

액체질소로 냉각된 Bi-2223 선재의 퀘치 전파 특성에 관한 연구

A Study on the Quench Propagation Properties of Bi-2223 Wire cooled in Liquid Nitrogen

윤경용*, 배덕권**, 안민철**, 강형구**, 이찬주***, 윤용수#, 이상진##, 고태국###

Kyung Yong Yoon*, Duck Kweon Bae**, Min Cheol Ahn**, Hyungku Kang**, Chanjoo Lee***, Yong Soo Yoon#, Sang-Jin Lee##, Tae Kuk Ko###

Abstract: With the successful commercialization of Bi-2223 powder-in-tube wire, various attempts in the R & D of the high-Tc superconducting (HTS) magnets for high magnetic field applications are being implemented actively. Operating temperature of HTS magnet has to be maintained at the designed level but the magnetic energy and mechanical disturbance can cause unstable operational temperature of HTS magnet. Especially, the generated heat energy of inner HTS winding is apt to be accumulated, so the normal region appears in HTS winding. This paper deals with the quenching characteristics of three kinds of selected Bi-2223 wires: the High Current Density Wire (HC-A) and the High Strength Wire (HS-A) made by AMSC and the HTS wire (HW-I) made by Innost. The Innost wire has the highest minimum quench energy (MQE). The High Current Density Wire has the highest normal zone propagation velocity (NZPV).

Key Words: Quench, normal zone propagation, Bi-2223 wire, superconductor, quench energy.

1. 서 론

Bi-2223와 YBCO는 초전도한류기, 케이블, 변압기, 모터 등과 같은 초전도 전력기기의 개발에 널리 이용되는 고온초전도체이다. 특히 PIT 공법을 사용한 Bi-2223 고온초전도선재의 성공적 상용화는 이 선재를 사용한 고온초전도전력기기의 개발을 활성화 시켜 고온초전도전력기기의 상용화를 매우 앞당기고 있다[1, 2]. 초전도전력기기의 상용화에 있어 고려되어야 할 중요한 점 중 하나는 극저온 상에서의 열적 교란이나 초전도체의 퀘치가 없는 초전도 시스템의 개발이다. 초전도의 세가지 임계조건 중 임계온도는 제어가 가장

힘든 요소인데, 특히 초전도 magnet 내부의 자기장 및 기계적 힘의 교란, 과전류 통전 등이 온도로 변환되어 상전도영역을 형성시킬 수 있으며 이는 인접 영역으로 전파되어 전체적인 시스템에 퀘치를 일으켜 초전도 선재 등을 열화시킨다. 따라서 Bi-2223 고온초전도선재의 퀘치 발생 및 전파특성으로 연구하는 것은 초전도 전력기기의 안전성 향상 및 상용화 촉진을 위해 꼭 필요하다.

본 논문에서는 세가지 Bi-2223 고온초전도선재의 퀘치 전파에 대한 특성을 연구하였다. 인위적인 퀘치를 발생시키기 위하여 선재로 제작한 시편에 NiCr 히터로 열에너지를 인가하였다. 세 시편은 AMSC 사의 고전류밀도 선재(HC-A), 고강도 선재(HS-A) 및 Innost사의 고온초전도선재(HW-I)로 각각 제작하였다.

2. 실험 및 측정

2.1. 시편의 준비

Table 1은 시편제작에 사용한 Bi-2223 선재의 제원을 나타낸다. HC-A는 Bi-2223 선재의 기계적 강도를 강화시키기 위하여 스테인레스강 테이프를 선재 양면에 부착시킨 것으로써 이 선재의 임계인장강도를 265 MPa 이다. 제조사에 의해 보장된 HC-A와 HS-A의 임계전류는 115A였으며 HW-I의 임계전류는 85A였다. HC-A, HS-A 및 HW-I의 은합금 모재의 비율은 각각 37.5, 28.45, and 65.4 % 였다.

Fig. 1은 퀘치특성 측정을 위한 시편의 제작과정을 나타내고 있다. 각 시편에서 고온초전도 선재 양 끝은 전류도입을 위한 구리 바에 납땀하였고 5cm 길이의 전압탭 5개와 5개 전압탭 전체인 25cm 길이의 전압탭 하나를 선재위에 설치하였다. 열에너지를 인가하기 위한 저항 36Ω의 NiCr 히터를 25cm 전압탭의 중앙에 설치하였다. 고온초전도선재와 히터간의 열접촉을 좋게

Table 1. Specifications of the Bi-2223 Wires Used.

	Thickness (mm)	Width (mm)	Critical current (A)	Ag alloy matrix (%)
HC-A	0.21	4.1	> 115	37.5
HS-A	0.31	4.2	> 115	28.45
HW-I	0.23	4.2	60	65.4

* 정 회 원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

** 학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

*** 정 회 원 : 현대중공업 기계전기연구소

정 회 원 : 안산공대 전기과 조교수

** 정 회 원 : 위덕대 공대 정보전자공학과 조교수

정 회 원 : 연세대 공대 전기과 교수

원고접수 : 2005년 2월 14일

심사완료 : 2005년 3월 15일

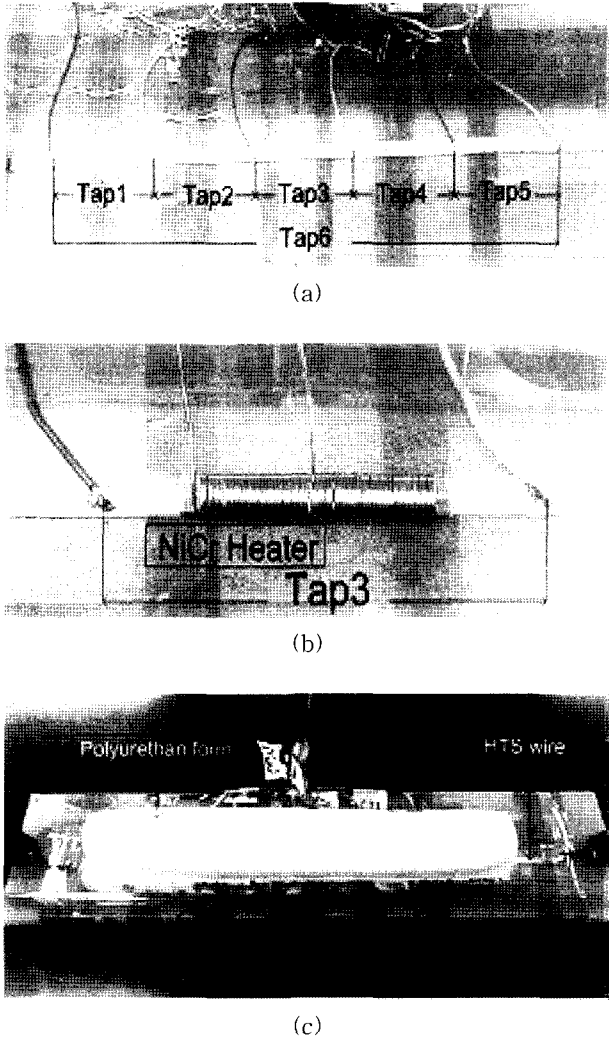


Fig. 1. Preparation of specimen: (a) 6 voltage taps, (b) NiCr heater, (c) finished specimen.

하기 위하여 N-grease를 접촉부위에 도포하였다. 극저온 상에서 운전되는 초전도 마그넷 내부에서 생성된 열은 냉매로 전달되기 어려우므로 이 부분을 “uncooled conductor”라고 부른다[3]. 이것은 단열조건과 비슷하다. 본 연구에서는 폴리우레탄 폼을 고온초전도선재위에 덮어 이러한 초전도 마그넷 내부의 단열상태로 모의한 시편을 준비하였다. Fig. 1의 (c)는 완성된 시편을 보여준다.

2.2. 실험구성

Fig. 2는 Bi-2223 고온초전도 선재의 퀘치특성을 연구하기 위한 실험구성을 나타낸다. 시편은 액체질소로 냉각시켰다. $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준으로 4 단자법을 이용하여 측정된 임계전류의 50, 60, 70, 80, 90, 95%를 각 시편에 흘린 상태에서 히터에 공급되는 에너지를 증가시켜 최소 퀘치 에너지(MQE)를 측정하였다.

MQE를 측정할 후 MQE 시점의 히터입력을 인가한 상태에서 각 시편에 임계전류의 50, 60, 70, 80, 90, Table 1에 사용된 Bi-2223 선재의제원 95%를 시편에 흘리면서 상전도영역의 전파 정도를 측정하였다. 모든 측정값은 필터와 절연증폭기를 거쳐 DAQ 장비에 저장하였다. 모든 측정기와 data는 LabVIEW와 GPIB로 제어하였다.

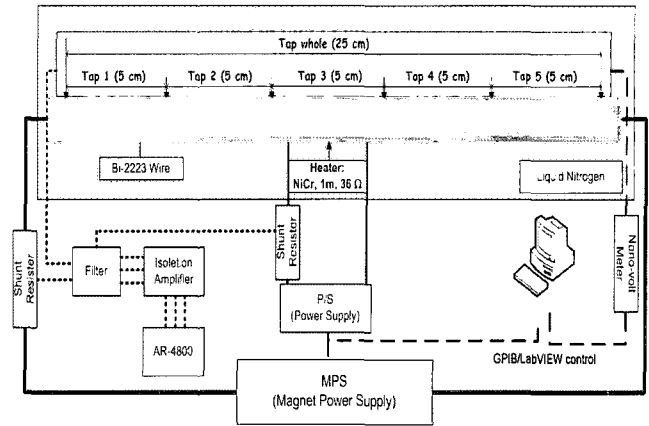


Fig. 2. Schematic drawing of experiment.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 최소 퀘치 에너지

Table 2는 1 기압 77K인 액체질소에서 측정된 각 시편의 임계전류 분포를 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 시편내부의 5 지점에서 측정된 임계전류에 차이가 있는데 특히 Innost 사의 고온초전도 선재에서는 약 10% 정도의 임계전류 차이가 측정되었다. 5개의 길이 5cm 전압탭에서 측정된 임계전류보다 Table 1의 (a)에 표시한 5개의 전압탭 양단에 설치한 Tap6에서 측정된 임계전류가 작았다.

최소 퀘치 에너지는 초전도체에 발생한 상전도영역이 인접영역으로 전파되도록 하는 에너지를 말한다. 만약 상전도영역을 생성시킨 에너지가 최소 퀘치 에너지 보다 클 경우에는 이 상전도 영역은 회복되지 못하고 상전도영역의 전파가 일어나게 된다. 최소 퀘치 에너지는 초전도 시스템의 안정적인 운전을 위한 초전도 마그넷의 중요한 설계요소이다[3]. Fig. 3은 시편의 최소 퀘치 에너지 측정의 결과를 나타낸다. 시편위에 설치된 히터에 전류의 형태로 에너지를 입력시키면서 5cm 길이의 선재 전체에 퀘치가 일어나는 에너지를 측정하였다.

Fig. 4는 각 시편에서 측정된 값으로 계산한 최소 퀘치 에너지를 나타낸다. 2회의 측정된 결과를 평균한

Table 2. Distribution of critical current in each specimen.

	I_c of HC-A (A)	I_c of HS-A (A)	I_c of HW-I (A)
Tap 1	137	121	60
Tap 2	140	120	61
Tap 3	140	122	58
Tap 4	140	121	60
Tap 5	139	120	64
Tap whole	135	120	59

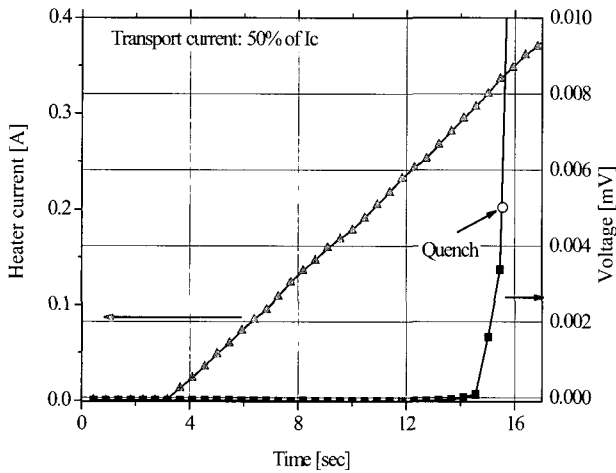


Fig. 3. Experimental data of MQE test.

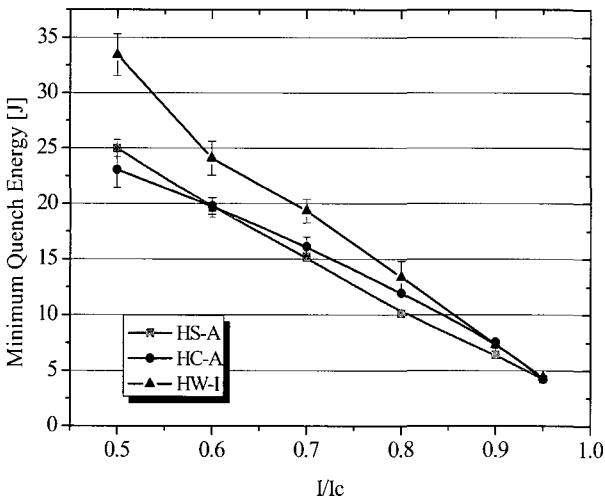


Fig. 4. Minimum quench energy of each specimen.

값으로 이 에너지를 계산하였다. 그래프의 가로축은 임계전류를 1로 본 측정 시의 전송전류 비를 나타낸다. 전송전류가 임계전류의 50% 일때에는 HW-I의 최소 퀸치 에너지가 가장 컸다. 전송전류가 증가함에 따라 각 시편의 최소 퀸치 에너지 차이는 감소하는 경향을 나타내었다. 일단 초전도선재 내부에 상전도영역이 발생되고 난 이후에는 초전도 코어로 전송되던 전류의 일부분이 선재의 모재인 은합금으로 분배되면서 저항에 의한 발열이 발생하는데 이 발열량의 축적으로 전류분배가 더욱 심해지면서 상전도영역 또한 커지게 되어 결국에는 대부분의 전류가 모재를 통하여 흐르는 초전도선재의 퀸치가 발생하게 된다. 전송전류가 임계전류 근처일 경우에는 외부에서 인가된 열에너지에 의해 상전도 영역이 보다 쉽게 발생하고 또한 그 전파 또한 빨리 일어나게 되고 모재로 전류가 이전되는 퀸치 또한 빨리 일어나게 된다. 모재로의 전류분배가 커지면 모재의 저항에 따라 생기는 발열량에 따라 퀸치가 발생하는데 이러한 점이 그림 4에서 전송전류가 증가함에 따라 각 시편의 최소 퀸치 에너지의 차이가 줄어드는 현상을 설명할 수 있다. HC-A와 HC-A의 경우 전송전류가 10% 증가할 때마다 최소 퀸치 에너지는 4J 씩 증가하였다.

3.2. 상전도영역의전파

Fig. 5, 6, 7은 각각 설치된 히터로의 외부 에너지입력에 의한 HC-A, HS-A, 및 HW-I의 상전도영역 전파 에너지(NZPE: normal zone propagation energy)를 나타낸다. 상전도영역 전파에너지는 본 시편에서 히터에 의해 Tap 3에 발생한 상전도영역을 인접영역으로 전파시킨 에너지를 측정하는 것이다. 상전도 영역은 히터가 설치된 시편의 중앙부분(Tap3)에서 가장 먼저 발생하여 전류도입부가 있는 양끝 부분으로 전파되었다. 표에서 볼 수 있듯이 HC-A의 상전도영역 전파 에너지가 가장 작았다. 전송전류가 임계전류의 90% 이상일 때 HC-A의 상전도영역은 설치한 전압탭의 양 끝까지 전파되었다. 다른 두 시편에서는 히터가 설치된 전압탭의 인접 전압탭 부분까지만 상전도영역이 전파되었다. Table 3은 Tap3의 인접 전압탭인 Tap4로의 상전도영역 전파속도를 나타낸다.

HS-A는 은합금 모재를 사용한 PIT 공법의 Bi-2223 선재의 양면에 스테인레스강 테이프를 부착시켜 선재의 기계적 특성을 향상시킨 선재이다. HC-A와 HW-I는 별도의 기계적 강화처리를 하지 않은 Bi-2223 고온초전도 선재이다. HC-A에서 모재가 차지하는 비율은 전체 단면적의 37.5%였고, HW-I의 모재 비율은 65.4%였다. 상전도영역 전파는 생성된 열에너지의 전파에 의한 초전도체 내부의 온도상승의 결과이다. 상전도영역이 발생되었을 때, HC-A와 HW-I에서는 발생된 열이 시편의 초전도 코어와 은합금 모재를 통하여 전파되는 반면 HS-A에서는 기계적 특성을 강화하기 위해 부착된 스테인레스강으로도 열이 분배되어 전파된다. 이것이 HS-A의 상전도영역 전파 에너지가 HC-A 보다 큰 이유이다. HW-I가 초전도 코어와 은합금 모재로만 이루어졌지만 가장 큰 상전도영역 전파 에너지를 가지고 있었다. 그리고 이 시편의 상전도영역은 단지 열에너지가 입력되어 상전도영역을 발생시킨 Tap3와 인접한 Tap4로만 전파되었다. 그러나 이 영역으로의 에너지 전파 속도는 다른 두 시편보다 빨랐다. 이것은 HW-I 선재의 은모재 비율이 크기 때문이다. HW-I에 상전도영역이 형성되었을 때 발생된 열에너지는 은모재를 따라 전달되었을 것인데, 저항 및 열전도율이 좋은 은모재의 비율이 커서 내부의 열에너지 축적에 의한 상전도영역의 전파가 잘 일어나지 않은 것으로 생각된다. 또한 이 시편의 길이가 길지 않았고, 전류도입을 위한 구리 블럭 또한 열전도도가 좋은 물질인데 이 부분이 액체질소와 접하여 냉각되고 있었으므로 시편내부에서 생성된 열에너지가 냉매인 액체질소까지 전달되는 양도 있어 상전도영역이 보다 멀리 전파되지 못하였을 것으로 생각된다.

상전도전파의 속도가 느린 고온초전도체의 특성과 시편에 사용된 선재의 길이가 짧은 이유 등으로, 본 연구에서 측정된 상전도영역 전파 에너지는 매우 큰 값이었다. 빠른 상전도영역 전파 속도는 초전도시스템 내부에 발생된 상전도영역을 냉매로 빨리 전파시켜서 시스템의안정적인 고온초전도 마그넷을 개발하기 위해서는 상전도영역 전파 속도가 빠른 고온초전도 선재를 사용하거나, 상전도영역 전파 에너지가 낮고 상전도영역 전파 속도가 높도록 설계하여야 한다. 본 연구의 결과로는 Bi-2223 선재를 사용한 고온초전도 마그넷 내부에서 원치 않은 상전도 영역이 발생하였을 경우에는 이 상전도영역이 전체 고온초전도 마그넷의 운전 안정성을 저하시킬 것으로 생각된다. 그러므로 Bi-2223 선재를 사용한 고온초전도 마그넷은 애당초 초전도 마그넷에서 상전도영역이 발생하지 않는 매우 신중한 설계 및 제작이 필수적으로 요구된다. 특히 냉

매로의 열전달을 극대화시킬 수 있는 초전도 냉각시스템의 설계 및 제작이 꼭 필요할 것이다.

Fig. 8, 9 및 10은 각각 HC-A, HS-A, HW-I의 상전도영역 전과 특성을 나타낸다. 상전도영역 전과는 HC-A에서 가장 잘 일어난다. Fig. 5에 나타낸 것과 같이 히터가 설치된 전압탭의 좌, 우측으로의 상전도영역 전과 속도에는 약간의 차이가 있다. Fig. 8와 9에서 볼 수 있듯이, 인가된 히터 에너지가 축적될수록 상전도영역 전과 속도는 빨라졌다.

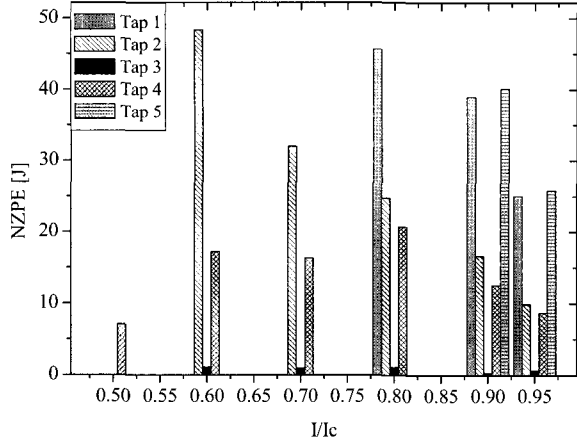


Fig. 5. NZPE of HC-A.

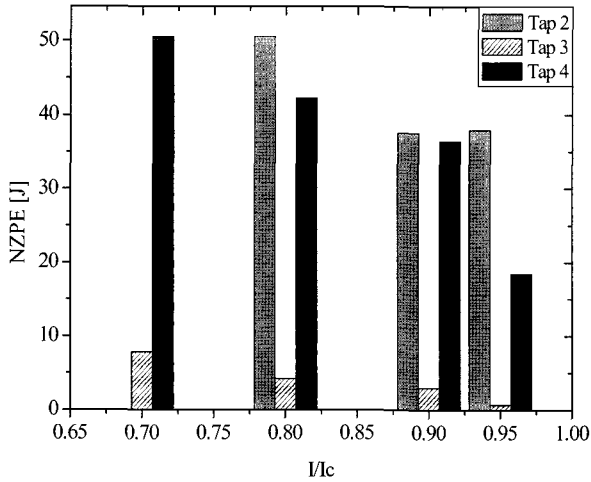


Fig. 6. NZPE of HS-A.

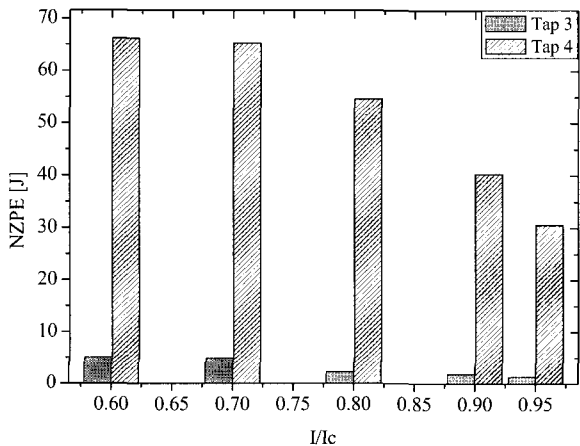


Fig. 7. NZPE of HW-I.

Table 3. NZPV of each specimen.

I/I _c	NZPV(Tap 3 → Tap 4) (cm/s)		
	HC-A	HS-A	HW-I
0.5	0.89		
0.6	0.92		0.75
0.7	0.91	0.36	0.76
0.8	1.02	0.35	0.88
0.9	1.13	0.34	1.15
0.95	1.21	0.54	1.51

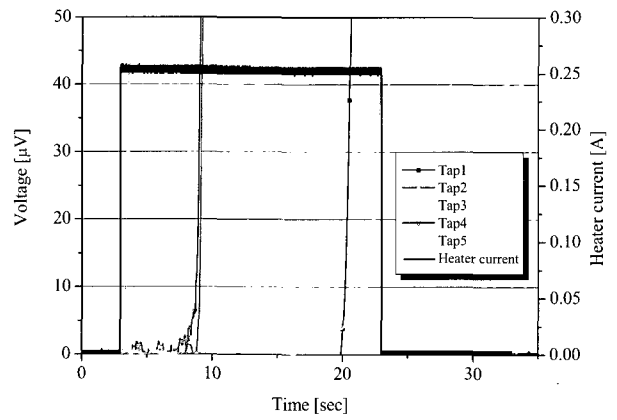


Fig. 8. NZP of HC-A(transport current: 90% of I_c).

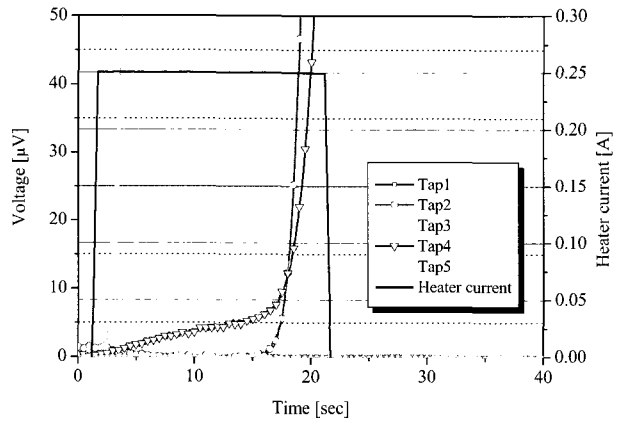


Fig. 9. NZP of HS-A(transport current: 90% of I_c).

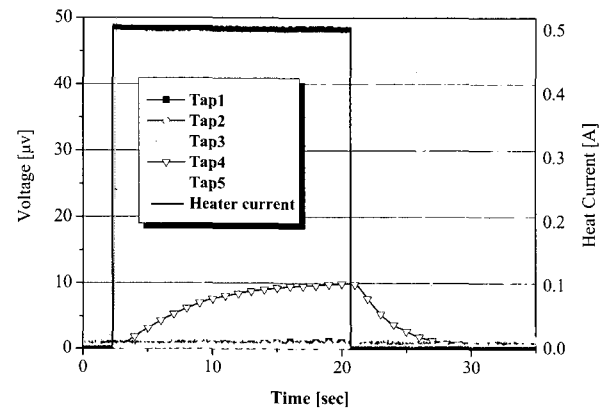


Fig. 10. NZP of HW-I(transport current: 90% of I_c).

4. 결 론

본 논문에서는 액체질소로 냉각된 Bi-2223 선재의 퀀치 전과 특성에 관한 연구를 수행하였다. 인위적인 퀀치를 발생시키기 위하여 NiCr 히터를 이용한 열에너지의 외부에서 인가하였다. 전송전류가 임계전류의 50% 일 때에는 Innot 사의 선재를 사용하여 제작한 시편인 HW-I의 최소 퀀치 에너지가 가장 크게 측정되었다. 전송전류가 증가함에 따라 각 시편에서 측정된 최소 퀀치 에너지의 차이는 감소하였는데 이는 각 선재의 모재의 재질이 크게 다르지 않기 때문이다. AMSC사의 두가지 선재를 사용하여 제작한 시편 HC-A와 HC-B의 최소 퀀치 에너지는 서로 크게 다르지 않았으며 임계전류가 10% 증가할 때 마다 4J 씩 감소하였다.

HC-A에서만 전송전류가 임계전류의 90% 이상인 조건에서 상전도영역이 전체 전압탭의 끝부분까지 전파되었다. 상전도영역의 전파는 고온초전도선재의 모재의 특성 및 구성비에 영향을 받았다.

상전도영역의 전파는 초기에 서서히 발생하나 발생한 열이 축적됨에 따라 급히 전파되는 경향을 나타내었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] Joseph A. Waynert, Heinrich J. Boenig, Charles H. Mielke, Jeffrey O. Willis, and Burt L. Burley, "Restoration and testing of an HTS fault current controller," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 1984-1987, 2003.
- [2] S. S. Kalsi, D. Aized, B. Connor, G. Snitchler, J. Campbell, R. E. Schwall, Th. Stephanblome, A. Tromm, and J. Kellers, "HTS SMES Magnet Design and Test Results," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 971-976, 1997.
- [3] Lawrence Dresner, "Stability of Superconductors", pp. 101, Plenum Press, 1995.

저 자 소 개



윤경용(尹景鏞)
1964년 8월 24일생, 1987년 한양대학교 졸업, 1997년 용인대학교 전산통계학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정.



배덕권(裴德權)
1971년 8월 16일생, 1998년 광운대학교 전기공학과 공학사, 2000년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정.



안민철(安敏哲)
1976년 9월 20일생, 1999년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



강형구(姜亨求)
1973년 8월 4일생, 1997년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 2005년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사).



이찬주(李燦周)
1972년 2월 20일생, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 선임연구원.



윤용수(尹庸銖)
1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1995년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학석사, 2001년 동 대학원 전기전자공학과 공학박사, 1985년~1998년 대우전자 전장개발 1팀장, 현재 안산공과대학 전기과 조교수.



이상진(李相鎭)
1962년 03월 03일생, 1988년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1991년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 1995년 동 대학원 전기공학과 공학박사, 1996년~97년 한국고속철도건설공단 선임연구원 1996년~97년 프랑스 Ecole Centrale de Lille-L2EP 객원연구원, 현재 위덕대학교 전기공학과 조교수.



고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 석사 졸업(M.Sc), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 한국초전도·저온공학회 부회장.