

## Bi-2223계 Prototype 고온 초전도 케이블의 전류 통전 특성

### The Characteristics on Transport Current of Bi-2223 Based Prototype HTS Cable

김영석\*, 이병성\*, 광민환\*, 장현만\*, 김상현\*  
(Y.S. Kim\*, B.S. Lee\*, M.H. Kwak\*, H.M. Jang\*, S.H. Kim\*)

#### Abstract

Superconducting power cable is one of the most promising energy application of high-T<sub>c</sub> superconductors (HTS). Thus, we investigated previously the electrical and mechanical characteristics on Bi-2223 Ag sheathed tape. And a prototype HTS cable have been designed, constructed and tested. In case of 19-filament tape, transport losses agree with the results of norris theory(strip). The critical current of HTS cable(1, 19-filament) in LN<sub>2</sub> was 116[A], 240[A], and degradation coefficient(k) was 0.71, 0.73 respectively. In case of 19-filament cable, critical current was decreased because of mechanical strain at pitch. And AC loss of HTS cable(19-filament) was 0.7 [W/m] in 240 [A] loading

**Key Words(중요용어)** : High-T<sub>c</sub> Superconductor, AC Transport Current Losses, HTS Cable

#### 1. 서 론

PIT(Powder-in-tube)법을 이용하여 선재를 제작하는 은 피복 Bi-2223선재는 외부자장에 약한 특성과 굽힘과 비틀림에 의한 기계적인 특성이 좋지 않지만, 최근에는 임계전류밀도(이하 J<sub>c</sub>)가 10<sup>4</sup>(A/cm<sup>2</sup>) 이상으로 통전 능력이 우수하고 은 합금을 이용하여 기계적인 특성을 개선한 선재가 실용 개발되고 있다<sup>1)</sup>. 이를 이용하여 변압기, 마그넷, 케이블등의 전력 응용부분에 대한 연구가 진행 중에 있으며, 특히 케이블의 경우 일반 케이블보다 100배 이상의 전류 통전능력을 가지게 되어 대용량 송전이 가능하고 소형화 할 수 있어 실용화의 가능성이 매우 높다. 또한, 케이블은 대도시의 대용량 송전 및 관로 포설시 compact화와 액체 질소를 냉매로 사용하기 때문에 비용면에서 경제적이다 할 수 있다<sup>2)3)</sup>.

이런 Bi-2223선재를 이용한 고온 초전도 케이블

(이하 HTS 케이블)은 미국, 일본, 이탈리아, 독일 등에서 연구가 진행 중에 있다<sup>4)</sup>. 특히, 유럽에서는 Pirelli사 및 Denmark 대학이 협력해서 2kA급 케이블의 연구개발을 진행하고 있으며, 케이블의 교류손실 측정시에는 전압 tap의 형상 및 위치에 따른 전압 loop 경향, 위상오차, 유도전압의 저감 등에 대해 검토를 하고 있다. 또한 일본에서는 Tokyo전력 및 Furukawa 전력에서 66kV, 2kA급의 HTS 케이블을 제작하여 시험하고 있으며, 케이블의 교류손실 저감을 위하여 수치해석에 의한 최적 설계에 대한 검토도 연구하고 있다<sup>5)6)</sup>.

HTS 케이블의 시스템은 크게 도체, 절연체, 냉각부분으로 나뉘며, 선재를 이용한 도체부분은 통전 용량을 증대시키기 위해 다층구조 형태로 제작되고 있으며, 대부분 케이블의 경우 교류 영역에서 운전되기 때문에 통전시에 각 층의 전류분포와 교류손실이 발생하게 된다<sup>7)8)</sup>. 이런 교류손실 발생은 냉매를 기화시켜 경제적 손실을 가져올 뿐만 아니라 기기의 안정성에도 크게 영향을 미칠것으로 생각된다. 따라서 교류손실을 억제하기 위해서 케이블은 spiral 형태로 제작되고 있지만, 이에 따른 자기장에 의한 영

\* 경상대학교 전기공학과(RIACE)  
(경남 진주시 가좌동 900, Fax: 055-759-2723  
E-mail : shkim@nongae.gsnu.ac.kr)  
2000년 3월 23일 접수, 2000년 6월 30일 심사완료

향과 pitch시의 기계적 응력에 의해 선재의  $J_c$ 가 저하되는 문제점도 가지고 있다<sup>9)</sup>.

이와 같은 점을 감안하여 이미 HTS 케이블용 선재의 기계적·전기적 특성을 보고하였고<sup>10)</sup>, 본 연구에서도 선재의 pitch시  $J_c$  및 자장에 대한 영향등을 조사하였다. 따라서 본 연구에서는 Bi-2223 고온 초전도 선재의 전기적 및 기계적 특성을 조사하고 이를 기초자료로 하여 direction type 및 spiral type의 고온초전도 케이블을 제작하였다. 또한 각각의 HTS 케이블의 통전 특성, 교류손실 특성등에 대해 연구하였기에 보고하고자 합니다.

## 2. 실험방법

### 2.1 HTS Cable의 제작

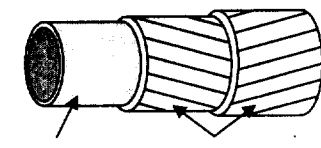
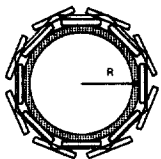
이미 보고한[10]선재의 제작 및 전기적 및 기계적 특성과 표 1에 나타난 보충한 선재의 특성결과들을 토대로 HTS 케이블을 단심선재인 경우 direction형으로 19심 선재의 경우 spiral형의 두 가지 형태로 제작하였다. HTS 케이블의 제작은 외경 16mm, 내

표 1. Bi-2223 선재의 특성

Table 1. Parameters of Bi-2223 tape

Bi-2223 Tape	$I_c$ (A)	S/S <sub>A0</sub>	S (mm <sup>2</sup> )	$J_c$ (A/cm <sup>2</sup> )
1-filament	10.2	0.527	0.375	3467
19-filament	20.5	0.218	0.14	14643

경 14mm인 원통형의 copper former상에 kraft지 (130 $\mu$ m)로 절연시킨 후, 은 피복 Bi-2223선재를 부착하였다. 단심으로 제작한 케이블의 경우, former상에 일직선상으로 인접한 선재의 간격을 최소한으로 하여 부착하였으며, 19심 선재로 제작한 케이블은 pitch 각에 의한 선재의 특성에서  $J_c$ 의 열화 폭이 적은 former의 길이방향과 15° 각으로 선재를 부착하였다. 2층의 경우에는 1층의 선재 상에 kraft지로 절연을 시킨 후, 1층의 감은 방향과 반대방향의 역 spiral 형태로 제작하였으며, 자장의 침입을 최소로



Cylindrical Former Bi-2223 tape

그림 1. 제작된 Prototype 고온 초전도 케이블 형태  
Fig. 1. A shape of constructed prototype HTS cable.

하기 위해, 1층의 인접한 윗 부분에 선재의 가운데 선재 끝 부분에 편조선으로 감은 후 납땜을 하여 고부분이 접하게 하였다. former상에서 선재의 부착은 정하였다. 그림 1에 제작된 prototype HTS 케이블을 나타내며, 표 2에 HTS 케이블의 제원을 나타낸다.

표 2. HTS 케이블의 제원

Table 2. Parameters of cable.

	Size	Characteristics
Former	O. dia : 16 mm I. dia : 14 mm	Copper pipe
Conductor	Length 100 mm	Bi-2223 Tape [3.2mm <sup>w</sup> × 0.25mm <sup>l</sup> ] $I_c = 20.5$ A (1 $\mu$ V/cm) 2 layer (16 wires)
Insulation	Thickness 130 $\mu$ m	Kraft紙 + LN <sub>2</sub>

### 2.2 실험장치 및 방법

HTS 케이블의 대전류 통전 특성은 4단자법을 이용하여 1 $\mu$ V/cm 일 때의 전류값을 임계전류값으로 정하였다. 그림 2에 4단자법에 의한 통전 전류의 측정과 교류손실 측정회로도를 나타낸다. HTS케이블 및 선재의 교류손실의 측정은 전류를 통전 시키고, 외부노이즈의 영향을 최소화하기 위해 차폐선을 사용하여 Lock-in amp(SR 830, Stanford Co.)에서 양단의 전압 신호를 측정하였다. 전압의 측정은 lock-in 기술을 이용하여 전압탭의 페루프를 쇄교하는 자속의 시간적 변화량으로 구할 수 있다.

이때 전체전압은 실제 손실로 표현할 수 있는 유효성분과 회로전체의 Inductance에 의한 유도성분을 포함하고 있다. 여기서 전류단에 Rogowski 코일을 설치하여 출력값을 Lock-in Amp에 입력시켜 차동 기능을 이용하여 유도분을 상쇄 시켰다. 그리고 오

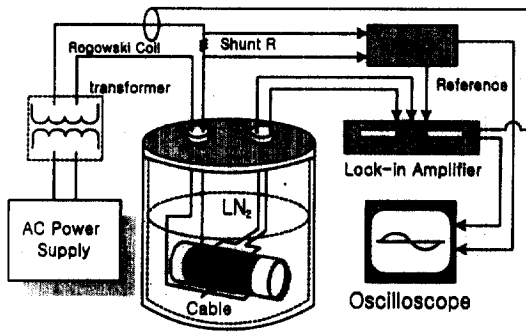


그림 2. HTS 케이블의 교류손실 측정 개략도  
Fig. 2. AC Loss Measurement Diagram of HTS Cable

실로스코프를 사용하여 shunt 저항에서 취득한 전류 신호와 lock-in amp에서 전압 신호를 취득하여 교류 통전 손실을 구하였으며, 다음 식에 주어진다.

$$W = I \times V \quad [W/m] \quad \text{----- 1)}$$

이때의 통전 전류는  $0.1 < I_p / I_c < 1$ 의 범위에서 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

HTS 케이블은 길이 방향에 대해 일정한 전류값을 유지하는 것이 중요하며, 이를 위해 장척의 선재를 제작하여  $J_c$ 의 균일도를 측정하였다. 그림 3에 19심 선재의 길이방향에 대한  $J_c$ 의 균일도를 나타낸다. 장척으로 19심 선재를 만들기 위해 알루미늄 보빈에 60cm로 감은 후, 열처리하였으며, 전압단자 간격은

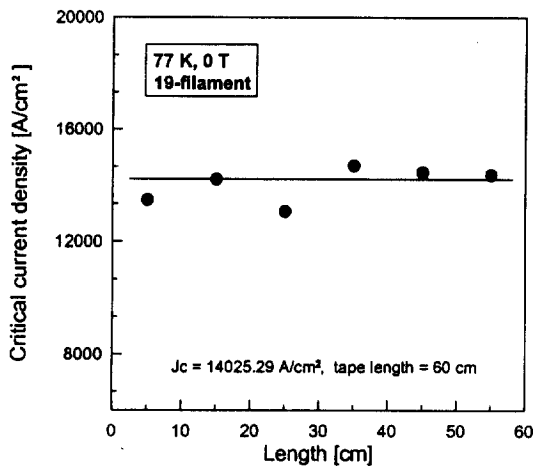


그림 3. 19심 선재의  $J_c$  균일성  
Fig.3.  $J_c$ -distribution of 19 filamentary tape

5cm로 하여  $J_c$ 의 변화를 측정하였다. 측정된 선재의 평균임계전류는 17.1 A였고 선재는 길이방향에 대해  $J_c$ 의 변화가 크게 나타나지 않았으며, 평균  $J_c = 14025.29 A/cm^2$ 였다. 따라서, 장척으로 한 경우  $J_c$ 의 균일성을 확인할 수 있었으며, 케이블 제작에 있어서 선재의 특성은 양호하다고 생각된다.

그림 4에 외부 자장하에서 pitch변화에 의한  $J_c$ 값을 나타낸다. pitch각은 외부자장의 방향과 Bi-2223 선재의 면의 변화로 결정하였다. 그림에서 알 수 있

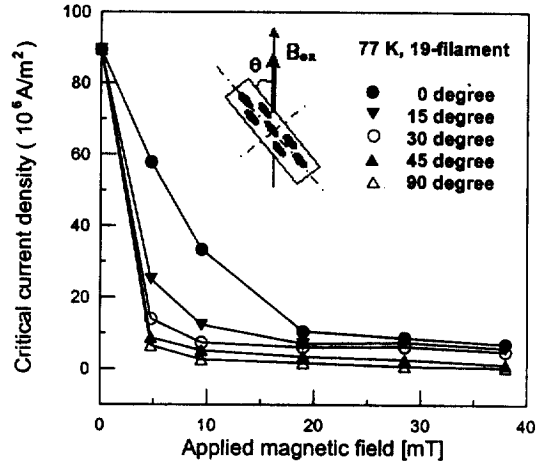


그림 4. 인가자계의 방향에 따른  $J_c$ 의 변화  
Fig. 4.  $J_c$  on direction of applied magnetic field.

듯이 인가되는 자장이 증가함에 따라 Bi-2223 선재의  $J_c$ 는 급격하게 감소되는 현상이 나타나고 있으며, 외부자장의 방향과 수직(90°)할 때보다 수평(0°)할 때의 값이 덜 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그러므로 HTS 케이블 제작시 Bi-2223선재를 일직선상으로 부착하는 것보다는 약간의 pitch를 두어 제작하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

그림 5에 spiral형 케이블 제작시 pitch각에 의한  $J_c$ 의 열화에 관해 나타낸다. 선재의 pitch각은 former 길이방향에 대한 것을 나타내며, 전체 pitch 길이의 1/2에 해당하는 길이를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이  $J_c$  열화의 폭이 19심 선재보다는 단심 선재의 경우 훨씬 심하게 나타나고 있다. 19심 선재의 경우 pitch 각이 30°이하에서 크게 변화하지 않았지만, 단심 선재의 경우는 약 50%이하로 떨어졌다. 그러므로, 단심 선재로는 통전 용량의 측면에서 spiral형의 케이블 구조보다는 direction형태의 케이블로 제작하였으며, 19심 선재의 경우 pitch 각에 의한 열화의 폭은 적으므로, 교류 손실 면에서 spiral형의 케

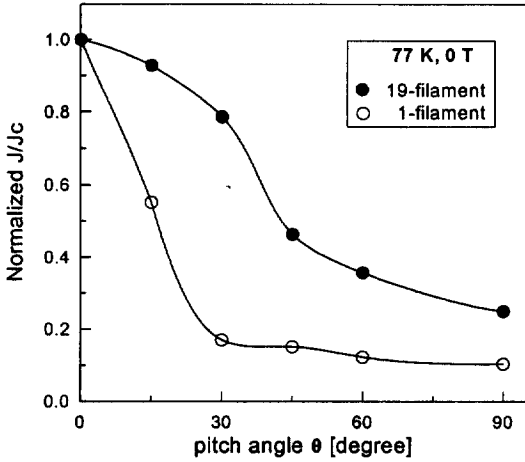


그림 5. LN<sub>2</sub> 중에서 pitch 각에 의한 임계전류밀도  
Fig. 5. J<sub>c</sub> dependence on pitch angle in LN<sub>2</sub>.

이들 구조로 제작하는 것이 유리하다고 생각된다.  
그림 6은 Bi-2223선재인 19심 선재 하나의 교류  
통전 손실을 나타낸다. 실험에서 구한 값은 Norris이  
론식[11]으로 계산한 값과 비교하였는데, Norris이  
론식은 다음과 같이 나타내어진다.

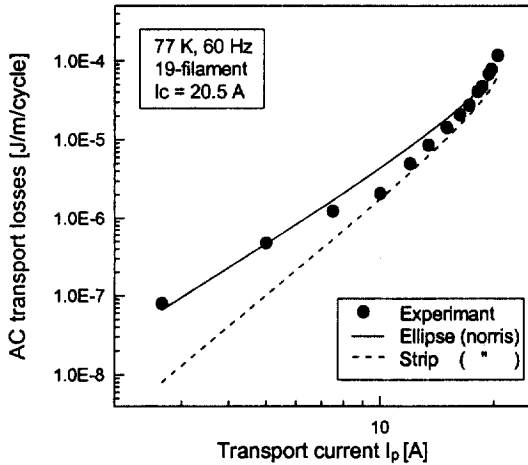


그림 6. 19심 선재의 한 주기당의 교류통전손실  
Fig. 6. AC transport losses per cycle of 19  
filamentary tape.

$I_p \leq I_c$  일 때, 초전도 선재의 단면형상이 strip 형  
상일 경우 손실식은

$$W = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} [(1 + \beta) \ln(1 + \beta)]$$

$$+ (1 - \beta) \ln(1 - \beta) - \beta] \quad \text{-- 2)}$$

로 주어지고, 선재의 단면형상이 ellipse형인 경우의  
손실은

$$W = \frac{\mu_0 I_c^2}{2\pi} [(2 - \beta) \beta + 2(1 - \beta) \ln(1 - \beta)] \quad \text{-- 3)}$$

로 주어진다. 단, 여기서  $\beta = I_p/I_c$  이다.

19심 선재의 손실은 선재의 core단면을 strip형상  
으로 간주하는 Norris 이론식 2)의 값에 가까운 것  
을 알 수 있다. 19심 선재 하나의 손실값은 임계전  
류영역에서 작게 나타남을 알 수 있다.

HTS 케이블의 제작에 있어서 인접한 선재를  
former상에 부착 시에는 통전에 의한 각 선재의 자  
장의 영향이 서로 다른 경향을 나타내고 있다. 인접  
한 선재의 gap에 의한 교류손실의 영향을 살펴보기  
위하여 그림 7에 19심 선재 3개의 배치에 대한 교류  
손실을 나타낸다. 실험은 19심 선재 3개를 일직선상

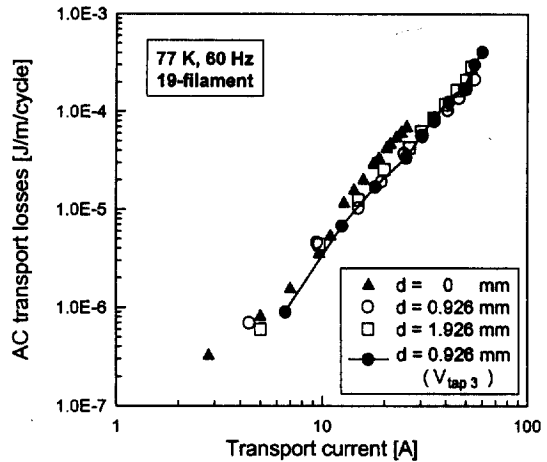


그림 7. 단층으로 배열된 선재의 교류통전손실  
Fig. 7. AC transport losses of tapes arranged in  
single layer.

으로 배치한 후 인접한 선재의 간격을 조절하였으  
며, 각 선재마다 전압탭을 내었다. d=0인 경우는 선  
재가 약간 포개진 경우로 선재 core-core 사이가 0  
인 경우, 0.926인 경우는 선재와 선재 사이의 gap이  
거의 없는 경우, 1.926은 선재와 선재 사이의 gap을  
1mm로 한 경우를 나타낸다. 그림에 나타낸 손실 값  
은 가운데 선재의 손실을 나타내며, 비교를 위해  
0.926일때(●)의 가장자리 선재의 손실 값을 나타  
낸다.

그림에 나타낸바와 같이 교류 손실값은 0.926에서

가장 낮은 값을 나타내며, d=0에서 가장 높은 손실 값을 가졌다. 이것은 d=0인 경우 선재의 겹침에 의한 접촉저항에 의해 손실 값이 증가한 것으로 생각되며, 가운데 선재의 손실 값은 자장의 상쇄에 의해 가장자리의 손실 값보다 낮게 나타났다. 이것으로 HTS 케이블의 제작 시에 인접한 선재의 gap이 최소한으로 작게 하는 것이 손실을 줄이는 방법으로 생각된다.

그림 8에 각 HTS케이블의 전류 통전에 대한 그림을 나타낸다. 케이블의 임계전류는 전류 통전 시

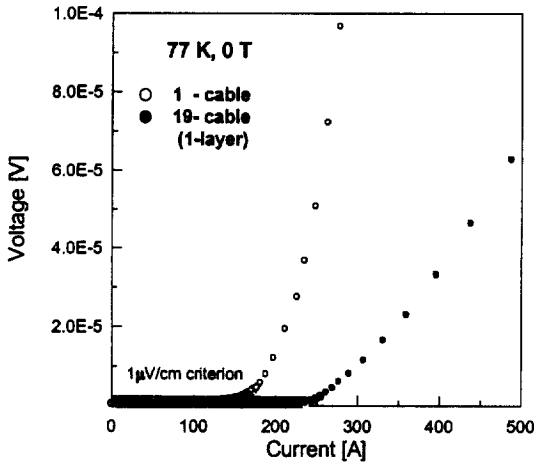


그림 8. HTS 케이블의 I-V 곡선  
Fig. 8. I-V curve for HTS cables.

의 자장에 의한 영향, 제조공정상의 기계적 열화 등을 고려하여 다음과 같이 도체 임계전류를 결정한다.

$$I_{cable} = \sum I_{c-tape} \times k \quad \text{--- 4)}$$

여기서, k는 열화계수이다.

direction형의 단심 케이블과 1층 spiral형 19심 케이블의 통전 전류는 각각 116 A, 240 A였으며, 열화계수는 0.71와 0.73이었다. 19심 케이블의 경우, 선재 부착 시 pitch에 의해 비틀리게 되므로 기계적 열화가 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 9에 19심 케이블의 통전 전류에 대한 교류 손실을 나타낸다. 실험에서 측정된 손실값은 최대 통전 전류 240 A에서 0.7 [W/m]의 값을 가졌으며, 손실값이 비교적 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 선재상호간의 Inductance 증가와 저항의 증가로 인해 높게 나타났다고 사료되며, 교류손실을 감소하기 위해 선재 상호간의 Inductance를 줄이는 것이 연구되어야 하겠다. 차후 Inductance에 의한 영향과 전

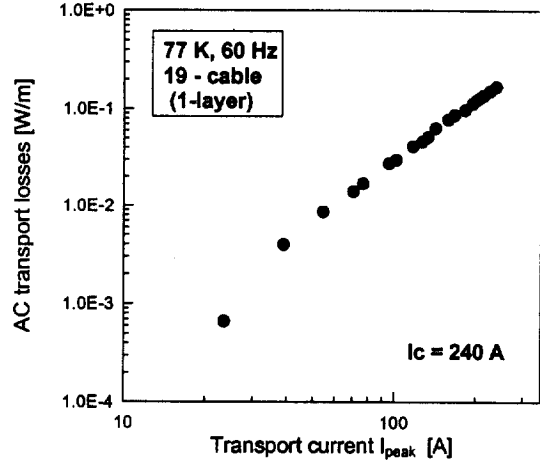


그림 9. 19심 HTS 케이블의 교류통전손실  
Fig. 9. AC transport losses of 19-filamentary HTS cable

류와 손실전압 상호간의 위상오차를 최소화하여 교류손실을 최소화하는 연구를 진행할 예정이다.

#### 4. 결론

본 실험에서 얻어진 결과들은 다음과 같다.

- 1) 보고된 연구결과와 본 연구에서 측정된 결과를 토대로 19심 및 단심 선재를 이용하여 prototype 형태의 케이블 제작하였으며, LN<sub>2</sub>중에서 각각의 통전 전류는 240 A, 116 A였다.
- 2) 19심 선재 3개를 이용한 교류 손실 값은 선재를 인접하게 부착하는 것이 손실을 줄일 수 있었으며, 가운데 선재의 손실 값이 약간 낮게 나타났다.
- 3) 19심 케이블의 경우 임계전류 통전시 손실값은 약 0.7 [W/m]값을 가졌다.

#### 감사의 글

본 연구는 “1998년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비”에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 戸叶一正, 低温工学, Vol.33, No. 5, 1998.
2. Michael, J et al, "HTS Cable Test Facility : Design and Initial Results", IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.9, No.2, pp.134-137, 1999.

3. D.W.Von Dollen, N.G.Hingorani and R.W. Samm  
"High Temperature Superconducting Cable  
Technology", Power cable and Accessories,  
pp.253-257, 1993.
4. 藤上 純, "Bi係銀シース線を用いた超電導導体の交  
流通電特性, 低温工学, Vol.33 No.3, pp. 121-127,  
1998.
5. 海保勝之, 低温工学, Vol.34, No.12, pp.741-757.  
1999.
6. L.M.Fisher, "Losses in Bi-2223/Ag tapes and in  
the 1kA AC transmission line model. Supercond.  
Sci. Technol.12. pp.24-35, 1999.
7. M.Daumling, "A model for the current  
distribution and ac losses in superconducting  
multi-layer power cables", Cryogenics 39, pp.759  
-765, 1999.
8. R.Wesche, A.Anghel, B.Jakob, G.Pasztor, G.  
Vecsey, "Design of superconducting power  
cables", Cryogenics, 39, pp. 767-775
9. T.P.Beales et al, " A DC Transmission Cables  
Prototype Using High-Tc Superconductors"  
Supercond.Sci. Technol. 9, pp.43-47, 1996
10. 백승명, 김영석, 정순용, 김상현, "고온 초전도 케  
이블용 Bi-2223선재의 기계적 특성", 한국전기전자  
재료학회, Vol.11, No.11, pp.1028-1034, 1998.
11. W.T Norris, Journal of Physics. D 3, pp. 489-  
507, 1970.