

### TLIM 전자펌프의 특성해석 및 고찰

전문호, 윤태규, 곽희성, 김창업  
호서대학교

### Analysis of TLIM Electromagnetic Pump

Mun-Ho Jeon, Tae-Kyu Yoon, Hee-Sung Kwak, Chang-Eob Kim  
Department of Electrical Engineering, Hoseo University, Asan, 336-795 Korea

**Abstract** - This paper presents a design of the electromagnetic pump with an tubular type linear induction motor(TLIM). The TLIM was designed for the fluid system, flow rate 15[l/min], and the thrust 39[N] at 0.29[m/s]. The TLIM is compared measurement with analysis. The electromagnetic pump of flow characteristics are calculated by treating TLIM thrust as a source term in the Navier-Stokes equation. The numerical analysis of flow characteristics of the liquid metal is presented for the various condition and discussed.

[l/min], 압력 0.3[bar], 2극, 3상의 220[V], 추력 39[N], 유속 0.29[m/s]이다.

#### 1. 서 론

전자기유체역학 현상을 이용한 전자펌프는 일반 전동기와 같이 전류와 자속의 상호작용에 의해 힘이 발생한다. 이 힘이 전기적 도체인 액체 금속에 직접 작용함으로써, 기계식 펌프와 달리 회전 날개 부분이 없고, 베어링의 마모와 같은 구조적인 문제점들이 사라지며, 장치 자체가 고유한 단순성을 가지게 되어 주조 및 정련산업에 사용된다[1-2]. 전자펌프는 전자기력을 발생시키는 방식에 따라 전도형과 유도형으로 나뉘어진다. 전도형의 경우 외부 전원에 의해 액체 금속과 접촉하고 있는 전극을 통해 유체 내에 직접 전류를 흘려주며, 별도로 자기장을 걸어준다. 유도형 펌프는 전극 없이 액체 금속내에 전류를 유기 시켜 하나의 전원장치만으로 전류와 자기장을 동시에 얻을 수 있는 장점 때문에 많이 사용되고 있다. 본 논문은 용융금속을 순환 구동시키기 위한 장치로 원통형선형유도전동기(TLIM: Tubular Linear Induction Motor)를 선정하였다. 설계된 TLIM은 실제로 제작하여 해석과 비교분석한후, TLIM에서의 전자기력을 유도방정식의 생성항에 삽입하여 전자펌프의 유동특성을 해석하였다. 전체시스템에서의 해석영역은 전자펌프에 직접적으로 영향을 주는 TLIM이 존재하는 구간으로 설정하였다. 모든 구간에서의 단면적을 동일시 하고 유동은 완전발달되었다고 가정하였으며, 벽면에서의 조건은 no-slip으로 하였다. 해석에 사용한 금속은 용융우드메탈이다.

#### 2. 전자펌프용 TLIM 설계

##### 2.1 TLIM 구동전력 결정

전자펌프의 유량을 15[l/min]로 정하면 식 (1)로 구동전력을 구할 수 있다.

$$P_d = \Delta P Q = F_x U \tag{1}$$

$$\Delta P = \rho g h$$

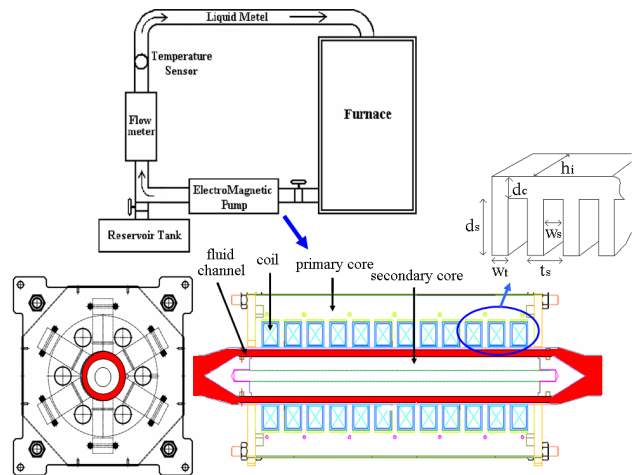
$$h = \frac{U^2}{2g} + 0.5 \frac{U^2}{2g} + 1.2 \frac{U^2}{2g} + f_c \frac{D}{L} \frac{U^2}{2g} + \Delta h$$

$$U = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \times D^2}$$

여기서 압력강하  $\Delta P$ 는  $\rho g h$ 로 구하여지고,  $\rho$ : 유체의 밀도 중력 [kg/m<sup>3</sup>],  $g$ : 중력가속도[9.8m/s<sup>2</sup>]  $h$ : 총수두[m],  $Q$ : 유량을 [l/min],  $F_x$ : 추력[N],  $U$ : 유체속도[m/s],  $D$ : 관의 내경,  $L$ : 관의 길이,  $f_c$ : 마찰계수,  $\Delta h$ : 수두높이 이다. 총 수두는 입구, 곡관, 직관, 급 확대관에서 발생하는 손실을 포함한 것이다.

##### 2.2 TLIM 설계

그림 1은 TLIM을 이용한 전자펌프의 계략도로서 노에 들어있는 용융 금속이 TLIM의 힘으로 순환되는 구조를 보여준다. 또한 TLIM의 해석 모델과 형상을 나타내었다. 식 (1)로부터 설계할 전자펌프는 유량 15



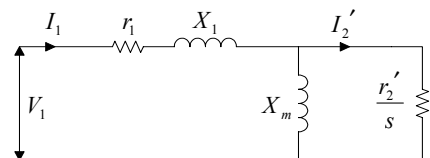
〈그림 1〉 TLIM을 이용한 전자펌프 계략도 및 해석모델

TLIM은 장하분배법을 사용하여 설계하였고[3], 설계된 값은 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 TLIM의 설계 변수

설계요소(기호)		단위	설계값
수력학 적변수	유량율(Q)	[l/min]	15
	유속(U)	[m/s]	0.323
	구동압력(ΔP)	[bar]	0.31
	슬립(s)	[%]	99
기계적 설계	슬롯폭(W <sub>s</sub> )	[mm]	22
	슬롯 깊이(d <sub>s</sub> )	[mm]	27
	치 폭(W <sub>t</sub> )	[mm]	7
	슬롯 피치(t <sub>s</sub> )	[mm]	29
	계철의 높이(d <sub>c</sub> )	[mm]	12
	1차측 코아적층폭	[mm]	31
	펌프 길이(L)	[mm]	348
슬롯당 턴수	[turn]	85	

그림 1에서 TLIM의 해석 모델을 등가회로로 나타내면 그림 2와 같이 한 상에서의 1차측 권선저항 r<sub>1</sub>, 누설 리액턴스 X<sub>1</sub>로 나타내며, 2차측이 가지는 용융금속의 저항성분 r'<sub>2</sub>, 자화리액턴스 X<sub>m</sub>으로 식 (2)-(5)로 나타낼 수 있다[4].



〈그림 2〉 TLIM 등가회로

$$r_1 = \frac{\pi \rho_c g k_p^2 m^2 D_2 N^2}{k_f k_p r^2} \quad (2)$$

$$X_1 = \frac{2\pi \mu_0 w D_2 \lambda_c N^2}{pq} \quad (3)$$

$$X_m = \frac{6\mu_0 w}{\pi^2} (k_w N)^2 \frac{\pi D_2}{pq} \quad (4)$$

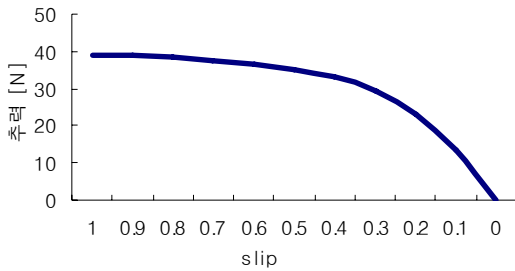
$$r_2' = \frac{6\pi D}{\pi} \rho_r' (k_w N)^2 \quad (5)$$

여기서,  $\rho_c$ : 코일도체의 비저항,  $g$ : 슬롯수/극/상,  $k_p$ : 단절계수,  $m$ : 상수,  $D_2$ : 2차측 코어직경,  $N$ : 턴수,  $k_f$ : slot-filling factor,  $w$ : 각주파수,  $\mu_0$ : 공기투자율,  $k_w$ : 권선계수,  $D$ : 유체의 평균직경,  $\sigma$ : 유체의 전기전도도,  $\rho_r'$ : 유체의 표면 비저항이다.

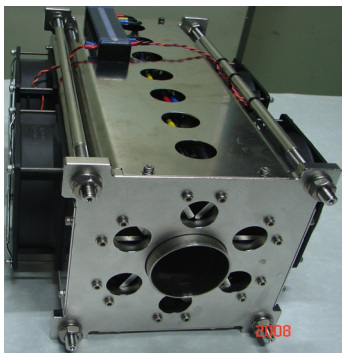
표 2는 전기적 사양을 나타내었다. 일차저항 측정값이 0.45[Ω]로 계산된 값 0.43[Ω]보다 약간 큰것은 제작시 오차로 볼 수 있다. 인덕턴스 측정값은 13.6[mH]로, 인덕터 값만을 가지고 있다고 가정하면  $X_1 = 2\pi fL$ 로부터 5.12[Ω]이 나오고 계산한 값은 4.92[Ω]이다. 그림 3은 슬립에 따른 추력값의 변화를, 그림 4는 제작된 TLIM을 나타내었다.

**<표 2> TLIM의 전기적 사양**

항목	단위	해석값	측정값
일차저항 $r_1$	[Ω]	0.43	0.45
고장자 누설 리액턴스 $X_1$	[Ω]	4.92	5.12
자화 리액턴스 $X_m$	[Ω]	32.5	-
2차저항 $r_2'$	[Ω]	9.4	-
전압	[V]	220	-
액체금속 전도도 $\sigma$	[S/m]	$1 \times 10^6$	-
추력 $F_x$	[N]	39	-



**<그림 3> 슬립에 따른 추력 특성곡선**

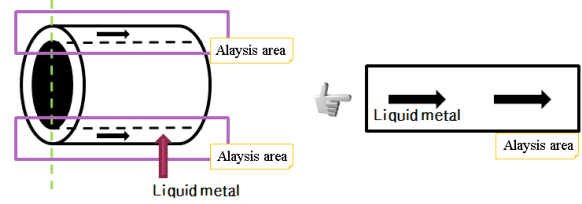


**<그림 4> 제작된 TLIM**

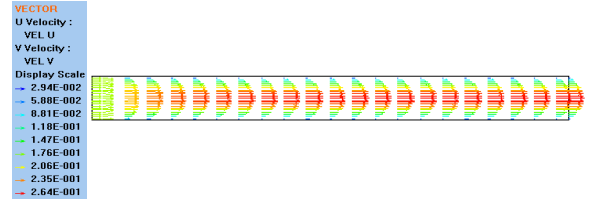
### 2.3 유동 해석

그림 5는 환단면 덕트의 해석영역으로, 용융금속이 흐르는 덕트내의 해석 영역이 상하 대칭이라고 가정하여 해석 하였다. 방향길이는 TLIM이 존재하는 구간인 348[mm], 반경방향 5.2[mm]이다. 유동해석은 전자기방정식과 유동방정식을 결합하여 해석하였다[5]. Lorentz force를 39[N]으로 주고 해석한 결과 유속 0.288[m/s], 전자기력 39.4[N]을 얻었다. 그림 6은 39.4[N]일때의 속도를 벡터도로 나타낸 것이다. 그림 7은 전자기력을 주었을때 유속의 변화를 나타낸 것으로 정지상태인 ①에서부터 완전발달된 ③으로 변화하는것을 볼수있다. ①은 유속이 0인상태이고

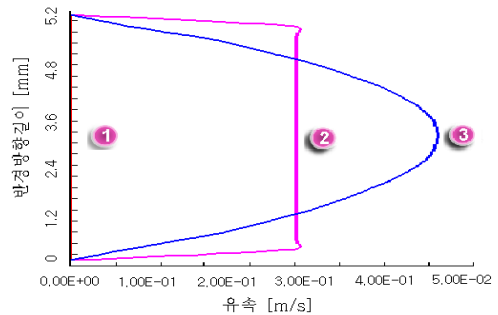
전자기력에 의해 ②번과 같은 형태로 변화하며, 완전 발달상태가 되면 ③과 같이 된다. 여기서 초기 유동은 벽면에서 더 빠른 것을 볼수가 있는데 이것은 관내의 마찰, 점성에 의해서 발생하는 현상이다. 완전발달된 상태에서는 벡터도에서도 확인할수 있듯이 층류유동이다.



**<그림 5> 해석 영역**



**<그림 6> 유동 벡터도**



**<그림 7> 전자기력에 의한 유속 변화**

### 3. 결 론

본 논문은 전자펌프용 TLIM을 설계하고, 실제 설계된 TLIM의 측정값과 계산된 값을 비교 하였다. 설계 값과 실측 값은 거의 근접한 값을 가졌고, 여기서 생기는 오차는 제작시 발생된 것으로 볼 수 있다. 설계된 TLIM의 전자기력을 유동방정식의 생성항에 삽입하여 유동해석을 하였다. 유동해석 결과 39[N]의 전자기력이 들어갈 때, 0.288[m/s]의 유속이 나왔고, 이 유속에 의한 전자기력은 39.4[N]이다. 향후 실험을 통하여 전자기력에 의한 유동특성을 비교분석할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (R-2005-7-088) 주관으로 수행된 과제임

### [참 고 문 헌]

- [1] 장석명, 우종섭, 김형규, "원자로 냉각재 이송을 위한 평면형 리니어 유도펌프의 설계," 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.10-12, 1998.
- [2] 저김희령, 남호윤, 황종선, "액체소듐 구동용 선형유도전자펌프 제작," 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp.434-437, 1999.
- [3] 김정현, 김민석, 전문호, 김창업, "용융 금속 이송을 위한 원통형 전자기 펌프 설계 및 해석," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.878-879, 2007.
- [4] S. A. Nasar, Linear Motion Electric Machines, John Wiley & Sons, New york, pp. 215-218, 1976.
- [5] 김민석, 김정현, 전문호, 김창업, 김서현, 권정태, "전자기력을 고려한 MHD 유동특성해석," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.876-877, 2007.