

# 실용고온초전도테이프의 교류손실에 대한 Round-robin테스트

論 文

53B-7-5

## Round-robin Test on AC Losses in a Technical High-Tc Superconducting Tape

柳 兪 佑\* · 崔 炳 柱\*\* · 黃 時 堯\*\*\*

(Kyung-Woo Ryu · Byoung-Ju Choi · Si-Dole Hwang)

**Abstract** - In this work the AC loss measurement setup based on an iron core background magnet, not used in a conventional one, has been successfully developed. To prove its validity, a round-robin test for the same Bi-2223 tape sample among three institutes has been done. The results show that the self-field and magnetization losses from the developed setup well agree with the losses measured at two other institutes of Korea Basic Science Institute and Yokohama National University. The measured magnetization losses for parallel or perpendicular fields can be well predicted from the slab model or the strip model for a filamentary region. However the magnetization losses for longitudinal fields can be rather predicted by the slab model for a decoupled filament. The self-field losses are well explained by the Norris ellipse model.

**Key Words** : Calorimetric method, Magnetization method, Magnetization loss, Poynting vector method, Self-field loss.

### 1. 서 론

성능대비 가격은 기존 구리도체보다 매우 비싸지만 공학적 임계전류밀도가  $100 \text{ A/mm}^2$  이상인 특성이 우수한 Bi-2223 테이프를 수 km까지 장선화(長線化)에 성공함에 따라 이를 응용한 고온초전도전력기기의 상용화에 대한 연구·개발이 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 실용고온초전도테이프를 사용한 전력기기가 상품화되기 위해서는 먼저 기술적 측면에서 비교 우위에 있어야 할 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 유리해야만 한다. 특히 경제성에 크게 영향을 미치는 중요한 인자 중 하나가 바로 초전도체의 비가역적인 자기적 특성에 기인하는 교류손실이다.

교류응용에서 초전도체에서 발생하는 손실은 구리도체의 저항성 손실과는 달리 기존 전력기기 등에서 자기회로로 많이 이용되고 있는 강자성체에서 발생하는 자기적 히스테리시스 손실과 동일한 손실로서 측정이 매우 난해하며, 강자성체의 손실도 고가의 장비를 활용해야만 측정이 가능할 뿐만 아니라 측정 주파수 또한 상용주파수에 비해 매우 낮다. 이러한 이유로 전력응용에서 실제로 중요한 상용주파수에서 초전도체의 교류손실을 평가하는데는 현재까지도 상품화된 장비가 없으며, 각 기관에서 개발된 측정장비에 의존하는 것이 보편적이다. 따라서 상이한 평가방법 및 장치로부터 측정된 교류

손실에 대한 신뢰성 검증은 필수적이며, 일 예를 들면 다수의 세계적 우수 기관에서 동일한 저온초전도(NbTi)선에 대해 동일 실험조건에서 측정된 교류손실을 상호 비교함으로써 신뢰성을 검증한 좋은 연구·개발 프로그램(VAMAS: Versailles Project on Advanced Materials and Standards)의 사례도 있다 [1].

이에 근거하여 본 연구실(이하 CNU: Chonnam National Univ.)에서 개발된 실용고온초전도테이프의 교류손실 평가 장치로부터 측정된 손실에 대한 신뢰성 검증을 위해 국내의 기초과학지원연구원(이하 KBSI: Korea Basic Science Institute)과 국외의 일본 요코하마국립대(이하 YNU: Yokohama National Univ.)의 협조로 수행한 동일 샘플에 대해 동일 실험조건에서 측정한 교류손실(이하 round-robin테스트)을 상호 비교·검토함으로써 CNU에서 개발된 교류손실 평가 장치의 신뢰성을 검증하였다.

### 2. 측정관련 이론

교류손실을 측정하는 방법에는 열적 방법과 전기적 방법을 들 수 있으며, 열적 방법은 전자기적인 노이즈에 강한 장점이 있는 반면 1회 측정에 소요되는 시간이 길고, 측정감도가 상대적으로 나쁜 단점이 있다. 반면 전기적 방법은 1회 측정에 소요되는 시간이 매우 짧고, 측정감도가 우수한 장점이 있지만 전자기적인 주변환경에 매우 민감하게 영향을 받는 단점이 있다.

또한 열적 방법에는 증발법과 온도법으로 나눌 수 있고, 교류손실 중에서도 특히 중요한 자화손실을 측정하는데 자주

\* 正 會 員 : 全南大 電氣工學科 副教授 · 工學博士

\*\* 正 會 員 : 徐羅伐大學 高速電氣鐵道科 助教授 · 工學博士

\*\*\* 正 會 員 : 漢電電力研究員 責任研究員

接受日字 : 2004年 3月 22日

最終完了 : 2004年 4月 25日

이용되는 전기적 방법에는 직류 및 저주파수 영역에서 적용 가능한 VSM법(vibrating sample method) 및 SQUID법(superconducting quantum interference device)이 있으며, 또한 상용주파수 영역에서 적용 가능한 픽업코일법 및 Hall-probe법이 있다. 픽업코일법은 비교적 큰 체적에 걸쳐 발생하는 평균 자화손실을 측정하는 데 적합한 반면 Hall-probe법은 매우 국부적 체적에서 발생하는 자화손실을 측정하는 데 적합하다[2]. 따라서 상용주파수에서 다량의 초전도체를 사용해야 하는 전력응용의 특성을 고려하면 픽업코일법이 가장 적합하다고 할 수 있다.

먼저 실용고온초전도데이프의 교류손실 중 기본적인 손실인 자기자계손실을 측정하는 방법에는 앞서 언급한 바와 같이 전기적 방법과 열적 방법이 있으며, CNU 및 YNU에서 실제로 사용한 전기적 방법에 대해서는 3절에서 상세히 논하기로 하고, 여기서는 열적 방법의 하나로써 KBSI에서 사용한 온도법에 대해 고찰하기로 한다. 온도법은 외부자장이 없는 상태에서 고온초전도데이프에 교류전류만 흘릴 때 발생하는 손실에 의해서 야기되는 온도상승을 측정하여 자기자계손실을 구하는 방법으로, 그림 1에는 실제 측정을 위하여 KBSI에서 제작한 샘플홀더의 개략도를 나타내었다. 또한 실용고온초전도데이프 단위길이 당 1사이클동안의 자기자계손실( $Q_s$ )은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s = \frac{8x\Delta T}{L^2 f} \quad (J/m \cdot cycle) \quad (1)$$

여기서  $x$ 는 고온초전도데이프의 열전도도(thermal conductance;  $W \cdot m/K$ )를,  $\Delta T$ 는 테이프 중앙부와 양단에서 측정된 온도차를,  $L$ 은 테이프 양단사이의 길이를 각각 나타낸다.

다음으로 변압기처럼 비교적 높은 자장아래서 운전되는 고온초전도응용에서 지배적인 교류손실로 작용하는 자화손실을 측정하는 픽업코일법에는 다시 자화법과 Poynting벡터법으로 나눌 수 있고, CNU에서 실제 사용한 자화법에 대해서는 3절에서 상세히 논하기로 하고, 여기서는 YNU에서 사용한 포인팅벡터법에 대해 고찰하기로 한다. Poynting벡터로부터 1사이클 당 폐곡면(S) 내부에서 발생하는 손실( $q$ )은 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \oint_T \oint_S \vec{E} \times \vec{H} \cdot \vec{ds} dt \quad (J/cycle) \quad (2)$$

여기서는  $T$ 는 전자장의 주기를,  $\vec{E}$  및  $\vec{H}$ 는 각각 전자장을,

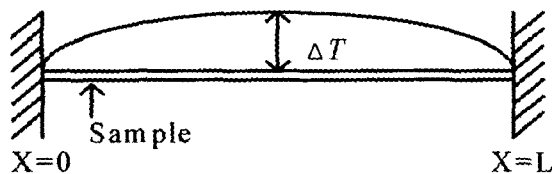


그림 1 KBSI의 샘플홀더.

Fig. 1. Sample holder of the KBSI.

그리고  $\vec{ds}$ 는 폐곡면에 수직이며 외부방향인 미소면적벡터를 각각 나타낸다.

그림 2에는 Poynting벡터로부터 실용고온초전도데이프의 자화손실을 측정하기 위하여 YNU에서 실제로 제작한 샘플홀더의 개략도를 나타내었다. 그림 2에서 A, B, C, D, E 및 F는 직육면체의 좌, 우, 상, 하, 전 및 후면을,  $w$ ,  $\ell$  및  $h$ 는 직육면체의 너비, 길이 및 높이를,  $r$ 은 픽업코일 중 B면 상에 있는 부분의 길이를,  $\theta$ 는  $y$ 축과 선분( $r$ )이 이루는 각도를, 그리고  $\vec{H}$ 는  $y$ 축 방향으로 인가된 외부자장(균일 자장)을 각각 나타낸다.

또한 그림 2에서 직육면체의 폐곡면 내부에 있는 고온초전도데이프의 자화손실은 샘플에 전류를 흘리지 않은 상태에서 외부교류자장만 인가하였을 때 직육면체의 폐곡면 내부에서 발생하는 손실(식(2))이 된다. 식(2)을 그림 2의 직육면체의 폐곡면에 적용하기 위해 폐곡면(S)에 대한 면적적분을 먼저 고찰하기로 한다. 먼저 C면 및 D면에서 면적적분은  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  및  $\vec{ds}$  사이의 고유한 특성으로부터 각각 0으로 되고,  $z$ -축 방향으로 무한히 긴 샘플을 사용하게 되면 E면 및 F면에서 각각의 면적적분은 크기가 같고 부호는 서로 반대로 되어 그들의 합이 0으로 된다. 따라서 직육면체의 폐곡면(S)에 대한 면적적분은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$\begin{aligned} \oint_S \vec{E} \times \vec{H} \cdot \vec{ds} &= \int_A \vec{E} \times \vec{H} \cdot \vec{ds} \\ &+ \int_B \vec{E} \times \vec{H} \cdot \vec{ds} \\ &= \frac{\ell^2 h}{r^2 N} \epsilon V H, \\ \epsilon &\equiv \frac{V_A + V_B}{V} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\ell$ ,  $h$  및  $r$ 은 그림 2에서와 같고,  $N$  및  $V$ 는 그림 2에서 픽업코일의 턴수 및 전압을,  $V_A$  및  $V_B$ 는 1턴의 픽업코일 중에서 각각의 A면, B면 상에 있는 선분( $r$ )에서 유도된 전압을 각각 나타낸다.

따라서 그림 2에서 직육면체 폐곡면 내부에 있는 고온초전도데이프에서 발생하는 초전도체 단위체적 당 1사이클동안의 자화손실( $Q$ )은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

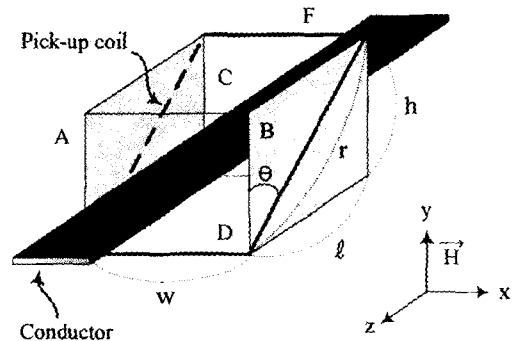


그림 2 YNU의 샘플홀더.

Fig. 2. Sample holder of the YNU.

$$Q = \frac{q}{v} \tag{4}$$

$$= \frac{\ell^2 h}{v r^2 N} \varepsilon \oint_T V H dt \quad (J/m^3 \cdot cycle)$$

여기서  $v$ 는 폐곡면 내부에 있는 초전도체만의 체적을 나타낸다. 또한 그림 2에서  $\theta$ 가  $90^\circ$ 인 특별한 경우(즉  $r = \ell, \varepsilon = 1$ )는 식(4)는 식(5)와 같이 간단히 나타낼 수 있다[3].

$$Q = \frac{h}{v N} \oint_T V H dt \tag{5}$$

### 3. 실험 샘플 및 방법

본 round-robin 테스트에 사용된 샘플은 현재로서도 기술적으로는 전력기기 등에 응용이 충분히 가능한 실용고온초전도체인 Bi-2223테이프를 그 대상으로 하였으며 그림 3에는 CNU 및 YNU의 자화손실 측정에 실제로 사용된 샘플의 사진을, 표 1에는 그 주요사양을 각각 나타내었다.

#### 3.1 자기자계 손실

전기적 방법으로 측정되는 고온초전도체의 단위길이당 1사이클동안의 자기자계손실( $Q_s$ )은 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_s = \oint_T i(t)v(t)dt/l \quad (J/m \cdot cycle) \tag{6}$$

여기서  $T$ 는 교류전류의 주기를,  $i(t)$ 는 테이프에 흐르는 교류전류를,  $v(t)$  및  $l$ 은 전압리드의 납땜부사이의 전압 및 길이를 각각 나타낸다.

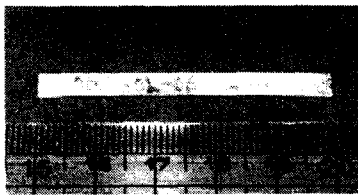


그림 3 시험샘플.  
Fig. 3. Test sample.

표 1 시험샘플의 사양

Table 1 Specifications of the test sample

Bi-2223/Ag/AgMgNi	27%/43%/30%
테이프 폭×두께	3.9×0.3 mm <sup>2</sup>
코아 폭×두께	3.7×0.26 mm <sup>2</sup>
필라멘트 수	37
트위스트피치	∞

### 3.2 자화손실

그림 4에는 고온초전도체의 자화손실 측정에 사용된 평가장치의 개략도를 나타내었다. 그림 4에서 30 A/50 V 전원(DC-1 kHz)을 함수발생기로 제어하여, 자석상수가 공심자석과 비교해 약 10배정도 큰 10.7 mT/A, 공극이 45 mm×175 mm×10 mm인 철심자석에 정현파의 전류를 인가한 후, 그림 5에서와 같이 참고문헌[4]에 근거하여 길이 50 mm로 절단된 그림 3의 고온초전도체를 장착한 샘플홀더를 철심자석의 공극에 배치하고, 수평·수직 및 종방향의 자장을 인가하여 실용고온초전도체의 자화곡선을 측정하였다[4].

또한 픽업코일로부터 자화곡선을 측정할 때 식(7)에서 보는 바와 같이 불필요한 외부자장은 그림 5의 샘플홀더에 함께 장착된 가변 상쇄코일로 충분히 상쇄시켰다.

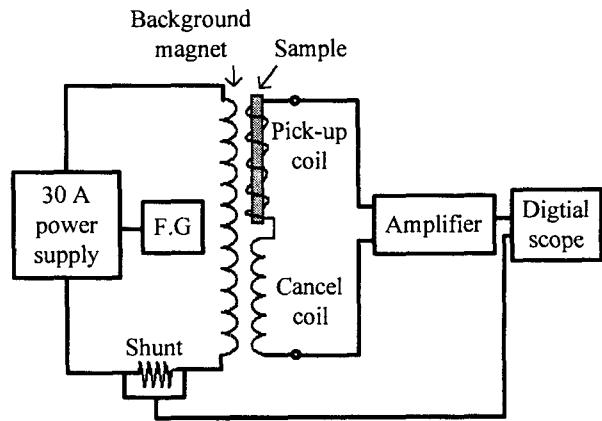
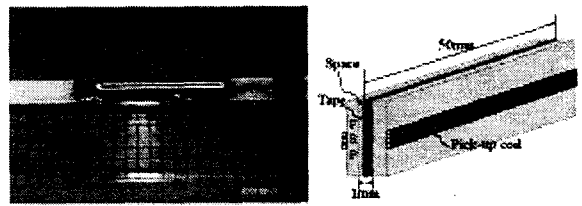
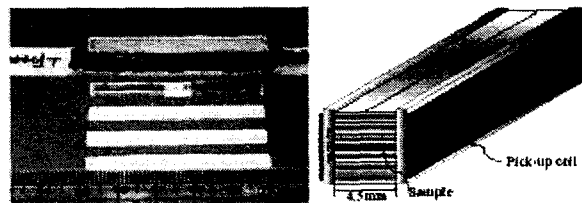


그림 4 자화손실 평가장치.

Fig. 4. Experimental setup for magnetization loss.



a) 수평·종자장 검출 샘플홀더



b) 수직자장용 샘플홀더

그림 5 자화손실 측정용 샘플홀더.

Fig. 5. Sample holder for magnetization loss measurement.

표 2 시험방법의 상이점 요약

Table 2 Summary

CNU	YNU
자화법	Poynting 벡터법
철심자석	공심자석
직접적분법	Lock-in 앰프법

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (7)$$

여기서  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율을,  $H$ 는 외부자장(균일 자장)을,  $M$ 은 외부자장에 의해 유도된 고온초전도체 단위체적 당의 자기쌍극자모멘트로 정의되는 자화를 각각 나타낸다. 또한 측정된 자화로부터 초전도체 단위체적 당 1사이클 동안의 자화손실 ( $Q$ )은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$Q = \oint_T \mu_0 M dH \quad (J/m^3 \cdot cycle) \quad (8)$$

여기서  $T$ 는 외부자장의 주기를 나타내며, 나머지 파라미터는 식(7)에서와 동일하다. 또한 표 2에는 CNU 및 YNU에서 그림 3의 동일 샘플에 대한 자화손실을 측정하는데 있어서 중요한 상이점을 요약하여 나타내었다.

4. 실험 결과 및 검토

4.1 자기자계 손실

그림 6에는 표 1의 실용고온초전도테이프에 대하여 CNU 및 YNU에서는 전기적 방법, KBSI에서는 온도법으로 각각 측정된 자기자계손실을 나타내었으며, 그림 6에서 실선은 테이프형상 고온초전도체의 자기자계손실에 대한 이론검토에 자주 사용되고 있는 타원형 모델로부터 계산된 손실을 나타낸다[5].

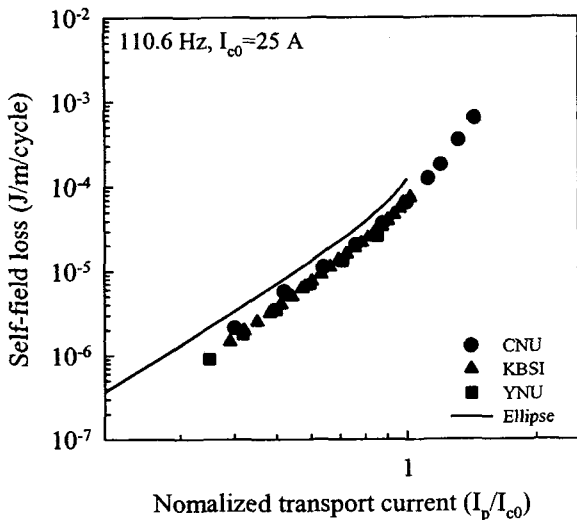


그림 6 상이한 세 기관에서 측정된 자기자계손실.  
Fig. 6. Self-field losses measured at three different institutes.

그림 6으로부터 보는 바와 같이 세 기관에서 측정된 자기자계손실은 평가방법 및 장치가 상이함에도 불구하고 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 이는 CNU에서 개발한 전기적 방법에 의한 자기자계손실 평가법은 신뢰성이 우수함을 의미한다.

4.2 자화손실

그림 7에는 그림 3의 시험샘플에 전류를 흘리지 않은 상태에서 외부자장의 크기, 주파수 및 자장 인가방향을 달리하여 CNU에서 측정된 자화손실 결과를 나타내었으며, 그림 7에서 자화손실은 필라멘트영역(또는 core라고도 함)의 단위체적당 손실로 나타낸 것이다.

그림 7의 결과로부터 측정된 자화손실은 외부자장의 주파수에 의존하지 않는 반면, 외부자장의 세기 및 인가방향에는 대단히 의존하는 것을 볼 수 있다. 또한 측정된 손실에 대한 이론 검토를 위해 사용된 필라멘트영역을 하나의 초전도체로

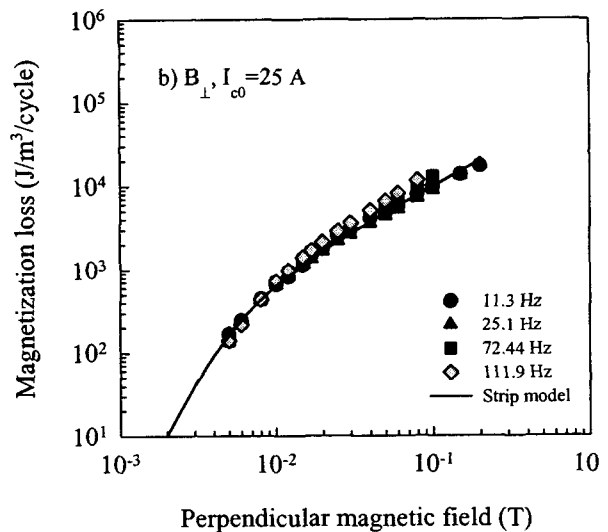
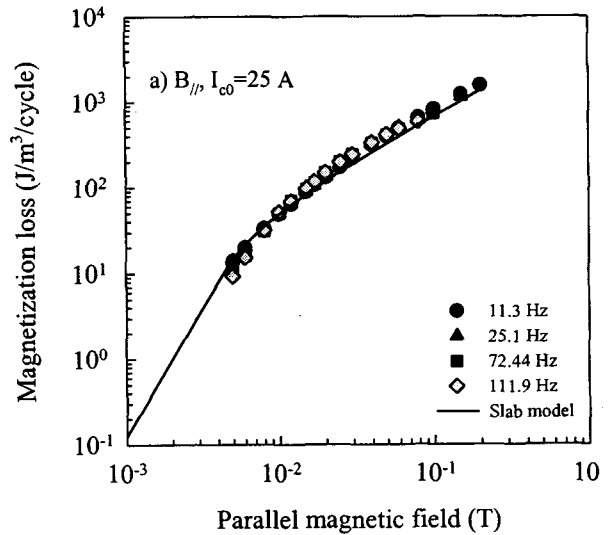


그림 7 수평·수직자장에 대한 CNU 자화손실.  
Fig. 7. Magnetization losses for parallel and perpendicular fields measured at CNU.

가정한 slab모델(식(9)) 및 strip모델(식(10))에 근거하여 계산된 자화손실은 측정된 손실과도 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

$$Q = \frac{2B_m^3}{3\mu_0 B_p} ; B_p > B_m$$

$$Q = \frac{2B_p B_m}{\mu_0} \left(1 - \frac{2B_p}{3B_m}\right) ; B_p < B_m \quad (9)$$

$$B_p = \mu_0 J_c a \quad (T)$$

$$Q = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \frac{\pi w}{2\beta d} \left( \frac{2}{\beta} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta \right)$$

$$\beta = \frac{B_m}{B_{ch}} ; B_{ch} = \frac{\mu_0 J_c d}{\pi} \quad (T) \quad (10)$$

여기서  $B_m$ 은 외부자장의 진폭을,  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율을,  $J_c$ 는 임계전류밀도를,  $2a$ 는 slab의 두께를,  $w$ 는 strip의 폭을, 그리고  $d$ 는 strip의 두께를 각각 나타낸다.

또한 그림 8에는 Bi-2223테이프의 길이방향으로 외부자장(종자장)을 인가하여 측정된 자화손실을 나타내었으며, 그림 8의 결과로부터 수평·수직자장에 대한 자화손실의 경우와 마찬가지로 종자장에 대한 자화손실도 주파수에는 의존하지 않고, 코어를 하나의 초전도체로 가정한 slab모델(식9)로부터 계산된 손실(점선)보다는 각각의 필라멘트를 초전도체로 가정한 slab모델(식9)로부터 계산된 손실(실선)과 더욱 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 수평·수직자장과는 달리 종자장에 대해서는 각각의 초전도필라멘트는 서로서로 전자기적으로 분리되어 있음을 의미한다.

그림 9에는 그림 3의 동일샘플에 대해 수평자장을 인가하여 외부자장 주파수를 각각 11.3 Hz 및 111.9 Hz로 했을

때, CNU에서는 자화법으로 그리고 YNU에서는 Poynting 벡터법으로 각각 측정된 자화손실을 나타내었으며, 그림 10에는 수직자장에 대하여 그림 9에서와 동일한 주파수에 대해 양측에서 측정된 자화손실을 나타내었다.

그림 9 및 그림 10의 결과로부터 양측에서 측정된 자화손실은 표 2에서 지정한 바와 같이 평가방법 및 장치의 상이함에도 불구하고 그림 6의 자기자계손실처럼 서로서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 실용고온초전도체이프의 자화손실 측정 시, 샘플에 인가하는 외부자장용 자석으로서 철심자석은 사용해서는 안 된다는 일반적인 통념을 깨뜨린 결과로서 신호대비 노이즈가 충분히 큰 경우에 한해서는 YNU의 공심자석 대신 CNU의 철심자석을 사용해도 좋음을 의미한다. 또한 공심대신 철심의 사용은 자석의 소형화뿐만 아니라 여자용 전원의 소형화를 초래하여 손실 측정장치의 소형화 및 우수한 경제성 등 많은 장점을 제공하게 된다.

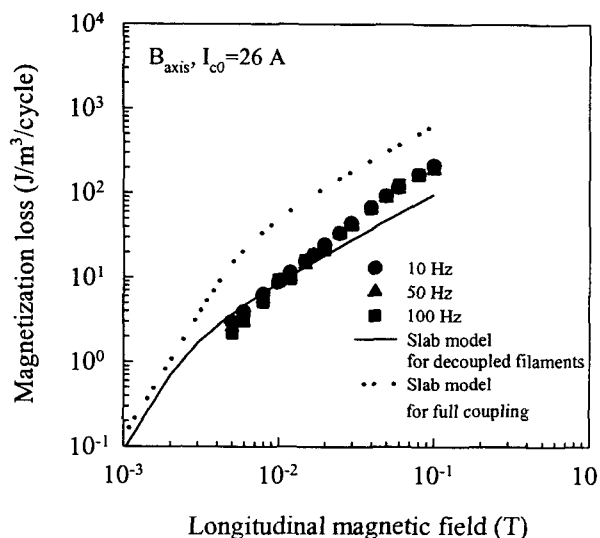


그림 8 종자장에 대한 CNU 자화손실.  
Fig. 8. Magnetization losses for longitudinal fields measured at CNU.

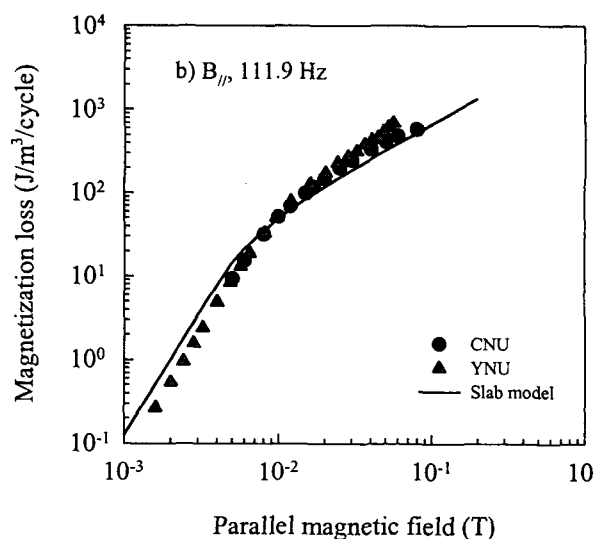
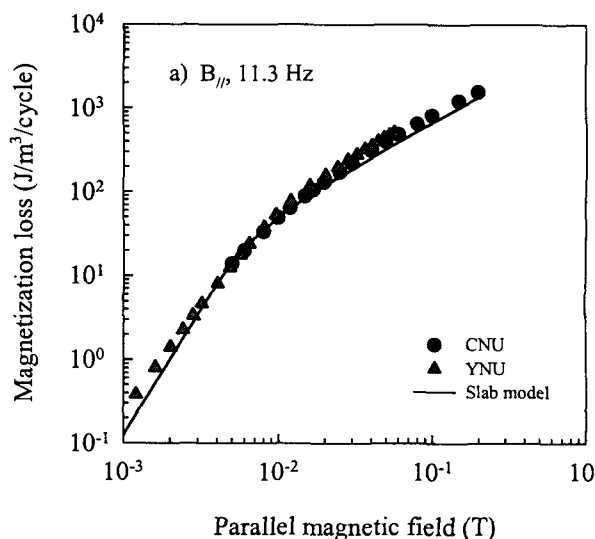


그림 9 수평자장에 대한 CNU 및 YNU 자화손실.  
Fig. 9. Magnetization losses for parallel fields measured at both institutes.

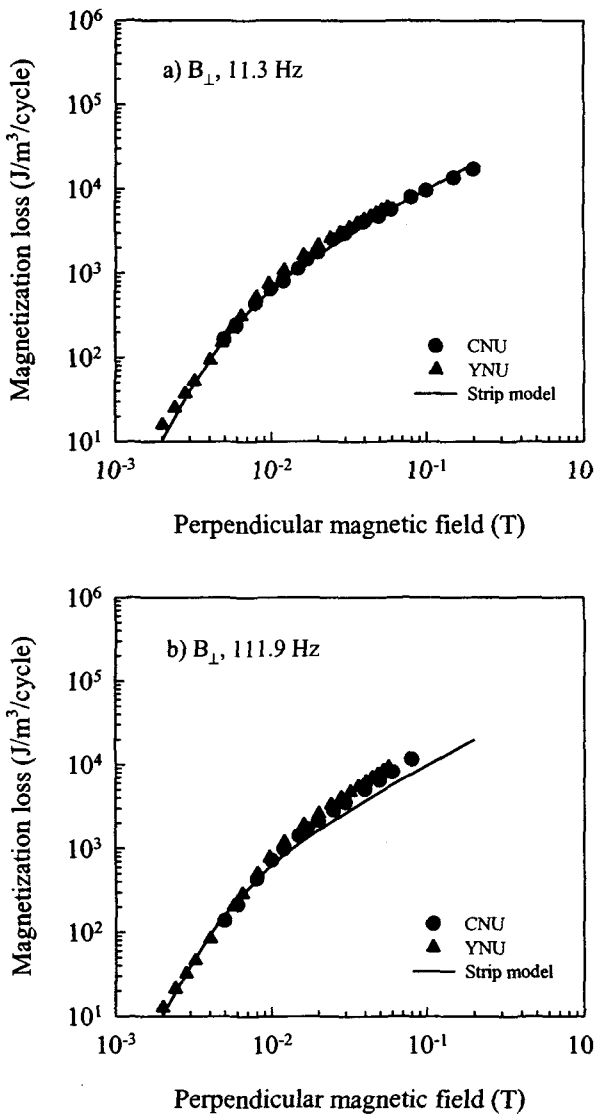


그림 10 수직자장에 대한 CNU 및 YNU 자화손실.  
 Fig. 10. Magnetization losses for perpendicular fields measured at both institutes.

5. 결 론

이상의 실용고온초전도테이프에 대해 CNU, KBSI 및 YNU에서 수행한 round-robin 테스트와 관련하여 중요한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 각 기관의 평가방법 및 장치가 상이함에도 불구하고 측정된 자기자계손실 및 자화손실은 서로 잘 일치하였다.
- 2) 따라서 CNU에서 개발된 자기자계손실 및 자화손실 평가기술에 대한 신뢰성은 우수하다는 것이 입증되었으며, 특히 자화손실 평가장치에서 외부자장용 자석으로서 지금까지 급기사항으로 되어있었던 철심자석의 사용가능성은 평가장치의 소형화 및 우수한 경제성을 제공할 뿐만 아니라 상호협력 연구의 훌륭한 성과라고 할 수 있다.

마지막으로 본 연구를 위해 협조를 해 주신 양 기관 (KBSI 및 YNU)에 진심으로 감사를 드립니다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] C. Schmidt, K. Itoh and H. Wada, "Second VAMAS a.c. loss measurement intercomparison: a.c. magnetization measurement of hysteresis and coupling losses in NbTi multifilamentary strands", *Cryogenics*, vol. 37, no. 2, pp.77-89, 1997.
- [2] 김현준, "실용고온초전도테이프의 자화손실 특성", 석사학위논문, pp.14-22, 2004.
- [3] K. Miyamoto, N. Amemiya, N. Banno, M. Torii, E. Hatasa, E. Mizushima, T. Nakagawa, H. Mukai and K. Ohmatsu, "Measurement and FEM analysis of magnetization loss in HTS tapes", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2, pp.770-773, 1999.
- [4] 류경우, 한형주, 최병주, 나완수, 주진호, "적층 Bi-2223 도체의 자화손실 특성", *대한전기학회논문지*, 51B권, 10호, pp.554-558, 2002.
- [5] K. Ryu, K. B. Park, G. Cha, "Effect of the neighboring tape's ac currents on transport current loss of a Bi-2223 tape", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 11, no. 1, pp.2220-2223, 2001.

## 저 자 소 개



### 류 경 우 (柳 炘 佑)

1962년 2월 10일생. 1983년 인하대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공학박). 1986년~1995년 한국전기연구소 초전도응용 연구사업팀 선임연구원. 1996년~현재 전남대학교 전기공학과 부교수.  
Tel : 062-530-1748  
Fax : 062-530-1749  
E-mail : kwryu@chonnam.ac.kr



### 황 시 돌 (黃 時 覿)

1981년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업. 1986년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년 12월 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 신에너지그룹 책임연구원  
Tel : 042-865-5972  
Fax : 042-865-5804  
E-mail : sdhwang@kepri.re.kr



### 최 병 주 (崔 炳 柱)

1958년 12월 12일생. 1981년 영남대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 일본 Kyushu Univ. 공학연구과 졸업(공학박). 1983년~1986년 현대중전기연구소연구원. 1986년~1996년 한국전기연구소초전도응용연구사업팀 선임연구원. 1997~현재 서라벌대학 고속전기철도과 조교수  
Tel : 054-770-3703  
Fax : 054-741-5429  
E-mail : bjchoi@sorabol.ac.kr