자기장하의 액체금속 유동의 차압 측정

차재은†· 김희령*· 김종만*· 남호윤*· 김성오*· 김병호*

MHD Pressure Drop of a Liquid-Metal Flow under a Transverse Magnetic Field

Jae-Eun Cha†, Hee-Reyoung Kim*, Jong-Man Kim*, Ho-Yoon Nam*, Sung-O Kim*, Byung-Ho Kim*

Key Words : MHD(전자기유체역학), Liquid Metal Flow(액체금속 유동), Pressure Drop(압력손실)

Abstract

The magnetohydrodynamic(MHD) pressure drop along a liquid sodium flow was measured in a rectangular duct under a transverse magnetic field. The test section was made of a 3 mm thick stainless steel SUS304 with a 74×5 mm^2 rectangular flow channel. The range of experimental parameters was roughly B = 0~0.18T and U=0~0.9m/s at around 200°C. The differential pressure was measured by a diaphragm seal-type pressure transmitter filled with a high temperature silicon oil within 0.1MPa. The experimental results show a similar pressure drop with the theoretical estimation according to a change of the flow velocity and the magnetic field.

기호설명

a : 측벽의 두께[mm]
b : 상부벽의 두께[mm]
σ_w : 관벽의 전기전도도 [mho/m]
t_w : 관벽의 두께[mm]
σ_f : 액체금속의 전기전도도 [mho/m]
B : 자속밀도[T]
J : 전류밀도[A/m^2]
U : 액체금속의 유속[m/sec]

1. 서 론

액체금속은 전기전도도 및 열전도성이 좋아서 고속로(fast reactor)의 냉각재 및 핵융합로(fusion reactor)의 냉각재로 사용된다. 고속로 및 핵융합로의 연구에 있어서 액체금속의 압력측정은 열수력 현상 및 전자기 유체역학(magnetohydrodynamic) 현상을 이해하기 위한 매우 중요한 기술중의 하나이다. 특히 자기장하의 액체금속의 압력손실(pressure loss)을 측정하는 것은 핵융합로 관벽의 냉각을 연구하는 중요한 테마중의 하나이다[1]~[9].

Figure 1 과 같이 균일 자기장이 유동장에 횡방향으로 가해질 때, 전도성 벽을 가진 사각 단면에서의 MHD 차압구배(pressure gradient)는 식 (1) 또는 (2)로써 기술할 수 있다.

$$-dp/dz = K_p \sigma_f U B^2 \quad (1)$$

$$\Delta p = \int K_p \sigma_f U B^2 dz \quad (2)$$

여기서 p 는 압력, z 는 유동방향의 거리, σ_w와 σ_f는 각각 관벽 및 유체의 전기전도도, $\boldsymbol{U}$는 액체금속의 평균속도, $\boldsymbol{B}$ 는 자속밀도를 나타내며, K_p 와 C는 식 (3)과 (4) 나타낼 수 있다.

$$K_p = \frac{C}{(1+\frac{b}{3a}+C)} \quad (3)$$

$$C = 2\sigma_w t_w / \sigma_f b \quad (4)$$

본 연구에서는 종횡비(aspect ratio)가 큰 전도성 사각덕트(rectangular duct)에 액체소듐을 흐르게 하

† 정회원, 한국원자력연구원 고속로개발그룹
E-mail : jecha@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-2065 FAX : (042)861-7697
* 한국원자력연구원 고속로개발그룹

여, 덕트의 외부에서 횡방향(transverse direction)으로 직류 자기장을 균일하게 형성시킨 후, 전자기 유체역학(MHD) 현상에 의해 발생하는 압력손실값을 고온용 차압계로 측정하여 이론값과 비교하였다. 본 연구에서는 액체금속으로 SFR(sodium fast reactor)의 냉각재로 사용되는 액체소듐을 작동유체로 사용하였다. 액체소듐(liquid sodium)은 녹는점이 약 98°C 이며, 비중이 물보다 약간 적으면서 유체역학적 특성이 물과 거의 유사한 알카리 금속(Alkali metal)으로, MHD 현상을 연구하기에 좋은 금속 중의 하나이다.

2. 실험장치

Figure 2 는 실험장치의 개략도로서 소듐을 냉각재로 사용하는 고속로(fast reactor)의 전자펌프 성능 실험 및 관성보완장치 특성 실험, 자기장하의 액체소듐의 압력강하 실험을 위하여 제작한 장치이다. 자기장하의 액체금속의 차압측정 실험을 위한 측정부(test section)는 ⑩전자석(electromagnet)의 극(pole)사이에 설치하였다. 소듐을 이송하기 위하여 노바톰(Novatome)사의 model IA124 전자펌프(3상-380V, 200 lpm-3bar)를 설치하였으며, ②서지탱크(surge tank)의 하부에서 유출된 소듐은 ⑩전자석(magnet)과 ⑤전자유량계를 거쳐서 서지탱크(surge tank) 상부의 자유표면 부근으로 다시 유입된다. 실험장치의 유로관은 1.5 인치 또는 1 인치의 SUS304 파이프를 용접한 후, 배관의 예열을 위한 히터를 부착한 후, 고온용으로 사용되는 세라믹 단열재를 사용하여 단열하였다.

Figure 3 은 MHD 차압 실험에 사용된 전자석의 단면(길이 2000mm-높이 500mm)을 나타낸 것이다. 전자석의 극(pole) 사이에는 종횡비(aspect ratio)가 큰 측정부(80mm-11mm-두께 3mm)를 설치하였으며, 측정부를 중심으로 양측면에 각각 3 개의 전자석을 직렬로 연결하여 횡방향 자기장을 발생시키도록 구성하였다. 전자석은 직류 전원공급장치에 의하여 구동되며, 약 3000Gauss 까지 자기장을 발생시킬 수 있다. 측정부의 덕트 표면에는 온도를 제어하기 위한 히터와 열전대가 설치되어 있으며, 전자석은 외부 공기로써 냉각한다.

Figure 4 는 유동 방향을 따라서 측정부의 중심에서 전자석의 자기장 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 P1 과 P2 는 차압을 측정을 위한 센싱부가 설치된 지점을 나타낸다.

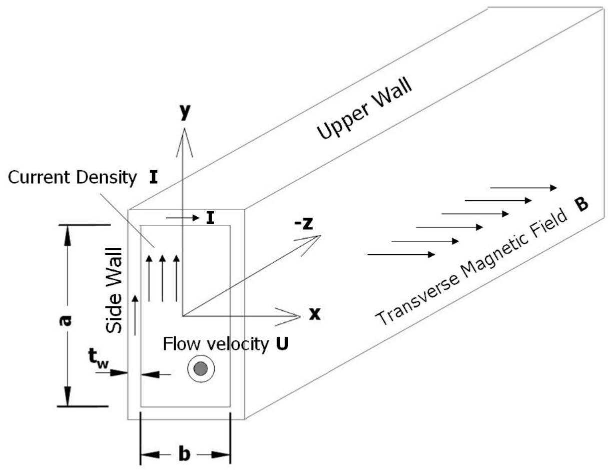

Figure 1. The MHD conceptual diagram under a transverse magnetic field

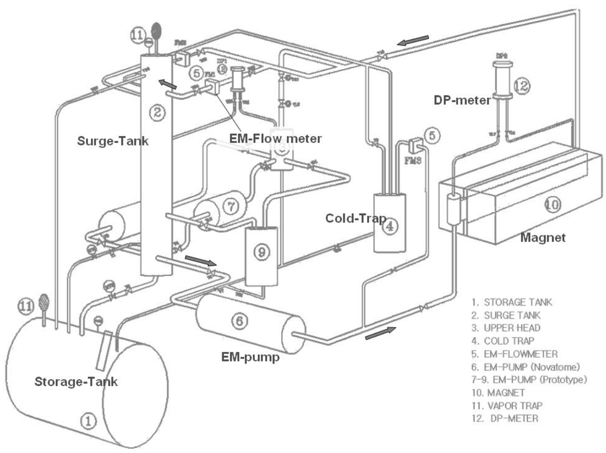

Figure 2. The schematics of the experimental facility

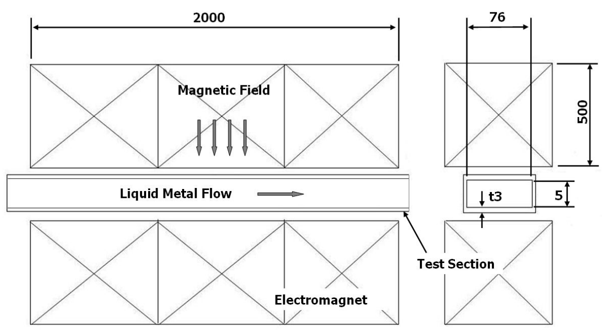

Figure 3. The sectional view of the electromagnet system

3. 실험결과

차압을 측정하기 위한 센서는 액체 소듐과 접촉해야 하므로 고온에서 견디어야 하며, 소듐에 의한 센싱부의 부식 및 고화 등을 고려해야 한다. 본 연구에서는 소듐의 차압을 측정하기 위하여 Asahi 사의 고온용 차압계인 MDC-Y24 모델을 사용하였는데, 스테인리스 SUS316 재질의 다이아프레임(diaphragm)이 액체 소듐과 접촉하며 압력은 2m 의 모세관(capillary)에 충전된 고온용 실리콘 오일(ET-700)을 통하여 반도체형(semiconductor type)의 트랜스미터(transmitter)로 전달된다. Figure 5 는 차압계를 기준 압력계를 이용하여, 아르곤 가스의 압력을 이용하여 교정한 결과를 나타낸 것이다. 또한 압력계는 교정 후 실험루프에 설치하여 대기압에서 영점(zero point)조정을 한 후, 배관의 가스압력으로 상호 비교하여 재교정하였다.

자기장하의 차압측정 실험은 배관의 온도를 약 200°C 로 유지한 상태에서, 저장탱크에 보관된 약 150°C 의 소듐을 실험루프에 충진한 후, 일정시간 동안 소듐을 순환시키면서 소듐의 온도를 200°C 까지 상승시켜 관내벽에 부착된 불순물을 제거하여 배관의 젖음성을 좋게한 후 수행하였다.

Figure 6 은 전자석의 자기장을 일정하게 한 후, 액체소듐의 유속을 변화시키면서 MHD 차압의 크기를 측정한 결과이다. 그림에서 실선은 이론적으로 추정한 압력손실값으로 실험결과와 유사한 값을 나타냄을 볼 수 있다. 실험에 의한 압력손실값은 이론값보다 크게 나타나는데, 이것은 관내부에 부착된 소듐산화물에 의한 주손실(major loss) 또는 유로관의 형상변화에 의한 부손실(minor loss)에 의한 것으로 판단된다.

Figure 7 은 식 (2)의 ΔP 추정치에 대하여 차압 측정값을 나타낸 것이다. 실선은 이론적으로 추정한 값으로 실험치와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

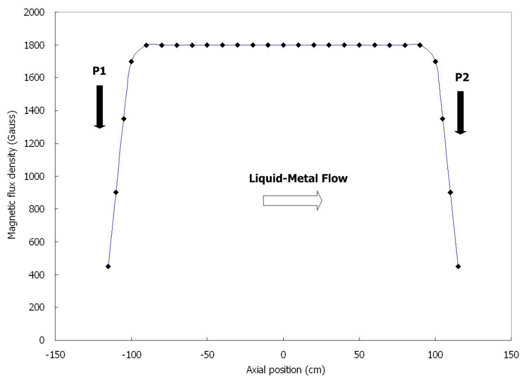

Figure 4. Distribution of the magnetic flux density(I=15A)

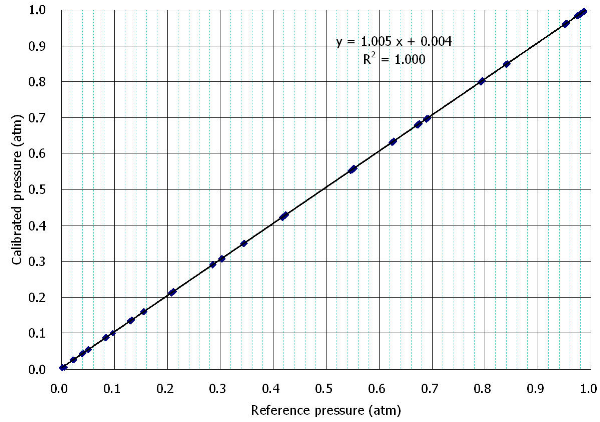

Figure 5. Calibration of the differential pressure transmitter

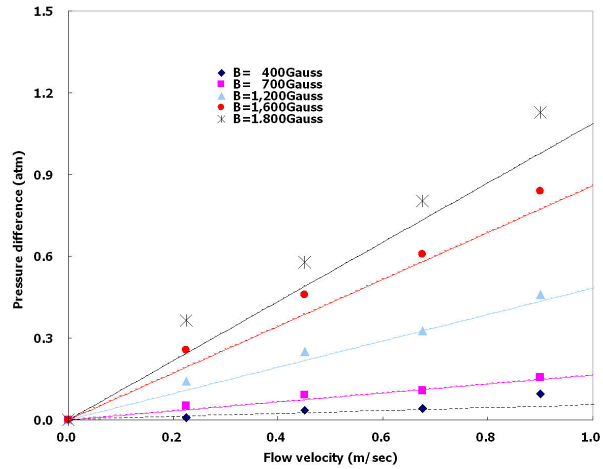

Figure 6. The MHD pressure drop with liquid velocity

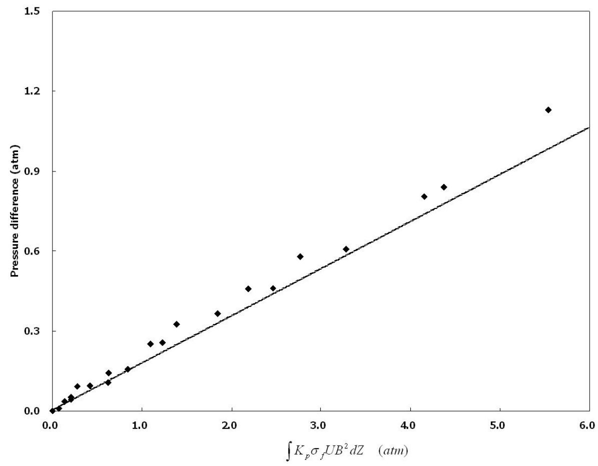

Figure 7. The pressure drop with $\int K_p \sigma_f U B^2 dz$

4. 결 론

액체소듐이 흐르는 종횡비가 큰 사각덕트에 유동장에 횡방향의 직류자기장을 균일하게 형성시킨 후, MHD 차압손실을 고온용 차압 트랜스미터로 측정하였다. 유속변화에 따른 압력손실값은 이론치에 비하여 실제 측정치가 약간 크게 나왔으나, 전체적으로 비슷한 값을 나타내었다.

참고문헌

(1) Keiji Miyzaki, et al, "Magneto-Hydro-Dynamic Pressure Drop of Lithium Flow in Rectangular Ducts", Fusion Technology, Vol. 10, pp. 830-836, 1986.

[2] Sergey Smolentsev et al., “Code development for analysis of MHD pressure drop reduction in a liquid metal blanket using insulation technique based on a fully developed flow model”, Fusion Engineering and Design, Vol. 73, pp. 83-93, 2005.

[3] Keiji Miyzaki, et al, "MHD Pressure Drop of Liquid Metal Flow in Circular and Rectangular Ducts under Transverse Magnetic Field", Liquid Metal Magnetohydrodynamics, pp. 29-36, 1989.

[4] Keiji Miyzaki, et al, "MHD Pressure Drop of NaK Flow in Stainless Steel Pipe", Nuclear Technology/Fusion, Vol. 4, pp. 447-452, 1983.

[5] Keiji Miyzaki, et al, “MHD Pressure Drop of Liquid Metal Flow in Circular Duct under Variable Transverse Magnetic Field”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 28(2), pp. 159-161, 1991.

[6] J. P. Qian, et al., “A liquid metal experimental loop for MHD pressure drop and compatibility studies”, Fusion Engineering and Design Vol. 17, pp. 221-226, 1991.

[7] Keiji Miyzaki, et al, "Reduction of MHD Pressure Drop of Liquid Metal Flow by Insulation", Fusion Technology, Vol. 19, pp. 969-975, 1991.

[8] D. K. Sze, et al., “MHD Considerations for a Self-Cooled Liquid Lithium Blanket”, Fusion Technology, Vol. 21, 1992.

[9] L. Barleon et al., “MHD flow in Liquid-metal-cooled blankets”, Fusion Engineering and Design, Vol. 14, pp. 410-412, 1991.