

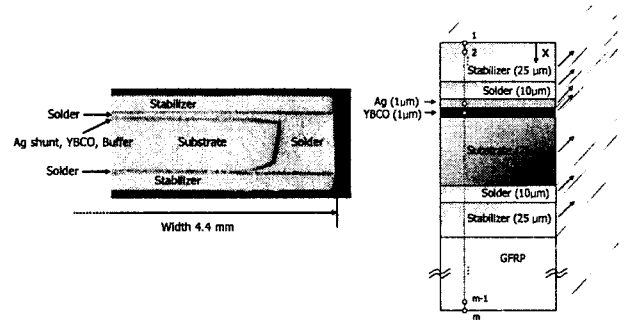
## YBCO Coated Conductor의 과전류 특성해석

이찬주\*, 남관우\*, 강형구\*, 고태국\*\*, 석복철\*  
 \*현대중공업 기술개발본부 기계전기연구소, \*\*연세대학교 전기전자공학과

### Analysis of Over-current Characteristics in YBCO Coated Conductor

C. Lee\*, K. Nam\*, H. Kang\*, T. K. Ko\*\*, B. Y. Seok\*  
 \*Electro-Mechanical Research Institute, R&D Division, Hyundai Heavy Industries, Co., LTD.,  
 \*\*Department of Electrical Engineering, Yonsei University

**Abstract** - In order to develop a high temperature superconducting(HTS) coil for the fault current limiter(FCL), the over-current characteristics in YBCO coated conductor(CC) with Ni-W alloy substrate are analyzed. The HTS wire is wound by bifilar winding method for resistive current limitation and it is operated in 65K sub-cooled nitrogen. In order to analyze the resistance and the temperature characteristics of the CC wire, an analysis program is developed considering all the composition materials except the buffer layer. Using this program, the temperature rise, the resistance development and the current limitation of CC are calculated depending on the applied voltage and the stabilizer materials. According to the analysis results, under the temperature restriction of 300K, the maximum voltage per meter is determined as 40V/m if the stabilizer is 25 $\mu$ m thick stainless steel at each side. Finally, the wire length needed for the distribution level HTS FCL is estimated.



<그림 1> CC의 구조 및 모델링

## 1. 서 론

현재 전 세계적으로 계통의 사고전류 저감대책으로 고온초전도 한류기가 대두되고 있다. 이미 독일에서는 FZK가 주축이 되어 CURL10 프로젝트를 성공적으로 마무리하여 2004년에 수개월에 걸친 실증시험까지 마친 상태[1]이고 다시 송전급 한류기 개발을 위하여 올해부터 CURL110 프로젝트를 진행하고 있다. 일본의 경우 Toshiba에서 66kV급 유도형 한류기를 개발[2]하였으며, 이후 CC를 이용한 저항형 한류기 개발로 방향을 바꾼 상태이다. IGC-SP는 벌크를 이용한 Matrix Fault Current Limiter(MFCL)을 8kV급까지 개발하였으며, 소자의 균일성 등의 문제로 인하여 2006년부터 CC를 이용한 MFCL을 개발하기로 하였다. 현대중공업(주)는 연세대학교, 홍익대학교와 공동으로 프론티어사업 중 하나인 차세대초전도용기술개발사업의 “차세대 무유도 권선형 고온초전도 한류기 개발” 과제를 2004년부터 수행하고 있으며, 본 과제에서는 세계최초로 CC를 이용한 배전급 고온초전도 한류기를 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

현대중공업(주)는 2004년부터 CC를 이용한 한류기 연구를 수행하고 있으며, 2005년에 Siemens가 CC를 이용한 한류기 개발을 선언하였고, 이후 Toshiba, IGC-SP 등이 한류기를 개발하는데 있어 CC를 사용하기로 하였다. 이러한 움직임은 CC의 개발이 예상보다 매우 빠르게 진행되고 있어 박막소자에 비해 가격이 매우 낮아질 가능성이 있으며, 벌크소자에 비해 안정성이 높기 때문이다. 또한 선재 형태이므로 여러 가지 디자인이 가능한 측면도 있다.

본 논문에서는 CC를 이용한 고온초전도 한류소자를 설계하기 위하여 CC의 전압 및 저항 특성을 해석적으로 수행하였으며, 그 결과를 실험과 비교하여 해석에 대한 타당성을 검증하고, 최종적으로 이를 설계에 이용하여 한류기에 사용되는 선재의 길이, 발생저항 등을 계산하였다.

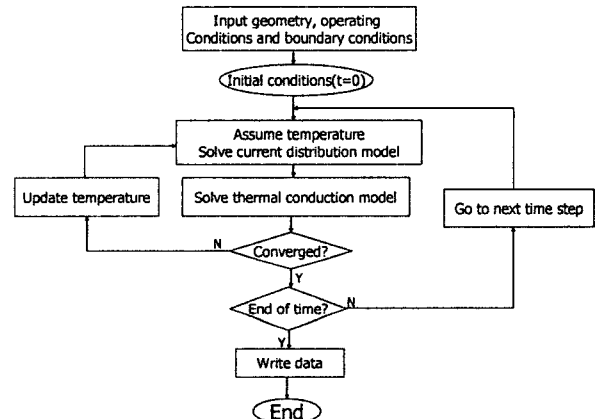
## 2. CC 모델링 및 해석방법

### 2.1 CC의 구조 및 모델링

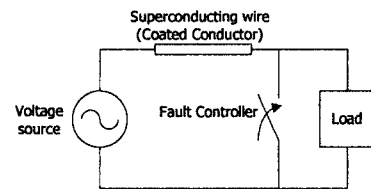
현재 개발 중인 무유도 권선형 한류기는 AMSC의 CC를 이용하여 개발 중에 있으므로 본 연구에서는 AMSC의 CC를 대상으로 해석하였다. AMSC의 CC는 크게 구리를 안정화제로 하는 344 선재와 stainless steel을 안정화제로 하는 344S 선재로 나뉜다. 두 선재는 안정화제를 제외하고는 모두 같은 구성이며 단면은 <그림 1>의 좌측 그림과 같다. AMSC의 CC는 크게 YBCO 증착을 위한 Ni-W합금 기판, YBCO와 기판 사이의 버퍼층, YBCO 박막, Ag 선트, 그리고 안정화제로 나눌 수 있다. 그리고 부가적으로 안정화제와 Ag 선트, 기판과 안정화제를 연결하는 접합층이 있다[3]. <그림 1>의 우측 그림은 해석을 위하여 간략화시킨 CC의 모습이다. 실제 선재와 다른 점은 매우 얇은 부도체층인 버퍼층이 해석에서 제외되었다는 것이며 하단 안정화제 아래에 고온초전도 선재를 감는 보빈의 재료인 GFRP가 존재한다는 것이다.

### 2.2 해석 방법

해석의 흐름은 <그림 2>와 같은 flow chart로 설명될 수 있다. 우선 초



<그림 2> 전류분배, 저항발생, 온도 해석을 위한 flow chart



<그림 3> CC 과전류 해석 회로도

전도체 각 부분의 크기 및 물질의 종류, 인가전압, 내부저항, 부하저항 및 동작온도 등의 초기값을 입력한 후 시간에 따른 각 부분의 저항을 계산하여 총 저항을 구하고 전류분배를 계산한다. 그 후 주울 발열에 의해 생성된 열 및 각 부분의 열전도도, 비열 등을 이용하여 열전도해석을 수행하고 그에 따른 온도를 계산한다. 각 구성물질에 절점을 두어 선재의 길이방향으로의 열 해석을 수행하였으며, 선재의 각 부분은 위치에 상관없이 동일한 특성을 갖는다고 가정하여 1차원 열전달 및 전기해석을 수행하였다.

### 2.2.1 회로도

교류 과전류 해석을 위한 회로는 <그림 3>과 같이 전압원, 부하저항, 초전도 선재, 단락스위치로 구성되어 있다. 정상상태에서는 사고전류 스위치가 열려 있다가 사고가 발생하면 사고 스위치가 닫히게 된다. 보통 사고발생시간은 5~6주기 정도이므로 본 해석에서는 0.1초동안 사고가 발생하는 것으로 모의하였다. 이때 순간적으로 과전류가 흐르게 되며 이 과전류로 인하여 초전도 선재가 켜지된다. 본 해석에서 이용된 각 파라미터의 값들은 내부저항 0.001 $\Omega$ , 부하저항은 1 $\Omega$ 이며, 전압은 20V부터 60V까지 10V간격으

로 순차적으로 증가시켜 각 전압에 따른 초전도 선재의 과전류 특성을 살펴 보았다.

### 2.2.2 저항 해석

각 구성물질의 온도에 따른 비저항은 문헌 및 실험결과와 유추를 통해 얻었다. 대부분 금속의 비저항은 선형이므로 문헌에서 얻을 수 없는 일부 금속의 극저온 비저항 데이터는 선형으로 처리하여 얻었다. 초전도체의 비저항은 온도에 따른 함수일 뿐 아니라 일부 구간에서는 전류밀도에 따른 함수이기도 하다. 즉 초전도체의 비저항은 온도에 따라 비선형적인 특성을 가지며 이를 세 구간으로 나누어 아래 식 (1)과 같이 표현하였다[5].

$$\rho_{YBCO} = \begin{cases} 0 & [J < J_c, T < T_c] \\ E_c \left( \frac{J_c(T)^n}{J^{n+1}} \right) & [J > J_c, T < T_c] \\ f_{\rho_{YBCO}}(T) & [T > T_c] \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $E_c = 0.1 \mu V/cm$ 이며,  $J_c(T)$ 는 2차원으로 근사화된 YBCO의 온도에 따른 임계전류밀도,  $J$ 는 통전전류밀도, 그리고  $n$ 은 초전도체의 index  $n$ 이다. 통전전류 및 온도가 각각 임계전류 이하이며, 임계온도 이하일 때, YBCO의 비저항은 0이고, 임계전류 이상이며, 임계온도 이하일 때, flux flow resistance가 발생하고, 임계온도 이상이면 온도에 따른 선형적인 비저항( $f_{\rho_{YBCO}}(T)$ )을 갖는다. flux flow resistance는 I-V 곡선으로부터  $n$  value를 계산하고, 이를 이용하여 구한다.  $n$  value는 측정된 결과 약 25로 계산되었다.

YBCO 층과 기관 사이에 있는 버퍼층은 선재 전체에 있어서 매우 작은 부분을 차지하며 또한 부도체이어서 전류가 흐르지 않으므로 해석에서 제외되었다. 실제 선재에서는 솔더가 초전도 선재 양옆에 존재하므로 부도체인 버퍼층을 제외한 모든 초전도 선재의 구성물질은 전기적으로 연결되어 있으며, 이로 인하여 전체적인 저항은 각 구성물질 저항의 병렬합으로 계산된다.

### 2.2.3 열전달 해석

0.1초간의 사고시에 액체질소로의 열전달은 기체 막(film) 생성으로 인하여 매우 작으므로 선재 최상위에 존재하는 안정화재는 위 방향으로 단일조건을 갖는다고 가정하였다. 선재가 GFRP 보빈에 충분한 장력을 가지고 권선되어 있다고 가정하여 선재의 최하위 부분과 GFRP와의 열접촉은 무시하여 계산하였다. 열 해석에 사용된 기본적인 식은 아래 식(2)과 같다.

$$\rho_d C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S, \quad S = \frac{i^2 R_k}{V_k} \quad (2)$$

위 식은 주열원에 의한 발열과 온도차이에 의한 각 부분으로의 열전달에 의해 각 절점의 온도가 결정된다는 것을 의미한다.

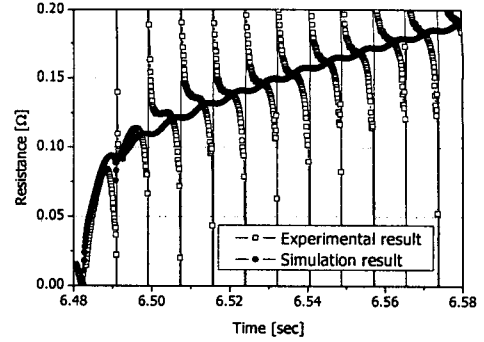
## 3. 해석 결과

### 3.1 해석과 실험의 비교

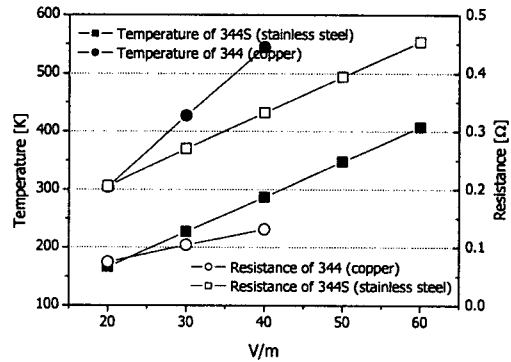
해석의 타당성을 검증하기 위하여 해석에 의한 발생저항과 실험에 의해 얻은 발생저항을 비교하였다. <그림 4>에서 □는 실험결과로 구리 안정화재를 갖는 344 선재에 약 12V/m를 인가하여 얻은 저항발생의 결과이다. ○로 표시된 곡선은 동일한 조건을 입력하여 해석한 저항발생의 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험결과와 해석결과의 저항발생이 거의 동일한 것을 알 수 있으며, 이에 따라 전류곡선도 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구를 통하여 얻은 해석방법은 매우 타당하다고 볼 수 있다.

### 3.2 안정화재 물질에 따른 비교

비교의 편리성을 위해 구리 안정화재와 stainless steel 안정화재의 두께가 모두 선재의 상하에 25 $\mu m$ 이며 따라서 안정화재의 총 두께는 50 $\mu m$ 라고 가정하고 해석하였다. 그 결과는 <그림 5>에서 보이는 바와 같이, 단위길 이당 전압에 따라 온도가 상승하는 것으로 나타난다. 이때 같은 온도에서 비교하였을 때 stainless steel 안정화재를 갖는 344S 선재의 V/m이 구리 안정화재를 갖는 344 선재에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이는 비저항이 낮을수록 온도상승폭은 크다는 것을 의미하며 고온초전도 한류기와 같이 상전이를 이용한 고온초전도 전력기기에서는 안정화재로 높은 비저항을 갖는 물질을 이용하는 것이 유리하다는 것을 단적으로 보여준다. 또한 같은 V/m에서 344S 선재의 저항이 344 선재의 저항에 비해 월등히 큰 것을 알 수 있는데, 이는 344S 선재의 사고전류의 제한율이 344 선재에 비해 크다는 것을 나타낸다.



<그림 4> 해석과 실험의 비교



<그림 5> 각 선재의 V/m에 따른 온도 및 저항발생

## 4. 결 론

AMSC의 stainless steel 안정화재를 도입한 344S 선재는 구리를 안정화재로 이용한 344 선재에 비해 비저항이 훨씬 크기 때문에 선재의 단위길이 당 허용인가전압이 약 2배 크다. 일반적으로 적용되는 CC의 온도상승 한계를 300K으로 가정하면 344S 선재의 경우 40V/m, 344 선재의 경우 20V/m가 최대허용인가전압이다. 따라서 13.2kV/630A급 고온초전도 한류기를 개발하기 위해 소요되는 선재 소요량을 계산하면 344S 선재를 채택하는 경우 2.64km가, 344 선재를 채택하는 경우에는 5.28km가 된다. 현재 선재의 가격 및 제작된 고온초전도 한류기의 부피를 고려하면 344S 선재를 이용하는 것이 바람직하다는 결론을 얻는다.

향후 현재의 CC에 비해 비저항이 큰 선재가 개발된다면 한류기를 제작하는데 있어 선재량의 절감 및 크기 감소 등이 예상되므로 한류기 전용선재 개발을 위한 노력이 필요하다고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대초전도용용 기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] R. Kreutz, J. Bock, F. Breuer, K. Juengst, M. Kleimaier, H. Klein, D. Krischel, M. Noe, R. Steingass, and K. Weck, "System technology and test of CURL 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high-Tc superconducting fault current limiter," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, June 2005, pp. 1961~1964.
- [2] T. Yazawa, Y. Ootani, M. Sakai, T. Kuriyama, M. Urata, Y. Tokunaga and K. Inoue, "66 kV/1 kA high-Tc superconducting fault current limiter magnet," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, June 2005, pp. 2059~2062.
- [3] Available at "http://www.amsuper.com"
- [4] Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, Plenum Press, 1994.