

## 틈새를 낸 열전자 차폐막의 차기차폐 특성

### Magnetic Shielding Characteristics of the Slitted Electrothermal Shield

李 弘 培\* · 裴 東 鎭\* · 金 錫 煥\* · 元 永 秦\*\* · 韓 聲 鎭\*\*\* ·  
車 貴 守§ · 韓 松 曄§§

(Hong-Bae Lee · Dong-Jin Bae · Seog-Whan Kim · Young-Jin Won · Sung-Chin Hahn ·  
Guee-Soo Cha · Song-Yop Hahn)

**Abstract-** Many research and development activities have found that Superconducting Generators (SCG) have advantages such as high efficiency, light weight, small size, large unit size and good steady-state stability over conventional ones. However the transient stability of SCG is comparable to that of conventional ones. One way to improve the transient stability of SCG is to apply quick-response excitation system to the SCG. For this purpose, an SCG with an electrothermal shield of short electric time constants should be developed. In this paper, a new electrothermal shield, called slitted electrothermal shield (SES), is proposed. The SES can easily transmit radiated heat into the ends of the shield as in the conventional electrothermal shields (CES) and can easily pass magnetic flux produced by armature and field windings. By finite element analysis and experimental test, the slitting effects of SES on magnetic shielding are compared. Good agreement is obtained between simulated and test results.

#### 1. 서 론

초전도 동기발전기는 상전도 발전기에 비해 효

\*正 會 員 : 서울대 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

\*\*正 會 員 : 韓 電 技 術 研 究 院 電 力 系 統 研 究 室 研 究 員

\*\*\*正 會 員 : 東 亞 大 工 大 電 氣 工 學 科 助 教 授

§正 會 員 : 順 天 鄉 大 工 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博

§§正 會 員 : 서울대 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1991年 1月 26日

1 次 修 正 : 1991年 5月 2日

율향상, 소형경량화 및 종래기의 용량 한계를 넘는 대용량화의 가능성을 보여 주고 있어 차세대 발전기로 연구개발이 진행중이다. 또한 저 동기 리액턴스화가 가능하기 때문에 계통에 연계운전시 계통의 정태 안정도 향상과 송전용량 증대효과를 가져 올 수 있을 것으로 기대된다. [1~3]

그러나 초전도 발전기의 과도안정도는 재래식 발전기에 비하여 거의 비슷한 수준에 있기 때문에

[4] 이에 대한 대책이 필요하며 그중의 한 가지가 속용여자방식을 채용하는 것이다. 이와같은 관점에서 저속용여자 중용량기는 도시근교에 설치하여 DSS(Daily Start and Stop)운전이 가능하도록 하며, 초속용여자 대용량기는 원격지에 설치하고 여자 변화에 견딜 수 있는 초전도선을 계자권선에 사용하여 과도안정도를 향상시키고자 하는 연구가 진행중이다. [5~7]

속용여자 방식의 초전도 발전기가 이에 부응하기 위해서는 계자와 전기자 권선에 의해 생기는 자속이 쉽게 열전자 차폐막(electrothermal shield)을 통과 할 수 있도록 열전자 차폐막의 시정수가 짧아야 한다.

본 연구에서는 속용 여자 초전도 발전기에의 적용을 목적으로 틈새가 있는 열전자차폐막(SES; slitted electrothermal shield)을 제안하고, 그 특성을 유한요소법에 의하여 해석하며 이를 실험을 통하여 확인하였다.

## 2. 틈새를 낸 열전자 차폐막

초전도 발전기에는 초전도 계자권선의 온도상승을 방지하기 위하여 초전도 권선의 밖에 열전자 차폐막을 설치한다. 종래의 열전자차폐막(CES: conventional electrothermal shield)은 동으로 된 관을 사용하여 왔는데 이것은 외부로부터 들어오는 복사열을 회전자 양쪽 가장자리로 분산시키고 전기자로부터 발생하는 과도자장 또는 고조파자장을 차폐하였다. 따라서 이 차폐기능을 향상시키기 위하여 열전자 차폐막은 열전도도 및 전기전도도가 높은 재질을 사용하였다. 이렇게 하면 속용여자 시스템을 사용하였을 때 계자권선에 발생한 과

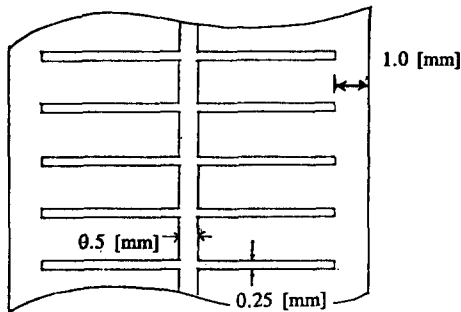


그림 1 틈새를 낸 열전자 차폐막의 펼친 그림  
Fig. 1 Development figure of slitted electrothermal shield

도자장이 차폐막을 신속히 통과하지 못하게 되어 속용여자 시스템의 효율을 발휘할 수 없다. 따라서 열전도는 잘 하면서 자기차폐는 줄일 수 있는 구조의 차폐막을 제안하였다. 그림 1은 본 연구에서 제안된 차폐막을 나타내는 데 종래의 원통형 차폐막에 틈새(slit)를 낸 것이다. 즉, 와전류를 줄이기 위하여 원통의 중앙을 자르고 축방향으로 틈새를 내었다.

본 연구에서는 유도전동기의 전기자에 3상 교류를 흘려 회전자계를 발생시키고, 회전자의 위치에 차폐층을 집어넣어 차폐효과를 측정하고, 이의 해석을 위하여 유한요소법으로 모델링 하였다.

## 3. 유한요소해석

본 절에서는 앞절에서 설명한 SES를 해석 모델에 적용하였을 때의 차폐효과를 유한요소법으로 해석하고자 한다.

### 3.1 지배방정식[8]

변위전류를 무시한 전자계 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 + \vec{J}_e \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

이교

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

의 관계를 갖는다. 여기서  $\vec{B} [\text{Wb/m}^2]$ 은 자속밀도,  $\vec{H} [\text{A/m}]$ 는 자계의 세기,  $\vec{J}_0 [\text{A/m}^2]$ 은 전류원의 전류밀도,  $\vec{J}_e [\text{A/m}^2]$ 은 와전류밀도,  $\vec{E} [\text{V/m}]$ 는전계의 세기이고,  $\mu$ 는 투자율,  $\sigma$ 는 전기전도도이다.

$B$ 는 벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 를 이용하여

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (5)$$

와 같이 표현할 수 있고, 식(5)는 식(2)와 더불어

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (6)$$

로 표현되고,  $\phi [V]$ 는 전위이다. 따라서 위의 식으로부터

다시

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = \vec{J}_0 + \sigma \left[ -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \right] \quad (7)$$

의 식을 얻게되고, 이 식은 정현적으로 변화하는

표 1 해석모델의 제원

Table 1 Dimensions of the analysis model

r <sub>1</sub> : 25.0[mm]	열전자 차폐막의 내경
r <sub>2</sub> : 26.8[mm]	열전자 차폐막의 외경
r <sub>3</sub> : 41.0[mm]	전기자의 내경
r <sub>4</sub> : 59.0[mm]	전기자의 외경
r <sub>5</sub> : 70.0[mm]	외부 차폐층의 외경
No. of slots : 36	
No. of conductors/slot : 36	

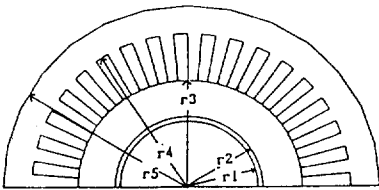


그림 2 해석모델  
Fig. 2 Model for analysis

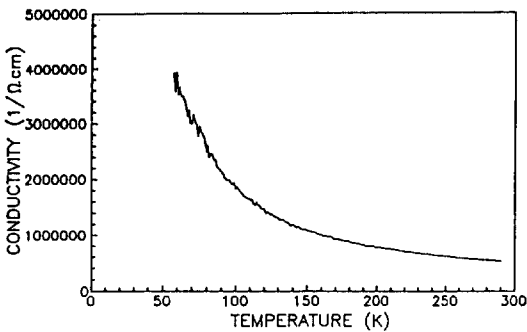


그림 3 사용된 동관의 도전율 특성  
Fig. 3 Conductivity vs. temperature curve of copper tube

계에 대해서는

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} + \sigma(j\omega \vec{A} + \nabla \phi) = \vec{J}_0 \quad (8)$$

이고,  $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ 인 Columb Gauge를 적용하고 투자율이 상수이면

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + \sigma(j\omega \vec{A} + \nabla \phi) = \vec{J}_0 \quad (9)$$

의 복소 포와슨 방정식으로 표현되는 지배방정식을 얻게된다. 따라서 경계가 주어진 해석대상 영역을 삼각형 요소로 분할하고 식(9)에 Galerkin법을 적용하여 유한요소 정식화[9]를 행한후 각 절점에서의 벡퍼 포텐셜 값과 각 요소에서의 자속밀

도 값을 구하였다.

표1과 그림2에 모델의 제원을 나타내었다. 고정자는 규소강판으로 되어 있으며 여기에 36개의 슬롯을 두고 3상 2극 권선을 하였다. 고정자 내에 두께 1.8mm동관으로된 SES를 설치하였다. 이 동관의 도전율은 그림 3과 같으며 본 연구에서는 액체 질소 온도(77K)에서의 도전율  $2.6 \times 10^8 [\Omega/m]$ 을 사용하였다. 유한요소 해석시 삼각형 요소수는 2018개, 절점수는 1031개이며 복소 ICCG법(complex incomplete conjugate gradient method)을 사용하였다.

#### 4. 해석결과 및 검토

그림 4는 유한요소망의 그림이며 그림 5는 전원의 주파수가 60Hz일때 세 경우에 대한 등자속선도이다. 즉 틈새가 없는 경우(경우 1), 틈새가 4개(경우 2), 및 6개(경우 3)인 경우를 보여주는데 틈새의 폭은 0.25mm이다. 이 그림을 보면 틈새수가 증가할수록 SES내부의 자속밀도가 증가하는 것을 알 수 있다. 표2는 전류를 3[A]로 했을 때  $r=19mm$ 인 곳의 반경방향에 대한 자속밀도의 측정값과 유한요소법에 의한 계산값을 보여주고 있으며, 이 두가지 값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있어 유한요소 해석의 타당성을 보여 준다 할 수 있다.

여기서 자속밀도 측정은 그림 6과 같은 장치를 제작하여 측정하였다. 즉 SES 내외측에 FRP관을

표 2 반경방향의 자속밀도[Gauss]

Table 2 Radial flux density[Gauss]

경우	경우1 (틈새 없음)	경우2 (틈새 4개)	경우3 (틈새 6개)
자속밀도			
계산값	129.4	426.9	480.8
측정값	130.7	376.1	440.3

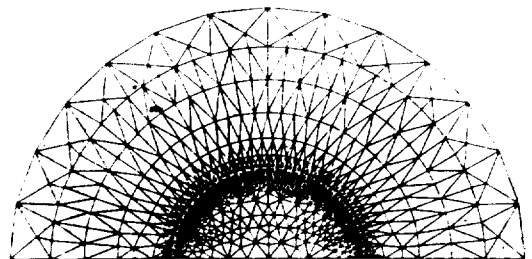
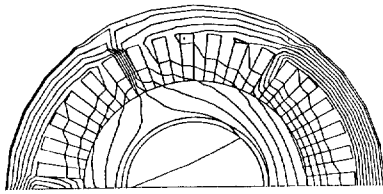
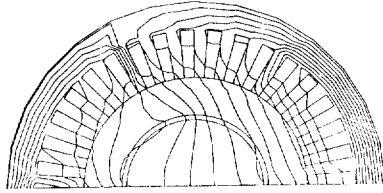


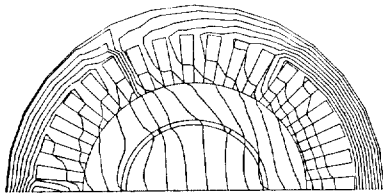
그림 4 해석모델의 요소망  
Fig. 4 Finite element mesh



a) 경우 1 : 틈새가 없는 경우  
a) case 1 : No slit



b) 경우 2 : 틈새가 4개인 경우  
b) case 2 : 4 slits



c) 경우 3 : 틈새가 6개인 경우  
c) case 3 : 6 slits

그림 5 세 경우에 대한 자속분포도  
Fig. 5 Flux patterns for 3 cases

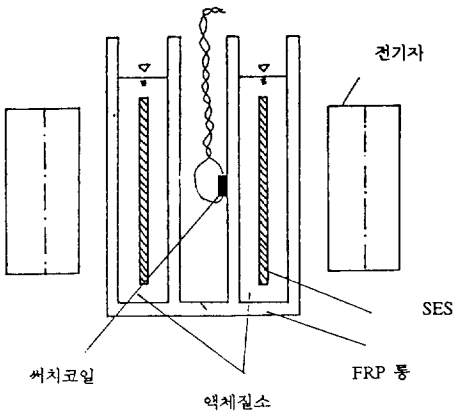


그림 6 자장측정용 실험장치  
Fig. 6 Experimental system for flux density measurement

설치하고 여기에 액체질소를 주입하여 SES의 온도를 77K로 유지하였고 내부 FRP통의 내부에 센서코일을 두어 자장을 측정하였다.

그림7은 반경이 19mm인 원주상에서의 자속밀도

표 3 주파수 변화에 따른 자속밀도의 평균값(Gauss)  
(단, 괄호 안은 투과율 % 임)

Table 3 Average flux density with frequency variation

주파수	2Hz	60Hz	120Hz
경우1	484.5(99.2)	129.4(26.5)	63.6(13.0)
경우2	488.1(99.9)	376.1(77.0)	297.9(60.1)
경우3	488.4(100)	440.3(90.2)	375.9(77.0)

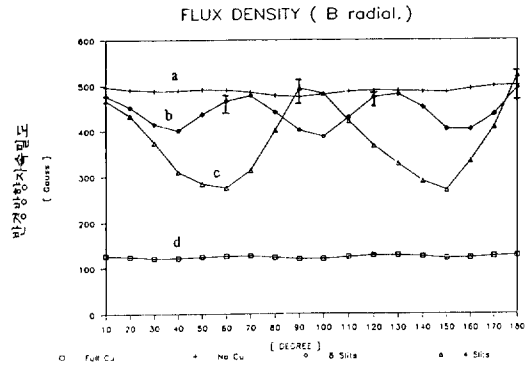


그림 7 반경방향의 자속밀도 분포(r=19mm)  
Fig. 7 Radial flux density distribution(r=19 mm)

값을 나타낸다. 여기서 (a)는 차폐를 전혀하지 않은 경우, (b)는 틈새가 6개인 경우, (c)는 틈새가 4개인 경우이고, (d)는 틈새가 없는 경우 (CES)이다. 이 그림의 곡선 (b) 및 (c)에서 "I"표시는 틈새가 있는 곳이다. 틈새가 없는 경우는 모든 위치에서 차폐가 많이 됨을 알 수 있다. 그러나 틈새가 있는 경우는 틈새가 있는 곳에서는 차폐가 적게되고 틈새와 틈새의 가운데 부분에서는 차폐가 많이 됨을 볼 수 있다.

표3은 전원 주파수 변화에 따른 반경방향 자속밀도의 평균값이다. 표3에서도 역시 그림7에서와 마찬가지로 틈새의 수가 많을수록 자속의 통과가 많아 자속밀도가 높아 짐을 볼 수 있으며, 또한 주파수가 낮을수록 역시 그러함을 볼 수 있는데 이는 충분히 예측할수 있는 결과이다. 주파수가 낮을때는 자속밀도의 값이 세 경우가 모두 비슷하였다. 그러나, 주파수가 높을때는 틈새수가 많을수록 자속의 차폐가 적게됨을 알 수 있다. 한편 틈새가 전혀 없는 전자 차폐막은 주파수가 높아질수록 차폐효과가 커지기 때문에, 속응여자방식의 발전기에서 요구되는 계자전류의 변화에 대한 변동 자속이

신속히 전기자에 전달되어야 하는 특성에는 맞지 않아 틸새가 있는 열전자차폐막의 이용 가능성을 보여준다 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 속응 여자 방식 초전도 발전기에의 적용을 목적으로 새로운 열전자 차폐막 모델을 제안하였으며, 유한요소 해석을 통하여 기존의 틸새가 없는 열전자 차폐막과 틸새가 있는 새로운 모델의 자기 차폐효과를 비교하였다. 그리고 이것을 실험을 통하여 확인함으로써 유한요소 모델링의 효용성을 입증하였다.

본 연구에서 제시한 틸새를 갖는 열전자차폐막은 구조가 간단하면서 열전도를 충분히 할 수 있으며 전자차폐율을 적게 할 수 있어 속응여자식 초전도 발전기의 차폐막으로 적합하다고 생각된다.

본 연구중 동관의 전기전도도 특성측정을 위하여 도와주신 한국전기연구소의 초전도 연구실 여러분께 감사드립니다. 그리고 본 연구는 한국전력공사 기술연구원의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 알려드립니다.

## 참 고 문 헌

[1] J.L. Smith. Jr., "Overview of the Development of Superconducting Synchronous

Generators", IEEE Trans. on Mag, Vol. MAG-19, No. 3 May 1983, pp. 522~528

- [2] 한 송엽, "초전도 교류발전기의 개발현황과 문제점", 대한기계학회지 Vol. 27, No. 3, 1987, pp. 180~185.
- [3] 한성진, 차귀수, 한송엽외, "Finite Element Modelling of Electromagnetic Shields in Superconducting AC Generator" MT-11, 1, 1989, pp. 540~544.
- [4] M. Furuyama, J.L. Kirtley, Jr. "Transient Stability of superconducting Alternators", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-94, No. 2, 1975, pp. 320~328.
- [5] T. Tanaka, et. al, "Current Situation of R & D on Superconducting Generators carried out by Engineering Rearch Association for Superconductive Generation Equipment and Materials," *ibid*, pp. 556~561
- [6] T. Okada, et. al, "Design and Manufacutre of Superconduting Generator with High-Response Excitation", *ibid*, pp. 562~576.
- [7] P.J. Lawrenson, T.J.E. Miller, J.M. Stephenson, "Damping and Screening in the Synchronus Superconducting Generator" Proc. IEE, Vol. 123, No. 8, A-W, 1978
- [8] W.K.H. Panofsky, M. Phillips, "Classical Electricity and Magnetism" 2nd Ed., A-W, 1978.
- [9] G. Dhatt, G. Touzot, "The Finite Element Displayed", John Wiley and Sons, 1984.