

직류 전자기 펌프의 특성 해석에 관한 연구

이재영, 장중근, 김창엽
호서대학교

A Study on the Characteristics Analysis of DC Electromagnetic Pump

Jae-Young Lee, Joog-Keun Jang, Chang-Eob Kim
Hoseo University

Abstract - 본 연구는 직류 전자기 펌프의 설계 및 특성해석을 다룬다. 전자기력으로 유체를 이동시키기 위해 필요한 힘을 발생시키는 직류 전자기 펌프의 특성 해석을 시뮬레이션을 통하여 진행하였다. 직류 전자기 펌프의 특성을 FLUX 3D 프로그램을 이용한 수치해석을 통해 도출하였다. 설계한 기본 모델은 자속밀도 약 0.35[T]를 보였으며, 용융금속 내부의 전류밀도는 0.24[A/mm²]일 때 Force는 1.85[N]을 보였다.

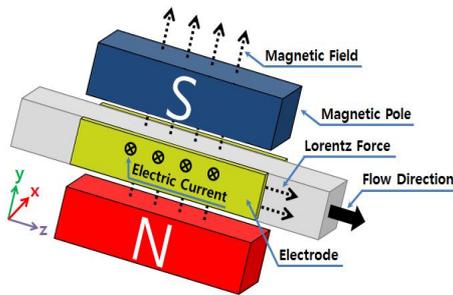
1. 서 론

원자력 발전에서 핵분열로 발생하는 열을 냉각시켜 주지 않으면 내부에 있는 연료봉이 과열되어 방사능과 함께 폭발의 위험이 있기 때문에 냉각 장치에 대한 필요성이 중요하게 되었다. 그에 대한 해결 방안으로 액체 금속로인 전자기 펌프이다.[1]

국외에서 직류 전자기 펌프를 이용한 액체 금속 유동제어 및 시뮬레이션을 통한 연구 등 진행 중에 있다.[2, 3] 국내에서는 교류 전자기 펌프에 대한 연구는 진행 중이지만 직류 전자기 펌프에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.[4, 5, 6]

직류 전자기 펌프는 직류 전원으로 용융 금속에 흐르는 전류를 구하기 때문에 금속의 전도율과 인가전압을 알면 쉽게 용융 금속에 흐르는 전류와 발생 추진력을 구할 수 있다. 또한 교류 전자기 펌프와는 달리 소형화까지 가능하며, 이를 위해서 본 논문에서는 직류 전자기 펌프의 특성 해석에 관한 연구를 진행하고자 한다. 전체적인 자기장의 진행방향과 자속밀도, 전류밀도와 전류의 방향을 확인하고 마지막으로 힘의 진행방향과 힘의 크기를 시뮬레이션 하여 전자기 펌프의 특성을 연구하였다.

2. 직류 전자기 펌프의 원리 및 해석



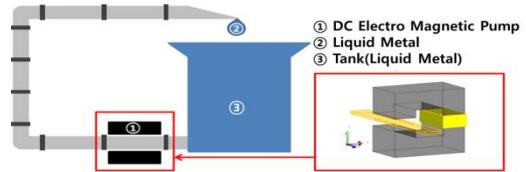
<그림 1> 전자기 펌프의 원리

직류 전자기 펌프의 기본 원리는 그림 1과 같이 플레밍의 왼손 법칙에 의해 자속밀도(B)와 수직으로 금속에 전류(I)가 흐르면 그에 대한 수직 방향으로 힘(F)이 발생하게 된다. 위와 같은 원리를 사용하여 직류 전자기 펌프를 설계할 수 있다. 힘에 대한 수식은 식(1)과 같다.

$$F = BIl \sin\theta \quad (1)$$

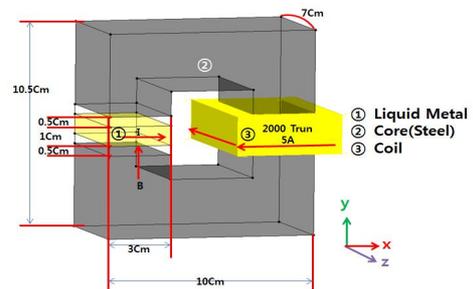
여기서, B는 자속밀도[T], I는 전극 사이의 전류[A], l은 전극 사이의 길이[m]이다.

그림 2는 직류 전자기 펌프를 이용한 유체순환의 개략도이다. 전자기 펌프의 사용은 그림 2의 ①과 같이 사용된다. Duct내부의 용융금속으로 본래 고온 용융금속의 수송을 위한 직류 전자기 펌프지만 본 연구에서는 전자기 펌프의 특성을 알아보기 위한 연구이므로 상온에서도 액체로 존재할 수 있는 금속으로 수은(Hg)을 사용하였다.[2]



<그림 2> 직류 전자기 펌프를 이용한 유체순환 장치 개략도

코일의 턴 수 및 전류, 용융금속 내부의 전류, 공극의 길이의 선정 방법으로 힘 2[N]에 기준을 두고 설계하였다. 기본 모델의 제원은 그림 3과 같다.[2]



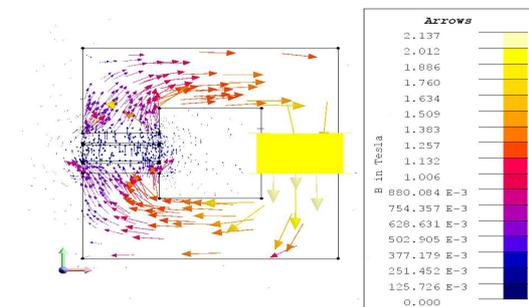
<그림 3> 직류 전자기 펌프의 기본 모델

<표 1> 수은(Hg)의 물성 자료

$T[^\circ\text{C}]$	$\rho_e[\text{ohm}\cdot\text{m}]$	$\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$	$\mu[\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$
20	$9.3 \text{ e-}7$	13400	$1.5 \text{ e-}3$

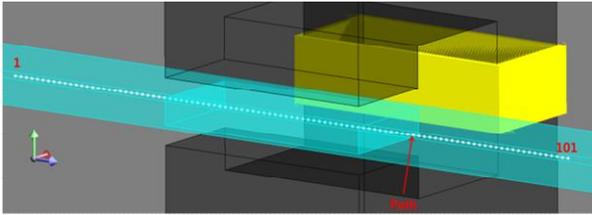
본 논문에서 사용된 프로그램은 FLUX 3D를 사용하였으며, 그림 3과 같은 시뮬레이션 모델을 설정 하였다. 코어에 감겨 있는 코일 턴 수는 2,000[Trun], 전류는 5[A]로 설계하였다. 해석을 위하여 유한요소를 사용하였다.

코어의 내부와 외부에서 발생하는 자속밀도의 방향과 크기는 그림 4와 같다. 자속밀도는 코어의 공극 부분을 기준으로 y축 방향으로 진행하고 있다는 것을 확인 할 수 있다. 그 위치가 공극 중앙으로부터 코어에서 멀어 질수록 적은 자속밀도를 형성하고 있음을 보이며, 코어 내부에서 코일과 가까울수록 큰 자속 밀도를 보인다. 여기서 중요한 부분은 공극에서의 자속밀도이다.



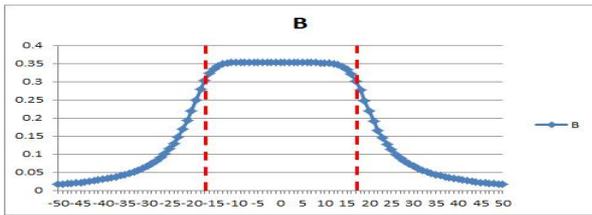
<그림 4> x-y평면상 코어내부, 외부 자속방향(Arrow)

다음으로 코어와 사각 Duct가 수직으로 만나는 부분에 대하여 그림 5와 같이 200[mm]의 Path를 만들어 그 위에 총 101개의 Point를 만든 후 각각의 Point에 대한 전류, 자속, 힘 등에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다.

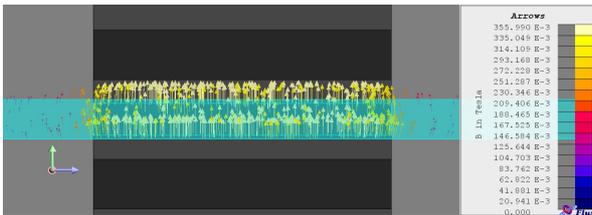


〈그림 5〉 용융금속 내부에 대한 Path의 위치

그림 6과 같이 최대 자속밀도는 약 0.35[T]인 것을 알 수 있으며, Duct와 코어가 수직으로 만나는 부분보다 멀어지면 멀어 질수록 자속밀도가 현저하게 떨어짐을 보였다. 다음으로 코일과 코어의 영향에 대한 부분을 확인할 수 있다. 코어의 폭이 70[mm]로 설계하였으므로 그에 해당 하는 자속과 자속 밀도의 영향은 코어의 폭과 동일한 구간에서 일정한 자속을 가져야 한다. 앞서 언급한 내용에 대한 시뮬레이션 자료는 그림 6, 7을 보고 확인할 수 있다.

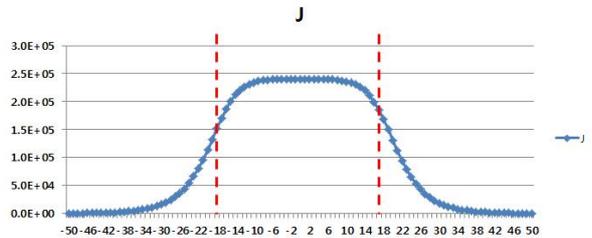


〈그림 6〉 공극 자속밀도(B_y)값

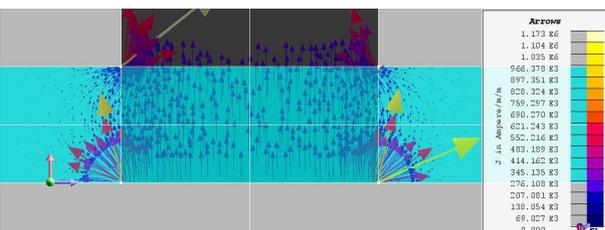


〈그림 7〉 x축 방향에서 자속밀도(B_y) Arrow 형상

전류의 방향은 자속이 발생하는 y축 방향과 수직으로 작용하도록 x축 방향으로 설정 하였다. 용융금속에 흐르는 전류는 200[A]로 설정하였으며, 적용된 전류 밀도 크기와 Arrow 형상으로는 그림 8, 9와 같다. 코어와 같은 폭 만큼 양단에 극을 형성하였으며, x축 방향으로 진행하는 것을 볼 수 있다. 그 때 극이 형성되지 않은 부분에서는 작은 전류밀도가 포물선을 그리며 반대방향에 위치한 극으로 이동하는 모습을 보인다.

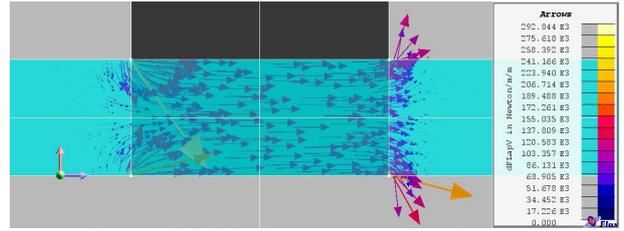


〈그림 8〉 전류 밀도(J_x)값



〈그림 9〉 전류 밀도(J_x)의 Arrow 형상

다음으로 용융금속이 받는 힘에 대한 부분이다. 플레밍의 왼손 법칙에 의해 힘은 z축 방향으로 작용하게 된다. 그림 10은 용융금속 내부에서 발생하는 힘의 Arrow형상이다. 이 그림으로 알 수 있듯이 z축 방향으로 힘이 작용 한다는 것을 알 수 있으며 코어와 Duct가 수직으로 위치한 부분 외에는 적은 힘을 가지는 것을 보인다. 이것은 유속과 관련 되어 Duct의 입구 부분에서 유속이 느리지만 중앙부분을 지나 출구부분에서 강한 유속을 낼 수 있다는 것을 예상할 수 있다.



〈그림 10〉 용융금속 내부 Lorentz Force의 Arrow형상

이러한 모든 작용들은 $F = BIl \sin\theta$ 의 수식으로 설명이 가능 하다. 시뮬레이션에 대한 결과는 표 2와 같이 정리 할 수 있다.

〈표 2〉 시뮬레이션 값 정리

코일전류	자속(B_y)	내부전류밀도(J_x)	Force[F]
5[A]	0.35[T]	0.24[A/mm ²]	1.85[N]

위와 같이 설계한 전자기 펌프의 특성을 이용하여 시뮬레이션을 진행한 결과를 비교분석 하여 최적의 조건을 찾아 설계를 한다.

3. 결 론

본 논문은 직류 전자기 펌프의 특성에 관하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전체적0인 논문의 시뮬레이션 결과 값 정리는 표 2와 같다.

코어에 존재하는 코일의 턴 수와 흐르는 전류에 비례하여 자속밀도가 만들어진다. 시뮬레이션에서 공극의 최대 자속밀도는 0.35[T]이며, 공극이 감소할수록 자속밀도는 더 커지게 된다. 본 논문에서 20[mm]의 공극을 형성 하고 있는 것을 감안한다면 Duct와 최대한 가깝게 코어를 설계 하면 더 강한 자속밀도를 얻을 수 있다. 또한 코어의 단면적은 작을수록 더 강한 자속밀도를 얻을 수 있다. 그러나 코어의 단면적이 감소하면 힘이 작용 하는 Duct의 면적 또한 줄어들기 때문에 주의해야 할 필요가 있다. 용융금속에 작용하는 힘은 전류와 자속밀도가 수직으로 작용하는 부분에서 발생하게 된다. 이는 플레밍의 왼손 법칙에 따라 작용함을 보였다. 향후, 직류 전자기 펌프를 이용하여 유체의 유동해석을 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박창규, 김연식 외23명, “액체 금속로 설계개념 연구”, 한국원자력연구원 보고서, pp.593-657, 1997.
- [2] E. M. Borges, F. A. Braz Filho, and L. N. F. Guimaraes, “Liquid metal flow control by DC electromagnetic pumps”, Engenharia Térmica (Thermal Engineering), vol.9, no.1, pp.47-54, 2010.
- [3] Nedeltcho Kandev, Val Kagan and Ahmed Daoud, “Electromagnetic DC pump of liquid aluminum: computer simulation and experimental study”, FDMP, vol.6, no.3, pp.291-318, 2010.
- [4] Geun Hyeong Lee, Hee Reyoung Kim, “The optimum design analysis of the small DC electromagnetic pump with loop-supported type”, Pyeongchang, Korea, October 30-31, 2014.
- [5] Chang Eob Kim, Mun Ho Jeon, et. al., “The analysis of liquid metal flow characteristics in the annular passage of an electromagnetic pump”, Journal of Electrical Engineering & Technology, vol.5, no.2, pp.270-275, 2010.
- [6] 김창업, 전문호 외2명, “선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성해석 및 실험”, 조명·전기설비학회논문지, vol.21, no.6, pp.65-70, 2007.