

**권선 보빈형 열전도판의 와전류 손실 해석**

박명진\*, 곽상엽\*\*, 이상엽\*\*, 김우석\*, 이지광#, 최경달##, 배준한\$, 김석호\$, 심기덕\$, 성기철\$, 정현교\*\*, 한승엽\*  
 \*기초전력 연구원, \*\*서울대학교, #우석대학교, ##한국산업기술대학교, \$한국전기연구원

**Analysis of Eddy Current Loss in the Bobbin Type Cooling Plate for Winding**

Myung-Jin Park\*, Sang-Yeop Kwak\*\*, Sang-Yeop Lee\*\*, Woo-seok Kim\*, Ji-Kwang Lee#, Kyeong-Dal Choi##, Joon-Han Bae\$, Seok-Ho Kim\$, Ki-Duk Sim\$, Ki-Chul Seong\$, Hyun-Kyo Jung\*\*, Song-Yop Hahn\*

\*Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, \*\*Seoul National University, #Woosuk University, ##Korea Polytechnic University, \$Korea Electric Research Institute

**Abstract** - SMES의 운전 상태는 충전, 운전, 방전의 3가지 모드로 나눌 수 있으며, 충·방전 구간에서 와전류 손실이 발생한다. SMES의 에너지 방전 시 마그넷에서의 전류 감소로 인한 와전류 손실은 비록 짧은 시간동안 발생하지만 그 크기가 냉동기의 정격 열 부하 용량에 비해 상대적으로 크기 때문에, SMES 시스템 설계 시 이에 대한 영향을 고려해야 한다. 본 논문은 고온초전도 선재를 이용하여 개발 중인 600 kJ SMES의 방전 시, 마그넷을 냉각시키기 위한 권선 보빈형 열전도판의 분할과 슬릿의 위치에 따른 와전류 손실 변화를 3차원 유한요소법을 이용해 해석하고 그 결과를 제시하였다.

**1. 서 론**

1세대 선재인 Bi-2223와 2세대 선재인 YBCO Coated Conductor 등의 고온 초전도(HTS) 선재를 이용한 초전도 에너지 저장장치(SMES) 시스템 개발의 개발과 계통적용에 관한 연구가 전 세계적으로 활발히 추진 중이다. SMES 시스템에서 에너지를 저장하는 마그넷의 손실은 크게 운전 기간 동안의 DC 손실과 충, 방전 기간 동안의 초전도 코일의 교류 손실, 그리고 열 전도판의 와전류 손실로 나누어 볼 수 있다. 이 중, 와전류 손실은 짧은 방전 시간 동안에 마그넷의 자장의 변화가 급격히 이루어지므로 그 값이 매우 크다. 이러한 와전류 손실로 인해 발생한 열은 마그넷의 온도뿐만 아니라 SMES 시스템 전체의 온도를 상승시키는 원인이 된다. 또한 시스템을 운전온도로 재냉각 시키기 위한 시간이 필요하므로 시스템의 운전주기가 길어져서, 전체적으로 SMES 시스템의 운전효율을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있다. 따라서, SMES의 효율적이고 안정적인 운전과 냉각 시스템의 설계를 위해서는 열전도판에서의 와전류손실에 대한 해석과 그 영향을 고려해야 한다[1].

현재 개발 중인 600 kJ급의 SMES 시스템 냉각방식으로는 2단의 G-M 극저온 냉동기 2대를 사용한 전도냉각 방식을 채택하였으며, 설계 시 SMES의 운전 온도를 20 K로 설정하여 초전도 마그넷을 설계하였다[2]. 에너지를 저장하기 위해 초전도 선재를 더블 팬케이크 코일로 권선 한 코일의 온도를 20 K의 극저온 상태로 유지하고 냉각의 효율성을 높이기 위하여 코일을 지지하는 보빈 자체를 AL6061를 재료로 한 열전도판으로 구성하는 방식을 채택하였다. 본 논문에서는 초전도 코일의 냉각을 위한 채택한 권선 보빈 형태의 열전도판에서의 와전류 손실을 해석하고 그 결과를 기술하였다.

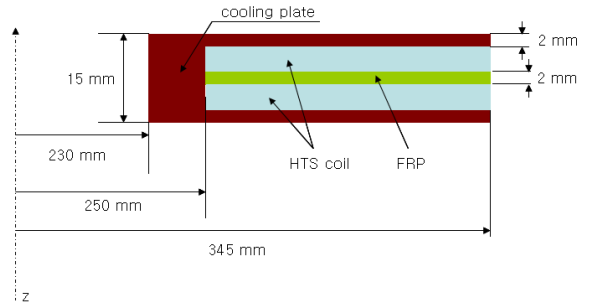
**2. 권선 보빈형 열 전도판의 와전류 손실 해석**

**2.1 600 kJ SMES 코일의 형상과 구조**

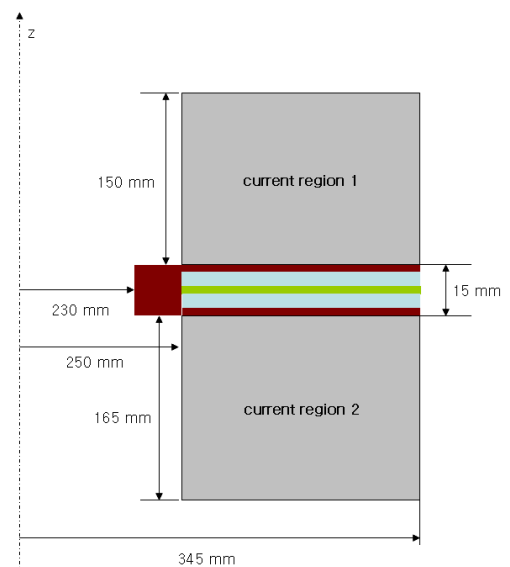
개발 중인 600 kJ급 SMES의 코일은 더블 팬케이크 코일(Double Pancake Coil)을 22개 적층한 싱글 풀 솔레노이드 형의 구조를 이루고 있으며, 코일의 내반경과 외반경은 각각 230 mm, 345 mm이며, 전체 높이는 330 mm이다. 그림 1(a)는 권선 보빈형 열전도 판에 초전도 선재를 권선 한 더블팬케이크 코일의 단면도를 나타낸다. 더블 팬케이크 코일은 초전도선재로 권선된 코일과 절연을 위한 2 mm 두께의 FRP 판 그리고 권선 보빈형 열전도판으로 구성되어 있으며, 높이는 15 mm이다. 정확한 와전류 손실의 해석을 위해서는 SMES 시스템의 모든 열 전도판에 대한 와전류 손실 해석이 필요하다. 하지만, 3차원 해석 시 해석 영역의 요소 발생에 대한 제약으로 인해 전체 해석이 어렵기 때문에 마그넷에서 와전류 손실이 가장 크게 발생하는 중심부의 더블 팬케이크 코일의 열전도 판의 와전류 손실에 대한 해석만을 수행 하였다. 따라서 와전류 손실이 가장 많이 발생하는 중심 부분의 열전도판을 기준으로 한 해석 모델을 나타내면 그림 1(b)와 같이 간략하게 표현 할 수 있다.

**2.2 열 전도판의 와전류 해석**

방전 모드에서는 SMES 코일의 전류 감소와 더불어 자장의 변화가 발생하고 이로 인해서 냉각판에서 와전류 손실이 발생하게 된다. SEMS 시스템의 방전 시 전류의 감소 형태는 그림 2에서 나타난 것과 같이 3 초 동안 275 A에서 138 A까지 감소시키며, 이때 SEMS의 저장 에너지는 615 kJ에서 150 kJ까지 465 kJ의 에너지를 방전시킨다. 열전도판의 형상에 대한 와전류 손실의 효과를 확인하기 위해서, 열전도판에 분할과 슬릿을 주지 않은 경우에 대해 먼저 해석 하였으며, 이때의 와전류 손실은 458 W이다. 마그넷은 더블팬케이크 코일 22개로 이루어져 있으며, 최대 10 kW 정도의 열이 발생함을 유추해 볼 수 있다. 이는 2대의 G-M 냉동기 1단의 용량인 140~320 W를 훨씬 초과하는 크기이므로 이러한 열전도판에서의 와전류 손실을 줄이기 위해 열전도판의 분할 개수 및 슬릿 수를 달리하는 방법을 택하여 해석하였다.

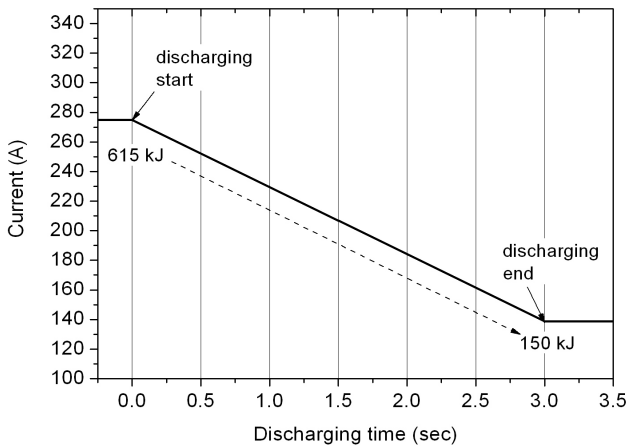


(a) 더블팬케이크 코일의 단면도..



(b) 해석 모델의 단면도.

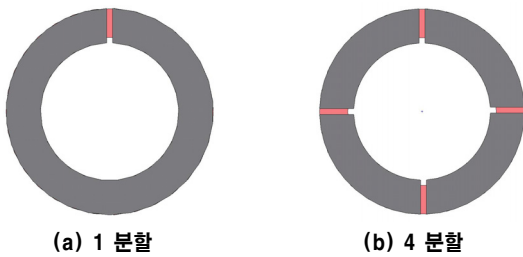
<그림 1> 와전류 해석을 위한 해석 모델의 형상.



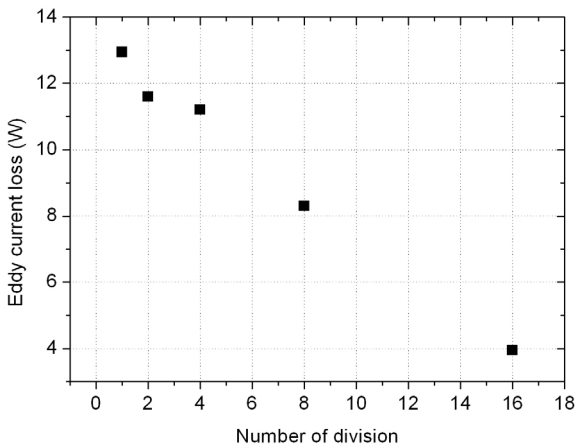
<그림 2> 방전 시 SMES의 전류와 저장 에너지의 변화.

### 2.2.1 권선 보빈형 열 전도판의 분할 효과

먼저 열전도판을 그림 3과 같이 여러 조각으로 나누었으며 분할의 수는 1, 2, 4, 8, 16 이다. 이는 분할한 열전도판의 각각을 전기적으로 절연시켜 와전류의 진행방향을 막고, 와전류가 생성되는 면적을 감소시켜 와전류 손실을 줄이기 위함이다. 그림 3(a)와 같이 열전도판을 1 분할하였을 때의 손실은 13 W였으며, 분할하지 않은 경우에 비해 손실이 약 1/35로 감소하는 효과가 있었다. 또한, 그림 4에 나타난 결과로부터 분할 수가 증가 할수록 와전류 손실이 더욱 감소하고 있음을 알 수 있다.



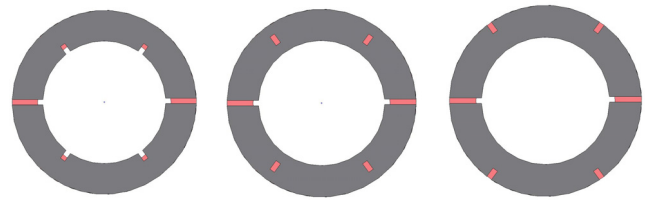
<그림 3> 열전도판의 분할 형상.



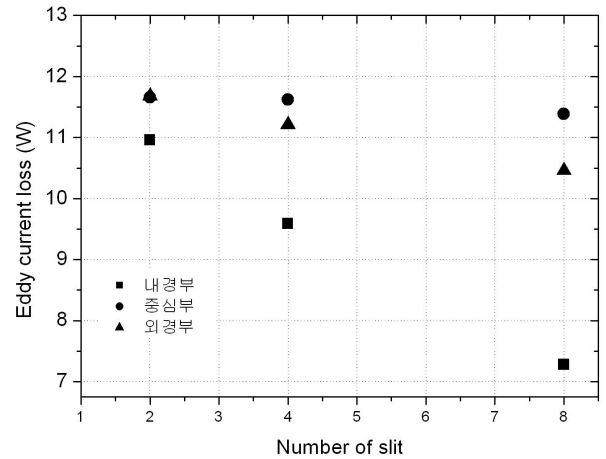
<그림 4> 열전도판의 분할 수에 따른 와전류 손실.

### 2.2.2 권선 보빈형 열 전도판의 슬릿 효과

열전도판의 분할에 따른 와전류 손실 감소효과를 확인 하였다. 그러나 분할 수를 증가할수록 초전도 선재를 권선하기 위한 보빈형 열전도판의 제작이 어렵기 때문에 실제 제작을 고려한 형상의 설계가 필요하다. 따라서 열전도판의 제작이 용이한 2 분할의 열전도판에 슬릿을 주어 슬릿의 개수와 위치에 대한 와전류 손실을 해석하였다. 슬릿의 위치는 그림 5와 같이 내경 부분, 중심 부분, 외경 부분으로 하는 3가지 경우를 고려하였고 슬릿의 길이는 열전도판의 반경방향 길이의 1/3로 하였으며 두



(a) 내경부분 (b) 중심부분 (c) 외경부분  
<그림 5> 슬릿의 위치에 따른 열 전도판의 형상(4 슬릿).



<그림 6> 2 분할의 슬릿 위치와 개수에 따른 와전류 손실.

께는 1 mm 그리고 슬릿의 수는 2, 4, 8개로 하였다.

그림 6은 슬릿의 위치와 수를 달리하였을 때, 와전류 손실의 해석 결과를 나타낸다. 슬릿의 위치와 수에 따른 와전류 손실의 감소는 내경부분에 슬릿을 내었을 때 가장 큰 효과를 보였다. 이는 열전도판에서의 와전류가 내경 쪽으로 집중하여 흐르게 되는데, 이곳에 슬릿을 주어 와전류의 경로를 효과적으로 차단할 수 있기 때문이다. 반면, 중심부와 외경부에 슬릿을 배치한 경우, 슬릿 수를 증가시키에 따라 손실이 감소하였으나, 내경부에 슬릿을 준 경우보다는 손실의 감소폭이 작았고 외경부분에 슬릿을 준 경우의 손실 감소 효과가 가장 적었다. 이는 열전도판의 내경 부분에서 와전류가 많이 발생하기 때문에, 중심 혹은 바깥쪽에 슬릿을 위치시키는 것은 와전류의 회전과 진행을 방해하는 영향이 거의 미치지 않았기 때문이다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 600 kJ급 고온초전도 SMES의 방전 시 권선 보빈형 열전도판의 와전류 손실을 해석하였다. 해석 결과로부터, 열 전도판의 분할에 따른 와전류 손실 저감 효과를 확인하였고, 또한 슬릿의 위치와 개수에 따라 변화하는 와전류 손실 특성을 분석하였다. 연구결과 와전류 손실을 효과적으로 저감시키기 위해서는 열전도판의 내경부에 열전도판의 기계적 특성을 고려한 슬릿의 길이와 수를 결정하는 것이 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2004-1-144) 주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

- [1] 이상엽, 광상엽의 “600 kJ SMES용 열 전도판의 구조에 따른 와전류 손실 특성”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계 학술대회, pp.132-133, 2007.
- [2] M.J. Park, S.Y. Kwak, S.W. Lee, W.S. Kim, S.Y. Hahn, K.D. Choi, J.H. Han, J.K. Lee, K.C. Seong and S.Y. Hahn, “Design of Superconducting Magnets for a 600 kJ SMES”, Progress in Superconductivity, Vol.8, No.1, pp.113-118, 2006.