

Study on the 2G High Temperature Superconducting Coil for Large Scale Superconducting Magnetic Energy Storage Systems

대용량 에너지 저장장치용 2세대 고온 초전도 코일의 특성 해석

Ji-Young Lee*, Seyeon Lee*, Yungil Kim*, Sang Ho Park*, Kyeongdal Choi*, Ji-Kwang Lee**, Woo-Seok Kim*†
이지영*, 이세연*, 김영일*, 박상호*, 최경달*, 이지광**, 김우석*†

* Korea Polytechnic University, 237 Sangdaehak-ro, Siheung, Gyeonggi-do, Korea,

** Woosuk University, 443 Samnye-ro, Wanju-gun, Ceollabuk-do, Korea,

† wskim@kpu.ac.kr

Abstract

대용량 초전도 에너지저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)용 초전도 권선을 제작하기 위해서는 높은 자장특성을 가지고 있는 2세대 고온초전도 (2nd Generation High-Temperature Superconductor, 2G HTS) 선재를 사용하는 것이 효율적이다. 자기에너지 저장 밀도를 높이기 위해서는 권선에 높은 전류밀도를 인가해야 하는데, 도체의 평면에 수직 방향으로 인가되는 자속밀도가 커지면 임계전류가 작아지는 2세대 HTS 선재의 특성상 토로이드 형태의 권선을 구성하는 것이 일반적이다. 이러한 고온초전도 권선을 설계하기 위해서는 권선 특성의 정확한 해석이 필요한데 이를 위해 유한요소법을 사용한 프로그램을 이용하여 해석이 가능하나 토로이드 형태의 권선은 대칭성의 문제로 3차원 해석을 해야만 하며, 이는 모델링에 많은 어려움과 높은 컴퓨터 사양, 그리고 매우 긴 계산 소요시간이 필요함을 의미한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 분석적이고 통계적으로 고온 초전도 코일에서 작용하는 최대 수직자장과 저장된 에너지를 결정하는데 이해하기 쉽고 효율적으로 계산하는 방법을 제시했다. 이 방법은 현저한 시간단축과 효율적인 설계를 할 수 있는 새로운 계산 방법으로 기존의 유한요소법에 의해 소요되는 계산 시간에 비해 1/1000정도로 계산시간 단축을 할 수 있었다.

Large scale superconducting magnetic energy storage (SMES) system requires very high magnetic energy density in its superconducting coils to enhance the energy capacity and efficiency of the system. The recent high temperature superconducting (HTS) conductors, so called 2G conductors, show very good performance under very high magnetic field so that they seem to be perfect materials for the large scale SMES coils. A general shape of the coil system with the 2G HTS conductor has been a toroid, because the magnetic field applied perpendicularly to the surface of the 2G HTS conductor could be minimized in this shape of coil. However, a toroid coil requires a 3-dimensional computation to acquire the characteristics of its critical current density – magnetic field relations which needs very complicated numerical calculation, very high computer specification, and long calculation time. In this paper, we suggested an analytic and statistical calculation method to acquire the maximum magnetic flux density applied perpendicularly to the surface of the 2G HTS conductor and the stored energy in the toroid coil system. Although the result with this method includes some errors but we could reduce these errors within 5 percent to get a reasonable estimation of the important parameters for design process of the HTS toroid coil system. As a result, the calculation time by the suggested method could be reduced to 0.1 percent of that by the 3-dimensional numerical calculation.

Keywords: SMES, Toroid, Magnetic Field, Stored energy

I. INTRODUCTION

최근 고급 정보화 기술의 발전에 따라 고품질의 전력 수요가 급증하는 반면, 화석연료의 감소로 인하여 대용량의 전기에너지를 공급할 수 있는 대체기술의 필요성과 화석연료 사용에 의한 지구 온난화 등의 문제가 발생하며 신재생에너지의 필요성이 크게 증가하고 있다 [1]. 이러한 신재생에너지는 대체로 에너지원이 무궁무진하고 온실가스의 배출이 적은 깨끗한 에너지원이라는 장점이 있는 반면에, 그 출력이 자연 조건에 좌우되므로 안정적인 전력공급이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 생

산되는 에너지의 양이 불확실한 발전기술을 계통에 연계하기 위해서는 출력 안정화 기술인 에너지 저장장치의 중요성이 커지고 있다 [2]. 특히, 대용량 발전기의 출력을 제어하기 위해서는 매우 높은 용량과 수시로 변화하는 발전기의 출력에 대응할 수 있는 빠른 응답속도를 가지는 에너지 저장 장치가 필요하다. 현재까지 개발된 여러 가지의 대용량 에너지 저장장치들 중 초전도 에너지 저장장치(SMES)는 상대적으로 에너지 저장용량에 비해 출력이 크고 응답속도가 빨라서 오랜 시간동안 잦은 충방전이 요구되는 풍력발전과 같은 분산전원의 출력보상 시스템에 적용하기에 적합한 에너지 저장장치기술이

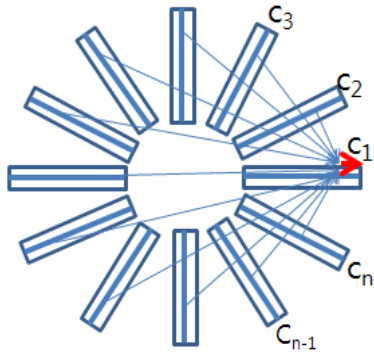


Fig. 1. 토로이드형태로 배치된 팬케이크 코일

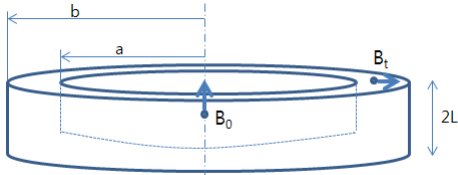


Fig. 2. 싱글팬케이크 형태의 모듈코일

다 [3].

SMES의 경쟁력을 높이기 위해서는 같은 체적에 보다 많은 에너지를 저장할 수 있으며 선재의 사용량이 적은 형태가 유리하다. 이런 대용량 SMES를 제작하기 위해서는 2세대 HTS 선재를 사용하는 것이 가장 효율적이며 수직 자장의 크기가 가장 작은 형상인 토로이드형으로 설계하는 것이 가장 적합하다 [4]. 하지만 토로이드 코일의 경우 형상의 대칭성 문제로 인하여 2차원 해석이 불가능 하며 3차원 해석이 필수적이기 때문에 계산상의 어려움이 존재하게 된다 [5]. 일반적으로 토로이드형의 자장 계산은 유한요소법을 이용한 상용프로그램을 이용하여 해석 할 수 있으나 해석을 위한 코일의 형태를 규정하는 많은 제약 조건이 따르게 되며, 해석 시간 역시 많이 소요되므로 최적 설계를 위한 반복 설계에 사용하기에는 적절하지 못하다 [6]. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 초전도 응용기기의 임계전류에 많은 영향을 주는 수직자장의 크기와 에너지의 크기를 빠르고 신뢰성 높게 계산하여 효율적인 설계를 할 수 있는 새로운 계산 방법을 제시하였다.

II. 수직자장의 계산

A. 자기자장(self-field)의 계산

토로이드 형태의 최대자기장을 계산하기 위해서 싱글팬케이크코일(Single pancake coil; SPC)을 Fig. 1과 같이 배치하였을 때 싱글팬케이크코일에서 자기 자신이 만들어내는 최대 자기장 값을 자기자장(self-field)라 하였다. 일반적으로 HTS선재의 표면에 수직으로 인가되는 자속 밀도는 임계전류에 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 일반적인 FEM해석에 의한 계산결과에 따르면 SPC의 자속밀도가 최대값이 되는 지점이 각각의 SPC의 측면 중간지점이다. FEM으로 구한 결과에서 이 지점의 자

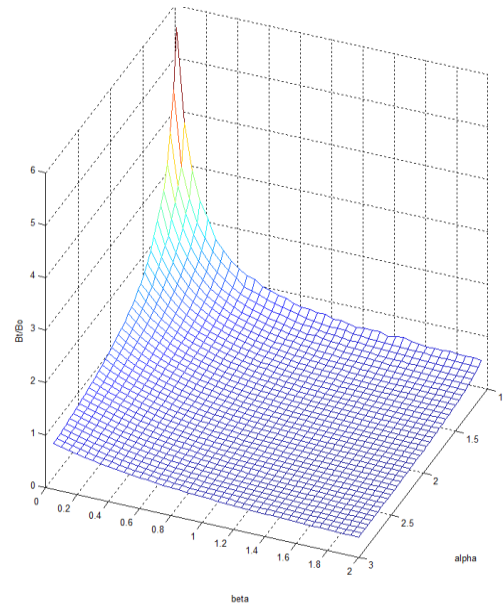


Fig. 3. α 와 β 에 따른 $T(\alpha, \beta)$ 의 3차원 그래프

속밀도는 실제로 토로이드를 구성하는 모든 SPC의 자속 밀도의 중첩이다. 그렇기 때문에 우리는 수치계산을 사용하여 SPC형상의 파라미터를 사용한 함수로 자기자장을 간단하고 빠르게 구하였다. 이를 계산하기 위하여 한 개의 팬케이크 코일을 보았을 때, Fig. 2와 같은 변수를 갖는 싱글솔레노이드의 형상이 된다.

싱글솔레노이드의 내반경을 a , 외반경을 b , 그리고 코일에 사용된 선재의 폭인 싱글솔레노이드의 높이를 $2L$ 이라고 정의할 때, 내반경 a 와 외반경 b 의 비를 α 라 하여 $\alpha=b/a$, 내반경 a 와 높이 L 의 비를 β 라 하여 $\beta=L/a$ 라 정의하였다. 싱글솔레노이드 중심에서의 자기장 크기인 B_0 와 최대수직자장이 발생하는 지점에서의 수직자기장의 크기인 B_t 의 비를 $T(\alpha, \beta)=B_t/B_0$ 와 같이 정의하였다. 솔레노이드의 α, β 에 따른 $T(\alpha, \beta)$ 의 데이터를 얻기 위하여 a 를 0.005 [m]로 고정하고 α 와 β 값을 변하게 하였다. 그런 다음 α 와 β 가 다른 솔레노이드의 B_t 와 B_0 의 값을 측정하고 MATLAB을 이용하여 정리한 후 $\alpha, \beta, T(\alpha, \beta)$ 를 3차원 그래프로 표현하면 Fig. 3와 같이 나타낼 수 있다.

여기에서 B_t/B_0 의 비율을 이용하여 SPC의 자기자장을 구할 수 있는데 이 때 팬케이크 중심자장인 B_0 를 계산하기 위하여 마틴 윌슨(Martin N. Wilson)이 제시한 계산법을 이용하여 [7] 식 (1) 및 (2)와 같이 구하였다.

$$B_0 = J \cdot a \cdot F(\alpha, \beta) \tag{1}$$

$$F(\alpha, \beta) = \mu_0 \cdot \beta \cdot \ln \left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \right) \tag{2}$$

식(1)을 이용하여 B_0 를 계산한 후에 $T(\alpha, \beta)$ 에 B_0 를 곱하여 팬케이크 코일의 수직자기장의 크기인 B_t 값을 계산 할 수 있다. 이 값은 SPC의 Self Field와 같아지므로 식(3)과 같이 결정된다.

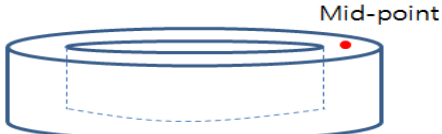


Fig. 4. C1코일의 최대 자기장 발생 지점 (미드포인트)

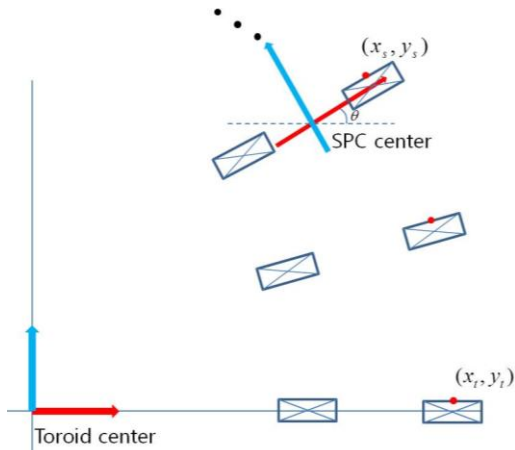


Fig. 5. Toroid center와 SPC center와의 관계

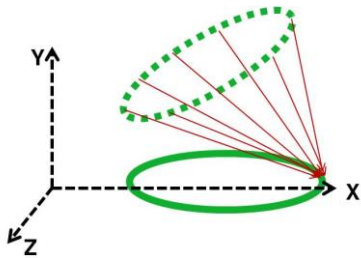


Fig. 6. 주변코일의 미소전류가 C1코일의 미드포인트에 작용하는 자기장

$$B_{self} = B_0 \cdot T(\alpha, \beta) \tag{3}$$

B. 주변 코일에 의한 자기장의 계산

주변코일에서 발생하여 작용하는 자장을 계산하기 위하여 토로이드 형태로 배치된 코일에 흐르는 전류를 선전류로 가정하여 계산하였다. 코일에 흐르는 전류에 의해서 만들어지는 자계의 세기를 구하는 기본이 되는 법칙인 비오-사바르 법칙(Biot-Savart law)을 이용하여 주변코일에 흐르는 전류로 인해 발생하여 Fig. 4에서 보인 바와 같이 C1코일에서의 최대 자기장 발생 지점인 미드포인트(Mid-point)에 작용하는 자계의 세기를 구하였다.

Fig. 5에서 보는 것처럼 토로이드의 중심을 기준으로 한 좌표계와 싱글웬케이코일(SPC) 중심을 기준으로 한 좌표계의 사이에는 식 (4)와 같은 관계가 존재하므로 싱글웬케이코일의 미드포인트 좌표를 토로이드 센터를 기준으로 한 좌표변환을 통하여 각 싱글웬케이코일의 미드포인트 좌표를 구한다.

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} \tag{4}$$

이렇게 구한 코일의 좌표를 이용하여 C2,C3,...,Cn코일에 흐르는 전류로 인하여 발생하는 C1의 미드 포인트인 점에 작용하는 자기장을 식 (5)의 비오-사바르 법칙을 사용하여 Fig. 6에서 보이는 것과 같은 코일의 미소전류소가 발생시키는 자기장의 합으로 주변 코일에 의한 자기장을 구한다.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{L} \times \vec{r}}{r^2} \tag{5}$$

$$B_x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Id\vec{L} \times \vec{r}}{4\pi|r|^2} \tag{6}$$

이렇게 미소전류의 수가 증가할수록 실제 FEM으로 구하는 결과와의 오차율이 현저하게 줄어들게 되지만 미소전류의 수가 증가함에 따라 계산시간이 늘어나게 된다. 이와 마찬가지로 결과의 오차율에 영향을 미치는 요인으로 지금까지의 계산에서는 SPC를 하나의 선전류로 모사하여 구하였는데 실제 SPC는 부피를 가지고 전류가 흐르기 때문에 이로 인한 차이가 발생하게 된다.

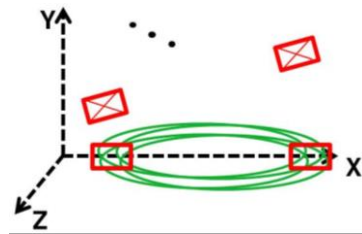


Fig. 7. SPC 단면을 여러 개의 선전류로 모사하여 나타낸 그림

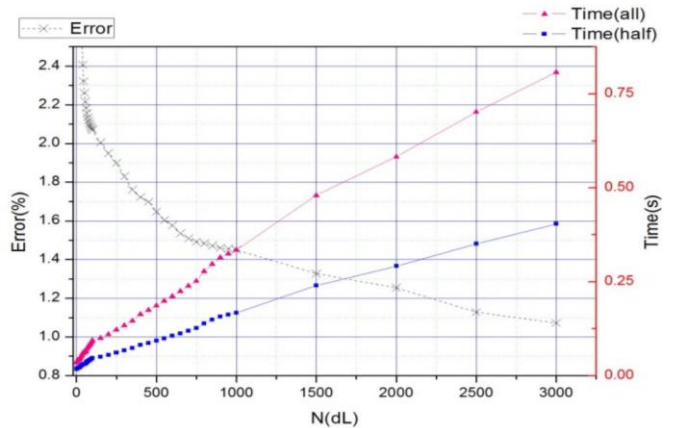


Fig. 8. SPC 미소전류에 따른 오차율과 소요되는 시간

이를 줄이기 위해서 Fig. 7에서 보이는 것처럼 SPC단면에 흐르는 전류를 하나가 아닌 여러 개의 전류가 흐르는 것으로 모사하여 계산하는 방식으로 수식으로 구한 주변코일에 의한 자기장과 FEM으로 구한 자기장의 값과의 오차율을 줄여나갔다.

C. 계산 결과

먼저 SPC의 선전류를 여러 개의 미소전류로 나누어

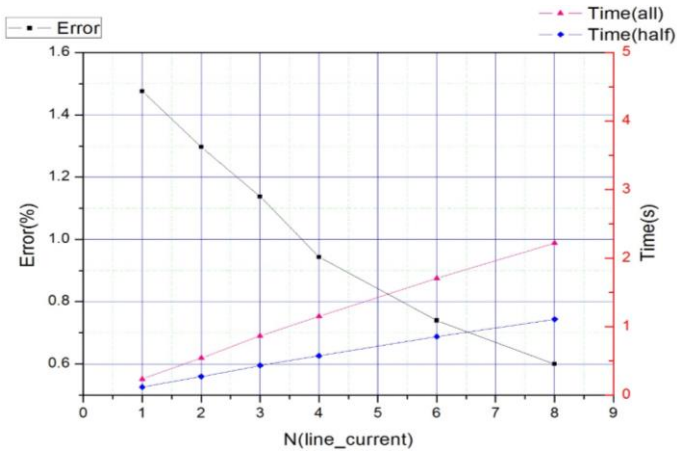


Fig. 9. SPC 단면에 흐르는 선전류의 개수에 따른 오차율과 소요되는 시간

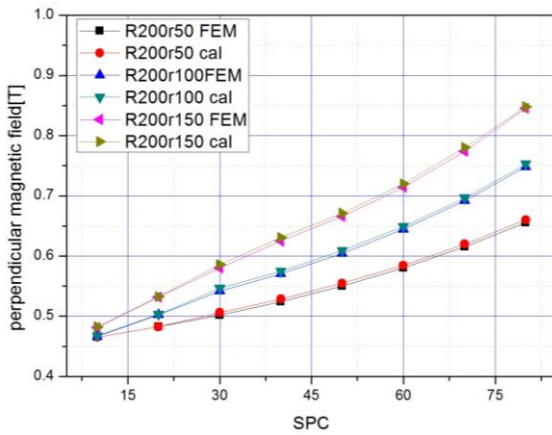


Fig.10. SPC 개수 변화에 따른 FEM과 계산식으로 구한 토로이드 최대수직자장의 크기

계산한 Fig. 8의 결과에 의하면 예상한 바와 같이 미소전류의 수가 많으면 많을수록 오차율은 줄어들지만 그만큼 계산에 걸리는 시간은 늘어나게 된다. 결과에서 빨간색은 토로이드를 구성하는 모든 코일에 대한 계산 결과를 나타내고 있으며, 파란색은 토로이드의 대칭성에 의하여 절반의 코일에 대해 계산한 결과를 나타낸다. 이와 같이 계산 소요시간을 줄이기 위하여 토로이드를 절반만 계산하여 계산시간을 반으로 줄여보는 방법도 함께 진행해 보았으나, 정확도를 높이기 위하여 미소전류의 수를 늘리기만 하는 것보다는 적절한 미소전류의 수를 정해야 한다. Fig. 9에서는 SPC의 단면에 흐르는 선전류의 개수를 늘려가면서 계산해본 결과이다. 위에서와 마찬가지로 여기에서도 단면에 흐르는 전류의 수가 늘어날수록 오차율은 줄어들지만 그만큼 걸리는 시간이 많이 늘어나기 때문에 SPC 한쪽 단면의 사이즈가 가로x세로 비율에 따라 결정되어야 한다. Fig. 10은 각 SPC에 100턴의 선재가 감겨있을 경우 SPC개수에 따른 토로이드형 SMES에서 최대 수직자장의 크기를 FEM으로 구한 값과 수식계산에 의해 구한 값을 나타낸 것으로 최대오차율 1%정도 매우 정확도가 높은 결과를 보였다. 또한 Table. 1에 나타낸 것과 같이 해석에 소요되는 시간을 최대 1/1000까지 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

Table 1. 최대수직자장을 구하는 경우 FEM과 수식계산의 소요시간

| | FEM | | | Calculation | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-------------|------|------|
| | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Radius of Toroid[mm] | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Radius of SPC[mm] | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 |
| Number of SPC[EA] | 60 | 70 | 80 | 60 | 70 | 80 |
| Running Time[s] | 309 | 371 | 386 | 0.4 | 0.55 | 0.57 |

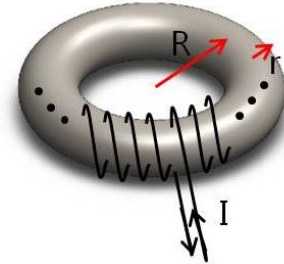


Fig. 11. 이상적인 토로이드 형태

III. 저장에너지 계산

에너지 저장장치에 저장된 에너지의 크기는 설계할 때 가장 중요한 결과물이다. 토로이드 코일에 저장되는 자기 에너지의 크기도 수직자장과 마찬가지로 기본적인 수치해석을 통하여 얻어야 하므로 원하는 용량의 SMES 용 초전도 코일을 설계하기 위한 각 변수의 크기를 찾는 데 계산시간이 오래 걸린다. 그러므로 팬케이크 코일이 토로이드 형태로 배치되었을 때 SMES에 저장되는 에너지의 크기를 빠르고 쉽게 계산하기 위한 계산법을 찾고자 하였다.

A. 이상적인 토로이드의 자기에너지

긴 솔레노이드가 원형으로 구부러지고 양 끝이 만난다면 이것이 토로이드 형태가 된다. Fig. 11에서 보는 것과 같이 토로이드가 여러 번 일정형태로 감겨 있을 때, 자속의 자기선들은 거의 권선의 내부로 갇히게 되고 B는 실제로 외부에서 0인 이상적인 토로이드의 형태가 되는 것이다. 그러나 실제 토로이드 형태의 SMES용 코일은 이상적인 토로이드에서 SPC사이의 간격만큼의 공간이 생기는 것이기 때문에 그 공간에 대한 부분도 계산과정에 반영되어야만 한다.

먼저 Fig. 11에 나타낸 것과 같은 이상적인 토로이드 형태의 코일의 인덕턴스는 식 (7)을 이용하여 구할 수 있으며, 토로이드에 흐르는 전류의 크기를 아는 경우에는 손쉽게 식 (8)로 저장되는 에너지의 크기를 구할 수 있다 [8].

$$L = \frac{\mu N^2 r^2}{2R} \tag{7}$$

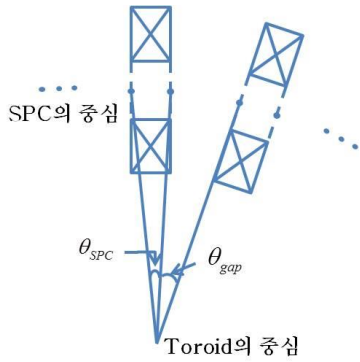


Fig. 12. 실제 Toroid 에서 SPC 가 차지하는 비율을 나타낸 단면

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (8)$$

(N : 토로이드 권선수, R : 토로이드 내반경, r : 코일(SPC)의 내반경, I : 전류)

식 (8)을 이용하여 구한 에너지의 크기는 연속적으로 연결되어 있는 이상적인 토로이드형 코일에 저장되는 에너지 크기이고 실제 SPC가 토로이드 형태로 배치된 초전도코일은 각 코일의 사이에 간격이 존재하여 자속의 누설이 생길 수 있으며, 또한 각 턴간 상호인덕턴스의 영향이 달라지게 된다. 이를 보정하기 위해서 이상적인 토로이드에서 실제 SPC가 차지하는 비율을 반영한 값을 보정함수의 변수로 만들어 보정함수를 구하였다.

먼저 이상적인 토로이드 형태의 초전도 코일을 모사한 뒤 그 에너지 E_{cal} 을 구한 뒤 유한요소법을 통하여 구한 실제 에너지의 값 E_{FEM} 과 Fig. 12에서 나타낸 것과 같이 이상적인 토로이드의 부피에서 실제 SPC가 차지하는 부피의 비율을 반영한 θ_{ratio} 를 변수로 갖는 보정함수 $f(\theta)$ 를 식 (9)와 같이 구하였다.

$$\theta_{ratio} = \frac{\theta_{SPC}}{\theta_{SPC} + \theta_{gap}} \quad (9)$$

$$f(\theta) = 4.36389 \times e^{(-\theta/0.0875)} + 12.27546 \times e^{(-\theta/0.033)} + 1.25395 \times e^{(-\theta/1.25395)} + 1.0226 \quad (10)$$

B. 보정함수를 이용한 에너지크기

위에서 설명한 방법을 이용하면 토로이드형 초전도 코일의 저장 에너지 크기를 구할 때 유한요소법을 사용하지 않고 이상적인 토로이드형을 가정한 후 그 토로이드의 인덕턴스를 이용한 에너지를 구한 뒤 보정함수만 곱해주면 어느 정도 실제 값에 가까운 근사치를 얻을 수 있다. 보정함수를 이용하여 구한 에너지크기를 $E_{Function}$ 이라 할 때 E_{cal} 의 값을 알고 보정함수를 식 (11) 같이 곱해주면 수치해석적으로 계산하는 경우보다 월등히 빠른 속도로 토로이드형 초전도 코일에 저장되는 에너지의 크기를 구할 수 있다.

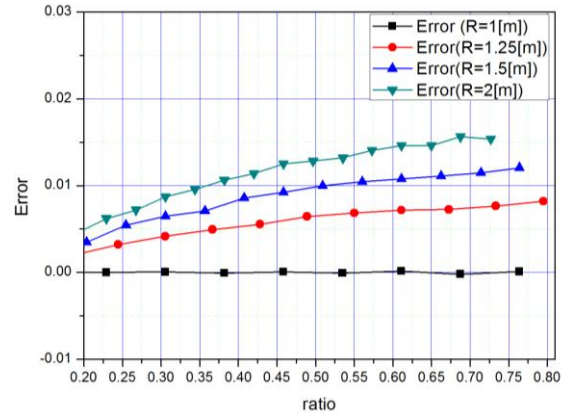


Fig. 13. 토로이드 내반경에 따른 오차

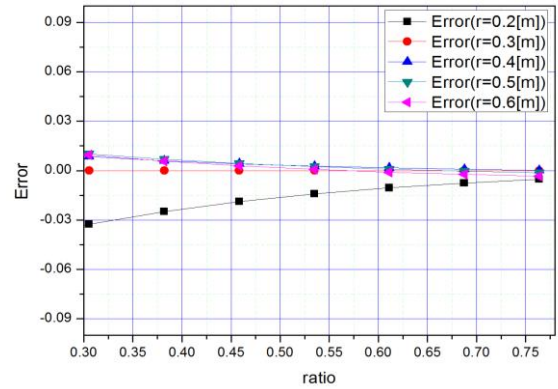


Fig. 14. SPC 내반경에 따른 오차

$$E_{function} = E_{cal} \times f(\theta) \quad (11)$$

C. 결과

계산방법의 타당성을 확인하기 위하여 SPC의 내반경은 고정된 채로 토로이드의 내반경의 크기를 변화시켜보고 토로이드의 내반경이 고정되어 있을 경우 SPC의 내반경 변화에 따른 에너지 크기를 살펴보았다. 수직자장을 구했을 경우와 마찬가지로 수치해석으로 구한값을 기준으로 놓고 이 값과의 비교를 통하여 오차를 계산했다. 식 (12)에서 보는 것과 같은 방법으로 오차를 구해서 비교해보았다.

$$Error = \frac{E_{function} - E_{fem}}{E_{function}} \quad (12)$$

먼저 Fig. 13의 그래프는 SPC의 내반경은 300 mm로 고정된 뒤 토로이드의 내반경 크기만을 1 m, 1.25 m, 1.5 m, 2 m로 증가시켜보면서 오차의 변화를 나타낸 것으로 SPC가 많아져서 토로이드에서 차지하는 비율이 커질수록 오차는 약간씩 증가하는 모습을 보이며 거기에 더불어 토로이드의 내반경의 크기가 증가하면 할수록 오차는 커지는 경향을 보였다. 하지만 최대 오차가 0.015로 수치해석으로 구한 값과 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 14에서는 토로이드 내반경이 1 m로 고정되어 있

Table 2. 저장된 에너지의 크기를 경우 FEM과 수식계산의 소요시간

| | FEM | | | Calculation | | |
|---------------------|-----|-----|-----|-------------|--------|---------|
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Radius of Toroid[m] | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Radius of SPC[mm] | 300 | 400 | 500 | 300 | 400 | 500 |
| Number of SPC[EA] | 50 | 60 | 70 | 50 | 60 | 70 |
| Running Time[s] | 275 | 327 | 396 | 0.0006 | 0.0001 | 0.00013 |

을 때 SMES를 구성하고 있는 SPC의 내반경의 크기를 변화시켰을때의 오차를 비교하여 보았다. 여기에서는 SPC의 수가 많아져서 SPC가 토로이드에서 차지하는 비율이 커질수록 오차율이 작아지는 경향을 보이고 있으며 이 경우에서도 마찬가지로 최대 오차가 대략 0.03정도로 정확도가 높은 모습을 보였다.

Table 2.에서 보는 것처럼 에너지의 경우 FEM으로 구하는 경우보다 현저하게 빠른 시간단축을 볼 수 있었다. 수식계산에서는 자장계산 같은 복잡한 과정이 포함되는 것이 아니라 지정된 값만 입력해 주면 근사치를 계산할 수 있으므로 자기장의 크기를 수식으로 구하는 경우보다 더 빠르게 결과를 얻어 낼 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 토로이드 형태로 팬케이크 코일을 배치한 SMES용 초전도 코일의 최대 수직자기장과 저장 에너지의 근사치를 빠르게 계산하는 방법을 제안하였다. 제안한 계산방법으로 최대 수직자기장을 계산하는 경우 유한요소법으로 계산하는 경우에 비교해서 1/1000정도로 계산 시간의 단축을 얻을 수 있었다. 또한 대용량 초전도 에너지 저장장치에서 중요한 부분인 저장되는 에너지의 크기를 구하는데 있어서도 시간이 오래 걸리는 유한요소법을 사용하지 않고 몇 개의 변수를 가지고 보정 함수를 통하여 빠르고 쉽게 구해낼 수 있었다. 이 방법을 이용하면, 토로이드 형 SMES용 초전도 코일의 최적 설계 시 최적화 알고리즘에 따른 반복 계산을 필요로 하므로 설계에 소요되는 계산시간을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서 제안하는 계산방법이 기존의 계산 방법을 대체할 수 있게 된다면 대용량 초전도 에너지 저장장치를 구성하는 초전도코일의

운전 안정성에 영향을 미치는 기계적 응력분포의 해석에 대한 후속 연구가 진행 될 것이다.

Acknowledgement

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초 연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. [과제번호 : R14XA02-23]

This research was supported by Korea Electric Power Corporation (KEPCO) through Korea Electrical Engineering & Science Research Institute. [grant number : R14XA02-23]

REFERENCES

- [1] S.Kwak, S.Lee, S.Lee, W.S.Kim, J.K.Lee, C.Park, J.Bae, J.B.Song, H.Lee, K.Choi, K.Seong, H.Jung, and S.Y.Hahn, "Design of HTS Magnets for a 2.5 MJ SMES", IEEE Transactions, Applied Superconductivity, vol19, no.3, pp.1985-1988, 2009.
- [2] A.R.Kim, H.R.Seo, G.H.Kim, M.Park, I.K.Yu, Y.Otsuki, J.Tamura, S.H.Kim, K.Sim, and K.C.Seong, "Operating characteristic analysis of HTS SMES for frequency stabilization of dispersed power generation system", IEEE Transactions, Applied Superconductivity, vol.20, no.3, pp.1334-1338, 2010.
- [3] S.Kim, "Analysis of Electromagnetic Characteristics of Large Scale Superconducting Magnetic Energy Storage", M.S. Thesis, Energy & Electrical Engineering, Korea Polytechnic University, 2013.
- [4] K.P.Yi, J.S.Ro, S.Lee, J.K.Lee, K.C.Seong, K.Choi, H.K.Jung, and S.Y.Hahn, "A design methodology for toroid-type SMES using analytical and finite element method", IEEE Transactions, Applied Superconductivity, vol23, no.3, p.4900404, 2013.
- [5] S.Lee, K.P.Yi, S.H.Park, J.K.Lee, W.S.Kim, C.Park, J.H.Bae, K.C.seong, I.Park, K.Choi, and S.Y.Hahn, "Design of HTS Toroidal Magnets for a 5MJ SMES", IEEE Transactions, Applied Superconductivity, vol22, no.3, p.5700904, 2012.
- [6] S.Lee, "Calculation of Normal Fields to Superconducting Tape of Toroidal Type Winding With Circular Section", IEEE Transactions, Applied Superconductivity, vol. 20, no. 3, pp. 1888 – 1891, 2010.
- [7] Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press, pp.20-21, 1983.
- [8] John D. Kraus, "Electromagnetics", McGraw-Hill, pp.239-240, 1994.