

초전도 전자식용 전류도입선의 최적설계
Optimum Design of Current Lead

한 총 업
용 손 함* 서울 대

1. 서 론

1911년 수은의 초전도현상이 발견된 이래로 70년이 지난 지금은 여러가지 초전도체의 발견과 저온공학의 발달로 말미암아 여러분야에서 초전도현상을 이용한 전기기기가 나타나고 있다. 일본에서는 시속 500km 이상의 자기부상열차의 시험에 성공했고, 여러 공업선진국에서는 초전도 발전기, 에너지 저장장치, MHD 발전용 전자석이 제작되고 있다. 이러한 초전도 응용전기기에서 주역을 맡고 있는 것은 고자계의 전자석이다. 이미 말한 MHD 발전용뿐만 아니라 자기 분손물 제거장치, 엔엠알 진단기 등에도 그 성능을 개선하기 위해서는 고자계의 전자석이 필요하다. 따라서 외국에서는 이 분야의 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 국내에서는 아직도 여기에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

초전도현상은 극저온에서 나타나는 현상이므로 전자석의 코일온도를 4.2K 이하로 유지해야한다. 이러한 극저온의 코일과 전원사이를 연결하는 것이 전류도입선인데 코일을 극저온 용기에 담아 열차단을 할 때 도입선에 의한 열전달 문제가 중요하다.

본 연구에서는 앞으로 제작할 소형 초전도 전자석에 부착되는 전류도입선의 열전달문제를 고려한 설계에 목적을 두었다.

2. 본 론

전류도입선의 설계에 있어서 가장 큰 목적은 주어진 전류에 대해서 증발하는 헬륨의 양 G를 최소로 하는 것이다. 증발량에 영향을 미치는 요소에는 여러가지가 있으나, 본 연구에서는 그림1과 같이 가장 간단한 모델인 반지름이 R인 원형 구리도선을 사용했기 때문에 설계에 필요한 요소는 길이 L과 반지름 R만이 된다.

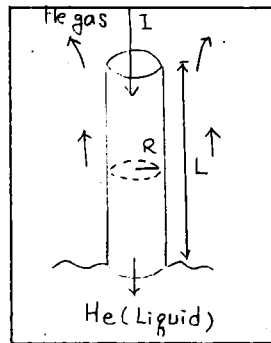


그림 1. 전류도입선의 모델.

그림2에서 전류도입선의 온도를 $T(x)$, 열을 지나는 헬륨가스의 온도를 $t(x)$ 라 두고, 단면적 A인 구리도선의 미소체적 Adx 에 대하여 단위시간당 표면을 통한 열량을 구했다.

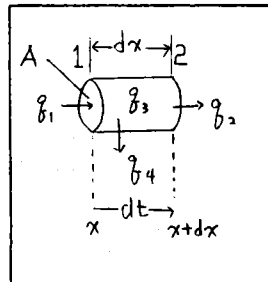


그림 2. 미소체적에서의 열평형

즉 단면1에서 $q_1 = -k(T) \frac{dT}{dx}$ (1) 이고, 단면2에서 $q_2 = -k(T) \frac{dT}{dx} |_{x+dx}$ (2) 이다. 여기서 k는 구리의 전기 전도도이다. 또 미소체적에서 주열은

$$q_3 = \frac{\rho(T) dx}{A} I^2 \quad (3)$$

이 된다. 여기서 ρ 는 구리의 고유저항이다.
 옆면적 $pdx(=2\pi Rdx)$ 를 통하여 데류에 의해 헬륨
 가스에 전달되는 열량은

$$q_4 = hp(T-t)dx \quad (4)$$

이다. 여기서 h 는 구리와 헬륨가스 사이의 데
 류에 의한 열전달계수이다.

전류도입선에서는 복사에 의한 열전달은 무시될
 수 있으므로 전류도입선의 열평형식은 다음과 같
 다.

$$A \frac{d}{dx} (k(T) \frac{dT}{dx}) - hp(T-t)dx + \frac{\rho I^2}{A} = 0 \quad (5)$$

데류에 의하여 전달되는 열량 q_4 는 도입선을
 사코 흐르는 헬륨가스가 얻은 열량과 같으므로 헬
 륨가스의 비열을 C_p , 단의시간당 증발하는 헬륨
 양을 $G(g/sec)$ 라 하면,

$$hp(T-t) = G C_p \frac{dt}{dx} \quad (6)$$

이다. 도입선의 아래끝을 통하여 헬륨속으로
 전도되어 나가는 열량은 헬륨을 기화시키는 데만
 쓰인다고 가정하면

$$k A \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = G C_L \quad (7)$$

이라고 볼 수 있다. 여기서 C_L 은 헬륨의 기화열
 이다. 또 도입선의 아래끝은 액체헬륨에 닿아 있
 으므로

$$T(0) = 4.2K, \quad t(0) = 4.2K$$

이다.

구리의 열전도도와 고유저항은 온도에 따라 변화
 하고, 열전달계수는 온도, 헬륨의 속도 및 기라
 계수, 구리의 표면상태등 여러가지 요소에 의해
 지배되는 양이다. 본 연구에서는 모든 물리적 계
 수를 온도에 무관한 상수로 보았다.²⁾ 즉, 헬륨에
 대하여

$$C_L = 23 J/g \quad (9)$$

$$C_p = 5.2 J/g.K \quad (10)$$

$$h = 0.023 J/sec.cm^2.K \quad (11)$$

이고, 구리에 대하여

$$\rho = 5 \times 10^{-7} \quad \Omega \cdot cm \quad (12)$$

$$k = 10 \quad W/cm.K \quad (13)$$

이다.

변수를 규정화(normalization)하기 위하여

$$x^* = \frac{x}{L}, \quad T^* = T/300, \quad t^* = t/300 \quad (14)$$

으로 두고 식(5)-(8)을 다시 쓰면

$$\frac{300 A k}{L^2} \frac{dT^*}{dx^*} - 300hp(T^*-t^*) + \frac{\rho I^2}{A} = 0 \quad (15)$$

$$ph(T^*-t^*) = \frac{G C_p}{L} \frac{dt^*}{dx^*} \quad (16)$$

$$T^*(0) = 0.014, \quad t^*(0) = 0.014 \quad (17)$$

$$\frac{300 A k}{L} \frac{dT^*}{dx^*} \Big|_{x^*=0} = G C_L \quad (18)$$

식(14)-(17)을 Runge-Kutta 방법으로 풀기
 위해서는 $T^*(0)$ 의 값이 필요하지만 알수가 없다.
 그래서 또 하나의 조건이 필요한데 여기서는 도입
 선의 외쪽 끝의 온도 $T(tip)$ 를 사용했다. 도입선
 의 외쪽 끝은 공기중에 노출되어 있고, 도선으
 로 연결되어 있으므로 상온(300 K)의 무한한 열
 원에 접촉하고 있다고 볼 수 있으므로 $T(tip)$ 를
 300K로 보았다.

식(14)-(17)을 풀기 위해서 우선 증발량을 G
 가정한다. 그리고 $T^*(1)=1, t^*(1) \leq 1$ 의 조건
 을 만족할 때까지 G 값을 바꾸어가며 계산을
 한다.

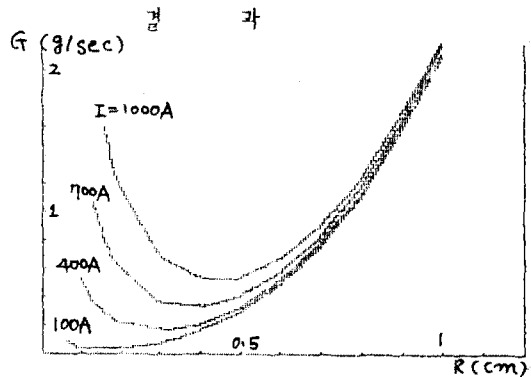


그림3. 반경에 따른 증발량의 변화

그림3은 일정한 전류와 길이에서 반경 R 따른
 증발량 G 의 변화를 나타내고 있다. 여기서 G
 를 최소로 하는 반경 R_{min} 을 구할 수 있다.

반경이 R_{min} 보다 작아지거나 커지면 증발량이 증가하게 되는데, 전자의 경우는 저항이 커져 주열열에 의한 증발량이 많아지고, 후자의 경우는 열전도에 의한 열 유입량이 많아지기 때문이다. 또 전류 I 를 매개변수로 한 증발량을 살펴보면 다음의 사실을 알 수 있다. 단면적이 좁을 때는 주열열에 의한 증발량이 전체 증발량에서 차지하는 비율이 크므로 전류의 크기에 많은 영향을 받는다. 그리고 단면적이 클 때는 전도열에 의한 증발량의 비중이 크므로 전류의 크기에 별 영향을 받지 않는다. 또 각 전류에서의 최소 증발량과 그때의 반경은 전류 I 에 비례한다.

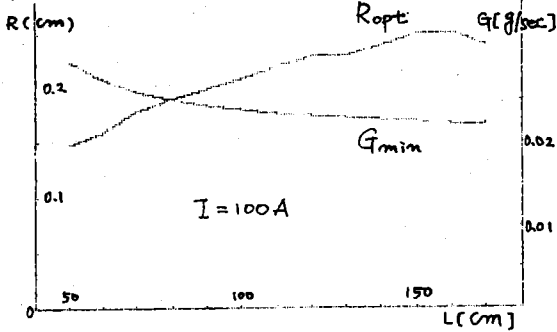


그림4. 길이에 따른 최소증발량의 변화

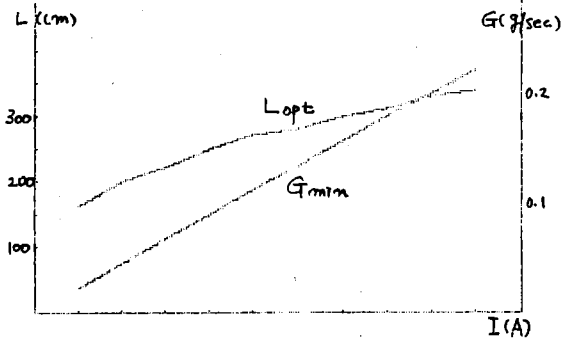


그림5. 전류에 따른 증발량의 변화

그림4에서는 $I=100A$ 에서 전류도입선의 길이를 변수로 하여 G 의 최소값과 그때의 반경을 표시했다. G_{min} 이 가장 작을때의 R 과 L 이 전류 $I=100A$ 에서의 최적치수(L_{opt}, R_{opt})이다.

그림5에서는 최적치수에서의 증발량과 L_{opt} 을 I 를 매개변수로 하여 나타냈다. 모두 전류 I 에 비례함을 알 수 있다.

마지막으로 전류도입선의 각 위치의 온도와 헬륨 가스의 온도 분포를 L 을 매개변수로 하여 나타냈다. L 이 L_{opt} 에 가까워질수록 도입선과 헬륨의 온도차가 적어짐을 알 수 있다.

$L = L_{opt}$ 일때 온도차가 없어진다. 다시 말해서 냉각기체가 흡수할 수 있는 최대의 열량을 흡수

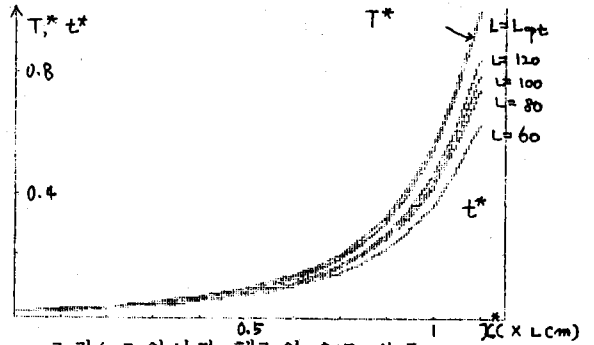


그림6.도입선과 헬륨의 온도 분포

했다고 볼 수 있으므로 가장 효율적이라고 할 수 있다.

3. 결론 및 검토

주어진 전류에서 헬륨의 증발량을 최소로 하는 길이와 반경을 동시에 구할 수 있었고, 단면적과 전류에 따른 증발량의 변화도 예상한 결과와 잘 일치했다.

앞으로의 연구과제는 전기전도도 및 열전도도를 온도의 함수로서 다루고, 실험을 통하여 열전달 계수를 구하며, 도입선의 모양까지 고려한 설계를 하는 것이다.

4. 참고 문헌

1. J.P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill, 1981.
2. N.INAI, Temperature Distribution along a Gas Cooled Cryogenic Wire, Cryogenics 9, 115,(1969)
3. C.K. Tsao, Power Loss and Temperature Distribution of a Gas-cooled Cryogenic Current Lead, Cryogenics 14,601,(1974)
4. J.M. Lock Optimization of Current Leads into a Cryostat, Cryogenics 9,438,(1969)