

외부자계 인가시 적층 고온초전도선재의 과전류 통전특성 측정

이광연, 임형우, 이희준, 차귀수, 이지광\*  
 순천향대학교 전기공학과, 우석대학교 전기공학과\*

Measurement of HTS Stacked Tapes' Properties under Over-Current Condition in External Magnetic Field

K. Y. Lee , H. W. Lim , H. J. Lee , G. S. Cha , J. K. Lee\*  
 Soonchunhyang University , Woosuk University\*

**Abstract** - Rises of current level at power applications, such as transformer, motor, power cable need for using stacked HTS tapes.

In this paper, we measured rises of temperature and tap voltage in 4-stacked HTS tapes under over-current condition. We measured 4-stacked HTS tapes properties under over-current condition with a little temperature rise as well as a large temperature rise. Rises of temperature and tap voltage are measured by using E-type thermocouples and voltage taps, respectively. According to the results of measurement, rises of tap voltage under over-current condition with a large temperature rises depends on rises of temperature.

표 1. 고온초전도선재의 사양

항목	특성
재질	Bi-2223
테이프 두께	0.2 [mm]
테이프 폭	3.1 [mm]
모재	은합금
트위스트 유·무	무
임계전류	68 [A]

1. 서 론

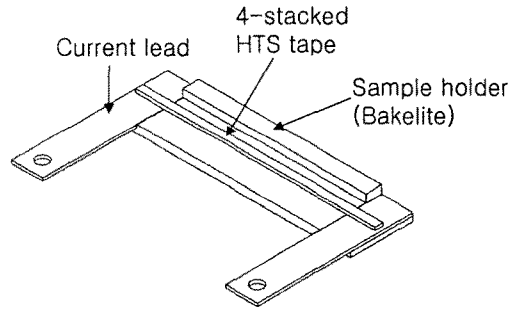
고온초전도선재를 이용한 전력기기가 점차 대용량화됨에 따라 전류분담을 위해 적층선재의 사용에 대한 연구가 진행 중이다. 이러한 적층선재를 이용한 전력기기의 운용에 있어서, 고온초전도선재는 종종 임계전류보다 훨씬 큰 과전류에 노출되는 상황에 직면하게 된다. 이는 선재의 급격한 온도상승과 전압상승에 의한 열화·소손을 야기시킨다.

본 논문에서는 외부자계 인가시 4가닥을 적층한 고온초전도선재에 과전류를 통전시켰을 경우, 작은 온도변화를 보이는 과전류구간과 급격하고 큰 온도변화를 보이는 과전류구간에서의 온도상승과 이때의 탭전압 상승을 측정하였다. 측정에 있어서, 온도상승은 적층된 선재 각 층의 표면에 여러개의 E-type 열전대를 설치하여 측정하였으며, 탭전압의 상승은 선재표면에 설치된 전압탭을 이용하여 측정하였다.

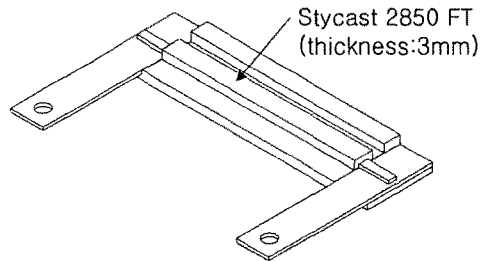
2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 고온초전도선재의 사양과 실험장치들을 표 1과 그림 1에 각각 나타내었다. 그림 1의 a)는 탭전압과 선재표면의 온도를 측정하기 위해 전압탭과 E형 열전대가 설치된 적층 샘플 테이프와 샘플홀더를 나타낸다. E형 열전대들은 선재 표면과의 전기적 절연과 열전달을 위해 전기적 절연특성과 열전달 특성이 우수한 저온 에폭시를 사용하여 얇게 코팅한 후 부착하였다. 그림 1의 b)는 적층 샘플 테이프의 온도상승과 탭전압 상승을 측정하기 위한 절연방식을 나타내며 전류도입부를 제외한 테이프의 부분을 저온에폭시를 사용하여 3mm 두께로 합침하였다.



a) 적층 샘플 테이프와 샘플 홀더



b) 저온에폭시를 이용한 절연방식  
 그림 1. 실험장치 모형도

샘플 테이프가 위치할 공극부분은 약 34mm이고, 온도와 전압측정의 정확도에 영향을 미치는 자계의 균일성을 측정하였다. 그림 2와 그림 3은 각각 외부자계 인가에 사용한 마그넷과 마그넷 장치의 균일도를 나타낸다. 샘플테이프가 위치할 공극 중앙(BM)과 좌우 50mm 지점(BL, BR)에서의 자계의 차이는 약 4% 이하로 거의 균일함을 알 수 있다.

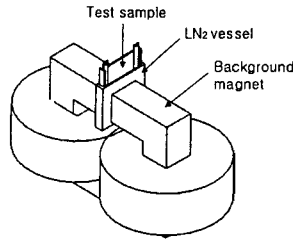


그림 2. 외부자기 인가용 마그넷

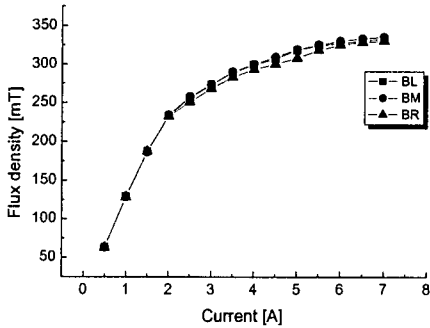


그림 3. 외부자기 인가용 마그넷의 공극 자장

## 2.2 실험방법

적층 샘플 테이프의 과전류 통전특성을 측정하기 위해 각 층의 선재표면에 총 3개의 E형 열전대를 부착하였고 전압측정을 위한 탭전압은 열전대 부착부분과 관련하여 2층과 4층의 선재에 세부분으로 나누어 설치하였다. 실험에 사용된 측정방법과 측정회로는 그림 4에 나타내어진다. 온도측정에 앞서 테이프의 초기온도를 액체질소 온도인 77K에 맞추기 위하여 백금 축온저항체인 Pt-111을 사용하여 측정에 사용된 온도측정모듈의 12 채널(ch2~ch13)을 교정하였다. 또한 적층 샘플 테이프의 과전류를 모의하기 위하여 약 0.3T DC의 외부자계를 인가하였고 이에 따라 적층 샘플테이프의 임계전류는 23A로 감소하였다.

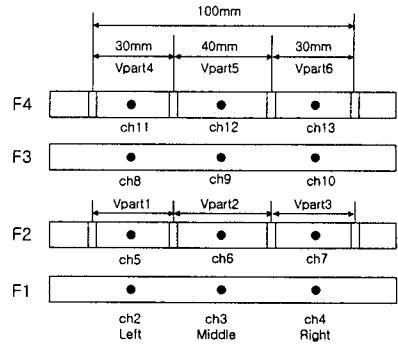
본 실험에서 외부자기와 테이프에 인가된 전류는 모두 직류조건하에서 이루어졌으며, 전류는 임계전류 23A의 0.5배 간격으로 30초씩 동일시간으로 인가하였다. 적층 샘플테이프에 인가한 전류는 shunt를 이용하여 측정하였다. 본 실험의 모든 측정값은 동시에 측정했다.

## 3. 측정결과

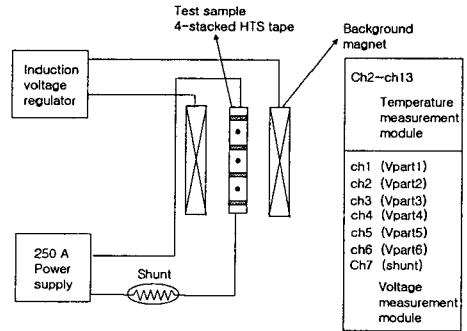
### 3.1 온도변화가 작은 구간에서의 통전특성 (23A~230A : 임계전류의 1~10배)

그림 5는 적층 샘플 테이프에 임계전류보다 1~10배 정도 큰 과전류를 인가한 경우의 측정결과이다. 각 층의 온도상승은 구간마다 차이가 있지만 약 3도~6도 정도의 작은 온도변화가 측정되었다. 이는 전류도입부와 저온에폭시로의 액체질소에 의한 냉각으로 인해 테이프의 온도가 회복되어 작은 온도변화가 측정된 것을 알 수 있다.

그림 6은 온도변화가 작은 구간에서 측정된 2층과 4층 선재의 탭전압을 나타낸다. 2층과 4층에 설치된 6개의 전압탭을 통해 측정된 전압은 거의 동일하게 측정되었다. 이는 탭전압의 증가는 온도의 영향을 받지 않고 인가된 전류에 의해 증가함을 알 수 있다.



● Thermocouple □ Voltage tap  
a) 층별 열전대 · 전압탭 부착위치



b) 측정회로도

그림 4. 열전대 · 전압탭 부착위치와 측정회로

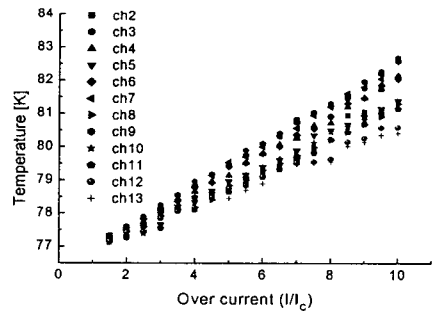


그림 5. 과전류에 따른 온도상승

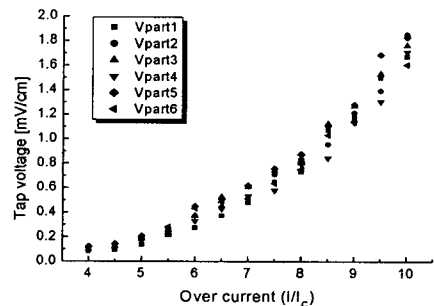


그림 6. 과전류에 따른 탭전압 증가

### 3.2 온도변화가 큰 구간에서의 통전특성 ( 241A 이상 : 임계전류의 10.5배 이상 )

그림 7은 적층 샘플 테이프에 241A의 과전류를 인가하여 임계온도에 도달할 때까지의 각 층에서 측정된 온도상승을 나타낸다. 각 층의 온도상승이 큰 차이를 보이며, 4층 우측 열전대(ch13)의 온도값이 실험에 사용된 고온초전도선재의 임계온도인 110K에 가장 늦게 도달하였다. 이는 절연의 정도나 액체질소에 의한 온도회복이 구간별로 서로 차이가 있음에 기인한다.

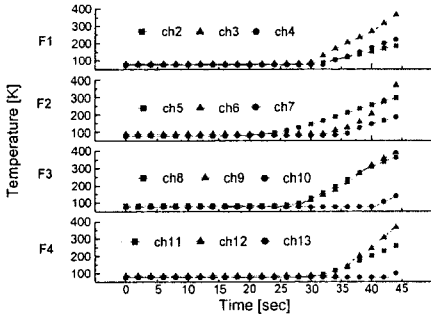


그림 7. 과전류 지속시간에 따른 온도상승(ch13-110K 도달 기준)

그림 8은 적층 샘플테이프의 과전류 지속시간이 탭전압 증가에 미치는 영향을 측정된 결과이다.

2층의 탭전압의 상승이 Vpart2, Vpart1, Vpart3의 순서로 크게 측정되었고, 이는 온도의 상승이 그에 관련된 부분에 부착된 열전대인 ch6, ch5, ch7의 순서로 크게 측정된 것과 일치한다. 4층의 탭전압의 상승이 Vpart5, Vpart4, Vpart6의 순서로 크게 측정되었고, 이는 온도의 상승이 그에 관련된 부분에 부착된 열전대인 ch12, ch11, ch13의 순서로 크게 측정된 것과 일치한다. 또한 ch13의 열전대에서 측정된 온도가 가장 늦게 임계온도에 도달한 것과 같이 탭전압 또한 그에 관련된 부분에 설치된 전압탭 Vpart6이 가장 적은 폭으로 증가함이 측정되었다. 이는 각 층의 구간별 온도상승이 탭전압의 증가에 영향을 미치기 때문이다.

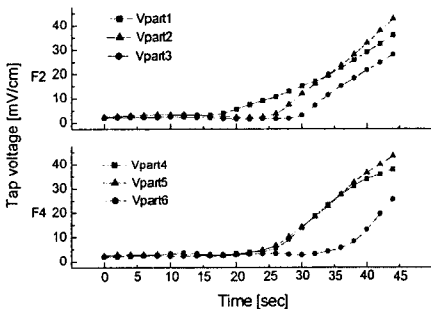


그림 8. 과전류 지속시간에 따른 탭전압 증가

### 4. 결 론

고온초전도선재를 이용한 전력기기가 점차 대용량화됨에 따라 전류분담을 위해 적층선재의 사용에 대한 연구가 진행중이며, 적층된 고온초전도선재는 종종 임계전류보다 훨씬 큰 과전류에 노출되는 상황에 직면하게 된다. 이는 선재의 급격한 온도상승과 전압상승에 의한 열화·소손을 야기시킨다.

본 논문에서는 외부자제 인가시 고온초전도선재 4가닥을 적층한 선재에 임계전류보다 큰 과전류를 통전시켰을 경우의 통전특성으로서, 각 층마다의 온도와 탭전압상승을 측정하였다. 작은 온도상승이 측정된 구간에서의 적층선재의 탭전압 변화는 온도상승에 따른 선재의 특성 변화가 아닌 인가전류의 증가에 의해서 좌우되며, 이 구간의 온도변화는 전류도입부와 적층선재를 절연한 저온에폭시의 열전달에 의해 +3~6도 정도로 작은 온도상승이 측정되었다. 상대적으로 온도가 급격하게 상승한 241A(임계전류의 10.5배)에서의 탭전압은 온도상승이 크게 측정된 구간에서 크게 증가됨이 측정되었다. 이는 큰 온도상승이 측정된 구간의 탭전압의 증가는 그 부분에서의 온도상승과 밀접한 관계가 있음을 나타낸다. 적층선재의 온도특성은 절연물의 종류와 절연정도에 따라 다르게 측정되므로, 보다 정확한 특성 측정을 위해서는 더 많은 측정실험이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Akira Sugawara et al., "Transient electrical and thermal responses of a 2-section BSCCO-2223 coil under overcurrent pulses", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.1848-1851, 2001
- [2] S. Kruger et al., "Loss and Inductance Investigations in a 4-layer Superconducting Prototype Cable Conductor", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.833-836, 1999
- [3] S.P. Ashworth and M. Suenaga, "Local Calorimetry to Measure the ac Losses in Structures of HTS Conductors", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp. 2200-2203, 2001
- [4] 이광연, 임형우, 이희준, 차귀수, 이지광, "고온초전도선재의 과전류 통전특성 측정", 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 263-266, 2002