

## 차폐층을 갖는 다층고온초전도 전력케이블의 전류분류 분석

이중화, 임성훈\*, 고석철, 박충렬, 한병성, 황시돌\*\*  
전북대학교, 전북대학교 공업기술연구소\*, 한국전력연구원\*\*

### Analysis of Current Distribution of Multi-Layer HTSC Power Cable with a Shield Layer

Jong-Hwa Lee, Sung-Hun Lim\*, Seokcheol Ko, Chung-Ryul Park, Byoung-Sung Han, and Si Dole Hwang\*\*  
Chonbuk National Univ.,  
The Research Center of Industrial Technology, Engineering Research Institute, Chonbuk National Univ\*,  
Korea Electric Power Research Institute\*\*.

#### Abstract

Superconducting transmission power cable is one of interesting parts in power application using high temperature superconducting wire. One of important parameters in high-temperature superconducting (HTSC) cable design is transport current distribution because it is related with current transmission capacity and AC loss.

In this paper, the transport current distribution at conducting layers was investigated through the analysis of the equivalent circuit for HTSC power cable with shield layer and compared with the case of without shield layer. The transport current distribution due to the pitch length was improved in the case of HTSC power cable with shield layer from the analysis.

**Key Words** : HTSC(High Temperature superconducting cable), parameters, Shield layer

#### 1. 서 론

고온초전도 전력케이블은 영저항 특성을 이용하여 무손실 송전을 가능케 함으로써 증가하는 전력 수급에 따른 기존 전력케이블의 한계를 극복해 줄 새로운 해결책으로 많은 주목을 받고 있다. 대전류 송전을 위해서 다층 구조를 갖는 고온초전도 전력 케이블은 일반 전력케이블과는 달리 각 층의 인덕턴스가 다르므로 층별 흐르는 송전 전류도 불균일하게 된다. 이를 분석하기 위해 자기 인덕턴스를 포함한 층간의 상호 인덕턴스를 계산하였고 계산된 인덕턴스와 부하단을 포함한 전원단자의 양끝단에서 접촉저항으로 구성된 회로방정식의 해를 구하였다[1].

고온초전도 전력케이블 도체부의 영향을 미치는

파라미터로 각 층의 접촉저항, 피치, 케이블 길이 등이 있으나 균등전류분류를 위한 최적의 설계값을 찾기에 어려움이 있다.

본 논문에서는 4층의 도체부와 한층의 차폐부로 구성된 다층고온초전도 케이블에서 차폐층이 전류분류에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 이를 위한 설계 파라미터로써 접촉저항, 피치 및 케이블의 길이가 각 층의 전류분류에 미치는 영향에 대해 조사하였으며 차폐층이 존재하지 않을 경우와 비교 분석하였다.

#### 2. 구조 및 등가회로

도체부와 차폐층을 포함한 다층 구조를 갖는 고온초전도 전력 케이블은 일정한 피치를 가진 수십

개의 테이프를 권선들에 병렬로 연결하고 자장에 의한 임계전류의 저하를 감소시키기 위해 서로 인접한 층은 권선 방향을 반대로 한 적층구조를 갖는다.

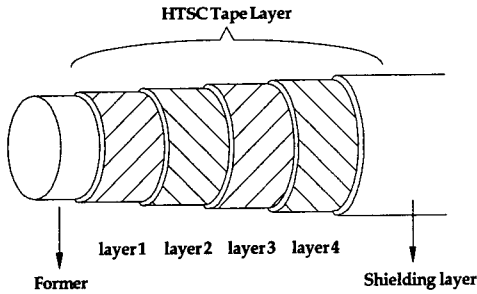


그림 1. 4층의 도체부와 1층의 차폐부를 갖는 고온 초전도 전력케이블의 구조

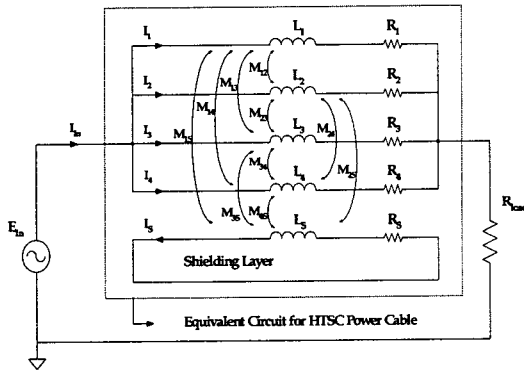


그림 2. 차폐층을 포함한 고온초전도 전력케이블의 등가회로

그림 1에서 보는 것처럼, 초전도케이블의 각 층간에는 절연체로 절연이 되어 있으며, 4층의 도체부와 1층의 차폐부를 갖는다. 그림 1로부터 각 층의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스 및 접촉저항을 포함한 그림 2의 등가회로를 유도할 수 있다.

자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스는 식(1), (2)를 이용하여 계산할 수 있으며, 설계한 케이블로부터 계산한 인덕턴스를 이용하여 4층의 고온초전도 케이블의 회로방정식을 식 (3)과 같이 전개할 수 있다[1]. 이때 식 (3)의 해를 계산함으로써 고온 초전도 전력 케이블의 층별 전류분류값을 구할 수 있다.

$$L_{ii} = L_{ig} \left( \mu_o \frac{\pi r_i^2}{l_{pi}^2} + \mu_o \frac{\ln\left(\frac{D}{r_i}\right)}{2\pi} \right) \quad (1)$$

$$M_{ij} = M_{ji} = L_{ig} \left( \frac{a_i a_j \mu_o}{l_{pi} l_{pj}} \pi r_i^2 + \frac{\mu_o}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_i}\right) \right) \quad (2)$$

$$E = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} & \dots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(1), (2)에서  $l_{pi}$ 는 권선각에 의한 권선피치를 나타내며, D는  $i$ 층과 송전전류의 리턴패스의 중심 사이의 거리를,  $a_i, a_j$ 는 각각  $i, j$  층의 권선 방향을 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

다층 고온초전도 전력케이블의 전류분류 계산을 위한 설계사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 다층 고온초전도케이블 설계 사양

테이프 임계전류	50 A
권선틀 직경	40 mm
테이프두께 [초전도체+Ag]	0.18 mm
필라멘트 두께 [초전도체]	0.12 mm
절연층 두께	0.1 mm

#### 3.1 차폐층이 존재하지 않을 경우 결선방향 및 피치길이에 따른 전류분류

설계파라미터에 따른 전류분류에 대한 분석으로 각 결선방향의 조합에 대해 피치길이 변화를 일정 범위 안에서 주었을 때 각 층의 전류분류를 분석하였다. 이때, 케이블 길이는 100m, 접촉저항은 10  $\mu\Omega$  로 설정하였다. 표 2는 차폐층이 없는 4층으로 구성된 도체부의 결선방향 조합을 보여준다. 여기서 +는 시계방향의 결선, -는 반시계 방향의 결선을 의미한다.

표 2. 차폐층이 없는 다층고온초전도 전력케이블의 결선방향 조합

구성 층번호	도체부				combination
	1	2	3	4	
결선 방향	+	+	+	+	++++
				-	+++-
			-	+	++-+
				-	+- - -
	-	-	+	+	+ - + +
				-	+ - + -
			-	+	+ - - +
				-	+ - - -

각각의 결선방향에 대해 각 층의 피치길이를 0~1.6 [m]까지 증가시키면서 각 층의 전류분류를 조사하였다. 그림 3은 결선방향이 각각 ++-, +--, +--, +--+ 인 경우 피치길이 증가에 따른 각 층의 전류분류 변화를 보여준다. 피치길이가 증가함에 따라 3층의 도통전류가 감소하는 구간이 있으나 최외각 층의 전류는 점차 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 피치길이에 따른 전류분류가 향상되는 구간이 나타나지 않음을 볼 수 있다.

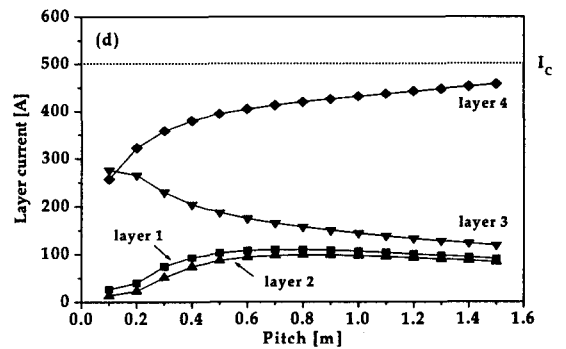
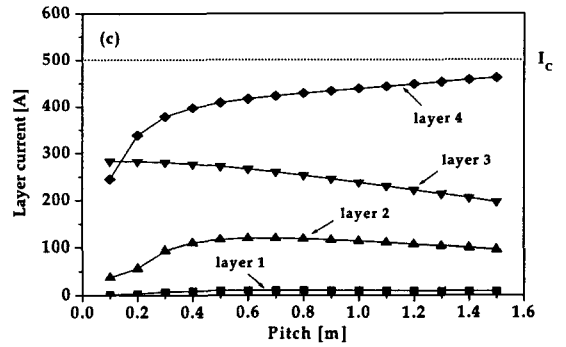
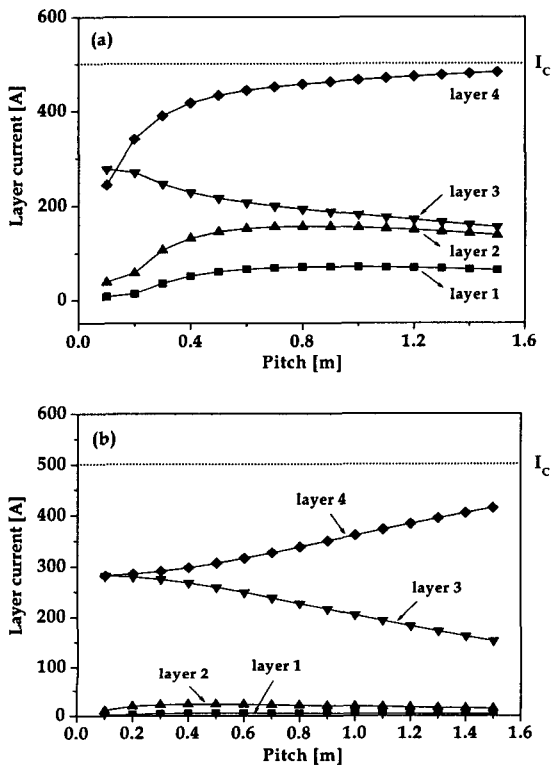


그림 3. 차폐층이 존재하지 않을 경우 결선방향 및 피치길이에 따른 각층의 전류분류 변화 (a) ++- (b) +-- (c) +--+ (d) +--+

또한 나머지 결선 방향 (++++, +--, +--, +--)에 대한 분석은 4층의 도통전류가 임계전류를 초과되는 결과를 얻기 때문에 나타내지 않았다.

### 3.2 차폐층이 존재할 경우 결선방향 및 피치길이에 따른 전류분석

차폐층이 존재할 경우, 결선방향에 따른 조합은 표 3과 같이 16가지의 조합이 있으며 이중에서 3가지 결선방향(+++--, +--+ , +--+ )에 따라 조사하였다. 이는 설정된 피치 범위 안에서 최외각 층이 임계전류를 넘지 않는 범위이며 나머지 경우 모두 임계전류를 넘는 결과를 얻었기 때문에 조사하지 않았다. 그림 4에서 보는 것처럼 각 권선방향에 대해 피치길이를 증가시키에 따라 각 층의 전류분류가 최소가 되는 피치 길이값이 존재함을 관찰할 수 있으며 이를 그림에서 점선으로 표시하였다. 이후의 피치길이 증가는 전류분류 향상에 기여하지 못하는 것을 볼 수 있다. 이는 기존의 차폐층이 케

이들 내에서 발생하는 자계로부터 외부로 영향을 차폐하기 위한 목적과 함께 통전부내의 전류분류 향상에 기여함을 보여준다. 이로부터 특정한 결선 방향에 대해 특정한 피치길이로 설계할 경우 전류분류 향상을 기대할 수 있음을 알 수 있다.

표 3. 차폐층을 갖는 다층고온초전도 전력케이블의 결선방향에 따른 조합

구 성	도체부				차폐부	combination
	1	2	3	4	5	
결선 방향	+					+++++
						++++-
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--
						+++--

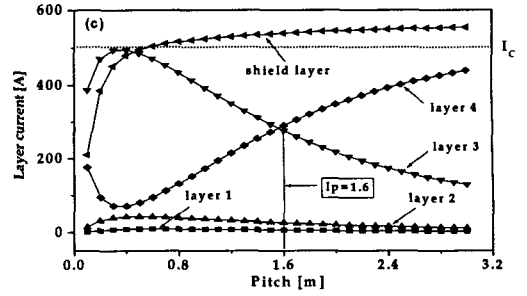


그림 4. 차폐층이 존재할 경우 결선방향 및 피치길이에 따른 각 층의 전류분류 변화  
(a) +---- (b) +---+ (c) +++--

#### 4. 결론

다층 고온초전도 전력케이블의 차폐층은 특정한 결선방향과 피치길이로 설계할 경우, 전류분류 향상에 기여함을 분석할 수 있었다. 이를 위해 차폐층이 존재하지 않은 경우와 존재하는 경우의 다층 고온초전도 전력케이블의 설계파라미터에 따른 각 층의 전류분류를 비교분석하였다. 차폐층이 존재하지 않을 경우 피치길이가 증가함에 따라 전류분류는 상이함을 보이며 전류분류 차가 최소가 되는 피치값은 없었지만 차폐층이 존재할 경우에는 전류분류의 차가 최소가 되는 피치값이 존재함을 확인할 수 있었다.

이로부터 각층 균등한 전류분류로부터 흐르는 전송전류를 향상시키기 위해서는 케이블 설계시 차폐층을 고려해야 하며 또한 적절한 피치값을 조절해야 한다는 결론을 얻을 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 연구개발인 초전도 전력케이블 시스템 개발의 연구비 지원에 의한 것입니다.

#### 참고 문헌

- [1] S. Kruger et al., "Loss and Inductance Investigations in a 4-layer Superconducting Prototype Cable Conductor", IEEE Trans. on Appl. Supercond, Vol. 9, NO 2 pp.833-836, 1999
- [2] H. Noji, "Ac Loss of a High-Tc Superconducting Power Cable Conductor" Vol. 10, pp.552-559, 1997.

