

전자기 펌프의 특성해석, 실험 및 고찰

전 문호, 김 정현, 김 민석, 김 창업
호서대학교 전기공학과

Flow Analysis, Experiment and Investigation of Electromagnetic Pump

Jeon Mun-Ho, Kim jung-Hyun, Kim Min-Seok, Kim Chang-Eob
Department of Electrical Engineering, Hoseo University

Abstract - This paper presents the experiment and characteristics analysis of electromagnetic pump using linear induction motor(LIM). The electromagnetic pump is used to transfer the molten metals by electromagnetic force of LIM. The characteristics of LIM pump for molten metals: zinc, tin, aluminum are analysed solving the magnetohydrodynamics at constant magnetic flux. The molten zinc is used in the experiment and the experimental results are compared with the analysis.

1. 서 론

전자기 펌프는 액체금속의 도전성을 이용하는 것으로 종래의 기계식에 비해 회전부가 없고 기밀을 요하는 패킹장치 등이 없어 보수가 필요 없을 뿐 아니라 동작 시 유도전압 조절기를 이용하여 유량제어를 쉽게 할 수 있는 등 많은 장점이 있다[1].

전자기 펌프의 원리는 전류와 자계사이에 발생하는 힘에 의해 전동기가 회전하는 원리와 같으나 전동기는 회전운동을 하는 반면 전자기 펌프는 직선운동을 하는 점이 다르다. 즉 1차측에 가한 교류에 의한 이동자계와 이동자계에 의해 2차측에서 발생한 유도전류와의 상호작용에 의해 펌프작용이 이루어지는 것이다. 전자기 펌프의 구조상 2차측(용융금속)과 펌프 덕트 등에서의 손실이 클 뿐 아니라 전자기 펌프의 이용 특성상 높은 온도에서 사용되므로 절연 및 내열재료 특성에서도 많은 연구가 필요하다. 전자기 펌프는 구동방식에 따라 여러 가지 형태가 이용되고 있는데 특히 유도형 전자기 펌프에서는 2차도체가 되는 유체의 도전성이 펌프 성능에 큰 영향을 미친다. 또한 교번자계의 변화에 따라 액체 금속 내에 자속이 발생하는 형태로 최근에 연구대상이 되고 있는 분야이다[2].

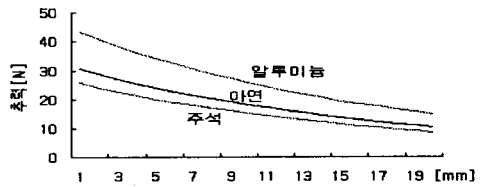
용융금속의 이송은 기계화가 어렵고, 높은 온도에서 작업을 해야 하기 때문에 위험성을 배제할 수 없다. 그래서 비 접촉식 펌프가 필요하며 공간적 제약에서 최대 추력을 발생하는 선형유도전동기(LIM)을 사용하게 되었다. 본 논문에서는 4극과 6극 LIM 두 모델을 사용하였으며, 2차 측이 용융금속이므로 MHD로 해석을 하였다. 실험은 용융아연으로 하였으며, 실험과 해석을 비교 분석하였다.

2. 본 론

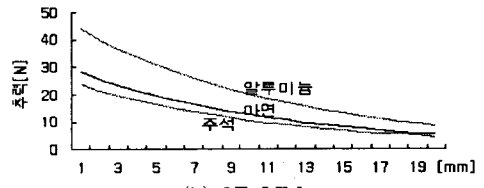
2.1 LIM을 이용한 전자기 펌프의 특성해석

본 논문에서는 3상 220V, 3kVA의 LIM을 이용한 전자기 펌프의 모델에 대해 해석하였다[3][4]. LIM의 특성 해석은 등가회로법을 이용하였으며[5], 공극의 변화에 대한 추력특성과 슬립 변화에 의한 추력특성을 그림 1과 2

에서 나타내었다. 해석 결과 4극 LIM의 추력이 6극 LIM 보다 더 크게 나타나며, 도전율이 높은 알루미늄, 아연, 주석 순으로 추력이 큰 결과 값을 가졌다.

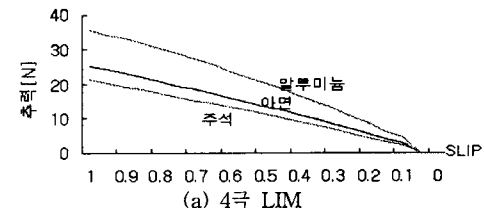


(a) 4극 LIM

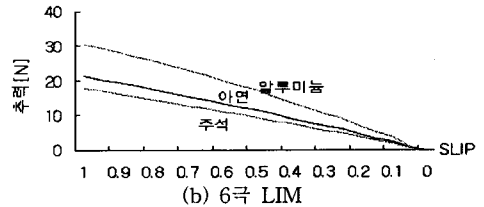


(b) 6극 LIM

그림 1. 공극변화에 따른 추력특성



(a) 4극 LIM



(b) 6극 LIM

그림 2. 슬립 변화에 따른 추력 특성

2.2 자기유체역학에 의한 전자기 펌프 특성해석

자기유체역학(MHD)은 전기전도성을 지니는 유체의 전자기장 속에서의 운동으로 유체가 자기력선을 가로지르는 방향으로 운동하면 전류가 흘러 새로운 자기장이 발생하고, 또 자기장속에 전류가 흐르면 유체에 힘이 작용하여 운동 상태를 바꾸는 것으로서 본 논문은 MHD를 사용한 해석 code인 Fluent를 이용하여 해석 하였다[6]. 용해로 안에 용융금속이 가득 차있다고 가정하면 대기

압에 의해서 용융금속은 덕트를 통해 흘러나오게 된다. 만약 41.9°의 각도로 두고자 한다면 대기압을 고려하여 노의 양정높이를 계산하면 400mm가 된다. 그림 3은 실험기구의 계략도이다.

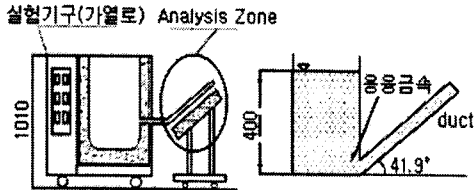


그림 3. 실험기구 계략도

그림 4는 4극 LIM 펌프를 해석한 것으로, 지면과 덕트 각이 41.9°일 때 덕트에서의 해석결과이다. 입구단과 출구단에 수평으로 속도의 경계층이 발생하는데 이것은 중력에 의한 것으로 경계층 하부로 갈수록 유속이 느려지고 경계층 상부로 가면 유속이 빨라지는 것을 볼 수 있다.

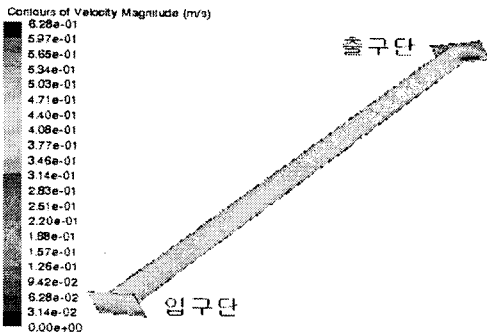
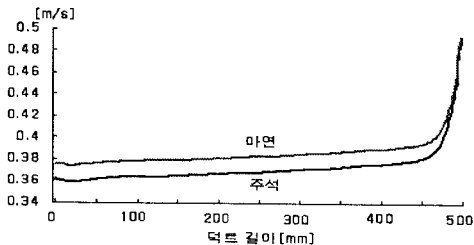
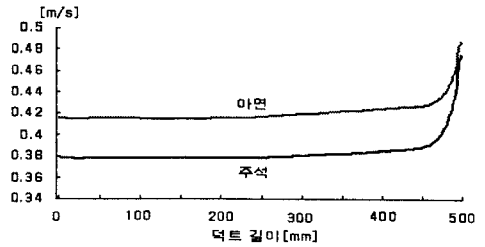


그림 4. MHD를 이용한 전자기 펌프 해석

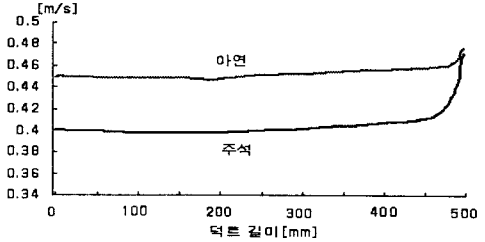
용융금속의 재료 및 공극자속밀도의 변화에 따른 유량을 알아보기 위해 덕트내부 자속밀도를 0.1T~0.3T까지 0.1T씩 변화를 주어 유속을 구하였다. 덕트내부 자속밀도가 증가할수록 유속이 증가하고, 아연과 주석의 유속차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 덕트의 길이에 따른 중앙부에서의 유속을 나타내었다. 여기서 덕트의 길이는 600mm이지만 LIM에서 힘을 받는 부분은 LIM의 길이인 500mm이기 때문에 덕트에 작용하는 길이만 해석 하였다. 표 1은 덕트내부 자속밀도의 변화에 따른 유속을 x축 성분방향과 y축 성분방향으로 나타낸 것이다.



(a) 자속밀도 0.1T



(b) 자속밀도 0.2T



(c) 자속밀도 0.3T

그림 5. 덕트 길이방향에 따른 유속

표 1. 자속밀도 변화에 따른 유량

32°	Zn		Sn		
	x방향[m/s]	y방향[m/s]	x방향[m/s]	y방향[m/s]	
0.1T	0.1036	0.06	0.057	0.03	
0.2T	0.11	0.063	0.1	0.06	
0.3T	0.124	0.073	0.12	0.07	
41.9°	Zn		Sn		
	x방향[m/s]	y방향[m/s]	x방향[m/s]	y방향[m/s]	
	0.1T	0.21	0.18	0.2	0.17
	0.2T	0.23	0.2	0.21	0.18
0.3T	0.25	0.22	0.22	0.2	

유속을 구하기 위해 그림 6과 같이 x방향 유속과 y방향의 유속을 이용하여 V'을 식 (1)과 같이 표현할 수 있고, 또 θ' 은 식 (2)으로부터 구할 수 있다. θ' 값을 구하면 각각의 θ 를 식 (3)으로 구할 수 있고, 식 (4)와 같이 유속을 계산할 수 있다.

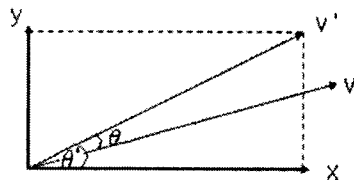


그림 6. 전자기 펌프의 유속

$$V' = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (1)$$

$$\theta' = \tan^{-1}\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad (2)$$

$$\theta_1 = \theta' - 32^\circ, \theta_2 = \theta' - 42^\circ \quad (3)$$

$$V = V' \cos\theta \quad (4)$$

표 2는 자속밀도 변화에 따른 유량 및 유속을 나타내었다. 계산 결과 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 해석 결과 약간의 오차가 발생하는데 이는 z축 성분을 고려하지 않아서 생기는 오차이다.

표 2. 자속밀도 변화에 따른 유량 및 유속

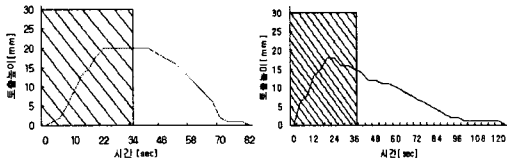
각도	자속밀도	아연 Zn	주석 Sn
42'	0.1T	5.6kg/s, 0.35m/s	5.72kg/s, 0.34m/s
	0.2T	6.33kg/s, 0.4m/s	6.09kg/s, 0.36m/s
	0.3T	6.94kg/s, 0.44m/s	6.5kg/s, 0.388m/s
32'	0.1T	2.5kg/s, 0.15m/s	1.43kg/s, 0.08m/s
	0.2T	2.63kg/s, 0.16m/s	2.55kg/s, 0.15m/s
	0.3T	3kg/s, 0.19m/s	3kg/s, 0.18m/s

3. 실험 및 검토

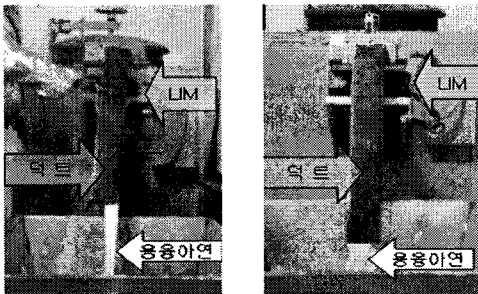
실험에 쓰인 금속은 용융아연이고, 4극 LIM 펌프와 6극 LIM 펌프를 사용하였다. 전자기 펌프의 각도를 조절할 수 있게 유동성 있는 관을 만들어 사용한 경우에 용융 아연이 녹고 굳는 과정을 반복하면서 유동성 관을 부식시키는 결과를 초래하여 각도를 고정하여 실험 하였다. 4극 LIM 펌프와 6극 LIM 펌프는 각각 공극 3mm, 2mm로 주었으며, 각도는 41.9°, 32°로 하였다. 덕트 내부에 용융 아연이 딱 차서 흐른다고 가정하면 토출 중량은 식 (5)과 같이 계산되어진다.

$$\text{토출중량} = \text{비중} \times \text{평균유속} \times (\text{덕트폭} \times \text{덕트높이}) \times \text{토출시간} \quad (5)$$

그림 7은 시간에 따른 LIM 펌프의 토출 높이를 도시화한 것으로 실험으로부터 토출 시간 계산은 용융 아연이 덕트에 딱 차서 흐른다는 가정 하에 빗금친 부분과 같이 구할 수 있다. 그 결과 4극 LIM 펌프는 34초, 6극 LIM 펌프는 41초로 계산 된다. 그림 8은 실험 결과로 용융 아연이 덕트에 가득 차서 나오지 않고, 4극 LIM 펌프가 6극 LIM 펌프 보다 빠른 시간에 많은 양이 토출되는 것을 볼 수 있다.



(a) 4극 LIM 펌프 (b) 6극 LIM 펌프
그림 7. 시간에 따른 용융아연 토출높이 변화



(a) 4극 LIM 펌프 (b) 6극 LIM 펌프
그림 8. LIM 펌프 실험

실험 결과 4극 LIM 펌프는 73초 동안 총 토출중량이 117kg이고, 6극 LIM 펌프는 90초 동안 103.3kg이었다. 특성해석 결과와 실험과의 오차가 상대적으로 4극 LIM 펌프의 경우에 크게 나타났다. 이 오차의 원인으로는 덕트 내부의 저항증가에 의한 토출부 면적의 감소, 실험

의 반복에 의한 용융아연의 점성의 증가, 토출부 입구단의 압력 감소에 대한 영향을 고려하지 않는 점 등을 들 수 있다. 실제로 해석에서는 용해로 내부의 용융 아연이 일정하다고 가정하여 해석함으로써 토출에 따른 용융아연이 감소하는 상황을 고려하지 못하여 토출부 입구단의 압력 감소를 고려하지 못하였다. 표 3은 양정높이에 대한 LIM 펌프의 추력, 토출량을 나타내었고, 표4에서는 LIM 펌프의 특성에 대한 해석, 실험 값을 비교하였다.

표 3. 양정높이에 대한 LIM 펌프 실험결과

	양정높이[mm]	추력[N]	토출량[kg]	공극[mm]
4극 LIM 펌프	400	27.88	117	3
6극 LIM 펌프	330	27.36	103.3	2
4극 LIM 펌프	330	29.62	160	2

표 4. 실험 결과 비교

	4극 LIM 펌프		6극 LIM 펌프	
	아연	아연	아연	아연
용융금속				
덕트각도[°]	41.9		32	
자속밀도[T]	0.1		0.1	
평균유속[m/s]	0.35		0.15	
유량[kg/s]	5.6		2.5	
추력[N]	27.88		27.36	
토출중량[kg]	해석	190.4	해석	102.5
	실험	117	실험	103.3

4. 결 론

본 논문은 선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 해석 및 실험에 관한 연구이다. 자기유체역학을 이용하여 전자기 펌프의 내부 유속 및 유량을 해석 하였고, 전자기 펌프의 양정 및 자속밀도의 변화에 따른 유속을 계산 하였다. 전자기 펌프의 특성실험에 의해 해석 결과와 비교 분석 하였다. 실험 결과 LIM의 추력이 높을수록 토출량도 증가하나, 마찰력, 용융금속의 점도, 전기로 내부의 증력변화에 대한 영향을 정확히 고려하지 못하여 오차가 발생 하였다. 향후 이 오차에 대한 원인을 고려하여 정확한 해석을 위한 연구를 계속할 예정이다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 편집부, 리니어모터 응용핸드북, 세화, pp.412-450, 1988.
- [2] 홍성욱, "유전알고리즘을 이용한 선형 유도 전동기의 최적 설계", 호서대학교 석사학위 청구논문, 2000.
- [3] 차재걸, 전문호, 이종용, 김창업, "LIM을 이용한 전자기 펌프의 특성해석", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.161-163, 2005.
- [4] 전문호, 김정현, 김민석, 김창업, "선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프 실험", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.691-692, 2006.
- [5] 임달호, 이철직, 박승찬, "등가회로법과 SUMT를 이용한 편측식 선형 유도 전동기의 설계변수 최적화", 대한전기학회 논문집, vol.42, no.5, pp.340-343, 1993.
- [6] Frank M. White, Fluid Mechanics, McGraw-Hill higher Education, 2003.