

하나로 원형 조사공의 안내관 제트유동 억제에 대한 해석

박 용 철^{1*}, 우 상 익²

THE ANALYTIC ANALYSIS OF SUPPRESSING JET FLOW AT GUIDE TUBE OF CIRCULAR IRRADIATION HOLE IN HANARO

Y.C. Park and S.I. Wu

The HANARO, a multi-purpose research reactor of 30 MWth, open-tank-in-pool type, has been under normal operation since its initial criticality in February, 1995. The HANARO is composed of inlet plenum, grid plate, core channel with flow tubes and chimney. The reactor core channel is located at about twelve meters (12 m) depth of the reactor pool and cooled by the upward flow that the coolant enters the lower inlet of the plenum, rises up through the grid plate and the core channel and comes out from the outlet of chimney. A fission moly guide tube is extended from the reactor core to the top of the reactor chimney for easily loading a fission moly target under the reactor normal operation. But active coolant through the core can be quickly raised up to the top of the chimney through the guide tube by jet flow. This paper describes an analytical analysis that is the study of the flow behavior through the guide tube under reactor normal operation and unloading the target. As results, it was conformed through the analysis results that the flow rate, reduced to about fourteen kilogram per second (14 kg/s) from the original flow rate of sixteen point three kilogram per second (16.3 kg/s) did not show the guide tube jet.

Key Words: 하나로(HANARO), 안내관(Guide Tube), 제트유동(Jet Flow), 표적취급장치(Target Handling Tool), 원형 유동관(Circular Flow Tube)

1. 서 론

30 MWth의 개방수조형 다목적 연구로인 하나로[1]는 1995년 2월에 초임계에 도달한 이후 정상적으로 가동되고 있다. Fission Mo-99는 의료용 방사성 동위원소인 Tc-99m의 모 핵종(mother nuclide)으로 U-235의 핵분열에 의해 생성된다. 이를 하나로에서 생산하기 위해 표적취급장치를 개발하고 있다.

Fission moly를 생산하기 위해서는 원자로 운전 중에 방사선을 조사(irradiation)하여야 하고, 조사 후에는 표적을 인출하여야 한다. 그리고 하나로 노심이 약 12 m 깊이에 있어 표적의 장전과 인출을 쉽게 하기 위해 안내관(guide

tube)이 조사공(irradiation hole)에서 침니상부까지 연장되어 야 한다.

그러나 하나로 노심은 상향유동으로 냉각되므로 표적을 장전 인출하는 경우 조사공이 비워지면 안내관은 방사선을 띤 냉각수를 수조 상부로 유인하여 솟구치게 하는 안내관 제트유동의 유로가 될 수 있다. 안내관 제트유동의 분출을 억제하기 위해서는 안내관이 수조수와 통할 수 있는 개도율을 높여 상부로 향하기 전에 측면 개구부를 통해 흐르게 하는 방법과 냉각수 유로 상에 적절한 차압을 유발하여 유량을 적게 함으로서 제트유동을 안내관 내에서 소멸시키는 방법이 있다.

전자의 경우, 안내관은 길이가 3 m이고, 개도율이 약 30%이므로 구조적 안정성의 한계로 개도율을 지나치게 높일 수 없다. 후자의 경우, 노심 유량을 조절하기 위해 노심하부에 유량조절 오리피스가 설치되므로 이를 개조하여 차압을 유발하고, 이 차압으로 유량을 줄여 안내관 제트유

접수일: 2004년 3월24일, 심사완료일: 2004년 5월10일.

1 비회원, 한국원자력연구소 연구로계통관리

2 정회원, 한국원자력연구소 중성자조사기술

* Corresponding author E-mail: ycpark@kaeri.re.kr

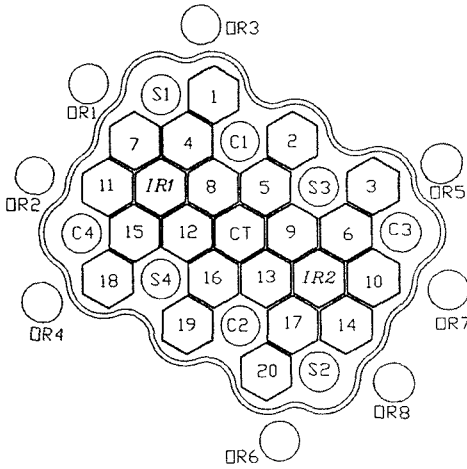


Fig. 1 Plan view of HANARO core

동을 소멸시킬 수 있을 것이다.

본 논문에서는 후자의 방법에 따라 전산유체해석 기법을 이용하여 안내관 제트유동이 안내관 내에서 소멸될 수 있는 안전한 유량을 구하였다.

2. 하나로의 표적취급장치

Fission moly 표적은 중성자 속(neutron flux)에 따라 Fig. 1과 같이 외부노심의 원형 조사공인 OR5에 장전된다. 이 노심은 약 12 m의 수중에 있다. 냉각수 순환펌프가 냉각수를 가압하여 Fig. 2와 같이 냉각수의 90%인 노심냉각수가 하부유입구(inlet plenum), 노심채널(core flow channel), 침니(chimney)를 거쳐 침니하부에 있는 출구를 통해 순환하며 핵반응 중에 발생한 열을 냉각한다. 나머지 냉각수인 노심우회유량은 침니상부를 통해 유입되어 순환펌프의 흡입력에 의해 침니하부 출구로 유출된다. 이 흐름 방향이 노심유량과 반대이므로 노심채널을 지난 냉각수의 제트유동을 억제하여 하나로 수조상부의 방사선 준위를 억제한다[2,3].

OR5 조사공 안내관은 그림과 같이 하나로에 설치되며 하부와 상부 안내관으로 구성된다. 하부 안내관은 노심채널에 설치되어 표적을 냉각하기 위한 유로를 형성하고, 유체유발진동을 억제하기 위한 지지대 역할을 한다. 상부 안내관은 수조상부에서 표적의 장전과 인출을 용이하게 하기 위해 침니상부로 연장되며 고정장치(OR clamp)에 의해 고정된다.

취급장치는 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 안내관 속에

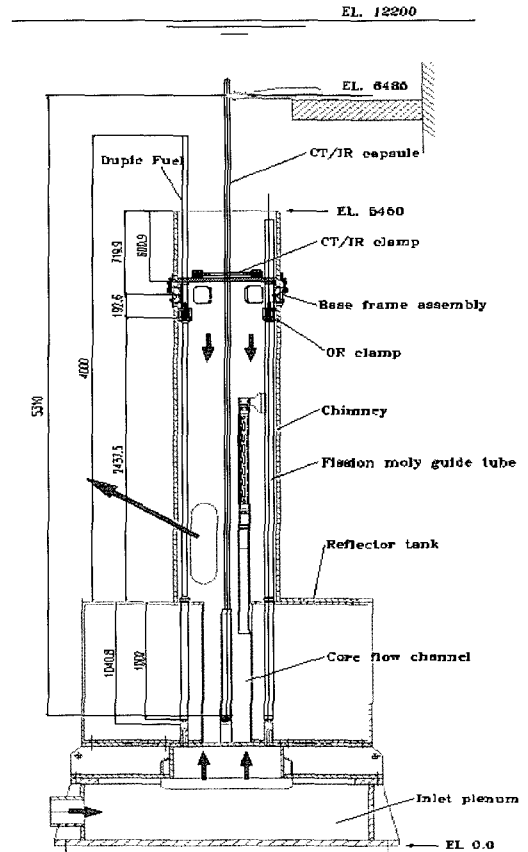


Fig. 2 Installation of fission moly guide tube

설치되며 하부에 표적이 장전된다. 이 표적은 안내관과 2 mm 이상의 간격을 유지하여 표적의 냉각수 유로를 형성한다. 취급장치의 하부에는 표적착탈장치가 있으며 120도 간격으로 3개의 볼이 설치되어 있어 취급장치 상부에서 조작하면 스프링 장력에 의해 표적을 착탈할 수 있다.

취급장치는 반사체 탱크의 상부에 자중으로 고정되도록 되어 있다. 그리고 유체유발진동에 의한 떨림을 방지하기 위해 120도 간격으로 설치된 패드가 취급장치의 상부에 각각 설치되어 안내관과 0.5 mm의 갭을 유지하여 떨림을 최소화한다.

표적은 Fig. 4와 같이 환형이며 알루미늄 내 외피 속에 우라늄이 들어 있다. 이 우라늄과 알루미늄 내 외피 사이에 니켈이 들어 있어 제거 시 분해를 용이하게 한다. 내 외피의 직경은 각각 37.76 mm와 44 mm이며 표적 한 개의 높이는 125 mm이다. Fission moly 표적이 조사된 후에는 하나로가 운전 중이라도 표적을 장전, 인출할 수 있어야 한다.

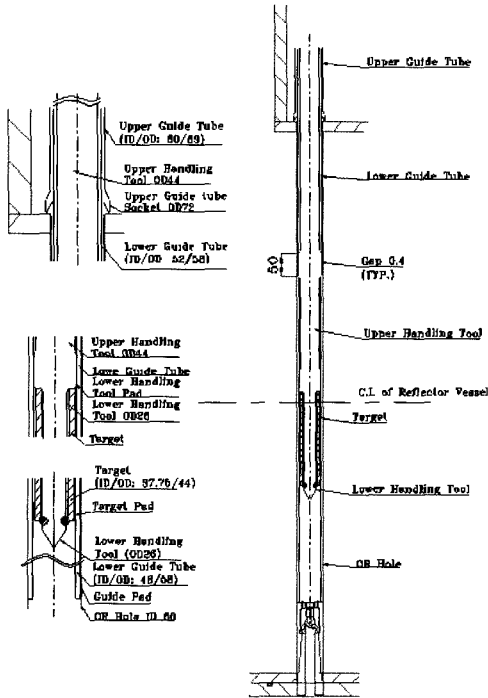
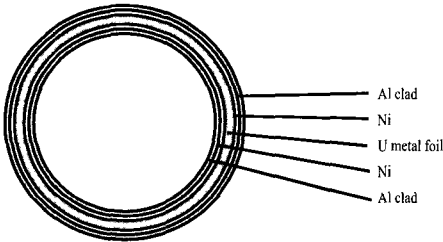


Fig. 3 Assembly of target, handling tool and guide tube



Inner diameter: 37.76 mm
Outer diameter: 44 mm
Height: 125 mm

Fig. 4 Fission moly target

3. 전산유동해석

3.1 지배방정식

냉각수는 비압축성 정상유동으로 가정하고 3차원 유동 해석을 하였다. 이 해석은 Fluent 사의 전산 프로그램을 이용하였으며 연속방정식, 운동량 방정식과 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 만족하여야 한다.

스칼라에 대한 일반 미분방정식은 식 (1)과 같다[4,5].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (1)$$

이때의 연속방정식은 $\Phi=1$, $S_m=0$ 이므로 식 (2)와 같이 표시된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

비압축성 정상유동의 Navier-Stokes 방정식은 ρ 상수, $\Phi = u_i$, $\Gamma = \mu$, $S_m = -\partial P / \partial x + \rho g + Vx$ 이므로 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (3)$$

여기서, u_i 는 유체의 평균유속, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 유체의 층류동점성계수, u'_i 는 유체의 난류섭동성분을 의미한다.

부시네스크 가설 (Boussinesq eddy-viscosity hypothesis)에 의하여 레이놀즈 응력과 난류동점성계수는 식 (4) 및 (5)와 같이 표현된다.

$$\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (5)$$

여기서, k 는 난류운동에너지, ϵ 는 난류소산율, δ_{ij} 는 Kronecker Delta (단위행렬)를 의미한다.

RNG $k-\epsilon$ 난류모델에 관한 운동에너지 및 소산율 전달방정식은 식 (6) 및 (7)과 같다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \right] \quad (6)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - \frac{C_\mu \rho n^3 (1 - \frac{n}{n_0})}{1 + \beta n^3} \frac{\epsilon^3}{k} \quad (7)$$

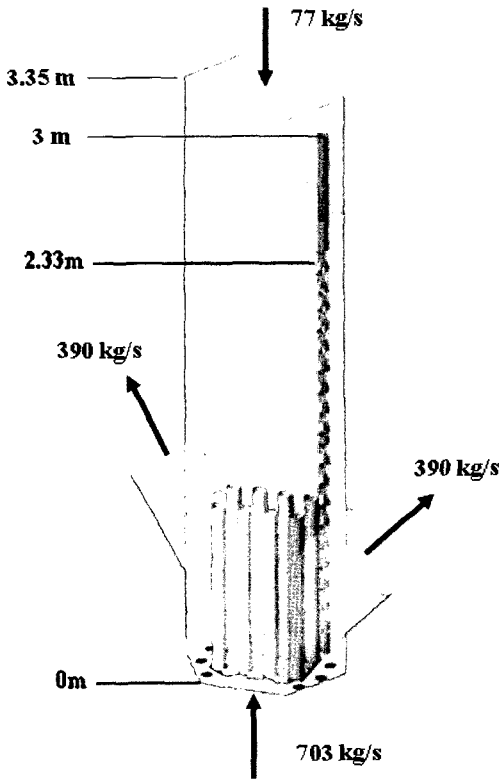


Fig. 5 Analysis model

여기서, G_k 는 평균속도 변화에 의한 난류운동에너지의 생성을 나타내고, G_b 는 부력으로 인한 난류운동에너지의 생성을 나타낸다. 그리고 Y_M 은 압축성 난류에서 전반적인 소산율에 대하여 변동되는 확산의 기여를 나타낸다.

또한 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 및 C_{μ} 는 상수이고, Pr_k 와, Pr_{ϵ} 은 난류 Prandtl 수이다. 해석에 사용되어진 계수 값들은 관련 전산해석시방에 따라 적용하였다[5].

3.2 계산조건 및 방법

해석모델은 Fig. 5와 같으며 해석범위는 침니 내부로 정하였다. 침니하단은 노심 유동관 채널과 연결되어 있다. 이 채널은 23개의 육각 유동관과 16개의 원형 유동관 그리고 96개의 갭 홀이 있어 각각의 육각과 원형 유동관에 19.64 kg/s와 12.58 kg/s의 유량이 흐르고, 갭 홀에는 50 kg/s의 유량이 흐르므로 침니하단으로 703 kg/s의 유량이 유입된다. 이 유량은 침니하단에 설치된 2개의 송출구를 통해 유출된다.

이때의 유출유량은 780 kg/s이며 부족한 유량은 침니상

부를 통해 77 kg/s의 노심우회유량이 유입된다.

침니내부에는 수두 압이 걸리게 되며 침니상단 압력을 0이라 하면 하단부에 걸리는 수두 압은 3.35 mWg(32.850 Pa)이다.

따라서 전산해석의 경계조건은 Table. 1에서 보여주는 바와 같이 경계면에서 수두 압이 걸리고, 입출유량은 침니 하부로부터 노심유량이, 침니상부로부터 노심우회유량이 각각 유입되어 침니출구로 유출된다.

안내관하부는 노심채널에 장착되고, 상부는 침니에 위치하여 시료의 착탈을 안내한다. 상부 안내관은 길이가 3 m이고, 하단에서 2.33 m 높이까지 측면구멍이 있다. 측면구멍은 단위 길이 당 개구면적이 약 40%이고, 상부 안내관 표면에 대해 약 30%이다. 이 구멍은 안내관을 따라 흐르는 냉각수가 수조상부로 오기 전에 침니하부의 송출구로 흐르도록 유도한다.

유동해석을 위한 격자는 정렬 및 비정렬 격자를 혼용하여 약 150만개의 cell로 구성하고, 난류모델은 RNG k- ϵ 을 적용하여 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 안내관의 제트유동

하나로가 정상적인 운전 상태에서 조사공의 표적을 장전, 인출하는 경우, 조사공이 비워질 때의 유동상태를 모의하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림과 같이 침니상단, 안내관 상단, 안내관 상단과 개구부 상단의 중간지점에 대해 유속을 벡터로 표시하였다. 이 속도벡터들은 모두 상부방향으로 나타내었으며 안내관에서의 숫구침이 침니상단까지 영향을 미치고 있다.

이 안내관 제트유동의 평균유속은 1.511 m/s로 조사되었다. 이때 안내관으로 유입되는 유동의 평균유속은 5.8 m/s이며 유량으로 환산하면 16.3 kg/s이었다.

이 숫구침이 노심우회유량의 유동방향으로 노심유량을 억제하는 하나로의 수조상부 방사선 억제기능 뿐만 아니라 방사선을 띤 노심우회유량의 일부가 수조상부로 상승하여 방사선 준위를 상승시키므로 이를 억제하기 위해 수

Table.1 Boundary conditions

Description	Pressure [Pa]	Flow rate [kg/s]	Remarks
Inlet	upper	0	Core bypass flow
	lower	32,850	Core flow
Outlet	0	780	Chimney outlet

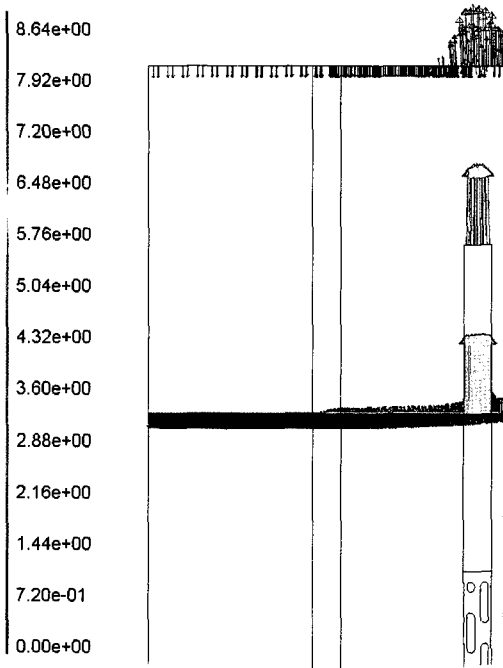


Fig. 6 Jet flow of guide tube under 16.3 kg/s of flow

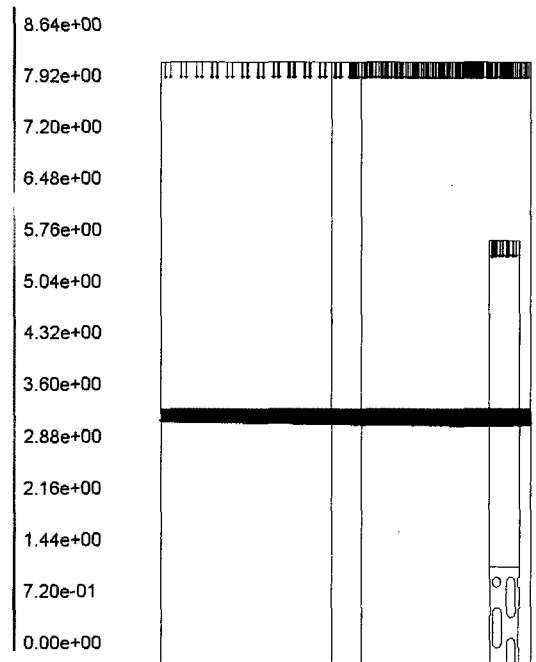


Fig. 7 Velocity magnitude at top of guide tube under 14 kg/s of flow

조상부로부터 2 m 깊이로 설치된 고온층 기능[3]을 잃게 한다.

따라서 N16 등의 방사화된 기체가 수조상부로 상승하여 수조상부의 방사선 준위를 증가시키고 나아가 원자로실의 방사선 준위를 증가시킬 수 있으므로 필히 제거되어야 한다.

4.2 안내관 제트유동의 억제

안내관 제트유동은 하나로의 안전운전을 위해 필히 억제되어야 하므로 제트유동이 생기지 않는 유량을 찾기 위해 안내관 유입유량을 5 kg/s에서 점차 증가시키면서 유동상태를 해석하였다.

유량이 14 kg/s일 때, Fig. 7에 나타난 바와 같이 침니상단, 안내관 상단, 안내관 상단과 개구부 상단의 중간지점에 대해 유속을 벡터로 표시하였다. 모든 속도벡터들은 하부로 향하고 있음이 조사되었다. 이때의 안내관으로 유입되는 평균유속은 4.986 m/s이며, 안내관 상부 출구의 제트 유속은 -0.179 m/s로 해석되었다.

여기서, 속도가 (-)로 표현된 것은 제트가 안내관 상부로 분출되지 않고 침니상부를 통해 원자로 수조수가 안내관 내로 역으로 유입되고 있음을 의미한다.

이 안내관 제트유동을 억제하기 위한 이론적 배경을 검

토해 보았다. 안내관 유량이 16.3 kg/s 인 경우 안내관 입구와 출구의 유속이 각각 5.8 m/s와 1.511 m/s이므로 유동 모멘텀은 94.54 kg·m/s²와 6.41 kg·m/s²이다.

안내관 유량이 14 kg/s가 흐르는 경우, 안내관입구의 유동 모멘텀은 69.804 kg·m/s²이고 이것은 손실 모멘텀보다 적어 안내관 제트유동이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

따라서 관내의 적절한 차압을 유발하여 안내관 제트를 억제하기 위해서는 유입유량의 모멘텀이 관내의 손실 모멘텀 (88.13 kg·m/s²)보다 작은 모멘텀을 유발하는 유량이어야 한다.

5. 결 론

하나로 운전 중 조사공에서 표적을 장전, 인출하는 것을 쉽게 하기 위해 안내관을 설치하였으나 안내관 제트유동이 형성되어 냉각수가 침니상부로 솟구치는 현상이 발견되었다. 이를 억제하기 위한 최대유량을 구하기 위하여 전산유동해석을 하였으며 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 하나로가 정상적인 운전 상태에서 조사공의 표적을 장전, 인출하는 순간에 조사공이 비워지면 약 16.3 kg/s의 유량이 흐르고 평균유속 1.511 m/s의 안내관 제트유동이

형성되었다.

(2) 안내관 제트유동을 억제하기 위한 안전한 유량은 14 kg/s이며 이때의 안내관 끝에서의 유속은 -0.179 m/s이므로 안내관 외부의 수조냉각수가 유입되어 제트유동이 억제되었다.

(3) 안내관 제트를 관내의 적절한 차압을 유발하여 억제하기 위해서는 유입 모멘텀이 관내의 손실 모멘텀 ($88.13 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$)보다 적은 모멘텀을 유발하는 유량이어야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Park, Y.C. et al., 1996, "System Performance Test in HANARO," *the 5th ASRR*, Vol.1, pp.240-246.
- [2] Kim, H.I. et al., 1995, "Flow Characteristics of Korea Multi-Purpose Research Reactor," *Proceedings of the 7th International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics*, NUGREG/CP-0142, Vol.4, pp.2796-2805.
- [3] Park, Y.C. et. al., 1999, "Reduction Effect of Hot Water Layer System Used by Ion Exchanger," *KFMA J.* Vol.2, fourth edition, pp.40-47.
- [4] Park, Y.C. et. al., 2003, "The Analysis of Core Flow Characteristics When Fission Moly Target is Loaded or Unloaded in HANARO," *Proceedings of Korean Nuclear Society Spring Meeting*, p.113.
- [5] *Users Manual of FLUENT 5.4*, Fluent Inc..