

## 임계전류 및 전류분포가 다중테이프 초전도도체의 교류손실 측정에 미치는 영향

### Influence of Tape's Critical Currents and Current Distributions on AC Loss Measurement in a Multi-tape Conductor

류경우\*, 마용호\*\*, 최병주\*\*\*, 황시돌\*\*\*\*

Kyung Woo Ryu\*, Y. H. Ma\*\*, Byoung Ju Choi\*\*\*, S. D. Hwang\*\*\*\*

**Abstract:** The AC loss is an important issue in the design of the high temperature superconductor (HTS) power cables, which consist of a number of Bi 2223 tapes wound on a former. In the cables, the tapes have different critical currents intrinsically. And they are electrically connected to each other and current leads. These make loss measurements considerably complex, especially for short samples of laboratory size.

In this work we have prepared a multi-tape conductor composed of Bi-2223 tapes. The ac losses of the conductor have experimentally investigated. The loss tests indicate that the effect of tapes critical currents on AC loss measurement in the multi-tape conductor is negligible only if currents in the tapes flow uniformly. Moreover, the measured losses of the conductor are in good agreement with the sum of the transport losses in the tapes. However, in the case of non-uniform current distributions, the measured AC losses considerably depend on the current distribution parameter of the positioning of a voltage lead. Thus special cautions should be needed for the measurement of the true AC losses in the short power cable samples.

**Key Words:** AC loss measurement, non-uniform current distribution, short power cable, uneven critical current.

#### 1. 서 론

초전도도체를 상용주파수의 전력응용에 이용할 때 필연적으로 발생하는 자기적 히스테리시스 현상에 기인하는 교류손실(AC loss)은 고온초전도(HTS) 전력케이블의 상용화에 있어서 매우 중요한 요소 중 하나이며, 기존 구리도체의 저항손실 측정기술과 비교하여 대단히 전문적인 지식과 주의가 요구되고 있다.

교류손실 측정방법에는 크게 열적 방법과 전기적 방법이 있고, 특히 전기적 방법을 이용한 교류손실 평가법에 대한 많은 연구가 이루어져 온 결과 상당한 발전을 한 것도 사실이다. 그러나 전력케이블의 교류손실 저감 기술개발을 위해 필수적인 다수본의 고온초전도테이프로 구성되는 수 m의 짧은 실험실 규모의 모델케이블에 대한 교류손실 평가기술은 케이블 제조 중에 발생할 수 있는 고온초전도테이프의 불균일한 임계전류 분포, 불균등한 전류분포, 전압리드의 형상(접촉위치 및 배열) 및 전압리드에 유도되는 유도성 전압의 상쇄시 필수적인 상쇄코일 전압의 위상오차 등 복잡성으로 인하여, 현재까지도 세계적으로 완전하게 정립되어 있지 못한 실정이다[1-3].

따라서 본 연구에서는 실험실 규모의 짧은 모델케이블의 교류손실 측정에 미치는 이들 요인들의 영향을 조사하기 위하여, 다수본의 고온초전도테이프로 구성된 샘플(다중테이프 초전도도체)을 제작하였으며, 각 테이프의 임계전류 분포 및 전류분포 등을 변화시켰을 때 다중테이프 초전도도체의 교류손실 평가에 미치는 영향에 대해 실험적으로 조사·검토하였다.

#### 2. 실험 샘플 및 방법

본 연구에 사용한 고온초전도테이프는 은(Ag)합금모재(matrix)의 다심 필라멘트형상의 Bi-2223테이프이며, 그 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

다중테이프 도체를 구성하는 각 테이프의 임계전류와 전류분포가 다중테이프 도체의 교류손실 측정에 미치는 영향을 조사하기 위하여 특히 3본의 Bi-2223테이프로 구성되는 도체 샘플을 제작하였으며, 이를 Fig. 1에 나타내었다. 특히 도체 샘플 도중에서 발생할 수 있는 전류 재분배로 인한 복잡한 문제를 배제하기 위하여 각각의 테이프사이에는 전기적으로 서로 절연시켰다. 또한, 테이프 표면으로부터 높이가 서로 상이한 전압리드 3종(0 mm, 5 mm, 10mm 전압리드)을 부착하였다.

샘플 통전을 위한 전원으로는 함수발생기로 제어되는 300 A급의 전원을 사용하였으며, 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 각각의 테이프에 흐르는 전류 크기는 외부 리액터의 임피던스를 변화시켜 제어하였고, Fig. 2의 상쇄코일을 이용한 보상시 위상오차를 최소화하기 위해 동일 리액터를 사용하여 각 테이프에 흐르는 전류 위상을 도체 전류 위상과 일치시켰다. 또한 교류손실은 도체 전류와 Fig. 1의 전압리드 전압을 곱한 후 1주기 동안 적분하여 구하였으며, 모든 실험은 액체질소 온도에서 행하였다.

\* 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과 부교수

\*\* 학생회원 : 전남대학교 전기공학과 석사과정

\*\*\* 정 회 원 : 서라벌대학 고속전기철도과 부교수

\*\*\*\* 정 회 원 : 한전전력연구원 책임연구원

원고접수 : 2005년 2월 21일

심사완료 : 2005년 3월 18일

Table 1. Specification of a Bi-2223 tape.

Bi-2223/Ag/Ag합금	38%/40%/22%
테이프의 폭과 두께	3.1 mm × 0.17 mm
필라멘트 영역의 폭과 두께	3.0 mm × 0.11 mm
필라멘트의 두께	0.006 - 0.012 mm
트위스트 피치	∞ mm
필라멘트의 수	55

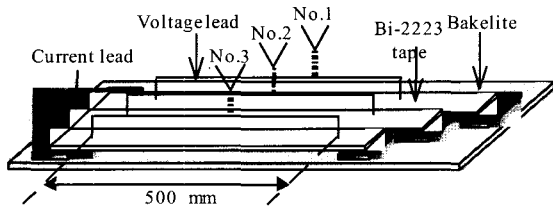


Fig. 1. Schematic of the multi-tape conductor sample.

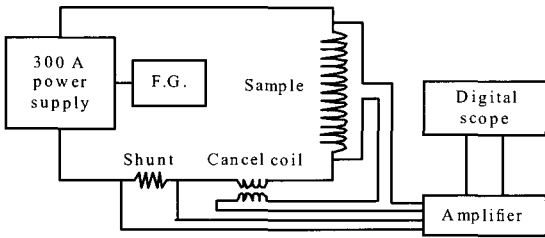


Fig. 2. Experimental setup.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 테이프의 임계전류 영향

먼저, 각각의 Bi-2223테이프에 균등 전류가 흐를 때 다중테이프 도체의 임계전류와 교류손실에 대하여 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 Fig. 1의 No. 1, No. 2, 및 No. 3 전압리드에 대해 측정된 도체 임계전류와 각 테이프의 임계전류 나타내었다. Fig. 3(a)의 결과로부터, 다중테이프 도체의 임계전류는 Bi-2223테이프 임계전류의 불균일성 때문에 전압리드의 접촉위치에 매우 의존하게 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 3(b)에는 50 Hz에서 No.2-테이프에 부착한 전압리드에 대해 그 배열을 다르게 하였을 때, 측정된 교류손실을 나타내었으며, 0 mm-전압리드에 대한 손실은 5 mm-전압리드 및 10 mm-전압리드에 대한 결과보다 대단히 작았다. 특히 10 mm-전압리드에서 그 높이(10 mm)는 단일 고온초전도테이프의 경우에서와 같이 도체 폭의 1/2의 약 3배에 해당한다[4-6]. 따라서 Fig. 3(b)의 결과로부터, 다중테이프 도체의 교류손실을 정확하게 평가하기 위해 모든 실험에서는 10 mm-전압리드를 사용하여 측정하였다.

Fig. 4는 각 테이프에 흐르는 전류가 균등할 때, Fig. 1의 접촉위치가 상이한 전압리드에 대해 측정된 도체의 교류손실을 나타내었으며, 동시에 대표적인 두 임계전류( $I_c$ )에 대한 Norris-모델에 기초한 계산된 손실을 도시하였다[7]. 여기서 점선은  $I_c$ 가 146 A, 실선은  $I_c$ 가 217 A인 경우이다. 도체의 임계전류 차이가 크에도 불구하고, 3개의 전압리드에 대해 측정된 교류손실은 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 다중테

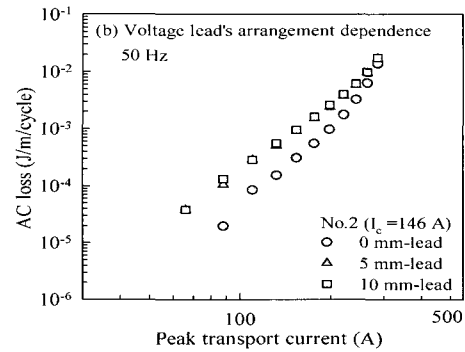
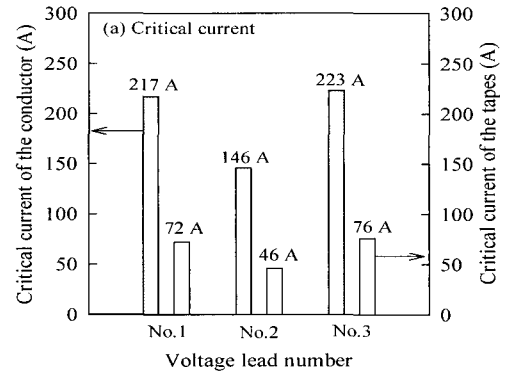


Fig. 3. (a) Critical current and (b) voltage leads arrangement dependence of the AC losses in the multi-tape conductor. The tapes critical currents are not uniform.

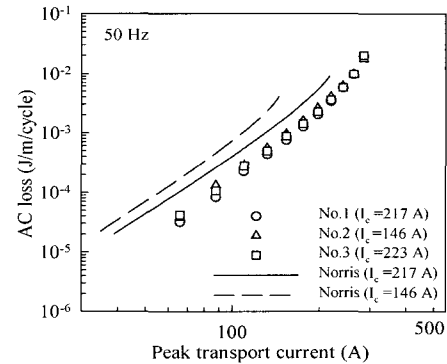


Fig. 4. AC loss vs. peak transport current for different contact positions using the 10 mm-voltage lead. The tapes critical currents are not uniform.

이프 도체의 교류손실은 테이프의 불균등한 임계전류에 그다지 영향을 받지 않음을 의미한다.

Fig. 4로부터 측정된 교류손실은 146 A 및 217 A의 두 임계전류에 대해 계산한 결과보다 상당히 작음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 1의 다중테이프 도체의 경우, Table 1에 나타낸 테이프 폭의 3배에 해당하는 9.3 mm의 폭을 가진 단일 테이프로 간단히 취급할 수 없음을 의미한다. 또한 Fig. 4의 측정결과에 대한 진위를 확인하기 위하여 동일 조건 아래서 각 테이프의 자기장손실 및 통전손실을 측정하였으며, 그들의 합을 No. 1의 전압리드에 대해 측정된 도체 교류손실과 함께 Fig. 5에 나타내었다.

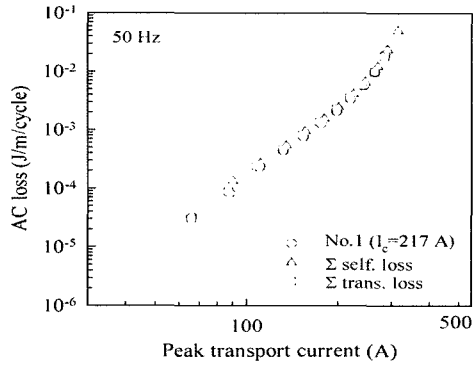


Fig. 5. AC loss vs. peak transport current using the 10 mm-voltage lead. The tapes critical currents are not uniform.

Fig. 5로부터 다중테이프 도체의 측정된 교류손실은 자기자계손실의 합 및 통전손실의 합과 아주 잘 일치함을 볼 수 있고, 이는 Fig. 4의 측정된 도체 교류손실이 사실임을 암시하고 있다.

### 3.2 전류분포 영향

테이프의 전류분포가 교류손실 측정에 미치는 영향을 조사하기 위하여 임계전류가 균등한 테이프로 구성된 균등 전류분포의 다중테이프 도체에 대하여 교류손실을 측정하였고, 접촉 위치가 상이한 3개의 전압리드에 대해 측정된 교류손실과 Norris-모델로부터 계산한 결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다.

Fig. 4에서 보인바와 같이, 측정된 교류손실은 전압리드의 접촉위치와 관계없이 잘 일치하며, 계산된 손실과는 잘 일치하지 않는다. Fig. 4 및 Fig. 6(a)으로부터 테이프의 임계전류가 다중테이프 도체의 교류손실 평가에 미치는 영향은 각 테이프에 흐르는 전류가 균등하다면 무시할 수 있음을 알 수 있다. 또한 각 테이프의 통전손실 합(Σtrans. loss)을 Fig. 6(a)에 함께 도시하였으며, Fig. 5에서처럼 측정된 도체 교류손실은 통전손실의 합과 잘 일치함도 볼 수 있다.

다중테이프 도체의 교류손실이 히스테리손실임을 보이기 위하여 손실의 주파수 의존성을 조사한 결과를 Fig. 6(b)에 나타내었으며, 측정된 교류손실은 타 연구에서처럼 주파수에 의존하지 않음을 확인하였다[8].

마지막으로, 각각의 테이프에 흐르는 전류가 불균등할 경우에 있어서의 도체의 교류손실을 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7(a)에는 전류분포 파라미터( $\gamma = i_2(\text{or } i_3)/i_1$ : 여기서,  $i_1, i_2, i_3$ 는 각 테이프에 흐르는 전류)가 1.3인 경우, No.1, No.2 및 No.3 전압리드로부터 측정된 도체 교류손실을 나타내었으며, 비교를 위해 각 테이프의 통전전류 합도 함께 도시하였다. Fig. 7(a)의 결과로부터 다중테이프 도체의 교류손실은 통전전류가 작은 범위에서는 서로 잘 일치하는 반면 전류가 증가함에 따라 전압리드의 접촉위치에 상당히 의존하는 것을 볼 수 있다.

No.2 테이프에 부착한 전압리드를 이용하여 측정된 Fig. 7(b)에는 상이한 전류분포 파라미터에 대하여 교류손실을 나타내었으며, 측정된 교류손실은 각 테이프에 흐르는 전류의 불균등 때문에 서로 상이함을 볼 수 있다. 따라서 이상의 Fig. 7의 결과로부터 특히 테이프에 흐르는 전류가 불균등할 경우 다중테이프 도체의 교류손실을 정확하게 측정하기 위해서는 특별한 주의가 요구됨을 알 수 있다.

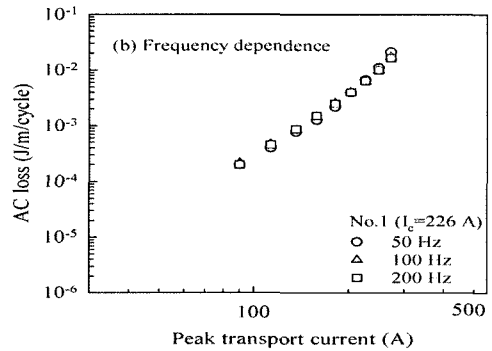
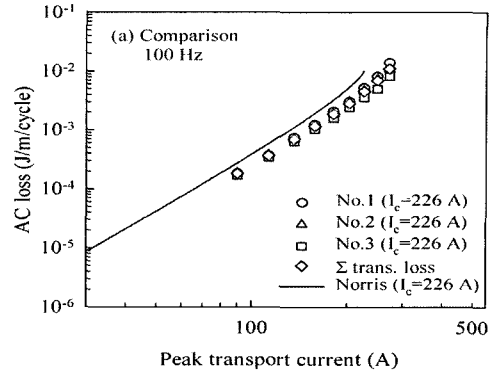


Fig. 6. (a) Comparison and (b) frequency dependence of the AC losses in the multi-tape conductor using the 10 mm-voltage lead. The tapes critical currents are uniform.

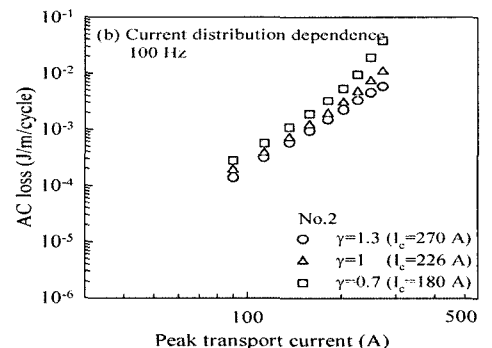
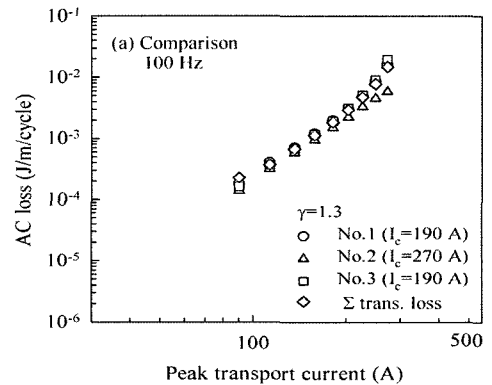


Fig. 7. (a) Comparison and (b) current distribution dependence of the AC losses in the multi-tape conductor using the 10 mm-voltage lead. The tapes critical currents are uniform.

4. 결 론

테이프의 임계전류 및 전류분포가 다중테이프 도체의 교류손실 평가에 미치는 영향을 조사하기 위하여 다수본의 Bi-2223테이프로 구성된 도체 샘플을 제작하여, 전력케이블에서 예상되는 실제 상황을 고려하여 도체의 교류손실을 평가하였으며, 그 주요 결과를 요약하면 아래와 같다.

다중테이프 도체를 구성하는 각 테이프에 흐르는 전류가 균등한 경우는 테이프 임계전류가 도체 교류손실 측정치에 미치는 영향은 무시 가능하며, 측정된 도체의 교류손실은 각 테이프의 통전손실의 합과 잘 일치한다. 이는 Fig. 1의 다중테이프 도체는 9.3 mm의 폭을 가진 단일 테이프로 간단히 취급할 수 없음을 의미한다. 그러나 테이프의 전류분포가 불균일하게 되는 경우 측정된 도체의 교류손실은 전압리드의 접촉위치 및 전류분포 파라미터에 매우 의존하게 되며, 따라서 특히 다중테이프 도체처럼 짧은 모델케이블의 교류손실을 정확하게 평가하기 위해서는 특별한 주의가 요구됨을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] C. M. Friend, D. M. Spiller, L. Le Lay, S. A. Awan, and T. P. Beales, "Using electrical measurements to determine the self-field AC losses of cable models", *Physica C* 309, pp.187-196, 1998.

[2] A. Kuhle, C. Traholt, S. K. Olsen, C. Rasmussen, and O. Tonnesen, "Measuring AC-loss in high temperature superconducting cable-conductor using four probe methods", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2, pp.1169-1172, 1999.

[3] J. W. Lue, J. A. Demko, L. Dresner, R. L. Hughey, U. Sinha, J.C. Tolbert, and S. K. Olsen, "AC losses of prototype HTS transmission cables", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*", vol. 9, no. 2, pp.416-419, 1999.

[4] S. Fleshler, L. T. Cronis, G. E. Conway, and A. P. Malozemoff, "Measurement of the ac power loss of (Bi,Pb)2Sr2Ca2Cu3Ox composite tapes using the transport technique", *Appl. Phys. Lett.* 67 (21), 20, pp.3189-3191, 1995.

[5] H. Eckelmann, M. Daumling, M. Quilitz, W. Goldacker, "AC transport current losses of multifilamentary Bi(2223) tapes with varying filament geometries", *Physica C* 295, pp.198-208, 1998.

[6] S. Y. Choi, D. S. Kim, W. S. Nah, J. H. Joo, J. H. Jung, and K. Ryu, "AC transport loss in stacked HTS tapes", *Physica C* 372-376,

pp.1746-1749, 2002.

[7] W. T. Norris, "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of tin sheets", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 3, pp.489-507, 1930.

[8] K. Ryu, K. B. Park, G. Cha, "Effect of the neighboring tapes 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



류경우(柳旻佑)

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



마용호(馬勇虎)

1980년 6월 12일생, 2003년 7월 중국 연변대학교 전자정보통신학과 졸업, 2004년 3월 전남대학교 전기공학과 석사과정.



최병주(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 현대중진기연구소연구원, 1986년~1996년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원, 1997~현재 서라벌대학 고속전기철도과 부교수.



황시돌(黃時玟)

1957년 1월 12일생, 1981년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업, 1986년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1980년 12월 한국전력공사 입사, 현재 한국전력공사 전력연구원 신에너지그룹 책임연구원.