Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 22, No.12, pp. 130~141 December 2008 논문 22-12-17

TLIM 전자펌프를 이용한 전도성 용융금속의 유동특성 해석

(The Analysis of Flow Characteristics of Conductive Liquid Metal Using TLIM Electromagnetic Pump)

김창업* · 전문호 · 권정태 · 임효재
(Chang-Eob Kim · Mun-Ho Jeon · Jeong-Tae Kwon · Hyo-Jae Lim)

요 약

본 논문에서는 원통형 선형유도전동기를 이용한 순환식 유동시스템에서의 유체특성을 해석하였다. 먼저 유동시스템에 필요한 추력 40[N] 원통형 선형유도전동기를 등가회로법과 유전알고리즘을 이용하여 설계하였다. 이 힘이 유체시스템에 작용하는 경우 유체의 특성은 유체방정식과 전자기 방정식을 결합하여 해석하여야 한다. 본 논문에서는 유체의 속도에 따라 층류해석과 난류해석이 가능한 해석프로그램을 개발하고, 각각에 대한 유동특성 해석을 하였다. 또한 전자기력에 의한 추력이 시스템에 추가되었을 때의 특성을 분석하였다.

Abstract

This paper presents the flow characteristics in the fluid circulation loop using the tubular type linear induction motor(TLIM) electromagnetic pump. A TLIM of thrust 40[N] is analyzed using the equivalent and genetic algorithm for the system. The flow characteristics are analyzed by coupling the Maxwell equations with the Navier-Stokes equation with the thrust. The analysis algorithm is developed for analyzing the liquid metal flow in the system for laminar and turbulent flow. And the effect of thrust is analyzed for the flow characteristics.

Key Words : TLIM, Navier-Stokes equation, Maxwell equations, Genetic algorithm

1. 서 론

전자펌프는 기계식 펌프와는 달리 회전 날개 부분이 필요 없고, 베어링 마모와 같은 구조적인 문제점들이 사라지며, 장치 자체가 단순하여 주조 및 정련 산업에 사용되고 있다[1]. 전자펌프는 용융 금속 내에 전류와 자기장이 서로 교차하면 이들과 수직 방향으로 전자기력이 발생되는데 전도식과 유도식으로 나누어진다. 전도식 전자펌프는 외부 전원에 의해 액체 금속과 접촉하고 있는 전극을 통해 유체 내에 직접 전류를 흘려주며, 별도로 자기장을 걸어주고 있다. 유도식 전자펌프는 단상 또는 다상 교류에 의해 발생하는 진행형 자기장에 의해 전극 없이 액체 금속 내에 전류를 유기시켜서 하나의 전원 장치

* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-540-5657, Fax : 041-540-5693
E-mail : cekim@hoseo.edu
접수일자 : 2008년 9월 17일
1차심사 : 2008년 9월 24일
심사완료 : 2008년 10월 2일

만으로 전류와 자기장을 동시에 얻을 수 있는 장점 때문에 많이 이용되고 있다[2].

유도형 전자펌프는 덕트 내부에 흐르는 액체금속에 대하여 일차측에 흐르는 전류와 수직하게 자기장을 발생시키고, 덕트 내의 축 방향으로 액체 금속의 구동력이 발생하게 된다. 이 힘에 의해 전도성을 지닌 액체 금속이 이송한다.

전자기력에 의한 유동에 관한 연구는 오랜 기간 지속되어 왔으나 실용화는 아직 활발하지 않는 편이다. 최근에 기초연구의 일환으로 MHD(Magneto Hydro Dynamics) 유동의 물리적 특성을 규명하는 유동장의 해석에 중점을 둔 연구가 국내외에서 진행되고 있다. 그러나 연구진행 상황은 그 내용이 미흡하거나 해석 방법론의 공개가 용이하지 않은 상황이므로 액체 금속로의 개발에 요구되는 MHD 유동현상의 해석방법론은 자체적으로 개발되어야 할 필요성이 있다[3]. 본 논문에서는 전자펌프에 사용된 전자력과 유동의 특성을 하나의 방정식으로 결합하여 해석하였다. 전자펌프는 원통형 선형유도전동기(TLIM : Tubular Linear Induction Motor)를 이용하였으며, TLIM의 설계는 장하분배법과 등가회로법을 이용하여 구한 전자력을 유동방정식과 결합하여 유동해석을 하였다. 전자펌프에 의해 발생되는 전자력이 유동시스템에 작용하여 유체의 속도 및 유량 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 전자펌프용 TLIM 설계

2.1 원통형 전자펌프의 출력 결정

전자펌프의 구동 전력 P_d는 식 (1)과 같다.

$$P_d = \triangle PQ = F_x U \tag{1}$$

여기서, 압력강하 $\triangle P$는 ρgh로 구하여지며, ρ : 유체의 밀도 [kg/m^3], g : 중력[9.8N], h : 총 수두[m], Q : 유량율[$l/\min$], F_x : 추력[N], U : 유체속도[m/s]이다. 총 수두h는 입구, 곡관, 직관 등에서 발생하는 손실을 포함한 것으로 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$h = \frac{U^2}{2g} + 0.5\frac{U^2}{2g} + 1.2\frac{U^2}{2g} + f_c\frac{D}{L}\frac{U^2}{2g} + 0.3 \tag{2}$$

여기서, D: 관의 내경, L: 관의 길이, f_c: 마찰계수이다.

또한 유체속도 U 는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$U = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \times D^2} \tag{3}$$

식 (1)~(3)으로부터 유량율을 10[$l/\min$]로 결정하고 총 수두를 계산하면 0.328이며, 유체속도를 0.2[m/s]로 가정하면 구동전력은 식 (1)로부터 4.85[W]이다. 손실을 고려하여 TLIM의 구동 전력을 8[W]로 설계하였다. 입력 용량 P를 구하기 위해 설계하고자 하는 전동기의 역률 및 효율을 추정하여야 한다. 역률 · 효율($\eta \cdot \cos\phi$)값을 기존의 자료를 참고하여 0.008로 예상하면, 식 (4)와 같이 구할 수 있다[4-5].

$$P = \frac{P_d}{\eta \cdot \cos\phi} \tag{4}$$

최종적으로 설계한 전자 펌프는 유량 10[$l/\min$], 압력 0.3[bar], 출력 8[W], 용량 1[kVA], 유속 0.2[m/s], 2극, 3상, 220[V]로 설계 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 설계 사양
Table 1. Design specification

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

2.2 장하분배를 이용한 원통형 전자펌프 설계

그림 1은 원통형 전자펌프의 1차 측 철심 형상이고, 각각의 치수들은 장하분배를 이용하여 설계하였다[6-7].

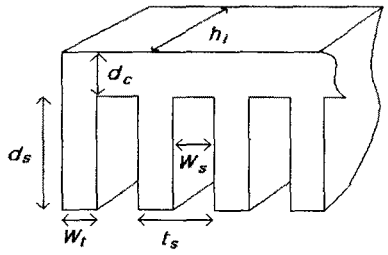

그림 1. 1차측 철심 설계
Fig. 1. Design of primary core

여기서, W_s는 슬롯폭, W_t 치폭, h_i 적층폭, t_s 슬롯피치, d_s 슬롯깊이, d_c 계철의 높이를 나타내고, 표 2에 1차측 철심 설계 값(기본설계)을 나타내었다.

2.3 등가회로법을 이용한 TLIM 특성해석

표 2. 기본 설계 값
Table 2. First design parameter

명칭 및 단위		수치
슬롯 폭	W_s[mm]	9.1
슬롯 깊이	d_s[mm]	22.8
치 폭	W_t[mm]	6.0
슬롯 피	t_s[mm]	15.2
계철의 높이	d_c[mm]	3
외부코아 적층 두께	h_i[mm]	31
펌프 길이	L[mm]	182.5
자극 피치	τ[mm]	91.2
슬롯수		12
상수	m	3
극수	P	2
유속	U[m/s]	0.2
유량율	Q[l/min]	10
구동 압력	△P[bar]	0.3
액체 금속		우드메탈
입력 전원	V_1[V]	220
입력 주파수	f[Hz]	60
1차 전류	I_1[A]	2.62
용량	P[kVA]	1
턴수	N[Turn]	110

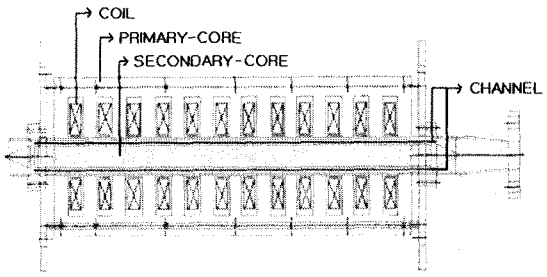

그림 2. 전자펌프 해석 모델
Fig. 2. Analysis model of cylindrical electromagnetic pump

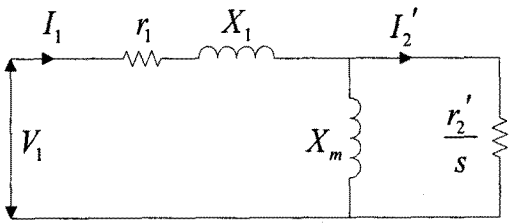

그림 3. 전자펌프의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of electromagnetic pump

그림 2는 전자펌프의 해석 모델을 나타낸 것이다. 2차측 채널에 있는 도전성 유체(우드메탈)는 전자력에 의해 축 방향으로 흐른다. 전자펌프의 등가회로는 그림 3과 같다. 여기서, r_1은 1차측 권선 저항, X_1은 1차측 누설리액턴스, X_m은 자화리액턴스, r_2'은 2차측 유체(우드메탈)의 저항이며 2차측 누설리액턴스는 구조상 거의 없으므로 생략하였다. 각각의 등가저항 및 리액턴스는 펌프의 기하학적 및 동작 변수로 이루어진 자기회로로부터 계산된 Laithwaite의 표준설계 식에 의해 식 (5)~(8)과 같이 표현된다[8].

$$r_1 = \frac{\pi \rho_c q k_p^2 m^2 D_2 N^2}{k_f k_d p \pi^2} \tag{5}$$

$$X_1 = \frac{2\pi \mu_0 w D_2 \lambda_c N^2}{pq} \tag{6}$$

$$X_m = \frac{6\mu_0 w}{\pi^2}(k_w N)^2 \frac{\tau \pi D_2}{pg} \tag{7}$$

$$r_2' = \frac{6\pi D}{\tau p}\rho_r'(k_w N)^2 \quad (8)$$

여기서, ρ_c : 코일 도체의 비저항 [Ω m]

q : 슬롯수/자극/상

k_p : t_s/W_s(t_s: 슬롯 피치, W_s: 슬롯 폭)

m : 입력 전원의 상의 수

D_2 : 2차측 코아 직경 [m]

N : 코일의 감은 횟수(권선수/슬롯)

k_f : slot-filling factor (0.6)

k_d : d_s/W_t (d_s : 슬롯깊이)

p : 자극쌍의 개수

τ : 자극 피치 [m]

μ_0 : 공기의 자기 투자율 [H/m]

w : $2\pi f$ (f : 입력 주파수)

$\lambda_c = \frac{1}{12}k_d(1+3a)$

a : chording factor = 코일피치/자극피치

k_w : 권선 계수

g : 공극 [m]

D : 유체의 평균지름 [m]

ρ_r' : 유체의 표면 비저항 ($\frac{1}{\sigma d(1-n_1)}$) [Ωm]

σ : 유체의 전기 전도도 [Ω/m]

d : 유체의 두께 [m]

n_1 : Russel-Northworthy 보정계수

등가회로에서 2차측 용융금속에 유도되는 2차 전류는 식 (9)로 나타낼 수 있고, 전체임피던스, 추력은 각각 식 (10)과 (11)에 나타내었다.

$$I_2' = \frac{I_1}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + X_m^2}} \quad (9)$$

$$Z = r_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{X_m} + \frac{s}{r_2'}} = r_1 + \frac{sr_2'X_m^2}{r_2'^2 + s^2X_m^2} + j\left(X_1 + \frac{r_2'^2 + X_m}{r_2' + sX_m^2}\right) \quad (10)$$

$$F_x = \frac{I_1^2 r_2'}{sU_s\left\{\frac{1}{(sG)^2}+1\right\}} \quad (11)$$

여기서 G는 기기의 Goodnees factor이며, Us는 유체의 동기속도이다. 등가회로법을 이용하여 구한 추력은 24[N]이었다. 1차 설계값을 기본 자료로 유체 시스템에서의 저항 등을 고려하여 기본 설계에서 나온 추력보다 약 1.65배 큰 추력인 40[N]을 최종 목표치로 잡고 유전알고리즘을 사용하여 2차 설계를 하였다.

2.4 유전알고리즘을 이용한 TLIM 설계

유전알고리즘은 유전학과 자연 진화를 모방한 적응 탐색법으로 1975년에 개발된 것이다[9]. 복잡한 최적화 문제를 해결하기 위해서 유전알고리즘은 집단을 사용하고 여기에 모의 진화를 일으켜 이를 점진적으로 개선해 나가게 된다. 본 논문은 초기에 변수의 적절한 설계점의 수를 결정하고 설계점들이 적합한지 판명한 후, 교배와 돌연변이를 거쳐 초기의 설계점 수와 같은 새로운 세대를 만들어 이를 반복하여 원하는 값을 찾도록 하였다. 제약이 있는 최적화 문제를 제약이 없는 최적화 문제로 변환하여 최적화 단계에서 제약에 대한 별도의 고려 없이 궁극적으로 제약 조건을 만족하는 최적해를 얻는 방법으로 순차 비제약 최소화 기법(Sepuential Unconstrained Minimization Technique: SUMT)을 사용하여 제약 조건을 만족시켰다[10]. 변수는 슬롯폭, 슬롯깊이, 치폭으로 하였고 목적함수는 추력으로 하여 최대 추력이 나오도록

표 3. 설계변수와 제약조건
Table 3. Design parameter and constraints

설계변수	제약조건
Ws(슬롯폭) $8 \leq Ws \leq 23[mm]$	1차전류밀도 $J_1 \leq 5[A/mm^2]$
W_t(치폭) $5 \leq W_t \leq 8[mm]$	치의최대자속밀도 $B_{tm} \leq 1[T]$
ds(슬롯깊이) $20 \leq ds \leq 30[mm]$	일차측최대길이 $L \leq 400[mm]$

하였다. 제약조건으로는 1차측 길이, 1차 전류밀도, 최대 치자속밀도로 하여 프로그램화 하였다. 표 3은 최적설계 프로그램에 사용된 변수와 제약조건을 나타내었다.

그림 4는 유전알고리즘에 의한 최적화 과정에서 설계변수와 목적함수 및 제약조건의 최적화 과정을 나타낸다. 50세대가 넘어가면서 설계변수들이 수렴하는 것을 볼 수 있다.

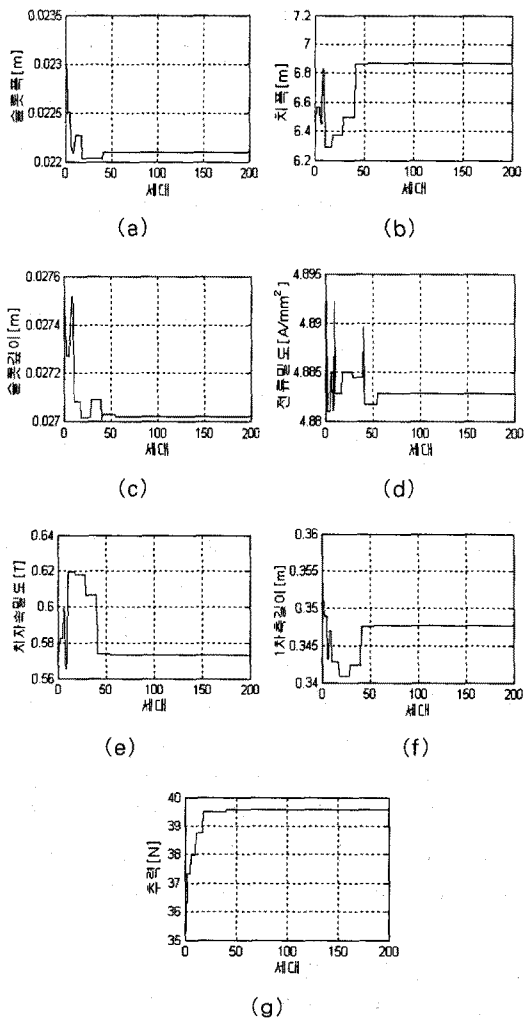

그림 4. 유전알고리즘을 이용한 변수들의 최적화 과정
(a) 슬롯폭 (b) 치폭 (c) 슬롯깊이 (d) 1차측 전류밀도 (e) 치자속밀도 (f) 1차측 길이 (g) 추력

Fig. 4. Optimum design parameter using genetic algorithm (a) slot width (b) teeth width (c) slot depth (d) primary current density (e) teeth flux density (f) primary length (g) thrust

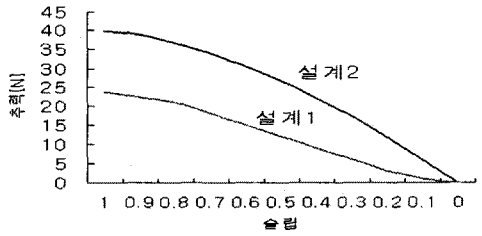

그림 5. 슬립변화에 따른 추력 특성곡선
Fig. 5. Thrust curve vs. slip

표 4는 기본설계사양과 유전알고리즘을 수행한 후의 설계사양을 정리한 것이다. 유량을이 16.5 [ℓ/min]일때 구동압력은 0.31[bar]이고 추력은 39.6[N]이다. 그림 5는 등가회로법에 의해 계산된 두 가지 설계 모델에 대해 슬립에 따른 추력 특성을 나타내었다.

2.5 유한요소법을 이용한 특성해석

등가회로법에 의한 설계값을 검증하기 유한요소법에 기초한 상용 프로그램인 Flux-2D를 이용하여 2차 설계한 TLIM의 특성을 계산하였다. 유한요소법에 의해 구한 추력값은 38.8[N]으로 설계 2의 사양에서 계산된 추력 39.6[N]과 거의 일치함을 알 수 있었다. 또한 공극자속밀도는 0.22[T], 치자속밀도 0.58[T]를 얻었다. 그림 6은 전자펌프의 자속 분포와 자속밀도 분포를 나타내었다.

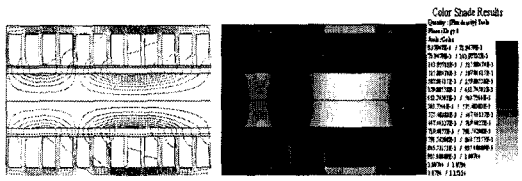

그림 6. 전자펌프의 자속 및 자속밀도 분포
(a) 자속 분포 (b) 자속밀도 분포

Fig. 6. Distribution of flux line and flux density
(a) flux line (b) flux density

표 4. 원통형 전자펌프 설계사양(2차설계)
Table 4. Second design parameter of TLIM

명칭 및 단위			설계1	설계2
수력학적변수	유량율(Q)	[l/min]	10	16.5
	유속(U)	[m/s]	0.2	0.323
	구동압력($\triangle P$)	[bar]	0.3	0.31
	레이놀즈수(Re)		80	129.2
	슬립(s)	[%]	99.9	99
	액체금속		Wood metal	Wood metal
기계적설계	슬롯폭(W_s)	[mm]	9.1	22
	슬롯 깊이(d_s)	[mm]	22.8	27
	치 폭(W_t)	[mm]	6.1	7
	슬롯 피치(t_s)	[mm]	15.2	29
	계철의 높이(d_c)	[mm]	7	7
	1차측 코아적층폭	[mm]	31	31
	펌프 길이(L)	[mm]	182.4	348
	1차측 코아직경	[mm]	120.1	124.5
	2차측 코아직경(D_2)	[mm]	46.8	46.8
	2차측 유체두께	[mm]	5.2	5.2
	2차측 덕트재질두께	[mm]	1.65	1.65
	자극 피치(τ)	[mm]	91.2	174
	슬롯폭/슬롯피치(k_t)		0.6	0.58
	슬롯수		12	12
	상수(m)		3	3
	극수(P)		2	2
	도체의 점적률		0.6	0.6
	슬롯당 턴수	[turn]	110	85
전기적특성	입력전원	[V]	220	220
	입력주파수	[Hz]	60	60
	용량	[kVA]	0.9	4.6
	공극 자속밀도(B_g)	[T]	0.08	0.24
	치의 자속밀도(B_t)	[T]	0.19	0.57
	1차전류(I_1)	[A]	2.4	12.2
	1차저항(r_1)	[Ω]	0.06	0.07
	1차누설리액턴스(X_1)	[Ω]	0.3214	0.35
	2차저항(r_2)	[Ω]	4.32	17.79
	자화리액턴스(X_m)	[Ω]	7.48	12.09
	출력	[W]	8	8.59
	전류밀도(J_1)	[A/mm^2]	2.6	4.7
	Goodness factor(G)		0.18	0.68
	역률	[%]	44.1	26.1
	효율	[%]	8	10
	추력	[N]	24	39.6

3. 유동 특성 해석

3.1 전자기력을 고려한 유체유동방정식

본 논문에 사용된 전체시스템 개략도는 그림 7에 나타내었고, 덕트 아래 부분에 설치된 TLIM의 전자력에 의하여 용융금속이 축 방향으로 흐르도록 구성하였다. 전자펌프에 사용된 2차측 금속은 우드메탈을 사용하였고, 표 5에 우드메탈의 물성치를 표시하였다.

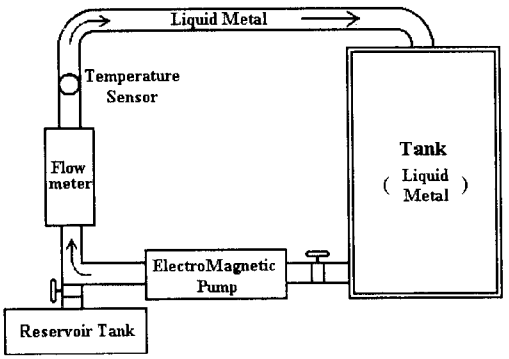

그림 7. 전자펌프를 이용한 유체순환장치 개략도
Fig. 7. Fluid circulation loop using electromagnetic pump

표 5. 우드메탈의 물성치
Table 5. Properties of liquid wood metal

특성	단 위	wood metal
구성(중량비)	[%]	Bi 50 Pb 25 Sn 15 Cd 10
밀도 ρ	[kg/m^3]	9,700 at 500[K]
동적점성도 ν	[m^2/s]	0.13
녹는점 T_m	[℃]	70
열전도율 k_h	[W/m℃]	15
비열 C_P	[J/(kg)(℃)]	0.18
전기전도율	[107/Ω · cm]	0.00232

액체금속의 유동특성을 해석하기 위해 전자펌프를 이용하여 덕트 내부 유체유동방정식에서 전자기장에 의한 Lorentz force를 고려한 유체방정식(Navier-Stokes Equation)과 유동의 연속성을 나타내는 연속방정식을 사용하였다[11].

Lorentz force equation :

$$\overrightarrow{F_L} = \vec{J} \times \vec{B} \tag{12}$$

Continuity equation :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \tag{13}$$

Modified Navier-Stokes equation:

$$\rho\left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V}\right] = -\nabla \vec{P} + (\mu \nabla^2 \vec{V} - \rho \vec{V}) + \overrightarrow{F_L} \tag{14}$$

여기서, $\overrightarrow{F_L}$: Lorentz force, $\vec{J}$: 전류밀도, $\vec{B}$: 자속밀도, P : 압력, $\vec{V}$: 2차측 유동 속도, μ_c : 점성계수, ρ : 2차측 용융금속의 밀도, $-\rho V$: 레이놀즈응력이다.

기존의 유체유동방정식에 Lorentz force를 x축 방향에 추가함으로써 전자장과 유동장을 결합하였다. 본 논문에서는 층류 및 난류 유동에 대한 방정식을 연속방정식에 포함하였다. 이 연속방정식은 모든 유동현상에서 만족되어야 하는 기본 법칙으로 유동 해석에 적용할 수 있다. 유동의 경계조건으로는 벽면에서의 no-penetration, no-slip 조건과 함께 출구에서는 Neumann 조건을 사용하였다.

3.2 유동해석 알고리즘

운동량 방정식으로부터 속도를 구할 수 있고, 연속방정식에서는 압력을 구할 수 있다. 그러나 연속방정식에는 압력이 포함되어 있지 않기 때문에 운동량방정식과 조합시킬 필요가 있다. 여러 가지 조합방법이 있으나 본 논문에서는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)해법을 채용하였다. SIMPLE 알고리즘을 사용하기 위해 유도된 Modified Navier-Stokes Equation을 이산화 하였다. 식(14)의 Navier-stokes Equation에 대한 이산화 방정식은 식 (15)와 같다[12].

$$a_n u_e^i = \sum a_{nb} u_{nb}^i + b + (p_P^i - p_E^i) A_e \tag{15}$$

x축 방향 속도에 대한 이산화방정식을 정리하게 되면 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$u_e = u_e^i + d_e(\Delta p_P - \Delta p_E) \tag{16}$$

여기서 i는 가정된 압력, 속도이고 Δ는 수정된 압력 및 속도이다.

$$p = p^i + \Delta p \ , \ u = u^i + \Delta u \tag{17}$$

여기서 p^i : 가정된 압력[Pa], Δp : 압력수정 [Pa], u^i : 가정된 x축방향의 속도 [m/s], Δu : 속도수정 [m/s]이다.

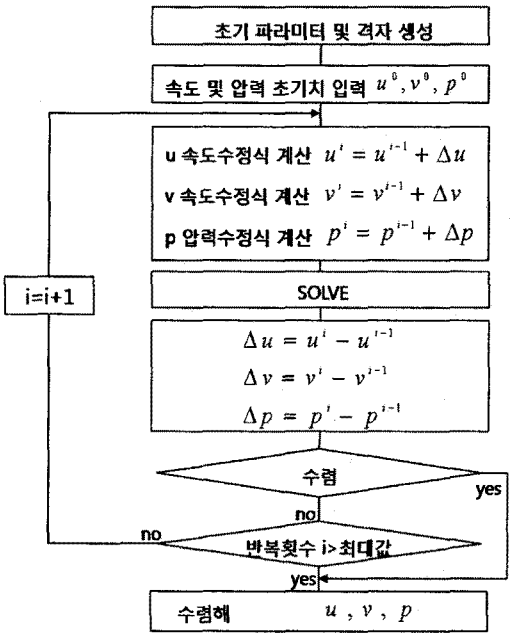

그림 8. 수치해석에 사용된 알고리즘 흐름도
Fig. 8. Flow chart of analysis algorithm

그림 8은 해석 알고리즘으로, 가정된 속도와 결과 값인 평균 유속이 일치 하지 않으면 다시 처음부터 반복 계산되도록 하였다. 가정된 속도와 결과 값이 오차 범위 안에 들면 수렴하게 되어 결과 값을 출력하도록 하였다. 마지막 반복 계산시, 앞에서 있었던 모든 반복 계산 과정의 결과에서 얻은 압력장을 p^i로 간주하고, 운동량 방정식을 풀어 $\triangle u, \triangle v, \triangle p$를 구하고, 이 속도장으로부터 압력수정방적식의 질량생성인 b항을 계산한다. 이 b값은 모든 제어체적에서 실제적으로 0의 값을 가질 때까지 반복 수행한다.

3.3 MHD 유동해석

그림 9는 환단면 덕트의 해석영역을 나타내고 있다. 용융금속이 흐르는 덕트 내에 해석영역을 두 개로 나누었다. 환단면 덕트의 단면적 조건은 설계값과 동일한 유로 덕트의 축 방향 348[mm] 반경방향 5.2[mm]으로 하였다. 속도장은 중심축 기준으로 해석영역 I 과 해석영역 II가 같다고 가정하여, 환단면 덕트의 해석영역 I 만을 해석하였다.

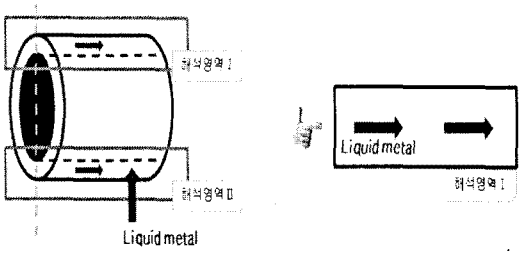

그림 9. 환단면 덕트의 해석영역
Fig. 9. Analysis Field of Annular Duct

덕트 내의 유동은 레이놀즈수에 의해 결정되며, 입구속도의 가정된 속도를 가지고 레이놀즈수를 알 수 있으며, 이에 의해 층류유동과 난류유동을 구분하였다. 전자기력이 영향을 미치지 않는 경우 덕트 내부의 전자기력에 영향을 받지 않기 때문에 입구단에 입구속도를 가정해 주어야 한다. 입구단의 초기입구속도를 넣어서 그때의 출구단의 속도와 비교하였다. 즉 전자기력이 덕트 내 용융금속의 유동에 영향을 주지 않을 경우 이상적인 유동해석을 한 경우 입구속도와 출구속도의 값이 같을 경우 이상적인 속도값이 해석되었다고 볼 수 있다. 유동속도 해석은 층류 · 난류 유동일 때 초기입구속도에 따른 덕트 내에 축 방향 속도에 대한 해석을 하였다. 그림 10은 전자기력이 덕트 내 영향을 미치지 않은 경우 환단면 덕트 내에서 축 방향에 대한 속도와 벡터분포를 나타낸 것이다. 질량유량을 각각 1.5[kg/s], 2.0[kg/s], 2.5kg/s]일 때 입구단의 초기속도는 근사값인 0.182[m/s], 0.243[m/s], 0.303[m/s]로 가정해 주었는데 이는 빠른 수렴을 얻기 위한 조치이다. 이때 레이놀즈수를 계산하면 2,300이하가 되어 층류유동임을 알 수 있다. 경계조건으로 벽면에서의 속도

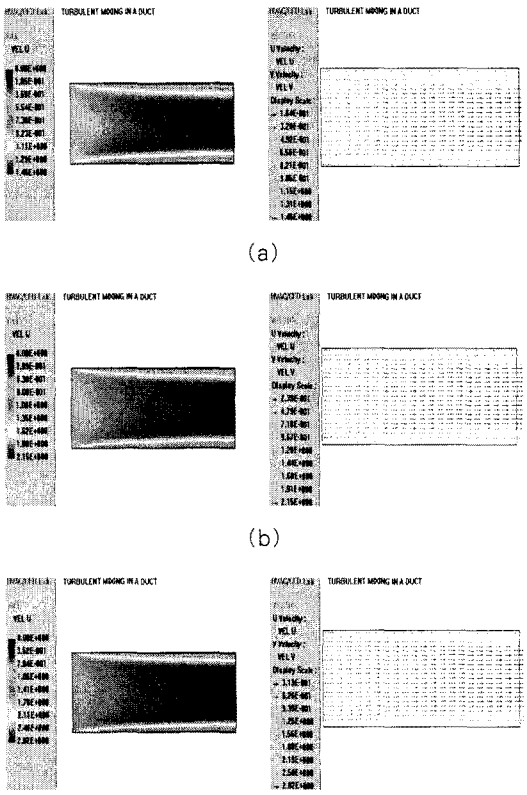

그림 10. 레이놀즈수에 따른 축 방향 속도 및 벡터분포(층류) (a) Re=72.8 (b) Re=97 (c) Re=121.36
Fig. 10. Axial-direction of velocity distribution and vector (laminar flow) (a) Re=72.8 (b) Re=97 (c) Re=121.36

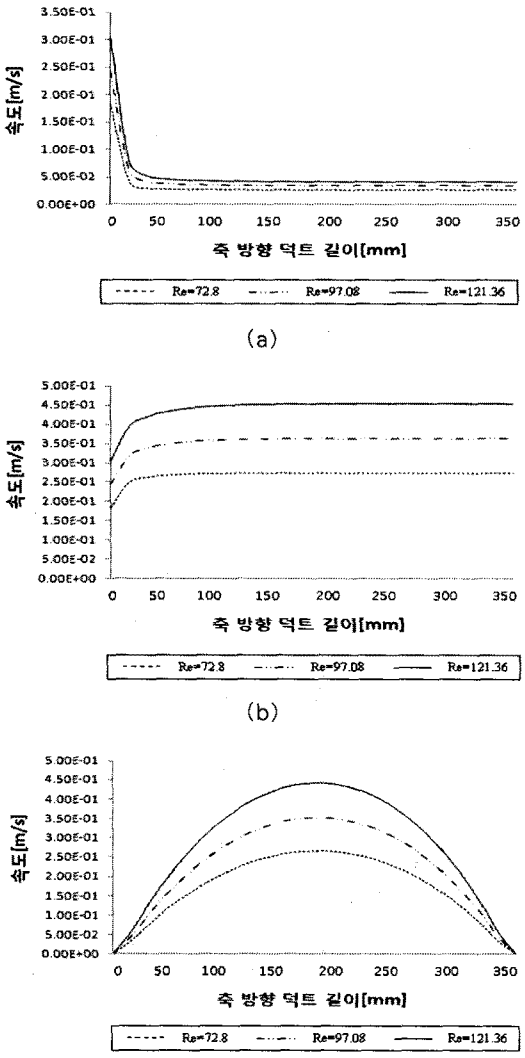

그림 11. 레이놀즈수에 따른 축 방향 속도(층류)
(a) 벽면속도 (b) 중앙속도 (c) 평균속도
Fig. 11. Axial-direction of velocity (laminar flow)
(a) wall velocity (b) center velocity
(c) average velocity

를 0으로 주었기 때문에 해석은 벽면부근속도와 중앙부분속도 그리고 평균속도로 하였다. 그림 12의 속도분포를 보면 덕트 벽면부근의 속도는 거의 0에 가까운 것으로 나타나는데 이것으로 경계조건이 잘 부합된것을 알 수 있다. 그림 11에서 (a)는 덕트 벽면부근에서의 초기입구속도, (b)는 덕트 중앙에서의

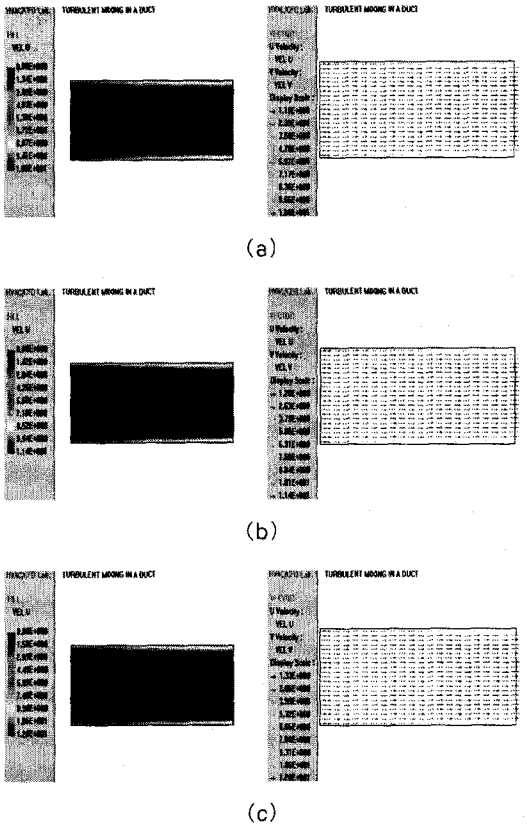

그림 12. 레이놀즈수에 따른 축 방향 속도 · 벡터분포
(난류) (a) Re=4126.2 (b) Re=4368.92
(c) Re=4611.64
Fig. 12. Axial-direction of velocity distribution and vector (turbulent flow)
(a) Re=4162.2 (b) Re=4368.92
(c) Re=4611.64

속도, (c)는 덕트 전체에서의 평균속도를 해석한 것이다. 덕트 벽면부근에서는 중앙부분과 다르게 초기속도가 빠르지만 용융금속의 이동에 따라 속도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 속도가 감소하는 것은 덕트 벽면부근에서는 점성에 의해 덕트 중앙부분의 속도보다 늦기 때문이다. 중앙부분에서는 벽면에서의 마찰 및 점성의 영향력이 거의 없기 때문에 용융금속의 이동시 방해하는 영향력이 거의 없음을 볼 수 있다. 전체 덕트 내의 평균속도를 보아 관의 평균속도는 어느 지점이든 동일함을 알 수 있다.

난류유동을 해석하기 위해 레이놀즈수가 4,000이상이 되는 질량유량을 구한결과 약 80[kg/s]이상일

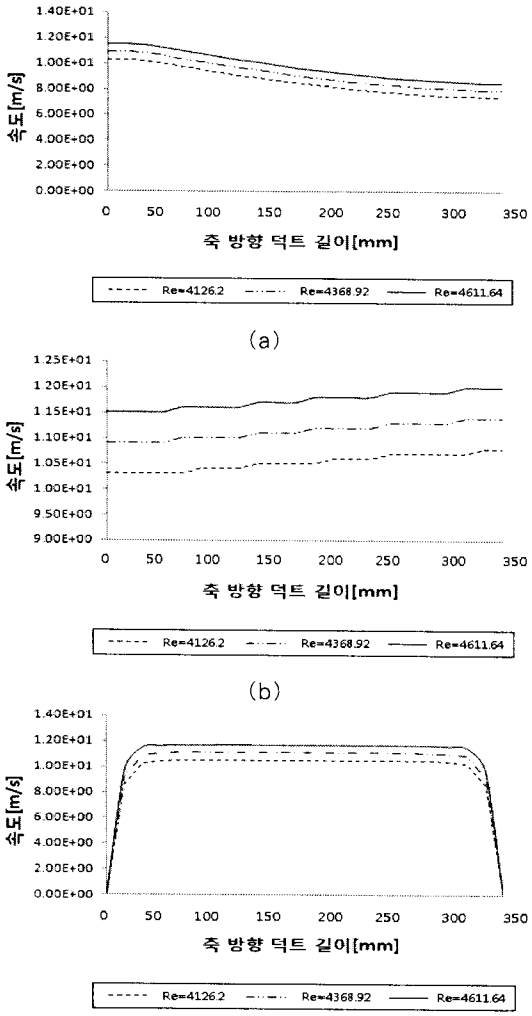

그림 13. 레이놀즈수에 따른 축 방향 속도(난류)
(a) 벽면속도 (b) 중앙속도 (c) 평균속도
Fig. 13. Axial-direction of velocity(turbulent flow)
(a) wall velocity (b) center velocity
(c) average velocity

때였다. 따라서 해석에서 질량유량을 80[kg/s], 85[kg/s], 90[kg/s]으로 주고 초기속도는 각각 10.3[m/s], 10.9[m/s], 11.5[m/s]로 가정하여 해석하였다. 그림 12는 난류유동일 때의 속도 · 벡터분포이고, 그림 13은 벽면부근 · 중앙 · 평균속도를 나타낸 것이다. 그림 13 (a)에서 보이는 것과 같이 초기입구단의 속도는 그림 11의 층류유동의 속도에 비해 빠

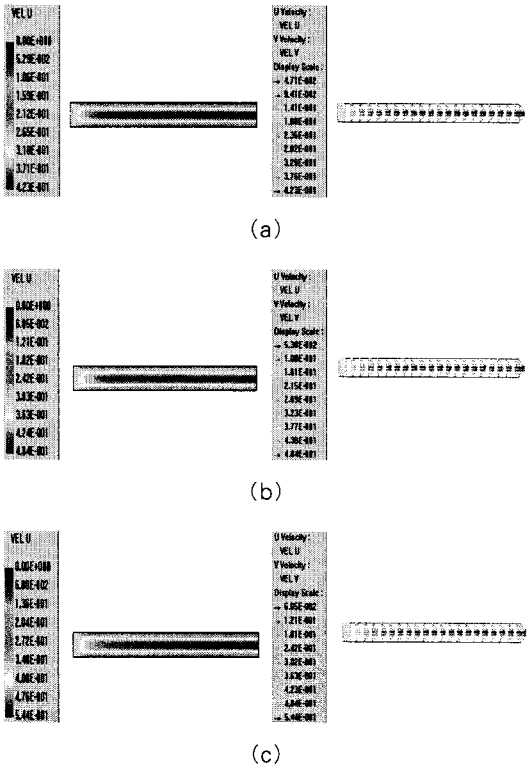

그림 14. 전자기력이 있을 때의 축 방향 속도 및 벡터분포
(a) $F_L = 35[N]$ (b) $F_L = 40[N]$
(c) $F_L = 45[N]$
Fig. 14. Axial-direction of velocity distribution and vector (a) $F_L = 35[N]$ (b) $F_L = 40[N]$
(c) $F_L = 45[N]$

르다. 그것은 덕트 벽면부근에서의 속도는 마찰 및 점성의 영향을 많이 받지 않기 때문이다.

전자기력이 덕트내 용융금속에 영향을 얼마나 주는지 알아보기 위해 35[N], 40[N], 45[N]을 주어 속도변화에 대한 해석을 하였다. 전자기력의 영향을 주지 않았을 때와의 차이점은 입구단의 초기속도값을 가정하지 않는다는 것이다. 즉 입구속도가 아닌 덕트 내에 미치는 힘에 의해 용융금속의 유동해석을 하였다. 그림 14는 전자기 펌프에서 나오는 전자기력에 따른 속도 · 벡터분포의 결과를 나타낸 것이고, 그림 15는 벽면부근 · 중앙 · 평균속도이다. 덕트 내의 속도분포에서 알 수 있듯이 벽면부근에서의 속도는 마찰 및 점성의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 층류임을 예상할 수 있었다. 레이

놀즈수를 계산한 결과 103.2, 118, 132.8을 얻었고, 전자기력의 영향을 받은 덕트 내 유동은 층류유동으로 예상치와 거의 동일함을 알 수 있었다.

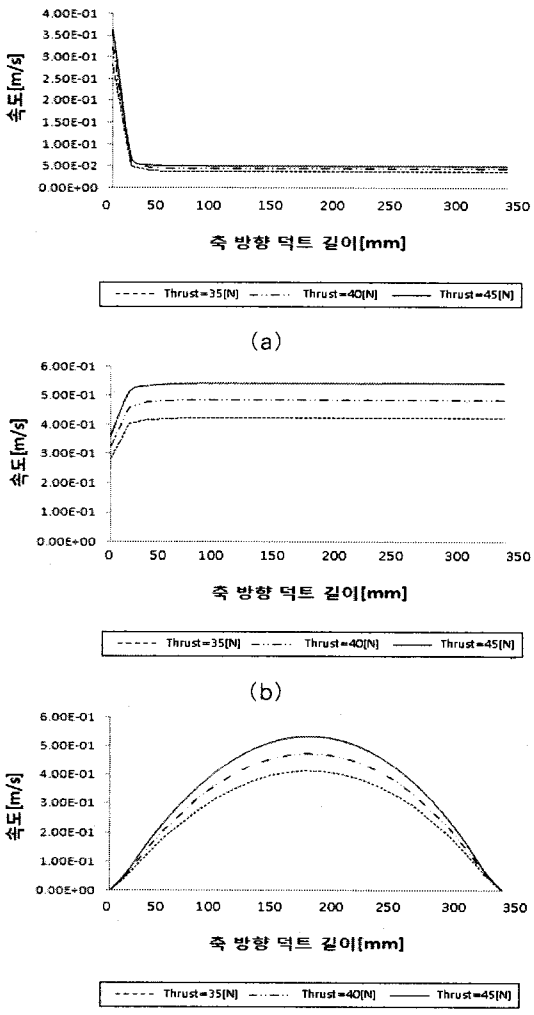

그림 15. 전자기력이 있을 때 축 방향 속도
(a) 벽면속도 (b) 중앙속도 (c) 평균속도
Fig. 15. Axial-direction of velocity according to Lorentz force (a) wall velocity (b) center average velocity (c) average velocity

전자기력을 35[N], 40[N], 45[N]으로 주었을 때 유량은 각각 2.126[kg/s], 2.4301[kg/s], 2.6368[kg/s]이고, 덕트내 평균속도는 0.258[m/s], 0.295[m/s], 0.332[m/s]이다. 전자펌프의 힘이 39.6[N]일 때 속도는 0.323[m/s]으로 계산 되었고, 40[N]으로 해석된 결과는 0.295[m/s]로 약 8[%]의 오차가 발생하는데 이것은 설계시 덕트 내 유동손실에 대해 즉, 벽면부근에서의 마찰손실과 점성에 의한 손실, 열손실 등 손실을 고려하지 않아 생긴 것이다. 축 방향의 속도 그래프를 보면 힘이 증가할수록 유체의 유동 속도가 빨라지는 것을 알 수가 있다. 전자기력이 덕트 내 영향을 주고 힘의 크기에 따라 유동속도에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 표 6은 전자기력에 따른 유동해석 결과를 정리한 것이다.

표 6. 전자기력에 따른 유동해석
Table 6. Analysis flow vs. Lorentz force

전자기력 [N]	유량 [kg/s]	레이놀즈수	덕트 평균속도 [m/s]
35	2.126	103.2	0.258
40	2.4301	118	0.295
45	2.6368	132.8	0.332

4. 결 론

본 논문은 전자펌프를 이용해 전자력이 순환장치에 미치는 영향에 대한 해석을 하였다. 장하분배법과 유전알고리즘을 이용하여 추력 40[N]의 원통형 전자펌프를 설계하였다. Lorentz force를 유동방정식인 Navier-Stokes 방정식에 추가하여 유동 흐름에 전자력의 영향을 해석할 수 있도록 하였다. 유동해석에 쓰인 금속은 용융 우드메탈을 사용하였으며, 층류와 난류에 대한 해석을 수행하였다. 또한 TLIM에서 발생하는 추력이 40[N]일 경우 본 시스템에서의 유량 및 평균 유속에 미치는 영향을 해석하였다. 전자력의 세기에 따라 덕트 내의 유량 및 속도를 예측할 수 있었다. 본 해석 결과는 도전성 유체를 이송하는 시스템 설계에 기초 자료로 활용될 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (R-2005-7-088) 주관으로 수행된 과제와 2006년 호서대학교 학술연구조성비로 수행된 연구결과임.

References

[1] 편집부, 리니어 모터 응용 핸드북, 세화출판사, pp. 412-450, 1998.

[2] S.A.NASAR, Linear Motion Electric Machines, John wiley & Sons, pp.19-52, 1976.

[3] 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 Research & Technology", vol. 3, pp.51-57, 2003.

[4] 김희령, "환단면 선형유도전자펌프의 자기유체역학적 동특성 해석 및 설계 기법 개발", 서울대학교 박사학위청구논문, 1998.

[5] 서울대학교 공학연구소, "소형 고속로 전자펌프 개발", 고속증식로 기본기술개발연구(한,불 공동연구), 한국원자력연구소 1차년도 보고서, 1991.

[6] 신성원, 송종환, 김창업, 박진홍, 안성찬, "공장자동화를 위한 220V/2KVA 선형서보모터 및 제어기 개발", 1차년도보고서, 한국전력공사, pp 23-32, 1994.

[7] Debabrata ROY, Yosuke AKIYAMA, Sotoshi IWAHARA, Biswarup BASAK, "Performance prediction of a tubular Linear Induction Motor utilizing the effect of Flus-Concentration by eddy currents," The Japan society applied electromagnetics and mechanics, vol.10, no.1, pp.53-58, 2002.

[8] S.A.NASAR Linear motion electromagnetic systems, John wiley & Sons, 1985.

[9] 신강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.

[10] 전문호, "유전알고리즘을 이용한 BLDC 전동기의 코깅토크 최소화를 위한 영구자석 최적 설계", 호서대학교 석사학위 청구논문, pp. 3-16, 2003.

[11] Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer And Fluid Flow, pp.126-133, 1980.

[12] Suhas V. Patankar, Computation Conduction and Duct Flow Heat Transfer, pp.23-25, 2005.

◇ 저자소개 ◇

김창업 (金昌業)

1960년생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983~1997년 (주)효성 중공업기술연구소 책임연구원. 2000~2001년 University of Southampton(Post doc.). 1997년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.

전문호 (全汶鎬)

1976년생. 2002년 2월 호서대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.

권정태 (權正泰)

1966년생. 1988년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1993년 포스텍(포항공대) 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1999년 포스텍(포항공대) 대학원 기계공학과 졸업(박사). 2003~2004년 Kyushu University(Post doc.). 2005년~현재 호서대학교 기계공학과 조교수.

임효재 (任孝宰)

1961년생. 1985년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1995년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1991~1997년 대우전자 선임연구원. 2001~2002년 UIUC(USA) 교환교수. 1997년~현재 호서대학교 기계공학과 교수.