

액체 금속 구동용 선형유도전자펌프의 자속밀도 분포 해석

장남영, 은재정, 박태봉*, 최훈기*, 유근종*
창원대 전자공학과, 창원대 기계설계공학과*

Flux Density Analysis of Linear Induction Electromagnetic Pumps for Liquid Metal

Nam Young Jang, Jae Jung Eun, Tae Bong Park*, Hun Gi Choi*, Geun Jong Yoo*
Department of Electronic Engineering, Changwon National University,
Department of Mechanical Design & Manufacturing, Changwon National University*

Abstract - A Linear induction electromagnetic(EM) pump of liquid metal fast breeder reactor(LMFBR) is used for the purpose that the liquid metal of high temperature is transported by EM force. This paper evaluates magnetic flux density necessary for transporting liquid metal, using analytical model of the linear induction EM pump. Using the 2-D finite element method(2-D FEM), magnetic flux density is estimated in consideration of a geometric model, electric parameter, and velocity of liquid metal. From the viewpoint of hydrodynamics, the results can be used for flow analysis of the liquid metal.

1. 서 론

고속중성자로의 실용적 모델로 각광 받고 있는 액체금속 고속중성자로(LMFBR)는 액체금속 냉각재의 순환용 펌프가 요구된다. 일반적인 기계식 펌프를 사용하여 고온의 액체금속을 수송할 경우, 펌프의 회전 날개가 고온의 액체금속으로 인해 물성적, 기계적 변형 발생과 사용 후, 유지·보수에 어려움이 있어 액체금속의 수송에는 부적합하다. 이에 비해, 전자펌프는 기계식 펌프의 회전 부분이 필요 없고, 유로 내에 흐르는 액체금속에 대하여 전자기력을 이용하여 유체를 구동시키므로, 유량을 제어하는데 있어 유도전류를 조절하여 쉽게 구현할 수 있으며, 구조가 간단하고 신뢰성과 안정성이 요구되는 고속중성자로뿐만 아니라 용융 금속 즉, 산업계에서 많이 쓰이는 알루미늄, 납, 수은등의 수송에 중요한 역할을 담당한다. 하지만, 고속중성로의 냉각재로서 가장 적절한 소듐(sodium : Na)은 물에 비하여 100배 이상의 뛰어난 열전도도를 지니고 있으며, 고속 증성자에 의한 방사화로 열순환 시스템이 필요하며, 비열이 낮기 때문에 동일 출력에 대하여 높은 펌프동력을 필요로 하는 단점이 있다[1],[2].

액체금속 고속중성로에 대한 액체금속 순환용 전자펌프에 대한 연구는 90년대에 환단면 선형유도전자펌프에 대한 연구를 시작으로 최근에는 40 l/min 급의 전자펌프에 대한 연구가 수행되었으며, 또한 선형유도전자펌프의 전자석 코일 구조에 대한 전자기력의 영향에 대한 연구논문도 보고되었다[3].

선형유도전자펌프는 외부에서 3상 전원을 인가함으로써 진행자계를 발생시키는 전자석 부분과 전자기력으로 구동되는 도전성 액체금속은 유도전동기에서의 고정자와 회전자에 해당되며, 따라서 선형유도전자펌프는 유도전동기의 해석에 사용되는 등가회로법을 적용하여 설계할 수 있다. 하지만, 본 논문에서는 기존 보고된 논문[1]을 참고하여, 선형유도전자펌프의 설계 변수들을 이용해 해석 모델을 설정하여 자속밀도 분포를 계산하였으며, 이는 액체금속로에 적용할 전자펌프의 신뢰성을 확인하기 위하여, 액체금속의 유동장을 해석하는데 사용될 구동력을 구하는데 이용될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 설

정된 해석 모델에 대하여 유한 요소법을 기초로 작성된 코드를 사용해, 액체금속 구동용 선형유도전자펌프의 자속밀도 분포를 해석하였다.

2. 본 론

2.1 선형유도전자펌프

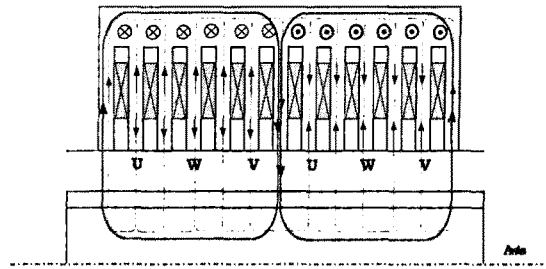
일반적으로 전자펌프는 액체금속이 축 방향으로 구동력을 갖도록 하기 위해, 구동에 필요한 자속 발생용 전류를 외부에서 직접 인가시키는 도전형 전자펌프와 교류로 발생시킨 자기장에 의한 유도 전류를 이용하는 유도형 전자펌프로 나뉜다. 도전형 전자펌프는 액체금속과 접촉하고 있는 전극을 통하여 유체 내로 자속 발생용 전류를 인가시킴으로서 전원 공급을 위한 별도의 회로가 요구되는 반면, 유도형 전자펌프는 교류로 발생시킨 진행자계에 의해 전극 없이 액체금속 내에 전류를 유도시켜 하나의 전원 장치만으로 전류와 자기장을 동시에 얻을 수 있다. 이러한 유도형 전자펌프는 입력 교류 전압에 의해, 시간에 따라 변하는 자기장이 발생하고 Faraday 법칙에 따라 도전성 액체금속 내에 자기장에 수직한 전류를 유도한다. 또한 자기장과 유도 전류에 대한 Lorentz 힘에 의해 액체금속은 구동력을 갖고 축 방향으로 펌핑 된다.

따라서, 선형유도전자펌프는 회전자계 대신 진행자계를 발생시키는 것을 제외하고 유도전동기의 동작 원리와 일치한다. 예를 들어, 2극 유도전동기에서의 회전자계, 3상 교류 신호를 인가하여 $\omega t = 0^\circ, 30^\circ, \dots, 150^\circ$ 등의 시점에서 각상의 권선전류에 의한 합성자속이 전원전류가 1주기 지나는 동안 1회전함을 알 수 있다. 이에 비해, 진행자계의 발생은 유도전동기의 고정자의 한쪽 부분을 잘라 펼치고 원통형의 회전자를 액체금속으로 대체시켜, 고정자의 코일부분을 등갈게 축 방향으로 만다고 생각하면, 그림 1과 같은 선형유도전자펌프와 같은 구조를 가지게 된다. 이러한 구조에서 회전자계 대신 축 방향을 따라 이동하는 진행자계가 형성되고 Arago 원리에 따라 회전자 즉, 액체금속도 축 방향으로 운동하게 된다. 따라서, 선형유도전자펌프의 진행자계를 형성하기 위한 3상 교류 전원의 인가방식은 그림 2와 같은 형태로 나타나게 되며, 그 한 예로, 선형유도전자펌프에 인가된 3상 교류 신호의 시점이 각각 $\omega t = 0^\circ, 60^\circ$ 일 경우에 형성된 자계를 그림 3에 나타내고 있다. 여기서, 형성된 자계는 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하는 진행자계임을 확인할 수 있으며, 선형유도전자펌프의 극 수는 3상 전원의 인가방법에 따라 조절할 수 있다.

2.2 해석 모델

본 논문에서는 선형유도전자펌프의 유동장 해석에 필요한 자속 밀도를 계산하기 위해 참고문헌 [1]의 설계치를 이용하여 해석 모델을 선정하였다. 표 1은 본 논문

에서 해석한 해석 모델의 전기적 변수를 나타내고 있으며, 그림 4는 해석 모델의 단면을 나타낸다. 여기서, 외부 코어(Outer core)는 전자석 코일을 고정하는 고정자의 역할을 수행하며 또한 적층 구조로 설계함으로써 와류에 의한 주열 열을 억제시키며 자기장을 최대화하기 위해 강자성체 매질을 사용한다. 내부 코어(Inner Core)는 자기장을 유로 내로 집속시키기 위해 강자성체로 구성되며, 덕트는 발생한 자기장 분포를 왜곡시키지 않고 액체금속과의 반응성이 적은 비자성체를 이용해 구성된다. 또한 액체금속은 소듐(sodium)으로 가정하였다.



(b) $\omega t = 60^\circ$

그림 3. 2극 선형유도전자펌프의 진행자계

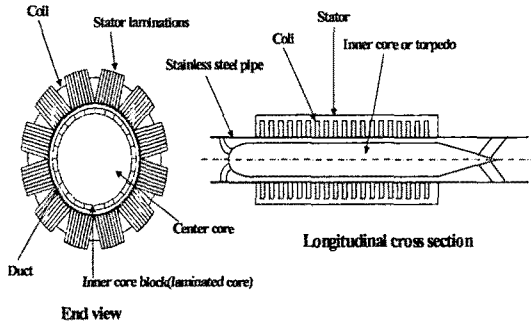


그림 1. 선형유도전자펌프의 단면

표 1. 해석 모델의 전기적 변수

전기적 변수	입력 전류 [A]	36
	입력 전압 [V]	116
	권선수	85
	주파수 [Hz]	17
	극 수	2
	슬립 (Slip)	0.49

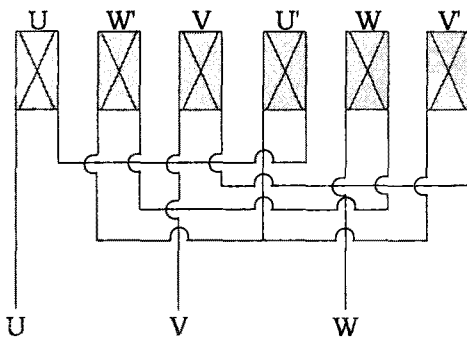


그림 2. 선형유도전자펌프 전자석 코일의 3상 결선

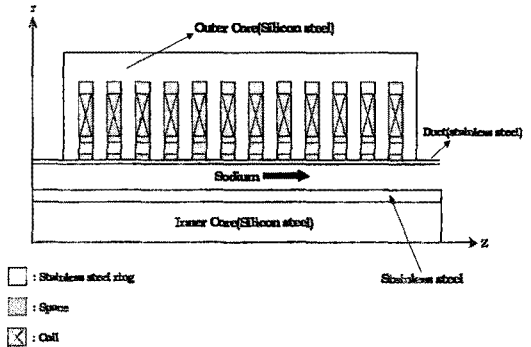
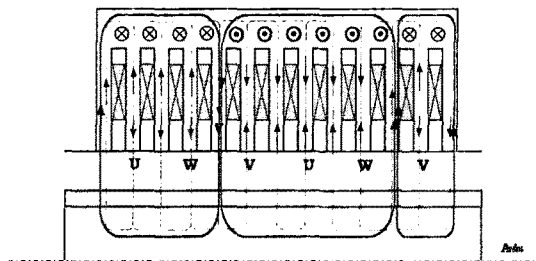


그림 4. 해석 모델의 단면도



(a) $\omega t = 0^\circ$

2.3 FEM 해석 모델

2-D FEM은 상용 코드인 EMF를 사용하였다. EMF를 이용한, 해석 모델의 요소 분할은 그림 5의 요소분할도에서 나타낸 것처럼, 요소 개수가 4544개, 절점 개수 2365개로 분할하였으며, 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체단면의 1/2만을 채택하였다. 또한 해석 단면의 경계조건은 Dirichlet 경계조건을 적용하였다.

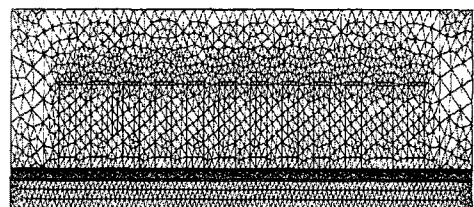
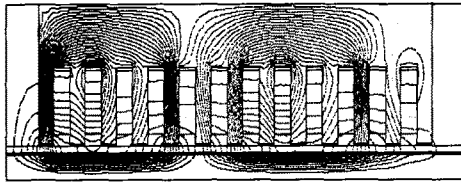


그림 5. 2-D FEM 요소분할도

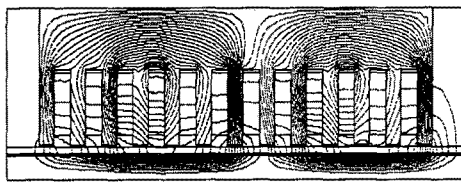
2.4 해석 결과

그림 6의 (a),(b)는 각각 3상 인가 교류 신호의 시점 $\omega t = 0^\circ, 60^\circ$ 에서 슬립을 0.49로 산정 했을 경우, 등전위 분포를 나타내고 있다. 그림 6을 통해 진행자계가 좌측에서 우측으로 진행함을 확인할 수 있다.

그림 7은 선형유도전자펌프의 해석 모델에 대하여, 유로 내 ($r = 24.3 \sim 30.25mm$)에서 자속밀도의 B_r 성분의 값을 $\omega t = 0^\circ, 60^\circ$ 일 때, $r = 26mm, z = 0mm$ 에서 $700mm$ 범위에 대하여 나타내었다. 그림 7에서 보는바와 같이 축 방향으로 정현파 형태의 자속밀도 분포를 확인할 수 있다. 하지만, 정현파 형태의 자속밀도 분포에 대하여 ripple이 발생하는데, 이는 외부 코어 슬롯에 구성되어 있는 전자석 코일의 불연속적 배열로 인한 결과로 생각된다. 또한, 그림 8의 결과로 볼 때, 기존의 구동력을 방해하는 힘을 발생시키는 선형유도 기기의 일반적인 특성인 끌효과와 입구에서 보다는 보다는 것이라고 예상할 수 있다. 이러한 끌효과는 그림 8에서 보는 바와 같이 저속일 때, 줄어들 것으로 예상된다.



(a) $\omega t = 0^\circ$ (slip=0.49)



(b) $\omega t = 60^\circ$ (slip=0.49)

그림 6. 등전위 분포

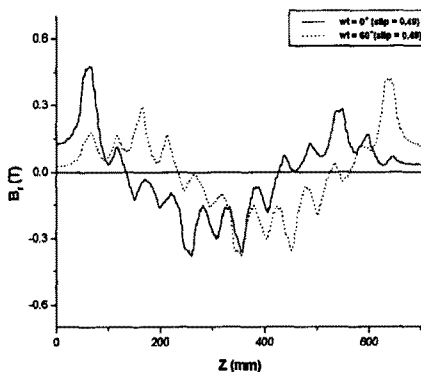


그림 7. z축 위치에 따른 유로 내의 B_r 성분 ($r = 26mm, z = 0mm \sim 700mm$)

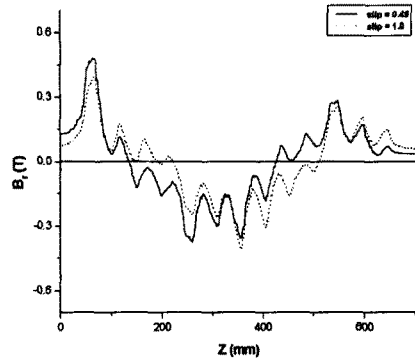


그림 8. $\omega t = 0^\circ$ 일 때, slip에 따른 유로 내의 B_r 성분 ($r = 26mm, z = 0mm \sim 700mm$)

3. 결 론

본 논문에서는 액체금속 구동용 선형유도전자펌프를 대상으로 하여, 펌프 내 유로에서의 자속밀도를 2-D FEM 해석으로 수행하였으며, 그 결과는 액체금속로에 적용되는 전자펌프의 신뢰성을 확인하기 위한 액체금속의 유동장 해석에 사용될 구동력 계산에 이용될 수 있다.

본 연구는 2002년 원자력연구개발사업 중 액체금속로 설계기술개발분야의 유체 및 계측제어계통설계 기술개발과제의 일환으로 한국원자력연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김희령, 남호운, 황중선, "액체소듐 구동용 선형유도전자펌프 제작", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회논문집, pp. 434-437, 1999.
- [2] 황중선, 한병성, "액체금속냉각고속로에 대한 고찰", 대한전기학회지, Vol. 42, No.7, pp. 3-8, 1993.
- [3] 이경우, 정순효, 오영주, 조영환, 심재동, "선형 이동 자기장을 사용한 원통형 전자기 펌프의 전자기력에 미치는 코일 모양의 영향", 한국자기학회지, Vol. 5, No. 5, pp. 892-899, 1995