

전압리드의 배치가 단층 고온초전도 모델케이블의 교류손실 측정에 미치는 영향

論 文
51B-12-3

Effect of the voltage lead configurations on AC Loss Measurement in a Single Layer High-T_c Superconducting Model Cable

柳 鏡 佑* · 程 載 勳** · 黃 時 奎*** · 金 錫 煥[§]
(Kyung-Woo Ryu · Jae-Hoon Jung · Si-Dole Hwang · Seok-Whan Kim)

Abstract - AC loss is an important issue in the design of high-T_c superconducting power cables. The cables consists of a number of Bi-2223 tapes wound on a former. In such cables tapes have different critical current characteristics intrinsically. And they are electrically connected to each other and current leads by soldering. These make loss measurements considerably complex, especially for short samples of laboratory size. Special cautions are required in the positioning of voltage leads for measuring the true loss voltage. In this work the ac losses in a single layer model cable have been experimentally investigated for different contacts and arrangements of voltage leads. The results show that the losses are not dependent on both arrangements and contact positions of the voltage leads. This implies that loss flux is only in a cylindrical conductor section. The measured losses also agree well with those based on a monoblock model and are independent of frequencies. This means that the measured AC loss of the model cable is purely hysteretic in nature.

Key Words : AC loss measurement, single layer high-T_c superconducting cable, voltage lead's contact position and arrangement.

1. 서 론

최근 공학적 임계전류밀도가 약 100 A/mm²급 이상이 되는 특성이 매우 우수한 Bi-2223테이프의 장선화(長線化) 성공함에 따라 이를 응용한 고온초전도 전력기기의 상용화에 대한 연구·개발이 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 고온초전도 전력기기가 상용화되기 위해서는 무엇보다도 경제성 및 효율 측면에서 기존 전력기기보다 우수해야 될 것이며, 특히 경제성 및 효율에 크게 영향을 미치는 인자가 바로 초전도체의 비가역적인 자기적 특성에 기인하는 교류손실이다.

고온초전도 전력기기 중 원통형의 구조물(이하 포머; former) 위에 다수 본의 Bi-2223테이프를 배열한 구조로 된 전력케이블의 교류손실에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 전력케이블은 본질적으로 불균일한 임계전류특성을 지닌 다수 본의 Bi-2223테이프들로 구성될 수 밖에 없을 뿐만 아니라 각각의 테이프에 흐르는 전류의 불균일한 특성 등 복잡한 요인들 때문에 전력케이블의 교류손실 연구와 관련해서는 지금까지도 불분명한 것이 산재해 있는 실정이다 [1]-[5].

일반적으로 전력케이블의 교류손실 측정에 사용되고 있는

전압리드로서는 케이블과 전류리드의 접속부에 납땀한 전압리드(이하 접속부접촉 리드), 접속부로부터 떨어져있는 임의의 하나의 테이프 위에 납땀한 전압리드(이하 테이프접촉 리드) 및 접속부로부터 충분히 떨어진 곳에 부착한 단락링에 납땀한 전압리드(이하 링접촉 리드)가 제안되고 있으나, 논문에서는 특히 수 m 길이의 짧은 실험실 사이즈의 시제품의 교류손실 평가에 적합할 것으로 사료되는 두 종류의 전압리드(테이프접촉 및 링접촉 리드)가 교류손실 측정에 미치는 영향에 대해 조사하였으며, 이에 근거하여 자체적으로 제작한 단층 모델케이블의 교류손실 특성을 실험적 및 이론적으로 고찰하였다.

2. 실험 샘플 및 방법

다수 본의 Bi-2223테이프로 구성된 단층 모델케이블의

표 1 3본 도체의 사양
Table 1 Specifications of the 3-conductor

Bi-2223테이프	특 성
조성	Bi-2223/Ag/Ag합금 (38%/40%/22%)
폭 × 두께	3.1 mm × 0.17 mm
필라멘트 수	55
테이프1의 임계전류	72 A (77 K at 0 T)
테이프2의 임계전류	46 A (77 K at 0 T)
테이프3의 임계전류	76 A (77 K at 0 T)

* 正 會 員 : 全南大 電氣工學科 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 全南大 電氣工學科 碩士課程

*** 正 會 員 : 韓電電力研究院 先任研究員

§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員 · 工博

接受日字 : 2002年 9月 18日

最終完了 : 2002年 10月 23日

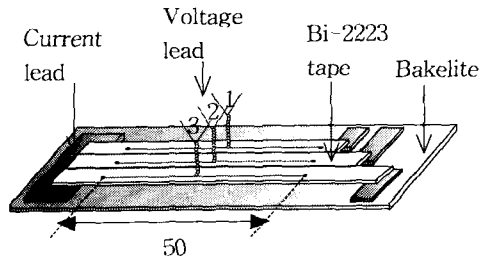


그림 1 3본 도체.
Fig. 1 3-conductor.

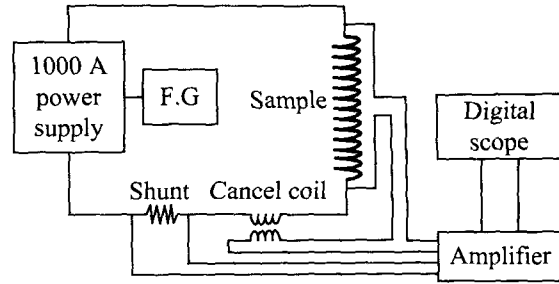
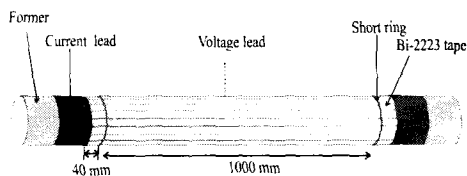


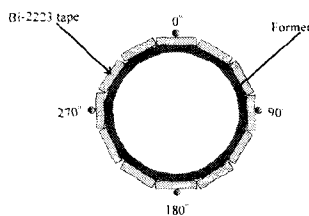
그림 3 실험장치.
Fig. 3 Experimental setup.

표 2 단층 모델케이블의 사양
Table 2 Specifications of the single layer model cable

항 목	특 성	
테이프	조성	Bi-2223/Ag/AgMgNi (27%/43%/30%)
	폭 × 두께	3.9 mm × 0.3 mm
	필라멘트 수	37
케이블	포머 외경 (재질)	16.8 mm (FRP)
	케이블 외경	17.5 mm
	층 수	1
	테이프 수	14
	테이프 권선피치	∞



a) 단층 모델케이블



b) 단면도

그림 2 단층 모델케이블.
Fig. 2 Single layer model cable.

교류손실 연구에 앞서 먼저 형상은 모델케이블과 다소 상이 하지만 본 수가 작아 실험결과에 대한 분석이 용이한 장점을 지닌 3본의 테이프로 구성된 도체(이하 3본 도체)를 제작하였다. 또한 실제의 케이블 제작에 사용되고있는 Bi-2223테이프는 본질적으로 임계전류특성이 상이하다. 따라서 이러한 점에 착안하여 3본 도체 제작에는 임계전류가 약 40 %정도 불균일한 Bi-2223테이프를 사용하였으며, 이에 대한 주요 사양을 표 1에, 그 개략도를 그림 1에 각각 나타내었다. 또한 전압리드의 배열 및 접촉위치에 따른 영향을 조사하기 위하

여 그림 1에서 보는 바와 같이 각각의 테이프 중심선 상에 전압리드를 납땀한 후 테이프의 표면으로부터 위로 0 mm 즉 테이프 표면(이하 0 mm리드), 5 mm(이하 5 mm리드) 및 10 mm(이하 10 mm리드) 떨어진 사각형 형상의 전압리드를 부착시켜 샘플을 준비하였다.

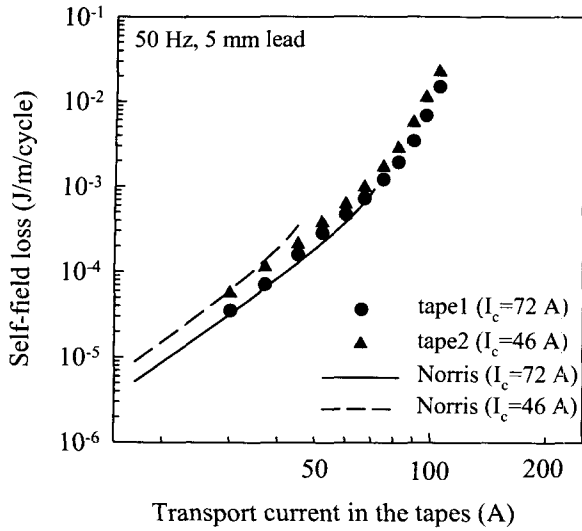
다음은 실제의 전력케이블과 유사한 구조로 14본의 Bi-2223테이프를 직경이 16.8 mm인 FRP포머 위에 서로 평행하게 배치시킨 단층 모델케이블을 제작하였다. 케이블 제작 시, 테이프사이의 갭은 가능한 한 작게 되도록 배열시켰다. 또한 3본 도체와 마찬가지로 전압리드의 배열 및 접촉위치가 손실 측정에 미치는 영향을 조사하기 위하여 모델케이블의 전류리드로부터 충분히 떨어진 곳에 단락링을 부착한 후 0도, 90도, 180도 및 270도 위치에 있는 Bi-2223테이프의 중심선 위에 전압리드를 납땀하여, 테이프의 표면으로부터 위로 0 mm(이하 0 mm리드), 2 mm(이하 2 mm리드) 및 5 mm(이하 5 mm리드) 떨어진 사각형형상의 전압리드를 부착시켰다. 이의 주요 사양 및 그 개략도를 표 2 및 그림 2에 각각 나타내었다.

그림 3에는 3본 도체 및 단층 모델케이블의 교류손실 측정에 이용된 실험장치의 개략도를 나타내었으며, 1000 A, 5 V (5 Hz ~ 1 kHz)의 전원을 사용하여 정현파의 전류를 샘플에 흘려 교류손실을 측정하였다. 또한 교류손실 측정 시, 각각의 Bi-2223테이프에 흐르는 전류를 균일하게 하기 위하여 외부 리액터를 사용하였으며, 각각의 전압리드에 유도되는 유도성 전압은 상쇄코일로 충분히 상쇄하였다.

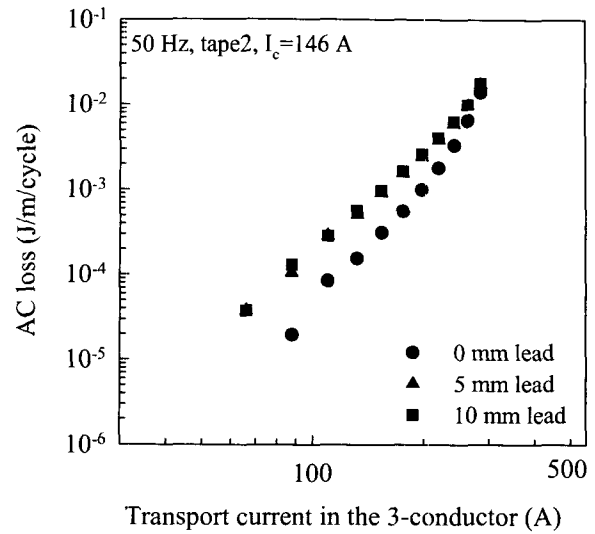
3. 실험 결과 및 검토

3.1 3본 도체

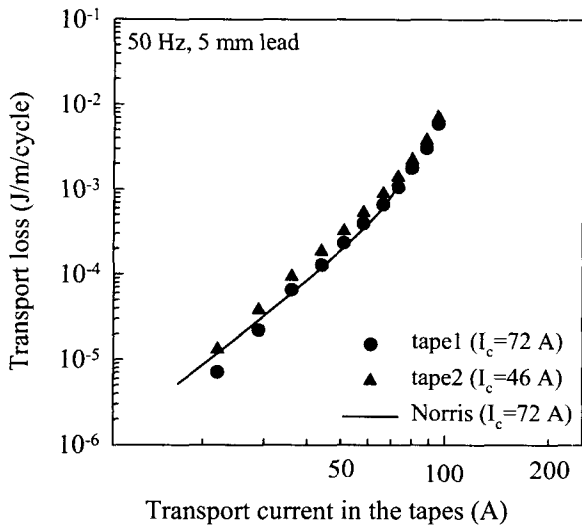
임계전류가 약 40 %정도 차이가 나는 Bi-2223테이프로부터 제작된 3본 도체의 교류손실 측정에 앞서 먼저 기초 데이터라 할 수 있는 1본 Bi-2223테이프에 대해 측정된 자기자계손실 및 통전손실을 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 손실 측정 시, 전압리드는 문헌[6]을 참조하여 5 mm리드(테이프 폭의 1/2의 3배정도)로 하였다. 또한 ● 및 ▲는 임계전류가 각각 72 A(테이프1) 및 46 A(테이프2)인 Bi-2223테이프에 대해 측정된 손실을, 실선 및 점선은 타원형 Norris식으로부터 계산된 손실을 각각 나타낸다[6]. 그림 4 a)로부터 3본 도체에서 두 Bi-2223테이프의 측정된 자기자계손실은 계산된 손실과 잘 일치하고, 동일 전류에 대해서는 임계전류가 작은 테이



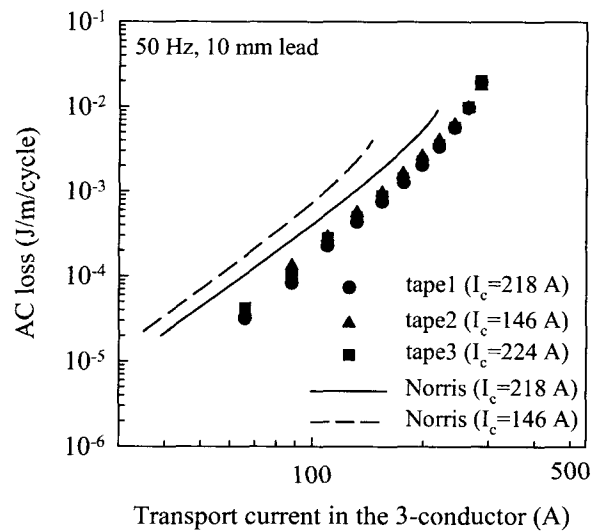
a) 자기자계손실



a) 전압리드 배열의 영향.



b) 통전손실



b) 전압리드 접촉위치의 영향.

그림 4 1본 Bi-2223테이프의 교류손실.

Fig. 4 AC losses of the Bi-2223 tapes in the 3-conductor.

프2의 자기자계손실이 오히려 큰 것을 볼 수 있다. 그림 b)로부터는 인접테이프에 전류가 흐르는 상태에서 1본 Bi-2223테이프에 대해 측정된 통전손실이 계산된 자기자계손실과 동일한 것을 볼 수 있고, 이는 인접교류전류에 의한 영향은 무시할 수 있을 정도로 작음을 의미한다.

그림 5에는 3본 도체에서 전압리드의 배열 및 접촉위치를 달리했을 때 측정된 교류손실을 나타내었다. 그림 5 a)에서 ●, ▲ 및 ■는 테이프2에 납땜된 전압리드를 테이프의 표면으로부터 0 mm, 5 mm 및 10 mm로 높이를 각각 달리하였을 때 측정된 교류손실을 나타낸다. 그리고 그림 5 b)에서 ●, ▲ 및 ■는 10 mm리드에 대하여 납땜 위치를 테이프1, 테이프2 및 테이프3으로 각각 달리하였을 때 측정된 3본 도체의 교류손실을 나타내며, 이 때 도체의 표면으로부터 전압리드의 높이는 1본 테이프의 자기자계손실 측정 시에 보편적

그림 5 전압리드의 배열 및 접촉위치에 따른 3본 도체의 교류손실.

Fig. 5 AC losses of the 3-conductor for different arrangements and contact positions of the voltage leads.

으로 채택되고 있는 전압리드 형상을 참조하여 10 mm로 하였다. 또한 I_c 는 도체를 구성하는 테이프1, 테이프2 및 테이프3에 납땜한 전압리드의 전압과 도체의 전류 특성으로부터 결정되는 3본 도체의 임계전류를 나타내며, 특히 실선 및 점선은 3본 도체를 폭이 9.3 mm인 1본의 Bi-2223테이프로서 가정하여 측정된 3본 도체의 임계전류를 타원형 Norris식에 대입하여 계산된 손실을 나타낸다. 그림 5 a)로부터 3본 도체의 측정된 교류손실은 1본 테이프와 마찬가지로 전압리드의 배열에 매우 의존하고[6], 도체의 표면으로부터 전압리드의 높이가 5 mm 이상이 되면 손실은 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 포화되는 것을 볼 수 있다. 그림 5 b)로부터 표 1에서 보는 바와 같이 테이프의 임계전류가 약 40 % 정도

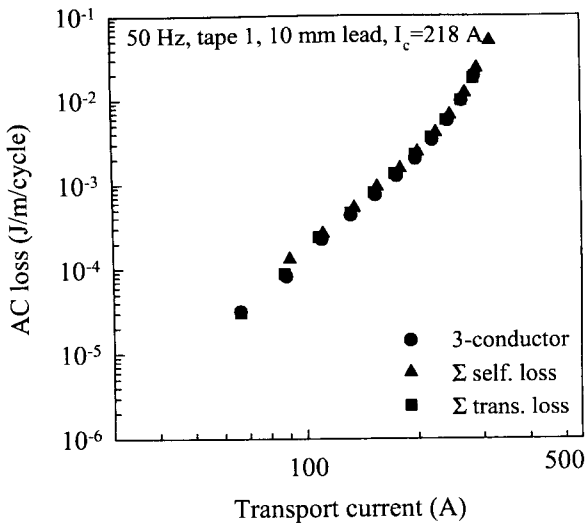


그림 6 3본 도체의 교류손실.
Fig. 6 AC losses of the 3-conductor.

상이한 Bi-2223테이프로 제작된 3본 도체의 임계전류는 전압리드의 접촉위치에 따라 상당히 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 1본 테이프 자체의 임계전류가 큰 테이프에 전압리드를 납땜하여 측정된 3본 도체의 임계전류가 그 반대인 경우보다 크다는 사실이다. 또한 전압리드의 배열만 동일(10 mm리드) 하면 전압리드의 접촉위치에 따라 도체의 임계전류가 달라짐에도 불구하고 측정된 교류손실은 전압리드의 접촉위치에 무관하게 일정한 것을 볼 수 있다. 마지막으로 측정된 교류손실은 3본 도체를 폭이 9.3 mm인 1본 테이프로서 가정하여 계산된 결과보다는 꽤 작은 것을 볼 수 있고, 이는 3본 도체를 등가인 1본 테이프로서 취급하는 것은 무리임을 의미한다.

그림 6에는 3본 도체의 교류손실 측정 결과를 요약하여 나타내었다. 그림 6에서 ●는 3본 도체의 테이프1에 납땜된 10 mm리드에 대해 측정된 교류손실을, ▲ 및 ■는 그림 4에서와 같이 3본의 Bi-2223테이프 각각에 대해 측정된 자기자계손실 및 통전손실을 각각 합한 결과를 나타낸다. 그림 6으로부터 3본 도체의 측정된 교류손실은 3본 도체를 구성하는 각각의 테이프에서 측정되는 자기자계손실 또는 통전손실을 합한 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 3본 도체의 교류손실을 고려할 때는 그림 5 b)의 결과에서 보는 바와 같이 3본 도체를 등가인 1본 테이프로서 보는 것보다는 인접테이프의 교류전류에 의한 영향을 거의 무시할 수 있는 독립된 1본 테이프들의 집합으로 보는 것이 더욱 타당함을 의미한다.

3.2 단층 모델케이블

원통형 전력케이블의 손실 계산에 일반적으로 이용되고 있는 이론모델은 Monoblock모델로서 교류손실(Q J/m·cycle)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$Q = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi \delta_0^2} ((1 - \delta_0 \beta) \ln(1 - \delta_0 \beta) + \delta_0 \beta (1 - \delta_0 \beta / 2)),$$

$$\delta_0 = 1 - (R_i / R_0)^2, \quad \beta = I_p / I_c \quad (1)$$

여기서 R_i 와 R_0 는 원통형 도체의 내반경과 외반경이고, I_p 와 I_c 는 각각 케이블의 전류 피크치 및 임계전류이다.

그림 7에는 상이한 전압리드 배열에 대해 측정된 단층 모델케이블의 교류손실을 나타내었다. 그림 7에서 전압리드의 부착 위치는 270도 위치에 있는 테이프 모두 동일하며, ●는 전압리드를 케이블의 표면에, ▲ 및 ■은 케이블의 표면으로부터 각각 2 mm 및 5 mm 위로 배열한 전압리드에 대해 측정된 교류손실을 각각 나타낸다. 또한 실선은 식(1)의 Monoblock모델로부터 계산된 교류손실을 나타내며, 계산 시 모델케이블의 임계전류는 270도 위치에 부착된 전압리드로부터 측정된 임계전류($I_c=402$ A)를 사용하였다. 그림 7로부터 모델케이블의 교류손실은 그림 5 a)의 3본 도체와는 달리

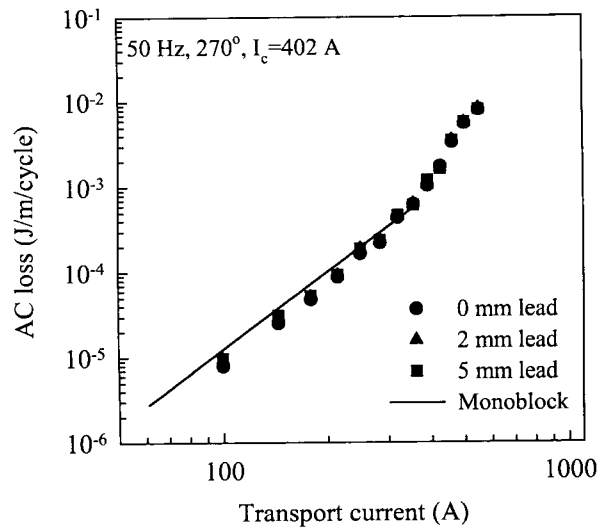


그림 7 전압리드 배열에 따른 모델케이블의 교류손실.
Fig. 7 AC losses of the model cable for different arrangements of voltage leads.

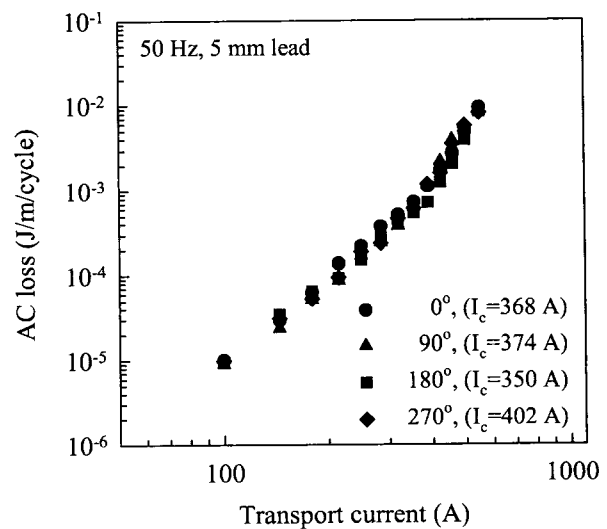


그림 8 전압리드의 접촉위치에 따른 모델케이블의 교류손실.
Fig. 8 AC losses of the model cable for different contact positions of voltage leads.

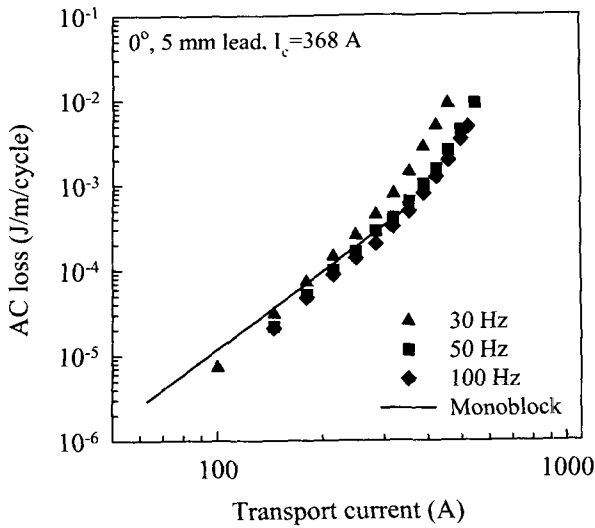


그림 9 주파수에 따른 모델케이블의 교류손실.
Fig. 9 AC losses of the model cable for different frequencies.

전압리드의 배열에 무관하게 측정된 교류손실은 동일한 것을 볼 수 있다. 이는 케이블의 도체가 원통형이기 때문에 손실자속이 원통형 도체 내부에만 존재하게 된 결과로 설명될 수 있다. 또한 측정된 교류손실은 Monoblock모델로부터 계산된 손실과 비교적 잘 일치하는 것도 볼 수 있다.

그림 8에는 전압리드의 상이한 접촉위치에 대해 측정된 모델케이블의 교류손실 특성을 나타내었다. 그림 8에서 전압리드의 배열은 케이블의 표면으로부터 5 mm 위로 모두 동일하게 하였으며, ●, ▲, ■ 및 ◆는 전압리드의 부착 위치를 그림 2 b)에서 보는 바와 같이 0도, 90도, 180도 및 270도로 한 경우에 대해 측정된 교류손실을 각각 나타낸다. 그림 8로부터 전압리드의 접촉위치에 따라서 케이블의 임계전류가 약 10 %정도 변함에도 불구하고 측정된 교류손실은 전압리드의 접촉위치에는 의존하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 2 a)에서 보는 바와 같이 단락링에 전압리드를 납땀하는 경우와 테이프에 직접 납땀하는 경우 측정된 손실은 동일하였으며, 이는 단락 링의 전위가 등 전위가 못됨을 의미한다.

그림 9에는 상이한 주파수에 대해 측정된 모델케이블의 교류손실 특성을 나타내었다. 그림 9에서 전압리드의 부착 위치는 0도 위치로, 전압리드의 배열은 케이블의 표면으로부터 5 mm 위로 모두 동일하게 배열하였으며, ●, ▲ 및 ■은 30 Hz, 50 Hz 및 100 Hz에 대해 측정된 교류손실을 각각 나타낸다. 그림 9로부터 측정된 교류손실은 임계전류 이하의 영역에서는 주파수에 거의 의존하지 않는 것을 볼 수 있고, 이는 측정된 모델케이블의 교류손실이 히스테리시스손실 메카니즘이 지배적임을 의미한다.

4. 결 론

이상의 다수 본의 Bi-2223테이프 구성된 단층 모델케이블에서 각각의 테이프에 균일한 전류가 흐를 때 교류손실 측정에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 측정된 교류손실은 1본 테이프 형상과 유사한 3본 도체와 달리 전압리드의 배열에 무관하게 일정하다. 이는 모델

케이블의 도체형상이 원통형이기 때문에 손실자속이 원통형 도체 내부에만 존재하게 되고, 따라서 전압리드에 유도되는 손실전압이 그 배열에 관계없이 일정하게 된 결과이다.

- 2) 측정된 교류손실은 3본 도체와 같이 전압리드의 접촉위치에 따라 케이블의 임계전류가 약 10 %정도 상이해짐에도 불구하고, 교류손실은 접촉위치에 무관하게 일정하다. 따라서 이는 교류손실 측정 시, 전압리드는 어떠한 테이프에 납땀해도 무방함을 의미한다.
- 3) 측정된 교류손실은 케이블의 임계전류이하 영역에서 Monoblock모델로부터 계산된 손실과 비교적 잘 일치하며, 주파수에 거의 의존하지 않는다. 이는 케이블의 교류손실은 히스테리시스손실이 지배적임을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Kuhle, C. Treholt, S. Kruger Olsen, C. Rasmussen and O. Tonnesen, "Measuring AC-loss in High Temperature Superconducting Cable-Conductors using Four Probe Methods," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 9, No. 2, pp.1169-1172, 1999.
- [2] S. Kruger Olsen, A. Kuhle, C. Treholt, C. Rasmussen, O. Tonnesen, M. Daumling, C.N. Rasmussen and D.W.A. Willen "Alternating Current Losses of a 10 Meter Long Low Loss Superconducting Cable Conductor Determined from Phase Sensitive Measurements," *Supercond. Sci. Technol.* 12, pp.360-365, 1999.
- [3] J. Rieger, M. Leghissa, J. Wiezoreck, H.P. Kramer, G. Ries, H.W. Neumuller, "AC Losses in a Flexible 10 m Long Conductor Model for a HTS Power Transmission Cable," *Physica C* 310, pp.225-230, 1998.
- [4] A. Kuhle, C. Treholt, M. Daumling, S.K. Olsen, O. Tonnesen, "AC Losses in Circular Arrangements of Parallel Superconducting Tapes," *Physica C* 310, pp.192-196, 1998.
- [5] 김창완, 정재훈, 류경우, 최병주, "고온 초전도모델전력케이블의 교류손실 특성," 대한전기학회계학술대회논문집, pp. 681-683, 2001.
- [6] 류경우, 박권배, 차귀수, 최경달, 이지광, 한송엽, "장척 Bi-2223/AgMgNi테이프의 자기자계손실 특성," 전기학회 논문지, 49B권 4호, pp.240-244, 2000.
- [7] C.M. Friend, D.M. Spiller, L.Le Lay, S.A. Awan, T.P. Beales, "Using Electrical Measurements to Determine the Self-field AC Losses of Cable Models," *Physica C* 309, pp.187-196, 1998.

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 초전도응용연구사업팀 선임연구원. 1996년

~현재 전남대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 062-530-1748, Fax : 062-530-1749

E-mail : kwryu@chonnam.ac.kr



황 시 둘 (黃 時 玆)

1981년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업. 1986년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년 12월 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 신에너지그룹 선임연구원



정 재 훈 (程 載 勳)

1975년 8월 17일생. 2001년 호남대 전기공학과 졸업. 2001년~현재 전남대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 062-530-0748, Fax :062-530-1749

E-mail : iamjong@moiza.chonnam.ac.kr



김 석 환 (金 錫 煥)

1964년 1월 12일생. 1986년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1988년 2월 서울대학교 전기공학과 석사. 1993년 기초전력공학공동연구소 연구원. 1994-1996 일본 고에너지물리학연구소 연구원. 1997-

1999 유럽 CERN 연구소 연구원. 2000-2001 미국 Fermi 연구소 연구원. 현재 한국전기연구원 선임연구원.