

## 고주파 전원에 의한 코일의 표피효과 해석

장 석 명<sup>\*</sup>, 서 진 호<sup>\*</sup>, 김 혁 규<sup>\*</sup>, 이 진 형<sup>\*\*</sup>

\* 충남대학교 전기공학과 \*\* 한국과학기술원 재료공학과

### Analysis of the skin effect on the coil with high frequency current source

S. M. Jang<sup>\*</sup>, J. H. Seo<sup>\*</sup>, H. K. Kim<sup>\*</sup>, J. H. Lee<sup>\*\*</sup>

\* Chungnam National Univ. \*\* KAIST

**Abstract** - The electromagnetic theory is applied on the field of electromagnetic continuous casting(EMC). This paper treats the stream phenomena of high frequency current on the solid-loop coil of which consists the hollow conductor. The governing equation is derived from electromagnetic field theory and the characteristics are analyzed by FEM. The results may be available data on designing the optimum shape of the coil for the improved pinch effect.

### 1. 서론

전자장 이론은 부유용융, 용탕교반, 전자기 연속 주조 등의 주조산업에도 응용이 되고 있는데, 그 중 전자기 연속주조는 외부에 장착된 유도코일에서 발생되는 전자기력에 의해 용탕을 가두어 하강시키면서 분무냉각으로 응고시키는 신 주조기법으로서 액체금속 표면의 질을 향상시킬 수 있는 이점이 있다. 이때 전자기력을 발생시키기 위해서 loop형 단선 코일에 매우 높은 주파수를 가진 고주파 대전류를 인가하게 되는데, 단선코일내부에는 고주파에 의한 표피효과에 의해 직류를 인가했을 경우와는 상당히 다른 전류분포가 나타나게 된다. 즉 주파수가 매우 높아질수록 코일내의 임피던스가 변하게 되며 그로 인해 인가되는 전류의 대부분은 코일의 안쪽과 바깥쪽 표면으로 집중된다. 본 논문에서는 loop 형 단선 코일에 대하여 고주파에 따른 표피효과와 전류특성에 대해 전자장을 이용한 이론적인 해석을 하였으며 유한요소법에 의한 해석결과와 비교 검토하였다.

### 2. 전자기 연속주조의 개념

전자기 연속주조는 그림 1에서 보는 바와 같이 단선 코일에 초고주파 대전류를 인가하게 되면 코일 안쪽에 있는 액체 금속의 표면에 매우 강한 와

전류가 발생된다. 유기된 와전류  $I$ 와 자속밀도  $B$ 의 상호작용으로 인해 액체금속 표면에는 수축력  $F$ 가 발생되어 이를 연속주조에 응용할 경우 액체금속의 전동마크 등이 제거되어 표면에 절을 향상시킬 수 있고, 불순물의 편석을 줄일 수 있는 장점이 있다.

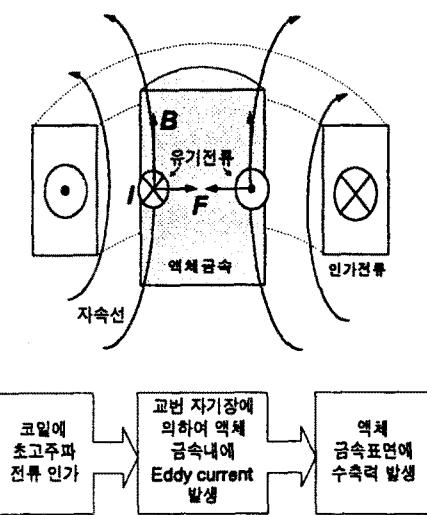


그림 1. 전자기 연속주조의 개념도

액체금속의 표면에 큰 수축력을 발생시키기 위해서는 수 kHz 이상의 초고주파가 인가되어야 한다. 이에따라 도체내부의 임피던스 및 전류의 분포특성이 크게 변하게 되므로 이에 대한 해석이 요구된다.

### 3. 코일내의 임피던스 변화 및 와전류 해석

#### 3.1 코일내의 임피던스 변화

그림 1과 같이 solid형으로 전기회로를 구성한 경우 임피던스 변화는 주파수가 증가할수록 그림 2와 같이 내부저항 및 리액턴스가 증가하게 된다[1]. 이것은 표피효과에 의해 전류가 흐르는 단면적이

감소되기 때문이다.

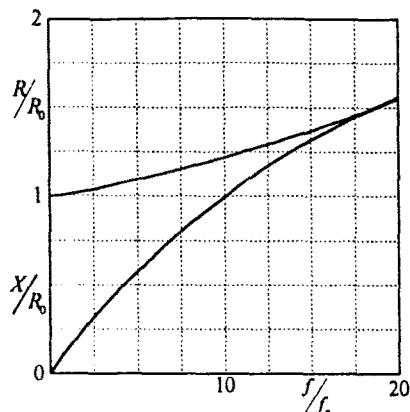


그림 2. 주파수에 따른 저항 및 리액턴스 특성

그림 2에서  $R_0$ 는 직류전원일 때의 저항,  $R, X$ 는 교류전원일 때의 저항 및 리액턴스,  $f_c$ 는 표피효과가 발생되는 임계 주파수를 나타낸다.

### 3.2 와전류 해석을 위한 지배방정식

도체에서의 전류흐름현상을 전자장이론을 적용하여 해석하기 위한 기본 막스웰방정식은 아래와 같다. 즉 도체 내에서의 전류에 의하여 발생하는 자속밀도는

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (1)$$

또한 도체내에서의 자속밀도와 전계의 관계식은

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

도체내의 전계와 전류밀도의 관계식은

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

따라서 정현적인 시변전류가 흐르는 경우의 전류와 자속밀도의 분포에 관한 지배방정식은 식(4)와 식(5)와 같다.

$$\nabla^2 \vec{J} = j\omega\mu\sigma \vec{J} \quad (4)$$

$$\nabla^2 \vec{B} = j\omega\mu \vec{B} \quad (5)$$

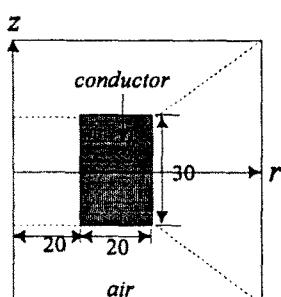


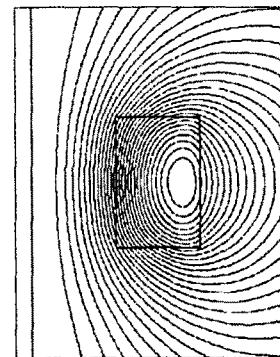
그림 3. 단선코일의 단면도(단위:mm)

그림 3은 단선코일의 해석을 위한 단면도이다. 액체 금속의 표면에 강한 수축력을 발생시키기 위해

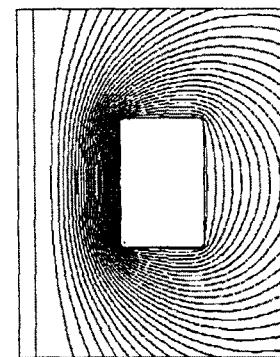
서는 전류와 자계의 침투깊이가 작아 표면에 만 집중적으로 흐르게 해야 하므로 침투깊이가 작도록 주파수가 매우 큰 초고주파 전류를 흐르게 한다. 즉 액체금속도체 주위를 초고주파 대전류가 흐르는 코일로 둘러싸면 전류의 침투깊이가 거의 없어 표면에서만 전류가 흐르게 되므로 액체금속의 표면에서만 힘이 발생하게 되어 표면의 질이 향상되는 효과를 얻을 수 있다.

### 3.3 자계 및 전류밀도분포 해석결과

그림 3과 같은 단선코일의 모델에 대하여 수행한 등벡터포텐셜 결과는 그림 해석한 결과 그림 4와 같다. 그림 4에서 알 수 있듯이 주파수가 높아지게 되면 단선코일내부에는 거의 자속이 쇠퇴하지 못하게 된다.



(a) frequency=0[Hz]



(b) frequency=10[kHz]

그림 4. 주파수에 따른 등벡터포텐셜 분포

그림 5는 그림 3의 단선코일 모델에서의 주파수에 따른 전류분포특성이다. 그림 5에서 단선코일에 10[kHz]의 초고주파 전류를 인가하게 되면 코일의 가운데 부분에는 거의 전류가 분포하지 않고 코일의 안쪽과 바깥쪽으로 집중됨을 알 수 있다.

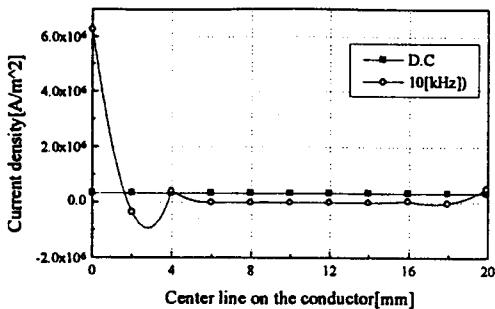


그림 5. 주파수에 따른 전류분포특성

이것은 코일내에 유기되는 와전류에 의해 발생되는 표피효과 때문이다. 따라서 코일의 안쪽 및 바깥쪽 부분에서는 전류가 집중되기 때문에 전류밀도가 상당히 높아지게 되고 그로 인해 열이 많이 발생할 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 도체내부를 중공코일과 만들어 그 내부에 냉각수를 흘리게 되면 열을 냉각시킬 수 있게 된다. 그림 6에 중공의 단선코일을 도시하였다.

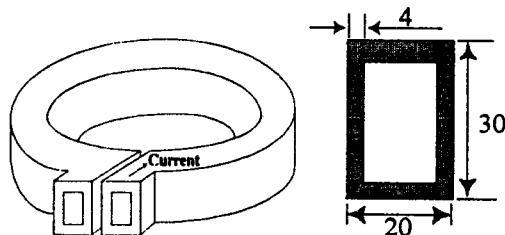


그림 6. 중공의 단선코일 형상

그림 6의 중공 단선코일에 대한 자계 및 전류밀도 해석한 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

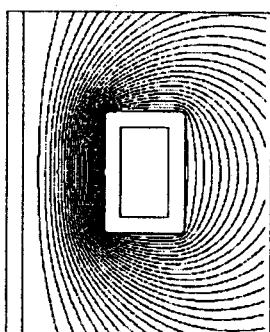


그림 7. 중공코일의 등비터포텐셜 분포

그림 3의 단선코일을 중공으로 만들기 위해서는 그림 5의 해석결과를 바탕으로 전류가 거의 흐르지 않는 부분을 중공으로 해야 만 한다. 본 논문에서 해석한 결과 단선코일의 바깥쪽에서 4[mm]까지 전류의 대부분이 분포함을 확인하였다.



그림 8. 중공코일의 전류분포

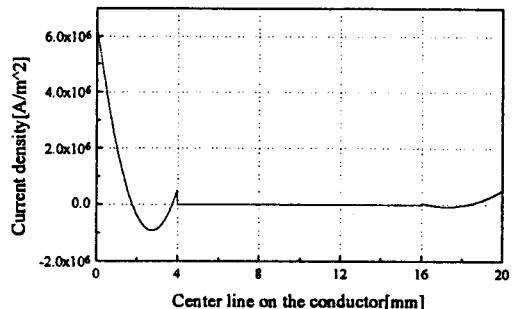


그림 9. 중공코일의 중심선에 따른 전류밀도 분포

중공코일의 전류밀도 분포를 나타낸 그림 9를 그림 5와 비교하면 단선코일의 내부를 중공으로 해도 발생되는 전류분포는 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 전자기 연속주조나 유도가열등과 같은 초고주파의 전원을 사용하게 되는 경우에는 이와 같은 와전류 해석이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 논문은 전자기 연속주조에 응용되는 단선코일에 대한 초고주파전류의 흐름현상을 해석 및 검토 하므로써 코일을 효율적으로 설계 할 수 있는 기본 자료를 얻었다. 즉 solid형 단선코일에 대한 와전류해석을 바탕으로 중공코일의 면적을 결정하였으며 중공코일에 대한 자계 및 전류분포특성을 유한요소법을 이용하여 해석하여 비교 검토한 결과 단선코일과 매우 유사함을 확인하였다. 이로부터 초고주파 전원을 응용하는 경우의 코일의 최적설계를 위한 자료를 구하였다. 해석결과를 통해 알 수 있듯이 초고주파수의 전류가 인가되는 코일의 설계시에는 안쪽과 바깥쪽의 형상, 두께 등을 적정하게 정해야 만 한다.

## [참고문헌]

- [1] Lawrence J. Giacoletto, "Frequency- and Time- Domain Analysis of Skin Effect", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 32, NO. 1, 1996