

2층 고온초전도 전력케이블 코어의 전자장 해석

조전욱, 주진홍, 김석환, 배준한, 김해종, 김해준, 성기철, 홍정표*
한국전기연구원, 창원대학교 전기공학과*

Electro-magnetic Field Analysis of 2-Layer HTS Power Transmission Cable Core

Jeonwook Cho, J.H. Joo, S.W. Kim, J.H. Bae, H.J. Kim, H.J. Kim, K.C. Seong, J.P. Hong*
Korea Electrotechnology Research Institute,
Dep. of Electrical Engineering, Changwon National University*

jwcho@keri.re.kr

Abstract - A typical HTS power transmission cable has multi-layer conductor structure to increase the current capacity. The tapes of the innermost layer are wound on a round former, and adjacent tapes of another layer are separated by a thin insulating film. In steady state, the total current flows in the conductor layer, and consequently there is magnetic field between the inner and outer layer. This paper describes a magnetic field amplitude around the conductor layer and the HTS tape by a transport current. Also, this paper will help for future cable conductor prototypes.

Keyword: HTS power transmission cable; multi-layer; electro-magnetic field analysis

1. 서 론

고온초전도(HTS) 전력케이블은 전력을 전송하기 위한 초전도도체로 구성된 코어부와 이 코어의 냉각을 담당하는 cryostat를 포함한 냉각 시스템으로 구성된다. 코어부는 전류전송용량을 늘리기 위하여 그림.1과 같이 HTS tape들이 former주위에 다층으로 적층 배열되어 있다.

HTS 전력케이블은 높은 전류밀도를 가지는 초전도체를 사용하기 때문에 기존 전력케이블보다 작은 크기로 저전압·대전류의 대용량 송전이 가능하다. 따라서 고온초전도 케이블의 계통 적용 시 전력계통에서 초고압 변전설비의 생략과 절연전압 레벨의 감소로 송·변전기기의 소형화 및 전력기기의 가격 저하가 가능하며, 적은 송전 손실은 케이블 운전비용의 감소 등 송전비용을 줄일 수 있다. 이러한 장점을 가지는 HTS 전력케이블을 대용량 부하가 집중된 도심지 전력계통의 신규 설비 또는 대용량의 국부 전원지에 적용한다면 매우 경제적인 새로운 전력기기가 될 수

있다 [1].

HTS 전력케이블에서 요구되는 중요한 기술로는 교류손실의 저감이다. 도체층간의 균일한 전류분포가 될 때 케이블 도체의 전체 사용율을 높일 수 있으며, 교류손실 또한 줄일 수 있다 [2].

최적의 초전도케이블의 개발을 위하여 균일한 전류분류 특성을 갖는 HTS 케이블코어의 설계 [3,4]와 함께, 실제 운전시 발생하는 자계분포에 대한 고려가 필요하다. 케이블 운전시 케이블 내의 HTS tape에 미치는 자계성분의 영향은 임계전류를 낮게 만들거나 교류손실의 원인으로 작용한다 [5].

본 논문에서는 2D FEM 전자장 해석을 통해 실제 운전시의 발생하는 HTS 전력케이블 코어 내의 최대 자속밀도와 도체에 투과되는 자속밀도 성분에 대해 살펴보고 그 영향에 대해 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

현재까지 설계가 진행된 2층 구조의 HTS 전력케이블의 설계사양과 이에 사용되는 HTS tape의 사양은 표 1, 2와 같다.

B_{\perp} (수직자계성분)은 y축 방향, $B_{//}$ (수평자계성분)은 x축 방향이며, 전류는 z축으로 흐르고 있다. B_{\perp} 은 HTS tape의 가장자리에 집중되어 a_u , 이 B_{\perp} 크기는 HTS tape의 임계전류값에 매우 큰 영향을 미친다 [5].

Table 1. Specification of HTS Cable

| | |
|-----------------------------------|------------|
| No. of Conductor Layer | 2 |
| No. of Magnetic Shield Layer | 1 |
| Total Current | 1260 [A] |
| Diameter of former | 25.5 [mm] |
| Thickness of Insulation Layer | 4.64 [mm] |
| Diameter of Magnetic Shield Layer | 27.52 [mm] |

Table 2. Specification of HTS tape

| | |
|------------------------|----------|
| Thickness | 0.3 [mm] |
| Width | 4.1 [mm] |
| Ic @ 77[K], SF, 1μN/cm | 115 [A] |

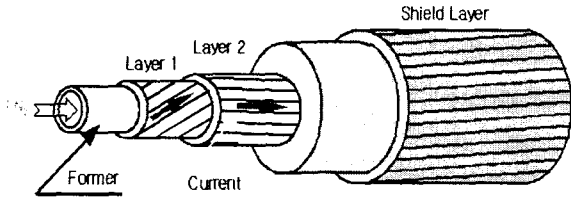


Fig. 1. 2-Layers HTS Power Transmission Cable

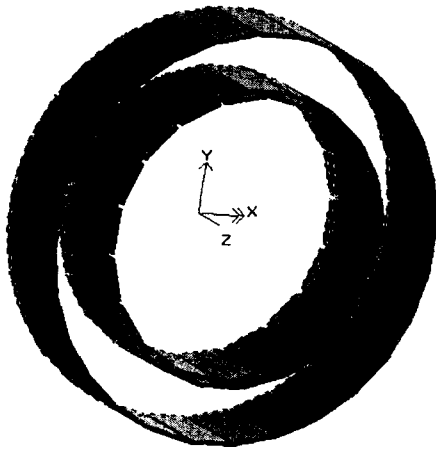


Fig. 2. 3D Geometry of HTS tape arrangement in HTS Cable

2.2 해석이론

Fig. 3은 HTS tape에 전류가 흐를 때의 자속선을 단순하게 도식화하였다.

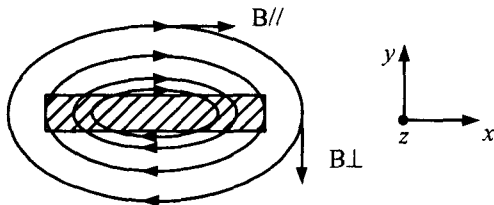


Fig. 3. The field lines round a strip carrying a current.

액체질소 속에서 HTS tape은 수십 Gauss의 B⊥에도 매우 큰 영향을 받기 때문에 해석 결과의 정도가 매우 높아야 한다. 따라서 상용틀로서 검증되고 다양한 분석이 가능한 MAGNET V를 이용하여 FEM과 같은 수치해석적인 방법을 사용하였다. HTS tape에서 유기되는 자계는 Biot-Savart의 수식 (1)과 같으며, 2차원 전

자계해석을 통해서 양상을 확인할 수 있다 [6].

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\frac{dl \times R}{R^3} \right) \quad (1)$$

여기서 B는 자속밀도, μ₀는 공기중의 투자율, Idl는 미소 전류소 벡터, R은 전류점에서 필드점으로 향하는 벡터이다.

2.3 해석결과

그림 4는 HTS 케이블에 정상상태로 운전전류가 흐를 때, 유기되는 자계를 2차원 FEM을 통해서 산출한 결과이다. 자계의 밀한 정도를 알 수 있고, 2번째 도체층에서 최대 자속밀도값이 약 187[G]가 됨을 알 수 있다.

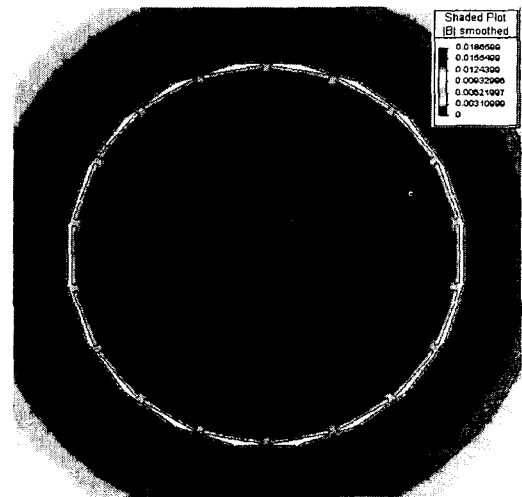


Fig. 4. Magnetic Field Distribution of Cross Section in HTS Cable Core

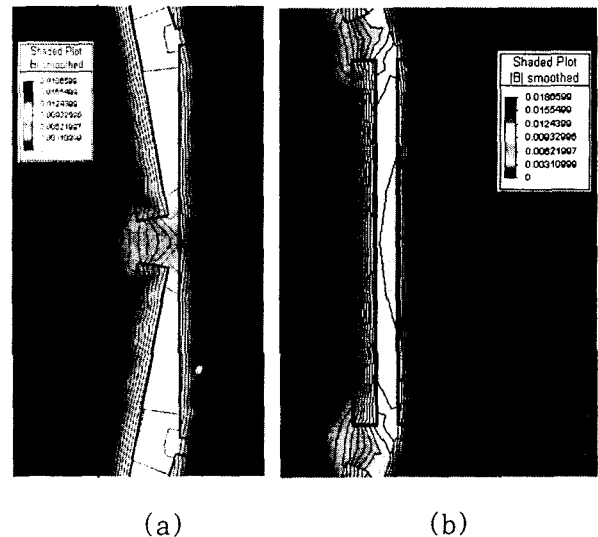


Fig. 5. Magnetic Field Distribution of Cross Section in HTS Tapes

3. 결 론

본 논문에서는 2층의 통전층으로 구성되는 HTS 전력케이블이 정상상태에서 형성되는 자계를 2D FEM방법을 통하여 해석하였다. 케이블 내에서 발생하는 자속밀도의 최대값은 대략 187[G]정도이며 방향은 원주방향과 일치하였다. 그리고 실제 제작에서 생겨날 수 있는 tape간의 배열상태에 따라 각 tape들이 운전중에 받게될 자계의 영향을 살펴보았다. HTS tape에서 I_c degradation에 큰 영향을 미치는 B_{\perp} 의 크기보다는 $B_{//}$ 의 크기가 훨씬 크며, 도체배열에 따라 $B_{//}$ 의 투과 양상은 비슷하지만, B_{\perp} 의 투과 깊이가 다른 것을 확인 할 수 있었다.

HTS 케이블의 경우 비자성체로 구성되며 간단한 코일의 형상이지만 향후 도체의 방향을 고려한 3D 모델링에 의하여 계속적인 해석을 진행할 것이며 시제작 및 검증을 통한 정확한 케이블 해석 기법을 확립할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조전욱, "고온초전도 케이블의 교류손실 및 자장분포 해석에 관한 연구", 연세대학교 공학박사 학위논문, 2001
- [2] 이지광, "교류 초전도선에서 필라멘트의 트루스트를 고려한 자기자계 손실", 서울대학교 공학박사 학위논문, 1997
- [3] Jin-Hong Joo et al., "Pitch Calculation of 4-layer HTS Power Transmission Cable for Balanced Sharing Current", Korea-Japan Workshop 2002 on Applied Superconductivity and Cryogenics, 2002.
- [4] Seok-Whan Kim et al., "Effect of Winding Direction on 4-layer HTS Power Transmission Cable", Korea-Japan Workshop 2002 on Applied Superconductivity and Cryogenics, 2002.
- [5] 조영식외, "고온초전도 케이블의 전자계 해석", 2000년 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 60-62, 2000.
- [6] David K. Cheng, Fundamentals of Engineering Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Company, 1994

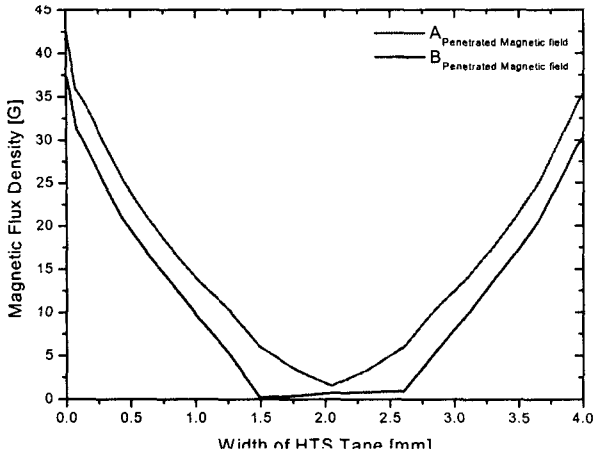


Fig. 6. B_{\perp} amplitude and depth of HTS Tape

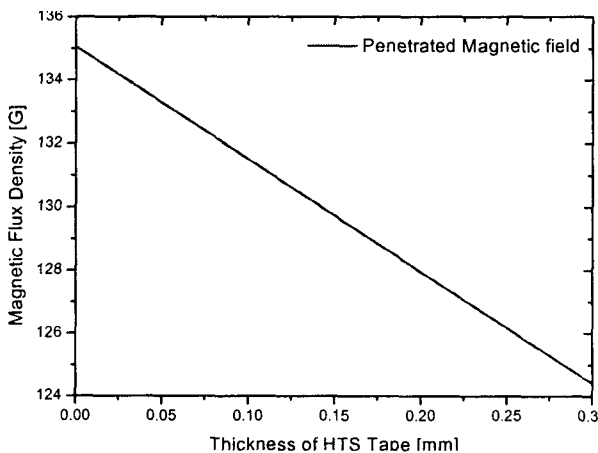


Fig. 7. $B_{//}$ amplitude and depth of HTS Tape

그림 5는 정상상태로 운전 중인 HTS 케이블에서 HTS tape주위에 유기되는 자계를 해석한 결과이다. 여기서, 실제 제작에서 생겨날 수 있는 tape 배치에 따른 상호 영향을 확인할 수 있다. (a) 그림은 첫 번째 층의 두 tape에 의해 두 번째 층의 tape이 크게 영향을 받는 경우이다. (b) 그림은 첫 번째 층과 두 번째 층 tape이 일치할 때 영향을 받는 경우이다.

그림 6과 7은 앞의 그림 (a), (b)의 경우에 두 번째 층 도체에 작용하는 B_{\perp} 과 $B_{//}$ 의 투과 정도를 각각 보여주고 있다.

그림 6과 같이 B_{\perp} 가 투과되는 양상은 Bean 모델과 같다. FEM의 preprocess 과정에서 tape의 요소를 좀더 잘게 나눈다면 자속이 투과되는 양상을 정도가 높게 볼 수 있을 것이다.

그림 7의 경우 도체배열에 따른 $B_{//}$ 양상이 거의 일치하여 하나의 그래프로 나타내었다.

$B_{//}$ 의 크기는 B_{\perp} 의 크기보다 3배가량 크지만 I_c degradation에 큰 영향을 미치는 B_{\perp} 의 크기가 크지 않음을 알 수 있다. 하지만, 전력케이블이 장척화될 때 이 두 성분의 자계는 실제 케이블의 운전 중에 교류손실에 어느 정도의 영향을 주는지에 대해서는 아직 더 많은 연구와 해석이 필요하다.