

전자기력에 의한 덕트 내부의 유동특성

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

Analysis of Duct Flow Characteristics under an Electromagnetic Force

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. The electromagnetic force was calculated by the equivalent circuit method. This Lorentz force was used as a source term for the fluid flow equations. The modified Navier-Stokes equation was solved to give the velocity distributions of the liquid metal flow.

되었다고 가정하였다. 이 때 금속은 용융아연을 사용하였으며, 그 결과 0.449m/s의 평균유속을 구할 수 있었다.

2. 덕트 내부의 유동 특성 방정식

2.1 전자기 펌프용 LIM의 추력 계산

1. 서 론

LIM에서의 전자기력은 유한요소법을 사용하여 그 해를 구하였다. 본 논문에 사용된 전체시스템 개략도는 덕트 아래 부분에 설치된 편축식 LIM의 전자기력에 의하여 용융금속이 덕트를 흐르도록 하였다. 그림 1은 전자기 펌프 시스템의 개략도이다. LIM은 4극, 3상 220V, 3kVA의 편축식을 사용하였다.

전자기 펌프는 종래의 기계식 펌프와는 달리 회전 날개 부분이 필요 없고, 베어링의 마모와 같은 구조적인 문제점들이 사라지며, 장치 자체가 고유한 단순성을 가지게 되어 액체 금속의 밀봉이나 펌프의 보수 유지가 용이해지는 특징을 가지게 된다. 전자기 펌프는 전자기력을 발생시키는 방식에 따라 전도형과 유도형으로 나누워진다. 이 두 펌프는 금속 유체 내에 전류와 자기장이 서로 교차하도록 하여 이들과 수직 방향으로 추진력을 생성시켜 유체를 구동하도록 하는 기본 원리를 이용하고 있으나, 유도형 펌프는 단상 또는 다상 교류로 발생시킨 진행 자기장에 의해 전극 없이 액체 금속 내에 전류를 유기시켜서 하나의 전원 장치만으로 전류와 자기장을 동시에 얻을 수 있는 장점 때문에 주로 많이 이용되고 있다.[1]

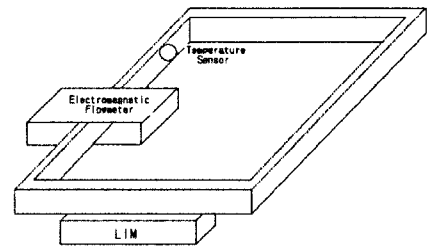
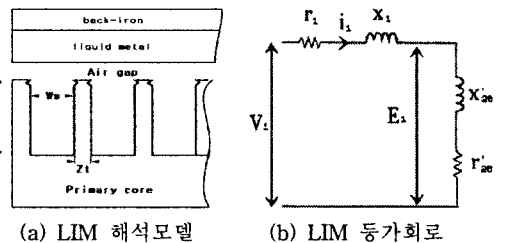


그림 1. 전자기 펌프를 이용한 유체 순환장치

전자기 펌프는 덕트 내에 흐르는 액체금속에 대하여 서로 수직하게 전류 및 자기장을 발생시키게 되며, 액체금속에 대한 구동력은 플레밍의 오른손 법칙에 의하여 덕트 내의 축 방향으로 발생하게 된다. 발생된 힘에 의해 전도성의 액체 금속은 이동하게 된다. 전자기력에 의한 유동에 관한 연구는 오랜 기간 지속되어 왔으며 그 성과는 미미한 편으로 활발한 연구가 이루어지지 못하고 있는 분야 중의 하나이다. 최근에는 기초연구의 일환으로 MHD(MagnetoHydroDynamics) 유동의 물리적 특성을 규명 하였으며 유동장의 해석에 중점을 둔 연구는 기초 성격의 연구와 병행하여 진행되어 왔다. 국내·외 연구자들에 의해서 자기장과 유동장을 결합하여 해석을 시도한 방법은 모두 동일하나 그 해석 대상을 달리하고 있는 연구들이 있다. 국내·외의 연구진행 상황은 그 내용이 미흡하거나 해석방법론의 공개가 용이하지 않은 상황이므로 액체금속로의 개발에서 요구되는 MHD 유동현상의 해석방법론은 자체적으로 개발되어야 할 필요성이 있다[2].

그림 2는 LIM의 등가회로도도와 고정자의 모습을 나타낸다.



(a) LIM 해석모델 (b) LIM 등가회로

그림 2. LIM 해석모델과 등가회로

본 논문에서는 전자기 펌프에 사용된 전자기력과 유동의 특성을 하나의 방정식으로 해석 하였다. 전자기력은 등가회로법으로 계산 하였으며 이 전자기력을 유동방정식에 넣어 유동해석을 하였다. 전체시스템에서 해석영역은 전자기 펌프가 직접적으로 영향을 주는 덕트 부분의 LIM이 존재하는 구간을 설정하여 그 구간을 해석하였다. 모든 구간에서의 단면적을 동일시키고, 유동은 완전 발달

여기서, W_s 는 LIM 1차축 철심의 슬롯폭, ds 는 슬롯 높이, Z_t 는 치폭, V_1 은 입력전압, r_1, x_1 은 1차권선 저항과 리액턴스, r_{2s}, x_{2s} 는 단부효과를 고려한 등가 2차 저항과 리액턴스를 나타내고 특성식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[3-4].

$$\text{동기 와트} : P_{el} = m V_1^2 r_{ze} / Z_1^2 [W] \quad (1)$$

$$\text{추력} : F_x = m V_1^2 r_{ze} / V_s Z_1^2 [N] \quad (2)$$

$$\text{출력} : P_o = (1-s)m V_1^2 r_{ze} / Z_1^2 [W] \quad (3)$$

$$\text{1차 입력} : P_1 = m V_1^2 (r_1 + r_{ze}) / Z_1^2 [W] \quad (4)$$

$$\text{1차 동손} : P_{c1} = m V_1^2 r_1 / Z_1^2 [W] \quad (5)$$

$$\text{2차 동손} : P_{c2} = sm V_1^2 r_{ze} / Z_1^2 [W] \quad (6)$$

$$\text{피상 입력} : P_A = m V_1^2 / Z_1 [VA] \quad (7)$$

$$\text{효율} : \eta = P_o / P_1 = (1-s) r_{ze} / (r_1 + r_{ze}) \quad (8)$$

전자기 펌프에 사용된 2차측 금속은 용융아연을 사용하였고 표 1에 용융아연의 물성치를 나타내었다.

표 1. 용융아연의 물성치

재료	용융 온도 [K]	전기 전도도 [S/m]	열 전도도 [w/m·k]	점도 [kg/m·s]	밀도 [kg/m ³]	비열 [J/kg·K]
아연	692.5	2670000	49.5	0.00413	6575	481

전자기 펌프에 사용된 4극 LIM은 공극 3mm이고, 덕트 높이 30mm, 폭 80mm, 슬립 1로 하여 해석한 결과 용융아연에 작용하는 힘은 27.3[N]이다.

2.2 전자기력을 고려한 유동해석 방정식

덕트 내 유체유동방정식에서 전자기장에 의한 Lorentz force를 고려한 수정된 유체 유동방정식과 연속방정식을 고려하여 식 (10)에 나타내었다[5].

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (10)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (11)$$

\vec{f} : Lorentz force [N/m³]

\vec{J} : 전류밀도 [A/m²]

\vec{B} : 자속 밀도 [T]

P : 압력 [Pa]

\vec{V} : 속도 [m/s]

식(9)는 Lorentz force 방정식이며, 이 항을 Navier-Stokes 방정식에 추가시키는 형태로 결합하였다. 경계조건으로는 No slip condition으로 하였다. 유도 전류와 전기장은 y방향의 성분만 있고, 속도와 자기장

방향에 수직이다. 맥스웰 방정식으로부터 정상상태인 경우 $\nabla \times \vec{E} = 0$ 이므로, E_y 는 상수가 된다. 그러므로 옴의 법칙으로부터 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\vec{J}_y = \sigma (\vec{E}_y + \vec{v}_z \vec{B}_x) \quad (12)$$

여기서, σ [S/m]는 전기 전도도이다.

덕트 내부의 유동 해석에서 관심을 가져야 할 부분은 압력강하로 전자기 펌프가 요구하는 동력과 직접적인 관계가 있으며, 식 (16)과 같다.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (13)$$

$$R_e = \frac{\rho w D_h}{\mu} \quad (14)$$

$$f = 64 R_e^{-1} \quad : \text{층류일 때} \quad (15a)$$

$$f = 0.184 R_e^{-0.2} \quad : \text{난류일 때} \quad (15b)$$

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \quad (16)$$

ΔP : 압력강하 [Pa]

w : z방향 속도 [m/s]

ρ : 밀도 [kg/m³]

μ : 점성계수

L : duct 길이 [m]

f : 마찰계수

R_e : Reynolds 수

D_h : 수력지름 [m]

P : 유체가 덕트벽과 접촉하는 둘레의 길이 [m]

또한 덕트의 형상에 의해 압력강하가 되는데 이는 90°의 각으로 꺾인 부분에서 생기는 것으로 식 (17)과 같고, 식 (11)에서 덕트에 미치는 총 압력강하는 식 (18)에 나타내었다.

$$\Delta P' = \frac{1}{4} \rho w^2 \quad (17)$$

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \cdot 4 \cdot \frac{1}{4} \rho w^2 \quad (18)$$

2.3 이산화 방정식

압력과 속도의 해를 구하기 위해 압력을 가정하고 그 가정한 압력 값으로 속도를 구하여 생성항이 0이 되도록 하여 수렴해를 찾는 방법으로 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였다[6]. 위 식(11)의 Navier-Stokes Equation에 대한 이산화 방정식은 식 (19)와 같다[7].

$$a_n w_c^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + b + (p_p^* - p_e^*) A_e \quad (19)$$

z축 방향 속도에 대한 이산화방정식을 정리하게 되면 식 (20)으로 나타낼 수 있다.

$$w_n = w_i^* + d_i(p'_P - p'_T) \quad (20)$$

여기서 *는 가정된 압력, 속도이고 p' 은 압력수정이다.

$$p = p^* + p' \quad , \quad w = w^* + w' \quad (21)$$

p^* : 가정된 압력 [Pa]

p' : 압력수정 [Pa]

w^* : 가정된 z축방향의 속도 [m/s]

w' : 속도수정 [m/s]

이때 계산된 속도 값은 가정된 속도의 값으로 압력강하와 Lorents force의 값을 결정한다. 가정된 속도와 결과 값의 평균 유속이 일치 하지 않으면 다시 처음부터 반복 계산하여 정확한 값을 얻도록 하였다. 가정된 속도와 결과 값의 오차가 1% 이내면 수렴하는 것으로 그 결과 값을 출력하게 하였다.

3. 유동 특성 해석 및 검토

덕트는 전체시스템에서 각 변의 z축 길이가 1m인 정사각형으로 하였다. 그림 4는 전체시스템에서 LIM이 있는 부분이고, 덕트 내부 유체의 속도는 완전발달 상태로 가정하여 해석 하였다.

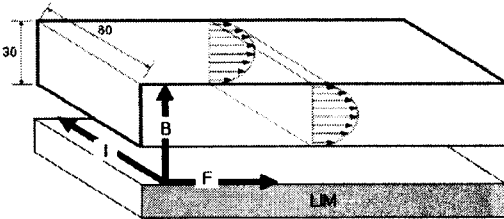
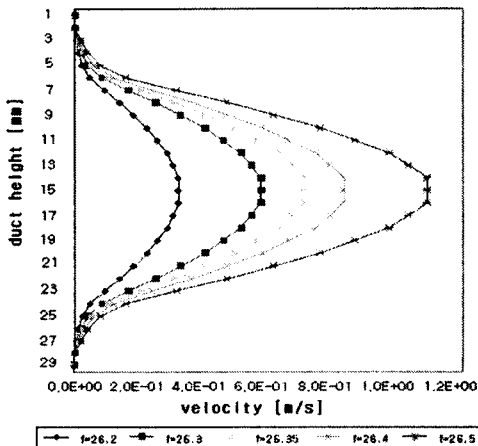
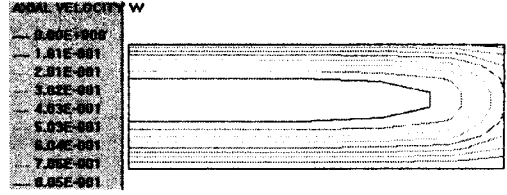


그림 4. 단면적이 0.0024m²인 사각덕트

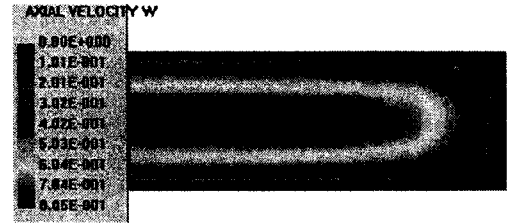
그림 5의 (a)는 덕트 내부의 유동에 작용하는 힘의 세기가 변화하는 것을 나타낸 것으로, 입구에서부터 점차 정상 유동으로 변화는 과정을 표현 하였다. (b)는 속도 곡선으로 속도장은 상하 대칭으로 사각덕트 내에서는 1/4만을 해석해도 해석해를 얻을 수 있다. (c)는 속도분포를 색으로 나타낸 것으로 벽면에서의 마찰에 의해 속도가 항상 0의 값을 가진다. 해석한 결과 덕트 내부의 평균속도는 0.449 m/s이다.



(a) 덕트 내부 속도분포(Streamline)



(b) 속도 분포 곡선



(c) 속도 분포

그림 5. 덕트 내부 속도분포

4. 결 론

본 논문에서는 선형유도전동기의 전자기력을 이용하여 유동특성을 해석하였다. 유체순환 시스템내의 유체에 미치는 전자기 방정식과 유동 방정식을 결합하여 전자기력이 유체의 특성에 미치는 영향을 해석하였다. 해석에 사용된 유체는 용융 아연으로 전자기력의 크기에 따라 유체의 속도를 계산하였다. 향후 이 시스템에 사용되는 전자기 펌프의 성능에 따라 유체의 다양한 특성(위치별 3차원 속도, 압력 및 유량 등)을 난류를 고려하여 해석할 예정이다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 김희령, 김용균, 이용범, 최석기, 남호윤, "환단면 선형유도 전자펌프의 유로 내 MHD 동특성 해석," 한국원자력학회, 춘계학술대회 논문집, pp.672-677, 1998.
- [2] Hoon Ki Choi, Geun Jong Yoo, Tar Bong Park, Jae Jong Eun, Nam Young Jang, "Numerical Study on Magnetohydrodynamic Flow in Linear Induction EM Pump, Engineering Resrarch & Technology," vol.3, pp.51-57, 2003.
- [3] 전문호, 김정현, 김민석, 김창업, "선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프 실험," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.691-692, 2006.
- [4] 전문호, 차재걸, 김창업, "유전알고리즘과 반응표면법을 이용한 LIM 최적설계," 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp.40-42, 2004.
- [5] C.A. Borghi, A. Cristofolini, and M. Fabbri, "Study of the Design Model of a Liquid Metal Induction Pump," IEEE Trans. Magn., vol. 34, no. 5, 1998.
- [6] Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer And Fluid Flow, pp.126-133, 1980.
- [7] Suhas V. Patankar, Computation Conduction and Duct Flow Heat Transfer, pp.23-25, 2005.