

LIM을 이용한 전자기 펌프의 특성해석 및 실험

전 문호, 김 민석, 김 정현, 김 창업
호서대학교

Experiments and Characteristic Analysis of Electromagnetic Pump using LIM

Mun-Ho Jeon, Min-Seok Kim, Jung-Hyun Kim, Chang-Eob Kim
HOSEO University

Abstract - This paper presents the experiment and the characteristics analysis of an electromagnetic pump using linear induction motor(LIM). The characteristics of LIM pump are analyzed solving the hydrodynamic equation at constant magnetic flux. The molten zinc is used in the experiment and the experimental results are compared with the analysis.

1. 서 론

선형유도전동기(LIM)는 초고속 운송용 전철, 자동 반송장치, 정밀기기 산업에 널리 응용되고 있다[1]. LIM는 용융된 금속을 이송하는 방법으로도 쓰이고 있으나 현재까지는 자유낙하 방식의 유동을 많이 채택하고 있다. 이 방법은 많은 공간의 제약을 받고, 제약 조건이 많이 따르는 단점이 있다[2]. 본 논문에서는 LIM 펌프 성능을 실험하기 위한 시험기를 제작하고 특성실험값을 해석 결과와 비교하였다.

본 논문은 편축식 LIM을 사용하여 전도성 액체금속을 이동할 수 있는 전자기 펌프 장치를 만들고 자기유체역학(MHD)을 사용해 전자기 펌프의 속도와 특성해석을 하였다. 해석에 사용된 금속은 주석, 아연, 알루미늄이고 실제 실험에 사용한 금속은 아연으로 실험을 통한 결과와 특성 해석한 결과를 비교분석 하였다.

실험은 4극과 6극 LIM으로 덕트 각도가 각각 41.9°, 32°로 하였다. 용융금속의 토출구로 사용된 덕트는 스테인레스(304)이고 높이 30mm, 폭 80mm, 길이 600mm를 사용하였다.

그림 1은 전자기 펌프 장치의 실제 모형이다. 상단부분은 덕트 내부의 용융금속이 굳지 않게 하는 보온장치로 덕트를 둘러싸았고, 밑에 있는 부분이 LIM으로 강한 열에 견딜 수 있도록 물딩을 하였다.

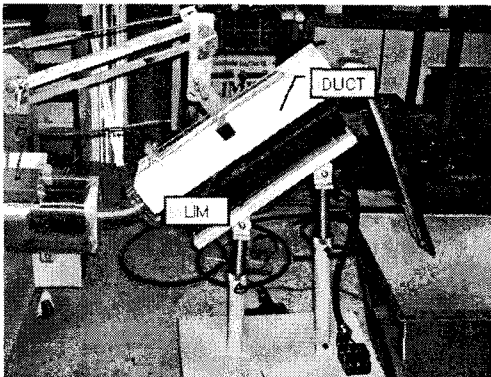


그림 1. LIM을 이용한 전자기 펌프

2. LIM 특성 해석

2.1 LIM 특성 해석

LIM 모델을 4극과 6극 두 가지로 나누어서 특성해석을 하였다[3]. 두 가지 모델을 각각 공극 3mm로 두고 back-iron이 있는 상태에서 도전율이 높은 알루미늄-아연-주석 순으로 추력이 높은 것을 볼 수 있고, 6극보다 4극에서 더 높은 추력이 나타나는 것을 그림 2에서 나타내었다.

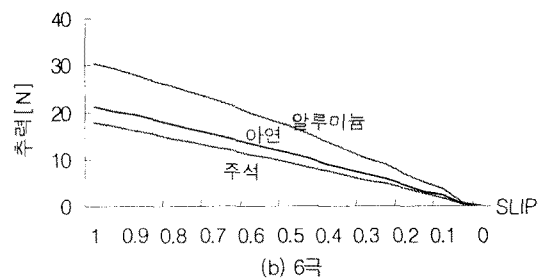
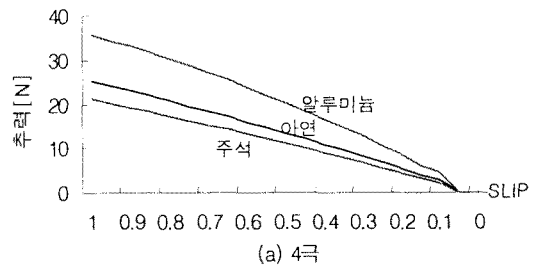
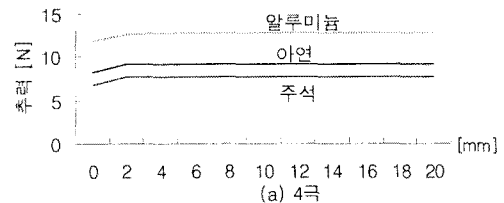


그림 2. 슬립변화에 따른 추력

그림 3은 back-iron의 두께에 따른 추력곡선을 나타내었다. 두께 3mm이상에서는 추력의 변화가 거의 없다. 따라서 실험에서는 back-iron의 두께를 5mm로 제작하였다.



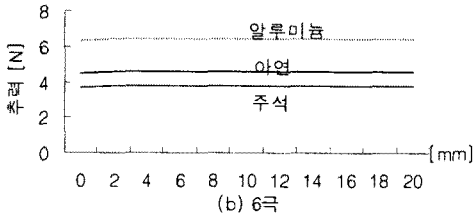
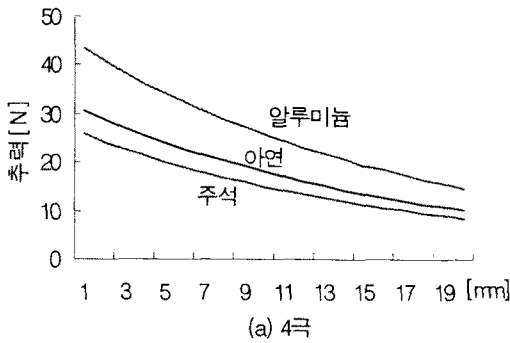
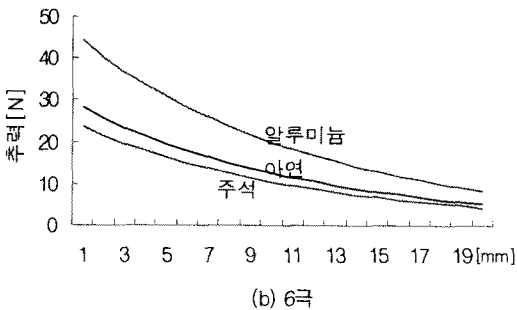


그림 3. back-iron두께 변화에 따른 추력

4극 LIM의 동기속도가 12.96m/s이고 6극 LIM은 8.64m/s이며 용융금속의 속도가 0.23m/s일 때 슬립은 0.98이다. 슬립을 0.98로 두고 공극을 1mm씩 증가시켜 20mm까지 변화시켜가며 추력을 구하였다. 공극이 작을 수록 높은 추력을 얻었고, 도전율이 큰 알루미늄, 아연, 주석 순으로 높은 추력을 얻는 것을 알 수 있었다. 이 결과를 그림 4에 나타내었다.



(a) 4극



(b) 6극

그림 4. 공극변화에 따른 추력

2.2 자기유체역학(MHD)에 의한 LIM 펌프 특성해석

MHD는 전기 전도성을 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 것으로 1937년 J.하르트만으로부터 시작 되었고, H알벤이 본격적으로 발전 시켰다[4]. 본 논문에서는 이 MHD를 사용한 프로그램인 FLUENT를 이용하여 덕트 내에서의 용융금속의 특성을 구하였다.

그림 5는 실험기구의 계략도이다. 전기로 안에 용융금속이 차 있다고 가정하면 전기로 내부 용융금속의 양과 대기압을 고려하여 덕트의 각도를 정해주어야 한다. 만약 400mm의 용융금속이 노에 차 있다고 가정하면 덕트의 각도는 41.9°의 각도를 가져야 용융금속이 흐르지 않는다.

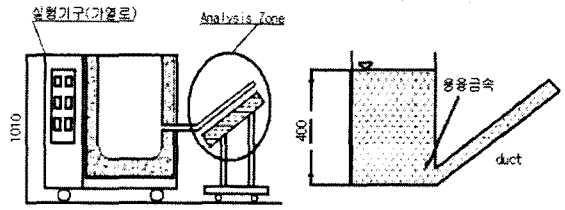


그림 5. 실험기구 계략도

본 논문에서는 4극 LIM을 FLUENT로 시뮬레이션한 결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 그림 6에서 수평으로 생기는 속도의 경계층은 중력의 작용에 의한 것이다. 그림 7의 벡터도에서 덕트 아래 부분은 중력의 힘 때문에 역류가 발생하고, 덕트 윗부분은 입구단의 압력 때문에 순류가 발생한다. 즉 하부로 갈수록 중력의 작용이 커서 속도가 느려진다. 이런 결과 값들은 출구단 쪽으로 가면 역으로 나타난다.

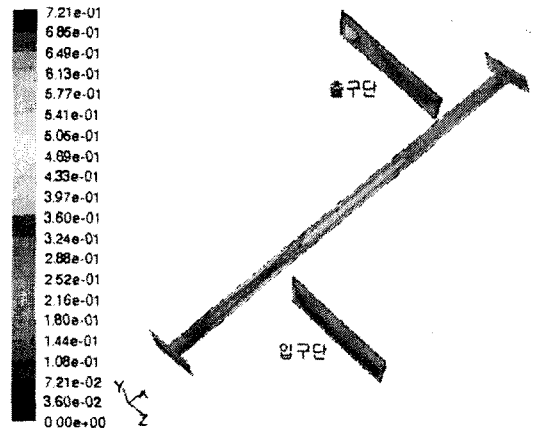


그림 6. MHD를 사용한 해석결과(유속)

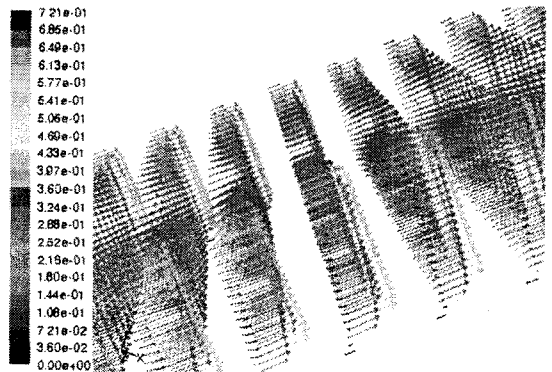


그림 7. 덕트 중간부분에서의 유속 벡터도

용융금속의 재료 및 공극자속밀도의 변화에 따른 유량을 알아보기 위해 덕트내부 자속밀도를 0.05T~0.2T까지 0.05T씩 변화를 주어 유속을 구하였다. 덕트내부 자속밀도가 커질수록 유속이 커지는 것을 알 수 있고, 덕트 내부에서의 유동의 변화가 작아짐을 알 수 있다. 자속밀도가 0.05T일 때 알루미늄의 토출 중량이 가장 작은 것을 볼 수 있는데 이것은 자기장이 걸려도 속도의 경계층이 남아있어 역류가 발생하기 때문이다. 그림 8은 덕트 내부의 길이방향에 따른 유속을 나타내고, 표 1은 덕트내부 자속밀도의 변화에 따른 유량을 나타낸다.

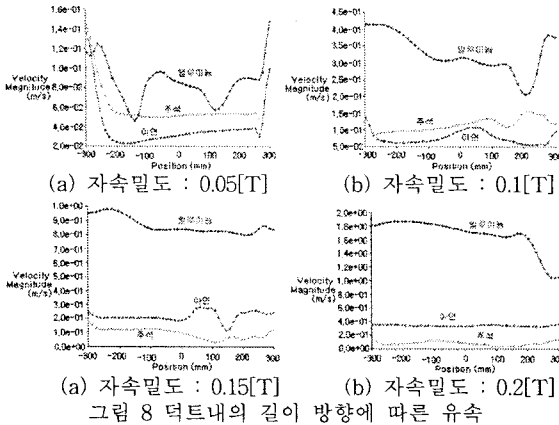


표 1. 덕트내부 자속밀도의 변화에 따른 유량

자속밀도[T]	재료		
	주석 [kg/s]	아연 [kg/s]	알루미늄[kg/s]
0.05	0.516	0.354	0.39
0.1	0.995	0.6967	1.528
0.15	1.3281	2.09	3.4879
0.2	2.4952	3.45	6.68

3. 실험 및 검토

본 논문에서는 4극 및 6극 LIM 펌프로 나누어 특성 해석과 실험을 하였다. 4극 LIM 펌프의 공극이 3mm일 때 덕트내부 자속밀도는 0.37T이며, 덕트각도는 41.9°로 하였다. 6극 LIM 펌프의 경우 공극이 2mm일 때 덕트내부의 자속밀도는 0.36T이며 덕트각도는 32°로 해석하였다. 토출중량을 계산하기 위해서 용융금속이 덕트 높이까지 차서 흐른다고 가정하면 토출 중량은 식(1)과 같이 계산된다.

$$\text{토출중량} = \text{비중} \times \text{평균유속} \times (\text{덕트폭} \times \text{덕트높이}) \times \text{토출시간} \quad (1)$$

그림 9는 시간에 따른 4극 LIM 펌프의 토출높이를 도시한 것이다. 실험으로부터 토출시간(t_1) 계산은 덕트높이가 완전히 차서 흐를 경우로 가정하면 빗금 친 부분과 같이 구할 수 있다. 그 결과 4극과 6극 LIM 펌프의 토출시간은 각각 약 40초와 60초로 계산된다.

실험 결과 4극 LIM 펌프는 82초 동안 총 토출중량이 117kg이고, 6극 LIM 펌프에서는 125초 동안 103.3kg이었다. 특성해석 결과와 실험과의 오차는 4극 LIM 펌프와 6극 LIM 펌프가 각각 25.8%, 31%가 되는데 이는 LIM의 힘이 작용하는 공간보다 용해로 안의 용융금속이 토출되어 높이가 낮아졌기 때문이다. 실제 용융금속이 토출되는 출구단의 면적은 시간이 경과 할수록 줄어드는 것을 그림 9에 나타내었고, 그림 10은 LIM 펌프 실험 장면이다. 표 2는 실험 결과와 특성해석을 비교하여 나타내었다.

표 2. 실험 결과 비교

	4극 LIM 펌프	6극 LIM 펌프		
용융금속	아연	아연		
덕트각도[°]	41.9	32		
자속밀도[T]	0.37	0.36		
평균유속[m/s]	0.23	0.175		
유량[kg/s]	3.94	2.99		
토출중량[kg]	해석	157.6	해석	149.5
	실험	117	실험	103.3

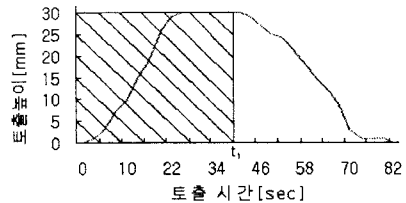


그림 9. 시간에 따른 용융아연의 토출높이 변화(4극)

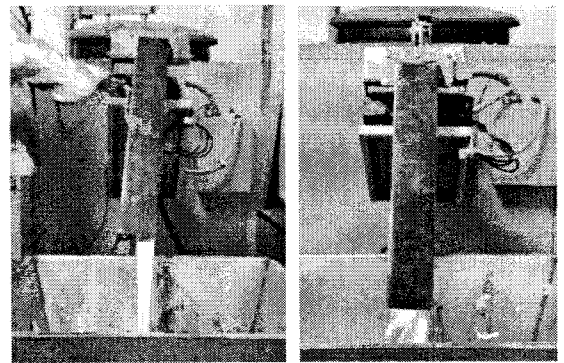


그림 10. LIM 펌프실험

4. 결 론

본 논문에서는 선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 해석 및 실험에 대해 기술하였다. MHD에 의해 LIM 펌프 내부 액체의 유속 및 유량을 해석하였다. 해석 결과를 검증하기 위해 LIM 펌프를 제작하고 이를 실험으로 검증하였다. 용융금속의 토출 중량으로 실험결과를 간접적으로 확인했으며 특성해석과 실험치의 오차는 4극 LIM 펌프의 경우 약 25%, 6극 LIM 펌프의 경우 31%가 되었다. 이 오차를 줄이기 위해서는 토출부의 유속을 정확히 측정하기 위한 연구가 추가로 필요하다고 사료된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2004-B-206)주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

[1] Jacek F. Gieras, Linear Induction Drives, Oxford, 1994.
 [2] O. Tsukamoto, Y. Tanaka and S. Sato, "Development of Superconduction Motor for steel making Processes," IEE E Transactions on Magnetics, vol.27, no.2, pp.2248-2251, 1991.
 [3] 차계길, 선형 유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성 해석, 호서대학교 석사학위 청구논문, 2002.
 [4] Fluent Inc, Magnetohydrodynamics(MHD), 2003.