

## 차폐층을 갖는 다층고온초전도 전력케이블의 전류분류 분석

### Analysis on Current Distribution in Multi-layer HTSC Power Cable with Shield Layer

이종화<sup>1</sup>, 임성훈<sup>2,a</sup>, 임성우<sup>3</sup>, 두호익<sup>1</sup>, 한병성<sup>1</sup>  
(Jong-Hwa Lee<sup>1</sup>, Sung-Hun Lim<sup>2,a</sup>, Seong-Woo Yim<sup>3</sup>, Ho-Ik Du<sup>1</sup>, and Byoung-Sung Han<sup>1</sup>)

#### Abstract

High- $T_c$  superconducting (HTSC) power cable is one of the interesting parts in power application using HTSC wire. However, its stacked structure makes the current distribution between conducting layers non-uniform due to difference between self inductances of conducting layers and mutual inductances between two conducting layers, which results in lower current transmission capacity of HTSC power cable. In this paper, the transport current distribution between conducting layers was investigated through the numerical analysis for the equivalent circuit of HTSC power cable with a shield layer, and compared with the case of without a shield layer. The transport current distribution due to the increase of the contact resistance in each layer was improved. However, its magnetization loss increased as the contact resistance increased. It was confirmed from the analysis that the shield layer was contributed to the improvement of the current distribution between conducting layers if the winding direction and the pitch length were properly chosen.

**Key Words** : High- $T_c$  superconducting (HTSC) power cable, Transport current distribution, Shield layer

#### 1. 서론

고온초전도 전력케이블은 영저항 특성을 이용하여 전력수송 증가에 따른 송전전압 상승문제와 이에 따른 기기의 절연문제, 기존전력케이블의 용량 한계로 인한 교체 비용 및 공간문제를 해결할 수 있는 방안의 하나로써 주목을 받게 되었다. 이후, 일부 각 선진국에서는 고온초전도 전력케이블을 단거리 송전에 포설하여 성공적인 결과를 보여주기도 하였으며 향후 전력수급증가에 따른 기존의 지중 전력케이블을 대체할 새로운 해결책으로써 이에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다[1].

고온초전도 전력케이블의 구조는 냉각 통로와 형상유지를 위한 포머, 통전을 위한 고온초전도 도체부, 절연부, 외부자계 차폐를 위한 차폐부로 이루어져 있으며, 이 중에서도 통전을 위한 도체부는 실계통의 용량을 만족하기 위해 원통 형태의 포머 위에 수십개의 고온초전도 선재를 병렬로 연결하여 하나의 층을 구성하고 이러한 테이프 선재층을 여러 층으로 하는 다층 구조를 갖는다. 그러나 다층 구조상, 각층의 인덕턴스 값의 차이로 인한 층간 전류 불균일이 발생되며 전류가 가장 많이 흐르는 층이 임계전류를 넘게 될 경우 초전도 상태가 깨지게 되고 전체 송전전류 용량의 제한을 가져오게 된다[2,3]. 또한 외부자계가 인가되지 않아도 자체의 다른 선재에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자계 영향으로 통전손실을 포함한 자화손실이 발생되어 이를 감소시킬 수 있는 방안이 요구되고 있다[2].

따라서 본 논문에서는 이를 해결하고자 차폐층을 갖는 고온초전도 전력케이블을 설계하여 균등

1. 전북대학교 전기공학과  
(전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14)  
2. 숭실대학교 전기공학과  
3. 한국전력연구원  
a. Corresponding Author : superish73@hanmail.net  
접수일자 : 2005. 12. 5  
심사완료 : 2006. 2. 6

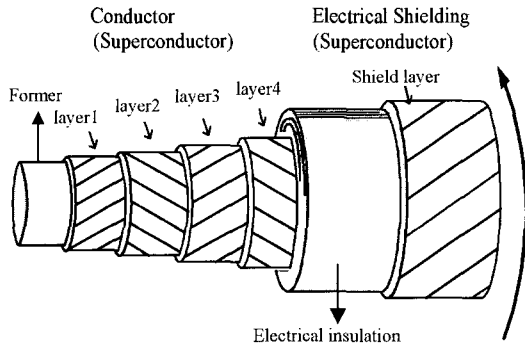


그림 1. 차폐층을 갖는 다층고온초전도 전력케이블의 구조.

Fig. 1. Structure of multi-layer HTSC power cable with a shield layer.

전류분류를 위한 각층의 자기인덕턴스와 층간의 상호 인덕턴스를 계산하였다. 계산된 인덕턴스와 부하단을 포함한 전원단자와 케이블의 양끝단에서의 접촉저항으로 구성된 등가회로로 방정식을 구하여 피치길이에 따른 각층의 전류분류의 불균일 정도를 분석하였다. 또한, 전류값으로부터 층별 및 층간에 유기되는 자계성분을 구하여 각층의 자화손실을 포함한 통전손실을 계산하였다. 마지막으로 전류분류에 영향을 미치는 설계 파라미터로서 차폐층이 존재 하였을 경우 피치 길이에 따른 전류분류와 손실의 변화가 어떻게 형성되는지 비교 분석하였으며, 시뮬레이션을 통해 대전류 송전을 위해서는 차폐층이 도체부의 균등전류분류 향상에 기여함을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 고온 초전도 전력케이블 설계시 교류손실 감소와 균등 전류분류 향상을 위해 착안하였으면 하고자 제시한다.

## 2. 본 론

### 2.1 구조 및 등가회로

고온초전도 전력케이블의 구조는 대전류 송전을 위해 그림 1과 같이 원통형 권선틀에 수십개의 테이프를 병렬로 적층한 구조를 갖는다.

이때, 인접한 두 층은 쇄교자속에 의한 임계전류의 감소를 줄이고자 초전도 테이프의 권선방향을 반대로 하였고 4층의 도체부와 한층의 차폐층으로 구성하였다. 여기서, 차폐층은 삼상케이블 구성시 공통으로 접지에 연결될 것을 고려하여 차폐

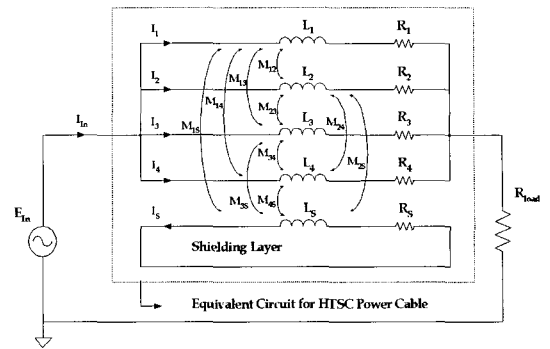


그림 2. 차폐층을 갖는 다층고온초전도 전력케이블의 등가회로.

Fig. 2. Equivalent circuit of multi-layer HTSC power cable with a shield layer.

층 양끝단도 공통접지에 연결된 것으로 가정하였으며. 이와 같이 차폐층을 구성할 경우, 차폐층에 유기되는 전류는 내부 도체층에 흐르는 전류로 인해 발생하는 자계성분이 폐회로를 구성하는 차폐층에 쇄교됨으로써 내부도체에 흐르는 전류와 같은 크기로 도체부에 유기되게 된다.

$$L_i = L \lg \left[ \mu_0 \frac{\pi r_i^2}{l^2} + \mu_0 \frac{\ln \left( \frac{D}{r_i} \right)}{2\pi} \right] \quad (1)$$

$$M_{ij} = M_{ji} = L \lg \left[ \frac{a_i a_j \mu_0}{l \pi l_{ij}} \pi r_i^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{D}{r_i} \right) \right] \quad (2)$$

한편, 각 층의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스는 저장된 자기에너지를 이용하여 식 (1), (2)와 같이 구할 수 있으며[2,3], 다층구조를 갖는 고온초전도 전력케이블은 적층된 구조상 층별 자기인덕턴스와 층간의 상호인덕턴스, 전원전압과 부하저항을 포함한 등가회로를 그림 2와 같이 구성할 수 있다. 이로부터 수치해석법 중에 하나인 유한차분법(finite difference method)을 적용하여 미분방정식의 해를 구하여 각층의 전류를 계산하였다.

전개한 미분방정식은 식 (3)과 같이 행렬 형태로 나타낼 수 있으며 전개한 행렬방정식을 식 (4), (5)와 같이 매시간 각 층의 전류변화량과 각 층에 유기자계 및 층간 유기자계를 전개하여 계산하였다.

$$E = R \cdot I + L \cdot \bar{I} \quad (3)$$

$$E = R \cdot I(n) + L \frac{I(n) - I(n-1)}{\Delta t} \quad (4)$$

$$I(n) = (\Delta t R + L)^{-2} + L \cdot I(n-1) + (\Delta t R + L)^{-2} \cdot \Delta t \cdot E \quad (5)$$

### 2.2 통전손실 및 자화손실 계산

각층을 구성하는 고온초전도 선재는 다층 고온 초전도 전력케이블의 구조상 외부자계를 인가하지 않아도 케이블 내부에서 발생하는 자계의 영향을 받게 되어 교류손실이 발생하게 된다. 이러한 손실은 송전전력 용량과 효율에 직접적인 관련이 됨으로 설계시 이를 고려할 필요가 있다. 각 층에서 발생하는 통전손실은 식 (6)으로 표현되는 노리스식을 이용하여 계산할 수 있으며, 이때 통전손실 계산을 위한  $i$  층의 전류는 식 (5)로부터 얻을 수 있다. 또 한 전체 통전손실은 식 (8)과 같이 각 층의 통전손실의 합으로 계산할 수 있다[3].

$$Q_{ii} = \frac{\mu_0 f \cdot I_{ci}^2}{2\pi} [(2 - F_i) + F_i + 2(1 - F_i) \ln(1 - F_i)] \quad (6)$$

$$F_i = \frac{I_{pi}}{I_{ci}} \quad (7)$$

$$Q_t = \sum_i Q_{ti} \quad (8)$$

여기서,  $I_{pi}$  는  $i$  층의 피크전류를,  $I_{ci}$  는  $i$  층의 임계전류를 나타낸다.

고온초전도 전력케이블에서 발생하는 교류손실로서 통전손실 외에 선재의 축방향 성분의 자계 영향을 받게 되는 자화손실이 발생하게 된다. 자화손실도 통전손실과 마찬가지로 각층에서 발생하는 손실의 합으로 계산할 수 있으며 동일한 개념으로  $i$ 층에 발생하는 직각성분의 자화손실은 식 (9)와 같이 해석이 가능하다.

$$Q_{mi} = \frac{2 \cdot f \cdot B_{\perp}^i}{\mu_0} \frac{\beta_i}{3} S_i \quad \beta_i < 1$$

$$= \frac{2 \cdot f \cdot B_{\perp}^i}{\mu_0} \left[ \frac{1}{\beta_i} - \frac{2}{3\beta_i^3} \right] S_i \quad \beta_i > 1 \quad (9)$$

$S_i$ 는  $i$ 층의 면적,  $J_c$ 는 고온초전도 테이프의 임계전류밀도,  $b$ 는 테이프 두께의 절반을 나타내며  $\beta_i$ 는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\beta_i = \frac{B_{\perp}^i}{\mu_0 J_c b} \quad (10)$$

따라서, 케이블 전체의 자화손실은 각 층에서 발생하는 자화손실의 합으로 식 (11)와 같이 계산할 수 있다.

$$Q_m = \sum_i Q_{im} \quad (11)$$

### 3. 결과 및 고찰

다층 고온초전도 전력케이블의 설계 파라미터에 따른 각 층의 전류분류 및 교류손실 계산을 위한 설계사양은 표 1에 나타내었다.

먼저 고온초전도 전력케이블이 4층의 도체부로만 구성된, 즉 차폐층이 없는 경우, 각 결선방향의 조합에 대해 피치길이 변화에 따른 각 층의 전류분류를 그림 3에 나타내었다.

여기서 +는 시계방향, -는 반시계 방향의 결선 방향을 나타낸다. 400<sub>rms</sub>의 전원전압 인가 시 피치 길이를 0.1 m에서 1.5 m 범위에서 변화를 주었을 때 임계전류를 초과하지 않는 각각의 결선방향에 대해서만 나타내었으며 피치길이를 증가시켜 각 층의 전류분류 변화를 살펴보았다.

표 1. 전류분류 및 교류손실 계산을 위한 초전도 전력케이블 설계 파라미터.

Table 1. Design parameters of HTSC power cable for calculation of current sharing and ac loss.

설계 파라미터	설정값	단위
층수	4(+1)	
권선틀 직경	40	mm
테이프두께	0.18	mm
필라멘트 두께	0.12	mm
절연층 두께	0.1	mm
테이프 임계전류	50	A
각 층의 테이프 수	10	

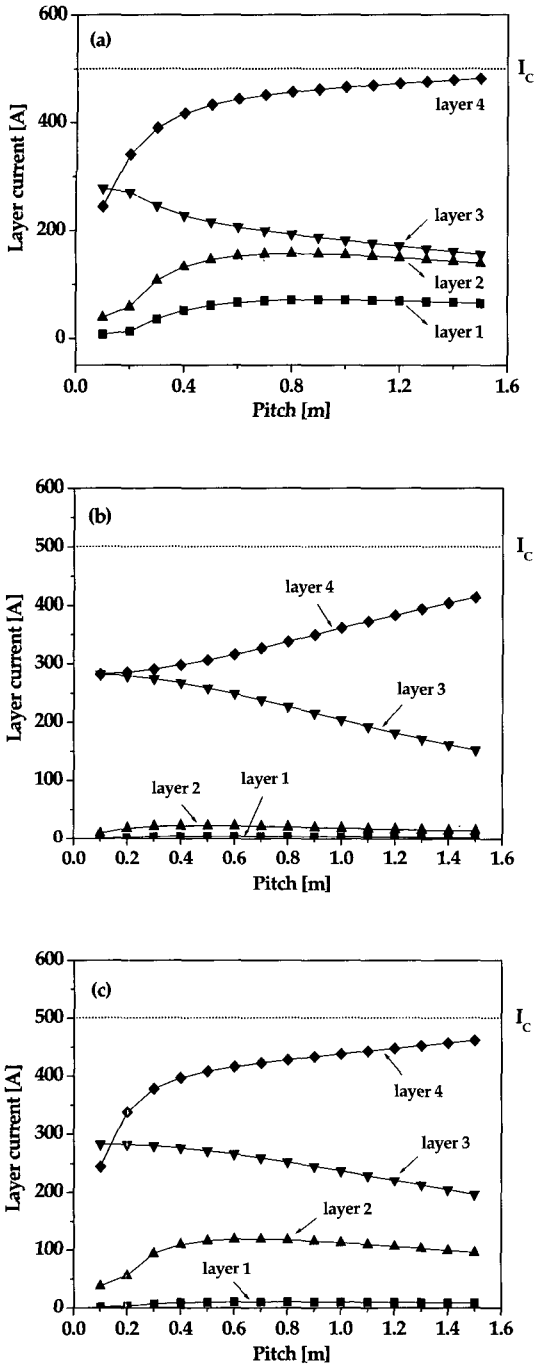


그림 3. 피치길이에 따른 각 층의 전류분류 변화.  
 (a) +-+ (b) +++- (c) ++++  
 Fig. 3. Variation of current distribution in each layer due to pitch length.  
 (a) +-+ (b) +++- (c) ++++

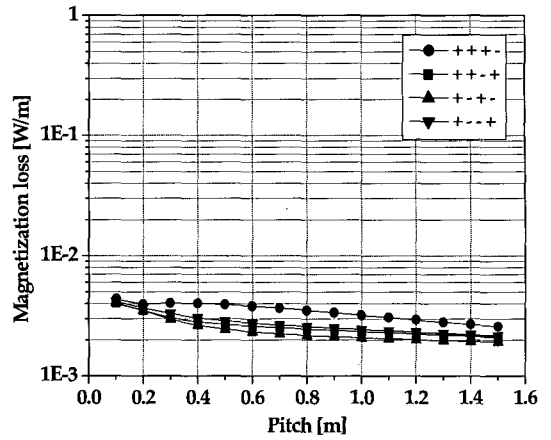


그림 4. 피치길이에 따른 전체자화손실 변화.  
 Fig. 4. Variation of total magnetization loss due to pitch length in each layer.

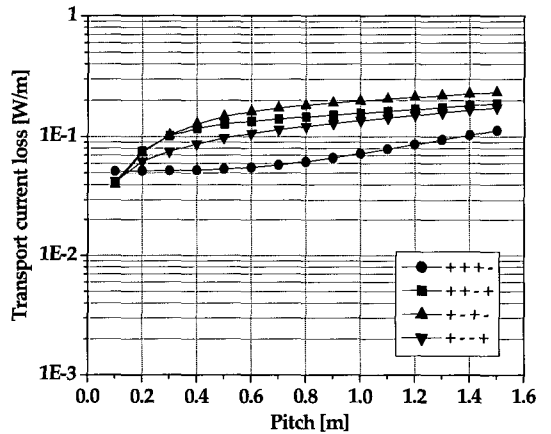


그림 5. 피치길이에 따른 전체통전손실 변화.  
 Fig. 5. Variation of total transport current loss due to pitch length in each layer.

피치길이가 증가함에 따라 3층의 도통전류는 감소하였고 최외각 층의 전류는 점차 증가하는 것을 볼 수 있으나 전류분류 향상에는 큰 영향을 미치지 못하였다.

그림 4, 5는 각각의 결선방향에 대해 피치길이에 따른 케이블 전체 자화손실과 통전손실을 나타내었다. 피치길이에 따른 전체 자화손실에서는 피치길이가 증가함에 따라 전체 자화손실은 다소 감소하는 경향을 얻을 수 있었으며 전체 통전전류는

표 2. 차폐층을 갖는 다층고온초전도 전력케이블의 결선방향에 따른 조합.

Table 2. Combination of winding directions of multi-layer HTSC power cable with a shield layer.

구 성	도 체 부				차폐부	combination
	1	2	3	4		
결선방향	+				5	+
						-
						+
						-
						+
						-
						+
						-
						+
						-
						+
						-
						+
						-
						+

피치길이가 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 보였다. 이는 피치길이가 증가함에 따라 테이프의 결선방향에 수직인 자계성분이 감소하게 되어 전체 저항손실이 감소된 것으로 분석할 수 있으며, 전체 통전손실의 증가는 가장 큰 전류가 도통하는 최외각 층이 전체 통전손실을 좌우한 것에 기인한 것으로 분석할 수 있다.

표 2는 차폐층이 존재할 경우 결선방향의 조합을 보여준다. 각 결선방향에 따라 피치길이를 0 m에서 3.0 m까지 증가시켜 각각의 피치에서 각 층의 전류분류를 조사하였다. 16가지의 결선방향 조합 중 3가지 결선방향인 경우(+++), (+--+), (+---)에만 설정된 피치범위에서 통전부의 최외각 층이 임계 전류를 넘지 않았다.

그림 6은 설정된 피치 범위 안에서 차폐층이 존재할 경우, 임계전류를 넘지 않은 결선방향에 대해 피치길이에 따른 각 층의 전류분류를 보여준다. 각 권선방향에 대해 피치길이를 증가시키기에 따라 각

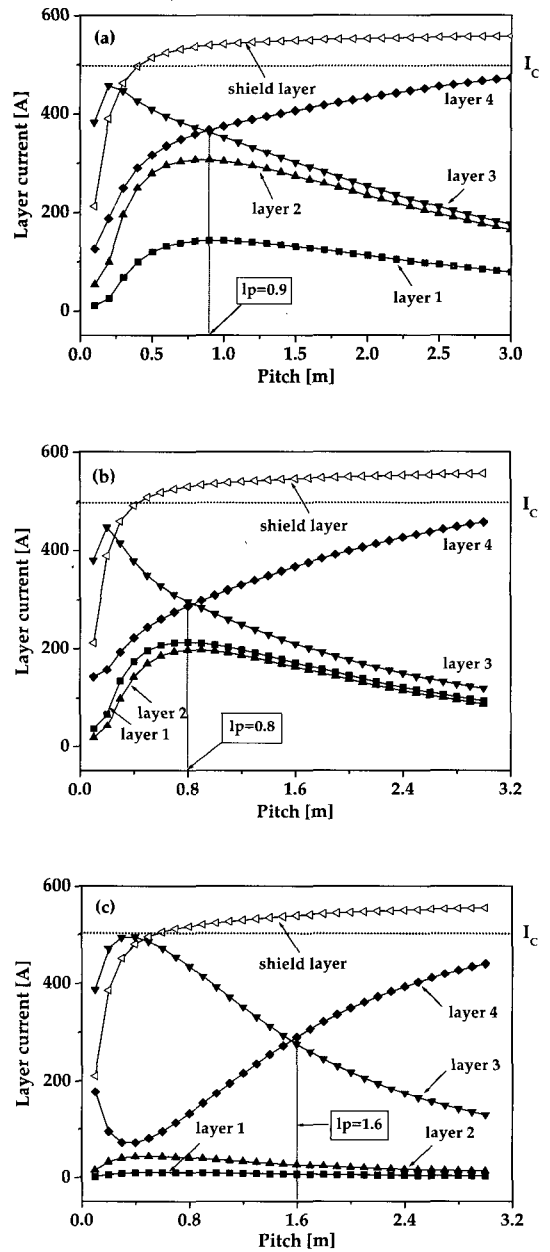


그림 6. 차폐층을 갖는 다층고온초전도 전력케이블의 피치길이에 따른 각 층의 전류분류 변화.

Fig. 6. Variation of current distribution in each layer of multi-layer HTSC power cable with a shield layer due to pitch length. (a) ++++ (b) +--+ (c) +---

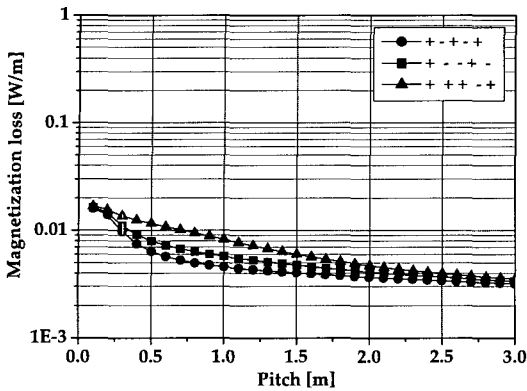


그림 7. 차폐층을 갖는 다층 고온초전도 전력케이블의 피치길이에 따른 전체자화손실 변화.  
 Fig. 7. Variation of total magnetization loss of multi-layer HTSC power cable with a shield layer due to pitch length in each layer.

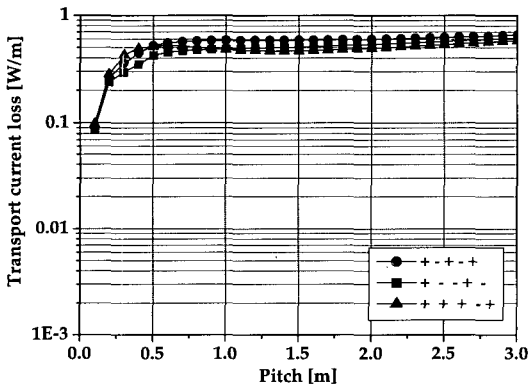


그림 8. 차폐층을 갖는 다층 고온초전도 전력케이블의 피치길이에 따른 전체통전손실 변화.  
 Fig. 8. Variation of total transport current loss of multi-layer HTSC power cable with a shield layer due to pitch length in each layer.

층의 전류분류가 최소가 되는 피치길이 값이 존재하였고 이를 각각의 그림에서 점선으로 표기하였다. 이후의 피치길이 증가는 전류분류 향상 효과에 기여할 수 없음을 의미한다. 그림 6(c)의 경우에는 각 층의 전류분류차가 최소인 피치길이 값이 존재하지만 나머지 결선방향인 경우(그림 6(a), 그림

6(b))보다 전류분류 차가 크게 나타남을 비교하고 있다.

따라서 균등한 전류분류 효과를 위해서는 특정한 결선방향에 대해 특정한 피치 길이로 설계해야 하며 이때 전류분류 향상을 가져 올 수 있음을 그림 6에서 확인할 수 있다.

차폐층을 갖는 다층고온초전도 전력케이블의 피치 길이에 따른 손실분석(그림 7, 그림 8)에서도 차폐층이 존재하지 않는 경우와 유사하게 전체 자화손실은 피치길이가 증가함에 따라 감소되는 경향을 보였고 전체 통전손실도 일정한 값에 도달된 후 크게 증가하지 않음을 볼 수 있었다. 이로부터 자화손실과 통전손실은 결선방향에 대해 적절한 피치값으로 설계한다면 차폐층의 유무에 관계없이 손실에는 영향을 미치지 못함을 분석할 수 있다.

#### 4. 결론

다층 고온초전도 전력케이블은 전류송전 시 각 층에 인덕턴스가 발생하게 되며 이로 인해 층별 불균등한 전류분류가 형성되게 된다. 또한 대전류 송전 시 어느 한층이 임계전류를 초과하게 되면 다른층 케이블에 영향을 미치게 되므로 균등한 전류분배가 이루어지도록 설계할 필요가 있다.

따라서 차폐층을 갖는 다층 고온초전도 전력케이블을 방안으로 생각하게 되었고 이는 특정한 결선방향과 피치길이로 설계하였을 경우 균등한 전류분류가 형성되며 별도의 교류손실도 증가하지 않고 통전부의 대전류 송전이 가능할 수 있다. 이때 결선방향은 +--+ , +--- , +++- (+는 시계방향, -는 반시계 방향의 결선방향을 나타낸다.)에 대해 피치길이는 각각 0.9 m, 0.8 m, 1.6 m 으로 설계할 경우 균등한 전류분류가 나타남을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004~2006년도 한전전력연구원의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고 문헌

[1] M. Tsuda, A. K. M. Alamgir, Y. Ito, T. Harano, N. Harada, T. Hamajima, M. Ono,

- and H. Takano, "Influence of current distribution on conductor performance in coaxial multi-layer HTS conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 12, p. 1643, 2002.
- [2] S. Kruger Olsen, C. Traholt, A. Kuhle, O. Tonnesen, M. Daumling, and J. Ostergaard, "Loss and inductance investigation in a 4-layer superconducting prototype cable conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 9, p. 833, 1999.
- [3] V. E. Sytnikov, P. I. Dolgosheev, G. G. Svalov, N. V. Polyakova, and D. I. Belij, "Influence of the multilayer HTS-cable conductor design on the current distribution," *Physica C*, Vol. 310, p. 387, 1998.
- [4] 조전욱, 성기철, 권영길, 류강식, "고온초전도 전력케이블의 기술동향", 초전도와 저온공학, 2권, 1호, p. 19, 2000.