

부양용해용 cold crucible 설계를 위한 전자기장 해석 모델 개발

송명곤\*, 이상진\*\*, 김호영\*\*\*, 박준표\*\*\*, 김구화\*\*\*, 정희태\*\*\*  
 \* 벡터필드코리아(주) \*\* 위덕대학교 전기공학과 \*\*\* 포항산업과학연구원

Introducing the Electromagnetic analysis model in the design of levitation melting cold crucible

Myung-kon Song\*, Sang-jin Lee\*\*, Ho-young Kim\*\*\*, Joon-pyo Park\*\*\*, Goo-haw Kim\*\*\*, Hee-tae Jeong\*\*\*  
 \* V.F.K. Inc., \*\* Dept. of E.E. Uiduk Univ., \*\*\* RIST

**Abstract** - 부양용해 기술은 티타늄등 용해 및 주조에 어려움이 있는 기능성 금속의 용해 시 소재의 오염이나 고가의 도가니 없이 용해할 수 있는 기술로써 기계 부품 경량화 및 고강도를 위한 기술 및 신수요 창출을 위한 기반을 제공할 수 있다. 본 논문은 실기용 부양용해 cold crucible의 설계 및 제작에 앞서 모사 cold crucible에 대한 기초 자료를 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 3차원 전자기장 해석 model을 구축하여, 모사 모델과의 측정값과 전자기장 해석결과를 비교하여, 실제 cold crucible 설계 제작시 다양한 형태로 활용될 수 있는 기본자료를 확보하는데 그 목적이 있다.

1. 서 론

전자기장을 재료 제조공정에 이용하는 기술(EPM - Electromagnetic Processing of Materials)은, 기존 공정의 생산성 및 제품 품질 개선, 그리고 환경 개선 등을 달성할 수 있는 기술로 주목을 받고 있다. 1970년대부터 전자기력을 이용하는 기술이 제안되어 용탕의 교반에 이용되기 시작하였으며, 전자기력으로 주조물드를 대신하는 알루미늄의 무중형 주조기술의 경우, 매년 수백만톤의 슬라브를 생산하고 있다. 산업 현장에서는 전원 장치나 제어 방법의 제약, 경제성 미흡 등으로 아직까지 기대만큼의 성과는 얻지 못하고 있지만, 주변 기술의 발달에 힘입어 21세기에는 EPM 기술이 친환경 금속재료 제조 공정의 핵심 기술이 될 것으로 전망되고 있다.

본 논문은 전자기장을 재료 제조공정에 이용하는 기술 중 한가지인 실기용 cold crucible의 설계, 제작에 앞서 3차원 전자기장 해석 model을 구축하여 cold crucible 설계를 위한 설계 자료를 확보하는데 그 목적이 있다. 이러한 목적으로 모사 crucible을 제작하여 자기장 분포를 측정하고 이를 기본모델로 3차원 수치해석 model구축하여 모사 crucible에서의 자장 측정값과 3차원 전자기장 시뮬레이션을 통한 해석값을 비교하여 기 구축한 모사 crucible의 전자기장모델을 검증하였다. 이 검증된 해석모델을 이용하여 segment 수, 코일에 인가하는 전류의 크기 및 주파수, 코일의 위치 등 여러 설계 조건을 변경하여 이에 따른 전자기장 해석결과를 도출하였다.

2. 본 론

2.1 기본 이론

부양용해용 cold crucible시스템은 Maxwell 방정식으로 부터 유도되는 Poisson방정식 또는 Laplace방정식으로 모델링 할 수 있다. 이 방정식들은 경계 조건을 갖는 편미분 방정식의 형태로 주어지는데, 아주 특수한 경우를 제외하면 해석적인 방법으로 해를 직접 구하는 것은 불가능하고, 대부분의 경우 수치해석적인 방법을 이용한다. 경계 조건을 갖는 편미분 방정식의 해를 구하는 수치해석적인 방법은 유한차분법(finite difference method), 경계요소법(boundary element method)등 여러 가지가 있

지만 가장 널리 사용되는 것은 유한요소법(finite element method)이라 할 수 있다. 유한요소법은 방정식이 적용되는 전체 영역을 작은 영역(유한요소)으로 세분하고, 각 영역에서 해(포텐셜)가 일정하다고 가정하여 방정식을 만족하는 해를 구한 다음 각 영역의 해를 일치 또는 이차 다항식을 이용하여 근사함으로써 전체 영역에서의 해를 구하는 기법이다. 현재 개발되어 있는 대부분의 상용프로그램들이 이 방법에 기초하고 있으며, 본 논문에서는 전자기장 수치해석에 사용한 상용 프로그램인 OPERA-3D를 사용하여 모델을 해석하였다.

교류 자기장의 해석에는 몇 가지 종류의 기법이 사용되지만 본 논문에서는 일반적으로  $A-\phi$  method로 알려져 있는 자기 벡터 포텐셜과 정전 스칼라 포텐셜을 기본으로 하여 계산 시간 및 메모리 용량을 감소시키기 위해 자기 스칼라 포텐셜을 도입하는 방법을 이용하였다.

다음 그림1은 교류 자기장 문제에서 해석영역을 설명한다. 전체 해석영역을  $\Omega$ 라 하면 해석 영역은 매질의 전기전도도에 따라 크게 도전성 매질로 구성되는 영역  $\Omega_1$  과 그 외의 영역으로 구분할 수 있다. 전자는 Faraday 법칙에 따라 유도되는 기전력에 의한 유도 전류가 흐르는 영역이고, 후자는 유도 전류가 흐르지 않는 영역으로서 전류원에 해당하는 도체를 포함한다. 따라서 후자를 비도전성 매질로 구성되는 영역  $\Omega_2$ 와 전류원(도체)을 포함하는  $\Omega_3$ 로 구분할 수 있다. 물론 영역  $\Omega_3$ 에서 전류원 부분은 문제의 조건 중의 하나인 전류 밀도로서 정의될 뿐 해석하고자 하는 영역은 아니다.

전체 영역  $\Omega$ 의 경계에는 두 가지 유형의 경계 조건이 정의될 수 있다. 하나는 자속밀도의 수직 성분이 정의되는 부분으로  $\Gamma_B$ 가 이에 해당된다. 다른 하나는 자계의 세기의 평행성분이 정의되는 부분으로  $\Gamma_H$ 가 여기에 해당된다. 전체 영역의 경계 조건은 해의 유일성을 보장하기 위해서 두 가지 유형, 또는 그 중의 하나는 반드시 주어져야 한다.

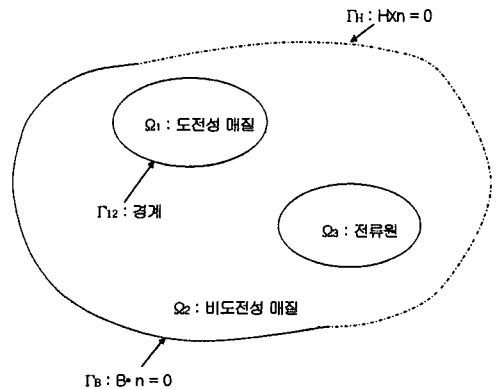


그림1 교류 자기장 문제의 해석영역

또한  $\Gamma_{12}$ 와 같은 매질간의 경계에 대해서도 같은 종류의 경계 조건이 적용되는데, 이는 문제에서 특별히 주어질 수도 있지만 일반적으로는 해석 프로그램 내부에서 자속밀도의 수직 성분과 자계의 평행 성분이 연속이라는 조건이 만족되도록 결정된다. 이상의 고찰로부터 각 해석 영역에서의 방정식과 경계조건을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 해석영역

$$\Omega_1 : \nabla \times H - \sigma E = 0$$

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\Omega_2, \Omega_3 : \nabla \times H = J_s$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

- 경계조건

$$\Gamma_B : B \cdot n = 0, H \times n = 0$$

$$\Gamma_H : B_1 \cdot n_1 + B_2 \cdot n_2 = 0$$

$$\Gamma_{12} : H_1 \times n_1 + H_2 \times n_2 = 0$$

본 논문에서 해석하고자 하는 부양용해용 cold crucible 시스템의 사용 주파수 대역은 보통 10-30kHz가 적용된다. 따라서 전자장 해석 모델 구성시 반드시 고려하여야 하는 특성이 있는데 바로 표피효과(skin effect)이다. 즉 사용 주파수가 증가할수록 유도 전류 및 자기장은 도체의 표면 부근에만 분포하는 특성으로 이 효과에 의해 도체 내부의 전류 및 자기장은 도체 표면으로부터 지수함수 형태로 감소하는 분포를 가지게 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$B(r, t) = B_m \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{r}{\sigma} - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{r}{\sigma} \right]$$

$$E(r, t) = E_m \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{r}{\sigma} \right) - \frac{r}{\sigma} \right]$$

여기서  $\sigma$ 를 skin depth라 하며 다음 수식과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega}}$$

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 skin depth는 주파수와 매질의 전기 전도도 및 투자율이 증가할수록 작아진다. 사용 주파수가 20kHz일 때 cold crucible 소재인 구리와 용융 알루미늄의 skin depth는 각각 0.46mm와 1.76mm이다. 이는 cold crucible이나 주변의 전체 치수에 비하면 아주 작은 값으로서 자기장 및 유도 전류가 좁은 부분에 집중되어 분포하고, 또한 그 안에서 급격하게 변화한다는 것을 의미한다. 이 점이 교류 자기장 해석을 어렵게 만드는 근본적인 원인이라고 볼 수 있다.

본 논문에서는 부양용해용 cold crucible의 전자기장 해석 모델을 구성하는데 있어 좀 더 정확한 해석결과를 얻기 위하여 skin depth에 영향을 주는 여러 설계 파라미터들의 변화에 따라 그 모델에서의 skin depth를 계산하여 mesh 생성 시 skin depth내에서 충분한 mesh를 생성할 수 있도록 프로그램화 하였다.

## 2.2 해석 모델

그림2는 모사 부양용해용 cold crucible의 단면도이다. 각 치수의 단위는 mm이다. cold crucible의 재질은 구리이며, 전도도는 60000S/mm이다. 전원전류의 크기는 1A 또는 1.5A이며 코일의 턴수는 60[turns]이다. 슬릿의 두께는 0.3mm이며 슬릿 개수는 6, 8, 12개를 가지는 모사 모델이 있다. 그리고 전류원으로 사용되는 코일의 중심 위치는 cold crucible의 윗면으로부터 35 - 75mm사이의 거리에 위치한다.

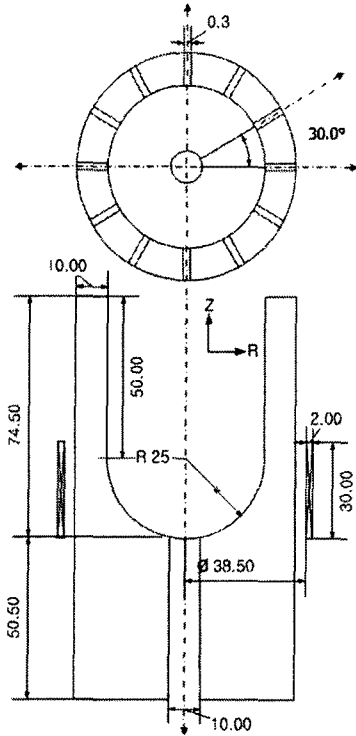


그림2 Cold crucible 단면도

그림3은 전자장 해석을 위해 OPERA3D의 전처리기인 modeler를 사용하여 구성한 해석모델도 및 각 영역에 대한 포넬셀 지정을 설명한 그림이다. 그림4에서 보는 바와 같이 계산 시간 및 mesh수 단축을 위해 segment의 개수에 따라 1/12, 1/16, 1/24모델을 구성하였다.

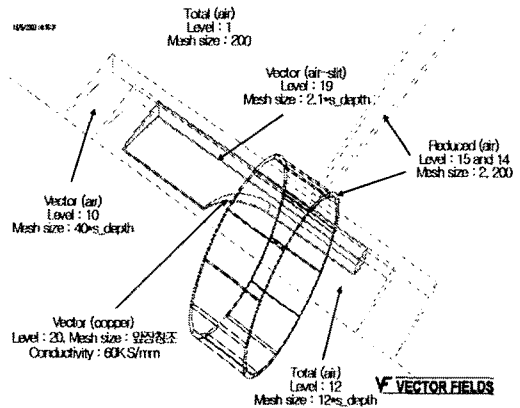


그림3 전자기장 해석을 위한 모델 및 해석영역지정

## 2.3 측정값 및 해석값 비교

그림4와 그림5의 그래프는 각각 코일의 중심위치가 35mm이고 주파수가 20kHz인 전류 1Arms를 코일에 인가하였을 때, segment의 갯수가 각각 6, 8, 12개인 cold crucible에서 발생한 자장값을 Z축을 따라 측정 및 해석한 결과이다. 각 그래프의 자장값들은 전부 rms로 환산한 값들이다. 그림4와 그림5에서 보는 바와 같이 전자장 해석 결과가 측정값과 거의 같음을 알 수 있다.

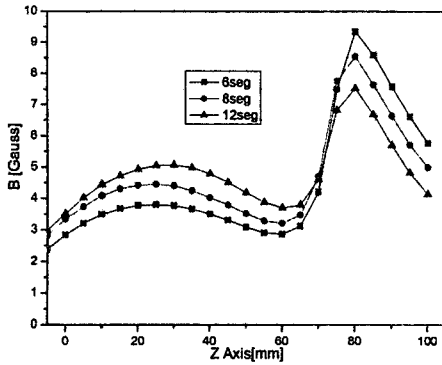


그림4 segment 개수에 따른 Z축 자장측정값

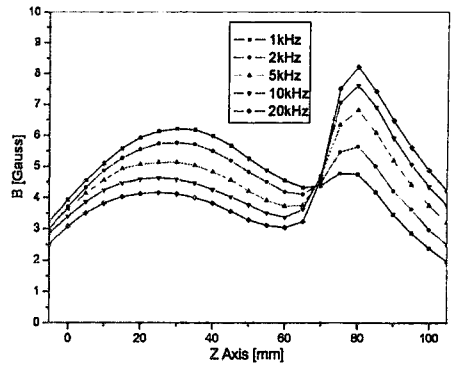


그림7 주파수 변화에 따른 Z축 자장해석값

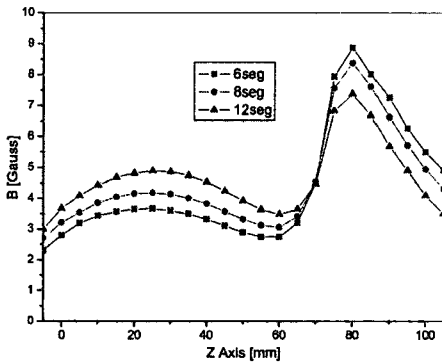


그림5 segment 개수에 따른 Z축 자장해석값

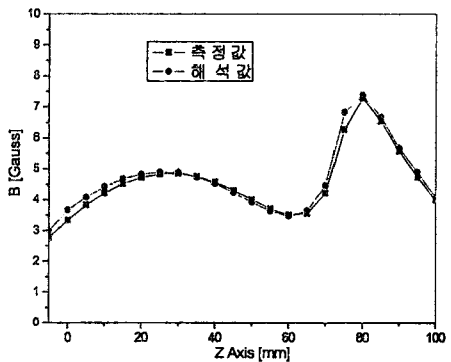


그림8 측정값 및 해석값 비교

그림6과 그림7의 그래프는 각각 코일의 중심위치가 35mm이고 cold crucible의 segment 개수가 8개인 모델에 전원전류 1Arms의 주파수를 1, 2, 5, 10, 20kHz로 변화시켜 코일에 인가하였을 때 cold crucible에서 발생한 자장값을 Z축을 따라 측정 및 해석한 결과이다. 이 결과 그래프 또한 앞선 결과와 마찬가지로 전자장 해석 결과가 측정값과 거의 같음을 알 수 있다. 그림8은 전원 주파수가 20kHz이고 전류가 1Arms, 12 segment 모델에서의 Z축을 따른 자기장측정값과 해석값을 비교해 놓은 것이다. 보는 바와 같이 거의 일치함을 알 수 있다.

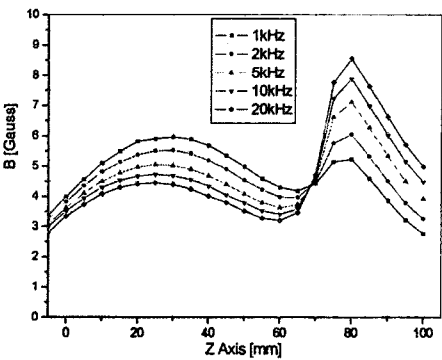


그림6 주파수 변화에 따른 Z축 자장측정값

### 3. 결 론

본 논문은 전자기장을 재료 제조공정에 이용하는 기술 중 한가지인 실기용 cold crucible의 설계 및 제작에 앞서 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 3차원 전자기장 해석 model을 구축하여 실제 cold crucible 설계 제작을 위한 기본자료를 확보하는데 목적이 있다. 따라서 그 목적을 충족시키기 위해서 모사 cold crucible을 제작한 후 그 모사모델에 대한 전자장 해석 모델을 구축하여 측정자장 값과 수치해석에 의한 값을 비교하여 전자장해석모델에 대한 검증하였다. 측정값과 유사한 결과를 얻기 위하여 전자장 해석모델 구성시 전원주파수에 의한 표피효과를 충분히 고려할 수 있는 모델을 구성하였으며, 모델 구성 후 여러 입력변수를 변화시켜 그 해석값 도출하여 이를 측정값과 비교하였다. 전자장 해석 모델에 대한 해석값은 측정값과 비교하여 아주 유사한 값을 얻을 수 있었으며, 이 모사 cold crucible의 전자기장 해석모델 구성 기술을 바탕으로 하여 실제 부양용해용 cold crucible 설계 및 제작에 있어 다양한 설계 자료를 도출할 것으로 예상된다.

### [참 고 문 헌]

[1] 포항산업과학연구원, "금속의 전자기 연속주조 및 부양용해 기술", p88-99, 2002  
 [2] 김호영, "Continuous Casting of Billet with High Frequency Electromagnetic Field", ISIJ international, vol42 no2, 2002  
 [3] Vectorfields, "OPERA-3d Reference Manual", Vectorfields, v8.5, 2002