

Evaluation of thermal conductivity in REBCO coated conductor

Yong-Ju Hong, Sehwan In, Hyobong Kim, and Hankil Yeom^{a,*}

Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Korea

(Received 30 November 2022; revised or reviewed 23 December 2022; accepted 24 December 2022)

Abstract

REBCO coated conductors are widely used for HTS power application, high magnetic field magnet application, and etc. A thermal stability of the REBCO conductor is essential for the operation of HTS-based device, and thermal conductivities of the conductor are relevant parameters for modeling cryogenic heat transfer. REBCO conductors consist of a REBCO layer, copper layers for electrical stabilization and a hastelloy substrate. At cryogenic temperature, thermal conductivity of copper and silver strongly depend on the purity of the material and the intensity of the magnetic field. In this study, thermal conductivities of the laminated composite structure of REBCO conductor are evaluated by using the thermal network model and the multidimensional heat conduction analysis. As a result, the thermal network model is applicable to REBCO conductors configured in series or parallel alone and multidimensional heat conduction analysis is necessary for complex cases of series and parallel configuration.

Keywords: REBCO coated conductor, thermal conductivity

1. 서 론

최근 희토류 바륨구리 산화물 REBCO ($\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)계 고온초전도 선재는 초전도 전력기기 및 초전도자석 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 각종 기기들의 대형화 및 고자장화 개발추세에 따라 초전도선재의 안정적인 전기적, 기계적, 열적 특성의 확보가 필수적인 요소로 대두되고 있다.

REBCO 고온초전도 선재는 일반적으로 기계적 강도를 확보하기 위한 스테인리스강 또는 하스텔로이(hastelloy) 등의 금속층(substrate)에 여러 완충층(buffer layers)과 높은 임계전류 특성을 지닌 얇은 REBCO 초전도 박막층, 적층(lamination) 혹은 전기도금(electroplating) 공정을 통해 구리 등으로 구성된 안정화층의 다층 복합재료로 구성되어 있다. 이와 같은 다층 박막 복합재료의 경우 필연적으로 전기적, 기계적, 열적 특성에서 비등방성을 나타내게 된다.

고온초전도 선재를 사용한 초전도자석의 설계를 위해서는 운전환경에서의 열적 특성 해석 및 평가를 통한 냉각구조 설계가 필수적으로 수행되어야 하고, 초전도자석의 경우 선재를 보빈에 감아 제작하기 때문에 열적인 특성의 평가를 위해서는 초전도 선재의 길이방향 뿐만 아니라 선재 단면 형 및 종 방향의 열전도도의 확보가 필수적으로 요구된다.

초전도선재의 열전도도는 극저온환경에서 운용되는 초전도 기기의 열적 안정성을 확보하기 위한 주요한 인자의 하나로, 초전도선재 길이방향의 열전도도는 주로 구리 등의 안정화층에 의해 크게 영향을 받는다. 극저온환경에서 순수 금속인 구리의 열전도도는 온도뿐만 아니라 물질의 순도에 따라 크게 다른 값을 나타내고, 고순도 구리의 경우 고자장 환경에서 큰 열전도도의 감소가 발생한다.

Simon 등[1]은 극저온환경에서 구리의 열전도도를 온도 및 RRR(Residual Resistivity Ratio)의 함수로 제시하였고, Ho

등[2] 및 Smith 등[3]은 은(Ag)의 온도 및 RRR에 따른 열전도도를 제시하고 70 K 이상의 온도에서는 RRR 값에 큰 영향을 받지 않음을 제시하였다.

Bounura 등[4,5]은 극저온 환경에서 실험적으로 AMSC, BHTS, FUJIKURA, SUNAM, SUPERPOWER 사의 REBCO 고온초전도 선재의 횡방향 열전도도를 측정하였고, 0 ~ 19 T 자기장 환경에서 REBCO 고온초전도 선재의 길이 방향 열전도도를 측정하고, 구리의 구성비를 고려한 열전도도 계산결과와 비교한 바 있다.

본 연구에서는 REBCO 고온초전도 선재의 열전도도를 구하기 위해 일반적으로 다층 복합재료의 열전도도를 구하기 위해 많이 활용되고 있는, 선재를 구성하는 각 층의 열전도도를 바탕으로 각층의 열저항을 구하고 이를 통해 직렬 및 병렬로 구성된 1차원 등가회로의 열저항을 구해 고온초전도 선재의 열전도도를 산출하는 방법과 2차원 이상의 열전도방정식의 해를 통해 열전도도를 산출하는 방법을 비교하여, 자기장 환경에서 REBCO 고온초전도 선재의 적절한 열전도도 산정 방법을 도출하고자 하였다.

2. REBCO 고온초전도 선재 열전도도 해석

REBCO 고온초전도 선재는 스테인리스강, 하스텔로이, 초전도박막층, 구리, 은 등의 다양한 소재 층으로 구성되어 있어 선재의 열전도도를 구하기 위해서는 각각의 구성층의 열전도도를 우선적으로 산출하여야 한다.

여러 층의 박막으로 구성된 REBCO 고온초전도선재는 방향에 따라 특성길이와 특성면적이 다르기 때문에 열전도도의 차이, 이방성 특성이 발생하게 된다. 따라서 다층 복합재료의 열전도도는 각 방향에 따른 박막층의 특성길이 및 면적을 고려한 1차원 직렬 및 병렬 등가회로로부터 구하는 방법과

* Corresponding author: hkyeom@kimm.re.kr

전체 다층 복합재료의 형상을 모델링하여 2차원 이상의 열전도방정식을 풀어 구한 열유속으로부터 정확한 열전도도를 구하는 방법이 있다.

온도(T) 및 잔류저항비(RRR)에 따른 구리의 열전도도(k_{Cu})는 다음 식[6]으로 표현된다.

$$\begin{aligned} k_{Cu} &= 1/(W_o + W_i + W_{io}) & (1) \\ W_o &= 0.634/(T \cdot RRR) \\ W_i &= P_1 T^{P_2} [1 + P_1 P_3 T^{(P_2+P_4)} \exp(-((P_5/T)^{P_6}))]^{-1} \\ W_{io} &= P_7 W_i W_o / (W_i + W_o) \end{aligned}$$

여기서 $P_1 = 1.754 \times 10^{-8}$, $P_2 = 2.763$, $P_3 = 1102$, $P_4 = -0.165$, $P_5 = 70$, $P_6 = 1.756$, $P_7 = 0.235 \cdot RRR^{0.1661}$

한편 비저항(ρ_{Cu})은 다음 식[6]으로 표현된다

$$\begin{aligned} \rho_{Cu} &= \rho_o + \rho_i + \rho_{io} & (2) \\ \rho_o &= 1.553 \times 10^{-8} / RRR \\ \rho_i &= P_1 T^{P_2} [1 + P_1 P_3 T^{(P_2+P_4)} \exp(-((P_5/T)^{P_6}))]^{-1} \\ \rho_{io} &= P_7 \rho_i \rho_o / (\rho_i + \rho_o) \end{aligned}$$

여기서 $P_1 = 1.171 \times 10^{-7}$, $P_2 = 4.49$, $P_3 = 3.841 \times 10^{10}$, $P_4 = 1.14$, $P_5 = 50$, $P_6 = 6.428$, $P_7 = 0.4531$

주어진 자속밀도(B)에 따른 비저항($\rho_{Cu}(B)$)은 다음 식[6]으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \rho_{Cu}(B) &= \rho_{Cu}(1 + 10^{a(x)}) & (3) \\ a(x) &= -2.662 + 0.3168 \log_{10} x + 0.6229 (\log_{10} x)^2 \\ &\quad - 0.1839 (\log_{10} x)^3 \\ &\quad + 0.01827 (\log_{10} x)^4 \\ x &= 1.553 \times 10^{-8} B / \rho_{Cu} \end{aligned}$$

자기장 환경에서의 구리의 열전도도($k_{Cu}(B)$)는 Lorenz 수가 변화하지 않는 경우 Wiedemann-Franz 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

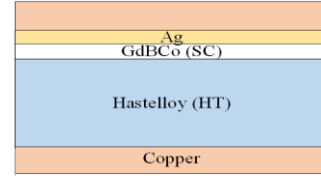
$$k_{Cu}(B) = k_{Cu} \rho_{Cu} / \rho_{Cu}(B) \quad (4)$$

은(Ag)의 열전도도, 비저항, 자기장 환경에서의 비저항은 Cryocomp[7] 및 Smith[3]의 문헌을 바탕으로 구하였고, Wiedemann-Franz 법칙을 통해 자기장 환경에서의 열전도도를 산출하였다.

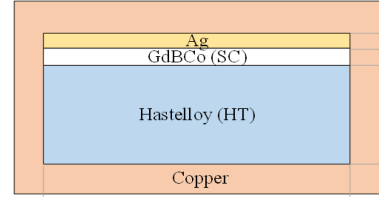
스테인리스강의 열전도도는 Cryocomp를 통해 구하였고, 하스텔로이의 열전도도는 Lu 등[8]의 문헌 값을 사용하였다. REBCO 초전도 박막층을 구성하는 $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 의 열전도도는 Jezowski 등[9], Y_2O_3 는 Klein 등[10], MgO , Al_2O_3 는 Slack[11], LaMnO_3 의 열전도도는 Cohn[12]의 문헌 값을 사용하였다.

그림 1은 3가지 형태 REBCO 선재의 구조를 나타내고 있으며, REBCO 고온초전도 선재 각 방향에 대한 열전도도는 직렬 및 병렬 등가회로에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

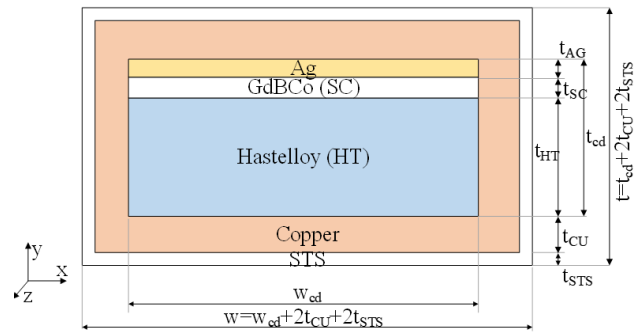
$$\begin{aligned} 1/[k_{eff}]_x &= (2/k_{STS} \cdot t_{STS} + 1/k_3 \cdot w_{cd})/w & (5) \\ k_1 &= (2k_{Cu}t_{Cu} + k_{HT}t_{HT} + k_{SC}t_{SC} + k_{Ag}t_{Ag})/(t_{cd} + 2t_{Cu}) \\ 1/k_2 &= (2t_{Cu}/k_{Cu} + w_{cd}/k_1)/(w_{cd} + 2t_{Cu}) \\ k_3 &= (2k_{STS}t_{STS} + k_2(t_{cd} + 2t_{Cu}))/t \end{aligned}$$



(a) REBCO (I)



(b) REBCO (II)



(c) REBCO (III)

Fig. 1. Schematic diagram of REBCO conductor.

$$1/[k_{eff}]_y = \left(2/k_{STS} \cdot t_{STS} + 1/k_4 \cdot (t_{cd} + 2t_{Cu}) \right) / t \quad (6)$$

$$\begin{aligned} 1/k_1 &= (t_{Ag}/k_{Ag} + t_{SC}/k_{SC} + t_{HT}/k_{HT}) / (t_{cd}) \\ k_2 &= (2k_{Cu}t_{Cu} + k_1w_{cd}) / (w_{cd} + 2t_{Cu}) \\ 1/k_3 &= (2t_{Cu}/k_{Cu} + t_{cd}/k_2) / (t_{cd} + 2t_{Cu}) \\ k_4 &= (2k_{STS}t_{STS} + k_3(w_{cd} + 2t_{Cu})) / (w) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [k_{eff}]_z &= \\ (k_{STS}A_{STS} + k_{Cu}A_{Cu} + k_{Ag}A_{Ag} + k_{SC}A_{SC} + k_{HT}A_{HT}) / A & (7) \\ A &= A_{STS} + A_{Cu} + A_{Ag} + A_{SC} + A_{HT} \end{aligned}$$

$A_{STS}, A_{Cu}, A_{Ag}, A_{SC}, A_{HT}$: 단면적

$k_{STS}, k_{Cu}, k_{Ag}, k_{SC}, k_{HT}$: 열전도도

$t_{STS}, t_{Cu}, t_{Ag}, t_{SC}, t_{HT}$: 두께

w_{cd} : 초전도박막층 너비

하첨자 STS, Cu, HT, SC, Ag : 스테인리스강, 구리, 초전도 박막층, 하스텔로이, 은

한편 2차원 이상의 열전도방정식을 풀어 열전도도를 구하는 방법으로는 상용 다중물리해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics[13]을 사용하였다.

2차원 이상의 열전도방정식의 해석은 각 해석방향의 양측 경계에서 일정 온도조건(+0.5 K, -0.5 K), 다른 방향의 경계에서는 단열조건으로 설정하였다.

TABLE I
SPECIFICATION OF REBCO CONDUCTORS.

	REBCO (I)	REBCO (II)	REBCO (III)
Type	Lamination	Cu Electroplating	STS Electroplating
Width (μm)	4000	3996	4024
Thickness (μm)	110	99	127
Cu portion (%)	32.9	36.6	15.9

열전도도 해석은 적층으로 구성된 선재, 전기도금 공정을 통해 구리층을 형성한 선재, 구리층 위에 스테인리스강 층을 형성한 3개의 REBCO 고온초전도 선재에 대해 수행하였으며, 해석에 적용된 각 선재의 사양은 표 1과 같다. 여기서 REBCO (I)의 x, z방향, REBCO (II) 및 REBCO (III)의 z 방향의 열적 등가회로는 병렬구조 단일로만 구성되고, 나머지 방향은 직렬 및 병렬의 등가회로로 구성된다.

3. 고온초전도 선재 열전도도 해석 결과

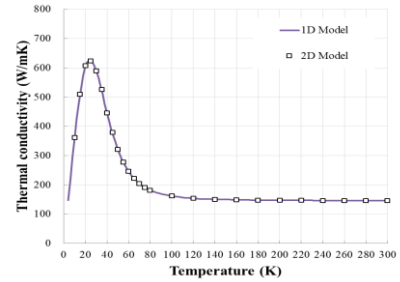
초전도선재의 열전도도 평가는 10 ~ 80 K의 온도영역에서 매 5 K 간격, 80 K 이상 온도에서는 20 K 간격으로 식 (5) - (7)의 등가열전도도 및 2, 3차원 열전도 해석을 통해 구한 해를 통해 등가 열전도도를 구하였다.

그림 2는 적층선재 REBCO (I)의 열전도도 해석결과를 나타내고 있다. 해석결과 1차원 등가회로방법과 2차원 해석 방법을 통해 구한 결과는 x, y, z 방향에서 동일한 열전도도를 나타내었으며, 적층된 구리(RRR=69)층의 열전도도 특성으로 인해 병렬회로로 구성된 x, z 방향의 열전도도가 직렬회로로 적층되어 열전도도가 작은 금속층의 열전도도에 의해 영향을 받는 y 방향의 열전도도에 비해 매우 크게 나타났다.

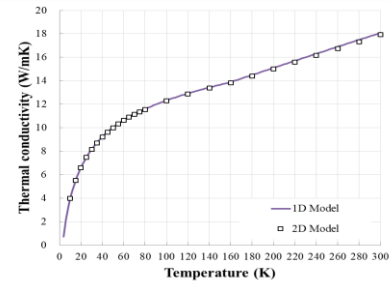
그림 3은 구리층(RRR=69)이 전기도금된 선재 REBCO (II)에 대한 등가열전도도 평가결과를 나타내고 있다. 선재의 열전도도는 전기도금된 구리층으로 인해 25 K 부근의 온도 영역에서 최대값을 나타내었으며, 이후 온도가 상승하면서 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한 y 방향의 경우 REBCO (II)는 적층 선재 REBCO (I)에 비해 더 큰 열전도도 값을 나타내었는데, 이는 열전도 경로에 열저항이 작은 최외곽 구리층의 존재하기 때문으로 발생하였다. 한편 1차원과 2차원 이상 열전도 해석결과는 x, z 방향에서는 일치하는 결과를 나타내었으나, y 방향에서는 1차원 해석결과가 더 큰 값을 나타내었다. 이는 1차원 해석에서 선재 외곽 구리층의 온도가 일정한 것으로 가정하였기 때문 즉 구리층 열전도 해석에서 해석수직(폭)방향 열저항을 무시하고 전체 구리층이 동일한 온도를 가지는 1차원 요소로 고려하였기 때문에 열전도도가 크게 예측되는 것으로 판단된다.

2차원 이상 열전도해석을 통해 구한 20 K에서의 REBCO (II) 선재 x, z 방향 열전도도는 각각 667.4, 678.0으로 구리 열전도도의 각각 37.2, 37.8 %로 REBCO (II) 선재의 구리 구성비 36.6 %와 유사한 비율을 나타내었다.

해석결과 선재 길이 방향인 z 방향에서의 열전도도는 Bounura 등[5]의 실험결과와 10% 미만의 오차범위로 나타났으나, y 방향의 경우 Bounura 등[4]의 실험결과와

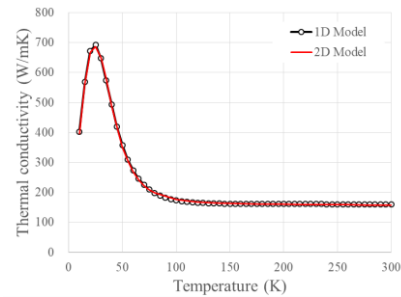


(a) Thermal conductivity in x and z direction

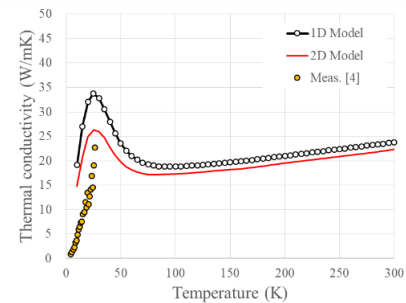


(b) Thermal conductivity in y direction

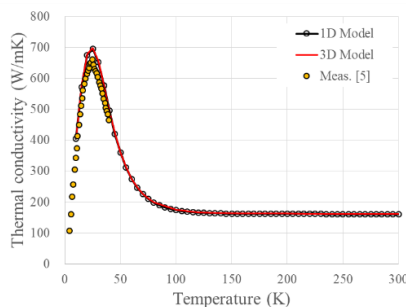
Fig. 2. Thermal conductivity of a laminated conductor (REBCO (I)).



(a) Thermal conductivity in x direction

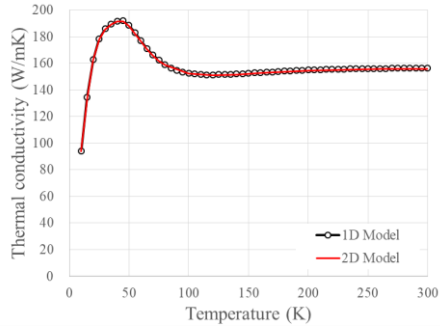


(b) Thermal conductivity in y direction

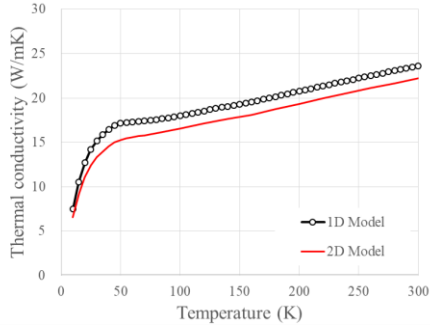


(c) Thermal conductivity in z direction

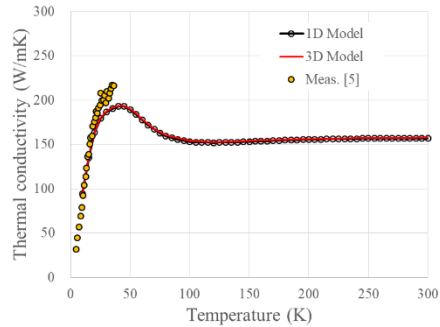
Fig. 3. Thermal conductivity of a Cu electroplated conductor (REBCO (II)).



(a) Thermal conductivity in x direction



(b) Thermal conductivity in y direction



(c) Thermal conductivity in z direction

Fig. 4. Thermal conductivity of a Cu electroplated conductor in magnetic field of 19 T (REBCO (II)).

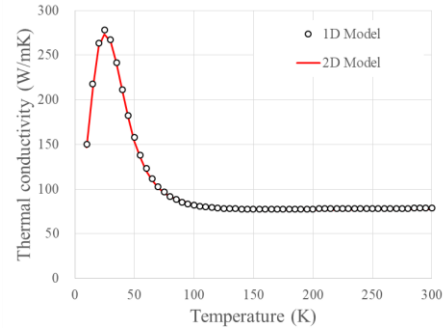
상당히 큰 오차가 발생하였다. 이는 y 방향 실험에서의 선재의 기하학적 형상 차이로 인해 발생하는 것으로 판단된다.

그림 4는 구리층이 전기도금된 선재 REBCO (II)의 자기장 환경에서의 열전도도 해석결과를 나타내고 있다.

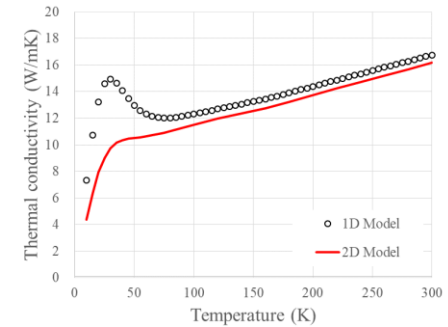
19 T 자기장 환경에서 REBCO (II) 선재의 열전도도는 자기장의 영향으로 인해 20 K 부근의 온도에서 x, z 방향의 경우 자기장이 없는 조건의 약 1/4 수준, y 방향의 경우 약 1/2 수준으로의 열전도도 감소가 발생하여 x, y, z 모든 방향에서 큰 열전도도의 감소가 발생하는 것으로 나타났으며, 100 K 이상의 온도에서는 자기장에 의한 변화는 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다.

2차원 이상의 해석을 통해 구한 열전도도는 x, z 방향에서는 1차원 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으나, y 방향의 경우 1차원 해석결과에 비해 20 K 부근 온도에서 87% 수준으로 낮게 예측되었으며, x 및 z 방향의 경우 19 T 자기장 환경에서 구리 열전도도의 38.5% 수준으로 나타났다.

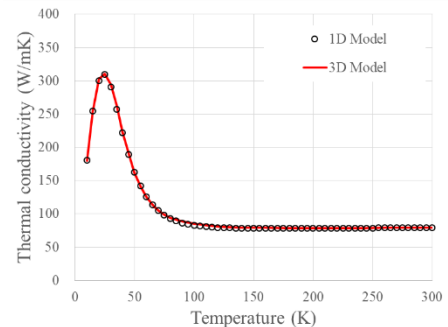
한편 해석결과 z 방향에서의 19 T 환경에서 열전도도는 Bounura 등[5]의 실험결과보다 최대 11% 작은 값으로 나타났다.



(a) Thermal conductivity in x direction



(b) Thermal conductivity in y direction



(c) Thermal conductivity in z direction

Fig. 5. Thermal conductivity of STS electroplated conductor (REBCO (III)).

그림 5는 구리층 위에 스테인스강 층을 전기도금한 REBCO (III) 선재에 대한 열전도도 해석결과를 나타내고 있다. 해석결과 REBCO(III) 선재는 REBCO (II)에 비해 열전도도가 높은 구리층 구성비가 작기 때문에 전체적인 열전도도의 감소가 발생하였다.

x, z 방향 열전도도는 1차원 및 2차원 이상의 해석결과 모두에서 열전달에서 구리층의 역할로 인해 20 ~ 30 K 온도영역에서 최대값을 나타내었으나, y 방향의 경우 1차원과 해석결과는 2차원 이상의 해석결과와 큰 차이를 나타내었다.

2차원 이상 해석을 통해 구한 20 K에서의 REBCO (III) 선재 x, z 방향 열전도도는 259.2, 302.6으로 구리 열전도도의 각각 14.4%와 16.9%로 REBCO (II) 선재의 구리 구성비 15.9%와 유사한 값을 나타내었다.

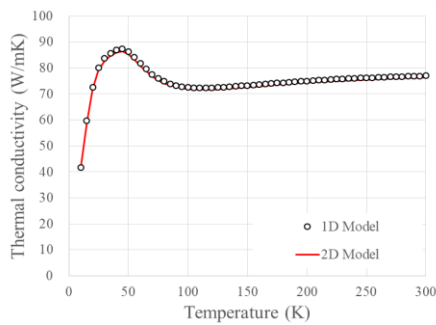
그림 6은 REBCO (III) 선재의 자기장 환경에서의 열전도도 해석결과를 나타내고 있다. 19 T 자기장 환경에서 열전도도는 REBCO(II)에서와 같이 자기장의 영향으로 인해, 구리의 열전도도가 큰 영향을 미치는 x, z 방향의 경우 20 K 부근의 온도에서는 약 1/4 수준으로의 열전도도 감소가 발생하였으며, 온도가 상승하면서 그 영향도 점차 감소하여 100 K 이상의

온도영역에서는 자기장에 의한 영향이 크게 나타나지 않았다. 한편 y 방향의 경우에는 구리의 열전도도의 영향이 크지 않아 자기장의 존재로 인한 열전도도의 변화가 크게 발생하지 않았다.

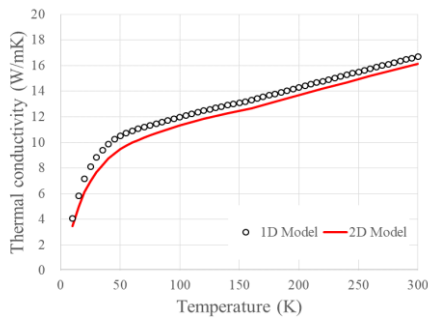
표 2는 해석을 수행한 3개의 REBCO 고온초전도 선재의 2차원 이상 열전도 해석결과 구한 열전도도를 나타낸다.

TABLE II
THERMAL CONDUCTIVITIES OF REBCO CONDUCTORS.

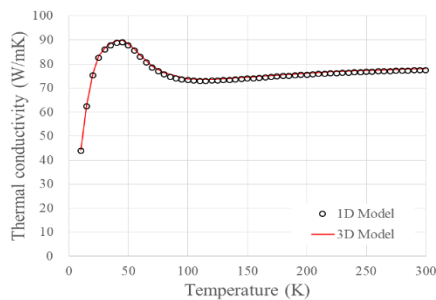
Thermal conductivity [W/mK]		20 K			30 K		
		x dir.	y-dir.	z-dir.	x-dir.	y-dir.	z-dir.
REBCO (I)	0 T	606.7	6.6	606.7	589.8	8.2	589.8
	19 T	148.5	6.6	148.5	169.4	8.1	169.4
REBCO (II)	0 T	667.4	24.9	678.0	649.0	26.0	654.9
	19 T	162.3	11.1	164.3	185.3	13.3	187.5
REBCO (III)	0 T	259.2	7.9	302.6	264.9	9.7	294.1
	19 T	71.8	6.1	75.9	82.8	7.7	86.7



(a) Thermal conductivity in x direction



(b) Thermal conductivity in y direction



(c) Thermal conductivity in z direction

Fig. 6. Thermal conductivity of STS electroplated conductor in magnetic field of 19 T (REBCO (III)).

구리층이 전기도금된 선재 REBCO (II)는 x, z 방향의 열전도도는 REBCO (I)과 큰 차이가 발생하지 않았으나, y 방향의 경우 최외곽 구리층으로 인해 열저항의 감소가 발생하여 자기장이 없는 경우 3.1배 이상, 19 T 환경에서 1.63배 열전도도가 높은 것으로 나타났다. REBCO (III) 선재의 경우 REBCO (II)에 비해 열전도도가 높은 구리층 구성비가 작고 열저항이 큰 최외곽 스테인리스강으로 인해 큰 폭의 열전도도의 감소가 발생하였다.

4. 결론

REBCO 고온초전도 선재의 열전도도를 구하기 위해 1차원 등가회로의 열저항을 구해 고온초전도 선재의 열전도도를 산출하는 방법과 2차원 이상의 열전도방정식의 해를 통해 열전도도를 산출하는 방법을 통해 3가지 선재에 대해 온도변화에 따른 열전도도를 구하였다.

적층 및 전기도금 공정을 통한 제작된 REBCO 고온초전도 선재는 매우 큰 비등방성 열전도도를 나타낸다.

고자기장 환경에서 REBCO 고온초전도 선재는 구리층의 열전도도 감소로 인해 큰 폭의 열전도도의 감소를 유발하게 된다. 해석결과 직렬 또는 병렬의 단일 등가회로로 구성된 경우 1차원 해석만을 통해 열전도도를 구하는 방법의 적용이 가능하나, 직렬 및 병렬 복합형태의 열저항의 차이가 큰 구성요소로 구성된 등가회로로 구성된 경우 적합한 열전도도를 구하기 위해서는 2차원 이상의 열전도 해석을 수행하여야 한다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by National R&D Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (2022M3I9A1072464)

REFERENCES

- [1] N. J. Simon, E. S. Drexler, and R. P. Reed, "Properties of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperatures," *NIST Monograph* 177, 1992.
- [2] C. Y. Ho, R. W. Powell, and P. E. Liley, "Thermal Conductivity of the Elements: A Comprehensive Review," *J. of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 3, Supplement no. 1, 1974.
- [3] D. R. Smith and F. R. Fickett, "Low-Temperature Properties of Silver," *J. of Research of the NIST*, vol. 100, no. 2, pp. 119-171, 1995.
- [4] M. Bonura and C. Senatore, "Transverse Thermal Conductivity of REBCO Coated Conductors," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 25, pp. 6601304, 2015.
- [5] M. Bonura and C. Senatore, "High-field thermal transport properties of REBCO coated conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, pp. 025001, 2015.
- [6] G. Manfreda, "Review of ROXIE's Material Properties Database for Quench Simulation," CERN, Internal Note 2011.24 EDMS Nr: 1178007, 2011.
- [7] "Cryocomp," *Eckels Engineering Inc.*
- [8] J. Lu, E. S. Choi, and H. D. Zhou, "Physical properties of Hastelloy C-276™ at cryogenic temperatures," *J. of Applied Physics*, vol. 103, pp. 064908, 2008.

- [9] A. Jezowski, J. Mucha, A. J. Zaleski, M. Ciszek, J. Olejniczak, K. Rogacki, C. Sulkowski, M. Wolcyrz and J. Klamut, "Thermal Conductivity Anomalies in $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$," *Physics Letters A*, vol. 127, no. 4, pp. 225-227, 1988.
- [10] P. H. Klein and W. J. Croft, "Thermal Conductivity, Diffusivity, and Expansion of Y_2O_3 , $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, and LaF_3 in the Range 77°–300°K," *Journal of Applied Physics*, vol. 38, pp. 1603-1607, 1967.
- [11] G. A. Slack, "Thermal Conductivity of MgO , Al_2O_3 , MgAl_2O_4 , and Fe_3O_4 Crystals from 3 to 300 K," *PHYSICAL REVIEW*, vol. 126, No. 2, pp. 427-441, 1962.
- [12] J. L. Cohn, "Electrical and Thermal Transport in Perovskite Magnanites," *J. of Superconductivity : Incorporating Novel Magnetism*, vol. 13, No. 2, pp. 291-304, 2000
- [13] COMSOL Multiphysics, COMSOL, www.comsol.com