

부양용해용 cold crucible 설계를 위한 전자기장 해석

(Electromagnetic analysis for the design of levitation melting cold crucible)

송명곤*, 고택범**, 이상진***

(Myung-kon Song*, Taek-beom Koh**, Sang-jin Lee***)

(*벡터필드코리아(주), **경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부, ***위덕대학교 전기공학과)

요 약

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 실기 제작할 cold crucible에 대한 기초 자료를 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 부양체를 포함한 3차원 전자기장 해석 model을 구축하여, 실제 cold crucible 설계 제작 시 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 무주형 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 부양체를 포함한 3차원 전자기장 해석 model을 구축하여 cold crucible 설계를 위한 다양한 자료를 확보하는데 그 목적이 있다. 이러한 목적으로 부양체를 포함한 3차원 수치해석 model구축하여 설계파라미터 변화에 따른 cold crucible의 전자기 특성을 해석하였으며, 또한 각 슬릿변화에 따른 cold crucible에서 부양체가 받는 전자기력등 전자기장 해석결과를 도출하였다.

2. 본 론

2.1 기본 이론

부양체를 포함한 cold crucible시스템은 Maxwell 방정식으로부터 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 있지만 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 일차 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 그림 1은 교류 자기장 문제에서 해석영역을 설명한다. 전체 해석영역을 Ω 라 하면 해석 영역은 매질의 전기전도도에 따라 크게 도전성 매질로 구성되는 영역 Ω_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 해당되는 도체를 포함한다. 따라서 후자를 비도전성 매질로 구성되는 영역 Ω_2 와 전류원(도체)을 포함하는 Ω_3 로 구분할 수 있다. 물론 영역 Ω_3 에서 전류원 부분은 문제의 조건 중의 하나인 전류 밀도로써 정의될 뿐 해석하고자 하는 영역은 아니다.

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

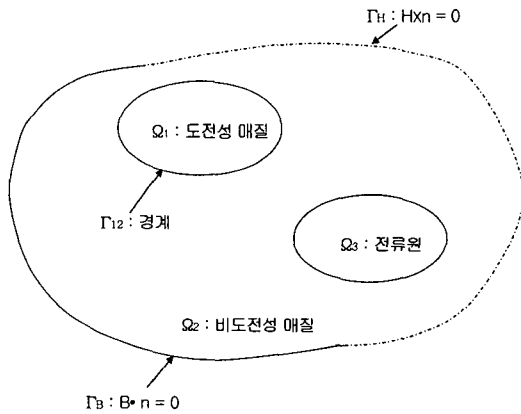


그림 1. 교류 자기장 문제의 해석영역
Fig 1. Analysis area for AC magnetic problem

또한 Γ_{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 방

정식과 경계조건을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 해석영역

$$\Omega_1 : \quad \begin{aligned} \nabla \times H - \sigma E &= 0 \\ \nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot B &= 0 \end{aligned}$$

$$\Omega_2, \Omega_3 : \quad \begin{aligned} \nabla \times H &= J_S \\ \nabla \cdot B &= 0 \end{aligned}$$

- 경계조건

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

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

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

일반적으로 부양용해용 cold crucible 시스템의 사용 주파수 대역은 보통 5-20kHz가 적용된다. 본 논문에서는 5kHz의 전원주파수를 사용하였다. 이와 같이 높은 주파수 대역의 전자장 해석 모델 구성 시 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 σ 를 skin depth라 하며 다음 수식과 같이 주어진다.

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

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 skin depth는 주파수와 매질의 전기 전도도 및 투자율이 증가할수록 작아진다. 사용 주파수가 5kHz일 때 cold crucible 소재인 구리와 용융 알루미늄의 skin depth는 각각 0.9mm와 3.5mm 정도이다. 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 crucible 및 부양체의 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

그림 2는 부양용해용 cold crucible 및 부양체의 단면도이다. 각 치수의 단위는 mm이다. cold crucible의 재질은 구리이며, 전도도는 60000S/mm이다. 전원전류의 크기는 5000Aturns이다. 슬릿의 두께는 0.3mm이며 슬릿 개수는 8, 12, 16개를 가지는 모사 모델이 있다. 그리고 전류원으로 사용되는 코일의 중심위치는 cold crucible의 윗면으로부터 43mm의 거리에 위치한다.

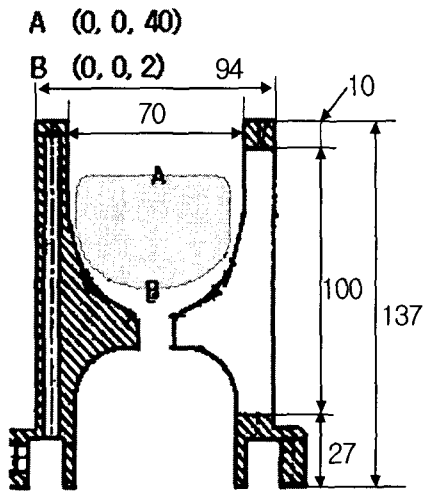


그림 2. 부양체 및 cold crucible 단면도
Fig 2. A cut-view of melt & CC

그림 3은 전자장 해석을 위해 OPERA3D의 전처리기인 modeler를 사용하여 구성된 해석모델도 및 각 영역에 대한 포텐셜 지정을 설명한 그림이다. 그림3에서 보는 바와 같이 계산 시간 및 mesh 수 단축을 위해 segment의 개수에 따라 1/16, 1/24, 1/32모델을 구성하였다.

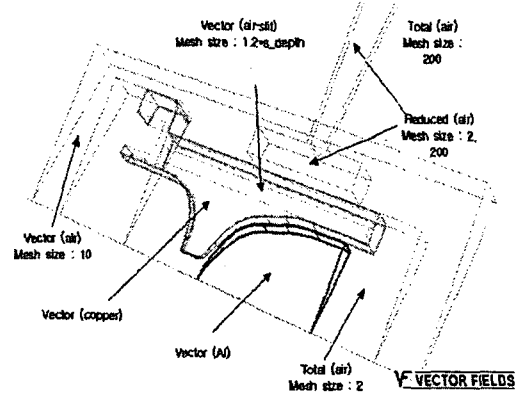


그림 3. 전자장 해석 모델
Fig 3. A model for F.E.M analysis

2.3 측정값 및 해석값 비교

각 해석 값들은 다음과 같은 입력변수의 결과들이다. 코일의 중심위치는 cold crucible의 윗면으로부터 43mm이고 주파수가 5kHz인 전류 5000Aturns를 코일에 인가하였을 때, segment의 개수가 각각 8, 12, 16개인 cold crucible에 의하여 부양체의 표면에 발생하는 자속밀도 및 부양체의 표면에 발생하는 힘을 도출한 결과이다. 그림4 cold crucible과 부양체에서의 자속밀도 분포 그래프이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 cold crucible 및 부양체의 표면에 자속이 집중되는 것을 볼 수 있다. 그림 5와 그림6은 각각 부양체 표면을 따라 A지점부터 B지점에 이르는 구간에 대하여 자속밀도의 값 중 z성분과 r성분의 값을 보여준다. 그림 7과 그림 8은 A-B구간을 따라 부양체 표면에 작용하는 힘을 도출한 값이다. 각 그래프의 자장값들은 전부 rms로 환산한 값들이며 힘은 평균값이다.

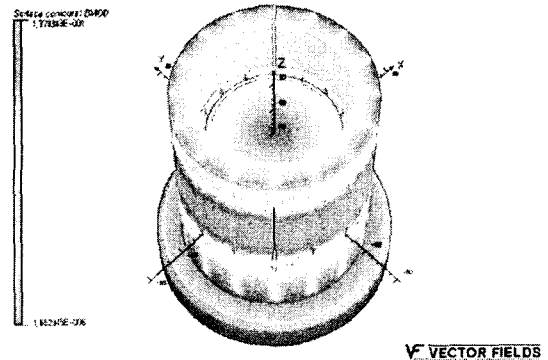


그림 4. 부양체 및 cold crucible의 자속밀도 분포
Fig 4. Magnetic distribution of melt & CC

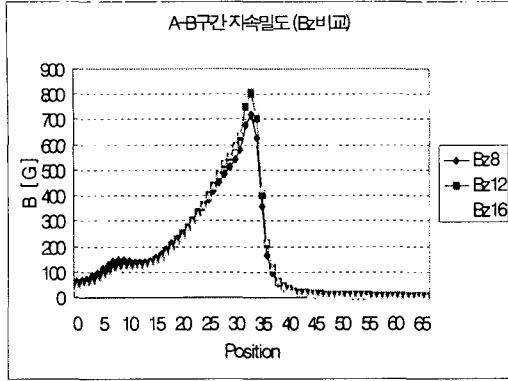


그림 5. A-B구간 자속밀도(Bz)
Fig 5. Magnetic flux(Bz) along A-B

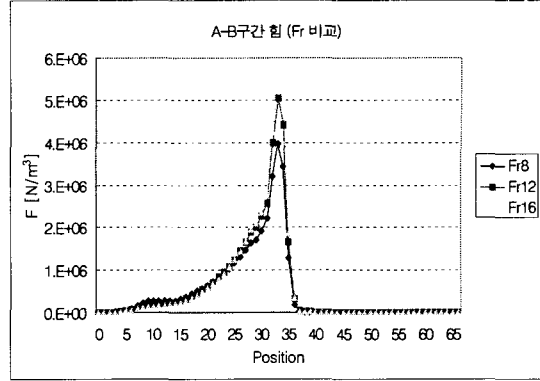


그림 8. A-B구간 힘(Fr)
Fig 8. Magnetic force(Fr) along A-B

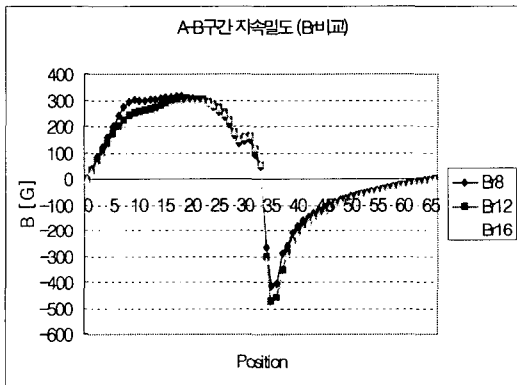


그림 6. A-B구간 자속밀도(Br)
Fig 6. Magnetic flux(Br) along A-B

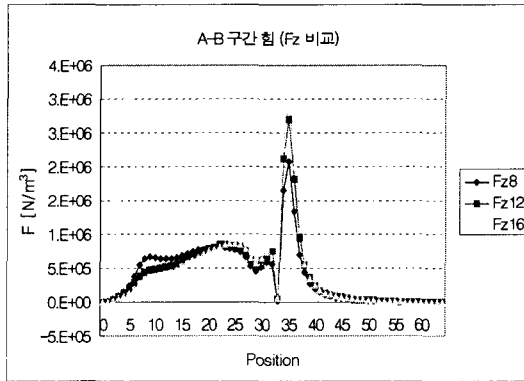


그림 7. A-B구간 힘(Fz)
Fig 7. Magnetic force(Fz) along A-B

다음 표 1은 부양체를 포함한 cold crucible의 해석결과에서 부양체 전체에 발생하는 힘을 정리한 것이다. 부양체가 받는 힘은 부양체의 중심으로의 힘은 서로 상쇄되어 없어지고 Z축 방향으로만 부양력이 존재한다.

표 1. 부양체에 작용하는 부양력

Table 1. A levitation forces on melt

슬릿수	8	12	16
힘[N]	1.5147	1.4094	4.6246

3. 결론

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 확보하는 데 목적이 있다. 따라서 그 목적을 충족시키기 위해서 제작할 cold crucible에 대한 전자기장 해석 모델을 구축하여 각 설계 파라미터 변화에 대하여 부양체가 받는 전자기력 등 전자기효과를 해석하였다. 본 논문은 전자기장 해석모델 구성 시 전원주파수에 의한 표피효과를 충분히 고려할 수 있는 모델을 구성하였으며, 모델 구성 후 여러 입력변수를 변화시켜 그 해석값 도출하였다. 이런 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", ISJ international, vol42 no2, 2002
- (3) Vectorfields, "OPERA-3d Reference Manual", Vectorfields, v8.5, 2002