하나로 원형 조사공의 안내관 제트유동 억제에 대한 해석

박 용 철*1, 우 상 익*2

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 m (12 m) depth of the reactor pool and cold 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 exit through the outlet of chimney. A guide tube is extended from the reactor core to the top of the reactor chimney for easily un/loading a 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 is described an analytical analysis to study 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, about fourteen kilogram per second (14 kg/s) suppressed the guide tube jet and met the design cooling flow rate in a circular flow tube, and that the fission moly target cooling flow rate met the minimum flow rate to cool the target.

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 원자로인 하나로[1]는 1995년 2월 초임계에 도달한 이후 정상적으로 가동되고 있다. 운전 중에 방사선을 조사하기 위해 조사공에 표적이 장전 인출되어야 하며 이를 쉽게 하기 위해 안내관이 조사공에서 침니 상부까지 설치되어야 한다.

그러나 하나로 노심은 상향유동의 냉각수에 의해 냉각되므로 표적을 장전 인출하는 경우 조사공이 비워지므로 안내관은 방사선을 띤 냉각수를 수조 상부로 유인하여 솟구치게 하는 안내관 제트유동의 유로가 된다.

안내관 제트의 분출 억제하기 위해서는 안내관이 외부와 통할 수 있는 개도율을 높이는 방법과 냉각수 유로 상에서 적절한 차압을 유발하여 제트유동을 안내관 내에서 소멸시키는 방법이 있다. 전자의 경우, 안내관은 길이가 3 m 이고 개도율이 약 30%이므로 구조적 안정성의 한계로 개도율을 지나치게 높일 수 없다. 후자의 경우 노심의 유량을 조절하기 위해 노심 하부에 오리피스가 설치되어 있으므로 이를 개조하여 안내관 제트유동을 소멸시킬 수 있는 차압을 유발시킬 수 있다.

본 논문에서는 원자로가 정상적으로 가동되고 조사공이 비어 있는 상태에서 제트유동이 안내관 내에서 소멸될 수 있는 최대유량을 전산유체해석으로 구하고, fission moly 표적이 장전되었을 때의 유동특성을 모의하였다.

*1 비회원, 한국원자력연구소 연구로계통관리
*2 비회원, 한국원자력연구소 중성자조사기술실

2. 하나로의 표적취급장치

약 12 m의 수중에 설치되어 있는 하나로 노심을 냉각하기 위해 순환펌프는 냉수를 가압하여 노심유량이 하부 유입구, 플레넘, 노심채널, 침니를 거쳐 침니 하부에 있는 출구를 통해 순환된다. 그리고 노심 우회유량은 침니 상부의 유입구를 통해 유입되어 순환펌프의 흡입력에 의해 침니의 하부 출구로 유출된다. 이 호름 방향이 노심유량과 반대이므로 노심채널을 지난 냉각수의 유동제트를 억제한다[2].

OR5 조사공 안내관은 fig. 1과 같이 하나로에 설치되며 하부와 상부 안내관으로 구성된다.

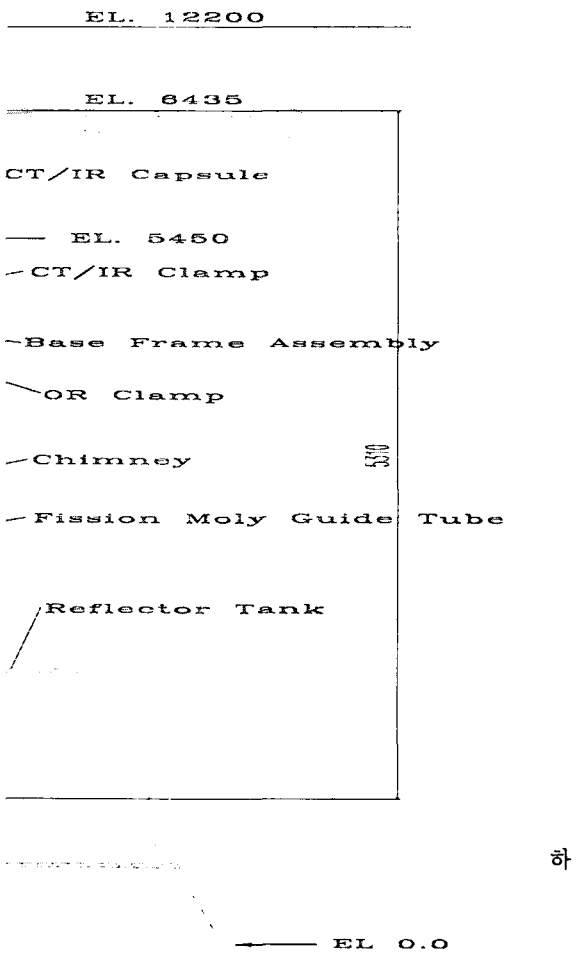

Fig. 1 Installation of target guide tube

부 안내관은 노심채널에 설치되어 표적을 냉각하기 위한 유로를 형성하고, 유체유발진동을 억제하기 위한 지지대 역할을 한다.

상부 안내관은 수조상부에서 표적의 장전과 인출을 용이하게 하기 위해 침니 상부까지 연장된다. 그리고 이 안내관은 표적 장전 시 표적취급장치도 함께 장전되므로 유체유발진동에 의한 떨림을 방지하기 위한 지지대 역할을 하고, 고정장치 (OR clamp)에 의해 고정된다.

표적취급장치 (이하 취급장치)는 fig. 2에서 보여주는 바와 같이 안내관 속에 설치되어 있다. 표적의 냉각수 유로를 형성하기 위해 안내관 및 환형 표적은 최소한 2 mm 이상의 간격을 유지하고 있다. 취급장치의 하부에는 표적착탈장치가 있으며 120도 간격으로 3개의 볼이 설치되어 있어 취급장치의 상부에서 조작하면 스프링 장력에 의해 표적을 착탈할 수 있다. 취급장치는 반사체 탱크의 상부에 자중으로 고정되도록 턱이 있다.

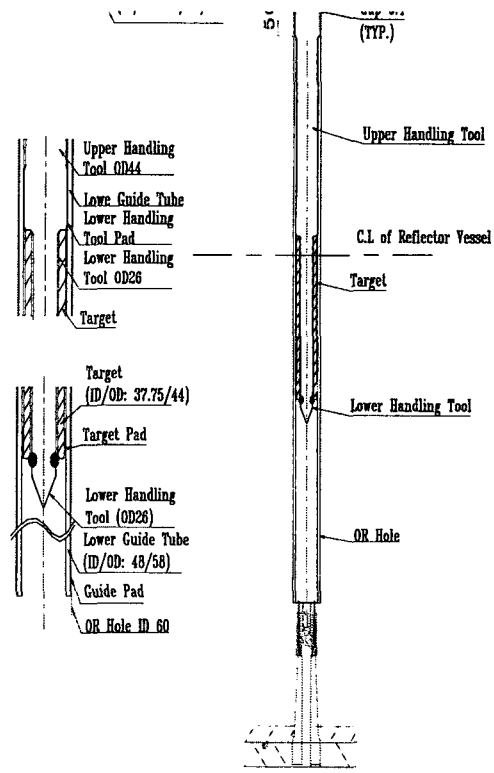

Fig. 2 Assembly of target, handling tool and guide tube

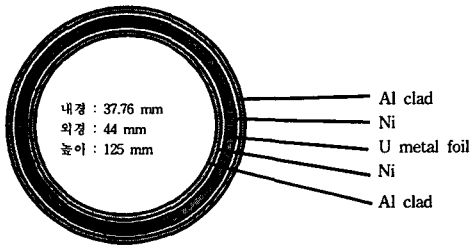

Fig. 3 Fission mo-99 target

그리고 이 장치는 유체유발 진동에 의한 떨림을 방지하기 위해 120도 간격으로 설치된 패드가 취급장치의 상하에 각각 설치되어 있으며 안내관과 0.5 mm의 갭을 유지하여 떨림의 진폭을 최소화한다. 표적은 fig. 3과 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 mm, 44 mm이며 표적 한 개의 높이는 125 mm이다.

3. 전산유동해석

3.1 지배방정식

냉각수는 비압축성 정상유동으로 가정하고 3차원 열/유동해석을 하였다. 유동해석은 Fluent 사의 전산프로그램을 이용하였으며 연속방정식, 운동량 방정식과 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 만족하여야 한다.

스칼라에 대한 일반 미분방정식은 식 (1)과 같다[3),(4)].

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

이 때의 연속방정식은 Φ=1, S_m=0이므로 식 (2)와 같이 표시된다.

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

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.

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

여기서, u_i는 유체의 평균유속, ρ는 유체의 밀도, ν는 유체의 층류 동점성계수, u_i'은 유체의 난류섭동 성분을 의미한다.

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

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

$$\nu_t=C_\mu k^2/\varepsilon \qquad (5)$$

여기서, k는 난류 운동에너지, ε은 난류 소산율, δ_{ij}는 Kronecker Delta (단위행렬)를 의미한다.

표준 난류 모델에 관한 난류 운동에너지 및 난류 소산율 전달방정식은 식 (6) 및 (7)과 같다.

$$\rho\frac{Dk}{Dt}= \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M\right] \qquad (6)$$

$$\rho\frac{D\varepsilon}{Dt}= \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right]+ C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (7)$$

여기서, G_k는 평균속도 변화에 의한 난류운동에너지의 생성을 나타내고, G_b는 부력으로 인한 난류운동에너지의 생성을 나타낸다. 그리고 Y_M은 압축성 난류에서 전반적인 소산율에 대하여 변동되는 확산의 기여를 나타낸다.

또한 $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ 및 $C_{3\varepsilon}$은 상수이고, Pr_k와, Pr_ε은 난류 Prandtl 수이다. 해석에 사용되어진 계수 값들은 관련 전산해석 시방에 따라 다음의 값들을 적

용하였다[4].

$C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_{3\varepsilon}=0.09$, $\Pr_k=1.0$ 및 $\Pr_\varepsilon=1.3$이다.

그리고 난류 점성계수 μ_t는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

3.2 계산조건 및 방법

하나로에 표적이 장전되어 있는 경우 안내관에 표면적의 30%에 해당하는 측면 구멍이 뚫어져 있어 상향 유동인 냉각수는 순환펌프의 흡입력에 의해 많은 냉각수가 측면구멍을 따라 흐른다.

그러나 하나로가 운전 중일 때 표적을 장전 인출하는 경우 노심이 비워지게 되므로 상향유동인 냉각수가 안내관을 따라 침니 상부로 솟구치는 안내관 제트유동이 형성된다.

이를 모의하기 위한 해석모델은 fig. 4와 같다. 해석범위는 유동관 출구로부터 침니 상단 면까지로 정하였다. 8개의 원형 유동관 상부에 형성된 shroud는 그림과 같이 직관으로 가정하였다.

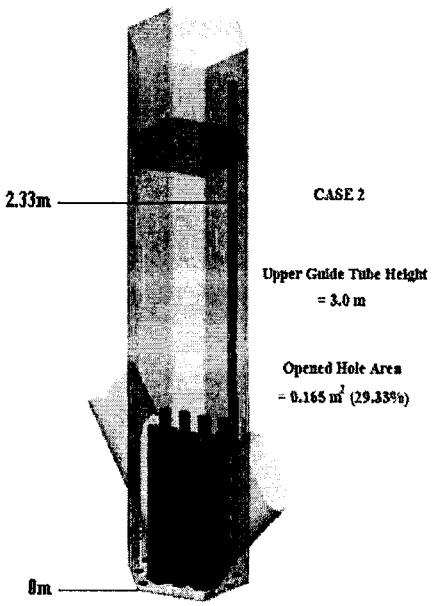

Fig. 4 Analysis model

상부 안내관의 길이는 3 m, 안내관에 측면구멍이 있는 부분의 단위 길이 당 개구면적은 약 40%이고, 상부 안내관 표면적에 대비한 개구면적은 약 30%이다. 격자는 정렬 및 비정렬 격자를 혼용하여 약 150만개의 cell로 구성하였으며 난류모델은 RNG k-ε 난류 모델을 적용하였다.

전산해석의 경계조건은 table 1에서 보여주는 바와 같이 경계조건에서의 차압은 플레넘 입구에서 조사공 출구까지 걸리는 차압 210 kPa와 안내관의 높이 3 m에 해당하는 수두 30 kPa을 합하여 240 kPa이다. 그리고 하부 노심과 침니하부의 입출 유량은 각각 703 kg/s와 780 kg/s이며 부족유량은 침니상부의 수조수가 유입된다. 표적을 냉각하는 유량은 유동관 외부를 냉각하기 위해 흐르는 갭 유량을 제외한 654 kg/s이다.

Table 1 Boundary conditions

Description	Pressure [pa]	유량 [kg/s]	Remarks
Inlet	240,000	780	Pressure Inlet
Target (U metal foil)	-	654	Solid
Outlet	0	780	Pressure Outlet

4. 결과 및 고찰

4.1 안내관의 제트유동

하나로가 정상적인 운전상태에서 조사공의 표적을 장전, 인출하는 순간에 조사공이 비워진다. 이 때의 유동상태를 모의하였을 때 fig. 5와 같이 안내관을 통한 제트유동이 형성되어 침니 상부로 솟구침이 발견되었다. 이 때 안내관으로 유입되는 유동의 평균유속은 5.8 m/s이며 안내관 상부로 분출되는 제트유동의 평균유속은 1.511 m/s이다. 그리고 안내관의 유량은 16.3 kg/s이었다.

4.2 안내관 제트유동의 억제

안내관 내에서 제트유동이 생기지 않는 유량을 찾기 위해 안내관 유입유량을 5 kg/s에서 점차 증가시키면서 유동상태를 해석하였다. 이 유량이 14 kg/s일 때, fig. 6에 나타낸 바와 같이 안내관 제트

유동이 형성되지 않았다.

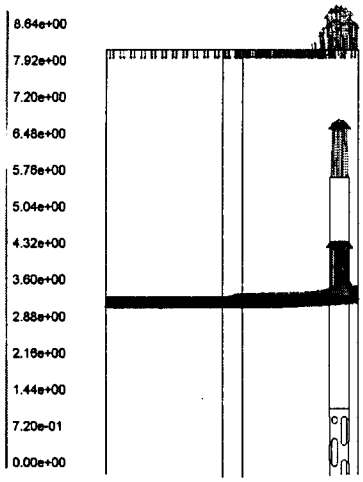

Fig. 5 Jet flow of guide tube under 16.3 kg/s of flow

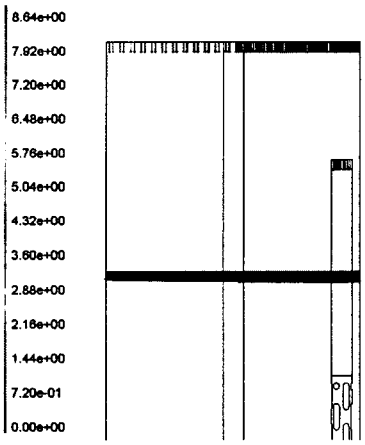

Fig. 6 Velocity magnitude at top of guide tube under 14 kg/s of flow

이 때의 평균유속은 4.986 m/s이며, 안내관 상부 출구의 제트유속은 -0.179 m/s로 해석되었다. 여기서, 속도가 (-)로 표현된 것은 제트가 안내관 상부로 분출되지 않고 침니 상부를 통해 원자로 수조수가 안내관 내로 역으로 유입되고 있음을 의미한다.

이 안내관 제트유동이 사라지는 현상의 이론적 배경을 검토해 보았다. 안내관 유량이 16.3 kg/s인 경우 안내관 입구와 출구의 유속이 각각 5.8 m/s와 1.511 m/s이므로 유동 모멘텀은 94.462 kg-m/s^{2}와 6.410 kg-m/s^{2}이다. 출구의 유동 모멘텀은 유량을 알 수 없으므로 유속과 출구 단면적을 고려하여 계산하였다. 안내관 내에서 손실되는 유동모멘트는 입출구의 차이인 88.052 kg-m/s^2 이며 이 이내의 입구 유동 모멘트를 가지는 유량은 안내관 제트가 발생하지 않는다.

따라서 14 kg/s의 유량이 흐르는 경우, 입구유동의 모멘텀은 69.808 kg-m/s^{2}이고 이것은 손실 모멘트 보다 적은 것이므로 안내관 제트유동이 발생하지 않았다.

4.3 안내관 제트유동 억제시 표적냉각수량

안내관 제트유동이 발생하지 않는 유량이 조사공으로 유입될 때 보수적으로 안전율을 고려하여 80%의 유량 11.2 kg/s가 유입되고, 조사공에 fission moly 표적이 장전되는 경우 표적의 냉각수량을 조사하기 위해 압력분포와 속도분포를 모의하여 figs. 7과 8에 각각 나타내었다.

하나로가 정상운전 중일 때 원형 조사공과 안내관을 포함한 실제 총차압 ($\sum\Delta P$)은 220 kPa이고, 입구관의 압력손실계수 (C) 및 길이 (L)가 각각 53.9975 및 0.158 m이므로 입구관의 압력손실 (ΔP_{INLET})은 67 kPa이다. 이 때 안내관 하부의 오리피스에서 추가로 발생되어야 하는 차압 (ΔP_{ADD})과 상부 안내관에 발생하는 차압 (ΔP_{GT})을 식 (9), (10) 및 (11)을 이용하여 시행 착오방식으로 구하였으며 압력분포도와 같이 각각 40 kPa와 119 kPa로 계산되었다.

$$\sum\Delta P = \Delta P_{INLET} + \Delta P_{GT} + \Delta P_{ADD} \tag{9}$$

$$\Delta P_{INLET} = \frac{1}{2}\rho C V^2 L \tag{10}$$

$$\Delta P_{GT} = C_{GT} V^2 \tag{11}$$

이를 속도분포로 표시하면 표적입구 및 출구 유속이 각각 3.25 m/s와 13 m/s를 나타내었으며 평균유속은 7.3 m/s를 나타내었다. 이를 유량으로 표시하면 6.38 kg/s이며 이는 표적을 냉각할 수 있는 최소유량, 2.72 kg/s[5]를 상회하므로 안내관 유동제트 없이 표적을 안전하게 냉각할 수 있는 것으로 판단된다.

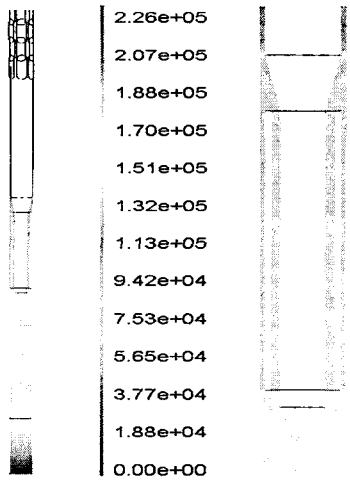

Fig. 7 Contour of static pressure (Pa)

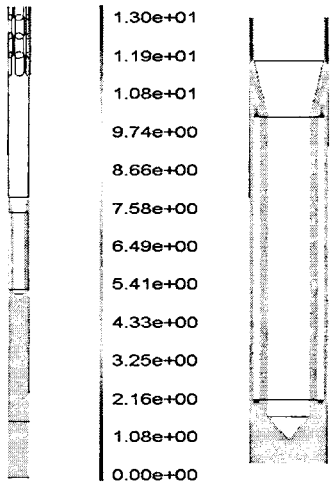

Fig. 8 Contour of velocity magnitude (m/s)

5. 결 론

하나로 운전 중, 조사공에서 표적을 장전, 인출하는 것을 쉽게 하기 위해 안내관을 설치하였으나 안내관 제트유동이 형성되어 냉각수가 침니 상부로 솟구침이 조사되었다. 이를 억제하기 위한 최대 유량을 구하기 위하여 전산유동해석을 하였으며 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 하나로가 정상운전 중에 조사공에서 표적을 장전, 인출하는 경우 조사공이 비워지면 약 16.3 kg/s의 유량이 흐르고 안내관 제트유동이 형성되었다.

(2) 안내관 제트유동을 억제하기 위한 최대 유량은 14 kg/s로 계산되었으며 이 때의 안내관 끝에서의 유속은 -0.179 m/s이므로 안내관 외부의 수조 냉각수가 유입되어 제트유동을 억제하였다.

(3) 안전성을 고려하여 안내관 제트유동을 억제하는 최대 유량의 80%유량이 흐르고, fission moly 표적이 장전되는 경우 압력손실은 226 kPa 그리고 표적 냉각수의 평균유속은 7.3 kg/s이다.

(4) 이 때의 유량은 6.32 kg/s이며 이는 표적을 냉각하기 위한 최소유량 (2.72 kg/s)을 만족하여 표적은 안내관 제트 없이 안전하게 냉각될 수 있음을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

[1] Park, Y.C. et al. "System Performance Test in HANARO", the 5th ASRR Vol.1, (1996), 240-246.

[2] Kim, H.I. et al. "Flow Characteristics of Korea Multi-Purpose Research Reactor", Proceedings of the 7th International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, NUGREG/CP-0142, Vol.4, (1995), p.2796-2805.

[3] Park, Y.C. et. al, "The Analysis of Core Flow Characteristics When Fission Moly Target is Loaded or Unloaded in HANARO", Proceedings of Korean Nuclear Society Spring Meeting, (2003), p.113.

[4] Fluent Inc. Users Manual of FLUENT 5.4.

[5] Park, Y.C. " Flow Analysis for Fission Moly Target Cooling in HANARO", Proceedings of KFMA Annual Meeting 2003, (2003), p.502-505,