

안내관 제트유동 억제시의 하나로 원형 조사공의 냉각특성

우 상 익^{*1}, 박 용 철^{*2}

The Cooling Characteristics for Circular Irradiation Hole under Suppressing Jet Flow at Guide Tube in HANARO

S. I. Wu and Y. C. Park

The HANARO, multi-purpose research reactor, 30 MWth open-tank-in-pool type, is under normal operation since it reached the initial critical in February 1995. The HANARO is planning to produce a fission moly-99 of radio isotopes, a mother nuclide of Tc-99m, a medical isotope and is under developing a target handling tool for loading and unloading it in a circular flow tube (OR-5). 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 calculate the hole size of a orifice inserted in the circular irradiation hole and to study the flow characteristics through the guide tube under reactor normal operation and loading the target. As results, the results show that the hole size of orifice was 31 mm of the inner diameter to suppress the guide tube jet flow and the coolant safely cooled the target of fission moly after inserting the orifice to the flow tube.

Key Words: 냉각특성 (Cooling Characteristics), 조사공 (Irradiation hole), 안내관 (Guide Tube), 제트유동 (Jet Flow), 표적취급장치 (Target Handling Tool)

1. 서 론

30 MWth의 개방수조형 다목적 원자로인 하나로 는 1995년 2월 초임계에 도달한 이후 정상적으로 가동되고 있다. 하나로 는 원형 조사공 (OR-5)에서 의료용 동위원소인 Tc-99m의 모핵종인 Fission Moly 99를 생산하기 위해 표적취급장치를 개발하고 있다. 이 장치는 표적을 쉽게 장전하고 인출하기 위해 안내관이 노심에서 침니 상부까지 연장되어야 한다.

그러나 하나로 노심은 상향유동의 냉각수에 의해 냉각되므로 표적을 장전 인출하는 경우 노심이 비워 지므로 안내관은 방사선을 띤 냉각수를 수조 상부로 유인하여 솟구치게 하는 안내관 제트유동의 유로가

된다.

안내관 제트의 분출을 억제하기 위한 안전한 냉각유량은 11.2 kg/s로 보고된 바 있다⁽²⁾.

본 논문에서는 원자로가 정상적으로 가동되고 조사공이 비어 있는 상태에서 제트유동이 억제될 수 있는 유량으로 조사공을 모의하였다. 그리고 적정 차압을 유발할 수 있는 오리피스구의 구멍을 결정하고, 조사공에 fission moly 표적이 장전되었을 때의 냉각특성을 모의하였다.

2. 하나로 의 표적취급장치

2.1 하나로 및 안내관

약 12 m의 수중에 설치되어 있는 하나로 노심을 냉각하기 위해 순환펌프는 냉수를 가압하여 노심을

*1 비회원, 한국원자력연구소 중성자조사기술실

*2 비회원, 한국원자력연구소 연구로계통관리

량이 하부 유입구, 플레넵, 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 흐름 방향이 노심유량과 반대이므로 노심채널을 지난 냉각수의 유동제트를 억제한다⁽³⁾.

OR5 조사공 안내관은 fig. 1과 같이 하나로 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 침니 상부까지 연장된다.

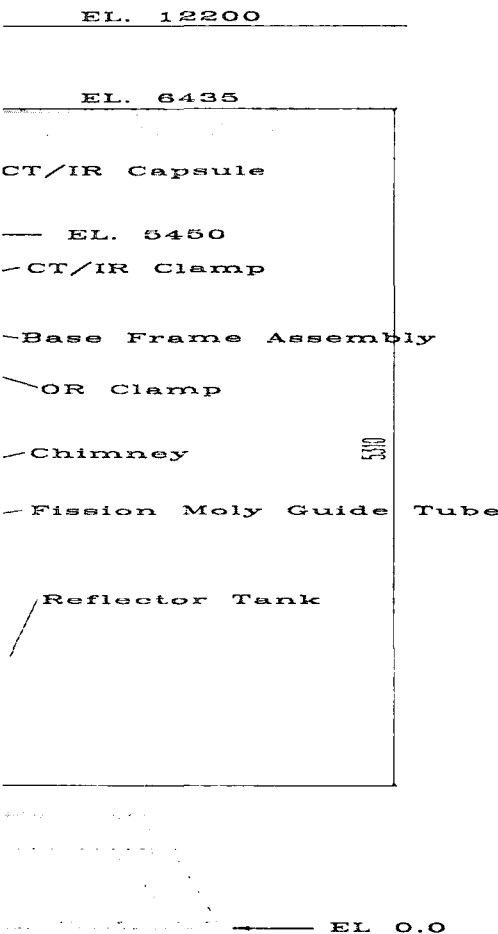


Fig. 1 Installation of target guide tube
그리고 이 안내관은 표적 장전 시 표적취급장치

도 함께 장전되므로 유체유발진동에 의한 떨림을 방지하기 위한 지지대 역할을 하고, 고정장치 (OR clamp)에 의해 고정된다.

그러나 이 안내관은 노심을 지난 냉각수가 침니 상부로 분출될 수 있는 유로를 제공하므로 이를 억제하여 노심을 지난 냉각수가 침니 상부에 도달하기 전에 순환펌프에 흡입되어야 하나로를 안전하게 이용할 수 있다.

2.2 표적취급장치 및 표적

표적취급장치 (이하 취급장치)는 fig. 2에서 보여주는 바와 같이 안내관 속에 설치되어 있다. 표적의 냉각수 유로를 형성하기 위해 안내관 및 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

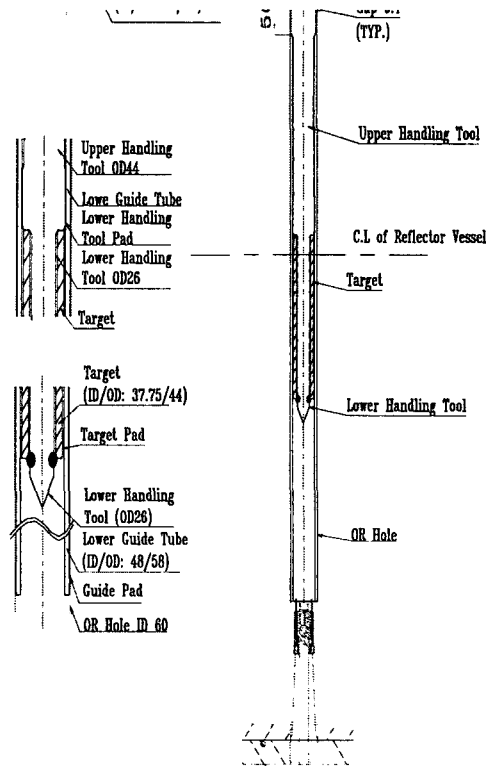


Fig. 2 Assembly of target, handling tool and guide tube

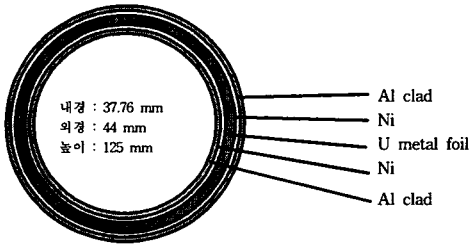


Fig. 3 Fission mo-99 target

착탈할 수 있다. 취급장치는 반사체 탱크의 상부에 자중으로 고정되도록 턱이 있다. 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. 표적이 장전되어 조사될 때에는 아래와 같이 반응열에 의해 열이 발생하므로 이를 식히기 위해 충분한 냉각수가 공급되어야 한다⁽⁴⁾.

- 표적 발열량: 379.92 kW/m x 250 mm = 95 kW
- 냉각수 입출구 온도: 35/43.6 °C

3. 전산유동해석

3.1 지배방정식

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

스칼라에 대한 일반 미분방정식은 식 (1)과 같다^{(5),(6)}.

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

이 때의 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.

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

여기서, u_i 는 유체의 평균유속, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 유체의 층류 동점성계수, u_i' 는 유체의 난류섭동 성분을 의미한다.

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

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

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

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

표준 난류모델에 관한 난류 운동에너지 및 난류소산율 전달방정식은 식 (6) 및 (7)과 같다.

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

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

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

또한 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 및 $C_{3\epsilon}$ 은 상수이고, Pr_k 와, Pr_ϵ 은 난류 Prandtl 수이다. 해석에 사용되어진 계수 값들은 관련 전산해석 시방에 따라 다음의 값들을 적용하였다⁽⁶⁾.

$$C_{1\epsilon}=1.44, C_{2\epsilon}=1.92, C_{3\epsilon}=0.09, Pr_k=1.0$$

및 $Pr_\epsilon=1.3$ 이다.

그리고 난류점성계수 μ_t 는 식 (8)과 같이 표현된다.

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

3.2 계산조건 및 방법

하나로는 상향 유동이므로 안내관에 측면 구멍이 뚫어져 있는 경우에는 순환펌프의 흡입력 영향범위에 있어 많은 냉각수가 흐를 수 있으나, 조사공이 비워지는 경 안내관 제트유동이 형성된다. 이를 억제할 수 있는 안전한 유량이 흐르는 경우 표적의 냉각상태를 모의하기 위해 유동해석을 하였다.

해석모델은 fig. 4와 같으며 120°간격으로 설치된 하부 패드는 유동형태에 미치는 영향이 미미하므로 확대 그림에서와 같이 그 길이만큼 경사지게 모델링하였다. 표적을 착탈하는 붉은 유체의 흐름에 큰 영향을 미치지 아니하므로 해석에서 제외하였다.

그림에서와 같이 표적은 2개가 동시에 장전되며 원형으로 지시한 것은 fig. 5에 상세하게 나타내었으며 이는 표적의 단면이다. 그림에서 회색으로 도색된 부분은 표적의 겉을 구성하는 알루미늄 피복이며 적색으로 도색된 것은 두께 0.1 mm의 U metal foil이다. 그리고 반경방향 양쪽으로 두께 0.01 mm의 니켈로 감싸여져 있다.

중력을 고려하고 standard k-ε turbulence model을 적용한 axisymmetric 해석을 시행하였으며 격자계는 정렬 및 비정렬 격자를 혼용하여 약 9만여 개의 cell로 구성하였다.

전산해석의 경계조건은 table 1과 같다. 경계조건

에서의 차압은 플레넘 입구에서 조사공 출구까지 걸리는 차압 210 kPa와 안내관의 높이 3 m에 해당하는 수두 30 kPa을 합하여 240 kPa로 정하였다. 표적의 발열량은 379.92 kW/m를 기준으로 표적의 부피를 고려하여 2.958e+10 W/m³을 적용하였다⁽⁴⁾.

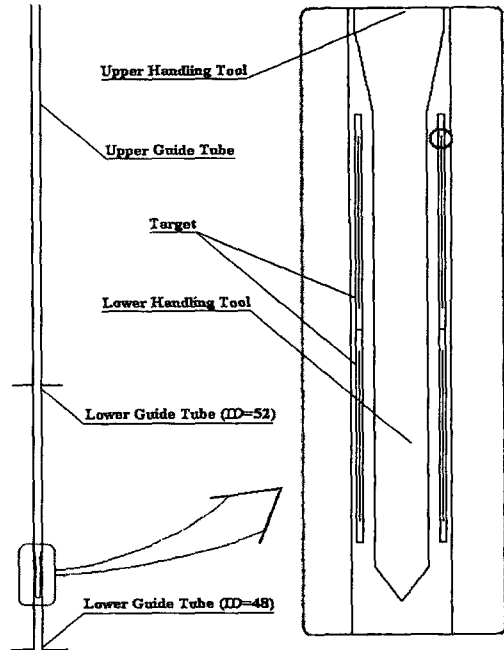


Fig. 4 Analysis model

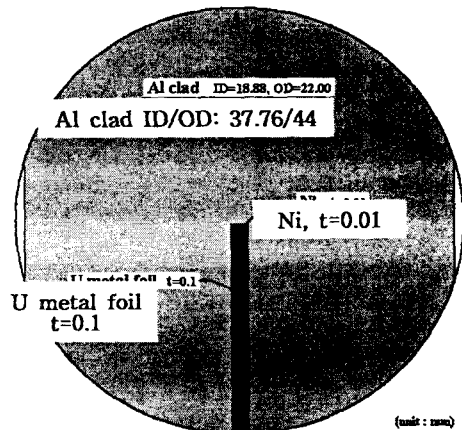


Fig. 5 Detail of target

Table 1 Boundary conditions

Description	Pressure [pa]	Temp. [°C]	Heat [W/m ³]	Remarks
Inlet	240,000	35	-	Pressure Inlet
Target (U metal foil)	-	-	2.958e+10	Solid
Outlet	0	-	-	Pressure Outlet

4. 결과 및 고찰

4.1 오리피스 크기

표적 장전, 인출 시 조사공이 비워졌을 때 조사공 유량을 11.2 kg/s로 조절하기 위한 오리피스 형상을 구하기 위해 다음과 같이 유동모의를 하였다.

(1) 설계유량인 12.7 kg/s의 유량이 흐를 때 오리피스에서 발생하는 압력손실량을 계산하였다.

(2) 안내관 제트유동이 발생하지 않는 안전한 유동 11.2 kg/s의 유량이 흐를 때 오리피스에서 발생하는 압력손실량을 계산하여 120 kPa의 추가 압력손실을 획득하기 위한 기준을 설정하였다.

(3) 오리피스 직경을 현재의 37.5 mm를 31 mm 변경하여 목표 압력손실 획득 여부를 파악하였다.

해석 결과는 fig. 6에 나타내었다. 유동은 좌측에서 우측으로 흐른다. 핵연료다발 체결부는 해석에서 제외하였으나, 오리피스부 후단에 발생하는 재순환 영역을 정확히 해석하기 위하여 출구부를 연장하였다. 기존 설계형상에 대한 12.7 kg/s의 유량조건 해석결과, 오리피스부에서 발생하는 압력손실은 약 73 kPa로 나타났다. 또한, 같은 기존 설계형상에 대하여 조사공 유량을 11.2 kg/s로 조절하였을 경우 발생하는 압력손실은 약 55.9 kPa로 해석되었다. 아래 그림 중 가장 아래의 결과는 오리피스부의 직경을 37.5 mm에서 31.0 mm로 줄였을 때이며 오리피스부를 통한 압력손실이 120.1 kPa 증가한 약 176 kPa로 해석되었다.

따라서 조사공을 개방하였을 때 오리피스의 형상을 31 mm로 줄이는 경우 차압은 120.1 kPa 증가하여 양을 11.2 kg/s로 조절할 수 있다.

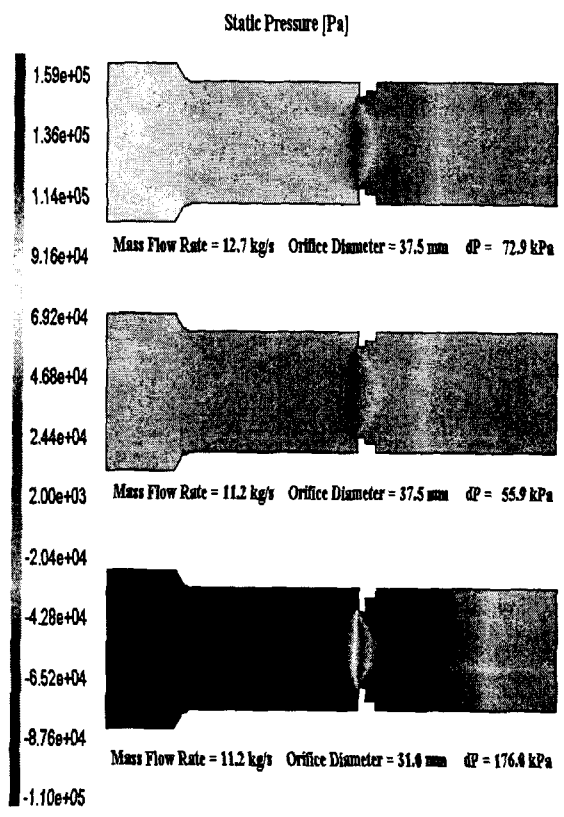


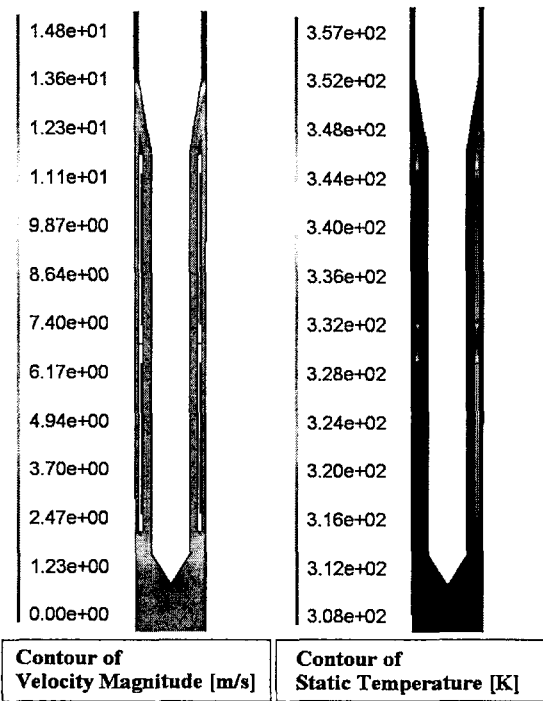
Fig. 6 Variation of pressure differences due to flow orifice size.

4.2 열유동해석

조사공 하부에 있는 유동 오리피스의 내경을 31 mm로 조정하였을 경우 표적 냉각에 대해 유동해석을 하였다.

Fig. 7은 표적 부근의 속도 및 온도 분포를 나타낸다. 유입된 냉각수는 표적상부에서 단면적이 협소해 지면서 유속이 빨라지고 있으며 표적 부근에서의 평균 유속은 7.3 m/s를 나타내었다. 그림 2에서의 표적이 설치되는 단면적을 고려하면 표적 냉각유량은 6.38 kg/s를 나타내어 표적의 최소 냉각유량 2.72 kg/s⁽⁴⁾를 만족하였다.

표적의 입구 냉각수는 35 °C (308 K) 유입되어 37.8 °C (310.85 K)로 흐른다. 이 때 표적의 최대 온도는 85.6 °C (358.6 K)로 나타내어 피복의 최대허용 온도인 146.6 °C의 약 60 %에 해당하므로 표적은 안전하게 냉각될 수 있다.



mm로 줄이는 경우 차압은 120.1 kPa 증가하여 조사공 유량을 11.2 kg/s로 조절할 수 있을 것으로 판단된다.

(5) 조사공에 11.2 kg/s의 유량이 유입되는 경우 표적 냉각유량은 6.38 kg/s를 나타내어 표적의 최소 냉각유량 2.72 kg/s를 만족하였다.

(6) 이 때 표적의 입구 냉각수는 35 °C (308 K) 유입되어 37.8 °C (310.85 K)로 흐르고, 표적의 최대 온도는 85.6 °C (358.6 K)로 나타내어 피복의 최대 허용온도인 146.6 °C의 약 60 %에 해당하므로 표적은 안전하게 냉각될 수 있다.

후 기

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

참고 문헌

[1] Park, Y.C. et al. "System Performance Test in HANARO", the 5th ASRR Vol.1, (1996), 240-246.
 [2] Park, Y.C. et al. "The Analytic Analysis of Suppressing Jet Flow at Guide Tube of Circular Irradiation Hole in HANARO", Proceedings of KSCFE Spring Meeting, (2004)
 [3] 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.
 [4] Park, Y.C. " Flow Analysis for Fission Moly Target Cooling in HANARO", Proceedings of KFMA Annual Meeting 2003, (2003), p.502-505.
 [5] 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.
 [6] Fluent Inc. Users Manual of FLUENT 5.4.

Fig. 7 Contour of velocity and static temperature under loading modified orifice with 31 mm of internal diameter

5. 결론

하나로 운전 중, 조사공에서 표적을 장전, 인출하는 것을 쉽게 하기 위해 안내관을 설치하였으나 안내관 제트유동이 형성되어 냉각수가 침니 상부로 솟구침이 조사되었다. 이를 억제할 수 있는 조사공 유량은 11.2 kg/s이다. 이를 모의할 수 있는 유동 오리피스의 크기를 구하고, 냉각특성을 조사하기 위해 유동해석을 하였으며 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 기존 설계형상에 대해 설계유량인 12.7 kg/s의 유량이 조사공에 유입되는 경우 오리피스에서 발생하는 압력손실은 72.9 kPa이다.

(2) 오리피스의 기존 형상인 내경이 37.5 mm일 때, 조사공에 11.2 kg/s의 유량이 흐르는 경우, 오리피스의 압력손실은 약 55.9 kPa로 해석되었다.

(3) 유량 오리피스의 내경을 37.5 mm에서 31 mm로 줄였을 때이며 오리피스를 통한 압력손실이 120.1 kPa 증가한 약 176 kPa로 해석되었다.

(4) 조사공이 비워졌을 때 오리피스의 형상을 31