

고온초전도 케이블용 은시스 Bi-2223 테이프 및 직층 도체의 안정성연구

이병성, 김영석, 장현만, 백승명, 김상현
 경상대학교 공과대학 전기공학과(생산 기술 연구소)

A Study on Stability of Ag sheathed Bi-2223 tape and Cylindrical Stacking Conductor for HTS Cable

B.S. Lee, Y.S. Kim, H.M. Jang, S.M. Back, and S.H. Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l. Univ.(RIIT)

Abstract - Normal zone propagation(NZP) characteristics were investigated on Ag sheathed multi filamentary Bi-2223 tape and cylindrical stacking conductor. The critical current(I_c) of Ag sheathed Bi-2223 tape and cylindrical stacking conductor were 12 A, 63 A at 77 K, 0 T. Normal zone propagation(NZP) experiments with tape were conducted with refrigerator in temperature from 45 K to 77 K, 0 T. Cylindrical stacking conductor was molding with epoxy and experiments were conducted with adiabatic condition in LN₂. NZP velocities of tape with two condition of DC and AC were almost same at each temperature. Temperature (T_1) of tape with distance of 0.5 cm from heater was strongly climbed up to 95K and slowly decreased. NZP velocities of cylindrical stacking conductor were 1.9-2.4 cm/sec in LN₂

도체를 제작하여 외부적 교란시 발생하는 열적, 전기적 안정성에 대한 관점에서 직류 및 교류전류에서 상전도 영역 전파(이하 NZP) 특성을 여러 가지 온도조건에서 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

PIT법으로 은시스 Bi-2223 테이프를 제조하여 1차 열처리 및 최종 압연과정을 마친 후 직경 5 cm의 알루미늄 튜브에 감아서 2차 열처리를 하였다. 이를 외경 4 cm, 내경 3.6 cm의 제작된 황동 샘플홀더에 감아서 냉동기에 부착하였다. 히터필스는 3.3 mm×10 mm면적의 carbon tape를 히터로 사용하여 테이프에 부착 후 인가하였으며 Kapton 테이프와 열전도도가 낮은 극저온용 에폭시를 이용하여 열적 차단을 하였고, 이때 저항은 상온에서 1 kΩ 이었으며 77 K에서는 200 Ω 이었다.

1. 서 론

고도 정보화사회의로의 진전에 따라 도심지의 전력수요가 대용량화, 고밀도화 되는 경향이 강하게 나타나고 있으며, 2010년경에는 서울지역의 전력수요도 현재의 약 2배인 11.5 GW로 전국의 21.7 %에 이를 것으로 예상되고 있다.[1] 또한 전력공급에 있어서도 양적인 문제 뿐만 아니라 높은 신뢰성과 안정성이 요구되어지며 이러한 요구에 대응하기 위해서 효율이 높은 초전도 전력기기 및 초전도송전케이블의 개발이 시급히 요구되어진다 할 수 있다.[2]

고온 초전도(이하 HTS)케이블은 액체질소를 냉매로 사용하므로 액체헬륨(LHe)을 냉매로 사용하는 저온 초전도(LTS)케이블에 비해 경제성이 높고 기존 도심지의 지중 관로를 그대로 활용함으로써 저전압으로 동일규모의 기존 케이블에 비해 100배 이상의 전류를 흘릴 수 있으며 설비가 compact하여 환경 및 부지확보 등의 문제를 해결 할 수 있다.[3,4].

하지만 송전계통에 이상전류가 발생하거나 외부적 교란이 도체에 가해지면 초전도 케이블에 수배에서 수십 배의 단락전류가 흐르거나, 국부적 발열이 생기고 이러한 발열이 커지게 되면 도체 전체로 빠르게 확산되지 못하고 초전도체는 켄치가 되어 결국 전체 케이블에 피해를 입히게 된다.[5,6].

따라서 본 논문에서는 향후 HTS 케이블 개발을 위한 기초연구로서 은시스 Bi-2223 테이프와 원통형 직층

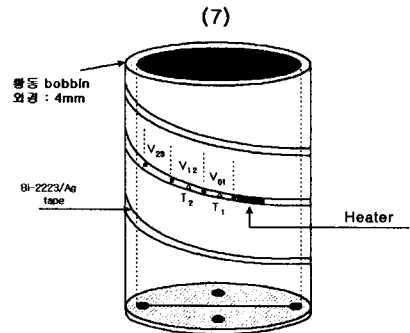


그림 2. Bi-2223 테이프(19-filament)의 실험적 배치

그림 2는 전압단자와 온도센서 및 히터를 나타내기 위한 테이프의 개략적인 형태를 나타내고 있다. 테이프의 길이방향으로 1 cm간격으로 4개의 전압단자를 설치하였고 각 전압 탭 사이에 동일한 간격으로 2개의 온도센서(Chromel-CuFe) 부착하여 HTS 케이블용 도체의 외란에 의한 NZP 특성을 측정하였다.

테이프의 임계전류 특성과 NZP 특성 평가를 위해 냉각장치는 CTI-refrigerator를 (model 22)사용하였으며 온도는 온도 controller를 이용하여 45 K - 77 K 범위에서 제어하였다. 동일한 11개의 테이프를 이용하여 원통형 former상에 길이방향의 형태로 부착하였으며, 이를 극저온용 에폭시를 사용하여 몰딩 후 액체질소에 함침하여 냉매와의 직접적인 접촉을 피하였다. 이때 전압단자는 각각의 테이프에 부착하였고, 실제로 제작된

원통형 적층 도체의 형상을 그림2에 나타내고 있으며 본 실험에 사용되어진 테이프와 이를 이용하여 제작한 원통형 적층 도체의 사양은 표1에 나타내었다.

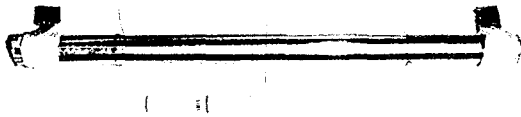


그림 2. 원통형 적층 도체의 형상

표 1. Ag sheathed Bi-2223 테이프 및 원통형 적층 도체의 사양

은 시스 Bi-2223 테이프	
Tape thickness	0.27 mm
Tape width	3.44 mm
I_c @77 K, 0 T	12 A
Ratio of silver	4.9
원통형 적층 도체	
Former (SUS) O.D	1.2 cm
Length	23 cm
I_c @77 K, 0 T	63 A
Number of tape	11

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 은시스 Bi-2223 테이프와 이를 이용하여 원통형 former상에 적용한 테이프의 임계전류특성을 나타내고 있다. 77 K, 0 T에서 테이프 1개의 임계전류는 12 A이었고 원통형 적층 도체의 임계전류는 63 A였으며, 열화계수(k)는 0.48로 열화의 폭이 다소 크게 나타났다. 이때 전압단자 양단에서 발생한 기준전계 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 에 해당하는 전압이 발생 할 때를 기준으로 삼았다.

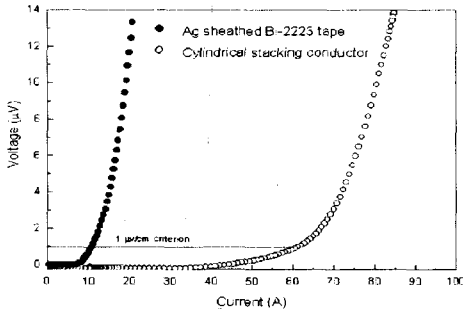


그림 3. 은시스 Bi-2223 테이프와 원통형 적층 도체의 V-I특성

또한 임계전류의 온도의존성을 조사한 결과 60 K에서의 임계전류는 22.4 A, 45 K에서는 35 A로 77 K에서의 임계전류보다 3배 가까이 증가하였다. 그림4는 60 K의 온도에서 DC 20 A를 통전 했을 때의 전압폭선을 나타내며 이때의 히트펄스의 폭은 100 ms, 크기는 0.5 A이다. 발열지점에 전압단자 V_{01} 의 전압 값은 급격히 상승하였으나 켄치는 발생하지 않고 초전도 상태로 회복하였으며, 발열지점으로부터 거리가 1 cm 떨어진 V_{12} 의 전압은 V_{01} 보다 0.53초 늦게 증가하기 시작했으며 초전도

상태로 회복되는 시간도 V_{01} 보다 짧았다.

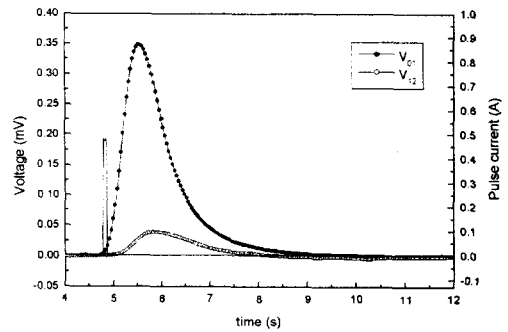


그림 4. 60 K에서의 히트펄스에 의한 테이프의 전압($I_t=20$ A)

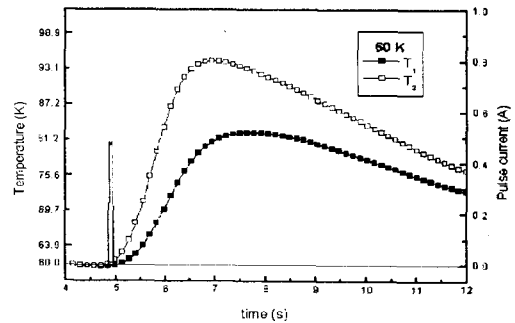


그림 5. 60 K에서의 히트펄스에 의한 테이프의 온도변화

그리고 이때의 온도특성을 그림5에 나타내었다. 발열지점에서 길이방향으로 0.5 cm 떨어진 T_1 지점의 온도는 95 K까지 급격히 증가하였으며, 1.5 cm 떨어진 T_2 에서는 83 K까지 상승한 후 서서히 초전도 상태로 회복함을 알 수 있었다. 하지만 극저온에서의 은의 고유저항이 수 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이하로 매우 적고 발생지점 근처의 온도가 임계온도를 넘어서지 않아 발생되어진 줄 열 또한 매우 적어 온도는 더 이상 상승하지 않고 서서히 감소되어진다고 사료된다.

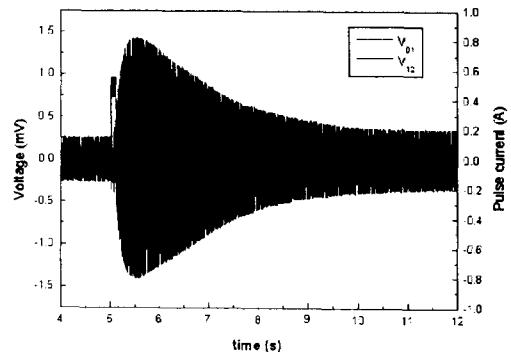


그림 6. 60 K에서의 히트펄스에 의한 테이프의 전압($I_t=20$ A_{rms})

그림 6은 위와 동일한 조건하에서 AC 20 A_{rms}를 통전 하였을 경우의 전압 파형을 나타내고 있다. 그림4와 5의 파형을 바탕으로 하여 AC와 DC의 영역에서 은시스 Bi-2223 테이프의 각 온도에서의 동작전류를 변수로 하여 NZP 속도를 구하였으며 노이즈와 열기전력의 영향을 배제하기 위하여 전압단자간 40 μV/cm를 기준 전계로 삼았다. 그 결과 그림4를 바탕으로 한 DC영역에서의 NZP 속도와 그림 6을 바탕으로 한 AC영역에서의 NZP 속도를 비교해 볼 때 AC가 약간 높게 나타났지만 실험적 오차를 감안해 볼 때 DC와 큰 차이가 없었다.

그림7은 원통형 적층 도체 중에서 3개의 테이프에 히터를 부착 후 DC 40 A를 통전 시키면서 0.5 A의 히터필스를 인가했을 때의 전압특성을 나타내고 있다. 이때 전압단자 V₀₁의 전압은 3.5 mV, V₁₂의 전압은 0.9 mV 까지 상승 후 감소하였다. 이 전압 파형 들을 바탕으로 원통형 적층 도체의 NZP 속도를 구하였다.

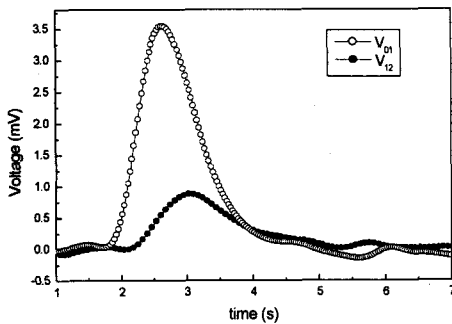


그림 7. 77 K에서의 히터필스에 의한 원통형 적층 도체의 전압

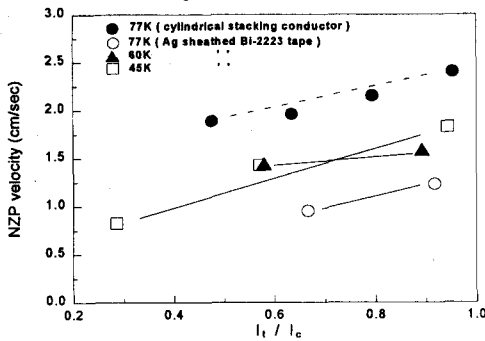


그림 8. 77 K에서 테이프와 원통형 적층 도체의 직류 동작전류에 따른 상전도 영역 전파속도

그림 8은 77 K의 온도에서 원통형 적층 도체에 임계전류의 약 48 %에서 95 %까지 동작전류를 증가시키면서 동일한 크기의 히터필스를 인가했을 때의 NZP 속도를 구하여 테이프에서의 NZP 속도와 비교하여 나타내었다. 기준 전계는 0.5 mV/cm로 높게 잡았으며 임계전류의 95 %로 운전시의 NZP 속도는 2.4 cm/sec로 나타났다. 이는 동일

한 온도에서의 테이프의 경우와 비교해 볼 때 높은 범위의 값이며 동작전류의 증가에 따라 NZP 속도가 증가함을 보였다. 하지만 향후 이론적 검토를 통해 이의 검증이 필요하다고 할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 은시스 Bi-2223 테이프와 이의 원통형 적층 도체를 제작하여 열 적, 전기적 안정성 관점에서 히터필스에 의한 NZP 특성을 조사하여 얻어진 결과 들은 다음과 같다.

임계전류가 12 A인 테이프를 이용하여 제작한 원통형 적층 도체의 임계전류는 77 K, 0 T에서 63 A를 나타 내었으며, 60 K에서 히터필스에 의한 테이프의 발열지 점 부근의 온도는 95 K까지 급격하게 상승하였다가 서서히 초전도 상태로 회복함을 알 수 있었다.

DC와 AC의 영역에서 히터필스에 의한 NZP 속도를 측정하였으며, AC가 약간 높게 나타났지만 실험적 오차를 감안해 볼 때 값의 큰 차이는 없었다. 또한 원통형 적층 도체의 NZP 속도를 동작전류를 변수로 하여 77 K의 온도에서 측정하였으며, 그 결과 1.9-2.4 cm/sec의 범위로 동작전류가 증가함에 따라 높게 나타났다.

본 연구는 1999년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음.
(과제번호 : 99-003)

(참 고 문 헌)

- [1] 한국전력공사 "超電導케이블 및 送電시스템 開發研究" 1996.
- [2] Aldo Bolza et al, "Recent Developments in HTS Power Cable Applications", IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.7, No.2, pp.339-344, 1997.
- [3] Michael, J et al, "HTS Cable Test Facility: Design and Initial Results", IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.9, No.2, pp.134-137, 1999.
- [4] T.Shibata et al, "Development of High Temperature Superconducting Power Cable Prototype System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.14, pp.182-187, 1999.
- [5] J.W.Lue et al, "Quenches in a high-temperature superconducting tape and pancake coil", Cryogenics, Vol.36, No.5, pp.379-389, 1996.
- [6] 金錫範, 石山敦士, 岡田秀彦, 野村後自 "Bi系(2223相) 銀 シーステーフ ソ超電導導体の常電導傳播特性", T.IEE Japan, Vol.116-A, pp.149-156 1996.