

용융 금속 수송용 리니어 모터의 파라미터에 따른 특성 해석

조희제, 이철규, 권병일
한양대학교

Characteristics Analysis of LIM for Molten Metal Transportation According to Parameters

Huee Je Cho, Chul Kyu Lee, Byung Il Kwon
Hanyang University

Abstract - Recently, applications of electromagnetic forces in the molten metal delivery system like LIM(linear induction motor) have been developed because it is dangerous to deliver the molten metal. Therefore it is important to get the fundamental characteristics of LIM. In this paper, we analyzed about characteristics of LIM for molten metal transportation by 2D finite element method. Then we compares the characteristics of LIM for molten metal transportation according to parameters.

1. 서 론

최근에 금속 제조 산업에서 열악한 근무 환경의 개선을 위해 전자기력(electromagnetic force)을 이용한 pump가 많이 이용되고 있다. 이러한 전자기력을 응용한 pump는 보통 용융금속을 거꾸집으로 이동시키거나 고른 특성을 가질 수 있도록 교반하는데 이용되는데 이는 저비용으로 고품질의 금속을 얻을 수 있기 때문이다[1].

전자기력을 이용한 linear induction pump는 효율과 유지보수성, 내구성 등이 다른 기계적인 펌프나 전자기 DC펌프에 비해 우수하다는 장점을 가지고 있으며, 직접 구동하는 방식이라 설계도 용이하다[2-3].

여기서는 수송용으로 쓰인 LIM(linear induction motor)의 특성을 해석하였다. 일반적으로 용융 금속의 특성을 해석하기 위해 전자기적 특성을 먼저 해석하고 이를 유체 방정식을 이용하여 용융 금속의 특성을 해석한다. 이 논문에서는 용융 금속의 전자기적 특성을 해석하였고, 보다 정확한 해석을 위해 2D FEM(finite element method)을 이용하였다. 파라미터에 따른 특성을 해석하고 비교함으로써 전자펌프로 이용될 때의 LIM의 특성들을 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

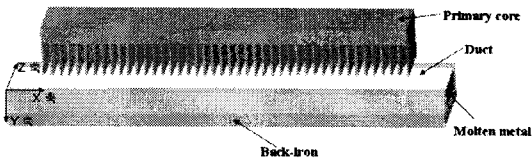


그림 1. LIM의 구조

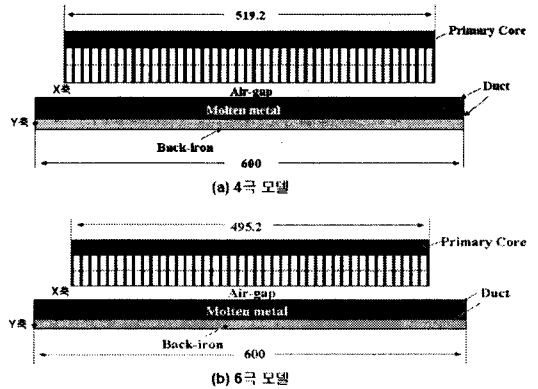


그림 2. 해석 모델 사양

그림 1은 해석 시 사용된 모델의 전체적인 구조를 나타내고 있다. 그림 2는 2D 해석 시 사용된 사양을 나타내는데, 각각 4극과 6극 모델로서 권선은 복층권이다. 절연 덕트의 두께는 상하 5[mm]씩 주었고 위의 덕트는 air, 아래쪽 덕트는 back-iron 으로 재질 정보를 주었다. 그리고 열의 차단을 위해서 덕트를 공기와 같은 재질의 세라믹으로 감쌌다. 유한 요소해석을 위해서 상하로 고정 경계 조건을 주었고 단부가 존재하므로 좌우로는 자연경계 조건을 주었다. 표 1과 표 2는 해석 모델의 사양을 나타내는데 이 논문에서는 공극의 길이, 극수, 도전율에 따른 특성을 해석했다.

표 1 해석 모델 사양

항목	해석모델1	해석모델2
극수	4	6
선간전압[V]	220	220
주파수[Hz]	60	60
극간격[mm]	108	72
슬롯깊이[mm]	47	47
슬롯폭[mm]	8.8	8.8
치폭[mm]	3.2	3.2
1차축길이[mm]	519.2	495.2
기계적 공극[mm]	15,20,25	15,20,25
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 해석 모델의 도전율

Material	Conductivity ($\times 10^6$ [U/m])
Al	4.02
Zn	2.7
Sn	2.2

2.2 FEM을 이용한 특성 해석

2.2.1 가정 및 특성 해석식

FEM을 사용하여 x-y평면에 대해 이차원적으로 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) Z축 방향으로의 모든 물리적 현상은 동일하다.
- (2) 해석 영역에서 모든 전류와 자기벡터 포텐셜은 Z축 성분만 갖는다.
- (3) 재료의 도전율은 등방성이며, 일정한 상수 값이다.
- (4) 재료의 투자율은 등방성이다.

이상의 가정을 두고 자기벡터 포텐셜 A 를 이용, 이차원 직각 좌표계로 전개하면 다음과 같이 LIM의 특성해석을 위한 지배방정식이 구해진다[4].

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = -J_0 + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + v_x \frac{\partial A}{\partial x} \right) \quad (1)$$

회전형 전동기와는 달리 양단부가 존재함으로써 이동자계가 진행되는 입구단과 출구단에서의 단부 효과 및 폭방향의 횡방향 효과가 발생하기도 한다. 실제 모델을 해석 모델로 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 1) 1차축 철심과 2차축 back-iron의 투자율은 무한대이며, 유효공극 g_e 는 슬롯의 영향을 고려해 식(2)와 같이 Carter계수(K_c)를 이용하여 보정한다.

$$g_e = K_c g \quad (2)$$

- 2) 2차축 도체 폭은 유한하며, 2차축 와전류분포에 기인한 실효치 저항의 증가는 Russell Norworthy계수를 사용하여 식(3)과 같이 보정한다.

$$\frac{\sigma_{2e}}{\sigma_2} = \frac{\tanh(\pi h/2\tau)}{\pi h/2\tau \{1 - \tanh(\pi h/2\tau) \tanh(\pi c/\tau)\}} \quad (3)$$

여기서, h : 1차 철심의 적층두께
 c : 2차 도체판의 overhang 길이
 σ_{2e} : 2차축 등가 도전율
 σ_2 : 2차축 유효 도전율

2.2.2 추력 및 수직력 계산

선형 유도전동기의 발생추력 및 편향력은 로렌츠의 힘의 방정식으로부터 유도할 수 있다. 즉 발생추력은 2차 도체판에 유기된 와전류의 z성분과 1차 입력 전원에 의해 발생된 공극자계 B_y 와의 상호작용으로 추력이 발생한다.

$$d\vec{f} = (\vec{J} \times \vec{B}) dV \quad (4)$$

$$J_s^x \times B_s^z = J_s^x k \times (B_i^x + B_j^y) = B_i^y J_s^x j - B_j^y J_s^x i \quad (5)$$

$$F_x = - \sum_{n=1}^l h B_{ym}^c J_{zn}^e \Delta^e [N] \quad (6)$$

$$F_y = \sum_{n=1}^l h B_{xm}^c J_{zn}^e \Delta^e [N] \quad (7)$$

l 은 2차축 해석영역의 총 요소의 개수, h 는 적층폭, Δ^e 는 요소의 면적이다.

2.3 파라미터에 따른 해석 결과

파라미터에 대한 비교를 위해 2차축 용융금속을 4개 층으로 나누고 그 값을 구한 뒤 평균값을 취했다. 기본적인 특성을 비교하기 위해 자속 밀도와 2차축 전류 밀도, 그리고 그 때의 추력 특성을 나타내었다. 시간은 간격을 40[μ s]로 주었고, 0.02[s]일 때의 값을 취해서 비교를 했다. X방향은 2차 용융 금속의 길이를 나타내는데, 실제적으로 2차축 용융 금속의 길이는 무한하기 때문에 이를 위해 이동 메쉬 기법을 이용했다.

2.3.1 공극의 길이에 따른 특성

공극의 길이에 따른 특성을 알아보기 위해서 표 3과 같은 조건 하에서 공극의 길이를 15, 20, 25[mm]를 주었을 때를 해석해서 비교해 보았다.

표 3 해석 시 공통조건

극수	4극	주파수	60[Hz]
선간 전압	220[V]	용융주석	2.2×10^6 [U/m]

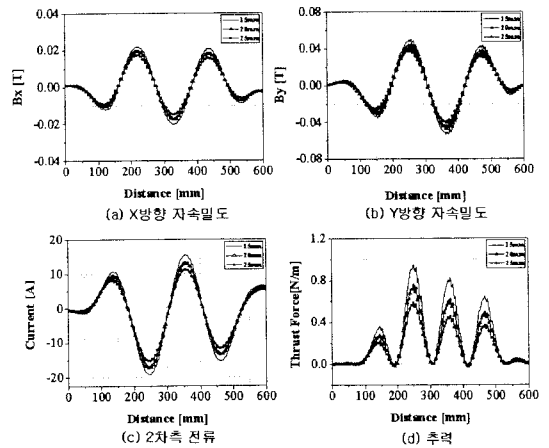


그림 3. 공극에 따른 특성

그림 3에서 보는 것처럼 공극이 작을수록 추력 특성이 더 좋은 것을 알수 있었다. 하지만 일반적으로 용융금속의 온도는 700[$^{\circ}$ C]이상의 고온이고 따라서 전자 펌프에서는 열적인 특성을 고려해서 보통 기계적 공극이 크다.

2.3.2 극수에 따른 특성

일반적으로 1차축 stator의 길이가 같을 때 극수가 작아지면 자로의 길이가 길어진다. 여기서는 표 4의 조건 하에서 4극 모델과 6극 모델에 대해 해석을 수행했다.

표 4. 해석 시 공통조건

공극	20[mm]	주파수	60[Hz]
선간 전압	220[V]	용융주석	$2.2 \times 10^6 [U/m]$

그림 4는 4극 모델과 6극 모델에 대해 해석한 결과를 나타낸다. 공극을 가로질러 2차측의 자속밀도가 4극일 때가 더 크기 때문에 더 많은 전류가 유기되고 따라서 추력이 더 크음을 알 수 있다. 하지만 유기된 전류가 많기 때문에 열손실이 더 많이 발생하고 저항률이 높아 질 것으로 예상된다. 실제적으로 Russel-Norsworthy overhang 상수를 구해 보면 4극일 때가 약 0.42, 6극일 때가 약 0.23으로 4극일 때가 와전류에 의한 저항률 상승이 더 크다. 따라서 4극일 때가 전체적인 효율은 더 떨어진다 고 볼 수 있고, 결과에서 보는 바와 같이 펌프로서의 성능, 즉 추력은 더 우수함을 알 수 있다.

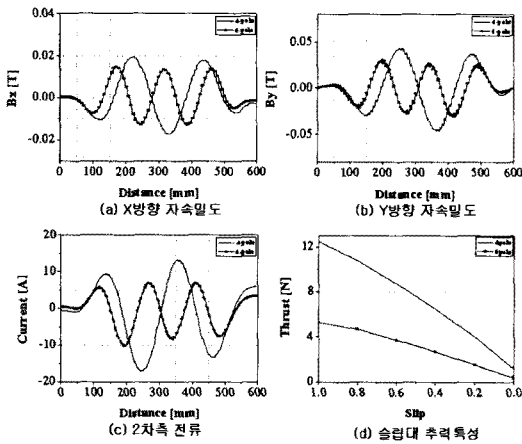


그림 4. 극수에 따른 특성

그림 5는 용융 금속의 힘의 벡터를 나타낸다. 각 층마다 힘의 방향이나 크기가 틀림을 알 수 있다. 이를 토대로 용융 금속의 수송 시 위치에 따라 속도는 불규칙적으로 변할 것으로 예상된다.

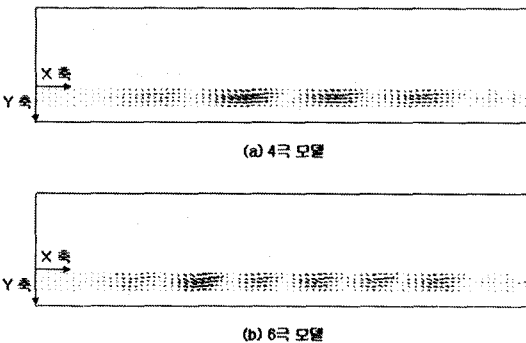


그림 5. 극수에 따른 힘의 벡터도

2.3.3 도전율에 따른 특성

용융 금속의 도전율은 고체 금속의 도전율과 비교했을 때 1/6~1/4의 작은 값을 가진다. 여기서는 표 5의 조건 하에서 세 용융금속에 대해 해석해 보았다.

표 5 해석 시 공통조건

극수	4극	주파수	60[Hz]
선간 전압	220[V]	공극	20[mm]

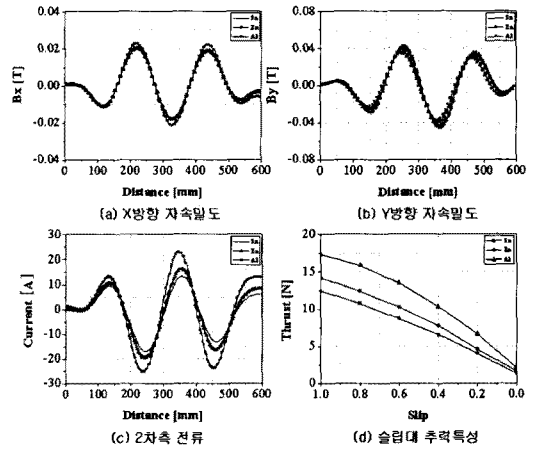


그림 6. 도전율에 따른 특성

그림 6에서 보는 것처럼 도전율에 따른 자속밀도의 값은 비슷하다. 하지만 도전율이 클수록 2차측에 유기되는 전류값은 커지고 따라서 추력이 더 크다. 일반적으로 고속 운전용 LIM같은 경우 도전율이 작을수록 기동 특성이 우수하지만, 이번 해석 모델 같이 고온의 용융 금속 수송을 위해 쓰인 경우, 큰 기계적 공극과 작은 도전율 때문에 위와 같이 슬립에 대해 수하하는 특성을 가지며, 도전율이 클수록 추력특성이 더 우수함을 알 수 있었다. 따라서 제어 시 유리한 장점을 가질 것이라고 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 FEM을 이용해 수송용으로 쓰인 LIM을 파라미터별로 해석해 보고 그 결과를 각각 비교해 보았다. 일반적인 유도기와 비교했을 때 수송용으로 쓰인 LIM은 다음과 같은 특성을 가진다. 첫째, 공극이 작을수록 특성이 좋지만 열적인 특성 때문에 공극이 크다. 둘째, 극수가 작을수록 수송하는 힘은 증가하지만 상대적으로 효율은 떨어진다. 셋째, 도전율이 클수록 추력 특성이 우수하고 슬립에 대해 수하하는 특성을 가짐을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Keisuke Fuisaki, Jun-ichi Nakagawa, Hideyuki Misumi, "Fundamental Characteristics of Molten Metal Flow Control by Linear Induction Motor." IEEE Trans. Magn.Vol.30, No. 6, November 1994.
- [2] Keisuke Fuisaki, Shouji Satoh, and Takahiro Yamada "Consideration of Heat Transfer and Solidification in 3-D, MHD Calculation." IEEE Trans. Magn.Vol.36, No. 4, July 2000.
- [3] Tsutomu Ando, Kazuyuki Ueno, Shoji Taniguchi, and To shiyuki Takagi, "Induction Pump for High-Temperature Molten Metals Using Rotating Twisted Magnetic Field: Molten Gallium Experiment" IEEE Trans. Magn. Vol. 40. No. 4, July 2004.
- [4] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992