

용융금속 이송용 전자기 펌프의 유동해석 및 실험

최재호[†]·임효재^{*}·김창업^{**}·권정태^{***}

An Experimental and Numerical Analysis of Flow of Electromagnetic Pump for Molten Metal Transport

Jae Ho Choi, Hyo Jae Lim, Chang Eob Kim, Jung Tae Kwon

Key Words: MHD(전자기 유체역학), Electromagnetic Pump(전자기 펌프), Computational Fluid Dynamics(전산 유체역학), Molten Metal(용융금속)

Abstract

This study aims at analyzing the flow characteristics of the electromagnetic pump using a linear induction motor (LIM) for transferring molten metals. The flow characteristics of the pump are simulated by magnetohydrodynamic(MHD) program. In this system, the LIM is used for transferring molten metal by electromagnetic force. The molten metal is treated as the secondary part of the LIM. Since the LIM produces an electromagnetic force in the duct, the molten metal can flow from the furnace to the reservoir. The flow characteristics of the pump are analyzed using MHD program for magnetic field of 0.1[T] in duct. In order to prove the analysis, we made a prototype electromagnetic pump using LIM.

기호설명	\vec{H} : induction field
	q : electric charge density(c/m^2)
$C_1, C_2, C_3, C_\mu, C_\lambda$: $k-\epsilon$ 모델의 실험상수	그리스 문자
G_b, G_k : k, ϵ 방정식의 생성항	β : 열팽창계수 [1/K]
g_i, g_j : i방향의 중력가속도[m/s ²]	δ_{ij} : Kronecker delta
k : 난류운동에너지[m ² /s ²]	ϵ : 난류운동에너지 소산율 [m ² /s ²]
P : 압력 [Pa]	μ_t : 층류/난류 점성계수 [Ns/m ³]
T : 온도 [K]	ρ : 밀도 [kg/m ³]
u, v, w : x, y, z 방향 속도 [m/s]	$\sigma_k, \sigma_\epsilon$: 난류 Prand수 및 Schmidt수
x^i : i방향 직교좌표계 [m]	μ : magnetic permeability
\vec{J} : electric current density [A/m ²]	ξ : electric permeability
\vec{B} : electric magnetic field	σ : electrical conductivity
\vec{E} : electric field [v/m]	ψ : scalar potential

† 호서대학교 대학원 기계공학과
 * 책임저자, 회원, 호서대학교 기계공학과
 E-mail : hjlim@hoseo.edu
 TEL : (041)540-5802 FAX : (041)540-5808
 ** 호서대학교 전기공학과
 *** 회원, 호서대학교 기계공학과

1. 서론

선형 유도전동기(LIM, Linear Induction Motor)

는 19세기에 발명되어 초고속 운송용 전철, 자동 반송 장치 등에 사용되고 있다. 선형유도전동기는 회전운동을 직선 운동으로 변환하는 기어, 풀리, 벨트 등이 없이 직접 직선 추력을 발생할 수 있다. 만약 이송하는 물질이 액체인 경우 용융금속으로 된 2차 축의 유동특성이 필요하다. 본 연구에서는 2차 축의 해석을 위해 수치해석적인 방법을 이용하며, 실험적인 검증을 통하여 이를 증명한다.

2. 수치해석방법

2.1 수치해석

본 연구에서는 LIM에서 발생된 자기장에 따른 용융금속의 토출량과 유속을 수치적으로 규명하고자 한다. 3차원 정상상태의 열 및 유동특성을 지배하는 방정식을 텐서형태로 나타내면 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + \rho g_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 하첨자 $i = 1, 2, 3$ 은 각각 x, y, z 좌표를 의미한다. 식 (2)의 Reynolds 응력항 $(\overline{\rho u'_i u'_j})$ 은 각각 난류유동을 지배하는 요소로서, 와-점성 근사에 의하면 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서 μ_t 와 α_t 는 난류 와점성계수 및 와확산계수로서

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

이다. 식 (4)에서 μ_t 를 구하기 위해서는 지배방정식의 닫힌문제를 해결하여야 하는데, 이 연구에서는 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용한다. 이때 난류운동에너지 (k)와 이의 소산율(ϵ) 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i k) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \\ + C_1 \frac{k}{\epsilon} (G_k + G_b)(1 + C_3 R_f) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에 나타난 G_k 와 G_b 는 난류응력 및 부력에 의한 생성에너지로서 다음과 같다.

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (7A)$$

$$G_b = -\beta g_i \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (7B)$$

본 연구에서 적용한 표준 $k-\epsilon$ 난류모델에 사용된 계수 및 함수는 가장 기본적인 값들을 사용한다.

Lorentz force

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (N/m^2)$$

즉, \vec{J} 와 \vec{B} 를 알면 Lorentz force \vec{F} 를 구하여 유동장을 해석할 수 있다.

\vec{B} 는 Maxwell 방정식에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

여기서 induction fields인 \vec{H} 와 \vec{D} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$$

$$\vec{D} = \xi \vec{E}$$

일반적으로 \vec{J} 는 다음의 2가지 방법으로 계산된다.

Magnetic induction equation

ohm's의 법칙과 Maxwell방정식에 의해 기술되며,

\vec{J} 는 ohm's의 법칙에 의해

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}) \quad (8)$$

로 나타낸다.

ohm의 법칙과 Maxwell방정식에 의해 induction

equation은 다음 식으로 기술된다.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{U} \quad (9)$$

자기장 \vec{B} 를 계산하고, Ampere법칙을 이용하여 \vec{J} 를 계산한다.

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \quad (10)$$

일반적으로 MHD 문제에 있어서 자기장 \vec{B} 는 외부에서 주어지는 \vec{B}_0 와 유체움직임으로 작용하는 유도장 \vec{b} 로 구성된다.

Electric potential equation

\vec{J} 는 ohm의 법칙과 electric potential equation을 이용하여 구할 수 있다.

일반적으로 \vec{E} 는 다음 식으로 나타낸다.

$$\vec{E} = -\nabla\psi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (11)$$

이 방법은 정상상태(steady)일 때, 사용된다.

정상상태일 때는 \vec{B}_0 는 \vec{b} 보다 훨씬 크기 때문에 \vec{b} 를 고려하지 않아도 된다.

따라서 식(8)은 다음으로 나타낸다.

$$\vec{J} = \sigma(-\nabla\psi + (\vec{U} \times \vec{B}_0)) \quad (12)$$

ψ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = (\vec{U} \times \vec{B}_0)_{boundary} \cdot \vec{n}$$

위에서 언급했듯이 정상상태로 가정하였기 때문에 Duct 안 유동을 계산하는데 사용된 지배 방정식은 (12)식이다.

따라서 이 논문에서는 Lorentz force와 Electric potential equation을 이용하여 유동 장을 계산한다.

2.2 수치해석 조건

본 연구에서는 LIM 펌프에 인가된 전류에 의해 발생된 자속에 의하여 압력차가 발생한다. 펌프

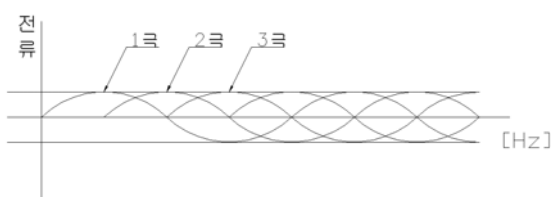


Fig. 1 Three-Phase Current

에 사용된 LIM은 60Hz의 교류(AC) 3상 모터이다. 60Hz 3상인 LIM의 전류 흐름을 보면 Fig.1과 같다.

Fig.1에서 보는바와 같이 실제로 사용되는 LIM의 상태는 초당 60번의 극수가 바뀌는 비정상 상태(unsteady)이다. 그러나 극이 3상 이므로 거의 직류(DC)와 같은 효과를 내고 있다. 직류는 시간에 따라 일정한 전류를 흘려보내기 때문에 시간을 고려하지 않는다.

본 연구에서는 가열로에서 나오는 용융금속을 42°의 기울기를 가진 덕트를 지나 토출이 되도록 하였다. 덕트의 하단에는 LIM이 설치되며 덕트의 크기는 가로, 세로, 길이가 각각 80mm, 30mm, 600mm이다. 격자의 구조는 Fig.2와 같다. 용융금속은 주석과 아연을 사용하였으며 물성은 Table 1과 같다.

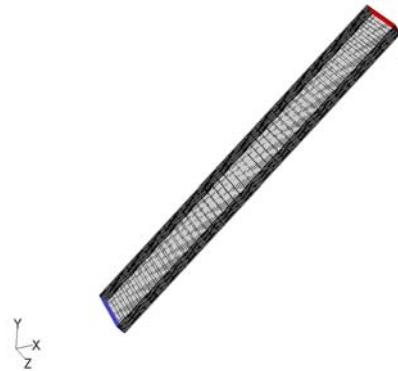


Fig. 2 Hexahedral grid system

Table 1 Properties of Sn and Zn

	Melting point K	Electric conductivity 1/ohm · m	Thermal conductivity w/m · k	Viscosity kg/m · s	Density kg/m ³	Specific heat J/kg · k
Sn	505	2110000	30.0	0.005382	6980	250
Zn	692.5	2670000	49.5	0.004131	6575	481

3. 결과 및 고찰

3.1 입구단 압력

아연은 밀도가 크므로 중력의 영향을 많이 받게 된다. 실험에 사용되는 덕트는 42°의 기울기로 출구단보다 입구단이 하단에 있다. 덕트 하단에 용융금속으로 인한 압력은 덕트의 수직높이에 밀도와 중력가속도를 곱해서 구해지며, 그 값은 주석의 경우 0.2702atm이고 아연의 경우 0.2545atm이다.

3.2 용융금속에 따른 변화

자속밀도 0.1T를 덕트에 주어 덕트내 용융금속의 유속변화를 계산하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 주석의 입구와 출구에서의 유속분포를 보여준다. 덕트 입구단의 하부는 상부보다 속도가 느리다. 그 이유는 LIM이 덕트 하단면을 완전히 감싸지 못해 인가된 자기장의 양이 적기 때문이다. 덕트 출구의 하부는 상부보다 속도가 크다. 출구에서는 42°로 기울어진 덕트구조에 의해 용융금속이 출구의 하부로 이동하려는 경향이 있기 때문이다. Fig. 5와 Fig. 6은 아연의 속도분포를 보여준다. 전체적인 유동은 주석과 비슷한 양상을 보인다. 유속은 주석보다 약간 빠른 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 덕트 중앙부의 유속을 보여주고 있다. 덕트 중앙부의 유속은 아연이 주석보다 조금 높다. 이는 밀도에 기인한 것이다. 출구에서 토출되는 질량유량은 주석의 경우 5.76kg/s이고 아연의 경우 5.66kg/s이다. 속도는 아연이 조금 크게 나왔지만 밀도가 4000 kg/m³의 차를 보임으로 인해 주석의 질량유량이 100g정도 크게 계산되었다.

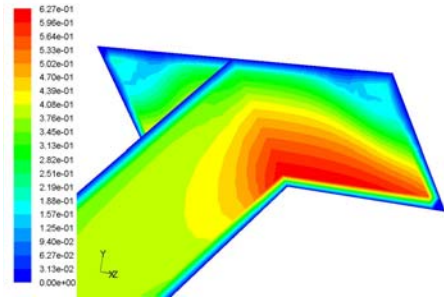


Fig. 4 Outlet velocity of Sn

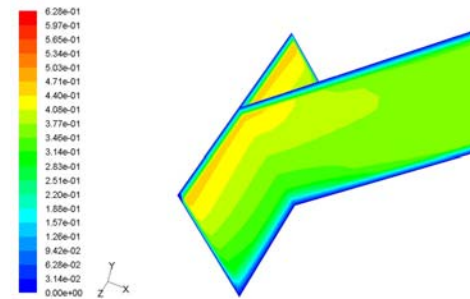


Fig. 5 Inlet velocity of Zn

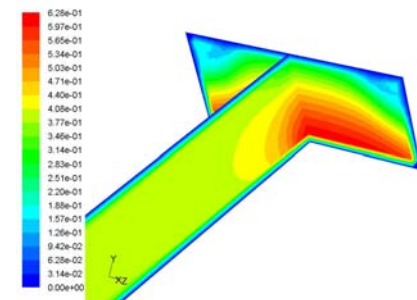


Fig. 6 Outlet velocity of Zn

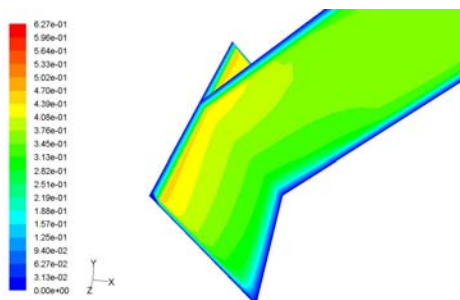


Fig. 3 Inlet velocity of Sn

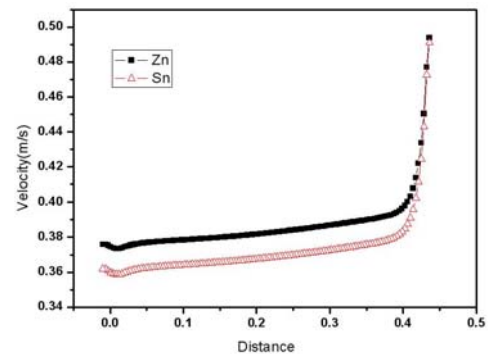


Fig. 7 Velocity distributions along centerline

3.2 실험 및 검토

Fig. 8과 같은 실험 장치를 구성하고 용융 아연을 0.1T의 자속밀도를 주어 실험을 진행 하였다. 실험수행결과 117kg을 82초 동안 토출하였다. 여기서 실험 수행시 토출되는 양이 시간에 따라 변하게 되므로 정상상태가 되었을 때의 정확한 질량유량을 계산하기에는 어려움이 있다. 덕트에서 토출되는 용융금속의 토출량은 선형에 가깝게 증감을 하기 때문에 질량유량은 총 토출질량을 실험수행시간의 절반으로 나누어 계산하면 대략 2.85 kg/s의 질량유량을 갖는다. 유동해석 수행결과와 실험치는 상당한 차이를 보인다. 이는 LIM의 상단으로 올라갈수록 감소되는 자속밀도와 LIM이 작동하면서 용융로 내부의 수위가 낮아짐으로 인해 생기는 입구부의 압력강하를 적용하지 못함에 있다. 또 용융로에서 덕트로 진입하는 구간의 입구저항에 의한 압력강하 또한 고려를 해야 할 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 LIM 펌프의 실험 및 유동해석에 대해 기술하였다. MHD에 의해 LIM 펌프에서 발생하는 덕트내의 유동을 해석하였고 해석을 검증하기 위해 LIM 펌프를 제작하여 실험을 수행하였다. LIM 펌프의 자속이 일정할 때 유속은 용융금속의 밀도에 반비례한다. 해석에 의한 질량유량은 5.66kg/s이고 실험에 의한 질량유량은 2.85kg/s로 많은 차이를 보인다. 이는 LIM 펌프의 상단으로 올라갈수록 감소되는 자속밀도와 LIM이 작동하면서 용융로 내부의 수위가 낮아짐으로 인해 생기는 압력강하를 적용하지 못함에 있다.

추후 자속밀도의 변화량과 용융로내의 압력강하를 고려하여 해석을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-088) 주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

- (1) O. Tsukamoto, Y. Tanaka and S. Sato, 1991, "Development of Superconduction Motor for steel making Processes," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 27, No. 2, pp.2248~2251.
- (2) Jeon, M. H., Kim, M. S., Kim, J. H., Kim, C. E., 2006, "Experiments and Characteristic Analysis of Electromagnetic Pump using LIM," *KIEE, EMECS*, pp. 161~163.
- (3) C. A. Borghi., A. Cristofolini, and M. Fabbri., 1998, "Study of the Design Model of a Liquid Metal Induction Pump," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp. 2956~2959.
- (4) Fluent Inc, 2005, "Magnetohydrodynamics Module Manual" Fluent 6.2, Lebanon, NH, U.S.A.
- (5) Cha, J. E., Cho, C. H., Kim, H. R., and Song. T. Y., 2003, "Preliminary Design of Dynamic Corrosion-Facility for Lead-Bismuth Eutectic," *KNS, Proceeding in Spring Conference*, pp. 126

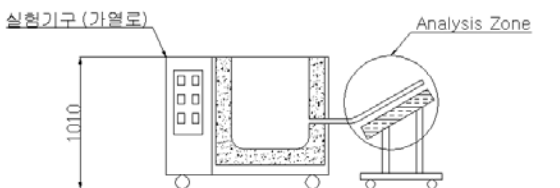


Fig. 8 Experimental apparatus