

# 하나로 유동모의 시험설비의 노심채널 유동분포 해석

박 용 철<sup>\*1</sup>, 김 경 련<sup>\*2</sup>

## The Analysis of Flow Distribution in the Core Channel of the HANARO Flow Simulated Test Facility

Y. C. Park and K. R. Kim

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. Many experiments should be safely performed to activate the utilization of the HANARO. A flow simulated test facility has been developed for the verification of structural integrity of those experimental facilities prior to loading in the HANARO. This test facility is composed of three major parts; a half-core structure assembly, flow circulation system and support system. The half-core structure assembly is composed of plenum, grid plate, core channel with flow tubes, chimney and dummy pool. The flow channels are to be filled with flow orifices to simulate similar flow characteristics to the HANARO. This paper describes an analysis of the flow distribution of the core channel and compares with the test results. As results, the analysis showed similar flow characteristics compared with those in the test results.

**Key Words:** 하나로 (HANARO), 유동해석 (Flow analysis) 유동모의 시험장치 (Flow simulated test facility) 1/2 노심 구조물 집합체 (Half-core structure assembly)

### 1. 서 론

하나로 유동모의 시험설비는 하나로에 실험장치를 장전하기 전에 구조적 건전성과 그 성능을 예측하기 위해 개발되었다. 이 설비는 하나로 노심의 약 반으로 구성된 1/2 노심 구조물 집합체에 핵연료 대신에 유동모의 오리피스를 장전하여 방사능의 피폭 없이 시험할 수 있는 장점이 있다. 이 유동모의 시험설비는 1/2 노심 구조물<sup>(1)</sup>, 유체순환계통<sup>(2)</sup>, 보조계통<sup>(3)</sup>으로 구성되어 있다. 노심 구조물 집합체는 육각형 유동관 13개, 원형 유동관 7개 및 46개의 갭 홀이 뚫어져 있다. 갭 홀은 하나로와 동일하게 유동관 외부를

식히기 위한 냉각수가 흐르도록 설치되어 있다.

이 유동모의 시험설비가 현재 가동 중인 하나로와 동일한 유동특성을 만족하기 위해 하나로와 동일한 운전조건 하에 유동모의 오리피스 노심에서의 차압이 하나의 설계차압 (209 kPa)을 만족하여야 한다. 또한 노심채널에서의 유동분포는 하나로와 마찬가지로 입출구 부근에서 낮은 유량분포를 보여야 하며 각 유동관의 유량은 평균유량의 95%를 상회함을 보여야 한다<sup>(4)</sup>.

본 연구는 시험장치의 노심채널 유동특성이 하나로와 유사함을 검증하기 위해 노심채널에 대한 유동분포해석을 하고, 그 결과를 시험 결과와 비교하여 하나로 유동모의 시험장치가 하나로와 유사한 유동특성을 가지는지 검증해 보았다.

\* 1 정희원, 한국원자력연구소  
\* 2 비희원, 한국원자력연구소  
\* E-mail : ycpark@kaeri.re.kr  
\* E-mail : kimkr2@kaeri.re.kr

## 2. 해석모델

### 2.1 지배방정식

계 내부의 유동을 계산하기 위하여 연속방정식, 비압축성 Navier-Stokes 방정식 등을 만족하여야 한다. 따라서 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같이 적용하였다<sup>(1)</sup>.

1) 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

2) 운동량 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

3)  $k - \epsilon$  난류 방정식

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

### 2.2 해석방법 및 경계조건

수치해석은 여러 분야에 사용되고 있는 유한 체적법 (finite volume method)의 상용 유동해석 프로그램인 Fluent 6.0을 사용하였다. 각각의 유동현상을 계산하기 위한 해석 모델은 Fig. 1과 같으며 계산에 사용된 셀 (cell)은 150만개의 정렬 및 비정렬 격자를 혼용하였다.

해석방법은 Table 1과 같이 중력을 고려하여 입구와 출구에서의 수두압력을 고려하여 3차원 정상유동 모델로 계산하였다.

유동관에서 발생하는 차압은 기존의 실험 데이터를 기준으로 유동관 하부의 구조부에서 발생하는 차압을 통해 발생하는 차압이 형성되도록 다공성 물질 (porous media)로 처리하였다.

운전 및 경계조건은 Table 1과 같이 하나의 운전 조건과 동일하게 정하였다. 노심유량 369kg/s은 설계

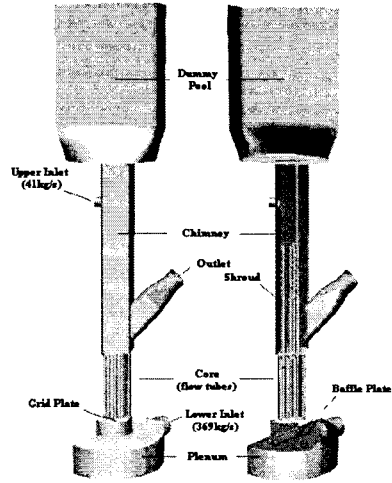


Fig. 1 Modeling of core structure assembly

Table 1 Operation and boundary condition

Operating conditions	Fluid	Water (998.2 kg/s)
	Temperature	40 °C
	Pressure	1 atm
	Gravity	9.8 m/s <sup>2</sup>
Boundary conditions	Low inlet	Core flow , 369 kg/s
	Upper inlet	Bypass flow, 41 kg/s
	Outlet	Outlet flow, 410 kg/s
	Hexagonal flow tube channel	Porous media (dP=209 kPag)
	Cylindrical flow channel	
Out core channel		

차압이 발생할 때 각각의 육각과 원형 유동관에 설계유량 19.7 kg/s와 12.7 kg/s가 각각 흐르고, 갭 홀에 하나로의 반에 해당하는 25 kg/s의 유량이 포함되어 있다.

## 3. 해석결과

### 3.1 노심유량의 분포 계산

시험장치의 노심에는 설계조건과 마찬가지로 설계 유량과 설계차압을 만족하는 오리피스가 장전되고, 순환유체의 온도가 약 40 °C인 유체가 노심 유입구와 우회관에는 369 kg/s와 41 kg/s의 유량이 각각 흐를 때, 노심 유동분포를 계산하여 Fig. 2에 나타내었다.

그림에서 각 유동관에 표시한 숫자는 유동관 번호와 그 아래에 평균 유량비를 각각 나타내었다. 이 비율은 육각과 원형 유동관으로 나누어 각각의 평균을 구하고 그 값으로 각 유동관 유량을 나눈 값이다.

그림에서 평균유량의 99 %이하를 검게 표시하였으며 그 중에서 최소유량을 해칭으로 표시하였다. 이 경우 모든 유동관은 평균유량의 98 %이상을 나타내어 설계요건인 평균유량의 95%를 상회하여 설계조건을 만족하였다. 이때의 노심유량은 369.2 kg/s이며 이 중에서 육각과 원형 유동관 및 갭 홀 유량은 각각 253.5 kg/s, 91.0 kg/s 및 24.7 kg/s를 나타내어 설계조건을 잘 만족하였다.

**3.2 하나로 노심의 유동분포와 비교**

시험장치의 유동분포 계산결과를 비교하기 위해 하나로 노심에 대해 실험으로 구한 유동분포를 Fig. 3에 나타내었다.

그림에서와 같이 하나로의 유동분포특성은 입구관과 출구관 가까운 곳에서 낮은 유동분포를 보여주고 있으며 급변 유동해석한 결과에서도 이와 유사한 유동특성을 보이고 있다.

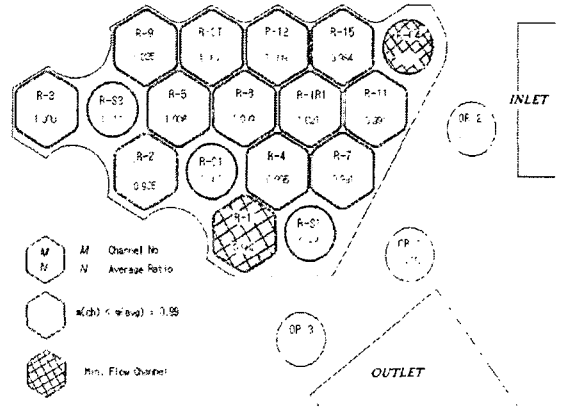
그러나 하나로에서는 외부 원형 유동관에서 낮은 유량분포를 보였지만 급변 유동해석한 결과에서는 더 많은 유량이 흐르는 것으로 조사 되었다.

**3.3 시험장치의 노심유동분포 실험결과와 비교**

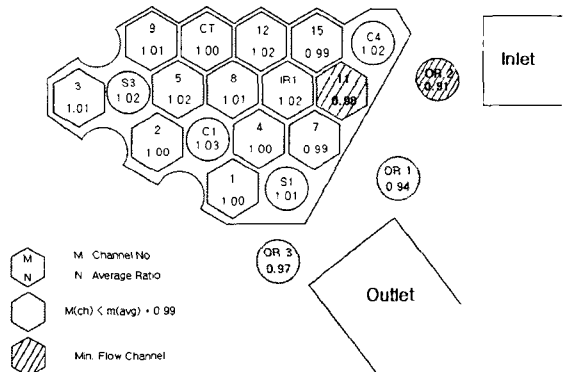
실험방법은 유체의 온도를 40 °C로 유지<sup>(5)</sup>하고, 육각과 원형 유동관에 각각의 설계유량이 흐를 때 설계차압이 발생되도록 Fig. 4의 (a) 및 (b)와 같이 각각의 유동모의 오리피스를 노심에 장전하였다. 그리고 7.8 m 깊이에 있는 노심의 각 유량을 측정할 수 있도록 Fig. 4의 (c) 및 (d) 같이 육각과 원형의 검중용 오리피스를 개발하였다. 이는 동일한 유동모의 오리피스의 상하부 오리피스 관에 120도 간격으로 분할된 압력 프로브 관을 설치하고, 이 관들을 한 개의 관으로 모아 모의수조 상부에 있는 압력 전송기에 연결하여 차압을 구하였다.

이 차압은 표 2에 나타난 바와 같이 유량 (kg/s)과 차압 (kPa)의 지수함수인  $Q = A \times dP^B$ 의 관계식에 적용하면 구할 수 있고 이 유량 특성 관계식은 실험치와 잘 일치하는 것으로 보고된 바 있다<sup>(6)</sup>.

각 유동관에 있는 유동모의 오리피스를 이 검중용 오리피스로 교체하여 각 유동관별로 유량을 측정하고, 이 값을 동일한 방식으로 평균 유량비를 구하여



**Fig. 2** Flow distribution in the core channel of the flow simulated test facility after calculation



**Fig. 3** Flow distribution in the core channel of the HANARO after field test

**Table 2** Experimental formula of the flow characteristics for flow verification orifices

Description	A	B	Tolerance min./max. (%)	Average Tolerance (%)
Hexagonal type	2.047	0.5255	0.04 - 0.2	0.1
Circular type	1.5711	0.4982	0.1 - 0.5	0.2

Fig. 5와 같이 노심의 유동분포를 나타내었다.

그림에서 각 유동관의 유량이 계산결과와 차이를 보이지만 유동분포특성은 입출구 가까운 곳에서 낮은 분포를 보여주고 있어 유동분포의 경향은 유사한 것으로 판단된다.

계산결과는 육각 및 원형 유동관이 평균유량의 98% 이상을 나타내었으나 실험결과는 내부 원형 유동관이 모두 95% 이하를 나타내었다.

그러나 외부 원형 유동관은 계산 결과와 마찬가지로 내부보다 더 많은 유량이 흐르는 경향을 보여 유사한 유동특성을 보여 주었다.

이러한 원인에 대해 노심의 총유량 측면에서 고찰해 보면 육각과 원형 유동관 및 갭 홀의 실험유량이 각각 244 kg/s, 83 kg/s 및 43 kg/s를 나타내어 총유량이 설계유량보다 1 kg/s 더 많이 흐르지만 갭 홀이 설계유량보다 더 많이 흐르기 때문에 내부 유동관의 유량이 더 적게 흐르는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 하나로 유동모의 설비의 노심채널의 유동분포를 수치해석하고, 시험결과와 비교 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 해석결과는 노심채널의 각 유동관의 유량이 설계요건인 평균유량의 95%를 상회하였다.
- (2) 해석결과는 플레넘의 입구와 침니 출구 부근에서 적은 유량 분포를 보여 하나로의 실험결과와 유사한 유동특성을 모의하였다.
- (3) 해석결과는 갭 유량이 설계요건을 만족하는 것으로 나타내었으나 실험결과는 더 많은 유량이 흐르는 것으로 조사되었다.
- (4) 이로 인하여 실험 결과의 노심유량은 해석 결과보다 더 적은 유량이 흐르는 것으로 판단되었다.

#### 참고문헌

- [1] Y. C. Park, et, al, 2002, "Flow Analysis of HANARO Flow Simulated Test Facility", Proceedings of the fifth JSME-KSME Fluid Engineering Conference, Nagoya, Japan.
- [2] Y. C. Park, 2004, "The Analysis for Flow Circulation System in HANARO Flow Simulation Facility", 유체기계저널, 제7권, 제1호, pp. 30~35.
- [3] Y. C. Park, et., al, 2002, "Technical Specification for Fabrication of Support System in HANARO Flow Simulated Test Facility", KAERI/TR-2299/2002.
- [4] Y. C. Park, et, al, 2003, "Technical Specification of Design Verification Equipment in HANARO Flow Simulated Test Facility", KAERI, HAN-DS-491-K002.
- [5] Y. C. Park, et., al, 2004, "Improvement of Temperature Control Function for HANARO Flow Simulation Test Facility", Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Gyeongju, Korea, pp. 97.
- [6] Y. C. Park, et, al, 2004, "Performance Characteristics of the HANARO Flow Simulated Test Facility", Proceedings of The Third National Congress on Fluids Engineering.

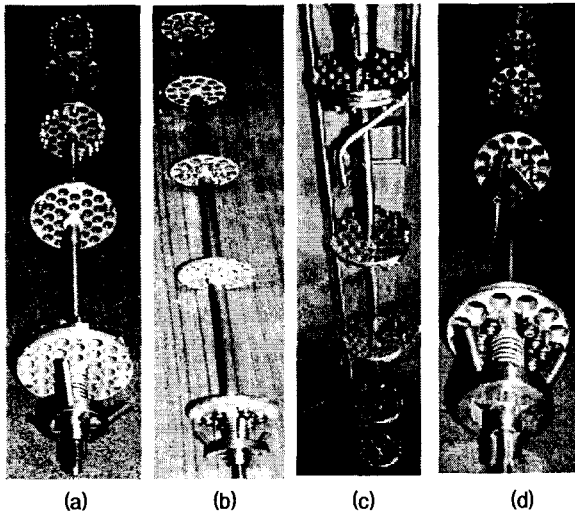


Fig. 4 Configure of flow simulation and verification orifices

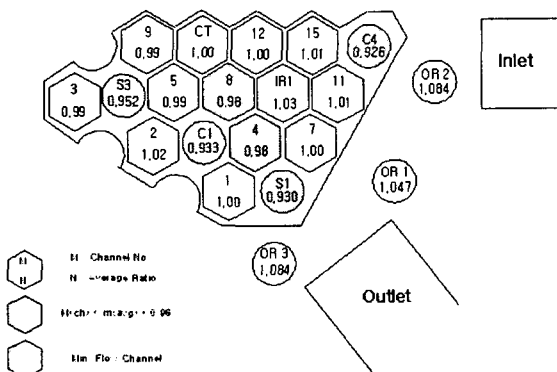


Fig. 5 Flow distribution in the core channel of the flow simulated test facility after field test