

600 kJ SMES용 열 전도판의 구조에 따른 와전류 손실 특성

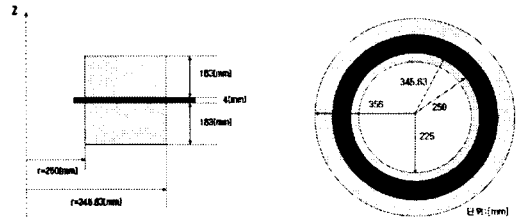
이상엽<sup>1</sup>, 광상엽<sup>2</sup>, 박명진<sup>3</sup>, 김우석<sup>4</sup>, 이지광<sup>5</sup>, 최경달<sup>6</sup>, 배준한<sup>5</sup>, 김석호<sup>5</sup>, 심기덕<sup>5</sup>, 성기철<sup>5</sup>, 정현교<sup>1</sup>, 한승엽<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>서울대학교, <sup>2</sup>기초전력 연구원, <sup>3</sup>우석대학교, <sup>4</sup>한국산업기술대학교, <sup>5</sup>한국전기연구원

Eddy Current Loss of the Cooling Plate According to its Shape for 600 KJ SMES

Sang-Yub Lee<sup>1</sup>, Sang-Yeop Kwak<sup>2</sup>, Myung-Jin Park<sup>3</sup>, Woo-Seok Kim<sup>4</sup>, Ji-Kwang Lee<sup>5</sup>, Kyeong-Dal Choi<sup>6</sup>, Joon-Han Bae<sup>5</sup>,  
 Seok-Ho Kim<sup>5</sup>, Ki-Duk Sim<sup>5</sup>, Ki-Chul Seong<sup>5</sup>, Hyun-Kyo Jung<sup>1</sup>, Song-Yop Hahn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Seoul National University, <sup>2</sup>Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, <sup>3</sup>Woosuk University,  
<sup>4</sup>Korea Polytechnic University, <sup>5</sup>Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 본 논문에서는 600kJ급 SMES용 열전도판의 와전류 손실의 해석에 대해서 나타내었다. SMES의 운전 상태는 충전, 운전, 방전의 3가지 구간으로 나누어 볼 수 있다. 이 중 방전 구간에서는 SMES 코일에서의 전류 감소에 의해서 와전류 손실이 발생한다. 이때 발생하는 와전류 손실은 짧은 시간동안 발생하지만 그 크기가 크기 때문에, SMES 시스템 설계 시 냉각 시스템의 효율과 안정성을 위해서 반드시 고려되어야만 한다. 본 논문에서는 이러한 열 전도판의 와전류 손실을 해석하고, 그 형상의 변화에 따른 와전류 손실 값들을 분석하였다.



(a) 축 방향 모델 (b) 평면도  
 그림 1. 와전류 해석을 위한 해석 모델의 형상

1. 서 론

현재 고온 초전도(HTS) 선재를 이용한 초전도 에너지 저장장치 (SMES) 시스템 개발에 관한 연구가 활발히 추진 중 이다. SMES 시스템의 운전 상태는 충전, 운전, 방전의 3가지 구간으로 나누어 볼 수 있다. SMES 시스템의 손실은 크게 운전 기간 동안의 DC 손실과 충전, 방전 기간 동안의 초전도 코일의 교류 손실, 초전도 코일의 냉각을 위한 열 전도판의 와전류 손실로 나누어 볼 수 있다. 이 중, 와전류 손실은 DC 손실에 비해서 그 값이 훨씬 크고, 짧은 시간 내에서 발생하게 되므로, SMES의 효율적이고 안정적인 냉각 시스템의 설계를 위해서는 반드시 고려되어야만 한다[1]. 본 논문에서는 와전류 손실을 열 전도판의 형상에 따라서 분석했다. 특히, 열 전도판을 분할하여서 각각을 전기적으로 절연시키는 방법 혹은, 열 전도판에 슬릿(Slit)효과를 주는 방법을 제안하고, 이를 해석하였다.

2. 600 KJ SMES의 열 전도판의 와전류 해석

2.1 600 kJ SMES 코일의 형상과 구조

본 논문의 600 kJ SMES의 코일은 DPC(double pancake coil)을 22개 적층한 싱글 폴 솔레노이드 형의 구조를 이루고 있다. SMES 코일을 위한 선재는 Bi2223 테이프 2개와 그 양 옆에 브라스 테이프를 병렬로 붙인 2+2 테이프 형태의 선재를 사용하였다. 이 선재를 이용하여 DPC를 구성하고, 이것을 여러 개 쌓아서, 솔레노이드 코일을 형성한다. 그리고 코일의 지지와 전도 냉각을 위한 열 전도판이 DPC사이에 삽입되는 형태를 하고 있다[2]. SMES 시스템의 모든 열 전도판에서의 와전류 손실 해석 시 전체 영역의 해석이 필요하나 3차원 해석 시 요소발생 등의 제약 때문에 솔레노이드의 중심부에 대해서만 해석 하였다. 따라서 와전류 손실이 가장 많이 발생하는 중심 부분의 열 전도판을 기준으로 하여 해석 모델을 그림 1과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

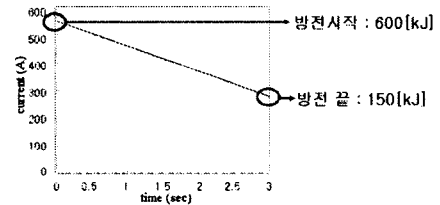


그림 2. 방전 시 전류 형태

2.2 열 전도판의 와전류 해석

충, 방전 구간에서는 SMES 코일의 전류 감소로 인해서 와전류 손실이 발생하게 된다. 시스템의 방전 시간은 3초이며 600[kJ]에서 150[kJ]까지 에너지를 방전시킨다. 이를 그림 2에 나타내었다.

먼저, 열 전도판에 어떠한 형상 변경도 가하지 않은 채, 와전류 손실을 해석한 결과, 와전류 손실 값은 355(W)정도로 해석되었고, 와전류는 원형 모양의 열 전도판의 원주 방향으로 돌고 있음을 알 수 있었다. 이러한 와전류 손실을 줄이기 위해서, 본 논문에서는 몇 가지 방법을 제안하였다.

2.2.1 열 전도판의 분할 효과의 분석

먼저 열 전도판을 여러 조각으로 나누어서, 각각을 전기적으로 절연시켜 와전류의 진행방향을 막고, 와전류가 생성되는 면적을 감소시킴으로써, 와전류 손실 저감을 기대할 수 있다. 열 전도판을 1, 2, 4, 8, 16분할했을 때의 해석 결과를 표 1에 나타내었고, 그중 몇 가지 경우에 대해서 전류 벡터의 분포를 그림 3에 나타내었다.

표 1. 분할 수에 따른 와전류 손실

분할 수	와전류 손실	분할 수	와전류 손실
0	355(W)	4	7.4(W)
1	8.4(W)	8	6(W)
2	8.0(W)	16	3.5(W)

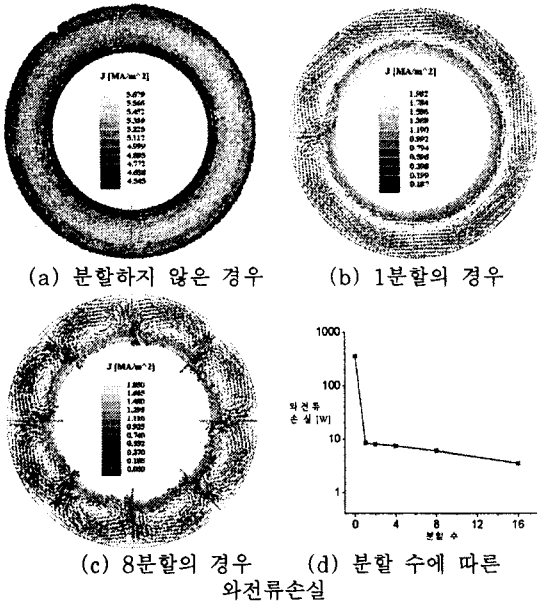


그림 3. 전류 벡터 분포(1.5sec)와 와전류 손실

그림 3에서 보면 알 수 있듯이, 열 전도판의 분할 때문에, 와전류의 진행 경로를 방해하게 되고, 결과적으로 와전류 손실은 줄어들게 된다. 표 1과 그림 3(d)에서 이러한 반비례 관계를 알 수 있다.

### 2.2.2 열 전도판의 슬릿 효과의 분석

다음으로 열 전도판에 슬릿을 줌으로써, 와전류 손실의 저감 효과를 확인하였다. 본 연구에서는 슬릿의 위치를 내경 부분, 중심 부분, 외경 부분으로 하는 3가지 경우를 고려하였고, 그림 4에 슬릿의 위치와 형상을 나타내었다. 한 부분은 완전 분할시켰고, 나머지 부분은 그림 4와 같이, 3가지 경우의 슬릿 효과를 고려하였다. 각각의 경우에 대해서 해석한 결과는 표 2에 나타내었고, 슬릿의 위치에 따른 각각의 전류 벡터 분포를 그림 5에 나타내었다.

표 2의 해석 결과로부터, 중심부와 외경 부에 슬릿을 배치하는 것은 와전류 손실 저감이 큰 도움이 되지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이는 실제로 열 전도판의 내경 부분에서 와전류가 많이 발생하기 때문에, 중심 혹은 바깥쪽에 슬릿을 위치시키는 것은 와전류의 회전에 거의 영향을 미치지 않기 때문이다. 반면에, 내경 부에 슬릿을 주는 것은 중심부와 외경 부에 슬릿을 주는 것에 비해서 와전류 손실의 감소 효과가 비교적 더 크며, 슬릿 수가 증가할수록 그 차이는 더 크게 나타났다. 이는 실제 와전류가 가장 많이 발생하는 부분에 슬릿을 위치시켜서 와전류의 진행을 방해할 수 있기 때문이다.

그림 5(a)에서는 슬릿이 의해서 와전류 회전이 확실히 제한을 받는 형태를 나타내고 있지만, 그림 5의 (b)와 (c)에서는 슬릿이 와전류의 회전을 방해하지 못하는 것을 알 수 있다. 그리고 실제로 슬릿을 중심 부분에 위치시켰을 때의 와전류 손실 값은 같은 개수의 분할을 가지는 경우와 비교해 보았을 때 그 값이 비슷한 것을 알 수 있다.

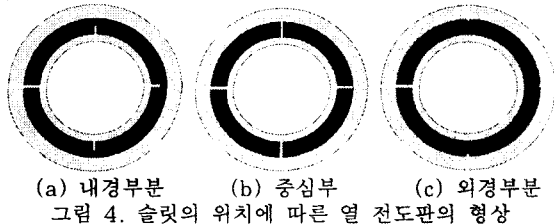


표 2. 슬릿의 위치와 개수에 따른 와전류 손실

슬릿 위치 \ 슬릿 개수	3	7	15
내경	7.1[W]	6[W]	4.3[W]
중심부	8.1[W]	7.9[W]	7.8[W]
외경	7.9[W]	7.8[W]	7.5[W]

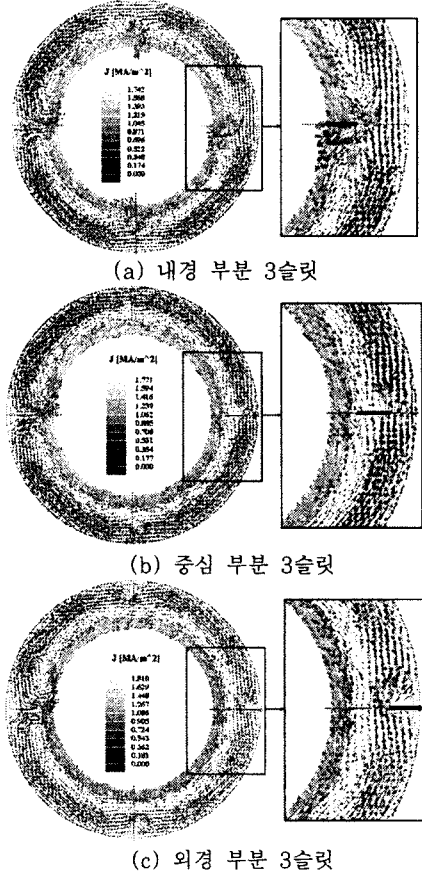


그림 5. 열 전도판의 전류 벡터 분포 (1.5sec)

## 3. 결론

본 논문에서는 600kJ SMES의 방전 시 전류 변화에 의한 열 전도판의 와전류 손실을 해석하였다. 해석 결과로부터, 열 전도판의 분할에 따른 와전류 손실 저감 효과를 확인하였고, 또한 슬릿의 위치와 개수에 따라 변화하는 와전류 손실 특성을 분석하였다. 본 논문의 연구 결과는 600kJ SMES의 냉각 시스템을 설계하는데 있어서 저 손실 열 전도판의 형상 설계에 관한 기초 자료로 활용할 수 있다.

### 감사의 글

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

### [참고 문헌]

- [1] 박명진, 이상수, 이승욱, 차귀수, 이지광, "고온초전도 페넬이크 코일과 솔레노이드 코일의 교류손실 측정 및 수치해석", 대한전기학회 논문지, 53B권 12호, pp732-738, 2004.
- [2] 박명진, 광상엽의 "소형 고온초전도 싱글 페넬이크 코일의 전자기력에 의한 Stress 해석", 대한전기학회 하계학술대회, 용평, 2006.