

# 해석적인 방법과 수치적인 방법에 의한 고온초전도테이프의 결합손실 계산

論 文  
48B-6-4

## Calculation of Coupling Loss in a HTS Tape by using Analytic Method and Numerical Method

沈政煜\* · 李喜俊\* · 車貴守\*\* · 李志光\*\*\* · 韓松擘§

(Jung-Wook Sim · Hee-Joon Lee · Guee-Soo Cha · Ji-Kang Lee · Song-Yop Hahn)

**Abstract** - Coupling loss is generated by the time-varying external magnetic field in the normal matrix of the multi-filamentary HTS tape. This paper calculates the coupling loss in the HTS tape. Analytic calculation of the coupling loss cannot consider the effect of the different shapes and the arrangement of the filaments. Numerical calculation by using finite element method and analytic calculation of the coupling loss have been done in this paper and results of two calculations have been compared. Transverse magnetic field and longitudinal magnetic field were considered as the external field.

**Key Words** : HTS Tape, coupling loss, transverse magnetic field, longitudinal magnetic field

### 1. 서 론

근래에 들어서 고온초전도체의 선재화 기술이 발전함에 따라서 다심선의 형태로 비교적 특성이 우수한 초전도선을 제작하는 것이 가능해졌을 뿐 아니라 교류손실을 줄이기 위해서 필라멘트를 트위스트하는 수준에 이르렀다. 현재 사용되는 다심형 고온초전도선재는 초전도체로 되어있는 필라멘트의 주위를 상전도체인 모재가 둘러싸고 있는 구조로 되어있고, 임계전류를 증대하기 위해 테이프 형태로 구성되어 있다.[1] 따라서 고온초전도 선재에 시변자장이 인가되면 히스테리시스손실과 결합손실이 발생한다.[2,3]

본 연구에서는 고온초전도선재에서 발생하는 손실 중에서 결합손실을 계산했다. 결합손실은 외부에서 인가되는 자장에 의해서 상전도 모재에서 발생하는 손실로서 결합손실을 발생시키는 외부자장은 횡방향 자장과 축방향 자장으로 나누어 생각할 수 있다. 이중에서 횡방향 자장은 다시 테이프형 초전도선재에 평행한 방향으로 인가되는 자장과 수직인 방향으로 인가되는 자장으로 나눌 수 있다.

손실을 계산하는 방법으로는 해석적인 방법과 수치적인 방법의 두 가지를 사용했다. 해석적인 방법으로는 횡방향자장 또는 축방향자장에 의해서 결합전류가 흐르는 루프 내에서의 전계를 구하고 이로부터 손실을 계산했다. 해석적인 방법을 사용할 경우에는 필라멘트의 형태와 배치등이 결합손실에 미치는 영향을 정확하게 고려할 수 없으므로 본 연구에서는 유

한요소법을 이용하여 각 필라멘트에 유기되는 전압을 경계조건으로 모재에 흐르는 결합전류를 계산하여 손실을 구하는 수치적 방법으로도 계산하였다.

### 2. 횡방향 자계에 의한 결합 손실

일반적으로 고온 초전도선은 테이프 형태의 매우 얇은 구조를 가지고 있고 내부의 필라멘트 역시 얇은 형태로 구성되어 있다. 따라서 외부자장이 인가될 경우 결합 손실을 계산

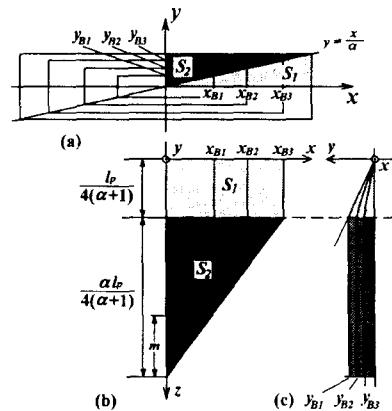


그림 1 초전도 필라멘트의 궤적  
(a) 고온초전도선의 단면구성  
(b) y축에서 바라본 소선의 경로  
(c) x축에서 바라본 소선의 경로

Fig. 1 Trajectory of the filaments  
(a) Cross-section of HTS tape  
(b) Trajectory of the filaments in xz plane  
(c) Trajectory of the filaments in yz plane

\* 正 會 員 : 順天郷大 電氣工學科 博士課程  
\*\* 正 會 員 : 順天郷大 電氣工學科 教授 · 工博  
\*\*\* 正 會 員 : 又石大 電氣工學科 專任講師 · 工博  
§ 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博  
接受日字 : 1998년 12월 17일  
最終完了 : 1999년 5월 21일

할 때 결정하는 초전도 필라멘트의 페루프를 저온 초전도선의 경우와는 다르게 결정해야 한다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 3층의 필라멘트 층으로 구성된 초전도 테이프를 해석 모델로 정했다.

z축 방향을 소선의 중심축이라고 하면 중심축에서 직각으로 바라본 임의의 필라멘트의 한 피치동안의 경로는 그림 1(b)처럼 사다리꼴 경로를 가지게 된다. 이것은 원통형 소선을 가공하여 생긴 결과로서 횡방향 외부자계가 가해질 때 왜곡되는 페루프의 면적이 외부 자계의 방향에 따라 다르기 때문에 이에 대한 고려를 필요하게 된다. 여기서는 초전도선에 대하여 횡방향 외부 자장이 수직 방향(y축 방향)과 수평 방향(x축 방향)으로 가해질 경우에 대하여 각각 계산하기로 한다.

### 2.1 외부자장이 수직 방향(y축 방향)으로 가해지는 경우

그림 1.(a)와 같은 내부의 필라멘트 분포가  $x B_n \times y B_n$ 인 테이프형 초전도 소선에 y축 방향으로 인가되는 외부시변자장이  $B = B_m \sin \omega t$ 라고 하면 영역  $S_1$ 의 임의의 점에서 발생하는 전위는 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{\alpha \cdot y \cdot l_p}{4(\alpha+1)} B_m \omega \cos \omega t \quad (1)$$

여기서  $\alpha$  : 초전도선의 가로와 세로의 비  
 $l_p$  : 트위스트 피치

또  $S_1$ 에서 발생하는 전계는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\partial V_1}{\partial x} = 0, \\ E_y &= -\frac{\partial V_1}{\partial y} = -\frac{\alpha}{4(\alpha+1)} l_p B_m \omega \cos \omega t \end{aligned} \quad (2)$$

$E_z$ 는 일반적으로 매우 작기 때문에 무시한다. 영역  $S_2$ 의 임의의 점에서 발생하는 전위는 식(3)과 같다.

$$V_2 = \frac{1}{8(\alpha+1)} \left[ \alpha(\alpha+2)y - \frac{x^2}{y} \right] l_p B_m \omega \cos \omega t \quad (3)$$

식(3)을 이용하여  $S_2$ 에서의 전계를 구하면

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\partial V_2}{\partial x} = \frac{1}{4(\alpha+1)} \frac{x}{y} l_p B_m \omega \cos \omega t \\ E_y &= -\frac{\partial V_2}{\partial y} \\ &= -\frac{l_p}{8(\alpha+1)} \left[ \alpha(\alpha+2) + \frac{x^2}{y^2} \right] B_m \omega \cos \omega t \end{aligned} \quad (4)$$

가 된다. 영역별의 손실을 구하면,  $S_1$ 에서는

$$P_{S1}(t) = \frac{\sigma_{\perp}}{16} \frac{\alpha^2}{(\alpha+1)^2} l_p^2 \omega^2 B_m^2 \cos^2 \omega t \quad (5)$$

이다. 여기서  $\sigma_{\perp}$ 는 초전도테이프의 횡단면 도전율이다.  $S_2$ 에서의 손실은

$$P_{S2}(t) = \frac{1}{240} \frac{(7\alpha^2 + 20\alpha + 20)\alpha^2}{(\alpha+1)^2} l_p^2 \sigma_{\perp} \omega^2 B_m^2 \cos^2 \omega t \quad (6)$$

이고, 따라서 외부자장이 수직방향으로 가해질 경우 전체 결합 손실은

$$P_y = 2f \int_0^{\frac{1}{2T}} 4[S_1 P_{S1}(t) + S_2 P_{S2}(t)] dt \quad [W/m] \quad (7)$$

이 된다.

### 2.2 외부자장이 수평 방향(x축 방향)으로 가해지는 경우

외부자장이 수평 방향(x축 방향)으로 가해질 경우에도 수직방향과 마찬가지로 방법으로 각 영역에서의 손실을 구할 수 있다. 수평방향으로 외부자장이 가해질 때 그림 1(c)의 영역  $S_2$ 의 임의의 점에서 발생하는 전위는 다음과 같다.

$$V_2 = \frac{x l_p}{4(\alpha+1)} \omega B_m \cos \omega t \quad (8)$$

따라서  $S_2$ 에서 발생하는 전계는

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\partial V_2}{\partial x} = -\frac{1}{4(\alpha+1)} l_p \omega B_m \cos \omega t \\ E_y &= -\frac{\partial V_2}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 영역  $S_1$ 의 임의의 점에서 발생하는 전위는 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{1}{8\alpha(\alpha+1)} \left[ (2\alpha+1)x - \alpha^2 \frac{y^2}{x} \right] l_p \omega B_m \cos \omega t \quad (10)$$

따라서 식(10)을 이용하여 영역  $S_1$ 의 전계를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\partial V_1}{\partial x} \\ &= -\frac{1}{8\alpha(\alpha+1)} \left[ (2\alpha+1) + \alpha^2 \frac{y^2}{x^2} \right] l_p \omega B_m \cos \omega t \\ E_y &= -\frac{\partial V_1}{\partial y} \\ &= -\frac{\alpha}{4(\alpha+1)} \frac{y}{x} l_p \omega B_m \cos \omega t \end{aligned} \quad (11)$$

그러므로 그림 1(c)의 경로에서 각 영역의 손실을 구하면

$$P_{S1}(t) = \frac{\sigma_{\perp}}{240} \frac{(20a^2 + 20a + 7)}{a^2(a+1)^2} l_p^2 \omega^2 B_m^2 \cos^2 \omega t \quad (12)$$

$$P_{S2}(t) = \frac{1}{16(a+1)^2} l_p^2 \sigma_{\perp} \omega^2 B_m^2 \cos^2 \omega t \quad (13)$$

따라서 수평방향 자계에 의한 전체 결합손실은

$$P_y = 2f \int_0^{\frac{1}{2T}} 4[S_1 P_{S1}(t) + S_2 P_{S2}(t)] dt \quad [\text{W/m}] \quad (14)$$

로 구할 수 있다.

### 3. 축방향 자계에 의한 결합 손실

고온 초전도선의 축방향 자계에 의한 결합손실은 저온 초전도선에서와 마찬가지로 인접한 두 필라멘트 사이에서 흐르는 전류에 의한 전위차에 의해 계산될 수 있다.

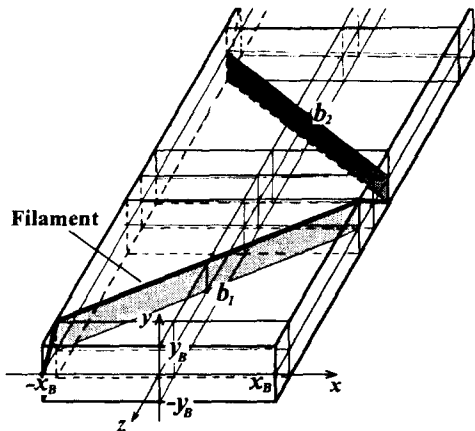


그림 2 축방향을 따라서 본 필라멘트의 경로  
Fig. 2 Trajectory of a filament along z axis

그림 2와 같은 고온 초전도선에 축방향으로 외부자장이 가해질 경우 외부자장이 쇄교되는 면적은 필라멘트의 경로를 z 축에서 투영할 때 보이는 면적이 된다. 축방향 외부자장으로 는 다음과 같은 자장을 고려했다.

$$B = B_{im} \cos\left(\frac{2\pi}{L} z\right) \sin \omega t \quad (15)$$

이다. 여기서 L은 자장의 주기이다. 초전도 필라멘트에서 발생하는 전위는

$$V = -\frac{d\phi}{dt} \quad (16)$$

로 구할 수 있다. 여기서  $\phi$ 는

$$\begin{aligned} \phi = & \int_0^{y_B} \int_{-x_B}^{x_B} B_{im} \cos\left(\frac{2\pi}{L} z\right) \sin \omega t \, dx \, dy \\ & + \int_{-y_B}^0 \int_{x_B}^{-x_B} B_{im} \cos\left(\frac{2\pi}{L} z\right) \sin \omega t \, dx \, dy \end{aligned} \quad (17)$$

이고 그림 2에서 xz평면상에서 바라본 필라멘트의 경로는 식 (18)과 같은 관계로 볼 수 있다.

$$0 \sim y_B : z = a_n x + b_1 \quad (18)$$

$$-y_B \sim 0 : z = -a_n x + b_2$$

여기서  $a_n$  : xz평면상에서 n번째 층에 있는 초전도선의 기울기

$b_1, b_2$  : 절편

따라서 식(17)에서 z를 적분 구간 별로 x의 함수로 치환하면

$$\begin{aligned} \phi = & -\left[ \int_0^{y_B} \int_{-x_B}^{x_B} B_{im} \cos\left\{\frac{2\pi}{L}(a_n x + b_1)\right\} \sin \omega t \, dx \, dy \right. \\ & \left. + \int_{-y_B}^0 \int_{x_B}^{-x_B} B_{im} \cos\left\{\frac{2\pi}{L}(-a_n x + b_2)\right\} \sin \omega t \, dx \, dy \right] \end{aligned} \quad (19)$$

이므로 식(19)를 이용하여 n층과 n-1층의 전위차를 구하면

$$\begin{aligned} \Delta V = & -\left( \frac{y_{Bn}}{a_n} \sin \frac{2\pi a_n x_{Bn}}{L} - \frac{y_{Bn-1}}{a_{n-1}} \sin \frac{2\pi a_{n-1} x_{Bn-1}}{L} \right) \\ & \cdot \left( \cos \frac{2\pi b_1}{L} + \cos \frac{2\pi b_2}{L} \right) 2fL B_{im} \cos \omega t \end{aligned} \quad (20)$$

이때의 전계는 식(21)과 같이 구할 수 있다.

$$E = \frac{\Delta V}{y_{Bn} - y_{Bn-1}} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{y}\right)^2} \quad (21)$$

두 필라멘트의 전위차를 이용하여 고온 초전도선의 손실을 구하려면

$$P = \int \sigma_{\perp} \left(\frac{\Delta V}{d}\right)^2 ds \quad (22)$$

여기서 d는 임의의 두 층 사이의 거리이다. 고온 초전도선은 테이프형 구조이기 때문에 두 층 사이의 거리 d가 일정하지 않다. 따라서 그림 3에서처럼 영역을 구분하여 각 영역에 대한 손실을 구한 후 더하는 방법을 이용한다. 면적  $S_1$ 에서의 손실  $P_1$ 을 구하면 면적  $S_1$ 에서는 두 층 사이의 거리  $d_1$

이 일정하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{S1} = \sigma_{\perp} \Delta V^2 \frac{x_{Bn-1}}{y_{Bn} - y_{Bn-1}} \quad (23)$$

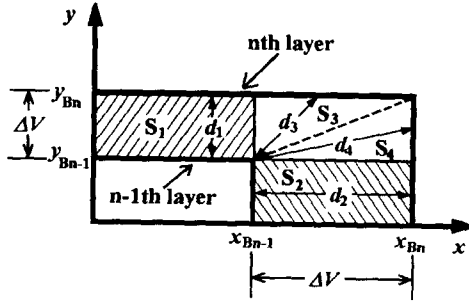


그림 3 n층과 n-1층 필라멘트 사이의 모재 영역  
Fig. 3. Matrix area between nth and (n-1)th layer

면적  $S_2$ 에서의 손실  $P_2$ 는 식(23)과 마찬가지로 거리  $d_2$ 가 일정하므로

$$P_{S2} = \sigma_{\perp} \Delta V^2 \frac{y_{Bn-1}}{x_{Bn} - x_{Bn-1}} \quad (24)$$

이다.

그림 3에서의  $S_3$ 와  $S_4$ 의 영역에서  $n$ 층과  $n-1$ 층간의 거리  $d_3$ 와  $d_4$ 가 일정하지 않기 때문에 손실  $P_{S3}$ ,  $P_{S4}$ 를 구하려면 거리의 변화에 따른 식을 세운다. 영역  $S_3$ 에서의 거리  $d_3$ 는  $n-1$ 층의 모서리에서  $n$ 층까지의 거리가  $x$ 축 변화에 대해  $y$ 축은 변하지 않으므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_3 = (y_{Bn} - y_{Bn-1}) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{x}{y}\right)^2} \quad (25)$$

따라서 이 영역에서의 손실은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{S3} = \sigma_{\perp} \frac{\Delta V^2}{2(y_{Bn} - y_{Bn-1})^2} \left[ \left\{ x_{Bn-1} y_{Bn-1} - y_{Bn-1}^2 \tan^{-1} \alpha + (x_{Bn-1}^2 + y_{Bn-1}^2) \tan^{-1} \left( \frac{x_{Bn-1}}{y_{Bn-1}} \right) \right\} - \left\{ x_{Bn-1} y_{Bn} - y_{Bn}^2 \tan^{-1} \alpha + (x_{Bn-1}^2 + y_{Bn}^2) \tan^{-1} \left( \frac{x_{Bn-1}}{y_{Bn}} \right) \right\} \right] \quad [W/m] \quad (26)$$

위와 같은 방법으로 그림 3에서의 영역  $S_4$ 에서의 손실  $P_4$ 를 구하려면  $n$ 층과  $n-1$ 층간의 거리  $d_4$ 를 구하면 된다. 여기서는  $y$ 축의 변화에 따라  $x$ 축은 일정하므로  $d_4$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_4 = (x_{Bn} - x_{Bn-1}) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{y}{x}\right)^2} \quad (27)$$

영역  $S_4$ 에서의 손실은  $S_3$ 의 경우와 마찬가지로 구할 수 있다.

$$P_{S4} = \sigma_{\perp} \frac{\Delta V^2}{2(x_{Bn} - x_{Bn-1})^2} \cdot \left[ \left\{ x_{Bn-1} y_{Bn-1} - x_{Bn-1}^2 \tan^{-1} \left( \frac{1}{\alpha} \right) + (x_{Bn-1}^2 + y_{Bn-1}^2) \tan^{-1} \left( \frac{y_{Bn-1}}{x_{Bn-1}} \right) \right\} - \left\{ x_{Bn} y_{Bn-1} - x_{Bn}^2 \tan^{-1} \left( \frac{1}{\alpha} \right) + (x_{Bn}^2 + y_{Bn-1}^2) \tan^{-1} \left( \frac{y_{Bn-1}}{x_{Bn}} \right) \right\} \right] \quad [W/m] \quad (28)$$

따라서  $n$ 층과  $n-1$ 층에서의 손실은 각 영역에서의 손실을 더하고 계산된 부분은 전체 면적의 1/4이므로

$$P_n = 2f \int_0^{2f} 4 \left[ \sum_{k=1}^4 P_{S_k}(t) \right] dt \quad [W/m] \quad (29)$$

가 된다. 최종적으로 고온 초전도선의 축방향 자장에 의한 손실은 이렇게 구한 각층의 손실의 합으로 구한다.

$$P_{lc} = 8f \sum_{m=1}^n \sum_{k=1}^4 \int_0^{2f} P_{S_{km}} dt \quad [W/m] \quad (30)$$

#### 4. 수치 계산

수치적인 계산을 위해서는 유한요소법을 사용했다. 이때에 앞에서 구한 전압을 식(31)의 경계 조건으로 적용할 수 있다.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (31)$$

따라서 수치적으로 계산된 전계와 다음 식을 이용하여 결합손실을 계산할 수 있다.

$$P = \sum_{i=1}^N \sigma E_i^2 \quad [W/m] \quad (32)$$

여기서  $E_i$  :  $i$ 번째 요소의 전계  
 $N$  : 요소의 개수

#### 5. 계산 결과

해석적 방법과 수치적 방법을 이용하여 횡방향과 축방향자계에 의한 결합손실을 계산한 결과는 다음과 같다. 해석에 사용된 고온초전도 선재의 사양은 표 1과 같이 폭3.6[mm], 두께 0.35[mm]인 고온 초전도테이프이다.

표 1 고온초전도테이프의 사양  
Table 1 Specifications of a HTS tape

폭	3.6[mm]	두께	0.35[mm]
트위스트피치	2.0[mm]	모재의 종류	Ag
필라멘트수	39	모재의 도전률	$3.9 \times 10^8$ [/Ωm]

5.1 횡방향 자계에 의한 손실

그림 4는 횡방향 외부자장이 인가된 경우에 초전도테이프 내부의 등전위선과 결합전류 분포를 유한요소법을 이용해서 수치적으로 구한 결과이다. 횡방향 외부자장의 방향에 따라 등전위선은 외부자장의 수직 방향으로, 결합전류는 같은 방향으로 발생됨을 알 수 있다.

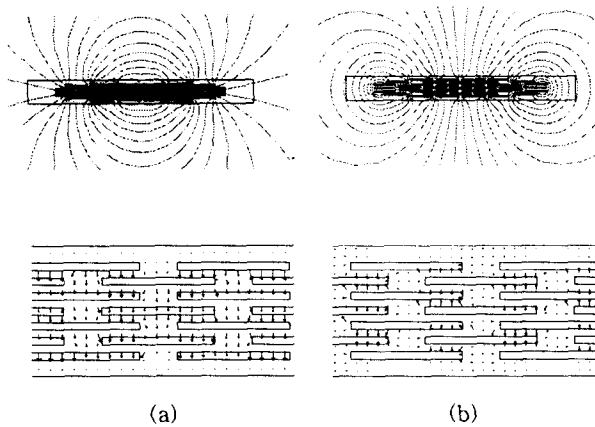


그림 4 횡방향 자장이 인가된 경우의 등전위선 및 결합전류 분포  
(a) 수직(y축) 방향 자장 (b) 수평(x축) 방향 자장  
Fig. 4 Equi-potential lines and coupling current by transverse field  
(a) perpendicular(y) direction (b) parallel(x) direction

그림 5는 횡방향 외부자장을 0.1[T]를 0~90° 사이에 10° 씩 변화를 주어가며 인가할 경우의 해석해와 수치해를 비교한 것이다. 그림에서 0°는 x방향을 의미하고 90°는 y방향을 의미한다. 계산 결과에 의하면 해석해가 수치해보다 적은 것을 볼 수 있고 이는 해석적인 방법으로 계산할 때는 고온초전도테이프의 필라멘트 각각을 하나의 점으로 바라보고 계산하지만 실제 필라멘트는 점으로 보기에 매우 크고, 서로 겹쳐진 형태의 배치를 가지고 있어서 해석적 방법으로는 이러한 부분들을 정확히 고려할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 외부에서 인가되는 자장의 방향과 관계없이 결합전류의 대부분은 필라멘트가 겹치는 부분에 분포하고 있고, 이것은 이 부분의 전계가 강하기 때문이다.

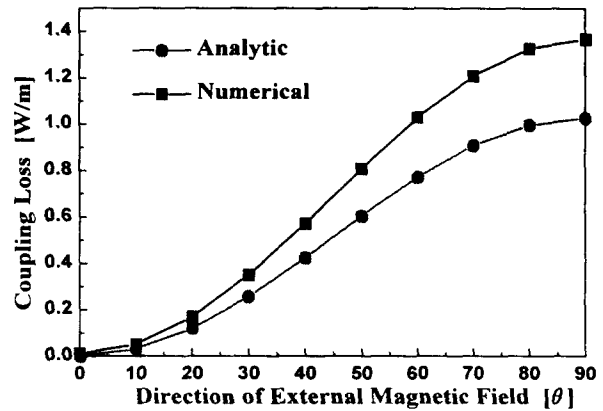


그림 5 횡방향 자장에 의해서 발생하는 결합손실의 비교  
Fig. 5 Comparison of coupling loss by transverse magnetic field

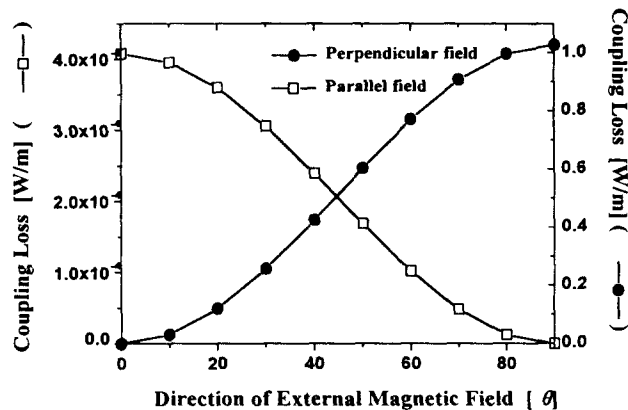


그림 6 각도에 따른 결합손실의 비교  
Fig. 6 Coupling loss by transverse field at various directions

그림 6은 횡방향 자계가 인가되는 각도를 변화시켰을 때 횡방향 자계의 수평방향성분과 수직방향성분에 의한 손실을 해석적으로 구한 결과이다. 그림 6에서 외부자장이 수직방향(90° 방향)으로 갈수록 수평 방향 성분에 의한 손실은 감소되고 수직방향의 성분에 의한 손실은 증가됨을 알 수 있다. 그러나 모든 각도의 횡방향 자계에서 수평방향의 손실은 수직방향의 성분에 비해 매우 작아서 무시할 정도이다.

5.2 축방향 외부자계에 의한 손실

그림 7은 축방향 자계가 인가될 경우의 등전위선과 결합전류 분포를 수치적으로 구한 것으로서 등전위선은 필라멘트를 중심으로 원을 그리는 것을 볼 수 있고 이에 따라 결합전류는 방사형으로 흐르고 있다.

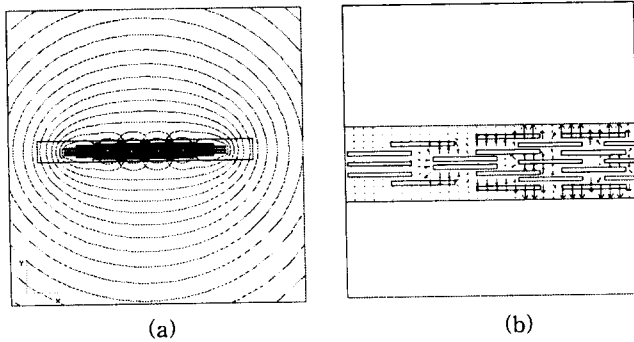


그림 7 축방향자계가 인가될 경우의 등전위선 및 결합전류 분포

(a) 등전위선 (b) 결합전류

Fig. 7 Equi-potential lines and coupling currents by longitudinal field

(a) Equi-potential lines (b) Coupling currents

그림 8은 해석해와 수치해의 비교이다. 저온 초전도선은 원통형 구조라서 층간의 거리가 일정하기 때문에 외부자계가 축방향으로 인가될 경우에 결정하는 페루프의 면적을 계산하기가 쉽고, 등전위선 및 결합 전류의 분포는 중심에 대해 방사방향으로 고르게 분포되지만, 고온 초전도선인 경우에는 테이프 형태로 납작하게 제작되어 있어서 필라멘트의 형태 및 배치 등에 대해 해석적인 방법만으로는 고려하기 어려운 부분들이 존재한다. 그림 9는 초전도테이프 각 부분에서 발생하는 손실을 해석적인 방법으로 구한 것으로서 그림 9에서와 같이 대부분의 손실은 영역 S<sub>1</sub>에서 발생하게 됨을 알 수 있다.

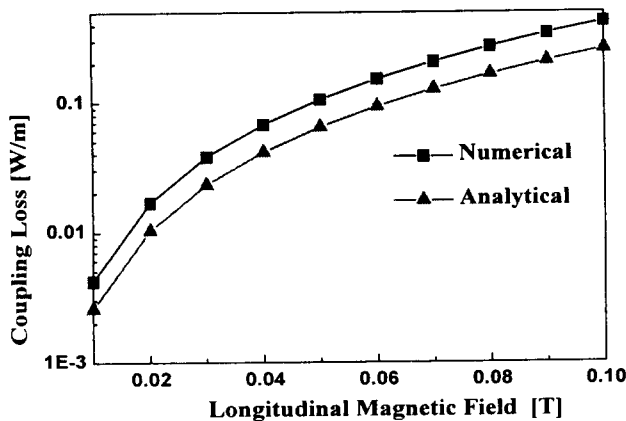


그림 8 축방향 자장에 의한 결합손실의 비교  
Fig. 8 Comparison of coupling loss by longitudinal magnetic field

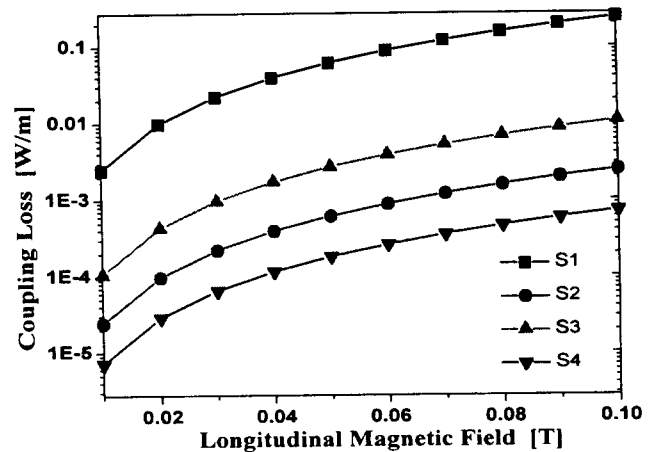


그림 9 고온초전도선의 각 영역에서의 손실비교  
Fig. 9 Comparison of coupling loss at each region

## 6. 결 론

본 연구에서는 테이프 형태로 제작된 고온초전도선재에서 발생하는 결합손실을 수치적 방법과 해석적 방법으로 계산했다. 결합손실을 발생하는 외부자장으로는 횡방향 자장과 축방향 자장을 고려했고 횡방향 자장의 경우에 선재에 평행한 방향으로 인가되는 자장과 수직인 방향으로 인가되는 경우를 나누어서 계산했다. 횡방향 자계가 인가될 경우에는 대부분의 손실은 수직(y축)방향의 자계에 의한 손실이 매우 크고, 축방향 자계가 인가될 경우 초전도선의 표면쪽 단면에서 대부분의 손실이 발생됨을 알 수 있었다. 수치적인 방법을 사용할 경우에 필라멘트의 배치와 형태 등을 고려할 수 있으므로 보다 정확한 계산결과를 얻을 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력 공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] W. Goldacker, H. Eckelmann, M. Quilitz, and B. Ullmann, "Effect of Twisting on the Multifilament BSCCO(2223)/Ag and /AgMg Tapes," IEEE Trans. on AS, Vol.7, No.2, pp.1670-1673, 1997
- [2] A. M. Campbell, "AC Losses in High Tc Superconductor." IEEE Trans. on AS, Vol. 5, No.2. pp.682-687, 1995
- [3] N. Amemiya, I. Hlasnik and O. Tsukamoto, "Influence of Longitudinal Magnetic Field on Thermomagnetic Instabilities in a AC Superconducting Cable," Cryogenics, Vol.33, No.9, pp.889-899, 1993
- [4] M. Iwakuma, et al., "AC Loss and Current Distribution in Parallel Conductors for Bi2223 HTS

Transformer Windings," ICEC16/ICMC in Kitakyushu, PS2-e2-38, pp.20-24, May, 1996

- [5] P. F. Herrmann, et al, "Development of Twisted Bi-2212 and Bi-2223 Powder in Tube Conductor for AC Applications," IEEE Trans. on AS, Vol.7, No.2, pp.1670-1673, 1997

## 저 자 소 개



심정욱(沈政煜)

1970년 10월 19일생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 0418-530-1333

E-mail : jungwook@asan.sch.ac.kr



이희준(李喜俊)

1969년 5월 15일 생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 0418-530-1333

E-mail : heejoon@enterprise.sch.ac.kr



차귀수(車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년 순천향대 조교수. 1991년 영국 Bath대학 방문교수, 현재 순천향대 공대 전기공학과 교수

Tel : 0418-530-1334

E-mail : gsoocha@asan.sch.ac.kr



이지광(李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 우석대 전기공학과 전임강사



한승엽(韓松曄)

1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1968년 서울대 전기공학과 전임강사. 1979년 프랑스 로렌공과대학 대학원 졸업(공박) 1995년 당 학회 회장. 1995년~1996년 서울대 공과대학 학장. 현재 서울대 공과대학 전기공학부 교수