

0.5MJ 초전도 펄스 마그네트의 최적화 설계에 관한 연구

Optimum Design Study on 0.5 MJ-Class Superconducting Pulse Magnet

羅 浣 洙* · 韓 松 曄** · 黃 錫 永*** · 李 承 院§ · 洪 元 杓§§
 (Wan-Soo Nah · Song-Yop Hahn · Seuk-Young Hwang · Sung-Won Rhee · Won-Pyo Hong)

요 약

본 논문에서는 0.5 MJ용량의 초전도 펄스 마그네트의 새로운 설계 기법을 제시하였다. 설계의 개념은 0.5MJ 에너지 용량을 갖는 조건하에서, 초전도 선재의 양을 최소화시키는 방향으로 마그네트 형상을 결정하는 것이며, 여기에 따라서 형상 계수에 의존하는 마그네트 설계 파라메타들이 확정된다. 확정된 설계 파라메타들의 환경 조건하에서 냉각 채널이 설계되어지고, 마그네트의 환경에 따른 선재의 기계적 특성 저하가 검토된다. 이와같이 설계되어진 마그네트는 기존의 설계방법에 의한 결과에 비하여 상대적으로 낮은 자장과 균등한 자장 분포를 가지며, 따라서 필요선재의 양을 감소 시키면서 선재에 기계적인 부담을 경감시킬수 있었다.

Abstract- In this paper, a new design method for superconducting pulse magnet is presented. Given energy storage capacity, magnet shape parameters are determined to minimize superconducting material quantity. Once the shape parameters are determined, cooling channel is designed and degradation characteristics are confirmed. According to the proposed magnet design concept, relatively uniform and low field distribution is obtained. Therefore, both the quantity of superconducting material and the mechanical load over magnet are reduced.

1. 서 론

전력 계통 안정화용 초전도 에너지 저장 장치 (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES)는 고효율성(90%이상), 고속응성(수십 msec)등으로 최근 크게 각광 받고 있다. [2] · [9]

*正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 博士課程
 **正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 ***正 會 員 : 檀國大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 §正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 名譽教授 · 工博
 §§正 會 員 : 韓電技術研究院 前任研究員 · 工博
 接受日字 : 1990年 4月 11日
 1次修正 : 1990年 7月 7日

이에 따라서 본 논문에서는 0.5MJ 에너지 저장 용량을 갖고, 고속 에너지 충방전이 가능한 초전도 펄스 마그네트의 설계에 대한 연구가 수행되었다. 본 마그네트에 사용되는 초전도 선재의 설계에 대한 연구는 기 수행 되었으며[9]여기에서는 설계된 선재를 적용하여, 기존의 설계방법과 다른 방법으로 마그네트를 설계하는 과정이 연구되어 있다.

마그네트 설계 개념은 0.5MJ 에너지 용량을 갖는 조건하에서, 초전도 선재의 양을 최소화하는 방향으로 마그네트 형상을 결정하고, 도출된 형상 계수로 부터 결정되는 마그네트 설계 파라메타들이 정격 동작점에서 냉각 채널의 냉각 능력, 기계적 성질들을 만족하는지를 확인하는 과정등을 거쳐서 최종적인 설계 파라메타들을 결정한다. 이와 같이 설계되어진 마그네트는 기존의 설계방법에 의한 결과에 비하여 상대적으로 낮은 자장과 균등한 자장 분포를 가지며, 따라서 필요선재의 양을 감소시키면서, 선재에 기계적인 부담을 경감시킬수 있었다. 설계된 초전도 마그네트는 차기 연구에서 제작, 실험할 예정이다.

2. 일정 에너지 용량을 갖는 초전도 마그네트의 설계

초전도 에너지 저장 장치에 사용되는 마그네트의 형상은 솔레노이드(Solenoid)형으로서, 그림 1과 같은 마그네트 보아(Bore) 중심의 자장을 B_o , 내벽 중심의 자장을 B_w 로 하고, 형상 계수를 $\alpha = a_2/a_1$, $\beta = b/a_1$ 으로 정의하면, 보아 중심의 자장 B_o 는 다음과 같이 표현될 수 있다. [5] · [6] · [9].

$$B_o = J a_1 F(\alpha, \beta) \tag{1}$$

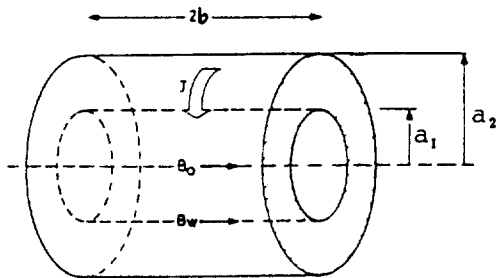


그림 1 SMES에 사용되는 마그네트의 형상
Fig. 1 Magnet Shape for SMES

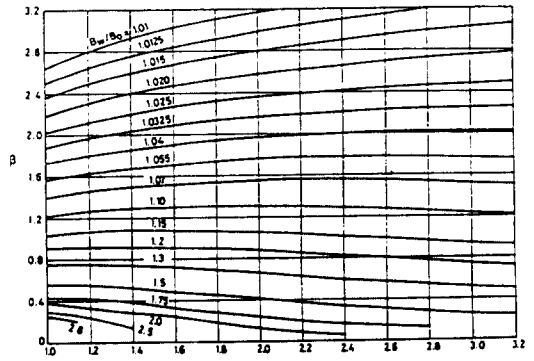


그림 2 α, β 에 따른 B_w/B_o 의 곡선
Fig. 2 Curves for B_w/B_o with respect to α and β

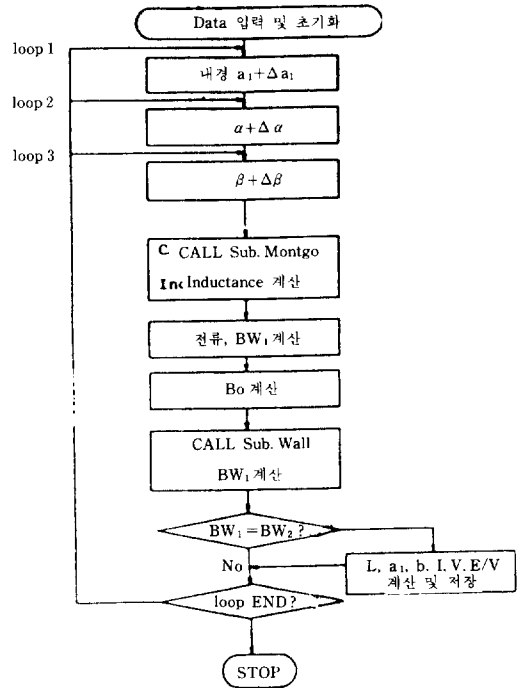


그림 3 프로그램의 흐름도
Fig. 3 Flowchart of Program

단,

$$F(\alpha, \beta) = \mu_0 \beta \ln \left[\frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}} \right]$$

여기서 J 는 Space Factor를 고려한 전류 밀도 (Overall current density)이고, $F(\alpha, \beta)$ 는 마그네트 형상 요소(Shape factor)를 말한다.

한편, 내벽 중심에서의 자장은, 극좌표를 사용

하여 Legendre Polynomial 의 멱 급수 (Power series) 로 표현될 수 있고 [5] 그림 2는 α, β 에 대한 B_w/B_0 의 곡선을 보여준다.

기존의 마그네트의 설계는 보통, 보아 중심 자장 B_0 가 주어지고 이것을 구현하기 위해 전류 밀도와 내벽 중심의 자장 B_w , 그리고 형상 계수 α, β 들을 조절하는 것이 일반적인 방법이다. [5] · [6] 물론 이 때, B_w 에서 전류 밀도가 임계점을 초과하지 않아야 한다.

그러나 본 설계의 목적은 일정 에너지 용량을 갖는 초전도 마그네트 설계이고, 이러한 경우에 지금까지는 주어진 내경의 크기에서 α, β 및 전류 밀도 등을 변화시키면서 경험적인 방법으로 여러 번 반복하여 설계하여 왔다. 이런 경우에 그 설계 결과에서 주어진 조건에 맞는 방법으로서의 설계로 변경시키려면, 변경시키려는 방향의 설정, 즉 마그네트 형상의 변화, 내경의 크기 변화 등의 방향 설정에 어려움이 따르게 된다. 따라서 본 논문에서는 최소의 선재 양으로써, 주어진 에너지 저장 능력을 갖춘 초전도 마그네트를 설계하는데 필요한 데이터 베이스 (Data base) 구축을 위한 알고리즘을 개발하였다. 그림 3은 알고리즘의 흐름도이다. 여기에서 인덕턴스 L 은 다음 식과 같이 계산된다.

$$L = a_1 N^2 \theta(\alpha, \beta) \tag{2}$$

단, N : 권선수

단위는 헨리 (Henry) 이고, $\theta(\alpha, \beta)$ 는 인덕턴스 계산에 사용되는 형상 계수이고, [5] · [6] · [7] 그림 4는 이 형상 계수의 그래프이다. 또 선재의 부피 V 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = 2\pi a^2 (a^2 - 1) \beta \lambda \tag{3}$$

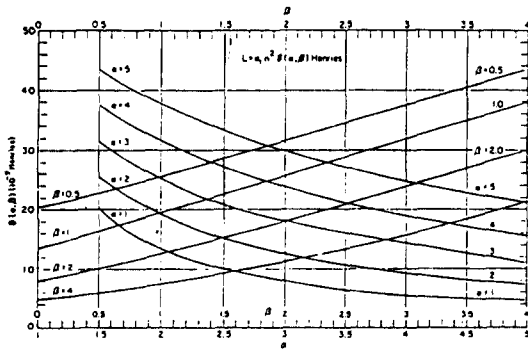


그림 4 α, β 의 변화에 따른 $\theta(\alpha, \beta)$ 의 그래프
Fig. 4 Graph of $\theta(\alpha, \beta)$ with respect to α, β

단, λ : 코일 단면적당 선재 단면적비

선재 부피 당 저장되는 에너지는 E/V 가 되므로, E/V 가 최대가 되는 a_1, α, β 등을 찾는 것이 본 설계의 목적이다. 흐름도의 상단부에서 설계에 사용되는 도체의 크기, 각 설계 상수 ($a_1, \beta_0, \alpha, \beta$) 의 초기치, 최종치, 분할 횟수 등의 데이터가 입력되며, 다음에 a_1, α, β 등이 한 스텝씩 증가하면서, 각종 설계 조건이 설계 조건에 만족되는지를 검사하여 맞는 것만 설계치로 선택된다. 먼저 주어진 α, β 에 대하여 인덕턴스를 계산하며, 이 서브루틴은 식 (2) 와 그림 4를 이용하며, Lagrange Interpolation을 이용하여 보간한다. 여기에서 구한 인덕턴스로 부터 전류 밀도를 구하고, 또 임계 자장 내 임계 전류 밀도 곡선 ($B-J$ Curve) 에서 부터 이 전류에 해당하는 내벽 중심 자장 B_{w1} 을 얻는다. 얻은 B_{w1} 의 타당성 확인을 위하여 식 (1) 에서 부터 B_0 를 구한 후 그림 2를 이용하여 B_{w2} 를 구한다. 여기에서도 상기와 같은 방법으로 보간하며, B_{w1} 과 B_{w2} 일치 유무를 비교하여 일치한 설계치는 실제 설계치로 선택된다. 선택된 데이터는 권선수, 선재 길이, 채적등이 계산되어 저서 출력 파일로 저장된다.

3. 사례 연구 I

위에서 개발된 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여, 오사카 대학에서 설계한 0.5MJ 펄스 마그네트의 경우 [8] (A안) 에 본 알고리즘 (B안) 을 적용시켜 본다.

표 1은 A안에서 설계된 각종 설계 파라메타와,

표 1 알고리즘의 적용 사례
Table 1 Application of Algorithm

	오사카 대학 설계치	본 알고리즘 적용 설계치
내 경	30 [cm]	40 [cm]
외 경	49 [cm]	49 [cm]
높 이	25.5 [cm]	34.84 [cm]
동 작 전 류	1976 [A]	2848 [A]
점 적 율	0.525	0.525
권 선 수	952 [Turn]	615 [Turn]
선 재 길 이	1358 [m]	860 [m]
인 덕 턴 스	0.264 [H]	0.127 [H]
중 심 자 계	5 [T]	3.9 [T]
저 장 에 너 지	515 [KJ]	515 [KJ]

상기 알고리즘에 의하여 추출된 B안에서의 설계 파라미터들을 비교하고 있다. B안의 적용시에는 A안에서의 선재와 같은 선재 조건을 이용하며 접적율도 같게 취한다. 또 임계 전류 대 임계 자장 곡선은 A안 설계치의 정격점에서의 마진폭 만큼 낮은 곡선을 사용한다. 이와 같은 가정은 양 쪽 설계 조건을 일치시키기 위하여 필요하다.

표 1에서 볼 수 있듯이 마그네트 외경은 두 설계치가 같은 값을 가지며, 이것은 A안 B안 공히 같은 저온용기를 상용할 수 있음을 의미한다. 한편 사용 선재량은 860[m]로 37% 감소 했으며, 따라서 선재당 높은 에너지 밀도로 마그네트가 설계됐음을 알 수 있다. 중심 자계는 5[T]에서 3.9[T]로 낮아지며, 따라서 동작 전류점을 높일 수 있으며, 이것은 초전도 선재의 용량을 극대로 사용하는 것을 뜻한다. 마그네트 형상은 A안에 비하여 축방향으로 길어지게 되며 코일 두께는 얇아진다. 이것은 A안에 비하여 상대적으로 자장이 균일해졌음을 의미한다. 이런 형상 변화에 따른 설계 파라미터의 변화 의미는 다음장에서 언급한다.

4. 사례연구 II

여기에서는 기 수행된 연구에서 [9] 설계된 선재 사양을 이용하여 0.5MJ 용량의 초전도 마그네트의 형상을 결정한다. 알고리즘 적용시에 이용되는 임계 자장 대 임계 전류 특성(B-J곡선)은, 실제 값보다 여유를 준 곡선을 이용하여야 한다. 이런 여유폭은, 보통 저온 안정 이론에서 추출이 되며, 동작점에서의 선재 단위 면적당 발열량에 따라서 안정 기준이 결정된다. 여기서는 단위 면적당 발열량이 1[Watt/cm²] 기준인 CCM(Critical Current Margin)을 적용한다. [3] · [9]

$$\alpha_j = \rho_{cu} I_{op}^2 / \lambda P A_{cu} (T_{ch} - T_b) = \alpha_o i^2 \quad (4)$$

- 단 i : 동작 전류와 임계 전류와의 비
- ρ_{cu} : 구리의 비저항
- h : 열 전달 계수
- P : 선재 주위 길이
- A_{cu} : 구리 면적
- T_{ch} : 주어진 자장에서의 임계 온도
- T_b : 4.2[K]

윗 식에서 α_o 및 α_j 는 각각 선재 안정 계수 및 동작 안정 계수를 치칭하며, 어느 일정 선재 안정 계수에 대하여 동작 안정 계수는 동작 전류를 감소시킴으로써 원하는 안정도를 얻을 수 있음을 나

타내고 있다. 식(4)에 CCM 이론을 적용하면, 5[T]하에서 동작 전류 밀도는 약 1,000[A]가 된다. 또한 이런 여유 폭에 의하여 기결정된 선재 설계 파라미터들의 안정도도 향상되는 효과를 가져온다.

위와 같은 조건하에서 설계 알고리즘을 적용한 결과, 본 연구에서 사용되는 선재 적용 시에는, 내경 반지름이 12-30[cm]일 경우에 0.5MJ의 에너지 저장에 가능한 마그네트가 설계될 수 있다는 것을 알 수 있다. [9] 이것은 내경 반지름 a_1 이 12[cm]이하의 경우에는 0.5MJ용량의 솔레노이드형 초전도 마그네트를 제작 할 수 없다는 것을 의미하는 것은 아니다. 본 결과는 초전도 선재의 특성, 그 중에서도 임계 전류와 임계 자장 특성 곡선을 이용하였고, 초전도 마그네트의 최대 자장에 대하여 최대 전류가 흐를 때만을 상정하여 계산할

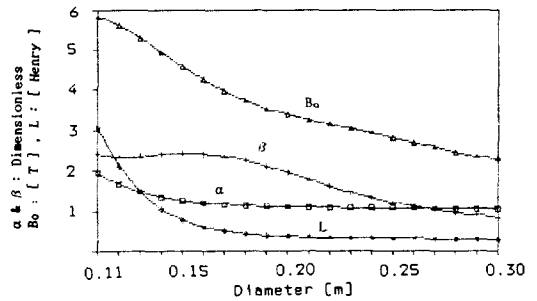


그림 5 마그네트 직경에 따른 α, β, L, B_o 의 변화
Fig. 5 Variation of α, β, L, B_o with respect to Magnet Diameter

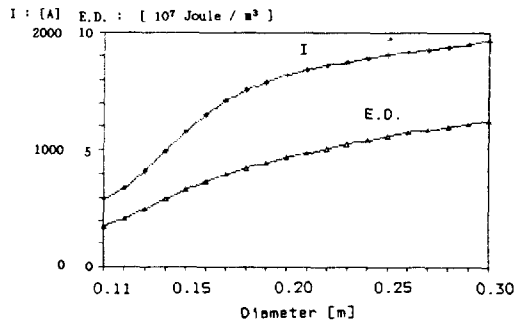


그림 6 마그네트 직경에 따른 전류 및 에너지 밀도의 변화
Fig. 6 Variation of Current and Energy Density with respect to Magnet Diameter

결과이다. 즉 이런 상정 없이 초전도 마그네트를 설계할 때에는 상기와 같은 제한은 일어나지 않는다. 그러나 그런 경우는 초전도 선재의 용량(Capacity)을 최대한 이용한 경우가 아니기 때문에 제외되어도 무방하다.

그림 5 및 그림 6은 선재 당 에너지 밀도가 최대인 경우 여러가지 설계 파라메타들을 마그네트 직경의 변하여 도시한 것이다. 제시된 그래프는 결과 데이터를 회축을 6차 다항식으로 회귀(Regression) 시킨 것이다. 본 그래프에서 볼 수 있듯이 선재당 에너지 밀도는 반경이 커질수록 증가하고 있음을 보이고 있고, 거기에 따라서 흐르는 전류 밀도도 증가하고 있음을 나타내고 있다. 반면 인덕턴스는 작아지게 된다. 이것은 반경이 클수록 최대 자장 B_w 가 작아져서 더 많은 전류를 흘릴 수 있기 때문이라고 분석될 수 있다. 저장 에너지는 인덕턴스에 비례하므로 인덕턴스가 감소하더라도, 흐르는 전류를 많이 흐르게 할 수 있으면 더욱 더 선재당 에너지 밀도가 커지게 된다. 즉 선재의 길이가 짧아지게 된다. 이와 같은 결과는 마그네트를 구성하고 선재가 초전도 선재라는 데에 그 이유가 있다. 즉 자장의 세기에 대하여 흐르는 전류가 제한을 받기 때문이다. 따라서 이런 제한성이 없는 일반 선재의 경우에는 위와 같은 특성이 해당되지 않는다. [11]

본 설계에서는 결과 데이터 중에서 선재당 에너지 밀도도 충분히 높고, 또 실험실 규모의 극저온 용기 제작에도 용이한 크기를 고려하여 내경의 반지름이 24[cm]이고, $\alpha=1.11$, $\beta=0.94$, $L=0.42$, $I=1552[A]$, $B_o=3.10[T]$, $B_w=3.7[T]$ 의 설계치를 선택하였다. 그러나 이렇게 선택된 사양

표 2 0.5펄스 마그네트의 사양

Table 2 Specifications of 0.5MJ Class Superconducting Magnet

내경	48[cm]	α	1.104
외경	52.98[cm]	β	1.035
높이	49.7[cm]	채널 폭	1.5[mm]
권선 형태	층간 권선	층당 권선수	142[Turn]
층수	8층	총권선수	1,136[Turn]
선재 길이	1,802[m]	전류	1,550[A]
점적율	0.514		
B_o	3.13[T] : 설계치	3.10[T] : FEM	
B_w	3.6[T]	3.55[T]	
인덕턴스	0.43[H]	0.422[H]	
저장 에너지	0.517[MJ]	0.507[MJ]	

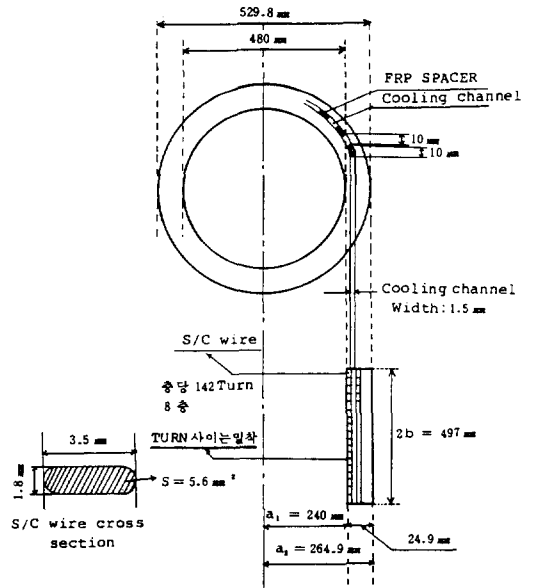


그림 7 초전도 코일의 단면도
Fig. 7 Cross Sectional View of Superconducting Magnet

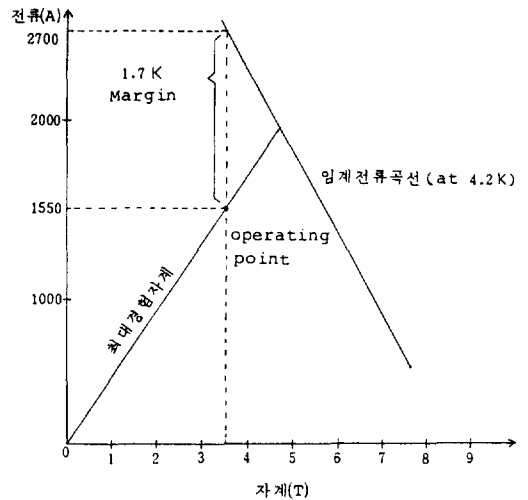


그림 8 부하 특성 곡선
Fig. 8 Load Line Characteristic

은 실제로 권선할 때 발생하는 오차 때문에 약간의 수정이 불가피하다.

표 2는 수정후에 최종 결정된 0.5MJ 펄스 마그네트의 사양을 나타낸다. 또 그림 7은 마그네트의 단면도를 보여준다. 권선법은 층간 권선 방식으로

권선하고 총당 142턴, 8층으로 구성되고 따라서 총 권선수는 1136이 된다. 층과 층 사이는 1.5[mm] 두께와 약 10[mm]의 길이를 갖는 스페이서(Spacer)채널이 구성된다. 이와 같이 설계된 마그네트의 정격 동작점은 1550[A]일 때 3.55[T]이고, 그림 6은 이를 나타낸다. 본 설계의 결과를 확인하기 위하여 유한 요소법은 이용하여 수치 해석적으로 정격 전류가 흐를 때 가장 에너지와 자장의 세기등을 구하여 본 결과 인덕턴스, 자장 세기, 저장 에너지등에서 모두 1-2[%]오차 이내로 만족하였다. (표2 참조)

그림 8에서 볼 수 있듯이 동작점 3.55[T]에서 온도 여유는 약 1.7[K]이다. 이것은 구리의 양과 관계없이 초전도체 자체의 온도 여유로서, 흐르는 전류를 임계 전류까지 사용하지 않고 1550[A]로 사용한 이유에 해당한다. 채널 크기는 마그네트 형상 결정 과정에서 추출된 결과로서, 이 채널 크기의 타당성을 검증하여야 하고, 이에 대해서는 다음장에서 기술한다.

5. 냉각 채널 설계

냉각 채널의설계는 형상과 크기를 결정하는 부분으로 나누어진다. 형상 측면에서는 수직 및 수평 채널로 대별되며, 본 설계의 경우는 냉매의 기포가 채널을 막는 현상(Vapour Locking) 측면에서 유리한 수직 채널에 해당한다. 냉각 채널의 냉각 능력은 채널 크기의 증가에 따라서, 포화되는 특성을 보이며, 그림 9는 채널 크기의 변화에 따른 열전달(Nucleate Heat Transfer) 변화 곡선을 보여준다. [9]·[10] 이 그래프는 Sydorik의 실

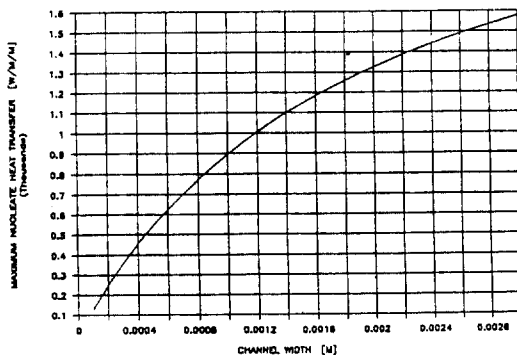


그림 9 채널 크기에 따른 열전달 그래프
Fig. 9 Heat Transfer with respect to Channel Width

험식 에서부터 얻을 수 있다. [10] 그래프에서 볼 수 있듯이 채널 크기의 증가에 따라서 냉각 능력이 포화 된다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 채널 크기는 포화점의 70~90%의 값을 취하며, 본 설계에서는 70%를 선택한다. 이 때 채널의 크기는 1.5mm가 되며, 냉각 능력은 0.115[W/cm²]으로서, 마그네트 펄스 동작 시의 평균 교류손실 0.043[W/cm²]은 냉각 채널에 의하여 완전히 제거될 수 있다.

6. 초전도 선재의 성능저하 검토

초전도 선재는 기계적 스트레스(Stress)에 대하여, 초전도 특성이 저하되는(Degradation)성질을 가지며, 이러한 특성 저하가 심해지면 마그네트 자체를 재설계 해야 한다. 보통 화합물계인 Nb₃Sn의 경우에, 이러한 한계가 설계에 주는 영향은 현격하고, 한편 합금계인 NbTi의 경우에는 상대적으로 영향을 심하지 않다. 본 마그네트의 경우, 마그네트 중심자장을 이용한 자기압력(Magnetic Pressure)을 기준으로 하여, 선재의 스트레스는 약 4.7×10⁷[Pa]이며, 이때 스트레인(Strain)은 0.3%미만이다. [1] 이 수치의 스트레인에 의한 임계전류, 임계자장, 임계온도의 특성저하는 NbTi의 경우에 무시할 만큼 작다. 한편 마그네트 직경과 초전도 선재 두께에 의해서 결정되는 벤딩 스트레인(Bending Strain)에 의한 특성저하역시, 본 설계수치에 의하면 거의 없다. [1]

7. 결 론

본 논문에서는 선재 단위길이당 최대 에너지밀도를 갖는 초전도 펄스 마그네트 설계 기법을 제시하였다. 제안된 알고리즘을 기준에 설계된 0.5 MJ급 초전도 펄스 마그네트[8]에 적용하여(사례 연구 I). 타당성을 확인하였고, 이어서 사례연구 II에서는 새로 설계된 초전도 선재의사양을 이용하여[9] 마그네트를 설계하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 마그네트의 형상은, 내부직경이 커질수록 선재당 에너지밀도가 커지며 코일 두께는 상대적으로 얇아지게 된다. 한편 이때 마그네트 보아 내부자장은 감소하면서, 자장의 균일성이 증가하게 된다. 이러한 결과는 비단 선재 단위길이당 최대 에너지밀도를 갖게하여, 선재길이가 감소될 수 있는 측면외에, 마그네트 중심자장을 감소시킬 수 있게 하여 자기 압력 및 교류손실을 감소시킬 수 있는 효과를 가져 온다. 이것은 초전도 선재의 기

계적 특성을 향상시켜 주는 결과를 가져오므로, 본 논문에서 제시된 초전도 마그네트 형상 방향 설정은 선재의 경제적 측면외에 기계적 측면에서 마그네트 성능을 향상시키는 방향과 부합한다. 본 연구에서 설계된 마그네트는 차기 연구에서 제작되어 시험 평가될 예정이다.

*본 연구는 한국전력공사 기술연구원의 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

[1] Simon Foner, "Superconductor Materials Science, Metallurgy, Fabrication and Applications", Plenum Press, New York, 1981.

[2] W. Hassenzahl, "Superconducting Magnet Energy Storage", IEEE, MAG-25, March, pp. 750~758, 1989.

[3] E.W. Collings, "Applied Superconductivity", Volume II, Plenum Press, 1986.

[4] T. Onishi et al, "Construction of A 400 KJ-Class Superconducting Magnet and Its

Characteristics", IEEE, MAG-17, September, pp. 1958~1961, 1981.

[5] D. Bruce Montgomery et al, "Solenoid Magnet Design", Robert E. Krieger Publishing Co, 1980.

[6] Wilson M.N., "Superconducting Magnet", Clarendon Press Oxford, 1983.

[7] F.W. Grover, "Inductance Calculations", D. Van Nostrand Co. 1946.

[8] 村上吉繁 外, "0.5 MJ 超電導 實驗裝置의 設計", 大板大學 超電導工學實驗 ヤンター報告, June, 1981.

[9] "0.5MJ 초전도 에너지 저장장치에 관한 연구", 한국 전력 공사 기술 연구원 연구 보고서, 1989.

[10] Stephen G. Sydoriak, "Hydrodynamic Theory Correlation for 72 Helium Evaporators", Low Temperature Physics Vol. 4, 1974.

[11] Cao Xiao-wen, "New Method of Selecting the Optimum Geometric Parameters in the Design of Superconducting Solenoids" Cryogenics, Vol 27, 1987