT_{max}가 과대예측될 수 있다. Fig. 7–8에서 나타나는 열발생/열유속의 공간적 비균일성이 Fig. 8 온도장 비균일성으로 귀결되며, 실험에서 정의한 ΔT_{max}의증가 또는 감소 경향을 물리적으로 설명할 수 있다. 또한 Fig. 8(b)와 (c)의 단면 결과로 TC 위치 주변의 온도 수준과 공간적 균일도를 직관적으로 비

Table 3. Quantitative comparison of the time required to reach the target temperature, $t_{target,}$ and the maximum temperature non-uniformity, $\triangle T_{max,}$ under different operating conditions

Frequency		30 kHz			40 kHz			57 kHz		
Power		1.0 kW	2.5 kW	5.0 kW	1.0 kW	2.5 kW	5.0 kW	1.0 kW	2.5 kW	5.0 kW
t_{target}(s)	Exp.	529	188	89	479	174	88	527	189	102
	Sim.	508	179	91	519	181	90	548	191	96
T_{max} (°C)	Exp.	43.9	47.3	45.8	49.0	46.6	37.8	23.9	29.3	46.1
	Sim.	71.6	58.4	50.1	73.4	56.7	43.2	73.7	58.7	49

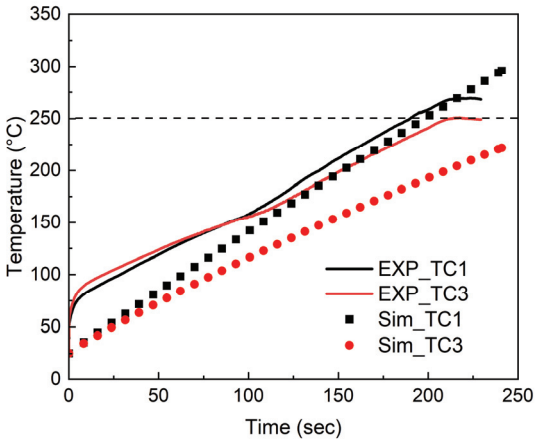

Fig. 9. Comparison of transient temperature profiles between experimental measurements and numerical simulations at 57 kHz and 2.5 kW

교할 수 있어, 실험에서 관찰된 중앙부와 단부의 승온 차이 또는 특정 위치에서의 상대적 과열 가능성을 해석적으로 뒷받침한다. 또한 시간 경과에 따라 열전도에 의해 온도장이 완화되는 경향이 나타나며, 이 과정에서 외부 열손실(자연대류/복사)과 구조물(플랜지·지지부 등)을 통한 축방향 열전달이 온도 분포 형성에 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 3에서 해석 결과는 전력 증가에 따라 목표 온도 도달 시간이 단축되는 경향을 실험과 일관되게 재현하였다. 반면 ΔT_{max}는 전반적으로 실험값보다 크게 예측되는 경향을 보였으며, 주파수 변화에 따른 균일도 거동 및 고주파·고전력 조건에서의 ΔT_{max} 변화는 실험과 동일한 경향으로 재현되지 않았다. 이러한 불일치는 본 연구의 단방향 연성 모델이 전자기 손실(Ohmic loss)의 공간 분포를 열해석의 체적 열원으로 이상화하여 적용하는 과정에서, 실제 실험계에서 존재하는 열완화 메커니즘(외부 자연대류/복사의 공간적 변동, 상·하단 구조물 및 결합부를 통한 축방향 열전달, 코일 냉각 및 주변 공기 유동에 의한 국부 열손실)이 충분히 반영되지 못했기 때문으로 판단된다. 특히 주파수에 따라 표피 효과 및 권선/단부 효과로 결정되는 열원 분포의 비균일성이 달라지는데, 해석에서는 코일–시험체 간극/정렬 공차 및 전자기 물성의 온도 의존성 등을 단순화하여 주파수 변화에 따른 비균일도 변화가 실험과 다르게 나타날 수 있다.

실험–해석 간 잔차(오차)의 주요 원인은 다음과 같이 정리될 수 있다. 첫째, 자연대류(및 복사) 경계조건은 설치 환경 및 표면 상태(방사율 등)에 따라 변동되며, 이를 대표값으로 단순화할 경우 외부 열손실 분포의 차이로 인해 ΔT_{max}가 과대평가될 수 있다. 둘째, 코일–시험체 간극 및 동축 정렬 공차는 전자기 결합을 변화시켜 Ohmic loss 분포의 비균일성을 증폭시킬 수 있다. 셋째, 전기전도도·자기적 특성·열전도도 등 재료 물성의 온도 의존성을 단순화할 경우 국부 과열 강도 및 분포 예측에 차이가 발생할 수 있다. 넷째, 열전대 부착 상태(접촉 열저항, 위치 편차)와 표면 조건은 계측 온도에 불확실성을 유발한다. 마지막으로 실험 입력 전력 대비 실제 흡착탑에 전달되는 유효 전력(코일/인버터 손실 포함)이 조건별로 달라질 수 있어 도달 시간 및 승온 기울기에서 차이가 발생할 수 있다. 향후에는 경계조건 보정(대류/복사 및 방사율 포함)과 유효 전력 추정의 체계화, 코일 정렬·간극 공차의 파라메트릭 반영, 온도의존 물성 적용을 통해 ΔT_{max}의 정량 오차를 축소하고, 주파수 변화에 따른 균일도 거동 및 고주파 조건에서의 국부 과열

예측 신뢰성을 추가로 향상시킬 예정이다.

Empty vessel 조건은 흡착제 충진 및 유동/흡·탈착열이 동반되는 실제 재생 공정의 모든 현상을 직접 재현하기 위한 것이 아니라, 유도가열에 의해 금속 흡착탑 외벽에서 생성되는 Ohmic loss와 이에 따른 과도 온도 응답을 정량적으로 규명하기 위한 기초 검증 단계로 설정하였다. 실제 재생 공정에서 흡착제가 충진되면 유효 열용량 증가, 충진층 내 유효 열전도도/접촉 열저항, 유동에 의한 대류 및 흡·탈착열이 추가되어 t_{target} 및 ΔT_{max}가 달라질 수 있다. 그럼에도 본 연구의 Maxwell–Thermal 연성 해석 결과는, 향후 흡착제 충진층을 다공성 매체(porous media)로 모델링하는 packed-bed 재생 해석에서 벽면 열원/열유속 경계조건(또는 벽면 온도 조건)으로 직접 활용될 수 있다. 또한 주파수–전력 조합별 t_{target} 및 ΔT_{max} 결과는 흡착제 열화 위험을 억제하면서 목표 재생온도를 만족시키기 위한 운전 조건 선별의 1차 설계 기준(가열 속도–과열 억제의 동시 고려)으로 적용 가능하다. 마지막으로 권선 피치 및 단부 효과에 의해 형성되는 축방향 비균일 발열/온도 분포는 실제 충진 시스템에서도 hotspot 후보 구간을 사전에 특정하고, 코일 설계 및 다구간 가열 제어 전략 수립에 대한 설계 지침을 제공한다.

4. 결 론

본 연구에서는 유도가열 기반 흡착탑 재생 기술을 대상으로, 주파수(30–57 kHz) 및 입력 전력(1.0–5.0 kW) 조건에서의 승온 성능과 온도 균일도를 실험과 수치해석으로 평가하였다. 실험 결과, 입력 전력 증가에 따라 목표 온도(250°C) 도달 시간이 유의하게 단축되었으며, 온도 균일도는 주파수에 따라 상이한 경향을 보였다. 특히 중간 주파수 영역에서 승온 속도와 균일도의 균형이 상대적으로 양호한 조건이 도출되었고, 고주파·고전력 조건에서는 표피 효과 및 권선/단부 효과에 의해 위치별 온도 편차가 증가할 수 있음을 확인하였다. 시간-균일도 트레이드오프를 함께 고려할 때, 57 kHz, 2.5 kW 조건은 목표 온도 도달 시간과 온도 균일도 측면에서 균형이 우수한 대표 운전 조건으로 판단되었다. 해당 조건에서 t_{target}은 189 s로 250°C 도달 시간을 5분 이내로 만족하였고, ΔT_{max}는 29.3°C 수준으로 평가되었다. 본 연구에서 '250°C 5분 이내 도달' 기준은 수전해 BOP의 흡착탑 교번 운전에서 연속 수소 공급을 유지하기 위해 재생 지연에 따른 운전 손실(가동률 저하 및 열손실 증가)을 최소화하기 위한 공학적 목표로 설정하였다. Fig. 6 및 Table 3에서 40 kHz, 5.0 kW(빠른 도달 시간)와 57 kHz, 2.5 kW가 모두 유망 후보로 도출되었으나, 5.0 kW와 같은 고피크 운전은 인버터 용량 및 전원 설비 요구와 피크 전력 부담을 증가시킬 수 있으므로, 상대적으로 낮은 피크 전력에서 목표 시간(5분 이내)과 허용 가능한 균일도를 동시에 만족하는 57 kHz, 2.5 kW를 대표 운전 조건으로 선정하였다.

수치해석에서는 전자기-열 연성 해석 결과, 와전류 및 Ohmic loss가 탑 표면 및 단부 인근에 집중되며 이에 따라 열원 분포가 비균일해지고, 열유속 또한 단부에서 상대적으로 크게 나타나는 경향을 확인하였다. 실험-해석 비교에서 초기 승온 구간의 편차와 온도 편차의 과대 예측 경향이 일부 확인되었으며, 경계조건, 코일 정렬/간극, 계측 불확실성 및 유효 전달 전력 차이 등으로 오차가 발생함을 알 수 있었다. 향후에는 경계조건 보정과 공차/물성 반영을 포함한 모델 고도화를 통해 정량 예측 정확도를 향상시키고, 본 연구에서 확보된 전자기-열 연성 해석 모델은 향후 흡착제가 충진된 복합 다공성 매체(Porous media) 내의 열-물질 전달 해석을 위한 핵심 기초 모델로 활용될 것이다.

후 기

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 부산시의 재원으로 부산RISE혁신원의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-02-004-13110001-001). 이 성과물은 울산 기술강소기업 유치지원사업-이동형 전기추진 플랫폼용

통합 수소정제시스템 개발과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구 진흥재단 - 2025년 창원 강소특구 이노테크 기업 육성의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02634735).

References

1. International Organization for Standardization (ISO), "Hydrogen fuel quality — product specification (ISO 14687: 2025)", ISO Standard.
2. SAE International, "Hydrogen fuel quality for fuel cell vehicles (SAE J2719)", SAE Standard.
3. T. Bacquart, A. Murugan, M. Carré, B. Gozlan, F. Auprêtre, F. Haloua, and T. A. Aarhaug, "Probability of occurrence of ISO 14687-2 contaminants in hydrogen: principles and examples from steam methane reforming and electrolysis (water and chlor-alkali) production processes model", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 26, 2018, pp. 11872-11883, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.084.
4. T. Bacquart, K. Arrhenius, S. Persijn, A. Rojo, F. Auprêtre, B. Gozlan, N. Moore, A. Morris, A. Fischer, A. Murugan, S. Bartlett, G. Doucet, F. Laridant, E. Gernot, T. E. Fernández, C. Gómez, M. Carré, G. De Reals, and F. Haloua, "Hydrogen fuel quality from two main production processes: steam methane reforming and proton exchange membrane water electrolysis", Journal of Power Sources, Vol. 444, 2019, pp. 227170, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227170.
5. Y. Ligen, H. Vrubel, and H. Girault, "Energy efficient hydrogen drying and purification for fuel cell applications", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, 2020, pp. 10639-10647, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.035.
6. Y. M. Seo, T. H. Koo, H. W. Noh, D. W. Ha, and R. K. Ko, "Study on development and application of PEM water electrolysis simulation model using simscape™", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 6, 2024, pp. 634-642, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.6.634.
7. S. Kwon, B. Jin, C. Lee, S. Eom, and G. Choi, "Ventilation performance study on hydrogen leakage characteristics of container packaged water electrolysis production system", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 3, 2024, pp. 324-335, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.3.324.
8. S. Kwon, B. Jin, and G. Choi, "Development of an application program code for dryer tower of heat transfer analysis in hydrogen purification system", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 4, 2023, pp. 334-341, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.4.334.
9. V. Rudnev, D. Loveless, and R. L. Cook, "Handbook of induction heating (2nd ed.)", CRC Press, 2017, doi: https://doi.org/10.1201/9781315117485.
10. D. Kleschew, U. Tuttlies, and U. Nieken, "Experimental analysis of inductive heating of catalytic beds", Chemie Ingenieur Technik, Vol. 96, No. 6, 2024, pp. 769-773, doi: https://doi.org/10.1002/cite.202300168.
11. S. Belik, O. Khater, and S. Zunft, "Induction heating of a fluidized pebble bed: numerical and experimental analysis", Applied Sciences, Vol. 13, No. 4, 2023, pp. 2311, doi: https://doi.org/10.3390/app13042311.
12. M. Gholami, B. Verougstraete, R. J. Vanoudenhoven, G. V. Baron, T. Van Assche, and J. Denayer, "Induction heating as an alternative electrified heating method for carbon capture process", Chemical Engineering Journal, Vol. 431, No. 4, 2022, pp. 133380, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133380.
13. Y. Muñoz-Maldonado, E. Correa-Quintana, and A. Ospino-Castro, "Electrification of industrial processes as an alternative to replace conventional thermal power sources", Energies, Vol. 16, No. 19, 2023, pp. 6894, doi: https://doi.org/10.3390/en16196894.
14. J. Park, D. Yu, and D. Cho, "Study on the improvement of efficiency in dehydration process of LNG liquefaction plant using molecular sieve", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 105-113, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.105.
15. B. Yang, A. Deng, Y. Li, and E. Wang, "Exploration of the relationship between the electromagnetic field and the hydrodynamic phenomenon in a channel type induction heating tundish using a validated model", ISIJ International, Vol. 62, No. 4, 2022, pp. 677-688, doi: https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-018.
16. T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, and A. S. Lavine, "Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.)", Wiley, 2011.