

하나로 유동모의 시험장치에 설치되는 모의 핵연료 유동해석

박용철*, 조영갑, 우종섭

Flow Analysis of Simulation Nuclear Fuel Loaded in the HANARO Flow Simulation Test Facility

Yong-Chul Park*, Yeong-Garp Cho* and Jong-Sub Wu*

Key Words : Simulation Nuclear Fuel(모의 핵연료), Simulation Orifice(모의 오리피스), Fluid Vibration Analysis(유체진동해석)

Abstract

The HANARO, multi-purpose research reactor, 30 MWth open-tank-in-pool type, is under 24 MWth of power operation since it reached to the initial critical in February, 1995. Many useful experiments should be safely performed to activate the utilization of the HANARO, but there is a radioactive risk of using the HANARO. To reduce the risk, a test facility, which is not reacted by nuclear fuel, is being developed to simulate similar flow characteristics with the HANARO. This paper describes the computational flow analysis to determine each shape of simulating fuels for simulating the flow similarities of 36 elements hexagonal fuels assembly and 18 elements circulating fuels assembly loaded in HANARO. The shapes of orifices were determined by the trial and error method and the structural integrities of them were verified by the finite element method assuming that the flow rate and pressure differences of reactor core are constant. The analysis results will be verified with the results of the flow test to be performed after the installation of this test facility.

1. 서론

하나로[1]은 30 MW의 개방 수조형 연구용 원자로이며 1995년 2월에 초임계에 도달한 이후 24 MW의 출력 운전을 하고 있다. 하나로의 이용을 활성화하기 위해 많은 유용한 시험들이 안전하게 수행되어야 하나, 한으로는 핵반응을 하므로 방사선의 위험이 있어 시험시설의 구조적 건전성이 입증되어야 한다. 이를 위해 핵반응을 하지 않는 모의 핵연료를 사용하여 하나로와 유사한 유동특성을 모의할 수 있는 시험장치를 개발하고 있다.

본 논문에서 하나로에 장착되는 36 개의 핵연료로 구성된 육각형 핵연료 집합체와 18 개의 핵연료로 구성된 원형 핵연료 집합체와 동일한 유동 특성을 모의할 수 있는 각각의 모의 핵연료의 형상을 결정하기 위해 수행한 전산유동해석에 대해 기술하였다. 노심에서의 유량과 차압이 일정하다는 가정 하에 모의 핵연료의 오리피스의 형상은 하나로의 핵연료 설계요건에 따라 시행착오 방법으로 구조적 건전성은 유체유발진동을 고려하여 유한요소법으로 각각 실시하였다. 이러한 해석결과들은 이 시험장치의 설치가 완료된 후에 수행될 유동시험으로 확인될 것이다.

2. 구조형상 및 설계조건

하나로의 핵연료는 그림 1과 같이 핵연료봉, 상하 봉단 접합판 (upper/lower endplate), 간격판 (space plate), 스프링 및 유도체 (spring/guide), 걸쇠머리 (grapple head) 및 걸쇠머리 잠금쇠 (grapple head lock)로 구성되어 있다[2]. 핵연료봉사이의 간격은 집합체 상하에 위치한 본단 집합판과 3개의 간격판에 의해 유지되고 이 간격을 따라 냉각수가 흐르면서 핵연료를 냉각한다.

모의 핵연료 시험장치에서는 실제 핵연료 집합체와 동일한 유동특성을 나타내기 위해서 핵연료 집합체와 동일한 차압과 유량을 유지하는 단순한 오리피스를 장착하여 시험한다. 이때, 주어진 유동조건을 만족하면서 유체의 진동과 구조적 안정성이 보장되는 오리피스를 설계할 필요가 있다.

본 연구에서 설계한 오리피스의 형상은 그림 2에 나타난 바와 같이 하나로 핵연료의 유동현상과 동일한 현상을 모의하기 위해 각각 5개의 육각과 원형인 다공판과 핵연료 간격을 고려하여 36개와 18개의 유동 구멍을 가지도록 설계하였다. 이 때의 유동조건은 표 1과 같으며 하나로의 경우와 동일하다. 유체유발진동과 구조물의 고유진동을 고려하여 구조적으로 안전한 형상을 설계하였다.

* 한국원자력연구소
E-mail: ycpark@kaeri.re.kr
E-mail: ygcho@kaeri.re.kr
E-mail: jswu@kaeri.re.kr

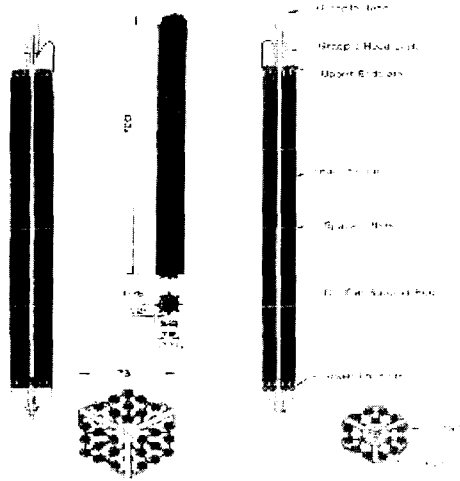


Figure 1 HANARO fuel assembly

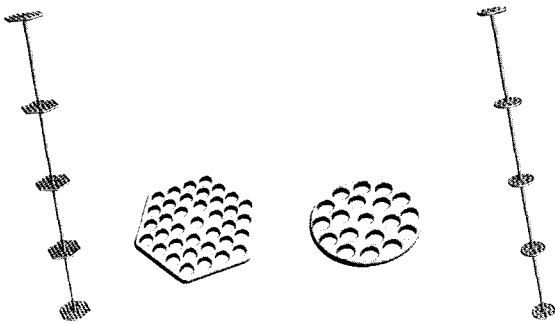


Figure 2 Hexagonal and circular perforated plates in simulated orifice

Table 1 Design conditions of orifice flow

유동조건	육각형 오리피스	원형오리피스
차압, kPa	210	210
유량, m ³ /sec	19.6	12.7

3. 유동설계

3.1 전산유동해석

지배방정식은 식(1)과 같이 연속방정식일 때 $\rho=1$, $S_m=0$ 이며, 운동량방정식은 $\Phi = u_i$, $\Gamma = \mu$, $S_m = -\partial P / \partial x_i + \rho g + V_i$ 이다. 이때, $V_i = \nabla \tau_{ij} + F_i$ 인 난류 전단응력항과 외력으로 구성된다.

수치해석을 위해 상용 프로그램[3]을 사용했으며, 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 방법을 적용했다. 계산격자는 약 50만개 정도의 비정렬 격자를 사용하고, 비정상 유체유발 진동모드를 해석하기 위해서 0.001 sec의 시간간격으로 약 2~3초간의 비정상유동해석을 실시하였다.

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

3.2 오리피스의 유동설계

주어진 유량에 대해서 다공판의 구멍크기를 변경시키면서

$\delta P \approx V^2 \approx \left(\frac{Q}{A_p} \right)^2$ 의 관계식을 이용하여 시행착오법으로 차압이 210 kPa이 나올 때까지 정상유동 계산을 반복하였다[4]. 차압을 만족하는 유동 패턴은 그림 3과 같으며 구간별 정압으로 표시하였다. 결정된 형상에 대해서, 시간 간격 0.001 sec로 비정상유동해석을 통해 유체유발 진동모드를 관찰하였다. 오리피스 양끝 단은 길이 방향으로 고정되어 있으므로 유체진동은 다공판의 면상에서 x, y방향으로 항력계수를 관찰하여 그림 4에 나타내었다. 이를 FFT (Fast Fourier Transformation)를 통해 주파수 모드로 관찰하여 육각과 원형 오리피스의 x, y방향별 주파수 특성을 그림 5에 나타내었다. 그리고 주요 주파수를 진폭의 크기별로 Table 2에 정리하였으며 대부분의 주요 주파수는 100 Hz 미만에서 나타나고 있으며, 원형 오리피스는 x, y방향으로 동일한 모드를 보여주고 있다.

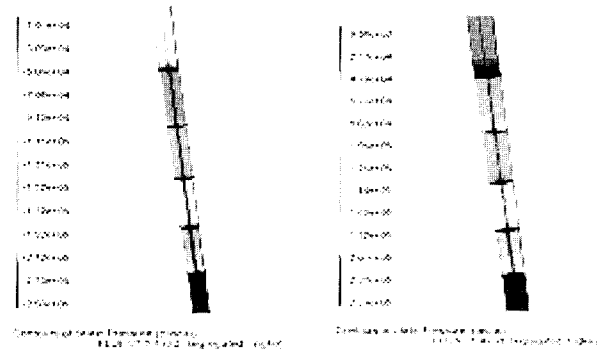


Figure 3 Static pressure contours of orifice

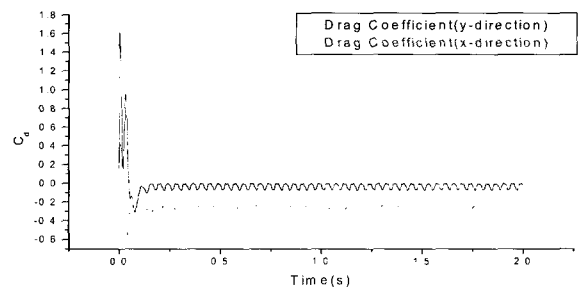


Figure 4 Variation of drag coefficient

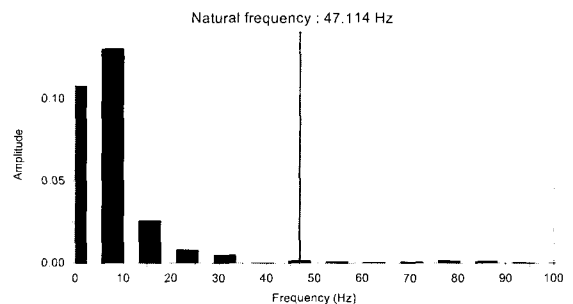


Figure 5-(a) X-dir. frequency mode of hexagonal orifice

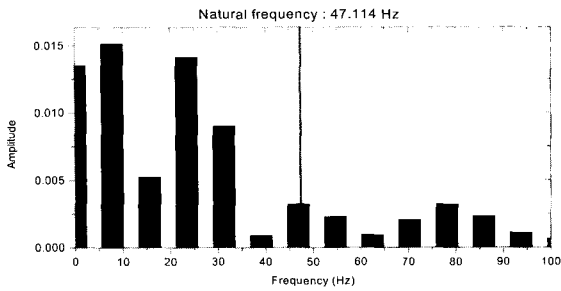


Figure 5-(b) Y-dir. frequency mode of hexagonal orifice

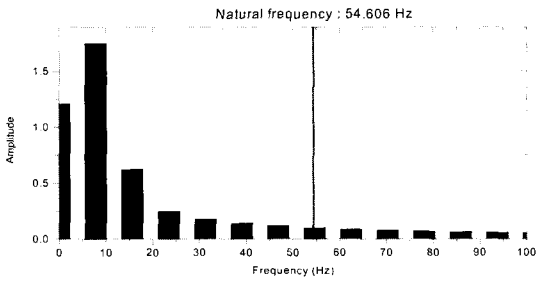


Figure 5-(c) X-dir. frequency mode of Circular orifice

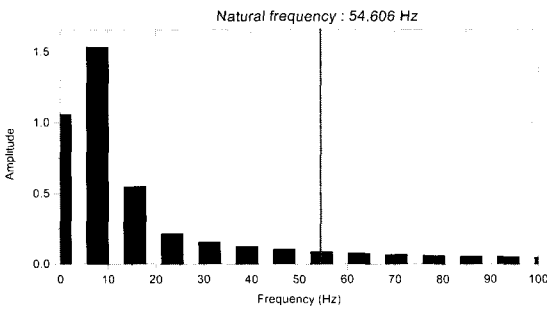


Figure 5-(d) Y-dir. frequency mode of circular orifice

Table 2 Principle frequency mode of hexagonal and circular orifices (Unit : Hz)

순서	육각형 오리피스		원형오리피스	
	x	y	x	y
1	7.5	7.5	7.5	7.5
2	1.5	22.5	1.5	1.5
3	15	1.5	15	15
4	23	31	22.5	22.5

4. 유체유발 진동해석

4.1 구속조건

선계된 오리피스의 형상은 그림 6과 같으며 0 지점은 완전 구속되며, 1번 오리피스는 0 지점의 삼각 가이드로 연결되어 횡 방향으로 구속된다. 또한 5번 오리피스 또한 6번 지점과 클립형태의 삼각 가이드로 연결되어 외형 원통과 간섭으로 횡 방향으로 구속된다.

4.2 해석결과

각 형상에 대해 유한 요소법에 의한 구조해석 프로그램[5]를 사용하여 Modal 해석을 수행하였다. 구조물의 고유진동수 중에서 제1모드의 진폭이 가장 크게 나타났으며, 그림 5(a)~(d)에서 100Hz 이내의 유체유발 진동수 대역에서 직선으로 고유 진동수를 비교하여 표시하였다. 구조물의 제1모드 고유주파수 부근의 유체진동 주파수에 해당되는 유체의 진폭이 상대적으로 작게 나타나고 있다.

따라서, 유체유발진동이 구조물과의 공진을 일으킬 소지가 매우 작다고 볼 수 있어, 오리피스의 설계가 적절히 유동조건과 구조적 안정성을 모두 만족하게 실시되었다고 볼 수 있다.

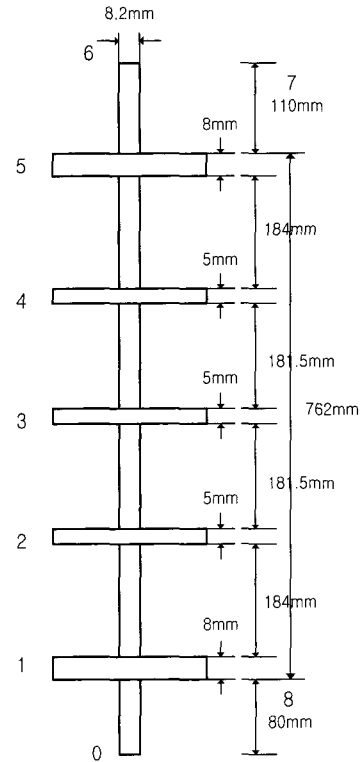


Figure 6 Dimension of orifice

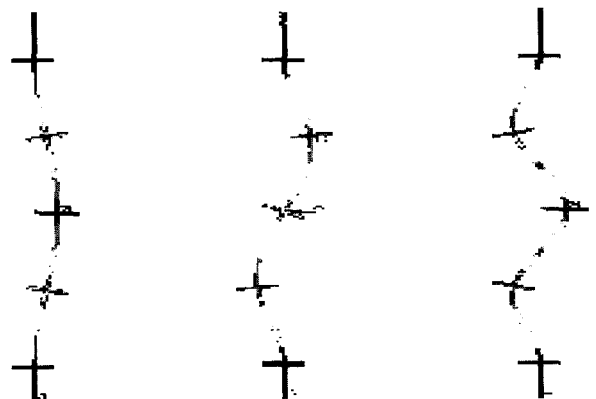


Figure 7 1, 2, 3 mode of hexagonal orifice (47.114 Hz, 127.74 Hz, 230.257 Hz)

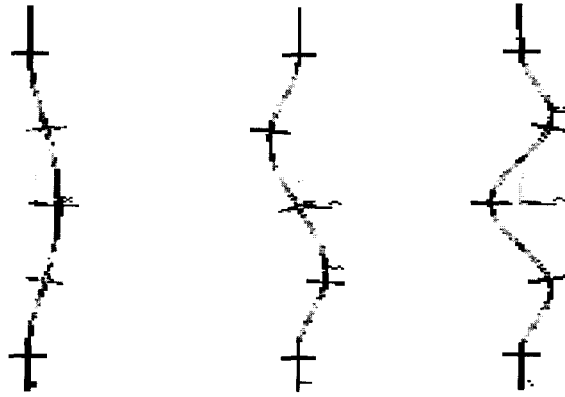


Figure 8 1, 2, 3 mode of circular orifice (54.606 Hz, 149.608 Hz, 275.78 Hz)

5. 결론

방사선의 위험 없이 하나로와 유사한 유동을 모의하기 위해 시험로에 설치되는 핵연료 집합체를 대신할 수 있는 모의 오리피스 설계를 하는데 있어, 유동해석과 고유진동해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 주어진 유량에 대해서 210 kPa의 차압을 유지하는 육각형과 원형의 다공판을 가진 모의 오리피스를 설계하였다.

(2) 비정상 유동해석을 통해 오리피스에서 발생하는 유체유발 진동모드에서는 주요 진폭을 나타내는 주파수는 약 50 Hz 이하에서 존재하고, 원형 오리피스는 축대칭의 모드가 나타났다.

(3) 구조물의 제1모드 고유주파수 부근의 유체진동 주파수에 해당되는 유체의 진폭이 상대적으로 작게 나타나고 있어 유체유발진동이 구조물과의 공진을 일으킬 가능성은 매우 작다.

(4) 유동해석과 고유진동해석을 통해 모의 오리피스의 설계가 적절히 유동조건과 구조적 안정성을 모두 만족함을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

- [1] Y. C. Park et. al., "System Performance Test in HANARO", the 5th ASRR Vol. 1, P240-246, 1996.
- [2] KAERI, "Safety Analysis Report of HANARO", KAERI/TR-710-96, Vol. 2, 1996.
- [3] Fluent Inc. FLUENT V5.5 User's Manual, 2001
- [4] Heonil Kim et. al., HANARO Core Channel Flow-Rate Measurement, KAERI/TR-717/96, KAERI, 1996.
- [5] ANSYS Inc. ANSYS V5.0 User's Manual, 2001