

등가회로 해석법에 의한 환단면형 유도전자펌프의 설계

김희령, 홍상희
서울대학교

황종선, 민병태, 남호윤, 조만
한국원자력연구소

A design of the annular induction electromagnetic pump
by equivalent circuit modelling

H. R. KIM, S. H. HONG (SEOUL UNIV.)
J. S. HWANG, B. T. MIN, H. Y. NAM, M. CHO (KAERI)

ABSTRACT

The annular induction electromagnetic pump with maximum flowrate of 60 l/min for the sodium coolant system of liquid metal fast breeder reactors has been designed using the equivalent circuit method.

The final optimum values of geometrical and electromagnetic parameters were obtained for an annular induction pump from the relation of the electrical variables giving the developing force to the fluid and the pressure drops between both sides of the pump.

The physical properties of the core, coil conductor materials in the high temperature and pump cooling systems under operation have been taken into account in the design of the pump.

The structural material were also selected considering the reaction with sodium and the magnetic field distortion.

1. 서론

소듐용 선형 유도전자펌프는 교류 전자석으로 발생시킨 자기장과 이로 인해 유기된 소듐 내의 전류에 의해 나타나는 전자력으로 펌프를 구동한다. 펌프에 사용되는 전자석 코일, 철심, 절연재 등의 구성 부품과 재료는 액체금속로의 정상 운전 온도인 550 °C 정도의 고온 상태에서 물리적인 성질의 높은 신뢰성이 요구되며, 화학적 반응성이 강한 소듐의 취급은 물론, 소듐과 접촉되는 구조재와 부품의 선정과 제작 조건이 까다로와 이에 대한 기술 습득이 선행되어야 한다. 전자펌프는 사용 위치, 형식 및 용량에 따라 그 설계와 제작 조건이 달라진다. 본 연구에서는 배관장착형 개발을

목적으로 다음의 제원을 갖는 펌프를 설계하였다.

- 펌프 형태 : 환단면 선형 유도 전자펌프
- 용 도 : 배관 장착형
- 사용최고온도 : 400 °C
- 최대 유량을 : 60 l/min
- 최대 압력차 : 1.3 bar
- 사용전원: 3상, 220V, 60Hz

2. 최적 설계 변수 해석

2.1 등가회로 해석식

출력·입력비를 최대화 하기 위한 펌프의 기하학적 모양 및 동작 변수를 결정하기위해 그림 1과 같이 펌프를 구성하는 전자석 부분과 유체를 각각 1차, 2차로 등가회로를 구성하고 Laithwaite의 표준 설계 공식을 이용하여 구동 전력에 대한 평형 방정식을 유도하여 다음과 같은 입력 전류(I_1)와 유량(Q)의 관계를 도출할 수 있다.^[1,2,3] 이때 펌프에의 전기적 입력은 대칭 3상이므로 1 상에 대한 등가회로를 고려하여 해석하였다.

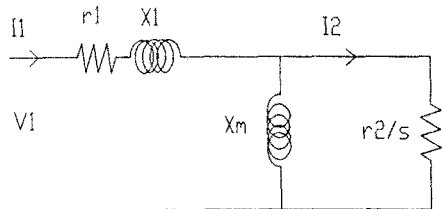


Fig 1. Equivalent Circuit of a Linear Induction Pump (1 PHASE)

$$I_1^2 = \frac{\rho Q^2 (4r_2^2 t^2 f^2 + X_m^2 (2\tau f - Q/A)^2)}{2r_2 X_m^2 A (2\tau f - Q/A)}$$

$$r_1 = \frac{\pi \rho_a k_f^2 m^2 D_a N^2}{k_f k_d \rho \tau^2} \quad : \text{1차축 저항}$$

$$r_2 = \frac{6\pi D}{\tau p} \rho'_r (k_w N)^2 \quad : \text{2차축 저항}$$

$$X_1 \approx \frac{2\pi \mu_a \omega D \lambda_c N^2}{p q} \quad : \text{누설 리액턴스}$$

$$X_m = \frac{6\mu_a \rho_a}{\pi^2} (k_w N)^2 \frac{\tau \pi D_o}{p g} \quad : \text{자화 리액턴스}$$

- ρ : 2차축 유체의 비저항
- f : 입력 교류 주파수
- ρ_o : 구리의 비저항
- k_p : 슬롯피치/슬롯폭
- D_o : 외부 코일의 안지름
- k_f : Slot-filing factor (0.5-0.6)
- p : 자극쌍의 수
- ρ'_r : 2차축 유체의 표면 비저항 (= $(\rho/d)/(1-k)$)
- d : 2차축유체의두께
- k : Russel-Norsworthy보정계수
- k_w : 권선계수=분포계수x단절계수
- w : 슬롯폭
- ω : 각주파수
- g : 공기의 간극(덕트 재료 및 유체의 두께 포함)
- τ : 자극 피치
- A : 환단면 유도 단면적
- q : 슬롯수/자극/상
- m : 입력 전원의 상의 수
- N : 1 상당 코일의 감은 횟수
- k_d : 슬롯깊이/슬롯폭
- D : 2차축(유체)의 평균 직경
- μ_o : 공기의 투자율
- λ_c : $\frac{1}{12} k_d (1+3\beta)$, β =코일피치/자극피치

입력전류·유량을 관계식으로부터 다른 기하학적 및 동작변수를 변화시켜 가며 그 추이를 관찰할 수 있으며 결과적으로 최적변수를 찾아낼 수 있다. 실제로 여러가지 변수들의 변화가 펌프 설계에 미치는 영향을 보면 표 1과 같다. [2.4.5]

표 1. 설계 변수 변화가 펌프 동작에 미치는 효과

변 수	증가 효과	감소 효과
공기 간극	큰 자화 전류 필요	고출력, 고효율 흐름의 불안정성 유발
내부코아 지름	큰 축방향 자속 발생	장치 무게 감소
유체의 도전성	큰 펌핑력 발생 저항 가열 손실	끝효과 감소
자극 피치	적은 자화 전류 요구	유속 저하
자극 갯수	끝효과 감소 저전류 운전 가능	2차축 누설 리액턴스의 증가
입력 주파수	유체의 유효 도전성 감소	유속저하

2.2. 최적 설계 계산값

유량을 60 l/min 를 얻기 위한 3상 입력 전력 및 효율 특성 곡선을 그림 2 및 3에 나타내었는데 이는 기하학적 및 전기적 설계 변수 요인들 중 펌프의 기하학적 균형을 고려하여 전체적인 펌프의 크기는 일정한 값으로 고정시키고 슬롯폭/슬롯피치를 변화시켜가며 계산한 결과이다. 이 설계값에 의한 환단면 유도 전자펌프의 제원을 표 2에 나타내었다.

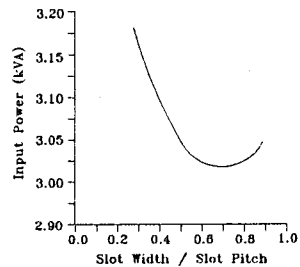


Fig2. Characteristics of Input Power - Slot Width / Slot Pitch

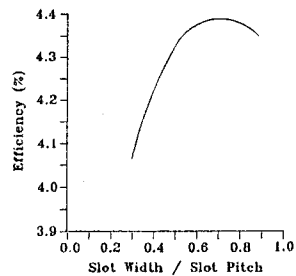


Fig3. Characteristics of Efficiency - Slot Width / Slot Pitch

표 2. 환단면 선형 유도 전자펌프의 설계 계산값

	설계 변수	설계 값
기 하 변 수	펌프 길이	485 mm
	외부 코아 크기	401 mm × 90mm × 51.4 mm
	내부 코아 지름	72.3 mm
	유체의 두께	3.4 mm
	자극상	1
	자극 피치	200.5 mm
	슬롯 수	12
	슬롯 폭	20 mm
동 작 변 수	슬롯 피치	31 mm
	권선수/슬롯	180회
	입력 전류	9 A
	입력 전압	195 V
	3상 입력 전력	3040 VA
	입력 주파수	60 Hz
	유량율	60 l/min

3. 펌프의 설계 제작

3.1 재료 및 기능상의 설계 요건

앞에서 논의된 최적 설계 계산값 이외에, 기술적인 관점에서 전자펌프는 고온의 소듐을 구동하므로 고온 내열성의 펌프 구성 재료 선택과 코아 및 코일의 발열, 유체로부터의 전열을 제거할 냉각 장치가 필요하다. 코아재료는 고온에서 자성을 유지하도록 큐리 온도가 높아야 하며 코아 표면은 전기 절연이 필수적이다. 전자석 코일 재료는 고온에서의 전기절연, 전기전도성, 기계적 강도등이 우수해야 한다. 고온에서 코일 전기 절연은 그 두께가 얇으면서도 절연성이 뛰어난 재료를 채택한다. 온도 상승시 펌프 구성 재료의 손상 방지를 위한 냉각은 자연 대류 및 강제냉각 방식을 병행하고^[4,6,7,8] 동작 온도 이상에서는 펌프가 자동 정지되는 안전 장치도 고려되어야 한다.

3.2 주요 구성품의 설계 제작 방법

설계변수 해석과 고온 재료 및 기능상의 설계요건을 토대로하여 설계한 3상 입력전력 3040 VA에서 목표 유량율 60 l/min를 얻을 수 있는 길이 485 mm, 지름 320 mm 외형 크기의 배관 장착용 환단면 선형 유도전자펌프의 단면도를 그림 4에 나타내고 있다. 개략적인 제작 방법은 다음과 같다.

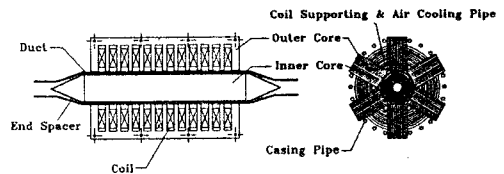


Fig 4. A Cross-Sectional View of the Annular Induction Pump of Externally-Supported-Duct Type

3.2.1 전자석 코아

전자석 코아는 내부 코아 및 외부 코아로 나누어진 다. 내부 코아는 외부 코아로부터의 반지름 방향의 자기장을 잘 이끌 수 있도록 절연된 규소강판 코아가 방사상으로 60°의 간격을 유지하면서 지름 27.3 mm인 덕트의 내부 스텔레스 스틸 파이프 주위에 여섯 부분으로 적층되어 있다. 그리고 각각의 뭉치 사이의 부채꼴 빈 공간에는 폭이 서로 다른 규소강판 코아를 채워 넣음으로써 보다 많은 자력선이 형성되도록 한다. 외부 코아는 연속 E자형 모양으로 12개의 슬롯을 가진 규소 강판을 적층시켜 측면 지지대로 고정하여 코아 뭉치를 먼저 제작한다. 이들 여섯개를 60°의 간격으로 방사상 형태로 배치함으로써 여섯개의 Version으로 구성된 외부 코아를 완성한다.

3.2.2 전자석 코일

그림 3에서 외부 코아의 슬롯에 감겨 있는 각각의 전자석 코일은 고온에서 단락되지 않도록 절연시켜 감는다. 이때 코일에 보다 많은 전류가 흐르도록 하기위해 테일 형태의 구리판을 사용하고, 여기에 절연 캡톤을 구리테일 사이에 같이 감도록 하여 400 °C까지 절연이 유지되도록 한다. 코일은 도체로서 전기전도성이 좋고 많은 전류를 흘리며 고온에서도 어느 정도의 기계적 강도를 유지하기 위해 두께 0.2 mm의 인·청동 구리테일을 사용한다.

3.2.3 Duct 및 Casing

Duct는 외부 파이프와 내부 파이프 사이에 환단면 형태로 형성이 되는데 그 사이로 액체소듐이 지나갈 유로가 된다. 이때, 덕트 구조제는 외부코아 및 내부코아에 의해 발생된 자기장을 왜곡시키지 않음과 동시에 화학적 반응성이 강한 소듐과의 접촉에도 아무런 손상이 가지 않는 비자성체인 스텐레스 스틸을 사용하도록 한다. 덕트 내부 양쪽 끝은 소듐의 흐름을 완만하게 하기 위해 유선형으로 원추형이 되도록 하여 내부 코어를 감싸게 하고, 덕트 외부 양끝은 레듀서를 설치하여 작은 지름의 소듐 배관계통에 연결되도록 한다.

3.2.4 냉각 파이프

소듐이 흐르는 덕트로부터의 방열과 코일 및 코아의 방열을 식혀주기 위해서 60°의 각도로 두 외부 코아와 만나는 내부에 반경이 접선으로 접촉하는 냉각 파이프를 축방향으로 여섯개를 나란히 끼워서 설치한다. 코아와의 두면과 접하고 있는 냉각 파이프는 코아와 코일을 지지할 뿐만 아니라 축방향을 따라 일정간격으로 돌려있는 공기 노즐을 이용하여 펌프를 강제 냉각시킬 수 있다.

6. 결 론

액체 금속 고속로의 소듐 냉각제 순환계의 배관장착용으로 최고 사용 온도 400℃, 펌핑 유량을 60 l/min의 제원을 갖는 환단면 선형 유도전자펌프를 등가회로 해석에 의한 최적설계 변수 도출에 의해 설계하였다. 이 계산값을 토대로 실제 펌프 제작시 소듐 취급에 따른 위험성과 액체 상태에서의 특이한 물리화학적 성질 때문에 전자펌프 구성 재료의 선택은 매우중요하다. 설계 변수 해석에서 고려 하지 않은 코아내에서의 와전류 및 히스테리시스 손실등은 실제 실험 결과에 오차를 유발시킬 수 있으나 입력 주파수가 적은 값을 고려할 때 큰 차이를 가져 오리라고는 생각되지 않는다. 한편

1차측의 고정자가 슬롯과 Teeth로 구성되어서 이에 의한 공기간극의 증가 효과로 밀미암이 일정한 최적 슬롯 폭의 값이 결정됨을 알 수 있었다.

7. 참고 문헌

- [1] S.A.Nasar and J.Boldea, *Linear Motion Electric Machines* (Wiley, New York, 1976).
- [2] 서울대 공대 생산기술연구소, 전기 기계 (대한고과서주식회사, 1986).
- [3] 勝導 電動機 (가남사, 1987).
- [4] 홍상희, 정기형, 남호운, 김희령, 김동욱, 소형 고속로 전자펌프 개발 연구, 한국원자력연구소보고서, 서울대공학연구소, 1991, 1992.
- [5] 홍상희, 정기형, 김희령, 최병룡, 주원태, 조수원, 고속로 냉각제 순환용 전자펌프 연구개발 (1), 한국원자력연구소보고서, 서울대공학연구소, 1993.
- [6] 橋本靖郎, 公開特許公報(A), 昭59-2, 563, 1984.
- [7] 鴨原重之, 公開特許公報(A), 昭60-70, 959, 1984.
- [8] M.Assadollahbaik, H.Liu, and F.G.Hoft, Trans. of the ASME, 108, 262 (1986).