

전자기펌프의 사각덕트 내의 유동특성 해석

권정태[†], 임효재*, 김창업**(호서대), 김서현***, 김민석***, 전문호***(호서대 원)

Analysis of The Liquid Metal Flow in the Rectangular Duct of an Electromagnetic Pump

J.T.Kwon[†], H.J.Lim*, C.E.Kim**, S.H.Kim***, M.S.Kim***, M.H.Jeon***
Hoseo University

Key Words: Electromagnetic Pump(전자기펌프), Flow Characteristics(유동특성),
Magnetohydrodynamics(전자기수력학)

Abstract

The effect of Lorentz force(Electromagnetic force) on the liquid metal flow has been investigated. 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 the rectangular duct of an electromagnetic pump was analyzed with the Lorentz force varied.

기호설명

P	: 압력 [Pa]	\bar{B}	: 자속 밀도 [T]
ΔP	: 압력강하 [Pa]	p^*	: 가정된 압력 [Pa]
f	: 마찰인자 [-]	p'	: 압력수정 [Pa]
L	: 덕트의 총 길이 [m]	w^*	: 가정된 z축방향의 속도 [m/s]
D_h	: 수력지름 [m]	w'	: 속도수정 [m/s]
ρ	: 유체의 밀도[kg/m^3]	\bar{F}	: Lorentz Force [N/m^3]
p	: 관의 둘레[m]	σ	: 전기전도도 [s/m]
u, v, w	: x, y, z 방향 속도 [m/s]		
\bar{J}	: 전류밀도 [A/m^2]		

1. 서론

[†] 책임저자, 회원, 호서대학교 기계공학과

E-mail: jtkwon@office.hoseo.ac.kr

TEL: (041)540-5803 FAX: (041)545-5808

* 호서대학교 기계공학과

** 호서대학교 전기공학과

*** 호서대학교 대학원

MHD(Magnetohydrodynamics)에 관련된 추진 연구로는 MHD추진, 전자기 펌프 및 전자기 유량계 등을 들 수 있다. MHD추진 방식은 기존에 추진기에 비해 구동부가 없어 소음과 진동이 극히 적고, 또는 케비테이션 현상이 없는 등 장점으로 인해 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만 강한 자기

장을 발생시킬 수 있는 초전도자석이 MHD추진의 필수조건으로 제기된 이후 한 때 주춤하였으나 MHD추진기를 장착한 선박을 제조하여 실험상에서 실험을 하기에 이르렀고 그 실용가능성이 확인되었다.⁽¹⁾

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 나뉘어진다. 이 두 펌프는 금속 유체 내에 전류와 자기장이 서로 교차하도록 하여 이들과 수직방향으로 추진력을 생성 시켜 유체를 구동하도록 하는 기본 원리를 이용하여 있으나, 유도형 펌프는 단상 또는 다상 교류로 발생시킨 진행 자기장에 의해 전극 없이 액체 금속 내에 전류를 유기 시켜서 하나의 전원장치만으로 전류와 자기장을 동시에 얻을 수 있는 장점 때문에 주로 많이 이용되고 있다.⁽²⁾

전자기 펌프는 덕트 내에 흐르는 액체금속에 대하여 수직하게 전류 및 자기장을 발생시키게 되며, 액체금속에 대한 구동력은 플레밍의 오른손 법칙에 의하여 덕트 내에 축 방향으로 발생하게 되며 발생된 힘에 의해 전도성의 액체금속은 이송하게 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(Magneto hydrodynamics) 유동의 물리적 특성을 규명 하였으며 유동장의 해석에 중점을 둔 연구는 기초적 성격의 연구와 병행하여 진행되어 왔다. 국내·외 연구원들에 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 않는 상황이므로 액체금속로의 개발에서 요구되는 MHD 유동현상의 해석 방법론은 자체적으로 개발되어야 할 필요성이 있다.⁽³⁾

전자기 유량계 또한 MHD를 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^(4,5)

본 논문은 전자기 펌프를 이용하여 덕트내에 있는 액체금속에 Lorentz Force를 적용 시켜 유동에 어떠한 영향을 주며 또한 이때 발생하는 유동을 분석하고 유도 자기장과 유체 유동장의 결합하여 추력의 의한 유동특성을 해석하였다. 해석에 대한 가정으로는 덕트의 모든 구간에서의 단면적은 동일하고, 유동은 완전 발달되었다고 가정하였다.

2. 수치해석

2.1 전자기력을 고려한 유체유동방정식

본 논문의 목적인 전자기 펌프를 이용하여 액체금속 유동 해석을 위해 덕트 관내 유체유동방정식에서 전기장에 의한 Lorentz Force를 고려한 수정된 유체방정식(Modified Navier-Sokes Equation)과 함께 유동의 연속성을 나타내는 연속방정식을 고려하여 전자계-유체방정식의 결합한 것을 다음의 식에 나타내었다.

Lorentz Force Equation

$$\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

Continuity Equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (2)$$

Modified Navier-Stokes Equation

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

z축 방향의 속도에 대한 이산화방정식에 Lorentz Force를 추가함으로써 유동장과 전자장을 결합하였다. $\vec{J} \times \vec{B}$ 은 유도전류와 가해주는 자기장과 반응에 의해서 생긴 전자기력(Lorentz Force)을 나타낸다.

유도전류와 전기장은 Y방향의 성분만 있고, 속도와 자기장 방향에 수직이다. 맥스웰 방정식의

로부터 정상상태인 경우 $\nabla \times \vec{E} = 0$ 이므로, E_y 는 상수가 된다. 그러므로 옴의 법칙, $\vec{J} = (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ 로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\vec{J}_y = \sigma(\vec{E}_y + \vec{v}_x \vec{B}_x) \quad (4)$$

여기서 σ [S/M]는 전기 전도도이다.

2.2 수치해석 알고리즘

위의 Navier-stokes Equation에 대한 이산화 방정식은 아래와 같다.

$$a_n w_e^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + b + (p_p^* - p_E^*) A_e \quad (5)$$

z 축 방향 속도에 대한 이산화방정식이다. 이 방정식을 정리하게 되면 다음과 같다.

$$\omega_n = \omega_r^* + d_r(p_p' - p_r') \quad (6)$$

여기서 *는 가정된 압력, 속도이고 p' 은 압력수정이라 한다.

$$p = p^* + p', \quad w = w^* + w' \quad (7)$$

압력과 속도 값을 구하기 위해 압력을 가정하고 그 가정한 압력 값으로 가정된 속도를 구한다. 가정된 압력과 속도에 수정방정식을 더해감으로써 점차 해를 찾아가는, 즉 생성항인 b 를 0에 가깝게 함으로써 수렴해를 찾아가는 것이 SIMPLE 알고리즘인 것이다.⁽⁶⁾

수치해석에는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고 그 계산에 있어서는 TDMA(Tri Diagonal-Matrix Algorithm)을 이용하여 수행하였다. 가정한 속도 값에 대해 실험 loop의 ΔP 와 Lorentz Force의 값을 결정한다. 가정된 속도와 결과 값인 평균 유속이 일치 하지 않으면 다시 처음부터 반복 계산되어 가정된 속도와 결과 값이 오차 1%내에 들면 수렴하게 되어 결과 값을 출력하게 하였다.

2.3 압력강하

관 유동의 해석에서 관심을 가져야 하는 부분이 압력강하이다. 유동을 유지하기 위한 펌프의 요구동력과 직접적인 관계가 있기 때문이다. 유동 길이가 L 인 관 내부를 지나는 동안의 압력강하는 다음과 같이 표현된다.

$$D_h = \frac{4A}{p}$$

$$Re = \frac{\rho w D_h}{\mu}$$

$$f = \frac{64}{Re} \text{ (층류)}, \quad f = 0.184 Re^{-0.2} \text{ (난류)}$$

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho w^2}{2} \quad (8)$$

또한 관로의 형상에 의한 압력강하가 있는데 본 논문에 조건인 90도에서의 압력강하는 다음과 같이 정리 된다.

$$\Delta P = \frac{1}{4} \rho w^2 \quad (9)$$

본 연구를 위해 개념 설계한 MHD유동 특성 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

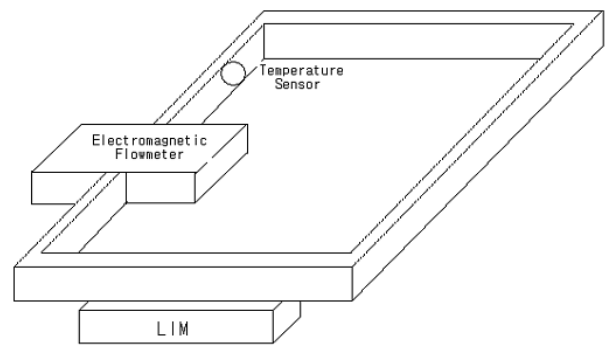


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

실험 loop에 미치는 총 압력강하는 (1)+(2)로 최종 압력강하는 다음과 같다.

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho w^2}{2} + 4 \frac{1}{4} \rho w^2 \quad (10)$$

3. MHD 유동특성해석

3.1 덕트 설계와 용융금속

LIM(Linear Induction Motor)에서의 전자력은 유한요소법을 사용하여 그 해를 구하였다. 본 논문에서 사용된 전체시스템 개략도는 덕트 아래 부분에 설치된 편축식 LIM의 전자력에 의하여 용융금속이 덕트를 흐르도록 하였다. Fig.1은 전자기 펌프 시스템의 개략도이다. LIM은 4극, 3상 220v, 3kVA의 편축식으로 사용하였다.

덕트의 크기는 $b=0.08[m]$, $h=0.03[m]$, $L=4[m]$ 로 수치 값을 정하고 해석하였다.

덕트는 전체 시스템에서 각 변의 z축 길이가 1[m]의 정사각형으로 하였다. Fig. 2는 수치해석 모델의 덕트의 일부분(LIM이 작용하는 부분)이다. 덕트 내의 유체의 속도는 완전 발달된 정상상태라고 가정하여 해석하였다.

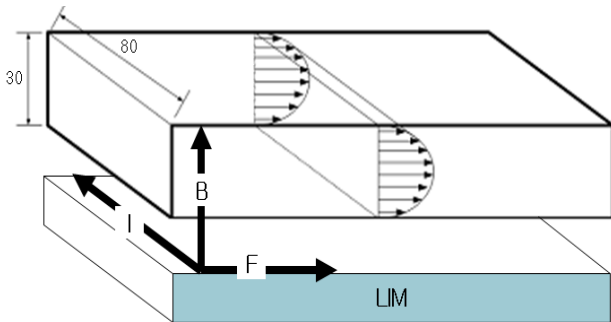


Fig. 2 The rectangular duct $A=0.0024[m^2]$

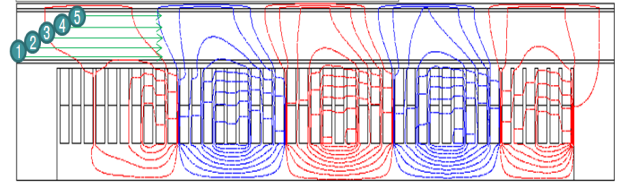
전자기 펌프에 사용된 2차측 금속은 용융아연(Zn)을 사용하였고 물성치는 다음과 같다.

Table 1 Properties of liquid metal(Zn)

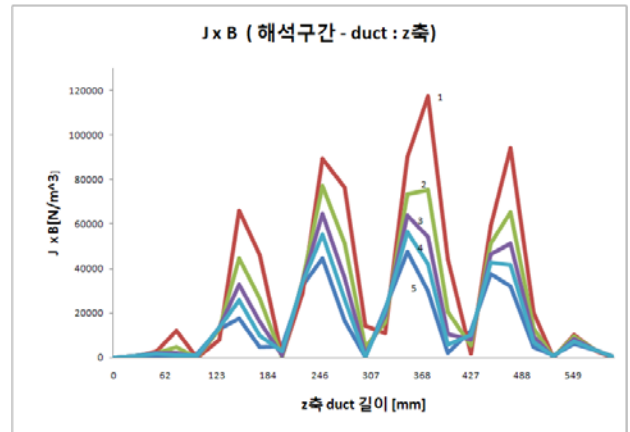
재료	용융 온도 [K]	전기 전도도 [S/m]	열 전도도 [W/m·k]	점도 [kg/m·s]	밀도 [kg/m³]	비열 [J/kg·K]
Zn	692.5	2670000	49.5	0.00413	6575	481

3.2 전자력 해석

전자기 펌프에 사용된 4극 LIM은 공극 3mm로 하여 계산한 결과 덕트에 작용하는 추력은 27.3[N]이 나왔으며, 각각의 위치마다 Lorentz Force의 변화를 Z축과 Y축으로 나누어 표현한 것을 Fig 3, Fig4에서 나타내었다.

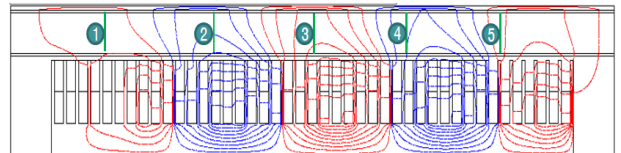


(a) Electromagnetic field of the test section(Z-direction)

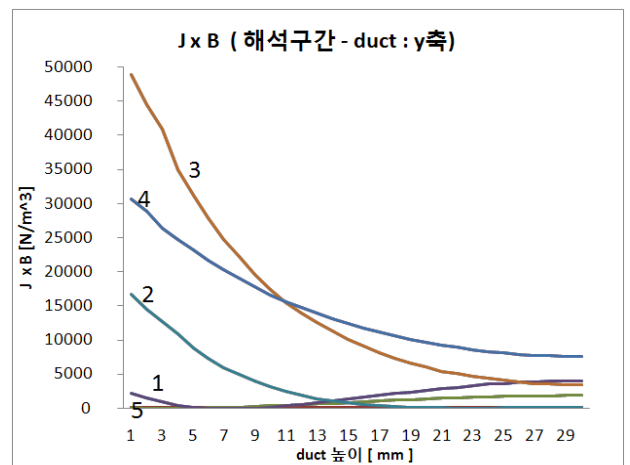


(b) Z-directional Lorentz force $\vec{J} \times \vec{B}$

Fig. 3 Z-directional electromagnetic force distribution



(a) Electromagnetic field of the test section(Y-direction)



(b) Y-directional Lorentz force

Fig. 4 Y-directional electromagnetic force distribution

또한, 등가회로 법칙을 이용한 전자기력은 다음과 같다.

$$F_x = \frac{P_{g1}}{V_s} = \frac{mr_{2e}I_1^2}{V_s} = \frac{mV_1^2 r_{2e}'}{V_s Z_1^2} = \frac{3 \times 127.01^2 \times 1.8927}{12.96 \times 16.089^2} = 27.3 \text{ [N]} \quad (11)$$

여기서 P_{g1} 는 동기 와트, r_{2e} 는 등가 2차 저항, Z_1 는 1차단자에서의 전 임피던스, r_{2e}' 는 단부효과를 고려한 2차 저항, V_1 는 1차단자전압, V_s 는 동기속도를 나타낸다.

위의 결과를 이용하여 동기속도 V_s 와 Lorentz force의 관계를 구하면 Fig.5와 같다.

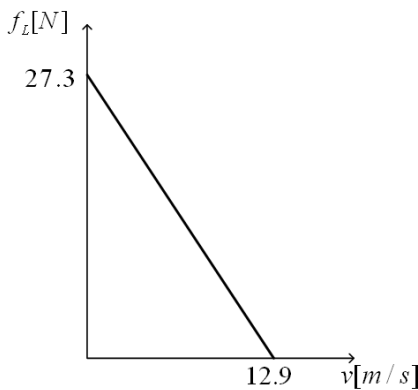
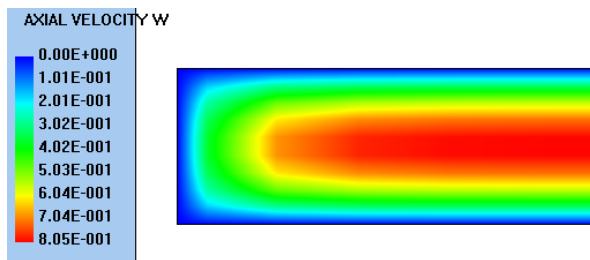
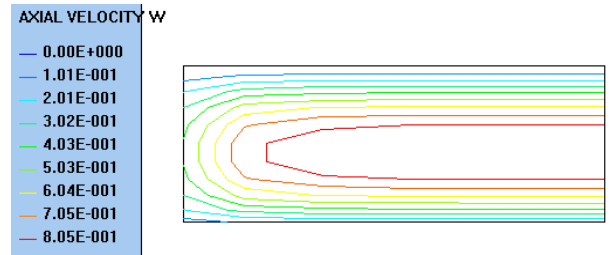


Fig 5. The relation between Lorentz force and velocity

Lorentz Force가 덕트 유동에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 힘의 세기에 대한 속도 변화를 Fig 6,7에 표현해 놓았다.⁽⁷⁾



(a) velocity (Fill)



(b) velocity (Streamline)

Fig 6. Velocity distribution

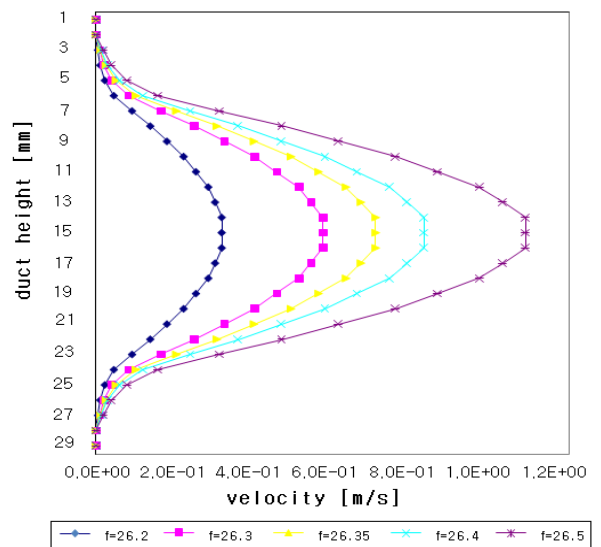


Fig 7. The effect of Lorentz force on velocity distribution

4. 결론

본 논문은 전자기 펌프를 이용해 전자기력이 사각덕트에 미치는 영향에 대한 해석을 하기 위함이 그 목적이다. Lorentz force를 Navier-Stokes 방정식의 force 항에 추가하여 유동 흐름에 전자기력의 영향을 해석할 수 있도록 하였다. 전자기력은 유한요소법으로 계산하였으며 그 힘을 전체 체적에 대한 힘 Lorentz Force로 바꾸어 유동해석을 하였다. 덕트에 흐르는 유체는 용융아연을 사용하였으며, 평균 유속은 0.449[m/s]을 구할 수 있었다.

향후에는 보다 다양한 유속 범위에 대하여 MHD 해석 및 검증 실험을 수행할 예정이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Noh, C. J., Kim, Y. S., Kong, Y.S., Lee, S. K., 1993, "An Experimental Study on MagnetoHydroDynamics Flow in MHD Propulsion System," Vol. 17, No 3 pp. 186~195.
- (2) Kim, H. R., 1988, "MHD Dynamic Analysis and Development of Design Method of an Annular Induction Electromagnetic Pump, *Korea Atomic Energy Research Institute*," pp. 672~677.
- (3) Choi, H. Ki., Yoo, G. J., Park, Tar. Bong., Eun, J. J., Jang, Nam. Young., 2003, "Numerical Study on MagnetoHydrodynamic Flow in Linear Induction EM Pump," *Engineering Research & Technology*, Vol. 3, pp. 51-57.
- (4) Cha, J. E., Ahn, Y. C., Seo, K. W., Nam, H. Y., Choi, J. H., Kim, M. H., 2003, "An experimental study on the characteristics of electromagnetic flowmeters in the liquid metal two-phase flow." *Flow Measurement and Instrumentation* 14, pp. 201~209
- (5) Cha, J. E., Ahn, Y. C., Seo, K. W., Nam, H. Y., Choi, J. H., Kim, M. H., 2003, "The Performance of Electromagnetic Flowmeters in a Liquid Metal Two-Phase Flow," *Nuclear Science and Technology*, Vo. 40, No. 10, pp. 744~753
- (6) Suhas V. Patankar, 1980, Numerical Heat Transfer And Fluid Flow, pp.113-137.
- (7) Suhas V. Patankar, 1991 Computation Conduction and Duct Flow Heat Transfer