

동축 고온 초전도 케이블의 전류분포 및 mini-model 케이블의 전기절연

김영석*, 곽동순*, 백승명*, 김해중**, 김상현*, Takataro Hamajima***
* 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원, ** 한국전기연구원 초전도 응용그룹,
*** 일본 Yamaguchi 대학 전기전자공학부

The Characteristics of Current Distribution of a Coaxial HTS Cable and Insulation of Mini-model Cable

Young-Seok Kim*, Dong-Soon Kwag*, Seung-Myeong Baek*, Hae-Jong Kim**,
Sang-Hyun Kim*, Takataro Hamajima***

* Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University
and Engineering Research Institute.

** Applied Superconducting Lab, Korea Electrotechnology Research Institute

*** Dept. of Electric and Electronic Engineering, Yamaguchi University

shkim@nongae.gsnu.ac.kr, athens19@hanmir.com

Abstract - In order to verify the extended theory, we have fabricated a two layers cable with the same twisting layer pitch. It was observed that almost all the operational current less than the critical current flowed on the outer layer because of its lower inductance. In case of operational current more than critical currents of layers, the flux flow resistances affect strongly current waveform and thereby the currents of layers were determined by the flux flow resistances. And we investigated withstand voltage, impulse voltage and breakdown characteristics of mini-model cable. In these test, the withstand voltage and impulse voltage test was satisfied and the breakdown voltage was 110kV.

1. 서 론

전력수요의 증가와 미래의 대 도시의 전력수송으로 고온 초전도케이블 송전이 유망하며, 각 국에서 실용화를 위해 개발연구가 활발하게 이루어지고 있다. 또한 100m 규모의 시험케이블의 성능시험이 개시되기 시작했다[1]. 고온 초전도 케이블은 도체, 도체절연 그리고 극저온 냉매로 구성되어 있으며, 실제 케이블에 적용되기 위해서는 도체의 교류손실 저감과 고전압 송전에 따른 전기절연에 관한 연구는 불가피 하다[2][3].

먼저, 케이블의 교류 손실 저감을 위해서는 케이블 각 층의 전류분포 균일화가 요구되며, 필자는 인접하는 층의 초전도 filament 사이에 성립하는 자속보존법칙을 이용하여 각 층의 전류분포를 제어하는 이론과 실험을 통해 새롭게 구축하였다.[4]. 그러나, 실제의 케이블에서는 단락 사

고 등이 발생하여 임계전류이상으로 전류가 초과해서 흐르는 flux flow 상태로 되며, 이때의 케이블 관한 연구는 케이블 도체의 최적설계를 위해 중요하다 하겠다.

한편, 고온 초전도 케이블의 전기절연은 주로 sheet상에서의 데이터를 기준으로 설계하여 제작하지만, 실제 케이블에서는 단부의 전계 집중과 제작 상 butt gap 형상에 대한 절연특성에 관한 연구는 미비한 실정이다[5]. 또한 제작된 케이블의 정확한 절연평가에 대한 기준도 아직 확립되어 있지 않다. 따라서, 케이블의 교류 내전압 시험, impulse 충격시험, 부분방전 그리고 유전특성에 관한 시험 평가와 시험방법의 확립은 케이블 전기절연에 있어서 중요하다.

이와 같은 관점에서 본 논문에서는 2층의 초전도 케이블을 제작해서 구축한 전류분포 방정식의 시뮬레이션 파형과 실험을 통한 전류분포를 비교하였다. 또한 mini-model 초전도 케이블은 보고한 22.9kV급 전력케이블 절연두께 설정에 따라 제작하였으며[6], 케이블 시험 기준에 맞게 교류 내전압, Impulse 충격시험 그리고 절연파괴 특성을 조사하였다.

2. 고온 초전도 케이블의 전류분포 특성

2.1 이론

Maxwell의 방정식을 인접하는 층의 초전도 filament의 사이에 쇄교하는 자속에 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_T}{\partial t} \quad (1)$$

이때, 좌변(Left Hand Side)은 다음 식으로 주어질 수 있다.

$$LHS = R_k i_k(t) - R_{k+1} i_{k+1}(t) \quad (2)$$

여기서, $R_k i_k(t) = R_{c,k} i_k + (V_c / I_c^n) k i_k^n$ 3) 이다. 다만, R_c 는 접촉저항, i 는 전류, 제 2항은 초전도도체의 전류전압특성을 표시하고, V_c 는 기준전압에서 $10^{-4}V/m$, I_c 는 임계전류, n 은 지수를 표시한다.

또한, 쇠교 자속(Φ_T)은 보고한[4] 것을 참고하였으며, 본 연구에서 제작하는 고온 초전도 케이블이 실제의 케이블같이 충분한 길이를 가지지 않고, 충분하지 않은 초전도 테이프를 구성되기 때문에 누설자속을 고려하여 계산하였다. 계산은 Runge-Kutta 방법을 이용해서 각 층의 시간적인 전류 파형을 구하였다.

2.2 고온 초전도 케이블 제작

제작된 2층 고온 초전도 케이블의 사진을 그림 1에 나타낸다. 케이블 제작은 길이 1m의 2층 고온 초전도케이블을 설계 제작하였다. 도체로는 폭 3.2mm, 두께 0.21mm 그리고 임계전류 15A를 가진 은 피복 고온 초전도 선재를 사용하였다. twist pitch 방향은 각 층 모두 동일방향(S방향)으로 하고 도체의 twist pitch 길이는 1층, 2층 모두 500mm하였으며, 각 층의 선재의

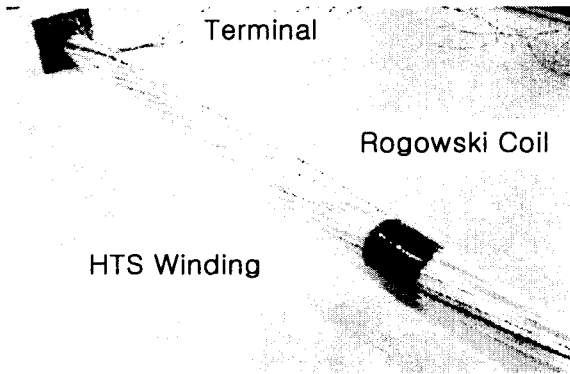


Fig. 1. The photograph of HTS cable.

수는 반경과 pitch를 고려하여 각 층에 각각 15개의 선재를 사용하였다. 먼저 1층의 제작은 원형 FRP former(두께 1.0mm)상 위에 선재와 kapton 시트가 밀착된 것을 감았다. 1층의 전류를 측정하기 위해 2개의 rogowski coil을 삽입했다. 2층의 제작은 반으로 절단된 원통 FRP를 사용해서, 1층과 같은 방법으로 작업을 수행하였다. 또한 접촉저항의 영향을 적게 하기 위해 계단형태의 동 block을 제작하였고 스테인레스 선으로 감은 후 납땜을 이용해서 고정하였다. 1층과 2층의 도체 길이는 각각 970mm, 1010mm 정도였다.

2.3 실험방법

제작된 2층 고온 초전도케이블은 단부를 포함해서 액체질소 내에 침적하였다. 교류전류는 shunt 저항을 이용해서 인가하였으며, 주파수는 20~200Hz의 범위에서 시험했다. 각 층의 전류분포 측정은 rogowski coil을 이용하여 transient recoder에서 측정하였다. 먼저 1층 케이블을 완성

한 후에 전류를 인가하여 그 결과에 의해 rogowski coil의 k 값을 구하였다. 따라서 다음의 관계식으로부터 각 층의 전류를 구하였다.

$$I_1 = k \int V_1 dt \quad (4)$$

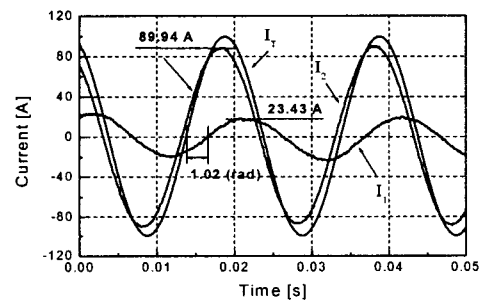
$$I_2 = I_T - I_1 \quad (5)$$

여기서, I_1 은 1층 도체의 전류 peak값, I_2 는 2층 도체의 전류 peak값 그리고 I_T 는 전체 통전 전류를 나타낸다. V_1 은 1층 rogowski coil 출력 전압의 peak값을 나타낸다.

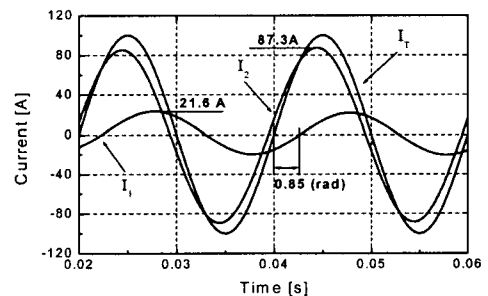
2.4 실험결과

2층 고온초전도 케이블에 통전 전류(I_T)의 변화에 따른 각 층의 전류 파형을 구하였다. 이때의 I_c 는 각 층의 임계전류, $2I_c$ 는 케이블 전체의 임계전류를 표시한다. 그리고 실험에서 구한 접촉저항(1층 $1\mu\Omega$, 2층 $5\mu\Omega$)과 $n=12$ 값 등을 유도된 식 중에 도입하여 simulation하였다.

그림 4 a), b)에 주파수 50 Hz, 통전전류(I_T)100A에서 각 층에 흐르는 전류분포의 실험 결과 및 simulation 결과를 나타낸다. 그림으로부터 전류는 1층보다 2층에 많이 흐르고 있는 편류현상과 1층의 위상이 2층보다 늦게 되는 것을 알 수 있다. a)의 경우, 각 층의 전류 peak값이 23.43A, 89.94 A로서 위상은 전체 전류로부터



a) Experimental result



b) Simulation result

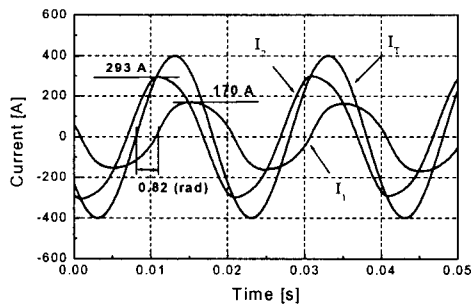
Fig. 2. In case of $I_{op} < I_c$, experimental and simulation result of current distribution in HTS cable.

어긋나서 1층이 1.02(rad)정도 늦고, 2층이 0.22(rad) 앞서는 것을 알 수 있다. b)의 경우,

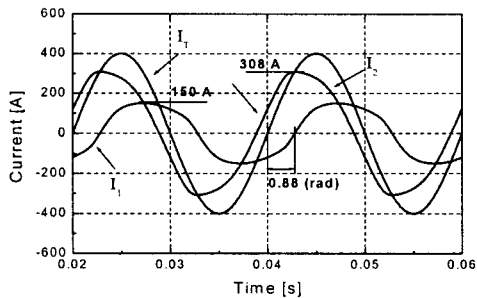
실험결과와 동일하게 제 2층에 전류가 많이 흐르는 것을 알 수 있다. 1층과 2층의 전류 peak값은 각각 21.6A, 87.3A로서 실험결과와 거의 같은 값을 나타내었다. 또한 전체 전류로부터 1층과 2층의 위상도 각각 0.85(rad) 늦고, 0.17(rad) 앞서는 것에서 실험결과도 거의 동등했다.

통전 전류가 I_c 와 $2I_c$ 의 사이에서 각 층의 흐르는 전류분포의 실험결과 및 simulation을 그림 3 a), b)에 나타낸다. 그림 a)로부터 각 층의 전류는 파형의 찌그러짐과 위상의 차이가 관측되었다. 먼저, 제 2층이 I_c 이상으로 도달하고, 이 부근으로부터 제 1층의 전류가 급격하게 증대하는 것을 알 수 있다. 전체 전류가 최대 값으로부터 감소하기 시작하면, 제 2층의 전류가 먼저 감소하기 시작하는 형태를 관찰 할 수 있다. 그리고 각 층의 전류 peak 값은 170A:293A정도이며, 위상은 제 2 층의 케이블이 I_c 에 도달할 때까지의 시간으로 결정되어진다. 그림 b)의 simulation 결과도 실험결과와 마찬가지로 제 2층이 먼저 임계전류 값에 도달하고, 다음에 제 1층의 전류가 급격하게 증대하는 것을 알 수 있다. 그리고 flux flow 저항이 생기는 것에 의해 파형이 찌그러짐이 나타나고, 위상차도 관측되었다. 이 결과도 실험결과와 거의 일치하고 그 peak값도 일치하는 것을 알 수 있다.

통전 전류가 $2I_c$ 이상의 경우에서의 주파수

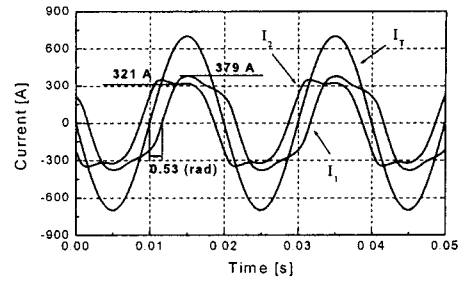


a) Experimental result

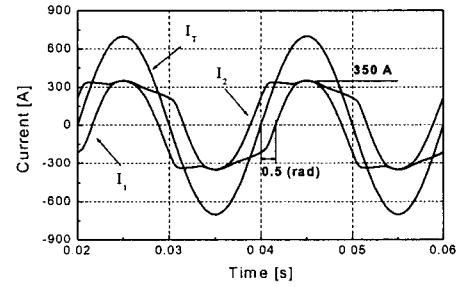


a) Simulation result

Fig. 3. In case of $I_c < I_{op} < 2I_c$, experimental and simulation result of current distribution in HTS cable.



a) Experimental result



a) Simulation result

Fig. 4. In case of $I_{op} > 2I_c$, experimental and simulation result of current distribution in HTS cable.

50Hz에 대한 각 층의 전류 분포의 실험결과 및 simulation 결과를 그림 4 a),b)에 나타낸다.

두 그림 모두 각 층의 전류는 임계 전류값 이상으로 도달하고 파형의 찌그러짐 현상이 관측되었다. 그림 3의 결과와 같이 제 2층이 먼저 I_c 에 도달하고, 계속해서 제 1층이 I_c 에 도달한다. 통전 전류가 I_c 를 초과하면, 각각의 층은 flux flow 상태로 되고 통전 전류의 peak값에서는 저항이 발생하며, 제 1층과 제 2층은 거의 같은 전류 peak값을 가지게 된다. 하지만, 실험결과와 simulation 결과를 상세하게 관찰하면, flux flow 상태의 전류 peak값이 약간 다른 것을 알 수 있다. 실험결과를 통해서도 고온 초전도선의 실질적인 길이가 제 2층이 길기 때문에 제 2층의 저항이 크게 되고 전류가 적게 흐른다고 사료되어진다.

3. Mini-model 케이블의 전기절연 특성

3.1 Mini-model 케이블 제작

그림 5는 전기절연시험에 사용된 길이 1.3m mini-model 케이블이다. 케이블의 제작은 SUS former상에 반 도전층인 carbon paper(두께 0.27mm)를 2 겹으로 감은 후, 반 합성지인 PPLP(두께 0.12mm, 밀도 0.89g/cm³ 핀란드산)를 butt gap 형상으로 감아서 두께 4.5mm의 케이블로 제작하였다. 또한 유효길이 100mm를 제외한 부분은 연면 방전에 의한 절연파괴의 저하를 방지하기 위해 단말처리를 하였고 carbon

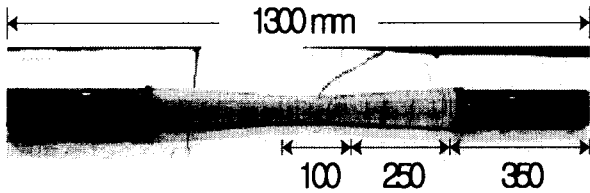


Fig. 5. The photograph of mini-model cable.

paper를 이용하여 전극형상을 만든 후, PE wire로 고정하였다. 제작된 mini-model 케이블은 건조기에 약 100°C에서 6시간 건조하여 PPLP의 수분을 완전히 제거하였다.

3.2 시험방법

제작된 mini-model 케이블은 대 기압상태에서 액체질소 속에 5시간 정도 침적시켰으며, 교류 내전압, Impulse 충격시험 그리고 절연파괴 시험을 하였다. 시험 방법은 22.9kV급 동심중성선 전력케이블 한전표준구매시방서 기준에 맞게 전압을 인가하였다. 그림 6에 케이블의 교류 내전압 시험방법을 나타낸다. 전압인가는 고전압 장치(Tokyo Transformer 300kV/1A)를 사용하였으며, 80kV에서 60분간 내전압 시험을 하여 합격여부를 판단하였다.

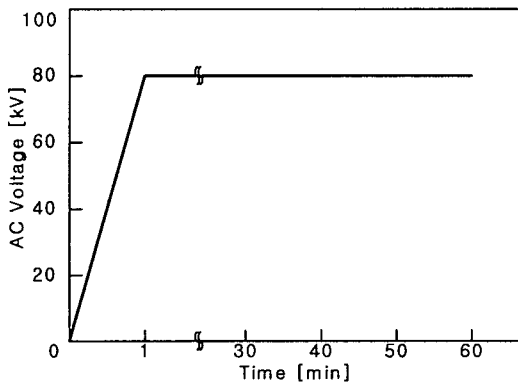


Fig. 6. The test of withstand voltage.

또한, 케이블의 Impulse 충격시험은 1.2×50μs 파형 150kV 충격전압으로 정·부극성으로 각각 10회 시험하여 합격여부를 판단하였으며, 절연파괴 시험은 그림 6의 교류 내전압 시험이 끝난 후, 10kV/5min씩 인가하여 절연파괴 될 때까지 전압을 인가하였다.

3.3 시험결과

Mini-model 케이블을 대 기압상태 및 액체질소의 냉각조건하에서 인가전압 80kV에서 60분간 교류 내전압 시험을 한 결과 내 절연성능을 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 impulse 충격시험에서도 정·부극성 모두 절연파괴 현상은 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 그림 7과 같이 절연파괴 시험을 할 결과 절연파괴 전압은 110kV에서 파괴되었다.

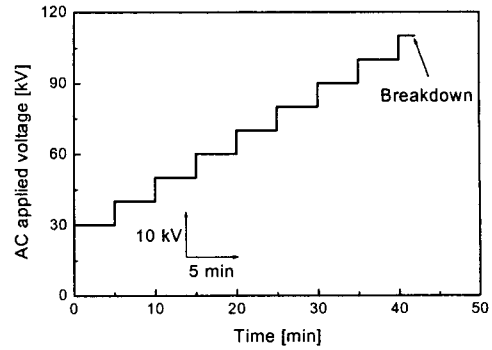


Fig. 7. The test of AC breakdown.

4. 결 론

본 연구에서는 Maxwell 방정식을 인접 층 사이의 초전도 filament에 쇄교하는 자속에 적용하여 2층 고온 초전도 케이블의 전류분포 simulation과 실험을 수행하였다. 동일한 twist pitch로 케이블이 구성되었기 때문에, 외층인 제 2층에 전류가 집중하는 편류현상을 관측할 수 있었다. 케이블의 각층의 전류가 Ic값 이상으로 흐르면, 제 2층 케이블에서 flux flow 상태가 되어 파형의 찌그러짐과 위상 차가 발생하였으며, 각층의 전류 peak값은 거의 균일화하는 것을 알 수 있었다. 또한 전 영역에 대해서 simulation 결과와 실험결과가 잘 일치하는 것을 정량적으로 확인했다.

한편, 액체질소에서 제작된 mini-model 케이블의 절연시험을 한 결과, 교류 내전압 시험 및 impulse 충격시험은 일반적인 22.9kV급 전력케이블의 시험 기준에 맞는 절연성능을 가지는 것을 확인하였고 절연파괴 전압은 110kV에서 파괴되었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 本庄昇一ら, "100m 超電導ケーブル實用性 検証試験の概要", 低温工学 36 pp.242, 2001.
- [2] M.Nassi, Supercond. Sci. Technol : 13 460, 2000.
- [3] M.Hara and H.Okubo, Cryogenics 38, pp.1083-1093, 1998.
- [4] 兵島高太郎ら, "超傳導導体内の電流分布解析", 低温工学 35 pp.176-183, 2000.
- [5] 小林他, "液體窒素/積層テープ複合絶縁系における部分放電開始電界の體積効果", 2002年放電研究会資料, ED-02-152, 2002.
- [6] 성기철, "배전급 초전도 케이블 개발", 차세대 초전도 응용기술개발 사업단, 2002.