

# 액체금속 이송용 전자기 펌프 설계를 위한 유동해석

권 정 태<sup>†</sup>, 임 효 재, 김 서 현\*, 남 택 훈\*, 김 창 업\*\*

호서대학교 기계공학과, 호서대학교 기계공학과 대학원\*, 호서대학교 전기공학과\*\*

## Liquid Metal Flow Analysis for Electromagnetic Pump Design

Jeong-Tae Kwon<sup>†</sup>, Hyo-Jae Lim, Seo-Hyun Kim\*, Taek-Hun Nam\*, Chang-Eob Kim\*\*

Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

\*\*Department of Electrical Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

**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 annular duct of an electromagnetic pump was analyzed with the Lorentz force varied.

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

### 기 호 설 명

$P$  : 압력 [Pa]  
 $\Delta P$  : 압력강하 [Pa]  
 $f$  : 마찰인자 [-]  
 $L$  : 덕트의 총 길이 [m]  
 $D_h$  : 수력지름 [m]  
 $\rho$  : 유체의 밀도[ $kg/m^3$ ]  
 $p_h$  : 관의 둘레[m]  
 $u, v, w$  :  $x, y, z$  방향 속도 [m/s]  
 $\bar{J}$  : 전류밀도 [ $A/m^2$ ]

$\bar{B}$  : 자속 밀도 [T]  
 $P^*$  : 가정된 압력 [Pa]  
 $p'$  : 압력수정 [Pa]  
 $w^*$  : 가정된 x축방향의 속도 [m/s]  
 $w'$  : 속도수정 [m/s]  
 $\bar{F}$  : Lorentz Force [ $N/m^3$ ]  
 $\sigma$  : 전기전도도 [s/m]

### 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 발

† 책임저자, 회원, 호서대학교 기계공학과  
 Tel: +82-41-540-5803; fax: +82-41-545-5808  
 E-mail address: jtkwon@office.hoseo.ac.kr

전시했다.<sup>(1)</sup>

MHD에 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 캐비테이션 현상이 없는 등 장점으로 인해 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만 강한 자기장을 발생시킬 수 있는 초전도자석이 MHD추진의 필수조건으로 제기된 이후 한 때 주춤하였으나 MHD추진기를 장착한 선박을 제조하여 실제 해상에서 실험을 하기에 이르렀고 그 실용가능성이 확인 되었다.<sup>(2)</sup>

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 나뉘어 진다. 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 이 있다.<sup>(3)</sup>

본 논문에서는 전자펌프에 사용된 전자기력과 유동의 특성을 하나의 방정식으로 결합하여 전자기력에 의한 유동특성을 해석하였다. 전자펌프는 장하분배법을 이용하여 설계한 후 설계된 전자펌프의 전자기력은 등가회로법으로 계산하였다. 계산된 전자기력을 유동방정식에 넣어 전자기력이 유체 유동에 속도를 발생시킴으로써 속도에 대한 수치해석을 한 것이다. 전체시스템에서 해석영역은 전자펌프가 직접적으로 영향을 주는 원통형 선형유도전동기(TLIM: Tubular Linear Induction Motor)가 존재하는 한 구간을 설정하여 해석하였다. 해석구간은 해석을 위해 제어체적으로 균일하게 세분화해서 나누었고 유동은 완전발달 상태라고 가정하고 해석하였다. 시스템 내부에 흐르는 유체는 전자기장이 영향을 미칠 수 있도록 용융 금속으로 하였고 전자펌프에서 나오는 전자기장에 의해 발생하는 Lorentz Force가 유체가 흐르는 덕트 내부에 미치는 영향을 특성해석 하였다.

Fig. 1은 탱크에 있는 용융금속이 TLIM에 의해 순환되는 시스템을 간략하게 표현해 놓았다.

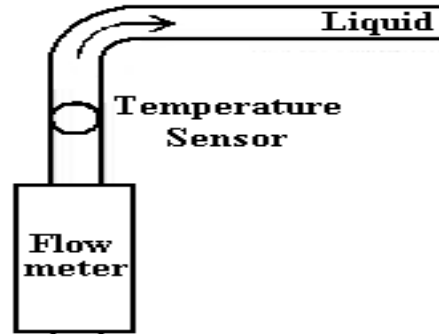


Fig. 1 The schematic system

## 2. 수치해석

### 2.1 전자기력을 고려한 유체유동 방정식

본 논문의 목적은 TLIM의 전자기력을 이용하여 유체 순환장치에 용융금속이 속도를 갖게 되고 그 속도를 해석하는데 있다. 용융금속에 속도를 해석하기 위해서는 덕트 내부 유체유동방정식에 전자기장에 의한 Lorentz Force를 고려한 유체방정식(Navier-Stokes Equation)과 유동의 연속성을 나타내는 연속방정식을 사용하였다.

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

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

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

유도전류와 전기장은 Y방향의 성분만 있고, 속

도와 자기장 방향에 수직이다. 맥스웰 방정식으로 부터 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.

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

여기서  $\sigma$  (S/M)는 전기 전도도이다.

## 2.2 알고리즘

위의 연속 방정식을 2차원 비압축성 유동의 경우 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho ru) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho rv) = 0 \quad (5)$$

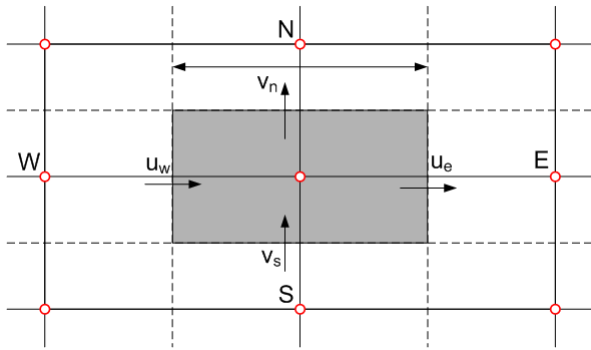


Fig. 2 Control volume

연속 방정식을 Fig. 2에서의 제어체적에 걸쳐서 적분하면 다음과 같다.

$$[(\rho u)_e - (\rho u)_w]r_p \Delta y + [(\rho rv)_n - (\rho rv)_s]r_p \Delta x = 0 \quad (6)$$

위의 Modified Navier-stokes Equation에 속도에 대한 이산화 방정식은 아래와 같다

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho ru) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho ru^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho ruv) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(r\mu \frac{\partial}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(r\mu \frac{\partial}{\partial y}) - r \frac{\partial p}{\partial x} + S_u + F_L \end{aligned} \quad (7)$$

위의 x방향의 운동방정식을 제어체적에 걸쳐 표현하면 다음과 같다.

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b_u + (p_P - p_E) A_e \quad (8)$$

x축 방향 속도에 대한 이산화방정식이다. 이 방정식을 풀기위해 예측된 압력장  $p^*$ 에 의해 계산된 속도를  $u^*$ 이라하면 가정된 이산화방정식은 다음과 같다.

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b_u + (p_P^* - p_E^*) A_e \quad (9)$$

이 방정식을 압력수정과 속도수정으로 정리하게 되면 다음과 같다.

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P - p'_E) \quad (10)$$

where  $d_e \equiv A_e / a_e$

여기서  $p^*, u^*$ 는 가정된 압력, 속도이고  $p'$ 은 압력수정이라 한다.

$$p = p^* + p' \quad u = u^* + u' \quad (11)$$

유체 유동에 관한 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식 즉 식(6)과 (10)을 결합하게 되면 속도의 값을 얻을 수 있는 압력 보정량에 관한 압력수정 방정식을 얻을 수 있다. 압력수정방정식을 이용하여 압력을 가정하고 가정한 압력에 대한 속도를 계산하게 된다. 가정된 압력과 속도에 압력, 속도 수정식으로 보정함으로써 해를 얻어가는 해법을 SIMPLE Algorithm이라 한다.

수치해석에는 SIMPLE Algorithm 을 사용하였고 이산화 된 운동량방정식 및 압력수정방정식의 대수 방정식을 효율적으로 산출하기 위해서 TDMA와 완화법을 조합시켜 계산하였다. 가정된 속도는 유체순화장치의 전체  $\Delta P$ 와 Lorentz Force의 값을 결정하게 되는데 이 때 가정된 속도와 계산된 속도장의 평균값과 일치 하지 않으면 수정방정식에 의해 처음부터 다시 계산하게 되어 수정방정식에 의해 입력된 속도와 결과 값이 수렴조건에 만족을 하게 되면 출력하게 하였다.

## 2.2 압력강하와 Lorentz Force

유체순환장치의 유동 해석에서 가장 중요한 것은 압력강하이다. 유동을 유지하기 위해서 펌프의

요구 동력과 직접적인 관계가 있기 때문이다. 본 논문에서 해석하고자 하는 용융금속의 속도를 나타내게 하는 것은 펌프의 힘이다. 이 힘과 압력강하의 관계를 정리함으로써 속도의 분포를 해석할 수 있는 것이다.

유체순환장치에서 유동 길이가 L인 관 내부를 지나가는 동안의 전체 압력강하는 다음과 같다.

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho u^2}{2} \quad (12)$$

where

$$D_h = \frac{4A}{p} \quad Re = \frac{\rho u D_h}{\mu}$$

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

또한 형상에 의한 압력강하 즉 손실은 무시하고 유동은 완전발달이라고 가정한다.

압력강하와 해석영역에 영향을 끼치는 Lorentz Force와의 관계는 힘의 의해 속도가 형성되면서 속도에 의해 압력강하가 생기는 것이다. 그렇기 때문에 해석할 때 같은 곳에서 계산을 하게 된다. 가정된 속도에 의해 압력강하와 Lorentz Force가 바뀌게 된다.

유동에는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 유동 양식에 따라 층류와 난류이다. 이 두 가지를 나누는데 그 기준이 되는 수를 Reynolds 수라 한다. 관내 유동일 경우에는 대체적으로 Reynolds 수가 4000이하이면 층류 이상이면 난류로 보고 해석을 한다. 층류와 난류 유동은 서로 많은 차이가 있기 때문에 해석할 때 서로 다른 해석이 필요하다. 본 논문은 유동 양식에 맞춰 서로 다른 해석법으로 해석하였다.

### 3. 덕트 설계와 용융금속

Fig. 3은 유체순환장치에 환단면 덕트의 해석영역을 나타낸다. 용융금속이 흐르는 덕트의 바깥부분을 위 아래로 나누어서 중력을 무시하게 되면 속도의 분포는 중심축으로부터 대칭이 되는 동일한 분포가 형성되기 때문에 한쪽만 해석하였다. 환단면 덕트의 단면적 조건은 설계 값과 동일한 유로 덕트의 축 방향 348 (mm), 반경방향 5.2

(mm)으로 하였다.

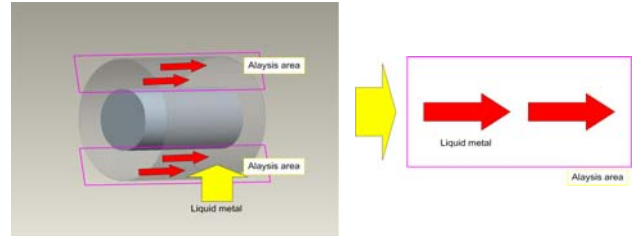


Fig. 3 Analysis Field Annular Duct

본 논문에서 사용한 용융금속으로는 우드 메탈을 사용하였다. 우드 메탈은 다른 금속에 비해 녹는점이 매우 낮은 장점을 가지고 있다. 우드 메탈에 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of liquid metal (Wood Metal)

재료	용융 온도 [K]	전기 전도도 [S/m]	열 전도도 [W/m·k]	점도 [kg/m·s]	밀도 [kg/m³]	비열 [J/kg·K]
Wood Metal	345	1 × 10 <sup>7</sup>	15	0.1261	9700	481

Wood Metal은 기본적으로 Bi, Pb, Sn 그리고 Cd 4가지 금속이 적절한 비율로 섞어서 만든 금속이다. 하지만 한 가지 비율로만 만들어지는 것이 아니고 비율이 바뀔 때마다 또 온도가 바뀔 때마다 물성치가 바뀌기 때문에 한 가지 경우에서 정확한 조건에 물성치를 선택하는 것이 중요하다

## 4. 전자펌프용 TLIM설계

### 4.1 원통형 전자펌프의 출력 결정

Fig. 1의 유체순환장치에서 유속을 0.2 (m/s)로 가정하여 전자펌프의 구동 전력을 결정하였다. 식 (13)은 전자펌프의 구동전력 식이다.

$$P_d = \Delta PQ = F_x U \quad (13)$$

여기서  $F_x$ 는 출력 (N)이고  $U$ 는 유체속도 (m/s)이다. 유체속도는 식(14)와 같이 표현할 수 있다.

$$U = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \times D^2} \quad (14)$$

여기서  $D$ 는 관의 내경이다.

식(13, 14)로부터 구동전력을 구하면 4.85 (W)가 되고 이때의 유량은 10 ( $l/min$ )가 된다. 구동 전력을 전자펌프 제작 시 손실을 고려하여 8 (W)로 설계하였다. 권선의 용량  $P$ 는 설계하고자 하는 전동기의 역률 및 효율을 추정하여야 한다. 역률 효율( $\eta \cdot \cos\phi$ )값을 기존의 자료를 참고하여 0.008로 두고 계산하면 식(15)로 용량을 구할 수 있다.

$$P = \frac{P_d}{\eta \cdot \cos\phi} \quad (15)$$

최종적으로 설계한 전자펌프는 유량 10 ( $l/min$ ), 압력 0.3 (bar), 출력 8 (W), 용량 1 (kVA), 유속 0.2 (m/s), 2극, 3극상 220 (V)이다. 설계 사양은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Design data of TLIM

용량	구동전력	극수	전압	정격속도	주파수	유량율
1 [kVA]	8 [W]	2 극	3상 220V	0.2 [m/s]	60 [Hz]	10 [ $l/min$ ]

#### 4.2 등가회로법을 이용한 TLIM 특성해석

Fig. 4는 전자펌프의 해석 모델을 나타낸 것으로 이것을 등가회로로 나타내면 1차 측 코일 입력 전류에 의해 기자력을 일으키는 전자석에서 코일에 나타나는 권선 저항  $r_1$ , 코어에서 누설되는 누설 리액턴스  $X_1$ , 자화리액턴스  $X_m$ 을 가지고 있으며, 2차 측은 우드메탈이 가지는 저항 성분  $r'_2$ 을 가지게 되며 실제 등가 입피턴스 계산에서는 우드메탈의 유속 및 자기장의 동기속도가 동시에 고려되어 나타난다. Fig. 5은 TLIM의 해석모델을 등가회로로 나타낸 것이다.

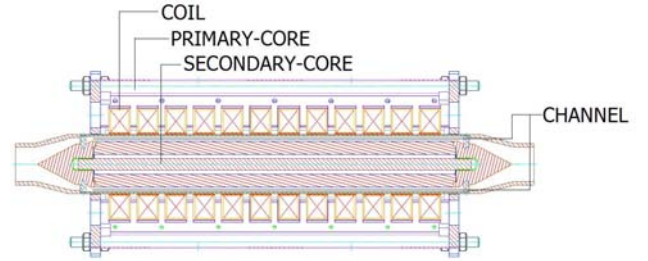


Fig. 4 Analysis model of cylindrical electro-magnetic pump

Fig. 5 Equivalent circuit of electro-magnetic pump

각각의 등가저항 및 리액턴스는 펌프의 기하학적 및 동작변수로 이루어진 자기회로부터 계산된 Laitthwaite의 표준설계공식에 의해 식(16~19)와 같이 표현된다.<sup>(4, 5)</sup>

$$r_1 = \frac{\pi \rho_c g k_p^2 m^2 D_2 N^2}{k_f k_d p \tau^2} \quad (16)$$

$$X_1 = \frac{2\pi \mu_0 w D_2 \lambda_c N^2}{p q} \quad (17)$$

$$X_m = \frac{6\mu_0 W}{\pi^2} (K_m N)^2 \frac{\pi \pi D_2}{\rho g} \quad (18)$$

$$r'_2 = \frac{6\pi D}{\tau p} \rho'_r (K_m N)^2 \quad (19)$$

등가회로법을 적용하여 구한 추력이 24 (N)이었다. 본 논문에서는 설계요건을 종합적으로 고려하고, 시장성 및 제작시의 오차를 고려하여 24 (N)보다 큰 추력을 구하기 위해 약 40 (N)이 나오도록 유전알고리즘을 사용하여 2차 설계를 하였다. Fig. 6는 슬립 변화에 따른 추력 특성을 나타낸다.

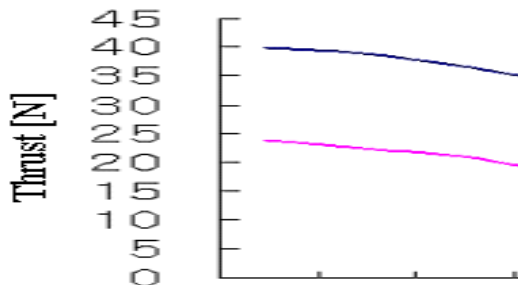


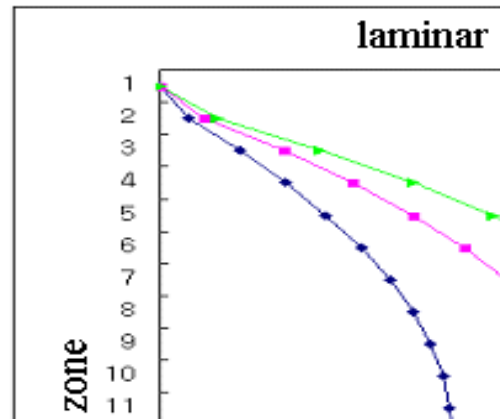
Fig. 6 Thrust curve vs. slip

## 5. MHD 유동 해석

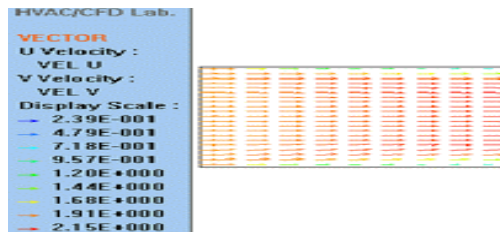
### 5.1 유체순환장치에서의 층류와 난류 해석

본 논문에서는 유체순환장치에서 Lorentz Force가 영향을 미칠 때 유동해석을 하는 것이다. 그 전에 Lorentz Force가 미치지 않고 초기 입구에 일정한 유량이 유입 될 때 덕트 내부에 유동의 형태와 속도가 분포하는지 해석하였다. 격자는 x, y축 모두 23개로 나누어 해석하였다. 크게 두 가지로 나눠서 해석을 하였는데 유동양식에 따라 층류와 난류로 나눠 해석하였다.

층류는 벽면으로부터 덕트의 중심으로 갈수록 속도가 증가하는데 이 때, Fig. 7과 같이 덕트 중심으로부터 선형적으로 증가하는 것을 알 수가 있다. 이와 같은 그래프가 나오는 이유는 층류 유동은 유선형 유동과 점성 유동과 관련이 있는 것으로, 각 층이 다른 속도로 유동하더라도 유동층에 섞임이 없고, 유체의 입지가 명확하고 관찰할 수 있는 경로-유선을 따라서 흐르기 때문이다. Fig. 7은 레이놀즈 계산에 의해 층류 유동을 유추하기 위해 임의의 유량 1.5, 2.0, 2.5 (kg/s)의 유량을 시스템에 넣어주었을 때의 속도 분포도이다.



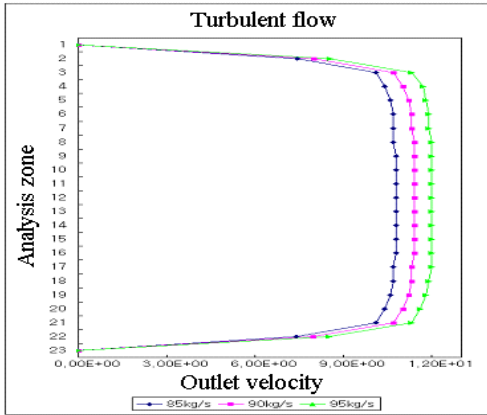
(a)



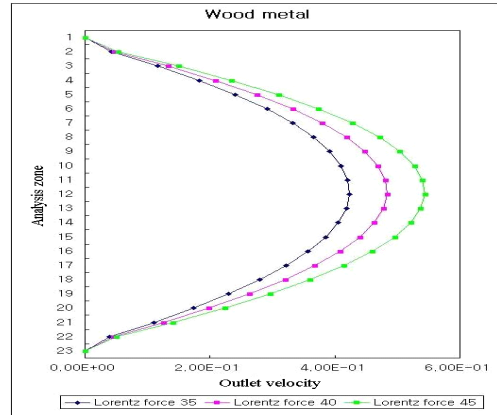
(b)

Fig. 7 Axial direction of velocity (laminar flow)  
(a) Outlet velocity (b) vector

난류는 Fig. 8과 같이 벽면으로부터 덕트의 중심으로 갈수록 속도가 증가하는데 난류유동은 앞서 본 층류유동보다 속도변화가 벽면으로부터 급격히 변하다가 중심으로 갈수록 그 변화가 작아지는 것을 볼 수가 있다. 난류는 유체 입자의 움직임이 불규칙한 흐름을 보이는 유동이기 때문에 명확한 파동주기 없고 와류에 의해 입자가 불규칙한 경로에 따라 움직인다. 그러므로 명확한 패턴이나 층을 찾아볼 수가 없다. Fig. 8은 층류와 마찬가지로 임의의 난류유동을 만들기 위해 레이놀즈수에 대한 계산을 통해 유량을 80, 85, 90 (kg/s)의 유량을 시스템에 넣어주었을 때의 속도 분포이다.



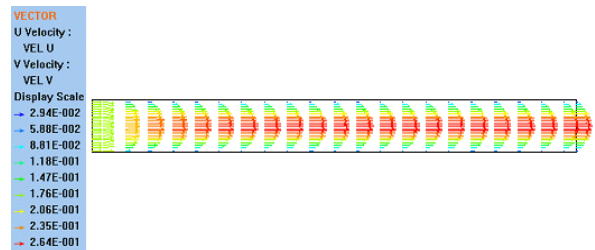
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 8 Axial direction of velocity (turbulent flow) (a) Outlet velocity (b) vector

Fig. 9 Axial direction of velocity (Lorentz Force) (a) Outlet velocity (b) vector

위의 Fig. 7, 8에서 볼 수 있는 것처럼 층류와 난류의 속도분포와 벡터가 서로 다른 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 각각의 유동 특성이 다르기 때문이다.

## 5.2 유체순환장치에서의 Lorentz Force 해석

본 논문의 목적인 전자기력이 덕트 내 용융금속에 영향을 얼마나 주는지에 대해 알아보기 위해 초기 펌프 제작 시 40 (N)의 전자기력이 발생하도록 하였기 때문에 Lorentz Force를 35, 40, 45 (N)을 주어 속도변화에 대한 해석을 하였다. 이는 전자기력이 덕트 내 속도에 어떠한 영향을 미치는가를 비교하기 위해 세 가지로 구분해서 해석하였다. Fig. 9은 세 가지 힘으로 유동해석을 한 결과이다.

위 그래프에서 볼 수 있듯이 전자기력이 발생할 때 전자기력의 세기에 따라 속도가 증가하는 것을 알 수가 있다. 전자기력을 일정하게 변화시켜서 해석하였는데 속도 또한 일정하게 변화하는 것을 알 수가 있다. 또한 속도분포가 유선형으로 나타나는데 이는 층류유동인 것을 보여주고 있으며 실제적으로 레이놀즈수를 계산해보아도 층류유동이 발생하는 것을 알 수 있다. 펌프의 용량을 계산할 때 39.4 (N)으로 계산되었는데 이 때 속도는 0.32 (m/s)의 속도분포가 형성 되었으나 40 (N)으로 계산한 결과 평균 속도가 0.29 (m/s)로 해석되었다. 약 8(%)의 오차를 보였는데 이는 경계면에서의 마찰손실과 형상에 대한 마찰손실을 고려하지 않고 계산했기 때문에 생기는 오차로 추측할 수 있다.

전자기력에 의한 해석을 Table 3으로 정리해보았다.

Table 3 Analysis flow vs Lorentz Force

Lorentz Force [N]	Flow rate [kg/s]	Reynolds number	Avg Velocity [m/s]
35	2.122	103.2	0.258
40	2.431	118.1	0.295
45	2.634	132.8	0.332

## 후 기

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

## 6. 결 론

본 논문은 전자펌프를 이용해 전자력이 유체순환장치에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 해석을 하였다. 해석을 위해 Lorentz Force를 Navier-Stokes 방정식에 Force항을 추가하여 유동흐름에 전자력의 영향을 해석할 수 있도록 하였다. 유동해석에 쓰인 금속은 용융 우드메탈을 사용하였으며, 전자력이 없을 때 임의의 층류와 난류에 대한 해석을 수행하였다. 전자력은 해석구간의 체적에 대한 Lorentz Force로 바꾸어 유동해석을 하였다. 펌프 설계에 따른 Lorentz Force가 40 (N)의 힘을 발생시켰기 때문에 이에 대한 해석과 이에 비교할 수 있는 35 (N), 45 (N)에 대한 해석도 함께 수행하였다. Lorentz Force가 40 (N)일 때 유체순환장치에의 유량은 2.43 (kg/s), 평균속도는 0.29 (m/s)의 결과를 얻을 수 있었다.

전자펌프는 원통형으로 장하분배법을 사용하여 설계하였고, Lorentz Force의 힘이 40 (N)을 발생할 수 있도록 최종설계 하였다.

## 참고문헌

1. 차재걸, 선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성 해석, 호서대학교 석사학위논문, 2002.
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. 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, pp.2956-2959, 199
5. S.A. Nasar, Linear motion electromagnetic systems, John wiley & sons, pp.131-263, 198