

Numerical analysis on the critical current evaluation and the correction of no-insulation HTS coil

Bonghyun Cho^a, and Jiho Lee^{* a, b}

^a Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

^b Robotics Institute of Non-Destructive Inspection, Pusan National University, Busan, Korea

(Received 2 March 2023; revised or reviewed 29 March 2023; accepted 30 March 2023)

Abstract

The International Electrotechnical Commission (IEC) 61788-26:2020 provides guidelines for measuring the critical current of Rare-earth barium copper oxide (REBCO) tapes using two methods: linear ramp and step-hold methods. The critical current measurement criterion, 1 or 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ of electric field from IEC 61788-26 has been normally applied to REBCO coils or magnets. No-insulation (NI) winding technique has many advantages in aspects of electrical and thermal stability and mechanical integrity. However, the leak current from the NI REBCO coil can cause distortion in critical current measurement due to the characteristic resistance which causes the radial current flow paths. In this paper, we simulated the NI REBCO coil by applying both linear ramp and step-hold methods based on a simplified equivalent circuit model. Using the circuit analysis, we analyzed and evaluated both methods. By using the equivalent circuit model, we can evaluate the critical current of the NI REBCO coil, resulting in an estimation error within 0.1%. We also evaluate the accuracy of critical current measurement using both the linear ramp and step-hold methods. The accuracy of the linear ramp method is influenced by the inductive voltage, whereas the accuracy of the step-hold method depends on the duration of the hold-time. An adequate hold time, typically 5 to 10 times the time constant (τ), makes the step-hold method more accurate than the linear ramp method.

Keywords: critical current, circuit analysis, REBCO, No-Insulation, HTS Coil

1. 서 론

2009년 무절연 권선법의 첫 발표 이후, 많은 연구자들이 무절연 권선법을 사용한 고온초전도 코일 및 자석의 연구와 개발을 하고 있다 [1]. 무절연 고온초전도 코일은 전기적, 열적 안정성 및 기계적인 강도에 있어 기존의 절연 고온초전도 코일에 대비하여 많은 장점이 있다. 하지만 절연 고온초전도 코일과 달리 턴간 저항이 존재하여 턴간 저항으로 향하는 누설전류가 발생할 수 있다. 무절연 고온초전도 코일의 누설전류는 임계전류 측정에 왜곡을 발생시켜 정확한 임계전류 측정을 방해할 수 있다.

선행연구에서는 누설전류로 인한 임계전류 측정의 왜곡을 해결하기 위해서 자기장을 이용한 보정 방법을 사용하였다 [2]. 이번 연구에서 우리는 누설전류의 영향을 자기장 측정을 하지 않고 회로해석을 통하여 분석하였다. 무절연 고온초전도 코일을 등가회로로 표현하고 파워 서플라이의 전류와 누설 전류를 제외한 전류를 인가한 상황에서 시뮬레이션을 수행하였다.

2. REBCO 초전도 선재 및 코일의 임계전류 측정

2.1. Rare-earth barium copper oxide (REBCO) 초전도 선재의 직류 임계전류 기준 : IEC 61788-26:2020 [3]

일반적으로 REBCO 초전도 선재의 직류 임계전류 측정은

IEC 61788-26:2020의 규정을 따르고 있다. I - V 곡선에서 $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 혹은 $E_c = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 과 만나는 지점의 전류 값을 임계전류 I_c 라 한다.

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c}\right)^n \quad (1)$$

식 (1)에서 V , V_c , I , I_c 는 각각 시편 전압, 임계전류 기준 전압, 시편 전류, 임계전류다. 식 (1)을 통해 n 값을 계산하거나 \log 플롯을 이용한 기울기로 대략적인 n 값을 계산해낼 수 있다.

전류를 인가하는 방법에는 전류를 0에서 I_c 이상 전류까지 일정한 속도로 스위프하는 정속 스위프법 (linear ramp), 전류를 0에서 I_c 이상 전류까지 단계적으로 스위프하는 램프-정지법 (step-hold)이 있다. 정속 스위프법에서는 전압 측정에 영향을 주지 않는 정도의 스위프 속도로 진행하여야 하고, 램프-정지법에서는 스위프 속도는 3초 내에 0 전류에서 I_c 로 램프하는 것보다 느려야 한다. 그리고 정지하는 동안의 전류의 변화량은 I_c 의 1% 미만이어야 한다 [3]. REBCO 초전도 선재로 이루어진 고온초전도 코일에서는 이 규정을 준용하여 정속 스위프법과 램프-정지법으로 전류를 인가하여 직류 임계전류를 측정하고 있다. 따라서 우리는 REBCO 고온초전도 코일에서 전류를 인가하는 방법으로 정속 스위프법과 램프-정지법을 통해 분석하였다.

2.2. 절연 고온초전도 코일과 무절연 고온초전도 코일의 회로해석 [4]

절연 고온초전도 코일의 등가회로는 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다. L , $R_{stabilizer}$, R_{HTS} 는 각각 코일의 인덕턴스,

* Corresponding author: leejiho@pusan.ac.kr

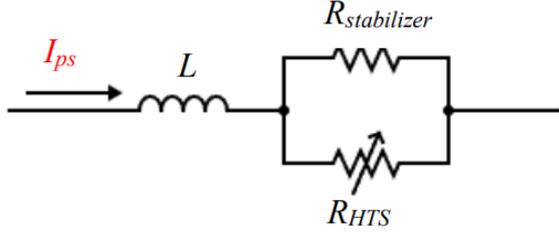


Fig. 1. Equivalent circuit model for insulated high temperature superconducting coil.

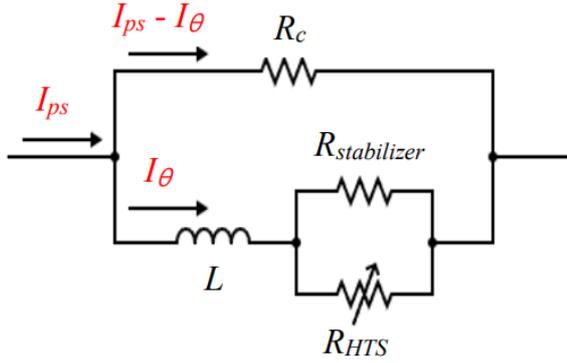


Fig. 2. Equivalent circuit model for No-insulation high temperature superconducting coil.

TABLE I

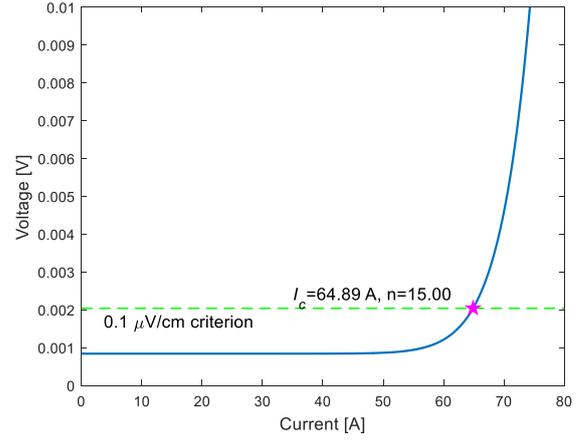
PHYSICAL DIMENSIONS AND SPECIFICATIONS OF THE REBCO TAPE AND THE DOUBLE PANCAKE COILS

Parameter		Simulated Coil
Conductor (REBCO, SuperPower)		
Width; thickness	[mm; μ m]	6; 75
Cu stabilizer thickness	[μ m]	40
Average I_c @ 77 K, self-filed	[A]	265
Minimum I_c @ 77 K, self-filed	[A]	255
Double Pancake Coil		
(design) inner diameter	[mm]	196.90
(design) outer diameter	[mm]	211.15
(design) height	[mm]	12.127
# of turns (upper single pancake coil)		96
# of turns (lower single pancake coil)		92
G10 spacer thickness	[mm]	0.127
Index-n value	[null]	15
Inductance	[mH]	16.8
Characteristic Resistance, R_c	[$\mu\Omega$]	600
Time constant, τ	[s]	28.25
Coil length	[m]	120

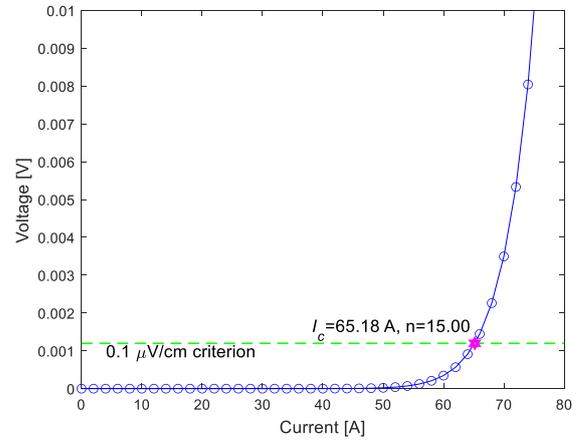
안정화재의 저항, 코일의 저항이다. 이 등가회로를 키르히호프의 전압법칙을 통해 해석하면 (2)를 도출해낼 수 있다.

$$V_{coil} = L \frac{dI_{ps}}{dt} + I_{ps}(R_{HTS} || R_{stabilizer}) \quad (2)$$

무절연 고온초전도 코일의 등가회로는 Fig. 2의 병렬 RL 회로로 표현할 수 있다. 앞서 언급한 누설전류는 턴간 저항을 표현하는 코일 인덕턴스 성분과 병렬로 연결된 R_c 에 흐르는 전류이다. Fig. 2에서 파워 서플라이를 통해 인가하는 전류는



(a)



(b)

Fig. 3. $I_{ps} - V_{coil}$ curve applying (a) linear ramp and (b) step-hold current for insulated high temperature coil based on the critical current criterion of $E_c = 0.1 \mu\text{V/cm}$.

TABLE II

CRITICAL CURRENT AND N-VALUE OF INSULATED HIGH TEMPERATURE COIL APPLYING I_{ps} BY LINEAR RAMP OR STEP-HOLD METHOD

	기준	Insulated coil	
		Linear ramp	Step-hold
I_c	65.18	64.89	65.18
($E_c = 0.1 \mu\text{V/cm}$)		99.6%	100.0%
n-value	15	15	15
($E_c = 0.1 \mu\text{V/cm}$)		100.0%	100.0%

I_{ps} , 인가하는 전류에서 누설전류를 제외한 초전도선의 길이방향으로 흐르는 전류는 I_θ 이다. L , R_c , $R_{stabilizer}$, R_{HTS} 는 각각 코일의 인덕턴스, 특성 저항, 안정화재의 저항, 코일의 저항이다. 이 등가회로를 키르히호프의 전압법칙을 통해 해석하면 (3)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V_{coil} = L \frac{dI_\theta}{dt} + I_\theta(R_{HTS} || R_{stabilizer}) = (I_{ps} - I_\theta)R_c \quad (3)$$

TABLE I는 회로해석을 위해 이 연구에서 사용한 REBCO 초전도선 및 코일의 사양이다. 기존의 연구에서의 초전도선 및 코일의 사양을 사용하였다 [5, 6]. 또한 두 코일의 인덕턴스를 동일하게 판단하기 위하여 절연 고온초전도

코일을 구성하는 절연체의 두께를 무시하였다. 따라서 절연체의 두께에 따라 실제 절연 고온초전도 코일의 외경과 인덕턴스는 무절연 고온초전도 코일의 인덕턴스와 다르다. TABLE I의 기준에서 $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 에서의 임계전류를 75 A라 설정하였다. IEC 61788-26:2020에 따라 전기 기준을 $E_c = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 으로 임계전류를 측정해도 되기 때문에 해석이 용이한 $E_c = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 으로 분석했을 때의 임계전류는 n 값이 15 일 때, 65.18 A가 된다. 절연 및 무절연 고온초전도 코일에서의 안정화재 저항은 (4)를 통해서 1Ω 임을 도출해낼 수 있다 [8].

$$R_{\text{stabilizer}} = \frac{\rho_{\text{cu}} \times \text{coil length}}{\text{width} \times \text{thickness}} \quad (4)$$

3. 고온초전도 코일 분석

3.1. 절연 고온초전도 코일 분석

고온초전도 코일에 각각 정속 스위프법과 램프-정지법으로 전류를 인가할 때, 스위프 속도는 0.05 A/s 로 가정하고 계산해보았다. 램프-정지법으로 전류를 인가할 때의 I - V 곡선은 전류와 전압이 인덕턴스의 영향으로 시간 지연이 발생한다. 따라서 전류 인가를 정지한 후 다시 전류를 인가하기 직전이 오차가 적게 발생한다. 그러므로 램프-정지법에서는 전류 인가를 정지한 후 다시 전류를 인가하기 전을 기준으로 전압을 측정한다고 가정하였다.

Fig. 1의 등가회로를 통해 절연 고온초전도 코일을 시뮬레이션하면 Fig. 3의 I - V 곡선을 구할 수 있다. 코일의 임계전류와 n 값은 비선형 회귀 분석, 즉 MATLAB의 nlinfit 함수를 이용하여 $E_c = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 기준을 사용하여 도출하였다. 정속 스위프법으로 전류를 인가하였을 경우 I_c 는 64.89 A, n 값은 15이고, 램프-정지법으로 전류를 인가하였을 경우 I_c 는 65.18 A, n 값은 15이다. 정속 스위프법의 경우 시간이 흐름에 따라 인덕턴스의 영향을 지속적으로 받기 때문에 임계전류 계산 값이 기준 값에 비해 0.4% 적었다. 램프-정지법의 경우 정지시간동안 유도성 전압의 영향이 지수함수적으로 감소하므로 5τ 및 10τ 정지시간 이후 임계전류 등의 기준 값 대비하여 0.1% 이내의 오차를 나타냈다.

3.2. 무절연 고온초전도 코일 분석

Fig. 2의 등가회로를 바탕으로 무절연 고온초전도 코일을 시뮬레이션하면 Fig. 4의 I - V 곡선을 구할 수 있다. 여기에 $E_c = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 기준과 (1)을 이용해서 I_c 와 n 값을 알아낼 수 있다. 무절연 고온초전도 코일에서는 누설 전류로 인한 영향에 대해 분석하기 위해 I_θ , I_{ps} 에 따른 I - V 곡선 두 개를 함께 Fig. 4에 표시하였다.

정속 스위프법으로 전류를 인가하였을 경우 $I_\theta - V_{\text{coil}}$ 곡선에서 I_c 는 65.78 A, n 값은 16.13이고, $I_{ps} - V_{\text{coil}}$ 곡선에서 I_c 는 69.36 A, n 값은 9.57이다. 램프-정지법으로 전류를 인가하였을 경우 $I_\theta - V_{\text{coil}}$ 곡선에서 I_c 는 65.18 A, n 값은 15.00이고, $I_{ps} - V_{\text{coil}}$ 곡선에서 I_c 는 67.11 A, n 값은 8.37이다.

정속 스위프법의 경우 인덕턴스의 영향을 시간에 따라 지속적으로 받아 I_θ 기준에서 임계전류가 0.9%, n 값이 7.5%의 오차가 발생하였다. 램프-정지법의 경우 정지시간동안 인덕턴스의 영향을 받지 않기 때문에 0.1% 이내의 기준과의 오차를 나타냈다. 코일의 인덕턴스에 의한 유도성 전압의 크기는 5τ 의 정지시간을 갖는다면 e^{-5} 인 0.007로 줄고, 10τ 의 정지시간을 갖는다면 e^{-10} 인 0.000045로 줄어든다. 따라서 정지시간을 길게 가진다면 코일의 유도성

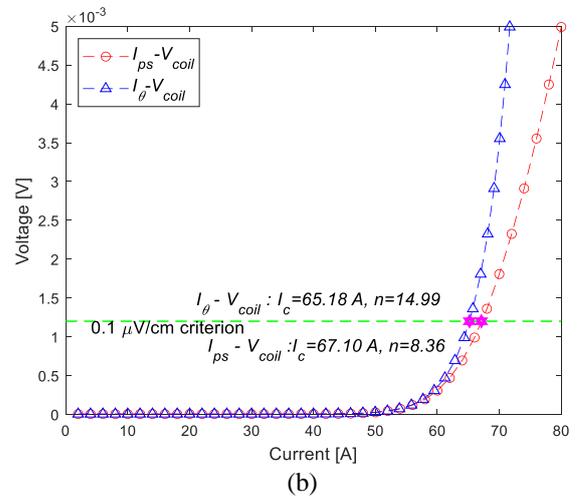
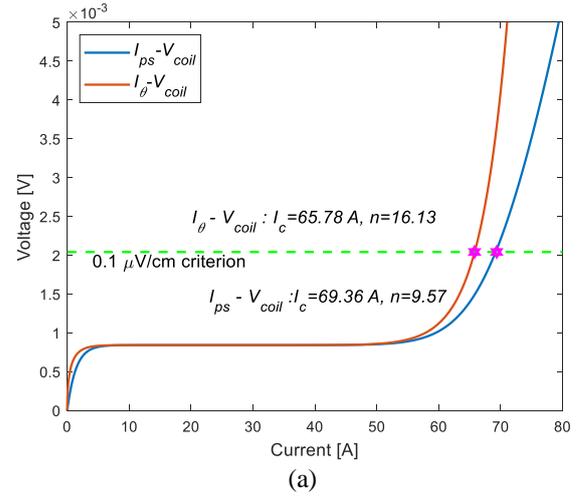


Fig. 4. $I_\theta - V_{\text{coil}}$ and $I_{ps} - V_{\text{coil}}$ curves applying (a) linear ramp and (b) step-hold current for No-insulation high temperature superconducting based on the critical current criterion of $E_c = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$.

TABLE III
CRITICAL CURRENT AND N-VALUE OF NO-INSULATION HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING COIL APPLYING I_{ps} BY LINEAR RAMP OR STEP-HOLD METHOD BASED ON THE CRITICAL CURRENT CRITERIA OF $E_c = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$, $I_c = 65.18 \text{ A}$, N-VALUE = 15

	No-insulation coil					
	Linear ramp		Step-hold (5τ)		Step-hold (10τ)	
	I_θ	I_{ps}	I_θ	I_{ps}	I_θ	I_{ps}
I_c	65.78	69.36	65.18	67.10	65.18	67.11
	100.9%	106.4%	100.0%	102.9%	100.0%	103.0%
n-	16.13	9.57	14.99	8.36	15.00	8.37
value	107.5%	63.8%	99.9%	55.7%	100.0%	55.8%

전압의 영향을 적게 받을 수 있어, 정밀한 측정을 할 수 있게 된다.

3.3. 회로해석을 사용한 보정방안

TABLE III의 결과를 보면 무절연 고온초전도코일에서 인가전류인 I_{ps} 로 해석한 임계전류와 n 값보다 누설전류를 제외한 I_θ 로 해석한 임계전류와 n 값이 기준 값들과 유사하다는 것을 알 수 있다. I_{ps} 로 해석했을 때 정속 스위프법의 경우 임계전류에서 6.4%, n 값은 36.2%의 오차가

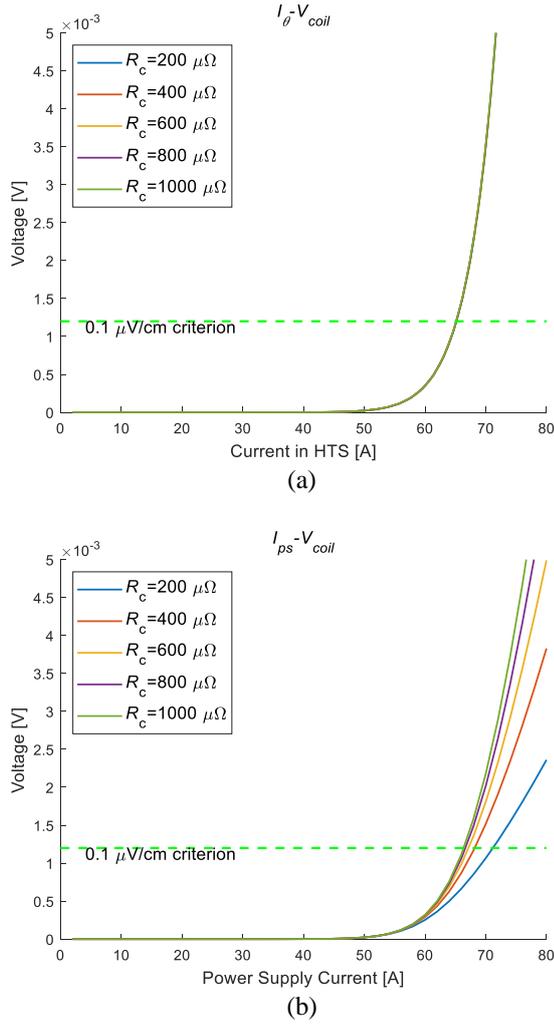


Fig. 5. (a) $I_\theta - V_{coil}$ and (b) $I_{ps} - V_{coil}$ curves applying step-hold current for No-insulation high temperature superconducting coil based on the critical current criterion of $E_c = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ with five varieties of R_c .

TABLE IV
CRITICAL CURRENT AND N-VALUE OF NO-INSULATION HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING COIL APPLYING I_{ps} BY STEP-HOLD METHOD BASED ON THE CRITICAL CURRENT CRITERIA OF $E_c = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$, $I_c = 65.18 \text{ A}$, $N - \text{VALUE} = 15$

	R_c				
	200 $\mu\Omega$	400 $\mu\Omega$	600 $\mu\Omega$	800 $\mu\Omega$	1000 $\mu\Omega$
$I_c(I_\theta)$	65.18	65.18	65.18	65.18	65.18
n-value(I_θ)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
$I_c(I_{ps})$	72.06	68.55	67.11	66.33	65.83
n-value(I_{ps})	7.01	7.83	8.37	8.78	9.12

나왔지만 I_θ 로 해석했을 때 임계전류에서 0.9%, n 값은 7.5%의 오차가 나왔다. I_{ps} 로 해석했을 때 램프-정지법의 경우 임계전류에서 7.1%, n 값은 44.3%의 오차가 나왔지만 I_θ 로 해석했을 때 임계전류에서 0.1% 이내의 오차, n 값은 0.1%의 오차가 나왔다. TABLE IV의 결과를 보면 램프-정지법에서 I_θ 로 해석했을 때에는 R_c 값이 변화하더라도 임계전류와 n 값 모두 기준과 0.1% 이내의 오차를 보였다. 따라서 무절연 고온초전도 코일에서 임계전류를 측정할 때에는 누설전류를 제외한 I_θ 를 통하는 것이 정밀도가 높다.

I_θ 를 구하기 위해서는 R_c 값을 구하는 것이 필요한데 이는 curve fitting, sudden discharge test 등으로 R_c 값을 측정할 수 있다 [7]. 측정된 R_c 값을 통해 (3)을 변형하여 I_θ 에 대한 (5)를 유도할 수 있다. 무절연 고온초전도코일에서 (5)를 통한 임계전류 해석을 하면 누설전류의 영향을 줄인 채로 0.1% 이내의 오차로 계산할 수 있다.

$$I_\theta = I_{ps} - \frac{V_{coil}}{R_c} \quad (5)$$

4. 결 론

REBCO 초전도 코일에 대해 자기장 측정 없이 등가회로를 이용해 임계전류 측정에 대해 분석을 해보았다. IEC 61788-26:2020에서 제안하는 방법 중 정속 스위프법의 경우 시간에 따른 인덕턴스의 영향을 받지만 램프-정지법의 경우 정지하는 동안 인덕턴스의 영향을 받지 않아 기준과의 오차가 적었다. 이에 따른 시뮬레이션 결과 무절연 고온초전도 코일의 경우 정속 스위프법으로 계산한 임계전류와 n 값에서는 각각 0.9%, 7.5%의 기준 값과의 오차를 보였고, 램프-정지법으로 계산한 값은 0.1% 이내의 오차를 보였다. 따라서 정속 스위프법으로 계산하는 것보다 램프-정지법으로 계산하는 것이 정밀하다는 것을 알 수 있다.

무절연 고온초전도 코일의 경우 수치적인 해석 결과 I_θ 를 기준으로 임계전류와 n 값을 산출하면 정속 스위프법일 때는 기준 값과의 0.9%, 7.5%, 램프-정지법일 때는 0.1% 이내의 오차를 보인다. 하지만 I_{ps} 기준으로 산출하면 임계전류와 n 값이 정속 스위프법일 때는 6.4%, 36.2%, 램프-정지법일 때는 3.0%, 44.2%의 오차를 보인다. 누설전류를 제외한 전류를 기준으로 임계전류를 계산했을 때 정밀한 결과값을 보인다. 따라서 무절연 고온초전도 코일에서 임계전류를 측정할 때에는 파워 서플라이 전류를 R_c 값을 통해 누설전류를 제외한 I_θ 를 이용하는 것이 정밀한 측정값을 계산할 수 있다.

R_c 값이 작아지더라도 램프-정지법에서 I_θ 를 기준으로 임계전류와 n 값을 산출한다면 모두 0.1% 이내의 오차를 보인다. 하지만 I_{ps} 기준으로 산출하면 누설전류에 의한 왜곡이 커진다는 것을 알 수 있다. 따라서 R_c 값이 작은 무절연 및 금속절연 고온초전도 코일의 경우 I_θ 를 통한 보정법이 더욱 유용하게 사용될 것이라 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

REFERENCES

- [1] Seungyong Hahn, Dong Keun Park, Juan Bascuñán, and Yukikazu Iwasa, "HTS Pancake Coils Without Turn-to-turn Insulation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 21, No.3, June 2011, pp.1592-1595
- [2] Jung-Bin Song, and Seungyong Hahn, "'Leak Current' correction for critical current measurement of no-insulation HTS coil," *Progress in Superconductivity and Cryogenics* Vol.19, No.2, (2017), pp.48-52
- [3] IEC 61788-26:2020 "Superconductivity – Part 26: Critical current measurement – DC critical current of RE-Ba-Cu-O composite superconductors," 2020
- [4] Xudong Wang, Seungyong Hahn, Youngjae Kim, Juan Bascuñán, John Voccio, Haigun Lee, and Yukikazu Iwasa, "Turn-to-turn contact characteristics for an equivalent circuit model of no-

- insulation ReBCO pancake coil," *Supercond. Sci. Technol.* 26 (2013) 035012 (6pp)
- [5] Yukikazu Iwasa, Juan Bascuñán, Seungyong Hahn, John Voccio, Youngjae Kim, Thibault Lécresse, Jungbin Song, and Kazuhiro Kajikawa "A High-Resolution 1.3-GHz/54-mm LTS/HTS NMR Magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 25, No. 3, June 2015, Art. No. 4301205
- [6] Dongkeun Park, Juan Bascuñán, Philip C. Michael, Jiho Lee, Seungyong Hahn, and Yukikazu Iwasa, "Construction and Test Results of Coils 2 and 3 of a 3-Nested-Coil 800-MHz REBCO Insert for the MIT 1.3-GHz LTS/HTS NMR Magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 3, April 2018, Art. No. 4300205
- [7] Tao Wang, So Noguchi, Xudong Wang, Issei Arakawa, Katsuhiko Minami, Katsutoshi Monma, Atsushi Ishiyama, Seungyong Hahn, and Yukikazu Iwasa, "Analyses of Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coils During Sudden Discharging and Overcurrent," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 25, No. 3, June 2015, Art. No. 4603409
- [8] Yukikazu Iwasa. *Case Studies in Superconducting Magnet*, 2nd Edition. Springer, New York, 2009.