

## Fission Moly 표적을 장전하기 위한 안내관의 제트유동 억제 후 하나로 노심 유량분포

박용철<sup>\*1</sup>, 이병철<sup>2</sup>, 김봉수<sup>3</sup>, 김경련<sup>4</sup>

### FLOW DISTRIBUTION IN THE CORE OF HANARO AFTER SUPPRESSING THE JET FLOW IN THE GUIDE TUBE USED FOR LOADING FISSION MOLY TARGET

Yong-Chul Park<sup>\*1</sup>, Byung-Chul Lee<sup>2</sup>, Bong-Soo Kim<sup>3</sup> and Kyung-Ryun Kim<sup>4</sup>

*HANARO, a multi-purpose research reactor, 30 MWth open-tank-in-pool type, is planning to produce a fission moly-99 of radio isotopes, a mother nuclide of Tc-99m, a medical isotope and a target handling tool is under development for loading and unloading it in a circular flow tube (OR-5) of HANARO. A guide tube is extended from the reactor core to the top of the reactor chimney for easily loading the target under a normal operation of the reactor. But active coolant through the core can be quickly raised up to the top of the chimney through the guide tube. The jet flow was suppressed in the guide tube after reducing the inner diameter of a flow restriction orifice installed in the OR-5 flow tube for adding the pressure difference in the flow tube. This paper describes an analytical analysis to calculate the flow distribution in the core of HANARO after suppressing the jet flow of the guide tube. As results, it was confirmed through the analysis results that the flow distribution in the core of HANARO were not adversely affected.*

**Key Words:** 냉각특성(Cooling Characteristics), 유량조절 오리피스(Flow Restriction Orifice), 안내관(Guide Tube), 제트유동(Jet-Flow), 표적취급장치(Target Handling Tool)

### 1. 서 론

Fission Mo-99는 의료용 방사성 동위원소인 Tc-99m의 모핵종 (mother nuclide)으로 U-235의 핵분열에 의해 생성된다. 이를 30 MWth의 개방수조형 다목적 연구로인 하나로[1]에서 생산하기 위해 표적취급장치를 개발하고 있다.

표적취급장치는 운전 중에 방사선을 표적에 조사하기 위해 표적을 OR5 조사공 (irradiation hole)에 장전하고, 조사 후에는 표적을 인출하여야 한다. 하나로 노심은 약 12 m 길이 수중에 있으므로 표적의 장전과 인출을 쉽게 하기 위해 안내관 (guide tube)이 조사공에서 침니상부까지 연장되어야 한다.

그러나 하나로 노심은 상향유동으로 냉각되므로 표적을 장전 인출하는 경우에 조사공이 비워지면 안내관은 방사선을 가진 냉각수를 수조상부로 유인하는 통로가 되어 수조상부의 방사선 준위를 상승시킨다. 수조상부의 방사선 준위를 낮게 유지하기 위해서는 이 조사공의 안내관 제트가 억제되어야 한다. 이를 위해 안내관에 측면 구멍이 뚫어져 있으나 안내관의 강도를 고려하여 더 많은 구멍을 뚫을 수 없어 유량을 줄이는 실험을 하였다. 이 조사공의 유량을 14 kg/s로 줄였을 때 안내관 제트가 관 내부에서 억제됨이 조사되었다[2].

보수적으로 이 유량의 80%에 해당하는 11.2 kg/s의 유량이 흐르도록 조사공 하부에 설치된 유량조절 오리피스의 내경을 37.5 mm에서 31 mm로 감소시켰다. 그 결과 안내관 제트유동은 조사공이 비워지더라도 안내관 내부에서 소멸되었다. 그리고 표적을 장전하였을 때에는 6.38 kg/s의 유량이 흘러 표적을 안전하게 냉각할 수 있음을 확인하였다[3].

따라서 본 논문에서는 안내관 제트유동이 안내관 내부에서 억제되는 경우 주변 유동체질의 유량변동을 조사하기 위해 유동해석을 하였다.

접수일: 2005년 9월 12일, 심사완료일: 2005년 11월 2일.

1 정회원, 한국원자력연구소 연구로계통관리

2 비회원, 한국원자력연구소 연구로기술개발

3 비회원, 한국원자력연구소 연구로계통관리

4 비회원, 한국원자력연구소 연구로계통관리

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

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 하나로의 표적취급장치

하나로 노심은 Fig. 1과 같이 23개의 육각 유동채널과 16개의 원형 유동채널로 구성된다. 그림상의 문자 및 숫자는 유동관의 번호이며 Fission moly 표적은 원형 유동채널 중 외부에 있는 OR5 조사공에 장전된다.

OR5 조사공의 안내관은 Fig. 2와 같이 설치되며 하부와 상부 안내관으로 구성된다. 하부 안내관은 유동채널에 설치되어 표적을 냉각하기 위한 유로를 형성하고, 유체유발진동을 억제하기 위한 지지대 역할을 한다.

상부 안내관은 수조 상부에서 표적의 장전과 인출을 용이하게 하기 위해 침니 상부로 연장되며 고정장치 (OR clamp)에 의해 고정된다. 그리고 이 안내관 표면에는 안내관 제트를 억제하기 위해 관면적의 30%에 해당하는 측면 구멍이 뚫여져 있다.

원자로가 가동되면 노심은 핵분열에 의한 열이 발생하며 이를 냉각하기 위해 냉각수가 흐른다. 총 냉각수는 780 kg/s이며 이중 90% (703 kg/s)인 노심 냉각수는 그림과 같이 유입구 (inlet plenum), 유동채널 (flow channel) 및 침니 (chimney)를 지나 침니 하부에 있는 출구를 통해 유출된다. 이 노심 냉각수가 유동채널을 지날 때, 93%의 유량 (653 kg/s)이 유동채널 내부를, 나머지가 유동채널 외부로 각각 흘러 노심을 냉각한다.

그리고 총유량의 나머지 10% (77 kg/s)인 노심 우회유량은 노심을 우회하여 수조에 공급된다. 이 유량은 침니 상부를 거쳐 침니 하부에 있는 순환펌프 입구를 통해 노심 냉각수와 함께 흡입된다. 그 흐름 방향이 노심 냉각수의 흐름방향과 반대이므로 방사선을 띤 노심 냉각수가 수조 상부로 솟아오르는 것을 억제한다[4].

### 2.2 실험방법

원자로 유동채널의 유량을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 유량측정용 모의핵연료, 2개의 1/8" 압력 프로브 (probe), 차압전송기와 이송관으로 구성된다. 유량 측정용 모의 핵연료에 설치된 2개의 프로브는 각각의 압력을 원자로실 바닥에 설치된 차압 전송기에 전달한다. 차압 전송기로부터 읽어 들인 전압신호는 A/D 변환기를 통해 PC에 저장된다. 측정된 차압은 식 (1)의 압력손실 관계식에 대입하여 채널유량으로 환산된다.

$$m = A(\Delta P)^b \quad (1)$$

실험의 신뢰성을 검증하기 위해 유량측정용 모의핵연료는

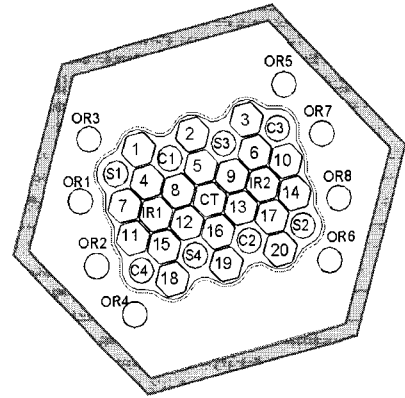


Fig. 1 View of flow channel in HANARO

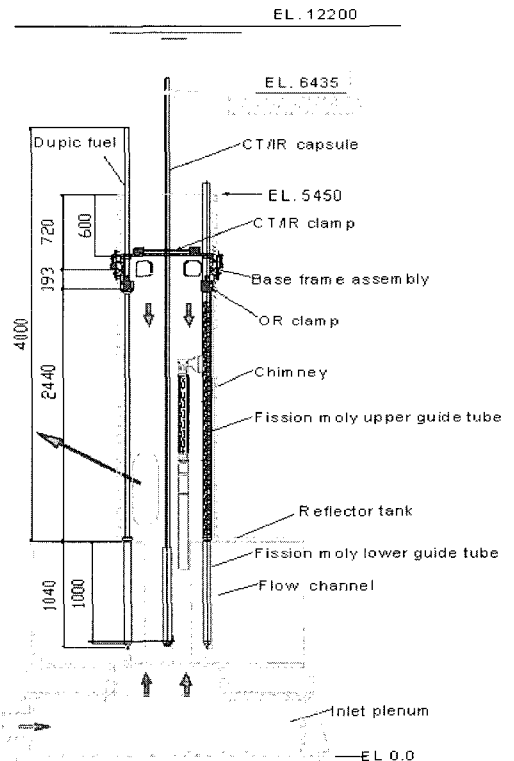


Fig. 2 Installation of fission moly guide tube

원형과 육각으로 각각 3개씩 만들었으며 실험을 통해 얻은 압력손실계수의 상수(A)와 지수(p)를 Table. 1에 각각 나타내었다[5]. 그리고 표에서는 이 실험식으로 구한 유량을 설계유량과 비교하여 상대오차를 보여 주고 있으며 최대 약 1.7%의 상대오차를 가지므로 설계값과 잘 일치함을 보여 주었다.

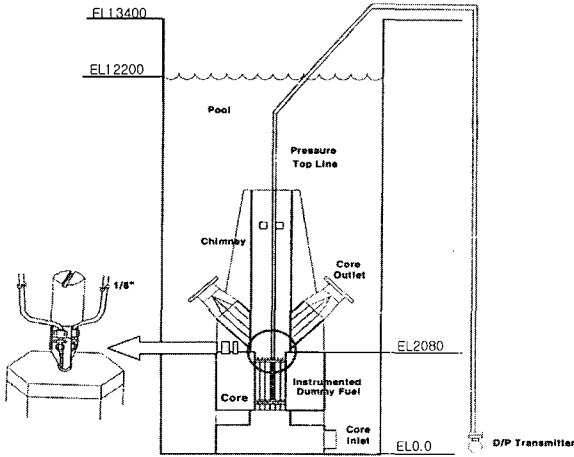


Fig. 3 Configuration of pressure measurement apparatus

### 3. 유동해석

#### 3.1 지배방정식

유동해석은 상용 프로그램을 사용하였다. 관 내부의 유동 해석을 하기 위해 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 등을 만족하여야 한다[6].

스칼라에 대한 일반 미분방정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (2)$$

이때의 연속방정식은  $\Phi=1$ ,  $S_m=0$ 이므로 식 (3)과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

비압축성 정상유동의 Navier-Stokes 방정식은  $\rho$ =상수,  $\Phi = u_i$ ,  $\Gamma = \mu$ ,  $S_m = -\partial P / \partial x_i + \rho g_i + V_{x_i}$ 이므로 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - u'_i u'_j \right] \quad (4)$$

여기서,  $u_i$ 는 유체의 평균유속,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\nu$ 는 유체의 층류 동점성계수,  $u'_i$ 은 유체의 난류섭동성분을 각각 의미한다.

Table. 1 Constants and exponents of flow measurement dummy fuels

Dummy fuel	A	p	Relative error(%)	
Hexagon	DH-002	1.88853	0.566339	0.867
	DH-003	1.89123	0.559319	0.742
	DH-004	1.91453	0.548788	1.203
Circular	DC-002	1.24527	0.558143	1.514
	DC-003	1.37596	0.568535	1.678
	DC-004	1.28139	0.551514	1.325

부시네스크 가설 (Bosnesque eddy-viscosity hypothesis)에 의하여 레이놀즈 응력과 난류 동점성계수는 식 (5) 및 (6)과 같이 표현된다.

$$\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (6)$$

여기서,  $k$ 는 난류 운동에너지,  $\epsilon$ 은 난류소산율,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker Delta (단위행렬)를 의미한다.

유동관 내에서의 스윙 유동 (swirl)을 고려하여 RNG  $k-\epsilon$  난류모델을 적용하였다. 이 모델에 관한 운동에너지 및 소산을 전달방정식은 식 (7) 및 (8)과 같다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \right] \quad (7)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - \frac{C_{3\epsilon} \rho n^3 \left( 1 - \frac{n}{n_0} \right)}{1 + \beta n^3} \frac{\epsilon^3}{k} \quad (8)$$

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  $C_{3\epsilon}$ 는 상수이고,  $Pr_k$ 와,  $Pr_\epsilon$ 은 난류 Prandtl 수이다. 해석에 사용되어진 계수값들은 관련 전산해석시방에 따라 적용하였다[6].

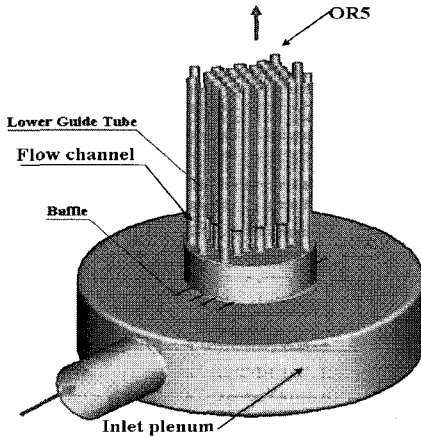


Fig. 4 Analysis model

3.2 해석방법 및 모델

해석방법은 실험을 통해 얻은 각 채널의 압력손실계수를 적용하여 각 채널의 유량을 구하고, 그 결과를 실험결과와 비교하여 계산방법을 검증하였다. 그리고 검증된 계산방법을 이용하여 OR5 조사공의 안내관 체트유동이 억제된 상태의 유량과 주변 채널의 유량을 모의하였다.

유동채널에서 발생하는 차압은 유동채널 하부의 구조부와 핵연료에 의한 것이므로 모두 다공성 물질(porous media)로 처리하여 계산하였다. 격자는 정렬 및 비정렬 격자를 혼용하여 약 150만개의 cell로 구성하였으며 중력을 고려하였다.

난류모델은 RNG  $k-\epsilon$  모델을 적용하여 계산하였으며 벽면에서의 유동특성을 예측할 수 있도록 격자를 구성하였다.

해석모델은 Fig. 4와 같으며 계산범위는 유입구에서부터 유동채널 상단까지이다. 경계조건은 Table. 2에 표시한 바와 같으며 실험으로 얻은 플레넘 입구를 통해 노심으로 유입되는 유량은 갭 유량을 제외한 653.5 kg/s이다. 이때의 차압은 226 kPag로 측정되어 이를 적용하였다.

3.3 해석결과 및 고찰

3.3.1 전산해석 방법 검증

압력손실계수 실험값을 이용하여 해석한 결과는 Fig. 5에 나타내었으며 해석방법을 검증하기 위해 계산결과를 측정유

Table. 2 Boundary conditions

Flow rate	653.5 kg/s
Differential pressure	226 kPag
Gravity accelerator	9.8 m/s <sup>2</sup>
Temperature	40 °C

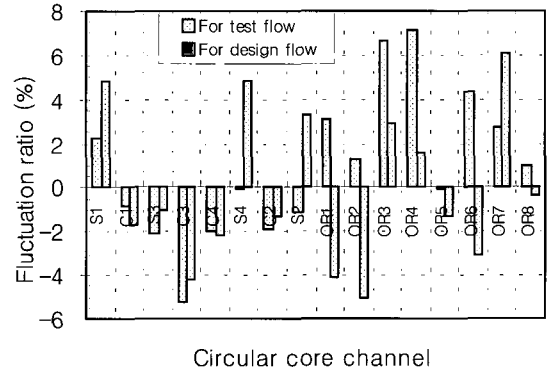
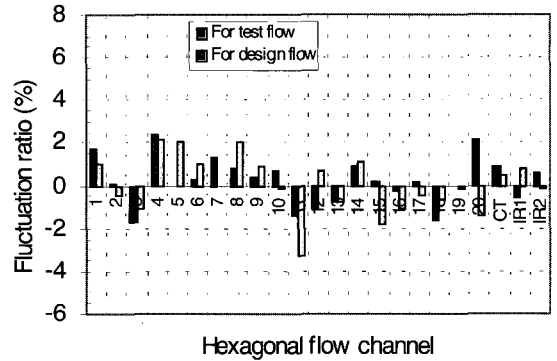


Fig. 5 Fluctuation ratio of calculation flow rate in hexagonal and circular flow channels

량과 설계유량에 대한 변동율 (fluctuation ratio, (계산값-기준값)/기준값x100(%))로 각각 표시하였다.

육각 유동채널에서 측정유량에 대해 4번 채널이 최고 2.372%의 증가를 보였고, 3번 채널이 최고 1.75%의 감소를 보였으며 상대오차의 평균은 0.865%를 나타내었다. 그리고 설계값에 대해서도 마찬가지로 4번 채널이 최고 2.102%의 증가를 보였고, 11번 채널에서 최고 3.25%의 감소를 보였으며 상대오차의 평균은 1.031%를 나타내어 잘 일치함을 보여주었다.

원형 유동채널의 해석결과는 실험값에 대해 OR7 채널에서 최고 6.102% 증가하였고, C3에서 최고 5.219% 감소를 보였으며 상대오차의 평균은 2.607%를 나타내었다. 그리고 설계값에 대해서는 OR7 채널에서 최고 6.102% 증가하였고, OR2에서 최고 5% 감소하였으며 상대오차의 평균은 2.975%를 보여 잘 일치함을 보여 주었다.

총 노심유량에 대해 측정유량, 설계유량 및 계산유량을 정리하여 Table. 3에 나타내었다. 계산결과 총유량은 측정유량이나 설계유량으로 계산한 것과 잘 일치하므로 계산방식은 신뢰할 수 있는 것으로 평가하였다.

Table. 3 Comparison of total flow(unit: kg/s)

Flow tube	Design unit flow	No. of flow tube	Design flow	Test flow	Cal'n flow
Circular	12.58	16	201.28	201.3	203.1
Hexagon	19.64	23	451.72	452.2	453.2
Total flow			653.0	653.5	656.3

3.3.2 유량분포 특성

실험으로 얻은 유량분포는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 채널유량을 채널형식별 평균유량의 비율인 유량분포율로 나타내었다. 그림에서 최소유량이 발생한 채널을 빗금으로 표시하였으며 육각 유동채널에서는 20번 채널이 96.7% (0.967)를, 원형 유동채널에서는 OR6 채널이 93.8% (0.938)를 각각 나타내어 최소유량을 보이고 있다. 그리고 평균유량의 99%이하를 나타내는 유동채널을 색깔로 표시하였으며 입구와 출구 부근에 분포하는 특성을 보이고 있다.

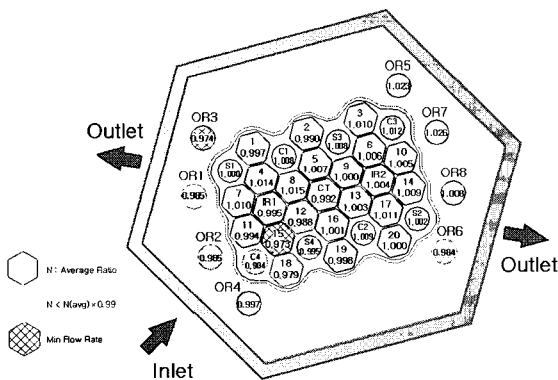


Fig. 6 Flow distribution of the flow channel in HANARO after test

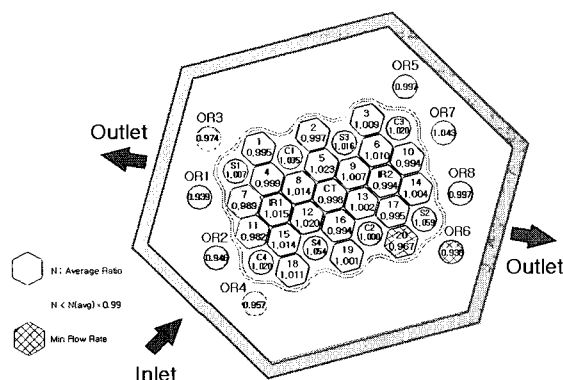


Fig. 7 Flow distribution of the flow channel in HANARO after calculation

이는 플레넘으로 유입된 냉각수가 1내지 2회의 회전유동 후 노심으로 유입되므로 입구와 출구 부근에서 낮은 유량이 분포하는 것으로 분석된다.

동일한 방식으로 계산결과에 대한 유량분포를 Fig. 7에 나타내었다. 육각 유동채널 15번과 원형 유동채널 OR3가 평균 유량의 97.3%와 97.4%를 각각 나타내어 채널별 최소유량을 나타내었다. 실험결과와 비교하여 최소유량이 나타난 유동채널의 위치가 다르지만 입출구 부근에서 낮은 유량분포를 보이는 것은 실험결과와 동일한 특성을 보여 주고 있다.

3.3.3 안내관 제트 억제 후 유량분포

검증된 계산방법을 이용하여 안내관 제트가 억제된 후의 유량분포상태를 Fig. 8에 각각 나타내었다. 각 그림에는 유량 분포에 대해 안내관 설치 전의 실험값 (test)과 계산값 (calculation) 그리고 안내관 제트 억제 후의 계산값 (modification)을 표시하여 OR5의 유량변동에 따른 주변 채널의 유량변화를 조사하였다.

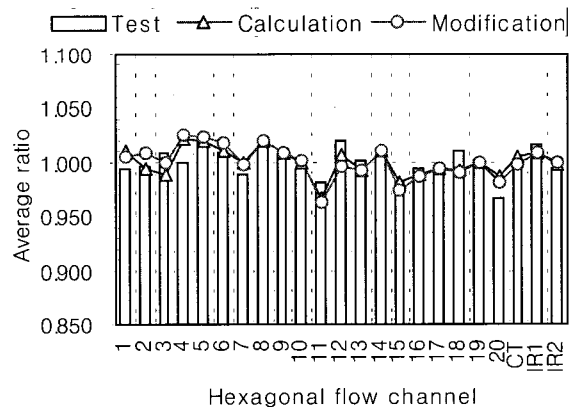
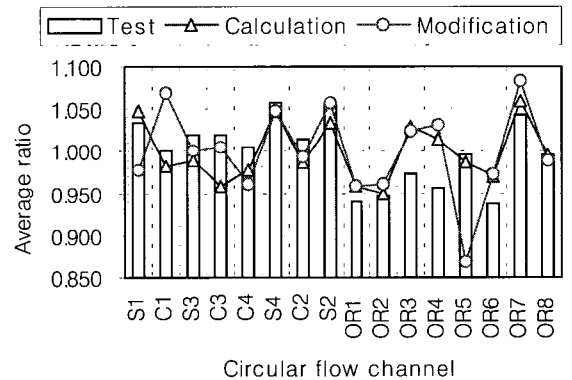


Fig. 8 Flow distribution of circular and hexagonal flow channel

OR5의 평균유량분포율은 87%이며 평균유량이 12.88 kg/s 이므로 11.2 kg/s를 나타내어 안내관 제트를 억제할 수 있는 유량이 모의되었다. OR5의 유량감소로 인해 원형 유동채널의 유량분포는 C1 채널이 약 8% 증가하였고, S1 채널이 약 7% 감소하였으나 OR5를 제외한 모든 채널은 평균유량의 95%를 상회함을 보여 설계요건을 만족하였다. 육각 유동채널의 유량 분포에서도 2번 채널이 최대 1.5% 증가하고, 15번 유동관은 1% 감소하였으나 모든 유동관이 평균유량의 95%를 상회하여 설계요건을 만족하였다.

## 5. 결 론

Fission Moly를 생산하기 위해 OR5 조사공의 안내관 제트 억제 후 하나로 노심의 유량분포를 검증된 계산방법으로 계산하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 안내관 설치 전의 각 채널의 유량오차, 총유량 및 유량분포 특성을 계산한 결과는 실험결과와 유사하게 나타내어 계산방법을 검증할 수 있었다.
- 2) OR5의 유량은 하부 유량조절 오리피스를 31 mm로 조정하였을 때, 11.2 kg/s를 나타내어 안내관 제트를 억제할 수 있는 유량이 모의되었다.
- 3) OR5의 유량감소로 인해 육각 유동채널의 유량은 큰 변화

가 없으나, 원형 유동채널의 C1 채널은 최대 약 8 % 증가하였고, S1 채널은 최소 약 7% 감소하였다.

- 4) 안내관 제트 억제 후 OR5를 제외한 모든 채널이 평균유량의 95%를 상회하여 설계요건을 만족한다.

## 참고문헌

- [1] Park, Y.C. et al, 1996, "System Performance Test in HANARO," the 5th ASRR vol.1, p.240-246.
- [2] Park, Y.C. et al, 2005, "The Cooling Characteristics for Circular Irradiation Hole under Suppressing Jet Flow at Guide Tube in the HANARO," *KSCFA J.* vol.10, second edition, p.1-6.
- [3] Park, Y.C. et al, 2004, "The Cooling Characteristics for Circular Irradiation Hole under Suppressing Jet Flow at Guide Tube in HANARO," *한국전산유체공학회 2004 춘계 학술대회논문집*, p.208-213.
- [4] Park, Y.C. et al, 2002, "Flow Analysis of HANARO Flow Simulated Test Facility," *the Abstracts of The Fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conference*, p.309.
- [5] Heonil Kim et. al, 1996, "HANARO Core Channel Flow Rate Measurement," *한국원자력연구소, KAERI/TR-717/96.*
- [6] Fluent Inc. Users Manual of FLUENT 5.4.