

초전도 케이블 시스템 구성과 레이어의 전류 분배에 관한 연구

김남열·이종범  
원광대학교

A Study on the HTS Distribution Cable System Modeling and the Current Distribution of Layers

Nam-Yoel Kim · Jong-Beom Lee  
Wonkwang University

**Abstract** - The use of high-temperature superconducting materials for transmission cable application is being realized in prototype situation. HTS cable systems have been installed in laboratories and tested successfully around the world. In Korea, the first step in development of superconducting cables is distribution system. In this paper, it is proposed the HTS distribution system modeling using ATPDraw and EMTDC programs. In the multilayer conductor, the inner layers have higher impedance than the outer layers. As a result, the current concentrates in the outer layers. This paper presents the result of the current distribution in EMTDC.

1. 서 론

산업의 성장과 인구 증가 그리고 인구의 대도시 밀집화에 따른 전기 에너지의 수요는 해마다 증가하고 있는 추세이다. 그에 따라 도심지에서의 전력선의 지중화가 진행되어왔으며 결과적으로 송전량의 증대를 이루어왔다. 그러나 중장기적으로 지하철, 통신선, 수도관, 가스관의 시설들이 같이 증가하면서 지하공간의 조밀화가 초래되고 있다. 따라서 전력케이블을 위한 전력구나 관로의 신설이 매우 곤란하게 되었고 지금까지 설치된 케이블만의 송전은 머지 않아 한계에 도달하게 될 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 대용량 XLPE케이블을 비롯한 절연체의 유전체 손실 저감대책과 강제 냉각방식등이 연구되고 있지만, 그 증가량이 크지 않아 획기적인 대안이 될 수 없다[1]. 이러한 대안에 비해서 위 한 초전도 케이블은 기존의 전력구나 관로를 그대로 사용하면서 냉각설비만을 추가하여 대용량의 전류를 송전할 수 있다. 더불어 송전손실이 감소하므로 운영비가 절감이 되기 때문에 국내뿐만 아니라 외국에서도 상당한 관심을 갖고 있으며 케이블을 개발하여 현재 실계통에 적용을 가까이에 두고 있다[2]. 국내에서도 이에 발맞추어 배전급 초전도 케이블 개발을 위해 국가적인 지원을 비롯하여 각 연구기관에서 지속적인 연구를 실시하고 있는 상황이다.

본 논문에서는 ATPDraw와 EMTDC 프로그램을 사용하여 계통을 구성하고 각각의 결과를 비교함으로써 프로그램의 적절성의 판단과 초전도케이블내의 실제 도체저항값을 추정하였으며 케이블에서 일정 전류가 유입되었을 때 각 레이어에서의 전류분배의 비율을 알아보았다.

2. 본 론

2.1 계통구성

프로그램상의 계통 비교를 위해서 기본적인 계통 데이터는 같게 설정되어야 한다. 즉 전원단과 부하단 그리고 케이블 배열과 구성 등의 설정값들 중 전원단의 전류 리드선과 각 위치에서의 냉각설비 그리고 부하단에 위치하는 기타 설비는 현재 자료가 없는 상황이기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않았으며 또한 설비들로 인 해 나타나는 영향은 고려하지 않고 접지와 케이블의 구성, 형태, 배열 등의 자체적인 것만을 고려하였다. 본 논문에서 다루게 될 간략화 선로에 대한 계통 데이터와 케이블 내부 구성 데이터는 표 1, 2에 나타내었으며, 데이터들을 이용하여 구성된 모델링 형태는 그림 1과 같다.

표 1. 계통 데이터

항목	규격	
전원전압	22.9(kV)	
부하용량	50(MVA)	
선로 길이	4.2(km)	
접지	개소	3
	간격	1(km)
	타입	직접접지
	저항값	1(Ω)

표 2. 케이블 데이터

항목	규격
케이블 타입	파이프타입
상 배열	삼각배열
former	16(mm)
O.D of SC	39(mm)
케이블 외경	136(mm)
절연층	7(mm)
SH 두께	10(mm)
보호층	2(mm)
단열층	34(mm)
방식층	3.5(mm)
초전도 선재	w=3.8(mm)
	t=0.24(mm)
도체 임계전류	22(kA/cm <sup>2</sup> )

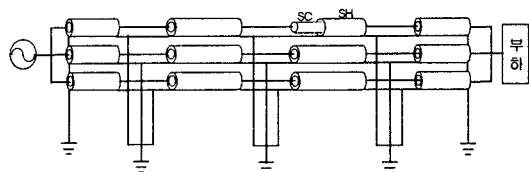


그림 1. 시뮬레이션 계통 모델

그림 1의 계통은 CDC type(Cold Dielectric Coaxial)의 삼상 일팔 파이프 타입으로 구성되었으며, 각 상도체는 내부에 SC(Superconducting Conductor)와 SH(Superconducting shield)를 가지고 있다. 그리고 액체질소는 내부의 stainless steel 재질의 중공 former를 통해 흐르게 되며 stainless steel 이 하나의 도체가 아닌 여러 개의 stainless steel이 나선형으로 꼬여서 이루어져있는 open former이기 때문에 액체질소는 former를 통해 SC에까지 스며들게 된다. 그 이유는 SC가 합침됨 으로서 웬칭 발생 억제효과를 높일 수 있기 때문이다. 또한 CDC 에는 계통내에 액체질소의 진행로와 귀로가 같이 존재하게되어 그 효과를 더욱 높이고 있다. 계통은 22.9(kV)의 배전전압이 입력으 로 주어졌으며, 계통 양단과 계통내의 구간별 접지저항을 중동적 으로서 1[Ω]으로 설정하였다. 그리고 부하용량은 현재의 배전계통에 서 고려되는 용량이 10(MVA)임을 고려하여 본 논문의 계통에서 는 50(MVA)로 가정하였다. 초전도 특성상 이론적으로 계통의 SC의 전류와 SH의 전류는 같은 크기이며 위상이 반대가 되어 SC에서 발생하는 자계를 SH에서 차폐시켜 결과적으로 손실을 줄

이고 송전량을 늘리는 결과를 가져오게 된다. 현재 초전도 선재의 실질적인 저항은  $1 \times 10^{-22} [\Omega \cdot m]$ 인 것으로 알려져 있지만, 이 초전도 선재를 통한 여러 층의 레이어로 이루어진 초전도 케이블의 SC와 SH에 적용될 수 있는 도체저항률과 전원단과 부하단에서 타 계통과 연결되는 부분에서 발생하는 Joint resistance가 고려되지 않은 저항값이기 때문에 이 값을 실제 초전도 배전계통에서의 SC와 SH의 저항값으로 보기는 부적절하다. 그러므로 본 논문에서는 SC와 SH의 도체의 저항률을  $1 \times 10^{-9} [\Omega \cdot m]$ ,  $1 \times 10^{-15} [\Omega \cdot m]$ ,  $1 \times 10^{-22} [\Omega \cdot m]$ 으로 선정하여 각각의 저항률에서의 케이블 전압, 전류를 측정하였다.

## 2.2 시뮬레이션 비교

### 2.2.1 정상상태

프로그램상의 계통 구성후의 각 저항값에 따른 케이블 선로 인입단에서의 전류값을 비교하였으며 결과는 그림 2, 3, 4와 같다.

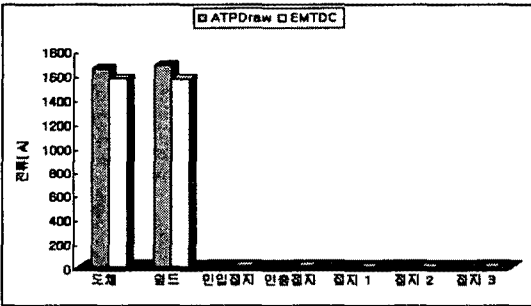


그림 2. 최대전류값 ( $R = 1 \times 10^{-9} [\Omega \cdot m]$ )



그림 3. 최대전류값 ( $R = 1 \times 10^{-15} [\Omega \cdot m]$ )

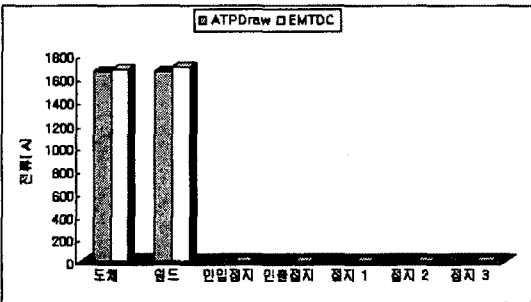


그림 4. 최대전류값 ( $R = 1 \times 10^{-22} [\Omega \cdot m]$ )

그림 2, 3, 4에서 프로그램상의 두 계통에 대한 결과가 큰 차이를 보이지 않고 있다. 즉 두 프로그램에서의 계통 구성이 적절하게 이루어졌음을 보여준다. 그리고 저항값이  $1 \times 10^{-15}$  일때와  $1 \times 10^{-22}$  일때를 보면 계통에서 도체와 일드의 피크 전류값이 차이를 보이지 않고 있다. 뿐만 아니라 점지에서의 전류값들도 차이를 보이지 않고 있다. 정상상태시의 도체와 일드에서의 최대 피크 전류값을 볼때 우리는 현재의 초전도 케이블 계통에서의 상 도체저항의 최저값이  $1 \times 10^{-15}$  이 될 수 있다고 추정할 수 있다. 초전도 선재의 저항과 Joint resistance를 감안했을 때 초전도 케이블의 저항범위는  $1 \times 10^{-15}$ 부터  $1 \times 10^{-22}$  사이 값이 될 것이다. 그러므로 고장상황

에서는  $1 \times 10^{-15}$  과  $1 \times 10^{-22}$ 만을 비교해 보도록 하겠다.

### 2.2.2 고장상태

고장상황으로 0, and 90. 일선지락 고장상황을 각각 모의하였으며 먼저 0. 고장 상황에서의 결과는 그림 5, 6과 같다.

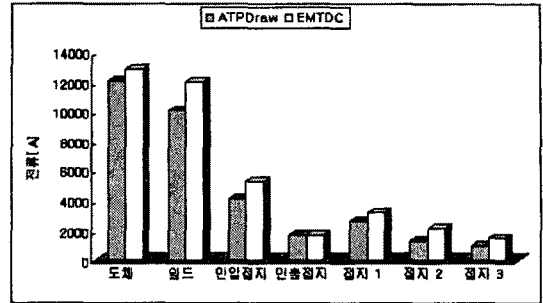


그림 5. 최대전류값 ( $R = 1 \times 10^{-15} [\Omega \cdot m]$ , 0. 고장)

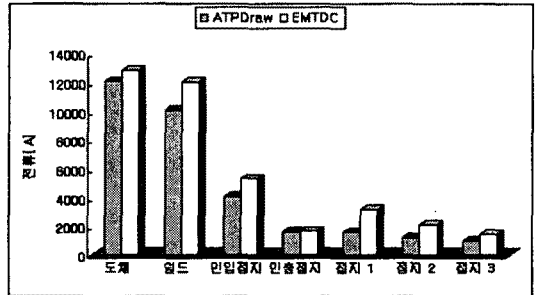


그림 6. 최대전류값 ( $R = 1 \times 10^{-22} [\Omega \cdot m]$ , 0. 고장)

그림 5, 6에서 보는 바와 같이 0. 고장상황에서  $1 \times 10^{-15}$  과  $1 \times 10^{-22}$  인 경우의 도체와 일드의 피크 전류값이 차이는 있지만 경향이 일치하는 것으로 나타났다.

그리고, 다음 그림 7, 8은 90. 고장상황에서의 결과값들이다.

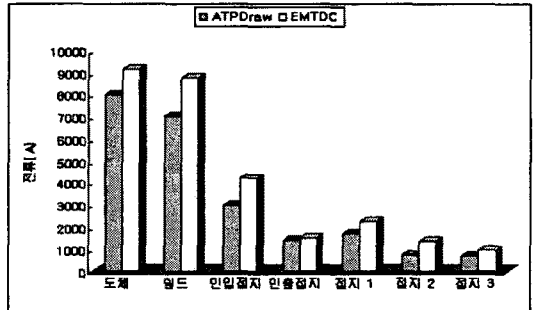


그림 7. 최대전류값 ( $R = 1 \times 10^{-15} [\Omega \cdot m]$ , 90. 고장)

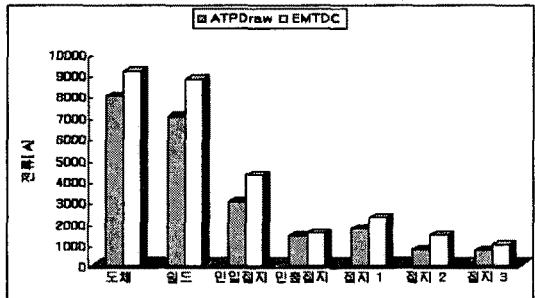


그림 8. 최대전류값 ( $R = 1 \times 10^{-22} [\Omega \cdot m]$ , 90. 고장)

그림 7, 8을 비교해 볼 때 0, 고장시와 그 경향이 비슷하게 나타났으며 전체적으로 EMTDC에서 피크값이 크게 나타났다. 위의 0°와 90°. 고장결과는 ATPDraw 보다도 EMTDC에서 그 피크값이 크게 나타났지만 그 고장 결과 형태는 비율적으로 같게 나타났다. 결과적으로 정상상태시의 두 프로그램이 정확한 일치성을 보이고 있기 때문에 고장상황에서의 결과가 잘못되었다고는 볼 수 없다. 즉 결과값의 차이는 프로그램상의 민감도와 요구되는 데이터들의 차이 때문으로 사료된다.

### 2.3 레이어 전류 분배

케이블 내의 SC와 SH는 같은 형태의 구성을 보이며, SC와 SH는 여러 개의 초전도 레이어로 이루어져 있다. 초전도 레이어 재료로는 BSCCO2223/Ag이 사용되었으며 각각의 레이어 사이에는 PPLP로 절연되어 있다. 초전도 레이어는 여러 개의 선재로 구성되며 각각이 former를 감싸며 트위스트되며 송전용량에 따라 각 layer의 수와 초전도 선재의 수가 결정이 되게 된다. 그리고 종류는 layer들의 pitch가 서로 다르며 일정각으로 트위스트되는 경우와 layer들의 pitch가 같고 트위스트 각을 다르게 하는 경우가 있다. 본 논문에서는 EMTDC 프로그램을 이용하여 레이어층을 구성하고 각 레이어당 흐르는 전류를 측정하였는데 선재는 15°의 일정각을 갖으며 pitch가 각 레이어마다 다르게 설정하였다. 그리고 상위층 레이어와 하위층 레이어는 그 감기는 각이 정반대이며 도체는 각각의 저항이  $1 \times 10^{-22}$ 인 4-layer로 가정하였다. 입력전원으로는 500(A) DC 전류를 사용하여 각 레이어에 분담되는 전류의 크기를 비교하였다. 기본적인 레이어 구성에 대한 데이터는 그림 9와 같다.

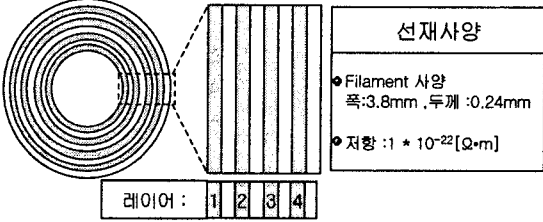


그림 9. 초전도 레이어 기본 구성 데이터

그림 9의 조건을 만족하는 케이블에서 각 레이어당 전류분배를 계산하는 방법은 수식적인 방법이 존재하지만 본 논문에서는 수식적인 방법은 간단하게 설명하고 주로 EMTDC를 통한 모델링을 구성하여 각 레이어당 전류 분배를 측정하는 시뮬레이션적인 방법을 주로 다루도록 하였다.

#### 2.3.1 이론적인 전류분배

일반적으로 4layer에 분담되는 전류를 구하는 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 이론식은 다음과 같다. (3)

$$L_i = \mu_0 \cdot \frac{\pi r_i^2}{L_p} + \mu_0 \cdot \frac{\ln(\frac{D}{r_i})}{2 \cdot \pi} \quad (1)$$

$$M_{ij} = M_{ji} = \frac{a_i \cdot a_j \cdot \mu_0}{L_p \cdot L_{ij}} \cdot \pi \cdot r_i^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(\frac{D}{r_j}) \quad r_j > r_i \quad (2)$$

여기에서  $L_i$ 는 자기 인덕턴스이며,  $M_{ij}$ 는 상호 인덕턴스이다. 그리고  $r_i$ 와  $r_j$ 는  $i$  레이어와  $j$  레이어의 반지름이며,  $L_p$ 는 절선 피치(pitch)이며,  $D$ 는 레이어와 전류 리턴 패스(current return path)중심과의 거리이다. 다음으로 레이어당 전류와 전압의 관계식은 식 3과 같다.

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 + \frac{R_1}{j \cdot \omega} & M_{2,1} & \cdots & M_{n,1} \\ M_{2,1} & L_2 + \frac{R_2}{j \cdot \omega} & \cdots & M_{n+1,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{1,n} & M_{2,n} & \cdots & L_n + \frac{R_n}{j \cdot \omega} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기에서  $R_i$ 는 각 레이어의 교류 손실과 Joint resistance를 함께 고려한 저항값이 되며,  $\omega = 2\pi f$  이고  $e_i$ 은 전압강하로 각 레이어가 모두 같은 값이다. 위의 식 1, 2, 3을 통해서 각 레이어에 분배되는 전류를 구할 수 있다.

#### 2.3.2 시뮬레이션을 통한 전류분배

EMTDC를 사용하여 초전도 케이블 전체가 아닌 4 layer와 layer들 사이의 절연층을 시뮬레이션적으로 구성하여 각 레이어에 일정 직류전류를 입력하였으며 시뮬레이션을 위한 기본 조건은 표 4와 같다.

표 4. Layer 초기 조건

조건		규격
레이어	층수	4 layer
	규격	t=0.24mm
두 레이어사이의 절연두께		0.17mm
결선 방향		+ - + -
joint resistance		$1 \times 10^{-6}$ , $1 \times 10^{-7}$
임계 전류		DC 500(A)
시뮬레이션 시간	$1 \times 10^{-6}$	200(sec)
	$1 \times 10^{-7}$	1000(sec)
케이블 길이		20(m), 3(km), 10(km), 50(km)

표 4의 조건에서 Joint resistance 값이  $1 \times 10^{-6}$ 과  $1 \times 10^{-7}$ 으로 설정하고 케이블 길이를 20(m), 3(km), 10(km), 50(km)로 설정하여 Joint resistance와 케이블 길이에 따른 전류분배를 같이 알아보았다. 그리고  $1 \times 10^{-6}$  일때의 시뮬레이션 시간은 200(sec) 이고  $1 \times 10^{-7}$  일때의 시뮬레이션 시간이 1000(sec)인 것은  $1 \times 10^{-7}$  일때의 각 레이어당의 전류값이 일정 값에 수렴하지 않기 때문에 최대한 수렴할 수 있도록 시간을 확장시킨 것이다.

먼저 결합저항이  $1 \times 10^{-6}$  일 때 200(sec) 동안의 각 레이어당 변화값은 그림 10, 11, 12, 13과 같다.

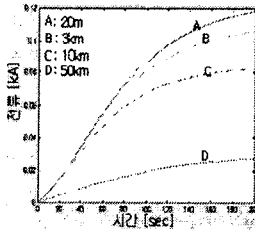


그림 10. 1 layer 전류분배

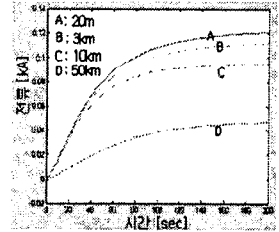


그림 11. 2 layer 전류분배

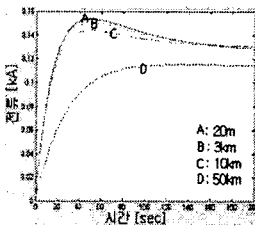


그림 12. 3 layer 전류분배

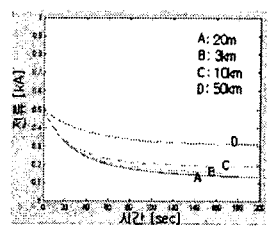


그림 13. 4 layer 전류분배

그림 10는 케이블 SC에서의 Former의 표면에 감겨있는 1번 layer의 전류의 변화이며 변화분인 20m, 3km, 10km, 50km에서 공장이 길어질수록 레이어에 유겨되는 전류의 크기는 감소한다. 그리고 그림 11, 12에서도 공장이 길어짐에 따라 그 유겨전류값이 완만하게 나타나며 증분이 감소함을 알 수 있다. 하지만, 최외각 레이어에 대한 결과인 그림 13에서는 그림10, 11, 12에서와는 달리 케이블 공장이 길어질수록 유겨되는 전류가 커짐을 알 수 있다. 즉 전체적으로는 케이블 길이가 길어질수록 전류는 최 외곽 레이어로 집중되게 되므로 송전에서의 최외각 layer의 중요성이 고려되어야 한다.

다음으로 결합저항이  $1 \times 10^{-7}$  일 때의 길이에 따른 변화를 1000(sec) 동안 알아보았으며 결과는 그림 14, 15, 16, 17과 같다.

(참고 문헌)

- [1] 성기철, 조전욱, "고온초전도 전력케이블 적용가능성 검토", 한국초전도 저온공학회 학술대회 논문집, pp.125-127, 2000. 2
- [2] Robert D, "Power Cables in 21st Century Energy Development", IEEE Power Engineering Review, pp. 8-10, 2000.9
- [3] S. Krieger Olsen, C. Traholt, "Loss and Inductance Investigations in a 4-Layer Superconducting Prototype Cable" IEEE Trans. on applied Superconductivity" Vol.9, No.2, pp.833-836 1999.6
- [4] M.Tsuda, A.K.M.Alamgir, "Homogeneous Current Distribution in a Coaxial Superconductor with and without Return Current Path", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.2481-2484, 2001.3
- [5] J.W.Lue, J.A.Demko, "AC Losses of Prototype HTS Transmission Cables, "Vol.9, No.2, pp.416-419, 1999.6
- [6] S.Mukoyama, K.Miyoshi, H.Tsubouti, " Uniform Current Distribution Conductor of HTS Power Cable", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.1269-1272, 1999.6
- [7] Ji-Kwang Lee, Guesoo Cha, "AC Loss Calculation of a Multi-Layer HTS Transmission Cable Considering the Twists of Each Layer", IEEE Trans. on Applied Superconductivity .Vol.11, No.1, pp.2433-2436, 2001.3

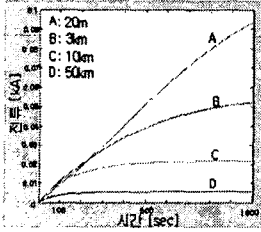


그림 14. 1 layer 전류분배

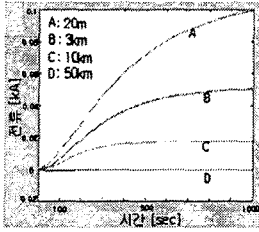


그림 15. 2 layer 전류분배

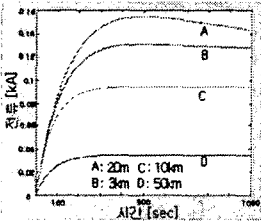


그림 16. 3 layer 전류분배

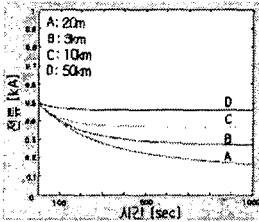


그림 17. 4 layer 전류분배

그림 14, 15, 16, 17에서 보인 결과로 볼 때 결합저항이  $1 \times 10^{-6}$ 일 때 보다 피크 전류값의 수렴시간이 길어졌으며 수렴되는 피크 전류를 알아보기 위해 시간을 1000(sec)까지 늘렸을 때 결과적으로 케이블 길이가 길어질수록 내부 레이어의 전류 분담 비중이 현저히 떨어져 1 layer와 2 layer에서는 50km 공장일 경우에 전류 분담이 거의 되지 않는 반면에 최외각 레이어인 4 layer는 그 비중이 지속적으로 상승하여 50km 공장일 경우에 거의 대부분의 전류가 4 layer로 흐르는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문은 현재의 초전도 케이블연구에 사용될 시뮬레이션 프로그램의 적절성을 검토하기 위하여 ATPDraw 와 EMTDC를 사용하여 계통 모델링에 대한 결과를 검토하였다. 그 결과 두 프로그램의 결과값이 정상상태에서 약간의 오차를 보이며 고장상태에서 오차를 보이고 있지만 그 방향성과 경향이 일치하였다. 그리고 SC 와 SH 에서의 전류값을 비교해 보았을 때 초전도의 특성이 충분히 고려되었음을 알 수 있다. 또한 초전도 케이블의 도체 저항값은  $1 \times 10^{-16}$ 이 적절할 것으로 사료된다.

초전도 도체의 각 레이어에서의 분담 전류 계산은 EMTDC 상에서 4 layer를 구성하여 임계전류 500[A]를 기준으로 하고 결합저항과 케이블 길이를 변수로 두어 시뮬레이션을 실시하였으며 결과로는 케이블 길이가 길어짐에 따라 최 외각 레이어의 전류분담이 커지게 되며 내부 레이어는 전류 분담이 줄어들어 1 layer 와 2 layer는 50[km] 케이블 길이에서 거의 전류가 흐르지 않음을 증명하였다. 따라서 케이블 길이가 길어짐에 따라 최 외각 레이어의 권선 발생 확률이 높아지므로, 이에 대한 추가적인 연구와 함께 대책이 요구된다. 또한 본 논문에 적용된 백전계통은 임의로 간략하게 구성한 경우이므로 앞으로 많은 연구를 통해 추가적으로 정확한 계통 구성이 연구되어야 할 것이다.