

원자로 냉각재 이송을 위한 평면형 리니어 유도펌프의 설계

장석명*, 우종섭**, 김형규**
 *충남대학교 전기공학과, **한국원자력연구소

The Design of Flat Linear Induction Pump for Transferring Reactor Coolant

*S.M.Jang, **J.S.Wu, **H.K.Kim
 *Chungnam National Univ., ** KAERI

Abstract - Pumping liquid metal in nuclear power plant application by conventional centrifugal pumps pose difficulties such as bearing wear out at high temperatures and leak proof sealing of the liquid metal. MHD machine is obtained by replacing solid conducting secondary of conventional motors with ionized gas or liquid metal. It is used for reactor cooling pump because of construction simplicity, perfect sealing and easy operation/maintenance.

MHD pump is complicated because it includes electromagnetic and hydrodynamic phenomena. The principle of MHD pumps is described in this paper. We design small laboratory size Flat Linear Induction Pump (FLIP) for transferring sodium.

1. 서 론

자기유체역학(이하 MHD) 현상을 이용한 기기는 2차 축 도체를 이온가스나 액체금속으로 대체한 것으로 크게 발전기와 펌프로 분류될 수 있다. 이온가스를 이용한 MHD 기기는 MHD 발전기를 예로 들 수 있다. MHD 발전기는 이온가스가 자속을 통과함으로써 플레밍의 오른손법칙에 의한 기전력을 발생시킨다. 액체금속을 2차 축으로 이용한 기기는 전자펌프와 전자유량계이며 일반적으로 고온의 액체금속에 사용된다. 전자펌프는 유도기기와 같이 전류와 자속의 작용에 의한 플레밍의 왼손법칙으로 힘이 발생하여 액체금속을 이송시킨다. 액체금속을 냉각재로 이용한 액체 금속로에서 일반 원심펌프를 냉각재 이송 펌프로 사용할 때 고온, 고압에 의한 베어링의 마모, 임펠러의 손상, 기밀작용의 어려움 및 캐비테이션에 의한 결함 등의 문제점이 발생하게 된다. 따라서 구조가 간단하고 유체의 기밀성이 보장되며, 운전 및 보수가 용이한 전자펌프를 액체금속로에서 냉각재 이송용 펌프로 사용되고 있다. 그러나 전자기 유체펌프는 전기적 문제와 유체역학적인 문제를 동시에 포함하는 것으로 매우 복잡하고 난해하다. 본 논문에서는 전자기 유체펌프(이하 MHD 펌프)의 원리에 대하여 기술하고, 액체금속로에서 냉각재로 사용되는 400°C의 고온의 소듐을 이송하기 위한 펌프를 개발하기 위하여 실험실에서 사용할 수 있는 소형의 평면형 리니어 유도펌프(Flat Linear Induction Pump, 이하 FLIP)를 설계하였다.

2. MHD 펌프의 원리 및 개발동향

2.1 MHD 펌프의 원리

MHD는 이온가스나 액체금속의 움직임을 발생시키는

자계를 포함한다. 일반적으로 전류와 자속 사이에서는 상호작용에 의해 자기력이 발생되며 이 자기력에 의해 이온가스 또는 액체금속이 이동하게된다. 아래의 식은 2차 도체를 이온가스나 액체금속을 사용하는 MHD 전자펌프의 기본식이다.

$$F_{mag} = qv \times B \quad (1)$$

$$\frac{F_{mag}}{l} = I \times B \quad (2)$$

식1.은 2차축이 이온가스인 경우 자속과 전하의 이동속도에 의해 발생하는 힘이며, 식2.는 전류와 자속사이의 상호 작용에 의해서 생기는 힘이다. 그림1.은 MHD 펌프의 기본적인 원리를 나타내는 그림이다. 그림과 같이 자속과 전류의 방향이 결정된다면 이들의 상호작용으로 자기력이 발생되고 따라서 유체는 채널을 따라 흐른다.

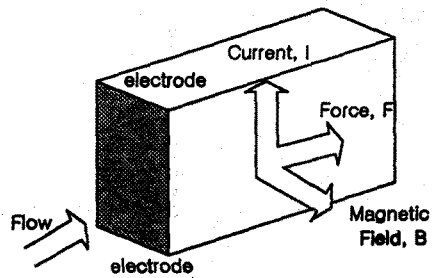


그림 1 MHD 펌프의 원리

그림1.의 전극은 평행판 콘덴서와 같은 작용을 하는 것으로 전류를 발생시킨다.

2.2 MHD 펌프의 개발동향 및 종류

MHD 펌프에 대한 연구는 Faraday에 의해 전자펌프라는 장치가 고안된 이후 1900년대 초에 전자유량계 및 액체금속을 이송하기 위한 전자펌프의 형태를 이용하기 시작하였다. 회전자계를 이용한 액체금속의 이송은 1915년 Chubb이 제안하였으며 1926년도에 Bainbridge가 교류 전도펌프를 제작 시험하였다. 전자펌프의 본격적인 개발은 1928년도에 Einstein과 Szilard가 수은과 소듐 및 포타슘과 같은 알칼리 금속을 이송하기 위하여 원통형 리니어 유도펌프를 개발한 이후 1942년도에 Feld와 Szilard에 의해 이 형태의 펌프 설계방정식이 정립되기에 이르렀다. 이후 액체금속을 냉각재로 이용하는 고속증식로의 냉각재 이송펌프로 사

용하기 위하여 유럽 등지에서는 여러 형태의 MHD 펌프가 개발되었다. 또한 최근에는 미국, 러시아, 일본 등의 국가에서 MHD 펌프의 일종인 직류 전도펌프를 이용하여 선박을 운항하기 위한 해수추력장치(Ses Water Propulsion)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. MHD 펌프는 전도 펌프와 유도펌프로 분류된다. 유도펌프는 일반적으로 높은 전도도를 가진 액체금속에 사용되며, 원통형 펌프, 헬리컬 펌프, 평면형 리니어 유도펌프, 원통형 리니어 유도펌프로 분류된다. 평면형 리니어 유도펌프는 대용량의 유체를 이송시키기 위하여 헬리컬 펌프를 개선한 것으로 가장 많이 사용되는 펌프이다.

3. 평면형 리니어 유도펌프의 설계

평면형 리니어 유도펌프는 대용량의 유체를 이송시키기 위하여 헬리컬 펌프를 개선한 것으로 다른 펌프에 비해 설치 및 운전, 보수가 용이하여 가장 많이 사용되는 펌프이다. 평면형 리니어 유도펌프는 리니어 유도전동기와 같이 편축식 및 양축식 리니어 유도펌프가 있다. 펌프의 성능을 향상시키기 위하여 농형 유도전동기의 엔드 바와 같은 역할을 하는 사이드 바를 덕트 양단에 설치하였다. 사이드 바는 도전성이 큰 도체로 채널 폭 방향으로 전류 변화율을 감소시킴으로써 펌프의 효율을 향상시킨다. 평면형 리니어 유도펌프의 설계는 액체금속의 종류, 유량 및 온도, 펌프 덕트의 재질, 두께 및 폭, 공극의 길이, 극수, 압력등 많은 설계변수가 있다. 이와같은 변수들은 다른 변수를 도출하기 위해 가정하거나 계산에 의해 결정된다. 실제의 설계에서는 전자기적 문제와 유체역학적 문제를 동시에 고려하여야 하나 본 설계에서는 유량 및 유체의 최대 속도, 액체금속의 종류 및 온도 그리고 덕트의 재질을 고려하여 평면형 리니어 유도펌프를 설계하였다.

3.1. 리니어 유도펌프의 설계

FLIP는 400℃의 소듐을 유량 3.154×10^{-4} , 속도 3.0 m/sec로 이송하는 경우에 대하여 설계하였다. 액체금속 및 덕트, 사이드 바는 온도에 따라 저항에 변화가 있으므로 이들 재질의 저항을 계산하였다. 덕트는 300계열의 스테인레스 스틸을 사용하였으며, 사이드 바는 동을 사용하였다. 코어의 포화를 고려하여 치에서의 자속밀도는 1.39Tesla를 넘지 않도록 하였으며 내각을 고려하여 1차 전류 밀도는 $8 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 을 넘지 않도록 하였다. 설계과정에 대한 흐름도는 그림2.에 나타나 있다. 그림3.은 설계한 평면형 리니어 유도펌프(FLIP)의 개념도이다. FLIP의 1차측은 양축식으로 하였으며, 극수는 5극, 극간격은 80.4mm이다. 두 1차측 사이에 유체를 이송시킬 수 있는 직사각형의 덕트를 설치하였으며 덕트의 두께는 6.34mm, 벽의 두께는 1.58mm, 유체 채널의 폭은 31.8mm, 깊이는 3.18mm이다. 2차측의 액체금속은 400℃의 소듐을 사용하였다. 표1.은 FLIP의 사양이다.

3.2. 등가회로

그림3.은 FLIP의 1상당 등가회로이다. 본 설계에서는 입력전원, E_B 는 3상 220V이며 2차측의 유도전압, E_A 는 120V로 설계하였다. 그림에서 R_1 은 1차 코일의 저항이며, X_1 은 Stator의 누설 리액턴스로 슬롯의 누설 리액턴스, X_{SL} 과 코일단의 누설 리액턴스, X_B 의 합성이며 X_m 은 자화 리액턴스이다. R_c , R_p , R_{SB} 는 덕트, 액체금속, 사이드 바의 등가저항이다. FLIP의 액체금속

및 사이드 바의 전도도, 1차측의 전류밀도는 표2.에 나타나 있다.

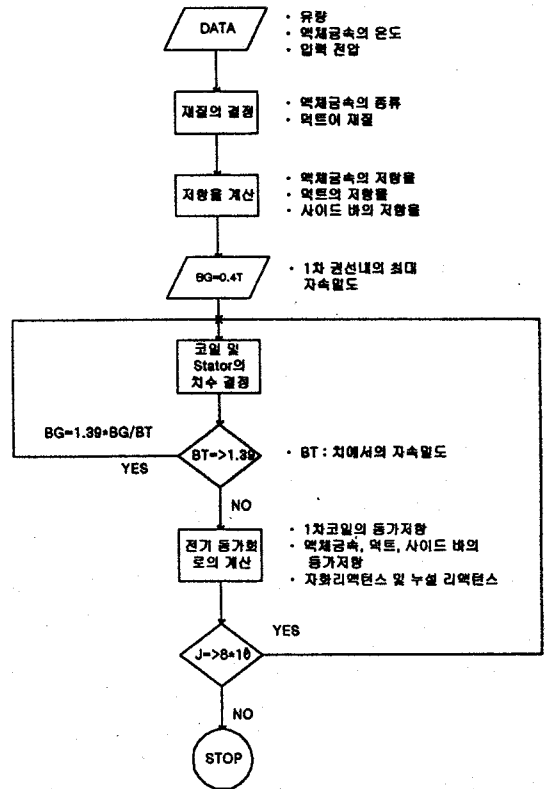


그림 2 FLIP의 설계흐름도

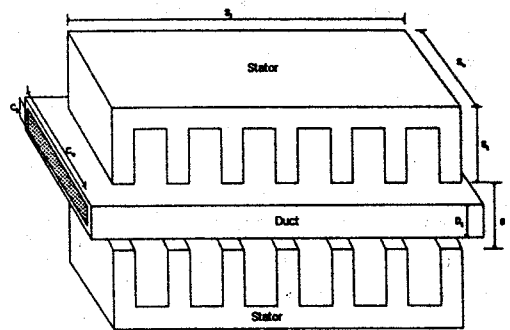


그림 3 설계한 FLIP의 개념도

4. 결 론

본 논문에서는 MHD 펌프의 원리에 대하여 고찰하였으며 FLIP를 원자력발전소의 액체금속로 냉각재 이송 펌프로 사용하기 위하여 실험실 크기의 펌프를 설계하였다. 유체가 일정 축류를 이룬다는 가정에서 펌프 채널 내에서 위치에 따른 전류밀도를 계산함으로써 설계된 펌프의 이론적 타당성을 입증하였다. 전류밀도는 그림5.에 나타났다. 그러나 MHD는 전자기적 현상뿐 아니라 유체역학적 현상을 고려하여야 하므로 해석은 더욱 복잡해진다. 따라서 유체 역학적인 현상을 고려하고 시각기의

제작 실험을 함으로써 원자력 발전소의 냉각제 이송펌프를 개발하고 응용분야를 개척해야 할것이다.

표 1. FLIP의 사양

Stator	Stator의 길이(S_l)	mm	412
	Stator의 폭(S_w)	mm	31.8
	Stator의 높이(S_h)	mm	94.13
	극수		5
	극간격	mm	80.4
	치의 폭	mm	10.5
	슬롯의 폭	mm	16.75
	두께(D_t)	mm	6.34
Duct	벽의 두께	mm	1.58
	채널의 깊이(C_d)	mm	3.18
	채널의 폭	mm	31.8
	공극의 길이(g)	mm	7.04

표 2. FLIP의 전기적 사양(400℃)

전압	V	220
주파수	Hz	60
액체금속의 온도	℃	400
액체금속의 전도도	Siemens	4.548E6
사이드 바의 전도도	Siemens	2.553E7
Stator 전류밀도(J_1)	A/m ²	2.395E6
Stator 코일의 저항(R_1)	Ω /Phase	1.635
Stator의 누설 리액턴스(X_1)	Ω /Phase	9.420
코일단의 누설 리액턴스(X_E)	Ω /Phase	2.538
슬롯의 누설 리액턴스(X_{sl})	Ω /Phase	6.882
자화 리액턴스(X_m)	Ω /Phase	16.85
덕트의 등가저항(R_c)	Ω /Phase	7789
액체금속의 등가저항(R_F)	Ω /Phase	0.0786
사이드바의 등가저항(R_{SB})	Ω /Phase	50.30

[참 고 문 헌]

- (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 Electro-Magnetic System", John Wiley & Sons, 1985
- (3) S.A.Nasar, I.Boldea, Linear Motion Electric machines", John Wiley & Sons, 1976
- (4) R.S.Baker, M.J.Tesser, "Handbook of Electro-magnetic Pump Technology", Elsevier, 1987

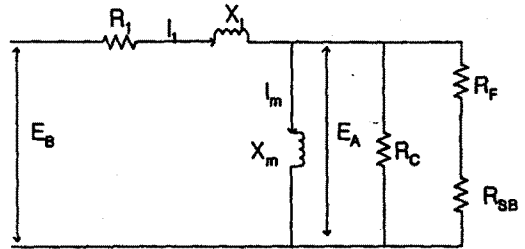


그림 4. FLIP의 전기동가회로

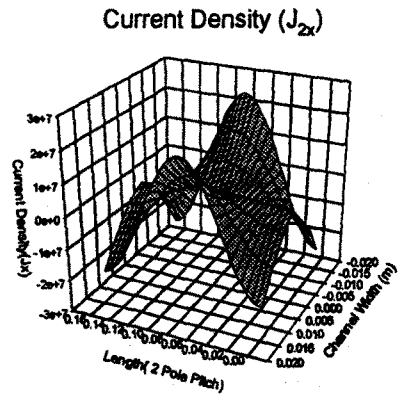


그림 5(a) x방향 전류 밀도

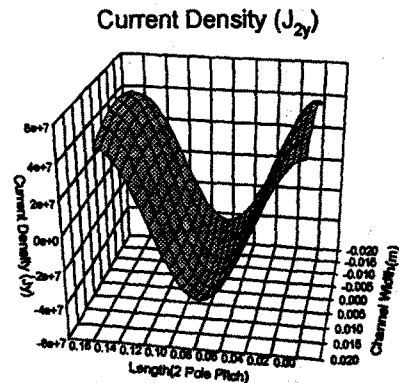


그림 5(b) y방향 전류 밀도
그림 5. FLIP의 채널내 전류밀도

- (5) R.A.Brukardt, A.S.Ghuman, "Magnetohydrodynamic Propulsion and Application in Naval Vessel", 1997
- (6) 장석명, 김형규, "MHD 기기의 전자기적 현상 고찰", 대한 전기학의 하계학회 논문집
- (7) K.Fujisaki, J.Nakagawa, H.Misumi, "Fundamental Characteristics of Molten Metal Flow Control by Linear Induction Motor", IEE Trans. on Magnetic, V30, No.6, 1994