

Fundamental characteristic analysis on 6 T-class high-temperature superconducting no-insulation magnet using turn-distributed equivalent circuit model

Q. Liu^a, J. Choi^a, K. Sim^b, and S. Kim^{*, a}

^a Changwon National University, Changwon, Korea

^b Supergenics Co., Ltd., Changwon, Korea

(Received 29 November 2021; revised or reviewed 28 December 2021; accepted 29 December 2021)

Abstract

In order to obtain ultra-high resolution MRI images, research and development of 11 T or higher superconducting magnets have been actively conducted in the world, recently. The high-temperature superconductor (HTS), first discovered in 1986, was very limited in industrial application until mid-2010, despite its high critical current characteristics in the high magnetic field compared to the low-temperature superconductor. This is because HTS magnets were unable to operate stably due to the thermal damage when a quench occurred. With the introduction of no-insulation (NI) HTS magnet winding technology that does not burn electrically, it could be expected that the HTS magnets are dramatically reduced in weight, volume, and cost.

In this paper, a 6 T-class NI HTS magnet for basic characteristic analysis was designed, and a distributed equivalent circuit model of the NI coils was configured to analyze the charging current characteristics caused by excitation current, and the charge delay phenomenon and loss were predicted through the development of a simulation model. Additionally, the critical current of the NI HTS magnets was estimated, considering the magnetic field, its angle and temperature with a given current. The loss due to charging delay characteristics was analyzed and the result was shown. It is meaningful to obtain detailed operation technology to secure a stable operation protocol for a 6T NI HTS magnet which is actually manufactured.

Keywords: critical current estimation, high temperature superconductor, high magnetic field, MRI, no-insulation

1. 서 론

자기공명영상장치(MRI)는 고자기장을 발생하는 초전도 자석, 자기공명 현상을 구현하는 Gradient/RF 시스템 및 고해상도 이미징 기술이 유기적으로 결합된 통합솔루션이다. 최근 전세계적으로 초고해상도의 MRI 영상을 얻기 위해 11 T 이상의 초전도 자석 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 MRI 시장은 저온 초전도체를 이용한 7 T 이하의 MRI가 주를 이루고 있으며, GE, SIEMENS, Philips 등 글로벌 기업 3사가 전세계적으로 대부분 공급하고 있다 [1].

1986년 처음 발견된 고온 초전도체는 저온 초전도체 대비 월등한 전자기적 성능과 낮은 운전 비용으로 초고자기장 MRI를 포함하여 광범위한 파급효과를 기대하였다. 그러나 고자기장에서 높은 임계전류 특성에도 불구하고, 운전 중 초전도 특성이 사라지는 켄치 발생 시, 초전도 코일이 과열되어 소손되는 현상으로 보호가 불가능하였으며, 2010 년 중반까지도 산업적 응용이 매우 제한되었다 [2-4]. 최근 전기적으로 타지 않는 무절연(No-insulation) 고온초전도 자석 기술이 도입되었고, 이를 적용한 고온초전도 자석은 설계단계에서 무게, 부피 및 비용에 있어 획기적인 절감을 얻을 수 있었다[5-9].

본 논문에서는 6 T 급 초고자기장 MRI 개발을 위해 유사한 크기와 에너지의 6 T 급 연구용 무절연 고온초전도 자석을 설계하였고, 임계전류 예측과 충전지연특성에 따른 손실을 분석하여 그 결과를 나타내었다. 이에, 고온초전도 초고자기장 MRI의 전기적/기계적 안정성 확보를 위하여

무절연 코일 권선 방법을 채택하였다. 무절연 코일의 등가회로 모델을 구성하여, 여자전류에 의한 충전전류특성을 분석하였으며, 충전 지연 현상 및 이에 따른 손실을 예측하였다. 이를 통해 6 T급 고온초전도 MRI 자석의 운전특성을 해석적으로 분석하여 안정적인 운전프로토콜을 확보하고자 한다.

향후 실제 제작될 6 T급 고온초전도 무절연 코일의 열적 안정성 확보를 위한 상세운전기술을 확보하는데 큰 도움이 될 것으로 기대한다.

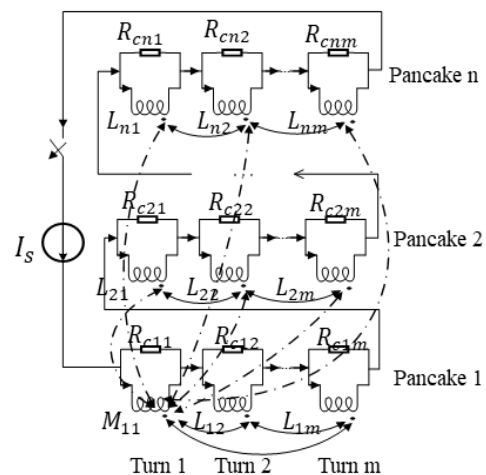


Fig. 1. Turn-distributed equivalent circuit of a NI HTS magnet

* Corresponding author: seokho@changwon.ac.kr

2. 무절연 초전도 자석의 등가회로 모델링

2.1. 등가회로 모델 구성

초전도 자석의 운전상태를 분석하기 위해서 NI 초전도 자석의 등가회로 모델링이 구성되어야 한다 [10-11]. 매 턴은 전류가 흐르는 도체로 모델링 되고, 초전도 저항은 R_{sc} 이고, Matrix 저항은 R_{mt} 그리고, 병렬특성저항은 R_{ct} 로 나타내었다. 총 자석은 매 턴 간 직렬로 연결되어 그림 1과 같이 상세히 나타내었다.

2.2. 등가회로 지배방정식 도출

초전도 자석을 여자 하기 위해서, 운전전류는 초전도 코일로 일정한 *Ramping rate*으로 입력된다. 초전도 저항 R_{sc} 는 거의 '0' 과 같다. 이에 등가회로는 턴 간 인덕턴스와 접촉저항의 병렬회로로 더 간단히 구성될 수 있고 식 (1)과 (2) 같이 지배 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{11}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{di_{1n}}{dt} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1n,nm} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{nm,n1} & \cdots & M_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{c11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & R_{cnm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{11} \\ \vdots \\ i_{1n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1n,nm} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{nm,n1} & \cdots & M_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{c11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & R_{cnm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ \vdots \\ I_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$I_s = \begin{cases} k_{rate} * t, & 0 \leq t \leq \frac{I_{steady}}{k_{rate}} \\ I_{steady}, & \frac{I_{steady}}{k_{rate}} < t \leq t_{final} \end{cases} \quad (2)$$

M_{11}, M_{nn} : 자기인덕턴스

$M_{(1n,nm)}$: Single pancake (SPC) 1 번의 첫번째 턴과 SPC n 번의 m 번째 턴 사이 상호인덕턴스

R_{c11} : SPC 1 번의 첫번째 턴의 접촉저항

I_s : 입력전류

k_{rate} : Ramping rate

I_{steady} : 정상상태 운전전류

운전전류는 NI 코일의 방위각 방향과 방사상 방향으로 흐른다. 전체 접촉저항은 여자전류의 충전 지연에 영향을 주므로, 중요한 요소이다. 전체 접촉저항은 식 (3)과 같이 나타내어진다. 접촉저항 R_c 로 나타내고, R_{ct} 는 특성저항 또는 접촉 비저항으로 나타낸다. r_i 는 턴의 반경이고, 도체의 폭을 w_d 로 나타낸다. 매 턴의 접촉저항은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$R_c = \sum_{i=1}^{N_t} R_i = \sum_{i=1}^{N_t} \frac{R_{ct}}{2\pi r_i w_d} \quad (3)$$

$$R_i = \frac{R_{ct}}{2\pi r_i w_d} \quad (4)$$

여기서, 턴 반경 r_i 는 SPC 코일의 외형치수에서 쉽게 계산될 수 있고 매 턴은 아주 가는 솔레노이드 코일로 묘사될 수 있고, 전류가 턴을 따라 흐를 때, 유도된 자속은 서로 쇄교되어 진다. 자기 쇄교 자속과 상호 쇄교 자속은 식 (5) ~ (8)로 나타내어진다..

$$L = \frac{\lambda_{11}}{I_{11}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{11} &= \frac{1}{A_t} \iint \phi_B d\rho dz \\ &= \frac{1}{(a_{2,11}-a_{1,11})(b_{2,11}-b_{1,11})} \int_{\rho=a_1}^{\rho=a_2} \int_{z=b_1}^{z=b_2} \phi_B d\rho dz \end{aligned} \quad (6)$$

$$M_{1n} = \frac{\lambda_{1n}}{I_{11}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{1n} &= \frac{1}{A_t} \iint \phi_B d\rho dz \\ &= \frac{1}{(a_{2,1n}-a_{1,1n})(b_{2,1n}-b_{1,1n})} \int_{\rho=a_{1,1n}}^{\rho=a_{2,1n}} \int_{z=b_{1,1n}}^{z=b_{2,1n}} \phi_B d\rho dz \end{aligned} \quad (8)$$

λ : 자기 쇄교 자속

A_t : 턴 단면적

ϕ_B : 자기전류에 의한 자속

$a_{1,11}$: SPC1의 첫번째 턴의 내반경

$a_{2,11}$: SPC1의 첫번째 턴의 외반경

$b_{1,11}$: SPC1의 첫번째 턴의 초기 높이

$b_{2,11}$: SPC1의 첫번째 턴의 나중 높이

λ_{1n} : 첫번째 턴 전류에 의한 n 번째 턴과 쇄교된 자속

M_{1n} : 첫번째 턴과 n 번째 턴 사이의 상호인덕턴스

3. 6 T급 고온초전도 자석 설계

3.1. 6 T급 NI HTS 자석 설계사양

6 T급 무절연 고온초전도 자석 설계 요구 사양을 표1과 같이 나타내었다. 초전도 선재의 두께는 4 mm이고, 두께는 0.1 mm SPC 간 스페이서 두께는 0.2 mm DPC 간 두께는 1 mm로 제한되어 있다. 설계에 사용한 초전도 선재의 자기장 및 온도에 따른 임계 전류 특성은 국내 초전도 제조회사인 Superpower에서 제조된 초전도 선재 특성 데이터를 기준이 적용되었다 [12].

초전도 자석의 중심 자기장은 6 T 이상이 되도록 설계되어야 하며, 보어 크기는 220 mm 이상이어야 한다. 초전도 자석의 운전 온도는 20 K 기준으로 운전 전류가 설계되었다.

3.2. 6 T급 고온초전도 자석 FEM 해석모델 개발

6 T급 고온초전도 자석 FEM 해석 모델 개발을 위해 각 SPC 코일의 매 턴에서 자기장 세기, 자기장 입사각, 운전 온도 3가지 요소를 고려한 선재의 임계 전류 대비 운전 전류의 비를 안전 계수로 정의 하였고, 안전 계수를 0.8로 설정하여, 그림 2와 같이 최적화 프로세스를 수행하였다. 그림 3에 나타난 최적화 프로세스 수행결과를 통해, SPC 당 턴 수는 152턴, 운전 전류는 272.19 A, 고온초전도 자석에서 최소 임계 전류를 가지는 턴에서의 임계 전류는 342.2 A로 설정하였다. 총 32개의 SPC로 구성되었고, 자석 총 턴 수는 4,864턴으로 설계 사양을 최종적으로 도출하였다.

TABLE I
DESIGN PARAMETERS OF 6 T CLASS NI HTS MAGNET.

Parameters	values
Width of HTS tapes	4 mm
Thickness of HTS tapes	0.1 mm
Thickness of the spacer between single pancakes	0.2 mm
Thickness of the spacer between double pancakes	1 mm
Inner diameter of the magnet	220 mm
Operating temperature	20 K
Target magnetic field at the center of the magnet bore	6 T

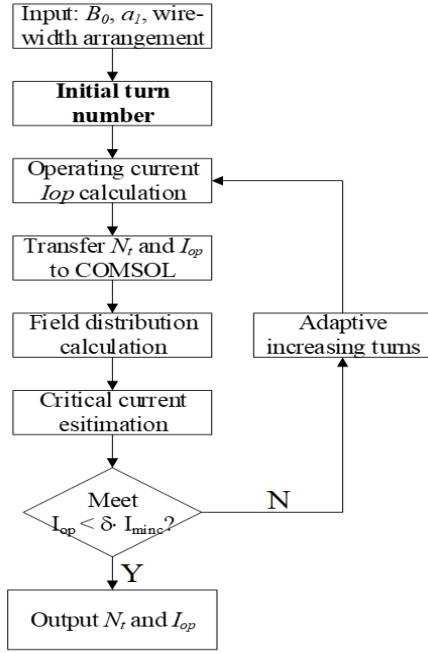


Fig. 2. The flow chart for the optimization process to get the FEM simulation model of 6 T HTS magnet, considering the magnetic field, bore size and the operating temperature.

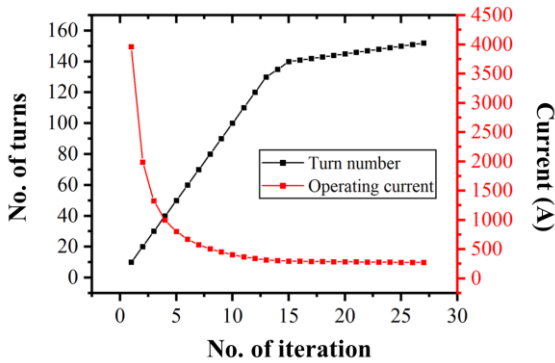


Fig. 3. Optimization process of the simulation model for 6 T NI HTS magnet, considering the magnetic field, bore size and the operating temperature.

200 mm bore size에서 중심 자기장 6 T 이상을 만족하는 기본 설계를 진행하였고, 운전 온도 20 K에서의 임계 전류를 고려하여 운전 전류 272.19 A에서의 자기장 분포를 그림 4와 같이 나타내었다.

3.3. 6 T급 NI HTS 자석 임계 전류 예측

본 자석의 설계에 있어 임계 전류를 예측하는데 신경망 회로 방정식 (Neural Network)을 적용하였다[13-14]. 초전도 자석의 임계 전류를 예측할 때 실험적으로 획득한 입력 전류에 의해 결정되는 초전도 자석의 온도, 자기장, 각도 값 등을 연속적 값으로 표현하는 것은 아주 중요하다. Superpower 선재의 모든 실험데이터를 기반으로 neural network 을 적용하여 온도에 따른 연속적인 자기장, 각도 값을 예측하여 설계프로세스에 반영되었다. 본 예측 데이터 검증을 위해 모든 실험 데이터는 예측된 임계 전류 값과 일대일로 매칭이 이루어졌고, 99.9 % 이상의 일치율을 확인하였습니다. 그림 5에 나타난 매 턴당 임계 전류 분포도와 같이 예측된 임계 전류는 적층된 32개 코일의 맨 아래와 위에서 최소임계전류 값 343 A 를 도출하였다.

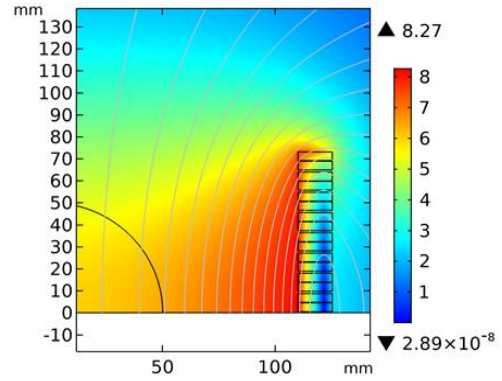


Fig. 4. Magnetic flux density distribution of the 6 T NI HTS magnet at the excitation current of 272.19 A.

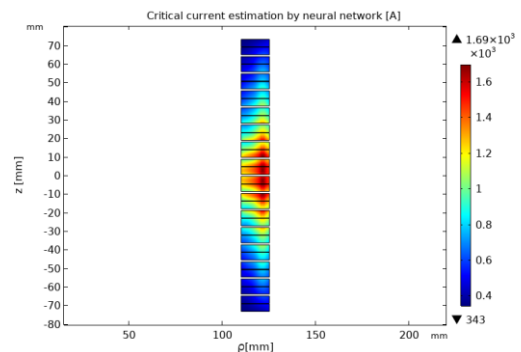


Fig. 5. Critical current estimation by neural network for 6 T NI HTS magnet.

4. 6 T 급 고온초전도 자석 여자특성 분석

4.1. 접촉저항에 따른 각 코일 별 충전지연 특성 분석
초전도 NI 자석의 불균일한 전류분포와 전류 입력에 의한 턴 간 손실은 등가회로 지배방정식을 이용하여 해석모델을 개발하여 계산되었다. 표 2에 나타난 주요 해석조건과 같이 접촉저항 $R_{ct}=100\mu\Omega\cdot cm^2$ 와 전류 충전 속도 $1 A/s$ 로 수행되었다.

NI HTS 자석에서 턴 사이의 자기장의 세기의 차이 때문에, 방위각 방향의 전류와 방사상 방향의 전류분포가 불균일해진다. 전류입력 272 초에서 전류분포를 그림 6과 7에 나타내었다. 방위각 방향의 즉 코일의 권선방향 전류는 NI HTS 자석의 상부와 하부 끝 코일에서 다른 위치의 코일보다 더 빠르게 충전됐고 내 반경에 가까운 턴에서 바깥쪽 위치한 턴보다 더 빠르게 충전됨을 확인하였다. 방사상 방향의 즉, 코일의 반경방향 전류는 NI HTS 자석의 상부와 하부 끝 코일보다 중간 위치의 코일에서 더 빠르게 충전되었고 내반경에 가까운 턴보다 바깥쪽 위치한 턴에서 더 빠르게 충전됨을 확인하였다.

TABLE II
PARAMETERS FOR TRANSIENT ANALYSIS OF 6 T NI HTS MAGNET.

Parameters	values
Ramping rate of the excitation current	1 A/s
Keeping current (Target current)	272 A
Total inductance	0.47424 H
Contact resistance	$100\mu\Omega\cdot cm^2$
Total operating time	2,000 s

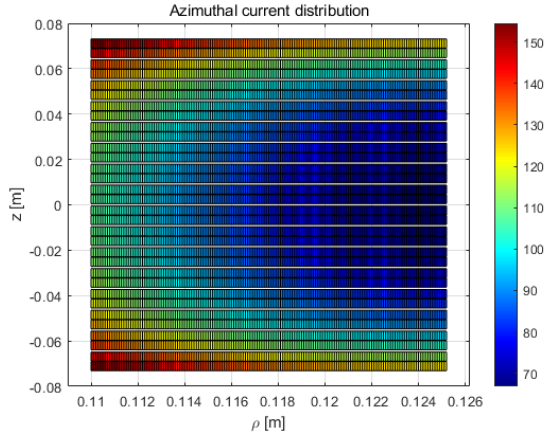


Fig. 6. Non-uniform azimuthal current distribution of the NI HTS magnet at the specific time of 272 s.

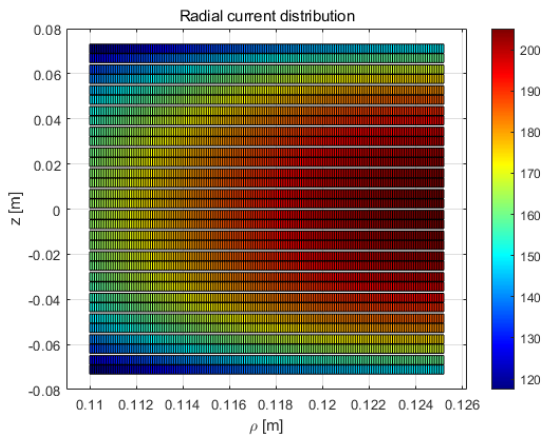


Fig. 7. Non-uniform radial current distribution of the NI HTS magnet at the specific time of 272 s.

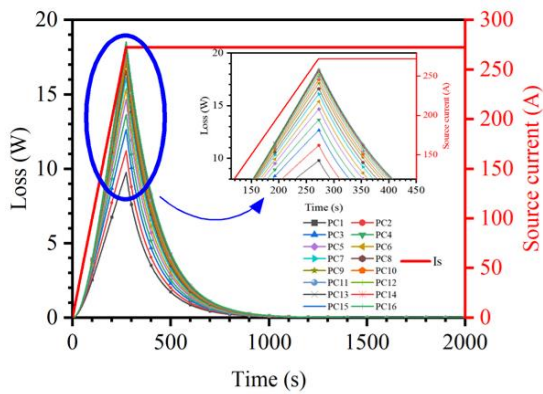


Fig. 8. Loss power curves of each SPC coil by radial current of the NI HTS magnet owing to the charging delay.

4.2. 접촉저항에 따른 유출전류에 의한 코일의 열손실 특성 분석

NI HTS 자석 특성과 전류 ramping에 의한 방사상 방향의 불균일한 전류 분포에 따른 턴 간 손실을 계산하였다. NI 자석의 Half-section 모델에서 방사 방향 전류에 따른 손실은 방사 방향의 전류가 최대가 되는 시점까지 증가한 후 다시 감소함을 알 수 있다. 방사 방향의 불균일한 전류에 따른 개별코일 별 손실을 그림 8과 같이 나타내었다. 적층된 코일의 중간코일에서 가장 큰 손실이 나타났음을 알 수

있다.

4.3. 접촉저항 및 전류 입력속도 변화에 따른 손실특성 분석

표 3과 같이 두 가지 시뮬레이션 그룹으로 나누어 같은 접촉저항에서 전류 ramping rate 차이에 따른 특성과 같은 Ramping rate에서 접촉저항 차이에 따른 특성을 추가로 해석을 수행하였다.

그림 9에 나타난 결과와 같이 초전도 자석 충전 속도의 감소는 최고손실 점과 전체 누설 전류에 의한 손실을 줄이는 결과를 얻었다. 또한, 초전도 자석의 충전 속도의 증가는 턴과 턴 사이의 유기전압이 크게 발생하고 이는 접촉저항으로 흐르는 방사 방향의 누설 전류를 증가시키는 결과를 얻었다.

TABLE III
PARAMETERS BY SIMULATION GROUPS FOR TRANSIENT ANALYSIS OF 6 T NI HTS MAGNET.

Simulation group	Contact resistance	Ramping rates
Same contact resistance and different ramping rate	$100\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$	0.1 A/s
		0.5 A/s
		1 A/s
Same ramping rate and different contact resistance	$50\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$	0.5 A/s
	$100\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$	
	$200\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$	

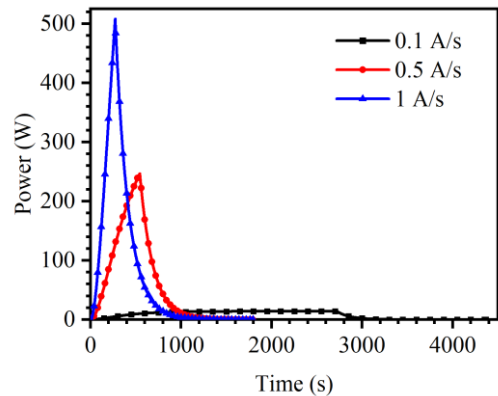


Fig. 9. Magnet excitation loss power according to different ramping rates.

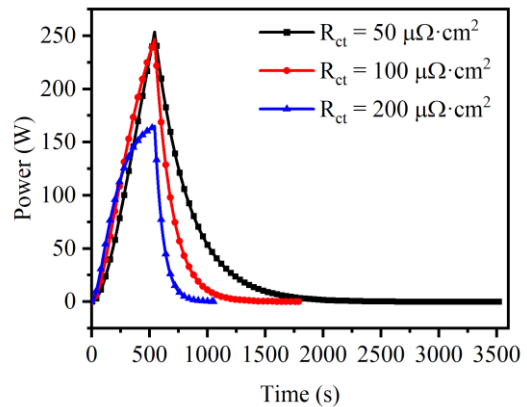


Fig. 10. Magnet peak power according to different contact resistance.

그림 10과 같이 접촉저항의 증가는 누설 전류에 의한 손실을 줄이는 방향의 결과를 얻었다. 더 높은 접촉저항은 방사 방향의 전류를 낮추고 코일 방향으로 흐르는 전류의 양을 증가시켜, 전체 손실과 최고손실 점이 감소하는 결과를 얻었다.

5. 결 론

본 논문에서는 차세대 6 T 이상 급 초고자장 MRI 개발을 위해 중심자기장 6 T 급 연구용 무절연 고온초전도 자석을 기본 설계하였고, 임계전류 예측과 충전지연특성에 따른 손실을 분석하여 그 결과를 나타내었다. Neural network에 의한 자장, 각도 및 온도 의존성을 갖는 임계전류 예측모델을 개발하여 임계전류를 분석함과 동시에 Matlab 해석모델을 개발하여 NI HTS 자석의 충전 지연 및 충전 손실 해석 결과 확보하였다. 가변온도에서 코일 임계전류 예측 및 시정수 예측 신뢰성 확보를 위해 실제 제작에 앞서 정확한 설계를 수행할 수 있었고, 운전 모의를 통한 냉각 시스템 용량, 운전 절차를 사전에 확립할 기회가 되었다. 다음 논문에서는 해석모델을 기반으로 모의 코일을 제작하여 실험결과와 비교를 통해 검증될 예정이다. 향후 개발예정인 6 T급 초고자장 전임상용 MRI 개발을 시뮬레이션 모델 개발 및 무절연 고온초전도 MRI 자석의 운전특성을 해석적으로 분석하여 안정적 운전프로토콜을 확보하는데 큰 도움이 될 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Korea Medical Device Development Fund grant funded by the Korea government (the Ministry of Science and ICT, the Ministry of Trade, Industry and Energy, the Ministry of Health & Welfare, the Ministry of Food and Drug Safety) (Project Number: 1711138067, KMDP_PR_20200901_0063)

REFERENCES

- [1] BCC research members, *Superconductors: Global Markets*. BCC Publishing, 2020.
- [2] G. Bansal, N. Yanagi, T. Hemmi, K. Takahata and T. Mito, "Experimental Investigation of the Minimum Propagation Currents and Quench Characteristics of LTS/HTS Hybrid Conductors," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 2474-2477, 2007.
- [3] E. A. Young, C. M. Friend and Y. Yang, "Quench Characteristics of a Stabilizer-Free 2G HTS Conductor," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 2500-2503, 2009.
- [4] E. A. Young, S. Chappell, I. Falorio and Y. Yang, "Quench Characteristics of a Cu-Stabilized 2G HTS Conductor," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 3062-3065, 2011.
- [5] S. Hahn, D. K. Park, J. Bascunan and Y. Iwasa, "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 1592-1595, 2011.
- [6] S. Hahn, et al. "No-insulation multi-width winding technique for high temperature superconducting magnet." *Applied physics letters* 103.17. 2013: 173511.
- [7] S. Hahn et al., "A 78-mm/7-T Multi-Width No-Insulation ReBCO Magnet: Key Concept and Magnet Design," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 3, pp. 1-5, 2014.
- [8] S. Yoon, et al, "26 T 35 mm all-GdBa₂Cu₃O_{7-x} multi-width no-insulation superconducting magnet." *Superconductor Science and Technology* 29.4. 2016: 04LT04.
- [9] K. Kim, et al. "Design and performance estimation of a 35 T 40 mm no-insulation all-REBCO user magnet." *Superconductor Science and Technology* 30.6. 2017: 065008.
- [10] A. Ikeda et al., "Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coil During Local Normal-State Transition," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1-4, 2016, Art no. 4600204.
- [11] T. Wang et al., "Analyses of Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coils During Sudden Discharging and Overcurrent," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-9, 2015, Art no. 4603409.
- [12] Robinson Research Insititue (2017). Critical current characterisation of SuperPower Advanced Pinning 2G HTS superconducting wire. Figshare. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.4256624>
- [13] F. Dan Foresee and M. T. Hagan, "Gauss-Newton approximation to Bayesian learning," *Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN'97)*, 1997, pp. 1930-1935 vol.3, doi: 10.1109/ICNN.1997.614194.
- [14] MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink. <http://www.mathworks.com/products/matlab.html>