

전자기펌프의 설계 및 액체금속 유동의 수치해석

권정태^{1*}, 김서현¹, 남택훈¹, 임효재¹, 김창업²
¹호서대학교 기계공학과, ²호서대학교 전기공학과

Design of an Electromagnetic Pump and Numerical Analysis of the Liquid Metal Flow

Jeong-Tae Kwon^{1*}, Seo-Hyun Kim¹, Taek-Hoon Nahm¹,
Hyo-Jae Lim¹ and Chang-Eob Kim²

¹Department of Mechanical Engineering, Hoseo University

²Department of Electrical Engineering, Hoseo University

요약 본 연구에서는 장하분배법(Load Distribution Method) 및 등가회로법(Equivalent Circuit Method)을 이용하여 액체금속이송을 위한 전자기펌프를 설계하고 제작하였다. 제작된 전자기펌프의 구동전력과 이에 상응하는 액체의 유량관계를 구하였다. 액체금속유동에 가하는 전자기 힘(Lorentz force)의 크기에 따른 유속과 유량을 수치해석기법을 이용하여 계산하였다. 수치해석결과를 상용코드인 FLUENT를 이용하여 계산한 결과와 비교하고 분석하였다. 다양한 전자기력의 크기에 대한 액체금속(우드메탈)의 평균속도에 대한 결과는 FLUENT의 결과와 5%이내의 오차 내에서 잘 일치하였다.

Abstract An electromagnetic pump has been designed using Load Distribution Method and Equivalent Circuit Method, and installed in a liquid metal flow system. The relation between the driving power of the electromagnetic pump and the flow rate was proposed. Also, the flow velocity and flow rate has been calculated by treating the Lorentz force as a source term in the Navier-Stokes equation. The calculation results were analyzed and compared with data from a commercial Code, FLUENT. They agreed well with each other within an error of 5%.

Key Words : Electromagnetic Pump, Flow Characteristics, Load Distribution Method, Lorentz Force

1. 서론

액체금속의 이송은 원자력발전소, 제철산업 등 극한 환경에서 자주 대두되는 문제이다. 기존의 기계식 펌프로서는 구동이 거의 불가능하므로 이러한 액체금속의 이송에는 전자기펌프(electromagnetic pump)를 사용한다. 전자기펌프는 전자기력을 발생시키는 방식에 따라 전도형과 유도형으로 나뉘어진다. 전도형 전자기펌프는 외부 전원에 의해 액체 금속과 접촉하고 있는 전극을 통해 유체 내에 직접 전류를 흘려주며, 별도로 자기장을 걸어준다.

유도형 전자기펌프는 단상 또는 다상 교류에 의해 발생하는 진행형 자기장에 의해 전극 없이 액체 금속 내에 전류를 유기시켜서 하나의 전원 장치만으로 전류와 자기장을 동시에 얻을 수 있는 장점 때문에 많이 사용하고 있다. 유도형 전자기펌프에서는 2차 도체가 되는 유체의 도전성이 펌프 성능에 큰 영향을 미친다[1]. 전자기펌프는 덕트 내에 흐르는 액체금속에 대하여 수직하게 전류 및 자기장을 발생시키게 되며, 액체금속에 대한 구동력은 플레밍의 오른손 법칙에 의하여 덕트 내에 축 방향으로 발생하게 된다. 이 발생된 힘에 의해 전도성의 액체금속은

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

*교신저자 : 권정태(jtkwon@hoseo.edu)

접수일 09년 07월 31일

수정일 (1차 09년 09월 14일, 2차 09년 10월 05일)

게재확정일 09년 10월 14일

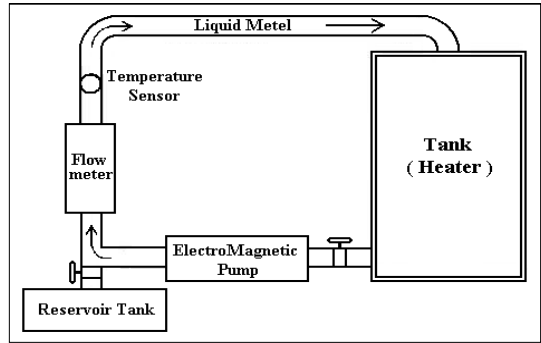
이송하게 된다. 전자기력에 의한 유동에 관한 연구는 오랜 기간 지속되어 왔으며 최근에는 기초연구의 일환으로 전자기수력학 (MHD ; Magnetohydrodynamics) 유동의 물리적 특성을 규명 하고 있으며 유동장의 해석에 중점을 둔 연구는 기초적 성격의 연구와 병행하여 진행되고 있다. 국내·외 연구원들에 의해서 자기장과 유동장을 결합하여 해석을 시도한 방법은 모두 동일하나 그 해석 대상을 달리하고 있는 연구들이 있다. 이 연구들의 진행 상황은 내용이 미흡하거나 해석방법론의 공개가 용이하지 않아 액체금속로의 개발에서 요구되는 MHD 유동현상의 해석 방법론은 자체적으로 개발되어야 할 필요성이 있다 [2]. 유체 내에서의 액체의 유동 특성을 파악하기 위해서는 전자기력에 대한 배경 지식과 유체의 특성에 대한 내용을 결합할 때 정밀한 해석이 가능할 것이다. 전자기-유동 해석을 통하여 고온의 액체금속이나 방사성 물질을 함유한 유체와 같이 비접촉식의 이송수단이 요구되는 경우에 전자기 펌프의 이송량을 정확히 예측 또는 측정할 수 있을 것이다. 또한 용융금속의 주탕 및 이송과 관련된 분야는 자동화하기 가장 어려운 것으로 알려져 있기 때문에 이 분야에서도 본 연구를 통해 개발된 기술이 매우 중요하게 활용될 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 원자력발전소의 냉각계통(액체소듐)이나 제철산업에서의 용융금속의 이송에 적용 가능한 전자기펌프를 설계, 제작하고, 이때 전자기력과 액체금속이송속도(또는 유량)의 관계를 구하는 것이다. 본 논문에서는 첫 번째 단계로 액체금속 이송용 전자기 펌프를 전자기펌프를 설계하고 제작하였으며, 액체금속의 유동특성 해석 프로그램을 개발하였다. 또한, 기존 상요코드인 FLUENT의 계산 값과 개발된 프로그램의 결과 값을 비교하였다. 향후, 액체금속의 유동측정실험이 수행된 뒤에는 실험결과와 비교할 것이다.

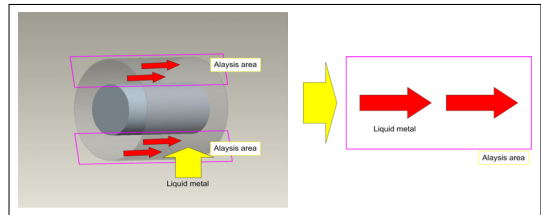
2. 유로설계와 용융금속

2.1 유로설계

그림 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 또한, 그림 2는 실험 장치에서 전자기펌프내의 유체가 흘러가는 공간인 환상(annular) 유로의 영역을 나타낸다.



[그림 1] 실험장치의 개략도



[그림 2] 환상 유로의 설계 및 해석 영역

2.2 용융금속

본 논문에서 선택한 용융금속으로는 우드메탈(Wood's Alloy; Bi50%, Pb 25%, Sn 12.5%, Cd 12.5%)로서 우드메탈의 물성치는 표 1과 같다.

[표 1] 액체금속의 주요 물성치

용융온도[K]	345
전기전도도[s/m]	1×10^6
열전도도[W/m · K]	15
동점성계수[m ² /s]	0.1261
밀도[kg/m ³]	9700
비열[J/kg · K]	481

3. 전자기펌프 설계

3.1 원통형 전자기펌프의 출력 결정

그림 1의 유체순환장치에서 최소기준설계유속을 0.2 [m/s]로 설정하고 전자기펌프의 구동 전력을 결정하였다. 식 (1)은 전자기펌프의 구동전력 식이다.

$$P_d = \Delta P Q = F_x U \quad (1)$$

여기서 P_d 는 펌프의 구동전력[W], ΔP 는 유동시스템 전체에 걸리는 압력손실[Pa], Q 는 액체금속의 체적유량[m³/s] 또는[l/min] [F_x 는 펌프모터 (TLIM; Tubular Linear Induction Motor)출력 [N]이고 U 는 유체평균속도 [m/s]이다.

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

여기서 D 는 관의 내경이다. 원관이 아닌 경우에는 수력직경 D_h 를 사용하여 구할 수 있다.

식 (1)과 (2)로부터 구동전력을 구하면 4.85 [W]가 되고 이때의 체적유량은 10 [l/min]이 된다. 구동 전력을 전자기펌프 제작 시 손실을 고려하여 8 [W]로 설계하였다. 권선의 용량 P 는 설계하고자 하는 전동기의 역률 및 효율을 추정하여야 한다. 역률 효율 ($\eta \cdot \cos\Phi$)의 값을 기존의 자료를 참고하여 0.008로 두고 계산하면 식 (3)로 용량을 구할 수 있다.

$$P = \frac{P_d}{\eta \cdot \cos\Phi} \quad (3)$$

먼저 구동전력을 4.85 [W]로 할 때의 설계한 설계 사양은 표 2에 나타내었다

[표 2] TLIM의 설계 데이터(24 [N])

용량[kVA]	4.5
구동전력[W]	4.85
극수[극]	2
전압[V]	3상
정격속도[m/s]	0.2
주파수[Hz]	60
체적유량[l/min]	10

전자기에너지 변환현상을 이용하는 모든 전기기기의 출력은 전기장하(electrical load)와 자기장하(magnetic load)의 곱으로 표현된다. 따라서 전기기기의 설계는 적용하는 전기 및 자성재료의 특성을 최적으로 활용하도록 전기 및 자기장하를 분배하는 작업이 되고, 이 같은 설계법을 장하분배법이라 한다[3].

표준설계조건으로 최초 설정한 유속의 150% 를 설정하고, 장하분배법(Load Distribution Method)을 이용하여 설계하였다. 장하분배법은 최종적으로 설계한 전자기펌프는 출력 8 [W], 유량 16.5 [l/min], 압력 30 [kPa], 용량 4.5 [kVA], 유속 0.323 [m/s], 2극 3상 220 [V]로 결정하

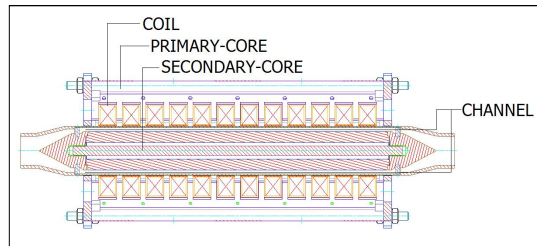
였다. 최종설계 사양은 표 3에 나타내었다

[표 3] TLIM의 설계 데이터(40 [N])

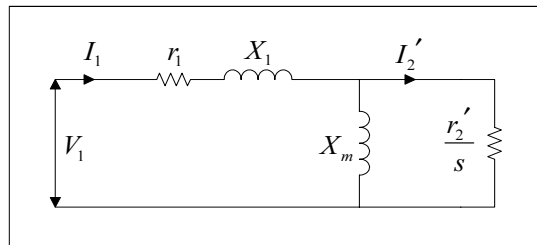
용량[kVA]	4.5
구동전력[W]	8
극수[극]	2
전압[V]	3상
정격속도[m/s]	0.323
주파수[Hz]	60
체적유량[l/min]	16.5

3.2 등가회로법을 이용한 TLIM 특성해석

TLIM의 설계 및 제작과 액체금속이송연구의 대표적인 것으로 원자력연구소의 J.E. Cha의 연구[4]가 있다. 본 연구에서는 J.E.Ch의 전자기펌프설계를 참조하고, 본 연구의 실험조건과 액체금속종류를 고려하여 체계적인 설계를 수행하였다. 그림 3은 전자기펌프의 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 임피던스 계산에서는 우드메탈의 유속 및 자기장의 동기 속도가 동시에 고려되어 나타난다. 그림 4는 TLIM의 해석모델을 등가회로로 나타낸 것이다.



[그림 3] 원통형 전자기펌프의 해석 모델



[그림 4] 전자기펌프의 등가회로

각각의 등가저항 및 리액턴스는 펌프의 기하학적 및 동작변수로 이루어진 자기회로로부터 계산된 Laitthwaite의 표준설계공식에 의해 식 (4)~식(7)과 같이 표현된다.[5, 6]

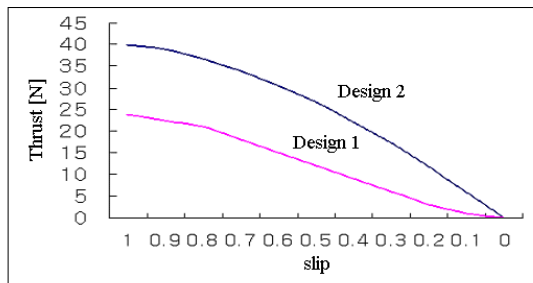
$$r_1 = \frac{\pi \rho_c q k_p^2 m^2 D_2 N^2}{k_f k_d p \tau^2} \quad (4)$$

$$X_1 = \frac{2\pi \mu_0 w D_2 \lambda_c N^2}{p q} \quad (5)$$

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

$$r'_2 = \frac{6\pi D}{\tau p} \rho'_r (K_m N)^2 \quad (7)$$

구동전력을 4.85[W]로 하여 설계한 결과 24[N]이었으며, 본 논문에서는 설계요건을 종합적으로 고려하고, 시장성 및 제작시의 오차를 고려하여 24[N]보다 큰 추력을 구하기 위해 재설계하여 등가회로법으로 해석한 결과 표 3에 나타난 바와 같이 40[N]을 얻었다. 그림 5는 슬립 변화에 따른 추력 특성을 나타낸다. 여기서 Design 1은 최초설계조건, Design 2는 최종설계조건을 나타낸다.



[그림 5] 슬립에 따른 추력의 변화

4. MHD 유동해석 방법

4.1 전자기력을 고려한 유체유동방정식

본 연구에서는 액체금속의 유동실험을 통해 인가된 자기 힘에 의한 유량 또는 유속을 측정하고, 이것을 이론적으로 계산한 결과와의 비교를 통하여 향후 다양한 자기 힘에 대한 유량변화를 예측하고자 하는 목적을 가지고 있다. 즉, 향후실험에서는 표준설계조건(40N)에서

의 우드메탈(Woon's Alloy)의 유량실험을 수행하고 이 실험결과를 수치해석결과와 비교할 예정이다. 본 논문에서는 수치해석프로그램을 개발한 내용을 소개하고 개발된 프로그램의 검증을 위하여 상용코드인 FLUENT를 이용하여 계산한 결과와 비교하였다.

먼저, 이장에서는 수치해석에 관한 내용을 요약하고자 한다. 전자기펌프에서 발생한 자기장에 의해 유로 내의 용융금속에 힘이 전달되어 유 체유동이 발생하는 데, 이러한 유동방정식은 식(8)~식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

Lorentz Force Equation

$$\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B} \quad (8)$$

Continuity Equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (9)$$

Modified Navier-Stokes Equation

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F}_L \quad (10)$$

x축 방향의 속도에 대한 이산화방정식에 Lorentz Force를 추가함으로써 유동장과 전자장을 결합하였다. $\vec{J} \times \vec{B}$ 은 유도전류와 가해주는 자기장과의 반응에 의해서 생긴 전자기력(Lorentz Force)을 나타낸다. 본 연구에서는 측정에 의하여 구한 전자기력을 상수로 가정하여 식(10)에 적용하였다. 물론 전자기력은 유로단면을 통하여 보면 일정하지 않지만, 본 연구에서는 평균적인 전자기력의 크기가 평균적인 속도에 미치는 영향을 우선적으로 보고자 하였다.

4.2 알고리즘

유체 유동에 관한 위의 식들을 이산화하고 결합하게 풀게 되면 유체유동의 속도 및 압력 등을 구할 수 있다. Lorentz Force의 세기는 전자기 펌프에 가까운 유로의 벽면에서 그 세기가 크고 거리가 가장 먼 유로의 중심이 가장 약하지만 본 논문에서는 Lorentz Force의 세기가 전체 해석 영역에 일정하다고 가정하였다.

본 연구에서는 SIMPLE Algorithm[7]을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 이산화 된 운동량방정식 및 압력수정방정식의 대수 방정식을 효율적으로 산출하기 위해서 TDMA와 완화법을 조합시켜 계산하였다. 가정된 속도는 유체순화장치의 전체 ΔP 와 Lorentz Force의 값을 결정하게 되는데 이 때 가정된 속도와 계산된 속도장의 평균

값과 일치 하지 않으면 수정방정식에 의해 처음부터 다시 계산하게 되어 수정방정식에 의해 입력된 속도와 결과 값이 수렴조건에 만족을 하게 되면 출력하게 하였다.

4.3 압력강하와 Lorentz Force

유체순환장치의 유동 해석에서 가장 중요한 것은 압력 강하이다. 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 해석 할 수 있는 것이다.

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

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho u^2}{2} \quad (11)$$

where

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

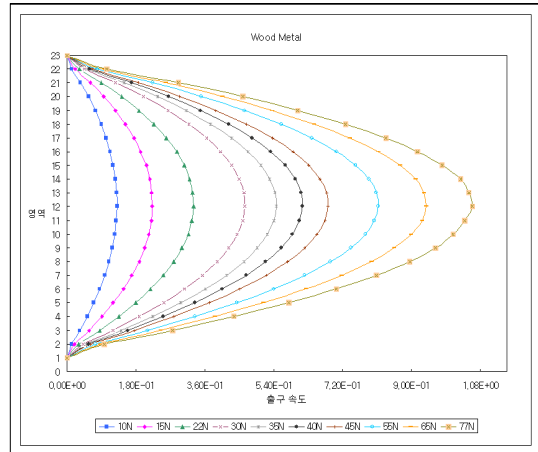
$$f = \frac{64}{Re} (\text{층류}), \quad f = 0.184^{-0.2} (\text{난류})$$

또한 형상에 의한 압력강하 즉 손실은 무시하고 유동은 완전발달이라고 가정한다.

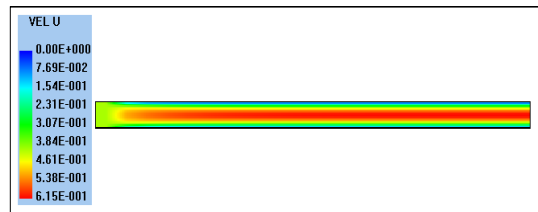
5. MHD 유동해석 결과

5.1 전자기펌프에서의 액체금속 속도특성

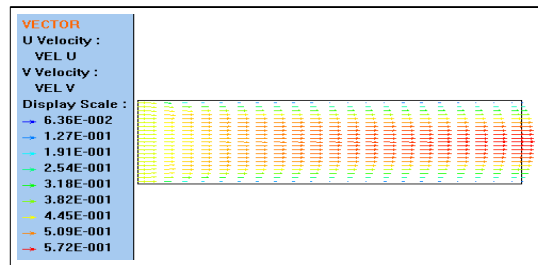
그림 6은 10[N]~77[N]의 인가된 전자기력에 대한 전자기펌프 유로안의 액체금속의 속도분포를 나타낸다. 또한, 그림 7은 본 논문의 설계 조건인 전자기력 40[N]일 때에 속도를 보여주는 분포와 벡터이다. 전자기력이 증가함에 따라 유체의 속도가 환상유로 내에서 벽면에 비해 중심부에서 더욱 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 평균속도에 대한 Re 수는 34.8 ~ 283.2로서 층류유동 영역이며 이는 해석된 속도분포가 포물선형을 보이고 있음에서 확인되고 있다. 우드메탈의 물성치를 고려해 볼 때, 우드메탈은 물에 비해 동점성계수가 $10^4 \sim 10^5$ 배 수준이어서 동일한 속도와 기하학적 형상에 대하여 물의 경우에 비해 매우 작은 Re 수를 나타낸다고 볼 수 있겠다.



[그림 6] 전자기력의 크기에 대한 x축방향의 속도분포



(a)



(b)

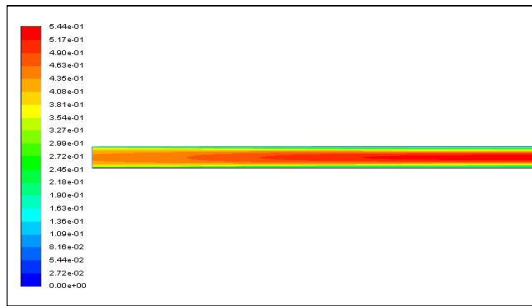
[그림 7] 표준설계조건에서의 x 축방향의 속도분포와 속도벡터

[표 4] 전자기력의 크기 변화에 대한 유체특성

Lorentz Force [N]	평균속도 [m/s]	Re 수	유량 [kg/s]
10	0.087	34.8	0.072
15	0.149	59.6	0.123
22	0.221	88.4	0.182
30	0.310	124	0.255
35	0.365	146	0.301
40	0.411	164.4	0.339
45	0.456	182.4	0.376
55	0.544	217.6	0.448
65	0.628	251.2	0.517
77	0.708	283.2	0.583

5.2 프로그램의 검증

본 연구에서 개발한 프로그램을 검증하기 위하여 상용 코드인 FLUENT로 계산한 결과와 비교하였다. 그림 8은 펌프의 설계 사항인 40 [A]에 대한 속도분포를 FLUENT로 해석한 결과이다. 또한, 표 5는 계산결과를 비교한 데이터이다.



[그림 8] x 축방향의 속도 (40 [A])

[표 5] Lorentz Force에 의한 두 프로그램에서의 평균속도 결과 값 비교

Lorentz Force [A]	ΔP [N/m ²]	Developed Code; Velocity [m/s]	FLUENT; Velocity [m/s]
10	1909.5	0.087	0.077
15	3834.6	0.149	0.139
22	6420.8	0.221	0.212
30	10097	0.310	0.303
35	12521	0.365	0.357
40	14947	0.411	0.408
45	17370	0.456	0.457
55	22092	0.544	0.547
65	26823	0.628	0.631
77	31918	0.708	0.713

결과에서 볼 수 있듯이 두 코드로 계산한 결과 값을 비교해보면 오차가 5% 미만으로 본 연구에서 개발된 코드의 신뢰성이 충분함을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 먼저 장하분배법을 이용하여 전자기 펌프를 자체적으로 설계하고 제작하였다. 또한, 설계된 전자기 펌프의 전자기력은 등가회로법으로 계산하였고, 또한 실제의 전자기력을 측정하였다.

또한, 향후 실험결과와의 비교를 위하여 액체금속의 유동특성해석 프로그램을 개발하였다. 또한, 개발된 프로그램의 검증을 위하여 상용코드인 FLUENT를 사용하여

계산한 결과를 비교하였다. 다양한 전자기력의 크기에 대한 액체금속(우드메탈)의 평균속도에 대한 결과는 FLUENT의 결과와 5%이내의 오차 내에서 잘 일치하였다. 본 프로그램은 향후 액체금속실험결과와 비교하고, 다양한 실험조건에서 액체금속의 속도 및 유량을 예측하는 데 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 김희령 “환단면 선형유도전자펌프의 자기유체역학적 동특성 해석 및 설계 기법 개발”, 서울대학교 원자핵공학과 박사학위논문, 1988.
- [2] 최훈기, 유근중, 박태봉, 은재정, 장남영, “선형유도전자펌프내의 자기유체 유동에 관한 수치적 연구”, 공업기술연구 학술지널, 제3권, pp. 51-57, 2003
- [3] 원중수 역, 대학과정 전기설계학, 동일출판사, pp. 39-64, 1994.
- [4] Cha, J. E., "Preliminary Design of Dynamic Corrosion Facility for Lead-Bismuth Eutectic", KNS Spring Conference, 2003.
- [5] Borghi, C. A., Cristofolini, A., and Fabbri, M., "Study of the Design Model of a Liquid Metal Induction Pump," IEEE Trans. Magn., vol.34, no.5, pp.2956-2959, 1999.
- [6] Nasar, S. A., "Linear motion electromagnetic systems," John Wiley & Sons, pp.131-263, 1998.
- [7] Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

권 정 태(Jeong-Tae Kwon)

[정회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 포항공과대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 포항공과대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2005년 2월 : 남부대학교 자동차기계공학과 조교수
- 2003년 3월 ~ 2004년 3월 : Kyushu University, Post-Doc.
- 2005년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

2상유동, 열전달, 냉동공조

김 서 현(Seo-Hyun Kim)

[준회원]



- 2007년 2월 : 호서대학교 기계공학과 (공학사)
- 2009년 2월 : 호서대학교 메카트로닉스 (공학석사)

<관심분야>

유동 수치해석, 열전달, 2상유동

임 호 재(Hyo-Jae Lim)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학과 교수
- 2008년 8월 ~ 현재 : 지식경제부 지역인력양성센터장

<관심분야>

지열냉난방, 난류유동, 전산열유체

남 택 훈(Taek-Hun Nam)

[준회원]



- 2007년 2월 : 호서대학교 기계공학과 (공학사)
- 2009년 2월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학과 (석사 과정)

<관심분야>

CFD, 2상유동, 열전달

김 창 업(Chang-Eob Kim)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1995년 8월 : 한양대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1983년 2월 ~ 1997년 2월 : 효성중공업 기술연구소 책임연구원
- 2000년 8월 ~ 2001년 8월 : Southampton University, Post-Doc.
- 1997년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전자기기 설계 및 해석, 전자계-유동 해석