한국전기전자재료학회 2000년도 추계학술대회 논문집

HTS 케이블용 은시스 Bi-2223 테이프 및 원통형 적층 도체의 상전도 영역전파 특성

Normal Zone Propagation Properties of Ag Sheathed Bi-2223 Tape for HTS Cable and Cylindrical Stacked Conductor

°이병성*, 김영석*, 장현만*, 백승명*, 김상현*
(°B.S.Lee*, Y.S.Kim*, H.M.Jang*, S.M.Baek*, S.H.Kim*)

* 경상대학교 공과대학 전기공학과(생산 기술 연구소)
Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l. Univ(RIT)

Abstract

Normal zone propagation(NZP) characteristics were investigated on Ag sheathed Bi-2223 tape and cylindrical stacked conductor. Normal zone propagation(NZP) experiments with tape were conducted with refrigerator in temperature from 45 K to 77 K, 0 T. Cylindrical stacked conductor was molding with epoxy and experiments were conducted with adiabatic condition in LN_2. NZP velocities of tape with two condition of DC and AC were almost same at each temperature. NZP velocities of cylindrical stacked conductor were 1.9-2.4 cm/sec in LN_2. Numerical analysis was carried out by a one-dimensional heat balance equation. As a result, simulated results of NZP velocity with Bi-2223 tape were similar to experimental results in DC.

Key Words *(중요용어) : Normal zone propagation(상전도 영역전파), Numerical analysis(수치해석),*

1. 서론

최근에는 임계전류가 액체질소 온도에서 100 A를 넘는 Bi-2223 고온초전도(이하 HTS) 테이프가 개발되고 있으며[1], 합금 시스를 사용함으로써 기계적 특성이 향상되어 이를 이용한 초전도 전력기기 응용에 대한 연구가 광범위하게 진행되고 있다[2]. 특히, HTS 케이블은 액체질소를 냉매로 사용하므로 액체헬륨을 냉매로 사용하는 저온 초전도 케이블에 비해 경제성이 높고 기존 도심지의 지중 관로를 그대로 활용함으로서 저전압으로 동일규모의 기존 케이블에 비해 100배 이상의 전류를 흘릴 수 있는 등의 장점이 있다[3]. 유럽의 Siemens에서는 Bi-2223 테이프를 이용한 110 kV/400 MVA, 50 m길이의 HTS 케이블을 개발하여 DC 3300 A 통전 실험과 더불어 1998년에는 완전한 케이블시스템이 설치되어 실용화를 위한 초기단계로서의 시험운전을 마치는 등 활발한 연구가 진행되고 있다[3].

하지만 송전계통에 외부적 교란이 도체에 가해지면 초전도 케이블에 국부적 발열이 생기고 이러한 발열이 커지게 되면 도체 전체로 빠르게 확산되지 못하고 초전도체는 퀜치가 되어 결국 전체 케이블에 피해를 입히게 된다[4].

본 연구에서는 HTS 케이블용 은시스 Bi-2223 테이프 외부적 교란시 발생하는 열 적, 전기적 안정성에 대한 관점에서 직류 및 교류전류에서 상전도 영역 전파(이하 NZP) 특성을 여러 가지 온도조건에서 평가하였다. 열 평형방정식을 이용한 수치해석으로 테이프의 NZP 속도를 구해 이를 실험에서 값들과 비교하였고 나아가 원통형 적층 도체를 제작 후 통전 특성 및 NZP 속도를 구하였다.

2. 실험방법 및 장치

HTS 케이블용 테이프의 퀜치 특성 및 열물리적 특성의 온도의존성을 보기 위한 온도범위는 77 K-45 K이며 냉각장치로 냉동기(CTI사, model 22)를 사용하였다. 히터에 전류를 인가하기 위한 전원장치는 DC pulse power supply를 이용하였다. 테이프에 히터펄스를 가하기 위해 3.3 mm×10 mm면적의 carbon tape를 히터로 사용하였다. 히터를 테이프에 부착 후 Kapton 테이프와 열전도도가 낮은 극저온용 에폭시를 이용하여 열 적 차단을 하였고 저항은 상온에서 1 kΩ 이었으며 77 K에서는 200 Ω 이었다. 샘플홀더에 감겨진 테이프의 길이는 23 cm이고 전압 단자는 발열지점에서 1 cm간격으로 3개를 설치하였으며 그사이 3개의 온도센서(Chromel-CuFe)를 부착하였다. 전압단자, 온도센서 및 히터의 위치를 나타낸 형태는 그림 1에 나타내었다.

원통형 적층 도체는 외경 12 mm, 내경 10 mm의

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

Table 1. Parameter of Ag sheathed Bi-2223 tape and cylindrical stacked conductor.

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

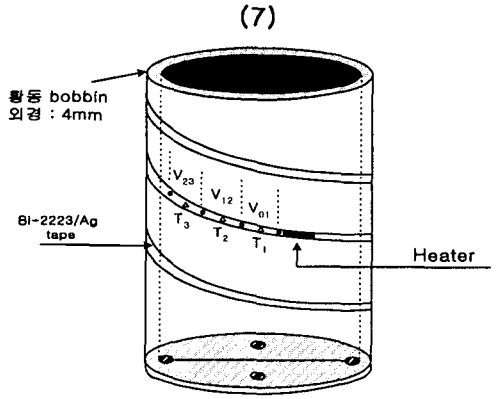

그림 1. 은시스 Bi-2223 테이프의 실험적 배치

Fig. 1. Experimental arrangement of Ag sheathed Bi-2223 tape

sus former상에 테이프를 일직선상으로 배열 후 인접한 테이프의 간격을 최소한으로 하여 부착하였다. 이를 극저온용 에폭시를 사용하여 몰딩 후 액체질소에 함침하여 냉매와의 직접적인 접촉을 피하였으며 이때 전압단자는 각각의 테이프에 부착하였다. 테이프와 원통형 적층 도체의 사양은 표 1에 나타낸다.

3. 결과 및 검토

NZP 특성평가를 위한 동작전류를 결정하기 위해 77 K, 60 K, 77 K의 온도범위에서 I_c를 측정한 결과 각각 12, 22.5, 35 A였으며 이때 전압단자 양단에서 기준전계 1 μV/cm에 해당하는 전압이 발생할 때를 기준으로 하였다.

그림 2는 60 K의 온도에서 HTS 테이프에 직류 20 A를 통전 했을 때의 직류전압 및 온도특성을 나타낸다. 이때의 히터펄스의 폭은 100 ms, 크기는 0.5 A이다. 발열지점에서 가까운 V_{01}의 전압 값은 급격히 상승하였으나 퀜치는 발생하지 않고 초전도 상태로 회복하였으며, V_{12}의 전압은 V_{01}보다 0.53 초 늦게 증가하기 시작하였다. 발열지점 T_1의 온도는 95 K까지 급격히 증가하였으며, 10 mm 떨어진 T_2에서는 83 K까지 상승한 후 서서히 초전도 상태로 회복함을 알 수 있었다. 극저온에서의 은의 고유저항이(60 K ; 0.17 $\mu\Omega$ · cm)[5] 매우 적기 때문에 이때 발생되어진 줄 열 또한 매우 적고, 발열지점 근처의 온도가 임계온도를 넘어서지 않아 온도는 더 이상 상승하지 않고 서서히 감소되어진다고 사료된다.

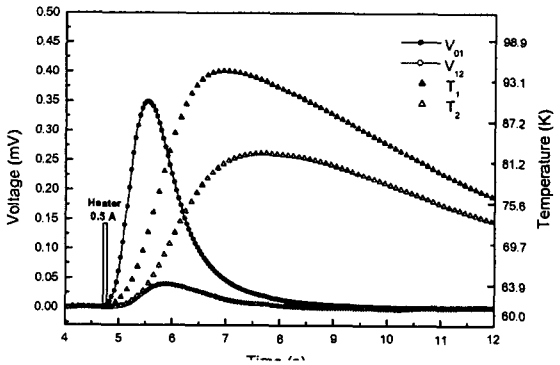

그림 2. 60 K에서 히터펄스에 의한 테이프의 직류 전압 및 온도특성

Fig. 2. DC voltage and temperature characteristics after heat pulse at 60 K

이와 같은 경향은 그림 3에서처럼 동일한 조건하에서 테이프에 교류 20 A_{rms}를 통전 하였을 경우에도 나타난다. 이상의 결과를 근거로 하여 직류와 교류의 두 영역에서 각각 은시스 Bi-2223 테이프의 각 온도에서의 동작전류를 변수로 하여 NZP 속도를 구하여 그림 4에 나타내었다.

$$V_{p01} = \frac{L_{01}}{\Delta t_{01}} \quad - (1)$$

$$V_p = \frac{(V_{p01} + V_{p12})}{2} \quad - (2)$$

여기에서 NZP 속도는 (1)식, (2)식을 이용하여 구하였으며 최종값은 이들의 평균값으로 하였다. 여기서 L_{01}은 V_{01} 전압단자 사이의 길이, Δt_1은 전압 파형 V_{01}과 V_{12}사이의 시간, V_{p01}은 V_{01}과 V_{12} 사이의 NZP 속도, 그리고 V_{p12}는 V_{12}와 V_{23} 사이의 NZP 속도로 표시하였다. 노이즈와 열기전력의 영향을 배제하기 위하여 단자간 40 μV/cm를 기준 전계로 삼았다.

그림 4는 45 K에서 77 K의 각각의 온도에서 측정된 직류 및 교류 동작전류에 따른 NZP 속도를 나타낸다. 동작전류는 I_c의 90 %까지 통전 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 동작전류가 증가함에 따라 직류와 교류의 두 영역에서의 NZP 속도도 동일한 경향으로 증가함을 볼 수 있으며 교류 동작전류에 대한 NZP 속도는 직류의 경우보다 약간 높게 나타나고 있지만

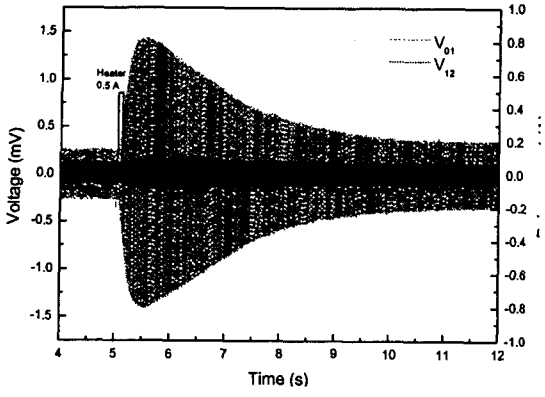

그림 3. 60 K에서의 히트펄스에 의한 전압곡선

Fig. 3. Voltage curve by heat pulse at 60 K

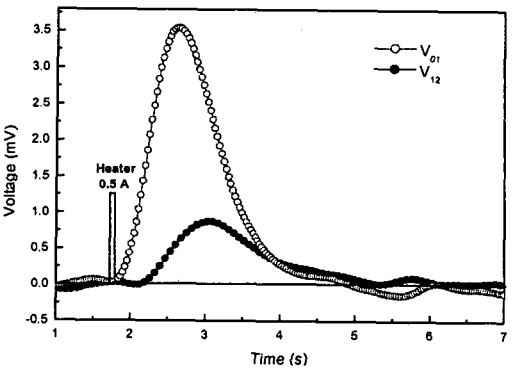

그림 5. 77 K에서 히터펄스에 의한 원통형 적층도체의 전압 특성

Fig 5. Voltage characteristics of cylindrical stacked conductor after heat pulse at 77 K

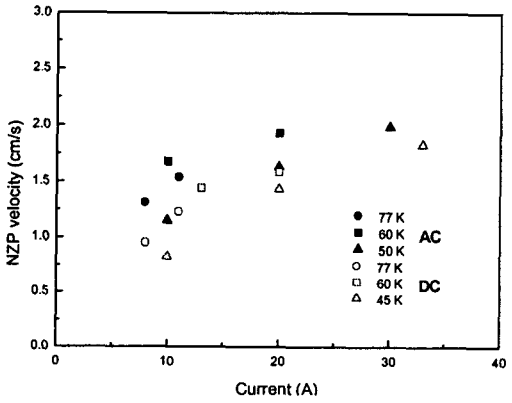

그림 4. 각 온도에서 직류 및 교류 동작전류에 대한 NZP 속도

Fig 4. NZP velocity vs DC and AC operating current at each temperature (45K-77K)

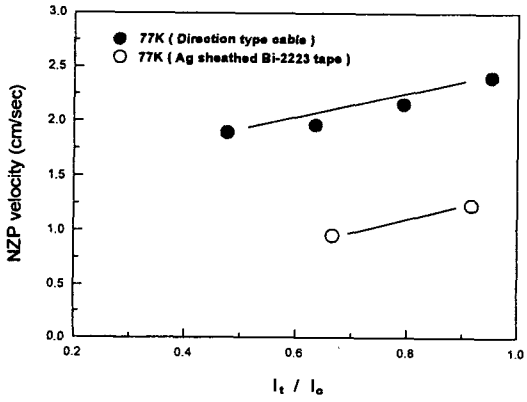

그림 6. 77 K에서 동작전류에 대한 원통형 적층도체의 NZP 속도

Fig 6. NZP velocity vs operating current of cylindrical stacked conductor at 77 K

실험적 오차를 감안해 볼 때 큰 차이가 없는 것으로 사료된다.

그림 5는 원통형 적층도체에 직류 40 A를 통전 시키면서 히터펄스를 인가했을 때의 전압특성을 나타내고 있다. 이때 전압단자 V_{01}의 전압은 3.5 mV, V_{12}의 전압은 0.9 mV 까지 상승 후 감소하였으며 이 전압 파형들을 바탕으로 동작전류를 변수로 하여 원통형 적층도체의 NZP 속도를 구하였다.

77 K의 온도에서 원통형 적층 도체에 I_c의 약 48 %에서 95 %까지 동작전류를 증가시키면서 동일한 크기의 히터펄스를 인가했을 때의 NZP 속도를 그림 9에 나타내었다. 기준 전계는 외부 노이즈와 잡음을 배제하기 위해 0.5 mV/cm로 높게 잡았으며 I_c의 95 %로 운전시의 NZP 속도는 2.4 cm/sec로 나타났으며 이는 앞장의 테이프의 경우와 비교해볼 때 두 배정도 빠른 값이다. 또한 동작전류가 증가함에 따라 NZP 속도도 증가하는 동일한 경향을 나타내었다. 하지만 향후 케이블에 대한 이론적 검토를 통해 이의 검증이 필요하다고 할 수 있다.

이상으로 실험에서 구해진 히터펄스에 의한 온도특성과 NZP 속도를 정량적으로 비교 검토하기 위해 식 (3)의 열평형방정식을 이용한 수치해석을 하였다.

$$\gamma C\frac{\partial T}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left[k(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right]+Q_j(T,\ I_t)+Q_d(x,t) \quad -(3)$$

이때, γ는 밀도(kg/m^3), C는 비열(J/kg.K), k는 열전도율(W/mK)이고 T는 온도 x는 길이방향의 좌표이며 t는 시간을 나타낸다. Q; Q_d는 초전도테니프 단위당 발열, 테이프 표면에서의 교란을 나타내는 항이다.

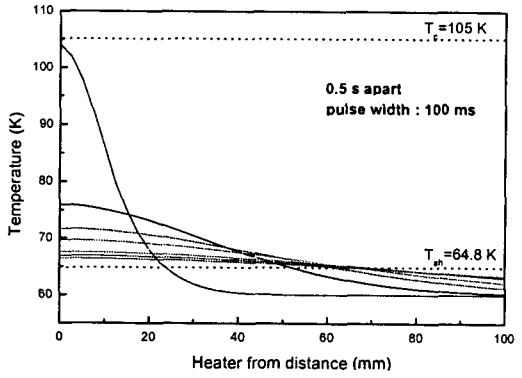

그림 7. 60 K에서 히터펄스에 의한 테이프 길이방향의 온도 분포

Fig 7. Temperature(longitudinal direction) traces of tape after heat pulse at 60 K

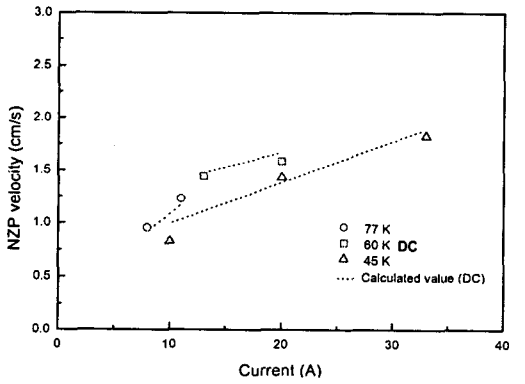

그림 8. 각 온도에서 직류 동작전류에 대한 NZP 속도

Fig 8. NZP velocity vs DC operating current at each temperature

60 K에서 히터펄스에 의한 테이프 길이방향의 온도분포를 그림 7에 나타내었다. 이때의 파라메타는 인가전류 20 A, 히터펄스 3.75 J의 에너지를 0.1 초 동안 인가한 앞의 실험조건과 동일한 값을 사용하였다. T_{sh}는 64.8 K이고 이 온도 이상이 되면 전류분류가 발생하고 이로 인해 주울 열이 발생하게 된다. 발열지점의 온도 T_1은 임계온도를 넘어서지 않고 103 K까지 상승하였다가 0.5초가 지난 후에는 76.5 K까지 급속히 감소하는데 이는 히터와 히터를 둘러싼 에폭시의 열용량에 의한 영향을 고려하지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

그림 8은 각 온도에서의 직류 동작전류에 대한 NZP 속도를 수치적으로 계산하여 실험치와 비교하여 나타낸다. NZP 속도는 테이프의 길이방향의 온도분포에서 T_{sh}에 해당하는 온도를 기준으로 이때의 거리를 시간으로 나누어 계산하였다. 동작전류는 I_c의 약 90 %까지 통전 하였으며 동작전류가 증가함에 따라 NZP 속도도 증가함을 볼 수 있다. 수치적으로 계산된 NZP 속도의 범위는 1.0-1.9 cm/sec로 실험에서 구한 직류에서의 NZP 속도와 비교해 볼 때 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

HTS 케이블용 은시스 Bi-2223 테이프를 이용하여 열 적, 전기적 안정성의 관점에서 히터펄스에 의한 NZP 특성을 조사하여 다음의 결과를 얻었다.

교류에서의 NZP 속도가 직류에서보다 약간 높게 나타났지만 실험적 오차를 감안해 볼 때 값의 큰 차이는 없었으며 직류에서 열 평형 방정식을 이용하여 구한 수치해석 결과와 실험치를 비교해 볼 때 거의 일치하였다. 원통형 적층도체의 NZP 속도를 동작전류를 변수로 하여 77 K의 온도에서 측정하였으며, 그 결과 1.9-2.4 cm/sec의 범위로 동작전류가 증가함에 따라 높게 나타났다.

참고문헌

[1] L.Masur et al, "Long length manufacturing of BSCCO-2223 wire for motor and cable application" ICMC, Montreal, Quebec, Canada, July 12-16 1999

[2] M.M. Sarker, W.R. Flavell, "Revie Application of high-temperature superconductors", J. Supercond. Vol.11, pp.209-212, 1998

[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] 金錫範, 石山敦士,岡田秀彦, 野村後自 "Bi系(2223相) 銀 シーステープ ソ超電導導体の常電導伝播特性", T.IEE Japan, Vol.116-A, pp.149-156 1996.

[5] Yukikazu Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues", Plenum Press 1994.