

액체소듐 구동용 선형유도전자펌프 제작

김희령, 남호윤, 황종선¹
한국원자력연구소, 담양대학¹

Manufacturing of the Linear Induction EM Pump for the Liquid Sodium

H. R. Kim, H. Y. Nam and J. S. Hwang¹
Korea Atomic Energy Research Institute, Provincial College of Damyang¹

Abstract

An EM pump is used for the purpose of transporting the electrically conducting liquid sodium of the high temperature that is used as a coolant in the liquid metal reactor. In the present study, the pilot pump has been designed and manufactured for the high temperature of 600 °C by the equivalent circuit method and the consideration of the materials and functions. The length and diameter of the pump are given as 84 cm and 10 cm each due to the fixed geometry of the circulation system to be installed. The characteristic of the developing pressure and efficiency is found out by using Laithewaite's standard design formula. It is shown that the developing pressure and efficiency are maximized at the frequency of 15 Hz from the curve. The annular channel gap of 3.95 mm is selected in the range of the reasonable hydraulic frictional loss. The components of the pump consist of the material for the high temperature. And then, the pump is manufactured to have the nominal flowrate of 40 l/min and developing pressure of 1.3 bar.

1. 서 론

액체금속로 내에서 화학적으로 반응성이 매우 강한 고온의 소듐 냉각재를 순환 구동시키기 위한 장치로써 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 액체 상태라는 것을 제외하고는 일반적인 선형유도전동기의 동작 원리와 일치한다. 따라서 펌프의 설계는 선형유도기기 해석에서 흔히 사용하는 전기적 등가회로법을 이용하여 수행될 수 있다[1-3]. 이때 매우 좁은 유로 내에서의 수력학적 마찰 손실에 대한 관계식과 등가회로상에서 나타나는 구동력-유량을 관계식을 결부시켜 펌프 변수 변화에 대한 펌핑력 및 효율 특성을 검토한다. 특성 해석으로부터 유량을 40 l/min 급 전자펌프에 대한 설계 변수를 결정 짓는다. 아울러 고온 액체 소듐 환경하에서의 재료상의 요건을 감안하여 펌프를 제작한다.

2. 본 론

2.1 환단면 선형유도전자펌프의 설계 해석

액체금속로 잔열 제거 시험용 환단면 선형유도 전자펌프의 단면도를 그림 1에 나타내고 있다.

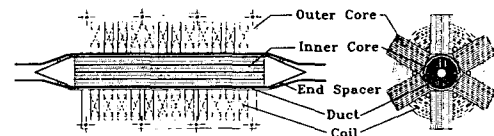


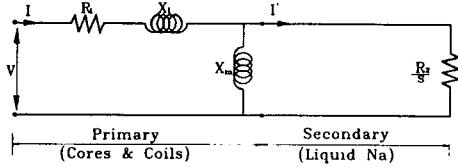
그림 1. 환단면 선형유도전자펌프의 단면도

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.
$$v(r, \theta, z) = v \hat{z}$$

2.1.1 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 시을 수 있다.



- (V : 입력 전압, I : 입력 전류
 R₁ : 1차측 저항, X₁ : 1차측 리액턴스
 X_m : 자화 리액턴스, I' : 2차 전류
 R₂ : 2차측 저항, s : 슬립)

그림 2. 1상당 전자펌프 등가회로

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. 등가회로부터 출력에 대한 평형 방

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

$$X_1 \cong \frac{2\pi \mu_0 \omega D_c \lambda_c N^2}{pq}$$

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

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

정식을 세우면 구동 압력(ΔP) - 유량(Q) 관계식은 다음과 같이 도출된다. 그리고 펌핑 효율

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

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

율은 전기적 입력에 대한 펌프의 수력학적 일의 비로 계산되며 아래와 같다. 한편, 좁은 환단면 유로 내에서 발생하는 수력학적 압력 손실은

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

Darcy-Weisbach 관계식[6]으로부터 나타낼 수 있는데 다음 식에서와 같이 유속(v)의 제곱에 비례하고 공기 간극(g)에 반비례하여 증가한다.

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

그러므로 유로의 폭은 자기장이 충분히 크게 발생하여 구동력이 커지도록 가능한 작은 값을 가져야 하지만 너무 작으면 수력학적 손실이 오히려 커질 수 있으므로 적절하게 선택되어야 한다. 그림 3과 4는 주파수 변화에 대한 펌프 구동 특성을 4개의 서로 다른 공기 간극의 경우에 대하여 나타내고 있다. 이 때 펌프가 설치되어야 할 순환 계통의 기하학적 크기가 미리 결정되어 있으므로 펌프의 길이와 지름은 각각 840 mm와 101.6 mm로 고정하여 해석하였다.

2.2 전자펌프의 구동 특성

그림 3에서 펌프의 구동력은 6 mm의 공기 간극에서 그 값이 가장 최대로 나타남을 알 수 있다. 그리고 이때의 입력 주파수는 15 Hz이다. 5 mm의 간극에서는 전자기적 토출 압력은 6 mm일 때 보다 더 크게 나타날 것으로 예상되나 간극의 감소에 따른 수력학적 손실의 증가 때문에 결과적인 구동력은 작게 나타나고 있다. 한편 그림 4에서 효율은 공기 간극 7 mm 및 그 때의 입력 주파수 7 Hz에서 가장 크게 나타나고 있다. 그림 3과 4에서 알 수 있듯이 일정한 공기 간극에서 구동 압력 및 효율의 최대 값은 서로 수 Hz 다른 지점에서 나타난다. 따라서 구동 압력 및 효율을 모두 적절히 만족하도록 입력 주파수 및 공기 간극을 각각 6.05 mm 및 15 Hz로 선택하였다. 표 1은 특성 곡선의 결과를 반영하여 도출된 40 l/min급 전자펌프의 설계 사양을 보여 주고 있다.

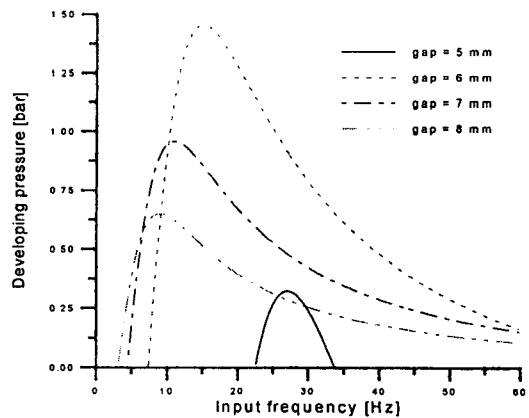


그림 3. 입력 주파수 변화에 대한 구동 압력 (NI = 1,000 AT)

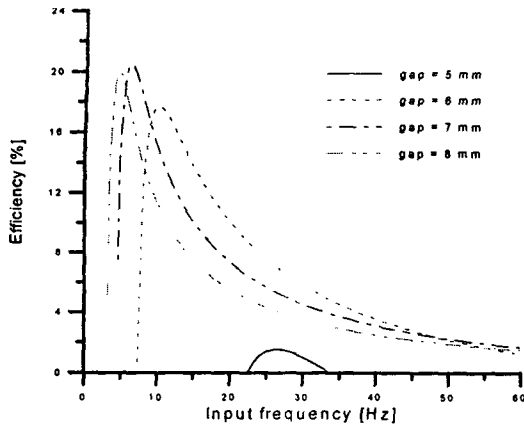


그림 4. 입력 주파수 변화에 대한 효율
($NI = 1,000 \text{ AT}$)

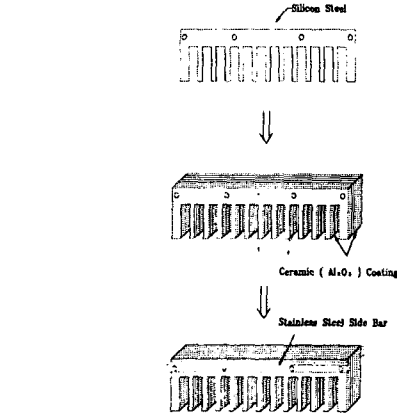


그림 5. 고온용 규소강판 적층에 의한 외부코어 제작

표 1. 40 l/min급 전자펌프의 설계 제원

설계 변수		설계제원
수력학적 변수	유량율 Q [l/min]	40
	구동 압력 ΔP [bar]	1.32
	슬립 s [%]	57.5
기하학적 변수	코아간 간극 g [mm]	6
	펌프 코아 길이 L [mm]	840
	펌프 지름 T [mm]	101.6
	내부 코아 지름 D_o [mm]	13.3
	자극 피치 τ [mm]	420
	자극상 p [개]	1
전기적 변수	입력 전류 I [A]	28.8
	입력 전압 V [V]	26
	입력 전력 VI [VA]	1,307
	입력 소비전력 P [W]	631
	권선수/슬롯 N [회]	35
	주파수 f [Hz]	15
	효율 [%]	13.9

그림 5에서 전자석 코어는 0.3mm 두께의 800 °C 고온 절연 코팅된 규소강판을 적절한 두께로 적층하여 코어 블록을 형성한다. 이때 이런 블록을 8개 만들어 외부 덕트 파이프 원주를 따라 방사상으로 배열한다. 한편 그림 6과 7에서는 내부코어 및 코일의 제작 과정을 보여주고 있다. 내부 코어는 외부 코어와 마찬가지로 규소강판 테잎을 일자형으로 폭을 달리하여 방사상으로 적층하여 외부코어로부터의 자기력선이 잘 이끌어지도록 하였다. 한편 코일은 두께 0.3 mm인 고온용 알루미늄 분산강화동 밴드에다 두께 0.13 mm 석면 밴드를 절연시켜 35회 감아서 스테인레스 스틸 밴드로 마감하여 코일 문치를 완성하였다. 그림 8에서는 결과적으로 각각의 구성품을 조립하여 완성된 환단면 소듐 풀 침지식 전자펌프를 나타낸다.

2.3 환단면 선형유도전자펌프의 설계 제작

표 1의 설계 값을 이용하여 전자펌프는 제작되는데 실제적으로 펌프는 고온의 액체 소듐 풀 속에 잠기어 사용하게 된다. 그러므로 펌프가 고온의 소듐과 직접적으로 접촉하지 않도록 소듐과 화학적 반응이 없는 스테인레스 스틸을 이용하여 밀봉할 필요가 있다. 한편 발생된 자기장을 왜곡시키지 않도록 펌프의 덕트 재료는 비자성체인 스테인레스 스틸 300 계열을 이용하였다. 그림 5 - 그림 7은 고온에서 동작하게 될 펌프의 핵심 구성품인 전자석 코어 및 코일의 제작 과정을 보여준다.

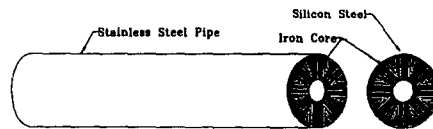


그림 6. 방사상 규소강판 배열에 의한 내부코어 제작

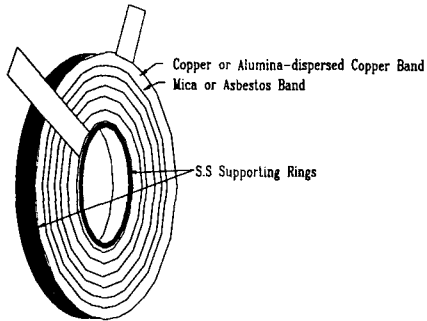


그림 7. 전자석 코일의 제작

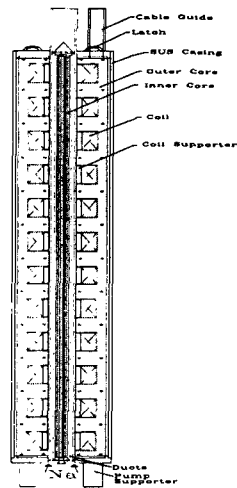


그림 8. 40 l/min급 전자펌프의 제작 단면도

3. 결 론

전기적 등가회로법을 이용하여 정적 유량을 40 l/min 및 구동 압력 1.3 bar급의 환단면 선형 유도전자펌프를 설계하였다. 길이 840 mm와 지름 101.6 mm를 갖는 전자펌프는 600 °C에서 3상 입력 전력 1,307 VA, 15 Hz로 약 1.39 bar의 토출 구동 압력을 가지도록 제작되었다.

[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.