

용융 금속 이송을 위한 원통형 전자기 펌프 설계 및 해석

김정현, 김민석, 전문호, 김창업
호서대학교 전기공학과

Design and Analysis of Tubular Type Electromagnetic Pump for Transferring Liquid Metal

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

Abstract - This paper presents an optimum design of the electromagnetic pump with an tubular type linear induction motor(TLIM). For obtaining the maximum flow rate, the TLIM is optimized using genetic algorithm.

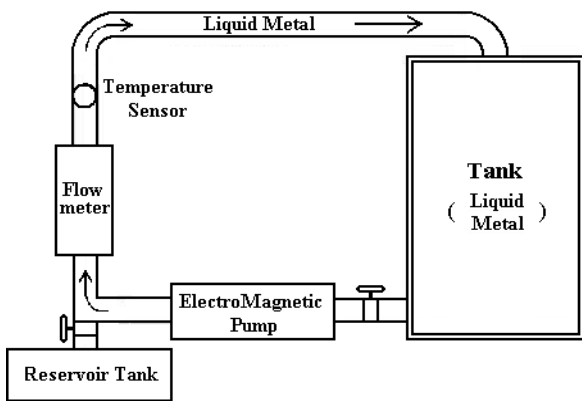
1. 서 론

자기유체역학 현상을 이용한 전자기 펌프는 일반 전동기와 같이 전류와 자속의 작용의 상호작용에 의해 힘이 발생된다. 이 힘이 전기적 도체인 액체 금속에 직접 작용함으로써 고온, 고압에서 사용되는 일반펌프의 문제점인 고온에서의 베어링 마모, 임펠러의 손상, 기밀작용, 캐비테이션에 의한 결함 등을 해결할 수 있다. 그런데 전자기 펌프는 2차 전류의 발생에 따라 유도 펌프 및 전도 펌프로 분류되며, 유체 채널의 구조에 따라 평면형 펌프, 헬리컬 펌프 및 원통형 펌프 등으로 분류된다[1]. 전자기 펌프의 응용예로 액체 금속로 내에서 화학적으로 반응성이 매우 강한 고온의 용융금속들을 순환 구동시키기 위한 장치로서 원통형 펌프가 연구되고 있다. 원통형 전자기 펌프는 구동되는 유체가 액체 상태라는 것을 제외하고는 일반적인 선형유도전동기의 동작 원리와 일치한다. 따라서 펌프의 설계는 선형유도기기 해석에서 흔히 사용하는 전기적 등가회로법을 이용하여 수행될 수 있다[2]. 본 연구에서는 등가회로법과 유전알고리즘(GA)을 사용하여 최대 유량 60l /min가 되는 전자기 펌프의 최적 설계와 특성 해석을 하였다.

2. 본 론

2.1 원통형 유도전동기 설계

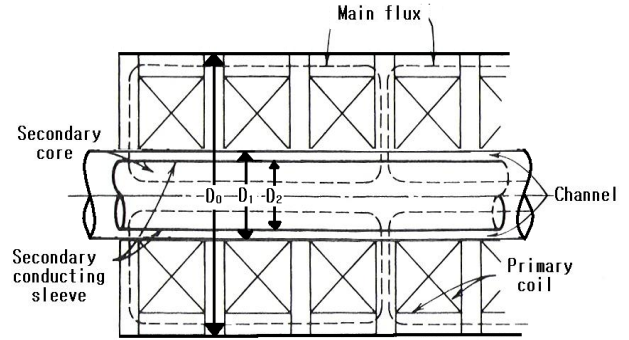
그림 1은 원통형 유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 계략도로서 탱크에 들어 있는 용융금속이 원통형 유도전동기의 힘으로 순환되는 구조를 나타내었다.



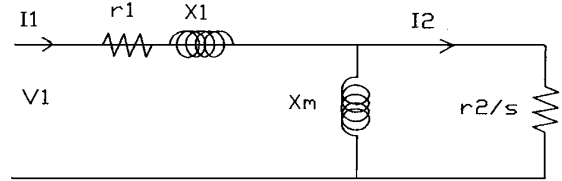
<그림 1> 원통형 유도전동기를 이용한 전자기 펌프 계략도

2.2 등가회로에 의한 지배방정식 계산

전자기 펌프의 최대 유량이 60l /min되도록 필요한 동작 변수 및 설계 변수를 구하기 위해 등가회로법을 사용하였다. 그림 2는 3상으로 구동되는 원통형 유도전동기로 (a)는 해석모델이고, (b)는 등가회로도이다. 2차측의 저항 및 리액턴스는 Laithwaite의 표준설계 공식에 의해 나타낼 수 있으며, 이들 저항 또는 리액턴스는 펌프를 이루고 있는 전자석 코어 및 duct의 기하학적 수치와 입력 전원의 주파수 등에 변화가 된다.



(a) 해석 모델



V_1 : 입력 전압, I_1 : 입력 전류
 r_1 : 1차측 저항, X_1 : 1차측 리액턴스
 X_m : 자화 리액턴스, I_2 : 2차 전류
 r_2 : 2차측 저항, s : 슬립

(b) 등가회로도

<그림 2> 원통형 유도전동기의 해석모델 및 등가회로

원통형 유도전동기의 등가회로에서 1차측 저항 r_1 , 누설 리액턴스 X_1 , 2차측저항 r_2 , 자화리액턴스 X_m , 1차 전류 I_1 및 2차 유도전류 I_2 는 각각 다음과 같다[3-4].

$$r_1 = \frac{\pi \rho_c q k_p^2 m^2 D_0 N^2}{k_f k_d p \tau^2} \quad (1)$$

$$X_1 \cong \frac{2\pi \mu_0 \omega D_0 \lambda_c N^2}{p q} \quad (2)$$

$$X_m = \frac{6\mu_0 \omega \tau \pi D_0 (k_w N)^2}{\pi^2 p g_c} \quad (3)$$

$$r_2 = \frac{6\pi D \rho_r' (k_w N)^2}{\tau p} \quad (4)$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{\rho Q^3 (r_2^2 + X_m^2 s^2)}{2A^2 X_m^2 s (1-s) r_2}} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{I_1 X_m}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + X_m^2}} \quad (6)$$

(s : 슬립, U : 유체 이동속도, U_s : 동기속도, A : 판의 단면적)

위 식에서처럼 기하학적 및 동작 변수에 의존성을 가지는 저항 또는 리액턴스로부터 주어진 유량을 얻기 위해 필요한 입력 전류, 전압 및 전력을 구할 수 있다.

구동 전력(developed power)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_a = I_2^2 r_2 (1 - s) / s = 1/2 \rho Q U^2 \quad (7)$$

식 (6)으로부터 2차 전류 I_2 와 입력전류 I_1 의 관계를 식 (7)에 대입하면, 입력전원과 유량과의 관계를 도출할 수 있다. 또한 입력 전력 P 는 식 (7)과 같다.

$$|P| = |I_1| |V_1| = |I_1|^2 |Z| \quad (8)$$

한편 효율을 입력 전력에 대한 유체가 흐름으로써 발생하는 펌핑력으로 정의하면 식 (6)과 (8)로부터 효율 η 는 다음과 같다.

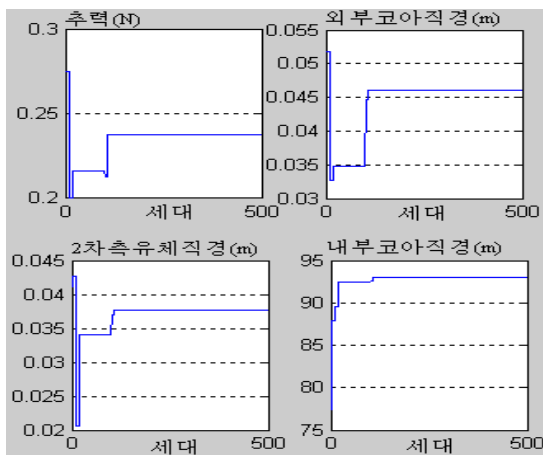
$$\eta = \frac{I_2^2 r_2 (1 - s)}{|I_1|^2 |Z| s} = \frac{X_m^2 r_2 (1 - s)}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + X_m^2} s \quad (9)$$

추력 F 에 관한 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

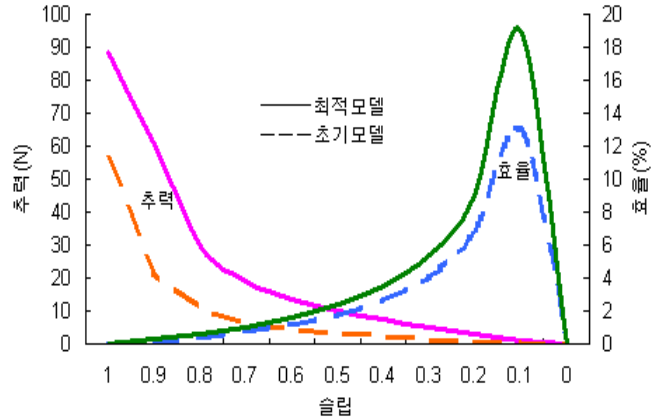
$$F = \frac{3 I_2^2 (r_2 / s)}{2 \pi f} \quad (10)$$

2.3 GA를 이용한 TLIM 최적화 적용

유전알고리즘은 다윈이 주장한 자연 진화의 법칙인 적자생존(Survival of Fittest)과 자연도태(Natural Selection)의 원리를 토대로 하여 적립된 최적화 알고리즘이다. 자연 진화의 법칙에 따르면 일정한 환경에 무리지어 살고 있는 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률을 크게 가지며 교배(Crossover)와 돌연변이(Mutation)의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진행해 나가고 부적합한 형질의 개체는 진화의 과정에서 점차 도태되어 간다[5]. 본 논문에서는 유전 알고리즘을 사용하여 설계 변수들의 최적해를 찾도록 하였다. GA의 목적함수는 추력으로 하였으며, 설계변수로는 외부코아직경 D_0 , 2차측 유체직경 D_1 , 내부코아직경 D_2 로 하였다. 그림 3은 GA의 결과로 100세대 이후에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 슬립 변화에 따른 추력과 효율로 슬립이 1에 가까워지면 추력이 증가하고 0으로 갈수록 줄어드는 것을 볼 수 있고, 효율은 0.1에 가까워 질 때 최대가 되었다가 0으로 되는 것을 볼 수 있다.



<그림 3> GA를 이용한 해석결과



<그림 4> 슬립에 따른 특성곡선

표 1은 GA의 최적화를 수행하기전과 수행후의 사양을 보여주고 있다. 초기모델에 비해 최적화 하였을 때 추력 및 효율이 모두 증가한 것을 볼 수 있다. 추력은 1.5배 이상의 값이 나왔으며, 효율 역시 약 1.5배 증가한 것을 볼 수 있다.

<표 1> GA를 이용한 TLIM 설계변수

명칭 및 단위	고정 변수	독립변수	초기모델	최적모델
외부코아 직경(m)		$0.24 \leq D_1 \leq 0.28$	0.261	0.237
내부코아 직경(m)		$0.04 \leq D_2 \leq 0.09$	0.061	0.046
2차측 유체직경(m)		$0.03 \leq D_3 \leq 0.08$	0.050	0.037
자극피치(m)	○		0.228	0.228
슬롯수	○		6	6
상수	○		3	3
슬롯피치(m)	○		0.076	0.076
유량율(ℓ / min)	○		60	60
액체 금속			소듐	소듐
1차 전류(A)			2.2	3.3
1차 전압(V)			13	16.1
2차측 저항(Ω)			2.3	1.8
2차측 전류(A)			14	20.5
추력(N)			56	88
효율(%)			13	19

3. 결 론

본 논문은 용융소듐을 2차측으로 하는 원통형 유도전동기의 설계 및 해석이다. 유량을 $60 \ell / \text{min}$ 이 되도록 등가회로법으로 설계한 원통형 유도전동기의 기본 변수를 이용하여 유전알고리즘으로 최적 설계하였다. 유전알고리즘에 사용된 목적함수는 추력이고 변수는 원통의 판 크기로 하였다. 그 결과 추력 및 효율이 모두 증가하였다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 장석명, 김형규, "MHD기기의 전자기적 특성 고찰", 대한전기학회 학제학술대회 논문집, pp.266-268, 1998.
- [2] 김희령, 남호운, 황종선, "액체소듐 구동용 선형유도전자펄스 제작", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp.434-437, 1999.
- [3] 서울대 생산기술연구소, 전기기계, 대한교과서 주식회사, pp.56-141, 1986.
- [4] S. A. Nasar, Linear Motion Electric Machines, John Wiley & Sons, New York, pp. 117-129, 1976.
- [5] David E. Goldberg, Genetic Algorithms, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.