

## 초전도 선재에서의 전류 분포 해석

°이 지광\*, 김동훈\*, 한송엽\*, 차귀수\*\*

\* 서울대학교 전기공학과 \*\* 순천향대학교 전기공학과

### Current Distribution Analysis of Multifilamentary Superconducting Wire

Ji-kwang Lee\*, Dong-hun Kim\*, Song-yop Hahn\*, Guee-soo Cha\*\*

\* Seoul Nat'l University \*\* Soonchunhyang University

**Abstract** - Superconducting cable is using by bundling and twisting with many strands for large current capacity. As a result of the twisting, the magnetic field whose direction is parallel to a strand axis by the transport current of themselves is produced in the cable. Not only the externally exposed longitudinal field but also longitudinal component of self field make a influence on a.c loss and a.c quench current degradation. In this paper, we calculate the saturated region flowing with the critical current density in a strand in case of various twist pitch, transport current, and external longitudinal field

#### 1. 서 론

초전도 발전기 초전도 변압기 등 각종 초전도 관련 전력기기 등에 사용되는 초전도선은 교류전류를 통전시킬 수 있는 극세다심형의 교류용 초전도선이다. 이러한 초전도 소선 하나에 훌릴 수 있는 임계전류는 그리 높지 않아서 큰 용량의 전류를 필요로 하는 경우에는 수~수백개의 초전도 소선을 서로 꼬고 묶은 케이블을 이용한다. 케이블은 초전도 소선들이 꾸여있는 형태로 이용되기 때문에 케이블에 흐르는 전송전류에 의해서 케이블을 구성하는 초전도 소선의 축방향 성분의 자계를 경험하게 되어 초전도 소선 내부의 전류 분포에 영향을 미치게 되고, 열-자기적 안정성을 감소시키게 된다. 근래에 들어서는 이러한 종방향성분의 자계가 초전도선의 성능을 저하시켜 펜치가 쉽게 발생되는 현상으로 생각되어 이에 대한 연구가 점차 증가하고 있다.

본 논문에서는 교류전류가 흐르고 있는 하나의 초전도 소선에 소선의 축방향과 평행한 종방향 성분의 자계가 가해질 때 초전도 소선내의 전류 분포를 알아보고, 아울러 전송전류의 크기, 트위스트 피치의 크기가 전류 분포에 미치는 영향을 알아본다.

#### 2. 초전도 소선에서의 전류분포 관계식

종방향 자계에 의한 초전도 소선에서의 전류 분포 영

향을 알아보기 위해 그림 1과 같은 초전도 소선 모델을 생각한다. 그림 1에서 초전도 필라멘트가 있는 영역을 필라멘트 영역이라 하고 이 영역내의 초전도 필라멘트들은 동심원의 형태로 층별로 규칙적으로 박혀 있다고 가정한다.

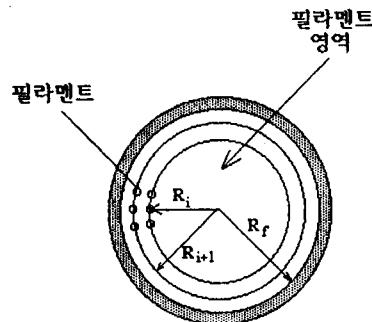


그림 1 초전도 소선 모델

이러한 초전도 소선에 전송 전류를 흘리게 되면 초전도 필라멘트를 통해서 전류가 흐르게 되고 임계전류로 전송전류가 흐르게 되는 초전도 필라멘트 영역인 전류 포화 영역(the saturated region)은 소선의 최외곽 층에 위치한 필라멘트로 부터 형성되어 점차 안쪽으로 확장된다. 즉 전송 전류는 임계 전류밀도로 가장 바깥층의 필라멘트에서부터 흐르게 된다.

외부 인가자계가 없고 전송전류만 흐르는 경우에는 전류 포화영역을 제외한 부분에서는 전류가 흐르지 않지만 외부 자계가 가해지면 전류 포화영역의 크기에 영향을 주게 되고 또한 전류 포화영역을 제외한 영역(불포화 영역)에서도 전류가 흐르게 되어 전류분포의 변화가 발생한다. 이 때의 소선에 흐르는 총전류량은 항상 전송전류와 같아야 하므로 외부 자계에 의해 발생된 전류 포화영역의 변화량 만큼 전류 불포화 영역에 전류가 흐르게 되고 그 합은 항상 전송 전류의 크기와 같게 된다.

같은 층의 필라멘트에는 같은 전류가 흐른다고 가정했을 때 전류 불포화 영역에서의 전류 분포는 이웃하는

두 층에 존재하는 두 개의 필라멘트 사이의 결합 자속(coupling flux)를 계산함으로써 알 수 있다. 자계의 확산정도를 나타내는 자계 확산 시정수(magnetic diffusion time)보다 짧은 시간 범위 내에서는 자계의 확산을 무시할 수 있으므로 불포화 영역에서의 결합 자계는 영이 된다고 할 수 있으므로 이에 근거하여 불포화 영역에서의 전류 분포를 계산 할 수 있다.

두 개의 필라멘트 사이의 전체 결합 자속은 전송 전류에 의해 두 필라멘트 사이에서 발생하는 자속과 외부 자계에 의한 자속의 합이므로 다음과 같다.

$$\phi_{\text{tot}} = \phi_{\text{sf},\theta} + \phi_{\text{sf},z} + \phi_{\text{ex},r} + \phi_{\text{ex},\theta} + \phi_{\text{ex},z} \quad (1)$$

식 (1)의 우변은 원통 좌표계에서 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

전송 전류에 의해 발생하는  $\theta$  성분 자계에 의해 i 층의 필라멘트와 j 층의 필라멘트 사이에서 한 피치( $l_{\text{po}}$ )를 통과하는 자속량은 다음과 같다. 단, 전류는 필라멘트에서만 흐른다고 가정한다.

$$\phi_{\text{sf},\theta} = \int_{R_i}^{R_j} \int_0^{l_{\text{po}}} B_{\text{sf},\theta} dz dr = \frac{\mu_0 l_{\text{po}}}{2\pi} \int_{R_i}^{R_j} \frac{I(r)}{r} dr \quad (2)$$

또한, 전송 전류에 의해 발생하는 z 성분 자계에 의해 i 층의 필라멘트와 j 층의 필라멘트 사이를 통과하는 자속량은 다음과 같다.

$$\phi_{\text{sf},z} = \pm \int_{R_i}^{R_j} \int_0^{2\pi} B_{\text{sf},z} r dr d\theta \quad (3)$$

외부 인가 자계는 종방향으로 가해기 때문에 외부 인가 자계의 r 성분과  $\theta$  성분에 의한 자속은 영이고 z 성분 자계에 의해 i 층의 필라멘트와 j 층의 필라멘트 사이를 통과하는 자속량은 다음과 같다.

$$\phi_{\text{ex},r} = \phi_{\text{ex},\theta} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \phi_{\text{ex},z} &= \int_{R_i}^{R_j} \int_0^{2\pi} r dr d\theta \\ &= \pm \int_{R_i}^{R_j} B_{\text{ex},z} 2\pi r dr \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 식 (1)의 전체 결합 자속량은 식 (2) ~ 식 (5)에 의해 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_{\text{tot}} &= \frac{\mu_0 l_{\text{po}}}{2\pi} I(R_i) \ln\left(\frac{R_j}{R_i}\right) - \frac{\pi}{l_{\text{po}}} \mu_0 (I_t - I(R_i)) (R_j^2 - R_i^2) \\ &\quad \pm \int_{R_i}^{R_j} B_{\text{ex},z} 2\pi r dr \end{aligned} \quad (6)$$

불포화 영역에서는 두 이웃하는 층 사이에서 전체 결합 자속량이 영이 되어야 하므로 식 (6) 으로부터 불포화 영역에서의 전류 분포를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I(R_i) = \frac{\frac{\pi}{l_{\text{po}}} \mu_0 I_t (2R_i \Delta R + \Delta R^2) \pm 2\pi \int_{R_i}^{R_j} B_{\text{ex},z} r dr}{\frac{l_{\text{po}}}{2\pi} \mu_0 \ln\left(1 + \frac{\Delta R}{R_i}\right) + \frac{\pi}{l_{\text{po}}} \mu_0 (2r_i \Delta R + \Delta R^2)} \quad (7)$$

단,  $\Delta R \equiv R_j - R_i$

소선 내의 반경  $R_i$ 에서의 전류 밀도 분포는 식 (7)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$j(R_i) = \frac{I(R_i) - I(R_{i-1})}{2\pi R_i} \quad (8)$$

$I(R_i)$  : 소선의 중심으로부터 i 층까지 흐르는 전류

$I(R_{i-1})$  : 소선의 중심으로부터 i-1 층까지 흐르는 전류  
 $R_i$  : i 층의 반경

초전도 소선 내에서 흐르는 전체 전류는 전류 포화 영역에서 흐르는 전류와 불포화 영역에서 흐르는 전류의 합으로서 그 값은 항상 전송전류의 값과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_t = \frac{R_f^2 - R_{\text{sat}}^2}{R_f^2} I_c + I(R_{\text{sat}}) \quad (9)$$

$R_f$  : 필라멘트 영역의 반경

$R_{\text{sat}}$  : 전류 포화 영역이 시작되는 반경

$I_c$  : 초전도 소선의 임계 전류

$I(R_{\text{sat}})$  :  $R_{\text{sat}}$  내의 영역에서 흐르는 전류

식 (9)로 부터 전류 포화 영역이 시작되는 반경  $R_{\text{sat}}$ 를 구할 수 있으며, 이러한  $R_{\text{sat}}$  보다 큰 영역에 위치하는 필라멘트 영역에서는 임계전류 밀도로 전류가 흐르게 되고,  $R_{\text{sat}}$  보다 작은 영역에 위치하는 필라멘트 영역에서는 식 (8)에서 구한 전류 밀도로 전류가 흐르게 된다.

### 3. 전류분포 해석

식 (7)~식 (9)를 이용하여 종방향 인가 자계, 전송 전류, 트위스트 피치를 변화 시켜가며 초전도 소선에서의 전류 분포에 미치는 영향을 알아본다. 표 1은 전류 분포 특성을 알아보기 위해 사례로 든 초전도 소선의 사양이다.

표 1 초전도 소선의 사양

소선의 반경 [mm]	0.1
필라멘트 영역의 반경 [mm]	0.08
점 쪽률(CuNi/NbTi)	1.0
필라멘트 층수	70
임계전류[A]	100

그림 2는 전송전류 60[A], 트위스트 피치 2[mm]의 경우에 대해 종방향 인가자계의 크기에 대한 전류포화 영

역이 시작되는 소선내의 위치를 보여준다.  
종방향인가자계가 증가할수록 전류포화 영역의 두께가 감소하고 있음을 알 수 있다.

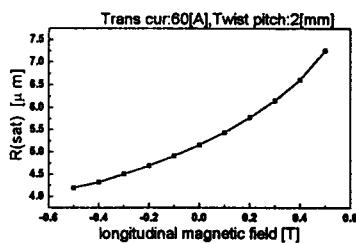


그림 2 전류 포화 영역에 대한 종 방향 자계의 영향

그림 3은 전송전류의 크기에 대해 전류포화영역이 시작되는 위치를 종방향 인가자계가 -0.5[T], 0[T], 0.5[T]인 경우에 대해 보여준다. 전송 전류값이 증가할수록 전류포화영역의 두께는 증가함을 알 수 있다.

그림 4는 종방향 인가자계가 -0.5[T], 그림 5은 0.5[T]의 경우에 대해 전송 전류가 30[A], 50[A], 70[A]로 흐를 때의 소선내의 전류분포를 보여주며 전류밀도가 수직으로 상승하는 지점이 전류포화영역이 시작되는 위치이다.

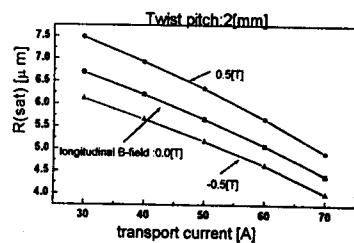


그림 3 전류 포화 영역에 대한 전송 전류의 영향

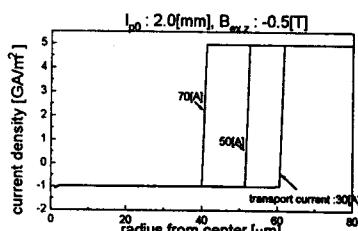


그림 4 초전도 소선에서의 전류 밀도 분포  
(B=-0.5[T])

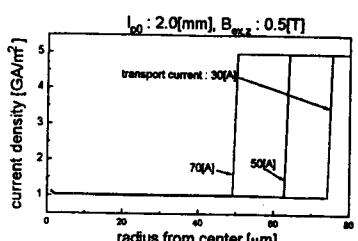


그림 5 초전도 소선에서의 전류 밀도 분포  
(B=0.5[T])

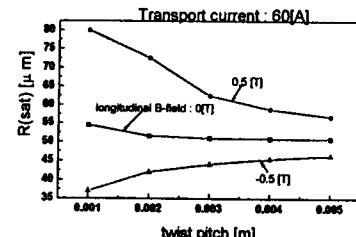


그림 6 전류 포화 영역에 대한 트위스트 피치의 영향

그림 6은 전송전류 60[A]일 때 트위스트 피치 변화에 따라 전류포화영역이 시작되는 위치를 보여준다.

종방향 인가자계가 0.5[T]의 경우에는 트위스트 피치가 증가할수록 전류포화영역의 두께는 증가하지만 -0.5[T]의 경우에는 트위스트 피치가 증가할수록 전류포화영역의 두께는 감소함을 알 수 있으며, 종방향 인가자계가 0[T]의 경우에는 트위스트 피치가 2[mm]보다 큰경우에는 전류포화영역의 두께가 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 극세 다심의 교류용 초전도선에서 전송 전류의 분포에 대해 해석하였다. 대용량의 전류를 필요로 하는 경우에 사용되는 초전도 케이블은 수십개의 소선들을 꼬아서 이용하기 때문에 하나의 소선에서는 다른 소선에 흐르는 전류에 의해 발생된 자계는 소선축에 평행한 종 방향 성분을 가지게 되며 이러한 종 방향 자계에 의해 소선 내의 전송 전류의 분포가 달라지게 되며 교류 손실과 안정성에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서 구한 전류 분포는 초전도 소선이나 초전도 케이블에서 발생하는 자기 자장 손실을 구하는데 필요하며 안정성을 유지하기 위한 수송 전류의 재한값을 구하는데 사용될 수 있다.

이 연구는 한국전력공사 연구 지원  
에 의해 수행되었음.  
(과제 번호 : KEPRI - 95Y - J06)

### 참 고 문 헌

- [1] N.Amemiya et al., "Quench Characteristics and Current Distribution of Multi-Strand AC Superconducting Cable," IEEE Tran. Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, 1993
- [2] N.Amemiya, T.Ohizumi, L.Hlasnik and O.Tsukamoto, "Instability in Multi-Strand AC Superconducting Cable Caused by Longitudinal Magnetic Field with Transverse Magnetic Field," IEEE Tran. Applied Superconductivity Vol.3, No.1, 1993
- [3] N.Amemiya and K.Inaho, "Current Distribution in Multifilamentary Superconductors and Their Quench Current Degradation," IEEE Tran. Magnetics, Vol.30, No.4, 1994
- [4] M.Tsuda et al., "Current Distribution in AC. Multi-Strand Superconducting Cables," Cryogenics, Vol.34, ICEC Supplement, 1994