

Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting
Pohang, Korea, May 1999

소형 환단면형 선형유도전자펌프 설계 코드의 개발 및 검증

Development and Verification of Design Code for Small Annular Linear Induction EM Pump

김희령, 김종만, 남호운
한국원자력연구소

요 약

선형유도전자펌프는 KALIMER와 같은 액체금속로 내에서 높은 전기전도도를 가지는 소듐 냉각재를 전자기적으로 순환 구동시키는데 이용된다. 본 연구에서는 최대 유량을 200 l/min 및 최대 구동 압력 3 bar를 갖는 소형 환단면 선형유도전자펌프에 대한 설 계산 코드를 개발하였다. 우선 선형유도기기에 널리 이용되는 전기적 등가회로 해석과 수 력학적 압력 손실 계산식으로부터 펌프 구동 평형 방정식을 도출하였다. 이때 펌프 설계 변수들로 나타내어지는 방정식을 프로그래밍화하여 최적의 펌프 설계 변수를 결정짓는 전 산 코드를 개발하였다. 자체 개발된 전산코드의 계산 결과를 기존의 상용화된 펌프 특성 값과 비교 해석하여 코드를 검증하였다.

Abstract

EM(ElectroMagnetic) pump is used for the purpose of transporting liqui coolant with electrical conductivity in the LMR(Liquid Metal Reactor). In t study, computr code for the pilot annular linear EM pump has been develop maximum flowrate with 200 l/min and maximum developing pressure wit Firstly, Balance equation is induced by the equivalent circuit method commonly employed to analyze linear induction machines and the calculat hydraulic pressure drop. Then, design equation is converted to the compute and optimum pump variables are determined by this code. The code is verifi comparative analysis with the characteristic of the commercialized pump.

1. 서 론

액체금속로 내에서 화학적으로 반응성이 매우 강한 고온의 소듐 냉각재를 순환 구동시

키기 위한 장치로서 선형유도형의 전자펌프가 주목되고 있다. 유도전자펌프는 기계식 펌프와는 달리 임펠러와 같은 회전 부분이 없이 전자기력에 의하여 도전성 유체를 구동하므로 근본적으로 구조가 간단하며 별도의 전극이 필요 없으므로 비접촉으로 유체를 펌핑할 수 있다. 선형유도전자펌프는 전자기력에 의하여 구동되는데 구동 유체가 액체상태라는 것을 제외하고는 일반적인 선형유도전동기의 동작 원리와 일치한다. 따라서 펌프의 설계는 선형유도기기 해석에서 흔히 사용하는 전기적 등가 회로법을 이용하여 수행될 수 있다[1-3]. 이때 매우 좁은 유로 내에서의 수력학적 마찰 손실에 대한 관계식과 등가 회로상에서 나타나는 구동력-유량을 관계식을 결부시켜 펌프 변수 변화에 대한 펌핑력 및 효율 계산식을 도출한다. 이때 계산식을 전산 프로그램화하여 펌프 설계 변수 변화에 따라 펌핑력과 효율이 모두 적절히 큰 값을 가지도록 하는 설계 값을 결정 짓는다. 자체 개발된 전산코드를 기존의 상용화 펌프(프랑스 Novatome사)의 특성값과 비교하여 검증한다.

2. 구동 평형 방정식의 도출

액체금속로 냉각계 순환용 환단면 선형유도전자펌프의 단면도를 그림 1에 나타내고 있다. 전자펌프는 자기 투자율이 매우 큰 규소강판의 적층에 의한 외부 및 내부 코아, 자장을 발생시키기 위한 전류 인가 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 해석시 사용된 가정은 다음과 같다.

- 전자펌프에 입력되는 전원은 3상 대칭이다.
- 전자펌프는 기하학적 구조 및 여자 전류는 축대칭이다. ($\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$)
- 좁은 환단면 유로 내에서의 유속 분포는 반지름 방향 좌표에 따라 일정하며 [4] 유체는 축방향으로 상수의 유속을 가진다. ($v(r, \theta, z) = v_z \hat{z}$)

2.1. 전자펌프 등가회로 해석

그림 2.는 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.의 등가회로에서와 같이 전자펌프는 코아와 코일에 의한 1차측과 액체 소듐에

의한 2차측으로 나누어진다. 이때 등가 저항 및 리액턴스는 Laithwaite의 표준 설계 공식(5)에 따라 다음과 같이 펌프 기하학적 및 전기적 변수의 함수로 주어진다.

$$R_1 = \frac{\pi \rho_c k_f^2 m^2 D_o N^2}{k_f k_d p \tau^2}, \quad X_1 = \frac{2\pi \mu_o \omega D_o \lambda_c N^2}{p q}$$

$$X_m = \frac{6\mu_o \omega}{\pi^2} (k_w N)^2 \frac{\tau \pi D_o}{p g}, \quad R_2 = \frac{6\pi D}{\pi} \rho_r (k_w N)^2$$

이때 각각의 기호는 다음과 같다.

- ρ_c : 코일 도체의 비저항
- q : 슬롯수/자극/상
- k_f : 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_o : 공기의 자기 투자율
- ω : $2\pi f$ (f : 입력 주파수)
- λ_c : $\frac{1}{12} k_d(1+3a)$
 - a : chording factor = 코일피치/자극피치
 - k_w : 권선 계수
- g_o : 유효 코아간 간극
- D : 유체의 평균 지름($\approx D_o$)
- ρ_r : 유체의 표면 비저항 ($= \frac{1}{\sigma d(1-n)}$)
 - σ : 유체의 전기 전도도
 - d : 유체의 두께
 - n : Russel-Norsworthy 보정계수

등가회로부터 출력에 대한 평형 방정식을 세우면 구동 압력(ΔP) - 유량을(Q) 관계식은 다음과 같이 도출된다.

$$\Delta P = \frac{3M^2}{Q} \frac{R_2(1-s)}{s(R_2^2/X_m^2 s^2 + 1)}$$

$$= \frac{18\pi\sigma\tau\omega(\mu_0 k_\omega NI)^2 L}{g^2 \{ \pi^4 + (\mu_0 \sigma \omega \tau^2)^2 \}}$$

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

$$\Delta P_L = \frac{\rho v L v^2}{2g}$$

따라서 전체적인 구동압력은 $\Delta P - \Delta P_L$ 로 주어진다. 효율 계산식은 전기적 입력에 대한 수력학적 일의 비로 주어지며 결과식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{6 k_\omega^2 (1-s)}{\frac{\rho_c Q k_p^2 m^2 \sigma g}{k_f k_d \tau} \left\{ 1 + \left(\frac{\pi}{2\mu_0 f s \sigma \tau^2} \right)^2 \right\} + \frac{6 k_\omega^2}{s}}$$

펌프 기하학적 및 동작 변수 변화에 따른 구동압력 및 효율 변화를 전산 프로그램에 의하여 나타낼 수 있는데 본 코드에서는 주어진 유량을 및 구동압력을 만족시키는 최적의 설계 변수가 도출되도록 구성되어 있다.

3. 전산코드의 검증

그림 3 및 4는 개발된 코드의 검증을 위하여 프랑스 Novatome 사의 펌프 모델 IA21 (유량을 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 내부코아의 지름 및 두께에 대한 구체적인 자료를 구할 수 없어 전체적인 펌프 크기를 고려하여 각각 3.3cm 와 1mm로 추정하였다. 그림 3과 4에서 전산코드에 의한 특성 계산값과 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 전산 프로그램화하여, 요구되는 펌프 사양에 대한 최적 설계 변수를 결정 짓는 전산 코드를 개발하였다. 이미 상용화된 소형 전자펌프의 특성값과 비교 분석함으로써 본연구에서 자체 개발된 코드의 타당성을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Assadoilahbaik, "Experiments on Electromagnetic Capsule Pump", the ASME, Vol. 108, pp. 262-268, 1986.
- [2] M. Assadoilahbaik and H. Liu, "Optimum Design of Electromagnetic 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 Nuclear Technology, Vol. 108, pp. 171-180, 1994.
- [4] Zh. D. Genchev, "Nonlinear Theory of the Stability of Hagen-Poiseuille Flow in a Longitudinal Magnetic Field", Magnitnaya Gidrodinamika, N 41-49, 1981.
- [5] S. A. Nasar, *Linear Motion Electric Machines*, John Wiley & Sons, N 1976.
- [6] M. C. Poltter, *Mechanics of Fluids*, Prentice-Hall International Inc., Lo

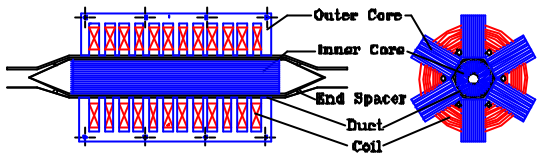


그림 1. 환단면 선형유도전자펌프의 단면도

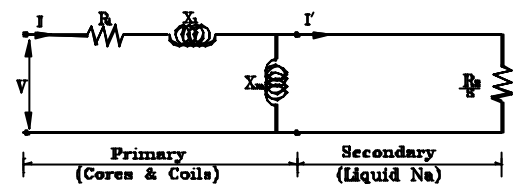


그림 2. 1상당 전자펌프 등가회로

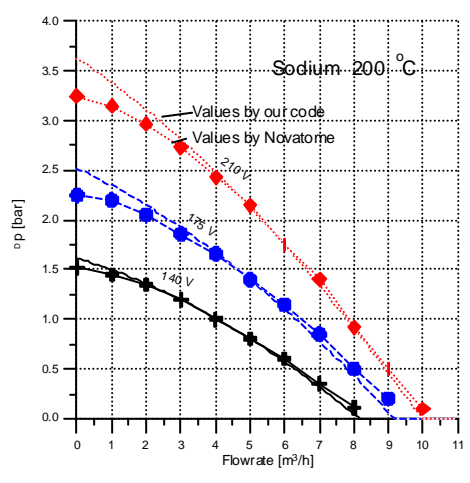


그림 3. 200 °C에서의 유량-압력차 특성

측정 치수
 코어 길이: 335 mm
 외부 덕트 지름: 4826 mm
 외부 덕트의 두께: 369 mm
 슬롯 깊이: 90 mm
 슬롯 폭: 15 mm
 지극량 (l)
 주극수: 60 Hz
 상수: 3
 상당 지극당 슬롯수: 2

추정 치수
 내부 코어 지름: 33 mm
 내부 덕트 두께: () mm

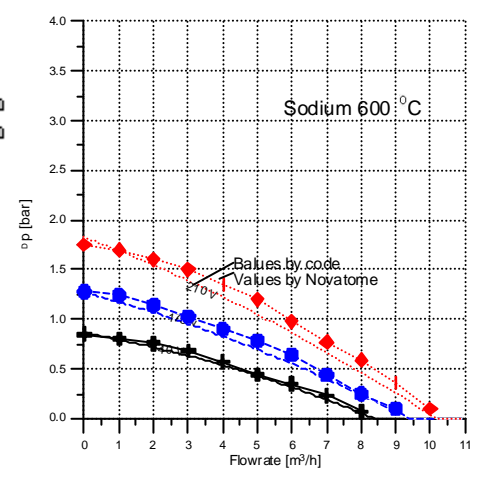


그림 4. 600 °C에서의 유량-압력차 특성