

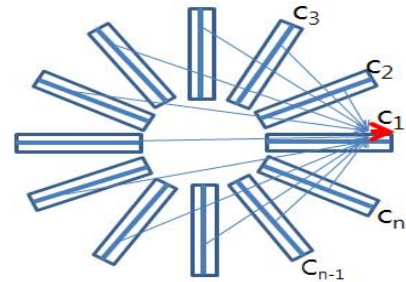
SMES용 고온초전도 코일에 인가되는 최대 자기장의 계산

이지영\*, 이세연\*, 김영일\*, 박상호\*, 최경달\*, 이지광\*\*, 김우석\*  
 한국산업기술대학교\*, 우석대학교\*\*

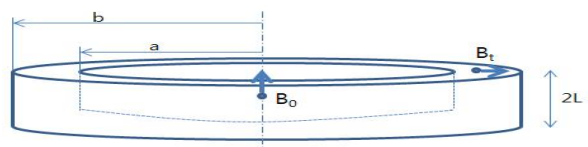
Estimation of the maximum magnetic field applied perpendicularity on the HTS conductor for a large scale SMES

Ji-Young Lee\*, Seyeon Lee\*, Yungil Kim\*, Sang Ho Park\*, Kyeongdal Choi\*, Ji-Kwang Lee\*\*, and Woo-Seok Kim\*  
 Korea Polytechnic University \*, Woosuk University\*\*

**Abstract** - 대용량 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)를 제작하기 위해서는 높은 자장특성을 가지고 있는 2세대 HTS(High-Temperature Superconductor) 선재를 사용하는 것이 효율적이다. SMES의 에너지밀도를 높이기 위해서는 선재에 많은 전류를 흘려야 하는데, 수직자기장이 커지면 임계전류가 작아지는 2세대 HTS 선재의 특성상 토로이드형태의 SMES가 유리하다. SMES를 설계하기 전에 선재의 사용량을 줄이고 체적을 줄이기 위해서 정확한 설계와 평가가 필요하다. 유한요소법을 사용한 상용프로그램을 이용하여 쉽게 해석할 수 있으나 토로이드 형태의 SMES는 대칭성의 문제로 3차원 해석을 해야만 한다. 그러나 2차원 해석에 비해 여러 가지 제약조건이 따르며 해석 시간이 많이 소요된다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 분석적이고 통계적으로 고온 초전도 코일에서 작용하는 최대 수직자장을 결정하는데 이해하기 쉽고 효율적으로 계산하는 방법을 제시했다. 본 논문에서는 싱글펜케이크코일의 크기에 따른 최대 자장값을 계산하였고 싱글펜케이크코일이 토로이드형태로 배치된 토로이드 모델에서 주 변코일이 싱글펜케이크코일의 미드포인트에 미치는 자장값을 계산하여 두 계산값을 합하는 방식으로 최대 자기장을 계산하였다. 이 방법은 현저한 시간단축과 효율적인 설계를 할 수 있는 새로운 계산 방법으로 기존 FEM을 사용해 걸리는 시간에 비해 1/1000정도의 시간단축을 할 수 있었다.



<그림 1> 토로이드형태로 배치된 펜케이크 코일



<그림 2> 싱글펜케이크 형태의 모듈코일

1. 서 론

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 저장장치기술이다[1].

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[2]. 하지만 토로이드 코일의 경우 형상의 대칭성 문제로 인하여 2차원 해석이 불가능 하며 3차원 해석이 필수적이기 때문에 계산상의 어려움이 존재하게 된다.

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.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 초전도 응용기기의 임계전류에 많은 영향을 주는 수직자장의 크기를 빠르고 신뢰성 높게 계산하여 효율적인 설계를 할 수 있는 새로운 계산 방법을 제시하였다.

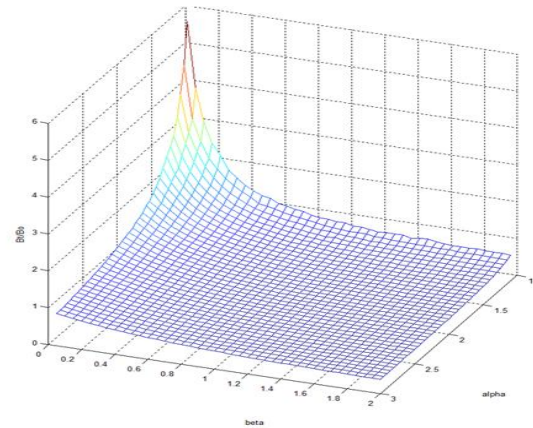
2. 본 론

2.1 셀프 필드(Self Field)의 계산

토로이드형태의 최대자기장을 계산하기 위해서 싱글펜케이크코일을 <그림 1>과 같이 배치하였을 때 싱글펜케이크코일에서 자기 자신이 만들어내는 최대 자기장 값을 셀프필드(Self Field)라 하였다. 이를 계산하기 위하여 한 개의 펜케이크 코일을 보았을 때, <그림2>과 같이 싱글솔레노이드의 형상이 된다. 싱글솔레노이드의 내반경을 a, 외반경을 b, 그리고 코일에 사용된 선재의 폭인 싱글솔레노이드의 높이를 2L이라고 했을 때, 내반경 a와 외반경 b의 비를 α라 하여 α=b/a, 내반경 a와 높이의

절반인 L의 비를 β라 하여 β=L/a라 정의하였다. 싱글솔레노이드 중심에서의 자기장 크기인 B0와 최대수직자장이 발생하는 미드포인트에서의 수직자기장의 크기인 Bt의 비를 T(α,β)=Bt/B0와 같이 정의하였다.

솔레노이드의 α,β에 따른 T(α,β)의 데이터를 얻기 위하여 a를 0.005[m]로 고정하고 α와 β값을 변하게 하였다. 그런 다음 α와 β가 다른 솔레노이드의 Bt와 B0의 값을 측정하고 MATLAB을 이용하여 정리한 후 α,β, T(α,β)를 3차원 그래프로 표현하면 <그림 3>와 같이 나타낼 수 있다.



<그림 3> α와 β에 따른 T(α,β)값의 그래프

펜케이크 중심자기장 B0를 계산하기 위하여 마틴 윌슨(Martin N. Wilson)이 제시한 계산법을 이용하였다[3].

$$B_0 = JaF(\alpha\beta) \tag{식(1)}$$

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

식(1)을 이용하여 B0를 계산한 후에 T(α,β)에 B0를 곱하여 펜케이크 코

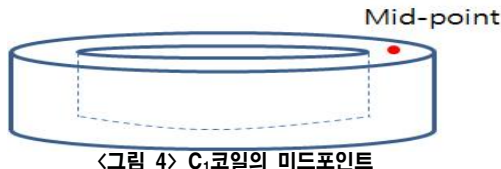
일의 수직자기장의 크기인  $B_z$  값을 계산 할 수 있다. 이 값은 싱글펜케이크의 Self Field와 같아지므로

$$\text{Self Field} = T(\alpha, \beta) \cdot B_0 \quad \text{식(3)}$$

와 같이 결정된다.

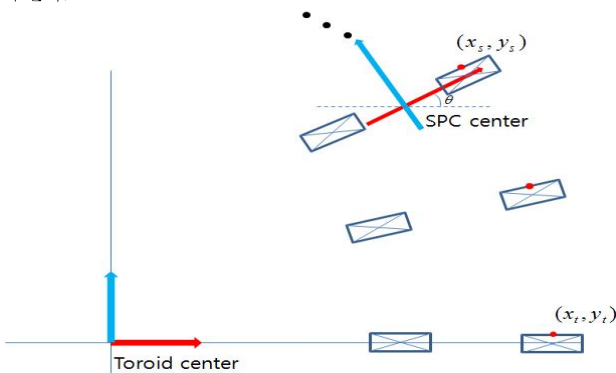
### 2.2 주변 코일에 의한 자기장 계산

주변코일에서 발생하여 작용하는 자장을 계산하기 위하여 토로이드 형태로 배치된 코일에 흐르는 전류를 선전류로 가정하여 계산하였다[4]. 코일에 흐르는 전류에 의해서 만들어지는 자계의 세기를 구하는 기본이 되는 법칙인 비오-사바르 법칙(Biot-Savart law)을 이용하여 주변코일에 흐르는 전류로 인해 발생하여 C1코일의 미드포인트(Mid-point)에 작용하는 자계의 세기를 구하였다.



<그림 4> C1코일의 미드포인트

<그림 5>에서 보는 것처럼 토로이드의 중심을 기준으로 한 토로이드 센터와 싱글펜케이크코일(SPC) 센터의 사이에는 식(4)와 같은 관계가 존재하므로 싱글펜케이크의 미드포인트 좌표를 토로이드 센터를 기준으로 한 좌표변환을 통하여 각 싱글펜케이크 코일의 미드포인트 좌표를 구한다.



<그림 5> Toroid center와 SPC center와의 관계

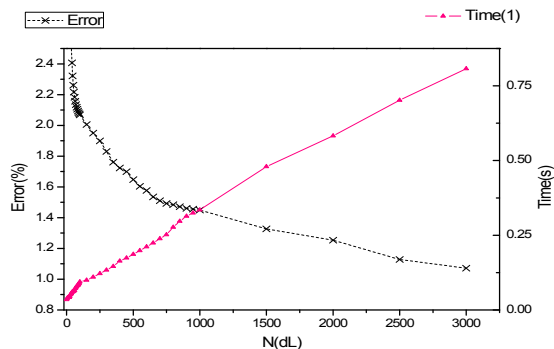
$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} \quad \text{식(4)}$$

이렇게 구한 구한 코일의 좌표를 이용하여 C2, C3, ..., Cn 코일에 흐르는 전류로 인하여 발생하는 C1의 미드 포인트인 점에 작용하는 자기장을 식(5)의 비오-사바르 법칙을 사용하여 코일의 미소 전류수가 발생시키는 자기장의 합으로 계산한다.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{L} \times \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Ird\vec{\phi} \times \hat{\rho}}{\rho^2} \quad \text{식(5)}$$

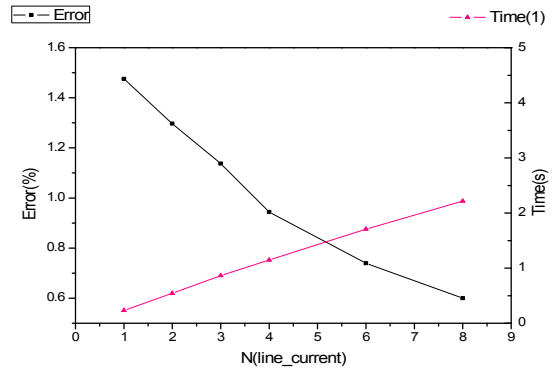
### 2.3 최대 수직자기장의 계산결과

계산함수로 계산을 진행할 경우 하나의 선전류로 가정하여 계산한 결과는 싱글펜케이크 코일의 볼륨 등을 고려하지 못하였기 때문에 유한요소법을 사용하여 구한 결과와 오차가 발생할 수 밖에 없다. 이런 오차를



<그림 6> 미소전류개수에 따른 오차율과 계산에 소요되는 시간

를 최대한 줄이기 위하여 싱글 펜케이크 코일의 미소전류 수를 늘리고 하나의 코일에 흐르는 전류를 하나의 선전류가 아닌 싱글펜케이크코일 단면에 여러 개의 선전류가 흐르는 것으로 가정하여 선전류의 개수를 조절해가며 오차율을 줄여나가는 과정을 진행하였다.



<그림 7> 선전류 개수에 따른 오차율과 계산에 소요되는 시간

<그림 6>과 <그림 7>에서 볼 수 있듯이 계산시 미소전류의 개수를 많이 할수록, 한코일에 흐르는 선전류의 개수를 더 많이 모델링 할수록 오차율이 줄어드는 것을 알 수 있으나 그에 따라 소요되는 시간이 늘어나므로 계산시 모델에 맞는 적절한 N(dL)값과 N(line\_current)값을 설정하고 계산식에 대입해야 함을 알 수 있다.

여기에서 해석한 모델은 SPC가 12개로 이루어진 토로이드 모델이고 미소전류의 수는 1000개, 선전류의 개수는 4개로 이루어졌다 모델링한 후 계산을 진행했다.

<표 1> FEM과 Calculation 소요시간과 오차율 비교

해석방법	소요시간	오차율
3D FEM	214 초	0 %
Calculation	0.33 초	0.94 %

계산한 결과를 보면 유한요소법을 사용한 해석에 필요한 시간은 214초가량 걸리는 반면 MATLAB을 사용한 계산함수의 실행에 소요되는 시간은 대략 0.3초 정도로 FEM대비 계산시간을 약 1/1000정도로 빠른 계산을 기대할 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 토로이드 형태로 펜케이크 코일을 배치한 SMES의 최대 수직자기장을 빠르게 계산하는 방법을 제안하였다. 우리는 여기에서 제시한 계산방법으로 유한요소법으로 계산하는 경우의 1/1000정도의 시간으로 결과를 얻을 수 있었다. 약간의 오차는 생기지만 그 보다 빠르게 최대 수직자기장의 값을 알아낼 수 있었다. 이 방법을 이용하여 SMES의 설계를 한다면 최적 설계를 찾기 위한 여러 번의 반복 계산이 이루어질 때 오랜 시간을 들이지 않고도 짧은 시간 안에 최적 설계를 가능하게 하여 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

본 논문에서 제안하는 계산 방법이 기존의 계산 결과를 대체할 수 있게 된다면 대용량 초전도 에너지 저장장치를 설계할 때 필요한 저장에너지의 크기를 빠르게 계산할 수 있는 방안에 대한 후속연구가 진행될 것이다.

### 감사의 글

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

### [참고 문헌]

- [1] S.Lee, "Magnetic Field Calculation of Toroidal Winding with Circular Section", Superconductivity and cryogenics Vol.12, no.1, pp28-31,2010
- [2] S.Kwak, 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", 2009
- [3] Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press, pp.20-21, 1983
- [4] S.Y.Kim, "Analysis of Electromagnetic Characteristics of Large Scale Superconducting Magnetic Energy Storage", 2013