2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Pb-Bi 합금의 동적부식 실험장치 기초 설계

Preliminary Design of Dynamic Corrosion-Facility for Lead-Bismuth Eutectic

차재은, 김희령, 조춘호, 송태영

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

Pb-Bi는 KAERI에서 개발중인 가속기구동 미임계 핵변환로인 HYPER(**HY**brid **P**ower **E**xtraction **R**eactor)의 노심냉각재 및 표적물질이다. Pb-Bi의 부식은 HYPER 시스템의 노심설계에서 Pb-Bi의 속도 및 온도의 제한치를 결정하는 주요한 요소중의 하나이다. KAERI는 FZK의 정적 실험장치를 활용하여 재료의 내식성과 산소농도조절 기술을 연구하여 왔다. KAERI는 Pb-Bi의 부식 연구를 위한 Pb-Bi 동적부식루프 및 정적실험장치의 기초 설계를 끝내고 10,000hr 이상의 지속적 운전을 목표로 제작에 착수하였다. 본 연구의 Pb-Bi 동적 실험장치는 주요 실험 온도인 400~550°C에서 측정부의 평균 유속 2.0m/s를 기준으로 루프의 압력 손실과 열손실을 고려하여 설계하였다. 전자펌프는 60lpm-4m(PbBi)의 설계조건에서 등가회로해석 방법으로 설계하여 최대 40kVA의 전기적 입력이 요구되었다. 직류 및 교류 전자석을 이용한 전자유량계와 보정기구를 루프에 설치하여 유량을 측정한다. 각종 히터 및 전자펌프 등의 입력을 고려할 때 전원은 최대 120kVA로 요구되며 정상상태에서는 50kW이내의 수준으로 운전 가능한 것으로 해석되었다. Pb-Bi 부식 실험에서 필수적으로 요구되는 산소농도의 조절은 H_2/H_2O 분압을 이용하여 화학적인 방법으로 10^{-7}wt% ~ 10^{-5}wt%의 범위에서 조절한다. 고온의 Pb-Bi에서의 산소농도는 전기화학적 방법의 산소센서와 고저항 전압계로써 측정하도록 고려하였다.

Abstract

Lead-Bismuth eutectic (LBE) has been emulously studied as core coolant and target material of ADS (accelerator driven transmutation system) in various countries. Since 1997, KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) has also conducted systematic studies to develop ADS system, called HYPER (**HY**brid **P**ower **E**xtraction **R**eactor). LBE corrosion has been considered as an important design factor to limit the temperature and velocity of ADS system. Thus far, KAERI has conducted a series of static test with FZK's stagnant facility to investigate material effect and to increase measuring techniques for the control of oxygen concentration until its own corrosion test facilities. KAERI recently finished preliminary design of dynamic and static LBE corrosion loops and entered into setup-process to construct within summer of 2004. We also have a long-term plan to build a proton irradiation test loop. The flow velocity in test section was designed around 2m/s in the range of 400~550°C(max. 650 °C) and 10^{-7}wt% ~ 10^{-5}wt% oxygen concentration. In this paper, we will introduce a general design concept for the dynamic corrosion loop, which include electromagnetic pump, electromagnetic flowmeter, and oxygen controller. Capital specification of ours loop is summarized in Table 1 within this paper.

1. 서 론

Fig.1의 개략도에서 볼 수 있는 HYPER(**HY**brid **P**ower **E**xtraction **R**eactor)는 KAERI에서 개발중인 가속기구동 미임계 핵변환로[1]로서, 원자력발전소에서 배출되는 Pu, MA 및 장수명 핵분열 생성물을 핵변환시키면서 전기를 생산하는 개념으로 설계되고 있다. HYPER는 고속로 개념으로 Pb-Bi를 노심냉각재 및 표적물질로 사용하는데 이때 Pb-Bi는 분리되지 않고 운전된다. Pb-Bi를 사용하는데 있어서 가장 큰 문제점 중의 하나가 부식(corrosion)으로, Pb-Bi환경에 철계통이 노출되었을 때 Fig.2와 같이 Ni, Cr등의 합금 성분이 용해[2]되어 나오면서 구조물의 표면 성분에 영향을 주기 때문이다. 기존의 실험결과에 의하면 575-750°C의 Pb-Bi 내에서 3,250hr 동안 ferritic steel 샘플을 노출시켰을 때 약 100 μm 정도의 깊이로 부식이 일어남[3]을 알 수 있다.

HYPER의 Pb-Bi 입구온도는 340°C이고 입출구온도차는 150°C정도로 설계되고 있는데 핵연료 피복관에서의 최대온도는 650°C정도까지 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 Pb-Bi내 산소농도 조절로 구조물질에 적절한 산화막을 만들어서 Pb-Bi에 의한 dissolution 부식을 방지하는 것이다. 아울러 표적빔창물질로 고려되는 9Cr-2WVTa 등에서는 방사선 손상과 부식이 공존하여 더욱 심한 영향을 줄 수 있으므로 방사선 손상 환경하에서의 부식 특성 연구도 필요하다.

따라서 KAERI에서는 HYPER의 개발에 따라, 핵연료 피복재, 구조물 및 빔창 재료에 대한 부식 실험을 수행하여왔다. KAERI는 FZK의 정적실험장치(static facility)를 활용하여 재료의 내식성과 산소농도조절 기술을 연구하여 왔으며, 2002년 말까지 무산소 분위기, 10^{-6}wt%, 그리고 10^{-5}wt%의 산소농도에서 316LN 및 HT-9 등의 재료로써 500hr이상의 정적실험을 수행하였다. 이와 더불어 다양한 재료 후보군에 대한 평가와 KAERI내의 Pb-Bi 취급 및 측정 기술 향상, 그리고 유동이 있는 상태에서의 물질 전달의 영향을 연구하기 위하여, KAERI는 Pb-Bi 동적부식루프 및 정적실험장치의 기초 설계를 끝내고 10,000hr 이상의 지속적 운전을 목표로 제작에 착수하였다. 본 연구의 Pb-Bi 동적 실험장치는 주요 실험 온도인 400~550°C(최대 650 °C)와 10^{-7}wt%~10^{-5}wt%의 범위에서 측정부의 평균 유속 2.0m/s를 기준으로 루프의 압력 손실과 열손실을 고려하여 설계하였다.

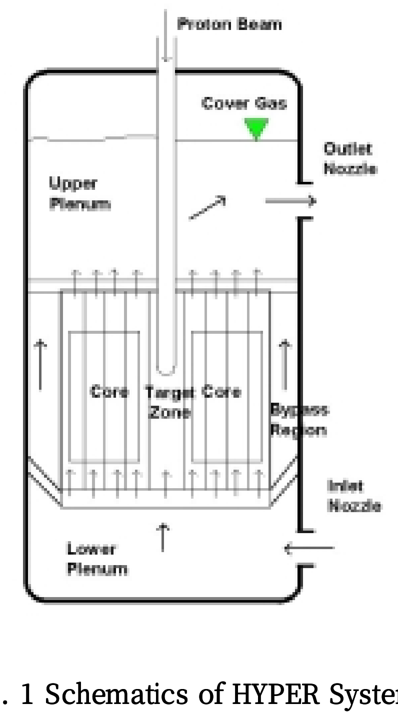


Fig. 1 Schematics of HYPER System

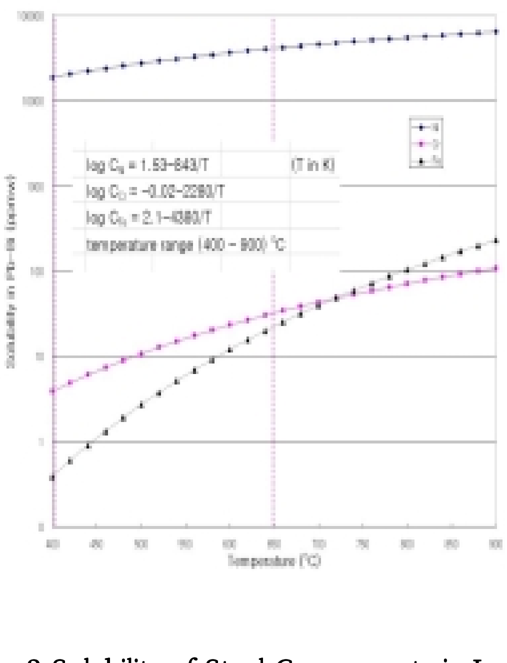


Fig. 2 Solubility of Steel Components in Lead

2. 동적부식루프의 개념 설계

Fig.3는 동적부식루프의 개략도로서, KAERI가 단계별로 제작할 동적부식루프[4]의 1단계 장치를 나타낸 것이다. Pb-Bi의 측정부로의 펌핑은 전자펌프(electromagnetic pump)에 의하여 이루어지며 유량은 전자유량계(electromagnetic flowmeter)로써 측정한다.

액체금속의 순환은 (1)전자펌프-(2)전자유량계-(4)산소조절기-(5)측정부-(7)마그네틱필터-(1)전자펌프의 순으로 진행되며, 전자펌프의 입구측을 기준으로 산소조절기의 위치는 약 700mm 높이에 설치하고, 이 높이차를 이용하여 전체적인 루프에 구배(slope)를 주도록 구성하였다.

액체금속 (9)저장탱크(sump tank)의 최하부는 전자펌프의 입구측을 기준으로 약 1000mm 아래에 설치하고, 루프로의 액체금속의 충진은 약 2기압의 cover-gas 압력을 이용하며, 실험 초기의 불순물은 (8)필터를 통과하는 흐름을 이용하여 제거한다. 저장탱크는 80liter의 액체금속을 저장할 수 있도록 설계하였으며, 실험을 위한 순환 루프에는 약 30 liter 내외의 액체금속이 장전되도록 구성하여 절반의 액체금속이 저장탱크에 남도록 하였다.

영구자석으로 만든 (2)전자유량계를 포함한 각종 유량 측정시 보정을 위하여 (10)보정탱크를 설치하고 (22)수위센서와 stop-watch로써 액체금속의 부피를 측정하여 유량계의 신호를 보정한다. 이때 (18)자동밸브 AV1와 AV2을 이용하여 액체금속의 흐름을 전환시킨다. 보정탱크(calibration tank)는 산소조절기(oxygen controller)와 내용적이 비슷하도록 고려하여 유량계 보정시 보정탱크와 산소조절기 사이의 액체금속의 이동에 의한 overflow나 부족함이 발생하지 않도록 설계하였다.

(5)측정부의 환상유로(annular channel)에 시편(sample)을 장착하여 전자펌프의 입력으로 유속을 제어하고 배관예열히터의 입력으로 온도를 피이드백(feedback) 제어하여 부식실험을 수행하며, 측정시편은 측정부의 상단부를 (6)글로브박스(glove box)의 내부에 설치하여 산소농도를 일정하게 제어한 상태에서 분해 장착하여 관찰한다.

산소농도(oxygen concentration)의 제어는 (13)Ar cover gas와 (14)Ar+H2(5%)의 유량을 조절하여 (26)water(H_2O)에 주입(bubbling)하여 수증기(water vapor)와의 분압비(H_2/H_2O ratio)를 이용하여 미세하게 조절한다.

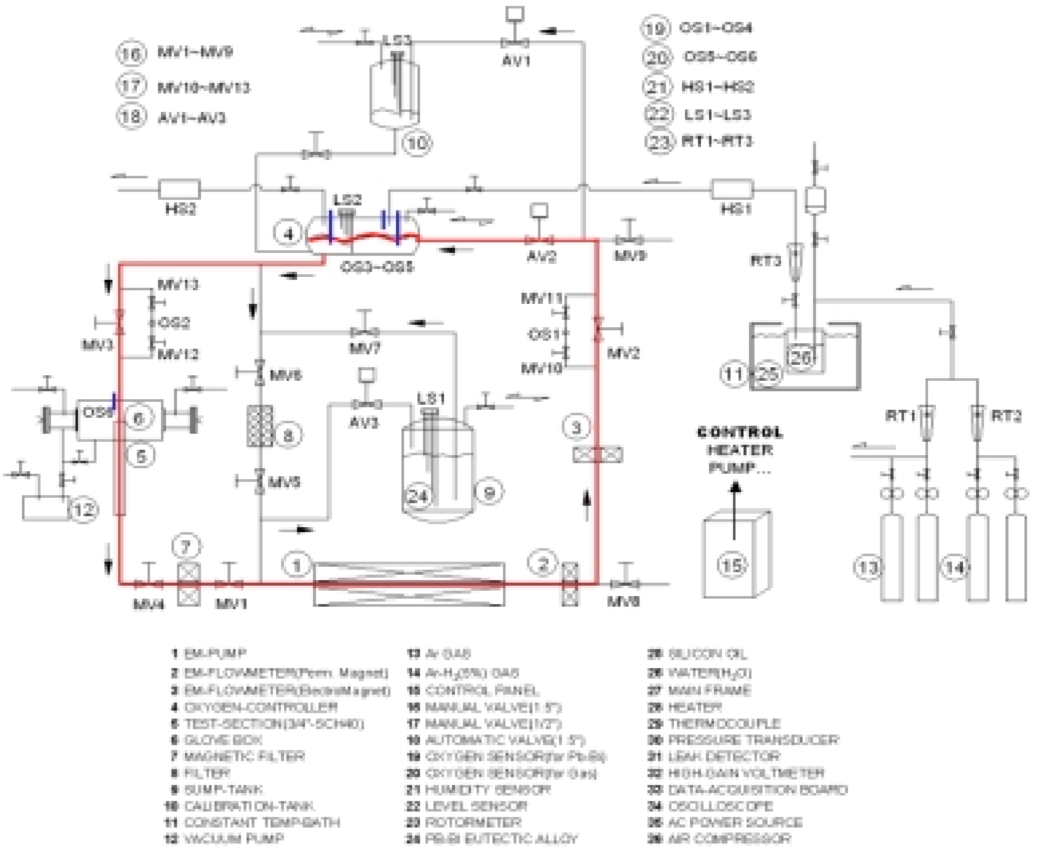


Fig. 3 Schematics of Dynamic Corrosion Loop

액체금속의 주요 순환 루프는 압력손실로 인한 펌프의 부하 문제와 연계하여 1.5inch로 구성하였으며, 그 길이는 약 10m(최대 12m)로써 1.5inch-schedule40-SUS316 pipe로써 구성하였다. 이때의 압력손실은 마찰에 의한 주 손실(major loss)과 밸브 및 관 형상변화에 의한 부 손실(minor loss)을 고려하여 최대 60lpm의 유량이 흐른다고 가정하여 1.5"(12m), 1.0"(1m), 3/4"(1m) 및 측정부(3/4" 환상유로-0.7m)의 직관과 15개의 엘보우(elbow), 7개의 게이트 밸브, 10개의 티(Tee-inline, Tee-branch), 6개의 출입구(entrance-exit), 2개의 필터를 고려하고, 관 거칠기는 부식 및 불순물에 의해 cast-iron 수준으로 보수적으로 계산하였으며, 최대 3m(약 3bar)의 압력 손실이 예측되었다.

배관예열히터는 주위 온도를 20°C로 가정하고 SUS(Cp=0.591kJ/kg-°C)의 온도를 10분간 100°C 올리는데 약 420W의 입력이 필요하므로 650°C에서의 주위로의 열손실이 3" 두께의 glasswool(Cp=0.038kJ/kg-°C) 단열의 경우 약 100W임을 고려하고, 히터와 배관의 열접촉을 고려하여 최대 1000W/m 출력의 4-6mm 직경의 wire-heater를 사용하면 가능할 것으로 판단되며, 장치의 열손실은 각 tank(3 x 100W) 및 배관의 전체길이를 20m로 고려하더라도 최대 3kW이하로 예측되었다.

장치의 열팽창을 고려한 expansion tank의 역할은 (4)산소조절기를 이용하면 가능하며, 각 tank의 온도는 별도의 히터를 부착하여 탱크외벽에 부착한 sheath형 k-type 열전대와 온도조절기(temperature controller)를 이용하여 제어하며, 배관의 온도는 전체 배관을 몇 개로 분할하여 개별적으로 온도를 제어하는 방식으로 구성하였다.

장치내의 급작스런 온도 상승에 의한 압력 상승을 방지하기 위하여 탱크에 안전밸브(safety valve)를 부착하며, cover gas의 배출은 filter를 거친 후 실험실 밖의 외기로 반드시 배출하여 Pb-Bi 증기에 의한 장기적인 인체의 손상을 방지하도록 gas-line을 구성하였다.

(15)제어반(control panel)은 각종 배관의 온도조절, 전자펌프의 입력 및 온도제어, 시스템의 수위 및 압력 감시, 그리고 액체금속의 누설 감시 등의 역할을 하며, 이를 위해 온도조절기(temperature controller) 및 신호표시기(displayer) 등을 부착하며, 급작스런 정전시 루프내의 액체금속 회수를 위한 자동밸브 작동 및 신호관찰을 위하여 약 3kW수준의 1시간 작동 가능한 무정전 장치(UPS)를 제어반에 부착하였다. 또한 (15)제어반으로의 전원 공급은 전자펌프용 전원과 히터 및 기타 부분을 위한 전원 라인을, 서로간의 문제가 다른 곳으로 전파되지 않도록 하기 위하여, 메인 전원으로부터 개별적으로 분리하여 연결한다.

루프의 설치를 위한 메인 프레임(main-frame)은 Pb-Bi의 비중이 물의 10배임을 고려하여 H-Beam(150×150mm)을 이용하여 제작하며, 정적장치와 글로브박스의 공간을 고려하여 약 4.5m(L)-2.5m(W)-3.5m(H)의 크기로 제작하며, 장치의 주요배관은 약 1m높이의 위치에서 형성되도록 구성하였다.

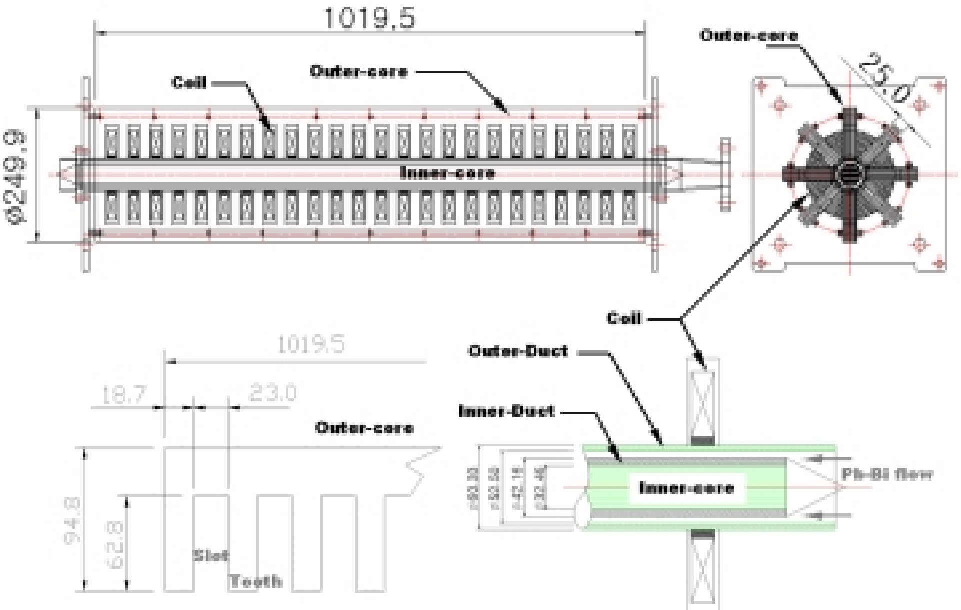


Fig. 4 Electromagnetic Pump for Pb-Bi Corrosion Loop

또한 루프의 모든 배관은 장치의 가동을 멈출 경우 중력에 의하여 자연스럽게 (9)저장탱크로 흘러가도록 약 3/100정도의 구배를 주며, 각 배관의 끝부분은 온도에 의한 열팽창을 고려하여 자유단(free end)이 되도록 구성하며, 각종 부품 및 배관은 메인 프레임의 구조물에 매달리는 구조를 갖도록 구성하였다.

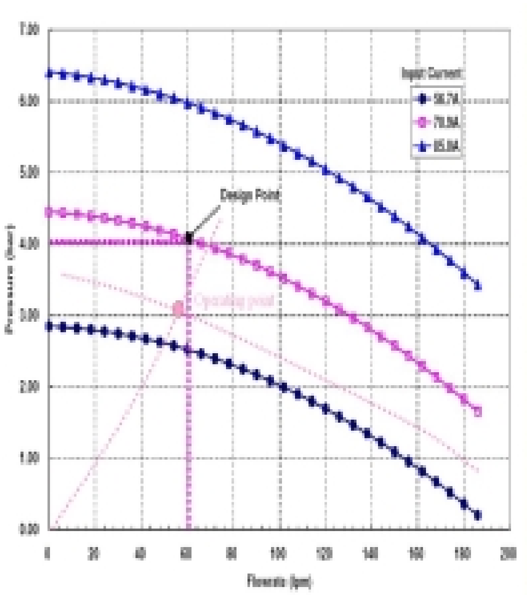
열전대, 압력계 및 각종 센서의 신호를 측정하기 위한 (33)자료수집보드(data acquisition board)는 온도보상(CJC)기능과 약 50채널이상으로 확장성을 가진 300만원대의 저가형인 Agilent사의 34970A수준이면 가능할 것으로 판단되었으며, 추후 연구의 확장성과 장기 실험에 따른 안전성을 고려하여 NI사의 Labview와 연계하여 SCXI system과 자료수집보드를 아울러 고려하였다.

3. 전자펌프 및 전자유량계 설계

Pb-Bi는 물 또는 소듐(sodium)과는 달리 비중이 10정도이므로 실험장치의 순환 루프는 압력손실이 최소화하면서 루프의 높이차 작도록 설계해야 하고, 펌핑 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 Pb-Bi 환경에서 장기간 운전할 경우 심한 부식으로 성능에 심각한 손상을 받을 우려가 예상(2m/s 이상에서 SUS계통 부식)되어 전자펌프를 펌핑 기구로 선택하였다.

Fig.4은 본 연구에서 설계한 전자펌프의 개략적 치수를 나타낸 것이다. 전자펌프의 외부코아(outer-core)의 반경방향으로 형성된 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 선형유도모터(linear induction motor)와 동일하여 별도의 장치가 없어도 기동 가능한 것이 주요 특징이다. 전자펌프는 실험장치 운전의 중간온도인 500℃의 온도조건에서 전기적 등가회로 방법을 이용하여 Fig.5(a)와 같이 60lpm-4bar의 설계점(design point)을 갖도록 설계하였다. 주요 설계 조건 및 결과는 Fig.5(b)와 같이 길이 1000mm-직경 250mm에서 부식과 압력 손실을 고려하여 환단면의 유속이 최대 1.3m/s 이하가 되도록 설계하였다. 루프에서의 실제적인 운전점(operating point)은 3bar 부근에서 이루어지도록 장치의 순환 루프를 설계하여, 펌프 설계의 불확실성에 따른 여유를 가지도록 고려하였다.

전자펌프는 600℃이상의 고온에서 기계적 전기적 특성이 우수한 두께 1mm의 알루미나 분산강화동(GLIDCOP, AL-25)과 두께 0.5mm의 석면테입으로 전기적 절연을 이루어 코일뭉치를 제작한다. 또한 외부코아의 제작은 두께 0.25-0.35mm의 방향성 규소 강판을 적층하여 제작하며, 펌프의 구조재는 자성이 없는 SUS316을 사용하여 제작한다.

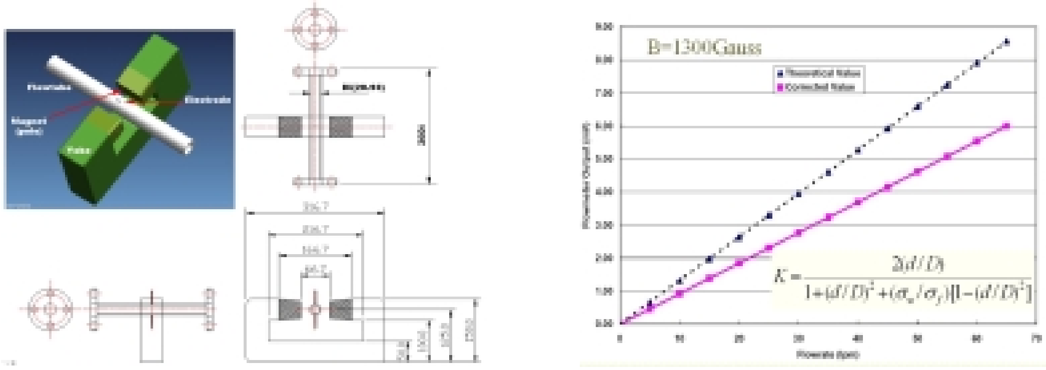


(a)

Design Specification of the ALIP		
Design Variables		Values
Hydrodynamical	Flowrates [l/min]	60
	Developing Pressure [bar]	4.08
	Temperature [°C]	500
	Velocity [m/sec]	1.3
	Slip [%]	95.7
	Reynolds Number	17705
Geometrical	Pump Length [mm]	1000
	Pump Diameter [mm]	250
	Inner Core Diameter [mm]	32.5
	Inter-core Gap [mm]	13.9
	Flow Gap [mm]	5.2
	Inner Duct Thickness [mm]	4.85
	Outer Duct Thickness [mm]	3.91
	Slot Width [mm]	22.9
	Slot Depth [mm]	62.8
	Core Depth [mm]	94.8
	Tooth Width [mm]	18.7
	Slot Pitch [mm]	41.7
	Number of Slots	24
	Copper Width [mm]	16.91
	Copper Thickness [mm]	0.88
	Insulator Thickness [mm]	0.5
Electrical	Input Phase Current [A]	70.9
	Input Phase Voltage [V]	329
	Input Frequency [Hz]	60
	Number of Pole Pairs	2
	Slots/phase/pole	2
	Pole Pitch [mm]	250
	Turns/slot [#]	31
	Input VA [VA]	40407
	Input Power [W]	16876

(b)

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



(a) (b)

Fig. 6 Electromagnetic Flowmeter for Pb-Bi Corrosion Loop

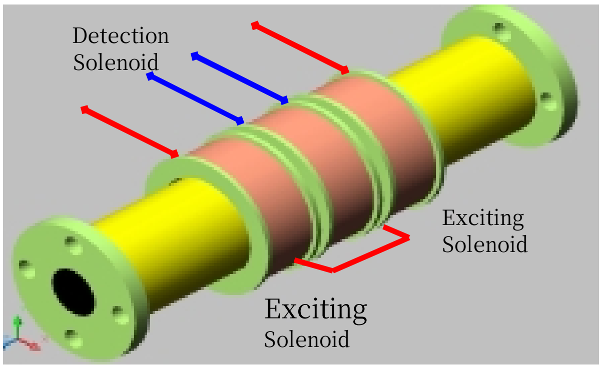


Fig. 7 Electromagnetic Flowmeter with Solenoid

전자펌프는 작동은 40kVA급의 전원공급장치를 이용하여 24개의 코일뭉치를 두 그룹으로 분할하여 독립적으로 제어하여, 1개에 그룹에서 문제가 발생하여도 펌프가 가동되도록 하며, 필요에 따라 인버터와 연계하여 60Hz가 아닌 최적 주파수에서 운전하도록 구성하였다.

Pb-Bi 유량 측정을 위하여 EU의 FZK 등의 여러 연구기관에서는 터어빈 유량계(turbine flowmeter), 초음파 유량계(ultrasonic flowmeter)와 함께 전자유량계로 유량측정을 시도하였다. 터어빈 유량계는 rotor의 회전을 감지하기 위한 pick-up 코일이 고온에서 견디지 못하고, 또한 rotor의 부식이 발견되었다. 또한 초음파 유량계의 경우 압전소자가 큐리점이상의 고온에서 극성을 잃어버리는 문제점으로 온도 문제를 해결하기 위하여 도파관(waveguide)을 이용하여 실험을 시도하였으나 젖음성(wettability) 문제와 온도에 따른 음속문제 등 미해결 문제가 남아있어 현재 사용이 어려운 것으로 보고되었다[5]. 따라서 본 연구에서는 유량 측정 기구로서 소듐 등의 액체 금속의 유량 측정에 비교적 성공적으로 적용되어 왔던 전자유량계를 직접 제작·설치하여 실험조건에 따라 교정하여 사용하는 방식을 채택하였다.

Faraday의 전자기 유도 법칙에 의하여 전도성 물질의 유동과 자기장의 방향에 상호 수직한 방향으로 기전력이 발생한다. 이러한 원리를 이용하여 두 개의 전극으로 발생한 기전력을 측정하여 유량-기전력 특성을 보정하여 평균 유속 또는 유량을 측정하는 기기가 전자유량계(electromagnetic flowmeter)이다. Shercliff[6],[7]는 액체금속(liquid metal)의 유량을 측정하고자 전자기유량계 이론을 체계적으로 유도·정리하였다. 또한 Shercliff는 유로 단면에서의 유속분포가 유량신호에 미치는 영향을 가중함수 (weight function) 개념을 도입하여 표현하였으며, 가중함수를 사용하여 균일한 자기장과 한 쌍의 점 전극(point electrode)을 가진 유량계에 대하여 선형 축대칭 유속분포를 가지는 경우에 두 전극간의 전위차(ΔU)는 단면에 대한 평균 유속(v_m), 자기장(B), 관경(d)에 비례하여 $\Delta U = Bv_m d$ 이 성립함을 보였다.

Fig.6(a)는 본 연구에서 설계한 전자유량계의 개략적 치수를 나타낸 그림이다. 유량계의 제작은 고온에서 자기적 특성이 우수한 AlNiCo-V(또는 AlNiCo-VIII)의 자성재료를 소결시켜

제작한 영구자석(permanent magnet)과 steel로써 C-type Yoke를 만들고 3/4inch-schedule40의 seamless SUS316 유로관에 두 개의 전극을 용접하여 만든다. Magnet pole의 크기는 40mm x 40mm, gap은 66.7mm로써 형성하며, 전극과 수직한 면에 히터를 부착하고 보온재로써 단열시킨다.

Fig.6(b)와 같이 약 1300Gauss의 자기장에서 유량계의 이론적 출력은 유량 60lpm에서 약 DC 6.5mV이며, 관의 전도성에 의한 유로관으로의 shunt effect에 의한 출력 감소 효과를 고려하면 4.5mV의 기전력이 발생하여, 열전대 신호처리 수준의 자료수집보드에서 측정 가능하다.

Fig.3의 전체개략도에서 (3)전자유량계는 AC를 이용하여 전자석(solenoid type)을 가진시켜 유량을 측정하는 방식이다. 기존의 전자유량계는 전극(electrode)을 유로관에 용접하여 횡방향 자기장을 형성하는 영구자석 또는 전자석으로 구성되어 있어, 500°C이상의 고온의 Pb-Bi 환경에서 전극부의 부식과 열팽창에 의한 전극부의 이동에 의한 유량 측정에 어려움이 예상된다. 또한 유량계를 구조물내에 설치할 경우 전자석을 설치할 공간 부족으로 인하여, 전극을 없애면서 구조를 단순화할 수 있는 전자유량계의 개발이 요구되어 본 연구에서 Pb-Bi 환경에서 사용가능하도록 개발할 생각으로 설치하였다. 이러한 방식의 전자유량계는 기존의 유량계가 유도된 기전력(induced electric field)을 측정하는 것과는 달리, 유도된 자기장(induced magnetic field)을 이용하는 방식으로 Fig.7에 나타낸 개략도와 같이 좌우측에 가진 솔레노이드(exciting solenoid)를 설치하고 중앙부에 검출 솔레노이드(detection solenoid)를 설치하거나 그 반대의 형태로 구성한다. 이 방식의 유량계는 코일의 감는 횟수 및 코일간의 간격과 가진 주파수가 주요 설계 인자가 되며, 고온의 적용을 위한 코일 재료 선정과 신호 처리 회로의 구성이 필수적이다. 이때 가진 주파수는 자기장이 유로관과 액체금속에 침투하는 거리(penetration depth)를 고려해야 한다.

전체적으로 Pb-Bi 내의 산소 농도 변화에 의한 전기전도도 변화와 관벽 오염에 의한 접촉 저항 발생으로 유량 측정에 어려움이 예상되며, 이로 인한 측정의 불확도(uncertainty)가 10%이상으로 매우 큰 것으로 보고되고 있다.

4. 측정부 및 산소조절기

Fig.8은 본 연구에서 설계한 측정부(test-section)의 개략적 치수를 나타낸 것이다. 측정부는 3/4inch-schedule40의 seamless pipe를 이용하여 제작하며, section A-A'와 같이 시편을 장착하여 환상유로로 Pb-Bi가 흐르도록 구성한다. 액체금속은 주로 Low Prandtl number의 유동이므로 온도에 의한 열전달은 빠르게 완전 발달(fully-developed)되므로 고려하지 않고, Pb-Bi의 밀도가 커 대부분의 경우 유동이 난류이므로 수력직경(hydraulic diameter)의 15-20배 되는 곳에 시편(sample)을 장착하여 속도분포가 비교적 완전 발달된 상태에서 시편의 부식 실험을 할 수 있도록 고려하였다.

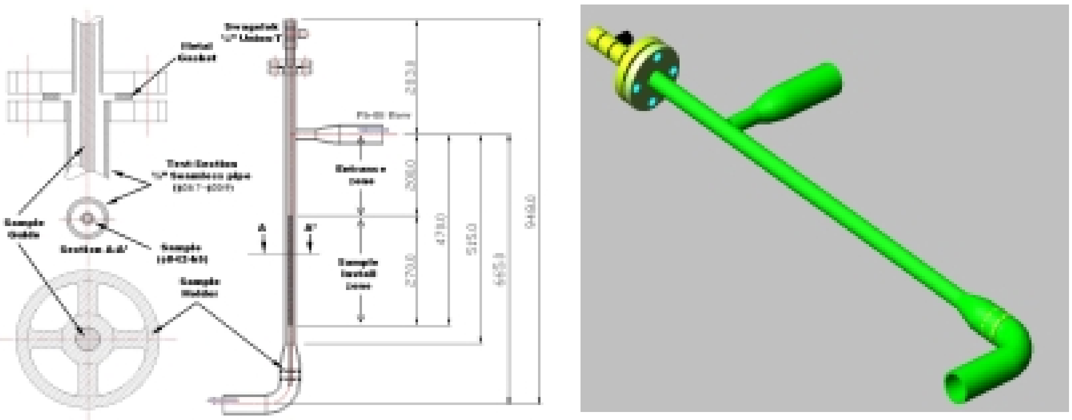


Fig. 8 Schematics of Test-Section for Corrosion Loop

시편은 핵연료의 사양을 고려하여 외경 8mm-두께 2mm-높이 5mm의 크기로 그림과 같이 sample-install zone에 test-matrix에 의하여 설치하며, 시편 지지봉(sample guide)은 그림과 같이 3/4inch Swagelok union-T의 cap(또는 flange)에 용접하여 고정시키고, 그 하류 부분은 sample holder에 끼워서 유동에 의한 흔들림을 방지하였다. 또한 sample holder는 지지봉이 잘 들어갈 수 있도록 적절한 공차를 두어 열팽창에 의하여 지지봉이 변형되지 않고 자연스럽게 늘어날 수 있도록 하였다. Flange와 metal-gasket을 포함한 상부는 글로브박스 내부에 설치하여 시편 장착 및 분석시 산소농도 변화에 의한 영향을 최대한 배제할 수 있도록 고려하였다.

이러한 측정부에 장착할 시편은 먼저 정적 실험으로 검증된 것을 우선적으로 장착한다. 정적 부식 실험의 목적은 순수한 Pb-Bi dissolution에 의한 부식 특성을 연구하는데 있다. 이외에도 실제 구조재의 원자로 내에서의 Pb-Bi 부식은 유속에 의한 물리적 손상까지 포함하게 되고 빔창물질의 경우에는 방사선 손상의 영향까지 받게 된다. 첫번째 단계로서 정적 상태에서의 부식을 연구하고 어떤 물질이 정적 상태에서 양호한 부식 특성을 보이면 다음 단계로 루프내에서 그리고 최종적으로 방사선 환경하에서 계속 양호한 상태를 보이는지를 살펴보아야 한다. 최종 단계까지 구조재의 예상 수명동안 문제가 없으면 그 물질을 사용할 수 있으나 그렇지 못하면 부식을 방지할 수 있는 방법을 개발해야 하고 부식 방지 방법을 찾지 못하면 설계시에 Pb-Bi의 운전온도를 부식이 발생하지 않는 낮은 온도로 내려야 한다. 만약 정적 상태에서의 부식 특성이 양호하지 않다면 동적 상태나 방사선 환경에서의 부식 실험을 수행할 필요가 없게 된다. 따라서 정적 실험은 샘플을 1단계로 screen하는 역할을 하게 된다.

측정부의 시편은 Fig.3과 같이 설치한 (6)글로브박스(glove box)에서 꺼낼 수 있도록 구성하였다. (6)글로브박스는 1.2m(L)-0.8m(W)-0.8m(H)의 크기를 갖도록 1인용으로 제작하고 전후면에 가시창(view window)과 2개의 glove를 설치하여 작업이 용이하도록 하였다. 또한 두 개의 출입구를 좌우에 부착하여 그 출입구의 한 개와 절반의 공간을 활용하며 정적실험을 공동으로 수행하여 그 활용도를 높이며, (12)진공펌프와 (13)Ar cover gas를 이용하여 내부의 산소농도를 제어하고 산소센서(OS6)으로 그 농도를 측정하도록 구성하였다.

Fig.9는 산소조절기(oxygen controller)의 개략도이며, 내경 200mm-길이 690mm(내부 용적: 20.7liter)-두께 8mm의 SUS316으로 제작하며, gas가 차지하는 공간을 제외하면 약 17liter의 액체금속을 담을 수 있도록 고려하였다. 탱크의 상부에는 가시창(view window)과 수위센서(level sensor)를 설치하기 위한 플랜지를 부착하였으며, 산소농도 조절을 위한 gas의 유입 및 유출을 위하여 3/4inch SUS316 tube를 상부에 부착하여 액체금속에 의한 막힘을 배제하였다. 액체금속은 탱크내의 자유표면 부근의 수위로 유입되며, 유출은 밑 부분에 설치한 배관을 통하여 빠져나갈 수 있도록 하였으며, drain시에 모든 액체금속이 빠져나가 잔류물이 없도록 고려하였다. 액체금속의 유출입 부위에 산소센서를 설치하여 산소농도를 측정하도록 구성하였다.

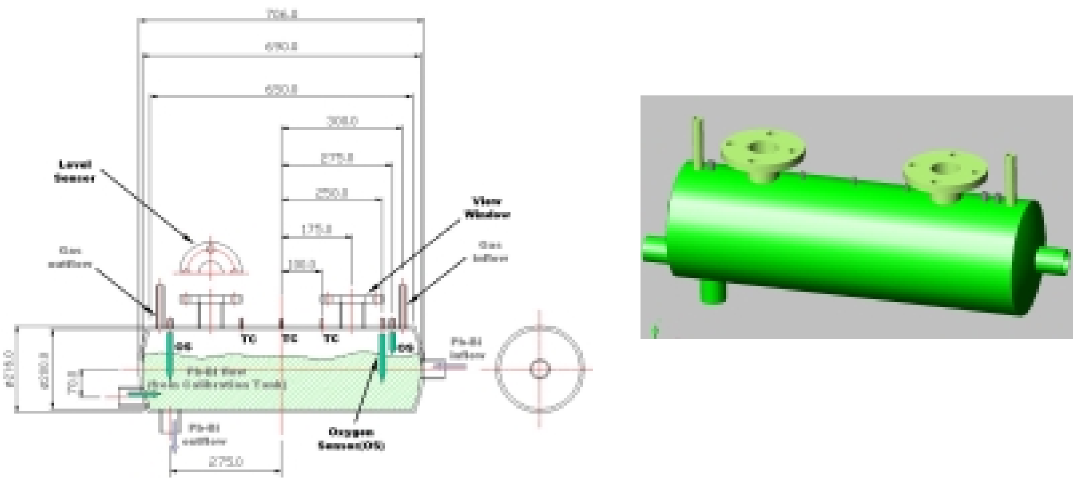


Fig. 9 Schematics of Oxygen-Controller for Corrosion Loop

탱크의 가열은 외벽에 약 3상-380V-15kW 수준의 밴드히터 또는 wire-heater를 부착하고 5inch 정도의 단열후 수분의 침투를 방지하기 위하여 함석재 또는 알미늄으로 마감처리하면 온도를 유지할 수 있을 것이다. 탱크의 가열은 관벽에 부착한 sheath형 k-type 열전대와 제어반의 온도조절기로 일정수준의 온도를 유지할 수 있도록 고려하였으며, 탱크내에 3개의 열전대를 삽입하여 액체금속의 온도와 gas의 온도를 측정할 수 있도록 설계하였다.

액체금속 내의 산소농도는 Fig.3의 개략도와 같이 (4)산소조절기 내부의 액체금속과 주입된 gas 사이의 장시간에 걸친 확산(diffusion)에 의한 물질전달(mass transfer)로써 제어하며, 그 농도의 측정은 (4)산소조절기내의 입출구의 액체금속에 잠입된 산소센서(OS3, OS4)와 gas 분위기에 노출된 산소센서(OS5)로써 측정한다.

루프내의 산소농도 변화는 Fig.3의 개략도와 같이 (5)측정부의 상류에 설치한 산소센서(OS2)와 (4)산소조절기의 상류에 설치한 산소센서(OS1)로써 관찰하고, 이 센서는 주 유동이 형성되는 루프에서 분기(bypass)시켜 주 유동의 몇 %의 유량이 흘러가도록 하여 산소농도를 측정하고 필요에 따라 산소센서를 교체할 수 있도록 구성하였다.

Pb-Bi 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 Pb-Bi 내에 투입하거나 Pb-Bi 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.

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

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

위식에서 첨자 S는 해당온도 T[K]에서 포화상태를 나타내며, R은 이상기체상수, ΔG는 표준상태의 Gibbs 자유에너지를 나타낸다.

Water의 온도는 Fig.3의 개략도와 같이 (11)항온조(constant temperature bath)와 표면장력이 비교적 커서 증발이 잘되지 않아 장시간 사용 가능한 (25)실리콘 오일(silicon oil)로써 제어한다.

수증기의 분압은 (21)습도센서와 측정온도를 이용하여 (4)산소조절기의 전후에서 측정하고, gas의 유량은 ml/min수준 이하의 (23)로타미터(rotormeter)로써 측정하고, gas 주입관은 항상 상온(room temperature)이상을 유지하여 관벽에 응축에 의한 수증기 분압이 변하지 않도록 미세 열량의 히터를 부착하여 단열시켜 필요에 따라 온도를 유지시킨다.

5. 결론

Pb-Bi에 의한 부식은 HYPER 노심설계에서 Pb-Bi의 속도 및 온도의 제한치를 결정하는 주요한 요소중의 하나로서, KAERI는 이러한 Pb-Bi의 부식 연구를 위해서 동적부식루프의 기초 설계를 끝내고 2004년 상반기 시험운전을 목표로 제작에 착수하였다. Pb-Bi 부식실험 장치의 설계는 액체소듐 루프를 설계 제작한 경험과 독일의 FZK 출장 및 파견 근무자의 조언 및 자료를 바탕으로 이루어졌다. 장치의 주요한 사양은 Table 1에 정리하였다.

Pb-Bi의 경우 소듐과는 달리 비중이 크고 전기전도도가 낮기 때문에 액체금속의 수송에 많은 에너지가 투입되어야 하고, 또한 유량 측정에 많은 어려움이 예상되어 소용량의 유량계 보정탱크를 루프에 설치하여 기존의 전자유량계 보정 및 새로운 개념의 유량계 개발에 활용하도록 시스템을 구성하였다. 루프의 모든 부품은 가능한 국내 기술을 활용하여 직접 설계 제작 예정이며, 연구에 많은 시간이 소요되는 산소센스(oxygen sensor)와 산소농도 제어 기술은 국제공동연구인 MEGAPIE 연구과제의 기술과 FZK 및 러시아의 IPPE 기술을 활용할 것이다.

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, “316LN의 Pb-Bi 부식 특성”, 추계 원자력학회, 2002, 10월, 용평

[5] 탁남일, Pb-Bi 냉각 MEGAPIE Window Cooling 실험참여를 위한 FZK/IKET 파견 귀국보고서, KAERI/OT-1047/2003, 2003

[6] Shercliff, J.A., 1954, “Relation Between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electromagnetic Flowmeters,” J. Applied Physics, 25, 817~818

[7] Shercliff, J.A., 1962, The Theory of Electromagnetic Flow Measurement, Cambridge University Press

Table 1. Summarized Specification of Dynamic Corrosion-Loop in KAERI

Operation Temperature	400℃ - 550℃ (max. 650 ℃)	Loop Length	10m (max. 12m)
Flow Rate	45lpm (max. 60 lpm)	Pressure Drop	max. 3.0 bar/60lpm
Liquid-Metal Volume	PbBi 80 Liter (ca. 800kg)	Loop-Heater	max. 1 kW/m (Ø4 ~ 6mm wire heater)
Test-Section	3/4inch-Schedule40 Seamless SUS316 pipe (i.d. Ø20.93mm)	Insulation	Ceramic wool (more than 3inch) & Al-Cover
Sample Specification	Ø8mm - T2mm - H5mm	Heat Loss	max. 3kW
Piping System	1.5inch-Schedule40 SUS316 pipe (T3.68mm) (or SUS316Ti pipe)	Required Maximum Electric Power	max. 120kW (Em-pump 40kW, heater 65kW, spare 15kW)
Flowrate Measurement	Electromagnetic flowmeter (1300~1500 Gauss)	Electric Power on Operation	ca. 50kW (Em-pump 35kW, heater 외 etc 15kW)
Liquid-Metal Pumping	Electromagnetic pump (60lpm/4bar)	Liquid-Level Sensing	multi-electrode rod & DC-5V
Oxygen Control	H2/H2O Partial Pressure (10-5wt% ~ 10-7wt%)	Metal-Loop Valve	Bellows-sealed Gate valve
Oxygen-Concentration Measurement	YSZ based O2 sensor (reference electrode: Pt-Air, In-In2O3, Bi-Bi2O3)	Purification	Magnetic filter Mesh filter
DAS Board	16bit-50Channel(sampling rate: 1 sample/sec, ±10V)	Main-Frame	4.5m(L)-2.5m(W)-3.5m(H), H-Beam(150×150 mm)