

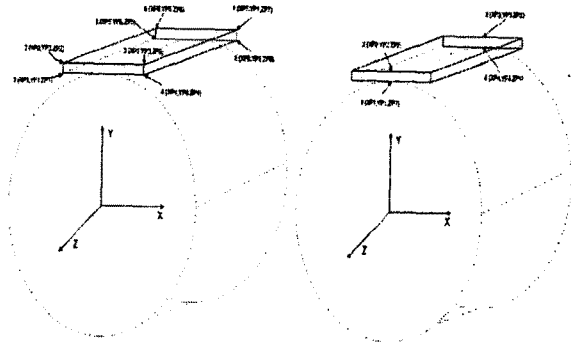
전자장 해석을 이용한 고온 초전도 전력 케이블의 통전용량 산정에 대한 연구

최석진, 이상진, 심가덕, 배준한, 조전욱  
 위덕대학교, 한국전기연구원

Research on the transmission current capacity of the high-Tc superconducting power cable using electromagnetic analysis

S.J. Choi, S.J. Lee, K.D. Sim\*, J.H. Bae\*, J.W. Cho\*  
 Uiduk Univ., \*KERI

**Abstract** - 고온 초전도 전력케이블의 통전용량 산정은 먼저 고온 초전도 전력케이블의 임계전류를 먼저 알아야 한다. 선재의 임계전류를 알고자 하는 경우, 전압-전류를 측정하거나 온도를 측정하는 방법을 통해 임계전류를 알아내지만, 고온 초전도 전력케이블의 경우 이러한 방법으로 임계전류를 알아내는 것이 불가능하다. 본 논문에서는 고온 초전도 케이블에 사용되는 선재에 대한 임계전류를 측정하고, 전자장 해석을 한 후, 실험결과와 해석 결과를 토대로 고온 초전도 전력케이블의 임계전류를 계산하였다. 이렇게 계산된 임계전류를 이용하여 고온 초전도 전력케이블의 통전용량의 기초자료로 활용토록 하였다.



a. 8node  
 b. 4node  
 <그림 2> 초전도 케이블에서의 위치

이 적용되는 전체 영역을 작은 영역으로 세분하고, 각 영역에서 해가 일정하다고 가정하여 방정식을 만족하는 해를 구한 다음 각 영역의 해를 일치 또는 이차 다항식을 이용하여 근사함으로써 전체 영역에서의 해를 구하는 기법이다 현재 개발되어 있는 대부분의 상용프로그램들이 이 방법에 기초하고 있으며, 본 논문에서는 전자기장 수치해석에 상용화프로그램인 opera-3d를 사용하여 모델을 해석하였다.

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

케이블 코어를 모델링 하는 과정은, 먼저 8-node brick conductor(8개의 좌표를 입력하여 하나의 conductor를 모델링)를 그린 후, 이 conductor를 중심원뿔로, pitch에 따라 회전 이동하여 모델링을 완성하게 된다. 케이블 코어에 사용되는 초전도 선재는 0.4mm(두께)×4.5mm(너비)이며, 각 케이블 코어를 10mm씩 나누어 모델링 하였다. 해석상 무한히 긴 코어를 모델링하

1. 서 론

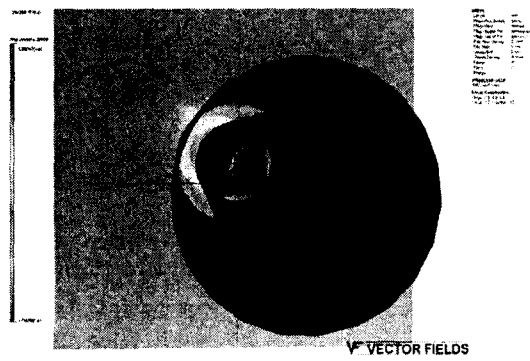
초전도 전력케이블은 R.McFee에 의해 처음 제안되어, 이 이후부터 1980년대 초까지 미국, 일본, 유럽 등의 세계 각국에서 초전도 케이블에 대한 많은 연구개발이 진행되고 있다. 그 중에서도 미국의 Brookhaven 국립연구소(BNL), 오스트리아의 Gratz 연구소, 일본의 전자기술통합연구소(BTL) 등에서는 실용화에 가까운 수준의 초전도 전력케이블을 개발하였으나 이 시기의 초전도 케이블은 Nb, NbTi, Nb3Sn과 같은 저온 초전도 도체를 사용한 시스템으로서 액체헬륨 온도에서 운전되어야 하는 극저온 환경으로 인한 신뢰성 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 세계적인 케이블 제조업체와 전력회사들이 경쟁적으로 가세하여 고온 초전도 전력케이블의 상용화개발에 박차를 가하고 있다.[1]

고온 초전도 전력케이블의 안정적인 통전용량을 산정하기 위한 방법은 여러 가지가 있었지만, 본 논문에서는 자장을 이용한 통전용량 산정 방법을 사용하였다. 고온 초전도 전력케이블의 임계전류를 알아낸다면, 좀 더 쉽게 통전용량 산정이 가능하겠지만, 고온 초전도 전력케이블의 특성상 임계전류의 정의조차도 내리기 힘들어 임계전류를 알아내는 것은 매우 어렵다. 본 논문은 고온 초전도 전력케이블에 대한 전자장 해석을 수행하여 코어의 각 위치에 대한 자장값을 찾고, 외부에서 자장을 인가할 때 고온 초전도 선재의 임계전류의 변화를 측정할 후 해석 결과를 측정결과와 비교하여 임계전류를 계산하고, 통전용량 산정 방법을 제시하였다.[2]

2. 본 론

2.1 전자장 해석

고온 초전도 전력케이블 시스템은 Maxwell 방정식으로부터 유도되는 Poisson방정식 또는 Laplace방정식으로 모델링 할 수 있다. 이 방정식들은 경계조건을 갖는 편미분 방정식의 형태로 주어지는 데, 아주 특수한 경우를 제외하면 해석적인 방법으로 해를 구하는 것은 불가능하고, 대부분의 경우 수치해석적인 방법을 이용한다. 경계 조건을 갖는 편미분 방정식의 해를 구하는 수치해석적인 방법은 유한차분법, 경계요소법 등 여러 가지가 있지만 가장 널리 사용되는 것은 유한요소법이라 할 수 있다. 유한요소법은 방정식



<그림 1> 초전도 전력케이블의 해석모델

<표 1> 각 위치별 자장(8node)

1층	X	Y	Z	Bx	By	Bz	Bm
1	-1.2470	-10.119	0	54.74212	-21.4484	60.63376	84.4582
2	-1.2081	10.517	0	352.1217	-54.9877	66.18906	362.4836
3	3.22075	-10.084	0	330.3647	116.825	66.78563	356.7201
4	3.18186	-9.6865	0	53.76968	20.23926	60.59972	83.49803
5	-2.4351	-9.9006	10	90.04026	-16.8011	57.24649	108.0124
6	-2.4435	-10.300	10	294.3246	42.9351	72.3359	306.1092
7	2.00541	-10.394	10	272.0681	99.16098	73.37674	298.7275
8	2.01387	-9.9948	10	80.96498	43.03306	57.59856	108.281
2층	X	Y	Z	Bx	By	Bz	Bm
1	-3.10889	-10.1197	0	284.4777	-124.608	72.42453	318.9043
2	-3.14337	-10.5182	0	411.6775	-154.055	57.90632	443.3557
3	1.290064	-10.9018	0	431.5575	77.72736	57.79538	442.2938
4	1.324544	-10.5033	0	301.588	68.49004	72.33052	317.6128
5	-2.11769	-10.3725	10	304.876	-93.5176	73.56273	327.2711
6	-2.11355	-10.7725	10	430.3618	-110.84	58.5697	448.249
7	2.332073	-10.7264	10	426.846	120.4859	58.36774	447.3491
8	2.013878	-10.3264	10	231.7599	97.06165	73.72187	261.8559
3층	X	Y	Z	Bx	By	Bz	Bm
1	0.717082	-16.0488	0	238.6674	26.1656	42.53433	243.8359
2	0.79011	-16.4421	0	24.02752	19.86829	4.083014	31.4427
3	5.165318	15.6297	0	29.57119	-9.90808	4.084577	31.45328
4	5.09229	15.2364	0	232.1681	61.27606	42.53651	243.8568
5	-1.08432	-16.0282	10	240.0985	-0.73353	42.53238	243.8377
6	1.05579	16.4272	10	26.10271	17.044	4.081221	31.44051
7	3.382873	-16.1097	10	28.26944	13.1563	4.084255	31.44726
8	3.354337	15.7107	10	237.5594	34.89731	42.53661	243.8476

<표 2> 각 위치별 자장(4node)

1층	X	Y	Z	Bx	By	Bz	Bm
1	0.967409	-9.90286	0	17.47775	12.6273	50.59393	54.99696
2	1.0063	10.301	0	231.8087	48.15757	75.71256	248.5686
3	0.21062	9.94777	10	3.462	-3.81117	52.70411	52.95502
4	0.21909	-10.3477	10	219.2965	-9.30678	77.26752	232.6969

2층	X	Y	Z	Bx	By	Bz	Bm
1	-0.89217	-10.3115	0	152.408	-24.6766	69.06694	169.1372
2	-0.92665	-10.71	0	450.8838	-38.6523	59.20421	456.3939
3	-0.0519	-10.3494	10	219.5996	-4.43426	77.14781	232.7991
4	0.109263	-10.7494	10	443.1007	2.791038	57.99613	446.8888

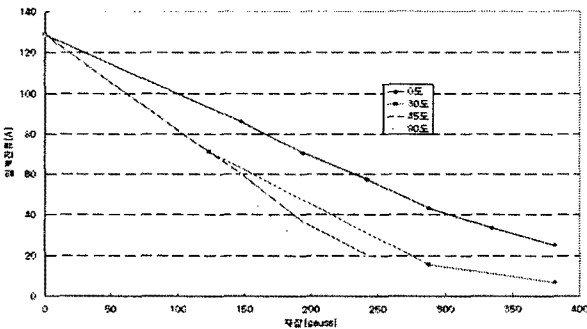
3층	X	Y	Z	Bx	By	Bz	Bm
1	2.904686	-15.6426	0	299.4287	55.58709	53.70951	309.2445
2	2.977714	-16.0359	0	26.76113	4.959698	4.39759	27.56983
3	1.135006	-15.8695	10	303.7786	21.71841	53.70708	309.2533
4	1.163542	-16.2684	10	27.15426	1.935776	4.3955	27.57574

기가 힘들기 때문에, 해석길이는 400mm로 하였으며, 가장 에러가 작은 중앙부분에서 2번 좌표를 회전 이동시키며 자장값을 찾았다. 끝 부분에서는 누설자장이 발생하여 에러가 발생할 수 있기 때문이다. 고온 초전도 전력케이블의 케이블 코어는 총 3층으로 이루어져 있다. <그림 2>에서와 같이 3층에 대한 위치를 찾고, 그 위치에 대한 자장값을 해석을 통하여 찾아내었다. 그 결과는 <표 1>과 같다. Bx, By, Bz는 x, y, z 방향의 자장이며, Bm은 전체 자장의 크기를 의미한다. Bx, Bz는 수평방향의 자장이고, Bz는 수직방향의 자장이 된다.

다음으로 4node를 선정한 이유는 8node의 위치에서의 자장값을 찾기 위해서 수행한 전자기장 해석의 영향 때문이다. 전체 케이블 코어가 촘촘히 pitch를 가지고 감겨 있다고 볼 때, 각 포인트에서의 자장의 수직 성분은 매우 작으리라 생각되지만, 8node에서의 전자기장 해석 결과를 보면 상당히 큰 수직 성분이 있음을 알 수 있다. 8node를 이용한 결과와 4node를 이용한 결과를 서로 비교하여 수직성분에 대한 영향 등을 파악하도록 하였다. 4node에서의 자장값은 <표 2>와 같다.

**2.2 고온 초전도 선재의 임계전류**

고온 초전도체의 특성상 고온 초전도 선재는 외부 인가 자장에 영향을 받게 된다. 외부 인가 자장의 크기가 클수록 고온 초전도 선재의 임계전류는 작아지게 되며, 선재가 수평방향의 자장을 받는 것보다 수직방향의 자장을 받는 것이 임계전류를 더 작아지게 만든다. 외부 인가 자장에 따른 고온 초전도 선재의 임계전류 변화는 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 자장의 방향에 따른 임계전류의 변화

**2.3 결과 분석**

전자장 해석 결과와 실험결과를 이용하여, 고온 초전도 전력케이블의 임계전류를 계산하였다. 8node에서 1층에 대해 임계전류를 산정해보면 다음과 같다. 선재가 받는 외부 자장이 수평방향의 자장 최대값은 Bx가 약 350 Gauss, By가 약 73Gauss였고, 수직방향의 자장 최대값은 약 116Gauss였다. 실험 결과를 보면, 수평방향의 자장이 350Gauss일 때, 76%, 73Gauss일 때 15%까지 임계전류가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 수직방향의 경우, 자장이 116Gauss일 때, 초기 임계전류(외부자장이 없을 때)의 43%가 떨어지게 된다. 선재가 최악의 조건인 수평방향의 최대값 350Gauss, 수직방향의 최대값 116Gauss가 인가된다면, 130A의 임계전류를 가지는 선재의 경우, 수평방향의 자장에 의해 32A의 임계전류를 가지게 되고, 수직방향의 자장에 의해 13.76A의 임계전류를 가지게 된다. 전자기장 해석 결과와 실험결과를 이용하여 임계전류를 계산한 값은 <표 3>과 같다.

8node의 위치에서의 임계전류는 1층의 경우 20.46A에서 99.84A, 2층의 경우 8.6A에서 37.21A, 그리고 3층의 경우 43.169A에서 116A까지 나오는 것을 알 수 있다. 4node의 위치에서의 임계전류는 1층의 경우 11.26A에서 109.61A, 2층의 경우 14.67A에서 68.4A, 그리고 3층의 경우 29.53A에서 119A까지 나오게 된다. 각 node에서의 평균값을 보면 8node의 경우, 1층에서 59.2A, 2층에서 19.246A, 3층에서 82.1A가 나오며, 4node의 경우 1층에서 55.404A, 2층에서 39.75A, 3층에서 75.144A가 나온다. 한 선재에서도 각 위치마다 받는 자장이 틀리기 때문에 각 위치마다 임계전류가 차이가 나고,

<표 3> 8node와 4node에서의 임계전류

8node	1	2	3	4	5	6	7	8	평균
1층	99.846	25.35	20.46	95.30	88.79	33.23	26.73	83.9	59.2
2층	21.32	8.66	13.53	27.76	24.19	11.30	10	37.21	19.246
3층	50.415	111.69	115.27	43.169	57	113.53	116.25	49.46	82.1

4node	1	2	3	4	평균
1층	109.61	45.50	11.26	55.246	55.404
2층	68.4	14.67	57.1	18.85	39.75
3층	29.538	117.169	34.8	119.07	75.144

또한 각 층마다 차이가 나는 것을 알 수 있다.

임계전류를 초과하였을 때 급격한 전압이 나타나는 저온 초전도 선재와 달리 고온 초전도 선재는 임계전류를 초과하는 경우 저온 초전도 선재와 달리 전압이 서서히 증가하게 된다. 즉, 임계전류 크기의 전류가 고온 초전도 선재에 통전되는 것은 선재에 1μN/cm의 전압이 발생한다는 것이다. 고온 초전도 전력케이블의 통전용량을 1μN/cm가 나타날 때의 통전전류로 본다면, 최악의 조건(1층의 3)을 가정하였을 때 1층에서의 통전용량은 20.46A가 될 것이다. 하지만, 실제 고온 초전도 전력케이블의 1층의 모든 위치가 위치 3의 자장을 균일하게 받는 것이 아니다. 본 연구에서는 통전용량 산정의 경계를 계산하였지만, 향후 좀 더 정확한 통전용량 산정을 위해서 고온 초전도 선재를 고온 초전도 전력케이블에 인가되는 자장조건하에서의 고온 초전도 선재 실험이나 선재의 방향에 따른 임계전류 측정을 좀 더 세분화시키는 연구를 진행할 것이다.

**3. 결 론**

본 논문에서는 고온 초전도 전력케이블의 통전용량 산정을 위하여, 전자기장 해석을 수행하고, 고온 초전도 선재에 대한 임계전류를 측정된 후, 이를 비교 분석하였다. 통전용량 산정을 하는 방법은 여러 가지가 있지만, 자장을 이용한 통전용량 산정 방법이 확립된다면 전자기장 해석과 고온 초전도 선재의 특성만으로 통전용량 산정이 가능해질 것이다. 본 논문의 결과는 고온 초전도 전력케이블 설계의 기초자료로 활용될 것이다.

**[참고 문헌]**

- [1] 성기철, 배전급 초전도 전력케이블 개발, 2003 DAPAS Program Workshop, 차세대 초전도응용 기술개발 사업단, 2003
- [2] "초전도 기술", 제 8회 국제 초전도 산업 summit(ISIS-8) 발표자료, October, 1999
- [3] Vectorfields, "OPERA-3d Reference Manual". Vectorfields, v9.0, 2003

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.