

## 10kVA 고온초전도변압기의 특성해석 및 제작

### Development and Characteristic Analysis of a 10kVA HTS Power Transformer

이희준\*, 차귀수\*\*, 이지광\*\*\*, 최경달#, 류경우##, 한송엽###

H.J. Lee\*, G.S. Cha\*\*, J.K. Lee\*\*\*, K.D. Choi#, K.W. Ryu##, S.Y. Hahn###

**Abstract** : This paper describes the construction and test results of a 10kVA single phase HTS transformer. Double pancake windings with BSCCO-2223 HTS tape and G10-FRP cryostat with room temperature bore are used in the transformer. Two double pancake windings are connected in series to provide 188 turns and other two double pancake windings are connected in parallel to conduct the secondary current of 45.4[A]. Coefficients of the constructed transformer are obtained using the fundamental tests of the transformer. According to the test results, larger leakage reactance than expected is observed due to the bulky core which surrounds the cryostat.

**Key Words** : superconducting power machine, HTS transformer, double pancake winding, AC loss.

## 1. 서 론

기존의 변압기에 비해 고온초전도변압기가 주목 받는 이유는 무게가 가볍고, 부피가 감소하며, 고효율이며, 환경친화적 이라는데 있다. 또 고온초전도변압기는 과부하에 의한 수명감소가 없고, 전력시스템에 고장 전류가 발생하면 고온초전도권선에 저항이 발생하여 자체보호능력을 보유하고 있다.[1]

초전도 분야의 전문가들은 고온 초전도 전력기기가 21세기 초에는 실용화될 것으로 예상하고 있으며, 이 중에서 가장 먼저 실용화가 가능하고 수요가 제일 많은 전력기기의 하나로 고온초전도변압기를 꼽고 있다.

Asea Brown Boveri(ABB), Waukesha Electric System, Fuji Electric Company,

Kyushu University 등의 전력회사나 대학에서 고온초전도 변압기를 개발하고 있다. 가장 큰 규모의 고

온초전도 변압기를 개발하는 곳은 ABB로 10MVA급 고온초전도변압기를 개발하고 있다.[2][3]

본 논문에서는 단상 10kVA급 고온초전도 변압기를 설계하고 제작된 고온초전도 변압기의 기본 특성 시험을 수행하였다. 설계시 권선부의 자화손실에 대해 계산하는데, 수평자계와 수직자계에 대한 영향을 고려하였다.[4~6]

## 2. 10kVA 고온초전도변압기 구조

권선에 사용한 선재는 BSCCO-2223 고온초전도 선재로서 폭은 3.1 [mm], 두께는 0.168 [mm]이며 임계전류는 외부자장이 없는 경우 77[K]에서 62[A]이고, 선재의 임계전류밀도  $J_c$ 는  $1.2 \times 10^4$  [A/cm<sup>2</sup>]이다. 결합손실을 줄이기 위해 모재는 은합금을 사용하였으며, 표 1은 BSCCO-2223 선재에 대한 기본 사양이다.

표 1. 고온초전도선재 사양

Table 1. Specifications of the HTS tape

재질	BSCCO-2223
테이프 폭	3.1[ mm]
테이프 두께	0.168[ mm]
모재	은 합금
트위스트	NO
필라멘트수	55
임계전류	62A(77K,self-field)

1차측과 2차측 모두 같은 선을 사용하여 권선하였고 1차측과 2차측의 권수비는 2:1이다. 고압측 전압은 440[V]이고 전류는 22.7[A]이며 저압측전압은 220[V]이고 전류는 45.4[A]이다. 4개의 더블팬케이크형태로 권선하였고 권선부는 액체질소에서 동작하도록 하였다. 각각의 팬케이크는 G10-FRP를 이용하여 제작하였으며 제작된 보빈에는 94턴씩 권선하였다.

4개의 더블팬케이크 권선중 고압측 두 개의 더블팬케이크 권선을 직렬로 연결하여 184턴을 만들었고 저압측은 두 개의 더블팬케이크를 병렬로 연결하여 정격부하전류 45.4[A]를 통전할 수 있도록 하였다.

\* 학생회원 : 순천향대 대학원 전기공학과 박사과정

\*\* 정 회 원 : 순천향대 정보기술학부 교수

\*\*\* 정 회 원 : 우석대학 전기공학과 교수

# 정 회 원 : 한국산업대학 전기전자공학과 교수

## 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과 교수

### 정 회 원 : 서울대학교 공과대학 교수

원고접수 : 2000년 10월 25일

심사완료 : 2000년 11월 10일

그림 1은 제작된 철심과 권선의 단면도이다. 철심 설계는 상온변압기 설계와 같은 방법으로 설계하였고, 두께는 0.3 [mm]의 방향성 규소강판을 성층하여 제작하였다. 철심의 단면적은  $85 \times 85$  [mm<sup>2</sup>]이며, 최대 자속밀도는 1.95(T)이고 동작자속밀도는 1.3(T)이다. 전체모양은 사각형 형태로 가로 세로의 길이는 670 [mm], 340 [mm]이며 창크기는 가로와 세로가 각각 500 [mm], 170 [mm]이며 무게는 86.7 [kg]이다.

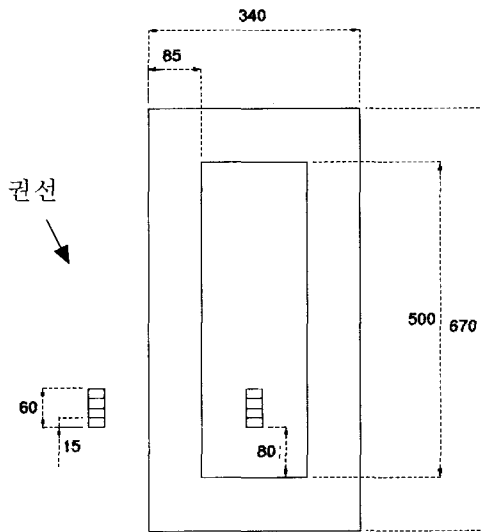


그림 1. 철심과 권선의 단면도

Fig. 1. Cross-section of core and windings

그림 2는 저온용기의 단면도이다. 저온용기와 지지대는 G10-FRP와 부도체를 이용하여 누설 자속에 의한 와전류손이 발생하지 않게 제작하였다. 중공형 형태로 제작하여 가운데로 철심이 지나갈 수 있게 하여 상온에 철심이 위치 할 수 있게 하였으며, 제작된 저온용기의 안지름과 바깥지름은 130 [mm], 405 [mm], 높이는 470 [mm]이다. 액체질소용기 안과 바깥 부분에는 진공층을 두어 외부로부터의 열손실 침투를 방지하였다. 제작된 저온용기에는 액체 질소를 26 [ℓ]을 담을 수 있으며, 저온용기에 담긴 액체질소의 자연 증발량을 측정하였는데 액체질소 증발량은 시간당 0.24 [ℓ]로 하루 평균 증발량은 5.76 [ℓ]이다.

표 2는 제작된 고온초전도 변압기의 주요 사양이다.

그림 3과 그림 4는 고온초전도 변압기의 단면도와 제작된 10kVA 고온초전도 변압기의 그림이다.

그림 5는 더블팬케이크권선을 쌓아 놓은 것으로 4개의 더블팬케이크권선을 차례로 위치시키고 스테인레스봉을 사용하여 지지하였다. 2차측 병렬권선에 순환 전류의 유무를 확인하기 위해 로고스키 코일을 양쪽에 두 개를 삽입하였다. 권선에 인가되는 자장의 세기를 측정하기 위해 고압측과 저압측이 만나는 부분에 수평 방향과 수직방향의 인가 자장을 측정하기 위한 홀센서를 삽입하였으며 각 더블팬케이크권선에 걸리는 전압을 측정하기 위해 전압탭을 설치하였다.

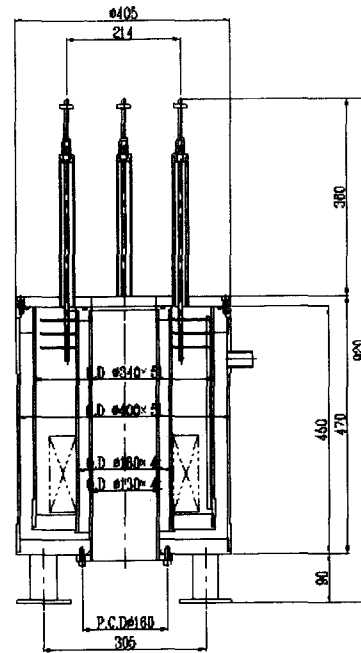


그림 2. 저온용기 단면도

Fig. 2. Cross-section of cryostat

표 2. 고온초전도 변압기의 사양

Table 2. Specifications of the HTS transformer

정격		
용량	단상 10kVA	
전압	1차/2차 440/220[V]	
전류	1차/2차 22.7/45.4[A]	
권선		
턴수	1차/2차 188/94	
선 길이	1차/2차 133/133[m]	
안쪽/바깥쪽지름	202/242 [mm]	
높이	60 [mm]	
철심		
재질	방향성 규소강판	
높이/너비	670/340 [mm]	
단면적	85×85 [mm <sup>2</sup> ]	
무게	86.7 [kg]	
손실	84.8[W], 1.3[T]	
최대자속밀도	1.92[T]	
동작자속밀도	1.3[T]	
저온		
용기 재질	GFRP	
안쪽/바깥쪽지름	130/405 [mm]	
높이	470 [mm]	

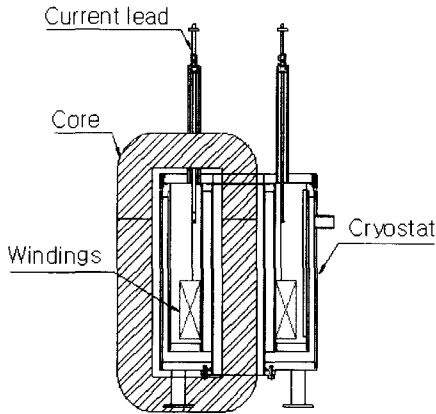


그림 3. 초전도변압기 단면도

Fig. 1. Cross-section of HTS transformer

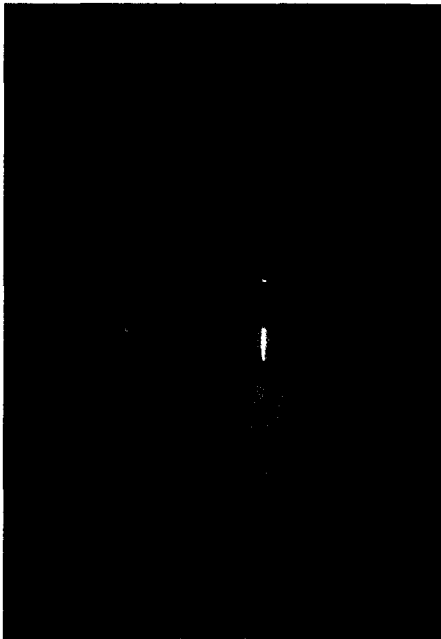


그림 4. 10kVA 고온초전도변압기

Fig. 4. The 10kVA HTS transformer

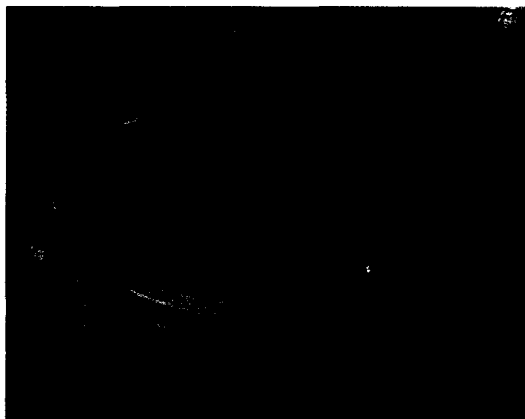


그림 5. 4개의 더블팬케이크 권선

Fig. 5. The double pan cake windings

### 3. 수직·수평자계에 의한 자화손실

고온초전도선재에 외부로부터의 자계가 공급되면 교류손실이 발생하는데 교류손실은 수직자계( $B_{\perp}$ ), 수평자계( $B_{\parallel}$ )와 같이 자계의 방향에 의해 많은 차이가 발생한다. 고온초전도선재의 넓은 표면에 인가되는 자계를  $B_{\perp}$ 로 한다. 권선부에 대한 외부로부터의 수직 수평자계는 유한요소법을 이용하여 계산하였고 구하여진  $B_{\perp}$ ,  $B_{\parallel}$ 을 이용하여 교류손실을 식(1)을 이용하여 계산하였다.[6]

$$Q_x = \frac{2B_{\perp}^2}{\mu_0} \left( \frac{1}{\beta_{\perp}} - \frac{2}{3\beta_{\perp}^3} \right) + \frac{2B_{\parallel}^2}{\mu_0} \left( \frac{1}{\beta_{\parallel}} - \frac{2}{3\beta_{\parallel}^3} \right) \quad (1)$$

위 식에서  $\beta$ 는 자속의 침투 정도를 나타내는 계수로서  $\beta = B_m/B_p$ ,  $B_p$ 는 자속이 초전도체의 중심에 도달하는 자속밀도로  $B_p = \mu_0 J_c a$ 이다. 여기서는 외부 자장의 크기  $B_m$  대신에  $B_{\perp}$ 와  $B_{\parallel}$ 을 사용하였다.

4개의 더블팬케이크를 사용하여 여러 종류의 권선배치가 가능하나 여기서는 고압-고압-저압-저압(HHLL), 저압-저압-고압-고압(LLHH), 저압-고압-고압-저압(LHHL), 고압-저압-저압-고압(HLLH)등의 4가지 경우에 대해서 확인하였다. 여기서 고압은 1차측권선을 의미하며 저압은 2차측권선을 의미한다. 4가지 경우에 대한 자화리액턴스  $X_m$ 과 누설리액턴스  $X_l$ 을 유한요소방법을 이용하여 계산하여 권선배치를 결정한다.

그림 6은 각 경우의 자화리액턴스와 누설리액턴스를 HLLH의 경우를 1로 해서 표시한 것으로 자화리액턴스는 세가지 경우 LLHH의 결선이 가장 크게 나왔다. 누설리액턴스의 경우는 HHLL과 LLHH의 누설리액턴스 값이 같았으며 LHHL과 HLLH의 값이 같았다.

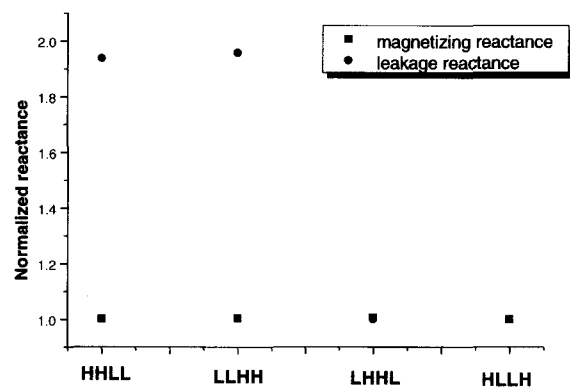


그림 6. 각 권선 배치별 자화리액턴스, 누설리액턴스

Fig. 6. Magnetizing reactance and leakage reactance of each winding arrangement

권선의 배치는 해석 프로그램을 사용하여 전류의 불균형이 최소로 되는 배치를 선택하였다. HHLL과 LLHH의 배치는 자속이 권선을 통과하는 부분이 적으나 2차측의 전류불평형이 크게 발생하여 사용하지 않았고 LHHL의 형태는 해석해 본 결과 저압 측의 전압이 정격전압보다 낮게 나왔으며, 저압측의 전압과 전류가 정확하게 나오는 모형인 HLLH의 배치로 변

압기의 권선배치를 결정하였다.

그림 7.(a)는 변압기의 철심과 권선 부근에서의 자속분포를 나타내고 있으며 그림 7.(b)는 권선부분을 확대한 것이다. 그림 7.(b)에서 볼 수 있듯이 고압측 권선끼리 자로가 형성되고 저압측 권선끼리 자로가 형성 되어 고압측과 저압측이 만나는 지점에서 수직 방향의 자속이 집중되는 것을 알 수 있다. 이는 고압측 권선과 저압측 권선에 흐르는 전류의 방향이 다르기 때문이다.

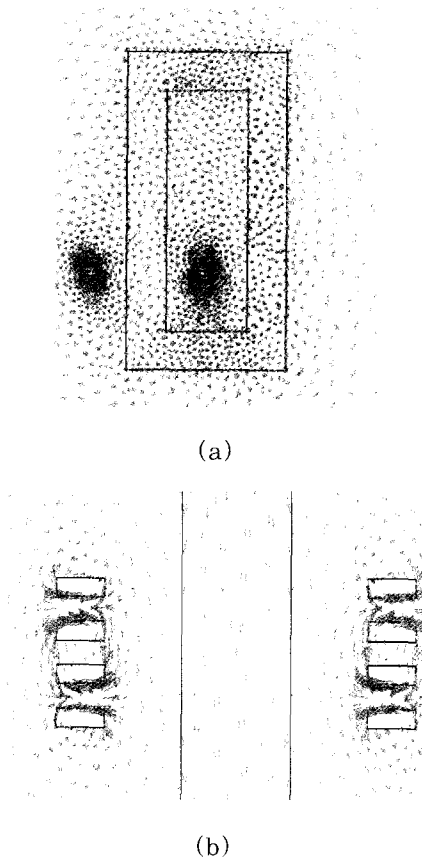


그림 7. 변압기내의 자속분포

(a) 전체영역 (b) 권선부분 확대

Fig. 7. Magnetic field distribution around the winding area

(a) whole diagram (b) enlarged winding area

그림 8은 수직방향의 자계  $B_z$  가 외부에서 권선면에 인가시의 교류손실밀도이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 고압측 권선과 저압측 권선의 사이에서는 자장이 초전도선에 수직 방향으로 가해지는 것을 알 수 있고 이는 고압측 권선과 저압측 권선에 흐르는 전류의 방향이 다르기 때문이다. 전류가 바뀌는 부분에서 자장이 초전도선에 수직 방향으로 가해지는 것을 알 수 있다. 고온초전도선에 수직성분으로 자장이 가해지면 수평방향의 자장이 인가될 때에 비해서 임계전류의 감소폭이 커지고 손실도 커지게 된다. 이때의 손실은 3.24 W이다. 저압측 권선과 고압측 권선이 마주보는 부분이 자장의 세기도 셀 뿐만 아니라 자장의 방향도 초전도선에 수직방향이기 때문에 변압기의 권선에서 발생하는 손실의 대부분은 고압측 권선과 저압측 권선이 마주보는 부분에서 발생하게 된다.

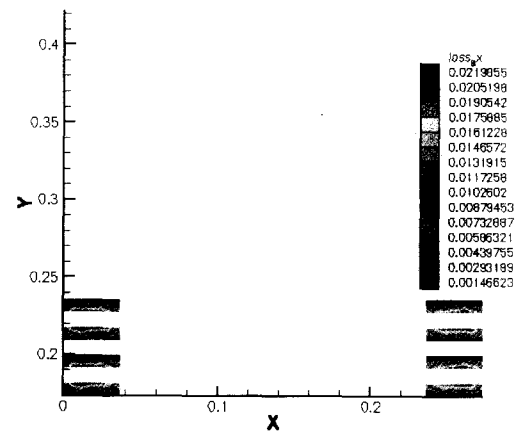


그림 8. 수직자계에 의한 초전도권선에서의 교류손실밀도

Fig. 8. Loss density of the winding area at Perpendicular field

그림 9는 수평방향의 자계  $B_x$  가 외부에서 권선면에 인가시의 교류손실밀도이다. 그림 7.(b)에서 볼 수 있듯이 고압측 권선과 저압측 권선의 모서리 부분 사이에서는 자장이 초전도선에 수평 방향으로 가해지는 것을 알 수가 있다. 고온초전도선에 수평성분으로 자장이 가해지면 수직방향의 자장이 인가될 때에 비해서 임계전류의 감소폭이 작아지고 손실도 작아진다. 이때의 손실은 0.43[W]이다.

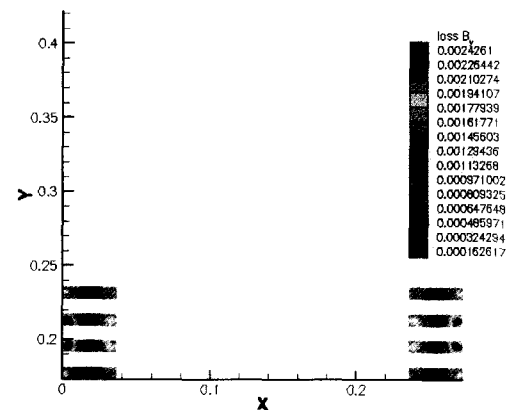


그림 9. 수평자계에 의한 초전도권선에서의 교류손실밀도

Fig. 9. Loss density of the winding area at Parallel field

여기서 자계가 수직으로 인가될 때의 교류손실이 수평으로 인가될 때의 교류손실 보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 4개의 권선에서의 총 교류손실은 3.67[W]이다. 이 교류손실이 작은 이유는 고온초전도 변압기의 용량이 10kVA로 작고 네 개의 권선에 외부자계가 잘 분배되기 때문이다.

그림 10은 고온초전도선체에 대한 임계전류를 측정한 것이다. 고온초전도선체 10 [cm]에 전류를 인가하여 발생하는 전압을 측정하였는데 고온초전도체의 임계전류를 1 [ $\mu$ V/cm]의 기준을 적용해서 결정할

경우 0.01 [mV]에서 켄치이고 따라서 측정된 고온초전도선재의 임계전류는 79 [A]로서 선재제작사에서 제시한 62 [A] 보다 컸다.

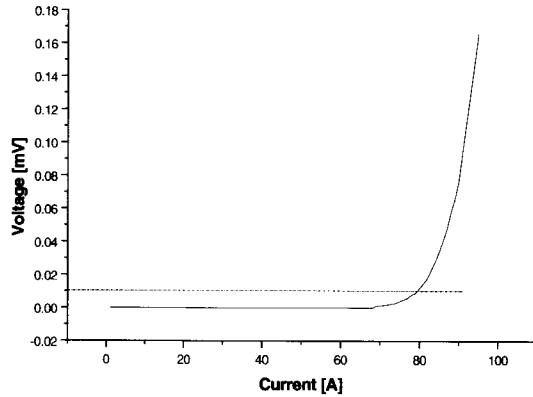


그림 10. 고온초전도선재의 임계전류 측정  
Fig. 10. Measured of Critical current in the HTS tape

제작된 4개의 더블팬케이크 형태의 권선에 대해 임계전류특성 실험을 실시하였다. 권선된 보빈의 양쪽에 전압탭을 두고 전류원을 가지고 전류를 인가하면서 전압탭에 발생하는 전압을 측정했다. 그림 11은 각각의 권선에 대한 임계전류측정시험 결과이다.

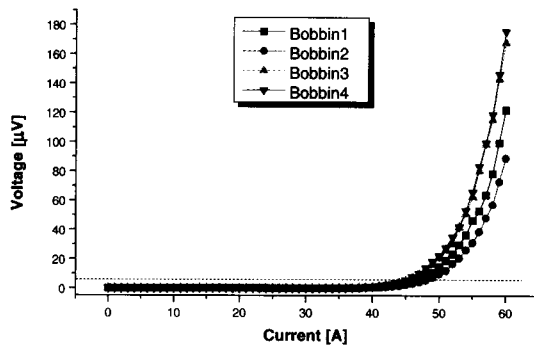


그림 11. 각 권선당 임계전류  
Fig. 11. The critical current of the transformer winding

각 보빈에 감긴 권선수는 94턴이고 선재의 길이는 66.6 [m]이다. 보빈에 감긴 각 권선의 상온상태에서의 저항은 4[Ω]이고, 인덕턴스는 0.32 [mH]이다.

고온초전도체의 임계전류를 1 [ $\mu$ V/Cm]의 기준을 적용해서 결정할 경우에 각 보빈의 임계전류는 47[A], 49[A], 46[A], 46[A]이다.

#### 4. 고온초전도변압기 실험 결과

제작된 단상 10kVA 초전도 변압기는 그림 12와 같은 회로로 시험하였는데, 변압기의 기본 시험인 단락시험, 무부하시험, 부하시험등을 실시하였다. 유도전

압조정기를 사용하여 제작된 고온초전도 변압기에 전압을 인가하여 무부하시험과 단락시험을 실시하였다. 변압기 2차측이 병렬로 연결되어 있으므로 두 개의 팬케이크 권선의 임피던스가 다르면 순환 전류가 발생하므로 로고스키 코일을 두 팬케이크 권선에 삽입하여 순환전류 발생 유무를 측정하였다.

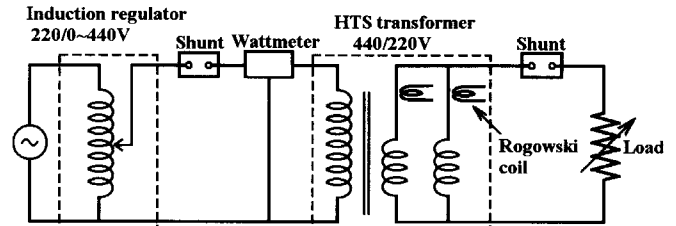


그림 12. 변압기 시험 회로도  
Fig. 12. Transformer test circuit

무부하시험시 1차 전압을 정격전압인 440[V]까지 증가시켰을 때 정격전류의 5%인 1.13[A]의 전류가 흘렀으며, 무부하 손실은 84.8W 이고 역률은 0.17이었다. 1차측 전압이 440[V]일 때 여자전류는 1.13[A] 이므로 자화리액턴스는 389[Ω]이다. 철심에서의 자장이 1[T]일 때에 철손은 84.8[W]이다. 고온초전도 변압기에서는 동손이 발생하지 않으므로 대부분의 손실은 철손이다. 그림13은 무부하 시험에 대한 결과이다. 그림 13에서 1차 전압이 정격인 440[V]까지 증가할 때 1차 전류가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 1차측 전류의 제곱으로 전력손실이 발생하는 것을 알 수 있다.

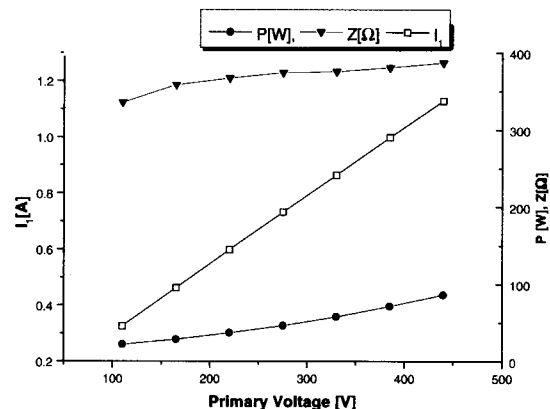


그림 13. 무부하시험  
Fig. 13. result of no load test

단락시험에서는 2차 측에 정격전류가 흐를 때 1차측 전압이 47.4[V]로 나타났으며, 이를 이용하여 변압기 내부의 임피던스를 구하였다. 이때 내부임피던스는 10.7%이었는데 이와 같이 내부임피던스가 높은 이유로는 중공형 저온용기에 철심이 지나가는 구조로 철심과 권선사이의 공극이 많이 증가하였으며, 권선과 권선사이의 길이가 커 누설자속이 많았으며, 저온용기의 크기가 커짐으로 철심의 길이가 증가한데 원인이 있는 것으로 판단된다. 그림 14는 단락시험결과로 1

차측전압의 증가에 대한 1차측전류의 변화를 나타내고, 퍼센트 임피던스와 관계를 나타내고 있다. 내부 임피던스는 1.89[Ω]에서 2.08[Ω]으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 내부임피던스가 정격전류에서 2.08[Ω]이었고, 이 값은 0.11pu에 해당한다. 2차측 병렬로 연결된 2개의 권선에서의 순환전류 발생을 로고 스키 코일로 측정한 결과 순환전류의 발생은 없었다.

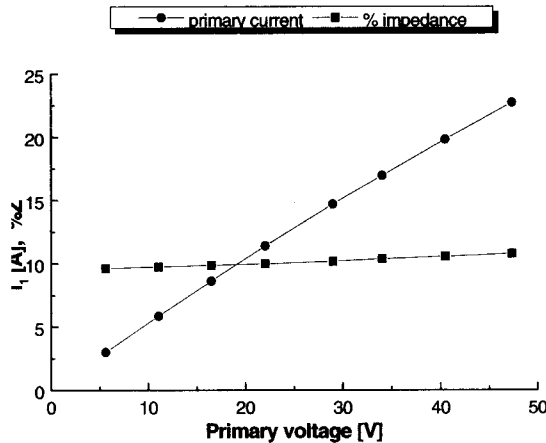


그림 14. 단락시험 결과

Fig. 14. Result of the short circuit test

저항부하를 이용하여 부하시험을 실시하였는데 1[kW] 저항 모듈을 사용하여 저항부하를 증가시키어 가며 부하시험을 실시한다. 그림 15는 2차측 전압과 역률 관계를 알 수 있는데 부하가 증가하면 2차측 전압은 감소되고 역률은 증가하였다. 전부하시 2차측전압이 220[V]에서 216.8[V]로 변화하므로 제작된 고온초전도변압기의 전압변동률은 2.4%이다.

측정결과에 의해 병렬로 연결된 2차측의 두 개의 더블팬케이크 권선에서의 순환전류가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 두 개의 더블팬케이크의 권선의 리액턴스 차이가 없음을 알 수 있었다. 표 3은 시험 결과를 정리한 것이다.

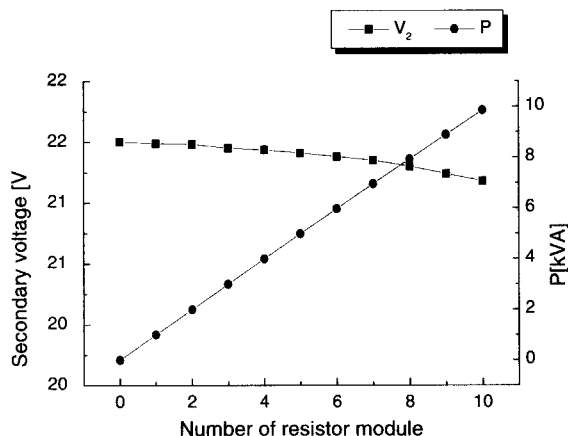


그림 15. 부하시험 결과

Fig. 15. Result of the load test

표 3. 시험 결과

Table 3. Summary of test results

무부하시험	
여자전압	440V
여자전류	1.13A
무부하손	84.8W
단락시험	
전압	47.4V
전류	22.7A
%임피던스	10.7%

## 5. 결 론

단상 10kVA 고온초전도 변압기의 제작과 시험 결과를 기술하였다. 4개의 더블팬케이크권선을 사용하였는데 더블팬케이크 권선방법은 고전압 변압기에서 솔레노이드권선 방법보다 많이 사용되는 방식이다. 권선된 더블팬케이크권선에 권선배치와 교류손실을 유한요소방법과 계산식을 이용하여 구하여 최적의 권선배치를 찾았으며 권선에서의 교류손실값을 구하였다.

제작된 변압기의 특성시험을 통해 고온초전도변압기의 기본 계수들을 구할 수 있었으며 시험 결과 누설 리액턴스가 다른 고온초전도 변압기에 비해 컸는데 그 이유는 권선부와 철심사이의 공극 길이가 크기 때문이다.

본 연구를 통해 얻어진 더블팬케이크형 권선제작, 중공형 극저온용기 제작, 고온초전도변압기의 기본 특성에 관한 자료는 향후 대형 초전도 변압기의 설계 및 제작시에 기초 자료로 활용 될 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming Transformers," IEEE Spectrum, Vol.34, No.7, pp.43-49, 1997
- [2] S. W. Schwenterly et al., "Performance of a 1-MVA HTS Demonstration Transformer," Trans. on IEEE Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.680-684, 1999
- [3] K. Funaki et al., "Preliminary Tests of A 500kVA-Class Oxide Superconducting Transformer Cooled by Subcooled Nitrogen," Trans. on IEEE Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp.824-827, 1997
- [4] C. P. Bean, "Magnetization of Hard Superconductor," Physical Review Letters,

Vol.8, No.6, pp.250-253, 1962

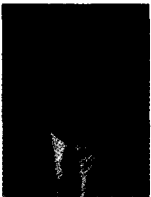
- [5] J.K.Lee, et al., "Development of a Three Phase 100kVA Superconducting Power Transformer with Amorphous Core", IEEE, Trans. Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, 1999, pp.1293-1296
- [6] 차귀수 등, "고온초전도선재의 자화손실 측정," 대한전기학회 논문지, 제48권(B), 제4호, pp.182-186, 1999

## 지 자 소 개



### 이희준(李喜俊)

1969년 5월 15일생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



### 차귀수(車貴守)

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



### 이지광(李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 졸업(공학석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 우석대학교 전기공학과 조교수



### 최경달(崔景達)

1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 공학박사. 현재 한국산업기술대학교 전기전자공학과 조교수



### 류경우(柳旻佑)

1962년 2월 10일 생. 1983년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1985년 서울대학교 전기공학과 대학원 졸업. 1995년 요코하마대학원 전자정보공학과 졸업(공학박사). 현재 전남대학교 전기공학과 교수



### 한송엽(韓松曄)

1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1968년 서울대 전기공학과 전임강사. 1979년 프랑스 로렌공과대학 대학원 졸업(공학박사). 현재, 당 학회 회장 및 서울대학교 공과대학 교수