2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

납-비스무스 합금 이송을 위한 전자펌프의 성능 실험

Performance of Electromagnetic Pump for Lead-Bismuth Alloy

차재은, 조춘호, 김희령, 송태영
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

납-비스무스 합금은 가속기 구동 미임계 핵변환로의 냉각재 및 표적물질로 고려되고 있다. 납합금 부식은 핵변환로 노심의 냉각재 속도 및 온도를 제한하는 주요한 설계 요소중의 하나이다. KAERI는 납합금 부식연구를 위하여 부식루프의 기초 설계를 끝내고 전자펌프를 포함한 대부분의 주요 부품을 제작하였다. 선형유도형의 전자펌프는 전기적 등가회로해석 방법을 통하여 60lpm의 유량에서 4bar의 압력으로 납합금을 이송하도록 설계하였다. 전자펌프는 고온 부식 실험을 위하여 600°C이상의 온도에서 견딜 수 있도록 알루미나분산강화동의 코일재료와 마이카-실리콘의 합성 절연재료를 사용하여 제작하였다. 고체 모사물(simulator)의 이송능력을 동력계로써 측정하고 장시간에 걸친 펌프 각부의 온도 변화를 관찰하여 고온에서의 사용 가능성과 성능을 검사하였다. 본 연구에서 설계·제작한 전자펌프는 약 500°C이상의 온도에서 최대 2.5bar의 압력까지 낼 수 있는 가능성을 확인하였다.

Abstract

Lead-Bismuth Eutectic has been widely studied as core coolant and target material of ADS (accelerator driven transmutation system) in various countries. LBE corrosion has been considered as an important design factor to limit the temperature and velocity of ADS system. KAERI finished preliminary design of corrosion loop. Most components of loop were already manufactured to construct within 2004. The EM-pump was designed by an equivalent electric circuit method to move an LBE up to 2m/sec in the test-section of the corrosion loop(60lpm/4bar). We measured the pumping force with one-component dynamometer and also checked the temperature of the pump-coil and duct with current. From this test, we confirmed that the prototype EM-pump could operate around 500°C and pumped the LBE up to 2.5bar.

1. 서 론

납 또는 납-비스무스 합금(납합금)은 화학적 활성이 낮아서 공기 및 물, 증기와의 상호작용에 의한 폭발 및 화재 가능성이 없고, 핵적 특성이 좋아서 최근 미임계 핵변환로의 노심냉각재 및 표적물질 후보로서 활발히 연구되고 있다. KAERI는 전기를 생산하면서 원자력발전소에서 배출되는 Pu, MA 및 장수명 핵분열 생성물을 핵변환하기 위하여 가속기구동 미임계 핵변환로인 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)를 고속로 개념으로 설계하고 있다[1]. Fig.1은 HYPER(**HY**brid **P**ower **E**xtraction **R**eactor)로서 노심냉각재 및 표적물질로서 납-비스무스 공용합금(Pb44.5-Bi55.5, 녹는점 124.5°C)을 사용한다. 납합금을 사용하는데 있어서 가장 큰 문제점 중의 하나가 부식(corrosion)으로, 액체금속인 납합금에 철계통의 구조재가 노출될 경우 주요성분인 Ni, Cr 등의 합금 성분이 용해되면서 구조물의 표면 성분에 영향을 주기 때문이다[2]. 기존의 실험에서 575-750°C의 Pb-Bi 내에서 3,250hr 동안 ferritic steel 샘플을 노출시켰을 때 수십 μm의 깊이까지 부식이 일어남이 관찰되었다[3].

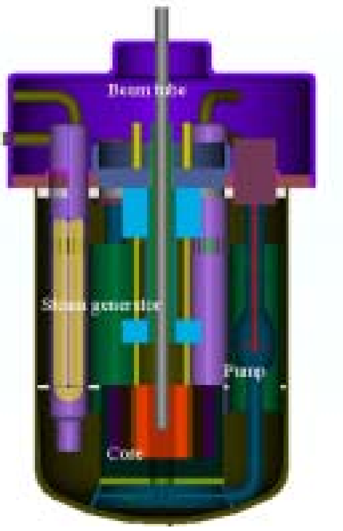


Fig. 1. Schematics of the HYPER system.

KAERI는 HYPER 냉각재의 입구온도를 340°C, 입출구온도차를 150°C정도로 고려하여 노심을 설계하고 있으며, 핵연료 피복관의 최대온도는 650°C까지 예측되어, 이러한 범위까지 핵연료 피복관 후보 재료(HT-9 등)와 구조물 재료에 대한 부식 거동을 파악해야 한다. 부식이 심한 경우에는 부식 방지 기술을 사용해야 하는데 대표적인 기술인 납합금내 산소농도 조절로 구조물질에 적절한 산화막을 만들어서 납합금에 의한 dissolution 부식을 방지하는 것이다. 아울러 표적빔창물질로 고려되는 9Cr-2WVTa 등에서는 방사선 손상과 부식이 공존하여 더욱 심한 영향을 줄 수 있으므로 방사선 손상 환경에서의 부식 특성 연구도 필요하다[4].

따라서 납합금에 의한 부식은 HYPER 노심설계에서 납합금의 속도 및 온도의 제한치를 결정하는 주요한 요소 중의 하나로서, KAERI에서는 HYPER의 개발에 따라, 핵연료 피복재, 구조물 및 빔창 재료에 대한 부식 실험을 수행하기 위하여, 독일 FZK의 정적실험장치(static facility)를 활용하여 316LN 및 HT-9 등의 재료로써 내식성과 산소농도조절 기술을 연구하면서,

자체적으로 설계·제작한 정적장치를 활용하여 여러 가지 산소분위기와 재료에서 부식 상태를 관찰하고있다. 또한 납합금 취급 및 측정 기술 향상, 동적 부식에 대한 내식성을 연구하기 위하여 지속적으로 운전 가능한 부식실험 루프를 예비 설계하고, 이를 토대로 전자펌프(electromagnetic pump)를 포함하여 부식루프의 주요 부품을 상세 설계하여 제작하였다.

납합금은 소듐과는 달리 비중과 점성이 크고 부식이 심각하기 때문에 이를 고려하여 이송기구를 선정해야 한다. 본 연구에서는 부식루프 설치공간과 배관의 진동 및 추후 연구의 적용성을 위하여 선형 유도형 전자펌프를 납합금 이송 기구로 선정하였다. 전자펌프는 전기적 등가회로해석 방법을 통하여 60lpm의 유량에서 4bar의 압력으로 납합금을 이송하도록 설계하였으며, 고온 부식 실험을 위하여 600^{o}C이상의 온도에서 견딜 수 있도록 알루미나분산강화동의 코일재료와 마이카-실리콘의 합성 절연재료를 사용하여 제작하였다.

전자펌프의 이송능력은 SUS 파이프를 이용한 고체 모사물(simulator)과 동력계로써 측정하고, 장시간에 걸친 펌프 각부의 온도 변화를 관찰하여 고온에서의 사용 가능성을 검사하였다. 본 연구에서 설계·제작한 전자펌프는 약 500^{o}C이상의 온도에서 최대 2.5bar의 압력까지 낼 수 있는 가능성을 확인하였다.

2. 동적 부식루프의 개념 설계

Fig.2는 부식루프의 개략도로서, 납합금의 측정부로의 이송은 전자펌프에 의하여 이루어지며 유량은 전자유량계(electromagnetic flowmeter)로써 측정한다. 액체금속의 순환은 전자펌프-전자유량계-산소조절기-측정부-마그네틱필터-전자펌프의 순으로 진행되며, 전자펌프의 입구측을 기준으로 산소조절기의 위치는 약 650mm 높이에 설치하고, 이 높이차를 이용하여 전체적인 루프에 기울기를 주도록 3차원적으로 배치하였다.

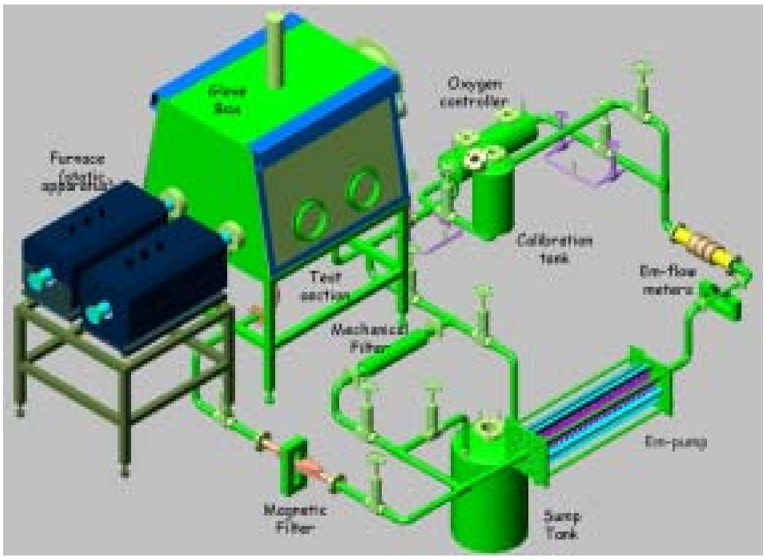


Fig. 2. Three-dimensional schematics of Pb-Bi corrosion loop.

납합금의 저장을 위한 저장탱크(sump tank)의 최하부는 전자펌프의 입구측을 기준으로 약 1m 아래에 설치하고, 루프로의 액체금속의 충진은 약 2기압의 보호 가스(cover-gas) 압력을 이용하며, 실험 초기의 불순물은 필터를 통과하는 저속의 흐름을 이용하여 제거한다. 저장탱크는 80liter 이상의 액체금속을 저장하도록 설계하였으며, 실험을 위한 순환 루프에 약 30liter 내외의 액체금속이 장전된 후 절반이상의 액체금속이 저장탱크에 남도록 하였다.

납합금은 소듐과는 달리 전기전도도가 낮고 부식이 심하기 때문에 유량 측정에 많은 어려움이 예상되어 소용량의 유량계 보정탱크(calibration tank)를 루프에 설치하여 기존의 전자유량계 보정 및 새로운 개념의 유량계 개발에 활용하도록 시스템을 구성하였다. 전자유량계는 수위센서(level-sensor)와 초시계(stop-watch)로써 액체금속의 부피를 측정하여 유량계의 신호를 보정한다. 측정부(test-section)의 환상유로(annular channel)에 시편(sample)을 장착하여 전자펌프의 입력으로 유속을 제어하고 부식실험을 수행하며, 측정시편은 측정부의 상단부를 글로브박스(glove box)의 내부에 설치하여 산소농도를 일정하게 제어한 상태에서 분해·장착하여 관찰한다. 산소농도(oxygen concentration)의 제어는 Ar cover gas와 Ar+H_2(5%)의 유량을 조절하여 water(H_2O)에 주입(bubbling)하여 수증기(water vapor)와의 분압비(H_2/H_2O ratio)로써 미세하게 조절한다. 납합금 실험에서 요구되는 산소의 분압은 10^{-20}bar 이하의 매우 작은 값이므로 보통의 방법으로는 도달하기가 매우 어렵다. 따라서 산소농도조절은 H_2와 H_2O 수증기를 적절한 비율로 혼합해서 납합금 내에 투입하거나 납합금 표면과 접촉시키도록 함으로서 수행한다. 산소농도 C_o를 10^{-7}wt% ~10^{-5}wt%로 조절하기 위해서는 먼저 식(1)로부터 필요한 산소압 P_{O2}을 계산하고 식(2)로부터 해당 산소압을 얻기위해 필요한 H_2와 H_2O의 압력비를 산출한다.

$$C_o = C_{o,S} \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,s}}\right)^2 \quad [\text{wt\%}] \tag{1}$$

$$P_{O_2} = \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}}\right)^2 \exp\left(\frac{2\Delta G^o_{H_2O}}{RT}\right) \quad [\text{atm}, \text{bar}] \tag{2}$$

위식에서 첨자 S는 해당온도 T[K]에서 포화상태를 나타내며, R은 이상기체상수, G는 표준상태의 Gibbs 자유에너지를 나타낸다. Table 1은 본 연구에서 설계제작하고 있는 부식루프의 주요 제원을 나타낸 것이다.

Table 1. Major specification of corrosion loop

Operation temperature	400°C ~ 550°C (max. 600°C)
Liquid-metal volume	Pb44.5%-Bi55.5%, 0.08m^3
Test-section	3/4 inch-Schedule 40, SUS 316 seamless pipe, V_{mean}=2m/s (at 45*lpm*)
Sample specification	ϕ8mm-T2mm-H5mm
Piping system	1.5inch-Schedule 40, SUS316 pipe
Flow measurement	EM flow meters
Liquid metal pumping	EM-pump (60lpm-4bar-40kVA)
Oxygen control	H_2/H_2O partial pressure (10^{-5} wt% ~ 10^{-7}wt%)
Purification	Magnetic filter, mechanical filter

3. 전자펌프의 설계 및 제작

납합금은 물 또는 소듐(sodium)과는 달리 비중이 10정도이므로 실험장치의 순환 루프는 압력손실이 최소화하면서 루프의 높이차 작도록 설계해야 하고, 이송 기구는 가능한 큰 헤드(head)를 낼 수 있는 사양을 선정해야 한다. 원심펌프 등의 기계적인 펌프는 축에서의 실링(sealing) 문제를 포함하여 임펠러(impeller)의 끝부분(tip)에서의 속도가 빠르므로, 고온·고속의 납합금 환경에서 장기간 운전할 경우 심한 부식으로 성능에 심각한 손상을 받을 우려가 예상(2m/s 이상에서 SUS계통 부식)되어 전자펌프를 이송 기구로 선택하였다.

Fig. 3은 납합금 이송을 위하여 설계한 전자펌프의 개략적 치수를 나타낸 것이다. 전자펌프의 외부코아(outer-core)의 반경방향의 이동자계 **B**와 환단면에 유도된 원주방향의 전류 **J**의 벡터적(**J** x **B**)에 의해 발생한 로렌쯔힘(Lorentz force)에 의하여 액체금속을 이송시키며, 그 원리는 선형유도 모터(linear induction motor)와 동일하여 별도의 장치가 없어도 기동 가능한 것이 주요 특징이다.

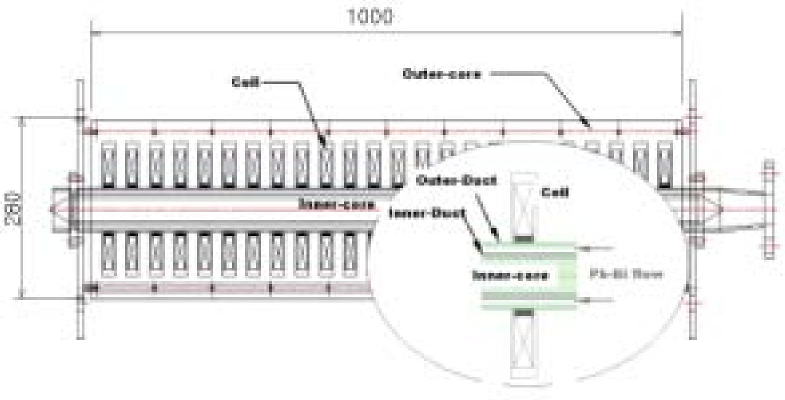


Fig. 3. Schematics of EM-Pump for Pb-Bi corrosion loop.

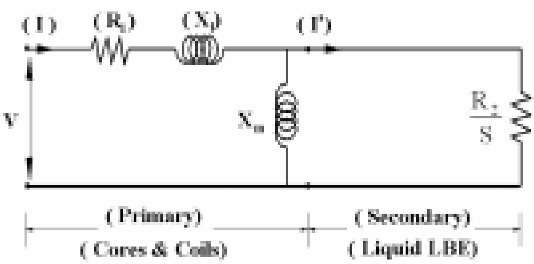


Fig. 4. Equivalent Circuit on One Phase of EM Pump Developed by Three-Phase Power.

(I: Input Current, V: Input Voltage, R_1: Primary Equivalent Resistance, X_1: Leakage Equivalent Reactance,

X_m: Magnetizing Reactance, I': Induced Current inside Fluid, R_2: Equivalent Resistance of Fluid, s: slip)

Fig. 4는 전자펌프를 설계하기 위한 전기적 등가회로를 나타낸 것으로 전자펌프의 내부코아(inner core), 외부코아(outer core) 및 코일(coil)로 구성된 1차부(primary part)와 덕트유로(duct channel) 내에서 이송되는 액체금속의 2차부(secondary part)로 구성되어 있다. 회로의 등가변수는 펌프의 기하학적 변수와 작동변수로 구성되어 있으며, 펌핑력(developing power) ΔP는 유량(flow rate) Q와의 관계로 부터 식 (3)으로 구한다.

$$\Delta P = \frac{3I^2}{Q}\frac{R_2(1-s)}{s(R_2{}^2/X_m{}^2 s^2+1)} \tag{3}$$

식(3)에서 등가 저항(equivalence resistance)과 리액턴스(reactance)는 Laithwaite의 표준 설계 방법에 의하여 아래의 식에서 구할 수 있다[5][6].

$$R_1 = \frac{\pi\rho_c q k_p{}^2 m^2 D_0 N^2}{k_f k_d p \tau^2} \tag{4}$$

$$X_1 \cong \frac{2\pi\mu_0\omega D_0\lambda_c N^2}{pq} \tag{5}$$

$$X_m = \frac{6\mu_0\omega\tau\pi D_0(k_w N)^2}{\pi^2 p g_e} \tag{6}$$

$$R_2 = \frac{6\pi D\rho_r{}'(k_w N)^2}{\tau p} \tag{7}$$

식 (3)-(7) 펌핑력(developing force) ΔP 와 효율(efficiency) ε는 펌프 변수로서 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta P = \frac{36\sigma s f\tau^2(\mu_0 k_w N I)^2}{p g_e{}^2\{\pi^2+(2\mu_0\sigma s f\tau^2)^2\}} \tag{8}$$

$$\varepsilon = \frac{6k_w{}^2(1-s)}{\frac{\rho_c q k_p{}^2 m^2 \sigma g_e}{k_f k_d \tau}\{1+(\frac{\pi}{2\mu_0 f s\sigma\tau^2})^2\}+\frac{6k_w{}^2}{s}} \tag{9}$$

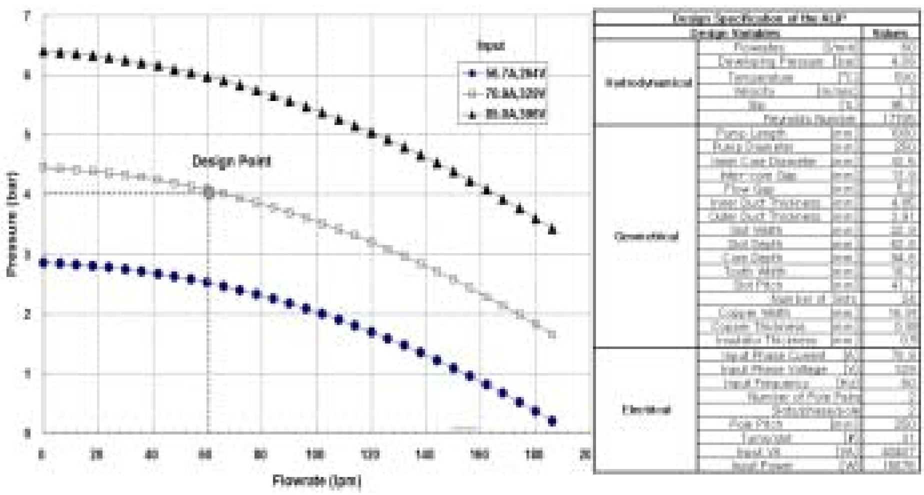


Fig. 5. Characteristics of Electromagnetic-Pump for Pb-Bi Corrosion Loop

전자펌프는 실험장치 운전의 중간온도인 500℃의 온도조건에서 Fig. 5(a)와 같이 60lpm-4bar의 작동점(operation point)을 갖도록 설계하였다. 납합금 이송을 위한 전기적 변수는 설치공간과 제작을 고려하여 펌프의 길이와 직경을 미리 입력시켜 시행착오 방법을 통하여 상용 재료를 이용할 수 있도록 계산하였다. 주요 설계 조건 및 결과는 Fig. 5(b)와 같이 길이 1000mm-직경 280mm(무게 약 180kg)에서 부식과 압력 손실을 고려하여 환단면의 유속이 최대 1.5m/s 이하가 되도록 설계하였다. 루프에서의 실제적인 운전점(operating point)은 3bar 부근에서 이루어지도록 장치의 순환 루프를 설계하여, 펌프 설계의 불확실성에 따른 여유를 가지도록 하였다.

Fig. 6은 제작한 전자펌프 시스템을 나타낸 것이다. 전자펌프의 코일 뭉치는 600℃이상의 고온에서 기계적·전기적 특성이 우수한 두께 1mm의 알루미나 분산강화동(GLIDCOP, AL-15)을 코일의 전기적 재료로, 운모 및 실리콘을 주성분으로 하여 제조된 두께 0.6mm의 SR864G(또는 SA864G, 성원전기)를 전기절연재로 구성하여 제작하였다. 또한 외부코아는 두께 0.35mm의 무방향성 규소강판을 적층하여 제작하였으며, 펌프의 구조재는 자성이 없는 SUS316으로 제작하였다. 코일과 외부덕트(outer duct) 사이의 열전달을 최소화하기 위하여 코일을 외부덕트와 격리시키고, 그 사이의 공간은 송풍기 및 압축공기로써 냉각하는 방식을 채택하였다.

전자펌프는 24개의 코일뭉치를 2극의 전기회로로 구성하여 Fig. 6(b)의 전원공급장치(SLIDAC, 50kVA, 3상-220V-60Hz)를 이용하여 제어한다. 전자펌프에 최대 90A-380V의 전원을 공급할 수 있도록 전원공급장치의 내부는 냉각시스템을 설치하였다. 전원공급장치는 전자펌프의 각 부의 온도를 감시하기 위한 온도표시기, 전자펌프의 입력을 조절하기 위한 up-down 스위치, 전력값을 표시하기 위한 전류 및 전압표시기, 전원을 순간적으로 차단하기 위한 비상스위치(emergency switch)가 설치되어 있다.

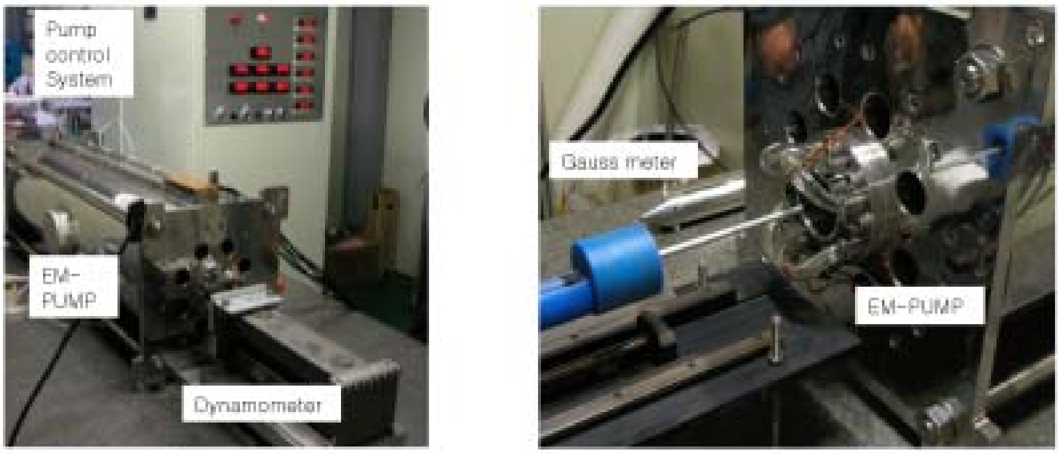
(a) EM-pump (b) Power system

Fig. 6. Electromagnetic-pump system for Pb-Bi Corrosion Loop

4. 전자펌프의 성능 측정

액체금속을 이송하는 능력을 측정하기 위해서는 액체금속의 유량 및 압력을 측정하기 위한 루프가 필요하므로 시작품(prototype)으로 만든 전자펌프의 성능을 확인하여 설계에 반영하

기에는 많은 비용과 시간이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 제작한 전자펌프의 성능은 스트레인 게이지(strain-gage)가 부착된 동력계(HBM strain amplifier, 1-component dynamometer)를 이용하여 측정하였다(Fig. 7(a)). 이송 능력의 측정은 내부덕트(inner duct)와 외부덕트(outer duct) 사이의 환상공간에 SUS 파이프를 액체금속의 모사물로 삽입하였다. 모사물의 끝부분의 중앙부가 동력계의 한쪽 측면을 밀도록 접촉시킨 후 펌프에 전원을 인가하여 스트레인 증폭기(strain amplifier)의 출력 단자에서 나온 DC 값을 읽어서 변위를 측정하였다. 동력계는 일정한 무게의 부하를 가하여 DC 출력을 측정하여 미리 교정하였다(Fig. 8). 또한 전자펌프의 환상공간 및 내부코아(inner core)를 제거한 상태에서 gauss meter를 이용하여 자기장을 측정하였으며, 횡 방향 센서(transverse probe)와 축 방향 센서(axial probe)로써 그 값을 측정하여 설계값이 제대로 반영되었는지를 확인하였다(Fig. 7(b)).



(a) Measurement of pumping force (b) Measurement of magnetic field

Fig. 7. Measurement of EM-pump characteristics

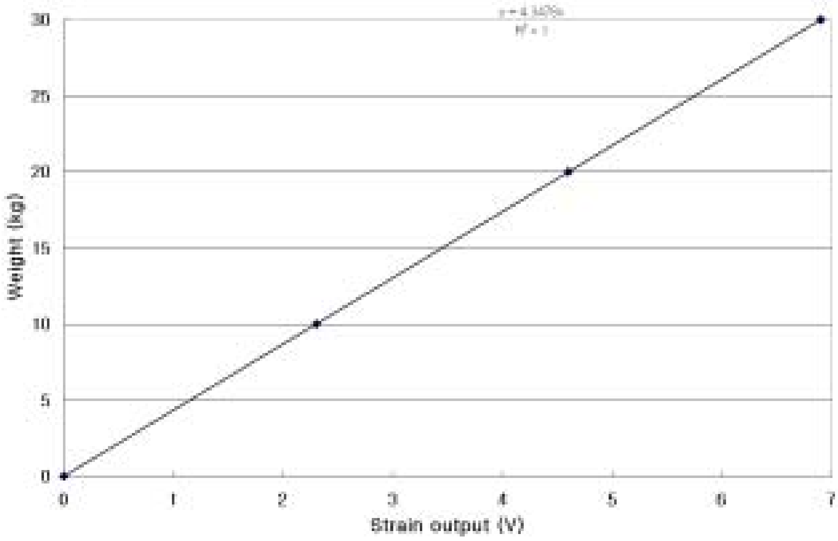


Fig. 8. Calibration data of dynamometer

또한 전자펌프에 전원을 인가하여 시간에 따른 온도변화를 관찰하였다. 온도는 내부덕트와 외부덕트 사이에 1/16” K-type sheath 열전대를 삽입하여 일정 전류치를 입력하여 그 변화를 측정하였다. 또한 전자펌프의 입출구 및 중앙부분에 외부덕트의 바깥쪽 표면에 부착한 열전대의 온도를 관찰하면서, 코일에 전원을 공급하는 연결선의 온도 변화도 함께 관찰하였다.

실험 data는 DAQ인 Agilent 34970A와 외장형 GPIB-USB를 이용하여 노트북에 자료를 전송하는 방식으로 측정하였으며, 자료는 6ch을 1sec로 sampling하여 받아들였다. 전자펌프와 동력계는 화강암 정반 위에 설치하여 주위의 진동이나 무게에 의한 변형을 방지하였다.

Fig. 9는 dynamometer로써 측정한 전자펌프 시작품의 이송 능력이다. 그림에서 iron insert 및 SUS insert는 내부코아를 만드는 과정에서 발생한 빈공간을 순철 또는 SUS로써 채워 넣어서 외부코아에서 발생한 자계를 내부코아로 끌어들이는 효과를 관찰하기 위한 것이다. SUS는 자성이 거의 없으므로 SUS에 의한 효과와 iron에 의한 효과를 명확히 볼 수 있다. 입력 전류가 80-90A일 경우 이송 능력은 약 2.5bar로 측정되었으며, 이것은 설계값(4bar/60lpm)에 비하여 작은 것으로 나타났다.

Fig. 10은 gauss meter로써 측정한 자기장으로, 내부코아에 iron insert와 SUS insert를 넣어서 전류에 따라 환상공간에서의 횡방향 자기장을 측정한 것과, 내부코아를 완전히 제거한 후 축방향 센서를 이용하여 자기장을 측정한 결과이다. 내부코아가 없는 상태의 자기장은 설계치와 비슷한 것으로 나타났으며, iron insert를 넣었을 때에는 설계치에 비하여 약 20% 작게 측정되어 내부코아의 성능과 내외부코아 간격을 개선해야 하는 것으로 판단되었다.

전자펌프의 온도는 최대 입력에서 펌프외부에 장착한 송풍 시스템을 가동하였을 때, 환상 유로의 중심부에서 약 500°C를 나타내었고, 외부덕트의 온도는 약 400°C로 측정되어 펌프의 코일 절연재는 그 역할을 하고 있는 것으로 판단되었다.

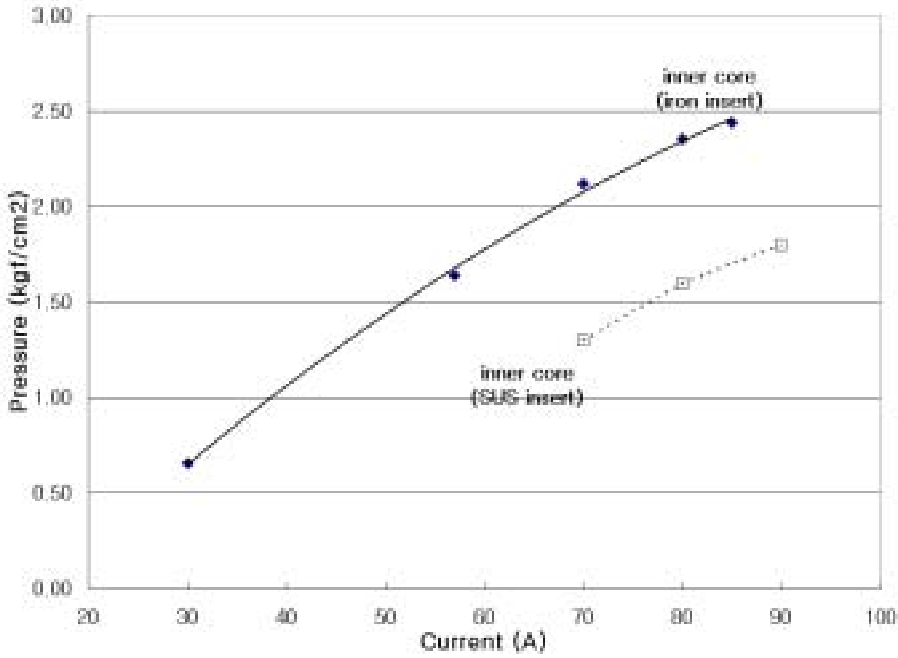


Fig. 9. Pumping power of EM-pump with current

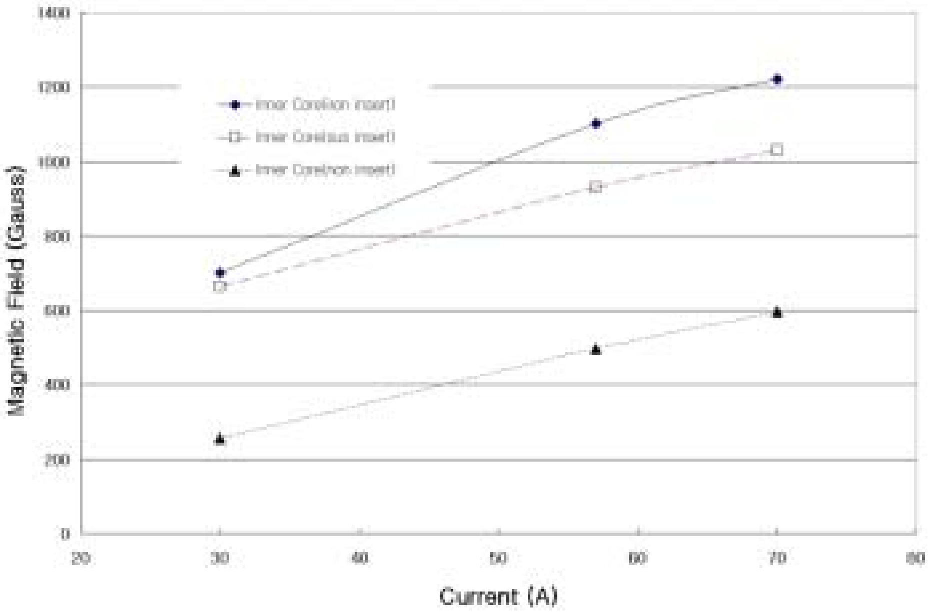


Fig. 10. Magnetic field with current

5. 결론

납합금은 이송을 위한 전자펌프 시작품을 전기등가회로 방법을 이용하여 설계하였으며, 동력계 및 gauss meter로써 그 성능을 측정하였다. 전자펌프의 이송능력은 SUS 파이프를 이용한 고체 모사물(simulator)과 동력계로써 측정하고, 장시간에 걸친 펌프 각부의 온도 변화를 관찰하여 고온에서의 사용 가능성을 검사하였다. 본 연구를 통하여 전자펌프는 500°C이상의 온도에서 그 역할을 수행할 수 있는 것으로 판단되었으며, 이송 능력은 설계치에 비하여 다소 낮게 측정되어 내부코아와 내외부코아간의 간격을 조절하여야 하는 것으로 판단되었다. 본 연구에서 설계·제작한 전자펌프는 약 500°C이상의 온도에서 최대 2.5bar의 압력까지 낼 수 있는 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기개발사업의 지원으로 수행되었습니다. 전자펌프의 제작을 위하여 수고하신 엑셀엔비즈의 한장민 대표와 전용우 박사님, 그리고 금룡테크의 김인식 사장님께 감사를 드립니다.

NOMENCLATURE

B	Magnetic field
D	Mean diameter of the fluid in EM pump

D_0	Diameter of inner core in EM pump
g_e	Effective inter-core gap
m	Number of phase of input power
N	Turns of coils
p	Number of pole pairs
P	Pressure
q	Number of slots / pole pairs / phase
T	Temperature (K)
$_f$	Electrical conductivity of fluid
$_w$	Electrical conductivity of tube wall
k_p	t_c / w (slot pitch / slot width)
k_f	Slot-filling factor
k_d	t / w (t : slot depth)
k_w	Winding factor
τ	Pole pitch
μ_0	Magnetic permeability
ω	Input angular frequncy(2 f, f: input frequency)
λ_c	$\frac{1}{12} k_d (1+3a)$ (a : chording factor)
ρ_c	Resistivity of coil conductor
ρ_r'	Surface resistivity of the fluid

참고문헌

1. W. S. Park et al., Development of Nuclear Transmutation Technology, KAERI/RR-1702/96, 1996
2. Y. I. Orlov et al., "The Problems of Technology of the Heavy Liquid Metal Coolants (Lead-Bismuth, Lead)", Proceedings of the Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology, Obninsk, 1998
3. G. Mueller et al., "Investigation on Oxygen Controlled Liquid Lead Corrosion of Surface Treated Steels", J. of Nuclear Materials, 2000, 278, 85-95
4. 송태영, 정지영, 박원석, "316LN 의 Pb-Bi 부식 특성", 추계 원자력학회, 2002, 10 월, 용평
5. L. R. Blake, " Conduction and Induction Pumps for Liquid Metals", *British Nuclear Energy Conference*, Paper No. 2111 U, July, 1956.
6. S. A. Nasar, Linear Motion Electric Machines, *John Wiley & Sons*, New York, 1976.