

# 전자펌프의 원리 및 기술 개발 현황

김 동 화

(한국에너지연구소 선임기술원)

## 1. 서 론

전자펌프(Electromagnetic)는 액체금속의, 도전성을 이용하는 것으로 종래의 기계식에 비해 회전부가 없고 기밀을 요하는 패킹장치 등이 없어 보수가 필요없을 뿐 아니라 동작시 유도전압 조정기를 이용하여 유량제어를 쉽게 할 수 있는 등 많은 장점이 있다.

따라서 신뢰성과 안전성이 요구되는 고속증식로, 인공위성과 같이 액체금속을 냉각재로 사용하는 시스템의 펌프에는 물론 알루미늄, 납, 수은 등과 같이 산업계에서 많이쓰는 용융금속의 수송에도 대단히 중요한 장치이다.

그러나 전자펌프는 구조상 2차측(액체금속)과 펌프다트등에서의 손실이 대단히 클 뿐 아니라 전자펌프의 이용 특성상 높은 온도에서 사용해야 하므로 절연 및 내열재료 특성에도 아직 연구되어야 할 과제가 많다.

본 난에서는 이러한 관점에 입각하여 전자펌프의 기본원리를 기술하고 국내외의 연구현황 및 전망을 고찰하여 보고자 한다.

## 2. 전자펌프의 원리

전자펌프의 기본원리는 전류와 자계간에 발생하는 힘에 의해 전동기가 회전하는 원리와 같으나 전동기는 회전운동을 하는 반면 전자펌프는 직선운동을 하

는 점이 다르다. 즉 일차측에 가한 교류에 의한 이동자계와 이 이동자계에 의해 2차측에서 발생한 유도전류와의 상호작용에 의해 펌핑작용이 이루어진다.

그림 1에서 전류 J의 방향을 X, 자속 By의 방향을 Y라 하고 다트내의 물체가 도전성 재료이면 이 도전성 재료는 Z 방향으로 이동 하게 된다. 펌프에서는 보통 이 물체가 나트륨, 수은, 알카리 금속과 같은 액체형 금속이 된다. 여기서 인가 자계는 Y방향만을, 전류는 X방향으로만 흐르고 덕트입구와 출구의 속도변화를 무시하면

$$B_x = J_y = 0 \tag{1}$$

$$dP_z = J_x \cdot B_y \cdot dz \tag{2}$$

이 된다. 여기서 Pz는 전류와 자계의 작용에 의한 Z 방향의 압력상승분으로 압력상승의 총효과는

$$P_z = J_x \cdot B_y \cdot dz \tag{3}$$

이고 유량은  $Q = V_f \cdot dA$ 로 주어지므로

$$P_z = B_y \cdot J_x \cdot c \tag{4}$$

$$Q = V_f \cdot a \cdot b$$

이 된다.

여기서 Vf는 액체금속 속도이고 dA는 유체가 흐르는 단면적이다. 액체금속은 전동기의 회전자와 같으므로 인가전압 E는 회전자에서 발생한 역 기전력과 저항강하의 합과 같다. 즉 액체금속의 고유저항을 Ro라하면

$$E = (R_o \cdot J_x + V_f \cdot B_y) \cdot b \tag{5}$$

이 된다. 손실을 무시하면 수력학적 출력은

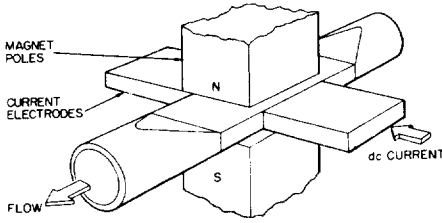
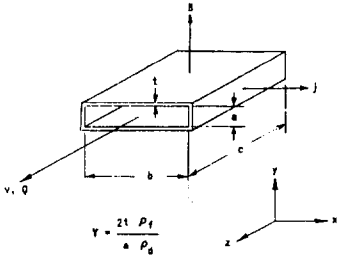


그림 1. 전자펌프의 원리

$$W_0 = P_z \cdot Q \quad (6)$$

가 된다. 액체금속의 동기속도를  $V_s$ 라하면  $V_s$ 는  $J_x = 0$ 이고 역기전력  $V_f$  By b가 E와 같은 점에서의 속도이므로

$$V_s = \frac{V}{By \cdot b} \quad \text{가 된다.}$$

$$\text{또 슬립을 } S \text{ 라면 } S = \frac{V_s - V_f}{V_s} \quad (7)$$

로 되고 전류  $J_x$ 는

$$J_x = \frac{By \cdot V_s \cdot S}{R_f} \quad \text{가 된다.} \quad (8)$$

식 (8)에서  $By \cdot V_s \cdot S$ 는 유도전동기의 2차전압  $E_2$ ,  $J_x$ 는 유도전동기의 2차 전류와 같다.

또 액체금속의 손실  $W_f$ 는

$$\begin{aligned} W_f &= J_x^2 f a b c = \frac{By \cdot V_s \cdot S \cdot a \cdot b \cdot c}{f} \\ &= \frac{B \cdot V}{1 - S} \left( \frac{S}{1 - S} \right) a \cdot b \cdot c \quad (9) \end{aligned}$$

이고 닥트벽의 전력손실은

$$W_d = \frac{2 t b c}{R_d} \left( \frac{E}{b} \right) = J_d \cdot R_d (2 t b c) = W_f \frac{Y}{S} \quad (10)$$

가 된다. 여기서  $R_d$ 는 닥트재료의 고유저항이고  $t$ 는

닥트두께이다. 보통 펌프의 코일배치는 전기자 반작용을 방지하기 위해 분포권으로 하고 보상 전류를 흘리는데 이때 이상적인 보상 전류분포는 유체와 닥트벽에서 전류분포의 합과 같다.

$$\text{즉 } Al = \frac{1}{KI} (aJ + 2t J_d) \quad (11)$$

이 된다. 단  $Al$ 은 보상권선의 슈트전류 밀도이고  $KI$ 은 전체의 권선에 대한 핏치 및 분포인자이다. 와를 여자권선의 극피치 및 자계극의 투자율이라면 여자권선의 전류 밀도는

$$Am = \frac{II g B}{KI} \quad (12)$$

$Al$ 과  $Am$ 은 90도의 전기각이 있으므로 총 권선손실은

$$W_l = r_l (Al + Am) b \cdot c$$

$r_l$ 은 고정자권선의 단위표면적당 전기저항이다.

점성손실을 무시하면 펌프효율  $Ed$ 는

$$Ed = \frac{W_0}{W_0 + W_f + W_d + W_e} \quad (13)$$

가 됨을 알 수 있다. 식(9), (10), (11)을 대입하고 정리하면 효율은

$$Ed = \frac{S(1-S)}{S+Y + \frac{a \cdot r_l}{fKI} \left[ (S+Y) + \left( \frac{2II R_f \cdot f \cdot g}{Va} \right) (1-S) \right]} \quad (14)$$

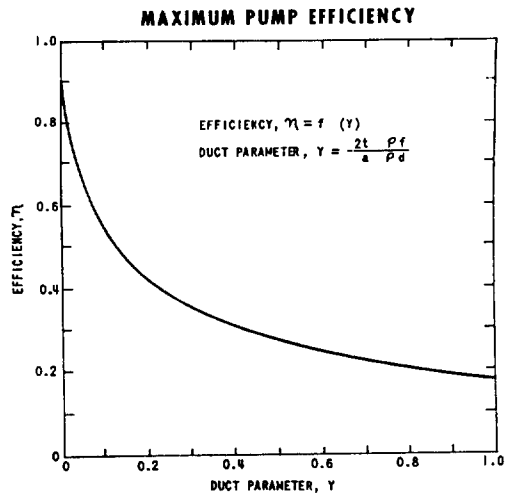


그림 2. 닥트 파라메터와 최대 효율과의 관계

표 1. 전자펌프 손실구성비

유체손실	5.3%
1차 존력손실	8.5%
2차 전력 손실	29.0%
덕트전력 손실	11.4%
철손	2.8%
계	57%

또는

$$Y = \frac{S(1-S)}{(S+Y) + C1[(S+Y) + C2(1-S)]} \quad (15)$$

a.r.l                      2T.T.f.f.g  
R.f.Kl                      V.a

$$Y = \frac{2t.Rf}{a.Rd} \text{이다.}$$

최대효율과 슬립과의 관계는

$$Em = \frac{S(1-S)}{S+Y} \text{ 또는 } S = Y(1+1/Y-1) \quad (16)$$

이들 닥트 파라미터 Y와 효율과의 관계를 나타낸 것이 그림 2에 있다. 식 (14)에서 전자펌프에 대한 효율을 유체 속도를 증가시키거나, 공급전압의 주파수를 작게하면 좋아짐을 알 수 있다. 그러나 실제의 설계에서는 속도를 과다하게 하면 유속손실이 증가하고 입력전원이 증가한 만큼 비례하여 효율이 커지는 않으므로 이들에 대한 결정문제는 별도의 고찰이 필요하다. 지금까지 개발된 전자 펌프의 효율은 43%정도인데 이와같이 효율이 낮은 주요 원인은 2차측에서의, 손실이 크기 때문이다. (표1참조)

즉 2차측의 액체금속을 통해 극당 누설되는 자속의 양이 많기 때문에 고조파에 의한 액체금속의 역이동 및 감속작용이 크고 주 자속의 감소 효과도 크기 때문인 것으로 알려지고 있다.

따라서 이의 개선에 대한 연구가 향후 효율개선에 대한 주요 인자가 될 것으로 본다.

### 3. 전자펌프의 종류

전자펌프는 구동하는 방식에 따라 여러가지 형이 이용되고 있는데 동작원리 및 인가전압에 따라 구분하면 그림 3과 같다.

CLASSIFICATION OF EM PUMPS

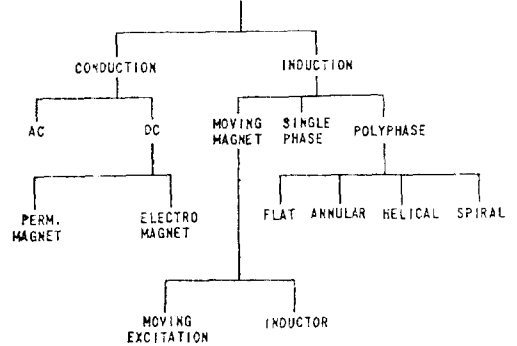


그림 3. 전자펌프의 구분

도전형 (Conduction pump)은 구동에 필요한 자속 발생용 전류가 외부의 전원에 의해 액체금속에 직접 흐르는 형태로 공급전원에 따라 AC, DC형으로 구분된다. 이에 비해 유도형 (Induction pump)은 교번자계의 변화에 따라 액체 금속내에 자속이 발생하는 형태로 전원 공급을 위한 별도의 회로가 필요없기 때문에 최근에 연구대상은 주로 이 형에 관한 것이다.

또한 모양에 따라 평판형 (linear induction)과 환상형 (Annularinduction)으로 구분되고 특히 환상형은 고효율 정량화가 요구되는 인공위성 용과 고속증식로 용에 많이 사용되고 있다.

### 4. 각국의 연구개발 현황 및 전망

전자펌프는 우주선용, 고속증식로용 기타 액체금속을 취급하는 시에만 응용되므로 전자펌프의 개발 현황도 이들의 개발현황과 맥을 같이한다.

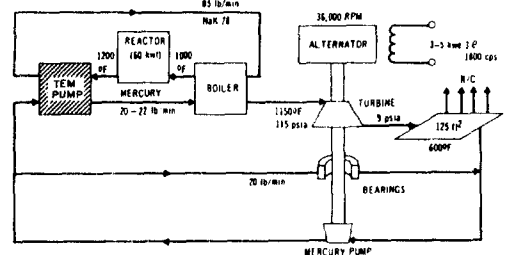


그림 4. 냉각재에 수은을 사용한 우주선용 정원 공급 장치

따라서 이를 연구하고 있는 나라는 미국, 영국, 프랑스, 일본 등으로 극히 제한되어 있는 실정이다. 이의 연구현황을 요약하면 다음과 같다.

#### 4.1 미 국

미국에서의 연구는 우주선 및 고속 증식로용으로 연구되어 있다. 우주선용으로는 우주선의 전원장치에 액체금속 냉각재(수은)원자료를 사용하는데 이는 고도의 신뢰성과 안전성이 요구되어 많은 장점이 있는 전자펌프의 사용이 필수 불가결 하였다. (그림 4)

1960년대 초반에 NaK금속을 이용하여 1200°F 6000시간 무보수 운전등 많은 실증 시험이 이루어져 있다. 고속 증식로용의 연구로서는 EBR I, EBR II, SIR Mark A, SEFOR등과 같은 실험용 고속 증식로에 사용되어 많은 실증시험이 이루어져 있다.

특히 1964년 EBR II의 2차측에 사용된 것은 6500 gpm의 용량을 가지고 있고 1979년의 FFTF에 사용된 것은 14500gpm으로 지금까지 실험된 것 중 최대의 용량인 것으로 알려지고 있으나 1979년 원자력 발전소사고 이후 연구가 급속히 냉각된 상태이다. 그러나 최근 차세대 전력원으로서 고속증식로의 위치가 재평가됨에 따라 이에 필요한 절연재료, 고정자코일 배치문제, 철심재료, 성능시험 등을 90년대 중반까지 연구완료하기 위한 구체적인 연구계획이 제시되어 있다.

#### 4.2 프 랑 스

미국의 연구가 잠시 소강상태였던데 반해 프랑스는 연구를 계속하여 현재는 첨단 연구결과를 갖고 있다. 펌프의 효율면에서도 미국의 GE가 43%의 효율을 목적으로 하고 있는 반면 프랑스의 Novatome에서는 효율 48%, 나트륨 속도 6.5(m/s), 정격유량 600(m/h), 유체온도 400도C의 것이 실용화 되어 있다.

#### 4.3 일 본

히다찌, 미스비시등과 같은 원자력 관련 기업체에서 고속로용계장기기 연구에 의해 얻어진 기반기술을 중심으로 종래의 기계식 펌프 대신 전자식 펌프

에 대한 연구가 고속로 연구와 더불어 시작되었다. 최근에는 이들을 기초로하여 Al, Zn, Sn, Pb, Mg등과 같은 용융금속의 수송에 사용할 수 있는 소형의 전자펌프를 상용화 하고 있고 건설적인 고속증식로 발전소에는 정격유량 140(m/h), 정격양정 40(m/h)인 환상형이 채택되어 있다.

#### 4.4 국내의 연구현황

전자펌프의 동작원리 및 기본해석 방법은 유도 전동기와 같기 때문에 이들 관점에서 본다면 원리에 대한 연구는 어느정도 이루어진 것으로 볼수 있겠으나 전자펌프의 목적이 용융금속 또는 이와 유사한 액체의 수송등에 있으므로 액체금속의 사용개소가 그리 흔치 않기 때문에 종합적인 연구는 대단히 미약한 것으로 볼 수 있다.

### 5. 결 론

지금까지 살펴본 바와 같이 전자펌프의 기본원리는 극히 간단한 것이나 현재까지 연구된 것으로는 효율이 48%를 넘지 못하고 있다.

이의 손실은 30% 정도가 2차측에서 발생하는 손실로 효율의 증감은 이곳의 개선에 의해 좌우 될 수 있음을 알 수 있다. 또한 전자펌프의 용도의 특수성을 감안하면 온도특성, 절연특성 등도 연구되어야 할 과제이다. 특히 차세대 전력원으로서 고속로의 위치가 재 평가됨에 따라 냉각재용 순환펌프로써 전자펌프에 대한 연구는 더욱 활발히 연구 되어야 할 것으로 본다.

#### 참 고 문 헌

- [1] "Electromagnetic pumps for large pool-concept LMFBR", EPRI NP-1265, 1979
- [2] Atz and baker, FBR Equipment, Academic press, 1963, pp.20-23,
- [3] "High-efficiency DC electromagnetic pumps and flow couplers for LMFBRs", EPRI NP-1656,
- [4] Hitach Review, vo.55, no.8, 1973, pp. 82-86.
- [5] 원자력 공업, vol.35, no.6, 1989, pp. 62-71.
- [6] Hitach review, vol.106, no.11, 1986, pp. 67-70,