

잔열 제거용 40 l/min급 환단면 선형유도전자펌프의 설계

김희령¹, 남호윤¹, 김용균¹, 최병해¹, 김중만¹, 황중선²
¹한국원자력연구소, ²도립담양대학

Design of ALIP with Flowrate of 40 l/min for the Removal of Residual Heat

H.R.Kim¹, H.Y.Nam¹, Y.G.Kim¹, B.H.Choi¹, J.M.Kim¹, J.S.Hwang²
¹Korea Atomic Energy Research Institute, ²Provincial College of Damyang

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, pilot EM pump has been designed by using of equivalent circuit method which is commonly employed to analyze linear induction machines for the test of removal of residual heat. The length and diameter of the pump have fixed values of 840 mm and 101.6 mm each by taking account of geometrical size of circulation loop for the installation of EM pump. Flowrate versus developing pressure is related from Laithwaite's standard design formula and the characteristic analyses of developing force and efficiency are carried out according to change of input frequency. From the characteristic curve, input frequency of 13 Hz is determined as the design frequency. On the other hand, The annular air gap size of 6.05 mm is selected not to bring about too much hydraulic loss. Resultantly design analysis makes pump have the electrical input of 604 VA and the hydrodynamical capacity of 1.3 bars and 40 l/min.

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 액체상태라는 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.

2. 본 론

2.1 환단면 선형유도전자펌프의 설계 해석

액체금속로 잔열 제거 시험용 환단면 선형유도전자펌프의 단면도를 그림 1에 나타내고 있다. 전자펌프는 자

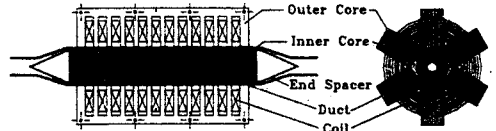


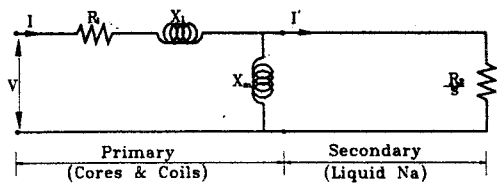
그림 1. 환단면 선형유도전자펌프의 단면도

기 투자율이 매우 큰 규소강판의 적용에 의한 외부 및 내부 코어, 자장을 발생시키기 위한 전류 인가 코일과 액체 소듐이 흐를 수 있는 좁은 환단면 유로로 구성되어 있다. 전자펌프는 코어의 길이(자극 쌍의 개수가 고정일 경우 자극 피치의 길이), 내부 코어의 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 지을 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 등가회로에서의 같이 전자펌프는 코아와 코일에 의한 1차측과 액체 소동에 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

$$R_1 = \frac{\pi \rho_c q k_p^2 m^2 D_o N^2}{k_f k_d \tau^2}, \quad X_1 \cong \frac{2\pi \mu_0 \omega D_o \lambda_c N^2}{b q}$$

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

대한 평형 방정식을 세우면 구동 압력(ΔF) - 유량을(Q) 관계식은 다음과 같이 도출된다. 그리고 펌핑 효율

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

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

은 전기적 입력에 대한 펌프의 수력학적 일의 비로 계산되며 아래와 같다. 한편, 좁은 환단면 유로 내에서 발생

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

하는 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. 그러므로 유로의 폭은 자기장이 충분하

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

게 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. 이때 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 전기적 토출 압력은 6 mm 일 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

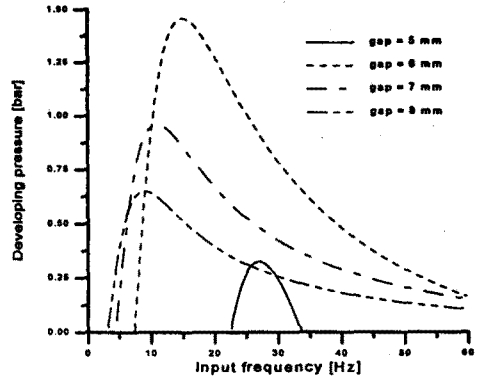


그림 3. 입력 주파수 변화에 대한 구동 압력 ($N = 1.225$ AT)

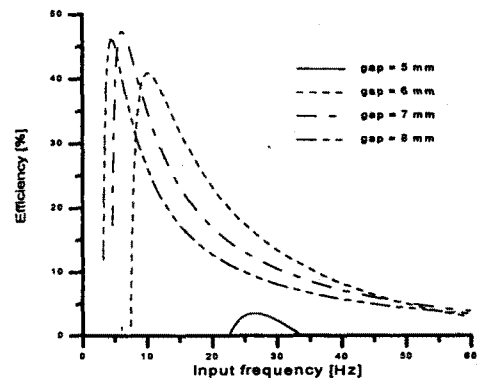


그림 4. 입력 주파수 변화에 대한 효율 ($N = 1.225$ AT)

13 Hz로 선택하였다. 표 1은 특성 곡선의 결과물 반영하여 도출된 40 l/min급 전자펌프의 설계 사양을 보여주고 있다.

표 1. 잔열 제거용 40 l/min급 전자펌프의 설계 제원

설계 변수		설계 제원
수력학적 변수	유량용	Q [l/min] 40
	구동 압력	ΔP [bar] 1.3
	슬립	s [%] 57.5
기하학적 변수	코아간 간극	x [mm] 6.05
	펌프 코아 길이	L [mm] 840
	펌프 지름	T [mm] 101.6
	내부 코아 지름	D_o [mm] 13.3
	자극 피치	τ [mm] 42
	자극강	p [개] 1
전기적 변수	입력 전류	I [A] 35
	입력 전압	V [V] 9.5
	입력 전력	VI [VA] 578
	입력 소비전력	P [W] 256
	권선수/슬롯	N [회] 35
	주파수	f [Hz] 13
효율	[%] 36.2	

2.3 환단면 선형유도전자펌프의 설계

표 1의 설계 값을 이용하여 전자펌프는 설계되는데 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 재질을 이용하였다. 그림 5는 펌프 동작 환경 요건을 감안하여 소듐 풀 침지식 형태로 설계된 환단면 선형유도전자펌프를 보여 주고 있다.

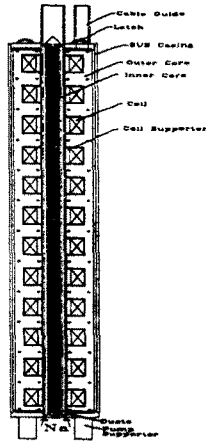


그림 5. 잔열 제거용 40 l/min급 전자펌프의 단면도

그림 6과 7은 설계 주파수 (13 Hz)와 상용 주파수 (60 Hz)에서 설계된 펌프의 유량에 따른 구동 압력 특성을 나타내고 있다. 정지시부터 정격 유량에까지의 구동 압력의 변동율은 20% 이하로써 실제 운전시 정격 유량을 이하의 범위에서 펌프는 대체적으로 일정한 토출 압력을 가짐을 알 수 있다. 한편 상용 주파수를 사용할 경우에는 설계 주파수일 때와 비교하여 같은 구동력을 발생하기 위하여 1.7 배 이상의 입력 전류가 요구됨을 알 수 있다. 이때의 입력 전력 및 효율의 비는 각각 약 3과 4.5로 계산되어 설계 주파수에서 펌프가 더욱 효율적으로 운전됨을 예측할 수 있다.

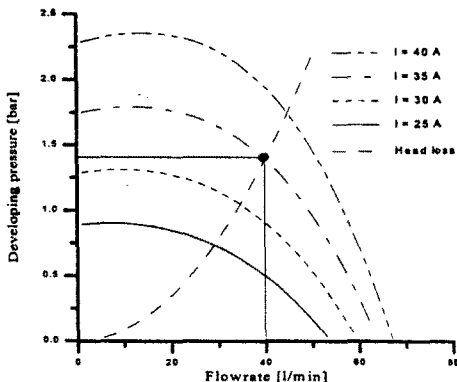


그림 6. 설계 주파수에서의 구동 압력 - 유량을 특성

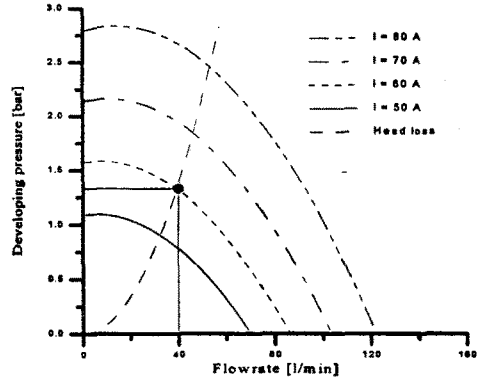


그림 7. 상용 주파수에서의 구동 압력 - 유량을 특성

3. 결 론

전기적 등가회로법을 이용하여 정격 유량을 40 l/min 및 구동 압력 1.3 bar급의 잔열 제거용 환단면 선형유도전자펌프를 설계하였다. 길이 840 mm와 지름 101.6 mm를 갖는 전자펌프는 3상 입력 전력 578 VA, 13 Hz에서 약 1.39 bar의 토출 구동 압력을 가지도록 설계되었다. 그리고 주파수 특성으로부터 전자펌프는 십수 Hz의 주파수 영역에서 상용주파수 일 때 보다 상대적으로 높은 효율로 동작됨이 예측되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] M. Assadoillahbaik, "Experiments on Electromagnetic Capsule Pump", Trans. of the ASME, Vol. 108, pp. 262-268, 1986.
- [2] M. Assadoillahbaik 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.