

하나로 Fission Moly 표적 냉각에 대한 유동해석

박용철*

Flow Analysis for Fission Moly Target Cooling in HANARO

Yong-Chul Park*

Key Words: Flow analysis (유동해석), Radio isotope (동위원소), Target handling tool (표적취급장치), HANARO (하나로).

ABSTRACT

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 used for fuel performance tests, radio isotope productions, reactor material performance tests, silicone semiconductor productions and etc. Specially, 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 those at a flow tube (OR-5). The target should be sufficiently cooled in the flow tube without an interference with the cooling of the others and an induction of extremely vibration. This topic is described an analectic analysis for the cooling characteristics of the fission moly-99 target to find the minimum cooling water. It was confirmed through the analysis results that the minimum cooling water, about 2.717 kg/s flew through the flow tube under the worst case that the guide tube got no perforating holes for cooling water to pass through the holes and that the target was safely cooled under about seventy percent (70%) of the maximum allowable temperature of the target.

1. 개요

30 MWth의 연구용 원자로인 하나로⁽¹⁾는 1995년 2월에 초임계에 도달한 이후 정상운전 중에 있다. 하나로가 정상적으로 가동되어 핵연료의 성능시험, 동위원소의 생산, 노재료의 성능시험, 규소 반도체의 생산 등 다목적으로 활용되고 있다. 특히, 동위원소 중에서 Fission Mo-99 (이하 표적)는 의료용 방사성 동위원소인 Tc-99m의 모 핵종으로 U-235의 핵분열에 의해 생산된

다. 이를 하나로에서 생산하기 위해 표적취급장치가 개발 중에 있다.

하나로의 노심은 13 m 깊이의 수조 속에 있으며 냉각수가 플레넘 하부로 유입되어 노심을 지나 순환펌프의 흡입력에 의해 침니 출구로 유출되는 상향식 유동이다.

표적취급장치가 노심에 있는 OR5 조사공에 표적을 용이하게 장전하기 위해서는 안내관이 침니 상부까지 연장되어 표적을 안내하여야 한다.

표적을 냉각하기 위해서는 충분한 냉각수가 공급되어야 하나, 이 냉각수는 표적을 냉각한 후 안내관을 따라 침니 상부로 솟아오를 수 있어 냉각수를 최적화하여야

* 한국원자력연구소
ycpark@kaeri.re.kr

한다.

따라서, 본 논문에서는 표적을 냉각하는데 필요한 최소한의 유량을 구하기 위하여 전산해석기법으로 표적의 냉각특성을 해석하였다. 해석방법은 표적취급장치를 통과하는 냉각수량을 계산하고, 압력, 유속 및 온도분포를 계산하여 표적의 냉각상태를 검토하였다.

2. 하나로의 Fission moly 표적취급장치

2.1 하나로 및 안내관

하나로의 노심은 약 13 m의 수중에 설치되어 있다. 순환펌프에 의해 하부 유입구로 냉각수가 유입되어 플레넘, 노심채널, 침니를 거쳐 침니 하부에 있는 출구를 통해 재순환된다.

이 때, 노심 우회유량은 침니 상부의 유입구를 통해 유입되어 순환펌프의 흡입력에 의해 침니의 하부 출구로 유출된다. 이 흐름 방향이 노심유량과 반대이므로 노심채널을 지난 냉각수의 유동제트를 억제한다⁽²⁾.

Fig. 1은 OR5 조사공 안내관이 하나로에 장전된 상

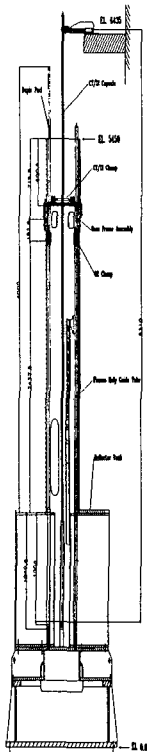


Fig. 1 Installation of target guide tube

태를 보여주며 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 연장되어 있고, 장전 시 취급장치가 표적과 함께 장전되므로 유체유발진동에 의한 떨림을 방지하기 위해 지지대 역할을 하며 고정장치 (OR clamp)에 의해 고정되어 있다.

그러나, 이 안내관은 노심을 지난 냉각수가 침니 상부로 분출될 수 있는 유로를 제공하므로 이를 억제하기 위해 많은 구멍을 뚫어 노심을 지난 냉각수가 침니 상부에 도달하기 전에 순환펌프에 흡입되어야 한다.

2.2 표적 취급장치 및 표적

표적 취급장치는 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 표적 착탈장치가 있으며 120도 간격으로 3개의 볼이 설치되어 있어 취급장치의 상부에서 조작하면 스프링 장력에 의해 표적

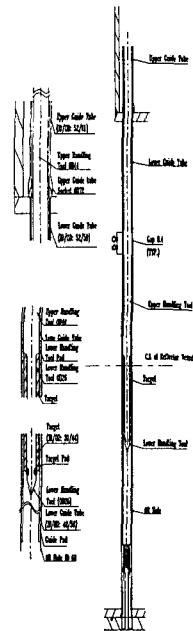


Fig. 2 Assembly of target, target handling tool and guide tube

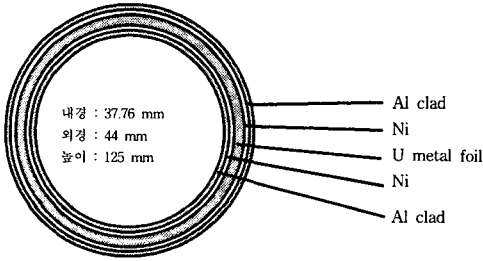


Fig. 3 Fission mo-99 target

을 착탈할 수 있다. 취급장치는 반사체 탱크의 상부에 자중으로 고정되도록 턱이 있다. 그리고 취급장치는 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⁽³⁾.

- 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 열/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^{(4),(5)}.

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

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.

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

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

부시네스크 가설 (Boussinesq 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 난류운동에너지, 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 난류운동에너지

지의 생성을 나타내고, G_b 는 부력으로 인한 난류운동 에너지의 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 사용되었던 계수 값들은 관련 전산해석 시방에 따라 다음의 값들을 적용하였다⁽⁵⁾.

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

$$Pr_k=1.0 \text{ 및 } Pr_\epsilon=1.3 \text{이다.}$$

그리고 난류점성계수 μ_t 는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

3.2 계산조건 및 방법

하나로는 상향 유동이므로 안내관에 많은 구멍이 뚫어져 있는 경우에는 순환펌프의 흡입력 영향범위에 있어 많은 냉각수가 흐를 수 있다. 반대로 구멍이 없는 경우에는 안내관이 순환펌프의 흡입력을 막고, 안내관과의 마찰손실이 커진다. 이와 같이 어려운 조건에서도 표적을 냉각할 수 있는지를 확인하기 위해 열유동 전산해석을 하였다.

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

그림에서와 같이 표적은 2개가 동시에 장전되며 원형으로 지시한 것에 대해서는 fig. 5에서 상세하게 표시하였다. 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. 경계조건에서의 차압은 플레넘 입구에서 조사공 출구까지 걸리는 차

압 210 kPa와 안내관의 높이 3 m에 해당하는 수두 30 kPa를 합하여 240 kPa로 정하였다. 표적의 발열량은 379.92 kW/m를 기준으로 표적의 부피를 고려하여 $2.958e+10 \text{ W/m}^3$ 을 적용하였다⁽³⁾.

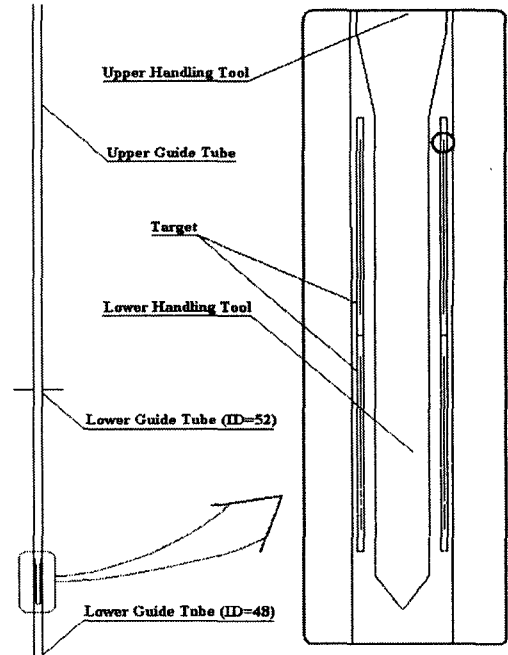


Fig. 4 Analysis model

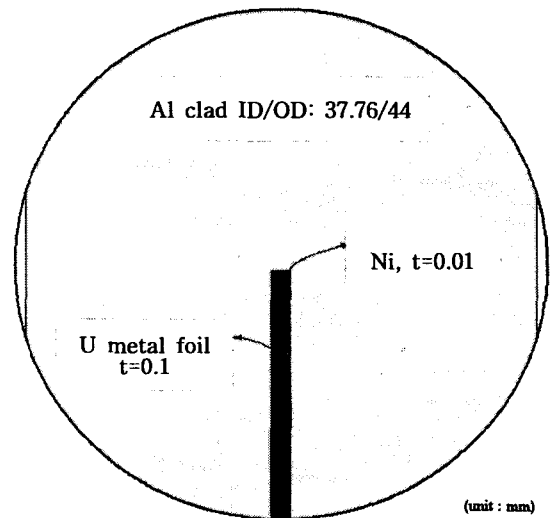


Fig. 5 Detail of target

Table 1 Boundary conditions

Description	Pressure [pa]	Temp. [°C]	Heat [W/m3]	Remarks
Inlet	240,000	35	-	Pressure Inlet
Target (U metal foil)	-	-	2.958e+10	Solid
Outlet	0	-	-	Pressure Outlet

3.3 결과 및 고찰

3.3.1 압력분포

OR5의 조사공에 안내관이 설치되어 있고, 그 안에 표적이 장전되어 있는 상태에서 하나로가 정상적으로 가동하고 있을 때, 안내관 정압을 계산하여 fig. 6에 나타내었다.

그림에서 가운데 표시된 것은 안내관 전체에 걸리는 정압을 표시하고, 우측에 표시한 것은 표적 부분을 상세하게 도시한 것이다. 안내관의 출구 정압을 0 kPag로 표시할 때 표적주변에 걸리는 차압은 230 kPag이다.

차압을 유발하는 곳은 표적이 상부로 밀리지 않도록

고정하기 위한 부분을 구배지게 표시하였으며 안내관과 표적취급장치의 간격을 따라 유로가 좁아짐으로서 차압이 발생됨을 알 수 있다.

내부표면과 외부표면은 각각 218.7 kPa와 218.0 kPa를 나타내어 외부표면이 0.7 kPa의 높은 압력을 보였으며 이는 안내관과의 공간이 더 좁기 때문이다.

3.3.2 속도분포

압력계산과 동일한 조건에서 안내관 내의 속도분포를 fig. 7에 나타내었다. 가운데 표시한 것은 안내관 전체에 대한 속도분포를, 오른쪽에 표시한 것은 표적주변의 속도분포를 각각 나타내고 있다. 표적 내 외부에서의 평균 유속은 약 3 m/s 내외이며, 표적을 지난 유속은 안내관과 취급장치 사이의 유로축소로 인하여 최대 6.2 m/s를 나타내고 있다.

이 속도는 안내관에 많은 구멍이 없는 상태에서 계산한 최소 유속이며 많은 구멍이 있는 경우에는 순환펌프의 흡입력에 영향을 받아 더 빠르게 흐른다.

따라서, 가장 어려운 조건에서 표적을 생각할 수 있는 최소유량은 약 2.72 kg/s로 예측되었다.

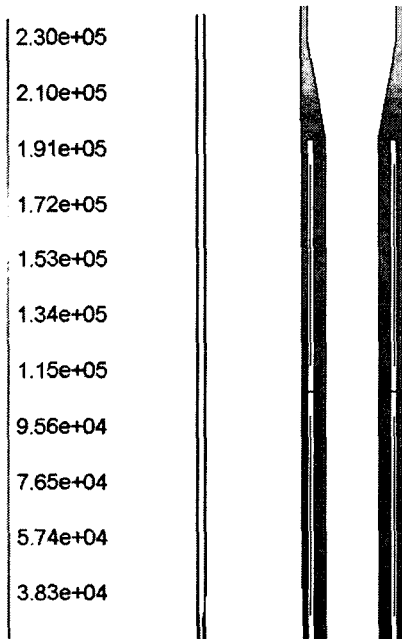


Fig. 6 Contour of static pressure (Pa)

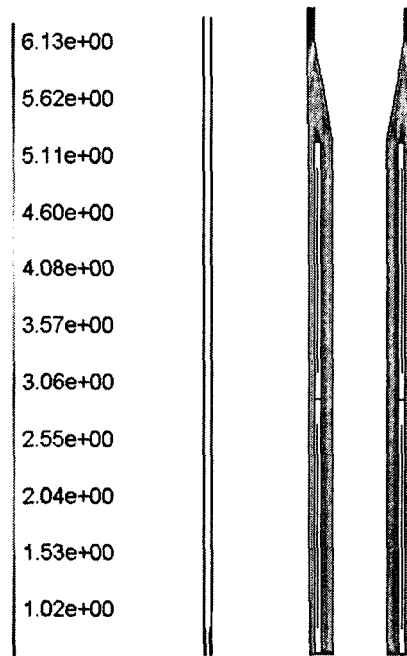


Fig. 7 Contour of velocity magnitude (m/s)

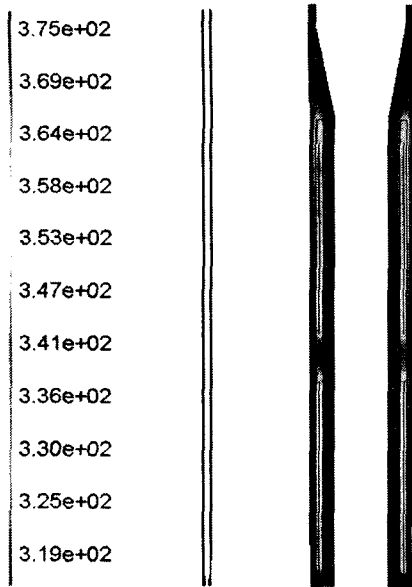


Fig. 8 Contour of static temperature (K)

3.3.3 온도분포

앞서 설명한 압력분포 및 속도분포와 동일한 조건에서 표적부근의 온도분포를 계산하여 fig. 8과 같이 표적과 피복의 온도분포를 나타내고 있다.

하부보다 상부표적이 더 높은 온도분포를 나타내었으며 최대온도는 104.6 °C (377.6 K)이다. 이는 표적의 최대허용온도인 146.57 °C보다 42.13 °C 낮다.

냉각수 유입온도가 35 °C일 때, 안내관 출구의 냉각수 온도는 약 41.5 °C (314.7 K)로 나타내었다. 피복의 외부와 내부의 평균온도는 각각 61.2 °C (334.2 K)와 62.2 °C (335.2 K)이며 피복재 용융온도 이하를 나타내었다.

그리고 상하부 표적의 니켈의 외부와 내부 평균온도는 각각 73.6 °C (346.7 K)와 74.3 °C (347.3 K) 및 86.6 °C (359.6 K)와 87.4 °C (360.4 K)로 해석되었다.

4. 결론

표적 취급장치는 하나로 표적을 장전 및 인출하기 위한 것으로 타 유동관의 냉각수량에 영향을 미치지 않는 범위에서 조사공 내에서 표적이 충분히 냉각되어야 한다.

이를 검토하기 위해 안내관에 구멍이 없는 상태에서 냉각하는 가장 어려운 조건에서 전산유체의 해석기법을

이용하여 표적의 냉각특성을 해석하였으며 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) OR5의 조사공에 안내관이 설치되어 있고, 그 안에 표적이 장전되어 있는 상태에서 하나로 정상적으로 가동하고 있을 때, 안내관에 걸리는 차압은 230 kPag이다. 그리고 표적의 내부표면과 외부표면은 각각 218.7 kPa와 218.0 kPa를 나타내어 외부표면이 0.7 kPa의 높은 압력을 보였다.
- 2) 동일한 조건에서 안내관 내의 속도분포는 표적 내 외부에서의 평균유속은 약 3 m/s 내외로 나타내었다. 이 속도는 안내관에 구멍이 없는 상태에서 계산한 가장 어려운 조건에서의 유속이며 유량은 약 2.72 kg/s로 예측되었다.
- 3) 냉각수 온도는 6.5 °C 상승하며 표적의 최대온도는 104.6 °C (377.6 K)로 나타내어 표적 최대허용 온도 (146.6 °C)의 약 70% 범위에서 안전하게 냉각되었다.

후 기

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

참고 문헌

- [1] Park, Y. C., et al., 1996, "System Performance Test in HANARO", the 5th ASRR Vol. 1, 240-246.
- [2] Kim, H. I., et al., 1996, "Flow Characteristics of Korea Multi-Purpose Research Reactor", Proceedings of the 7th International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics.
- [3] Jun, B. J. and Park, Y. C., et. al, 2002, "Year 2002 HANARO Operation", KAERI/MR-395/2002, KAERI.
- [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, Gyeongju, Korea.
- [5] Fluent Inc. Users Manual of FLUENT 5.4.