

선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성해석 및 실험

(Characteristics Analysis and Experiment of Electromagnetic Pump using LIM)

김창엽* · 전문호 · 권정태 · 임효재

(Chang-Eob Kim · Mun-Ho Jeon · Jeong-Tae Kwon · Hyo-Jae Lim)

요 약

본 논문에서는 선형유도전동기의 전자기력에 의해 용융 금속을 이송할 수 있는 전자기 펌프에 대하여 특성 해석 및 실험 결과에 대하여 제시하였다. 선형유도전동기에서 발생하는 전자기력과 전자수력학(MHD) 현상을 결합하여 용융 금속의 이송 특성을 해석하였다. 실험은 용융 아연을 대상으로 하였으며, 해석 결과와 비교 검토하였다.

Abstract

This paper presents the characteristics analysis and experiment of the electromagnetic pump using linear induction motor(LIM Pump) which can transfer the molten metals by the electromagnetic force. The characteristics of LIM Pump are analysed solving the magneto-hydro-dynamic(MHD) equation at various magnetic flux. The molten zinc is used in the experiment and the results are compared with the analysis.

Key Words : LIM Pump, MHD, Molten metal, Characteristics Analysis

1. 서 론

전자기 펌프에 대한 연구는 Faraday에 의해 처음 고안된 이후 1900년대 초에 전자유량계 및 액체금속을 이송하기 위한 전자기 펌프로 이용되기 시작하였다. 전자기 펌프의 본격적인 개발은 1928년도에 Einstein과 Szilard가 수은, 나트륨 및 칼륨과 같은 알칼리 금속을 이송하기 위하여 원통형 선형유도 펌프를 개발한 이후 1942년도에 Feld와 Szilard에 의해

이 형태의 펌프 설계방정식이 정립되었다. 이후 액체금속을 냉각재로 이용하는 고속 증식로의 냉각재 이송펌프로 사용하기 위하여 유럽 등지에서는 여러 형태의 전자기펌프가 개발되었다. 최근에는 미국, 러시아, 일본 등의 국가에서 전자기 펌프의 일종인 직류 전도펌프를 이용하여 선박을 운항하기 위한 해수 추진 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 전자기 펌프는 전도펌프와 유도펌프로 분류된다. 유도 펌프는 일반적으로 높은 전도도를 가진 액체금속에 사용되며, 원통형 펌프, 헬리컬 펌프, 평편형 리니어 유도펌프, 원통형 리니어 유도펌프로 분류된다. 평편형 리니어 유도펌프는 대용량의 유체를 이송시키기 위하여 나선형 구조의 펌프를 개선한 것으로 가장 많이 사용되는 펌프이다. 전자기 펌프는 액체

* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수

Tel : 041-540-5657, Fax : 041-540-5693

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

접수일자 : 2007년 2월 27일

1차심사 : 2007년 3월 2일

심사완료 : 2007년 3월 30일

선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성해석 및 실험

금속의 도전성을 이용하는 것으로 종래의 기계식에 비해 회전부가 없고 보수가 필요 없으며 동작시 유도전압 조정기를 이용하여 유량제어를 쉽게 할 수 있는 장점이 있다. 전자기 펌프의 원리는 전류와 자계 사이에 발생하는 힘에 의해 전동기가 회전하는 원리와 같으나 전동기는 회전운동을 하는 반면 전자기 펌프는 액체금속이 직선적인 선형 운동을 하는 점이 다르다. 즉 1차측에 가한 교류에 의한 이동자계와 이 이동자계에 의해 2차측에서 발생한 유도전류와의 상호작용에 의해 펌프작용이 이루어지는 것이다. 전자기 펌프의 구조상 2차측(용융금속)과 펌프 덕트 등에서의 손실이 크며, 일반적으로 고온에서 사용되므로 절연 및 내열재료 특성에서도 많은 연구가 필요하다. 유도형 전자기 펌프에서는 2차도체가 되는 유체의 도전성이 펌프 성능에 큰 영향을 미친다[2]. 본 논문에서는 전자기 펌프에 편축식 선형유도전동기(LIM)를 사용하여 전도성 액체금속을 이동할 수 있는 전자기 펌프를 제작하고 자기유체역학(MHD)을 이용하여 전자기 펌프내 유체의 유동특성을 해석한 후 실험을 통해 해석 결과와 비교 분석하였다. 해석에 사용한 용융금속은 아연, 주석, 알루미늄이고 실험은 아연으로 하였다.

2. 전자기 펌프 특성해석

2.1 전자기 펌프용 선형유도전동기

LIM에 대한 체계적이며 합리적인 연구는 1950년대에 들어서 영국의 Laithwaite 교수로부터 시작되어 현재까지 발전해 오고 있다[3]. 본 논문에 사용된 전자기 펌프는 그림 1과 같다. 덕트 아래 부분에 설치된 편축식 LIM의 추진력에 의하여 용융로에 있는 액체 금속이 저장탱크로 흐를 수 있도록 설계하였다. 덕트내 용융 금속의 흐름은 용융로 내의 용융 금속 자체 중력에 의한 힘과 덕트에서의 마찰력 및 LIM의 추력에 의하여 영향을 받는다. 또한 LIM은 4극과 6극을 제작하여 두 가지 특성을 비교하였다. 그림 2는 LIM의 해석 모델과 등가회로도이다.

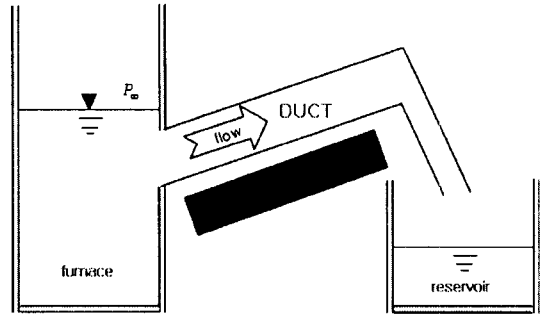
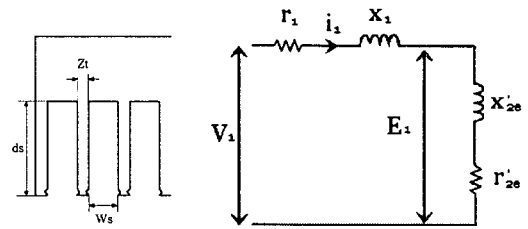


그림 1. LIM을 이용한 전자기 펌프
Fig. 1. Electromagnetic Pump using LIM



(a) LIM 해석모델 (b) LIM 등가회로

그림 2. LIM 해석모델과 등가회로
Fig. 2. Analysis model and equivalent circuit of LIM

여기서 W_s 는 LIM 1차측 철심의 슬롯폭, d_s 는 슬롯 높이, Z_t 는 치폭, V_1 는 입력전압, r_1, X_1 은 1차 권선 저항과 리액턴스, r'_{2e}, X'_{2e} 는 단부효과를 고려한 등가 2차 저항과 리액턴스를 나타내고 특성식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[4-5].

$$\text{동기 와트 : } P_{gl} = m V_1^2 r'_{2e} / Z_1^2 [\text{W}] \quad (1)$$

$$\text{추력 : } F_x = m V_1^2 r'_{2e} / V_s Z_1^2 [\text{N}] \quad (2)$$

$$\text{출력 : } P_0 = (1-s) m V_1^2 r'_{2e} / Z_1^2 [\text{W}] \quad (3)$$

$$\text{1차 입력 : } P_1 = m V_1^2 (r_1 + r'_{2e}) / Z_1^2 [\text{W}] \quad (4)$$

$$\text{1차 동손 : } P_{c1} = m V_1^2 r_1 / Z_1^2 [\text{W}] \quad (5)$$

$$\text{2차 동손 : } P_{c2} = sm V_1^2 r'_{2e} / Z_1^2 [\text{W}] \quad (6)$$

$$\text{피상 입력 : } P_A = m V_1^2 / Z_1 [\text{VA}] \quad (7)$$

$$\text{효율 : } \eta = P_0 / P_1 = (1-s) r'_{2e} / (r_1 + r'_{2e}) \quad (8)$$

표 1은 전자기펌프에 사용된 LIM의 사양이다.

표 1. LIM 사양
Table 1. Specifications of LIM

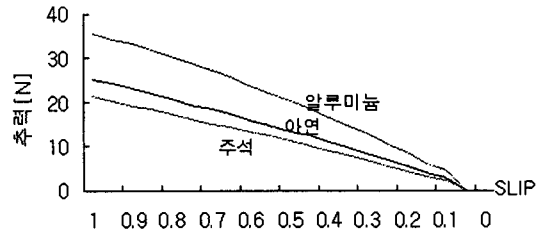
항 목	모 델 1	모 델 2
극 수	4	6
선간 전압[V]	220	220
주파수[Hz]	60	60
극간격[mm]	108	72
슬롯깊이[mm]	47	47
슬롯폭[mm]	8.8	8.8
치폭[mm]	3.2	3.2
1차축길이[mm]	519.2	495.2
기계적 공극[mm]	3	2
1상의 직렬턴수	480	480
반코일의 길이[mm]	206	190
1차 저항[Ω]	3.3575	3.0967
적층폭[mm]	80	100
1차축 중량[kg]	18.99	22.96
단절율	7/9	5/6

2.2 LIM 특성해석

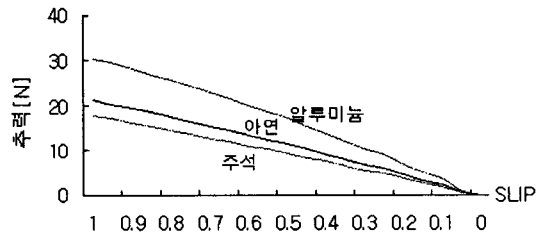
특성 해석을 위해서 2차축인 용융금속의 물성치를 알아야 한다. 본 논문에서는 주석, 아연, 알루미늄의 세 가지 용융금속을 사용하였으며, 표 2에 각각의 물성치를 나타내었다. 4극 LIM은 공극 3[mm], 6극 LIM은 공극 2[mm]로 하고 슬립의 변화에 따른 추력의 변화를 그림 3에 나타내었다. 해석 결과 도전을 이 높은 알루미늄-아연-주석 순으로 추력이 높은 것을 알 수 있다. LIM 펌프에서는 일반적으로 속도가 낮으므로, 그림 3에서는 슬립이 1일 때 공극의 변화에 따른 추력의 변화 특성을 나타내었다.

표 2. 용융금속의 물성 값
Table 2. Properties of molten metals

재료	용융온도 [K]	전기 전도도 [S/m]	열 전도도 [w/m·k]	점도 [kg/m·s]	밀도 [kg/m ³]	비열 [J/kg·K]
주석	505	2110000	30.0	0.00538	6980	250
아연	692.5	2670000	49.5	0.00413	6575	481
알루미늄	933	4123711	94.05	0.00149	2385	1080



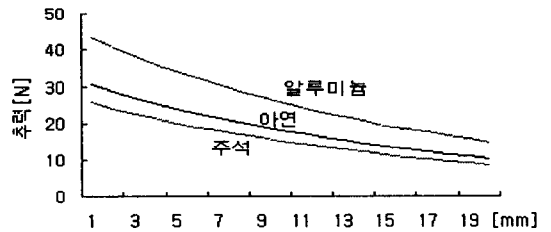
(a) 4극 LIM



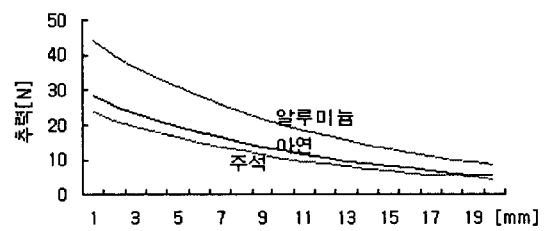
(b) 6극 LIM

그림 3. 슬립변화에 따른 추력

Fig. 3. Trust vs. slip



(a) 4극 LIM



(b) 6극 LIM

그림 4. 공극변화에 따른 추력

Fig. 4. Trust vs. air gap for 4-pole and 6-pole LIM

그림 5는 4극 LIM 펌프의 슬립이 1일 때와 0일 때의 자속선도이다. 여기서 해석에 사용된 금속은 용융 아연이고, 1차축 인가전압은 3상 220[V], 주파수는 60[Hz]이다.

선영유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성해석 및 실험

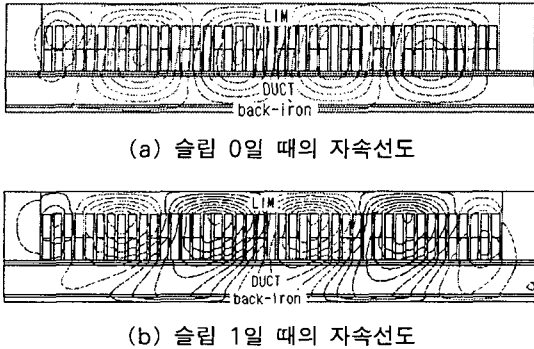


그림 5. 4극 LIM의 자속선도
Fig. 5. Flux line for 4-pole LIM

2.3 자기유체역학에 의한 전자기펌프의 특성해석

자기유체역학(MHD)은 전기 전도성을 지니는 유체의 전자기장 속에서의 운동으로 유체가 자기력선을 가로지르는 방향으로 운동하면, 전류가 흘러 새로운 자기장이 발생하고, 또 자기장속에 전류가 흐르면 유체에 힘이 작용하는 원리이다[6]. 본 논문에서는 이 MHD 원리를 이용한 프로그램인 Fluent를 사용하여 전자기펌프에서의 용융금속의 유동 특성을 해석하였다. 아연의 녹는점은 419.6[°C]로 실험시 온도를 유지하기 위해 용융 금속이 흐르는 관에 보온장치를 하여 용융 금속이 토출하는 도중에 굳어지는 것을 방지하였다. 실험에 사용한 전자기 펌프의 토출부인 덕트의 경사면은 4극 LIM일 때 41.9[°], 6극 LIM일 때 32[°]의 두 가지 모델을 사용하였다. 용융금속이 이송되는 덕트는 높이 30[mm], 폭 80[mm], 길이 600[mm] 크기의 스테인레스강(304)을 사용하였다. 덕트의 온도를 아연의 녹는점보다 높게 유지하여야 굳지 않기 때문에 500[°C]이상으로 유지시켜 주었다. 이때 LIM주변의 온도는 200[°C] 이상의 고온이므로 덕트 표면과 LIM사이의 공극은 일반적인 경우보다 커야 한다. 또 LIM을 보호하기 위해 몰딩을 하여 고온에 견딜 수 있도록 하였다. 그림 6은 실험 장치의 구성도이다. 가열로 내부에 용융금속이 가득 차 있다고 가정하고 LIM에 전원이 가해지지 않았을 때 덕트에서 금속이 흐르지 않도록 하기 위해서는 가열로 내의 용융 금속의 높이가

400[mm]일 때 덕트의 경사면이 41.9[°]가 되어야 한다.

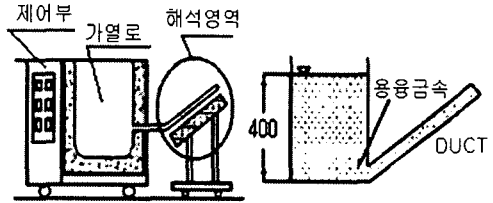


그림 6. LIM 펌프 실험장치 구성
Fig. 6. Construction of Experiment for LIM Pump

그림 7은 4극 전자기 펌프에서 LIM에 전원이 인가되지 않은 상태의 유체 속도 분포를 모의한 것이다. 그림에서 수평으로 속도의 경계층이 생기는데 이것은 중력에 의한 것으로 덕트 하층부에는 중력의 영향 때문에 역류가 발생하고, 덕트 상층부에는 입구단으로부터의 압력에 의해 순류가 발생한다. 즉 하부로 갈수록 중력의 작용에 의해 유속이 느려진다. 이 결과는 출구단 쪽으로 가면 반대로 나타난다. 그림 8은 LIM에 전원이 인가된 상태의 유체 속도 분포를 모의한 것이다. LIM에서 발생하는 추력에 의해 유속이 크고, 상대적으로 입구단보다 출구단의 유속이 빠름을 알 수 있다. 또한 덕트의 상층부보다 하층부의 유속이 빠르게 나타나는데 이것은 LIM에서 발생하는 자기력이 덕트의 상층부로 갈수록 약해지기 때문이다.

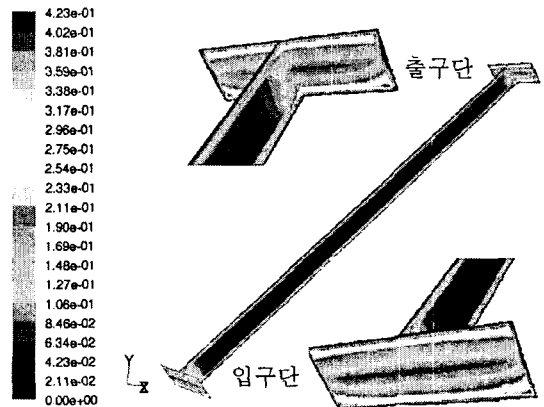


그림 7. 4극 LIM 영향이 없을 때의 유속 분포
Fig. 7. Flow velocity without 4-pole LIM

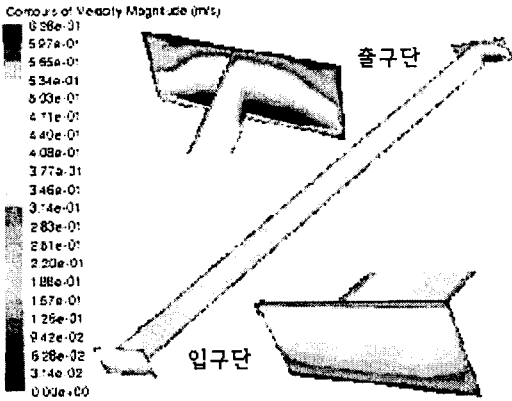


그림 8. 4극 LIM 영향이 있을 때의 유속 분포
Fig. 8. Flow velocity with 4-pole LIM

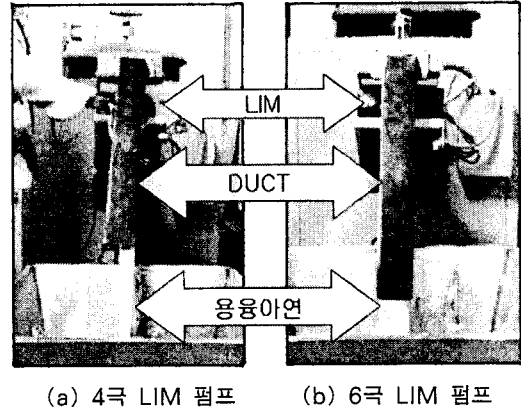


그림 9. LIM 펌프 실험
Fig. 9. Experiment of LIM pump

용융금속의 재료 및 공극자속밀도의 변화에 따른 유량을 알아보기 위해 용융금속이 아연과 주석인 경우 덕트 내부의 자속밀도를 0.1~0.3[T]까지 변화할 때 각각의 유속 및 단위시간당 토출 중량을 표 3과 같이 구하였다. 덕트 내부의 자속밀도가 커질수록 유속 및 토출 중량이 커지는 것을 알 수 있다.

표 3. 자속밀도에 따른 토출 중량 및 유속
Table 3. Flux and velocity vs. magnetic flux density

각도	자속밀도	아연[Zn]	주석[Sn]
41.9[°]	0.1[T]	5.66[kg/s], 0.28[m/s]	5.72[kg/s], 0.26[m/s]
	0.2[T]	6.33[kg/s], 0.3[m/s]	6.09[kg/s], 0.28[m/s]
	0.3[T]	6.94[kg/s], 0.34[m/s]	6.5[kg/s], 0.3[m/s]
32[°]	0.1[T]	2.46[kg/s], 0.12[m/s]	1.43[kg/s], 0.08[m/s]
	0.2[T]	2.63[kg/s], 0.13[m/s]	2.55[kg/s], 0.12[m/s]
	0.3[T]	3[kg/s], 0.14[m/s]	3[kg/s], 0.14[m/s]

3. 실험 및 검토

그림 9는 용융 아연을 대상으로 덕트내 자속밀도 0.1T에서 4극과 6극 전자기 펌프에 대해 유동특성을 실험한 사진이다. 토출 중량을 구하기 위해 용융금속이 덕트에 꽂 차서 흐른다고 가정하면, 토출 중량은 식 (9)와 같이 계산된다.

$$\text{토출중량} = \text{비중} \times \text{평균유속} \times \text{덕트면적} \times \text{토출시간} \quad (9)$$

그림 10은 시간에 따른 LIM 펌프의 토출높이를 도시화 한 것이다. 실험으로부터 토출시간 계산은 용융 아연이 덕트에 꽂 차서 흐른다고 가정하면, 빗금 친 부분과 같이 구할 수 있다. 그 결과 4극 LIM 펌프의 토출시간은 34초, 6극 LIM 펌프는 41초로 계산된다. 식 (9)에 의한 이론상 토출 중량은 4극 LIM 펌프인 경우 134[kg], 6극 LIM 펌프에서는 102[kg]이다. 또한 4극 LIM 펌프에서의 입구단 초기압력은 0.2543[atm]이고, 실험이 끝난 후의 압력은 0.2142[atm]이다. 6극 LIM 펌프의 압력은 초기 0.2022[atm], 실험 후 0.1672[atm]이다. 본 논문에서는 출구단에서 빠져나온 용융아연이 저장탱크로 흘러들어가는 구조로 덕트 출구단의 압력이 해석영역에 영향을 주지 않으므로 전기로에서 용융아연이 토출되어 압력변화가 생기는 입구단의 압력 변화를 그림 11에서 나타내었다.

실험 결과 4극 LIM 펌프는 82초 동안 총 토출 중량이 117[kg]이고, 6극 LIM 펌프는 123초 동안 103.3[kg]이었다. 특성해석 결과와 실험과의 오차는 해석에서 고려하지 못한 원인에서 찾을 수 있으리라 생각된다. 즉 LIM에 의해 용융 금속이 토출되면서 용해로 내부의 금속 높이와 덕트 내부의 금속 높이가 변화하는 것을 반영하지 못했으며, 덕트 벽면의 마찰 저항도 이상적으로 고려하여 오차의 원인이 되었으리라 사료된다. 또한 덕트 내부의 평균적인 유속을 통하여 토출 중량을 계산하였으나 전자계-유

선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성분석 및 실험

동 해석을 통한 정확한 유속을 알면 이 오차를 줄일 수 있을 것이다.

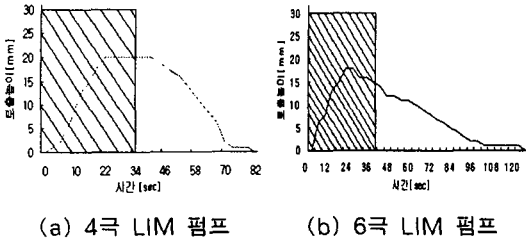


그림 10. 시간에 따른 용융아연 토출높이 변화
Fig. 10. Flow height vs. time

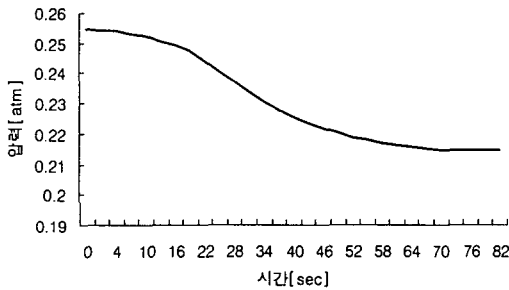


그림 11. 4극 LIM 펌프의 시간에 따른 입구단 압력변화
Fig. 11. Variation of inlet pressure vs. time for 4-pole LIM pump

4. 결 론

본 논문은 LIM을 이용한 전자기 펌프의 해석 및 실험에 대한 연구이다. 자기유체역학을 이용하여 LIM 내부의 유량 및 유속을 해석 하였다. 해석 결과의 검증을 위해 LIM을 이용한 전자기 펌프를 제작 하고, 용융 아연을 대상으로 한 실험을 통해 해석치와 비교 검토하였다. 해석치와 실험 결과의 오차는 덕트 내부의 정확한 유속 측정이 불가능하여 생긴 것으로 앞으로 전자기-유동 문제를 결합한 보다 정밀한 해석이 요구된다.

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

References

- (1) 편집부역, 리니어모터응용핸드북, 세화, 1988.
- (2) C.A. Borghi, A. Cristofolini, and M. Fabbri, "Study of the Design of a Liquid Metal Induction Pump," IEEE Transactions on Magnetics, vol.34, no.5, pp.2956-2959, 1998.
- (3) Dal-Ho Im, Chul-Jik Lee, Yoon-Hyun Cho, "The Conveyer System Driven by a Single-Sided Linear Induction Motor," The Transactions of KIEE, vol.39, no.5, pp.445-452, 1990.
- (4) Mun-Ho Jeon, Jea-Keul Cha, Chang-Eob Kim, "Optimum Design of LIM using Genetic Algorithm, Response Surface Method," Proceedings of the KIEE EMECS Autumn Annual Conference, pp.40-42, 2004.
- (5) Mun-Ho Jeon, Jung-Hyun Kim, Min-Seok Kim, Chang-Eob Kim, "Experiments of Electromagnetic Pump using Linear Induction Motor," Proceedings of the 37th KIEE Summer Annual Conference, pp.691-692, 2006.
- (6) Frank M. White, Fluid Mechanics, McGraw-Hill Education, 2003.

◇ 저자소개 ◇

김창업 (金昌業)

1960년 1월 1일생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983~1997년 (주)효성중공업기술연구소 책임연구원. 2000~2001년 University of Southampton(Post doc.). 1997년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수.

전문호 (全汶鎬)

1976년 12월 11일생. 2002년 2월 호서대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.

권정태 (權正泰)

1966년 3월 2일생. 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)

1961년 11월 14일생. 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 부교수.