

## 유도형 고온초전도 한류기용 Prototype 직류 리액터의 설계와 제작

### Optimal Design and Fabrication of Prototype DC Reactor for Inductive Superconducting Fault Current Limiter

김태중\*, 강형구\*\*, 고태국\*\*

(Kim Tae Jung\*, Hyoung Ku Kang\*\*, and Tae Kuk Ko\*\*)

#### Abstract

In this paper, dc reactor for the inductive high-Tc superconducting fault current limiter (SFCL) was optimally designed by finite element method(FEM). The prototype high-Tc dc reactor was manufactured and compared to the results of design. This dc reactor consists of 4-stacked double pancake coils which are wounded with Bi-2223 wire coated with SUS315L. Kapton tape is used for the insulation of turn to turn and layer to layer. Each pancake is connected in series by soldering. Finally, optimal design and manufacture method for the dc reactor is suggested in this paper. Through the comparison of result of optimal design and experimental result of prototype high-Tc superconducting dc reactor, reliance on the design of the high-Tc dc reactor for the 1.2 kV/80 A SFCL is proved.

**Key Words** : Superconducting fault current limiter, Double pancake coil, Dc reactor, Superconducting magnet

#### 1. 서론

1900년대 초에 K.Onnes에 의해 초전도 현상이 처음 발견된 이후로 일반적인 초전도 현상에 관한 연구가 활발히 진행되었으며, 1980년대 중반 이후로 접어들어서 고온초전도체가 발견되면서부터는 고온초전도체를 변압기, 한류기, 송전용 케이블, 모터, 그리고 발전기 등 각종 전력기에 응용하기 위해서 폭넓게 연구가 진행되고 있는 실정이다. 그 중 초전도 한류기는 초전도 전력기기 중 변압기, 케이블 등과 더불어 실용화 가능성이 높아서 전 세계적으로 가장 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나이다. 특히 전력계통의 용량 증가와 기기 보호를 위한 필수적인 전력기기로 인식되어 현재 세계

각국에서 경쟁적으로 고온초전도 한류기를 연구하고 있는 실정이다. 이러한 고온초전도 한류기는 크게 저항형, 유도형, 복합형으로 나뉘어지며, 유도형은 다시 자기 차폐형, 포화 리액터형, 직류 리액터(DC reactor)형으로 세분화되어 연구되고 있다. 이중 직류 리액터형 한류기는 크게 자기 코어 리액터, 전력변환기, 직류 리액터 세부부분으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 직류 리액터의 설계기법을 통하여 얻은 최적설계 파라미터들을 바탕으로 prototype의 직류 리액터를 설계하고 직접 제작하였다[1]. 또한 최적설계의 결과와 실제 제작된 직류 리액터의 특성을 비교하였으며, 비교결과를 통하여 1.2 kV/ 80 A급 직류 리액터 설계결과와 신뢰성을 입증하였다[2].

유도형 고온초전도 한류기는 직류 리액터의 인덕턴스값을 이용하여 사고전류의 크기를 제한하는 역할을 하게 된다. 따라서 사고전류의 크기를 적절하고도 효율적으로 제한하기 위해서는 직류 리액터의 인덕턴스값과 리액터의 사이즈 등 여러 가지 파라미터들을 미리 예측하여 설계하는 것이 매우

\* : 성남기능대학 전기공학과

\*\* : 연세대학교 전기전자공학과

(서울시 서대문구 신촌동 134번지,

Fax: 02-393-2834

Corresponding Author : maglev@yonsei.ac.kr)

2003년 3월 8일 접수, 2003년 4월 15일 1차 심사완료,

2003년 5월 7일 최종 심사완료

중요하게 된다. 그러나 고온초전도선재는 세라믹계로써 저온초전도선재와는 다르게 곡률반경에 따라 임계전류의 크기가 상이해지게 되므로 이를 고려하여 직류 리액터의 크기를 결정해 주어야 하는데, 이 직류 리액터의 사이즈는 시스템의 경제적인 측면과 밀접한 관계를 가진다. 또한 직류 리액터에서 발생하는 자기자계의 크기는 임계전류의 값을 결정하는데 커다란 영향을 끼치게 되며 운전전류의 크기에 의해 발생하는 Lorentz's force의 크기는 또한 시스템의 안정성에 영향을 미친다. 따라서 계통에서 효율적인 한류작용을 하기 위한 인덕턴스값과 임계전류의 크기를 가지기 위해서는 이와 같은 여러 가지 상호관계들을 고려해 주어야 한다. 본 연구에서는 위에서 언급한 여러 조건들과 유한요소법을 이용하여 고온초전도 직류 리액터를 설계하였다. 이러한 설계결과를 이용하여 prototype의 직류 리액터를 제작하고 그 특성을 측정하였다. 제작된 prototype 직류 리액터의 특성은 유한요소법을 이용하여 얻은 설계결과와 거의 일치함을 알 수 있었다. 결과적으로, 본 연구결과를 통해서 1.2 kV/80 A급 고온초전도 한류기용 직류 리액터의 설계결과와 신뢰성을 입증할 수 있었다.

표 1. Prototype 직류 리액터의 설계사양.

Table 1. Specifications of prototype dc reactor.

Total Height	0.036 m
Inner Diameter	0.099 m
Outer Diameter	0.1186 m
Kapton Thickness	0.000335 m
Wire Length	19.2 m × 4 ea

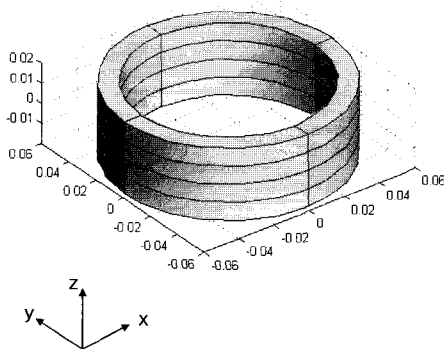


그림 1. Prototype 직류 리액터의 모델링도.

Fig. 1. Modeling of prototype dc reactor.

## 2. 본 론

### 2.1 Prototype 직류 리액터의 설계

유도형 고온초전도한류기는 직류 리액터의 인덕턴스의 크기를 이용하여 사고시 급격하게 증가하는 전류의 크기를 제한하여 기기를 보호하는 역할을 한다. 사고전류의 크기를 제한하기 위해서는 직류 리액터의 인덕턴스값을 적절히 결정해야 하는데, Newton method를 이용하여 1.2 kV/80 A급 한류기용 직류 리액터의 인덕턴스값을 계산하였을 때, 필요한 최적의 인덕턴스값은 대략 200 mH 이상임을 알 수 있다[1]. 이러한 200 mH 이상의 1.2 kV/80 A급 고온초전도 한류기용 직류리액터를 설계하면, 대략 단위길이(piece length) 200 m인 고온초전도선재를 이용하여 제작한 더블팬케이크 코일 4개를 직렬 연결한 구조를 가지게 된다. 더블팬케이크 코일들은 양면에 SUS315L이 코팅된 BSCCO-2223 테이프(reinforced wire, 강화선재)로 제작하였으며, 각각의 코일들은 서로 솔더(solder)를 이용하여 접합하였다. 본 실험에서 설계하고 제작한 prototype 직류 리액터는 1.2 kV/80 A급 직류 리액터의 구조와 동일하게 4개의 더블팬케이크 코일을 직렬로 연결한 구조이다. 각각의 더블팬케이크 코일은 강화선재 19.2m를 이용하여 권선하였으며, 보빈의 지름은 9.9cm이다. 표 1에 prototype 직류 리액터의 설계사양을 나타내었다.

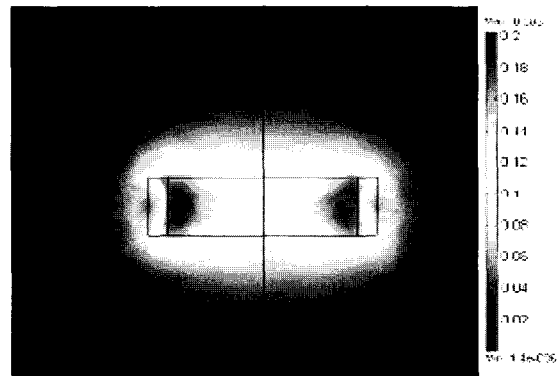


그림 2. 동작전류 50 A일 때 자장분포의 yz단면도.

Fig. 2. Distribution of magnetic field in dc reactor at 50 A.

### 2.2 Prototype 직류 리액터의 시뮬레이션 결과

표 1과 같이 제시된 설계사양을 기본으로 FEMLAB을 이용한 유한요소법으로 prototype의

직류 리액터를 3차원 시뮬레이션하였다. 그림 1에는 prototype 직류 리액터의 설계도를 나타내었으며, 그림 2에는 동작전류 50 A일 때 직류 리액터에서 발생하는 자장 분포값의 해석결과를 2차원 단면도로 도시하였다. 직류 리액터의 내부에서 발생하는 최대 자장은 직류 리액터의 가장 안쪽 부분에서 약 0.2 T였으며, 이때 발생하는 Lorentz's force의 최대 크기는 대략 0.3 MPa로써, 이 값은 강화선재의 수직방향의 최대 허용 stress값이 265 MPa(27 kg·f/mm<sup>2</sup>)임을 감안하였을 때 매우 작은 값이다.

또한 1.2 kV/80 A급 유도형 한류기용 직류 리액터의 경우에도 사고전류가 발생하였을 때 유도되는 Lorentz's force의 값을 위와 같은 방법으로 계산하였을 때, 그 값이 대략 10 MPa 정도임을 감안한다면 유도형 고온초전도 한류기용 직류 리액터는 통전전류에 의해 발생하는 Lorentz's force에 대해 상당히 안정함을 알 수 있었다. 또한 FEM을 이용하여 계산한 직류 리액터의 인덕턴스는 약 6.4 mH이었다[2].

### 2.3 Prototype 직류 리액터의 제작

Prototype 직류 리액터용 더블팬케이크 코일은 기계적 성능을 향상시키고 취급(handling)상의 용이함을 위해서 선재 양면에 SUS315L이 코팅되어 있는 ASC사의 강화선재를 이용하여 제작하였다. 표 2에는 SUS315L을 포함한 강화선재의 사양을 나타내었다.

직류 리액터를 제작하기 위해서 더블팬케이크 코일 제작용 권선기를 제작하였으며, 각각의 더블팬케이크 코일은 약 19.2 m의 강화선재를 이용하여 권선하였다. 권선시에 고온초전도선재를 수평으로 잡아당기는 장력의 값이 너무 클 경우에는 세라믹 계열인 BSCCO 조적이 파손되어 선재의 특성이 저하될 수가 있으며, 반대로 장력의 값이 너무 작은 경우에는 초전도선재가 보빈에 단단하게 고정되지 않아 시스템이 기계적으로 전기적으로 불안정하게 될 위험이 있게 된다. 더욱이 진도냉각과 같은 방식의 냉각 시스템에서는 선재 층 간의 밀착도에 따라서 냉각 효율이 결정될 수 있기 때문에 적절한 장력값의 선정이 중요하게 된다.

현재 이렇게 수평으로 잡아당기는 장력에 의해 초전도선재가 손상되지 않는 범위 내에서 최대한 안정적으로 권선을 하기 위한 최적의 장력 범위를 실험적으로 연구하고 있으며, 이 연구결과에 대한 자세한 내용은 추후에 발표할 예정이다.

표 2. SUS315L을 포함한 고온초전도 선재의 사양.  
Table 2. Specifications of reinforced wire.

Wire	Bi-2223/AgMg
Thickness	0.000305 m
SUS thickness	0.000097 m (both sides)
Width	0.0041 m
Ic@77K	134 A
Max. stress	265 MPa (perpendicular to the tape)
Laminated material	SUS315L

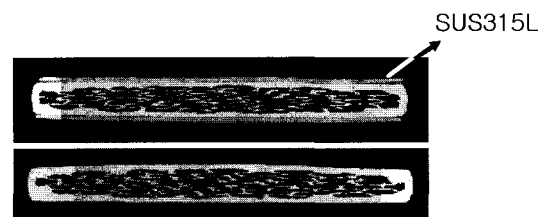


그림 3. 고온초전도선재의 단면사진그림.  
(a) 강화선재의 단면도 (위)  
(b) 일반 초전도선재의 단면도 (아래)

Fig. 3. Cross section view of HTS wire.  
(a) Reinforced wire by SUS315L (up)  
(b) Non-reinforced wire (down)

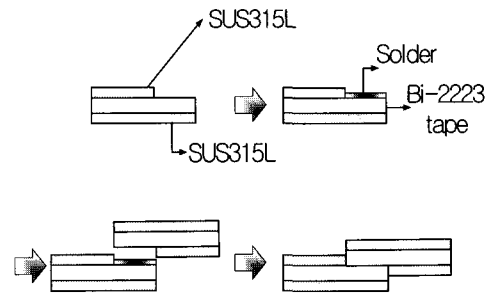


그림 4. 강화선재의 접합순서.  
Fig. 4. Process of joint between reinforced wires.

본 연구에서 사용된 권선 장력은 약 0.5 kg·f였다. 이렇게 제작된 4개의 코일들은 각각 솔더를 이용하여 접합하였다. 그러나 강화선재의 경우에는 초전도선재의 표면이 그림 3의 (위)에 있는 그림에서 보는 바와 같이 SUS로 코팅되어져 있어서, 솔

더에 의한 접합이 어려울 뿐만 아니라 접합저항값의 상승으로 인한 임계전류값의 저하등 여러 가지 문제점이 있다. 따라서 접합부분의 초전도선재 표면에 코팅되어져 있는 SUS를 에칭시킨 후 접합하였다. 에칭시간은 대략 1시간 정도로 충분히 하여 표면의 SUS를 완전히 제거하였다. 선재 전체가 SUS에 의해 기계적 강도가 강화되어 있으나, 접합을 하기 위해서 접합부를 양면 모두 에칭시키면, 상대적으로 기계적 강도가 약한 AgMg 매트릭스 부분이 나타나게 되므로 접합 등의 취급시에 SUS와 AgMg 경계부분에서 파손의 위험이 있다. 따라서 초전도선재의 한쪽 면만 에칭시켜서 다른 한쪽 면은 기계적 강도를 유지해 주는 것이 매우 중요하다. 이러한 접합공정을 간략하게 그림 4에 나타내었다. 초전도선재 간의 접합은 직류 리액터의 외경이 약 9.9 cm 정도로 작지만 접합부의 접합저항값을 줄이기 위해서 접합길이를 5 cm로 가능한 최대로 하여 SnAg paste 솔더를 이용하여 접합하였다.

### 3. 특성 실험

#### 3.1 단척시료(Short sample)의 특성 실험

표 3. 접합조건에 따른 임계전류값의 변화.

Table 3. Critical current with respect to various joint conditions.

접합 회수	접합길이	
	2 cm	5 cm
1회	110 A (12cm)	115 A (10cm)
2회	110 A (12cm)	115 A (15cm)
3회	110 A (12cm)	115 A (18cm)

더블팬케이크 4개를 직렬 연결한 직류 리액터를 제작하기 위해서는 초전도선재 간의 접합이 필수적이므로 접합된 선재의 특성을 실험을 통하여 알아보았다. 접합길이는 2 cm와 5 cm, 접합회수는 1회와 3회로 조건을 달리하여 시료를 제작하였다. 비접합 단척시료의 경우 134 A 정도의 임계전류값을 가지지만 접합길이와 접합회수가 변화함에 따라 임계전류의 값은 크게 변화함을 알 수 있었다.

참고로 본 연구에서 초전도선재의 임계전류값은 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 을 기준으로 정하였다. 표 3에는 접합조건에 따른 임계전류값의 변화를 나타내었으며, 팔호 안의 값은 전압탭의 길이를 나타낸다. 표 3에서의 결과와 같이 접합길이가 길어지면 면적이 증가하게 되어 접합저항값의 크기가 감소되므로, 결과적으로 임계전류값의 감소를 최소화할 수 있게 된다. 따라서 접합부의 길이를 가능한 길게 해주면 임계전류값의 감소를 최소화할 수 있을 것이다. 그러나 1회 접합한 선재나 3회 접합한 선재의 임계전류값은 변화하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 접합선재의 임계전류값은 접합길이와 솔더의 두께, 그리고 접합 온도 등에 의해서 결정되지만 접합회수와는 무관함을 알 수 있었다. 또한 3회 접합한 선재의 접합저항값은 대략  $7 \times 10^{-7} \Omega$ 이었으며 이 값을 비저항값으로 환산하면 약  $2 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ 이다. 그러나 실제로 본 실험에서 고온초전도선재는 단척시료 실험조건과 같이 직선구조가 아니라 최소 9.9 cm의 곡률반경을 가지고 권선된 곡선구조이므로 이 곡선조건에서의 임계전류값을 측정하였다. 결과적으로 그림 5와 그림 6에서의 결과와 같이 5 cm의 길이로 3회 접합한 선재에서의 임계전류값은 정상시의 약 86 %, 곡률반경 9.9 cm일 때의 임계전류값은 정상시의 약 85 %정도가 되므로 통전전류의 크기에 의한 자기자계의 영향을 무시한 단척시료의 경우, 곡률반경 9.9 cm의 보빈에 고온초전도선재를 3회 접합하여 권선한 경우의 임계전류값은 대략

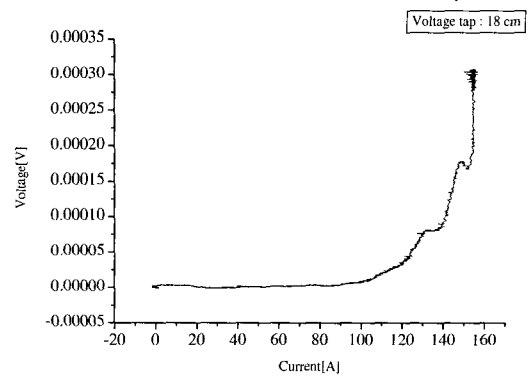


그림 5. 접합길이 5 cm, 3회 접합시 선재의 임계전류특성.

Fig. 5. V-I Characteristic of superconducting tape at 5 cm joint length and 3 joints.

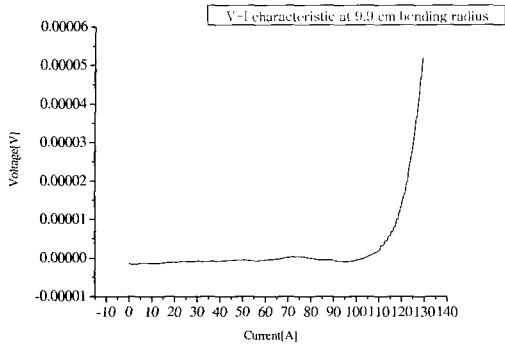


그림 6. 곡률반경이 9.9 cm 일 때 비접합선재의 임계전류특성.

Fig. 6. V-I characteristic of superconducting tape at 9.9 cm bending radius.

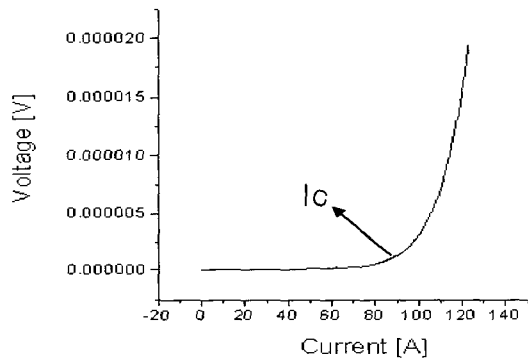


그림 7. 3회 접합 후 곡률반경 9.9 cm 보빈에 권선한 선재의 임계전류특성.

Fig. 7. V-I characteristic of wound superconducting tape to the bobbin after joints.

90 A 가량으로 예측할 수 있다. 또한 실제로 3회 접합한 단축의 시료를 보빈에 2턴 가량 권선하여 자기장계의 영향을 거의 받지 않는 조건 하에서 임계전류 측정실험을 한 결과, 임계전류값은 대략 88 A로써 예측 임계전류값과 유사함을 알 수 있었다. 또한 강화선재의 임계전류특성과 더불어 접합부의 극저온에서의 기계적 특성을 알아보기 위해서 5 cm 접합 길이로 접합한 선재에 100 A의 전류(임계전류값의 약 87%)를 연속으로 24시간 통전시킨 후의 접합상태를 실험하였다. 그 결과, 솔더에 의해 접합된 부분은 장시간 극저온에서의 운전 에 의해 기계적으로나 전기적으로 그 특성이 저하

되지 않음을 알 수 있었다.

### 3.2 더블팬케이크 코일의 특성 실험

더블팬케이크 코일 4개를 직렬로 접합하여 직류 리액터를 제작하기에 앞서 코일들 각각의 특성을 실험하였다. 4개의 코일들은 모두 내경 9.9 cm의 보빈에 19.2 m의 초전도선재로 같은 조건 하에서 제작되었다. 0.5 kg·f의 장력으로 같은 조건 하에서 제작된 각각의 더블팬케이크 코일은 4개 모두 비슷한 인덕턴스와 저항값을 가지고 있었으며, 이 결과를 표 4에 나타내었다. FEMLAB을 이용한 시뮬레이션을 통하여 계산한 인덕턴스 역시 660  $\mu$ H로써 측정값과 거의 일치하였다. 참고로 prototype 코일의 인덕턴스를 측정하는데 사용된 LCR 미터는 HP사의 4263A 모델이며, 인덕턴스 측정 주파수는 100 Hz를 사용하였다. 또한 코일 각각의 임계전류값을 액체질소의 온도 77 K에서 측정한 결과 역시 모두 65 A 정도로 유사하였다. 이 결과는

표 4. 더블팬케이크 코일의 특성.

Table 4. Specifications of double pancake coils.

Double Pancake Coil	Inductance	Resistance @300K	Ic @77K
#1	661 $\mu$ H	0.85 $\Omega$	65 A
#2	660 $\mu$ H	0.82 $\Omega$	65 A
#3	675 $\mu$ H	1.1 $\Omega$	68 A
#4	670 $\mu$ H	1.1 $\Omega$	66 A

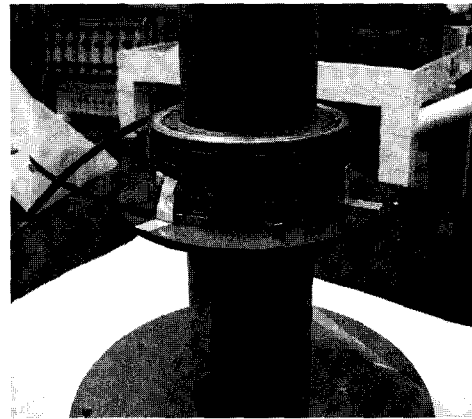


그림 8. Prototype 직류 리액터의 모습.

Fig. 8. Picture of prototype dc reactor.

자기자계의 영향을 무시한, 단척시료와 같은 조건으로 권선한 경우일 때의 임계전류값인 88 A의 약 74 %에 해당하는 값으로, 이와 같이 예상전류보다 실제 임계전류값의 감소가 커진 이유는 자기자계의 크기에 의한 임계전류값의 감소와 더블팬케이크 코일 권선 시의 장력, 더블팬케이크의 제작과 접합 등의 공정에서의 취급(handling) 등으로 인한 초전도선재의 특성 감소에서 기인된 것으로 판단된다.

**3.3 Prototype 직류 리액터의 특성 실험**

4개의 더블팬케이크 코일들은 모두 같은 조건 하에서 제작되었으며, 각각 인덕턴스는 661  $\mu$ H, 임계전류값은 65 A 정도로 유사한 특성을 가지고 있다. 이러한 각각의 코일들을 SnAg 솔더를 이용하여 접합하였으며, 4개의 코일로 이루어진 구조이므로 접합회수는 3회이다.

이렇게 제작한 prototype의 직류 리액터의 임계전류값은 60 A 정도로 더블팬케이크 코일 각각의 임계전류값보다 감소하였으며, 인덕턴스는 6.52 mH로 시뮬레이션을 통해 얻은 6.4 mH와 유사하였다. 그림 8에 prototype 직류 리액터의 임계전류 특성도를 나타내었다. 또한 통전전류에 의한 발생 자장값은 직류 리액터의 중앙 상단부에서 약 1.5 cm 정도 떨어진 지점에 transverse 타입의 홀센서를 부착하여 측정하였는데, 측정값은 약 850 Gauss였으며 시뮬레이션을 통해 계산한 자장값은 약 900 Gauss 정도였다. 그런데 직류 리액터에서 통전전류에 의해 발생하는 자기자계의 방향은 거의 모두 선재의 방향과 평행한 방향이 된다[1]. 한편, ASC

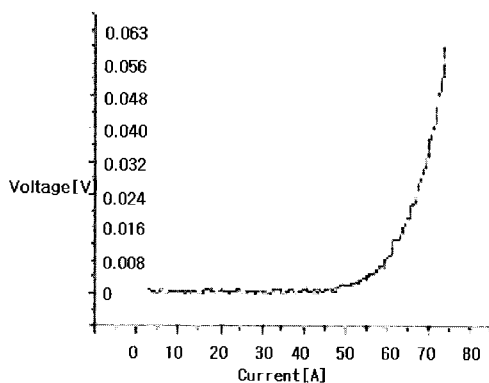


그림 9. Prototype 직류 리액터의 임계전류특성.  
Fig. 9. V-I characteristic of prototype dc reactor.

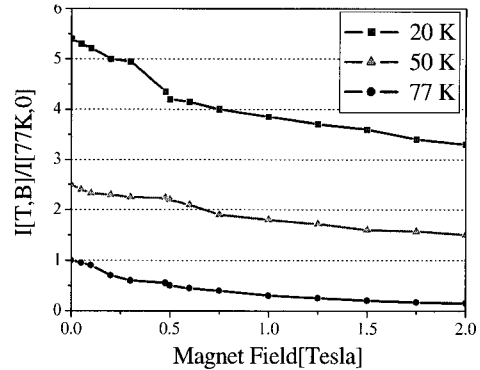


그림 10. 온도별 외부 자기장의 세기에 따른 고온 초전도선재의 임계전류값의 변화.

Fig. 10. Bi-2223 performance at different temperatures and fields compared to the performance at 77 K for field parallel to the tape surface.

사의 고온초전도선재는 그림 6에서와 같이 77 K에서 0.2 T의 평행자계에 의해 임계전류값이 약 70 % 정도로 감소됨을 알 수 있다. 따라서 직류 리액터의 운전전류를 50 A로 하였을 때 발생하는 최대의 자장값은 그림 2에서 보는 바와 같이 직류 리액터의 가장 안쪽 부분에서 약 0.2 T 정도가 된다. 따라서 단척선재를 사용하여 9.9 cm의 곡률과 선재 간 접합을 한 임계전류특성 실험에서 얻은 임계전류인 88 A보다 70 % 정도로 더 감소된 62 A 정도가 되어야 한다. 실제 임계전류의 값은 60 A로써 거의 자기자계의 크기에 의해서 임계전류값의 크기가 결정됨을 알 수 있었다.

이와 같은 실험결과를 종합해 보면, 초전도 마그넷에서의 임계전류값은 크게 자기자계, 접합저항, 기계적 충격 등에 의해서 감소된다고 할 수 있다. 그 중에서 첫 번째 요인은 자기자계의 크기에 의한 감소이며, 이 문제는 마그넷의 직경을 조절함으로써 최소화할 수 있으나 그에 따른 냉각비용의 증가가 문제될 수 있다. 두 번째로는 접합저항값에 의한 임계전류값의 감소를 들 수 있다. 그러나 이 문제는 알맞은 접합공정을 통해서 접합저항에 따른 임계전류값의 감소를 최소화할 수가 있다. 마지막 세 번째로는 마그넷 제작시에 오는 기계적 충격으로 인한 임계전류값의 감소를 들 수 있다. 그러나 이 문제 또한, 강화선재를 사용하여 최적의 장력조건을 사용한다면 그 피해를 최소화할 수가 있게 된다. 따라서 유도형 고온초전도한류기용 직

류 리액터를 포함한 고온초전도 마그넷에서의 임계전류값 감소는 대부분 자기자계의 크기에 의해 감소된다고 할 수 있다.

마지막으로 그림 6에서와 같이 비접합 선재에서의 index n값을 측정 한 결과, 대략 20 정도였다. 한편, 그림 5, 7, 9와 같이 강화선재를 에칭시켜 접합하여 제작한 접합선재에서의 index n값은 16 정도로 다소 감소하였다. 이 값은 현재 미국의 FBML이나 일본의 NRIM과 같은 선진 외국에서 개발 중인 1 GHz급 NMR용 insert coil에 사용되는 고온초전도선재의 index n값이 16 정도임을 감안했을 때 바람직한 것으로 판단된다[3].

#### 4. 결론

본 논문에서는 prototype의 고온초전도 직류 리액터를 여러 가지의 조건들과 FEM을 이용하여 설계하고, 직접 제작하여 그 특성을 측정하였다.

즉, 다음과 같은 결론을 통해서 1.2kV/80A급 유도형 고온초전도한류기용 직류 리액터 설계결과의 신뢰성을 입증할 수 있었다.

1. 강화선재는 기존의 은합금 선재와 동일한 접합 특성 결과를 얻을 수 있었으며, 접합부는 장시간 극저온의 조건 하에서도 기계적으로 전기적으로 안정하다는 사실을 알 수 있었다.
2. 운전전류에 의해 발생하는 Lorentz's force의 크기는 강화선재가 수직방향으로 견딜 수 있는 최대 stress의 크기에 비해 무시할 정도로 매우 작은 크기이므로 유도형 고온초전도한류기용 직류 리액터는 Lorentz's force에 대해 상당히 안정하다.
3. 고온초전도 선재의 임계전류값은 초전도선재 간의 접합에 기인한 접합저항, 장력이나 마그넷 제작 시 취급(handling)에서 오는 충격, 그리고 운전전류에 의해 발생하는 자기자계 등 크게 세가지의 요인에 의해 감소될 수 있으며, 이 중에서 자기자계에 의한 원인이 가장 지배적이다.
4. 고온초전도선재의 임계전류값은 자기자계의 세기에 의해 크게 변하게 되며, 직류 리액터의 설계, 제작시에 3차원 FEM 해석 등을 이용하여 최대 발생자기장의 크기를 계산하고 이에 따른 임계전류값의 감소를 미리 예측하여 적절하게 직류 리액터 보빈의 반경을 결정할 수 있다. 따라서 직류 리액터 보빈의 반경에 의한 임계전류값과 냉각효율 간의 경제성을 고려해야 한다.

5. 이상과 같이 얻어진 여러 가지의 결론들을 이용하여 1.2 kV/80 A급의 유도형 고온초전도한류기용 직류 리액터를 제작할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] 서호준, 이승제, "Newton Method를 이용한 DC Reactor Type 한류기의 최적설계", Proceedings of KIASC Conference 2002, p. 330, 2002.
- [2] 김용구, 강형구, "유한요소법을 이용한 유도형 고온 초전도 한류기용 DC Reactor의 설계 파라미터 결정법에 관한 연구", Proceedings of KIASC Conference 2002, p. 326, 2002.
- [3] T. Kiyoshi, H. Kitaguchi, and H. Mumakura, "High-field performance of BSCCO coils with an outer diameter of 130mm", Presented at MT-15, October 20-24, Beijing, China, 1997.
- [4] Takashi Yazawa and Eriko Yoneda, "Design and test results of 6.6 kV high-Tc superconducting fault current limiter", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, March, 2001.
- [5] M. Yamaguchi and S. Fukui, "Performance of DC reactor type fault current limiter using high temperature superconducting coil", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, June, 1999.
- [6] 김정호, 지봉기, 박형상, 임준형, 오승진, 주진호, 황보훈, 나완수, "Bi-2223 초전도선재의 상전도 및 초전도-접합부 특성평가", 전기전자재료학회논문지, 13권, 3호, p. 247, 2000.
- [7] 김민기, 고요, 한병성, "설계조건에 따른 고온 초전도 마그넷의 특성변화", 전기전자재료학회논문지, 8권, 4호, p. 451, 1995.