'96 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (1996. 7. 22~24)

초고주파전류가 흐르는 코일의 표피효과와 전류분포특성
- 핀치효과 개선용 4각단면 중공코일의 전류흐름특성-

장석명*, °서진호*, 이현구*, 홍정표**, 이진형***
*충남대학교 전기공학과 ** 창원대학교 전기공학과 *** KAIST 재료공학과

The skin effect and current distribution characteristics of a coil streaming with high frequency

S.M. Jang*, J.H. Seo*, H.G. Lee*, J.P. Hong**, J.H. Lee***
* Chungnam Nat'l Univ. ** Changwon Univ. *** KAIST

ABSTRACT

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 elctromagnetic field theory and the characteristics are analyzed by FEM with 2-D and 3-D. The results may be availabe data on designing the optimum shape of the coil for the improved pinch effect.

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 전기에너지의 응용분야 및 방법이 더욱 다양해져 가고 있다. 그 중에서도 에너지를 고밀도의 형태인 초고주파 대전류 에너지형태로의 응용은 최근 전기공학 뿐 아니라 초고주파 유도가열, 용접공학 등의 전열공학에 응용되며 금속, 재료공학 분야에 까지 확산되어 발전되고 있다.

본 논문에서는 핀치효과를 응용하는 아크가열분야에서 널리 쓰이고 있는 4각형 단면적 中空의 코일로 구성한 원형단선 코일에서의 초고주파전류의 흐름현상을 해석하여 검토하므로써 핀치효과 개선용 코일을 효율적으로 설계 할 수 있는 기본자료를 얻고자 하였다. 즉 코일에 초고주파 전류가 인가되는 경우 주파수, 도전율, 투자율에 따라 도선의 표피쪽으로 전류가 집중되며 내부에는 전류가 흐르지 않는 표피현상이 발생하게 된다. 이는 주파수가 커지는 경우 코일의 내부 임피던스가 커지며, 이에 따라 전기저항 및 자기저항이 증가하기 때문이다. 따라서 대전류 초고주파형태의 고밀도에너지의 흐름특성은 주파수, 코일의 기하학적 형상 등에 의하여 매우 민감하게 영향을 받으므로 정밀한 해석을 바탕으로 한 코일의 형상 최적화가 필요하다.

본 논문에서는 여러 가지 2차원 기본모델을 설정하여 주파수의 변화에 따른 표피효과와 전류의 흐름현상을 전자장 수치해석법을 적용하여 구명하고, 이를 바탕으로 핀치효과 개선용 코일특성을 실제와 가장 접근할 수 있도록, 3차원 모델을 설정하여 해석하므로써 효율적인 설계를 위한 기본자료를 도출하고자 하였다.

2. 핀치효과와 표피효과

2.1 핀치효과

액체상태의 유동도체에 전류 I [A]를 흘리면, 이 전류와 이 전류가 만드는 자속밀도 B가 상호작용을 하여 플레밍의 왼손법칙에 의한 힘 ($\vec{F}=\vec{I}\times\vec{B}$ [N])을 발생하여 액체도체를 중심쪽으로 집중시키려고 하게 된다. 이 힘이 액체금속에 압축력으로 작용하여 단면적을 축소시키게 되는 데, 이러한 현상이 계속되면 결국에는 액체도체의 단면이 끊어지게 되며 이를 핀치효과라고 한다. 전류의 흐름이 중단되면 압축력도 제거되어 다시 원상태로 되며, 또다시 전류가 흐르게 되면 이러한 현상은 반복된다. 이 현상을 아크용접기 등에 이용하면 고온의 아크가 중심에 집중되어 대단히 높은 온도를 얻을 수 있으므로 전열공학 및 금속재료분야에서 널리 사용된다.

2.2 핀치효과 개선용 코일모델

핀치효과를 가장 효과적으로 응용하기 위해서는 힘이 표면에만 집중되도록 발생시켜야 하며, 이를 위해서는 전류와 자계의 침투깊이가 작아 표면에 만 집중적으로 흐르게 해야 하므로 침투깊이가 작도록 주파수가 매우 큰 초고주파 전류를 흐르게 한다. 즉 액체도체 주위를 초고주파 대전류가 흐르는 코일로 둘러 싸면 전류의 침투깊이가 거의 없어 표피에 만 전류가 흐르게 되므로 액체의 표면에서 만 힘이 발생하여 요동없이 깨끗하며 효과적인 핀치효과를 발생하게 된다.

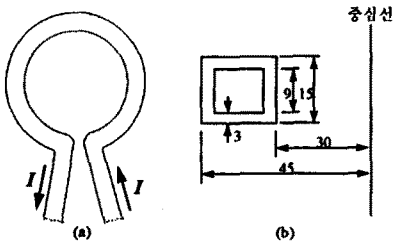

그림 1. 핀치효과 개선용 4각단면 중공 원형코일
(a) 위에서 본 모양
(b) 4각중공코일의 단면도(단위;mm)

최근에 널리 사용되는 코일의 모양은 그림 1과 같다. 즉 4각 중공단면의 코일로 원형을 이루게 한 형상으로 中空의 공간에는

냉각수를 흘려 발열 및 저항값을 감소시킨다. 그런데 매우 밀도가 높은 전기에너지가 흐르게 되므로 주파수, 도전율 등의 영향은 물론 기하학적형상에 따라 그 특성이 민감하게 결정된다. 따라서 효율적인 펀치효과 개선을 위한 코일이 되기 위해서는 면밀한 해석을 통하여 특성을 검토해야 한다.

3. 전자장이론을 적용한 FEM에 의하여 전류의 흐름현상을 해석하기 위한 지배방정식

3.1 지배방정식

도체에서의 전류흐름현상을 전자장이론을 적용하여 해석하기 위한 기본 막스웰전자방정식은 아래와 같다.

즉 도체 내에서의 전류에 의하여 발생하는 자속밀도는

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

또한 도체 내에서의 자속밀도와 전계의 관계식은 패러디 렌츠법칙으로 부터

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

도체내의 전계와 전류밀도의 관계식은

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

따라서 시간적으로 정현적인 변화를 하는 전류가 흐르는 경우의 전류와 자속밀도의 분포에 관한 지배방정식은 각각

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

3.2 도체내부의 저항 및 리액턴스, 전류특성식

도체내부에 직류전류가 흐르는 경우와는 달리 고주파 전류가 흐르게 되면 표피효과에 의한 침투깊이가 달라져 임피던스 및 전류특성이 완전히 달라 진다. 펀치효과개선용 코일의 특성식을 유도하기 위한 기본 예는 아래와 같다.

(1) 4각단면 단일도체의 경우

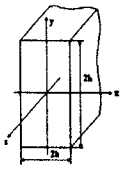

그림 2. 4각단면 단일도체모델

4각단면도체에 직류전류가 흐르는 경우의 저항값은

$$R_o = \frac{1}{4bh\sigma} \qquad (5)$$

이 도체에 교류전류가 흐르는 경우의 임피던스값은

$$Z = \frac{k}{4h\sigma} \coth kb \qquad (6)$$

따라서 교류저항과 리액턴스는 각각 아래와 같다

$$\begin{cases} R_\sim = Re(\frac{k}{4h\sigma} \coth kb) \quad [\Omega/\mathrm{m}] \\ X = \omega L = Im(\frac{k}{4h\sigma} \coth kb) \quad [\Omega/\mathrm{m}] \end{cases} \qquad (7)$$

도체에 교류전류가 흐르는 경우의 전류밀도분포식은

$$J = \frac{kI}{4h} \frac{\cosh kx}{\sinh kb} \ , \quad k = \frac{1+j}{\delta} \ , \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \qquad (8)$$

여기서 I ; 인가된 전류, j ; 복소수, δ ; 침투깊이, $\omega = 2\pi f$; 각주파수, μ ; 도체의 투자율 , σ ; 도체의 도전율

(2) 4각단면 평행왕복도체의 경우

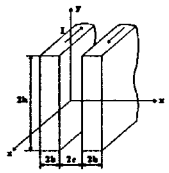

그림 3. 4각단면 평행왕복도체 모델

도체에 교류전류가 흐르는 경우의 1개도체에서의 임피던스는

$$Z = \frac{k}{2h\sigma} \coth 2kb \quad [\Omega/m] \qquad (9)$$

따라서 도체의 교류저항 및 리액턴스값은 각각

$$R_\sim = Re\ (Z), \quad X = \omega L = Im\ (Z) \qquad (10)$$

이들 임피던스특성식을 고려하여 도체내의 전류밀도분포특성식을 얻는다.

$$J = \frac{kI}{2h\sigma} \frac{\cosh k(x-c-2b)}{\sinh 2kb} \qquad (11)$$

4. 초고주파 전류의 흐름현상 해석을 위한 기본사례와 FEM을 적용한 2차원 특성해석

3.2절에서 살펴 본 2개의 기본 예에서와 같이 해석적인 방법으로의 특성해석은 가능하지만 전류의 흐름현상을 시각적으로 이해하기 쉽게 나타내는 것은 어렵다. 이 경우 가장 적합한 방법으로 수치해석법이 있는데, 본 장에서는 그 중 FEM 해석을 적용하기로 한다. 즉 초고주파 전압을 코일에 인가하였을 때 전류의 흐름특성을 해석하기 위한 기본단계로 아래와 같은 간단하면서도 기본적인 모델을 사례로하여 전자장이론을 적용하는 FEM해석을 통해 특성을 해석한다.

4.1 2차원 해석모델

펀치효과 개선용 코일의 전류흐름특성식을 2차원 전자장이론을 적용하여 FEM해석에 의하여 구한다. 즉 원형 4각단면 중공도체의 해석모델을 그림 4와 같이 설정하여 2차원 원통좌표계로 해석한다.

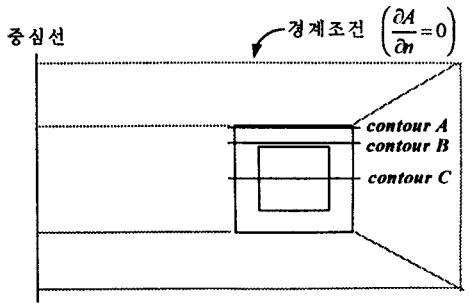

그림 4. 왕복 4각단면 중공도체 해석모델(等深線 A, B, C)

4.2 자속분포특성

그림 1의 4각단면 중공코일의 단면을 그림 4과 같은 해석모델로 설정하여, 전류가 흐를 때의 자속분포에 대한 FEM 해석결과는 그림 5, 6과 같다. 즉 4각단면 중공도체로 구성한 원형코인에 주파수 1 kHz와 7kHz의 전류가 흐를 때 원형코일의 내부공간에 만 자속이 분포하며 도체내부에는 침투하지 못하는 것을 볼 수 있다. 특히 7kHz인 경우는 도체내부에 거의 침투하지 못함을 볼 수 있다.

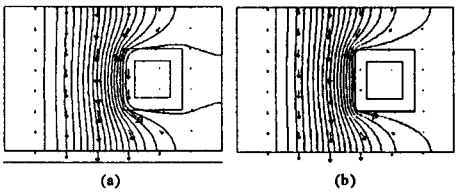

그림 5. 주파수에 따른 자속분포특성
(a) 1 [kHz]인 경우; (b) 7 [kHz]인 경우

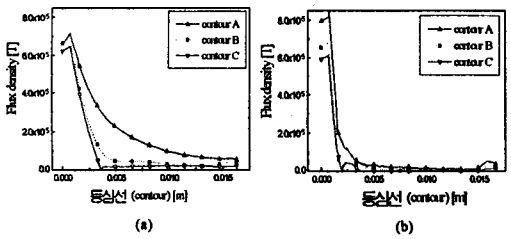

그림 6. 그림 4의 등심선에 따른 자속밀도분포 값
(a) 1 kHz인 경우; (b) 7 kHz인 경우

4.3 전류밀도분포

그림 7은 그림 4의 모델에 대하여 각 등심선에서의 전류밀도를 나타낸 것이다. 주파수가 높아질수록 표피효과가 커져 원형코일 안쪽 표면으로 전류밀도가 집중되는데, 등심선이 C-B-A 축으로 갈수록 전류밀도가 높아짐을 알 수 있다.

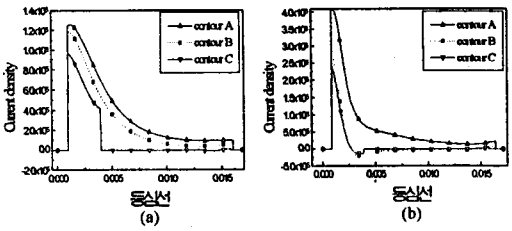

그림 7. 등심선에 따른 전류분포
(a) 1 kHz인 경우; (b) 7 kHz인 경우

5. 핀치효과 개선용 코일에서의 초고주파전류 흐름특성의 3차원 해석

5.1 3차원 모델링 및 요소분할

원형코일에 대한 3차원 FEM 해석을 하기 위하여 그림 8과 같이 해석모델을 설정한다.

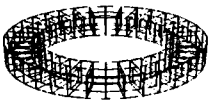

그림 8. 3차원 해석모델

5.2 해석결과 및 검토

그림 6, 7의 자속 및 전류밀도분포특성과 그림 8의 3차원 해석결과를 검토해보면 주파수가 높아질수록 표피효과가 매우 분명하게 나타타고 있음을 알 수 있다. 또한 2차원과 3차원 해석의 결과는 상당히 다르다. 이로써 이러한 문제의 해석방법은 2차원보다는 3차원 해석이 필수적 임을 알 수 있다. 또한 원형코일의 바깥쪽보다는 안쪽으로 전류가 크게 흐르므로 원형코인의 설계시에는 안쪽과 바깥쪽의 형상, 두께 등을 적정하게 정해야 만 한다.

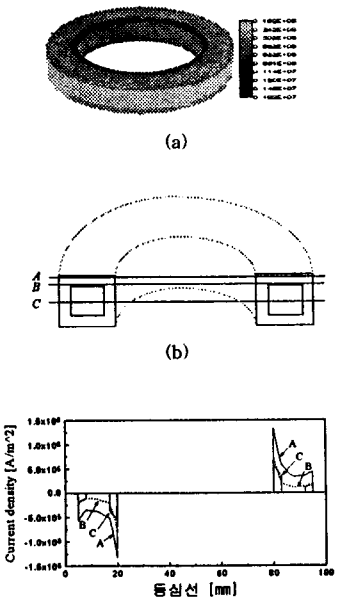

그림 9. 3차원 해석결과
(a)전류흐름의 3차원 분포도; (b) 코일전체의 단면도 ;
(c) 등심선에 따른 전류밀도분포

6. 결 론

본 논문은 4각단면 중공 코일에 대한 초고주파전류의 흐름현상을 해석 및 검토하므로써 코일을 효율적으로 설계 할 수 있는 기본자료를 얻었다. 즉 전자장이론을 적용한 지배방정식을 유도하였고, 2차원 및 3차원 모델을 설정하여 FEM에 의한 해석결과를 비교검토하였다. 따라서 실제에 근접하는 특성 해석법에 대한 기본자료를 얻었으며 이로부터 핀치효과 개선용 코일의 최적설계를 위한 자료를 구하였다. FEM해석결과를 통해 알 수 있듯이 원형코일의 바깥쪽보다는 안쪽으로 전류가 크게 흐르므로 원형코일의 설계시에는 안쪽과 바깥쪽의 형상, 두께 등을 적정하게 정해야 만 한다.