

## 고온 초전도 테이프 선재의 퀸치 전파 특성 해석

### Analysis on Quench Propagation Characteristics of HTS Tape

이지광\*, 김지훈\*\*, 류경우#, 차귀수##, 한송엽###

Ji-kwang Lee\*, Ji-hoon Kim\*\*, Kyung-woo Ryu#, Guesoo Cha##, Song-yop Hahn###

**Abstract** : The main issues for the power application of High Tc superconducting tape are lower AC loss and higher stability conditions. HTS tape has large stability margin by high heat capacity of superconductor itself and high temperature margin. But, it can be damaged by continuous heat generation at quench point, because normal zone propagation velocity by generating heat is very low. Here, we analyze the quench propagation characteristics using finite element method for BSCCO-2223 HTS tape.

**Key Words** : HTS tape, quench propagation, finite element method

### 1. 서 론

고온 초전도체는 저온 초전도체에 비해 임계온도가 높아서 실제 사용되는 동작온도도 매우 높을 뿐만 아니라, 초전도 재료 자체의 비열 역시 매우 커서 퀸치가 발생되기 위한 최소 교란에너지도 매우 크므로 안정성 측면에서는 유리하다. 그러나, 열에 의한 상전도 영역 전파속도는 느리기 때문에 국부적인 영역에서 발열에 의해 퀸치가 발생되면 그 발열 지점의 열을 빠르게 제거시켜 주지 못하므로 집중적인 온도 상승이 일어나서 초전도 선재에 손상을 입힐 수 있다 [1]~[3]. 본 논문에서는 현재 초전도 전력용 연구에서 가장 일반적으로 사용되는 BSCCO-2223 고온 초전도 테이프 선재에 대해 열적 교란에너지에 의한 퀸치 발생과 전파 특성에 대해 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

### 2. 지배방정식 및 해석모델

고온 초전도체로 만든 선재는 주로 액체질소의 비

\* 정 회 원 : 우석대 전기공학과 전임강사  
 \*\* 학생회원 : 서울대 전기공학부 석사과정  
 # 정 회 원 : 전남대 전기공학과 부교수  
 ## 정 회 원 : 순천향대 전기공학과 교수  
 ### 정 회 원 : 서울대 전기공학부 교수  
 원고접수 : 2000년 04월 15일  
 심사완료 : 2000년 05월 15일

등점 (77 [K])에서 작동하게 된다. 이때 만약 외부에서 일정량 이상의 열  $Q_d$ (disturbance)가 가해진다면 선재의 온도가 상승한다. 온도가 상승하다가 일정한 온도에 도달하면 초전도체 내의 초전도 상태는 깨어지고 선재는 그 특성을 잃어버리고 상전도 상태가 된다. 이때 상전도 상태로 변환 부분에서는 시간이 지나면서  $Q_d$ 가없어져도 주울열에 의한 가열이 이루어져 인접한 선재부분의 초전도 상태를 파괴하면서 열이 전파하게 된다.

이러한 퀸치전파(열에 의한 퀸치) 현상을 유한요소법을 이용하여 해석하기 위한 지배방정식과 정식화에 대해 간단히 살펴보면 다음과 같다.

고온 초전도 선재에서 퀸치 현상 해석을 위해 사용되는 지배 방정식은 발생열은 전도열과 자체 열용량의 합과 같다는 일반적인 열 평형 방정식으로서 식(1)과 같다

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T) \nabla T) + Q_j(T) + Q_d(t) \quad (1)$$

식(1)에서 좌변항은 자체 열용량을 나타내고 우변의 첫 번째 항은 전도열,  $Q_j(T)$ 는 초전도 상태가 깨어져서 상전도 영역으로 바뀐 부분에서 발생하는 주울열,  $Q_d(t)$ 는 외부에서 가해주는 교란에너지를 나타낸다.

$C(T)$ 와  $k(T)$ 는 온도의 함수로서 해석에서 온도에 따른 값을, 상전도 영역에서 발생하는 주울열은 온도에 따른 안정화재의 비저항값을 이용하였으며, 교란에너지는 일정시간동안만 가하므로 그 시간 동안만 값을 갖는 항이다. 본 논문에서는 식(1)의 지배방정식을 가중잔차법을 이용한 유한요소 해석을 통해 초전도 테이프 선재의 온도 상승을 계산하여 퀸치 전파특성을 살펴왔다.

일반적으로 초전도체 내에서는 저항이 생기지 않는다. 그러나 열에 의해 퀸치가 발생했을 시에는 오히려 은의 저항보다 초전도체의 저항이 훨씬 커지게 되어 초전도체로 흐르던 전류가 퀸치 후에는 주로 은 매트릭스로 흐르게 되므로 퀸치 후에 초전도 선재에서 발생하는 주울 열은 주로 은의 비저항에 의존한다. 퀸치 전파 특성 해석을 위해서는 식(1)에서 보는 바와 같이 비열, 열전도도, 비저항과 같은 여러 물질 상수들의 온도에 대한 값들이 필요하다. 초전도체인 Bi-2223의 비열, 열전도도, 안정화재인 은의 비열, 열전도도, 비저항의 온도에 대한 값들은 여러 논문[2][4]에서 제시된 값들을 이용하였고, 이 값들과 선재내의 초전도체의 비열인 점적율을 고려하여 온도에 대한 고온 초전도 선재의 등가 비열은 식(2), 등가 열전도도는 식(3)을 통해 구한 결과를 해석에 이용하였다.

$$C_{Bt}\lambda + C_{Ag}(1 - \lambda) = C_{eq} \quad (2)$$

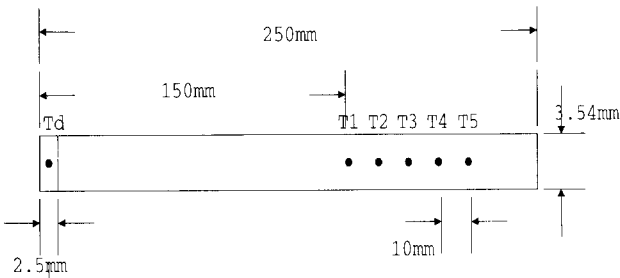
$$k_{Bi}\lambda + k_{Ag}(1 - \lambda) = k_{eq} \quad (3)$$

단,  $C_{Bi}$ ,  $k_{Bi}$ 는 Bi-2223의 비열, 열전도도,  
 $C_{Ag}$ ,  $k_{Ag}$ 는 은의 비열, 열전도도  
 $C_{eq}$ ,  $k_{eq}$ 는 테이프의 등가 비열, 등가 열전도도  
 $\lambda$ 는 초전도체의 점적율

특성 해석에 사용된 고온 초전도 테이프 선재 사양은 표 1과 같다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 고온 초전도 선재는 표 1에서처럼 두께가 매우 얇고 폭이 두께의 10배가 넘는 테이프 형태를 하고 있기 때문에 두께에 해당하는 좁은 면쪽에서 보았을 때 임의의 한 단면의 온도는 온도편차가 거의 나타나지 않은 등온분포를 가지므로 테이프의 폭에 해당하는 넓은 면에 대한 2차원 모델링을 통한 해석이 가능하다. 퀘치 특성을 해석하기 위한 모델은 전체영역을 중심(교란에너지 인가를 위한 열원이 위치한 부분)에서 받을 나누어 풀었고, 퀘치에 의한 온도 상승과 발생 전압을 계산하기 위해 설정한 위치는 그림 1과 같다.

표 1. 특성 해석에 사용된 고온 초전도 테이프 사양  
 Table 1. Specification of HTS tape for analysis

종류	Bi-2223	은비	2.5
테이프의 폭	3.54 [mm]	매트릭스 재질	은(Ag)
테이프의 두께	0.25 [mm]	필라멘트 수	55
테이프의 길이	500 [mm]	임계 온도	105 [K]



교란 에너지를 준 부분

그림 1. 온도 상승과 발생 전압을 해석하기 위한 테이프 선재의 계산 설정 위치

Fig. 1. Considered points for analysis of temperature and voltage in tape model

퀘치 특성을 알아보기 위해 그림 1의 모델에 대해 테이프 선재가 단열되어 있는 경우와 액체 질소에 잠겨 있는 경우에 대해 해석하였으며, 그 때의 경계조건은 다음과 같이 달라진다. 고온 초전도 테이프 선재에 기계적인 안정성과 전자력에 의한 선재의 움직임을 방지하기 위해 예폭시 등에 함침한 경우나, 선재가 진공 중에 열전도에 의해 냉각이 되어 초전도 상태로 이용되고 있는 경우에는 그림 2와 같이 오른쪽 경계만이 Dirichlet 경계조건을 가지고 나머지는 Neumann 경계조건을 가진다고 생각할 수 있다. 액체질소 속에 초전도 선재를 넣는 경우에는 그림 3과 같이 위와 아래

의 경계가 77 [K]의 액체질소와 직접 닿게 된다. 이 경계조건들은 정식화과정에서 사용된다.

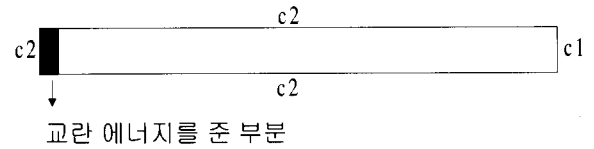


그림 2. 단열 조건시의 경계조건

(c1 : Dirichlet 조건, c2 : Neumann 조건)

Fig. 2. Boundary conditions for finite element analysis in case of adiabatic circumference

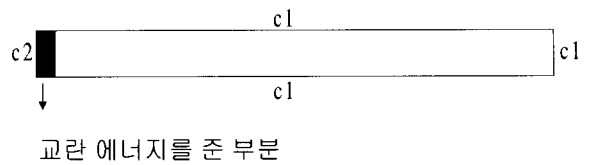


그림 3. 액체질소 내에 있을 때의 경계조건

(c1:Dirichlet 조건(77[K]), c2:Neumann 조건)

Fig. 3. Boundary conditions for finite element analysis in case of liquid nitrogen circumference

### 3. 해석 결과

각각의 해석 모델에 대해 선재에 흐르는 전류량과 인가한 교란에너지의 양이 퀘치 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 다음과 같은 시뮬레이션을 행하였다.

#### 3.1. 단열 조건

단열 조건하에서 외부에서 공급하는 교란에너지가 일정할 때 초전도 선재에 흐르는 전류량이 퀘치 발생 및 전파에 주는 영향을 알아보기 위해 교란에너지를 2.25[W]×2.0[초]로 가하고 선재에 0[A], 35[A]의 전류가 흐른다고 하여 그림 1의 각 지점에서의 온도 변화를 계산한 결과를 각각 그림 4, 그림 5에 보인다.

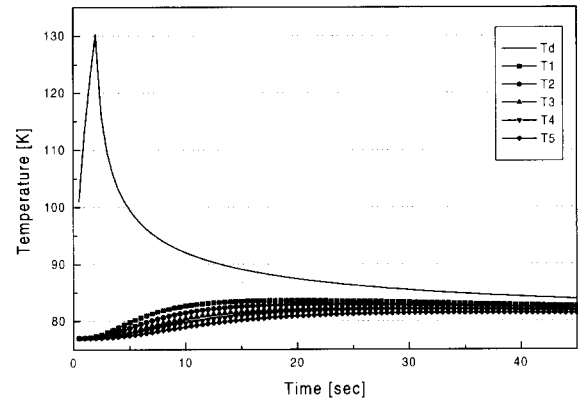


그림 4. 통전전류는 없고 외부교란에너지만 인가한 경우의 각 지점의 온도 ( $Q_d = 4.5[J]$ )

Fig. 4. Temperature at each point by external disturbance and no transport current

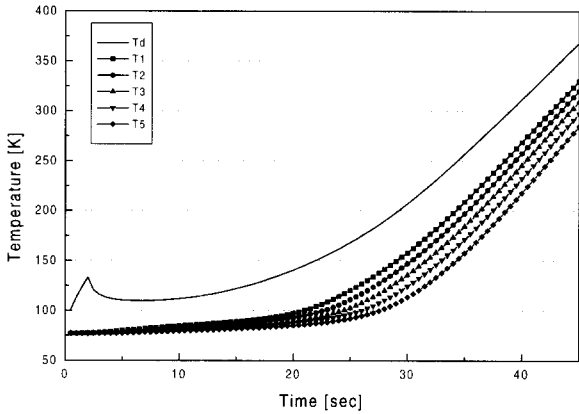


그림 5. 35[A]의 전류가 흐르고 외부교란에너지를 인가한 경우의 각 지점의 온도 ( $Q_d = 4.5[J]$ )

Fig. 5. Temperature at each point by external disturbance and 35[A] transport current

전류가 흐르지 않는 경우에는 그림 4에서 알 수 있듯이 선재에 흐르는 전류가 없으므로 퀀치로 이어지는 않는다. 교란에너지가 가해지는 지점의 온도  $T_d$ 는 교란에너지가 가해지는 시간동안에는 급격히 상승하다가 교란에너지가 사라지면 지수함수적으로 감소함을 알 수 있으며, 다른 지점들의 온도는 교란에너지의 열이 전파되어 온도가 약간 증가하고 온도가 증가하기 시작한 시간도 약간씩 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 시간의 차이는 열의 전달 속도를 의미한다. 그림에는 표시되지 않았으나, 시간이 경과함에 따라 각 지점의 온도는 초기상태(77 [K])로 되돌아온다. 또한, 그림 5에서 알 수 있듯이 교란에너지가 인가되는 지점의 온도는 전류가 흐르는 경우에는 전류가 없을 때와는 다르게 교란에너지가 끊긴 후 어느 정도의 시간 동안에는 온도가 감소되는 경향을 보이다가 일정시간이 지나면 온도가 다시 빠르게 증가하고, 다른 지점들의 온도도 일정시간이 지난 후 급속히 증가됨을 알 수 있다. 이는 교란에너지에 의해 상전도로 바뀐 영역에서 흐르는 전류에 의한 주열 열이 발생하고 이 열들이 전파되어 인근영역들도 상전도 상태로 전이되는 과정이 연속적으로 급속히 이루어지는 이른 바 퀀치 발생 및 전파를 의미한다. 교란에너지가 끊어진 후부터 온도가 올라가기 시작하는 지점까지 걸리는 시간이 저항이 생겨 주열열  $Q_j$ 를 발생하는데 걸리는 시간임을 알 수 있다. 온도는 교란에너지가 가해지는 지점에 가까울수록 더 일찍 상승하기 시작한다. 인가되는 교란에너지의 크기와 같은 에너지라 하더라도 교란열이 인가되는 시간에 대한 퀀치 특성을 살펴보기 위해 전류가 흐르지 않을 때와 20[A], 35[A]가 흐르는 경우에 교란에너지 인가 지점인  $T_d$ 에서의 온도 변화를 해석한 결과가 그림 6, 그림 7, 그림 8이다.

그림 6 ~ 그림 8에서 교란에너지는 각각 2.25 [W], 4.5 [W]을 2초씩, 그리고 2.25 [W]을 4초 주었을 때이다. 그림 6의 결과에서 알 수 있듯이 교란열의 인가시간이 길 때보다 교란열의 크기가 클 때 온도가 더 올라가는 것이 보인다. 그림 7의 결과에서는 20[A]의 전류가 흐를 때에는 교란열의 크기와 지속시간에 따라 퀀치가 발생할 수도 그렇지 않을 수도 있다는 것을 알 수 있다. 4.5 [W]의 외부열량을 2초 동안 주었을 때와 2.25 [W]을 4초 동안 주었을 때에는 퀀치를 일으

키고, 2.25 [W]를 2초 동안 주었을 때에는 퀀치를 일으키지 않았다. 역시 작은 교란열을 오래 주었을 때보다는 큰 교란열을 짧게 주었을 때의 온도가 더 높게 나타난다.

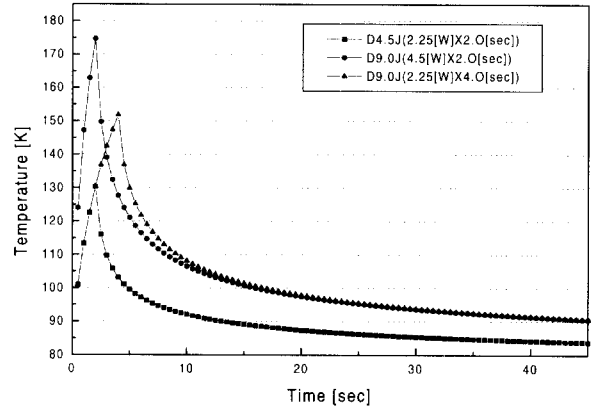


그림 6. 전류가 흐르지 않을 때 교란에너지의 변화에 의한  $T_d$  지점의 온도

Fig. 6. Temperature at  $T_d$  point by various disturbance and no transport current

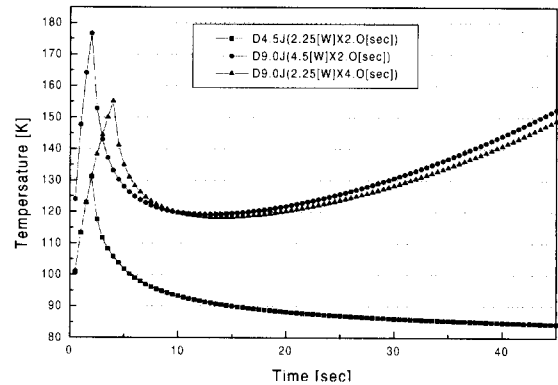


그림 7. 20[A]가 흐를 때 교란에너지의 변화에 의한  $T_d$  지점의 온도

Fig. 7. Temperature at  $T_d$  point by various disturbance and 20[A] transport current

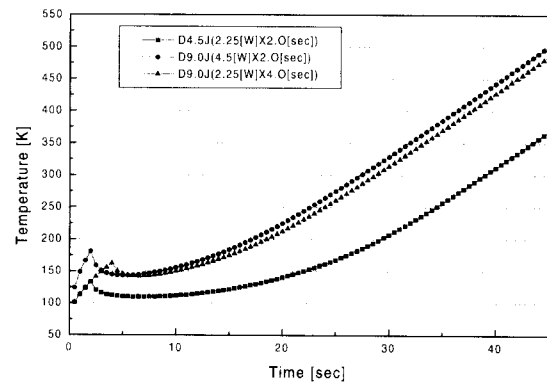


그림 8. 35[A]가 흐를 때 교란에너지의 변화에 의한  $T_d$  지점의 온도

Fig. 8. Temperature at  $T_d$  point by various disturbance and 35[A] transport current

그림 8의 결과를 살펴보면 흐르는 전류가 35 [A]로 늘어나면 모두 퀵치가 발생했고, 그림 7의 결과와 비교하였을 때 교란에너지가 같더라도 전류가 크면 퀵치가 더 쉽게 일어나며 온도 역시 더 큰 폭으로 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 발생 주율열  $Q_j$ 가 커지면서 나타나는 결과이다.

그림 9는 35[A]의 전류가 흐르고, 교란에너지가 4.5[J]일 때의 온도 분포를 실제 해석한 테이프 선재 모델에 대해 그린 것으로서 등온선은 Dirichlet 경계조건을 만족하면서 나타남을 볼 수 있다. 이러한 온도구배 특성은 단일조건인 경우에는 항상 나타난다. 그림 9의 온도 분포에 대해 그림 1에 나타난 다섯 지점의 시간에 따른 온도 값은 그림 5에서도 알 수 있다.



그림 9. 해석에 사용된 테이프 모델에서의 등온선 분포  
**Fig. 9.** Equi-temperature line of HTS tape in case of 4.5[J] disturbance and 35[A] transport current

고온 초전도 테이프 선재에서 퀵치가 발생한 후 상전도 영역의 증가(퀵치 전파)에 따라 선재에서 발생하는 전압을 구하기 위하여는 새로 생겨난 저항의 증가화가 필요하다. 각 지점에서의 저항은 그 지점에서의 온도에 의하여 구해질 수 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이 단일조건인 경우에는 한 지점에서의 온도와 그 지점을 수직하게 지나가는 선상에 있는 모든 지점에서의 온도가 같기 때문에 그림 1의 모델을 등 간격으로 수직하게 잘라 각각의 저항을 구한 뒤 직렬 연결을 시켜 전체적인 저항의 값을 구한다. 이 때 한 부분에서의 저항은 그 부분의 최저 온도와 최고온도의 평균을 구하여 그 평균 온도를 사용한다. 이런 방법으로 교란에너지를 인가한 Td 지점으로부터 각 지점(T1~T5)과의 사이의 저항들을 구한 후 흐르는 전류를 곱하여 구한 전압들(Td 지점이 기준)을 그림 10에 보여준다. 그림 10의 결과를 이용하여 상전도 영역의 전파속도를 구하면 0.667[cm/sec]로서 저온 선재에서의 전파속도인 수 ~수십 [km/sec] 비해 매우 느리다는 것을 알 수 있고 이 결과는 다른 논문들에서 제시된 값들과 비슷하다[2],[4].

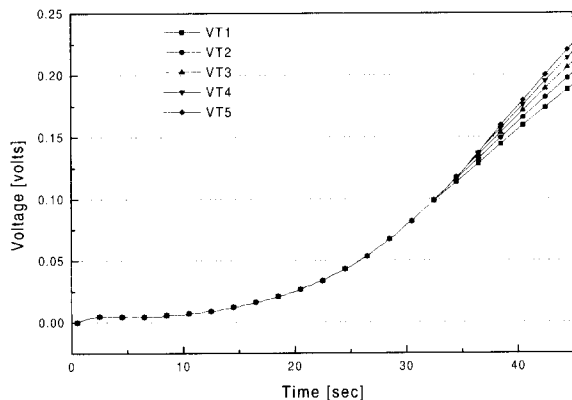


그림 10. 전류 35[A], 교란에너지 4.5[J]이 가해질 때 각 지점의 발생 전압 (Td지점이 기준)  
**Fig. 10.** Voltage at each point by normal region in case of 4.5[J] disturbance and 35[A] transport current

### 3.2. 액체질소에 잠길 때

액체질소 속에서는 고온 초전도 선재와 77 [K]의 액체질소가 그림 1의 3면(위,아래,오른쪽)과 접하게 되어 그 결과 그림 3과 같은 경계조건이 성립하게 된다. 그림 11은 인가된 교란에너지가 4.5 [J]이고, 전류가 0, 20, 35[A]일 때 교란에너지가 인가되는 지점인 Td에서의 시간에 따른 온도변화를 보여준다.

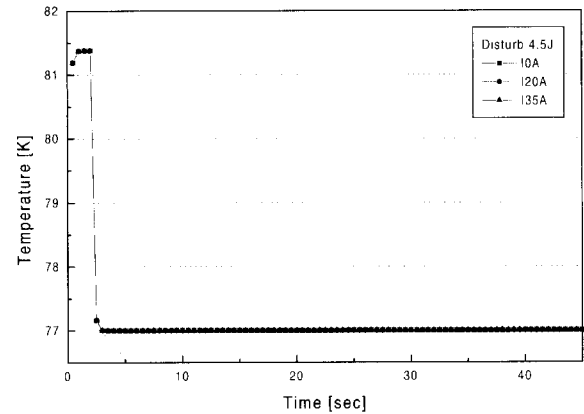


그림 11. 액체질소에서 동작할 때 교란에너지가 인가된 지점의 온도변화

**Fig. 11.** Temperature at Td point by external disturbance in liquid nitrogen circumference

최고 온도 상승치도 매우 작으며, 교란에너지 제거 후 바로 원래의 온도 상태로 되돌아 오음을 볼 수 있다. 교란에너지를 증가시키고, 흐르는 전류를 증가시켜도 같은 결과를 얻었다. 즉, 교란열이 가해지고 흐르는 전류에 의해 주율열이 발생하더라도 선재를 따라 전파하기보다는 제일 가깝고 제일 온도가 낮은 부분으로 빠져나가게 되어 퀵치가 일어나지 않고 열량이 침입한 부위 역시 즉각 냉각이 된다는 것을 보여준다..

## 4. 결 론

BSCCO-2223 고온 초전도 테이프 선재에 대한 퀵치 발생 및 전파 특성을 알아보기 위해 유한요소 해석을 하였다. 외부 교란에너지만 있을 때와 통전전류가 동시에 있을 때에 대해 교란에너지의 크기와 통전전류의 크기에 따른 테이프 선재내의 온도 변화와 전압발생을 해석하였다. 테이프 선재가 단일 상태에 있을 때는 외부 교란에너지만에 의한 퀵치 발생은 일어나지 않고, 통전전류가 흐를 때는 교란에너지의 양에 따라 퀵치의 발생여부가 결정됨을 알았다. 또한, 같은 양의 교란에너지라 할 지라도 인가 시간에 따라 퀵치가 발생하기도 그렇지 않기도 한다는 해석 결과를 얻었다. 테이프 선재가 액체질소에 직접 닿아 있을 때는 교란에너지와 통전전류 크기에 관계없이 퀵치는 발생하지 않았으며, 이는 고온 초전도 테이프를 액체 질소 조건하에서 사용할 때는 안정성을 고려하지 않아도 됨을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행된 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

**참 고 문 헌**

- [1] S. B. Kim, and A. Isiyama, "Transient Stability Analysis in Bi-2223/Ag Superconducting Tapes," IEEE Trans. on AS, Vol.7, No.2, pp.203-206, 1997
- [2] S. Shimizu, A. Isiyama, and S. B. Kim, "Quench Propagation Properties in HTS Pan-cake Coil," Proceedings, ASC '98, LTA-03, September, 1998
- [3] J.W.Lue, M.S.Lubell, D.Aized, J. Campell, R. Schwall, "Quenches in a high-temperature superconducting tape and pancake coil", Cryogenics Vol.36, pp.379-389, 1996
- [4] S. B. Kim, Y. Ueno, A. Ishiyama, H.Okada, S.Normura and H.Maeda "Experiment and Numerical Analysis of Normal Zone Propagation Properties in Ag Sheathed Bi-2223 Superconducting Tapes", IEEE trans .on Magnetics, vol. 32, No. 4 1996

**차귀수(車貴守)**



1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공박), 1987년 순천향대 조교수, 1991년 영국 Bath대학 방문교수, 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 교수

**한송엽(韓松晔)**



1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1968년 서울대 전기공학과 전임강사. 1979년 프랑스 로렌공과대학 대학원 졸업(공박) 1995년 전기학회 회장. 1995년~1996년 서울대 공과대학 학장. 현재 당학회 회장.

**저 자 소 개**



**이지광(李志光)**

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사) 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공박) 현재 우석대 전기공학과 전임강사



**김지훈(金志薰)**

1975년 3월 1일생. 1998년 뉴저지 주립대학교 전기공학과 졸업.(공학사) 현재 서울대학교 전기공학부 석사과정



**류경우(柳炅佑)**

1962년 2월 10일생. 1983년 인하대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공박) 1986년~1995년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원, 1996년~현재 전남대학교 전기공학과 조교수