

전자기력을 고려한 MHD 유동특성해석

김민석*, 김정현*, 전문호*, 김창업*, 김서현**, 권정태**
 호서대학교 전기공학과*, 호서대학교 기계공학과**

Analysis of MHD Flow Characteristics under an Electromagnetic Forces

Min-Seok Kim*, jung-Hyun Kim*, Mun-Ho Jeon*, Chang-Eob Kim*, Seo-Hyun Kim**, Jeong-Tae Kwon**
 *Department of Electrical Engineering, Hoseo University
 **Department of Mechanical Engineering, Hoseo University

Abstract - This paper presents the MHD characteristics of the liquid metal flow using an electromagnetic force. The flow velocity has been calculated by treating the Lorentz force as a source term in the Navier-Stokes equation. The liquid metal flow in duct using an electromagnetic pump was analyzed with the Lorentz force varied.

1. 서 론

MHD(MagnetoHydroDynamics)는 전기 전도성을 지니는 유체의 전자기장 속에서의 운동으로 유체가 자기력선을 가로지르는 방향으로 운동하며, 전류가 흘러 새로운 자기장을 발생시키고, 이 자기장 속에 전류가 흐르면 유체에 힘이 작용하여 운동 상태를 바꾸는 것으로 1937년 J.하르트만으로부터 시작되었고, H.알벤이 본격적으로 발전시켰다[1].

전자기 펌프는 용융 금속을 비접촉으로 이동할 수 있는 특징에 착안하여 폭발성 용융금속을 밀폐해서 이송시키는 원자로의 냉각 매체용 순환펌프, 제철소 주조공장에서 주철, 알루미늄, 동합금의 주탕 장치로서 이용되고 있다[2].

본 논문에서는 전자기 펌프에서 전자기장에 의해 발생하는 Lorentz force가 덕트 내부 유동에 미치는 영향과, 덕트 높이에 따른 유동특성해석을 하였다.

2. 수치해석

2.1 전자기력을 고려한 유체유동방정식

액체금속 유동 해석을 하기위해 전자기 펌프를 이용하여 덕트 내부 유체유동방정식에서 전자기장에 의한 Lorentz force를 고려한 수정된 유체방정식(Navier-Stokes Equation)과 유동의 연속성을 나타내는 연속방정식을 나타내었다.

Lorentz force Equation

$$\vec{f}_L = \vec{J} \times \vec{B} \tag{1}$$

Continuity Equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \tag{2}$$

Modified Navier-Stokes Equation

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{f}_L \tag{3}$$

여기서, \vec{f}_L 은 Lorentz force를 나타내고, \vec{J} 는 전류밀도, \vec{B} 는 자속밀도, P 는 압력, \vec{V} 는 2차측 유동 속도, μ 는 점성계수이며, ρ 는 2차측 용융금속의 밀도이다. 기존의 유체유동방정식에 Lorentz force를 z축 방향에 추가함으로써 전자장과 유동장을 결합하였다. 본 연구에서는 층류 유동에 대한 방정식을 연속방정식에 포함하였다. 이 연속방정식은 모든 유동현상에서 만족되어야 하는 기본 법칙으로 유동 해석에 적용할 수 있다. 유동의 경계조건으로는 벽면에서의 no-penetration,

no-slip조건과 함께 출구에서는 Neumann 조건을 사용하였다.

2.2 수치해석 알고리즘

수치해석에 사용된 알고리즘은 압력과 속도 값을 구하기 위해 압력을 가정하고 그 가정한 압력과 속도에 수정방정식을 더해 감으로써 점차 수렴해를 찾아가는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)알고리즘을 사용하였다. SIMPLE알고리즘을 사용하기 위해 유도된 Modified Navier-Stokes Equation을 이산화 하였다[3-4]. 유동을 유지하기 위한 펌프의 요구동력과 직접적인 관계가 있는 부분은 압력강하 ΔP 로 식 (4)에 나타내었다. D_h 는 수력지름, 식(5)는 덕트 단면에 걸친 z방향 속도를 나타내고, 식(6)은 Reynolds수와 마찰계수이다. \vec{w} 는 z방향 속도, ρ 는 유체 밀도, μ 는 유체 점성계수, L 은 duct 길이이며, f 는 마찰인자, R_e 는 Reynolds 수이다.

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho \vec{w}^2}{2} \quad D_h = \frac{4A}{p} \tag{4}$$

$$\vec{w} = \frac{\iint w dx dy}{A} = \frac{\iint w dx dy}{\iint dx dy} \tag{5}$$

$$R_e = \frac{\rho \vec{w} D_h}{\mu} \quad f = 64 R_e^{-1} \tag{6}$$

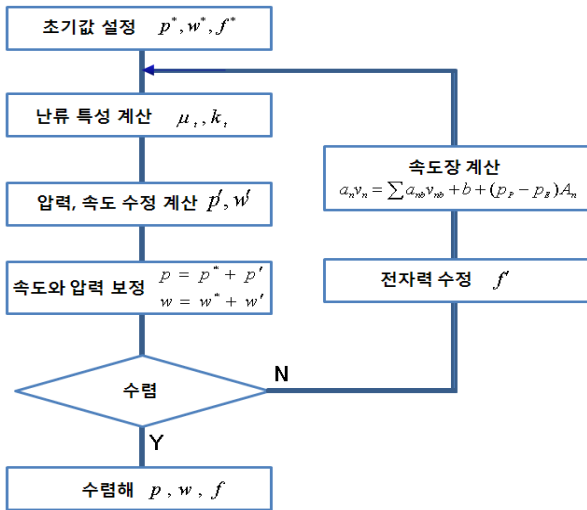
식 (7)은 모서리 부분에서의 압력강하 $\Delta P'$ 로 유체 순환 시스템에서의 90°의 각을 갖는다.

$$\Delta P' = \frac{1}{4} \rho w^2 \tag{7}$$

전체 시스템에서 각각의 모서리부분에서의 압력강하를 포함한 총 압력강하는 식(8)과 같다.

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho w^2}{2} + 4 \cdot \frac{1}{4} \rho w^2 \tag{8}$$

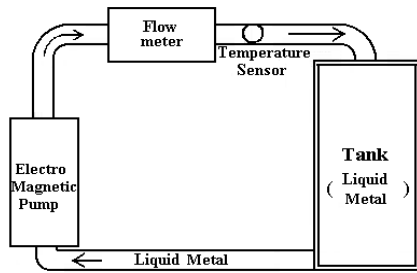
가정한 속도 값에 대해 유체 순환 시스템의 ΔP 와 Lorentz force의 값이 결정된다. 가정된 속도와 결과값인 평균 유속이 일치 하지 않으면 다시 처음부터 반복 계산하여 가정된 속도와 해석이 오차 1%내에 들면 수렴하는 것으로 가정하고 그 결과값을 출력하게 하였다. 본 논문에서는 전체적인 수치해석의 순서는 그림 1의 흐름도와 같다.



〈그림 1〉 Simple 해법의 흐름도

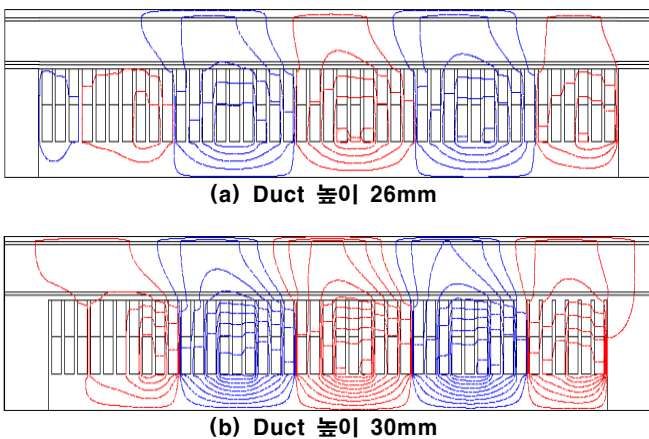
2.3 전자장 수치해석

그림 2는 특성해석을 위해 개념 설계한 것으로 탱크에 들어있는 용융금속이 전자기 펌프의 힘으로 유동을 시작하는 순환 시스템이다. 전자기 펌프에서 발생하는 Lorentz force가 용융금속의 유동에 미치는 영향을 해석하였다.



〈그림 2〉 유체 순환 시스템

전체 시스템에서 전자기장 특성해석은 유동이 완전 발달된 상태로 가정하였을 때의 전자기 펌프의 자기장 분포를 그림 3에 나타내었다. 그림 (a)는 공극 3mm, 폭 80mm, 4극 LIM에서 슬림 1일 때 덕트 높이 26mm로 해석한 결과이고, (b)는 덕트 높이를 30mm로 해석한 결과이다. 해석에 사용된 금속은 용융아연으로 용융아연에 작용하는 힘은 각각 31.7[N], 27.3[N]이다.

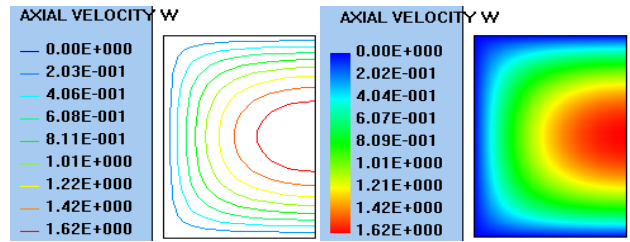


〈그림 3〉 전자펌프의 전자기장 분포

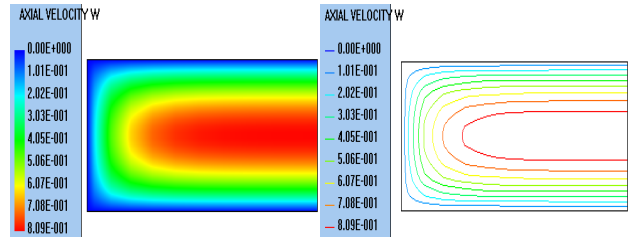
2.4 MHD 유동특성해석

전체 유체 순환 시스템에서 Lorentz force가 덕트 내부 유동에 미치는 영향을 알아보기 위해서 덕트 높이에 따른 유동 속도를 그림 4에 나타내었다. 덕트내부의 평균속도는 덕트의 높이가 26mm일 때 0.707m/s, 덕트 높이 30mm일 때 0.43m/s로 덕트 높

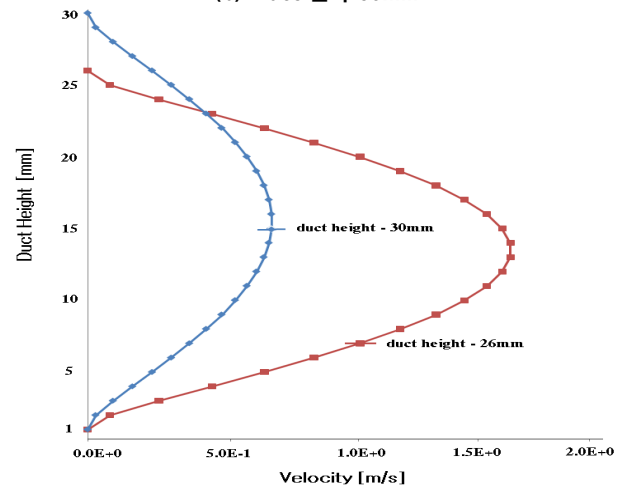
이가 클수록 추력이 작아져 유속이 작아짐을 볼 수 있다. 그림 4(c)는 덕트 높이에 따른 속도 분포를 나타내었다.



(a) Duct 높이 26mm



(b) Duct 높이 30mm



(c) 유체 속도 분포

〈그림 4〉 Duct 높이에 따른 유체 속도 변화와 속도 분포

3. 결 론

본 논문은 전자기장에 의해 발생하는 Lorentz force가 덕트 내부 유동에 미치는 영향과, 덕트 높이가 달라짐에 따라 유동 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 덕트 높이에 따라 용융금속에 작용하는 힘의 크기가 달라지고, Lorentz force가 작용하는 덕트 내부 유동은 덕트 높이가 작을수록 더 큰 속도를 나타내었다. 그러나 지나치게 좁은 덕트 높이는 제작상의 문제와 높은 유속의 요구에 따른 마찰력 증가 등의 난점이 있으므로 이에 대한 적절한 고려가 필요하다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (R-2005-7-088) 주관으로 수행된 과제임

[참고 문헌]

- [1] 차재걸, “선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성 해석”, 호서대학교 석사학위논문, 2002.
- [2] 김성원, 홍성욱, 김창업, 심동준, “용융아연 이송용 선형 전자기 펌프의 특성에 관한연구,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.142-144, 1999.
- [3] Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer And Fluid Flow, pp.126-141, 1980.
- [4] 荒川忠一, 數値流體工學, pp.163-178, pp.356-358, 1997.