

초전도자석의 영구전류모드 운전시 초기자장감쇠

The Initial Magnetic Field Decay of the Superconducting Magnet in the Persistent Current Mode

배준한*, 심기덕**, 권영길**

Joonhan Bae*, Kideok Sim**, Youngkil Kwon**

Abstract : This paper deals with the initial magnetic field decay for a large scale superconducting magnet e.g. NMR/MRI magnet. The high resolution image can not be obtained during the periods of the initial field decay.

It is known that all superconducting materials have the property of diamagnetism. This diamagnetism is usually explained with the concept of screening current. We assumed that the existence of the screening current makes the current distribution in the superconducting wire non-uniform. And the current distribution in the energizing state is different from the distribution in the steady current state in the view of its pattern. The initial magnetic field decay is caused by the change of the current distribution between the energizing state and persistent current mode.

In this paper the theoretical analysis for the current distributions has been introduced for each state. The experiments have been carried out for various transport currents in order to verify the theoretical analysis. Through experiments, it was found that the initial field decay is small at the higher transport current.

Key Words : initial magnetic field decay, current distribution, persistent current mode.

1. 서 론

NMR, MRI 등은 고해상도의 영상을 얻기 위해 균일한 강자장을 발생시키는 초전도자석을 사용하며, 외부 전원에 의한 중심자장의 왜곡을 막기 위해서 영구전류모드로 운전한다. 이러한 영구전류모드 운전을 위해 $10^{-9} \Omega$ 정도의 낮은 접촉저항을 요구한다. [1]

그러나, 충전직후에 초전도체 내의 전류분포는 시변 충전전류에 의해 발생한 self-field 효과에 의해 불균일해진다. 이로 인해 초전도자석의 충전직후에 초기자장감쇠가 발생하며, 이 현상은 초전도체 내의 전류분포가 균일해 질 때까지 지속된다. [2]-[4]

* 정 회 원 : 한국전기연구소 영상응용연구그룹

** 정 회 원 : 한국전기연구소 초전도응용연구그룹

원고접수 : 2000년 04월 12일

심사완료 : 2000년 05월 23일

따라서, 본 논문에서는 초기자장감쇠를 설명하는 이론적 해석을 소개하고, 이를 바탕으로 실험을 통하여 현상을 검증하였다. 이를 통해 초기자장감쇠가 전송전류의 양과 관계가 있으며, 따라서 전류의 양을 조절하는 방법인 current-overshooting이 초기자장 감쇠를 억제하는데 기여할 수 있다는 것을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 해석

도체에 전류를 인가하면 모든 도체는 자신을 감싸는 원주형태의 self-field를 갖으며, 초전도체는 발생된 self-field가 초전도체 내부로 침투하는 것을 막기 위해서 차폐전류가 유도된다. 결국, 이 차폐전류에 의해 전송전류는 마치 구리도체에 교류전류를 인가시 발생하는 표피효과 현상과 유사하게 초전도체의 표면으로만 흐르게 된다. 따라서, 초전도체의 표면에는 J_c 만큼의 임계전류가 흐르며, 전송전류를 흘리기 위해 필요한 만큼만 자장이 투과된다. 더구나, 초전도체가 횡방향 자장에 노출된다면 초전도체의 내측으로 밀려들어오는 횡방향 자장을 막기 위해 차폐전류가 유도된다. 그 결과, 초전도체 내에는 전송전류와 차폐전류의 두가지 전류가 공존하게 된다.

한편, 초전도자석을 충전할 때에는 중심으로 갈수록 자장이 더 강해지기 때문에 이러한 자장의 차에 의해 초전도자석의 각 층에서 유도되는 차폐전류가 달라진다. 초전도자석은 한 개의 선으로 연속해서 권선되어 있고, 각 층에서 유도된 차폐전류는 서로 다르기 때문에 결국 초전도체 내의 전류분포는 불균일해진다.

이후 초전도자석이 영구전류모드로 돌입하게 되면 초전도체 내의 전송전류가 일정하게 되므로 차폐전류를 발생시킨 근원은 사라지게 되고 결국, 초전도체 내의 전류분포는 균일해진다. 이 과정에서 초전도자석의 중심자장은 감소하게 되고, 전류는 재분류된다. 전류분포를 균일하게 만들기 위해서 에너지 손실은 불가피하게 되어 초전도체 내에 약간의 전압강하가 발생하며, 이러한 전압강하는 외부에서는 측정될 수 없는 초전도체의 내부저항과 관계된다.

차폐전류의 감쇠는 전송전류와 직접적인 관계가 있으며, 이러한 전송전류와 차폐전류 간의 상호관계를 보이기 위해서 그림 1과 같이 변압기의 개념을 도입한 등가회로를 구성하였다. 초전도자석을 구성하는 초전도체 내에는 차폐전류와 전송전류의 두가지 전류가 존재할 것이며 이 두 전류의 경로는 기하학적으로 서로 쇄교될 수밖에 없다. 두 전류의 증가 혹은 감소시 자장의 변화를 통해 에너지를 주고받을 것으로 판단된다. 즉 변압기와 같은 동작 메커니즘을 갖을 것이다. [5]

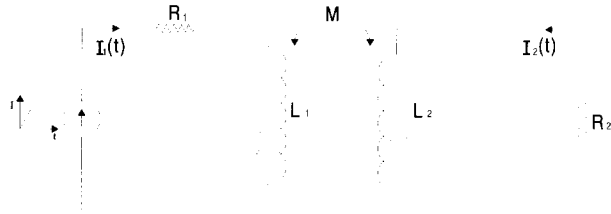


그림 1. self-field를 고려한 초전도체의 등가회로
Fig. 1. The equivalent circuit considering the self-field effect

회로에서 1차측은 전송전류에 관련된 loop이고, 2차측은 차폐전류에 관련된 loop로 구성되어 있다. 여기서, i_1 는 인덕턴스 L_1 과 접촉저항 R_1 을 갖는 1차측 회로에 흐르는 전송전류이다.

또한, i_2 는 인덕턴스 L_2 과 내부저항 R_2 을 갖는 2차측 회로에 흐르는 차폐전류이며, R_2 는 초전도체 내에 흐르는 차폐전류의 감쇠와 재분류를 보이기 위해 도입된 내부저항이다. M은 1차측과 2차측 회로간의 상호 인덕턴스이다.

그러나, 실제 시스템은 분포정수를 갖고, 권선간의 복잡한 자기결합을 하고 있기 때문에 본 논문에서 제시된 모델이 모든 실제 상황을 포함하고 있지는 않다.

여기서, $L_1 \gg L_2$ 라고 가정하면, $\tau_1 = L_1/R_1$, $\tau_2 = L_2/R_2$ 이고 결국, $\tau_1 \gg \tau_2$ 이 된다.

초기상태 $t=0$ 에서 $i_1 = I_{10}$, $i_2 = I_{20}$ 라 하면 그림 1의 등가회로의 해는 다음과 같이 얻어진다.[5]

$$i_1(t) = I_{10} \left[\left(1 + \frac{I_{20}M}{I_{10}L_1} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - I_{10} \left[\frac{I_{20}M}{I_{10}L_1} - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2\sigma}\right) \right] \right] \quad (1)$$

$$i_2(t) = I_{20} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2\sigma}\right) \quad (2)$$

여기서, 자기결합계수 $\sigma = 1 - M^2/L_1L_2$ 이고, 등가회로의 분포정수는 다음과 같이 표현된다.[5]

$$L_1 = \frac{\mu_0\pi h}{d^4} \left(\frac{r_e^4}{6} - \frac{r_i^4}{2} + \frac{2}{3} r_e r_i^3 \right) \quad (3)$$

$$L_2 = \frac{\mu_0\pi h d_f}{2d^3} (r_e^2 - r_i^2) \left(1 + \frac{I_t}{I_{ce}} \right) \quad (4)$$

$$M = \frac{\mu_0\pi h d_f}{2d^4} \left(\frac{r_e^3}{3} - \frac{2r_i^3}{3} - r_e r_i^2 \right) \left(1 + \frac{I_t}{I_{ce}} \right) \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{4\rho\pi h}{\lambda d^3} (r_e^2 - r_i^2) \left(1 - \frac{I_t}{I_{ce}} \right)^{-1} \quad (6)$$

여기서, h , r_i , r_e 는 각각 초전도자석의 높이 및 내외경이다. I_t 는 외부전원에서 초전도체에 인가된 전송전류이다. d , d_f 는 각각 초전도체와 필라멘트의 직경이며, I_{ce} 는 초전도체의 임계전류이다. 또한, ρ 는 자장감쇠를 초래하는 저항률로서 초전도체내체의 차폐전류의 재분배에 관여하는 값이며, λ 는 초전도체의 점적율이다. 식(4)와 식(5)을 이용하면 식(7)과 같이 전송전류가

일정해진 직후의 차폐전류의 감쇠시간이 얻어진다.

$$\tau_2 = \frac{\mu_0\pi h d d_f}{8\rho} \left(1 - \frac{I_t^2}{I_{ce}^2} \right) \quad (7)$$

식(7)으로부터 초전도자석의 충전동안에 발생한 self-field에 의해 유도된 차폐전류는 전송전류가 일정해지면 지수함수적으로 감소하고, 전송전류가 클수록 차폐전류의 감쇠속도는 증가한다.

2.2 특성 실험

제시된 이론적 해석을 검증하기 위해 시험용 초전도자석을 사용하였다. 사용된 초전도자석은 직경 0.6mm의 균일한 자장공간을 가지며, 영구전류모드운전을 위해 초전도 영구전류스위치를 가지고 있다.

표 1과 표 2는 각각 사용된 초전도체와, 초전도자석의 제원을 나타낸다. 전송전류를 변화시켜가면서 초전도자석의 초기자장감쇠가 측정되었고, 이를 통해 초기자장감쇠의 시정수를 계산하였다.

표 1. 초전도체의 제원

table 1. specifications of the superconductor

Composition	NbTi/Cu
Cu/nonCu ratio	1.3
Diameter of the conductor	0.6mm
Diameter of the filament	100 μm
Number of filaments	55
Effective length of the conductor	9,000m
Critical current (at 4.2K, 2T)	523A

표 2. 초전도자석의 제원

table 2. specifications of the superconducting magnet

Inner diameter	135mm
Outer diameter	205mm
Height	210mm
Diameter of the clear bore	100mm
Inductance	22H
Maximum central field	6T
Field drift in steady state	4ppm/hr

2.3 결과 및 고찰

그림 2는 영구전류모드가 시작된 직후의 초기자장감쇠이다. 영구전류모드는 초전도자석이 0.051 A/sec로 20,236 Gauss까지 자화된 직후부터 시작되어 5,000 초 동안 자장감쇠가 지속되었다. 측정된 자장값은 20,236 Gauss로 설계값 20,000Gauss 보다 높게 얻어졌다. 초기자장감쇠가 종료된 이후에는 초전도자석과 영구전류스위치간의 초전도 접촉저항에 의해 자장감쇠가 일어났다.

그림 3은 단위 전송전류당 발생자장의 관계를 나타낸다. 설계에서는 731 Gauss/A로 초전도자석이 충전될 것으로 예상했으나 실제 실험에서는 충전초기에 731 Gauss/A 보다 훨씬 큰 값이 측정되었다. 이것은 초전도자석의 내측에 전류분포가 집중되었기 때문이며, 중심자장은 전송전류가 낮을 때 전류의 불균일에 의해 더 많은 영향을 받는다.

그림 4는 전송전류의 증가에 따른 초전도체 내의 전

류분포 변화를 나타낸다. 충전초기 즉, 낮은 전송전류 구간(a)에서 차폐 전류의 영향은 전송전류가 많은 구간에 비해(b) 상대적으로 크게 나타난다. 이는 인가된 전송전류로부터 기대되는 중심자장값 보다 큰 중심자장 값을 얻게 한다. 그러나, 전송전류가 증가함에 상대적으로 차폐 전류에 의한 영향은 줄어들고 전송전류가 중심자장값을 지배하게 된다. 이는 실험결과 그림 3을 개념적으로 이해하게 해준다. 그림 5는 자장대 임계전류의 관계를 이용하여 얻어진 전송전류에 따른 임계전류이다. 그림 6은 초기자장감쇠의 시정수와 전송전류의 관계를 나타낸다. 충전초기의 전송전류는 0으로 가정하고, 식(3), 식(4), 식(5), 식(7)을 이용하면 그림 6과 같이 전송전류에 따른 초기자장감쇠의 시정수를 계산할 수 있다. 그림을 통해 전송전류가 낮은 영역에서는 전류가 증가함에 따라 초기자장감쇠의 시정수도 증가하지만 전송전류가 높은 영역에서는 시정수는 감소됨을 볼 수 있다.

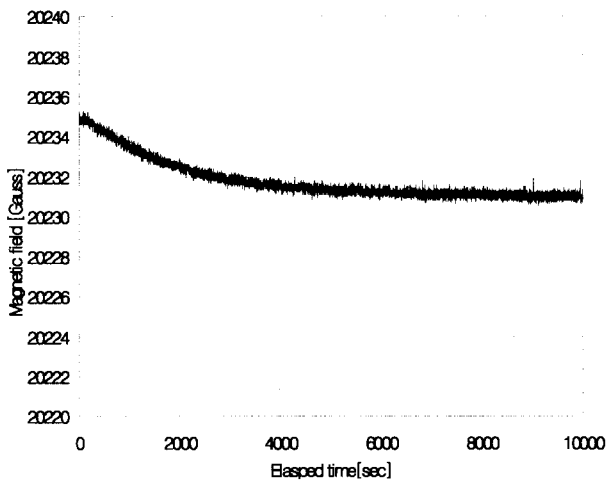


그림 2. 영구전류모드시 측정된 초기자장감쇠
Fig. 2. Observed initial magnetic field decay in a persistent current mode

표 3. 중심자장과 전송전류의 비
table 3. The ratio between magnetic fields and transport currents

전송전류 [A]	중심자장[gauss]	중심자장 ÷ 전송전류
0.1028	97.388	946.9
0.2114	180.479	853.7
0.3999	317.27	793.3
0.9992	751.26	751.9
2.0021	1492.27	745.4
10.0112	7338.4	733.0
15.0041	10986.9	732.2

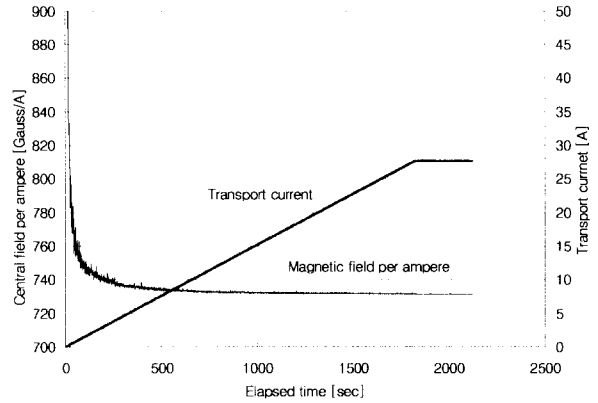


그림 3. 전송전류 증가에 따른 단위 전류당 자장변화
Fig. 3. Magnetic field per ampere during the increasing transport current

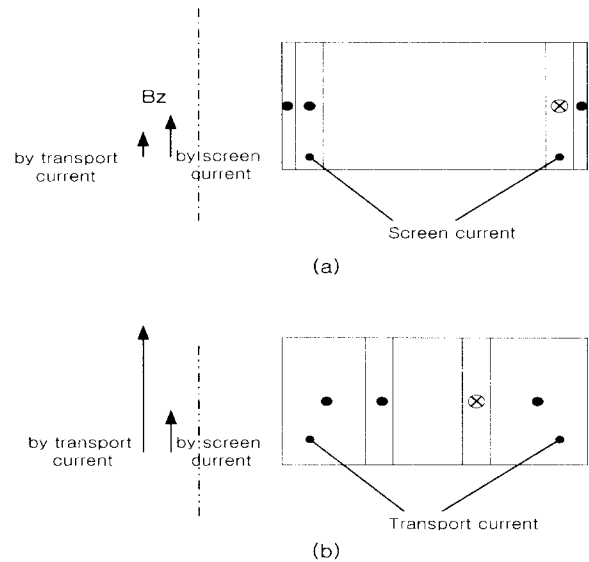


그림 4. 전송전류에 따른 초전도체 내의 전류분포 개념도: (a) 전송전류가 낮은 영역 (b) 전송전류가 높은 영역

Fig. 4. Schematic diagram of the current distribution in the superconductor with the transport current: (a) in low range of the current, (b) in high range of the current

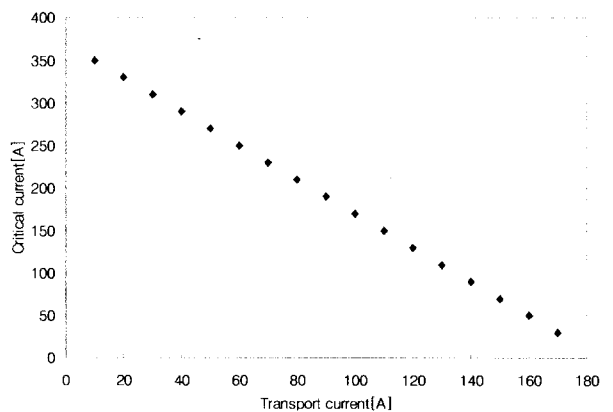


그림 5. 전송전류와 초전도체의 임계전류 관계
Fig. 5. The critical current vs. the transport current

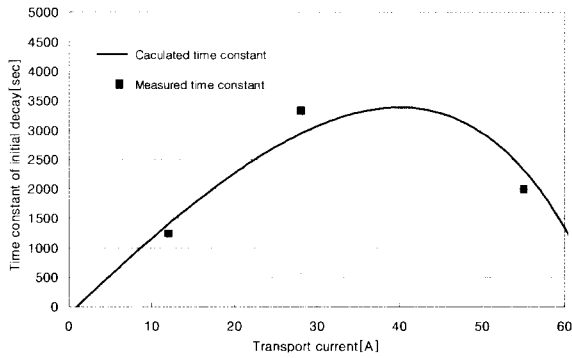


그림 6. 전송전류와 초기자장감쇠의 시정수 관계
 Fig. 6. The time constant (τ_2) of initial field decay as a function of the transport current

4. 결 론

초기자장감쇠는 초전도자석의 충전 중에 발생하는 전류의 불균일에 의해 일어난다. 전류의 불균일 현상은 차폐전류에 의해 해석될 수 있다. 충전 중의 초전도체 내의 전류분포는 불균일해 지고 전송전류가 일정해지면 전류분포는 재분류되어 균일해진다.

이런 전류의 불균일에 의한 초기자장 감쇠를 제거하는 일반적인 방법으로 초전도자석의 충전시 과전류(overshooting)를 인가하는 방법을 사용하고 있다. 그러나, 인가해야 하는 과전류의 양은 전송전류의 증가율, 전송전류값, 전류유지시간, 초전도체의 임계전류와 초전도자석의 형상에 복잡하게 연관되어 있으므로 정량적·수식적으로 그 양을 예측하는 것은 상당히 어렵고 따라서, 아직 이론적 체계가 잡혀있지 않다. 그러나, 실험적 고찰을 통해 초기자장감쇠의 시정수가 전송전류량에 상당부분 기인한다는 사실을 확인하였다. 본 연구를 통해 얻어진 전송전류와 시정수의 관계를 활용하면 고균등의 자장을 요구하는 초전도자석의 충전시 최적의 운전전류값을 선택하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 보건복지부에서 시행한 선도기술·의료공학 기술개발 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] S. Yamamoto and T. Yamada, Initial Magnetic Field Decay of the Superconducting Magnet in Persistent Current Mode, IEEE Trans. Magn., Vol. 24, No. 2, pp. 21292-1294, March, 1988
 [2] M. N. Wilson, Superconducting Magnets, Clarendon Press, Oxford, 1983
 [3] T. Ogasawara, K. Yasukochi, Y. Takahashi, K. Yosohama, and Y. Kubota,

An Experiment Clarifying the Distribution of Transport Currents in Superconducting Wires, IEEE Trans. Magn., Vol. MAG 15, No. 1, pp. 236-239, September, 1979

[4] G Luderer and P. Dullenkopf, Influence of Flux Penetration on Magnetic Field, Cryogenics 16, pp. 42-44, January, 1976
 [5] L. Cesnak and J. Kokavec, Magnetic Field Stability of Superconducting Magnets, Cryogenics 17, pp. 107-110, February, 1977

저 자 소 개



배준한(裴俊漢)

1966년 4월 30일 생, 1992년 건국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구소 영상응용그룹 선임연구원



심기택(沈基德)

1973년 2월 1일 생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 연구원



권영길(權永吉)

1959년 7월 28일 생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1990~1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 그룹장