

극저온용기 액체헬륨 표면 상부의 열전달 특성

최연석[†], 김동락, 신동원

한국기초과학지원연구원 물성과학연구부

Heat Transfer above Liquid Helium Surface in Cryostat

Yeon Suk Choi[†], Dong Lak Kim, Dong Won Shin

Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

(Received August 9, 2010; revision received January 3, 2011)

ABSTRACT: The cryogenic cooling load from the top plate of cryostat to liquid helium surface, including wall conduction, thermal radiation and current leads, is investigated in a closed cryostat system for superconducting magnet. In general methods of load estimation, individual load is calculated separately, however they are actually coupled each other because of natural convection of helium vapor. Using relevant heat transfer analysis, we calculate cryogenic load with taking into account the effect of natural convection. Cryogenic load is under-estimated approximately 1% when the natural convection is ignored. The difference between actual cooling load and cooling load by individual calculation increases with supplying current.

Key words: Heat transfer(열전달), Natural convection(자연대류), Cryostat(극저온용기)

기 호 설 명

A	: 면적 [m ²]
H	: 높이 [m]
h	: 열전달계수 [W/m ² K]
I	: 전류 [A]
k	: 열전도도 [W/m-K]
Lo	: 로렌츠 수
Pr	: Prandtl 수, ν/α
p	: 접수길이 [m]
Re	: Rayleigh 수
T	: 온도 [K]
z	: 수직거리 [m]

그리스 문자

ν	: 동점성 계수
-------	----------

ρ	: 비저항 [Ω -m]
σ	: Stefan-Boltzmann 상수
ϵ	: 방사율

하첨자

g	: 헬륨기체
l	: 전류도입선
w	: 진공용기 및 지지대

1. 서 론

초전도 응용기기의 성공적인 개발을 위하여 가장 중요한 요인 중 하나는 극저온 냉각기술이다. 최초의 헬륨액화 그리고 수은에서 초전도현상을 발견한 이래로 초전도기기를 냉각하기 위한 다양하고 실질적인 극저온 냉각시스템이 개발되어 왔다. 대부분의 시스템들은 저온초전도체라고 하는 니오비움 티타늄(Niobium titanium) 또는 니오비움 틴(Niobium tin)을 사용하는데, 초전도현상을 얻기 위해

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-865-3913; fax: +82-42-865-3610

E-mail address: ychoi@kbsi.re.kr

서는 액체헬륨 온도로 낮추어 주어야 한다. 저온초전도 시스템의 기본 냉각방식으로는 시스템을 4 K 부근으로 냉각시키기 위하여 액체헬륨이 효과적으로 사용된다.^(1, 2)

Fig. 1은 현재 한국기초과학지원연구원에서 설계되고 있는 고자기장을 발생하기 위한 인서트 마그넷 냉각시스템의 개략도이다. 냉각시스템은 초전도 권선부가 액체헬륨에 잠겨있는 밀폐시스템이다. 일반적으로 극저온 시스템에서 발생하는 냉각부하는 전도열전달, 복사열전달 및 전류도입선을 통한 열전달 등이 있다.⁽³⁻⁵⁾ Fig. 1에서 보는 바와 같이 초전도자석용 냉각시스템에서 전도열전달은 저온용기의 벽과 초전도자석을 지지하는 지지대 및 계측선 그리고 헬륨기체를 통해 발생한다. 복사열전달은 저온용기의 주위 및 상판에서 액체헬륨 표면으로 발생하며, 전류도입선 부하는 저온용기 상판에서 액체헬륨 표면으로 유입된다.⁽⁶⁾

Sato et al.⁽⁷⁾은 질량분석기 초전도자석용 액체헬륨 용기의 지지대를 통한 전도열전달과 복사 열전달량을 복사철드의 온도를 가정하여 구하였으며 그 결과를 냉각장치 설계에 사용하였다. Wang et al.⁽⁸⁾은 소형 초전도가속기용 냉각용기를 최적화하기 위하여 액체헬륨의 순환 현상을 이용하였으며, 초전도자석의 정상운전시 냉각부하를 고려한 저온용기의

형상을 결정하였다. Chang et al.⁽⁹⁾은 고온 초전도 변압기용 냉각용기를 최적화하기 위하여 과냉 액체 질소의 자연대류 현상을 이용하였으며, 냉각부하를 고려한 저온용기 최적의 형상비를 제시하였다. 그러나 이 연구들⁽⁷⁻⁹⁾은 냉각부하의 크기를 각 성분들에 대해 개별적 해석을 이용하여 계산하였으나 실제 초전도자석 냉각장치는 밀폐시스템이므로 전류도입선에서 전기저항에 의한 발열에 의해 전류도입선 표면의 온도가 헬륨기체의 온도보다 높기 때문에 자연대류가 발생하여 저온용기 벽과 지지대를 통한 전도열전달, 헬륨기체를 통한 전도열전달 그리고 전류도입선 냉각부하는 서로 연결되어 있다.

본 연구에서는 극저온용기내 액체헬륨 표면 상부에서 저온용기 벽의 전도열전달, 헬륨기체 전도열전달 및 전류도입선 열전달의 상호 연결성을 고려한 종합 열전달 해석을 수행하였다. 헬륨기체의 자연대류가 저온용기 상판에서 액체헬륨 표면으로 유입되는 냉각부하에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였으며, 액체헬륨표면 상부에 설치한 복사철드의 수가 전체 냉각부하에 미치는 영향을 비교하여 극저온용기 기초 설계자료를 제시하였다.

2. 에너지 평형

2.1 액체헬륨 표면 상부

Fig. 2는 액체헬륨 표면 상부의 열전달 해석을 위한 모델이다. 저온용기 벽과 전류도입선에서는 축방향의 온도구배가 지배적이다. 상부의 헬륨기체는

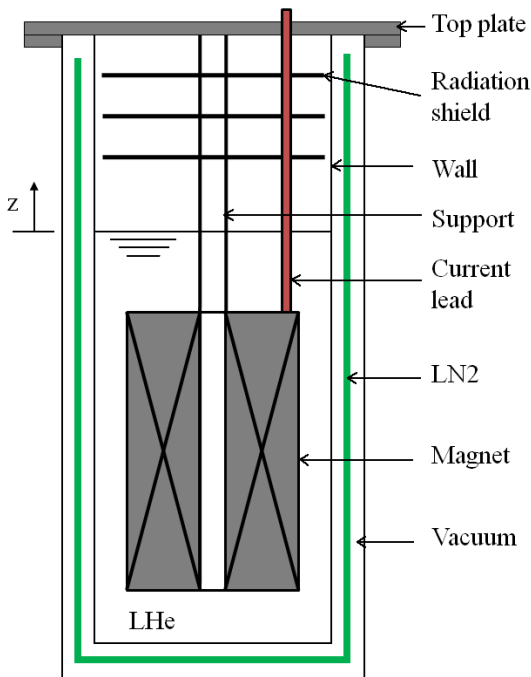


Fig. 1 Schematic of cryogenic cooling system for superconducting magnet.

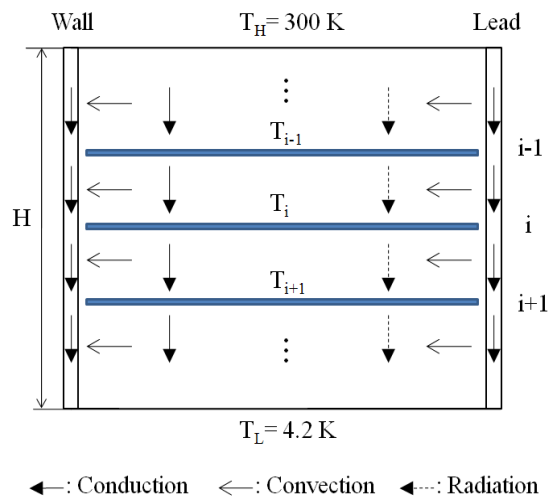


Fig. 2 Energy flow between LHe surface and top plate.

도는 하부의 온도보다 높기 때문에 헬륨기체는 안정되어 있으며, 저온용기 벽과 전류도입선 부근의 얇은 경계층을 제외하고는 헬륨기체의 대류효과는 미약하다. 따라서 축 방향으로의 1차원 열전도문제로 가정할 수 있다. 저온용기의 벽과 같은 재질인 기계적 지지대는 저온용기 벽에 포함시켰다. 저온용기 벽과 지지대(하첨자 w), 헬륨기체(하첨자 g) 그리고 전류도입선(하첨자 l) 사이의 에너지 평형은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dz} \left((kA)_w \frac{dT_w}{dz} \right) - (hp)_{wg} (T_w - T_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} \left((kA)_g \frac{dT_g}{dz} \right) + (hp)_{wg} (T_w - T_g) + (hp)_{lg} (T_l - T_g) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz} \left((kA)_l \frac{dT_l}{dz} \right) - (hp)_{lg} (T_l - T_g) + \frac{\rho I^2}{A} = 0 \quad (3)$$

여기서 A, h, P는 각각 단면적, 열전달계수 및 접촉 길이를 의미한다. 식(1)에서는 상온에서 진공을 통하여 저온용기 벽으로 유입되는 복사열전달은 무시하였다. 식(3)에서 I는 초전도 자석으로 공급되는 전류이며, ρ 는 전기적 비저항으로 구리와 같이 Wiedemann-Franz법칙을 만족하는 금속은 간단한 온도의 함수로 표현된다.⁽²⁾

$$k(T)\rho(T) = L_0 T \quad (4)$$

여기서 L_0 는 로렌츠 수이며 $2.45 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$ 이다. 저온용기 벽과 전류도입선의 경계조건은 액체헬륨 표면($z = 0$)온도는 대기압에서 액체헬륨의 포화온도(4.2 K), 그리고 저온용기 상판($Z = H$)온도는 대기 온도(300 K)이다. 헬륨기체의 경우 Fig. 2에서 보는 바와 같이 각 구간에서 경계조건은 상부의 온도(예를들면 T_i)와 하부의 온도(T_{i+1})이다.

저온용기 벽 및 전류도입선 표면에서의 열전달은 수직 벽에서의 자연대류로 간주하였으며, 열전달계수를 구하기 위하여 다음의 경험식을 사용하였다.⁽¹⁰⁾

$$Nu = \frac{hH}{k_g} = 0.68 + \frac{0.67 Ra^{1/4}}{(1 + (0.492/Pr)^{9/16})^{4/9}} \quad (5)$$

H는 액체헬륨 표면에서 상판까지의 높이이고 Ra,

Pr은 각각 Rayleigh 수 및 Prandtl 수를 의미한다.

2.2 복사열전달

Fig. 1에서 보는 바와 같이 저온용기 상판으로부터 액체헬륨 표면으로 전달되는 복사열전달을 줄이기 위하여 복사열전달을 설치한다. 복사열전달 표면의 온도는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 i 번째 복사열전달로 유입되는 열전달양과 i 번째 복사열전달에서 방출되는 열전달양 사이의 에너지 평형을 이용하여 구할 수 있다. 형상계수(Shape factor)⁽¹¹⁾는 1로 가정하였다.

$$k_g A \frac{dT_{i-1,i}}{dz} + \frac{\sigma A (T_{i-1}^4 - T_i^4)}{\frac{1}{\epsilon_{i-1}} + \frac{1}{\epsilon_i} - 1} = k_g A \frac{dT_{i,i+1}}{dz} + \frac{\sigma A (T_i^4 - T_{i+1}^4)}{\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_{i+1}} - 1} \quad (6)$$

여기서 σ 및 ϵ 는 각각 Stefan-Boltzmann 상수 및 방사율을 의미한다.

3. 수치해석 방법

식(1)~식(3)에서 대류에 의한 영향이 전도의 영향에 비해 매우 작은 경우 온도분포는 섭동법(Perturbation theory)⁽¹²⁾에 의한 근사해석이 가능하다. 이 해석방법에 의하여 식(1)~식(3)에서 벽, 기체 그리고 전류도입선 사이의 열전달계수를 0으로 가정하여 각 성분의 온도분포, 즉 0차(zeroth-order)해를 구하였다. 0차해를 이용하여 식(5)에서 열전달계수를 구할 수 있다. 이상의 결과를 이용하여 식(1)~식(3)을 한번 더 계산하면 대류열전달에 의한 영향이 고려된 1차(first-order)해를 구할 수 있다. 이 과정에서 각각의 열전도도는 일정하다고 가정하였다.

4. 결과 및 토의

액체헬륨 표면 상부의 열전달 해석에 사용된 각종 자료가 Table 1에 나타나 있다. 전류도입선의 길이는 저온용기 상판에서 액체헬륨 표면까지의 거리와 같으며, 단면적은 최적의 길이/지름의 비⁽¹³⁾를 만족한다.

Table 1 Given data for heat transfer analysis above liquid helium

Cryostat	Material	Stainless steel
	Diameter	100 mm
	Thickness	1 mm
Current lead	Material	Copper
	Current	200 A
	Length	500 mm
	Area	37 mm ²
Support	Material	Stainless steel
	Length	500 mm
	Area	10 mm ²
Radiation shield	Material	Aluminum ₂
	Surface area	5000 mm ²
	Emissivity	0.05

Fig. 3은 복사선투드가 없을 경우, 저온용기 벽, 헬륨기체, 전류도입선에 대해 액체헬륨 표면에서 상판까지 온도분포이다. 헬륨기체와 전류도입선 사이, 헬륨기체와 저온용기 벽 사이의 자연대류를 무시한 경우(Fig. 3에서 점선), 헬륨기체와 저온용기 벽의 온도는 일치하며 선형이다. 전류도입선의 온도분포는 전기저항에 의한 발열에 의해 위로 불록하며 상판(z = 500 mm)에서 거리의 변화에 따른 온도의 변화량, 즉 온도의 기울기가 0이 되어 전류도입선으로 열 유입은 없다. 실제로 자연대류가 있는 경우(Fig. 3에서 실선), 전류도입선에서 발생한 열은 헬륨기체 및 저온용기 벽으로 전달된다. 따라서 전류도입선의 온도는 자연대류를 무시했을 경우에 비해 낮아지는 반면, 헬륨기체 및 벽의 온도는 높아지게 된다.

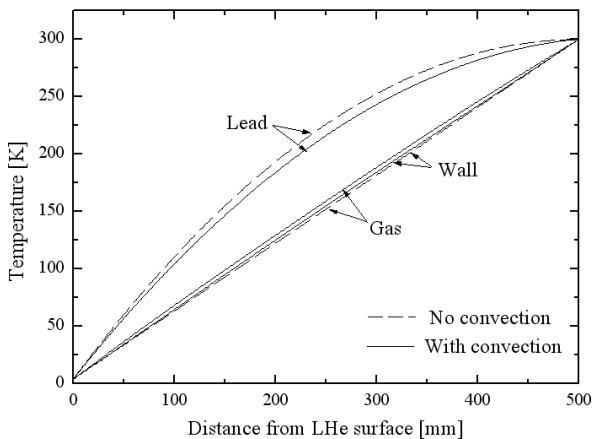


Fig. 3 Temperature distribution from LHe surface to top plate without radiation shield.

전류도입선의 온도분포를 보면, 상판(z = 500 mm)에서 온도구배가 생기며, 즉 온도의 기울기가 발생하며, 이는 상판에서 전류도입선을 통하여 열이 유입된다는 것을 의미한다.

액체헬륨 표면으로 유입되는 각각의 냉각부하를 Table 2에 정리하였다. 실제로 전류도입선에서 전기저항에 의해 발생한 열은 헬륨기체로 일부(0.21 W) 전달되고, 그 나머지와 상판에서 유입된 열의 합(1.97 W)이 액체질소 표면으로 유입된다. 질소기체로 전달된 열 중 일부는 저온용기 벽으로 전달(0.06 W)되고 나머지(0.15 W)는 상판으로부터 전도되는 열(1.39 W)과 함께 액체헬륨 표면으로 유입된다. 저온용기 벽을 통하여 상판으로부터 전도되는 열(0.51 W)은 헬륨기체로부터 전달된 열(0.06 W)과 함께 액체헬륨 표면으로 유입된다. 복사열전달량은 대류와 무관하므로 두 경우 서로 같다. 총 냉각부하는 실제로 자연대류가 있을 경우가 자연대류를 무시했을 경우보다 약 1% 큰 것을 알 수 있다. 즉, 헬륨기체와 벽, 헬륨기체와 전류도입선 사이의 자연대류를 무시하고 계산한 경우, 냉각부하는 약 1% 과소평가 되었음을 의미한다. 하지만 운전전류가 높아지거나, 또는 전류도입선의 크기가 클 경우 전류도입선에서 발생하는 발열량이 증가하게 되고 전류도입선 주변의 자연대류가 활발해져서 실제 냉각부하와 대류를 무시하고 개별적으로 해석한 냉각부하의 차이는 더욱 커지게 된다. 이 경우, 대류의 영향을 고려한 전류도입선을 최적화하여 전체 냉각부하를 줄일 필요가 있다.

Fig. 4는 액체헬륨 표면 상부에서 복사선투드의 수에 따른 선투드의 위치 및 선투드의 온도를 식(6)을 이용하여 해석한 결과이다. 복사선투드가 한 개인 경우 선투드는 액체헬륨 표면으로부터 150 mm 떨어진 곳에 위치하며, 두개 이상인 경우 액체헬륨 표면으로부터 150 mm 위에 한 개의 선투드가 위치하며 나머지 선투드들은 등 간격으로 위치한다. 복사선투드가 한 개인

Table 2 Cooling load from top plate to liquid helium surface

	No convection	With convection
Wall conduction	0.51	0.57
Gas conduction	1.39	1.54
Radiation	12.07	12.07
Current Lead	2.07	1.97
Total	16.04 [W]	16.15 [W]

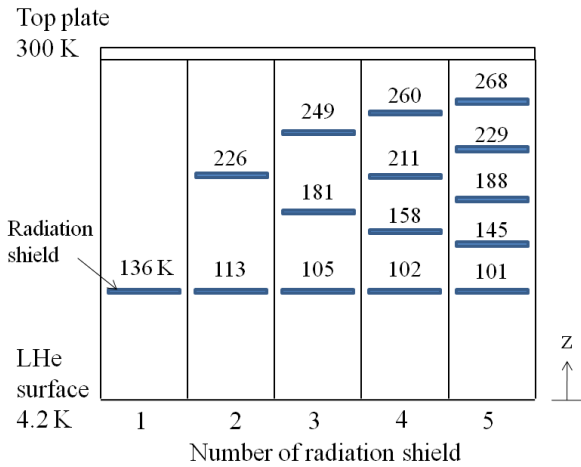


Fig. 4 Temperature and position of thermal radiation shield.

경우 쉴드에서의 온도는 136 K이고 같은 위치에서 벽의 온도에 비해 약 40 K 높다. 복사쉴드의 수가 증가할수록 액체헬륨 표면에서 가까운 곳의 쉴드 온도는 낮아지는 것을 알 수 있다. 하지만 복사쉴드의 수가 증가하여도 액체헬륨 표면에 가까운 쉴드의 온도가 감소하는 폭이 줄어 약 101 K로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 복사쉴드 수가 액체헬륨 표면으로 유입되는 냉각부하에 미치는 영향을 보여준다. 복사쉴드 수가 증가할수록 액체헬륨 표면으로 유입되는 총 냉각부하는 감소한다. 이는 복사쉴드 수가 증가함에 따라 복사열전달량이 감소하기 때문이다. 하지만 복사쉴드 수가 일정수 이상 되면 감소하는 냉각부하의 효과는 미약하다. 복사쉴드 수가 증가할수록 헬륨기체를 통한 열전도는 점점 작아지는데, 이는 첫

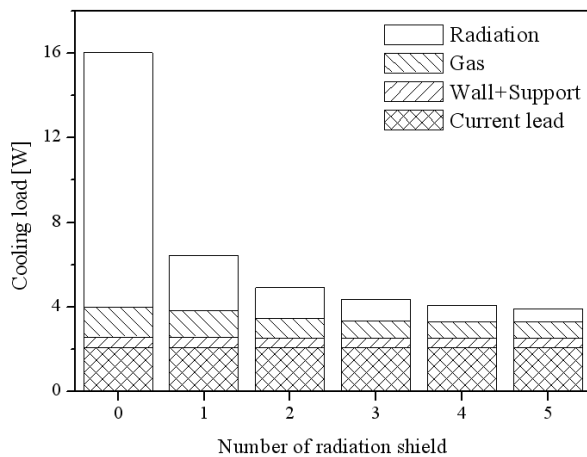


Fig. 5 Effect of number of radiation shield on cooling load.

번째 복사쉴드의 온도가 복사쉴드의 수가 증가할수록 낮아지기 때문이다. 전류도입선 및 저온용기 벽을 통하여 액체헬륨 표면으로 유입되는 냉각부하는 복사쉴드 수가 증가할수록 작은 양이지만 조금씩 감소한다. 따라서 복사쉴드 수가 증가할 때, 다른 부하에 비하여 복사열전달 감소가 우세함을 알 수 있다. 고온초전도 마그넷 시스템의 제작, 조립 및 냉각부하 측면에서 보면, 액체헬륨 표면 상부에 3개의 복사쉴드를 설치하는 것이 타당하다.

5. 결 론

본 연구에서는 저온용기 상판에서 액체헬륨 표면으로 유입되는 냉각부하를 자연대류의 영향을 고려한 종합 열전달 해석모델을 이용하여 구하였다. 자연대류를 무시하고 냉각부하를 계산했을 경우에는 약 1% 과소평가 되었음을 알 수 있었다. 하지만 초전도자석 시스템의 운전전류가 높아지면 전류도입선에서 발생하는 발열량이 커져서, 자연대류를 무시하고 계산했을 경우와 실제와의 냉각부하 차이는 더욱 커지게 된다. 이 경우 자연대류를 고려한 새로운 최적화방법이 전류도입선에 적용되어야 한다. 액체헬륨 상부에 복사쉴드를 설치함으로써 저온용기 상판에서 액체헬륨 표면으로 유입되는 냉각부하를 줄일 수 있다. 복사쉴드의 수를 늘리면 액체헬륨 표면으로 유입되는 냉각부하를 줄여 액체헬륨의 증발량을 줄일 수 있지만, 복사쉴드가 일정 수 이상이 되면 냉각부하를 줄이는 효과는 미비하다. 고온초전도 마그넷 시스템에서는 3개의 복사쉴드를 설치하는 것이 타당하다.

후 기

이 논문은 한국기초과학지원연구원 연구비(T30407)에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Van Sciver, S. W., 1986, Helium Cryogenics, Plenum Press, New York.
2. Wilson, M. N., 1986, Superconducting Magnets, Clarendon Press, Oxford.
3. White, G. K., 1989, Experimental Techniques in Low-temperature Physics, Clarendon Press,

- Oxford.
4. Barron, R. F., 1999, *Cryogenic Heat Transfer*, Taylor and Francis
 5. Flynn, T. M., 1997, *Cryogenic Engineering*, Marcel Dekker, New York.
 6. Chang, H. M., Choi, Y. S. and Van Sciver, S. W., 2002, Optimization of operating temperature in cryocooled HTS magnets for compactness and efficiency, *Cryogenics*, Vol. 42, pp. 787-794.
 7. Sato, A., Miki, T., Matsumoto, F., Nagai, H., Wada, H., Ito, S., and Kawate, Y., 1999, Development of superfluid-cooled cryostat for 1 GHz NMR spectrometer, *Proceedings of ICEC 17*, pp. 613-616.
 8. Wang, L., Wu, H., Li, L. K., Green, M. A., Liu, C. S., Li, S. Y., Jia, L. X., and Virostek, S. P., 2008, The helium cooling system and cold mass support system for the MICE coupling solenoid, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 18, pp. 941-944.
 9. Chang, H. M., Choi, Y. S., Van Sciver, S. W., and Choi, K. D., 2003, Cryogenic cooling system of HTS transformers by natural convection of subcooled liquid nitrogen, *Cryogenics*, Vol. 43, pp. 589-596.
 10. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley and Sons
 11. Hassani, A. V. and Hollands, K. G. T., 1990, Conduction shape factor for a region of uniform thickness surrounding a three-dimensional body of arbitrary shape, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 492-495.
 12. Bender, C. M. and Orszag, S. A., 1978, *Advanced Mathematical Methods for Scientist and Engineers*, McGraw Hill.
 13. Choi, Y. S., Painter, T. A., Kim, D. L., Lee, B. S., Yang, H. S., and Miller, J. R., 2007, Conceptual design of current leads for a 21T FT-ICR magnet system, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 17, pp. 2228-2231.