

고온초전도 전력케이블의 안정도 평가를 위한 교류손실에 관한 연구

論 文

56-7-10

Study on the Stability Evaluation of the High-Tc Superconducting Power Cable

裴俊漢[†] · 崔錫鎭^{*} · 李相鎭^{**} · 趙全旭^{***}
(J.H. Bae · S.J. Choi · S.J. Lee · J.W. Cho)

Abstract - In order to evaluate if the high-Tc superconducting(HTS) power cable is operating stably, the characteristics of the HTS power cable should be found out. The properties of HTS tapes by measuring the voltage with respect to the current can be archived. But, the HTS power cable is different from the case of HTS tapes. This method is invalid because of the electromagnetic fields caused by other HTS tapes. In this paper, the stability evaluation of the HTS cable was performed by the following procedure.

First, the voltage-current characteristics of HTS tape were measured and the electromagnetic field distributions of the HTS power cable with the external magnetic field were analyzed. Second, the losses of the HTS power cable were calculated using the result of the measurement and the analysis. Finally, the stable operation of the HTS power cable was evaluated on the basis of the losses of the superconducting cable.

Key Words : HTS power cable, HTS tape, voltage-current characteristics, electromagnetic field, external magnetic field, losses, stability evaluation

1. 서 론

고온초전도 전력케이블은 구리도체 대신 고온초전도 도체를 사용하여 전기저항이 없어지는 초전도현상을 이용하여 저손실·대용량 전력수송이 가능한 전력케이블로서 대도시의 전력공급문제를 해결할 수 있는 환경 친화적 전력케이블이다. 초전도 전력케이블은 1961년 McFee가 최초로 제안하여 80년대까지 유럽, 미국, 러시아, 일본 등에서 저온초전도 케이블에 대하여 활발하게 연구개발이 진행되었으나, 1986년에 약 90K의 임계온도로 초전도특성의 재현성이 양호한 Y-Ba-Cu-O계 초전도체가 발견되어 액체헬륨이 필요가 없는 액체질소냉각 초전도케이블의 실현가능성을 기술적으로 검토하게 되었다. 고온초전도체의 발견이후 1, 2년 사이에 고온초전도 케이블의 실용화 가능성에 대하여 선진 각국에서 활발하게 진행되어져 왔다. 최근에는 Bi계 고온초전도 선재의 고임계 전류밀도화와 장척화가 이루어지면서 초전도 전력케이블 연구개발은 실용화를 목표로 경제성이 있는 고온초전도 전력케이블을 개발하려는 움직임이 일본, 미국, 유럽 등에서 본격화되고 있다 [1], [2].

본 논문에서는 전자기장 해석을 통하여 고온초전도 전력케이블 운전시 안정성 여부를 판단할 수 있는 방법을 제시하였다. 안정도 평가를 위하여, 우선 전자기장 해석을 통한 고

온초전도 전력케이블의 자장분포를 해석하였다. 그리고 실험을 통하여 고온초전도 선재의 V-I 특성을 파악하였고, 전자기장 해석 결과와 실험 결과를 이용하여 고온초전도 전력케이블의 교류손실을 계산하였다. 이렇게 계산된 교류손실 값을 토대로 고온 초전도 전력케이블 운전시 안정성 여부를 판단하였다.

2. 전자기장 해석

고온초전도 전력케이블은 맥스웰 방정식으로부터 유도된 포아송 방정식이나 라플라스 방정식을 이용하여 유한요소모델로 표현될 수 있다. 이러한 방정식들은 경계조건을 갖는 편미분 방정식의 형태로 주어지고, 대부분의 경우 해석적인 방법으로 해를 도출하는 것은 불가능 하다. 그래서, 일반적으로 수치적인 방법을 이용하여 해를 구하고 있다.

경계조건을 갖는 편미분 방정식으로부터 해를 도출할 수 있는 수치적인 방법에는 유한차분법, 경계요소법 등 다양한 방법이 있지만, 유한요소법이 가장 널리 이용되고 있다.

유한요소법은 방정식이 적용된 넓은 영역을 몇 개의 작은 영역으로 나눈 다음, 해가 각 요소에 고정되어 있다고 가정하고, 방정식을 만족하는 해를 도출한다. 각 요소의 해는 1차 혹은 2차 다항근사식을 이용하여 전체 시스템의 해를 도출하기 위해서 이용된다. 현재 널리 사용되고 있는 상용 프로그램의 대부분은 유한요소법을 적용하고 있다.

본 논문에서는, 고온초전도 전력케이블의 전자기장 해석을 위해서 OPERA-3D가 사용되었고, 해석시간과 기억저장용량을 줄이기 위해서 자기스칼라 전위법이 적용되었다 [3].

고온초전도 전력케이블의 모델링 과정을 다음과 같다. 먼저, 통전층과 차폐층의 도체를 각각 설계한 다음, 이 도체를 권선피치를 따라서 회전시킨다. 유한요소법으로 무한히 긴

[†] 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 선임연구원

E-mail : baejh@keri.re.kr

^{*} 正會員 : 위덕대학교 산학협력단 연구원

^{**} 正會員 : 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수

^{***} 正會員 : 한국전기연구원 책임연구원

接受日字 : 2007年 2月 26日

最終完了 : 2007年 6月 13日

케이블을 해석하는 것이 어렵기 때문에 모델의 해석길이는 400mm로 제한하였다.

또한, 일반적으로 FEM 모델의 양끝 부분에서는 해석적 오차를 포함하고 있기 때문에 FEM 모델을 해석한 후에 가운데 부분만의 해석결과를 발취하였다.

그림 1은 고온 초전도 전력케이블의 구조를 나타낸 그림이다. 고온초전도 전력케이블은 전력의 전송을 위한 2층의 통전층과 자장차폐를 위한 1층의 차폐층으로 구성되며, 한국전기연구원에서 개발중인 22.9 kV급 고온초전도 전력케이블의 통전전류와 차폐전류는 모두 1260 Arms이다. 각 도체에 동일한 전류가 흐른다고 가정할 때, 통전층과 차폐층의 도체 한 개에 흐르는 전류는 각각 45 Arms, 57.27 Arms가 된다 [4]. 그림 2는 고온초전도 전력케이블의 자장분포이다.

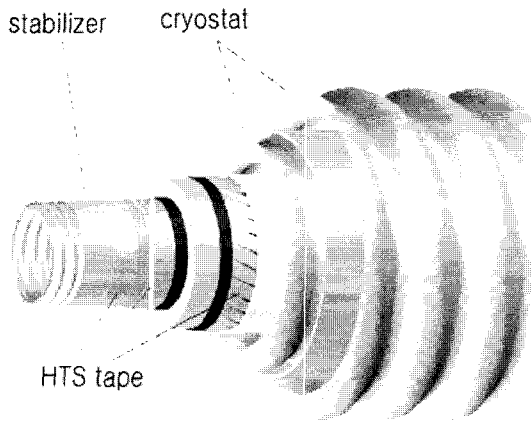


그림 1 고온초전도 전력케이블의 구조
Fig. 1 A structure of the high-Tc superconducting power cable

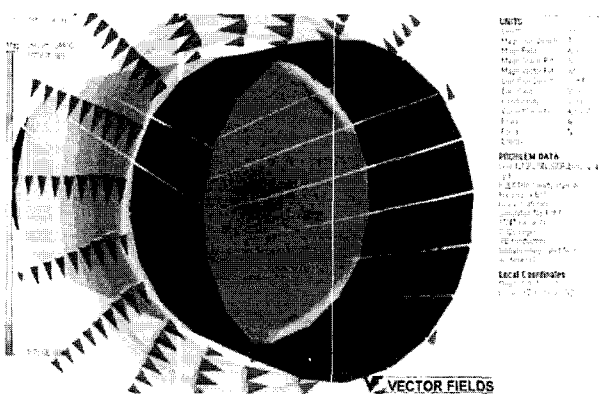


그림 2 고온초전도 전력케이블의 자장분포
Fig. 2 Magnetic field distributions of the high-Tc superconducting power cable

그림 3은 고온초전도 전력케이블의 해석시 이용되는 해석적 노드들의 좌표이며, OPERA-3D를 이용하여 이 점들에서 자장값이 계산된다. 통전 1, 2층과 차폐층 내의 하나의 고온

초전도 선재를 각각 선정하여 이들의 끝점과 중간점을 해석 노드로 정의하였다. 표 1, 2, 3은 각각 통전층(1st), 통전층(2nd), 차폐층 고온초전도 선재의 노드에서의 전자장 해석결과이다. 여기서, Bx, By, Bz는 각각 x, y, z 방향으로의 자장성분을 의미하고, Bm은 전체자장을 의미한다. 그리고, Bx, Bz는 고온초전도 선재의 표면에 평행한 자장이고, By는 선재 표면에 수직인 자장이고, 단위는 gauss이다. M은 수직자장과 수평자장 사이의 각도를 의미한다.

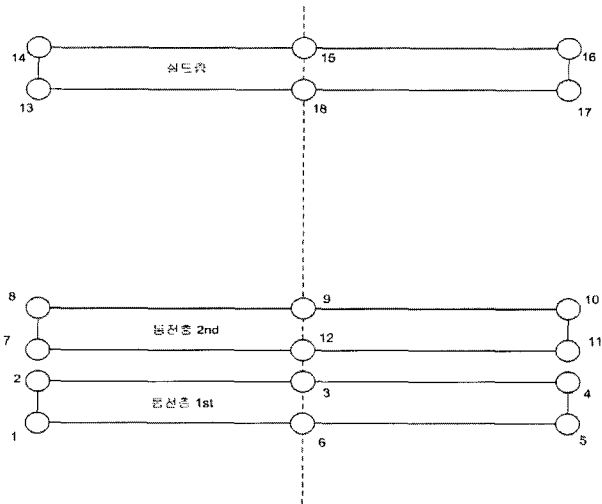


그림 3 고온초전도 전력케이블의 해석 노드 좌표
Fig. 3 The coordinate of analytical nodes in the high-Tc superconducting power cable

표 1 통전 1층의 자장분포
Table 1 The magnetic field on transmission layer(1st)

1st	Bx [gauss]	By [gauss]	Bz [gauss]	Bm [gauss]	M [degree]
point 1	66.997	79.4561	46.3397	113.795	44.28577
point 2	204.14	48.0582	41.4414	213.779	12.9913
point 3	93.693	27.2121	46.3257	108.005	14.59306
point 4	206.42	-11.371	41.8637	210.938	3.090331
point 5	84.091	-73.055	46.3085	120.635	37.27138
point 6	83.816	15.9178	45.6630	96.7660	9.468077

표 2 통전 2층의 자장분포
Table 2 The magnetic field on transmission layer(2nd)

2nd	Bx [gauss]	By [gauss]	Bz [gauss]	Bm [gauss]	M [degree]
point 7	246.302	-0.4891	48.3257	250.999	0.11166
point 8	262.813	-15.309	45.5476	267.169	3.28504
point 9	248.545	-21.250	48.1060	254.048	4.79823
point 10	261.209	-32.414	45.4690	267.111	6.97011
point 11	242.680	-45.648	48.2592	251.607	10.4528
point 12	179.253	-23.642	40.5705	185.302	7.33035

표 3 차폐층의 자장분포

Table 3 The magnetic field on shield layer

Shield layer	Bx [gauss]	By [gauss]	Bz [gauss]	Bm [gauss]	M [degree]
point 13	143.434	-105.44	22.894	179.490	35.9787
point 14	83.6072	-91.894	12.562	124.870	47.3844
point 15	107.114	19.8834	17.965	110.415	10.3742
point 16	45.0523	115.790	12.563	124.88	68.0047
point 17	96.0286	149.922	22.895	179.506	56.6360
point 18	121.911	22.6279	20.161	125.622	10.3771

3. 실험

실험에 사용된 고온초전도 선재는 고온초전도 전력케이블에 사용되는 Bi-2223 tape 선재이며, 임계전류가 77[K]에서 115[A]이고, 4.1(width)×0.3(thickness)[mm]의 사양을 가지고 있다. 고온초전도 선재는 자장의 세기, 방향 및 온도에 크게 의존한다. 이러한 특성은 고온초전도 테이프를 이용하는 초전도 장치에 큰 영향을 미친다. 따라서, 외부자장의 크기와 방향에 따른 고온초전도 선재의 전압특성을 검토해 보았고, 고온초전도 선재의 전압특성을 측정하기 위해 시험용 자석이 제작되었다. 시험용 자석의 사양은 전자기장 해석을 통해서 결정되고, 그림 5와 같이 조립되었다. 0-300 mT 범위의 자장크기로 고온초전도 선재의 표면에 인가되는 각도를 변화시켜가면서 선재에서의 전압변화를 측정하였다. 고온초전도 선재는 마지막에 조립되는 홀더에 위치하게 되며, 전압을 측정하기 위하여 고온초전도 선재에 70 mm 간격의 전압탭을 부착하였다. 전압탭과 선재 사이의 저항을 줄이기 위하여, 전압탭은 고온초전도 선재 위에 솔더링하여 부착하였고, 외부자장 및 외부자장에 의해 유도되는 자장에 의한 전압이 자체적으로 상쇄되는 구조로 되어 있는 8자 형태의 리드를 사용하였다. 홀더는 실험 중 액체질소 온도(77 K)와 상온(300 K)을 반복적으로 경험하며, 이로 인해 온도차에 의한 열응력으로 고온초전도 선재가 변형되는 것을 최소화할 수 있도록 제작되었다.

그림 6, 7은 시험용 자석의 중간에 위치한 고온초전도 선재에 통전층 및 차폐층 전류를 각각 흘린 상태에서 외부자장의 크기와 인가각도를 변화시켜가면서 측정된 고온초전도 선재의 전압특성이다. 그림을 통해서 외부자장의 크기와 인가각도가 증가할수록 고온초전도 선재의 전압이 상승하는 것을 확인하였고, 이것은 고온초전도 선재의 전압특성이 수평자장 보다는 수직자장에 더욱 의존하는 것을 의미한다.

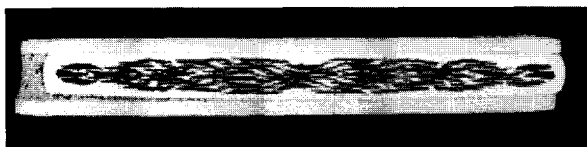


그림 4 Bi-2223 tape 선재의 단면도
Fig. 4 Cross section of Bi-2223 tapes

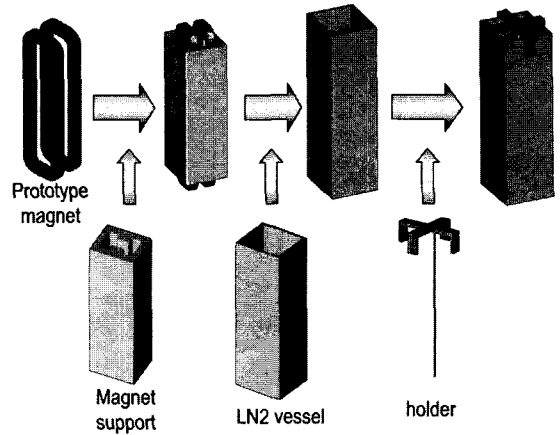


그림 5 시험용 자석의 조립과정
Fig. 5 Assembling the test magnet

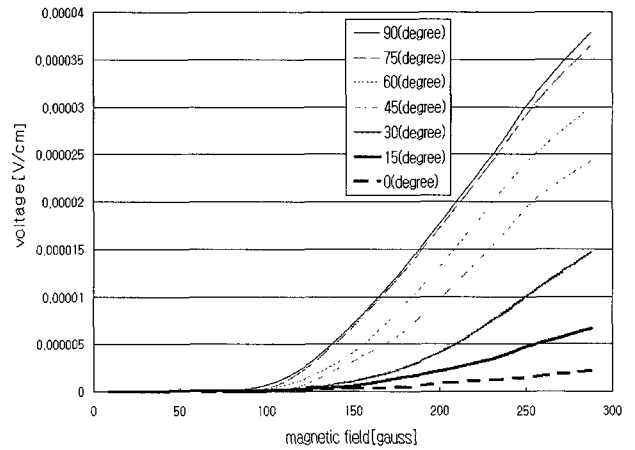


그림 6 45 Arms의 통전층 전류 인가시 외부자장에 따른 고온초전도 선재의 전압특성
Fig. 6 The voltage characteristic of HTS tape with the external magnetic field for transmission current of 45 Arms

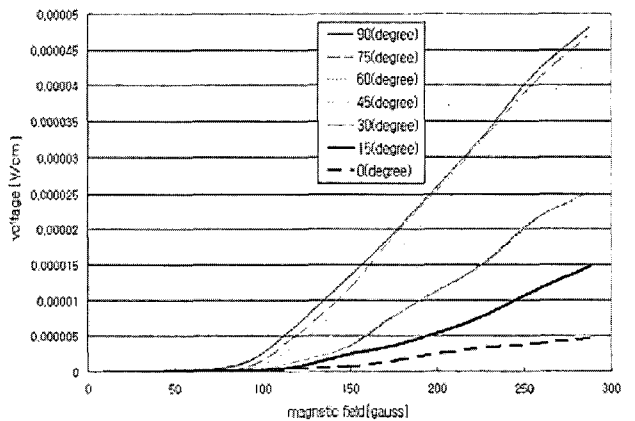


그림 7 57.27 Arms의 차폐층 전류 인가시 외부자장에 따른 고온초전도 선재의 전압특성
Fig. 7 The voltage characteristic of HTS tape with the external magnetic field for shield current of 57.27 Arms

4. 교류손실 계산 및 안정도 평가

고온초전도 전력케이블의 전압특성이 시험과 해석의 결과를 이용하여 분석되고, 이를 이용하여 케이블의 손실이 계산된다. 고온초전도 전력케이블의 통전층과 차폐층은 각각 28개, 22개의 고온초전도 선재로 구성되어 있다. 표 4는 시험과 해석 결과를 이용하여 계산된 고온초전도 전력케이블의 손실값이다.

표 4 고온초전도 전력케이블의 손실계산
Table 4 Loss calculation of the high-Tc superconducting power cable

	Transmission layer(1st)		Transmission layer(2nd)		Shield layer	
	voltage [V/cm]	loss [VA/m]	voltage [V/cm]	loss [VA/m]	voltage [V/cm]	loss [VA/m]
	3.5E-07	1.58E-03	1.5E-06	6.75E-03	1E-05	5.73E-02
	2.2E-06	9.90E-03	3E-06	1.35E-02	3.4E-06	1.95E-02
	1.2E-07	5.40E-04	2.6E-06	1.17E-02	3.8E-07	2.18E-03
	1.5E-06	6.75E-03	3.5E-06	1.58E-02	5.5E-06	3.15E-02
	5E-07	2.25E-03	3.7E-06	1.67E-02	1.6E-05	9.16E-02
	1E-07	4.50E-04	9E-07	4.05E-03	8E-07	4.58E-03
Loss average of one tape [W/m]	0.0035		0.0097		0.0346	
Loss of one layer [W/m]	0.045		0.137		0.37615	
Tctal loss [W/m]	0.9475					

고온초전도 전력케이블의 손실을 계산하는 과정은 다음과 같다. 고온초전도 전력케이블의 통전 1층의 좌표 1을 예로 들면, 표 1의 좌표 1에서의 수평 및 수직 자장값은 각각 81.46 gauss, 79.45 gauss이고, 수직자장과 수평자장 사이의 각은 44.28도이다. 통전층의 전류분포가 균일하다 가정하면, 그림 6을 이용하여 표 4의 좌표 1에서의 발생전압은 0.35 μ V/Cm이 되고, 이 때 통전층 내의 하나의 고온초전도 선재에 흐르는 전류는 45 Arms이므로 좌표 1에서의 교류손실은 전압과 전류의 곱인 1.58 mW/m가 된다. 이와 같은 방법으로 좌표 2에서 좌표 6까지의 교류손실을 계산한 다음, 통전 1층에서 평균손실을 구하고, 여기에 14개의 고온초전도 선재 수를 곱하여 (0.049 W/m의 통전 1층의 손실을 얻었다. 동일한 방법으로 통전 2층과 차폐층의 손실을 계산한 다음, 이들을 모두 더하면 0.9475 W/m의 고온초전도 전력케이블의 전체손실을 얻었다.

일반적으로, 초전도 케이블의 손실은 1 W/m/상을 넘지 않도록 제작되어야 한다고 알려져 있다 [4]. 본 연구에서 해석된 고온초전도 케이블의 손실은 0.9475 W/m/상으로 평가되었다. 따라서, 설계된 고온초전도 전력케이블은 안정한 상태로 운전될 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 고온초전도 전력케이블의 안정성 여부를 판단하기 위하여 초전도 테이프의 전압특성을 실험적으로 검토하고, 고온초전도 전력케이블의 전자기장 해석을 수행하여, 고온초전도 전력케이블의 교류손실을 계산하였다. 초전도 케이블의 교류손실을 계산하는 방법은 여러 가지가 있으나, 전자기장 해석을 이용한 방법을 적용하면, 전자기장 해석 결과와 초전도 테이프의 실험결과 만을 이용하여 고온초전도 전력케이블의 교류손실을 계산할 수 있다.

본 연구를 통해서 개발된 방법은 고온초전도 전력케이블의 설계에 활용될 수 있고, 궁극적으로 설계된 고온초전도 전력케이블의 실계통 적용시 안정하게 운전될 수 있는지 여부를 평가하는데 기여할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Aldo Bloza, et al "Recent Development in HTS Power cable Applications", IEEE Trans. on Appl. Supercond. Vol. 7, No.2, pp339-344 1997
- [2] International Workshop on High-Tc Superconducting Power Transmission Cables, IEA Workshop, April 1997
- [3] Vectorfields, "OPERA-3d Reference Manual". Vectorfields, v9.0, 2003
- [4] J.W.Cho, et al., "A Design and Test of HTS Power Cables and Feasibility Study of HTS Power Transmission System in KOREA," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, pp 1150 - 1153, 2000.

저 자 소 개



배 준 한 (裴 俊 漢)

1966년 4월 30일생, 1992년 건국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 선임연구원



최 석 진 (崔 錫 鎭)

1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 위덕대학교 산학협력단 연구원



이 상 진 (李 相 鎭)

1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수



조 전 옥 (趙 全 旭)

1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원