

## BSCCO 벌크를 이용한 초전도 한류기

현 옥 배  
한전 전력연구원

### 1. 서 론

초전도 한류기는 전기 회로에 직렬로 삽입되어 동작하는 수동 소자로서, 사고 발생시 대단히 빠르게 임피던스를 발생시켜 고장전류를 제한한다. 여러 종류의 고온초전도체가 한류기용 도체로 활용되고 있는데, 도체의 종류에 따라 다양한 종류의 초전도 한류기가 제안 및 개발되고 있다. 그 중 저항 스위치형 한류기는 통전 전류가 임계전류( $I_c$ ) 초과시 초전도체가 상전도체로 전이(quench)할 때 저항이 발생함을 이용하는 바, 고장 감지 및 한류동작이 같은 부품에서 동시에 이루어지므로 수동소자이다. 저항발생은 대단히 빨리 일어나는데, 이는 초전도체의 허용 전류밀도가 대단히 높아 상전이시 입력되는 에너지가 높은데다 열용량이 작은 이유로 온도상승이 대단히 빠른 것과 관계있다.

초전도 한류기는 저온초전도체로도 개발되었으나 액체헬륨온도 운용이라는 높은 운용비용으로 실용화되지 못하였다. 이에 운용비용이 낮은 고온초전도체의 활용이 기대되고 있다. 여러 가지 고온초전도체, 예로서 YBCO 벌크 및 박막, BSCCO 벌크 (tube 혹은 plate), 게다가 최근 개발되고 있는 coated conductor (CC)가 저항스위치 한류소자 제작에 쓰인다.

이 중 YBCO 박막은 우수한 한류동작을 보임에도 범용으로의 활용이 어려울 것으로 전망되고 있는데, 이는 YBCO 박막을 대량으로 값싸게 제작하는 것이 어렵기 때문이다. 대안으로 CC에의 기대가 높으나 대량생산이 이루어질려면 다시 수 년의 시간이 더 필요할 것으로 보여 현재 범용화 되지 못하고 있다. Bi2223 PIT 선재도 있으나, Ag 모재에서 저항발생이 곤란하여 저항형 한류기로는 쓰이지 않는다. Bi2223 벌크는 순수한 상을 얻기가 힘들다. 벌크를 만들려면 solid state reaction을 넘어서 용융상태로 들어가야 하는데,

Bi2223는 용융으로 제작되기 대단히 힘들다. 가장 제작공정이 용이한 것이 Bi2212 벌크이다.

본 논문에서는 현재 생산 및 가격에서 응용이 이루어지리라고 전망되고 있는 Bi2212 벌크(tube 혹은 plate)를 활용한 초전도 한류기 개발에 대해 논할 것이다. 그 중에서도 한류기 개발이나 활용보다는 Bi2212 도체의 응용에 초점을 맞추되, 해당 도체를 어떻게 가공하여 한류소자를 제작하는지, 그리고 어떤 문제 해결이 우선 필요한지 등을 중점적으로 논의할 것이다.

### 2. BSCCO 한류소자의 Quench 촉진 방식 및 특성

고온초전도체는 산화구리 계열의 세라믹으로 제조공정의 어려움 때문에 불가피하게 결함을 갖는데, 이들 중 한류기 개발과 관련하여 가장 중요한 것이 (1) 전류특성 불균일과 (2) 도체의 크기에 제한이 있는 점 등이다. 이 결함을 극복하고자 하는 기술에 의해 여러 형태의 한류기 제작 기술이 개발되고 있다.

#### 가. 초전도체 켄치의 문제

우선, 임계전류밀도( $J_c$ )의 불균일 때문에 한류 동작시 국부적 켄치에 의해 hot spot이 생기고, 저항이 발생하면 다른 부분은 켄치를 중단하여 켄치 - 비켄치의 구분이 확연히 구별된다. 그러면 도체 일부분이 전체 전압을 감당해야 하고, 그 부분은 열발생이 계속되어 과도한 온도상승의 위험에 처한다. 가장 효율적인 경우는 도체 전체가 균등하게 온도상승하는, 즉 균등하게 전압을 분담하도록 하는 것이다. 그러므로 한류소자로 사용되기 위해서는 도체 전체가 동시에 켄치되도록 하는 조치가 절대 필요하다. 이 기술에 따라서 여러 가지 방식이 제안되거나 개발되고 있다.

나. 초전도체-금속 복합체 (superconductor - metal composite)

먼저 개발된 것이 도체에 안정화재를 부착하는 방식으로, 세라믹 도체에 금속을 덧씌워 hot spot 발생시 전류를 우회하도록 하는 방식이다. 그러면 hot spot에서의 열발생이 제한되어 온도상승은 억제된다. 그 동안 전류는 더욱 상승하여 다른 부분에도 켄치가 진행된다. 이렇게 해서 도체 전체에서 켄치가 동시에 진행되도록 조절할 수 있다. 켄치후 초전도체의 저항이 금속의 그것보다 훨씬 크므로 열발생은 주로 금속에서 일어나며, 전류는 금속의 저항에 의해 한류된다.

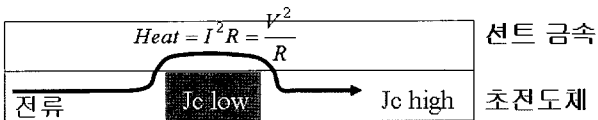


그림 1. 초전도체-금속 복합체.

다. 자기장 유도 켄치 방식

이에 더하여 자기장을 발생시켜 강제로 임계전류밀도 값을 낮춤으로써 동시켄치를 유도하는 방식이 있다. BSCCO 도체의 Jc가 다른 어떤 고온초전도체보다도 자기장에 민감하게 감소한다는 현상을 이용한다. 정상상태에서는 전류가 작으므로 발생 자기장도 작아서 임계전류 저하에 별로 기여하지 않는다. 그러나 선로에 고장이 발생하여 전류가 커지면 덩달아서 자기장도 증가하고, 도체의 임계전류를 심각하게 감소시킨다. 여기서 도체의 국부적 Jc 분포,  $\Delta J_c / J_c$  (average)가 수 % 이내라는 점에 유의하자. 그러면 이미 hot spot 발생 지역뿐만 아니라 다른 지역에서도 임계전류 저하로 인해 강제로 켄치가 발생하게 된다. 이 때 자기장 발생 코일은 초전도체와 직렬 혹은 병렬로 연결되는데, 어느 경우든 도체 전체가 동시에 저항체로 전이하게 함으로써 효율을 극대화 하는 기술로 계속 향상된 기술이 개발되고 있다.

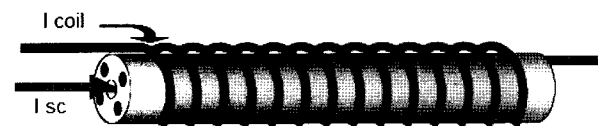


그림 2. 자기장 발생 코일 방식 한류소자.

라. 느린 스위칭과 전류 상승

BSCCO 벌크를 사용하는 한류소자는 그 특성상 스위칭이 느리고, 따라서 고장전류가 초기에 한류되지 않는 특징이 있다. 느린 스위칭은 BSCCO 도체가 낮은 임계전류밀도에  $V \sim I^n$  에서  $n = 8 \sim 10$  정도로 작으므로 상대적으로 YBCO 박막 등에 비해 열용량은 크고 에너지 입력은 작은 것이 이유이다. 여기서 느린 스위칭과 관련된 초기 한류시 높은 피크 전류 문제 및 그와 관련된 전자기력 문제가 나타난다. 초전도체에 국부적으로 켄치가 발생하면 전류는 bypass 금속 혹은 코일로 우회하지만, 여전이 초전도체로도 흐른다. 그러므로 bypass로 우회된 전류가 충분히 커서 임계전류를 심각히 감소시키기 까지 전류는 계속 상승할 수 밖에 없는데, 이로 인해 고장 직후 전류제한이 지연되어 초기 피크 전류가 발생한다. 이 피크 전류는 대단히 커서 5 ~ 20 kA<sub>peak</sub>까지 소자에 따라 다양하게 나타난다. 이 피크 전류는 고장 후 첫 1/2 주기 이후에는 완전히 없어지므로 한류기 역할에는 영향이 없다. 다만, 피크 전류가 있을 동안 소자간 전자기력이 발생하여 기계적 응력을 주게 되므로 이에 대비할 필요가 있다.

마. 용이한 직병렬

BSCCO를 이용한 한류소자는 도체 크기의 제한 때문에 전류 및 전압 용량에 한계가 있다. 그러므로 고전압 및 대전류에 사용하기 위해서는 다수의 소자를 직병렬 연결하는 기술이 필요하다. 여러 소자를 직렬연결하면, 전류가 Ic를 초과할 때 소자의 켄치가 대단히 빨라 일부의 소자가 먼저 켄치되고, 따라서 일부 소자에 전체전압이 인가된다. 그러므로 전체소자가 동시에 켄치되도록 조절하는 기술이 필요하다. 이런 현상은 스위칭이 대단히 빠른 YBCO 박막 소자에서 특히 심각하며 필자 등은 동일 선트저항 방식으로 해결한 바 있다.

그러나 BSCCO 소자의 경우 벌크이므로 Ic가 커서 병렬의 기회가 거의 없고, 낮은 Jc로 말미암아 스위칭이 느려서 직접 직렬시에도 동시켄치에 문제가 없음이 증명되었다. 그러므로 BSCCO 벌크 소자의 경우는 직병렬 문제보다는 소자 크기에 따른 공간 배치 문제, 초기 높은 전류상승에 따른 소자간 전자

기력 문제에 더하여 소자간 절연 문제 등 조립과 관련된 문제가 더 중요한 요소이다.

### 3. 한류소자 제작 및 연구 동향

#### 가. Nexans SC의 Bi2212 bifilar coil

이 방식의 한류소자는 독일 정부지원의 CURL10 프로젝트하에서 소자 개발자인 Nexans SuperConductor가 개발한 소자이다. Nexans는 용융주조법 (Melt Casting Process)로 Bi2212 tube를 제작하였다. 이 방식으로 제작된 도체는  $J_c = 1.1 \text{ kA/cm}^2 @ 77 \text{ K}$ , 그리고  $3.5 \text{ kA/cm}^2 @ 65 \text{ K}$ 이다. 가용 전류를 증대시키기 위해 소자는 65 K에서 운용된다. 국부적  $J_c$  균일도는 현재  $\Delta J_c/J_c = 4 \%$  정도까지 제조되고 있다.

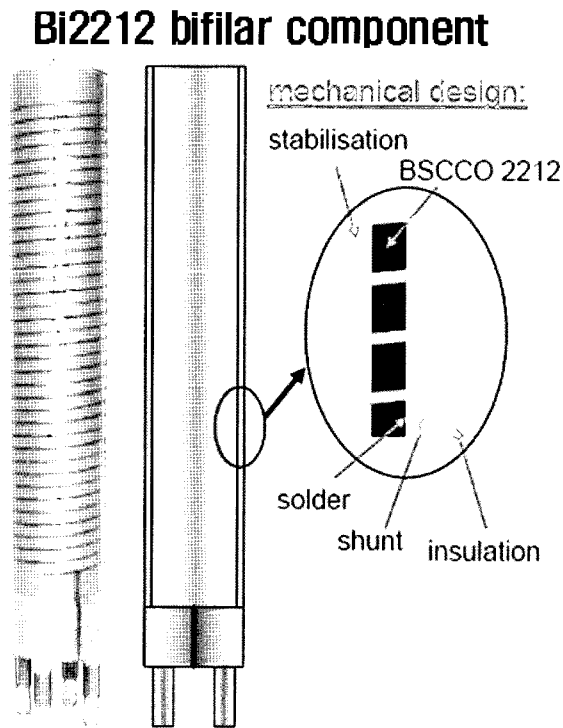


그림 3. Nexans SC의 bifilar coil. 정격 220 V/1 kA용

우선 제작된 tube의 내부에 FRP로 보강하고 양단에 전극을 부착한다. 다음 Cu/Ni 합금으로 된 튜브를 끼워 넣어 초전도체-금속의 복합체를 만든다. 이 때 도체-금속간 저온 soldering으로 초전도체에 영향을 극소화하면서 접촉저항을 최소화 한다. 이렇게 만든

튜브를 bifilar coil 형태로 절삭하고, 그 사이 및 표면을 에폭시로 피복하면 제작이 끝난다. Bifilar coil 형태로 절삭하는 이유는 전류방향을 상쇄시킴으로써 전체 자기장을 0으로 만들고자 함에 있다 [1].

이 bifilar coil을 선로에 연결하고 고장을 발생시키면 초전도체가 퀸치되고 전류는 금속으로 우회하는데, 이 금속의 저항(소자당 약 110 mΩ)으로 고장전류를 제한한다. 열은 이 금속에서 발생하며 정격전압 220 V에서 온도가 약 300 K까지 상승한다. 이런 정도의 온도상승에는 초전도체에 영향이 없음이 확인되었다.

CURL10 project는 그림 3과 같은 한류소자를 30개 직렬로 연결하여 단상 모듈을 만들고, 다시 3개 모듈을 연결하여 3상 10 kV/1 kA (10 MVA)급 한류기를 제작하였다 [2]. 그림 4는 bifilar coil로 만든 CURL10 한류기의 단락특성이다. 이 한류기는 2003년말 완성되었고, 2004년 4월부터 현장에 설치되어 1년간 성공적으로 현장시험을 마쳤다.

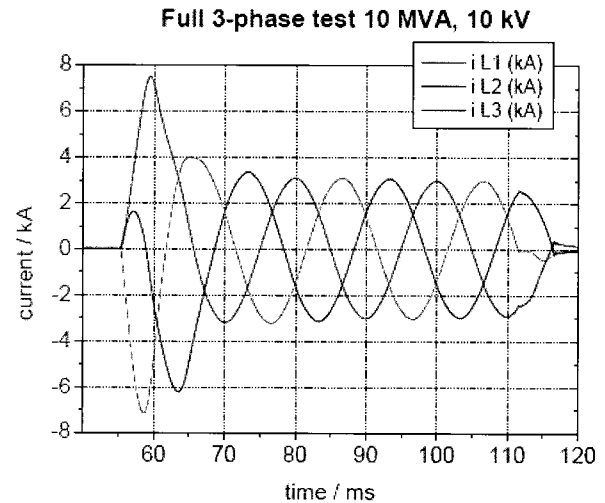


그림 4. CURL10 한류기의 한류특성

#### 나. ABB의 Bi2212 plate형 한류소자

ABB사는 대형 BSCCO tube를 사용한 유도형(자기차폐형) 한류기를 개발한 후 저항형 한류기로 선회하였다. ABB 방식의 저항형 한류기 개발은 BSCCO 도체를 사용한 한류기로서 대단히 진보된 기술을 구사하고 있으며 개략적 과정은 다음과 같다.

우선 도체 제작과정을 보면, Bi2212 전구

체 분말( $D_{90} = 20 \mu\text{m}$ )을 Ag power 및 바인더와 함께 슬러리를 만들어 tape casting 한다. 이를  $0.1 \text{ m}^2 (= 30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm})$  면적으로 자르고 Ag 도포된 기판위에 넣어 말린 후 열처리한다. 이 때 부분 용융 공정을 거쳐 제작된다. 이렇게 제작된 Bi2212 plate는 non-textured 다결정 미세구조를 보인다. 이 도체의 임계온도는  $T_c = 95 \text{ K}$ 이고 임계전류는  $77 \text{ K}$ 에서  $J_c = 5 \text{ kA/cm}^2$  정도로 대단히 높은 값을 보인다.

이 Bi2212 plate를 FRP로 보강한다. 그리고 저온 soldering을 통해 steel plate에 접착하여 전류 bypass를 만들고, meander 형태로 절삭한 후 그 사이를 절연하고, 교류 손실을 줄이기 위해 2개의 소자를 전류 방향이 반대되도록 겹쳐서 제작하면 단위 한류소자가 만들어진다 (그림. 5 - 6). 단위 길이당 적정 전기장은  $0.4 \text{ V/cm}$ 이며 회복시간은 3초로 알려져 있다 [3].

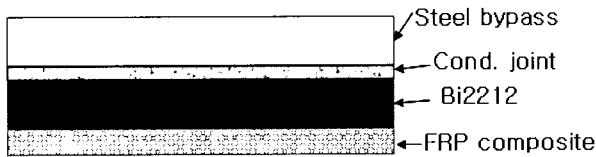


그림 5. ABB 한류소자의 기본 구조

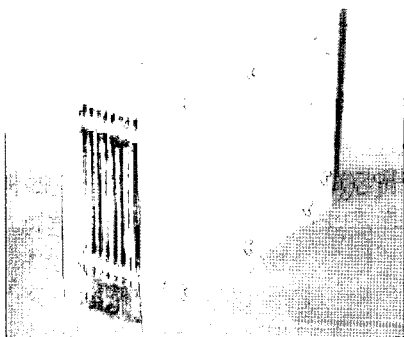


그림 6. 단위소자 10매 겹쳐서 조립된 한류 모듈

그림 8은 상기 한류소자를 조립하여 제작한  $6.6 \text{ kV}/800 \text{ A}$ 급 ( $6.4 \text{ MVA}$ ) 한류기의 한류 특성이다 [3]. BSCCO이용한 한류기의 특성대로 초기 전류 상승이  $10 \text{ kAp}$  이상으로 나타나고 있다. 그러나 사고후 첫  $1/2$ 주기 이후에는 충분히 한류되고 있음이 잘 나타나 있다. 현재 제작되고 시험된 BSCCO 한류기 중

가장 성능이 우수하다고 하겠다.

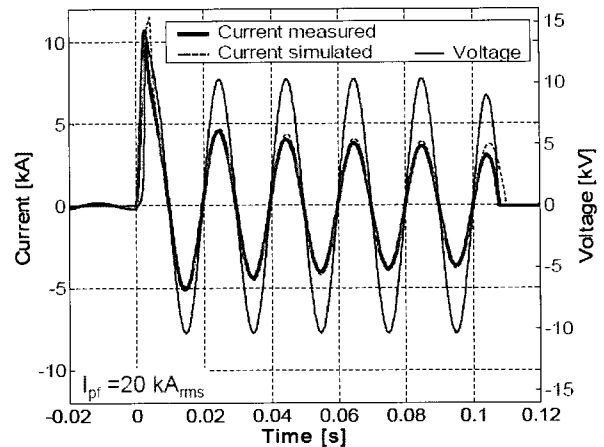


그림 7. 6.6 kV급 한류기의 한류 특성

#### 다. 자기장에 의한 켄치 촉진형 한류소자와 MFCL

자기장에 의한 켄치 유도형 한류기의 시작은 VA Technology가 시작하였다. 초기 시작품을 보면, BSCCO 막대를 한류소자로 사용하고, 다수의 BSCCO 막대형 소자 전체를 둘러싸도록 주변으로 전선을 감아 자기장을 발생시키되, 막대와 코일이 직렬로 연결되도록 결선하였다. 고장이 발생하면 큰 전류가 코일에서 일정 자기장을 발생시켜 막대 도체의 켄치를 촉진한다는 구도이다. 이 방식은 이미 상용화되어 값이 싼 BSCCO 막대 (혹은 튜브)를 사용한다는 장점이 있으나 초전도체 전체와 자기장 코일이 직렬연결됨으로 인해 발생하는 자기장으로 상시 도체성능저하 및 상시 리액턴스가 단점으로 지적되었다.

상기 상시 리액턴스 문제를 해결하고도 자기장 촉진형 한류기를 제작하는 방안이 IGC-Superpower가 제안한 Matrix FCL (MFCL) 이다. MFCL에서는 2개의 중요한 부분이 있는 바, 그 하나는 소위 trigger element이고 다른 하나가 limiting element이다. Trigger element는 trigger 소자에 다수의 코일이 병렬로 연결된 구조이다. 과전류로 trigger 소자가 작동하는 순간 전류는 전부 병렬 코일로 우회한다. 병렬 코일의 리액턴스가 작지 않음에도 수가 많으므로 전체 리액턴스는 아주 작아서 전류는 신속하게 우회한다. Trigger로는 초전도체가 사용될 수도 있고 아니면 다른 능동소자가 사용될 수도 있다. MFCL의 다른 중요한 부분은

limiting element인데, 이는 길고 가는 Bi2212 막대 혹은 튜브에 상기 trigger 소자에서 나온 코일이 직렬로 감긴 형태이다. 즉, trigger 소자와 병렬연결된 코일은 그 자기장을 limiting 소자에 인가하게 된다. 따라서 limiting 소자와 코일은 직렬로 연결된 모습이 된다. 이렇게 다수의 limiting 소자를 조립하여 한류기를 제작한다. 이와 관련된 여러 종류의 변화된 조립 방식이 있다 [4].

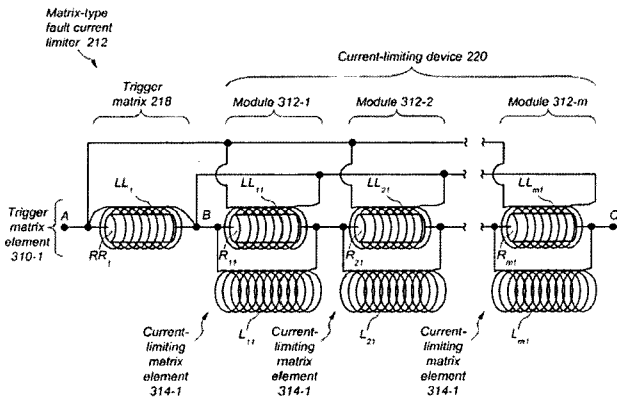


그림 8. MFCL의 열개

IGC-SP는 이 방식으로 138 kV급 한류기 개발을 진행하고 있으며, 현재 8.6 kV급까지 시험하였다 [5,6].

한편, 전력연구원이 개발하고 있는 22.9 kV급 한류기는 Bi2212 tube를 사용하는 자기장에 의한 퀘치 촉진형인데, 상기 MFCL에서 trigger 소자 없이 각 소자가 trigger이면서 limiting 소자이도록 하는 구도로 되어 있다.

라. 기타 방식 - BSCCO 벌크를 이용한 유도형(자기차폐형)

BSCCO 벌크를 이용한 한류기로서 또 하나의 형태가 ABB의 자기차폐형을 들 수 있다. 이 형식은 가장 초기에 시도된 형식으로 변압기 형태인 구조가 간단하고, 초전도체의 품질에 덜 민감하며, 냉각이 간단하다는 등의 이점이 있다. 특히, 저항발생과 한류소자가 분리되어 있어 초전도체가 퀘치된 후 부가적인 전류가 없으므로 과열에 의한 품질저하 문제가 발생하지 않는다.

ABB는 이 방식의 한류기를 1996년 완성하였다. 이를 위해 furnace 내에서 회전하는 인코넬 드럼 속에 직경 38 cm, 폭 8 cm의

Ag mold를 부착하여 두께 1.8 mm의 Bi2212 도체를 제작하였다. 이 도체는 임계 전류밀도  $J_c = 1.4 \text{ kA/cm}^2 @ 77 \text{ K}$ 를 보였다 [7]. 퀘치시 hot spot 방지를 위한 전류 분로(bypass) 및 기계적 강도 보완을 위해 상기 링형 도체에 steel bondage를 부착하고 외벽을 FRP로 보강하였다. 이러한 링을 16개 제작하여 원통형으로 쌓아올리되, 링과 링 사이에 damper를 넣어 기계적 접촉에 대비한다. 이 한류소자를 FRP 냉각조에 넣고, 그 주위를 구리 코일로 감은 다음, 전체의 중앙에 변압기처럼 철심을 넣으면 한류기가 만들어진다. ABB는 이 방식으로 1.2 MVA급을 제작하고 시험하였다 [8]. 그러나 이 방식은 여러 장점에도 불구하고, 교류손실이 크고, 무엇보다도 소형화가 어렵다는 점 등으로 추가 개발이 이루어지지 않고 있다.

4. BSCCO 벌크를 이용한 한류소자 문제점 및 향후 전망

가. BSCCO 도체 품질 향상

BSCCO 도체가 다른 도체, YBCO 박막 혹은 벌크보다 유리한 점은 필경 제조공정상의 용이함일 것이다. YBCO 박막은 대량생산이 어려우며, 값이 비싸다. YBCO 벌크는 대형화가 곤란한 점이 문제이다. (CC는 현재 대량으로 생산되지 않음으로 논의에서 제외한다.) 이러한 장점을 가졌음에도 실용화에는 더 향상되어야 할 문제가 있다.

우선 Bi2212 도체의 품질향상이 시급하다. 현재 벌크 Bi2212의  $J_c = 1 \text{ kA/cm}^2$ , index  $n = 8 \sim 10 @ 77 \text{ K}$  정도로 (상용화된 YBCO 박막의  $J_c = 3 \text{ MA/cm}^2$  및  $n = 40 \sim 45$ 에 비해) 매우 낮다. Bi2212 벌크 제조시에는 Bi2223 PIT 선재에서는 가능한 압연 등에 의한 강제 texturing의 기회가 거의 없기 때문이다. 원심성형을 통해 부분적으로 조직정렬을 시도하지만 한계가 있다.

이렇게 낮은  $J_c$ 로 인한 다른 문제가 작지 않은 교류손실이다. 실제로 bifilar coil을 사용한 CURL10의 10 MVA급 한류기의 경우 125 W per MVA의 손실이 있었는데, 이 값은 전류인입선을 통한 열침입 등도 포함한 값이긴 하지만 주로 bifilar 코일의 도체손과 디자인에 따른 것이다. 여기서 디자인과 관련된 손실은 디자인 변경으로 감소시킬 수

있는데, 자기장 유도 켄치방식으로 하면 크게 줄일 수 있다. 예로서, 전력연구원이 개발하고 있는 한류기의 경우 22.9 kV/25 MVA 급으로서 교류손실 24 W per MVA를 목표로 하고 있다. 이 손실에는 디자인에 따른 손실이 상당부분 제거되었는데, 주파수에 의존함이 거의 없다는 점에서 주로 초전도체의 magnetic hysteresis에 기인한 도체손으로 보인다. Bi2212 벌크의 손실이 대부분 도체손이라는 점과 일치한다.

Jc가 증대되면 덩달아 n 값도 커지고 하여 도체손도 함께 감소하는 경향이 있다. 더하여, 켄치가 더 빨리 일어나므로 고속 한류는 물론 고장직후 초기 전류 피크 문제, 거기에 부가적인 소자간 전자기력 문제 등 일거에 해결하게 된다. 이렇게 초전도체의 Jc 증대가 반드시 이루어져야 하는 바, Bi2212의 범용화를 위해서는 Jc = 10 kA/cm<sup>2</sup> @ 77 K 까지 향상시킬 필요가 있다. 기술 혁신이 절실한 부분이다.

나. 향후 전망

여러 가지 고온초전도체가 개발되었지만 현재 상용화된 도체에는 제한이 있다. YBCO 박막, 제한된 크기의 YBCO 단결정, Bi2223/Ag PIT 선재, Bi2212 벌크, 그리고 기대되는 CC가 그것이다. 이 중 한류기로 활용될 수 있는 것은 기술적 및 경제적 관점에서 (CC를 제외하고) Bi2212 벌크 뿐이다. 그러므로 Bi2212 벌크의 성능향상과 가공기술 개발이 중요시 된다. 경제적으로 보면 현재의 가격으로는 범용화하기 어렵다. 다만, 낙관적 견해일 수는 있으나, 그림 9와 같이 Bi2212 벌크를 사용한 한류소자의 가격이 계속 하락하고 있는 점이 향후 활용전망을 밝게 해 준다. 이러한 가격 하락은 신개념의 한류소자 도입에 따른 것이다. 예로서 bifilar coil은 공정이 복잡하여 제작비가 높는데 MFCL 소자는 구조가 간단하여 값이 싸다. 이렇게 계속 디자인 변경 및 도체성능 향상을 통해 단위 용량당 가격이 계속 낮아질 전망이다. 그림 9에 의하면 국내 배전선로용 22.9 kV/25 MVA급 한류기에 소요되는 한류소자 가격이 2003년 925,000€, 2005년 225,000€으로 낮아지고 2007년엔 37,500€까지 하락한다. 아직은 대량생산을 전제로 하지 못했으므로 범용화 된다면 다시 1/2 이상

으로 제작비가 낮아질 수 있을 것이다. 교류손실까지 줄인다면 냉각에 따르는 설비비 및 운영경비도 줄일 수 있다. 기대하건대, 머지않아 배전급 한류기 1대 가격 50백만원이 전혀 불가능하지는 않을 것이다.

이상과 같이 Bi2212 벌크의 한류기 용으로 활용 전망을 보았거니와, 기술적 및 경제성 문제의 해결의 가장 중요한 관건은 도체성능 향상에 있음을 보았다. Bi2212 도체의 Jc 향상은 활용에 장애되는 여러 문제를 해결한다. 이 부분에 기술 진보 여부가 한류기 활용의 범용화를 판가름할 수도 있다.

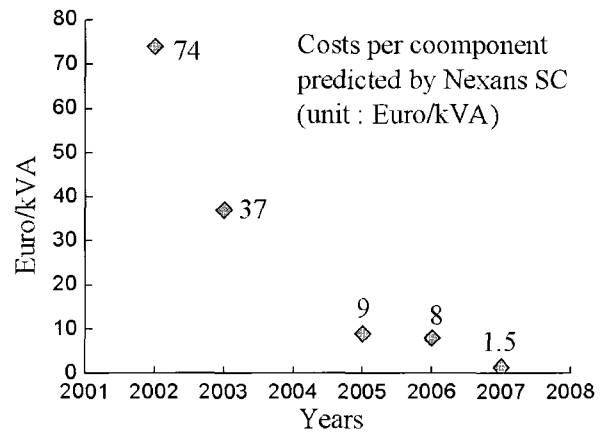


그림 9. 초전도 한류소자의 가격 추이 (Nexans SC의 예측)

감사의 글

이 글은 산업자원부 전력산업기반기금의 과제 수행의 일부로 작성되었습니다.

참고문헌

[1] Steffen Elschner, et. al., "Manufacturing and Testing of MCP 2212 Bifilar Coils for a 10 MVA Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 13, no. 2 (June 2003) 1980  
 [2] Joachim Bock, et. al., "CURL 10: Development and Field-Test of a 10 kV/10 MVA Resistive Current Limiter Based on Bulk MCP-BSCCO 2212", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, no. 2 (June 2005)

1955

[3] M. Chen, *et al.*, "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor", *Physica C* 322-376 (2002) 1657-1663

[4] US Patent No. 6,664,875 (Dec. 16, 2003) 등

[5] Xing Yuan, *et al.*, "Proof - of - Concept Prototype Test Results of a Superconducting Fault Current Limiter for Transmission-Level Applications", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2 (June 2005) 1982

[6] L. Kovalsky, *et al.*, "HTS Matrix Fault Current Limiter Program", 2004 annual DOE peer review 발표자료

[7] Makan Chen, *et al.*, "Fabrication and Characterization of Superconducting Rings for Fault Current Limiter Application", *Physica C* 282-287 (1997) 2639-2640

[7] W. Paul, *et al.*, "Test of 1.2 MVA high-Tc superconducting fault current limiter", *Supercond. Sci. Technol.* 10 (1977) 914-918

## 저자이력

### 현옥배 (玄鉦培)



1976년 연세대학교 물리학과 졸업, 1987년 미국 아이오와 주립대 졸업 (Ph. D), Ames 연구소 연구원 (Post Doc.), 미 NIST 객원연구원, 일본 ISTE Fellow를 거쳐 현재 한전 전력연구원 책임연구원