

선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프 실험

전 문호, 김 정현, 김 민석, 김 창엽
호서대학교 전기공학과

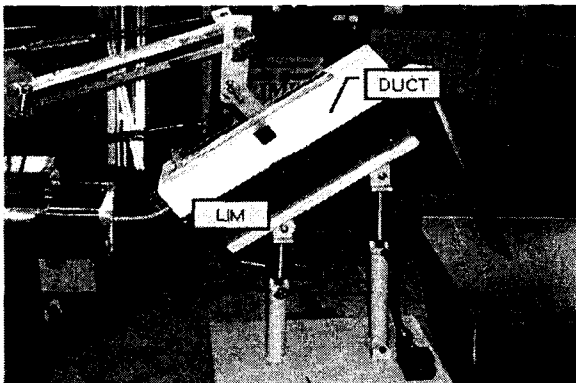
Experiments of Electromagnetic Pump using Linear Induction Motor

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

Abstract - The electromagnetic pump can transfer molten metals by the electromagnetic force of LIM for molten metals, which are zinc, tin and aluminum. The speed and quantity of the flow are analyzed using magnetohydrodynamics. The molten zinc is used in the experiment and the experimental results are compared with the analysis.

1. 서 론

전자기 펌프는 용융 금속을 비접촉으로 이동할 수 있는 특징에 착안하여 폭발성 용융금속을 밀폐해서 이송시키는 원자로의 냉각 매체용 순환펌프, 제철소 주조공장에서 주철, 알루미늄, 동합금의 주탕 장치로서 이용되고 있다[1]. 본 논문은 편축식 LIM을 이용한 전자기 펌프를 전자유체역학 툴을 사용하여 시뮬레이션 한 값과 실측값을 비교분석하였다. 전도성 액체 금속은 아연을 사용하여 실험 하였다. 용융아연의 녹는점은 419°C이므로 용해로의 온도는 500°C 이상을 유지하였다. 토출될 당시의 온도는 400°C 이상으로, 선형유도전동기 주변의 온도도 200°C 이상의 고온이므로 덕트 표면과 선형유도전동기 사이의 공극이 일반적인 경우보다 커야 한다. 그림 1은 실험 장치로 상단 부분은 덕트이며, 용융 아연이 굳는 걸 방지하기 위해 보온 장치를 하여 세라믹으로 둘러쌓았고, 아래 부분은 LIM으로 높은 열에 견딜 수 있도록 몰딩 하였다.

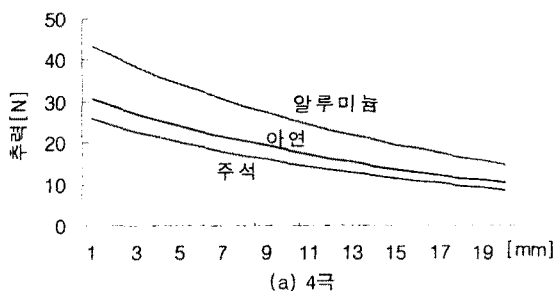


〈그림 1〉 LIM을 이용한 전자기 펌프 실험장치

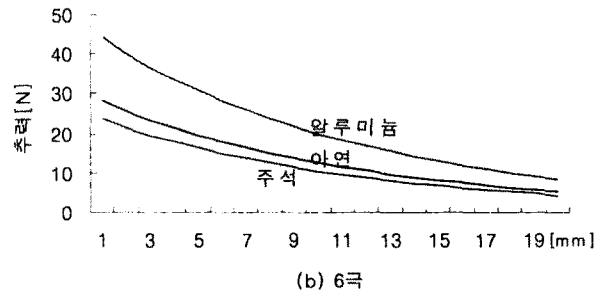
2. 전자기 펌프 특성해석

2.1 LIM 특성해석

전자기 펌프에 사용된 LIM은 4극과 6극 두 모델을 사용하였고, 각도는 41.9°와 32°로 하였다. 그림 2는 용융금속을 알루미늄, 아연, 주석 세 가지를 가지고 시뮬레이션 한 결과이다. 6극의 LIM의 동기속도는 8.64m/s이고, 4극의 LIM은 동기속도가 12.96m/s로서 슬립을 구하면 6극과 4극 둘 다 0.98이므로 슬립을 0.98로 두고 공극을 변화 시키면서 추력 값을 구한 결과 알루미늄, 아연, 주석 순으로 추력특성이 좋음을 알 수 있다[2]. 표 1은 LIM의 설계 사양이고, 용융금속의 도전율은 표 2에 나타내었다.



(a) 4극



〈그림 2〉 공극 변화에 따른 추력

〈표 1〉 LIM 설계사양

항목	설계모델1	설계모델2
극수	4	6
선간 전압[V]	220	220
주파수[Hz]	60	60
극간격[mm]	108	72
슬릿깊이[mm]	47	47
슬릿폭[mm]	8.8	8.8
치폭[mm]	3.2	3.2
1차축길이[mm]	519.2	495.2
기계적 공극[mm]	2	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

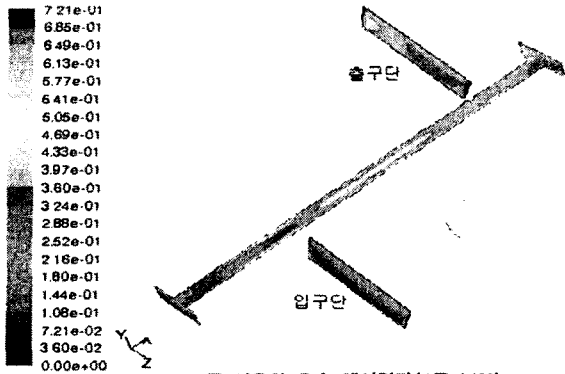
〈표 2〉 2차축 용융금속 도전율

금속종류	도전율 $\times 10^6$ [$1/\Omega m$]
알루미늄	4.02
아연	2.7
주석	2.2

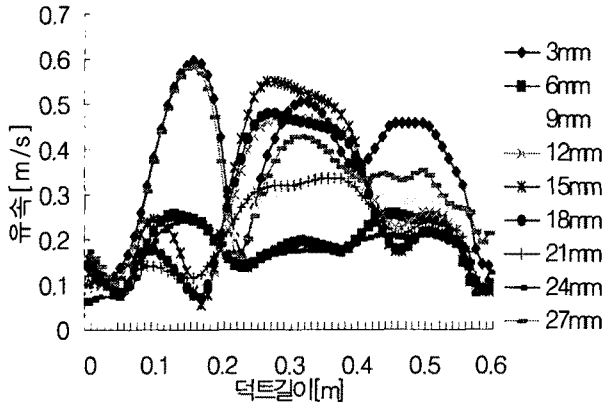
2.2 전자유체역학(MHD)을 이용한 LIM 펌프 해석

전자유체역학은 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 시작되었고, H알벤이 본격적으로 발전 시켰다[3]. 본 논문은 FLUENT에 MHD를 더하여 덕트 내에서의 용융금속의 유속의 특성을 구하였다.

전기로 안에 용융금속이 차 있다고 가정하면 전기로 내부 용융금속의 양과 대기압을 고려하여 덕트의 각도를 정해주어야 한다. 만약 노에 400mm의 용융금속이 차 있다고 가정하면 덕트의 각도는 41.9°의 각도를 가져야 용융금속이 흐르지 않는다. 그림 3은 덕트의 각이 41.9°인 4극 LIM 펌프로 해석한 결과 이다. 여기에 수평으로 생기는 속도의 경계층은 중력의 작용에 의한 것이다. 덕트 아래 부분은 중력의 힘 때문에 약간의 역류가 발생하고, 덕트 상위 부분은 입구단의 압력 때문에 순류가 발생한다. 즉 하부로 갈수록 중력의 작용이 커서 속도가 느려지는 것을 볼 수 있으며, 이런 결과 값들은 출구단 쪽으로 가면 역으로 나타난다.

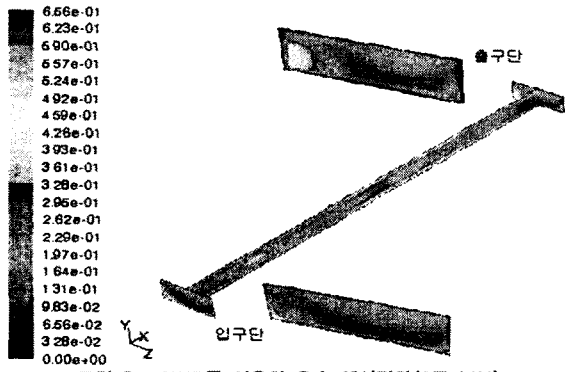


〈그림 3〉 MHD를 이용한 유속 해석결과(4극 LIM)

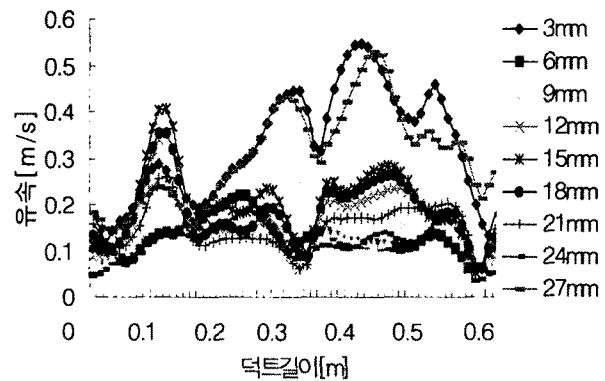


〈그림 4〉 MHD를 이용한 유속 해석결과(4극 LIM)

그림 4는 41.9°일때 덕트를 길이 방향으로 반으로 잘랐을 때의 덕트 높이에 대한 유속을 나타내었다. 덕트 높이는 30mm로 3mm씩 10개의 구간으로 나누었다. 0mm와 30mm는 덕트벽으로 점성 때문에 유속은 0의 값을 가진다. 덕트 중간 부분에서 속도가 빠르며 출구단 쪽으로 갈수록 입구단보다 유속이 빠른 것을 볼 수 있다. 그림 5와 6은 덕트의 각이 32° 일 때 6극 LIM 펌프의 유속을 보여준다.



〈그림 5〉 MHD를 이용한 유속 해석결과(6극 LIM)



〈그림 6〉 MHD를 이용한 유속 해석결과(6극 LIM)

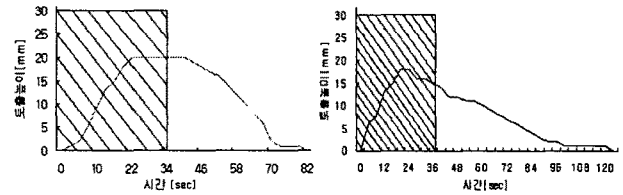
3. 실험 및 검토

본 논문에서는 4극과 6극 LIM 펌프로 나누어 실험을 하였다. 4극의 LIM 펌프는 공극을 3mm주고, 덕트 각도는 41.9°로 하였다. 이때의 자속밀도는 0.37T이다. 6극 LIM 펌프는 공극 2mm, 덕트 각은 32°로 하였을 때의 자속밀도는 0.36T이다. 두 가지 모델의 토출 중량을 계산하기 위해 용융금속이 덕트 최고높이까지 차서 흐른다고 가정하면 토출 중량은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

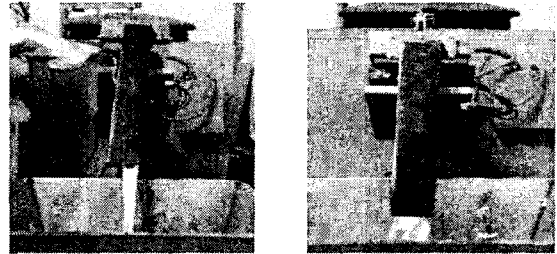
$$\text{토출중량} = \text{비중} \times \text{평균유속} \times (\text{덕트폭} \times \text{덕트높이}) \times \text{토출시간} \quad (1)$$

그림 7은 시간에 따른 4극 LIM 펌프의 토출 높이를 도시화 한 것이다. 실험으로부터 토출 시간(t_1) 계산은 용융금속이 덕트 높이에 완전히 가득차서 흐른다고 가정하면 빗금 친 부분과 같이 구할 수 있다. 그 결과로 4극과 6극 LIM 펌프는 각각 약 34초와 41초로 계산된다.

실험 결과 4극 LIM 펌프는 82초 동안 총 토출중량이 117kg이고, 6극 LIM 펌프는 125초 동안 103.3kg이었다. 특성해석 결과와 실험과의 오차는 각각 4극 LIM 펌프는 12%, 6극 LIM 펌프는 17%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 7에서 보였고, 실험장면은 그림 8에 나타내었다. 표3은 실험 결과와 특성해석의 결과를 비교한 것이다.



〈그림 7〉 시간에 따른 용융아연 토출높이 변화(좌:4극, 우:6극 LIM 펌프)



〈그림 8〉 LIM 펌프 실험 (좌:4극, 우:6극 LIM 펌프)

〈표 3〉 실험결과 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	133.96	해석	122.59
	실험	117	실험	103.3

4. 결 론

본 논문은 선형유도전동기를 이용하여 전자기 펌프의 해석 및 실험에 대해 기술하였다. MHD에 의해 LIM 펌프 내부 용융금속의 유속 및 유량을 해석 하였다. 해석 결과의 검증에 위해 전자기 펌프를 제작하고 실험을 통해 이를 검증 하였다. 특성해석과 실험치의 오차는 4극 LIM 펌프는 약 12%, 6극 LIM 펌프에서는 약 17%의 오차를 가졌다. 이 오차를 줄이기 위해서는 토출부의 유속을 정확히 측정하기 위한 연구가 추가로 필요하다고 사료된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-200 5-7-088)주관으로 수행된 과제임.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 김성원, 홍성욱, 김창업, 심동준, "용융아연 이송용 선형 전자기 펌프의 특성에 관한연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.142-144, 1999
- [2] 차재걸, 선형 유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특형 해석, 호서대학교 석사학위 청구논문, pp.18-23, 2005
- [3] Fluent Inc, Magnetohydrodynamics(MHD), 2003