

## 외부자장하에서 SMES용 HTS도체의 DC 전압 - 전류 특성

이주영\*, 마용호\*, 류경우\*, 김해중\*\*, 성기철\*\*  
전남대학교\*, 한국전기연구원\*\*

### DC Voltage - Current Characteristics of a High Temperature Superconductor for Superconducting Magnetic Energy Storage in External Magnetic Fields

Z.Y. Li\*, Y.H. Ma\*, K. Ryu\*, H.J. Kim\*\*, K.C. Seong\*\*  
Chonnam National Univ.\*, KERI\*\*

**Abstract** - 임계온도가 높아 외부교란에 대하여 대단히 안정한 장점을 지닌 고온초전도체를 이용하여 600 kJ급의 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)용 마그네트를 개발하고 있으며, 이의 설계·제작에 선행하여 선정된 4-ply도체에 대한 N-value 및 임계전류 특성을 상이한 외부자장의 크기 및 방향에 대하여 조사하였다. 그 주요 결과를 요약하면 4-ply도체의 측정된 N-value는 이의 정의에 사용된 전계영역의 범위에 따라 매우 상이하며, 또한 경사자장 ( $\theta = 30^\circ$ )에 대하여 측정된 임계전류는 4-ply도체 면에 수직인 자장성분으로부터 계산된 임계전류와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 1. 서 론

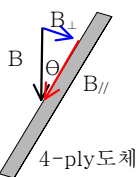
액체헬륨 온도(4.2 K)에서 운전되는 저온초전도선재와 비교하여 운전 온도 (20 K정도)가 비교적 높아 냉각비용이 저렴할 뿐만 아니라 외부교란에 대한 안정성이 매우 우수한 장점 때문에 고온초전도선재를 사용하여 SMES용 마그네트를 개발하려는 시도가 최근 고온초전도선재 기술의 진보에 힘입어 시도되고 있다. 물론 현재 대표적인 고온초전도선재라 할 수 있는 Bi-2223테이프 및 YBCO테이프의 경우, 성능대비 가격이 대표적인 저온초전도선재인 NbTi선재보다 대단히 비싼 관계로 앞서 언급한 장점에도 불구하고 고온초전도 SMES시스템의 상용화를 가로막고 있는 실정이다. 이뿐만 아니라 고온초전도선재는 본질적으로 저온초전도선재와는 달리 기계적으로 대단히 취약한 본질적인 특성으로 인하여 제작과정에서 전기적 특성열화가 쉽게 일어 날 뿐만 아니라 SMES시스템의 에너지저장모드에서도 발생하는 자속유동손실 (flux-flow loss) 특성을 결정짓는 N-value가 본질적으로 작은 문제도 있으며, 임계전류 및 N-value 등 전기적 특성이 외부자장 방향에 따라 매우 상이해지는 이방성으로 인해 마그네트의 특성해석이 매우 난해하다.

따라서 본 연구과제에서 목표로 하고 있는 600 kJ급 고온초전도 SMES시스템의 개발에 선행하여 SMES시스템의 설계 및 제작에서 중요한 특성인 외부자장 아래서 임계전류 및 N-value 특성을 선정된 고온초전도선재인 4-ply도체에 대하여 실험적으로 조사하였으며, 측정된 실험결과에 대해 이론적인 검토·고찰을 하였다.

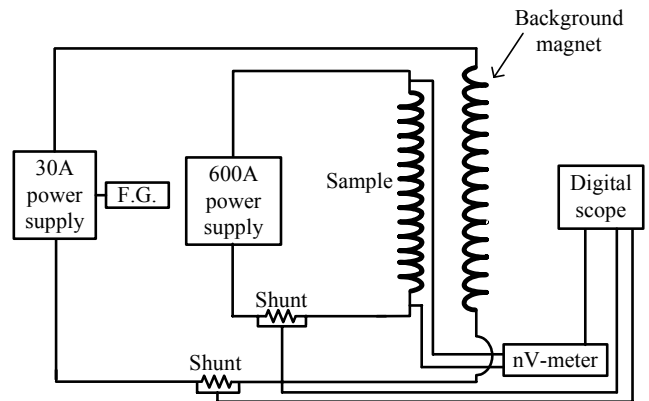
#### 2. 실험 방법

그림 1에는 SMES용 마그네트 제작을 위해 선정된 4-ply도체에 인가된 외부자장에 대한 개략도를 나타내었으며, 도체의 사이즈가 4.57 mm×0.77 mm인 면에 수직, 수평 그리고 임의의 각  $\theta^\circ$ 인 경사자장을 인가한 상태에서 도체의 DC 전압 - 전류 특성을 조사하였다.

그림 2에는 4-ply도체의 DC 전압 - 전류 특성 평가에 사용된 장치의 개략도를 나타내었으며, 그림 2의 장치는 크게 외부자석용 전원 및 도체샘플용 전원, 외부자석, 샘플홀더 및 계측기로 구성되어 있다. 또한 외부자장을 발생시키기 위해서는 30A/ 50V DC전원을 이용하여 철심형 외부자석(background magnet)에 직류전류를 인가하였으며, 철심형 자석의 자석상수는 25 mT/A이며 공극은 45



〈그림 1〉 4-ply도체에 인가된 외부자장.



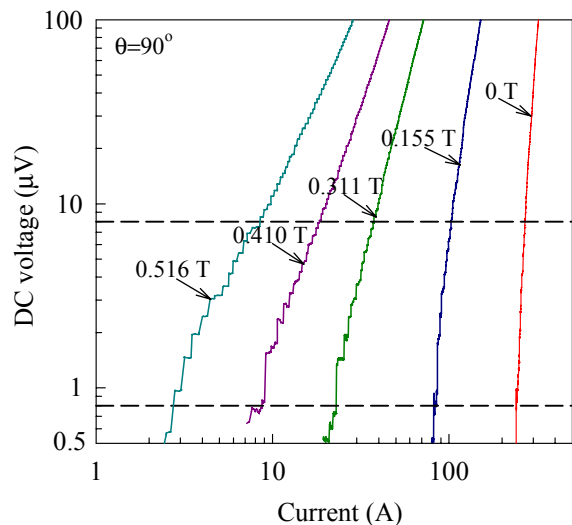
〈그림 2〉 DC 전압 - 전류 특성평가 장치 개략도.

mm×100 mm×8 mm이다. 한편 도체샘플에 직류전류를 흘리기 위해서는 600A/ 8V DC전원을, 도체샘플에 부착된 전압탭 양단의 전압 및 전류는 각각 나노볼트미터 (HP 34420A) 및 센트로 측정하였다. 모든 실험은 액체질소 온도 즉 77 K에서 하였다.

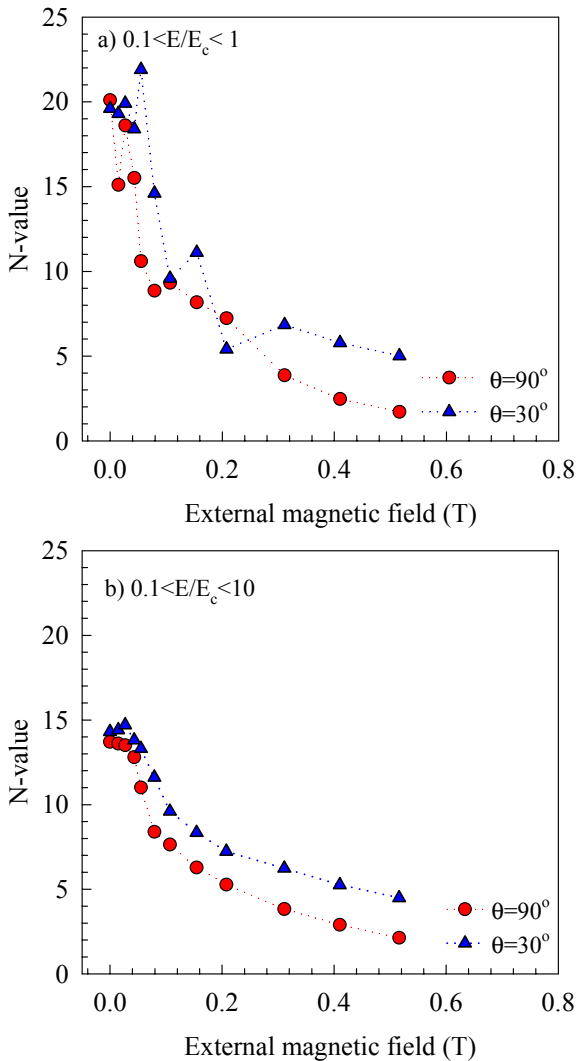
#### 3. 결과 및 고찰

그림 3에는 SMES용 고온초전도도체로 선정된 4-ply도체 면에 수직 (그림 1에서  $\theta=90^\circ$ )한 외부자장을 인가한 상태에서 도체에 부착된 80 mm의 전압탭 양단에서 측정된 DC 전압특성을 나타내었다.

그림 3에서 보는 바와 같이 실험에서 인가된 전 자장영역 (0 mT - 약 500 mT)에 걸쳐 특히 자속유동손실 특성을 결정짓는 파라미터인 N-value의 정의를 위해 중요한 전압범위인 0.8  $\mu$ V (임계전류를 정의하



〈그림 3〉 수직자장하에서 4-ply도체의 DC 전압 - 전류 특성.



〈그림 4〉 4-ply도체의 N-value - 외부자장 특성.

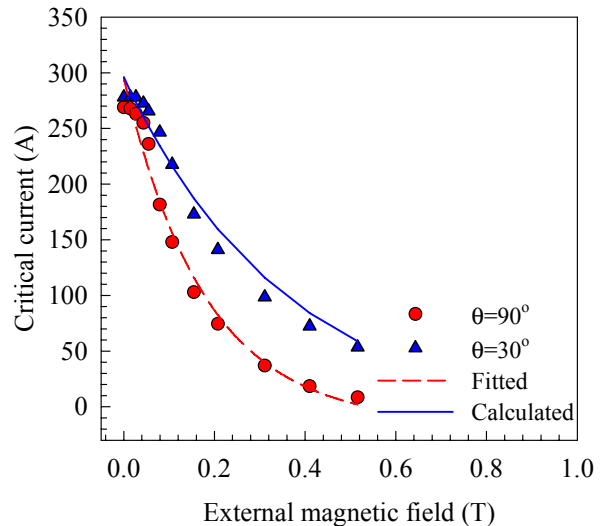
는 전계의 1/10인 즉 0.1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 보다 큰 전압영역에서 외부자장의 크기에 무관하게 노이즈전압의 크기는 측정된 DC 전압과 비교하여 충분히 작음을 알 수 있다.

그림 4에는 4-ply도체 면에 대하여  $\theta$ 가  $30^\circ$  및  $90^\circ$  (그림 1 참조)인 외부자장을 인가한 상태에서 측정된 그림 3와 같은 DC 전압 - 전류 데이터로부터 구한 N-value를 상이한 외부자장에 대하여 나타내었다[1]. 그림 a)에는 N-value 정의에 보편적으로 사용되고 있는 전계범위인  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm} \leq E \leq 1 \mu\text{V}/\text{cm}$  구간의 DC 전압 - 전류 데이터를 사용한 경우 N-value를, 그림 b)에는 본 연구에서 새로이 제안하는 전계범위인  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm} \leq E \leq 10 \mu\text{V}/\text{cm}$  구간의 DC 전압 - 전류 데이터를 사용한 경우 N-value를 각각 나타내었다.

그림 4에서 보는 바와 같이 N-value 정의에 보편적으로 사용되고 있는 전계범위인  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm} \leq E \leq 1 \mu\text{V}/\text{cm}$  구간의 DC 전압 - 전류 데이터를 이용하여 구한 N-value는  $\theta$  (그림 1 참조)에 관계없이 외부자장의 크기가 증가함에 따라 규칙적으로 감소하지 않고 불규칙적인 특성을 보이는 반면 본 연구에서 제안한 전계범위인  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm} \leq E \leq 10 \mu\text{V}/\text{cm}$  구간의 DC 전압 - 전류 데이터를 이용한 그림 4 b)의 N-value는  $\theta$  (그림 1 참조)에 관계없이 외부자장의 크기가 증가함에 따라 규칙적으로 감소하는 특성을 지님을 볼 수 있다.

그림 5에는 4-ply도체 면에 대하여  $\theta$ 가  $30^\circ$  및  $90^\circ$  (그림 1 참조)인 외부자장을 인가한 상태에서 측정된 임계전류를 나타내었다. 그림 5에서 점선은  $\theta$ 가  $90^\circ$ 인 외부자장을 인가하여 측정된 임계전류를 fitting한 식 (1)으로부터 계산된 임계전류를, 실선은  $\theta$ 가  $30^\circ$ 인 외부자장 (그림 1 참조)을 4-ply도체 면에 수직한 자장성분 ( $B_\perp$ ) 및 수평한 자장성분 ( $B_\parallel$ )으로 분해한 후, 수직한 자장성분 ( $B_\perp$ )만을 식(1)에 대입하여 계산한 임계전류를 각각 나타낸다.

$$I_c(B_\perp) = y_0 + Ae^{-b(B_\perp)} + Ce^{-d(B_\perp)} + Ge^{-h(B_\perp)}, \quad (1)$$



〈그림 5〉 4-ply도체의 임계전류 - 외부자장 특성.

여기서  $y_0$ 는 -15.7, A는 105.5, b는 5.54, C는 104.3, d는 5.55, G는 101.8, 그리고 h는 5.55이다.

그림 5에서 보는 바와 같이  $\theta$ 가  $90^\circ$ 인 외부자장에 대해 측정된 4-ply도체의 임계전류는 외부자장이 대단히 작은 영역을 제외하고는 식(1)으로부터 비교적 잘 fitting되고 있음을 볼 수 있다. 또한  $\theta$ 가  $30^\circ$ 인 외부자장에 대해 측정된 임계전류는 4-ply도체 면에 수직한 자장성분 ( $B_\perp$ )과 식(1)으로부터 계산된 임계전류와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

SMES용 고온초전도도체로 선정된 4-ply도체에 상이한 외부자장을 인가한 상태에서 마그네트의 설계·제작에서 중요한 자속유동손실 및 임계전류를 실험적으로 측정하였으며 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) N-value를 정의하는데 보편적으로 이용되는 전계범위 ( $0.1 \mu\text{V}/\text{cm} \leq E \leq 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ )에서 구한 N-value는 외부자장의 크기가 증가에 따라 대단히 불규칙적인 특성을 보이는 반면 새로이 제안된 전계범위 ( $0.1 \mu\text{V}/\text{cm} \leq E \leq 10 \mu\text{V}/\text{cm}$ )에서 구한 N-value는 외부자장의 크기가 증가에도 불구하고 규칙적인 특성을 보임을 알 수 있다.
- 2)  $\theta$ 가  $30^\circ$ 인 외부자장에 대하여 측정된 임계전류는 4-ply도체 면에 수직한 자장성분과  $\theta$ 가  $90^\circ$ 인 외부자장에 대한 fitting함수로부터 계산된 임계전류와 비교적 잘 일치한다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다

#### [참고 문헌]

- [1] 류경우, 이주영, 마용호, 최병주, 박권배, 오일성 “고온초전도체의 DC 전압 - 전류특성,” 한국초전도·저온공학회는문지, 8권, 3호, pp.49-53, 2006.