

## 다중블록실험과 전산유체해석을 통한 블록형 초고온가스로의 노심우회유량 평가

윤수종,<sup>\*1</sup> 이정훈,<sup>2</sup> 김민환,<sup>3</sup> 박군철<sup>4</sup>

### ASSESSMENT of CORE BYPASS FLOW IN A PRISMATIC VERY HIGH TEMPERATURE REACTOR BY USING MULTI-BLOCK EXPERIMENT and CFD ANALYSIS

S.J. Yoon,<sup>\*1</sup> J.H. Lee,<sup>2</sup> M.H. Kim<sup>3</sup> and G.C. Park<sup>4</sup>

*In the block type VHTR core, there are inevitable gaps among core blocks for the installation and refueling of the fuel blocks. These gaps are called bypass gap and the bypass flow is defined as a coolant flows through the bypass gap. Distribution of core bypass flow varies according to the reactor operation since the graphite core blocks are deformed by the fast neutron irradiation and thermal expansion. Furthermore, the cross-flow through an interfacial gap between the stacked blocks causes flow mixing between the coolant holes and bypass gap, so that complicated flow distribution occurs in the core. Since the bypass flow affects core thermal margin and reactor efficiency, accurate prediction and evaluation of the core bypass flow are very important. In this regard, experimental and computational studies were carried out to evaluate the core bypass flow distribution. A multi-block experimental apparatus was constructed to measure flow and pressure distribution. Multi-block effect such as cross flow phenomenon was investigated in the experiment. The experimental data were used to validate a CFD model for analysis of bypass flow characteristics in detail.*

**Key Words :** 초고온가스로(Very High Temperature Reactor), 블록형 노심(Block-type Core), 노심우회류(Core Bypass Flow), 우회류 간극(Bypass Gap), 횡류 간극(Crossflow Gap), 다중적층 실험(Multi-block Experiment), 전산유체역학(CFD)

## 1. 서 론

초고온 가스로의 노심은 핵연료의 종류에 따라 페블형(Pebble type Reactor)과 블록형(Block-type Prismatic Reactor)으로 구분된다. 본 연구의 대상 노형인 PMR-200 [1]은 200MWth 출력의 블록형 원자로로서, 유효노심은 Fig. 1과 같이 66개의 핵연료 블록을 환형태로 배열하고 6층으로 쌓아 총 396개의 블록으로 구성된다. 유효노심의 내경 및 외경은 각각 0.8239m와 1.7426m이며 높이는 4.758m이다. 노심을 구성

하는 표준 핵연료 블록은 Fig. 2과 같이 면대면 길이가 0.36 m, 높이 0.793 m로서 블록 내에 108개의 냉각재 홀과 210개의 핵연료 홀이 존재한다. 반사체 블록의 경우 블록 내부에 냉각재 홀 및 핵연료 홀이 없고 크기는 핵연료 블록과 동일하다. 노심 블록은 크게 핵연료 블록과 반사체 블록으로 구분되며 제어봉 홀의 존재 여부에 따라 세분화된다. 이들 노심 블록 사이에는 노심 블록의 설치 및 재배치를 위하여 일정 크기의 간극을 두게 된다. 이러한 블록 사이의 간극을 노심우회간극이라고 정의하고 우회간극을 통해 흐르는 냉각재 흐름을 노심우회유동이라 정의한다. 또한, 노심 블록 층 사이에 존재하는 간극을 횡류간극이라 정의하고, 횡류 간극을 통해 흐르는 유동을 횡류 유동이라 정의한다. 횡류 간극은 냉각재 홀과 우회간극 간의 유동 교환 통로로서 노심 내 유동 분포를 복잡하게 만드는 요인이 된다.

노심우회간극의 크기는 노심 주기에 따라 변화하게 된다. 이는 노심 블록을 구성하는 후연의 특성에 기인한 것으로 후

접수일: 2011년 8월 25일, 수정일: 2011년 9월 16일,

게재확정일: 2011년 9월 17일

1 정회원, 서울대학교 대학원 원자핵공학과

2 서울대학교 대학원 원자핵공학과

3 정회원, 한국원자력연구원 수소생산원자기술개발부

4 정회원, 서울대학교 원자핵공학과

\* Corresponding author, E-mail: paper80@snu.ac.kr

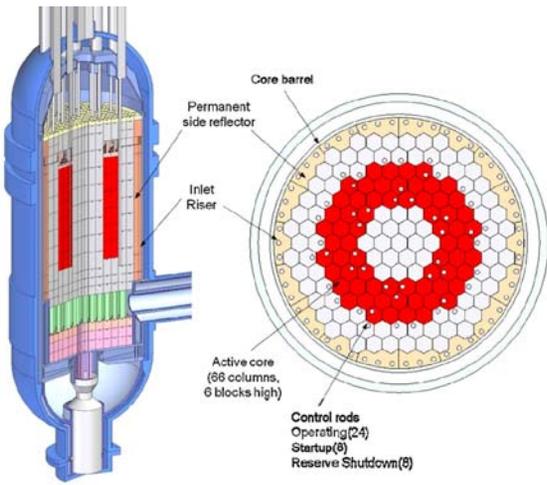


Fig. 1 Configuration of PMR200 Core

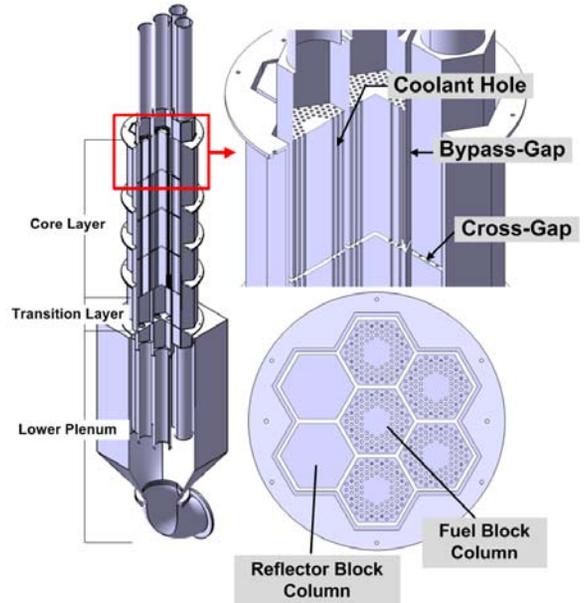


Fig. 3 SNU Multi-Block Experimental Apparatus

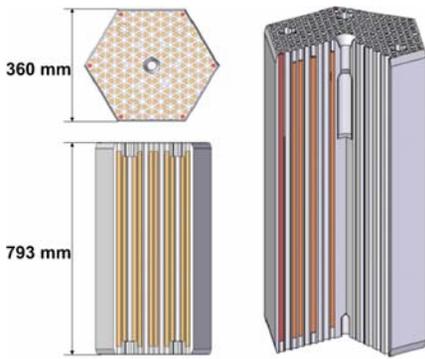


Fig. 2 Standard Fuel Assembly of Block-Type VHTR

연 노심 블록들이 고온의 열과 방사선 조사에 따라 수축 및 팽창 하기 때문이다[2]. 특히 방사선 조사에 따라 흑연 블록이 수축하면서 블록 사이의 간극의 크기는 증가하게 된다. 노심우회간극이 커질 경우 원자로심의 건전성에 좋지 않은 영향을 미치게 되는데, 이는 핵연료 블록 내의 냉각재 흡을 통해 노심을 냉각해야 할 냉각재가 노심우회간극을 통해 흐르면서 냉각률이 감소하기 때문이다. 특히 노심에 대한 기존의 연구 결과 [3], 노심 내부의 최대온도의 크기가 노심우회유동이 증가함에 따라 증가할 것으로 예측되므로 노심우회유동을 정확하게 예측, 평가하는 것은 노심 설계에 있어서 중요하다.

노심우회유량은 전체 냉각유량의 10 - 25% 수준에 달할 것으로 예상되는데[4], 이를 정량화하기 위한 연구로서 단위-셀 실험[5]이 수행된 바가 있다. 하지만 단위-셀 실험의 경우 단일 블록의 우회간극의 크기 변화에 의한 유량분포 특성을

연구한 것으로서 시험부의 영역이 매우 좁아 실제 노심의 우회간극 내 유동 특성을 평가함에 있어서 한계점이 있다. 또한 단일 블록을 대상으로 하였기 때문에 다단-다층 구조에서 발생하는 횡류유동과 같은 다중블록 효과를 평가할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 기존 단위-셀 실험의 단점을 보완하여 다중블록 우회유량 정량화 실험 장치를 구축하고 노심우회유동의 특성을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 또한, 전산유체 해석과의 비교 분석을 통하여 해석 코드의 해석 능력을 검증하고, 실험상 측정하기 어려운 내부의 상세한 유동장을 분석하고자 한다.

## 2. 블록형 초고온가스로 노심유동장 평가

### 2.1 다중블록 노심우회유량 정량화 실험

Fig. 3은 실험장치의 구성도로서 그림에서 보이는 바와 같이 7개의 블록 단을 4층으로 쌓아 노심을 모사하였다. 노심을 모사하기 위하여 실험에 사용된 시험 블록의 종류는 핵연료 블록과 반사체 블록이며, 각 블록은 실제 노심 블록을 길이비 1/2로 축소하여 제작하였다. 최상단의 핵연료 시험블록과 최하단 지지대블록에는 각 블록 단으로 흐르는 유량을 측정하기 위해 길이 1.0 m의 유량측정용 배관을 설치하였고, 평균 Pitot관 유량계를 설치하여 유량을 측정하였다. 육각형 시험 블록의 면대면 너비(flat-to-flat width)는 0.18 m이고, 높이는 0.4 m로 제작하였다. 핵연료 시험 블록 내의 냉각재 흡의 수

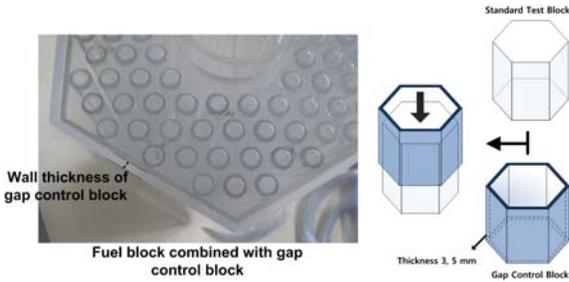


Fig. 4 Bypass Gap Control Methodology

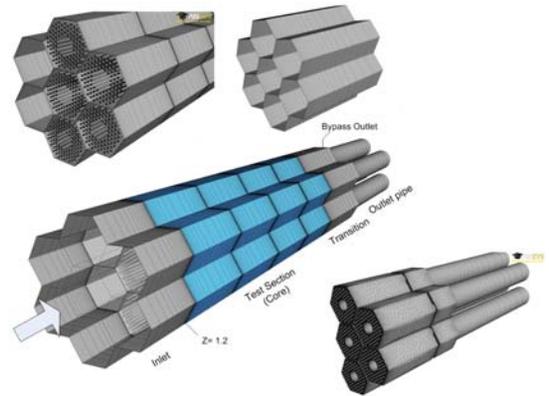


Fig. 6 CFD Model of SNU Multi-Block Experimental Facility

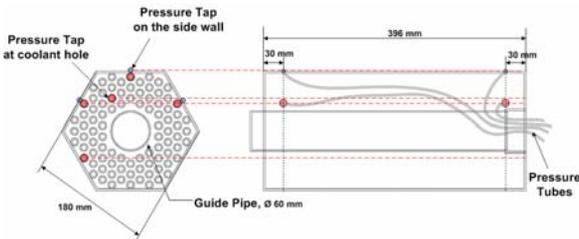


Fig. 5 Design of Fuel Type Test Block

는 총 90 개이며, 각 홀의 내경은 0.008 m 이다.

시험 블록 간 우회간극의 크기를 조절하기 위하여 Fig. 4 와 같이 우회간극 조절 블록을 핵연료 블록 및 반사체블록에 결합하는 방식을 고안하였다. 우회간극 조절 블록의 벽면 두께에 의해서 우회간극의 크기가 결정되며, 본 연구에서는 2.0 mm와 6.0 mm 조건에 대하여 시험을 수행하였다. 핵연료 시험 블록 내 냉각재 홀 및 우회간극 내의 국부적인 압력 분포를 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 각 시험 블록 벽면 및 냉각재 홀의 입구와 출구 부에 압력 측정 탭 및 압력 튜브를 설치하였고, 블록 중심에 설치된 배관을 통해 외부의 정압계와 연결하여 내부 압력을 측정하였다. 또한 시험부 벽면에는 횡류 간극 주변에서의 압력 변화를 자세히 측정하기 위하여 총 14개의 정압계를 설치하여 압력을 측정하였다. 표 1 은 실험 케이스 및 조건을 정리한 것이다. 축소된 시험 모형과 실제 노심의 냉각재 홀 Re 수에 대한 상사비를 고려하여 총 유량 조건은 1.1 kg/s로 설정하였다.

## 2.2 다중블록실험에 대한 CFD 해석

블록형 초고온가스로의 노심 내 현상을 분석하는 데 있어

Table 1 Test Matrix

| Case     | Bypass Gap Size(mm) | Mass Flow Rate(kg/s) |
|----------|---------------------|----------------------|
| R2BG2CG0 | 2.0                 | 1.1                  |
| R2BG6CG0 | 6.0                 |                      |

서 실험적 방법에는 여러 가지 한계가 있다. 노심 내 유로가 좁고 복잡하게 형성될 뿐 아니라 구조물이 다단, 다층으로 배치되므로 측정 장치를 설치하기에 어려운 면이 많다. 따라서 이러한 실험의 한계를 극복하기 위해서는 CFD 코드를 이용한 해석적 방법이 매우 유용하다. 하지만 이를 위해선 우선 CFD 코드가 복잡한 유로에 대해서 충분한 예측 능력을 가지고 있는지에 대하여 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 다중블록실험을 대상으로 CFD 코드의 예측 능력을 검증하기 위하여 상용 CFD 코드인 CFX-12 [6]를 이용한 해석을 수행하였다. 균일한 우회간극 2 mm와 6 mm 분포에 대한 실험과 CFD 코드 결과를 비교함으로써 CFD 코드의 예측 능력을 평가하고자 한다. 또한, 노심 블록의 층간 간극인 횡류 간극을 통해 발생하는 횡류 유동이 노심 유동장에 미치는 영향을 알아보기 위해 전산유체해석을 수행하였다.

### 2.2.1 지배방정식 및 수치해석 방법

지배방정식으로는 정상상태 비압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 적용하였다. 비압축성 난류 유동에 대한 지배 방정식인 연속 방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \tag{2}$$

대류항 차분법으로써 CFX-12에서 제공하는 상류차분법을 선택하고 Specified Blend factor 값을 1로 적용하였다. 이 경우 일반적으로 2차 차분화의 정확성을 가진다. 또한 반복 수치 계산은 보존 방정식의 최대 잉여값(Residual)이  $10^{-4}$  이하가 될 때까지 수행하였다.

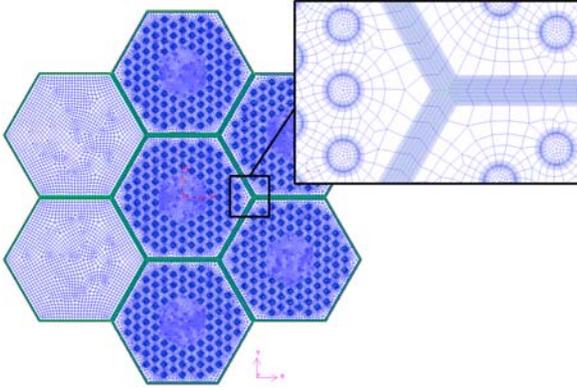


Fig. 7 Mesh Structure of the Cross-section of the Test-section

2.2.2 해석 모델링 및 해석 조건

본 연구에서는 다중블록 실험장치의 형상 모델링과 격자 생성을 위하여 GAMBIT 2.2.30[7]을 이용하였다. 해석 격자는 사면체와 육면체의 혼합 격자를 사용하였으며, 각 시험 조건에 적용된 격자 정보는 표 2에 정리하였다. Figs. 6-7은 실험 장치에 대한 CFD 모델 및 격자 구조를 나타낸다. 우회간극 벽의 y+ 값은 약 20정도이며 냉각재 홀의 경계층 격자의 수는 6개를 적용하였다. 또한 블록과 우회간극이 인접한 영역에서는 3개의 경계층 격자를 적용하여 해석의 정확성을 확보하고자 하였다. 횡류간극이 없는 CG0 조건의 경우 실험과의 비교를 통해 해석 코드를 해석 능력을 평가하였고, 횡류간극 2 mm를 설정한 CG2 조건의 경우 CG0 해석과의 비교 분석을 통해 횡류 유동이 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 해석 모델의 입구 경계 조건은 실험에서 실측된 입구유량 조건에 맞춰 설정하였다. 작동 유체는 공기로서 계산에 사용한 밀도와 점성도는 각각 1.185 kg/m<sup>3</sup>과 1.7894E-5 kg·m/s이다.

냉각재 홀 채널과 우회간극 채널의 난류유동 해석을 위해 운동량 방정식의 레이놀즈 응력항은 Menter의 SST 모델[8]을 적용하여 계산하였다. SST 모델은 다음과 같은 k 방정식과 ω 방정식을 이용하여 난류 매움 문제를 계산한다.

k-equation

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (3)$$

Table 2 Mesh Statistics

| Case       | Number of Element (#) | Number of Node (#) |
|------------|-----------------------|--------------------|
| R2-BG2-CG0 | 10,712,093            | 9,944,225          |
| R2-BG2-CG2 | 18,081,107            | 13,196,928         |
| R2-BG6-CG0 | 12,227,517            | 10,874,211         |
| R2-BG6-CG2 | 18,167,267            | 13,269,277         |

ω-equation

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (4)$$

또한, k-ω 방정식의 난류 점성항  $\nu_t (= \mu_t / \rho)$  계산을 위해 다음과 같은 Blending function을 이용한다.

Turbulent eddy-viscosity

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (5)$$

Blending function

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (6)$$

$$\arg_1 = \min \left( \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho k}{C D_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right) \quad (7)$$

$$C D_{k\omega} = \max \left( 2 \rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1.0 \times 10^{-10} \right) \quad (8)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (9)$$

$$\arg_2 = \max \left( \frac{2 \sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \quad (10)$$

(단, α, β는 모델 상수, P<sub>k</sub>는 난류 생성을, y는 가장 인접한 벽과의 거리, S는 변형율의 불변 척도를 의미한다)

초고온가스로 노심 유동 분포에 대해 정확한 결과를 얻기 위해선 유동 박리 및 채널 내에서의 압력 분포를 정확하게 예측할 필요가 있는데, SST 모델은 k-ε 모델과 k-ω 모델의 장점을 결합한 모델로서 다양한 종류의 정확한 박리 예측에 매우 효과적인 것으로 알려져 있다[9]. 또한, 기존에 수행한 연구[5]에서는 여러 난류 모델의 비교를 통해 난류 모델의 영향을 평가해 본 바가 있으며, 본 연구에서는 기존 연구 결과를 토대로 SST 모델을 난류 모델로 선정하여 해석을 수행하였다.

3. 연구결과 및 논의

3.1 우회간극 측정 결과

우회간극의 크기는 우회유량의 분포와 내부 압력분포에 중요한 영향을 미치는 인자이다. 우회간극의 크기가 얼마나 정확하게 형성되었는가에 따라서 실험에 대한 해석 결과의 정확성이 달라질 수 있다. 표 3과 4는 각 시험 조건에 대하여 실제 측정된 우회간극의 분포를 보여준다. 우회간극의 측정은

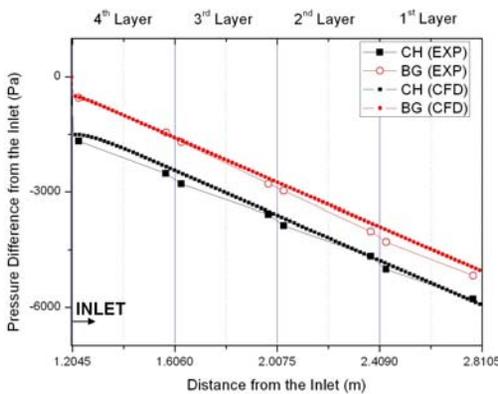


Fig. 8 Pressure Distribution of Coolant Hole and Bypass Gap (R2-BG2-CG0 Case)

시험용 블록을 쌓은 후 각 층의 상단에서 측정하였으며, 각 층별 평균값을 구하였다. 우회간극의 크기를 측정한 결과, BG2 실험보다 BG6 실험에서 우회간극의 크기가 정확하게 형성되었다. BG2 실험의 경우, 천이블록 층에서 측정된 우회간극의 최대오차가 약 15.5% 정도로 측정되었으나, BG6 실험의 경우 3번째 시험블록 층에서 최대오차가 약 4.5%로 나타났다. 이러한 우회간극의 오차는 실험장치 제작 오차로 기인한 것이나, 주요 측정 위치인 중심부 블록 주변의 우회간극의 크기는 시험 조건에 가깝게 형성되었다.

3.2 우회유동의 분포

우회간극의 크기는 우회유동의 분포에 중요한 영향을 미친다. 표 5에 정리된 바와 같이 우회간극이 2 mm 인 경우에는 전체 유동 중 우회유동이 차지하는 비율이 약 14.0%인데 반해, 우회간극이 6 mm로 증가할 경우 우회유동의 비율이 44% 정도로 증가하였다. 이처럼 우회간극의 크기에 따라 노심우회유동의 비율이 전체 유량의 50%에 가깝게 형성될 가능성이 있으므로 노심의 우회간극의 증가를 제한시켜줄 기술적인 방안을 고안할 필요가 있다.

Table 3 Measured Bypass Gap Distribution of R2-BG2-CG0 Case

| Layer      | Average Bypass Gap Size (mm) | Average Bypass Gap Size Around Central Column (mm) |
|------------|------------------------------|--|
| 1          | 2.348                        | 2.038  |
| 2          | 2.368                        | 2.232  |
| 3          | 2.448                        | 2.198  |
| 4          | 2.361                        | 2.089  |
| Transition | 2.715                        | 2.309  |

CFD 해석 결과는 실험 결과보다 우회유량 값을 다소 작게 예측하고 있는 것으로 나타났다. 이는 실제로 형성된 우회간극의 크기와 해석 모델의 우회간극의 크기의 차이로 기인한 것이다. R2-BG2-CG0 실험에서 측정된 우회간극의 평균값은 약 2.45 mm로서 실험 조건 2.0 mm 보다 크게 형성되었고, 이로 인해 우회유량의 비율도 실험에선 11.48%로 해석 결과인 9.49%보다 높게 나타났다. R2-BG6-CG0의 경우에는 우회간극의 크기가 실험 조건과 실측값이 거의 유사하게 형성되었으며, 우회유량의 비율도 약 44% 정도로 유사하게 형성되었다.

3.3 유로 별 압력 분포 특성

유로 별 압력 분포의 특성을 알아보기 위해 시험부 중앙에 설치된 블록의 냉각재 홀과 그 주변의 우회간극의 압력 강하에 대하여 압력강하를 비교하였다. 이는 우회간극의 분포가 중앙 블록 근처에서 비교적 정확하게 형성되었기 때문이다. 압력 분포의 경우 우회간극의 크기에 따라 서로 다른 경향성을 나타낸다. 시험부 입구에서는 외부의 대기가 흡입되어 흐를 때 유로 단면적의 급격한 감소(Sudden Contraction)으로 인한 급격한 압력 강하가 발생한다. 급격 수축 유로의 압력 손실은 다음 상관식[10]과 같이 유로 면적의 변화에 의해 결정된다.

$$\frac{\Delta p}{\rho w^2 / 2} = (1 - n)^2 \tag{11}$$

(단,  $n = \frac{F_0}{F_1}$  는 유로의 축소 또는 확대 비)

Fig. 8은 R2-BG2-CG0 실험 및 해석 결과로서 냉각재 홀(CH)의 수력 직경(hydraulic diameter)이 8.0 mm로 우회간극(BG)의 수력 직경 3.93 mm 보다 상대적으로 크기 때문에 시

Table 4 Measured Bypass Gap Distribution of R2-BG6-CG0 Case

| Layer      | Average Bypass Gap Size (mm) | Average Bypass Gap Size Around Central Column (mm) |
|------------|------------------------------|--|
| 1          | 6.014                        | 6.001  |
| 2          | 5.873                        | 5.728  |
| 3          | 5.904                        | 5.975  |
| 4          | 5.981                        | 5.906  |
| Transition | 5.985                        | 5.986  |

Table 5 Effect of Bypass Gap Size on Bypass Flow Ratio

| Case       | Exp. (%) | CFD (%) |
|------------|----------|---------|
| R2-BG2-CG0 | 11.48    | 9.49    |
| R2-BG6-CG0 | 44.93    | 44.01   |

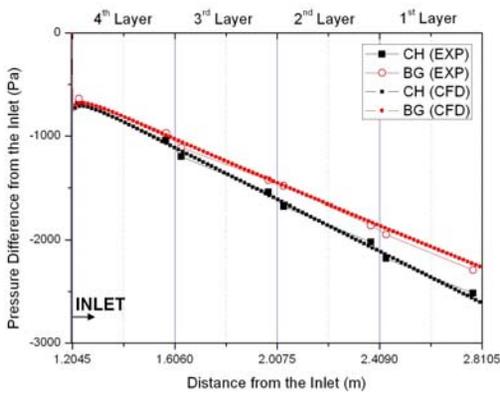


Fig. 9 Pressure Distribution of Coolant Hole and Bypass Gap (R2-BG6-CG0 Case)

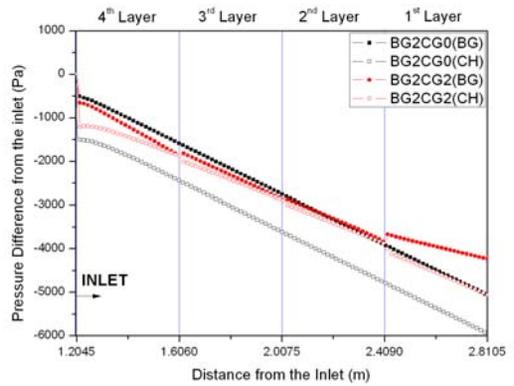


Fig. 10 Effect of Crossflow on the Pressure Distribution (Bypass Gap 2 mm)

협부 입구의 냉각재 홀 입구유로에서 더 큰 급격 수축 압력 손실이 발생하였다. 유로 내에서의 압력 손실은 주로 마찰 손실에 의한 것으로서 각 유로를 통해 흐르는 유량과 벽면 마찰 계수에 영향을 받는다. 일반적으로 좁은 평판 사이에서의 유동은 벽면효과가 크기 때문에 동일한 단면적을 가진 유로에 대해서 마찰 손실이 더 크게 발생한다. 우회간극 2 mm 실험의 경우, 우회간극과 냉각재 홀의 압력강하 크기가 유사한 것은 우회간극의 수력학적 지름이 작음에도 불구하고 각 유로로 흐르는 유량이 다르기 때문에 마찰 손실에 의한 압력강하 크기가 유사하게 발생했음을 의미한다.

R2-BG2-CG0와 R2-BG6-CG0 실험은 모두 횡류간극을 고려하지 않았기 때문에 유로 내 압력강하가 선형적으로 발생해 야한다. Figs. 8과 9에서 볼 수 있듯이 실험의 경우 대체로 선형적인 압력 강하가 발생하고 있으나 블록 층간 경계인 횡류간극 주변에서 추가적인 압력 손실이 발생한 것으로 나타났다. 이것은 시험 블록의 미세한 제작 오차로 인하여 우회간극의 크기가 층마다 미세하게 다르게 형성되었고 이러한 오차가 우회간극 유로에 영향을 미쳐 국부적인 압력 손실이 발생하였다. 해석의 경우 이러한 블록 배열에 의한 오차가 없기 때문에 선형적인 압력 분포를 보이고 있다. 또한, 전체적인 압력 강하의 크기와 경향성에 있어서 실험 결과를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

Table 6 Effect of Cross flow on Bypass Flow Distribution (CFD)

| Case       | Bypass Flow Ratio (%) |
|------------|-----------------------|
| R2-BG2-CG0 | 9.49                  |
| R2-BG2-CG2 | 11.39                 |
| R2-BG6-CG0 | 44.01                 |
| R2-BG6-CG2 | 45.39                 |

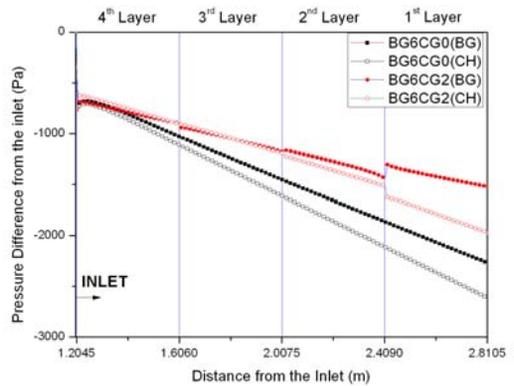
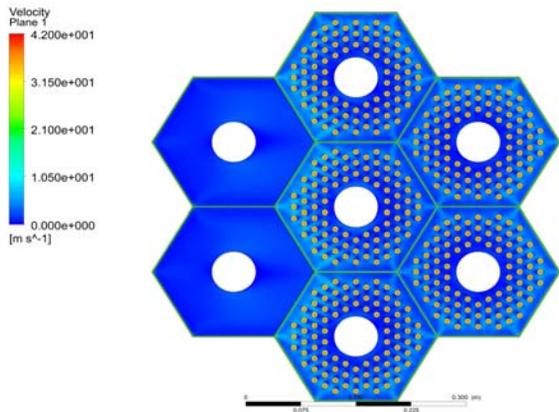


Fig. 11 Effect of Crossflow on the Pressure Distribution (Bypass Gap 6 mm)

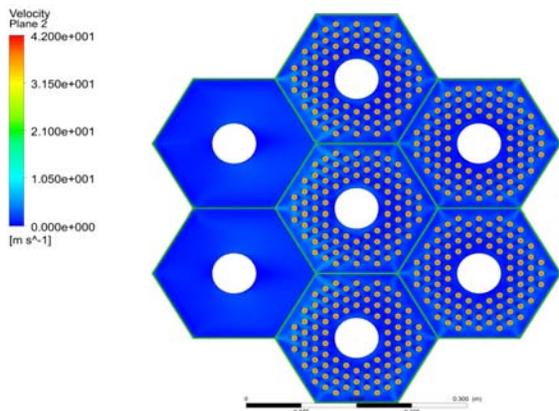
### 3.4 횡류 유동의 영향 평가

횡류유동이 내부 유동 분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 우회간극 2 mm 및 6 mm 조건에 대해 균일한 횡류간극 2 mm를 가정하여 CFD 해석을 수행하였다. 표 6은 각 조건 별 우회유량의 비를 정리한 것이다. 우회간극의 크기가 균일하게 유지될 경우, 횡류 유동이 유로 면적의 변화 등의 구조적인 요인이 아니라 오로지 우회간극과 냉각재 홀의 압력 차이에 의해서만 발생하게 되므로 횡류 유동의 영향이 제한적이다. 횡류유동에 의해 우회유동의 비가 약간 증가하고 있으나, 변화 폭이 제한적이며 우회간극의 크기가 우회유동 분포에 주요한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

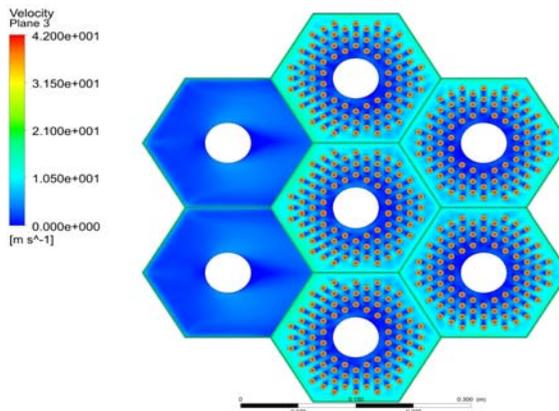
유로 별 압력 분포의 경우 Figs. 10과 11에서 볼 수 있듯이 횡류 간극이 없는 경우에는 선형적인 압력강하가 발생하지만 횡류 간극이 있는 경우 횡류 간극 주변에서 국부적인 압력



(a) Upper Cross-Gap

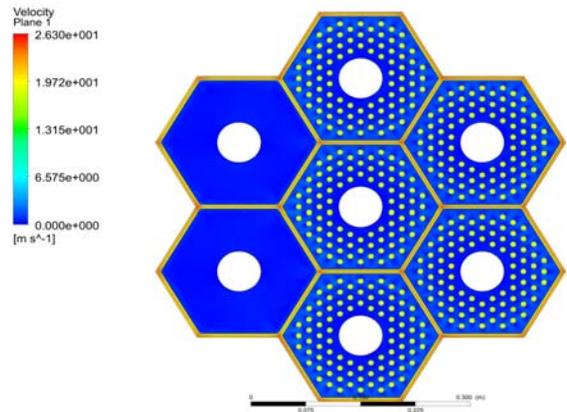


(b) Central Cross-Gap

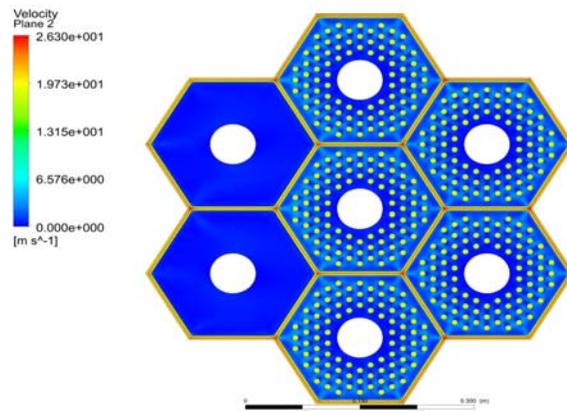


(c) Lower Cross-Gap

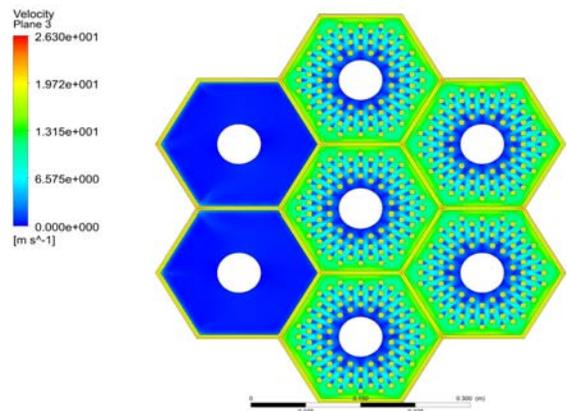
Fig. 12. Velocity Distribution in the Cross Gap (R2-BG2-CG2 Case)



(a) Upper Cross-Gap



(b) Central Cross-Gap



(c) Lower Cross-Gap

Fig. 13. Velocity Distribution in the Cross Gap (R2-BG6-CG2 Case)

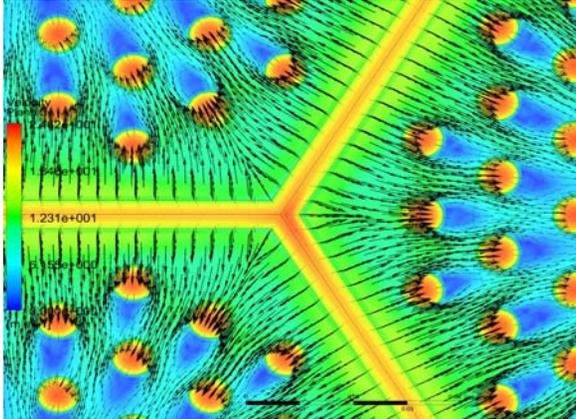


Fig. 14 Velocity Vector Field at the lowest Cross Gap (R2-BG6-CG2 Case)

강하가 발생하여 불연속적인 압력 분포가 나타나게 된다. 횡류 유동으로 인한 비선형적 압력분포의 특징은 유로의 급격 확대(Sudden Expansion) 및 축소(Sudden Contraction)에 의한 압력 손실과 유사하다. 급격 확대 및 축소에 의한 압력 손실의 경우 유로 면적이 넓어지거나 좁아지면서 유로 내 유속이 변화하면서 국부적인 미소 손실(minor loss)가 발생하는 것인데, 초고온가스로의 노심의 경우 횡류 유동이 이러한 유속 변화를 야기하는 것이다. 횡류 유동의 강도가 강할수록 유속 변화의 폭은 커지며, 이는 국부적인 압력 강하의 크기에 반영된다. 우회간극과 냉각재 홀 간의 압력차이가 작은 상단 및 중간 횡류 간극에서는 횡류 유동이 작게 발생하였고, 따라서 Figs. 12와 13에 나타난 바와 같이 횡류 간극 단면에서의 유속이 작게 형성되었다. 하지만 하단의 횡류간극의 경우 상대적으로 강한 횡류유동이 발생하였고 이로 인해 압력의 변화가 다소 크게 형성됨을 알 수 있다.

최하단 횡류 간극을 지나면서 우회간극의 압력은 상승하고, 냉각재 홀의 압력은 급격히 감소하는 현상이 발생하였는데, 이는 횡류 유동의 방향이 우회간극에서 냉각재 홀을 향하고 있기 때문이다. 앞서 기술한 바와 같이 횡류 유동으로 인한 압력 분포의 특징은 급격 확대 및 축소에 의한 압력 분포와 유사한데, 우회 간극의 유동이 횡류 간극을 통해 냉각재 홀로 흐르면서 우회 간극의 유속은 감소하였고, 반대로 냉각재 홀의 유속은 증가하였다. 따라서 유속이 증가한 냉각재 홀에서는 국부적인 압력 강하가 발생하고, 유속이 감소한 우회간극에서는 반대로 압력이 약간 회복되는 현상을 보이게 된다. Fig. 14는 우회간극 6 mm 조건에 대하여 하단 횡류간극 내의 속도 벡터장을 확대한 것으로서, 유동의 방향이 우회간극에서 냉각재 홀로 향하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 블록형 초고온가스로 노심의 우회유동 분포 및 유동 특성을 알아보기 위하여 노심을 1/2로 축소한 다중블록 우회유량 정량화 실험장치를 구축하여 실험을 수행하고 이에 대한 CFD 해석을 수행하였다.

실험을 통해 우회간극이 2 mm에서 6mm 로 변화함에 따라 우회유량의 비가 14%에서 44% 정도로 증가하는 결과를 도출하였다. 실험에 대한 CFD 해석의 경우 우회간극의 크기가 전체적으로 정확하게 형성된 BG6 조건의 경우 해석 결과와 실험이 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. BG2 조건의 경우 해석 결과가 우회유량의 비를 다소 작게 예측하였는데, 이는 실험에서 형성된 우회간극의 평균값이 해석 조건인 2 mm보다 크게 형성되어 실험에서 우회유량의 비가 높게 형성되었기 때문으로 판단된다. 우회간극의 크기가 상대적으로 정확하게 형성된 중앙 블록 주변에서의 압력 분포의 경우 CFD 해석 결과와 실험 결과가 서로 잘 일치하고 있다. 따라서 CFD 코드의 해석 능력이 블록형 초고온가스로의 노심 내 유로를 해석하는 데 충분하다고 판단된다.

횡류 유동의 영향을 평가하기 위한 CFD 해석 결과, 우회간극의 분포가 균일한 경우 횡류 유동의 영향이 제한적임을 확인하였다. 압력 분포에 있어서는 횡류 간극이 있을 경우, 냉각재 홀과 우회간극의 압력이 서로 수렴하는 현상이 관찰되었다. 횡류 유동에 의한 압력 변화의 특성은 급격 확대 및 축소에 의한 압력강하의 특성과 유사한 것으로 나타났다. 특히, 횡류 간극을 지나면서 발생하는 우회간극 및 냉각재 홀의 압력 변화로부터 횡류 유동의 방향을 파악할 수 있음을 알 수 있다.

## 후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다. (연구과제 관리코드: 2008-2005919)

## 참고문헌

- [1] 2008, KAERI, "PMR 200MWth의 GAMMA+ 코드 입력 자료 작성 및 정상 상태 열수력 해석," NHDD-KA-08-RD-CA-002, KAERI.
- [2] 1994, Burchell, T.D. et al., "The Effect of Neutron Irradiation on the Structure and Properties of Carbon-Carbon Composite Materials," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 191-194, pp.295-299.

- [3] 2004, Independent Technology Review Group, "Design Features and Technology Uncertainties for the Next Generation Nuclear Plant," INEEL/EXT-04-01816, INL.
- [4] 2005, MacDonald, P.E., "Next Generation Nuclear Plant Research and Development Program Plan," INEEL/EXT-05-02581, INL.
- [5] 2009, 윤수중 외3인, "단위-셀 실험과 전산유체해석을 통한 블록형 초고온가스로의 노심우회유량 평가," *KSCFE*, Vol.14, No.2, pp.59-67.
- [6] 2009, ANSYS, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, PA.
- [7] 2004, Fluent Inc., GAMBIT 2.2 User's Guide, Fluent Inc., Lebanon, NH.
- [8] 1993, Menter, F.R., "Zonal Two Equation k-w Turbulence Models For Aerodynamic Flow," *AIAA 93-2906*.
- [9] 1997, Bardina, J.E., et al., "Turbulence Modeling Validation," *AIAA 97-2121*.
- [10] 1996, Idelchik, I.E., "Handbook of Hydraulic Resistance 3rd edition," Begell house Inc., New York, NY.