

고온 초전도 케이블의 굽힘 직경에 따른 임계전류 저하 특성

김해준\*, 김재호, 조전욱, 심기덕, 배준한, 김해중, 성기철  
한국전기연구원

Characteristics of Critical Current Degradation with Bending Diameter of High Temperature Superconducting Cable

Hae Joon Kim\*, J.H. Kim, J.W. Cho, K.D. Sim, J.H. Bae, H.J. Kim, K.C. Seong  
Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)

**Abstract** - 22.9[kV]/50[MVA]/30[m] HTS transmission power cable has been developed and tested at Korea Electrotechnology Research Institute and LG Cable Company by 21 century center for applied superconductivity technology. It is necessary to measure of critical current degradations, AC loss, insulation test and etc at the HTS cable development. This paper is analyzed characteristics that critical current of HTS cable bending condition according to this paper. We will be able to decide the diameter of drum which HTS cable is wound around and minimum curvature radius of HTS cable from results of this research.

1. 서 론

네덜란드의 Kamerlingh Onnes에 의해 초전도현상이 발견된 이후 초전도의 응용을 위한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 특히 손실이 없는 전력수송에 대한 관심과 함께 1961년 R. McFee에 의해 초전도케이블이 처음 제안되었다. R. McFee의 제안 이후 1980년대 초까지 미국, 일본 등의 세계 각국에서 초전도케이블에 대한 많은 연구개발이 진행되었다[1][2].

고온초전도 전력케이블은 기존 케이블의 구리 도체 대신 고온초전도 도체를 사용하여 전기저항이 없어지는 초전도현상을 이용하여 저손실·대용량 전력수송이 가능한 전력케이블로서 대도시의 전력공급 문제를 해결할 수 있는 환경 친화적 신 개념의 전력케이블이다. 또한 종래의 전력케이블에 비해 초전도케이블은 765 kV나 345 kV의 초고압이 아닌 154 kV 또는 22.9 kV 정도의 전압으로 대용량 송전이 가능하기 때문에 종래 변전소의 고전압송전을 위한 주변기기를 간략화 시킬 수 있으며, 송전손실이 극히 작고 compact한 케이블에 의해 부지 문제를 해결할 수 있다. 또한, 작은 송전손실은 전력케이블 운용단가를 낮출 수 있다. 이러한 장점을 가지는 HTS 케이블은 대용량 부하가 밀집된 도심지 전력계통의 신규 설비에 적용시킨다면 경제적인 대체수단이 될 수 있다[3].

최근 임계전류가 높고 기계적 특성이 크게 개선된 고온 초전도 선재가 개발됨에 따라 이를 응용한 고온초전도 케이블의 개발연구가 더욱 활발해지고 있다. 이에 미국, 유럽 및 일본에서는 케이블을 개발하여 시험 중이며, 우리나라에서도 21세기 프론티어 사업의 일환으로 22.9kV급 고온 초전도 케이블을 주관 연구기관인 한국전기연구원과 LG전선(주)이 공동으로 개발 중에 있다 [4-6].

초전도 케이블의 개발 및 실제 계통에 적용을 위해서는 케이블의 굽힘 반경에 따른 임계전류저하특성, 교류손실, 냉각시스템, 절연 시험 등 여러 가지 시험을 거쳐야 한다.

따라서 본 연구에서는 고온초전도 케이블의 굽힘 직경에 따른 임계전류의 감소 특성에 대해 측정, 분석하였

다. 현재 설계된 고온 초전도 케이블은 도전층, 실드층으로 되어있으며, 본 연구를 위해 동태이프로 실제 설계된 케이블의 피치를 그대로 적용하고, 각 층마다 초전도 선재의 제조사 별로(AMSC, INNOST, KERI) 초전도체가 하나씩 삽입된 실험용 모델 케이블을 제작하여 각각의 굽힘 직경별로 임계전류의 감소 특성을 측정·분석하였다. 실제 제작되어진 초전도 케이블은 대형 보빈에 감겨져서 보관, 운반이 되고, 실 계통에 적용시에 케이블이 굽혀서 설치해야하는 구간도 있으므로, 본 연구를 통하여 케이블이 감겨지는 보빈의 직경, 최소 곡률 반경을 확인하고자 한다.

2. 본 론

고온 초전도 케이블의 형태는 그 절연방식에 따라 상온 절연 고온초전도케이블, 저온절연 고온초전도케이블로 구분할 수 있다. 상온절연 고온초전도케이블은 초전도 도체위에 전기 절연층이 없으며, 냉각을 위한 cryostat 위에 전기절연을 한 구조의 초전도케이블로서 이 케이블의 전기절연재료는 상온에서 사용되기 때문에 기존의 절연재료를 그대로 쓸 수 있는 장점이 있다. 그러나 상온 절연 고온초전도케이블은 이미 검증된 절연재료를 사용할 수 있기 때문에 전기절연 측면에서의 신뢰성은 어느 정도 보장되지만, 교류자계를 차폐해 극저온관로와 같은 도체 이외의 부분에 있어서의 와류손을 억제하는 shield layer를 설치할 수 없기 때문에 cryostat의 와전류에 의한 온도상승으로 시스템의 손실이 증가하기 때문에 대용량의 시스템에 적용은 곤란하다. 그림 1과 같이 현재 프론티어 사업의 일환으로 추진되는 고온 초전도 케이블은 저온절연형으로 고온초전도케이블은 전기절연층이 극저온관로내에 있는 구조의 케이블로서 고온초전도 도체위에 전기 절연층을 놓고 그 위에 다시 HTS 쉴드층을 설치한 케이블 core를 극저온관로 내에 설치하는 구조의 초전도케이블로서 shield layer와 도체층의 적용이 가능하여 cryostat에서 와전류의 발생을 억제할 수 있으며, 하나의 cryostat에 3상 케이블 코어를 모두 설치할 수 있어 각 상마다 cryostat를 설치하는 상온절연방식과 비교해서 단위길이당의 열절연층의 표면적이 작게 되기 때문에 외부로부터의 침입 열이 적고 compact하다는 장점이 있다.

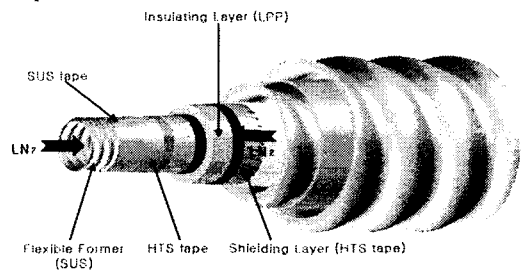


그림 1. 고온초전도 케이블의 형태

## 2.1 실험방법

그림 2는 실험용 모델 케이블을 나타내고 있다. 실험용 모델 케이블은 그림 3과 표 1에서와 같이 제작하였다. 그림 3에서와 같이 실제 초전도 케이블처럼 모든 Layer를 초전도 선재로 제작한 것이 아니고, 층별로 초전도 선재 제조사 별로 하나씩 구성하게 하였다. 그리고 모델 케이블의 나머지 부분은 Cu-tape를 사용하여 같은 피치로 하여 길이 323cm의 케이블을 제작하였다. 따라서 이러한 모델 케이블을 그림 5에서와 같이 각각의 bending diameter 별로 같은 방향으로 굽힌 후 다시 펴서 실험용 cryostat에 넣고 각 층별로 임계전류를 측정하였다.

이러한 모델 케이블을 bending 하기 전의 정상 상태에서 먼저 임계전류를 측정한 후 각 bending 조건을 4000mm, 3800mm, 3000mm, 2800mm, 2500mm, 2000mm, 1700mm의 순서대로 bending 하여 그때의 임계전류를 측정한 것이다. 이러한 bending diameter의 기준은 초전도 케이블이 감겨지는 드럼을 기준으로 한 것이며, 초전도 케이블 bending 후 액체질소와 상온의 온도차에 의한 열화로 임계전류가 감소할 수 있는 것은 무시하였다.

임계전류 측정 시 전원장치는 Agilent6617A(0~8V, 200A)인 DC Power-Supply를 사용하였고, 전압신호를 측정하기 위해 KEITHLEY의 nano-Voltmeter를 사용하였고, 이러한 전압 및 전류 신호를 GPIB 통신으로 Labview 임계전류 측정 프로그램을 사용하여 data를 저장하였다.

표 1. 모델케이블의 각 층별 초전도 tape 구성요소

	1st Layer	2nd Layer	Shield Layer
제조사	AMSC INNOST KERI	AMSC-1 AMSC-2	AMSC KERI INNOST
피치	190mm	460mm	490mm
voltage tap 간 거리	351.9cm	328.61cm	332.89cm

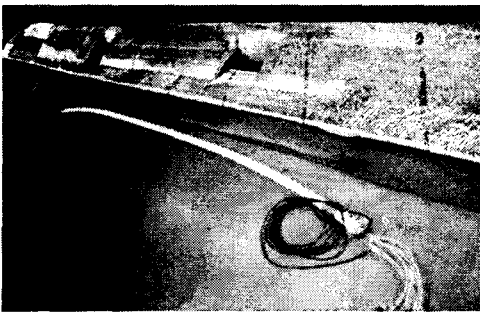


그림 2. 모델 케이블과 실험용 Cryostat



(a)shield layer (b)2nd layer (c)1st layer

그림 3. 모델 케이블의 층별 도체 구성도

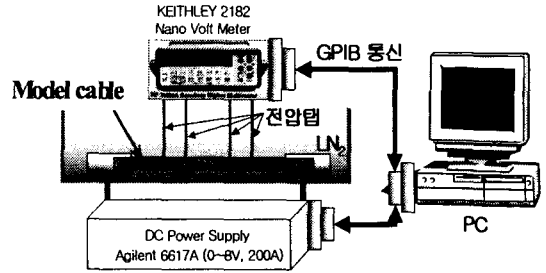


그림 4. 임계전류 시험 구성도

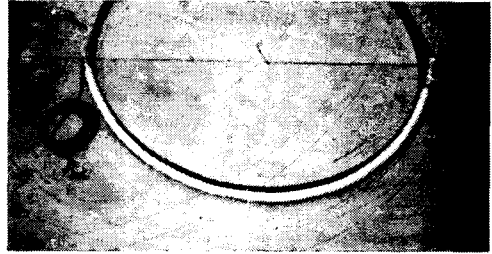


그림 5. 굽혀진 모델 케이블

## 2.2 실험결과

본 실험용 모델 케이블은 실제 제작된 초전도 케이블과 동일한 장력으로 권선하여 제작한 것이다. 실제 제작된 HTS cable은 통전층(1st, 2nd)과 shield층으로 구성되고 각 layer에서는 AMSC 선재를 사용하였다. 본 연구에서 케이블 권선 작업을 마치고 난 후의 각 선재의 임계전류를  $I_{c0}$ 로 규정하여 여기서부터 각각 케이블을 bending하여 그때의 전류를 측정하여 그림 6,7,8과 같이 임계전류의 감소율을 측정하였다.

그림 6에서는 모델 케이블의 1st-layer에서 각 bending diameter에 따른 임계전류의 감소율을 측정 한 것이다. 2500mm까지는 임계전류가 약 4%정도 감소되었다. 이러한 4% 정도의 감소율은 측정 계기의 오차, 액체질소의 온도(77K)와 상온의 온도차에 의해 미세하게 감소될 수 있으므로, 2500mm까지는 bending에 의한 감소율은 거의 없을 것이라고 판단된다. 특히 온도차에 의한 초전도 선재의 열화 특성이 있을 수 있으므로 향후 이러한 점을 고려하여 시험해야 할 것이다.

2500mm이하에서 임계전류의 감소율이 커진 것으로 보아 향후 제작될 초전도 케이블에서는 2500mm이하로 굽혀서 보관 및 작업을 하지 말아야 할 것이다.

그림 7에서는 2nd-Layer에서의 각 bending diameter에 따른 임계전류의 감소율을 측정 한 것이다. 2nd-Layer에서 2가지 AMSC 선재에서 2500mm이하에서 하나는 감소율이 적고 나머지 하나는 감소율이 크게 측정되었다. 1700mm까지 시험 후 모델 케이블을 해체하여 조사를 해 보니 AMSC-1의 도체는 current 단자와 전압탭 사이 도체가 심하게 damage를 받고 있었다. 모델 케이블의 운반 및 bending 작업시에 받은 damage인 것으로 추정되며, 향후 초전도 케이블 취급 시 주의가 요구된다. 따라서 이러한 외적인 damage가 없었다면 기계적으로 성능이 우수한 AMSC 도체의 경우는 2nd-Layer에서 임계전류의 감소율은 1700mm까지 5%이내가 될 것으로 사료된다.

그림 8에서는 Shield Layer의 임계전류의 감소율을 측정 한 것이다. AMSC 도체의 경우 2500mm까지 측정하고 그 뒤에 부분은 전압탭이 떨어져서 측정을 못하였다. Shield Layer의 경우 케이블의 가장 바깥쪽 부분으로 bending에 대해서 가장 심하게 영향을 받을 수 있는 부분이다. 그림 8에서와 같이 1st와 2nd-Layer에 비해 임계전류의 감소율이 크게 측정되었다.

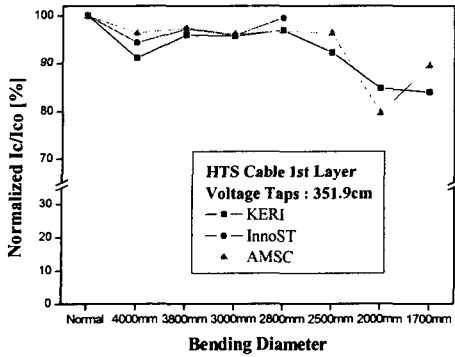


그림 6. 1st layer에서의 임계전류 감소

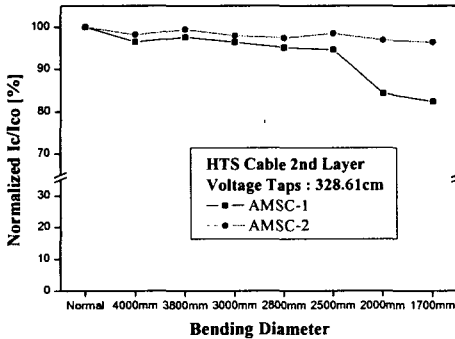


그림 7. 2nd layer에서의 임계전류 감소

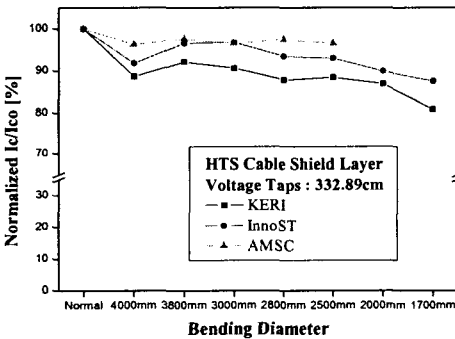


그림 8. Shield layer에서의 임계전류 감소

아래 실험 결과에서 나타난 공통적인 사항들은 기계적으로 성능이 우수한 AMSC 도체의 경우는 우선 케이블 권선 작업에 의한 임계전류의 감소가 없었고, bending에 의한 감소율도 작았다. 또한 2500mm 이하에서는 임계전류의 감소율이 커지게 되는 것으로 보아 실제 초전도 케이블이 제작되고 보관되어지는 드럼의 직경은 최소 2500mm 이상은 되어야 하며, 케이블을 굽혀서 설치해야 할 경우는 2500mm 이하로 굽혀서 설치하면 케이블의 임계전류가 크게 감소하므로 케이블 설치 및 취급 시 주의해야 할 점이라 사료된다.

### 3. 결 론

현재 프론티어 사업으로 진행중인 배전급 초전도 케이블 개발에서 본 연구는 실제 제작되는 초전도 케이블에서 각 bending diameter에 따른 임계전류의 감소율을 측정하여 향후 케이블의 설치 및 보관 시 요구되는 최소 굽힘 직경에 대해 다음과 같은 결론을 내렸다.

① 모델 케이블에서 측정된 바와 같이 초전도 케이블은 bending diameter 2500mm 이하에서 임계전류의 감소율이 커진다. 따라서 케이블을 보관하는 케이블 드럼이나 케이블 포설시에 bending 하여 설치할 곳에서는

그 직경을 최소 2500mm 이상으로 해야 한다.

② 기계적 특성이 우수한 AMSC 선재의 경우가 케이블 권선 작업이나 케이블 bending으로 인한 임계전류의 감소율이 작았다. 따라서 케이블 제작시에는 기계적으로 성능이 우수한 선재를 사용하는 것이 유리하다.

특히 실제 케이블을 제작하고 보관 운반시에 드럼에 권선될 때에는 bending뿐만 아니라 장력도 가해지므로 케이블의 임계전류가 저하되지 않는 범위 내에서 드럼에 감겨 보관되어야 할 것이다.

본 연구는 단상 초전도 케이블에 대하여 각 bending diameter에 따른 임계전류의 감소율을 측정하는 것이다. 향후 장력을 가하면서 케이블을 굽혀서 임계전류의 감소율을 측정하여 제작될 케이블에 적용할 수 있는 드럼의 직경이나 최소 곡률반경을 구해야 할 것이다. 이러한 데이터는 앞으로 진행될 초전도 케이블 연구개발에서도 쓰일 수 있는 중요한 기초 데이터가 될 것이라 사료된다.

감사의 글

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

### [참 고 문 헌]

- [1] I. Forsyth, E. B and Williams, J A, "The Technical and Economical Feasibility of Superconducting Power Transmission : A Case study", Trans. on IEEE PAS-94 : pp.161, 1975
- [2] Forsyth, E. B, "The 60Hz performance of superconducting power transmission cables rated for 333 MVA per phase", Trans. on IEEE PAS-103, No. 8 : pp.182-185, 1984
- [3] S. Honjo and Y. Takahashi, "Outline of Verification Tests on a Superconducting Cable System for Practical Use", Cryogenic Eng. In Japan. 36, pp242, 2001.
- [4] N.Steve et al, "High Temperature Superconducting cable field demonstration at Detroit Edison", Physica C 354, p49, 2001
- [5] M.Nassi, "HTS Prototype for Power Transmission Cable : recent result and future programmes", Supercon. Sci. Technol:13, 2000
- [6] 성기철 외, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 차세대 초전도 응용기술개발 사업단 연차보고서, 2002