

## 하나로 냉중성자원 감속재의 냉각에 대한 연구

박국남\*, 박종학\*\*, 조만순\*, 최창웅\*, 유성연\*\*

\*: 한국원자력연구소 냉중성자원과제, \*\*: 충남대학교 기계설계공학과

### (A Study on Cooling of the CNS Moderator in HANARO)

K.N. Park\*, J.H. Park\*\*, M.S. Cho\*, C.O. Choi\*, S.Y. Yoo\*\*

\*: Korea Atomic Energy Research Institute, \*\*: Chungnam Nat. Univ.

knpark@nanum.kaeri.re.kr

**Abstract** - Cold Neutron Source(CNS) facility comprises moderator circulation system, helium cooling system, neutron guide and auxiliary systems. To increase the amount of cold neutron, the thermal neutron should pass cold moderator at cryogenic temperature. As cold moderator in Hanaro, the liquid hydrogen or liquid deuterium will be used and the temperature in operation will be maintained to be 250°C below zero. To maintain the moderator at this cryogenic temperature, He refrigerator is used to cool it down in thermosiphon having natural circulation. As a part of the conceptual design of Hanaro CNS, study on the characteristics of moderators, design of moderator chamber and cooling method were done through the collaboration of Korea Atomic Energy Research Institute and Petersburg Nuclear Physics Institute. During the collaboration, a program for the design of moderator cooling system were developed in cooperative work. The study described in this report was performed with the emphases on the understanding of the CNS cooling system design concept through the parametric study using this program. In the parametric study, the effect of the moderator type on the design parameters was investigated. Also, the requirements on the performance test for the cooling system, which will be made before the basic design, were investigated

Å 범위에 있는 중성자를 냉중성자라 한다. 원자로에서 발생하는 열중성자를 극저온 감속재를 통과시켜 냉중성자로 바꾸어 주는 장치를 냉중성자원(Cold Neutron Source : CNS)이라 한다.

이러한 냉중성자의 용도는 미세결정 구조의 측정, 재료내의 열운동 측정, 생체 고분자의 분자·원자 배치의 관찰에 사용되며, 이외에도 중성자 라디오그래피를 이용한 투과 촬영과 즉발 감마선 측정에 의한 원소 및 동위원소의 분석 등 다기능 비파괴 분석을 할 수 있다. : 문헌[1]

하나로에는 중수로 채워진 반사체 탱크내에 설계 초기부터 냉중성자원 설치를 위하여 지름 16cm의 수직홀을 마련하였다. 이곳에 설치될 냉중성자원의 개념도는 Fig. 1과 같다. : 문헌[2]

하나로 냉중성자원 감속재의 냉각방식으로는 열사이펀 방식을 채택하였으며 특히, 이 방법은 감속재가 자연순환하기 때문에 별도의 동력이 필요없다. 열사이펀 루프는 감속재가 들어있는 감속재용기와 헬륨냉동기로부터 공급되는 헬륨으로 감속재의 열을 제거시켜 주는 열교환기, 그리고 감속재용기와 열교환기를 연결시켜 주는 연결튜브로 이루어져 있다. 감속재는 열사이펀 원리에 의해 열교환기를 통해 루프를 순환하고, 이 과정에서 열중성자로 인해 발생하는 열이 제거됨으로써 냉중성자의 추출이 가능하다.

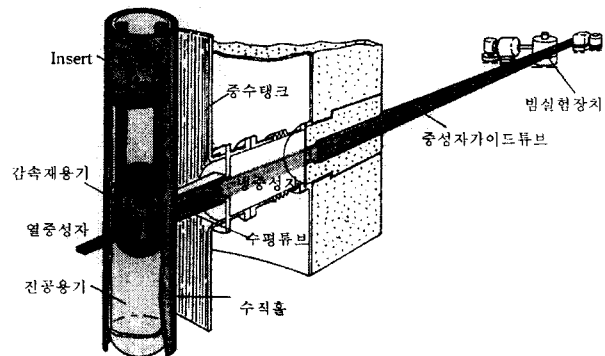


Fig. 1 Cold Neutron Source

## 1. 서 론

에너지가 5meV 이하이며 파장이 4 내지 30

본 연구에서는 하나로에 설치될 냉중성자원에서 열중성자를 냉중성자로 변화시키는데 필요한 냉각계통에 대한 개념설계가 수행되었고 그 과정에서 제열계통의 설계에 사용되는 프로그램이 작성되었다. 이 프로그램을 이용하여 설계 변수에 따른 열교환기 입·출구에서의 감속재와 헬륨의 온도, 열전달계수 등의 계통 변수를 고찰하였다.

## 2. 냉각 계통의 설계

일반적으로 많은 냉중성자원에서 이상(two-phase)의 열사이편 루프가 냉각에 사용되었는데, 이 방식을 채택하는 경우에 감속재에서 발생하는 열은 감속재의 비등에 의해서 제거된다. 그런데, 하나로의 냉중성자원에서는 단상의 열사이편 방식을 채택하는 것이 검토되었고 열사이편을 단상으로 유지하려면 감속재용기에서의 감속재의 순환온도는 감속재 자체의 비등점보다 낮아야 하고 빙점 온도보다 높아야 한다.

냉중성자원에서의 열은 감속재와 감속재용기 및 연결튜브, 중성자빔 가이드 수평관부에서의 열중성자의 포획과 감속, 원자로심으로부터의 핵분열에 따른 감마선과 베타선으로 인하여 발생된다.

### 2.1 열사이편루프의 최소지름 결정

루프내에는 감속재의 밀도차 때문에 생기는 부력에 의한 감속재 유동이 존재한다. 열교환기 내부와 열교환기 출구에서의 감속재 밀도는 감속재용기 내에서 가열되어 온도가 상대적으로 높은 열교환기 입구쪽 감속재 밀도가 열교환기의 내부와 출구에서의 밀도보다 낮다. 루프에서의 마찰저항이 수직 루프 찬부분과 뜨거운 부분에서의 밀도차에 의한 구동력이 같을 때 감속재 순환이 발생된다.

순환력과 저항력이 같다고 할 때 Darcy-Weisbach 방정식은 다음과 같다. 열교환기에서의 마찰도 루프 파이프의 상당길이로 나타내고,  $\Delta P$ 를 열교환기의 수력저항이라 할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \Delta \rho gh = \xi \frac{\rho V^2}{2} \frac{l}{d} \quad (1)$$

여기서,  $l$ 을 계산 루프길이라면 마찰계수  $\xi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (2)$$

감속재의 질량유속은 다음과 같이 열부하와 루프에서의 온도차에 의해서 결정되므로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = c_p m^{H_2} \Delta T^{H_2} \quad (3)$$

식(1),(2)을 사용하여 루프에서의 감속재 속도를 구할 수 있고,

$$V = \left[ \frac{\Delta \rho gh d^{1.25}}{0.158 \eta^{0.25} \rho^{0.75} l_p} \right]^{0.571} \quad (4)$$

냉·온부분에서의 감속재온도차는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta T^{H_2} = \frac{0.12 Q \eta^{0.143}}{c_p \rho^{0.572} \Delta \rho^{0.571} d^{2.713}} \left( \frac{l_p}{h} \right)^{0.571} \quad (5)$$

식(5)로부터 최대 열부하( $Q_{max}$ )에서의 루프 파이프의 최소지름을 구할 수 있다.

$$d_{min} = \left( \frac{0.12 Q_{max} \eta^{0.143} (l_p/h)^{0.571}}{c_p \rho^{0.572} \Delta \rho^{0.571} \Delta T^{H_2}} \right)^{0.368} \quad (6)$$

열부하  $Q_{max}$ 에 대한 최소지름  $d_{min}$ 은 액체 수소와 열교환기 내에서의 냉동헬륨의 열교환에 따라서 결정되는 수소 온도차  $\Delta T^{H_2}$ 와 평균 수소온도를 이용하여 구할 수 있다. : 문헌[3]

## 2.2 열교환기의 설계계산

### 2.2.1 열교환기에서의 온도차

Fig 2와 같은 열교환기에서의 향류에 대한 온도분포에서 대수평균 온도차는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_{\sigma} - \Delta T_M}{\ln(\Delta T_{\sigma} / \Delta T_M)} \quad (7)$$

여기서,

$$\Delta T_{\sigma} = T_2^{H_2} - T_2^{He}$$

$$\Delta T_M = T_1^{H_2} - T_1^{He}$$

향류형 열교환기에서의 수소의 온도차는 아래와 같이 결정된다.

$$\Delta T^{H_2} = T_2^{H_2} - T_1^{H_2} + \Delta T_{cp} \quad (8)$$

열교환기에서의 수소의 대수평균온도는  $\Delta T^{He} = \Delta T^{H_2}$ 일 때, 다음 관계가 성립한다. : 문헌[4]

$$T_{cp}^{H_2} = 0.5 (T_2^{H_2} + T_1^{He} + \Delta T_{cp}) \quad (9)$$

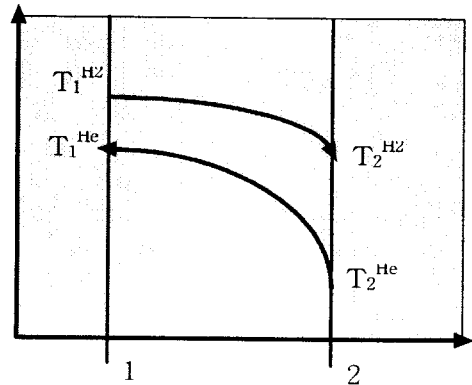


Fig. 2 Counter Flow Heat Exchanger

$$Nu = 0.195 Re^{0.6} Pr^{0.3} \quad (15)$$

### 2.2.2 열교환기에서의 총합열전달계수 계산

열교환기의 설계에 있어 열교환기 입·출구에 서의 온도차가 최대가 되도록 하여야 하며, 열교환기 내부에서의 압력손실은 최소가 되어야 한다. 또한 이러한 요구를 만족하면서도 크기를 작게 설계하여야 한다.

자연순환 루프에서 이러한 요구사항을 만족하기 위한 최적의 열교환기 구조는 shell & tube 타입이다. 이때 액체 수소는 튜브 안에서 흐르고, 튜브 바깥쪽의 튜브사이 공간에서 헬륨이 흐르게 하여 루프에서 수소 유동저항을 작게 하고 헬륨의 열교환 표면을 크게한다. 열교환을 증가시키기 위하여 튜브 사이의 공간에 격자를 설치하여 헬륨의 유동방향에 변화를 준다.

튜브 바깥지름의 선정에 있어서 튜브격자에서의 튜브배치의 피치를 결정하여야 한다. 튜브 바깥지름과 횡단피치의 비를 이용하여 주어진 공간에 들어가는 튜브의 수를 결정할 수 있다. 필요한 열교환의 열전달 면적에서  $\alpha_1, \alpha_2$ 를 튜브안과 바깥지름에서의 대류 열전달계수,  $d_1, d_2$ 를 튜브 안지름과 바깥지름이라고 할 때 총합열전달계수  $K$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{d_1}{d_2}} \quad (10)$$

### 2.2.3 수소에서의 열전달계수

직관에서 난류유동인 경우에는 Kraussold식 (또는 Dittus와 Boelter의 실험식)을 사용한다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33} \quad (11)$$

이 식의 유효한 범위는  $0.7 < Pr < 120$  ;  $4 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^6$  ;  $1/d > 50$ 이다.

열교환기 튜브 안에서의 수소의 속도는 아래 식에 의해 결정된다.

$$V = \frac{4 m^{H_2}}{\pi d^2 \rho n} \quad (12)$$

열전달계수는 Nusselt number로부터 다음과 같이 계산한다. : 문헌[4]

$$h = Nu \frac{k}{d} \quad (13)$$

### 2.2.4 헬륨에서의 열전달계수

열교환이 잘 이루어지더라도 수력손실이 크면, 열교환 효율이 높다고 할 수 없다. 헬륨계통에서의 수력저항에 대하여 허용치를 설정하고 열교환기 설계를 수행한다. Euler number와 수력저항의 관계는 아래 식과 같다.

$$\Delta P = Eu \frac{\rho V^2}{2} Z \quad (14)$$

Nusselt 수는 다음 식으로 구한다. 문헌 : [5]

이 식과 이미 결정된 튜브의 바깥지름을 이용하여 열전달계수를 구할 수 있다. 헬륨 질량유속은 14K에서 50g/s 이다. 이러한 헬륨 질량유속에 적합한 크기의 열교환기는 주변 홀에 영향을 미치지 않고 원자로 풀내에 위치할 수 있다. 50g/s 정도의 질량유속은 열교환기가 방사선 바깥에 위치해도 충분히 자연순환을 할 만큼의 순환력을 제공한다.

### 2.2.5 루프 냉각부의 높이 계산

루프에서의 순환력은 유체상승부와 하강부에서의 밀도차와 이 밀도차가 있는 범위의 높이에 의해서 결정되는데 경사가 없는 경우에는  $P_{dr} = \Delta \rho gh$  이다. 그러나 루프의 수직부분 즉, 밀도가 변화하는 루프에서 변수  $\Delta \rho$ 와  $h$ 가 부정확하기 때문에  $\rho_{cp}$ 를 중심부 평균밀도,  $\rho_T$ 와  $\rho_X$ 를 열교환기 입·출구 온도에서의 밀도라 할 때 순환력을 열교환기 중간높이 부분에서의 순환력으로 계산하여

$$P_{ABT/O} = (\rho_{cp} - \rho_T) g h_{T/O}$$

밀도차가  $\Delta \rho = \rho_X - \rho_T$ 인 루프에서의 평균순환력은 아래와 같고

$$P_{ABT/O} = \Delta \rho g \frac{h_{T/O}}{2}$$

루프에서의 총순환력은 다음과 같다. : 문헌[4]

$$P_{AB} = \Delta \rho g \left( h_X + \frac{h_{T/O}}{2} \right) \quad (16)$$

## 3. 열사이편 루프의 운전해석

열사이편 루프의 구조는 Fig. 3과 같으며 열사이편의 설계 해석은 컴퓨터 프로그램에 의해서 이루어졌다. 이 설계해석 프로그램에 대한 입력값으로는 감속재의 종류, 열사이편내 열교환기의 형태, 감속재용기에서의 열부하, 헬륨의 질량유속 및 입구온도, 감속재의 입구온도 등이 사용된다.

하나로 냉중성자원 열사이편은 열교환기, 감속재용기, 그리고 감속재용기와 열교환기를 연결하는 단열튜브로 이루어진다. 감속재에서의 발생열량으로는 열적 여유도를 고려하여 1,000W를 사용하였다.

열교환기를 방사선구역 바깥쪽에 설치할 목적으로 열교환기 아래의 열사이편 튜브 길이를 1.3 m로 정하였다.

헬륨 질량유속은 헬륨냉동기의 용량과 열교환기가 주변 홀에 영향을 미치지 않고 원자로 풀내에 위치하도록 하는 것을 고려하여 결정되어야 하는데, 이를 위하여 14K에서 50g/s로 정하였다.

하나로 냉중성자원에서도 향류형 열교환기가 더 적합하다. 설치 공간을 고려하여 향류형 열교환기의 길이는 1.2m이고 지름은 112mm로 정

하였고, 이 때 필요한 열사이펀 튜브의 최소지름은 28mm가 된다. 최소지름에서 액체 수소는 감속재용기가 가열된 후 비등점에 가까운 온도가 되므로 액체수소가 비등하지 않도록 열사이펀 용량을 증가시키고 감속재 온도를 감소시키기 위해 내부 튜브의 지름을 30mm로 선정했다.

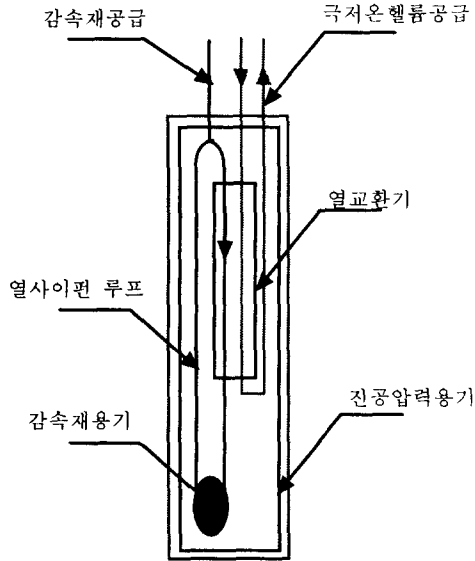


Fig. 3 Thermosiphon Loop

액체 수소와 액체 중수소를 감속재로 사용하는 경우에 감속재의 운전범위를 살펴보았다. 열부하가 700W에서부터 1,500W까지 변할 때, 감속재로 수소를 사용하는 경우의 운전범위는 Fig. 4와 같다. 50g/s의 질량유속에 사용되는 극저온냉동기의 평균용량은 20K에서 헬륨이 순환할 때 약 1,500W이다. 수소를 감속재로 사용할 때 열교환기 입구에서의 헬륨온도는 14K로 일정하고, 열부하의 증가에 따라 수소의 온도도 상승한다. 700W에서 수소의 출구온도는 15.7K로 빙점인 13.9K보다 높아 정상적인 운전이 가능하고 1,500W일 때, 감속재의 온도는 21.5K까지 올라간다. 이것은 대기압에서 비등점에 가깝지만 감속재는 더 높은 압력으로 유지되므로 비등점이 더 높아져 비등은 발생되지 않는다. 즉, 수소는 0.158Mpa의 압력하에서 22K에 도달했을 때 비등이 발생되므로 단상유동의 열사이펀이 유지된다. 1,000W의 열부하에서는 14K의 헬륨이 열교환기 유동 중에 17.8K로 되면서 19.7K의 수소를 16.5K로 냉각시킨다.

중수소의 경우, 열부하가 700W인 경우에 열교환기를 거친 중수소 온도는 18.7K로 빙점 이하이므로 운전이 불가하지만 출구에서의 중수소의 온도가 빙점이상인 800W에서부터는 운전이 가능하며, 1,500W에서 중수소 온도는 24.5K까지 상승한다. 비등온도가 24.5K가 되는 경우는 중수소의 압력이 0.131Mpa인 경우이나, 감속재의 압력은 이보다 높으므로 열사이펀에서 비등이 없는 단상유동이 가능하다. 열부하 1,000W에서 17K의

헬륨이 20.8K로 되면서 22.3K의 중수소를 19.5K로 냉각시킬 수 있다.

열부하의 변화에 따른 수소, 중수소 감속재의 평균온도를 Fig. 5에 나타냈다. 열부하 1,000W에서 수소의 평균온도는 18.1K이고 중수소의 평균온도는 21K이다. 따라서, 수소의 평균온도보다 중수소의 평균온도가 2.9K정도 높음을 알 수 있다.

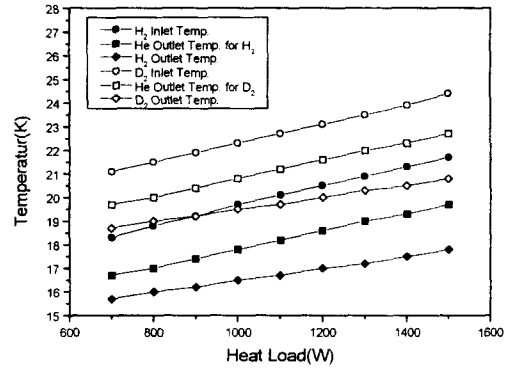


Fig. 4 Hydrogen and helium temperature in the inlet and outlet of heat exchanger

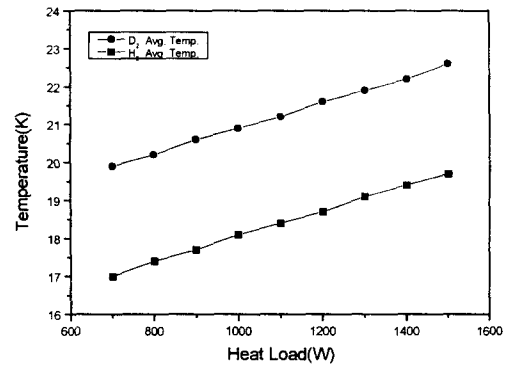


Fig. 5 Hydrogen-deuterium average temperature in the thermosiphon

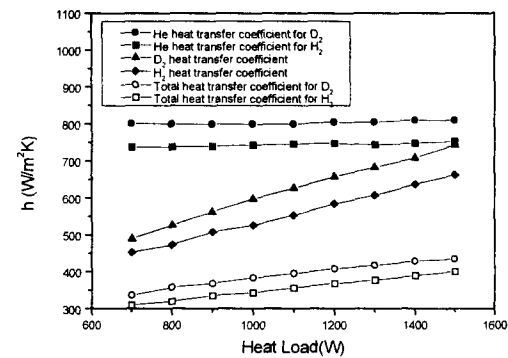


Fig. 6 Heat transfer coefficient of hydrogen-deuterium in the heat exchanger

Fig. 6은 열교환기에서의 헬륨, 감속재의 열전달계수와 총합열전달계수를 보여준다. 헬륨의 열전달계수, 감속재의 열전달계수, 총합열전달계수(overall heat transfer coefficient) 순서로 낮았다. 열교환기 내부로 흐르는 헬륨의 유량은 일정하기 때문에 열부하와 상관없이 헬륨의 열전달계수는 거의 일정하게 유지되나, 열부하가 커질수록 감속재의 자연순환 구동력이 커지므로 감속재의 유량이 증가하여 감속재의 열전달계수는 상승하였다. 1,000 W의 열부하에서 수소의 열전달계수는  $526\text{W/m}^2\text{K}$  중수소의 열전달계수는  $597\text{W/m}^2\text{K}$ 로 수소에 비해 중수소의 열전달계수가 높았다.

#### 4. 결 론

하나로 냉중성자원에서는 열중성자 등에 의해 열부하가 발생되는데, 열사이편 루프 내에서 순환하는 감속재를 극저온 헬륨이 흐르는 열교환기로 냉각시켜 냉중성자로 만들어 준다.

본 연구에서는 이러한 열사이편 계통의 재질의 선정 및 치수 결정에 대한 연구를 수행하였고, 열사이편의 운전해석 프로그램을 작성하였으며 열부하에 따라 액체 수소, 액체 중수소 각각을 감속재로 사용했을 때 열교환기에서의 감속재의 입·출구온도, 헬륨의 입·출구온도 및 열전달계수를 예측하였다. 이를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열사이편 계통의 튜브지름은 계산에 의한 최소 지름에 여유를 주어 30mm로 하는 것이 적절하고, 루프의 높이는 2.5m로 하였고, 열교환기의 형상 계산을 통해서 얻어진 결과로 열교환기 내에서의 튜브의 수는 61개, 열교환기 내의 감속재 튜브의 안지름은 6mm이고 튜브 사이의 피치는 약 11mm, 플레이트 사이의 거리는 71mm로하였다. 그리고, 열교환기의 유동형태는 냉각효율을 최대화하기 위하여 향류유동으로 하였다.
- 2) 운전해석 프로그램을 이용한 계산결과, 헬륨의 질량유량 50g/s, 추정된 열부하 1,000W에서 감속재인 액체 수소와 액체 중수소 각각의 운전조건에서 단상으로 운전됨을 알 수 있었으며, 열부하가 1,000W를 벗어나더라도 상당히 넓은 범위에서 단상을 유지하며 운전될 수 있음을 알았다.
- 3) 열사이편 계통 내의 감속재의 평균온도는 수소를 사용할 때보다 중수소를 사용할 때에 약 2.9K 정도 높았다.

**Acknowledgement** : 본 연구는 원자력연구개발 중장기계획사업에 의해서 수행되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 熊井敏夫, "JCNS의 설계와 운전 실적", pp4-10, pp13-25, pp51-59 (1994)
- [2] "냉중성자원 개발" KAERI/RR-1728 /96, pp 94-129, pp329-339 (1997)
- [3] A.P. Serebrov, A.F. Schebetov, V.A. Mityukhlyev, A.A. Zakharov "Hanaro cold neutron source interim report", HCNS-CD55064., St-Petersburg Vol.1 Appendix 2, Vol. 2 pp9-31 (1997)
- [4] I.S. Altarev, K.A. Konoplov, V.A. Mityukhlyev, A.P. Serebrov A.A. Zakharov "Universal cold and ultra cold neutron source at PIK reactor-The determination of heat and hydraulic characteristics of the cryogenic circulation source contour" pp12-26 (1991)
- [5] Heat exchanger design handbook, Vol.2, Single phase fluid flow pp72-80, Hemi-sphere Publishing Corporation
- [6] J. P. HOLMAN "Heat Transfer", pp277-313, pp327-360, pp525-569 Mc Graw-Hill Publishing Company