

## 30kVA급 초전도 동기 발전기에서 축방향 길이 변화에 따른 유기 기전력 특성연구

조 영식, 홍 정표, 김 규탁, 권 영길\*, 류 강식\*

### E.M.F Characteristic of 30kVA class Superconducting Synchronous Generator according to Magnetic shield length

Young-Sik Jo, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Young-Kil Kwon\*, Kang-Sik Ryu\*  
Changwon National University, KERI\*

**Abstract** - In general, we apply the 2 dimensional method to analyze the characteristic of electric machinery. But it is very difficult to analyze the air-cored machine like as superconducting generator, because it have 3 dimensional flux distribution.

In this paper, we compare the analysis r between 2D and 3D. 3D Finite Element Meth applied to the superconducting generator at n condition. And we studied the characteristic acc to the axial length of magnetic shield.

### 1. 서 론

초전도 동기발전기는 회전계자형으로 계자가 초전도체로 구성되어 있으며, 원리는 기존의 발전기와 같으나 초전도 계자코일을 냉각하기 위한 냉각시스템과 단열구조를 갖고 있다. 계자코일과 전기자코일이 투자율이 공기와 같은 재질에 권선되어 있기 때문에 3차원적인 자기 분포를 갖게 된다. 따라서 2차원 전자계해석으로는 정확한 유기전압을 해석할 수가 없다. 또한, 초전도 발전기의 경우 자기실드의 축방향 길이가 다양하게 설계되고 있는데 자기실드의 길이는 유기 기전력 크기에 직접적인 영향을 미치게 되므로 적절한 자기실드의 길이 결정은 설계에 있어서 중요한 요소가 된다.

본 논문에서는 Biot-Savart법칙과 자기영상법을 이용하여 2차원 전자계 해석을 하고 이를 3차원 유한 요소법을 이용한 전자계해석결과와 비교 검토하였으며, 자기실드의 축방향 길이 변화에 따른 유기 기전력 특성을 분석하고 고조파분석을 하였다.

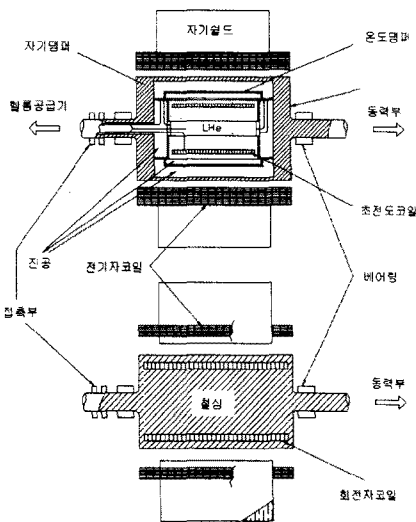


그림 1. 초전도 발전기의 구조

### 2. 본 론

#### 2.1 초전도 동기 발전기의 구조

본 논문에서 대상으로한 30kVA급 초전도 동기 발전기는 계자가 있는 곳에 액체헬륨이 통과하면서 냉각을 하고 온도덤퍼 외부를 진공으로 하여 단열이 되게끔 설계되어 있다. 따라서 일반적인 상도체 발전기와 달리 이러한 덤퍼에 의해 공극이 매우 크게된다. 상도체로 된 전기자는 FRP로 지지구조 형상을 만들고 방열을 위해 에어덕트를 설치하였다.

표 1. 초전도 발전기 사양

출력	극수	속도	주파수	계자형상
30kVA	4	1800rpm	60Hz	Racetrack

#### 2.2 해석모델

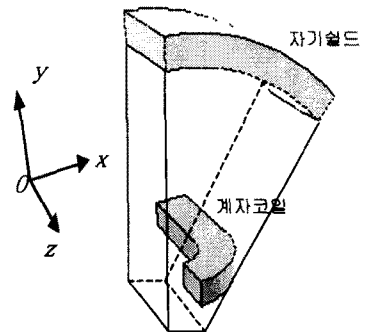


그림 2. 해석모델

3차원 전자계 해석의 경우 모델의 선정은 초전도 동기 발전기가 자기실드를 제외하고는 매질이 같기 때문에 매우 단순하게 모델링 될 수 있다. 대칭성을 고려해서 그림 2와 같이 전체모델의 1/8만을 해석영역으로 선정하여 정상상태 해석을 하였다.

3차원 유한요소해석을 하기 위한 지배방정식은 식(1)과 같다. [1],[2]

$$\mu \nabla^2 \Omega = \nabla \cdot \mu H_c \quad (1)$$

$$\nabla \times H_c = J_0$$

여기서  $\mu$  : 투자율

$\Omega$  : 자기 스칼라 포텐셜

지배방정식에 Galerkin method를 이용하면 식(2)와 같은 요소 방정식을 구성할 수 있다.

$$[S][\Omega] - [F] = 0 \quad (2)$$

2차원 전자계해석은 해석모델이 간단하고 자기철드의 재료는 투자율이 충분히 높기 때문에 자기 철드의 내 반경을 투자율이 무한대인 것으로 가정하고 자기영상법을 식(3)에 결합하여 해석하였다.[3]

$$dH = \frac{IdL \times R}{4\pi |R|^3} \quad (3)$$

### 3. 해석결과

#### 3.1 해석 결과

자기 철드의 축방향길이 변화에 따른 해석모델의 선정은 기존의 설계치인 계자의 직선부 길이와 같은 case 1과 계자코일의 리턴 경로까지인 case 2, 그리고 전기자의 리턴경로까지라고 가정한 case 3으로 분류하였다.

표 2. 해석 대상의 분류 단위 : mm

구분	case 1	case 2	case 3
자기철드의길이	96	160	260

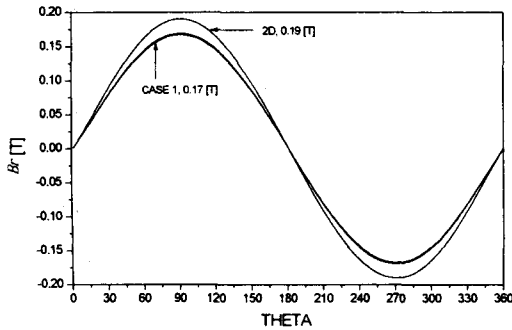
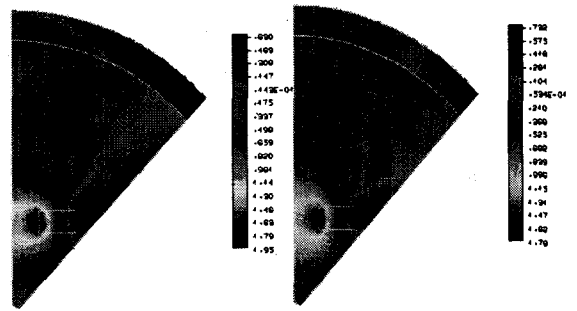


그림 3. 전기자 코일 위치에서의  $B_r$  ( $z=0$ )

그림 3에  $z=0$ (mm)인 단면에서 해석결과를 나타내었다. 2차원 해석결과 자속밀도의 반경방향성분  $B_r$ 의 최대값은 0.19(T)이고 3차원해석에서는 case 1~3 모두가 거의 같은 0.17(T)로 2차원 해석 결과치가 3차원 해석치에 비교해서 12%정도 크다.  $B_r$ 이 최대값을 갖는 축의 중심  $z=0$ 에서의 3차원 해석의 결과를 보면 자기철드의 축방향길이 변화에 대한 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

그림 4는 case 1과 case 3의  $B_r$ 의 분포이다. case 1의 경우 자기 철드가 끝나는 단면으로 통과하는  $B_r$ 이 case 3와 비해 확연히 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 발전기의 유기 기전력의 감소에 직접적으로 이어지게 된다.

초전도 동기 발전기가 정상 운전을 하기 위해서는 초전도 계자 코일이 초전도 상태를 안정적으로 유지하고 있어야 한다. 계자 코일이 초전도 상태를 유지하기 위해서는 임계온도, 임계 전류밀도, 뿐만 아니라 임계 자계 값 이하에서 운전되어야 한다. 따라서 초전도 동기 발전기에서는 계자 코일에서  $B_{max}$ 의 크기와 위치를 계산하



(a) case 1

(b) case 3

그림 4. 자속밀도 분포 ( $z=96$ mm)

여야 안정적인 운전전류와 계자 모양을 선택할 수 있다. 그림 5는 계자코일의 중앙단부에서  $x-z$ 평면에서의  $|B|$ 의 분포이다. 자기 철드의 축방향 길이가 96(mm)인 경우 계자 코일 리턴경로의 시작점에서 최고값을 가지는 것을 알 수 있다.

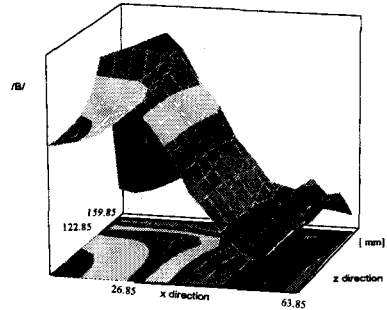


그림 5.  $x-z$  평면에서의  $|B|$ 의 분포( $y=85.63$ )

#### 3.2 유기기전력 특성

전기자는 매극 매상당 슬롯수 3, Y결선, 2층권이고 7/9단절권으로 설계되어 있으며, 유기기전력의 계산결과를 그림 6에 나타내었다.

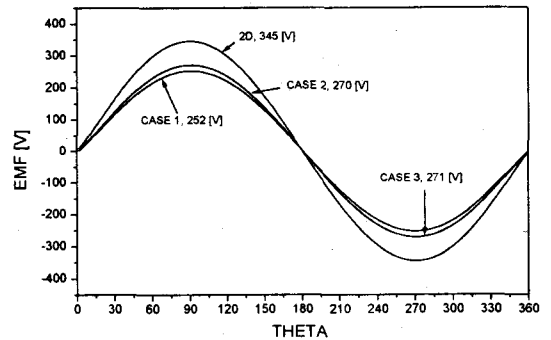


그림 6. 유기 기전력 (단절권)

2차원으로 해석한 유기 기전력의 최대값이 case 1의 경우와 비교하면 37%정도 크게 계산되었으며, 이것은

3차원 해석의 경우는 전기자 중심 위치( $z=0$ [mm])에서 리턴경로로 갈수록  $B_r$ 의 값이 감소하지만 2차원 해석에서는  $z$ 축 방향의 길이 변화를 고려할 수 없기 때문이다. 그림 7에 축방향에 따른  $B_r$  분포를 나타내었다.

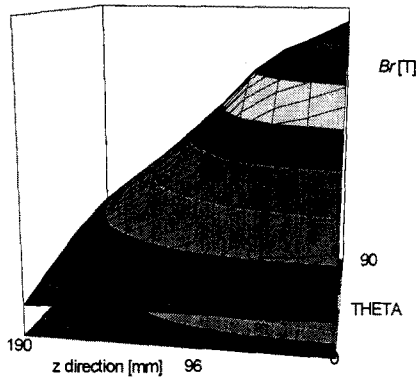


그림 7. 축방향에 따른  $B_r$  분포 (case 1)

case 2와 case 3의 경우는 자기 철드가 계자의 리턴 경로까지 포함하기 때문에 누설에 의한 유효 자속밀도의 감소가 적지만 case 1의 경우는 자기철드의 길이가 계자권선의 리턴경로를 포함하지 않기 때문에 상대적으로 누설이 많아 유기 기전력에 기여하는 자속이 줄어들기 때문임을 알 수 있다. 유기 기전력을 비교하면 case 3이 case 1에 비해 7%정도 증가한 것으로 계산되었다. 즉 계자 권선의 리턴 경로까지 자기 철드의 길이를 증가시키면 자속 밀도의 누설을 감소시켜 유기 기전력이 증가할 것이라는 것을 알 수 있다. 그림 8은 전철권으로 권선하였다고 가정된 경우의 유기 기전력 파형이다. 이 경우 유기 기전력은 전체적으로 단철권으로 권선하였을 경우와 비교해보면 20(V)정도 증가 하였다.

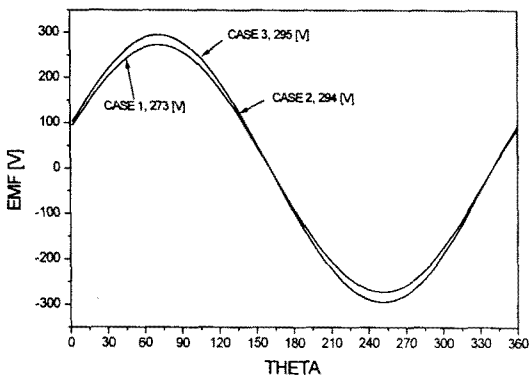


그림 8. 유기 기전력 (전철권)

case 1~3의 결과에 대해 유기기전력을 푸리에 급수 전개하여 식(4)를 이용하여 유기기전력의 왜형율을 계산하였다.

$$\epsilon = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_{kp}}}{V_{1p}} \times 100 \quad (4)$$

왜형을 계산시 100차항의 고조파까지 고려하였으며, 왜형을 계산결과를 표 3에 나타내었다.

표 3. 유기기전력의 왜형율 단위 : %

결과	case 1	case 2	case 3
단철권	0.3	0.33	0.31
전철권	0.52	0.47	0.46

표 3의 결과에서 보는 것처럼 공극의 길이가 매우 크고 전기자 지지부가 투자율이 공기와 같은 재질이기 때문에 슬롯 고조파에 의한 영향이 없어서 현재의 설계와 달리 단철권으로 하지 않아도 유기 기전력의 파형은 거의 정현파로 될 수 있을 것이다. 그림 9에 자기철드의 축방향길이 변화에 따른 유기기전력의 변화를 나타내었다.

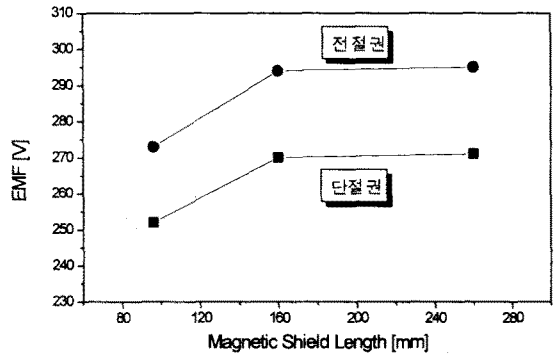


그림 9. 자기철드길이 변화에 따른 유기 기전력

#### 4. 결 론

본 논문에서는 초전도 동기 발전기를 대상으로 2차원 해석결과와 3차원 해석결과를 비교 검토하였다. 이 결과 초전도 동기 발전기에서는 공극 자속밀도의 분포가 축방향으로 크게 저감하는 3차원적인 자체분포임을 알 수 있었으며, 초전도 동기 발전기의 경우 2차원 해석으로는 신뢰성있는 결과를 얻을 수 없다.

3차원 해석 결과를 이용해 유기 기전력의 특성을 분석한 결과 적절한 자기 철드의 길이는 계자의 리턴경로까지라는 것을 알 수 있었으며, 또한 해석 대상의 경우 전기자 권선을 전철권으로 하여도 유기 기전력의 파형은 정현적이면서 단철권에 비해 큰 유기 기전력을 얻을 수 있다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] S.J.SALON, "Finite Element analysis of electrical machines", 125~135,1995
- [2] J.N.Reddy, "An Introduction to the Finite Element method", 408,1984
- [3] Hague, "The Principles of Electromagnetism", 104-114, 1995