2000년도 대한전기학회 추계부문학술대회 논문집 (2000.11.25)

Prototype 고온초전도 케이블의 최소 Quench에너지 및 대전류 특성

김 상 현
경상대학교 전기공학과

A Characteristics of Large Current and Minimum Quench Energy on Prototype High-T_c Superconducting Cable

sang hyun Kim
Dept. of Electrical Engineering, Gyeong Sang National University

Abstract

NZP velocities were investigated on Ag sheathed multi filamentary Bi-2223 tape and direction type HTS cable. The critical current(I_c) of Ag sheathed Bi-2223 tape and direction type HTS cable were 12 A, 63 A at 77 K, 0 T. NZP velocities of tape with two condition of DC and AC were almost same at each temperature. In case of DC, the NZP velocities of numerical analysis and experiment were almost same. NZP velocities of direction type HTS cable were 1.9-2.4 cm/sec. The result shows that the total transport current of spiral type HTS cable in LN_2 was 475[A], and transport current passed through almost the outer layer (2-layer). Also, AC transport losses in outer layer of HTS cable was proportion to I^2 and higher than losses of inner layer. And in case of I_p=I_c, calculated numerical loss density was concentrated on the edge of tape and most of loss density in cable was distributed outer layer more than inner layer.

1. 서론

고온 초전도체를 이용한 전력 기기 응용은 고온초전도 테이프가 가지고 있는 기계적 취약성과 낮은 임계전류 특히 외부자장에 대한 특성저하 등 많은 문제점을 안고 있었다. 최근에는 임계전류가 액체질소 온도에서 100 A를 넘는 Bi-2223 고온초전도(이하 HTS) 테이프가 개발되고 있으며[1], 합금 시스를 사용함으로써 기계적 특성이 향상되어 이를 이용한 HTS 케이블, 발전기, 변압기, 한류기, 고자장용 마그넷 등의 연구가 광범위하게 진행되고 있다[2]. 특히, 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]. HTS 케이블은 액체질소를 냉매로 사용하므로 액체헬륨(LHe)을 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[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 퀜치가 되어 결국 전체 케이블에 피해를 입히게 된다[5][6]. 그리고 대부분 케이블의 경우 교류 영역에서 운전되기 때문에 통전 시에 각 층의 전류분포 불 균일성과 교류손실이 발생하게 된다[7]. 케이블에서 불 균일한 전류분포는 기기의 안정성 및 교류손실의 불균형을 초래하게 된다. 교류손실 발생은 냉매를 기화시켜 경제적 손실을 가져올 뿐만 아니라 기기의 안정성에도 크게 영향을 미치게 된다[8].

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. 그리고 열 평형 방정식을 이용하여 테이프의 길이방향에 대한 1차원적 수치해석으로 계산된 값을 실험에서 구한 값들과 비교하였다. 나아가 HTS 케이블을 제작 후 각 층의 통전 특성, 교류손실 특성 등에 대해 조사하였으며, 각 층에 미치는 교류손실을 수치해석을 통해 분석하였다.

2. 실험방법 및 장치

PIT법으로 19심 은시스 Bi-2223 테이프를 제조하였다. 1차 열처리 및 최종 압연과정을 마친 테이프를 직경 5 cm의 알루미나 튜브에 spiral형태로 감아서 840 ℃ 100시간의 2차 열처리를 하여 테이프의 최종길이는 23 cm로 하였다. 이 형태를 유지하여 외경 4 cm, 내경 3.6 cm의 황동 샘플홀더에 감아서 냉동기에 부착하였다. 실험에 사용된 테이프의 사양은 표 1에 나타내었다. HTS 케이블용 테이프의 퀜치 특성 및 열물리적 특성의 온도의존성을 보기 위한 온도범위는 77 K-45 K이며 냉각장치는 냉동기(CTI, model 22)를 사용하였다. 온도조절은 온도 controller를 이용하여 제어하여 실험하였으며 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 4개를 설치하였으며 그사이 3개의 온도센서(Chromel-CuFe)를 부착하였다. 전압단자, 온도센서 및 히터의 위치를 나타낸 형태는 그림 1에 나타내었다.

표 1. 은시스 Bi-2223 고온초전도 테이프의 사양

Ag sheathed Bi-2223 HTS tape (19-Filament)	
Tape thickness	0.27 mm
Tape width	3.44 mm
I_c @77K, 0T	12 A
Ratio of silver	4.9
Length	23 cm

제조된 테이프의 히트펄스에 의한 NZP 특성 평가를 위해 일정 온도 하에서 직류 4단자법에 의하여 테이프에 직류 전류를 인가하고 이때 히터에서 가까운 지점의 전압단자 양단에서 발생하는 전압을 각각 V_{01},V_{12}, V_{23} 그리고 발열지점에서 1 cm간격으로 설치된 T_1, T_2, T_3 의 온도변화를 각각 구하였다. 동일한 방법으로 교류 영역에서도 외란에 의한 전압특성을 구하였다. 그리고 이들 두 직류와 교류의 영역에서 각 온도에서의 NZP 특성을 구하여 값을 서로 비교 검토하였으며, 열 평형방정식을 이용하여 테이프의 길이방향에 대한 1차원적 해석으로 계산되어진 값들을 실험적으로 구해진 값들과 비교하였다. 그리고 은시스 Bi-2223 테이프를 사용하여 direction형과 spiral형의 두 가지 형태로 HTS 케이블을 제작하였으며 표 2는 HTS 케이블의 재원을 나타낸다

(7)

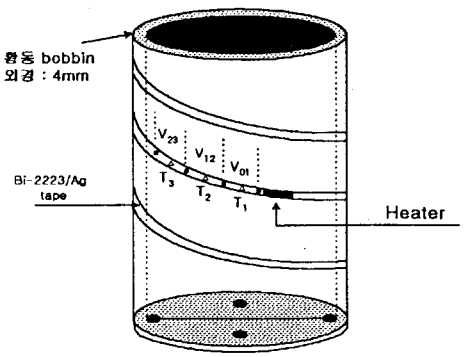


그림 1. 은시스 Bi-2223 테이프의 실험적 배치

표 2. HTS 케이블의 재원

Type		Size	Characteristics
Direct-ion	Former	O.D : 12 mm I.D : 10 mm	Sus pipe
	Conductor	Length : 230 mm	I_c:63 A(1 μV/cm) 19-filament tape
	layer	1	11 tapes
Spiral	Former	O.D : 18 mm I.D : 14 mm	Flexible sus pipe
	Conductor	Length : 200 mm	I_c:225 A (1 layer) I_c:250 A (2 layer)
	layer	2	35 tapes

Direction형 HTS 케이블은 외경 12 mm, 내경 10 mm의 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

Spiral형 HTS 케이블은 외경 18 mm, 내경 14 mm인 원통형의 former상에 kraft지(130 ㎛)로 절연시킨 후, 최외층인 2층은 1층의 감은 방향과 반대방향의 역 spiral 형태로 부착하였으며, 자장의 침입을 최소로 하기 위해 1층의 인접한 위 부분에 테이프의 가운데 부분이 접하게 하였다. 마지막으로 테이프의 고정은 끝 부분에 편조선으로 감은 후 납땜을 하였으며, 케이블 전체를 teflon tape으로 고정하였다. HTS 케이블의 전류 통전 특성은 직류 4단자법을 이용하여 전압단자 양단에서 발생하는 전압값이 1 μV/cm 일 때의 전류값을 임계전류(이하I_c)값으로 정하였다. Direction형 HTS 케이블을 액체질소에 함침 후 직류에서 통전 특성을

측정 후, 77 K 단열조건하에서 케이블에서의 외부 교란시 발생하는 대한 열 적, 전기적 안정성 관점에서 히터펄스에 대한 NZP 특성을 조사하여 앞장에서의 테이프에 대한 결과와 비교하였다. 테이프의 안정성 실험과 거의 동일한 방법으로 히터는 12 mm×10 mm면적의 carbon tape테이프를 사용하여 케이블에 부착하였다. 전압 단자는 발열지점에서 1 cm간격으로 4개를 설치하였으며 케이블에 직류 전류를 인가하면서 히터에 히터펄스를 인가 후 이때 발생하는 전압을 측정하였다. Spiral형 HTS 케이블의 교류손실의 측정은 poynting vector $E \times H$를 이용하여 다음 식에서 계산했다.

$$P = \int E \times H \, dt \qquad - (1)$$

손실의 측정은 초전도체에 전류(I_p)를 인가하고, 전압단자 양단에서 발생하는 손실전압을 Lock-in amp(Stanford, SR 830)에서 측정하였다.

3. 결과 및 검토

은시스 Bi-2223 테이프 1개의 I_c는 77 K, 0 T에서 12 A이었다. 여러 가지 온도범위에서 NZP 특성평가를 위한 동작전류를 결정하기 위해 45 K, 60 K, 77 K 및 기타 온도에서의 I_c를 그림 2에 나타내었다.

그림 3은 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 시작하였으며 초전도 상태로

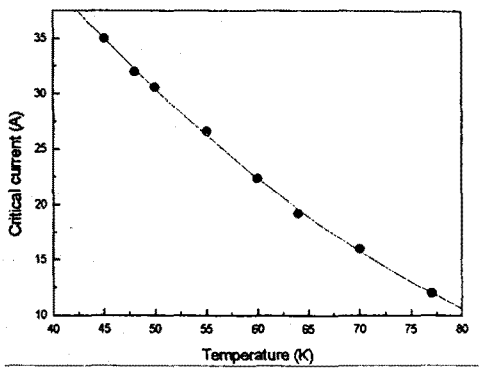


그림 2. 온도에 따른 테이프의 임계전류

회복되는 시간도 V_{01}보다 짧았다. 또한 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)[9] 매우 적기 때문에 이때 발생되어진 줄 열 또한 매우 적고, 발열지점 근처의 온도가 임계온도를 넘어서지 않아 온도는 더 이상 상승하지 않고 서서히 감소되어진다고 사료된다.

이와 같은 경향은 동일한 조건하에서 테이프에 교류 20 A_{rms}를 통전 하였을 경우에도 나타난다(그림 4).

이상의 결과를 근거로 하여 직류와 교류의 두 영역에서 각각 은시스 Bi-2223 테이프의 각 온도에서의 동작전류를 변수로 하여 NZP 속도를 구하여 그림 5에 나타낸다. 여기에서 NZP 속도는 (2)식, (3)식을 이용하여 구하였으며 최종값은 이들의 평균값으로 하였다. 여기서 L_{01}은 V_{01} 전압단자 사이의 길이, Δt_1을 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.

$$V_{p01} = \frac{L_{01}}{\Delta t_{01}} \qquad - (2)$$

$$V_p = \frac{(V_{p01} + V_{p12})}{2} \qquad - (3)$$

그림 5는 45 K에서 77 K의 각각의 온도에서 측정된 직류 및 교류 동작전류에 따른 NZP 속도를 나타낸다. 동작전류는 I_c의 90 %까지 통전 하였으며 이때 직류 동작전류에서 NZP 속도의 범위는 0.7-1.8 cm/sec로서 이는 단심 테이프보다 약 두 배정도 빠른 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 동작전류가 증가함에 따라 직류와 교류의 두 영역에서의 NZP 속도도 동일한 경향으로 증가함을 볼 수 있으며 교류 동작전류에 대한 NZP 속도는 1.1-2.0 cm/sec로 직류의 경우보다 약간 높게 나타나고 있지만 실험적 오차를 감안해 볼 때 큰 차이가 없는 것으로 사료된다.

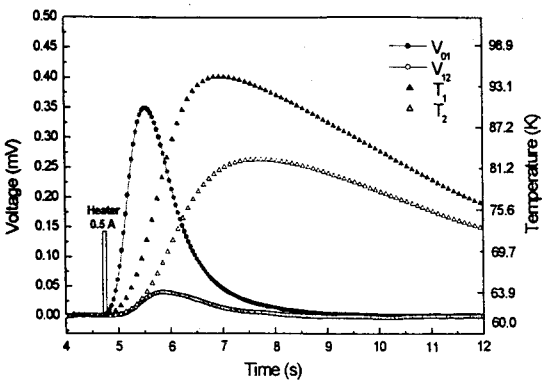


그림 3. 60 K에서 히터펄스에 의한 테이프의 직류전압 및 온도특성

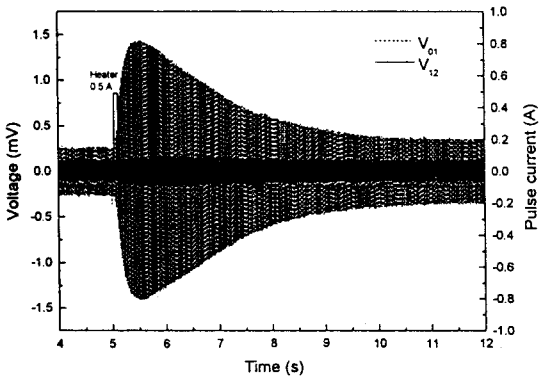


그림 4. 60 K에서 히터펄스에 의한 테이프의 교류전압특성

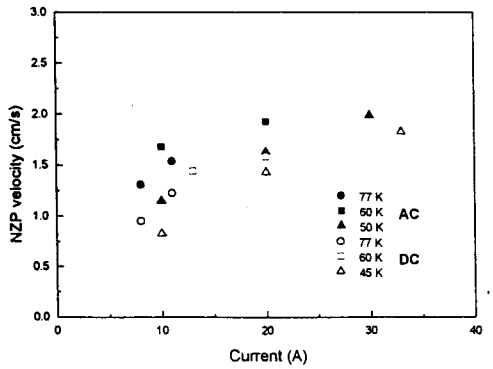


그림 5. 각 온도에서 직류 및 교류 동작전류에 대한 NZP 속도

이상으로 실험적으로 구해진 히터펄스에 의한 온도특성과 NZP 속도를 정량적으로 비교 검토하기 위하여 식 1)의 열평형방정식을 이용한 수치해석을 하였다. 고온 초전도 테이프를 길이방향에 대해 1차원적으로 모델링하여 해석하였다.

60 K에서 히터펄스에 의한 테이프 길이방향의 온도분포를 그림 6에 나타내었다. 이때의 파라미터는 인가전류 20 A, 히터펄스 3.75 J의 에너지를 0.1 초 동안 인가한 앞의 실험조건과 동일한 값을 사용하였다. 온도분포는 0.5 초 간격으로 계산하여 세분하여 나타내었으며 발열지점에서 1 cm 간격으로 설치된 T_1, T_2...T_{10}의 온도변화를 각각 구하였다.

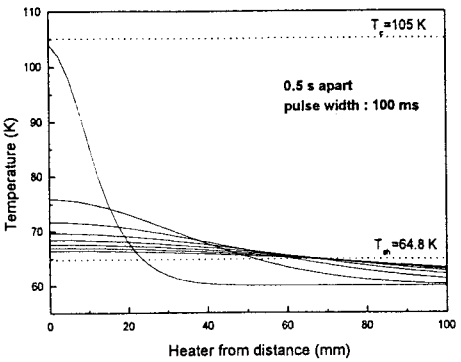


그림 6. 60 K에서 히터펄스에 의한 테이프 길이방향의 온도 분포

발열지점 온도 T_1은 초기에 103 K까지 급격하게 상승하였으나 실험결과와 동일하게 시간이 흐름에 따라 초전도 상태로 회복하였다. 그러나 약간의 온도측정 오차로 인해 온도변화의 최대치가 다소 차이가 있다. 또한 온도의 상승과 회복이 매우 급하게 나타나고 있다. 이는 수치해석에 있어서 실제 히터와 히터를 둘러싼 에폭시의 열용량에 의한 영향을 고려하지 않았기 때문이라고 생각된다. 식 (3)을 이용하여 계산하면 전류분류개시온도(T_{sh})는 64.8 K이고 이 온도 이상이 되면 전류분류가 발생하고 이로 인해 테이프에 주울열이 발생하게 된다.

그림 7은 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.

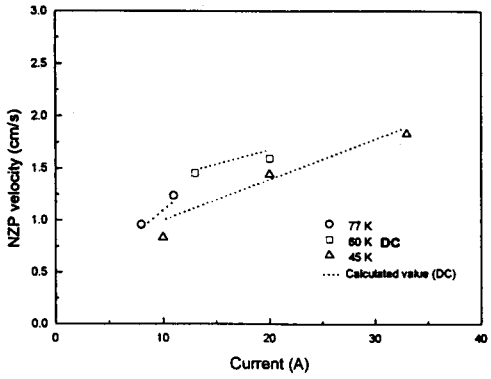


그림 7. 각 온도에서 직류 동작전류에 대한 NZP 속도

그림 8은 direction형 케이블에 직류 40 A를 통전 시키면서 0.5 A의 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 파형 들을 바탕으로 동작전류를 변수로 하여 direction형 케이블의 NZP 속도를 구하였다.

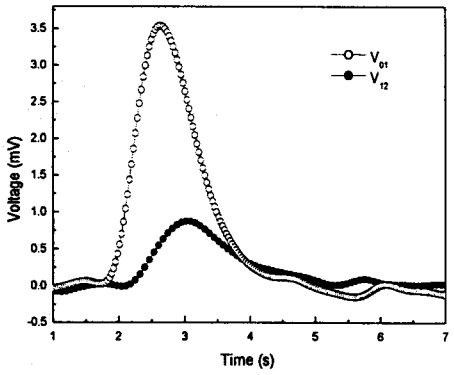


그림 8. 77 K에서 히터펄스에 의한 direction형 HTS 케이블의 전압 특성

77 K의 온도에서 direction형 케이블에 I_c의 약 48 %에서 95 %까지 동작전류를 증가시키면서 동일한 크기의 히터펄스를 인가했을 때의 NZP 속도를 그림 9에 나타내었다. 기준 전계는

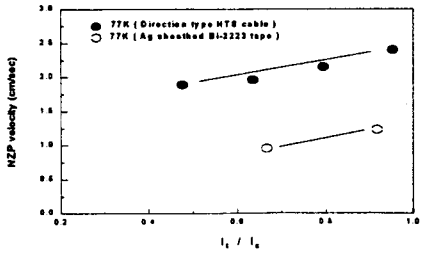


그림 9. 77 K에서 동작전류에 대한 Direction형 HTS 케이블의 NZP 속도

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 값이며 동작전류가 증가함에 따라 NZP 속도도 증가하는 동일한 경향을 나타내었다. 하지만 향후 케이블에 대한 이론적 검토를 통해 이의 검증이 필요하다고 할 수 있다.

HTS 케이블은 주로 교류영역에서 운용되기 때문에 spiral형 HTS 케이블은 실제 교류전원을 사용하여 통전 능력을 측정하였으며, 이를 그림 10에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 각층에 흐르는 전류를 비교하면, 2층에 흐르는 전류가 1층보다 큼을 알 수 있다. 이는 일반 구리도체와 같이 표피효과에 의한 최외층에 전류가 집중하는 현상이 나타나며, 이러한 현상을 편류현상이라 부른다. 이것은 각 층의 저항값의 차이와 인덕턴스의 영향이라 사료된다. 이 편류현상이 발생하면 케이블의 각 층에 미치는 전류의 불 균일성이 가중되어 교류손실에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

따라서 케이블 제작 시에는 I_c의 열화를 방지하기 위해 spiral pitch를 크게 해야 하며, 교류손실을 감소시키기 위해 각 층의 균일한 전류분포와 인덕턴스를 줄이는 것이 시급하다 하겠다.

그림 11은 HTS 케이블 각층의 교류손실을 나타내며, 실선은 다음의 Norris 이론식을 이용한 계산 값이다

$$W=\left(\frac{\mu_0 f I_o^2}{\pi}\right)\cdot\left\{(I_p/I_0)-\frac{(I_p/I_0)^2}{2}+(1-I_p/I_0)\ln(1-I_p/I_0)\right\}$$

$$I_0 = \frac{{R_0}^2}{{R_0}^2-{R_1}^2} I_c \qquad -(4)$$

여기서, f는 주파수, R_0와 R_1은 케이블 도체의 외반경, 내반경, I_c는 임계전류를 표시한다. 그림에서 알 수 있듯이 1층보다는 2층의 손실 값이 큼을 알 수 있다. 1층의 손실값은 이론식에 의한 계산값과 잘 일치하여 히스테리시스 손실이 지배적이지만, 2층의 손실 값은 거의 전류의 제곱에 비례하여 히스테리시스손 뿐 만 아니라 와전류손에도 많이 의존하

는 것으로 사료된다.

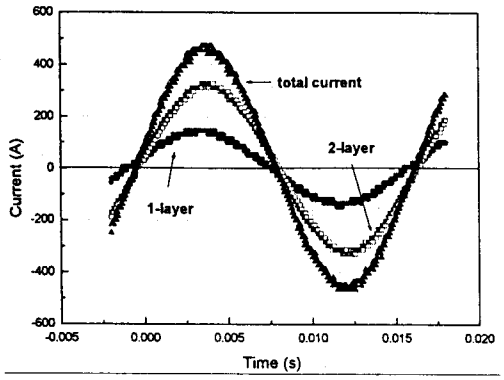


그림 10. Spiral형 HTS 케이블 각 층의 전류분포

그림 12는 $I_p = I_c$ 일 때의 다층 케이블의 소선 1회선당의 수치 해석된 손실밀도분포를 나타내고 있다. 여기서, 수치해석은 Norris 이론에 기초해서 임계상태 모델인 Bean모델을 사용했다. 초전도체에 흐르는 교류전류에 의한 초전도내부의 임의의 점 r에서 발생하는 손실밀도는 Maxwell 전자방정식을 이용하여 정리하면 다음 수식에 의해 계산된다[10].

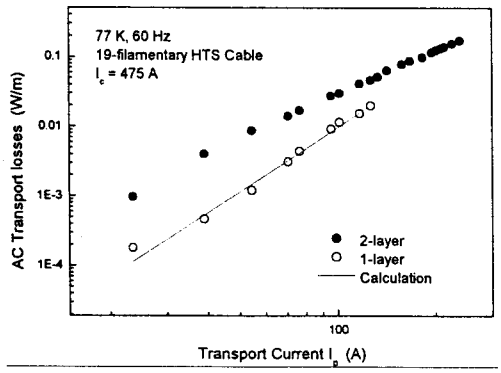


그림 11. Spiral형 HTS 케이블의 교류손실

손실밀도 P_d는

$$P_d = 2\mu_0(H_0 - J_c r)^2 \qquad - (5)$$

이 되며, 임의의 점 r에서 기준점(=원점)을 쇄교하는 자속 ϕ는

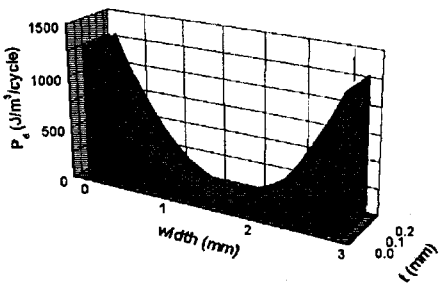
$$\phi = \frac{\mu_0(H_0 - J_c r)(H_0/J_c - r)}{2} \qquad - (6)$$

이 된다. (5)와 (6)식을 정리하면, 손실밀도 P_d는

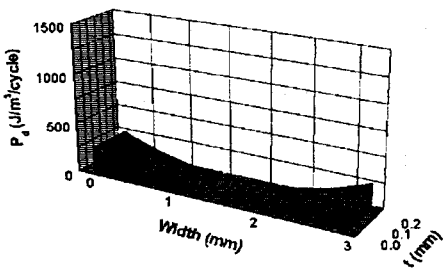
$$P_d = 4J_c\phi \qquad - (7)$$

가 된다. 여기서, J_c는 테이프의 임계전류밀도이다. 따라서, 손실값은 $r = H_0/J_c$ 일때, P_d =0 이고, r=0이 되면 최대 $2\mu_0 H_0^2$ 이 된다.

그림에서 알 수 있듯이 2층의 손실 밀도값이 1층보다 훨씬 크게 분포되어 있으며, 테이프 내부로 갈수록 감소됨을 알 수 있다. 1층의 손실값이 2층보다 상대적으로 낮은 것은 그림 10에 나타낸 각 층의 전류분포에서 케이블 2층에 전류가 집중하게 되어 자기 자계의 영향이 상대적으로 2층보다 작은 것으로 사료된다. 따라서 케이블에 있어 교류손실을 줄이기 위해서는 각층의 전류분포를 균일하게 하는 것이 중요하며 spiral pitch길이에 대한 연구도 병행되어야겠다.



a) 2-layer cable



b) 1-layer cable

그림 12. 수치계산된 spiral형 HTS 케이블 1회선당의 교류손실 밀도 (I_p=I_c)

4. 결론

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

HTS 케이블용 은시스 Bi-2223 테이프의 열 적, 전기적 안정성 관점에서 직류와 교류의 영역에서 히터펄스에 의한 NZP 특성을 조사하였고 HTS 테이프의 1차원적 열 평형방정식을 이용하여 계산된 결과들을 실험치와 비교하였다. 그

결과 교류가 직류에서보다 약간 높게 나타났지만 실험적 오차를 감안해 볼 때 값의 큰 차이는 없었으며 직류에서 열평형 방정식을 이용하여 구한 수치해석 결과와 실험치를 비교해 볼 때 거의 일치하였다.

Direction형 HTS 케이블의 NZP 속도를 동작전류를 변수로 하여 77 K의 온도에서 측정하였으며, 그 결과 1.9-2.4 cm/sec의 범위로 동작전류가 증가함에 따라 높게 나타났다. 다층으로 제작한 spiral형 HTS 케이블의 경우 각 층의 I_c는 225 A, 250 A였지만 1층보다는 2층에 전류가 집중하는 편류현상이 발생하였다. 그리고 spiral형 HTS 케이블을 이용하여 각 층의 교류손실 값을 측정하였는데 1층보다는 2층의 손실 값이 큼을 알 수 있으며, 2층의 손실 값은 거의 전류의 제곱에 비례하여 히스테리시스손 뿐 만 아니라 와전류손에도 많이 의존하는 것으로 사료되며 이는 자장의 영향이 1층보다는 2층에 집중하여 나타난 결과로 사료된다. 더불어 교류손실의 저감을 위해 각 층의 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 조사 및 손실에 있어 이론적인 해석도 요구되어진다.

5. 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] J.Wiezoreck et al. "Development of HTS Power Transmission Cables", IEEE Trans. Appl, Supercond, Vol.9, No.2, pp.406-411, 1999.

[4] Michael, J et al, "HTS Cable Test Facility: Design and Initial Results", IEEE Trans. Appl, Supercond, Vol.9, No.2, pp.134-137, 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.

[7] M.Daumling, "A model for the current distribution and ac losses in superconducting multi-layer power cables", Cryogenics 39, pp.759-765, 1999.

[8] J.W.Lue et al, "AC Losses of Prototype HTS Transmission Cables", IEEE Trans. Appl, Supercond, Vol.9, No.2, pp.416-419, 1999.

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

[10] Y.Yang et al, "The influence of geometry on self-field AC losses of Ag sheathed PbBi2223 tapes", Physica C, 256, pp.378-386, 1996.