

<응용기술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2015.3.4.257>

ISSN 2288-3991(Online)

[특집섹션: 한국기계연구원 주요사업 창의과제]

액체금속 피동냉각유동모사 실증설비의 개발

류경하* · 이태현* · 이상혁** · 반병민*

* 한국기계연구원 원자력산업기기검증센터

Development of Liquid Metal Passive Cooling Flow Simulation System

Kyung-Ha Ryu^{*†}, Jae-Hyoung Kim^{*}, Tae-Hyun Lee^{*}, Sang-Hyuk Lee^{**} and Byoung-Min Bahn^{*}

* Equipment Qualification Center for NPPs, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received January 27, 2015 ; Revised September 11, 2015 ; Accepted September 11, 2015)

Key Words: Liquid Metal(액체금속), Passive Cooling(피동냉각), Natural Circulation(자연순환)

초록: 원자력 발전이 중요한 에너지 공급역할을 담당하기 위해서는 안전성을 확보하고, 사용 후 핵연료 문제를 해결하여야 한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로 소듐이나 납비스무스 공융합금 등과 같은 액체금속을 냉각재로 이용하는 방안이 연구되고 있다. 본 논문에서는 액체금속 유동모사 실증설비 개발을 위한 설계변수 검토, 설계 해석, 구조재의 선정 및 설비 개발 결과를 서술하였다. 설비의 개발은 열수력 해석코드의 해석을 통해 수행되었고 충분한 자연순환 유량을 갖는 설비제작 기술을 확보하였다.

Abstract: To maintain sustainability of nuclear energy as an important energy source, both safety problem and Spent Nuclear Fuels(SNFs) problem should be solved. In case of Gen-IV reactors such as fast reactor, SNFs can be used as fuels by using fast neutrons. It can be a suitable treatment method of high-level waste in near future. Liquid metals such as Sodium or Lead-Bismuth Eutectic (LBE) can be possibly used as a coolant to use fast neutrons. In this paper, it was described that natural circulation parameter studies, design analyses, material selections and a completion of facilities. To develop a natural circulation facility, thermal hydraulic analyses were performed. Installation technique of liquid metal natural circulation were secured.

1. 서론

최근 에너지수요가 증가하게 되면서 기존의 화석 연료를 대체하며 이산화탄소 배출을 감축하기 위한 에너지 공급원으로 원자력에 대한 의존도가 점차 증가하고 있다. 향후 원자력 발전이 중요한 에너지 공급 역할을 담당하기 위해서는 안정성을 확보하고, 사용 후 핵연료(Spend Nuclear Fuels, SNFs) 문제를 해결하여야 한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로 소듐(Na)이나 납 비스무스 공융합금(Lead Bismuth Eutectic, LBE)등과 같은 액체금속을 냉각재로 이용하는 방안이 연구되고 있다.

액체금속을 냉각재로 이용할 경우 고속중성자를 이용하기 때문에 고준위폐기물을 중저준위화 할 수 있어 사용 후 핵연료 문제를 해결 할 수 있다.⁽¹⁾ 또한, 액체금속 냉각재의 경우 펌프와 같은 능동기기를 배제한 완전피동형설계(Full passive design)가 가능하다. 완전피동형설계는 액체금속의 밀도차를 이용한 자연순환 및 전원상실시 공기 냉각에 의한 노심 잔열제거 설계가 가능하여 후쿠시마와 같은 최악의 원전 사고(Level 7 accident)가 불가능하며, 원전사고의 주요 원인인 human error를 배제할 수 있다.

† Corresponding Author, sanghyuk@kimm.re.kr

본 논문에서는 액체금속냉각재의 순환 특성을 파악하기 위하여 LBE의 2kg/s이상 자연순환 유량을 갖는 액체금속 유동모사 실증설비(KIMM Liquid Metal flow Simulation system, KIMM-LIMSI system) 개발 결과를 서술하였다. 개발된 장치는 316L 구조재로 되어있으며 열수력 해석코드(Multidimensional Analysis of Reactor Safety, MARS-LBE)를⁽²⁾ 이용하여 해석을 수행하였다. MARS-LBE 해석을 기초하여 장치의 자연순환 유동 성능 및 압력손실계수를 설정하여 KIMM-LIMSI system을 제작하였다.

2. 액체금속 유동모사 실증설비 개발

2.1 액체금속 유동모사 실증설비 개발을 위한 자연순환 유량 영향인자 평가

액체금속을 냉각재로 이용하는 차세대 원자로의 1차측 유로를 단순화하여 액체금속의 유동특성을 모사하는 장치 개발을 위해 LBE를 자연 순환시킬 수 있는 단순한 유로를 갖는 사각형 loop의 형태로 계획하고, 자연순환 유량에 미치는 인자에 대해 영향평가를 수행하였다. 냉각재의 자연순환 능력에 관련된 인자는 loop의 높이, 넓이, 배관 직경, 하단에서의 core높이, core와 열교환기의 용량 등이다. 이들을 대상으로 하여 자연순환 유량에 대한 영향평가를 수행하였다.

핵심 인자에 대한 자연순환 영향 평가결과는 Fig. 1에 제시되었다. 배관의 직경, 루프 높이, 코어의 power, 하단에서의 코어 높이, 루프의 넓이는 각각 0.05m, 1m, 0.2kWth, 0.1m, 1m를 기준으로 정규화 하였으며 정규화에 사용된 표준 유량은 2.994kg/s이다.

각각의 변수는 서로 연관되어지며 변수 분석을 통해 다음과 같이 액체금속 유동모사 실증설비의 기본 사양을 결정하였다.

- Loop height: 3m (system height: 5m with attached storage tank and expansion tank)
- Core power: 5kWth (max. Power: 15kWth)
- 2.5 in. STS Sc 40 pipe
- Loop width: 1.4m
- Bottom to Core length: 0.3m

2.2 설계/제작을 위한 해석검증

액체금속 유동모사 실증설비 설계/제작을 위한 해석은 변수분석을 통해 결정된 설비의 사양을 모델링

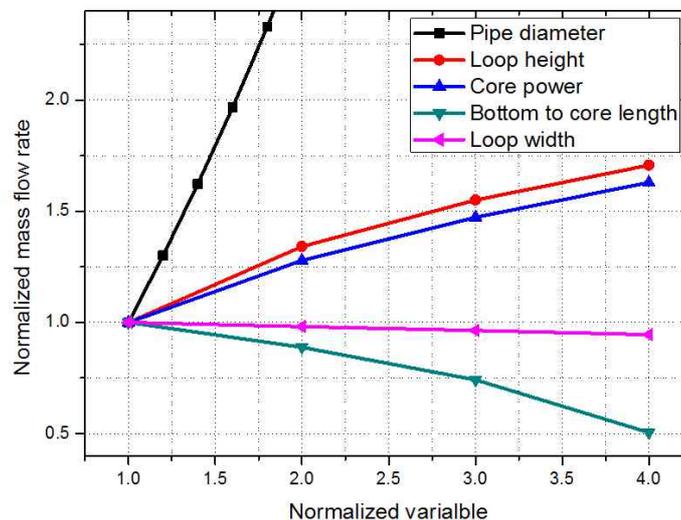


Fig. 1 Parametric studies results of natural circulation

하여 MARS-LBE를 이용하여 수행하였다. MARS-LBE에 사용된 주요 해석 모델은 다음과 같다.

- Thermal condition
 - : Power 5 ~ 15kw
- Geometry
 - : Wall thickness in heat exchanger 5.54 mm
 - : Internal diameter of entire pipes 60.3mm
 - : Internal diameter of heat exchanger oil pipe 114.3mm
- LBE condition
 - : Initial flow rate 0kg/s
 - : Initial temperature 250℃
- Oil condition 초기 해석 조건
 - : Oil mass flow rate 0.21kg/s
 - : Oil inlet temperature 95℃

Core heater는 약 10초 후 100% 출력으로 작동하도록 모사되었고, 열교환기의 유량은 core heater가 완전히 작동 한 후 시동되어 시동에 약 1초가 걸리는 것으로 모사되었다. 직관 및 곡관과 유량계의 오리피스에 의한 액체금속 유동의 압력강하 손실효과는 CFD를 통해 수행하였고, 결과는 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1 Analysis results of liquid metal pressure drop of elbows and straight pipes

유량 (g/m)	속도 (m/s)	직관의 압력변화 (Pa)	곡관의 압력변화 (Pa)	곡관-직관 (Pa)	저항계수
0.5	0.0152	0.5169	0.5937	0.0768	0.0623
1.0	0.0305	2.1423	2.5046	0.3622	0.0734
1.5	0.0457	4.6472	5.6557	1.0084	0.0908
2.0	0.0609	7.9462	9.9951	2.0489	0.1038

Table 2 Analysis results of liquid metal pressure drop of orifices

유량 (kg/m^3)	속도 (m/s)	압력변화 (Pa)	저항계수
0.5	0.0152	1461	1184.7
1.0	0.0304	5868	1189.6
1.5	0.0456	12428	1119.8
2.0	0.0609	22058	1117.9

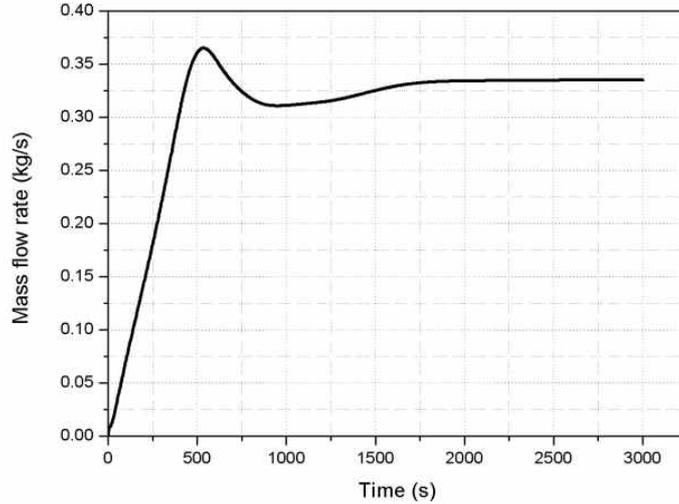


Fig. 2 Analysis results of liquid metal natural circulation flow rate of base conditions

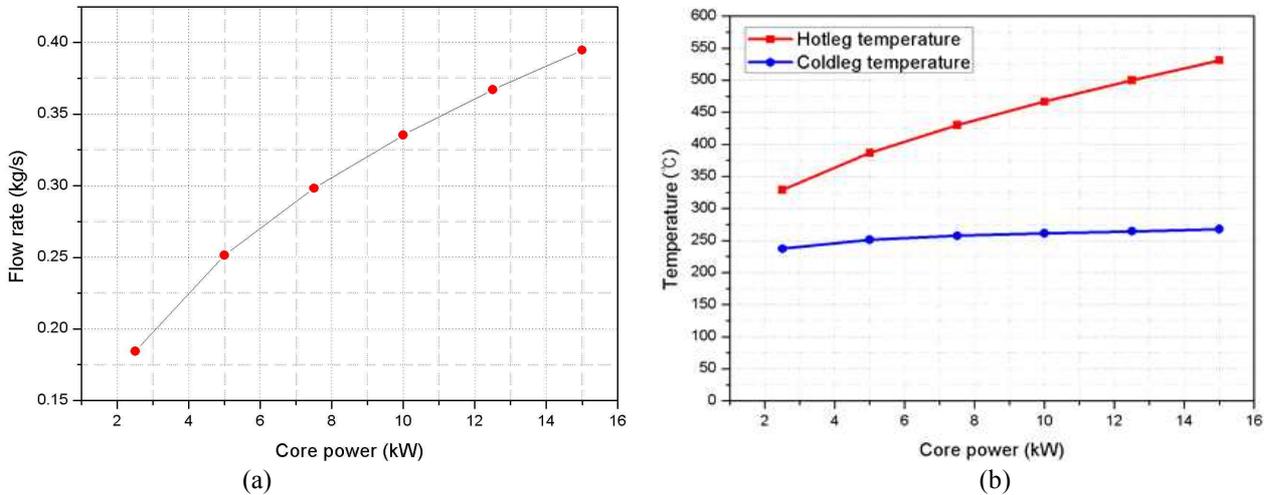


Fig. 3 Core power effect on natural circulation, (a) natural circulation flow rate by core power and (b) temperature by core power

1) 기본 설비 사양에 대한 해석검증

2.1장에 에 제시된 기본 설비 사양을 해석조건으로 해석을 수행한 결과를 Fig. 2에 나타냈다. 자연순환 유량은 loop 가동 시작 후 500초 정도까지 선형으로 증가하였으며 500초 이후 다시 감소하였다가 1000초 이후 안정화됨을 확인 할 수 있다. 이는 500초 이후부터 열교환기에서 발생한 차가운 LBE가 유입되며 hot-leg의 온도를 낮추는 효과가 있기 때문이다.

2) 초기 예열의 효과

초기예열은 LBE의 용점 이상으로만 가해지면 자연순환 유량 및 온도에 영향이 없음을 확인하였다. 초기예열의 효과는 자연순환의 안정화에 소요되는 시간에는 영향을 주나 그 효과는 크지 않았다.

3) Core power의 효과 해석검증

Core power를 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0 kWth로 변환한 경우, 형성되는 자연순환 유량을 Fig. 3(a)에, hot-leg과 cold-leg의 온도를 Fig. 3(b)에 도시하였다. 각각의 core power에서 자연순환 유량의 안정화에 소요되는 시간을 Fig. 4에 도시하였다. Core power 증가에 따라 자연순환은 증가하며, 안정화에 소요되는

시간은 감소함을 확인하였다. Core power에 따라 hot-leg의 온도가 증가함을 확인하였다. 현재 설비 사양에서는 core Power가 6kW를 넘을 경우, hot-leg의 온도는 400℃를 초과하였다.

3) 열교환기 주입 oil 온도 및 유량에 대한 해석검증

구조재의 열화 문제를 해결하기 위해서는 400℃미만의 운전과 LBE의 용점인 125℃이상의 운전이 필요하다. 열교환기 2차측 주입 오일의 온도 및 유량 변화를 통해 운전온도를 적절히 떨어뜨리며 LBE 용점 이상의 온도를 유지하는 것이 중요하다.

열교환기에 주입되는 오일의 입구 온도는 LBE의 용점을 고려하여 95℃로 고정하였고, 오일의 유량을 변수로 0.2kg/s, 0.5kg/s, 3kg/s, 7kg/s, 8.5kg/s, 10kg/s에 대하여 해석을 수행하였다. 해석결과는 Fig. 5에 도시하였다. 냉각오일의 유량이 증가할수록 자연순환 유량은 줄어들음을 확인할 수 있다. 그러나 이를 냉각에 따른 자연순환 저해 효과로 보기는 물리적으로 어려울 것으로 생각되고, 열교환기 내부 벽면에 LBE가 응고되며 유로가 좁아드는 현상에 기인한 것으로 생각된다.

냉각 오일의 유량이 증가할수록 운전온도는 낮아짐을 확인하였다. 따라서 냉각유량을 제어하여 운전온도를 낮추어 구조재의 안전성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 냉각오일 유량이 8.5kg/s 이상인 경우에는 cold-leg의 온도가 균눈점 이하로 떨어지고 시간이 흐름에 따라 유량이 형성되지 않음을 확인할 수 있었다.

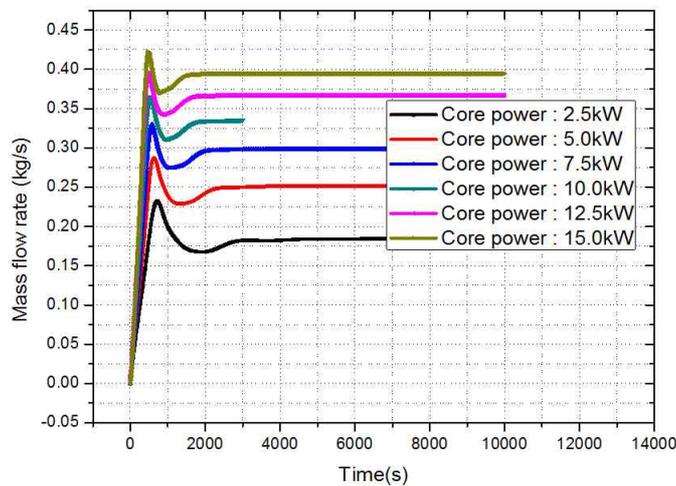


Fig. 4 Core power effect on natural circulation

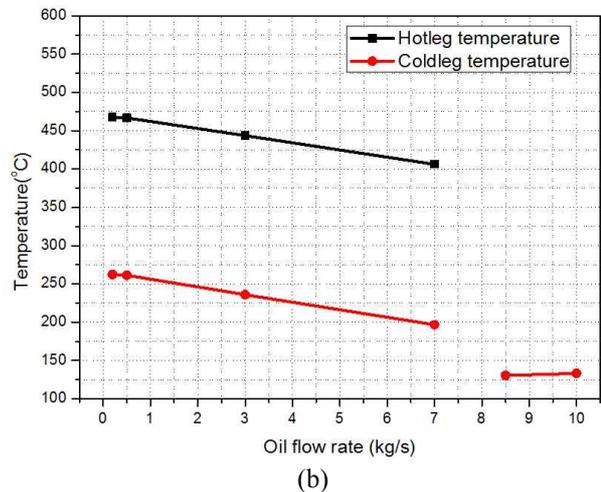
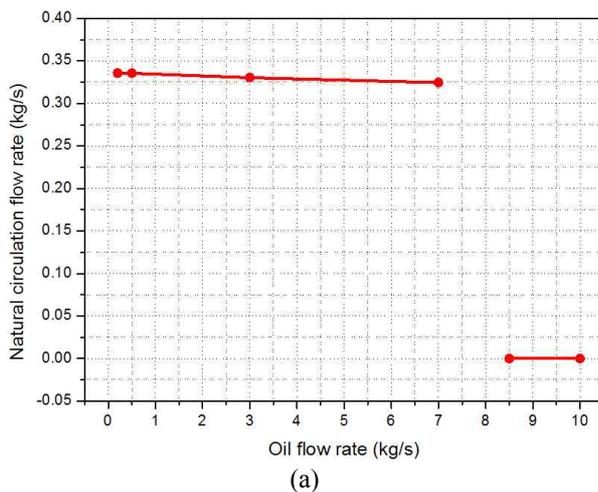


Fig. 5 Heat removal effect on natural circulation, (a) natural circulation flow rate by heat removal and (b) temperature by heat removal

4) 오리피스 변경 효과

Core power와 열교환기의 해석결과, 기본 설비 사양으로는 LBE의 자연순환 유량과 구조재 보호를 위한 온도형성이 어려운 것으로 보인다. 따라서 압력강하 요소를 수정하여 LBE 자연순환 유량 증가를 통해 hot-leg의 온도를 낮게 유지할 필요가 있다. 오리피스에 의한 압력강하 효과를 줄일 필요가 있으며, 추천되는 값은 form loss coefficient가 15이하인 오리피스이다. 해석결과 오리피스의 저항계수를 10이하 값으로 설정할 경우, LBE의 자연순환 유량 2kg/s 이상을 만족하면서 구조재 보호를 위한 hot-leg 최고 온도인 400℃를 넘지 않는 것으로 Fig. 6에서 확인하였다.

2.3 사용온도 및 용존산소 환경을 고려한 구조재 선정

액체금속인 LBE는 금속과 친화성이 높아 구조재와 전기화학적 활발한 반응성을 가진다. 특히 LBE가 구조재 내부로 침투하여 발생하는 Lead Bismuth Embrittlement 현상은 아직까지 정확한 메커니즘이 밝혀지지 않고 있으며 구조재 선정에 어려움을 야기하고 있다. 따라서 사용 온도 범위에서 적절한 재료 선정이 필요하며 취급 용이성을 고려한 구조재 선정이 요구된다. 또한 대부분의 경우 냉각재 내의 용존 산소 제어가 요구될 수 있다.

이를 바탕으로 17가지 후보 구조재 재료(316L, 304L, 410, 430, T410, T91, HT-9, SCM420, Cr-Mo steel, F82H, STBA28, NF616, ODS-M, Eurofer97, STBA26, EM10, Magnet II)에 대한 물성치 분석이 수행되었다. Table 3에는 STS 316L 구조재의 LBE 적합성 확인 결과를 도시하였다.

STS 316L의 경우, 기타 재료와는 다르게 austenite 계열로서 구조재로 적합하다고 평가되었다. 단 Ferrite-martensitic 계열 재료와 같은 부식 안전성은 없는 것으로 생각된다. 316L을 이용하기 위해서는 400℃이하의 운전 조건이 필요하며 이를 위한 열교환기 설계가 중요한 것으로 평가되었다. 고온 실험을 위해서는 용존산소의 제어가 필요하게 된다. 500℃ 사용을 위해서는 10⁻⁶ wt% DO control이 필요한 것으로 보이며, 550℃ 사용을 위해서는 10⁻⁷ wt% DO control이 필요하게 된다.

적절한 열교환기는 cold leg 전단에서 LBE의 온도를 급격히 낮추어 주어야 하지만 LBE 응고점 이하로 유동 온도가 떨어지지는 않도록 설계할 필요가 있다. 입구온도는 너무 낮을 경우, 액체금속의 고화를 야기할 수 있다.

2.4 KIMM-LIMSI system

평가된 해석 결과를 고려하여 KIMM-LIMSI system을 제작 하였다. Fig. 7과 같이 LBE가 관내 유동할 수 있는 316L 배관으로 제작되었으며 수평 1.4m, 수직 3m의 사각루프의 형태로 제작되었다. 하단 storage tank, 상단 expansion tank, core heater와 열교환기로 구성되었다.

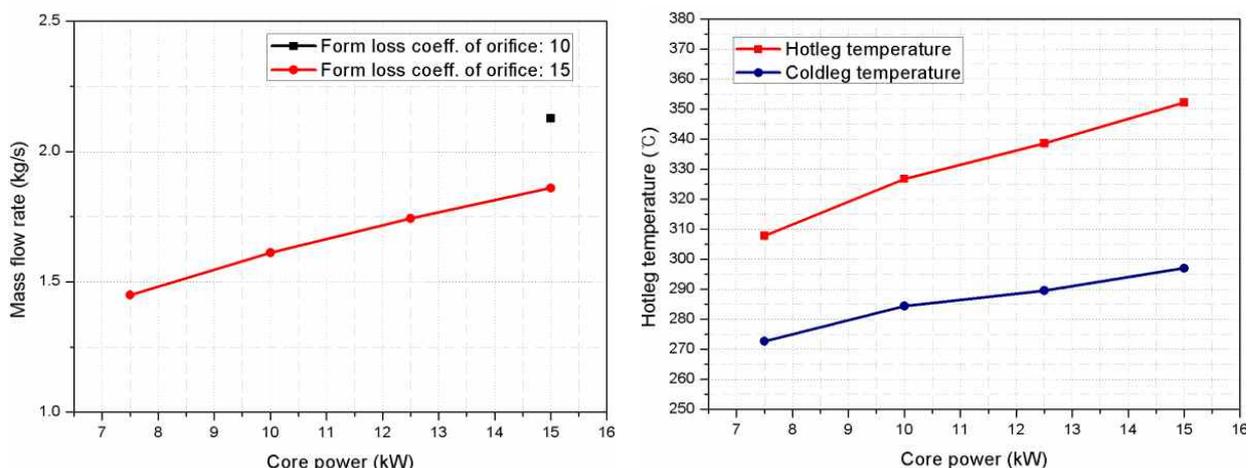


Fig. 6 Form loss effect on natural circulation, (a) natural circulation flow rate by orifice form loss and (b) temperature by orifice form loss

Table 3 Suitability evaluation results of STS-316L on LBE environment⁽³⁾

Material	T(°C)	Time(hours)	[O](%wt.)	Oxide thickness/dissolution depth(microns)	Ref.
316L	300,400	1500	Saturation	n.m.	[Fazio,2001]
316L	300	5000	Saturation	<1	[Fazio,2001]
316L	400	5000	Saturation	1	[Fazio,2001]
316L	476	700	Saturation	n.m.	[Fazio,2001]
316L	476	1200	Saturation	2-4	[Fazio,2001]
316L	300	1500, 3000, 5000	1.84x1e-5		[Benamati, 2002]
316L	400	1500, 3000, 5000	1.41x1e-4		[Benamati, 2002]
316L	360-450	3000	5x1e-7		[Deloffre, 2002]
316L	<360	3000	5x1e-7		[Deloffre, 2002]
316L	550	100	4x1e-7	-9	[Martin, 2004]
316L	535	3000	3x1e-7		[Martin, 2004]
316L	550	3000	4x1e-7	-46	[Martin, 2004]
316L	535	500	8x1e-6	11	[Martin, 2004]
316L	550	500	8x1e-6	9	[Martin, 2004]
316L	600	500	8x1e-6	-55	[Martin, 2004]
316L	535	3000	3x1e-6	-60	[Martin, 2004]
316L	550	3000	4x1e-6	-70	[Martin, 2004]
316L	600	3000	8x1e-5	-156	[Martin, 2004]
316L	450	3000	6x1e-8		[Gomez, 2004]
316L	300	1500	1.85x1e-5		[Long Bin, 2003]
316L	400	1500	1.41x1e-4		[Long Bin, 2003]
316L	300	5000	1.85x1e-5		[Long Bin, 2003]
316L	400	5000	1.41x1e-4		[Long Bin, 2003]
316L*	350	1000		-	[Gnecco, 2004]

LBE의 자연순환은 core heater와 열교환기의 제어를 통해 LBE의 온도구배를 발생시켜 비중 차와 압력 강하에 의해 자연순환 능력이 결정된다.⁽⁴⁾ Core heater는 최대 15kW의 사양으로 배관 외부에 밀착되어 감싼 형태로 1.4m로 되어 있으며, 열교환기의 경우 배관 외부에서 열교환되는 형태로 열교환기 하단에서 실리콘 오일이 통제된 온도로 유입되어 LBE와 열교환하는 형태이다.

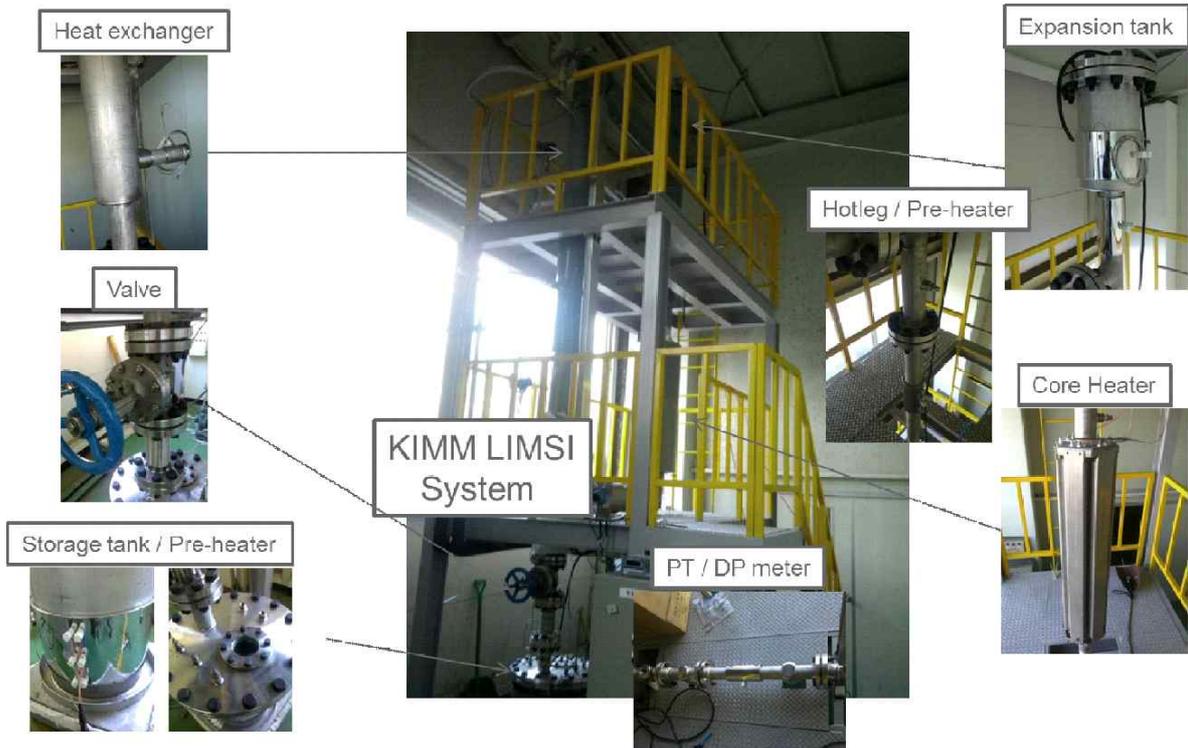


Fig. 7 KIMM-LIMSI system

3. 요약 및 결론

본 논문에서는 자연순환 유량 2kg/s 이상을 갖는 액체금속 유동 모사 실증설비 제작 결과를 서술하였다. 자연순환 유량에 미치는 인자에 대해 영향평가를 수행하여 기본 설계를 하였고, 이에 대해 열수력 해석을 수행하여 액체금속 냉각재의 자연순환 유량과 운전온도에 영향을 주는 압력강하요소, core power, 열교환기에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 하여 KIMM-LIMSI system이 제작되었으며, 향후 차세대 원전의 유로기기 연구에 본 설비를 적극 활용할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 주요사업의 재정적 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Wade, D.C. and Chang, Y.I., 1988, "Integral Fast Reactor Concept: Physics Of Operation And Safety", Nuclear Science English, Volume 100, pp. 507-524
- (2) KAERI, 2004, MARS CODE MANUAL, Technical report-2812
- (3) OECD-NEA, LBE handbook, Publication in progress
- (4) Incropera, F., et al., 2008, Fundamentals of Heat And Mass Transfer, John Wiley & Sons