

# 도체의 배열 및 전류방향이 코일형 한류소자의 교류손실 특성에 미치는 영향

## Effect of Conductor's Arrangement and Current Direction on AC Loss Characteristics of a Fault Current Limiting Coil

마용호\*, 류경우\*\*, 박권배\*\*\*, 오일성\*\*\*\*

Y. H. Ma\*, Kyung-Woo Ryu\*\*, K. B. Park\*\*\*, Il-Sung Oh\*\*\*\*

**Abstract:** AC loss of a high  $T_c$  superconducting conductor has a strong influence on the economic viability of a superconducting fault current limiter, which offers an attractive means to limit short circuit current in the power systems. Therefore, several samples of the fault current limiting coils have been fabricated and the effect of conductor's arrangement and current direction on AC loss characteristics investigated experimentally. The test result shows that the AC losses measured in the fault current limiting coils depend significantly on the conductor's arrangement. Furthermore, they are also considerably influenced by the conductor's current direction. The AC loss measured in the face-to-face arrangement is smallest among the fault current limiting coil samples.

**Key Words:** AC loss, conductor's arrangement, current direction, fault current limiter.

### 1. 서 론

상용주파수의 전력응용에 초전도체를 사용할 경우, 필연적으로 일어나는 자기적 히스테리시스현상 때문에 초전도체에는 교류손실이 발생하게 되며, 이는 초전도 전력응용기기의 상용화에 있어서 경제성과 관련된 매우 중요한 요소이다. 특히 교류손실은 기존 전선재료인 구리 또는 알루미늄의 저항손실과는 달리 전압리드의 배열에 따라서도 그 측정값이 달라지는 등의 매우 난해하여, 현재까지도 완전하게 정립되어 있지 못한 실정이다[1-2]. 또한 동일 기능의 응용이라고 할지라도 초전도도체의 기하학적 배열 및 전류방향 등에 따라서도 교류손실이 대단히 달라진다. 따라서 이와 같은 손실을 저감시켜, 전력응용기기의 충분한 경제성을 확보하기 위해서는 교류손실에 대한 부단한 연구가 요구되고 있다.

초전도응용(케이블, 변압기 등등) 중에서도 냉동기의 주된 열 부하로서 작용하는 교류손실 및 용기(cryostat)손실의 측면에서 가장 우수한 전력응용이라 할 수 있는 전력계통의 사고 시 발생하는 큰 사고전류

를 대단히 짧은 시간 (1/2사이클 이내)에 제한 가능한 초전도한류기에 대한 상용화 연구가 활발히 진행되고 있다[3].

따라서 본 연구에서는 임계전류밀도가  $\sim 100 \text{ A/mm}^2$ 인 Bi-2223테이프를 이용하여, 그 배열을 달리한 코일형상의 한류소자 샘플을 제작하였으며, 선행연구에서 확립된 전압리드(Diagonal리드)를 활용하여 한류소자의 교류손실 특성을 실험적으로 조사하였다[4]. 또한 측정된 교류손실로부터 코일형 한류소자의 교류손실 저감방안에 대해서도 검토를 하였다.

### 2. 실험 샘플 및 방법

본 연구에 사용된 고온초전도테이프는 은(Ag) 모재의 다심 필라멘트형상의 Bi-2223테이프로 기계적 강도 보강을 위해 Bi-2223테이프 양면에 얇은 SUS테이프를 부착한 것으로, 그 주요사양을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1에는 Table 1의 테이프 도체를 사용해 그 배열을 달리한 코일형 한류소자 샘플의 개략도를 나타내었다. Fig. 1 a)는 도체를 원통형의 FRP구조물(직경 88 mm) 표면에 나선형으로 배열한 샘플(이하 Helical: 단층배열)을, b)에는 테이프 도체의 가장자리가 서로 접하도록 배열한 샘플(이하 Edge-to-edge: 단층배열)을, c)에는 테이프 도체의 넓은 면이 서로 접하도록 배열한 샘플(Face-to-face: 2층배열)을 각각 나타내었다.

Fig. 2에는 Fig. 1과 같은 코일형 한류소자의 교류손실 특성 조사에 이용된 시험장치의 개략도를 나타내었다. 특히 교류손실 평가에서 매우 중요한 전압리드는 다양한 배열에 대해 선행적으로 수행한 연구결과에 근거하여 유도성 전압이 가장 작으면서도 손실성 자속을 충분히 픽업할 수 있는 구조인 즉 FRP 표면을 따라 배열한 Diagonal리드를 사용하였다. 또한 이러한 전압리드로부터 교류손실을 측정할 때 한류소자에 흐르는 전류와 90도 위상차가 나는 불필요한 유도성 전압은 공심 토로이드형상의 Rogowski코일을 이용하여 충분히 상쇄하였으며, 마지막으로 교류손실은 전압리드로부터 측정된 전압과 한류소자에 흐르는 전류로부터 구하였으며[5], 본 연구에서 모든 실험은 액체질소 온도인 77 K에서 하였다.

Table 1. Specifications of a high strength HTS tape.

테이프의 조성	Bi-2223/Ag/SUS
테이프의 폭과 두께	4.1 mm × 0.3 mm
필라멘트 영역의 폭과 두께	4.0 mm × 0.19 mm
필라멘트의 폭과 두께	0.4 mm × 0.02 mm
필라멘트의 수	55
트위스트 피치	∞ mm

\* 학생회원: 전남대학교 전기공학과 대학원 석사과정

\*\* 정 회 원: 전남대학교 전기공학과 부교수

\*\*\* 정 회 원: LS 산전 전력연구소

\*\*\*\*정 회 원: LS 산전 전력연구소

원고접수:2005년 08월 24일

심사완료:2005년 09월 08일

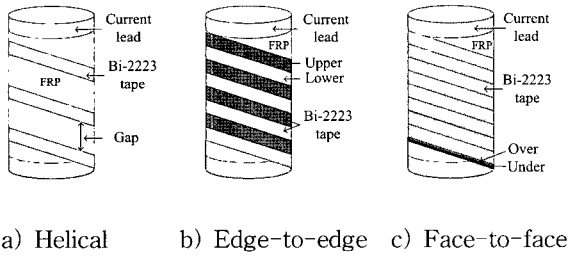


Fig. 1. Fault current limiting coil sample.

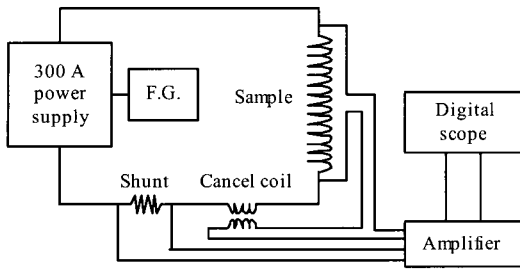


Fig. 2. Experimental setup.

### 3. 실험 결과 및 토론

먼저 다양한 도체의 배열 및 전류방향에 대해 측정된 교류손실과 비교·검토를 위해 Fig. 3에는 본 실험에서 사용된 도체인 Table 1의 고온초전도테이프를 일직선상으로 배열하였을 때, 측정된 손실을 나타내었다. Fig. 3에서 기호  $\bullet$ ,  $\blacktriangle$  및  $\blacksquare$ 는 전류의 주파수를 10, 50 및 100 Hz로 했을 때 측정된 자기자계손실을,  $I_{c0}$ 는 자기자계에서 측정된 임계전류를 각각 나타낸다. Fig. 3의 결과로부터 수많은 연구결과에서와 동일하게 측정된 자기자계손실은 주파수에 의존하지 않으며, 동시에 타원형 Norris식으로부터 계산된 손실과도 잘 일치하는 것을 알 수 있다 [6-7].

Fig. 4에는 코일형상 중에서도 가장 간단한 구조인 즉 도체를 원통형의 구조물 위에 나선형으로 단순히 배열한 샘플(Helical)에 대해 측정된 교류손실을 나타내었다. Fig. 4에서 기호  $\bullet$ ,  $\blacktriangle$  및  $\blacksquare$ 는 인접한 턴사이의 갭을 0, 3 및 14 mm로 각각 달리했을 때 측정된 손실을, 실선은 Norris식으로부터 계산된 자기자계손실을,  $I_c$ 는 Helical배열 아래서 측정된 임계전류를 각각 나타낸다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 턴사이의 갭이 커짐에 따라서 측정된 교류손실은 현격히 감소하여 궁극적으로는 도체의 자기자계손실 레벨과 거의 같아지는 것을 볼 수 있다. 이는 Helical형상의 코일형 한류소자의 교류손실을 저감시키기 위해서는 소자의 크기가 다소 커지는 단점이 있지만 턴 사이의 갭을 크게 해 줄 필요가 있음을 의미한다.

Fig. 5에는 edge-to-edge배열에 대해 측정된 교류손실을 나타내었다. Fig. 5에서 a)는 도체의 전류방향이 동일한 경우(Conventional), b)는 전류방향이 서로 반대인 경우(Bifilar), 상(Upper)·하부(Lower)의 도체 및 총 길이(3 m)의 도체(Total)에 대해 측정된 각각의 손실을 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 측정된 교류손실은 도체의 위치에 관계없이 모두 동일함을 알

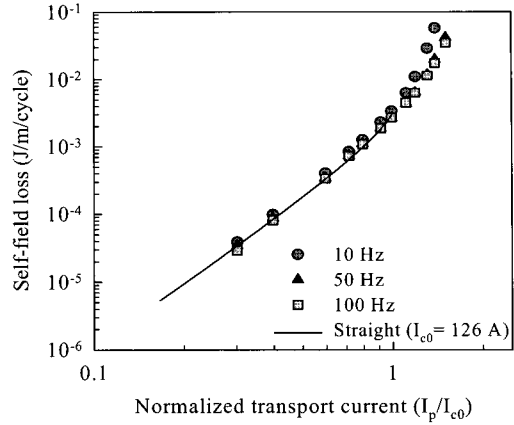


Fig. 3. Self-field losses of the high  $T_c$  Superconducting tape.

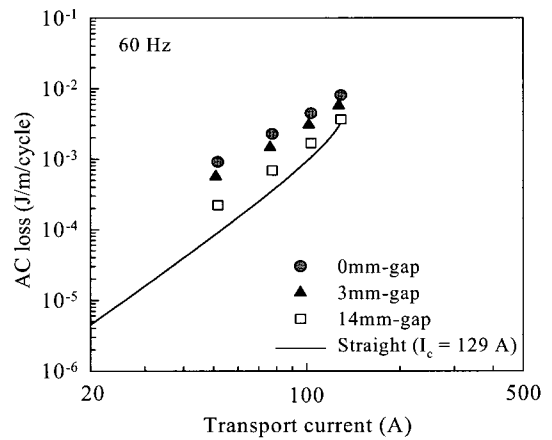


Fig. 4. AC losses in the helical arrangement.

수 있다. 또한 도체 전류방향이 동일한 경우 측정된 교류손실은 계산된 자기자계손실(실선)과 비교해 매우 큰 반면 전류방향이 서로 반대인 경우에 따라서 이들 둘 사이의 차가 현격히 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 동일한 edge-to-edge배열이라 할지라도 전류방향에 따라서 코일형 한류소자의 교류손실은 매우 상이해짐을 의미한다.

Fig. 6에는 face-to-face배열에 대해 측정된 교류손실을 나타내었다. Fig. 6에서 a)는 도체의 전류방향이 동일한 경우(Conventional), 상(Over)·하부(Under)의 도체 및 총 길이(3 m)의 도체(Total)에 대해 측정된 각각의 손실을, b)는 전류방향이 서로 반대인 경우(Bifilar)에 대해 측정된 결과를 각각 나타내었다. Fig. 6 a)에서 보는 바와 같이 측정된 교류손실은 도체의 위치에 관계없이 모두 동일함과 동시에, 이는 계산된 자기자계손실(실선)과 비교해 매우 큰 것을 볼 수 있다. 반면 전류방향이 서로 반대인 Fig. 6 b)의 경우, 측정된 교류손실은 도체의 위치에 매우 의존함을 볼 수 있다. 특히 하부(Under) 도체의 교류손실은 상부(Over) 및 총 길이의 도체(Total) 손실보다도 매우 작을 뿐만 아니라 이들 모두는 계산된 자기자계손실보다는 최소한 작음을 알 수 있다. 이상의 Fig. 6의 결과는 동일한 face-to-face배열의 경우라 할지라도 도체의 전류방향만을 달리함으로써 코일형 한류소자의 교류손실을 대단히 저감할 수 있음을 의미한다.

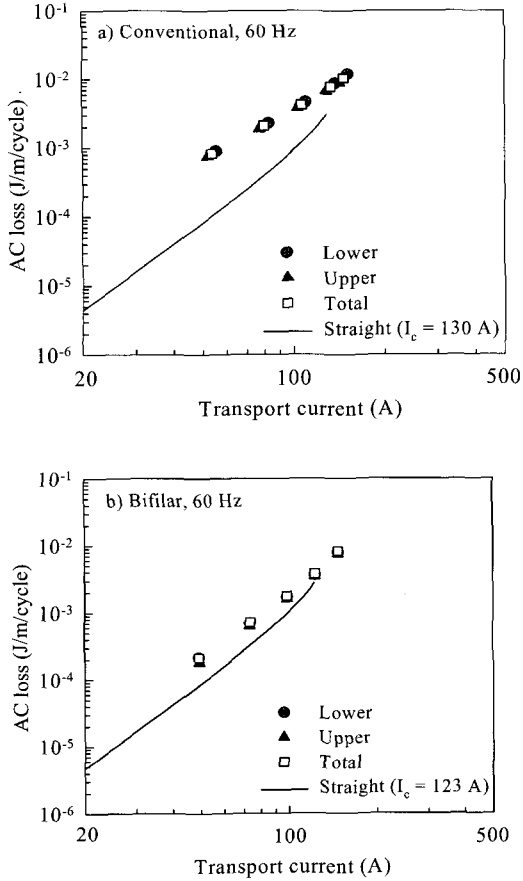


Fig. 5. AC losses in the edge-to-edge arrangement.

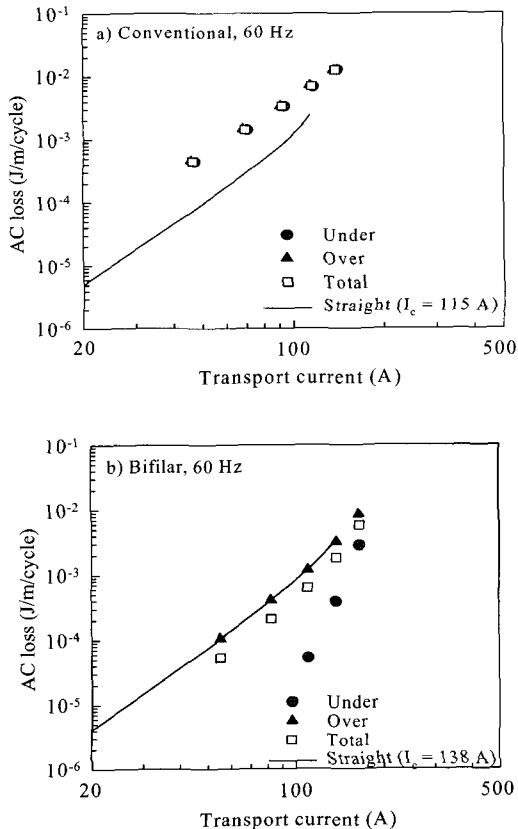


Fig. 6. AC losses in the face-to-face arrangement.

#### 4. 결 론

이상의 코일형 한류소자 샘플에 대해 행하여진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 측정된 교류손실은 도체의 배열 및 전류방향에 매우 의존한다.
- 2) Helical 배열의 한류소자에서 교류손실을 저감시키기 위해서는 턴 사이의 갭을 크게 함으로서 가능하다.
- 3) 도체의 자기자계손실 레벨보다도 작은 값으로 코일형 한류소자의 교류손실을 저감시키기 위해서는 도체의 배열을 Face-to-face 배열로 하는 것이 바람직하다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 류경우, 김현준, “자장방향이 적층 Bi-2223도체의 자화손실에 미치는 영향,” 전기전자재료학회논문지, 16권, 1호, pp.77-82, 2003.
- [2] 류경우, 최병주, “인접 교류전류가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향,” 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, pp.251-256, 2001.
- [3] W. Paul and M. Chen, “Superconducting control for surge currents,” *IEEE Spectrum*, pp.49-54, May 1998.
- [4] 류경우, 마용호, “코일형 한류소자의 교류손실 특성,” 전기전자재료학회논문지, 18권, 4호, pp.370-374, 2005.
- [5] 류경우, 최병주, “전류분포가 3본-도체의 임계전류/교류손실 특성에 미치는 영향,” 전기전자재료학회논문지, 16권, 5호, pp.418-423, 2003.
- [6] 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.
- [7] 류경우, 최병주, “외부 교류자장이 Bi-2223테이프의 동저항 및 손실특성에 미치는 영향,” 전기전자재료학회논문지, 18권, 5호, pp.473-477, 2005.

#### 저 자 소 개



마용호(馬勇虎)  
1980년 6월 12일생. 2003년 7월 중국 연변대학 전자정보통신학과 졸업.  
2004년 3월 전남대학교 전기공학(석사과정).



류경우(柳旻佑)

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



오일성(吳一成)

1960년 12월 22일생, 1986년 연세대학교 금속공학과 졸업, 1990년 미시간주립대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 LS산전 전력연구소 책임연구원.



박권배(朴權培)

1972년 11월 09일생, 1998년 전남대학교 유전공학과 졸업, 2000년 전남대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 현재 LS산전 전력연구소 주임연구원.