

## 전류분포가 3본-도체의 임계전류/교류손실 특성에 미치는 영향

### Influence of Current Distributions on Critical Current and AC Loss Characteristics in a 3-conductor

류경우\*, 최병주\*\*

(Ryu Kyung Woo\* and Choi Byoung Ju\*\*)

#### Abstract

AC loss is an important issue in the design of high- $T_c$  superconducting 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. So special cautions are required in the positioning of voltage leads for measuring the true loss voltage. In this work we have prepared a conductor composed of three Bi-2223 tapes with different critical currents. The critical current and AC loss characteristics in the conductor have experimentally investigated. The results show that for uniform current distributions the conductor's critical current is proportional to the critical current of the Bi-2223 tape to which a voltage lead is attached. However it depends on the current non-uniformity parameter in the conductor rather than the tape's critical currents for nonuniform current distributions. The loss tests indicate that the AC loss is dependent on arrangements of voltage leads but not on their contact positions. The measured losses in the conductor also agree well with the sum of the transport losses measured in each Bi-2223 tape.

**Key Words** : 3-conductor, AC loss characteristics, Bi-2223 tape, Current distribution, Critical current characteristics, Superconducting power cable

#### 1. 서론

다수 본의 초전도테이프로 구성되는 초전도전력 케이블에서 발생하는 교류손실은 케이블의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 냉동기 비용의 증가를 초래하여 기존 구리도체케이블과의 가격경쟁에서 경제성을 저하시키는 주된 요인으로 작용한다. 따라서

초전도케이블의 상용화를 위해서는 먼저 교류손실에 대한 충분한 이해와 더불어 정확한 평가가 선행되어야 한다. 한편, 초전도체의 교류손실은 기존 철심의 히스테리시스손실과 같이 자기적인 손실인 관계로 정확하게 측정하기가 대단히 어렵다[1].

따라서 본 논문에서는 다수 본의 초전도테이프 로 구성되는 전력케이블의 교류손실에 대한 연구에 앞서 전력케이블의 형상과는 다소 상이하지만, 초전도테이프의 본 수가 적어 평가결과에 대한 분석이 용이한 점에 착안하여 3본의 Bi-2223초전도 테이프 로 구성되는 샘플(이하 3본-도체)을 제작하였으며, 이에 대한 임계전류특성, 교류손실 평가기술 및 교류손실특성을 조사하였다.

\* : 전남대학교 공과대학 전기공학과  
(광주광역시 북구 용봉동 300)  
Fax : 062-530-1749

Corresponding Author : kwryu@chonnam.ac.kr

\*\* : 서라벌대학 디지털전기정보학부  
2002년 1월 22일 접수, 2003년 2월 12일 1차 심사완료,  
2003년 3월 4일 최종 심사완료

## 2. 실험 샘플 및 방법

### 2.1 실험샘플

표 1에는 3본-도체 제작에 사용된 Bi-2223테이프의 주요 사양을, 그림 1에는 제작된 3본-도체 샘플을 각각 나타내었다. 특히 3본-도체 샘플의 제작 시, 케이블 제작에 실제로 사용되고 있는 Bi-2223 테이프는 본질적으로 불균일한 임계전류특성을 지니고 있다는 점에 착안하여 임계전류가 수 십% 정도 상이한 테이프들을 사용하였으며, 3본-도체 도중에서 발생될 수 있는 인접한 테이프사이의 전류재분배에 의한 영향을 배제하기 위하여 테이프 사이는 전기적으로 완전히 절연하였다.

또한 전압리드의 접촉위치 및 배열이 3본-도체의 임계전류특성 및 교류손실특성 평가에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 전압리드를 각각의 테이프의 중심선 상에 납땜하여 부착시켰으며, 테이프의 표면에서 수직한 방향으로 0 mm(0 mm 리드), 5 mm(5 mm 리드) 및 10 mm(10 mm 리드) 떨어진 사각형 형상의 전압리드(center-rectangle lead)를 배열하였다. 이 때 전압리드의 납땜부사이의 거리는 모두 500 mm로 동일하게 하였다.

표 1. Bi-2223테이프의 주요 사양.

Table 1. Specification of a Bi-2223 tape.

항 목	특 성
사이즈	3.1 mm × 0.17 mm
Bi-2223/Ag/Ag합금	38 %/40 %/22 %
필라멘트 수	55
트위스트 유·무	무

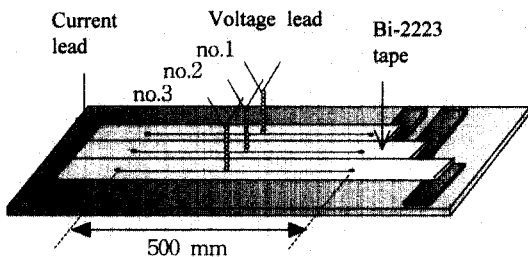


그림 1. 3본-도체 샘플.

Fig. 1. 3-conductor sample.

### 2.2 실험방법

그림 2에는 3본-도체의 임계전류특성 및 교류손실특성 평가에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내었으며, 실험은 액체질소 온도(77 K)에서 하였다. 그림 2에서 1000 A<sub>rms</sub>, 7 V<sub>rms</sub> (DC~200 Hz) 전원을 함수발생기로 제어하여 직류 및 정현파 교류 전류를 샘플에 인가하였다. 먼저 임계전류 평가 기준으로서 고온초전도체에서 일반적으로 채택되고있는 1 μV/cm를 사용하였다.

교류손실 평가 시, 각각의 전압리드에 발생하는 유도성 전압은 상쇄코일을 이용하여 충분히 상쇄시켰고, Bi-2223테이프에 흐르는 전류를 균일 또는 불균일하게 강제적으로 제어하기 위하여 외부 리액터를 사용하였다. 또한 교류손실 측정에서는 일반적으로 널리 이용되고 있는 전기적 방법을 채택하였으며, 전기적 방법에 의한 단위길이 및 1주기에 대한 교류손실(Q) (J/m/cycle)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \oint_T i(t)v(t)dt/l \quad (1)$$

여기서 T는 정현파 교류전류의 주기, i(t)는 샘플 전류, v(t) 및 l은 그림 1에 나타낸 전압리드의 전압 및 납땜부 사이의 거리를 각각 나타낸다.

## 3. 실험 결과 및 검토

### 3.1 임계전류특성

그림 3에는 각 테이프에 균일하게 전류가 흐를 경우, 3본-도체(각 Bi-2223테이프의 임계전류는 72 A, 46 A, 76 A)에 대하여 측정된 임계전류특성을

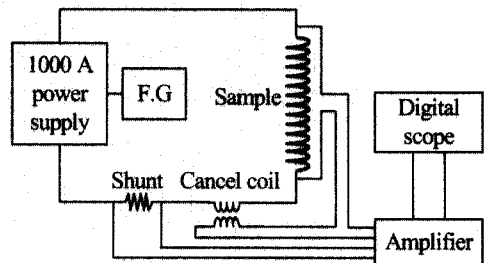


그림 2. 실험장치.

Fig. 2. Experimental setup.

나타내었다. 그림 3에서 x축의 일련번호는 그림 1에서 보는 바와 같이 전압리드의 일련번호임과 동시에 3본-도체샘플에서 Bi-2223테이프의 일련번호를 나타낸다. 또한 왼쪽 y축은 각 전압리드 전압과 도체 전류로부터 측정된 3본-도체의 임계전류를 나타내며, 오른쪽 y축에는 3본-도체를 구성하는 각 Bi-2223테이프의 임계전류를 참고로 나타내었다.

그림 3에서 균일 전류분포일 경우, 3본-도체의 임계전류는 Bi-2223테이프 자신의 임계전류에 비례하는 것을 볼 수 있다. 즉 임계전류가 큰 테이프의 전압리드(no.1, no.3)로부터 측정된 3본-도체의 임계전류는 임계전류가 작은 테이프의 전압리드(no.2)로부터 측정된 임계전류보다 크다. 또한 3본-도체의 임계전류는 전압리드가 부착된 Bi-2223테이프 자신의 임계전류에 테이프의 본 수인 3을 곱한 값과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

따라서 그림 3의 결과로부터 균일 전류분포일 경우는 다음과 같이 요약될 수 있다. 먼저 3본-도체를 구성하는 테이프의 임계전류가 불균일한 경우, 3본-도체의 임계전류는 전압리드의 접촉위치에 따라서 상이해져, 도체의 임계전류를 유일한 값으로 정의하는 것이 불가능한 반면 테이프의 임계전류가 균일한 경우, 3본-도체의 임계전류는 전압리드의 접촉위치에 관계없이 일정하게되어 도체의 임계전류는 유일한 값으로 정의가 가능해진다. 볼

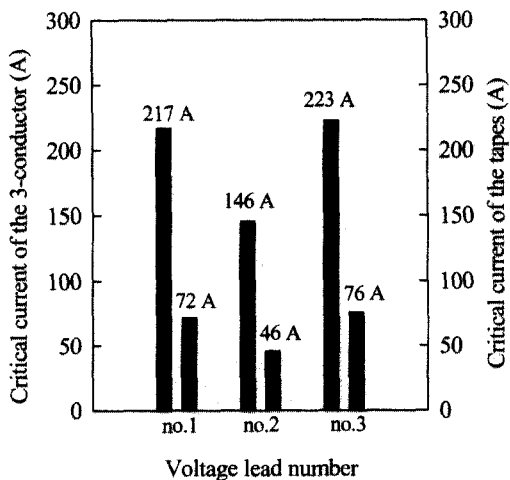


그림 3. 전압리드의 접촉위치에 따른 3본-도체의 임계전류특성: 균일 전류분포.

Fig. 3. Voltage lead's contact position dependence of the critical current in the 3-conductor: uniform current distribution.

론 이 경우 도체의 임계전류는 1본 테이프의 임계전류에 본 수인 3을 곱한 전류로 된다.

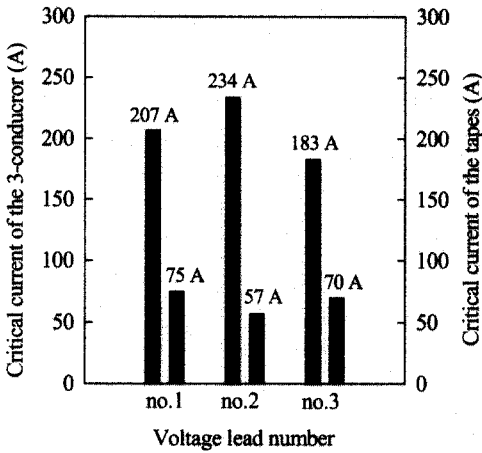
또한 다수 본의 초전도테이프로 구성되는 전력케이블의 경우, 테이프의 불균일한 임피던스특성 및 임계전류특성 등 때문에 각각의 테이프에는 불균일한 전류가 실제로 흐를 수 있게된다. 따라서 이러한 점에 착안하여 본 연구에서는 불균일한 전류분포가 3본-도체의 임계전류특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 먼저 각 테이프에 흐르는 전류의 불균일한 정도를 정량적으로 정의하기 위하여 전류 불균일 파라미터( $\gamma$ )를 도입하였으며 이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \frac{I_1}{I_2} \text{ or } \frac{I_3}{I_2} \quad (2)$$

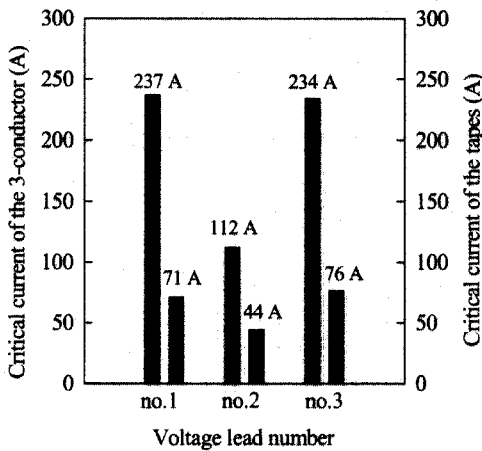
여기서  $I_1, I_2, I_3$ 은 그림 1에서 보는 바와 같은 no.1, no.2, no.3의 Bi-2223테이프에 흐르는 전류를 각각 나타낸다. 특히 본 실험을 위해 제작된 모든 3본-도체 샘플의 경우, no.1 및 no.3 테이프의 임계전류가 거의 동일할 뿐만 아니라 이들 두 테이프에 흐르는 전류 또한 외부 리액터를 이용하여 동일하게 제어하였기 때문에 전류 불균일 파라미터를 정의하는데 있어서 기존 전류로서는 no.2 테이프에 흐르는 전류를 선정하였다.

그림 4에는 각 테이프에 불균일한 전류가 흐를 경우, 3본-도체에 대하여 측정된 임계전류특성을 나타내었다. 그림 4 a)는 전류 불균일 파라미터를 1.58로 한 경우 즉 no.1 및 no.3 테이프에 흐르는 전류가 no.2 테이프보다 1.58배 큰 경우, 3본-도체의 임계전류특성을 나타내는 반면 그림 4 b)는 전류 불균일도 파라미터를 0.67로 한 경우, 3본-도체의 임계전류특성을 나타낸다. 그림 4에서 x축의 일련번호 및 왼쪽 그리고 오른쪽 y축의 임계전류는 그림 3에서와 같다.

그림 4에서 보는 바와 같이 불균일 전류분포인 경우, 3본-도체의 임계전류특성은 균일 전류분포인 경우(그림 3)와는 달리 Bi-2223테이프 자신의 임계전류에 무관한 반면 전류 불균일 파라미터에 크게 의존하는 것을 볼 수 있다. 즉 그림 4 a), b) 모두에서 동일하게 no.2 테이프의 임계전류가 no.1 및 no.3 테이프의 임계전류보다 작지만 그림 4 a)의 경우는 전압리드(no.2)로부터 측정된 3본-도체의 임계전류(234 A)가 가장 큰 반면 그림 4 b)에서는 동일한 전압리드 no.2로부터 측정된 3본-도체의 임계전류(112 A)가 가장 작은 것을 볼 수 있다.



a) 전류 불균일 파라미터( $\gamma$ )= 1.58



b) 전류 불균일 파라미터( $\gamma$ )= 0.67

그림 4. 전압리드의 접촉위치에 따른 3본-도체의 임계전류특성: 불균일 전류분포.

Fig. 4. Voltage lead's contact position dependence of the critical current in the 3-conductor: nonuniform current distribution.

따라서 그림 4의 결과로부터 불균일 전류분포일 경우는 다음과 같이 요약될 수 있다. 임계전류가 불균일한 테이프로 구성된 3본-도체의 임계전류는 균일 전류분포인 경우(그림 3)와 달리 전압리드의 접촉위치보다는 전류 불균일 파라미터에 더욱 의존하여, 도체의 임계전류를 유일한 값으로 정의하는 것이 역시 불가능하게 된다.

이상의 그림 3 및 그림 4의 실험결과로부터 전력케이블처럼 다수본의 Bi-2223테이프로 구성되는

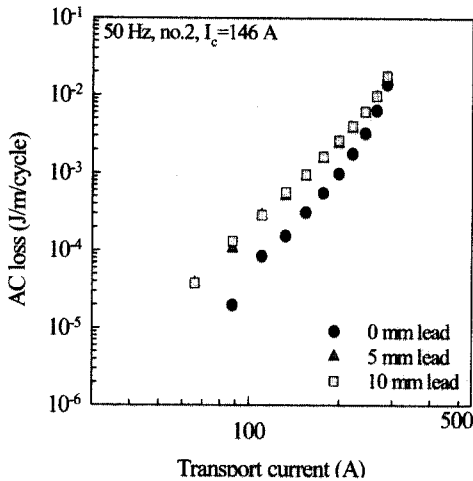
도체의 경우, 테이프의 임계전류특성이 균일하고, 각 테이프에 흐르는 전류 또한 균일한 경우를 제외하고는 모든 경우에 대하여 도체의 임계전류를 유일한 값으로 정의하는 것은 불가능하게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 이하에서 논의할 다수본의 테이프로 구성되는 도체에서 발생하는 교류손실은 도체의 임계전류에 의해 단순히 기술될 수 없음을 의미한다.

### 3.2 교류손실특성

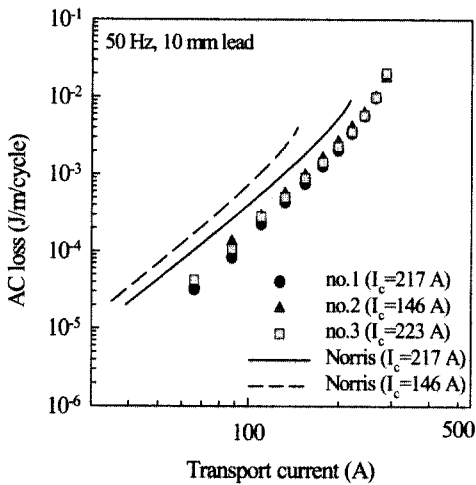
그림 5에는 각 테이프에 균일하게 전류가 흐를 경우, 전압리드의 배열 및 접촉위치를 달리했을 때 3본-도체에 대하여 측정된 교류손실을 나타내었다. 그림 5 a)에서 ●, ▲ 및 ■는 테이프 no.2에 납땜된 전압리드를 테이프의 표면으로부터 0 mm, 5 mm 및 10 mm로 높이를 각각 다르게 하였을 때 측정된 교류손실을 나타낸다. 그림 5 b)에서 ●, ▲ 및 ■는 10-mm리드에 대하여 전압리드의 접촉위치를 테이프 no.1, no.2 및 no.3으로 각각 다르게 하였을 때 측정된 3본-도체의 교류손실을 나타낸다. 이 때 도체 표면으로부터 전압리드의 높이는 1본 테이프의 자기자계손실 측정 시에 보편적으로 채택되고 있는 전압리드 형상을 참조하여 10 mm로 하였다[1]. 또한 그림 5 b)에서  $I_c$ 는 도체를 구성하는 테이프 no.1, no.2 및 no.3에 납땜한 전압리드의 전압과 도체의 전류 특성으로부터 결정되는 3본-도체의 임계전류를 나타내며, 실선 및 점선은 3본-도체를 폭이 9.3 mm(테이프 폭의 3배)인 1본의 Bi-2223테이프로 가상하여 측정된 3본-도체의 임계전류를 타원형 Norris식에 대입하여 계산된 손실을 나타낸다[2-4].

그림 5에서 균일 전류분포일 경우, 그림 5 a)에서 보는 바와 같이 3본-도체의 교류손실은 1본 Bi-2223테이프와 마찬가지로 전압리드의 배열에 매우 의존하지만, 도체의 표면으로부터 전압리드의 높이가 5 mm 이상이 되면 손실은 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 포화되는 것을 볼 수 있다.

그리고 그림 5 b)로부터 그림 3에서 보는 바와 같이 Bi-2223테이프의 임계전류가 약 40 % 정도 상이한 테이프로 제작된 3본-도체의 임계전류는 전압리드의 접촉위치에 따라 상당히 달라지는 반면 측정된 교류손실은 전압리드의 접촉위치에 무관하게 일정한 것을 볼 수 있다. 또한 측정된 교류손실은 3본-도체를 폭이 9.3 mm인 1본 테이프로 가상하여 계산된 결과보다 상당히 작은 것을 볼 수 있으며, 이는 3본-도체를 등가인 1본 테이프로 취급하는 것은 무리임을 의미한다.



a) 전압리드 배열의 영향



b) 전압리드 접촉위치의 영향

그림 5. 전압리드의 배열 및 접촉위치에 따른 3본-도체의 교류손실특성: 균일 전류분포.

Fig. 5. Voltage lead's arrangement and contact position dependence of the AC losses in the 3-conductor: uniform current distribution.

그림 6에는 각 테이프에 균일하게 전류가 흐를 경우, 3본-도체의 측정된 교류손실에 대한 분석 결과를 요약하여 나타내었다. 그림 6에서 ●는 3본-도체의 no.1 테이프에 납땜된 10 mm 리드에서 측정된 교류손실, ▲ 및 ■는 3본-도체를 구성하는 각 Bi-2223테이프에 대하여 측정된 자기자계 손실

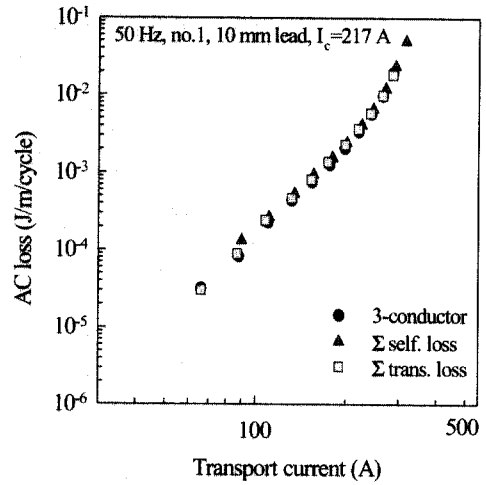


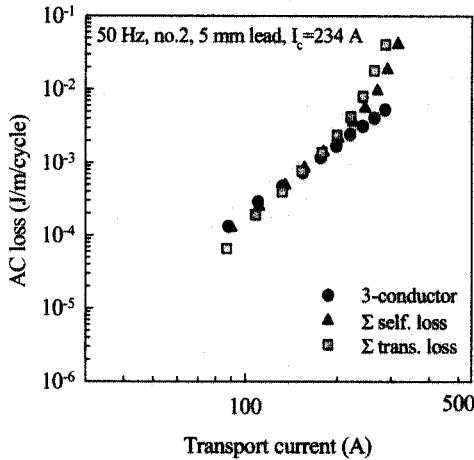
그림 6. 3본-도체의 교류손실: 균일 전류분포.

Fig. 6. AC losses in the 3-conductor: uniform current distribution.

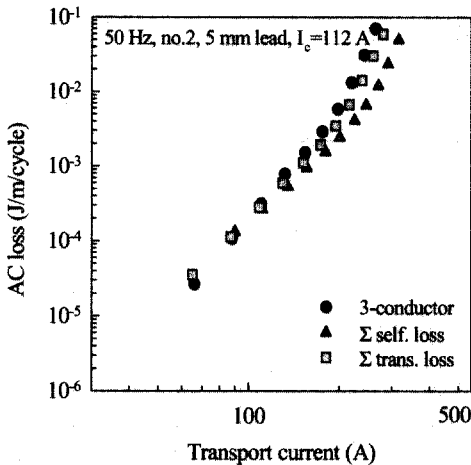
(측정하고자하는 테이프만 통전한 상태에서 측정된 손실로 정의) 및 통전손실(인접한 테이프를 통전한 상태에서 측정된 손실로 정의)을 각각 합한 손실을 나타낸다. 그림 6에서 균일 전류분포일 경우, 3본-도체의 교류손실은 도체를 구성하는 각 테이프에 대하여 측정된 자기자계손실 또는 통전손실을 합한 손실과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 3본-도체의 교류손실은 그림 5 b)의 결과에서 보는 바와 같이 3본-도체를 등가인 1본 테이프로 보는 것보다는 인접 테이프의 교류전류에 의한 영향을 거의 무시할 수 있는 독립된 1본 Bi-2223 테이프들의 집합으로 보는 것이 더욱 타당함을 의미한다.

그림 7에는 각 테이프에 불균일한 전류가 흐를 경우, 3본-도체의 측정된 교류손실에 대한 분석 결과를 요약하여 나타내었다. 그림 4에서처럼 그림 7 a)는 전류 불균일도 파라미터를 1.58로 한 경우 측정된 교류손실을 나타내는 반면 그림 7 b)는 전류 불균일도 파라미터를 0.67로 한 경우 실험결과를 나타낸다. 그림 7에서 각각의 경우에 대하여 ●는 3본-도체의 no.2 테이프에 납땜된 5 mm 리드에서 측정된 교류손실, ▲ 및 ■는 그림 6에서와 같이 3본-도체를 구성하는 각 Bi-2223테이프에 대하여 측정된 자기자계손실 및 통전손실을 각각 합한 손실을 나타낸다.

그림 7에서 불균일 전류분포일 경우, 도체의 임



a) 전류 불균일도 파라미터( $\nu$ )=1.58



b) 전류 불균일도 파라미터( $\nu$ )=0.67

그림 7. 3본-도체의 교류손실: 불균일 전류분포.

Fig. 7. AC losses in the 3-conductor : nonuniform current distribution.

계전류보다 작은 전류영역에서 3본-도체의 교류손실은 전류 불균일도 파라미터에 의존하지 않고, 균일 전류분포인 그림 6과 마찬가지로 3본-도체를 구성하는 각 테이프에 대하여 측정된 자기자계손실 또는 통전손실을 합한 손실과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 도체의 임계전류보다 큰 전류영역에서는 균일 전류분포인 그림 6과는 달리 전류 불균일도 파라미터에 따라서 측정된 3본-도체의 교류손실과 각 테이프의 자기자계손실 또는 통전손실의 합과의 상관관계가 상이해지는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 3본의 Bi-2223테이프로 제작된 도체에 대한 임계전류특성, 교류손실 평가기술 및 교류손실특성을 실험적으로 조사하였으며, 이상의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저 임계전류특성이 상이한 다수 본의 Bi-2223테이프로 제작되는 전력케이블과 같은 도체의 임계전류는 전류분포가 균일할 경우는 전압리드가 부착된 테이프의 임계전류에 비례하는 반면 불균일한 경우는 테이프 자신의 임계전류보다는 전류 불균일 파라미터에 더욱 의존한다. 그리고 균일한 임계전류특성을 지닌 테이프로 제작된 도체에 전류가 균일하게 흐르는 경우를 제외하고는 모든 다수 본의 테이프로 제작된 도체의 임계전류는 유일한 값으로 정의가 불가능하다.

다음은 다수 본의 Bi-2223테이프로 제작된 도체의 교류손실은 1본 테이프에서처럼 전압리드의 배열에 매우 의존하는 반면 전압리드의 접촉위치에는 의존하지 않는다. 또한 임계전류특성과는 달리 측정된 교류손실은 전류 불균일 파라미터에 무관하게 도체의 임계전류보다 작은 전류영역에서는 도체를 구성하는 각 테이프의 자기자계손실 또는 통전손실의 합과 비교적 잘 일치한다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기프린터 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] 류경우, 박권배, 차귀수, 최경달, 이지광, 한송엽, "장척 Bi-2223테이프의 자기자계손실 특성," 전기학회논문지, 49B권, 4호, p. 240, 2000.
- [2] 류경우, 최병주, "인접 교류전류가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p. 251, 2001.
- [3] K. Ryu, K.B. Park, and 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, p. 2220, 2001.
- [4] 류경우, 김창완, 차귀수, "외부교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 통전손실 특성", 대한전기학회논문지, 50B권, 6호, p. 290, 2001.