

### MHD 기기의 전자기적 특성 고찰

\*장석명, \*\*김형규

\*충남대학교, \*\*한국원자력연구소

### Electromagnetic Characteristics of MHD Machine

\*S.M. Jang, \*\*H.K. Kim

\*Chungnam National Univ., \*\*KAERI

Abstract - The linear MHD(magnetohydrodynamic) machine obtains the linear motion by replacing the solid conducting secondary of LIM with the ionized gas, plasma or the liquid metal. The electromagnetic pump which is a kind of MHD machine is divided into induction pump and conduction pump. This paper shows the classification and development trends of MHD machines and the characteristics of double sided flat linear induction pump (DFLIP).

#### 1. 서 론

자기유체역학(이하 MHD) 현상을 이용한 펌프 중에서도 펌프는 일반 유도 기기와 같이 전류와 자속의 작용에 의한 플레밍의 왼손법칙으로 힘이 발생된다. 이 힘이 전기적 도체인 액체 금속에 직접 작용함으로써 고온, 고압에서 사용되는 일반펌프의 문제점인 고온에서의 베어링 마모, 임펠러의 손상, 기밀작용, 캐비테이션에 의한 결함 등을 해결할 수 있다. 그런데 펌프는 2차 전류의 발생에 따라 유도 펌프 및 전도 펌프로 분류되며, 유체 채널의 구조에 따라 평면형 펌프, 헬리컬 펌프 및 원통형 펌프 등으로 분류된다. 전도 펌프는 저전압 대전류를 필요로 하는 낮은 전도도를 가진 액체 금속에 사용되며, 유도 펌프는 큰 전도도를 가진 액체 금속에 사용된다. 한편 MHD 발전기는 도전성 유체를 일정속도로 자계속을 통과시킴으로써 플레밍의 오른손 법칙으로 기전력을 발생시키는 장치이다. 이와같은 MHD 기기는 전기적인 문제와 유체역학적인 문제를 동시에 포함하는 것으로 매우 복잡하고 난해하다. 즉, 운전원리 및 1차 권선의 전자기적 현상에서 일반 전기 기기의 특성 현상에서 더 나아가 유체역학 문제까지를 다루어야 하는 것이 현재의 기술적 과제이다.

본 논문에서는 MHD 기기의 개발 동향을 조사 검토하였고 상용의 교류 전원에서 사용이 가능한 양극성 평면형 리니어 유도펌프(이하 DFLIP)에서의 전자기적 현상에 대하여 고찰함으로써 전자펌프의 기본을 확립하고자 하였다.

#### 2. MHD 기기의 분류 및 개발 동향

##### 2.1. MHD Machine의 분류

MHD 기기는 리니어 유도전동기 또는 직류전동기의 2차측 도체를 이온가스(플라즈마)나 액체금속으로 대체한 것으로 전자유체역학 기계를 말한다. 그림 1과 같이 전자기 유체 펌프와 MHD 발전기로 분류할 수 있다. 또한 펌프는 2차 전류의 발생에 따라 유도 펌프 및 전도 펌프로 분류된다. 유도펌프는 자속 발생장치의 구조

에 따라 정지형 및 회전형 유도펌프로 분류된다. 즉, 채널의 구조에 따라 정지형 유도 펌프는 평면형 리니어 유도펌프, 원통형 유도펌프, 헬리컬 유도펌프 등이 있고, 회전형 펌프에는 원심펌프, 원통형 회전자 유도펌프, 헬리컬 회전자 유도펌프등이 있다. 전도펌프는 전기자 전류 및 계자 전류에 따라 교류 전도펌프 및 직류 전도펌프로 분류된다.

또한 MHD 현상을 응용하는 발전기는 도전성 유체를 일정속도로 자계속을 통과시킴으로써 기전력을 발생시키는 장치로, 가동부가 없기 때문에 고온에서도 사용할 수 있으며 고효율 발전이 가능하다. MHD 발전기에는 액체금속 MHD 발전기, 플라즈마 MHD 발전기등이 있다.

##### 2.2. MHD 기기의 개발 동향

물이나 기름 또는 일반적인 액체 도체를 배관을 통해 이송하기 위한 것으로는 임펠러를 이용한 원심펌프 및 피스톤을 이용한 피스톤 펌프가 주로 사용되어 왔다. 이들 펌프를 Na, K, Hg와 같은 액체금속에 사용함으로써 1)임펠러의 급격한 마모, 2)고온에서의 베어링의 마모, 3)액체금속과 임펠러와의 반응, 4)액체금속의 기밀의 어려움, 5)캐비테이션에 의한 결함 등 많은 문제점이 발생하였다. 이를 위하여 전자기력을 이용한 방법이 응용되고 있다. 즉, 전류와 자속 사이에서는 식(1)로 정의되는 힘이 발생되며, 전자펌프에서 이 힘이 모터와 같이 전기적 도체인 액체금속에 직접 작용하게 된다. 이로써 1)구조가 간단하고, 2)유체의 기밀성이 보장되며, 3)운전 및 보수의 용이성이 좋아져 액체금속을 이송하기 위한 용도로 사용할 때 일반펌프에 비하여 많은 장점을 갖게 된다.

$$F = BLI \quad (N) \quad (1)$$

MHD 펌프에 대한 연구 및 개발은 Faraday에 의해 오늘날 전자펌프라 불리는 장치가 고안된 이후 1900년대 초에 전자 유량계 및 액체 금속의 이송을 위하여 나선형 와전류를 이용한 전자펌프의 형태를 이용하기 시작하였다. 전자 펌프의 본격적인 개발은 1927년 Einstein과 Szliard가 개발한 원통형 리니어 유도펌프(ALIP)를 리튬, 포타슘 등 여러 종류의 액체금속에 이용하면서 시작되었다. 최근에는 FLIP, 헬리컬 전자펌프 등 여러 종류의 MHD 기기가 개발되면서 제련 및 제철소 응용 금속 이송펌프 및 원자력 발전소의 냉각재 이송펌프에 사용되고 있다.

MHD 발전은 1950년대 후반 보다 효율적인 발전방식으로써 제안되었다. MHD 발전기는 전도도를 가진 유체를 일정속도(U)로 자계(B)속을 통과시킴으로써 식(2)로 정의되는 기전력을 발생시키는 장치인데, 가동부가 없기 때문에 고온에서도 사용할 수 있으며 고효율 발전이 가능하다.

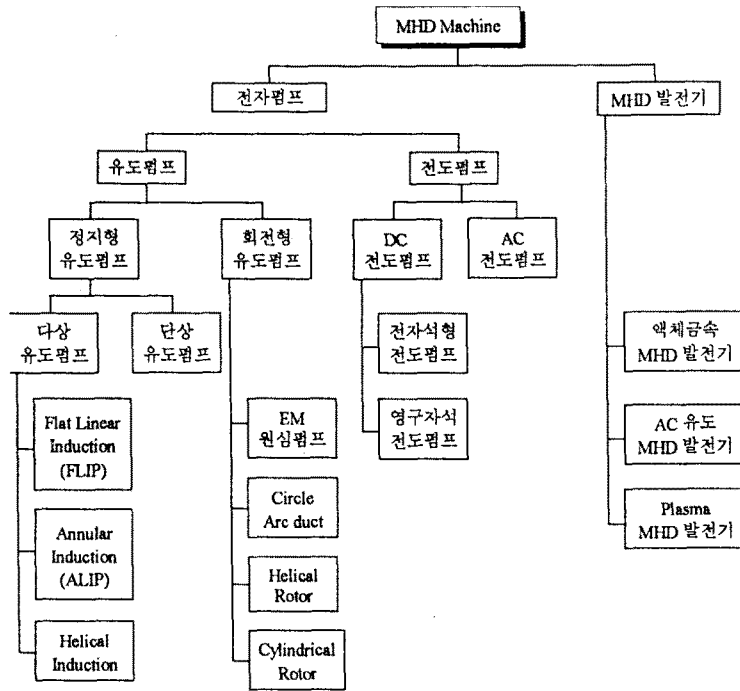


그림 1. MHD 기기의 분류

$$E = U \times B \quad (V)$$

(2)

성분만 고려한다.

MHD 기기를 이용한 플라즈마 DC 발전은 세계적으로 25MW 이상까지 실제통에 수백 시간 정도 연결 운전한 경험이 있으며, 300MW 이상의 MHD 시험발전소가 설계되어 1980년대에 운전된 예가 있다. 현재 미국, 러시아, 일본, 호주, 중국 등의 국가에서 MHD의 응용 연구가 폭넓게 진행 중에 있다. 또한 미국, 러시아, 일본 등의 국가에서는 MHD를 이용한 해수추력작용(Sea Water Propulsion)에 대한 연구도 진행되고 있다.

이와 같이 국외에서 MHD 기기를 이용한 에너지 변환 장치의 개발이 활발하게 진행되고 있으나 국내에서는 연구가 거의 이루어지지 않고 있다.

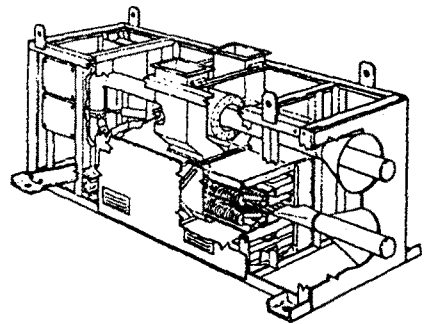
### 3. 유도펌프의 전자기적 특성

그림1.과 그림2.에서 볼 수 있듯이 전자 펌프는 유도 펌프와 전도 펌프로 분류될 수 있다. 유도 펌프는 상용 교류전원에서의 사용이 가능하기 때문에 전도펌프에 비하여 구조가 간단하나 자화에 필요한 큰 무효전류를 필요로 하므로 에너지 변환효율이 낮다. 따라서 유도 펌프는 도전성이 좋은 액체금속에 사용된다. 전도펌프는 DC전원 및 채널양단에 전극이 필요하므로 구조가 다소 복잡하나 에너지 변환 효율이 유도펌프에 비하여 크다. 따라서 낮은 전도도를 가진 액체금속에 사용된다. 본 논문에서는 상용의 교류 전원에서의 사용이 가능한 DFLIP에서의 전자기적 특성에 대하여 고찰하였다.

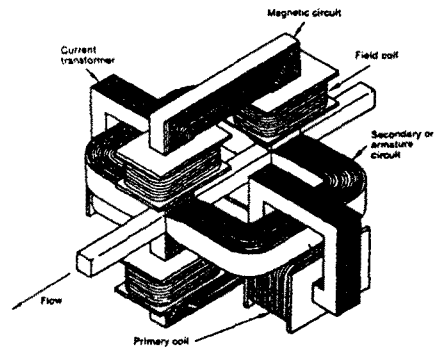
#### 3.1. FLIP의 전자기적 모델

채널내의 유체는 일정 속도로 축류를 이룬다고 가정하고, 단부 효과 및 표피 효과를 고려하여 LIM과 같이 해석할 수 있다. 따라서 다음의 가정을 고려하였다.

- 1)공극에서의 자계는 채널 깊이 방향(z)으로 일정하고 유도되는 전류는 x 및 y의 두 성분이다.
- 2)종방향의 단부효과가 존재하지 않으므로 공극에서의 자계와 2차 유도전류는 1차 전류와 같은 진행파이다.
- 3)End plate의 두께는 매우 작으므로 전류는 x 방향의



(a) 양축식 평편형 리니어 유도펌프



(b) AC 전도펌프

그림 2. 전자펌프의 구조

그림 3.은 FLIP의 단면도이다. 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times H = J \quad (4)$$

그림 2.a의 횡단면도에서 1차 전류의 방향은 y방향이며 x의 주기함수라 하자. 1차 전류에 의한 공극에서의 자계  $H_1$ 은 가정에 의해 식(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$-g_0 \frac{\partial H_{1x}}{\partial x} = J_1 \quad (5)$$

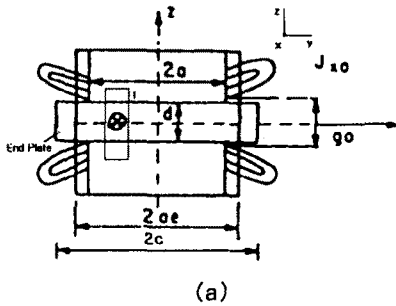
1차 전류에 의한 자계  $H_{1x}$ 에 의한 2차측의 전류는 x, y의 두 성분하므로 식(6)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial H_{2x}}{\partial y} i - \frac{\partial H_{2y}}{\partial x} j = J_{2x} i + J_{2y} j \quad (6)$$

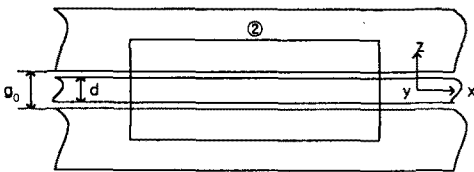
그림 2.a 및 2.b의 영역 1 및 2에 대하여 앙페르의 법칙을 취하면 액체금속에서의 자계  $H_2$ 에 의해 유도되는 전류는 2차측 채널의 두께를 고려하면(7)과 같다.

$$g_0 \frac{\partial H_{2x}}{\partial y} = d \cdot J_{2x} \quad (7)$$

$$-g_0 \frac{\partial H_{2y}}{\partial x} = d \cdot J_{2y}$$



(a)



(b)

그림. 3. Linear induction pump의 단면도  
(a) 횡단면도 (b) 종단면도

### 3.2. 특성방정식

공극에서의 Reaction Field를  $H_r$  이라면, Maxwell법칙과 Ohm의 법칙에 의하여

$$\nabla^2 H_r = -\frac{\partial^2 H_{rx}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 H_{ry}}{\partial y^2} = -j\omega\sigma\mu_0 \frac{d}{g_0} (H_1 + H_2) \quad (8)$$

1차 전류만에 의한 자계  $H_{1x}$ 는 식(9)와 같으므로

$$H_{1x} = j \frac{\tau}{\pi} \frac{1}{g_0} J_{1m} \quad (9)$$

$$\text{단, } J_1 = J_{1m} e^{j(\omega t - \frac{x}{\tau})} \quad \frac{\partial}{\partial x} = -j \frac{\pi}{\tau}$$

1차 및 2차 유도전류에 의한 Reaction Field는 다음의 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial^2 H_{rx}}{\partial y^2} - \left[ \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 + j\omega\sigma\mu_0 \frac{d}{g_0} \right] H_{rx} = J_{1m} \omega\sigma\mu_0 \frac{d}{g_0^2} \frac{\tau}{\pi} \quad (10)$$

여기서,  $\tau$  = 극단격,  $s$  = 슬립,  $\sigma$  = 전도도 이다.

따라서 공극에서의 합성 자속  $B_x$ 는 와전류에 의한 자속과 1차 전류에 의한 자속의 합으로 표현된다.

유체 채널 중앙에서의 전류는 x성분만 존재하며, 액체 금속과 End plate의 경계면에서의 전계 및 전류의 연속성을 고려하면 경계조건은 다음과 같다.

$$(J_{2x})_{y=0} = 0$$

$$(c - a_e) \frac{\partial J_{20}}{\partial x} = (J_{2y})_{y=a_e} \quad (11)$$

$$\frac{J_{20}}{\sigma_0 e} = \left( \frac{J_x}{\sigma_e} \right)_{y=a_e}$$

위의 경계조건을 적용하면 End plate에서의 전류밀도  $J_{x0}$  및 합성자속  $B_x$ 는 다음과 같다.

$$J_{20} = -\frac{sG\tau J_{1m}}{\pi d(1+j sG)} \frac{1}{\left[ (c-a_e) + \frac{\sigma_e}{\sigma_0 e} \frac{1}{\gamma \tanh \gamma a_e} \right]} \quad (12)$$

$$H_r = \frac{J_{20} \sigma_e d}{\sigma_0 e g_0 \gamma \sinh \gamma a_e} \cosh \gamma y + \frac{sG\tau J_{1m}}{\pi(1+j sG)g_0} \quad (13)$$

$$B_x = \mu_0 H_r + \frac{j\mu_0 J_{1m} \tau}{\pi g_0} \quad (14)$$

일정속도  $U$ 에서 리니어 유도 전동기의 추력 및 안내력에 대응하는 유체에 작용하는 자계압력의 기울기는 Navier-Stroke 식으로부터 식(15)와 (16)으로 표현된다. 식(15)는 유체의 흐름 방향으로의 압력의 기울기이며, 식(16)은 채널 양단의 End plate에 의하여 유체가 채널의 중앙으로 흐르도록 하는 역할을 한다.

$$\frac{\partial p_x}{\partial x} = \text{Real}(J_y B_0^*) = \text{Real}\left( j J_y \frac{\mu_0 J_{1m}}{\pi g_0 \tau} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial p_y}{\partial y} = \text{Real}(J_x B_0^*) = \text{Real}\left( -j J_x \frac{\mu_0 J_{1m}}{\pi g_0 \tau} \right) \quad (16)$$

## 4. 결론

본 논문에서는 MHD 기기의 개발 동향, 분류 및 일 반펌프에 대한 특징점에 대하여 고찰하였으며, 채널 양단에 End plate를 가진 FLIP의 전자기적 현상에 대한 일반식을 구함으로써 전자펌프의 기본을 확립하고자 하였다. 액체금속이 일정 속도로 층류를 이룬다는 가정에서 FLIP의 일반식을 구하였으나 실제 모델에서는 유체의 특성을 고려하여야 한다. 이와같이 MHD 기기는 전기적인 문제와 유체역학적인 문제를 포함하는 것으로 매우 복잡하고, 운전원리 및 1차권선의 전자기적 현상에서의 리니어 모터와의 구별은 현재의 과제이다.

### (참고 문헌)

- [1] D.D. Bluhm, R.W. Fisher, "Design and Operation of Flat Linear Induction Pump", Report No. TID-4500, United State Atomic Energy Commission, 1964.
- [2] S.A. Nasar, I. Boldea, "Linear Motion Electromagnetic Systems", John Wiley & Sons, 1985.
- [3] S.A. Nasar, I. Boldea, "Linear Motion Electric Machines", John Wiley & Sons, 1976.
- [4] R.S. Baker, M.J. Tessier, "Handbook of Electromagnetic Pump Technology", Elsevier, 1987.