

소형 환단면 선형유도전자펌프 설계를 위한 전산 프로그램 개발

Development of Computer Program for Design of the Small Annular Linear Induction EM Pump

김희령, 남호윤, 황종선

H. R. Kim, H. Y. Nam, and J. S. Hwang

Abstract

EM(ElectroMagnetic) pump is used for the purpose of transporting liquid sodium coolant with electrical conductivity in the LMR(Liquid Metal Reactor). In the present study, computer program for the pilot annular linear EM pump has been developed for the maximum flowrate with 200 l/min and maximum developing pressure with 3 bar. Firstly, Balance equation is induced by the equivalent circuit method which is commonly employed to analyze linear induction machines and the calculation of the hydraulic pressure drop. Then, design equation is converted to the computer program and optimum pump variables are determined by this code. The code is verified by the comparative analysis with the characteristic of the commercialized pump.

Key Words: EM pump, liquid sodium, computer program, optimum pump variables

1. 서 론

액체금속로 내에서 화학적으로 반응성이 매우 강한 고온의 도전성 소듐 냉각재를 순환 구동시키기 위한 장치로서 선형유도형의 전자펌프가 주목되고 있다. 선형유도전자펌프는 별도의 임펠러 없이 전자기력에 의하여 구동되는데 동작 원리는 일반적인 선형유도전동기의 동작 원리와 일치한다. 따라서 펌프의 설계는 선형유도기기 해석에서 흔히 사용하는 전기적 등가회로법과[1-3] 매우 좁은 유로 내에서의 수력학적 마찰 손실을 고려하여 수행될 수 있다.

본 연구에서는 펌프설계변수로 이루어지는 펌핑력과 효율 계산식을 이용하여 최적의 펌프설계 값을 결정짓기 위한 소형 전자펌프 설계 전산프로그램을 개발하고 기존의 상용화 펌프의 특성값과 비교하여 개발된 프로그램의 타당성을 검증한다.

2. 구동 평형 방정식의 도출

액체금속로 냉각재 순환용 환단면 선형유도전자

펌프의 단면도를 그림 1에 나타내고 있다. 전자펌프는 자기 투자율이 매우 큰 규소강판의 적층에 의한 외부 및 내부 코아, 자장을 발생시키기 위한 전류인가 코일과 액체 소듐이 흐를 수 있는 좁은 환단면 유로로 구성되어 있다. 전자펌프는 코아의 길이(자극 쌍의 개수가 고정일 경우 자극 피치의 길이), 내부 코아의 지름, 유로의 간극 및 입력 주파수 등에 의하여 그 구동 특성이 다르게 나타난다. 이러한 구동 특성은 전자펌프에 대한 등가회로상에서 나타나는 등가변수들에 의한 구동력-유량을 관계식을 이용하여 해석될 수 있다. 이때 전자펌프 설계 해석 시 사용된 가정은 다음과 같다.

- 전자펌프에 입력되는 전원은 3상 대칭이다.
- 전자펌프의 기하학적 구조 및 여자전류는 축대칭이다. ($\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$)
- 환단면 유로내에서의 유속분포는 반지름 방향에 따라 일정하며[4] 유체는 축방향으로 상수의 유속을 가진다. ($v(r, \theta, z) = v \hat{z}$)

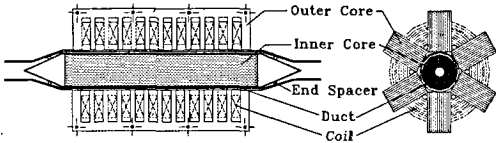


그림 1. 환단면 선형유도전자펌프의 단면도.

Fig. 1. Cross section of the annular linear induction electromagnetic pump.

2.1. 전자펌프 등가회로 해석

그림 2는 실제의 전자펌프를 전기적 등가회로로 나타낸 것이다. 입력되는 전원은 3상 대칭이므로 1상에 대하여 등가회로 해석을 한 뒤 결과적인 설계 변수를 결정 지을 수 있다.

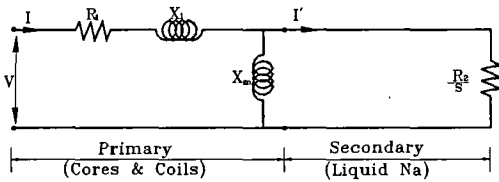


그림 2. 1상당 전자펌프 등가회로.

Fig. 2. Equivalent circuit per phase of an EM pump.

그림 2의 등가회로에서와 같이 전자펌프는 코아와 코일에 의한 1차측과 액체 소듐에 의한 2차측으로 나뉘어진다. 이때 등가 저항 및 리액턴스는 Laithwaite의 표준 설계 공식[5]에 따라 다음과 같이 펌프 기하학적 및 전기적 변수의 함수로 주어진다.

$$R_1 = \frac{\pi \rho_c q k_f^2 m^2 D_o N^2}{k_f k_d p \tau^2}$$

$$X_1 \cong \frac{2\pi \mu_0 \omega D \lambda_c N^2}{p q}$$

$$X_m = \frac{6\mu_0 \omega}{\pi^2} (k_w N)^2 \frac{\pi D_o}{p g}$$

$$R_2 = \frac{6\pi D}{\tau p} \rho_r (k_w N)^2$$

이때 각각의 기호는 다음과 같다.

ρ_c : 코일 도체의 비저항

q : 슬롯수/자극/상

k_p : t_c/w (t_c : 슬롯 피치, w : 슬롯 폭)

m : 입력 전원의 상의 수

D_o : 내부 코아 지름

N : 코일의 감은 횟수 (권선수/슬롯)

k_f : slot-filling factor (0.5 - 0.6)

k_d : t/w (t : 슬롯 깊이)

p : 자극쌍의 갯수

τ : 자극 피치

μ_0 : 공기의 자기 투자율

ω : πf (f : 입력 주파수)

$$\lambda_c = \frac{1}{12} k_d (1 + 3a)$$

a : chording factor = 코일피치/자극피치

k_w : 권선 계수

g_e : 유효 코아간 간극

D : 유체의 평균 지름 ($\approx D_o$)

$$\rho_r = \text{유체의 표면 비저항} \left(= \frac{1}{\sigma d(1-n)} \right)$$

σ : 유체의 전기 전도도

d : 유체의 두께

n : Russel-Norsworthy 보정계수

등가회로로부터 출력에 대한 평형 방정식을 세우면 구동 압력(ΔP) - 유량을(Q) 관계식은 식(1)과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{3I^2}{Q} \frac{R_2(1-s)}{s(R_2^2/X_m^2 s^2 + 1)} \\ &= \frac{18\pi\sigma\tau\omega(\mu_0 k_w N I)^2 L}{g^2 \{ \pi^4 + (\mu_0 \sigma \omega \tau^2)^2 \}} \end{aligned} \quad (1)$$

한편, 좁은 환단면 유로 내에서 발생하는 수력학적 압력 손실은 Darcy-Weisbach 관계식[6]으로부터 나타낼 수 있는데 식(2)에서와 같이 유속(v)의 제곱에 비례하고 공기 간극(g)에 반비례하여 증가한다.

$$\Delta P_L = \frac{\rho n L v^2}{2g} \quad (2)$$

따라서 전체적인 구동압력은 $\Delta P - \Delta P_L$ 로 주어진다. 효율 계산식은 식(3)과 같이 전기적 입력에 대한 수력학적 일의 비로 주어진다.

$$\epsilon = \frac{6 k_w^2 (1-s)}{\frac{\rho_c q k_p^2 m^2 \sigma g}{k_f k_d \tau} \left\{ 1 + \left(\frac{\pi}{2\mu_0 f s \sigma \tau^2} \right)^2 \right\}} + \dots \quad (3)$$

따라서 식(1) ~ 식(3)을 전산 프로그램화하여 펌프 기하학적 및 동작 변수 변화에 따른 구동압력 및 효율 변화를 나타낼 수 있다.

3. 전산 프로그램의 작성

그림 3은 전산 프로그램을 작성하기 위한 순서도이다. 사용자가 유량을, 구동압력과 사용온도의 값을 키보드로 입력하기만 하면 이들을 만족시키는 최적의 전자펌프설계 변수가 도출되도록 전산프로그램을 구성하였다.

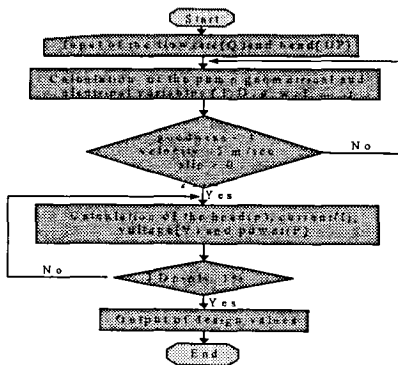


그림 3. 소형 전자펌프 설계용 전산프로그램 작성을 위한 순서도.

Fig 3. Flow chart of a computer program for design of a small EM pump.

한편, 그림 4 ~ 그림 6에서는 그림 3의 순서도에 따라 작성한 프로그램 수행 과정의 한 예를 나타내고 있다. 그림 4에서는 요구되는 토출압력, 유량 및 사용 온도를 키보드를 이용하여 입력하는

과정을 나타낸다.

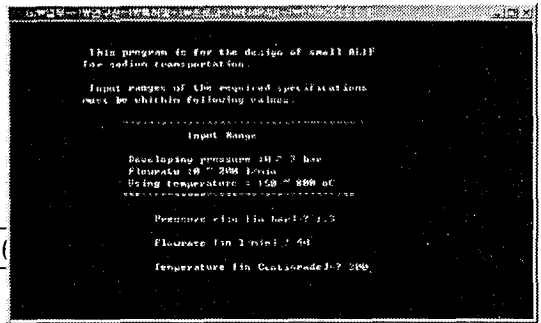


그림 4. 설계전산프로그램의 초기 화면.

Fig. 4. Initial screen of the computer program.

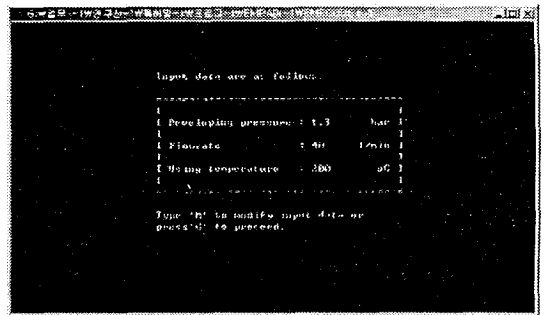


그림 5. 입력된 변수들의 표시 및 수정/진행 질의 화면.

Fig. 5. Screen of the indication of input variables and question for modification/proceeding.

그림 5에 나타낸 바와 같이, 입력된 변수들이 하나의 창에 표시되며 수정할 필요가 있을 경우 "M", 그렇지 않고 계속 진행할 경우 "G"를 입력하도록 한다.

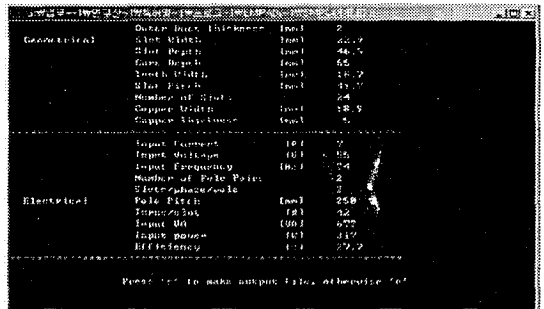


그림 6. 최적 설계 변수의 결과 출력.

Fig. 6. Output of the results of the optimum design variables.

그림 6에서 설계변수들이 출력되며 사용자 요구에 따라 "s"를 입력하면 파일로 저장된다.

4. 전산코드의 검증

그림 7 및 8은 개발된 코드의 검증을 위하여 프랑스 Novatome 사의 펌프 모델 IA21 (유량율 4 m³/h, 압력차 1.3 bar)과 비교한 것으로써 온도가 각각 200 °C 및 600 °C일 때의 두가지 경우에 대하여 특성값을 비교하여 도시하였다.

이때 IA21 펌프의 기하학적 치수 중 내부코어의 지름 및 두께에 대한 구체적인 자료를 구할 수 없어 전체적인 펌프 크기를 고려하여 각각 3.3cm 와 1mm로 추정하였다(표 1).

표 1. Novatome Pump IA21의 기하학적 및 전기적 설계 변수
Table 1. Design variables of the Novatome Pump IA21.

	Known values	Prediction Values
Geometrical	Core length: 336mm Pump diameter: 334mm Outer duct diameter: 48.26mm Outer duct Thickness: 3.68mm Slot depth: 90mm Slot width: 15mm	Inter core gap: 4.5mm Inner core diameter: 33mm Inner duct thickness: 1mm
Electrical	Frequency: 50Hz Phase: 3	Pole pairs: 1 Slot/phase/pole pair: 2 Pole pitch: 168mm

그림 7과 8에서 전산코드에 의한 특성계산값과 실제 펌프의 특성값의 상대오차가 최대 10%이하로 나타나 소형 펌프 설계에 대하여 본 전산코드가 직접 이용될 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

등가회로에 의한 전자기적 구동력과 수력학적 압력 강하를 고려한 토출 압력식, 그리고 효율식을 이용하여, 요구되는 펌프 사양에 대한 최적설계변수를 결정 짓는 소형 전자펌프 설계전산 프로그램을 개발하였다. 이미 상용화된 소형 전자펌프의 특성값과 비교 분석함으로써 본 연구에서 개발된 프로그램의 타당성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 연차연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Assadoilahbaik, "Experiments on Electromagnetic Capsule Pump", Trans. of the ASME, Vol. 108, pp. 262-268, 1986.
- [2] M. Assadoilahbaik and H. Liu, "Optimum Design of Electromagnetic pump for Capsule Pipe Lines", J. of Pipelines, Vol. 5, pp. 157-169, 1986.
- [3] M. S. El-Genk, "An Integrated Model of the TOPAZ-II Electromagnetic Pump", Nuclear Technology, Vol. 108, pp. 171-180, 1994.
- [4] Zh. D. Genchev, "Nonlinear Theory of the Stability of Hagen-Poiseuille MHD Flow in a Longitudinal Magnetic Field", Magnitnaya Gidrodinamika, No. 4, pp. 41-49, 1981.
- [5] S. A. Nasar, *Linear Motion Electric Machines*, John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [6] M. C. Poltter, *Mechanics of Fluids*, Prentice-Hall International Inc., London, 1991.

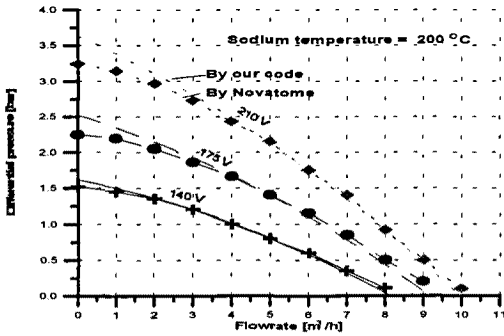


그림 4. 200°C일 때 Pump IA 21의 유량율-압력차 특성.
Fig. 4. P-Q of the pump IA 21 at the 200°C.

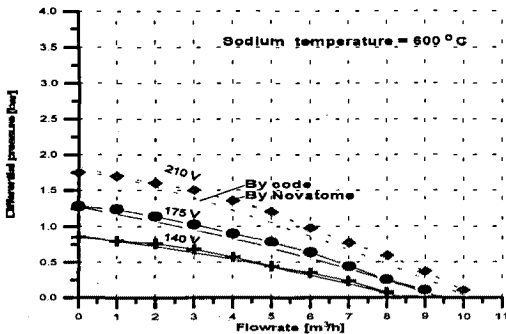


그림 5. 600°C일 때 Pump IA 21의 유량율-압력차 특성.
Fig. 5. P-Q of the pump IA 21 at the 600°C.