

’99추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

**Double Stator 환단면 선형유도전자펌프의 구동 특성 해석**  
Characteristic Analysis of a Double Stator Annular Linear Electromagnetic Pump

김희령, 김종만, 박진호, 남호운

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

김태룡

전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

**요 약**

액체금속로 소듐 냉각재 이송을 위하여 일반적으로 환단면 선형유도전자펌프가 사용되고 있다. 본 연구에서는 대유량의 소듐 순환용으로 주목 받고 있는 double stator 형 환단면 선형유도전자펌프에 대한 구동 입출력 방정식을 이론적으로 도출하였다. 이때 펌프 기하학적 및 전기적 설계 변수들로 표현되는 압력차-유량을 관계식을 프로그래밍하여 실제 개발되고 있는 double stator version의 ALMR 전자 펌프에 적용하였다. 유도된 동 방정식의 타당성을 검증하기 위하여 입력 전류에 따른 유량을-압력차 특성을 기존의 자료들과 비교 검토하였다.

**Abstract**

A annular linear induction electromagnetic pump (ALIP) is generally transport liquid sodium coolants for liquid metal reactors. In the present theoretical induction of a developing equation has been carried out for a dou version of the ALIP which is noticeably employed for the sodium circulation o flowrate. The computerzed P-Q relation, which is represented by th geometrical and electrical variables, has been applied to a double stator ver ALMR EM pump. An induced equation was verified by the compared analy the known data on the P-Q characteristic according to the input currents.

## 1. 서 론

액체금속로 내에서 화학적으로 반응성이 매우 강한 고온의 소듐 냉각재를 순환 구동시키기 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. 실제 ALMR의 경우 1차 계통의 소듐 냉각재는 4개의 풀침지형 전자펌프에 의하여 순환 구동된다[1, 2]. 이때 사용되는 환단면 선형유도전자펌프는 외부 stator와 내부 stator 로 구성되는 double stator 펌프 구조이다. 이러한 double stator 구조의 펌프는 이전의 single stator 구조의 펌프에 비하여 P-Q 특성이 우수하여 액체금속로와 같이 대용량 전자펌프가 요구되는 곳에 이용된다. 본 연구에서는 double stator 구조를 갖는 전자펌프에 대한 구동 방정식을 이론적으로 도출하여 기존의 ALMR 펌프의 구동 특성 결과와 비교 검토한다. 우선 구동 방정식은 선형유도기기 해석에서 흔히 사용하는 전기적 등가 회로법을 이용하여 유도될 수 있다.[3-5]. 이때 펌핑력은 로렌쯔 힘으로 날리는 전자기적 구동력과 매우 좁은 유로 내에서 발생하는 수력학적 마찰 손실의 대수적 차이로써 계산된다. 유도된 관계식으로부터 입력 전류 변화에 따른 구동력-유량을 특성 곡선을 ALMR 펌프에 대하여 도출하여 기존의 특성 결과와 비교 검토하여 본 해석식의 타당성을 검증한다.

## 2. 구동 평형 방정식의 도출

그림 1에 나타나는 펌프는 일반적인 사각단면 선형유도전자펌프이다. 이 펌프의 전자석부분(코아 및 코일로 구성)의 모양을 살펴보면 사각형태를 가지고 있는데 이 때 전자석 부분을 감아버리게 되면 그림 2와 3에서 보이는 바와 같이 링 모양의 유로를 가지는 환단면형으로 바뀌게 된다. 즉, double stator 구조의 펌프가 된다. 그러므로 구동평형 방정식은 사각단면형에 대한 등가회로를 이용하여 구해질 수 있다. 단, 펌프 형태가 원형이므로 사각단면형 펌프에서 나타나는 transverse edge 효과는 나타나지 않는다. 우 double stator version의 펌프는 일반적인 전자펌프와 마찬가지로 자기 투자율이 매우 규소강판의 적층에 의한 외부 및 내부 stator, 자장을 발생시키기 위한 여자 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 알고 있으면 해석적으로 직접 구할 수 있다. 이때 전자펌프 구동 평형 방정식을 도출하기 위하여 사용된

가정은 다음과 같다.

- 전자펌프에 입력되는 전원은 3상 대칭이다.
- 전자펌프의 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. ( $v(r, \theta, z) = v_0 \hat{z}$ )

## 2.1. 전자펌프 등가회로 해석

그림 4는 실제의 전자펌프를 전기적 등가회로로 나타낸 것이다. 입력되는 전원은 3상 대칭이므로 1상에 대하여 등가회로 해석을 한 다음 그 결과를 3상에 맞게 선형적으로 계산을 할 수 있다. 그림 4의 등가회로에서와 같이 전자펌프는 코아와 코일에 의한 1차측과 액체 소동에 의한 2차측으로 나누어진다. 이때 등가 저항 및 리액턴스는 Laithwaite의 준 설계 공식[5]에 따라 다음과 같이 펌프 기하학적 및 전기적 변수의 함수로 주어진다.

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

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

이때 각각의 기호는 다음과 같다.

- $\rho_c$  : 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)
- $k_y$  : slot-filling factor (0.5 - 0.6)
- $k_d$  :  $t/w$  ( $t$ : 슬롯 깊이)
- $p$  : 자극쌍의 갯수
- $\tau$  : 자극 피치
- $\mu_o$  : 공기의 자기 투자율
- $\omega$  :  $2\pi f$  ( $f$ : 입력 주파수)
- $\lambda_c$  :  $\frac{1}{12} k_d (1 + 3\omega)$

- $\alpha$  : chording factor = 코일피치/자극피치  
 $k_w$  : 권선 계수  
 $g_e$  : 유효 코아간 간극  
 $D$  : 유체의 평균 지름 ( $\approx D_o$ )  
 $\rho_r$  : 유체의 표면 비저항 ( $= \frac{1}{\sigma d(1-n)}$ )  
 $\sigma$  : 유체의 전기 전도도  
 $d$  : 유체의 두께  
 $n$  : Russel-Norsworthy 보정계수

등가회로부터 출력에 대한 평형 방정식을 세우면 구동 압력( $\Delta P$ ) - 유량을( $Q$ ) 관계식은 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= \frac{3I^2}{Q} \frac{R_2(1-s)}{s(R_2^2/X_*^2s^2+1)} \\
 &= \frac{18\pi\sigma r\omega(\mu_0 k_w NI)^2 L}{g^2\{x^4 + (\mu_0\sigma\omega sr^2)^2\}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

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.

$$\Delta P_L = \frac{\rho\eta Lv^2}{2g} \quad (2)$$

따라서 실질적인 펌프 구동 압력은  $\Delta P_d = \Delta P - \Delta P_L$ 로 주어진다. 즉,

$$\Delta P_d = \frac{3I^2}{Q} \frac{R_2(1-s)}{s(R_2^2/X_*^2s^2+1)} - \frac{\rho\eta Lv^2}{2g} \quad (3)$$

(3)식을 이용하면 주어진 펌프에 대하여 입력 전류에 대한 구동압력-유량을 특성을 계산할 수 있다. 여기서는 ALMR 펌프를 대상으로 특성 곡선을 비교함으로써 도출된 방정식의 타당성을 확인할 수 있다.

### 3. 해석 결과

그림 5는 정격 전압 1.027 V, 그리고 이때의 정격 유량을 43,500 l/min와 정격 압력차

8기압의 ALMR 펌프에 대한 입력 전압에 따른 P-Q 특성 곡선이다. 여기서는 사용 온도가 338 °C일때 기존의 ALMR 펌프의 특성값과 본 해석에 의한 특성값을 도시하였다. 우선 특성 곡선의 형태는 기존의 결과와 본 해석 결과의 두 경우에 있어서 오차 10 % 이내로 유사한 경향성을 보인다. 한편, 유량이 동기 유량을(이동 자장의 속도와 동일한 값을 가지는 유량을) 근처에서는(그림 5에서 유량이 50,000 l/min 의 값을 가지게 되는 부분) 본 해석 결과와 기존의 값은 상대적으로 큰 차이가 보인다. 이러한 오차를 유발하는 요인들은 유속의 증가에 따른 자기레이놀드 수의 증대와 같은 전자기적 영향들이 있을 수 있다. 그러나 일반적으로 대부분의 선형유도전자펌프의 경우 정격 범위에서 자기레이놀드 수는 1 보다 매우 작은 값을 가지므로 실제 펌프 운전 측면에서는 이와 같은 전자기적 영향은 거의 나타나지 않을 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

등가회로에 의한 전자기적 구동 평형 방정식을 사각단면형 선형유도전자펌프의 해석식을 원용하여 도출하였다. 도출된 전자기력과 수력학적 압력 강하를 고려하여 결과적인 펌프 구동압력-유량을 방정식을 얻을 수 있었다. ALMR 펌프에 대하여 기존의 P-Q 특성 자료와 도출된 방정식에 의한 특성값을 비교하여 본 해석 결과가 double stator versi의 전자펌프에 적용될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 감사의 글

본 연구는 정부의 원자력 중장기 개발 계획의 일환으로 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] C. Nam and et al, "A Calculation Model for Fuel Constituent Redistribution and Temperature Distribution on Metallic U-102Zr fuel Slug of Liquid Metal Reactors", J. of Korean Nuclear Society, Vol. 30, No. 6, pp. 507-517, 1998.
- [2] A. W. Fanning, W. Kwant and M. Patel, "Double Stator Electromagnetic the ALMR Primary Sytem", GE Report, P15, 1992.
- [3] M. Assadoilahbaik, "Experiments on Electromagnetic Capsule Pump", the ASME, Vol. 108, pp. 262-268, 1986.
- [4] M. Assadoilahbaik and H. Liu, "Optimum Design of Electromagnetic pump for Capsule Pipe Lines", J. of Pipelines, Vol. 5, pp. 157-169, 1986

- [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, 1976.

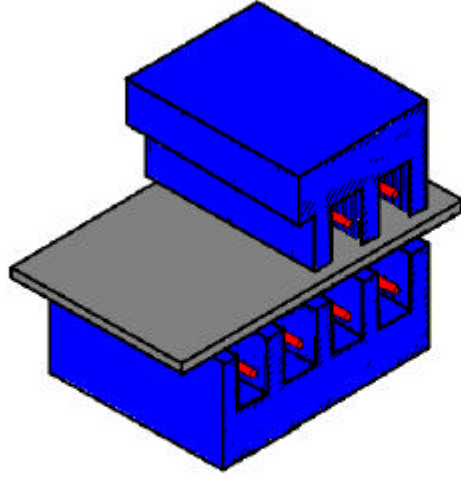


그림 1. 환단면 성형 이전의 double stator 전자펌프 구조도

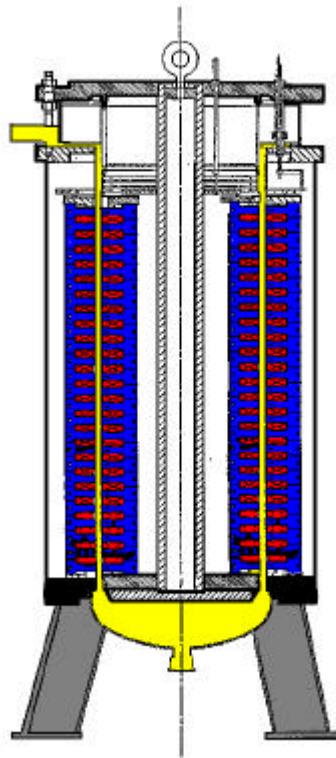


그림 2. Double stator 환단면 선형유도전자펌프 개념 설계도

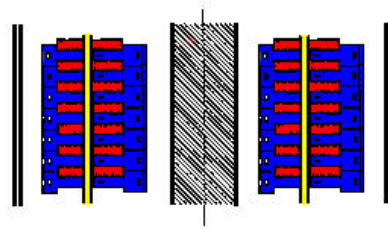
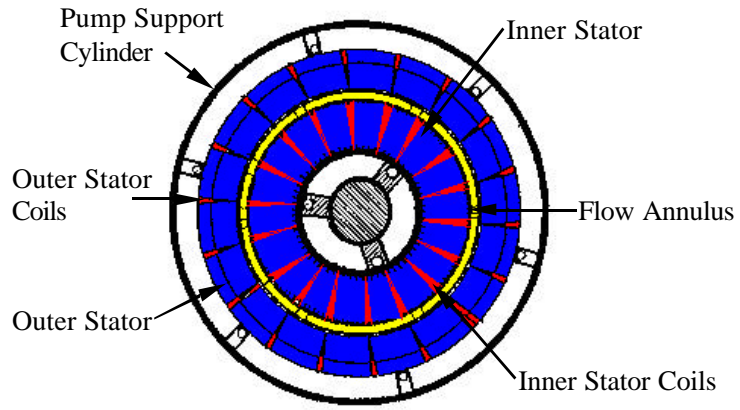


그림 3. Double stator 환단면 선형유도전자펌프의 단면도

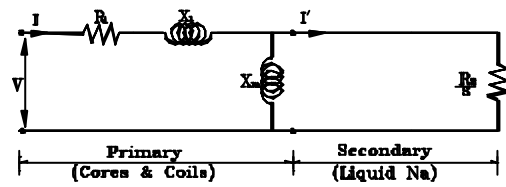


그림 4. 1상당 전자펌프 등가회로



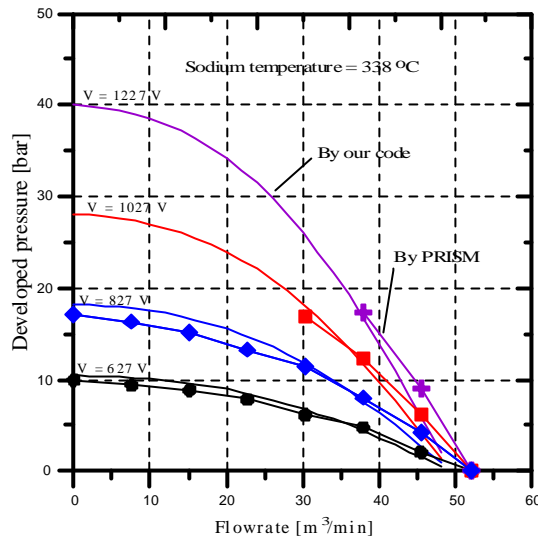


그림 5. 유도된 방정식에 의한 ALMR 펌프의 유량-압력차 특성 비교