2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

과부하 전류인입선 개발을 위한 수치해석

Numerical Analysis for the Development of Overloaded Current Lead

이영주, 김양수, 오영국, 김웅채, 박영민, 진승보, 박주식, 이경수

한국기초과학지원연구원
대전광역시 유성구 어은동 52

요 약

합금을 이용한 전류인입선에 전류를 공급하면 구리로 제작된 것에 비해 온도가 상승하는 속도가 느리기 때문에 보다 더 오랫동안 안정적으로 과부하 전류를 공급할 수 있다. 이와 같은 특징을 이용하면 전류공급 시간이 공급하지 않는 시간에 비해 상대적으로 짧게 펄스운전을 하는 초전도 자석 시스템의 경우 구리로 제작된 기존의 전류인입선을 이용하는 것 대신 합금을 재료로 과부하 전류가 흐르도록 전류인입선을 이용하면 냉매인 헬륨가스의 소모량 및 헬륨 냉동기의 부하를 줄일 수 있다. 본 논문에서는 수치해석을 통하여 황동 합금을 재료로 과부하 전류가 공급되도록 디자인 된 전류인입선의 열/전기적 안정성 및 펄스운전을 하는 초전도 시스템에서의 응용 가능성에 대하여 연구분석 하였다.

Abstract

When a current flows through a vapor-cooled current lead made of metal alloys, the speed of temperature rise is much less than that of the current lead made of highly conductive copper. Thus, for the case of current lead made of metal alloys, it can be operated much more safely with relatively low cryogenic loads compared to conventional copper current lead in the over-loaded current. In this paper, numerical analysis results about the heat loads and operational safeties of brass current lead were presented.

1. 서 론

초전도 자석과 외부전원을 연결하기 위해서는 상온(~300 K) 과 저온(~4 K) 사이의 온도분포를 갖는 전류인입선(CL; Current Lead)이 필수적이다. 이 CL 의 상온부분으로부

터 유입되는 전도열(conduction heat)이 초전도자석에 영향을 주지 않도록 차단하기 위해 필요한 액체헬륨 또는 초임계 헬륨(supercritical helium)과 같은 냉매의 양은 전체 초전도자석 시스템에 필요한 냉매의 상당 부분을 차지하기 때문에 냉매량을 최소화 하여 냉동기의 부하를 줄이는 새로운 CL 개발이 하나의 새로운 연구분야로 주목 받고있다 [1~3]. 특히, 플라즈마 핵융합 연구장치 및 초전도자석의 임계전류 테스트 등과 같은 응용분야에 필요한 10 kA 이상의 전류수송능력을 갖는 동시에 필요한 냉매량이 적은 CL 개발이 주된 관심의 대상이 되고있다. 헬륨냉동기의 부하를 줄이는 방안으로 초기에 개발된 CL 은 전기전도도가 좋은 고 순도의 구리 선으로 제작되었으며 저온으로 냉각된 헬륨가스를 이 구리 선으로 흘려보내 냉각시키는 VCL(vapor-cooled current lead)이었다. 이 VCL 을 이용할 경우 단순히 초전도자석에 연결되는 부위만을 냉매로 냉각하여주는 CCL(conduction-cooled current lead)에 비하여 열 부하(heat load)를 1/47 로 줄이는 효과를 보게 된다 [4]. 구리나 금속합금과 같은 도체에 비하여 열전도도가 매우 낮은 고온초전도체를 기존의 VCL 하단에 부착하여 제작된 HTS(high temperature superconducting) CL 의 경우, 기존의 VCL 에 비하여 제작이 어렵고 고가의 장비이기는 하지만 열 부하를 10 배 이상 줄일 수 있기 때문에 10 kA 급 이상의 HTS CL 연구개발이 활발히 진행되고 있다 [5].

전류가 흐르는 시간에 비하여 흐르지 않는 시간이 상대적으로 긴 초전도 자석 시스템의 경우 HTS CL 에 비해 제작이 용이하고 단가가 낮으며 구리 VCL 에 비해 열 부하가 작은 OCL(overloaded current lead)을 개발하여 이용할 수 있다 [1][2]. VCL 의 열 부하 q 는 CL 에 흐르는 전류가 낮을 때 다음과 같은 전류 의존성을 갖는다 [6].

$$q = q_0 + aI^p \tag{1}$$

여기서, q_0 는 전류 I 가 영(0)일 때의 열 부하, a 는 비례상수 이고, 주울 열(Joule heat)이 I^2 에 비례하므로 지수 p 값은 2 에 가까운 값을 갖게 된다. 단위전류 당 열 부하 Q 를 다음과 같이 정의하면,

$$Q \equiv q / I = q_0 / I + aI^{p-1} \tag{2}$$

$I \equiv I_{opt} = [q/(a(p-1))]^{1/p}$ 일 때 이 Q 값이 최소가 됨을 알 수 있으며 이때의 전류 I_{opt}

를 최적전류(optimum current)라고 하며 최적 열 부하 Q_{opt} 는, 액체헬륨의 잠열(latent heat ~ 20.6 J/g)로 환산하였을 때, CL 재질에 관계없이 약 1 W/kA 이다 [4][7]. CL 에 흐르는 전류가 정해지면 CL 디자인은 $(IL/A)_{opt}$ 값에 의해서 이루어진다. 여기서, L 과 A 는 각각 CL 의 길이와 단면적이다. 고 순도 구리 CL 의 경우 $(IL/A)_{opt}$ ~ 2.5 × 10^7 A/m 이며 이 값은 CL 을 구성하고 있는 재료의 RRR(residual resistance ratio)에 따라 달라진다. 일반적으로 RRR 이 클수록 $(IL/A)_{opt}$ 값이 크기 때문에, CL 의 길이와 최적전류가 같을 경우 CL 의 직경이 작아짐을 알 수 있다 [4]. $(IL/A)>(IL/A)_{opt}$ 가 되도록 CL 을 디자인 하여 최적으로 디자인된 CL 과 같은 전류(I_{opt})가 흐르면 CL 의 온도가 상온보다 높이 증가하며 CL 의 최대온도 $T_{\max}$ 는

$$f_{ov} \equiv (IL/A)/(IL/A)_{opt} \tag{3}$$

와 같이 정의되는 과부하 상수(overloading factor) f_{ov} 의 영향을 받게 된다 [1]. 일단 CL 이 제작되면 L 과 A 가 정해지므로 f_{ov} = I/I_{opt} 이 되며, f_{ov}>1 인 경우 CL 의 $T_{\max}$ 는 상온(300 K)보다 높게 증가하며 f_{ov} 값이 너무 크면 CL 이 손상된다. CL 이 손상되지 않는 범위 내에서 f_{ov}>1 이 되도록 제작된 CL 을 OCL(overloaded current lead)라고 한다. 구리로 제작된 CL 의 경우 f_{ov} 가 1 보다 커짐에 따라 $T_{\max}$ 값이 급격히 상승하므로 OCL 로는 적당하지 않고 이보다 RRR 이 작은(1~2) 황동(brass)과 같은 합금으로 OCL 을 제작하면 f_{ov}>2 가 되어도 $T_{\max}$ 값이 그리 높지않아 안정적으로 CL 에 전류를 흘릴 수 있다.

초전도 자석 시스템에 전류가 흐르는 시간을 t_i, 전류가 흐르지 않는 시간을 t_0 라 할 때, $t_i << t_0$ 인 경우, OCL 을 이 초전도 자석 시스템에 이용하면 기존의 구리로 제작된 VCL 을 이용하는 것 보다 열 부하를 상당히 줄일 수 있다. $\boldsymbol{t}_i \equiv t_i/(t_0+t_i)$ 와 같이 정의하면, CL 의 평균 열 부하 $\tilde{q}$ 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다 [1].

$$\tilde{q} = q_0(1-\boldsymbol{t}_i) + q_i\boldsymbol{t}_i \tag{4}$$

$\boldsymbol{t}_i$<<1 인 경우, $\tilde{q} \approx q_0(1-\boldsymbol{t}_i) \approx q_0$ 로 근사 됨을 알 수 있다. 따라서, q_0 및 $\boldsymbol{t}_i$ 값이 작을수록 평균 열 부하 $\tilde{q}$ 를 줄일 수 있게 된다. q_0 와 최적전류에서의 q_{opt} 값의 비 q_0/q_{opt}

값은, 구리로 제작된 CL 인 경우 약 0.61 이며 RRR 값이 구리에 비해 작은(1~2) 황동(brass)과 같은 합금 재료로 제작된 CL 의 q_0 / q_{opt} ~ 0.35 이다. 뿐만 아니라, 황동 CL 은 f_{ov}>1 인 OCL 이므로 전류가 흐르지 않을 때의 열 부하는 $q_0' = q_0 / f_{ov}$ 가 된다. 따라서, $t_i = 0$ 일 때의 구리 CL 과 황동 OCL 의 $\tilde{q}$ 값 비는 0.35/0.61/ $f_{ov} \approx$ 0.57/ f_{ov} 이 됨을 알 수 있다. $f_{ov} = 2$ 인 경우를 예로 들면, 이 값은 약 0.29 가 되므로 t_i <<1 인 초전도 자석 시스템에서 기존의 구리 CL 대신 황동 OCL 을 이용하면 약 70% 가까이 냉동기 부하를 줄일 수 있게 됨을 알 수 있다 [1].

본 논문에서는 t_i <<1 인 초전도 자석 시스템에서 이용될 OCL 개발을 목적으로 황동 및 구리 재질의 VCL 에 대한 수치해석 결과를 분석하였다.

2. 수치해석

VCL 의 시간 및 위치에 대한 온도분포는 다음과 같은 미분방정식을 풀어 구해낼 수 있다 [4].

$$c_p^c(T)d(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[k(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] - \frac{\dot{m}c_p^g(T)}{A}\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{r(T)I^2}{A^2} \quad (5)$$

여기서, 각각의 파라미터들은 다음과 같다.

$k(T)$: 도체의 열전도도(W/m/K), $r(T)$: 도체의 비저항($\Omega\, m$), $c_p^c(T)$: 도체의 열용량(J/kg/K), $d(T)$: 도체의 밀도(kg/ m^3), $c_p^g(T)$: 냉매 헬륨 가스의 열용량(J/kg/K), $\dot{m}$: 헬륨 냉매의 유량(kg/s).

도체의 열전도도는 Wiedemann-Franz 법칙에 따라 도체의 비저항과 $k(T) = L_0 T / r(T)$ 와 같은 관계가 있다. 여기서, $L_0 = 2.45 \times 10^{-8}$ $(W\Omega / K)$ 는 Lorentz 상수이다. CL 의 열부하 q 및 CL 양단에 걸리는 전압 V 는 다음과 같은 방정식으로 주어진다.

$$q = \dot{m}h_L = kA\left.\frac{dT}{dz}\right|_{z=0} \quad (6)$$

$$V = \frac{I}{A}\int_0^L r\,dz \qquad (7)$$

방정식 (6)에서 h_L = 20.6 J/g 은 액체헬륨의 잠열이다. 방정식 (6)을 정리하면 다음과 같은 단위가 없는 변수 및 파라미터들로 구성된 미분 방정식이 유도된다 [8].

$$\tilde{c}_p^c(J)\tilde{d}(J)\frac{\partial J}{\partial t'} = \tilde{k}(J)\frac{\partial^2 J}{\partial x'^2} + \frac{\partial \tilde{k}(J)}{\partial J}\left(\frac{\partial J}{\partial x'}\right)^2 - a\tilde{c}_p^g(J)\left.\frac{\partial J}{\partial x'}\right|_{x'=0}\frac{\partial J}{\partial x'} + b\tilde{r}(J)\tilde{I}^2(t') \qquad (8)$$

위 식에서 각각의 변수 및 파라미터들은 다음과 같다 [8].

$$x' = x/L \;;\; t' = \frac{t}{\frac{c_p^c(T_0)d(T_0)}{k(T_0)}L^2} \;;\; J(x',t') = T(x,t)/T_0 \;;\; \tilde{I}(t') = I(t)/I_{opt} = f_{ov}(t') \;;$$

$$\tilde{k}(J) = k(T)/k(T_0) \;;\; \tilde{r}(J) = r(T)/r(T_0) \;;\; \tilde{c}_p^c(J) = c_p^c(T)/c_p^c(T_0) \;;$$

$$\tilde{c}_p^g(J) = c_p^g(T)/c_p^g(T_0) \;;\; \tilde{d}(J) = d(T)/d(T_0) \;;\; a = \frac{c_p^g(T_0)T_0}{h_L} \;;\; b = \frac{r(T_0)z_0^2}{k(T_0)T_0} \;;$$

여기서, $z_0 = (IL/A)_{opt}$ 이고, T_o = 4.2 K 는 $x = 0$ 일 때의 온도이며 $x = L$ 일 때의 온도 T_{top} = 300 K 와 함께 일정한 값으로 고정되는 경계조건(boundary condition)을 사용하여 온도분포를 계산하였다. 유한 차분(finite difference)법 및 최소 자승법(least square method)을 이용하여 위 방정식 (8)을 수치해석 하여 위치 및 시간에 따른 CL 의 온도분포를 계산하였다.

CL 에 흐르는 전류가 일정할 때의 온도분포는 방정식 (8)의 좌변 항을 영(0)으로 놓고 계산하면 된다. CL 의 초기 온도는 $T = T_0 + (T_{top} + T_0)(x/L)$ 로 놓고 CL 을 100 등분하여 유량의 변화율 $|d\dot{m}/\dot{m}|$ 가 10^{-8} 이하로 포화 될 때까지 반복계산 하였다. 전류가 일정할 때의 온도분포가 계산되면 이 값을 초기 온도로 설정하여 전류가 시간의 함수로 주어지는 경우의 온도 변화를 계산할 수 있게 된다.

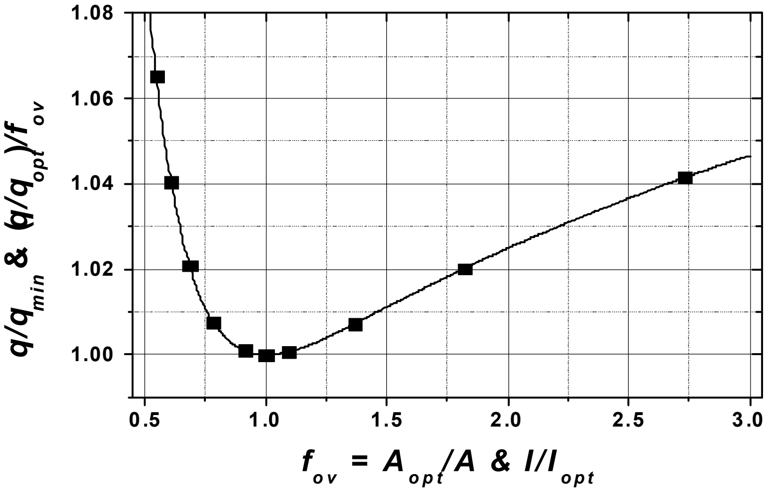
3. 결 과

그림 1 ~ 그림 4 및 표 1 은 전류가 일정할 때의 수치해석 결과를 보여주고 있다. CL 의 디자인 값 $(IL/A)_{opt}$ 을 찾기 위해서 CL 의 I 와 길이 L 을 고정하고 단면적 A 에 따른 열 부하 q 를 계산하였다. 그림 1 에서 보는 바와 같이 특정 단면적 A_{opt} 에서 q 는 최소값 $(q/I)_{\min} \approx 1.08\, W/kA$ 을 갖게 됨을 확인할 수 있다. 이때의 $(IL/A)_{opt}$ 는, 황동 CL 의 경우, $1.83\times10^{6}\ A/m$ 로 계산된다. 방정식 (3)에서 알 수 있듯이 I 와 길이 L 이 일정할 때의 f_{ov} 는 A_{opt}/A 가 되고 q 를 최소값 $q_{\min}$ 으로 나누어준 $q/q_{\min}$ 는, CL 의 재료가 결정되면, 다른 파라미터들에 관계없이 f_{ov} 만의 함수로 주어진다. 마찬가지로 CL 의 L 과 A 가 고정되면 f_{ov} 는 I_{opt}/I 가 되고 $(q/q_{opt})/f_{ov}$ 가 $q/q_{\min}$ 와 완전히 일치함을 확인할 수 있다. 이는 CL 의 재료가 결정되면, CL 의 온도분포, 전압, 및 규격화된 열 부하량 q/q_{opt} 은 모두 f_{ov} 에 의해서 결정됨을 의미한다.

표 1. 전류가 일정할 때 수치해석 결과. $q(W)$ 값은 CL의 길이 L 이 1.5 m일 때의 결과임.

f_{ov}	0	1	2	3
$q(W)$	3.75	10.83	22.2	34
$q/I(W/kA)$	-	1.08	1.11	1.13
$a(f_{ov})$	-	1	1.03	1.05
$T_{\max}(K)$	300	300	568	1213
$V(mV)$	0	81	218	486

그림 2 는 RRR ~ 100 인 구리 CL 과 RRR ~ 1.71 인 황동 CL 의, L 과 A 가 일정할 때, f_{ov} 에 따른 q/q_{opt} 의 변화를 나타내고 있다. $I = I_{opt}$ 일 때 구리 및 황동 CL 의 $Q = q/I$ 값은 1.07 W/kA 와 1.08 W/kA 로 거의 비슷한 결과를 얻었다. 그러나, $I = 0$ 일 때의 q/q_{opt} 는 구리 CL 의 경우(0.66 W/kA)에 비해 황동 CL 의 경우(0.38 W/kA) 더 작은 결



.

그림 1. f_{ov}**에 따른** $q/q_{\min}$ **및** $(q/q_{opt})/f_{ov}$ **의 변화 그래프. 사각형 심볼은** $q/q_{\min}$ **이고 실선은** $(q/q_{opt})/f_{ov}$ **이며 이 두 값들이 완전히 일치하는 결과를 보여주고 있다.**

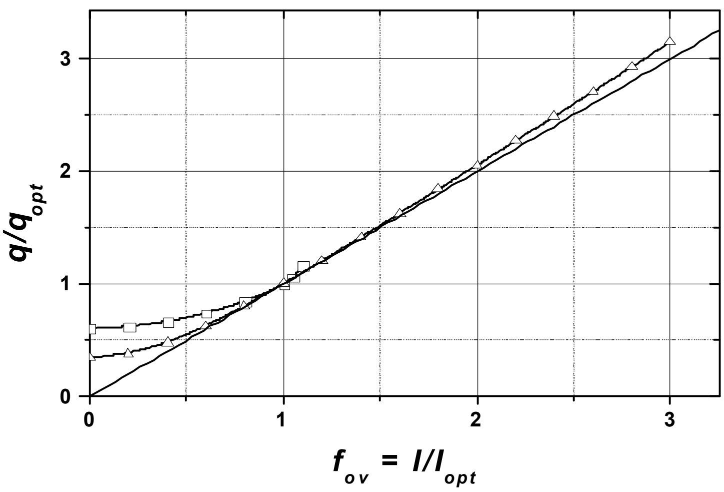


그림 2. q/q_{opt} **대** f_{ov} **그래프. 사각심볼 라인과 삼각심볼 라인은 각각 구리 CL과 황동 CL의** q/q_{opt}**를 나타낸다. 직선 라인은 최적화된 CL의 이상적인 냉각라인(ideal cooling line)을 표시하고 있다.**

과를 얻었다.

황동 CL 의 x/L에 따른 온도분포는 그림 3 에 나타나 있다. f_{ov} < 1 인 경우, x/L = 1 에서의 dT/dx > 0 이었고 f_{ov} = 1 인 경우는 영(0)이었으며, f_{ov}가 1 보다 커지면서 dT/dx 가 음의 값을 갖게 되며 그 절대값이 커짐을 알 수 있다. f_{ov} > 1 인 경우, x/L ~ 0.8 근처에서 온도가 최대(T_{mzx})가 되었다. 그림 4 는 구리 및 황동 CL 의 f_{ov}의 변화에 따른 T_{mzx} 변화를 보여주고 있다. f_{ov} < 1 인 경우 두 가지 CL 모두 T_{mzx} = 300 K 이었으나 구리 CL 은 f_{ov} 이 1.1 정도만 되어도 CL 이 녹아 끊어질 정도로 T_{mzx} 값이 상승한 반면 황동 CL 은 f_{ov} > 2 영역에서도 CL 이 손상될 정도로 T_{mzx} 가 상승하지 않음을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, OCL 개발의 근본 목적인 CL 에 전류가 흐르는 상대적인 시간 t_i << 1 인 초전도자석 시스템에서 황동 CL 에 과부하 전류를 공급할 경우 T_{mzx} 는 이보다 더 낮은 상태에 놓이게 된다. 방정식 (5)에서 온도 증가에 영향을 주는 항은 우변의 세 번째 항이다. 우변의 처음 두 항을 무시하면,

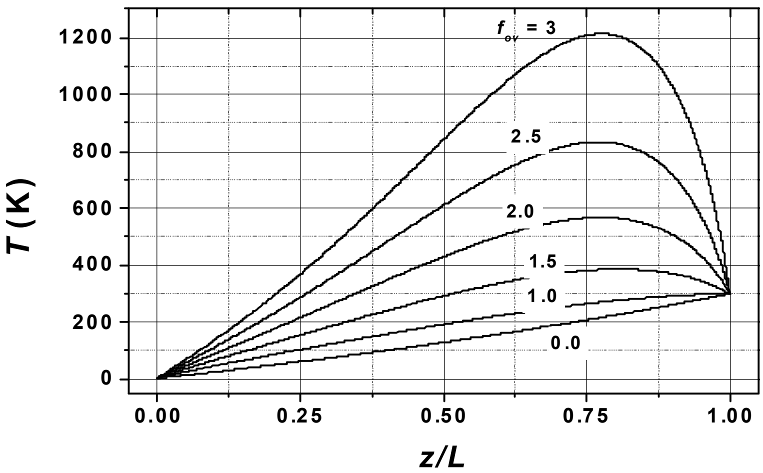


그림 3. CL의 위치 x/L에 따른 온도분포.

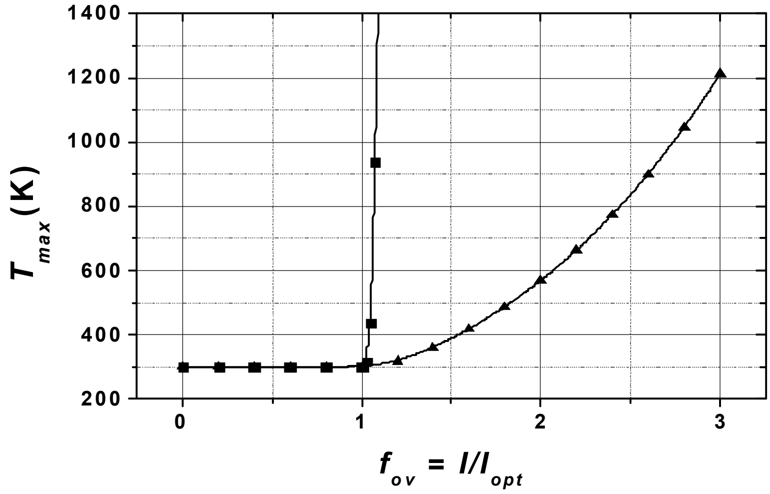


그림 4. f_{ov}**에 따른** $T_{\max}$ **의 변화. 사각심볼 라인 과 삼각심볼 라인은 각각 구리 CL과 황동 CL의** $T_{\max}$ **이다.**

$$Ac_p^c(T)\boldsymbol{d}(T)\frac{dT}{dt} = \boldsymbol{r}(T)I^2 / A^2 \qquad (9)$$

가 된다. $T > 300$ K**인 온도영역에서 도체의 밀도 및 열용량이 거의 변화가 없으며 금속 또는 합급의 비저항** $r(T)$ **는 다음과 같은 온도 의존성을 보인다**.

$$\boldsymbol{r}(T) = a + bT \qquad (10)$$

시 상수(time constant) $\boldsymbol{t}_s$ **를**

$$\boldsymbol{t}_s \equiv \frac{c_0 \boldsymbol{d}_0 L^2}{\boldsymbol{z}_0^2 f_{ov}^2} \qquad (11)$$

라고 정의하면 시간에 대한 온도 미분 dT / dt **는 다음과 같이 유도된다**.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{a}{b\boldsymbol{t}_s} + \frac{T}{\boldsymbol{t}_s} \qquad (12)$$

따라서, CL **의 온도는 다음과 같은 함수로 주어짐을 알 수 있다**.

$$T(t) = (T_0 + a / b)e^{t/\boldsymbol{t}_s} - a / b \qquad (13)$$

방정식 (11)에서 c_0와 d_0는 상온(300 K)에서의 열용량 과 밀도를 의미한다. (11)식 및 (13)식에서 알 수 있듯이 t_s가 클수록 온도는 천천히 증가하며 t_s는 CL 길이의 제곱에 비례하고 f_{ov}^2에 반비례한다. 플라즈마 핵융합 초전도자석에 응용되는 CL의 길이는 1~2 미터 이므로 L = 1.5 m로 놓으면 f_{ov}가 2 일 때 t_s = 104 분, f_{ov}가 3 일 때 t_s = 46 분으로 계산된다. KSTAR PF 초전도자석을 예로 들면, 전류를 공급하는 시간이 최대 6 분 정도에 불과하다. 전류를 공급하는 시간이 t = 10 분인 경우일지라도, T_0 = 300 K라 가정하면, f_{ov}가 2 와 3 일 때 T_{mzx}는 각각 334 K와 380 K로 계산되며 이는 섭씨 온도로 각각 61 도와 107 도에 해당된다. 이 온도에서는 CL이 손상될 우려가 전혀 없으므로 황동 CL의 경우 f_{ov} > 3 으로 디자인 하여도 CL의 온도 면에서 안정적임을 기대할 수 있다.

주어진 f_{ov}에 대하여 시간에 따라 온도가 어떻게 변화하는지를 살펴보기 위하여 방정식 (8)을 다시 해석하였으며 그 결과를 그림 5 , 그림 6 및 표 2 에 나타내었다.

표 2. 10분간 전류를 공급하였을 때의 결과. $q(W)$값은 CL의 길이 L이 1.5 m인 경우임.

f_{ov}	1	2	3
$q(W)$	9.96	19.33	29.33
$q/I(W/kA)$	.996	.967	.974
$T_{\max}$	300	300	352
$T'_{\max}$	308	333.5	380.2
$V(mV)$	75.1	160	267
$t_s(\min.)$	69	56	48
$\Delta P(mbar)$	1.1	9.6	16.5

그림 5 는 f_{ov} = 3 으로 전류를 공급하였을 때 시간에 따른 CL 양단의 전압 변화를 나타낸다. CL의 평균 온도 및 전압은 f_{ov} > 1 인 경우 $1-\exp(-t/t_s)$에 비례하여 증가함이

알려져 있다 [3]. $f_{ov}>>1$ 인 경우 시 상수 t_s 는 다시 방정식 (8)과 같이 L^2 에 비례하고 f_{ov}^2 에 반비례하게 된다. 그림 5 의 실선은 방정식 (7)및 (8)을 이용하여 CL 양단의 전압을 계산한 결과이며 점선은 $1-\exp(-t/t_s)$ 함수로 근사한 결과인데 잘 일치함을 보여주고 있다. f_{ov} 가 2 와 3 일 때의 시 상수는 표 2 에 나타낸 바와 같이 56 분과 48 분이었다. 그림 5 에서 알 수 있듯이 t_i << 1 인 경우, CL 의 온도 및 전압은 포화 되지않고 꾸준히 증가하므로 t_i 시간동안 전류를 공급하고 $1-t_i$ 시간동안 전류공급을 하지않는 펄스운전을 주기적으로 지속하면 $I=0$ 일 때 온도가 감소하는데 걸리는 시간 역시 t_i 의 영향을 받게 되기 때문에 점차 CL 의 온도가 상승하게 되는 것을 예측할 수 있다. 그림 6 은 이와 같이 10 분 동안 f_{ov} = 3 로 전류를 공급하고 50 분 동안 전류 공급을 차단하는 펄스운전을 계속할 때 온도가 최고가 되는 x/L = 0.9 위치에서의 온도변화를 보여주고 있다. 이 경우, t_i = 1/6 ≈ 0.17 이며 온도가 점진적으로 증가하기는 하나 반복 횟수가 증가하면서 온도의 증가 폭이 점차 줄어드는 것을 볼 수 있다. 펄스 운전 주기 t_p 와 시 상수 t_s 의 상관관계를 살펴보면 이와 같은 결과를 쉽게 이해할 수 있다. t_s > t_p 인 경우, 마치도 CL 에 교류전류를 흘리는 것과 같은 효과로 인해 CL 의 온도가 점차 상승하게 되며 이와 같은 온도상승은 t_i = 1 일 때 최대가 된다. 그러나, 그림 6 에서와 같이 t_s (48 min.) < t_p (60 min.)인 동시에 t_i << 1 인 경우 이 같은 교류전원 효과가 사라져 펄스운전 시의 온도 상승이 미미하게 되는 것으로 해석할 수 있다 [8]. 또한, 표 2 에서 알 수 있듯이 펄스운전 시 CL 의 최고온도 T_{mzx} 는 방정식 (9)로 근사한 경우의 최고온도 T'_{mzx} 보다 낮음을 확인할 수 있다.

이와 같이 f_{ov} > 1 인 OCL 의 장점은 펄스운전을 하는 초전도 자석 시스템에서 기존의 구리 CL 에 비해 헬륨 냉동기 부하를 상당히 줄일 수 있다는 데에 있다. 펄스운전 시 시간에 대한 평균 열 부하 $\tilde{q}$ 는 방정식 (4)를 이용하여 구할 수 있으며 구리 CL 의 $\tilde{q}$ 로 규격화 시킨 황동 OCL 의 상대적인 열 부하 $\tilde{q}_{br}/\tilde{q}_{Cu} \equiv (q_{br}/q_{cu})_{avg}$ 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

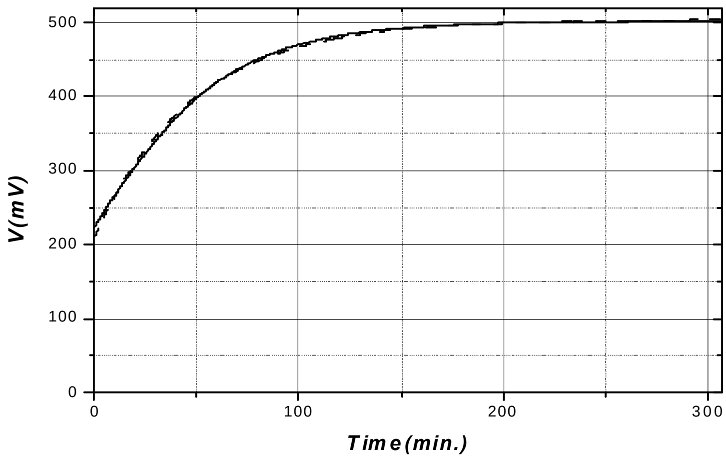


그림 5. f_{ov} **= 3일 때 시간에 따른 CL의 전압변화. 실선은 방정식 (7)을 이용하여 구한 결과이며 점선은** $1-\exp(-t/t_s)$ **함수로 플롯(plot) 한 결과이다.**

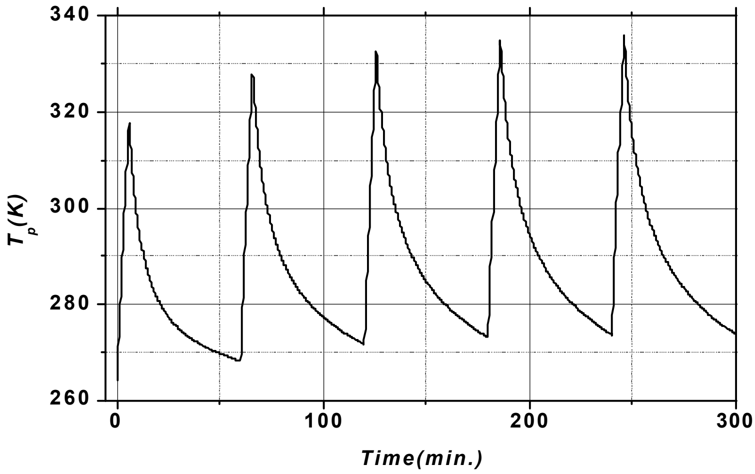


그림 6. 시간에 따른 T_p **변화 그래프.**

$$(q_{br}/q_{Cu})_{avg} = \frac{q_{i,br}t_i + q_{0,br}(1-t_i)}{q_{i,Cu}t_i + q_{0,Cu}(1-t_i)} = \frac{a(f_{ov})t_i + b(1-t_i)/f_{ov}}{t_i + g(1-t_i)} \qquad (14)$$

여기서,

$$a(f_{ov}) = q_{i,br} / q_{i,Cu} = q_{i,br} / q_{opt} \; ; \; b / f_{ov} = q_{0,br} / q_{opt} = 0.35 / f_{ov} \; ; \; g = q_{0,Cu} / q_{opt} = 0.61 \quad (15)$$

이다. $a(f_{ov})$ 값은 표 1 에 나타나 있고 그림 7 은 f_{ov} = 1, 2, 3 일 때 $(q_{br} / q_{cu})_{avg}$ 와 t_i 사이의 관계를 보여주고 있다. $f_{ov} > 1$ 인 경우, $t_i = 1$ 일 때 $(q_{br} / q_{cu})_{avg} > 1$ 이지만 t_i 가 1 보다 작은 초전도 자석 시스템에서는 최적의 f_{ov} 값이 존재함을 확인할 수 있다. 예를 들면, $0.7 < t_i < 1$ 영역에서는 f_{ov} = 3 인 경우보다 f_{ov} = 2 인 경우에 $(q_{br} / q_{cu})_{avg}$ 가 더 작다. 즉, t_i 가 작아짐에 따라 $(q_{br} / q_{cu})_{avg}$ 가 최소가 되는 최대의 f_{ov} 역시 증가함을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 $t_i < 0.1$ 인 초전도 자석 시스템에서는 f_{ov} = 3 으로 전류를 공급할 경우 헬륨 냉동기 부하를 약 70 % 이상 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 반면, f_{ov} 를 증가시키면 헬륨 유량이 증가하여 CL 의 압력차 ΔP 가 증가하게 된다. 포이즐리(Poiseuille) 법칙을 이용하여 구한 ΔP 값을 구하였고 이를 표 2 에 나타내었는데, f_{ov} = 3 인 경우 ΔP ~ 16.5 mbar 로 적어도 f_{ov} = 3 까지는 ΔP 가 문제가 되지 않음을 확인할 수 있었다 [9].

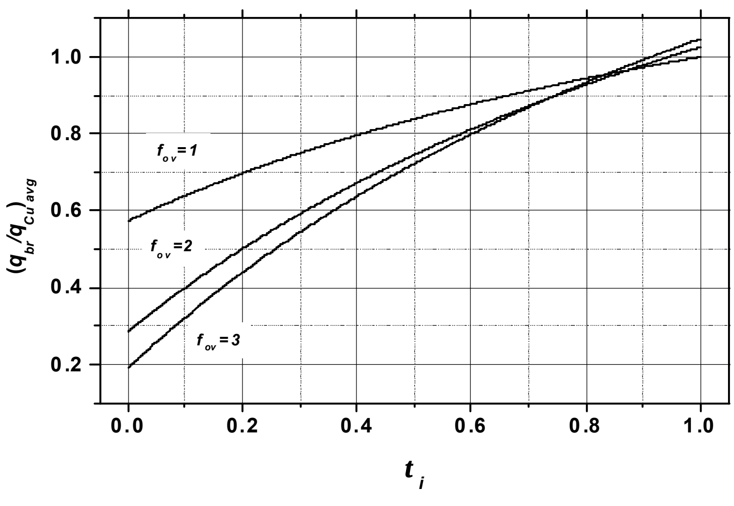


그림 7. $(q_{br} / q_{cu})_{avg}$ 대 t_i 그래프.

4. 결 론

전류가 공급되는 시간에 비해 공급되지 않는 시간이 매우 짧은 초전도 자석 시스템에서 황동 OCL 의 이용 가능성을 수치해석을 통하여 검토하여 보았다. 주어진 전류공급 시간에 따라 최적의 과부하 상수로 전류를 공급할 경우 CL 의 열 부하가 최소가 됨을 입증하였고 주기적인 펄스 운전에 따른 점진적인 온도 상승 효과는 전류공급 시간에 비해 CL 의 평균온도 및 전위차가 증가하는데 영향을 주는 시상수가 큰 시스템에선 미미하게 나타남을 보였다. 최적의 과부하 상수로 전류를 공급하는 것은 CL 의 온도분포, 과부하전류 공급 시 증가하는 압력차, 펄스운전 시나리오등을 고려하여 결정할 수 있을 것으로 결론지었다.

감사의 글

본 논문은 한국기초과학연구원의 “KSTAR 플라즈마 핵융합 연구” 프로젝트 연구성과 이다.

참고문헌

[1] A. V. Gavrilin and V. E. Keilin, “Overloaded Current Leads”, 15th Magnet Technology Conf. Proc., Beijing, China, pp. 1254-1257, 1997.

[2] A. V. Gavrilin et al., “Comparative Analysis of Design Options for Current Leads for Wendelstein 7-X Magnet System”, Paper TUPO3D2-14, 17th Int. Conf. on Magnet Technology Geneva, Sept. 24-28, 2001.

[3] Haigun Lee et. al., “Helium vapor-cooled brass current leads: experimental and analysis results”, Cryogenics No. 954, p1-5, 2001.

[4] M. N. Wilson, “SUPERCONDUCTING MAGNETS”, CLARENDON PRESS OXFORD, 1983.

[5] R. Heller et al., "Development Program of a 60 kA Current Lead Using High Temperature Superconductors", IEEE Trans. on Mag., vol. 7 No. 2, pp. 692-695, 1996.

[6] K. Yoshida, "Current Leads", ITER DDD 1.1-1.3 Appendix J, pp. 136-143, 1998.

[7] Y. Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues", Plenum Press, 1994.

[8] E. Barzi, "Gas/Vapor-Cooled Binary Current Leads Copper Part", TD-98-026, 1998.

[9] S. W. V. Sciver, "Helium Cryogenics", Plenum Press, New York and London, 1986.