

고온초전도 케이블의 전자계 해석

조영식*, 홍정표*, 정종만**, 조전욱**, 성기철**, 권영길**, 류강식**
*창원대학교 전기공학과, **한국전기연구소

Electromagnetic Field Analysis Of High Temperature Superconducting Cable

Young-Sik Jo, Jung-Pyo Hong
Dept. Electrical Engineering, Changwon National University

Jong-Man Jeong, Jeon-Wook Cho, Ki-Chul Seong, Young-Kil Kwon, Kang-Sik Ryu
Korea Electrotechnology Research Institute

gkstkso@cosmos.changwon.ac.kr

Abstract - It is widely acknowledged that the value of critical current in High Temperature Superconducting(HTS) tape has a great influence on B_{\perp} . Therefore, when HTS cable is designed, a method to reduce the B_{\perp} should be considered in order to improve the capacity. This paper deals with the influence of the space between each HTS tape by using 2D analytical method. From the analysis results, it is found that the decrease of the space causes the decrease of B_{\perp} . Moreover, another HTS cable, which has a very small space, is analyzed by 3D analytical method and it is manufactured. The validity of these analysis results are verified by comparison with experimental results.

고온초전도 케이블은 고온초전도 테이프를 사용하는데, 널리 알려진 사실처럼 고온초전도 테이프는 액체질소의 온도에서 임계자계의 값이 매우 낮은데, 특히 임계전류치는 고온초전도 테이프에 수직인 값에 매우 큰 폭으로 감소하는 특성을 나타낸다 [3]. 따라서 고온초전도 케이블에서는 사용된 고온초전도 테이프에 침투하는 자계의 수직성분을 감소시키는 방법이 매우 중요한 자기회로 설계의 변수가 된다. 본 논문에서는 초기 제작한 고온초전도 케이블(RC1)의 고온초전도 테이프간의 간격 변화에 따라 고온초전도 테이프에 침투하는 자계의 수직성분 변화를 해석적인 방법을 이용하여 고찰하였다. 또한 개선하여 새롭게 제작한 고온초전도 케이블(FC)의 3차원 전자계 해석을 수행하였다. 이 결과를 사용된 고온초전도 테이프의 자장에 대한 전류곡선(I_c - B)에 대입하여 직류통전시 고온초전도 케이블의 용량예측 하였으며, 예측한 결과가 실험결과와 비교하여 매우 근사함을 확인하였다.

1. 서 론

지난 1980년대에 액체질소 이상의 온도(-180~-150℃)에서 초전도 성질을 가지는 산화물계 세라믹 초전도 물질이 발견되었다. 이 발견으로 초전도 응용기기들의 상용화가 가속화되었는데, 특히 1960년대부터 연구 개발되었던 저온초전도케이블에 대한 연구가 액체헬륨이 필요 없는 액체질소 냉각 초전도케이블의 실현가능성을 본격적으로 검토하게 되었다. 현재 미국을 시작으로 유럽의 여러나라와 이웃의 일본에서는 경제성이 있는 고온초전도 케이블을 수십년 이내에 실계통 포설을 목표로 개발진행 중이다 [1].

국내에서는 한국전기연구소가 중심으로 1994년 금속계 테이프를 이용한 초전도 케이블 연구에 이어 현재 2005년까지 154kV, 1GVA급 100m 3상 고온초전도케이블 개발을 목표로 연구개발 중이다 [2].

2. 본 론

2.1 해석모델

고온초전도 테이프간의 간격에 따른 임계전류 특성을 고찰하기 위해 초기 설계하여 제작한 RC1을 기준으로 고온초전도 테이프의 갯수는 고정하고 포머의 반경을 감소시켜 고온초전도 테이프간의 간격이 매우 좁아지는 RC6까지 6가지의 모델을 선정하여 2차원 전자장 해석을 하였다. 표 1은 각 해석모델 내층의 반경을 나타낸다.

Table 1. Classifications of analysis model
Unit : mm

RC1	13.75	RC4	12.319
RC2	13.273	RC5	11.842
RC3	12.796	RC6	11.365

Table 2. Specification of RC1

HTS	Size	0.32×3.57(mm)
	Ic	40 (A) @ 77K
1st Layer	Radius	13.75 (mm)
	Pitch	300(mm)
	Number of Tape	20
	Length	600 (mm)
2nd Layer	Radius	14.4 (mm)
	Pitch	300 (mm)
	Number of Tape	21
	Length	600 (mm)

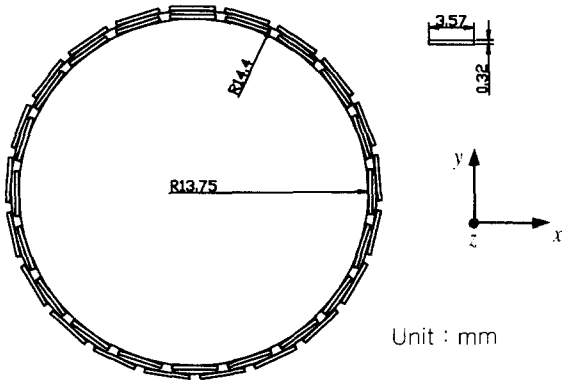


Fig. 1. Cross section of RC1

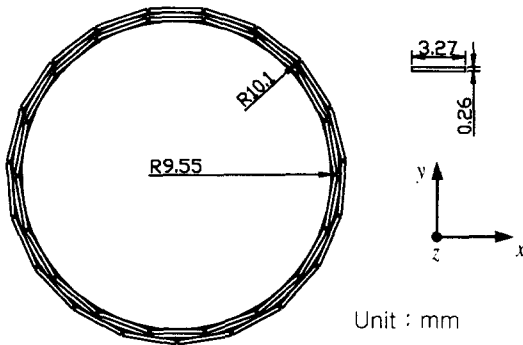


Fig. 2. Cross section of FC

Table 3. Specification of FC

HTS	Size	0.26×3.27(mm)
	Ic	26 (A) @ 77K
1st Layer	Radius	9.55 (mm)
	Pitch	300(mm)
	Number of Tape	18
	Length	500 (mm)
2nd Layer	Radius	10.1 (mm)
	Pitch	300 (mm)
	Number of Tape	19
	Length	500 (mm)

그림 1은 초기 제작된 고온초전도 케이블 (RC1)의 2차원 해석단면을 나타낸다. RC1의 주요사양은 표 2와 같다.

그림 2는 개선하여 새롭게 제작된 고온초전도 케이블(FC)의 3차원 해석단면을 나타내고, 표 3은 주요사양을 표시한다.

2.2 해석이론

그림 3은 고온초전도 테이프에 전류가 흐를 때의 자속선을 단순하게 도식화하였다. 수직자계 성분은 y축 방향, 수평자계 성분은 x축 방향이며, 전류는 z축으로 흐르고 있다. 수직자계 성분은 고온초전도 테이프의 가장자리에 집중되고, 이 수직성분의 크기가 고온초전도 테이프의 임계전류 값에 매우 큰 영향을 미치게 된다 [4].

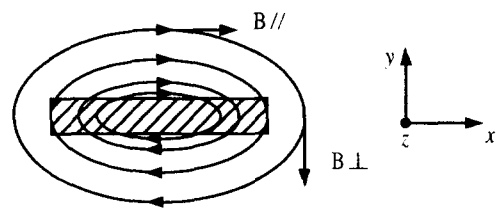


Fig. 3. The field lines round a strip carrying a current.

액체질소의 온도에서 고온초전도 테이프는 수십 Gauss의 수직자계성분에도 매우 큰 영향을 받기 때문에 해석결과의 정도가 매우 높아야 하는데 고온초전도 케이블은 자성체의 사용이 없고 코일의 형상을 수학적으로 모델링하기 비교적 간단하기 때문에 FEM과 같은 수치해석적인 방법보다는 해석적방법이 유리하다. 따라서 Biot-Savart의 수식 (1)을 이용하여 RC1~RC6는 2차원, FC는 3차원 전자계해석을 수행하였다 [5].

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

여기서 \mathbf{B} 는 자속밀도, μ_0 는 공기중의 투자율, $d\mathbf{l}$ 는 미소 전류소 벡터, \mathbf{R} 은 전류점에서 필드점으로 향하는 벡터이다.

2.3 해석결과 및 실험결과

그림 4는 고온초전도 테이프간의 간격이 RC1에서 RC6로 좁아질수록 고온초전도 테이프의 옆면에 발생하는 최대 B_{\perp} 의 양상을 나타낸다. RC1의 외층은 88.4 Gauss, RC6의 외층은 53.5 Gauss로 고온초전도 테이프간의 간격이 매우 좁아진 RC6는 RC1에 비해 B_{\perp} 이 약 40% 줄어 고온초전도 테이프간의 간격에 따라 B_{\perp} 이 매우 큰 차이를 나타내었다. 따라서 고온초전도 케이블에서 고온초전도 테이프간의 간격을 최대한 가깝게 하는 것이 매우 유리함을 알 수 있다.

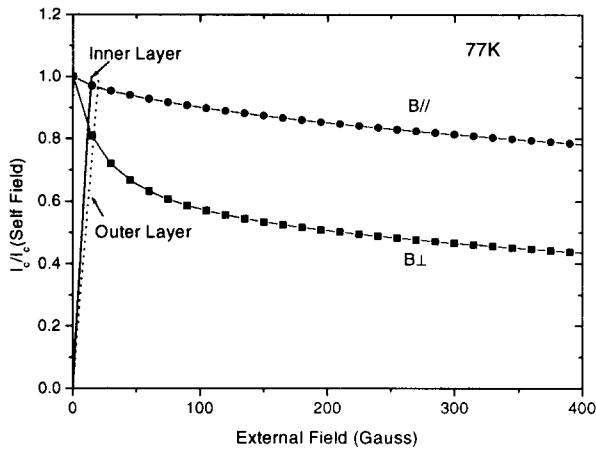


Fig. 4. I_c -B Curve in FC

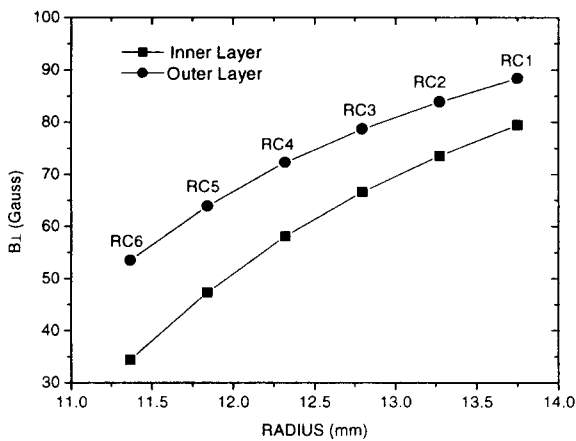


Fig. 5. B_{\perp} according to the space between each HTS tape

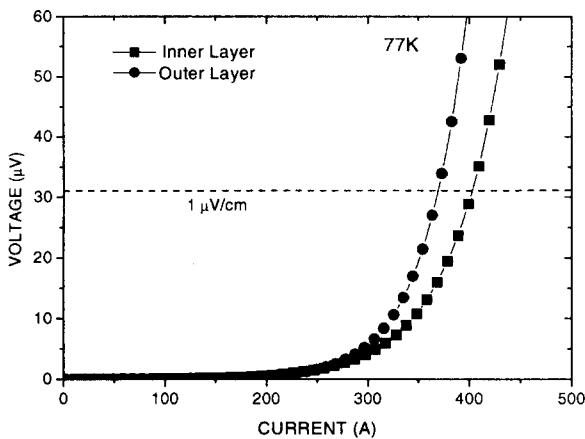


Fig. 6. Experimental results of FC

FC는 자성체를 사용하지 않으므로 자기적인 포화가 만들어지지 않아서 자계의 크기가 전류의 증가와 비례하여 선형적으로 증가하게 된다. 그러므로 short-sample에서의 I_c 를 FC의 도체당 전류로 입력하여 3차원 해석을 수행하여 계산된 최대 B_{\perp} 를 I_c -B 곡선에 대입하여 원점과 잇는 직선을 만들어 고온초전도 테이프의 B_{\perp} 곡선과

만나는 점이 고온초전도 케이블의 기준전계 값에서의 전류치가 된다. 그림 5는 FC에 대한 3차원 해석 결과를 HTS 테이프의 I_c -B 곡선에 대입하여 도식화한 것이다. 이 직선과 B_{\perp} 곡선이 만나는 점이 고온초전도 케이블에서의 기준전계에 대한 통전전류 값이 될 것이다. 여기서 내층은 I_c 의 83%, 외층은 I_c 의 79%이다. 그림 6은 제작된 FC에 대한 DC통전실험의 결과이다. 사용된 고온초전도 테이프 당 내층은 I_c 의 약 80%, 외층은 약 76%이다. 따라서 FC의 해석결과와 실험결과가 매우 근사함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 고온초전도 케이블의 전자계 해석을 이용하여 고온초전도 테이프의 간격에 따른 B_{\perp} 을 분석한 결과 고온초전도 테이프간의 간격이 작을수록 고온초전도 케이블의 임계전류치를 크게 할 수 있다는 것을 확인하였으며, FC에 사용된 도체의 I_c -B 곡선에 3D 해석결과를 대입하여 예측된 FC의 기준전계에 대한 전류값이 실험결과가 비슷함을 확인하였다.

이후 AC 여자를 고려하여 HTS 케이블의 안정도에 대한 연구를 수행 할 계획이다.

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행한 연구 결과입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 조전욱 외 1명, "고온초전도 전력케이블의 기술동향", 전기학회지, 제47권, 6호, 24~28, 1998
- [2] 류강식, "초전도응용기기 및 시스템의 연구동향과 발전방향", 초전도와 저온공학, 제1권, 1호, 18~27, 1999
- [3] C. Reimann et al., "Current carrying capability of multifilamentary $(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ tapes determined from transport and magnetization measurements", Appl. Phys. Lett., 71 (22), 3287~3289, 1997
- [4] A.M. Campbell, "AC Losses in High T_c Superconductors", IEEE Trans. On AS, Vol. 5, No. 2, pp. 682~687, 1995
- [5] David K. Cheng, Fundamentals of Engineering Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Company, 1994