

## 외부 노이즈에 따른 초전도 CICC의 침투자장 해석

안민철\*, 이승재\*, 이찬주\*, 김태중\*\*, 고태국\*, 김기만\*\*\*  
 \*연세대학교 전기·컴퓨터 공학과, \*\* 성남기능대학 산학협력과, \*\*\*삼성종합기술원

### The Analysis of Penetrated Magnetic Field in Superconducting CICC according to External Noise

Min Cheol Ahn\*, Seung Je Lee\*, Chan Joo Lee\*, Tae Joong Kim\*\*, Tae Kuk Ko\*, Kee Man Kim\*\*\*

\*Dept. of Electrical and Computer Eng., Yonsei University, \*\*Sunnam Polytechnic College, \*\*\*Samsung Advanced Institute of Technology

superlab@yonsei.ac.kr

**Abstract** - Generally high frequency electromagnetic waves can not penetrate into waveguide, and it is called skin effect. Since the shape of superconducting CICC(Cable In Conduit Conductor) is similar to that of waveguide, the characteristics of waveguide can be applied to CICC. In this paper, we analyzed penetrated magnetic field in CICC according to external noise. From it, noise frequency bandwidth affecting voltage tap sensor in CICC was found.

### 1. 서 론

초전도 magnet은 고자장을 낼 수 있는 장점을 가지므로 많은 응용이 되고 있다. 1986년 이후 고온 초전도체가 발견되어 많은 응용사례를 낳고 있지만, 고온 초전도 선재는 재료의 특성상 연성이 작아서 제작이 용이하지 않으므로 고자장용 magnet은 주로 저온 초전도선재를 이용한다. 대용량의 저온 초전도 시스템에서는 자장에너지에 의한 외력을 견디기 위해 stainless steel로 conduit을 만들고, 그 안에 supercritical helium을 흘려보내는 CICC(Cable In Conduit Conductor)를 이용한다.[1] 예를 들면 토카막, SMES, MAGLEV 등에 CICC가 사용되는데 이러한 시스템에서는 초전도체의 quench를 검출하기 위해 CICC 내부에다 일반 도체선인 전압 탭 센서를 장착한다. 외부에서 생긴 노이즈가 CICC의 내부까지 침투한다면, 이 노이즈는 센서에 영향을 끼쳐서 실제 quench 신호를 검출하는데 방해가 하게 된다. 그러나, CICC는 conduit으로 둘러싸여 있기 때문에 고주파의 외부 노이즈는 CICC의 내부로 침입하지 못할 것이다. 따라서 내부로 침입할 수 있는 노이즈의 주파수 대역을 알아내는 것이 필

요하다.

본 논문에서는 주파수를 달리하면서 CICC 내부로 침투하는 자장을 시뮬레이션 하였다. 이를 통해 CICC 내부의 센서에 영향을 미칠 수 있는 노이즈의 주파수 대역을 결정하였다.

### 2. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문은 KSTAR 토카막용 TF Coil의 CICC를 모델로 삼았으며, 이는 conduit 내부에 초전도 선재 Nb<sub>3</sub>Sn과 함께 일반 도체로 된 전압 탭 센서가 들어있다. 이 센서는 초전도선과 cowound로 되어있기 때문에 toroidal의 링 형태 안쪽으로 쇄교된 자속은 상쇄되어 센서에서 검출되지 않는다. 그런데, 초전도선과 센서 사이로 침투한 자속은 두 선에 링크되는 자속이 서로 다르므로 나오는 전압 또한 다르다. 만약 CICC 외부의 노이즈가 conduit에 수직으로 침투하여 두 선 사이까지 침입한다면, 센서가 올바른 quench 신호를 감지하는데 악영향을 끼치게 된다. 따라서 본 논문에서는 CICC에 수직으로 침투하는 자장만을 고려한다.

#### 2.1 모델 설정

본 논문에서 모델로 삼은 KSTAR 토카막용 TF coil의 단면과 규격은 그림 1과 같다.[3]

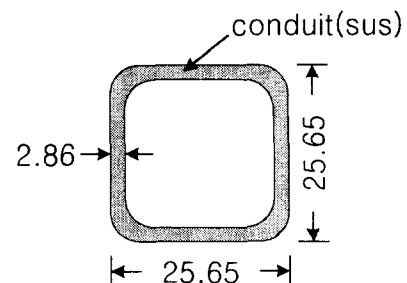


Fig.1. CICC model

토카막용 TF coil은 conduit이 incoloy 908이라는 재질로 되어있는데, 여기서는 일반적인 stainless steel 316 재질로 모델을 설정하였다. stainless steel 316의 상대 투자율은 1.005이고 전도도는  $553 \text{ n}\Omega \text{ m} (\leq 20\text{K})$ 이다.[1]

### 2.2 결과 및 고찰

전자기파에 의해 유도된 전류가 흐르는 깊이 skin depth는 다음과 같은 식으로 결정된다.[2]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (\text{m}) \quad (1)$$

외부 노이즈의 주파수 f의 변화에 따라 skin depth  $\delta$ 는 그림 2와 같이 변한다. 그림 2는 주파수 변화를 일반적으로 표현한 log scale로 나타낸 것인데, 이 그래프로는 skin depth가 수 mm인 주파수 대역을 찾아내기 어려워서 그림 3에서 decade scale로 나타내었다.

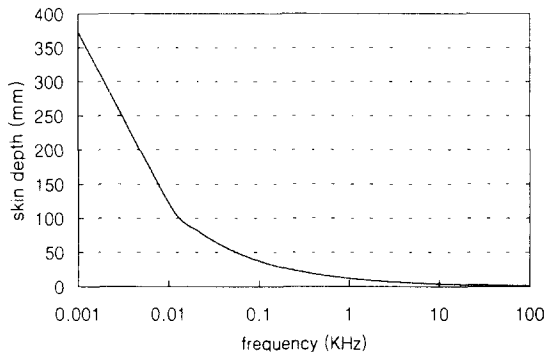


Fig.2. Skin Depth according to Frequency using Log Scale

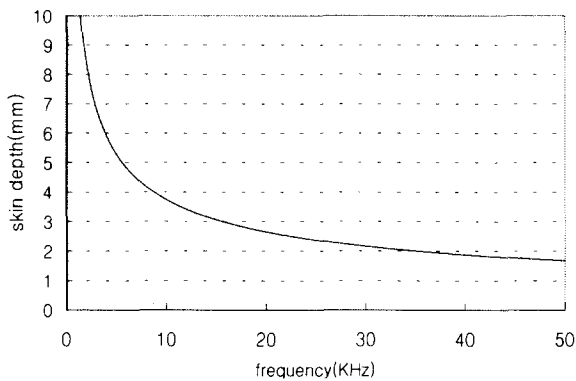


Fig.3. Skin Depth according to Frequency using Decade Scale

설정 모델의 conduit 두께인 2.86mm를 skin depth로 갖는 주파수는 약 17040Hz이다. 본 논문에서는 외부 노이즈 주파수 5000

Hz인 경우와 17040Hz인 경우의 두 가지를 FEM으로 시뮬레이션 하였으며, 그 결과는 그림 5, 6과 같다.

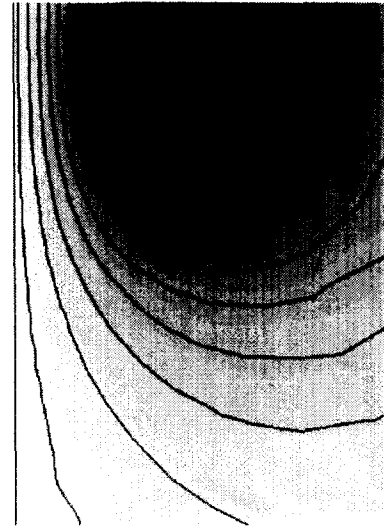


Fig.4. Magnetic Field without Conduit

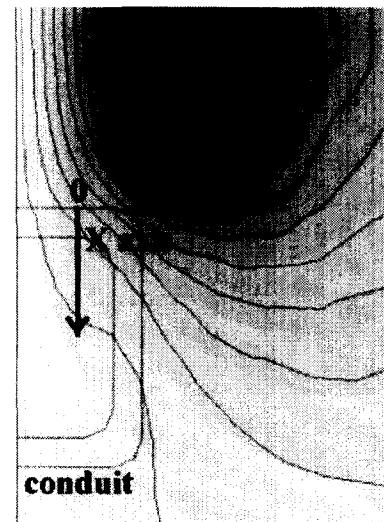


Fig.5. Magnetic Field at 5000Hz

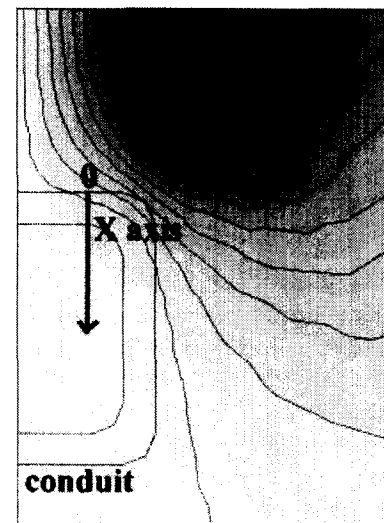


Fig.6. Magnetic Field at 17040Hz

### 3. 결 론

한편, 그림 4는 실제적인 상황은 아니다. 이는 conduit이 없을 때의 자장의 경로를 보여주는 것이다. 즉, 그림 4는 그림 5, 6의 결과를 해석하는데 참조하기 위한 것이다. 그림 5의 5000Hz 노이즈의 결과에서는, 외부의 자장이 conduit 내부까지 침입하는 것을 볼 수 있다. 반면에 skin depth 계산에 의한 결과인 17040 Hz의 노이즈에서는 자장이 conduit내부로 침입하지는 않지만, 아주 작은 값에 불과하다는 것을 볼 수 있다. 이를 더욱 정확하게 보여주는 것이 그림 7인데, 이는 그림 5, 6에서 보는 바와 같이 conduit의 외부 표면을 0으로 하고, conduit의 두께인 2.86mm를 훨씬 넘긴 곳인 12mm의 곳까지 conduit에 수직인 축을 생각하여 이를 길이 축(x 축)으로 설정하여, 여기에서 자속밀도의 변화를 본 것이다.

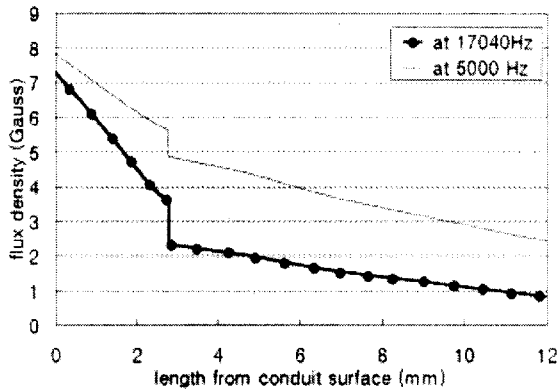


Fig.7. Flux Density according to length from Conduit Surface at 17040Hz, 5000Hz

그림 7에서 길이가 2.86mm인 곳에서의 자속밀도 값이 불연속적인 것을 알 수 있는데, 이는 여기가 conduit과 CICC 내부 공기 매질의 경계면이므로 투자율의 차이(공기의 상대 투자율 1.000, SUS 316의 상대 투자율 1.005)에 의해 나타나는 것이다. 0~2.86mm까지의 conduit에서나 2.86mm 이상의 공기에서나 마찬가지로, 깊이가 늘수록 자속밀도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

skin depth는 도체의 표면에 닿은 자장 값의 36.8% 만큼의 값이 남아있는 곳까지의 침투 깊이이다. [4] 그림에서 도체표면에 닿은 자속밀도 값은 7.3 Gauss이다. 따라서 이 값에 0.368을 곱한 2.6864 Gauss를 갖는 곳까지의 깊이가 skin depth이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 자속밀도가 2.6864 Gauss인 곳은 도체 표면으로부터의 길이가 2.86mm인 곳이며, 이는 conduit의 내부 면이다. 즉, conduit에서 73.2% 이상의 자장이 침투된 것이다. 이러한 결과는 17040Hz이상의 주파수를 가진 외부 노이즈는 대부분의 자장이 conduit에서 흡수되어 conduit 내부로는 침투자장이 미세하다는 것을 의미한다.

KSTAR 토카막용 TF coil의 CICC를 모델로 하여 skin depth를 계산하고, 이를 토대로 FEM으로 침투자장을 시뮬레이션 하였다. 그 결과 conduit의 두께를 skin depth로 갖는 주파수를 찾아낼 수 있었고, 본 논문의 모델에서는 17040 Hz이었다. 즉, 이 이상의 주파수를 가진 노이즈가 외부에서 침입하여도, 대부분의 자장은 conduit에서 침투되어 conduit 내부로 침입하는 자장은 거의 없다. 게다가 전압 탭 센서를 CICC 단면의 중앙부분에 위치시키기 때문에 이러한 임계주파수 이상의 고주파수 노이즈는 센서의 quench 검출에 거의 영향을 주지 않는다고 할 수 있다. CICC를 사용하는 시스템에서의 전류값 변화를 주파수로 변환하면 발생 가능한 노이즈의 주파수 대역이 결정된다. 본 논문에서와 같은 방법으로 센서에 영향을 주는 임계의 주파수 대역을 계산한다면, 시스템의 운전상태에 따른 노이즈 대역에 따라 센서의 노이즈 민감성을 판단할 수 있으리라 생각된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Yukikazu Iwasa, "Case Study in Superconducting Magnets", Plenum Press, 1994
- [2] Lamont V. Blake, "Transmission Lines and Waveguides", John Wiley & Sons, pp. 19-21, 1969
- [3] "KSTAR Magnet System Review", SAIT, pp. T131-1, 1999
- [4] David K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics", Addison Wesley, pp. 370-371, 1989