

Analysis of eddy current loss in high-Tc superconducting power cables with respect to various structure of stabilizer

S. J. Choi^{*a}, M. K. Song^a, S. J. Lee^a, K. D. Sim^b, J. W. Cho^b

^a Div. of Elec. Eng, Uiduk Univ, Korea

^b Keri, changwon, Korea

초전도 전력 케이블에서의 stabilizer의 형태에 따른 와전류 손실 해석

최석진^{*a}, 송명곤^a, 이상진^a, 심기덕^b, 조전욱^b

Abstract

The High-Tc superconducting power cable consists of a multi-layer high-Tc superconducting cable core and a stabilizer which is used to bypass the current at fault time. Eddy current loss is generated in the stabilizer in normal operating condition and affects the whole system. In this paper, the eddy current losses are analyzed with respect to various structure of stabilizer by using opera-3d. Moreover, optimal conditions of the stabilizer are derived to minimize the eddy current losses from the analyzed results. The obtained results could be applied to the design and manufacture of the high-Tc superconducting power cable system.

Keywords : Power cable, stabilizer, cryostat, eddy current loss

I. 서론

초전도 전력케이블은 RMCFee에 의해 처음 제안되어, 이 이후부터 1980년대 초까지 미국, 일본, 유럽 등의 세계 각국에서 초전도 케이블에 대한 많은 연구개발이 진행되었다. 그 중에서도 미국의 Brookhaven 국립연구소(BNL), 오스트리아의 Gratz 연구소, 일본의 전자 기술 통

합연구소(BTL) 등에서는 실용화에 가까운 수준의 초전도 전력케이블을 개발하였으나 이 시기의 초전도 케이블은 Nb, NbTi, Nb3Sn과 같은 저온 초전도 도체를 사용한 시스템으로서 액체헬륨 온도에서 운전되어야 하는 극저온 환경으로 인한 신뢰성 및 경제성의 한계로 실용화가 이루어지지 못하였다. 그러나 1987년 액체 질소온도에서 사용가능한 고온 초전도체가 발견되고 1990년 중반 이후부터 실제 전력기에 적용이 가능한 실용성 있는 고온 초전도선이 개발되면서 2000년대에 들어선 최근에는 세

*Corresponding author. Fax : 82 54 223 2430

e-mail : sjchoi@vfk.co.kr

계적인 케이블 제조업체와 전력회사들이 경쟁적으로 가세하여 고온초전도 전력케이블의 상용화 개발에 박차를 가하고 있다 [1].

초전도 케이블이 정상적으로 통전되는 경우, 주위에는 와전류가 발생하여 손실이 생기며, 와전류 손실은 전체 시스템에 많은 영향을 끼치게 된다. 그러므로 초전도 케이블 제작의 전단계로 와전류 손실에 대한 전반적인 해석이 반드시 이루어져야 한다. 본 논문에서는 초전도 케이블에서 발생하는 와전류 손실을 상용전자장 프로그램인 opera 3d를 이용하여 모델링한 후, stabilizer에서의 와전류 손실을 도출하였다 [2].

II. 본 론

1. 와전류 손실 기본 이론

반경 R 인 원통형 도체에 $B\sin(2\pi ft)$ 의 시변 자기장이 인가될 경우 반경 r 위치에서의 유도기전력 V 는 반경 r 인 tube내의 전체 자속량 Φ 의 변화율로부터 아래 식과 같이 계산된다.

$$V = \int E \cdot dl = \frac{d\Phi}{dt} = \pi^2 B \sin(2\pi ft) \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

이때 최대 유도기전력은 아래와 같이 V_m 으로 다시 쓸 수 있다.

$$V_m = \int E \cdot dl = \frac{d\Phi}{dt} = \pi^2 B \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

반경 r 에서 두께 dr 인 요소원형도선을 가정할 경우 이 도선에 흐르는 최대 와전류는 아래의 식에서와 같이 I_m 으로 표현되며, 여기서 R_e 는 이 요소 tube형 도선을 독립적으로 생각했을 때의 저항값이다.

$$I_m = \frac{V_m}{R_e}, R_e = \rho \cdot \frac{2\pi r}{l \cdot dr} \quad (3)$$

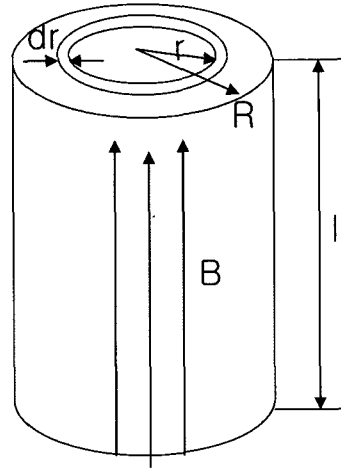


Fig. 1. Cylinder conductor.

여기에서 ρ 는 원통형 도체의 저항율이며 l 은 도체의 길이이다.

요소 tube형도선에서의 단위 길이당 최대 와전류 손실(P_m/l)은 최대 전압과 전류의 곱으로 표현되며, 유효 와전류손실값은 최대 손실값의 $1/2$ 이 된다.

$$\frac{dP_m}{l} = \frac{d(V_m I_m)}{l} = \frac{2\pi^3 r^3 f^2 B^2}{\rho} \cdot dr \quad (4)$$

$$\frac{dP}{l} = \frac{\pi^3 r^3 f^2 B^2}{\rho} \cdot dr \quad (5)$$

반경이 R 인 원통형 도체는 식 (5)의 요소원형도체의 유효손실값을 r 에 대해 적분하면 얻을 수 있다. 따라서 반경 R 인 원통형 도체에서의 단위길이당 와전류 손실은 아래의 식을 따르게 된다.

$$\frac{P}{l} = \int \frac{dP}{l} = \int_0^R \frac{\pi^3 r^3 f^2 B^2}{\rho} \cdot dr = \frac{\pi^3 R^4 f^2 B^2}{4\rho} \quad (6)$$

2. 전자기적 해석을 위한 모델

본 논문에서는 전자기장 수치해석에 상용화 프로그램인 opera-3d를 사용하여 모델을 해석

하였다.

교류 자기장의 해석에는 몇 가지 종류의 기법이 사용되지만 본 논문에서는 일반적인 method로 알려져 있는 자기 벡터 포텐셜과 정전 스칼라 포텐셜을 기본으로 하여 계산 시간 및 메모리용량을 감소시키기 위해 자기 스칼라 포텐셜을 도입하는 방법을 이용하였다 [3].

Fig. 2는 opera-3d로 해석하기 위한 해석 모델의 모습이다. 초전도 전력케이블의 코어는 통전층 2층, shield층 1층으로 모델링하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 stabilzier의 모습이다. 각각을 소선 절연한 것(stabilizer 1)과 단면적을 같게 하면서 원통형태인 것(stabilizer 2)으로 모델링하였다. stabilizer는 사고가 발생시 사고 전류를 bypass시키는 역할을 하며, 코어의 안쪽에 위치해 있다. 두 가지 형태의 stabilizer에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 비교하여, 와전류 손실을 줄

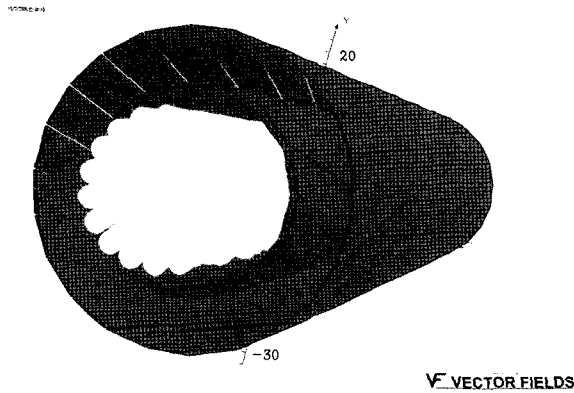


Fig. 2. Model for electromagnetic analysis.

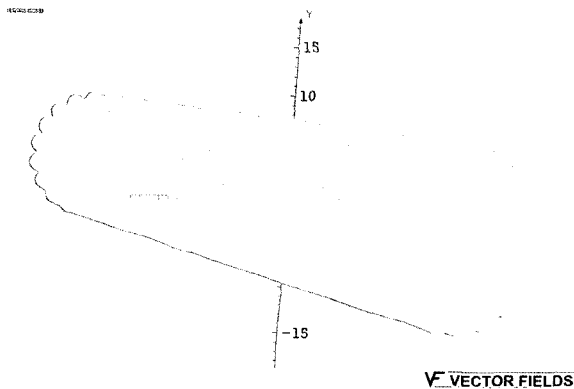


Fig. 3. Model for stabilizer 1.

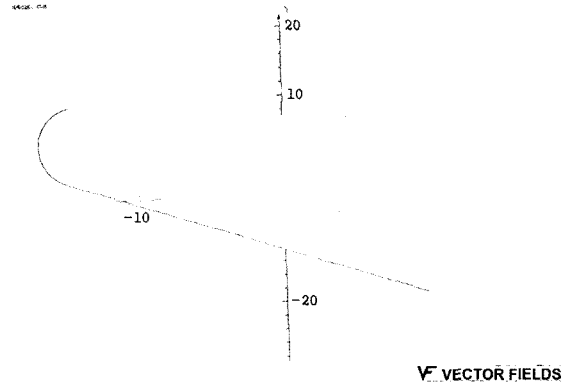


Fig. 4. Model for stabilizer 2.

이는 데 적합한 stabilizer의 형태를 찾도록 하였다. 그 형태를 찾은 후, 코어의 pitch에 따른 와전류 손실을 해석하여 와전류 손실이 전체 초전도 케이블 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 해석을 위한 입력값은 통전전류는 1260 [A]rms, 주파수 60[Hz]로 하였으며, 해석영역은 z축 방향으로 40mm로 정하였다.

3. 해석 결과

Fig. 5와 6은 stabilizer에서의 자기장 분포를 나타낸 것이다. stabilizer 1의 경우, 각 선들이 twist되어 있어서 해석이 힘들고, 또한 해석이 되더라도 그 해석시간이 매우 길었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 각 선에 대해서 와전류 손실 해석을 한 후, 그 손실들을 더하는 방법을 선택하였다. Table 1은 각 stabilizer에 대해서 해석한 와전류 손실 해석 결과이다. 이론식

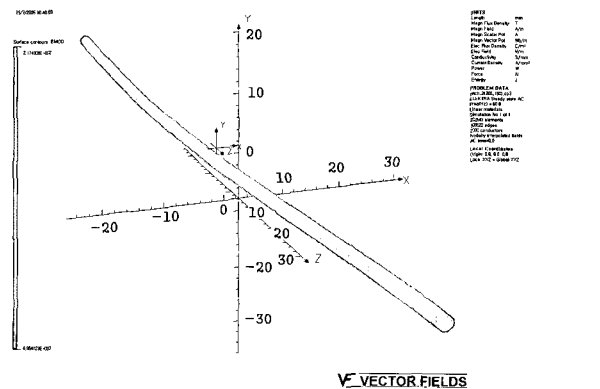


Fig. 5. Magnetic field distribution on the stabilizer 1.

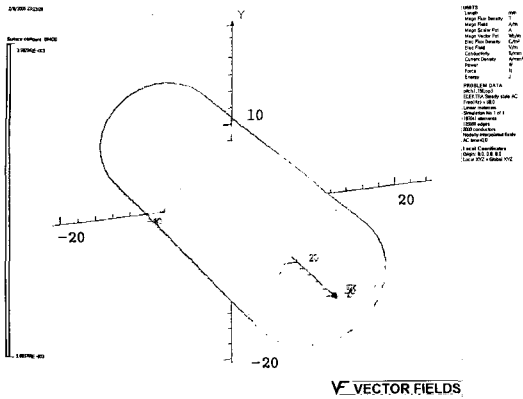


Fig. 6. Magnetic field distribution on the stabilizer 2.

Table 1. Analytic results for eddy current loss.

	Eddy current loss	
	이론식	해석
Stabilizer 1	0.835 (mW/m)	0.962 (mW/m)
Stabilizer 2	66.52 (mW/m)	68.82 (mW/m)

과 해석상의 결과는 작은 차이를 보였으며, 이러한 차이는 이론식에서 twist factor와 자장 변화에 대한 고려가 없었기 때문이었다. 소선절연한 stabilizer의 값과 원통형태의 stabilizer의 값은 약 70배의 차이를 나타내었다. stabilizer를 소선절연한 형태로 제작하는 것이 eddy current loss를 줄이는 데 매우 효과적임을 알 수 있다.

다음 과정으로 stabilizer를 소선절연한 형태로 결정하고, 코어의 pitch를 변화시켜 가며 해석을 수행하였다. 코어의 pitch는, 중심자장이 최대 자장이 나오는 pitch부터 중심자장이 가장 적게 나오는 pitch까지 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 자장이 작게 나올수록 eddy current loss는 작게 나올 것으로 예상되지만, 이론식에서는 twist factor가 고려되지 않았기 때문에 eddy current loss를 이론식만으로 계산하는 데는 한계가 있다. 이러한 해석을 통하여, 코어의 pitch 변화에 따른 eddy current loss를 계산하여, 실제 초전도 케이블 시스템의 코어 설계에 그 결과를 응용할 수 있도록 하였다. Table 2는 소선절연한 stabilizer에 코어의 pitch를 변화시켜가며

eddy current loss를 해석한 결과이다. 코어의 pitch에 따라 eddy current loss가 약 50배까지의 차이를 보였다.

Table 2. Analytic result for eddy current loss with respect to pitch of core.

	Eddy current loss	
	이론식	해석
Case1 (중심자장 최대조건)	40.55 (mW/m)	46.99 (mW/m)
Case2 (제품화급 기초설계1)	1.054 (mW/m)	1.184 (mW/m)
Case3 (제품화급 기초설계2)	0.835 (mW/m)	0.962 (mW/m)

III. 결론

본 논문에서는 초전도 전력케이블 시스템의 stabilizer의 형태에 따른 와전류 손실을 도출하였다. 또한 core의 pitch를 변화시켜가며 와전류 손실을 도출하였다. stabilizer의 형태에 따라 와전류 손실값이 큰 차이를 보였으며, core의 pitch에 따라서도 큰 차이를 보였다. 본 논문은 입력값에 따라 초전도 케이블과 stabilizer를 모델링할 수 있는 변수화 모델을 구축하였으며, 이 변수화 모델을 이용하여 stabilizer와 core설계에 그 결과를 응용할 수 있도록 하였다.

참고문헌

- [1] 성기철, "고온초전도 전력케이블의 개발동향 및 전망". 전력케이블 심포지엄, #2002.
- [2] S.Fuchino, N. Tamada, I. Ishii, N. Higuchi, Hydraulic characteristics in superconducting power transmission cables, *Physica* 345, 125-128 (2001).
- [3] Vectorfields, "OPERA-3d Reference Manual", Vectorfields, v9.0, 2003.

본 연구는 차세대 초전도 응용기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.