

초고온원자로 중간열교환기 미니채널에서의 Molten Salt 열수력 특성 연구[§]

정희성* · 황인선* · 방광현**†

* 한국해양대학교 냉동공조공학과, ** 한국해양대학교 기계정보공학부

A Study on the Thermal-Hydraulic Characteristics of Molten Salt in Minichannels of an Intermediate Heat Exchanger for a Very High Temperature Reactor (VHTR)

Hui-Seong Jeong*, In-Seon Hwang* and Kwang-Hyun Bang**†

* Dept. of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Korea Maritime Univ.

** Dept. of Mechanical Engineering, Korea Maritime Univ.

(Received July 5, 2010 ; Revised September 13, 2010 ; Accepted September 25, 2010)

Key Words : VHTR(초고온원자로), Heat Exchanger(열교환기), Molten Salt(용융염)

초록: 초고온원자로(VHTR) 설계에 있어 중간열수송루프(IHTL) 및 중간열교환기(IHX) 설계는 고온의 운전조건(950 °C 이상)으로 인하여 공학적으로 어려운 과제 중 하나로 알려져있다. 본 연구에서는 LiF, NaF 및 KF(46.5:11.5:42.0 mole %)의 공융혼합물인 Flinak molten salt 를 IHTL 의 열수송매체로 고려하였다. Flinak molten salt 의 세관에서의 열수력 특성을 평가하기 위하여 직경이 1.4 mm 인 원형관을 이용하여 고온의 가스화 Flinak 을 열교환할 수 있는 이중관식 열교환기를 구성하여 실험하였다. 실험 결과 층류유동에서 측정된 Flinak 의 마찰계수는 이론적인 64/Re 에 근접하였고 Nusselt 수는 일반적으로 3.66 에서 4.36 범위에 들었다.

Abstract: For Very High Temperature Reactors (VHTR), the designs of the Intermediate Heat Transport Loop (IHTL) and the Intermediate Heat Exchanger (IHX) are particularly difficult because of the high-temperature operation (up to 950°C). In this study, Flinak molten salt, a eutectic mixture of LiF, NaF, and KF (46.5:11.5:42.0 mole %) is considered as the heat transporting fluid in the IHTL. To evaluate the flow and heat transfer performance of the Flinak molten salt in small channels with hydraulic diameters in the millimeter range, a double-pipe heat exchanger was constructed using small-diameter tubes for the heat exchange between the Flinak and the gas flow. The experimental data showed that, for laminar Flinak flow, the measured friction factors were close to the 64/Re curve and the Nusselt numbers were generally between 3.66 and 4.36.

- 기호설명 -

A : 표면적 (m²)

d : 직경 (m)

f : 마찰계수

G : 질량유속 (kg/m²s)

h : 열전달계수 (W/m²K)

k : 열전도도 (W/mK)

L : 길이 (m)

Nu : Nusselt 수

ΔP : 압력강하 (Pa)

R : 열저항 (m²K/W)

T : 온도 (°C)

U : 총괄열전달계수 (W/m²K)

ΔT_{LM} : 대수평균온도차 (°C)

그리스문자

ρ : 밀도 (kg/m³)

μ : 점도 (Pa·s)

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 부산지회 춘계학술대회 (2010. 5.7., 신라대) 발표논문임.

† Corresponding Author, khbang@hhu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

하첨자

- G : 가스
- MS : 용융염
- c : 저온유체
- h : 고온유체
- i : 입구
- o : 출구
- 1 : 고온유체 입구측
- 2 : 저온유체 입구측
- w : 벽

1. 서론

미래형 원자로 개발 대상의 하나인 초고온원자로(Very High Temperature Reactor: VHTR)는 고효율 수소 생산 공정에 필요한 900°C 이상의 높은 온도의 열을 공급하기 위하여 현재 한국을 포함한 여러 나라에서 개발 중에 있는 가스냉각 원자로이다. 원자로에서 발생된 열을 원자로 냉각재(보통 He 가스)로 직접 수소생산공정에 보낼 수 없기 때문에 중간에 원자로 냉각재와 생산공정 열매체와 열교환을 해주는 중간열교환기(IHX)가 필요하다.

이러한 IHX의 일반적인 설계 요구 온도는 Fig. 1과 같다. 고온 He의 입구온도 및 생산공정 즉 열매체의 출구온도는 수소생산공정에서 요구되는 온도로 거의 고정적이며 He측 출구 온도는 원자로 용기 설계 상 높게 할 수가 없다. 또한 생산공정 즉 열매체의 입구온도를 높이면 열매체 수송동력이 증가하는 문제가 있다. 이러한 상황의 IHX 설계 온도 조건은 매우 높은 열교환기 효율을 요구한다.

따라서 IHX 형태로 원통다관형과 같은 일반적인 열교환기의 경우 크기가 매우 커 경제적이지 못한 문제점을 가지고 있어 Printed Circuit Heat Exchanger(PCHE)와 같은 컴팩트 열교환기가 기술적, 경제적 관점에서 IHX로 선호되고 있다.⁽¹⁾

한편, 초기에 관심을 가진 생산공정 열매체는 Helium이었지만 원자로의 안정성을 고려해 원자로와 수소생산시설을 1 km 이상의 거리를 두어야 할 경우 열매체가 가스인 관계로 높은 펌핑 동력이 문제가 된다.⁽²⁾ 이러한 문제를 고려하여 이에 대한 대체 물질로 액체인 여러 가지의 molten salt가 검토되고 있다. Molten salt 중의 하나인 LiF, NaF 및 KF(46.5:11.5:42.0 mole %)의 공융혼합물

Table 1 Physical properties of molten Flinak and helium gas at 700 °C (He at 7 MPa)

	Flinak	He
Melting point, °C	454	-
Density, kg/m ³	2020	4.818
Specific heat, kJ/kgK	1.88	5.19
Viscosity, mPa·s	2.55	0.036
Thermal conductivity, W/mK	0.92	0.281

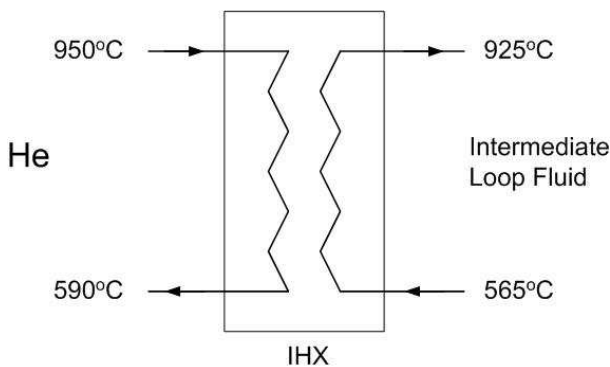


Fig. 1 A Typical operating condition of VHTR Intermediate Heat Exchanger(IHX)

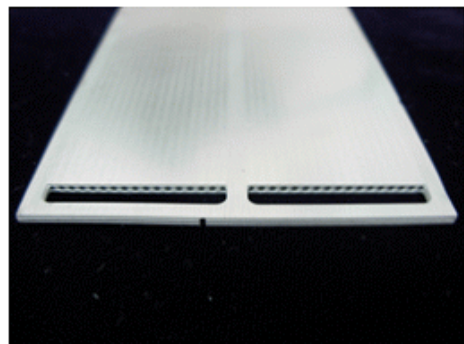
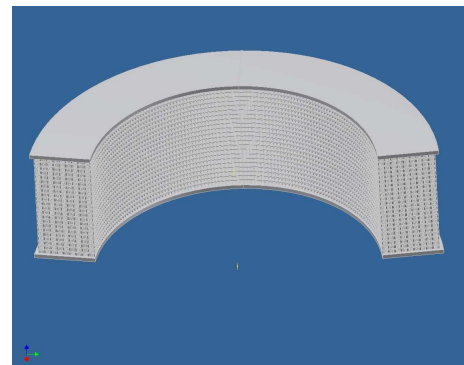


Fig. 2 Ring-type plate-fin compact heat exchanger(top) and diffusion-bonded minichannels(bottom)

Flinak 이 화학적 안정성과 He 과 비교하여 낮은 펌핑 동력으로 인하여 He 을 대체 하는 열수송 매체로 고려될 수 있다. Flinak 의 용융점은 454°C 이고 대표적인 물성치는 He 의 물성치와 함께 Table 1 에 나타내었다.^(3,4)

작동 매체가 He-Flinak 인 컴팩한 중간열교환기 설계는 고온 운전조건의 특성과 He 과 Flinak 간의 큰 압력차(He : 70 기압, Flinak : 대기압 수준) 등이 고려되어야 한다. PCHE 형태의 열교환기는 평판에 관경이 밀리미터 크기의 채널들을 에칭에 의해 형성하고 확산접합(diffusion bonding)에 의해 제작되는데 이러한 고온, 고압 환경에서 확산접합은 그 내구성이 약한 문제점이 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 Fig. 2 와 같이 낮은 압력의 Flinak 채널은 확산접합으로, 그리고 고압 He 측은 흰(fin)으로 구성하는 열교환기를 고안하였다.⁽⁵⁾ 따라서 확산접합 판 외부의 고압에서 저압의 내부 채널로 힘이 가해지므로 확산접합의 취약한 내구성 문제를 해결할 수 있다.

이러한 열교환기를 설계하기 위해서는 세관에서 Flinak molten salt 의 열수력학적 특성이 필요하다. 본 연구에서는 내경이 밀리미터 단위인 원형 채널에서 Flinak 의 열수력 특성을 실험적 연구를 통해 파악하여 He-Flinak IHX 설계에 이용하고자 하였다.

2. 실험

Flinak 은 LiF, NaF 및 KF 의 공융혼합물이다. 고온의 molten salt 는 수분과 산소에 반응하여 화학적으로 불안정해지기 때문에 Flinak 의 취급과 사용은 산소와 습기가 제거된 환경에서 이루어져야 한다. Flinak 의 이러한 특성을 철저히 고려하여 실험을 구성하고 진행하였다. 실험장치는 Fig. 3 과 같이 molten salt 루프와 고온 가스 루프로 구성하였다.

고온의 molten salt 에 사용가능한 기계적인 펌프가 상용화 되어있지 않기 때문에 Inconel 600 으로 제작한 2 개의 용기에 압력차를 이용하여 molten salt 를 고압측 용기(supplying tank)에서 저압측 용기(receiving tank)로 흘러 보내는 방법을 택하였다. 또한 molten salt 가 흐르는 관 전체를 용융점 이상으로 유지하기 위하여 heating jacket 을 사용하여 단열하였다. Molten salt 의 유량은 Inconel 용기 내부 salt 의 무게 변화를 load cell 을 이용하여 측정 한 뒤 유량으로 환산하였다.

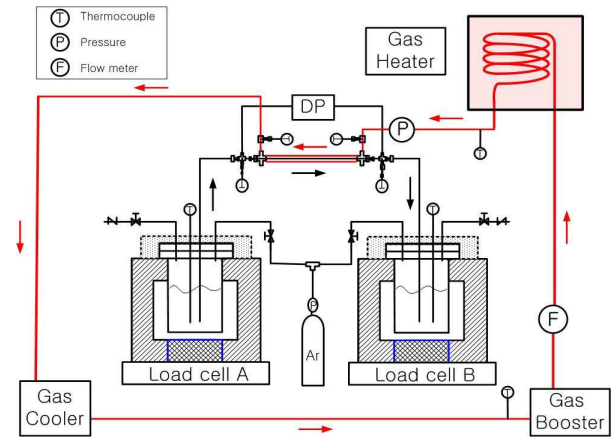


Fig. 3 A schematic diagram of molten salt-gas heat exchange loop

Molten salt 와 가스(helium 또는 argon)간의 열교환을 위해 작은 직경의 원형 튜브를 이용하여 이중관식 열교환기를 제작하였다. 고온, 고압 실험조건에 대비해 튜브와 튜브피팅은 Inconel 600 재질을 사용하였다. 이중관식 열교환기의 길이는 500 mm 이고, 내부 관은 외경 3.18 mm, 내경 1.40 mm 튜브를 사용하였고, 외부 관은 외경 6.35 mm, 내경 4.57 mm 튜브를 사용하였다. 이중관식 열교환기 내부 관에는 molten salt 가 흐르고 내부 관과 외부 관 사이 0.7 mm 간격의 환상공간에는 가스가 흐른다.

두 가지 열교환 유체의 입·출구 온도를 측정하고 molten salt 의 입구에서 출구까지의 압력손실을 측정하여 1.4 mm 내경 세관에서 molten salt 의 유동과 열전달 특성을 확인하고자 하였다. 온도는 Inconel-sheathed K-type 열전대를 이용하여 측정하였다.

가스 루프는 열교환기에 고온의 helium 또는 argon 을 공급할 수 있도록 제작하였다. 가스 루프는 가스 부스터와 가스 가열용 전기로, coriolis-type 유량계, 가스 냉각기로 구성하였고 고온(< 950°C), 고압(< 7 MPa) 상태에서 운전가능하도록 설계되었다. 모든 온도, 압력, 유량 데이터는 National Instrument 사의 Labview 를 사용하여 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

Flinak 은 LiF 와 NaF, KF 의 혼합물이다. 각 구성 salt 의 몰(mole)비는 46.5%, 11.5%, 42.0%이고, 질량비는 29.2%, 11.7%, 59.1%이다. 실험에 사용한

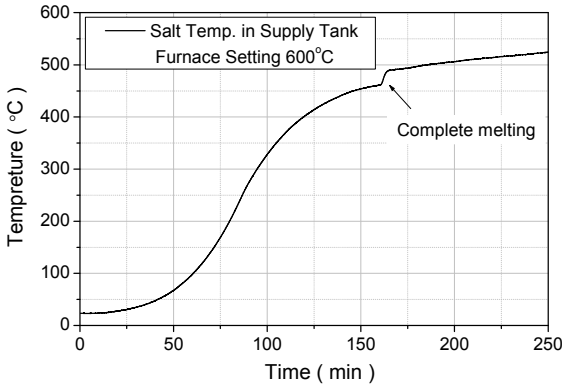


Fig. 4 Flinak temperature trace during melting

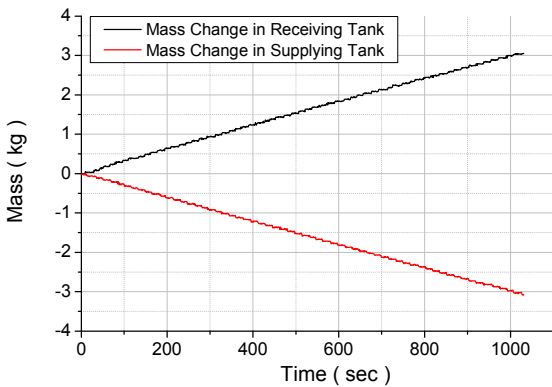


Fig. 5 Mass changes of supplying and receiving crucibles used for Flinak flow rate measurement

Flinak 은 세 가지 분말형태의 salt 를 수분과 산소가 제거된 비활성상태의 glove box 에서 질량비에 맞추어 혼합한 뒤 Inconel 600 용기에 담아 전기로에 장착시켰다. Flinak 의 최초 용융은 성공적으로 진행되었고, Fig. 4 에 보이는 것처럼 salt 의 용융 온도를 확인할 수 있었다. 용융된 salt 는 Inconel 용기 내에서 응고되었다가 차후 실험을 수행할 때 다시 용융시켜 사용하였다. 용기 내부 salt 의 가열 및 용융 시 전형적인 온도 상승 형태는 Fig. 4 와 같으며, 보고된 용융점 454 °C 에서 용융에 따른 온도 변화가 관찰된다.

Molten salt 의 유량은 각 Inconel 용기의 무게 변화를 측정하여 유량으로 환산하였다. Supplying tank 와 receiving tank 의 무게 변화가 동일하다는 것을 Fig. 5 를 통해 알 수 있다. 유량 측정의 정확도를 높이기 위해 load cell 신호를 curve fitting 하여 시간에 따른 유량을 구하였다.

본 실험에서 가스 측은 helium 대신 argon 가스를 사용하여 실험을 하였다. 그리고 molten salt 의 입구 온도 범위는 500~650°C, argon 가스의 입구

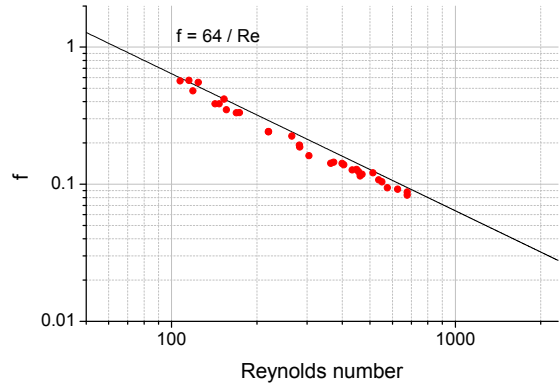


Fig. 6 Measured friction factors of Flinak flow in 1.4 mm inner-diameter round tube and comparison with the theoretical laminar flow relation

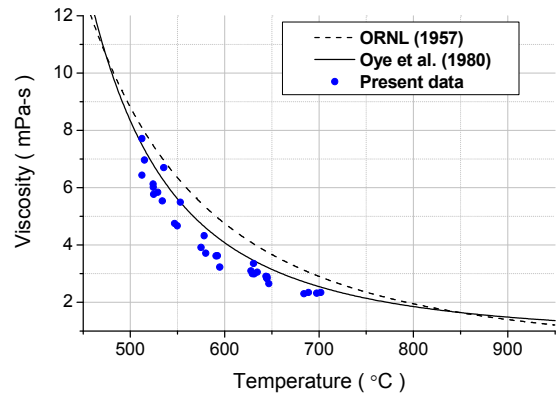


Fig. 7 Comparison of deduced viscosity from measured pressure drop and existing viscosity correlations

온도 범위는 620~665 °C 이다.

3.1 층류유동에서 Flinak 의 마찰계수

Flinak 유동의 마찰계수 측정 실험은 내경 1.4 mm 튜브 기준으로 층류유동 범위인 Reynolds 수 100~700 에서 수행하였다. 현재 실험장치에서 압력손실 측정은 Fig. 3 에 나타낸 것과 같이 시험부 입·출구에 차압계를 연결하여 측정하였다. 이러한 측정 방식은 salt 가 테스트 튜브를 흐를 때 시험부와 차압계를 연결하는 차압측정 라인에 salt 가 올라와 차압측정에 오차를 발생시키는 문제점이 있다. 이 문제점을 해결하기 위하여 salt 가 차압측정 라인에 얼마나 올라오는지 확인해 볼 필요가 있었다. 마찰계수 측정 실험을 하는 동안 차압 라인에 올라온 salt 의 높이를 확인하여 salt 가 올라온 만큼의 압력을 차압계 측정치에 보상하였다.

Flinak 의 점도에 관한 자료는 Oak Ridge National Laboratory(ORNL) 데이터⁽⁶⁾와 Oye⁽⁷⁾에 의하여 측정

된 자료가 있다. 본 실험에서 사용한 점도는 더 최근에 측정된 Oye 의 데이터를 사용하였다. Oye 상관식을 사용하여 온도에 따른 Flinak 의 점도를 사용하여 아래 식에 의해 마찰계수를 계산하였다.

$$\Delta P = f \frac{L G^2}{d 2 \rho} \quad (1)$$

측정한 마찰계수를 층류영역에서 이론 상관식인 $64/Re$ 와 비교하여 Fig. 6 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 실험 결과는 원형관 층류유동에 대한 이론 상관식과 비교적 잘 일치하였으나 -23~+7%의 오차를 보였다.

이러한 오차의 원인으로 Flinak 점도의 부정확성을 고려할 수 있다. 그래서 측정한 압력손실 값을 이용하여 역으로 Flinak 의 점도를 계산해보았다. 계산한 점도 값과 ORNL 상관식 및 Oye 상관식을 비교한 내용을 Fig. 7 에 나타내었다. 500°C 이상의 고온 액체의 점도를 측정할 경우라 기존 상관식을 만든 데이터도 오차를 보인다. ORNL 의 점도 데이터의 경우 $\pm 10\%$ 의 오차를 가지며 Oye 의 점도 데이터는 0.5~1%의 표준편차를 가진다. 따라서 본 실험에서 측정한 점도로 새로운 상관식의 제시가 가능하다. 참고로 기존의 점도 상관식은 고온용 점도계를 이용하여 측정한 경우이다.

3.2 층류유동에서 Flinak 의 열전달계수

열전달 실험은 이중관식 열교환기를 사용하여 수행하였다. 대향류에서 두 작동유체의 입·출구 온도는 Fig. 8 과 같다. 초기 실험에서 고온 가스측의 주변에 의한 열손실이 너무 커서 가스의 출구온도가 molten salt 의 입구온도보다 낮게 측정되었다. 그래서 시험부의 단열을 보강하고 heating jacket 으로 감싸 고온환경을 조성하였다. 단열을 보강하여 열손실은 줄어들었고 측정온도는 Fig. 8 과 같이 물리적으로 타당한 범위에 들었다.

그러나 본 실험이 고온 실험인 관계로 가스 측의 열손실은 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 무시할 수 있는 양은 아니었다. 이론적으로는 고온의 가스 측이 잃는 열량이 Flinak 이 얻는 열량과 같아야 하나 여전히 가스 측의 주변에 의한 열손실이 있었다. 대수평균 온도차 방법 등 열교환기 해석 방법을 통해 관 내부 Flinak 의 열전달계수를 산출하기 위해서는 열손실을 고려한 열교환기 해석 방법이 필요하였다.

각 유체의 열평형은 유량과 입·출구의 온도차를 이용하여 다음과 같다.

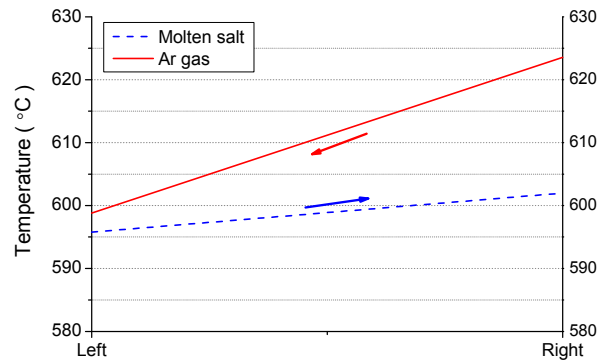


Fig. 8 Illustration of inlet and outlet temperatures in counter flow heat exchanger

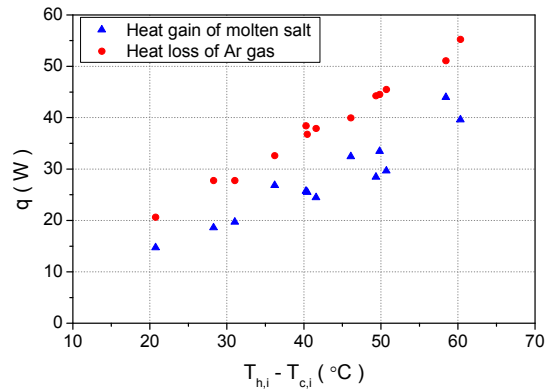


Fig. 9 Differences between heat gain and heat loss indicating the amount of energy loss to the surroundings

$$q_{MS} = \dot{m} c_p (T_o - T_i)_{MS} \quad (2)$$

$$q_G = \dot{m} c_p (T_i - T_o)_G \quad (3)$$

Molten salt 는 이중관식 열교환기 중 내부 관에 흐르기 때문에 주변에 의한 열손실은 무시할 수 있을 만큼 작다. 이 가정을 기반으로 실제 열교환량은 molten salt 측의 열취득량으로 하였다. 그러나 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 열손실이 상당히 크기 때문에 Flinak 측 열전달계수를 구하는데 있어서 열손실을 고려해 주어야 한다.

만약 열손실을 무시할 수 있고 두 유체간의 에너지 보존이 성립되면 열전달량은 대수평균온도차를 이용하여 구할 수 있다. 대향류에서,⁽⁸⁾

$$q = UA \Delta T_{LM} \quad (4)$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (5)$$

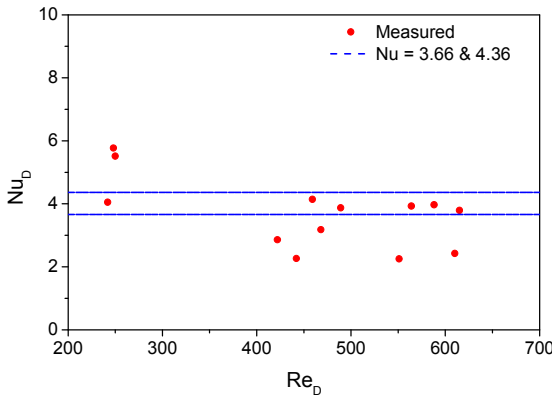


Fig. 10 Measured Nu numbers of Flinak flow in 1.4 mm inner-diameter round tube

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(hA)_{MS}} + R_w + \frac{1}{(hA)_G} \quad (6)$$

그러나 본 실험의 경우 주변에 의한 열손실이 크기 때문에 열손실을 고려한 온도차 관계식을 구성해 보았다. 만약 열손실이 열교환기에 따라 일정하다고 가정하면, 대향류에서 각 유체의 열평형식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dq = -\dot{m}_h c_{p,h} dT_h - dq_{loss} = -C_h dT_h - dq_{loss} \quad (7)$$

$$dq = -\dot{m}_c c_{p,c} dT_c = -C_c dT_c \quad (8)$$

열전달량 또한 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dq = U(T_h - T_c)dA = U\Delta T dA \quad (9)$$

식 (7), (8), (9)를 결합시키면 온도차에 대한 1 차 미분식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d(\Delta T)}{dx} + P(\Delta T) = r \quad (10)$$

$$\text{where, } P = U(\pi d_o) \left(\frac{1}{C_h} - \frac{1}{C_c} \right), \quad r = -\frac{dq_{loss}}{C_h}$$

따라서 미분방정식 식 (10)의 해를 구하면 ΔT_1 과 ΔT_2 의 관계를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta T_1 e^{-PL} = \Delta T_2 - \frac{r}{P}(1 - e^{-PL}) \quad (11)$$

실험에서 측정된 입출구 온도 및 열교환량, 열손실량 데이터를 이용하여 식 (11)에서 P 값을 구

하고 식 (10)의 P 관계식에서 총괄열전달계수 U를 구한다. Flinak 측 대류열전달계수를 구하기 위해서는 환상공간의 가스 유동에 대한 대류열전달계수 값이 필요하다. 본 실험조건의 환상공간에서 가스 유동은 난류유동이며 따라서 Gnielinski 상관식을 사용하였다.⁽⁸⁾

이와 같은 방법으로 산출된 Flinak의 Nusselt 수를 Fig. 10에 표시하였다. 층류 완전발달 영역에서 원형관의 경우 Nusselt 수는 벽온도가 일정할 경우 3.66, 열유속이 일정할 경우 4.36이다. 고온 실험에 따른 오차들이 많아 비록 실험값이 흩어져 있지만 측정값이 일반적으로 층류 유동의 이론값에 근접해 있음을 볼 수 있었다.

4. 결론

초고온원자로(VHTR)의 중간열수송루프 작동유체로 성능이 우수한 Flinak 용융염에 대한 세관에서의 열수력학적 특성 실험을 수행하였다. 우선 3가지 salt를 혼합한 공용점 454°C의 Flinak 용융염을 사용한 열수력 실험장치 구축 및 실험을 성공적으로 수행하였다. 초고온원자로 중간열교환기 설계에 필요한 미세 채널에서의 Flinak의 열수력학적 특성을 확인하기 위하여 내경 1.4 mm의 원형관에서 층류 유동일 때 Flinak의 마찰계수는 $64/Re$ 관계식에 -23~+7%의 오차범위에서 일치하였다. 또한 열전달 실험에서 측정된 Nusselt 수는 비록 고온 조건으로 인해 측정오차가 있지만 일반적으로 3.66에서 4.36 범위에 있는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국연구재단 원자력기초공동연구소(BAERI) 사업 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Peterson, P. F., Zhao, H. and Fukuda, G., 2005, "Functional Requirements Overview for a 50 MW(t) Liquid-Salt Intermediate Loop for NNGP," UC Berkeley Report UCBTH-05-007.
- (2) Forsberg, C. W. et al., 2008, "Safety Related Physical Phenomena for Coupled High-Temperature Reactors and Hydrogen Production Facilities," Proc. 4th Int. Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR2008), Washington, DC, USA.

- (3) Zwaan, S. J. et al., 2007, "Static Design of a Liquid-Salt-Cooled Pebble Bed Reactor (LSPBR)," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 34, pp. 83~92.
- (4) Williams, D. F., Toth, L. M. and Clarno, K. T., 2006, "Assessment of Candidate Molten Salt Coolants for the Advanced High-Temperature Reactor," Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-2006/12.
- (5) Bang, K.H. and B.W. Lee, 2010, Korea Patent No. 10-0937227.
- (6) Cohen, S. I. and Jones, T. N., 1957, "Viscosity Measurements on Molten Fluoride Mixtures," ORNL-2278, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- (7) Torklep, K. and Oye, H. A., 1980, "Viscosity of Eutectic LiF-NaF-KF," *J. Chem. Eng. Data* 25, p. 16.
- (8) Kakac, S. and Liu, H., Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design, CRC Press.