

SMART 유동분포시험장치 노심모의기에서의 횡방향 유동 특성

윤정* · 김영인** · 정영종* · 이원재*

Cross Flow Characteristics of the Core Simulator in SMART Reactor Flow Distribution Test Facility

Jung Yoon*, Young-In Kim**, Young-Jong Chung*, Won-Jae Lee*

Key Words : SMART(스마트원자로), Flow distribution test facility(유동분포시험장치), Fuel assembly(핵연료집합체), Core simulator(노심모의기), Cross flow(횡방향 유동), Perforated plate(다공판), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

To identify the flow characteristics of the SMART reactor, a flow distribution model test and a numerical simulation are performed in KAERI. Among several part of the SMART reactor, the fuel assemblies are simulated using simulators because of the complexity. The geometries of the core in the SMART reactor and simulator are different, but some similarities are maintained such as the ratio of pressure drop in the vertical and cross directions. There are cross flow holes in each core simulator to reproduce the cross flow of SMART fuel assemblies. To know the flow characteristics of the cross flow, numerical analysis is performed. As the cross flow area is decreased, the pressure drop between inlet and outlet is decreased. Also, when the flow imbalance between two core simulators is constant, the cross flow area does not significantly affect the cross flow.

1. 서 론

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 원자로는 한국원자력연구원에서 독자 모델로 개발중인 중소형 일체형원자로이다. 원자로는 핵연료집합체로부터 발생된 중성자를 이용하여 핵연료의 핵분열을 유도해 이 때 발생하는 에너지로 전력을 생산한다. SMART 원자로의 유동 특성을 파악하기 위한 원자로유동분포시험⁽¹⁾이 한국원자력연구원에서 수행되었다. 이 유동분포시험장치는 SMART 원자로의 노심유동분포와 원자로 중요 구성품의 유로저항 및 유동분포 특성을 복합적으로 모의할 수 있도록 제작되었으며, 대상 원자로의 선형축소비 1/5 크기로 설계되었다. 시험장치는 실제운전시의 속도조건을 저온, 저압에서의 오일러수 상사성으로 모의하며, 실제 레이놀즈수의 1/20에 해당하는 유동조건을 모의할 수 있도록 구성되었다.

SMART 원자로에는 총 57개의 핵연료집합체가 설치되는데, 유동분포시험에서는 핵연료집합체를 직접 모의하지 않

고 축방향 유로저항을 보존하고 횡방향 유동특성을 근사적으로 보존한 모의기를 이용하여 시험을 수행한다. 각각의 모의기는 통과유량을 계측하기 위한 벤트리 1개, 축방향 유로저항을 모사하기 위한 19개의 유로구로 구성되는 3개의 다공판, 그리고 횡방향의 유로저항을 모사하기 위한 다수의 횡방향 유로가 설치된다. 모의기를 구성하는 벤트리⁽²⁾와 다공판⁽³⁾에 대한 유동현상은 경험상관식⁽⁴⁾에 의해 계산되어지며, 이미 충분한 실험과 해석을 통해 그 유동현상이 밝혀져 있다. 따라서 노심(핵연료집합체)모의기의 횡방향 유로에서 발생되어지는 횡방향 유동 특성을 파악함으로써 노심모의기가 실제 핵연료집합체를 잘 모사하는지를 확인할 수 있다. 이미 압력강하 특성을 확인하기 위해 주인철헤⁽⁵⁾ 등에 의해 노심모의기에 대한 검, 교정 시험이 수행되었으며, 배정호⁽⁶⁾ 등에 의해 병렬로 연결된 노심모의기에서의 횡방향 유동 특성이 파악된 바가 있으나 이는 횡방향 유로의 단면적이 일정할 경우 각각의 노심모의기에 유량 편차가 발생할 경우의 횡방향 유동 특성을 계산한 것이며, 횡방향 유로 단면적의 변화에 따른 유동 특성의 변화는 연구된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 SMART 원자로의 노심모의기에서의 횡방향 유로 단면적 변화에 따른 유동 특성을 파악하고, 각각의 모의기에서

* 한국원자력연구원 스마트개발본부 기술검증부

† 교신저자, E-mail : yikim3@kaeri.re.kr

유량 편차가 발생할 경우 횡방향 유로 단면적의 설계값 대비 감소율의 변화에 따른 유량 편차의 해소가 어느 정도로 이루어지는지를 해석적으로 알아보고자 한다.

2. 노심모의기 수치해석

2.1. 기본형상

SMART 원자로 유동분포시험장치에서 사용되는 노심모의기의 형상은 Fig. 1과 같다. 총 57개의 노심모의기가 대칭형태로 배열되어 있으며, 각 노심모의기는 다수의 횡방향 유로에 의해 서로 연결되어 있다. 각 노심모의기 하부에는 통과 유량을 계측할 목적으로 벤트리가 설치되어 있고, 축방향의 유로저항을 조정하기 위해 탈, 부착이 가능한 3개의 다공판이 설치되어 있다. 이러한 노심모의기 2개 혹은 3개를 병렬로 연결하여 각 모의기 간의 유량 편차가 발생할 경우 횡방향 유로에 의한 유로저항 및 유동분배 특성을 확인하고, 또한 횡방향 유로의 단면적을 변화시킬 경우 그 특성 변화가 어떠한지를 확인하였다.

2.2. 수치해석

2.2.1 계산조건

SMART 원자로의 100% 출력운전조건의 1/20 Re 조건에 대해 상용 CFD 코드인 FLUENT 12.0⁽⁷⁾을 이용하여 계산을 수행하였다. SMART 원자로의 100% 출력운전조건은 Re수

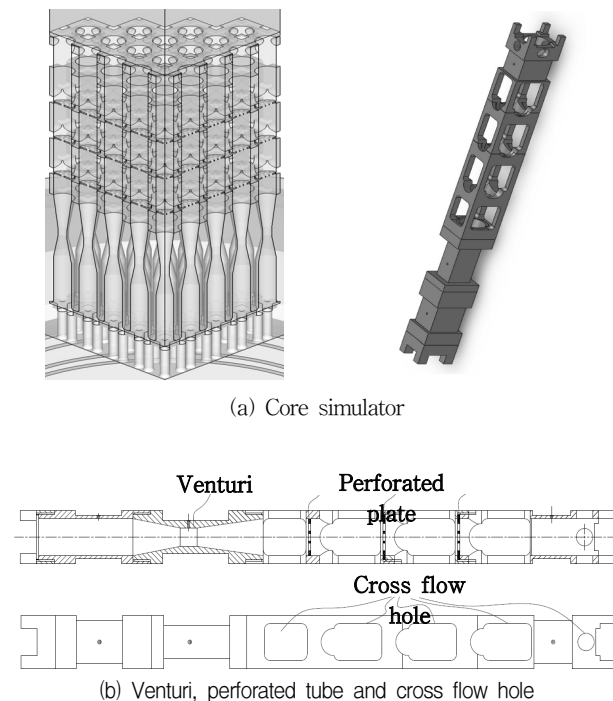


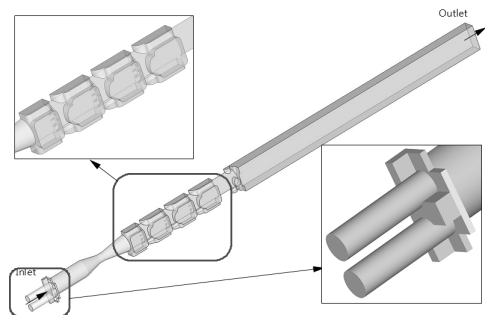
Fig. 1 Geometry of the fuel assembly

가 매우 큰($Re \approx 10^7$) 유동조건으로 Re수를 다소 낮추어도 유로저항 및 유량분배 특성은 크게 변화가 없는 것을 시험장치의 척도 및 기본설계 과정⁽¹⁾에서 확인하였다. 해석에서 유동은 3차원 1/2 대칭의 정상상태 유동으로, 밀도 및 점도 등 물성 조건은 일정한 것으로 가정하여 식 (1)~(2)과 같은 연속방정식 및 운동량방정식⁽⁷⁾을 사용하여 계산하였다.

모의기 후단에는 완전발달유동을 모사하기 위해 노심모의기 직경의 20배에 해당하는 직관부⁽⁸⁾를 추가하여 출구에 의한 영향을 배제하였다. 이는 유로저항 구조물의 유로저항을 측정할 때 실험 등에서 일반적으로 사용하는 방법으로, 유로저항 구조물에 의해 상류에서 형성된 유동이 완전히 발달하여 소멸되지 않는 경우에는 구조물의 유로저항을 정확히 측정할 수 없기 때문이다. 본 계산에 앞서 단일모의기에 대해 격자민감도 및 난류모형 테스트를 먼저 수행하였으며, 난류모형테스트에 사용된 난류모형은 Standard k-ε, Realizable k-ε, RNG k-ε 및 SST k-ω이고 k-ε 계열의 난류모형에서는 Standard wall function을 사용하였다. 식 (3)~(4), (5)~(6), (7), (8)~(9)는 각각 Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε 및 SST k-ω 난류모형^{(7),(9)}을 나타내었다. 해석에 사용된 경계조건은 Fig. 2에 나타나 있다.

2.2.2 격자민감도 및 난류모형 테스트

Fig. 3은 격자민감도 테스트를 위한 격자 형상을 나타낸 그림이다. 격자의 질을 양호하게 유지하기 위해서 모든 격자



(a) Boundary condition (Mass flow inlet and pressure outlet)

(b) Boundary condition (Symmetry)

Fig. 2 Geometry of the core simulator for CFD

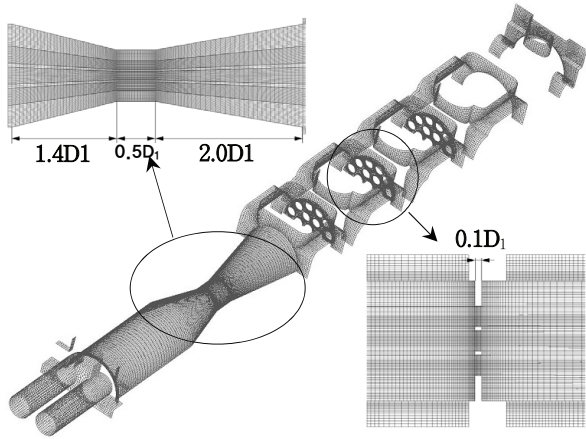


Fig. 3 Mesh for wall, venturi and perforated tube

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i w) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + G_w - Y_w + D_w \quad (9)$$

는 육면체 형상으로 형성하였으며, 이를 위해 주 유로와 측면 유로는 별도의 구역으로 구성한 후 그 경계면은 Interface 조건을 적용하였다. 각 벽면의 첫 번째 격자는 주유로의 y^+ 를 기준으로 벽함수(Wall function)에 적합하도록 설정하고, 유로저항이 큰 다공판의 전후로 조밀한 분포를 갖는 형태로 격자를 구성하였다. 이를 바탕으로 입, 출구간의 차압을 비

Table 1 Mesh sensitivity test result

Case	Mesh	ΔP (kPa)	Deviation(%) (Case A05)
A01	1,397,043	31.506	1.35
A02	2,334,704	32.006	0.26
A03	2,826,408	32.288	1.14
A04	4,011,570	31.709	0.67
A05	5,084,766	31.923	-

* 격자민감도 테스트는 Realizable k- ϵ 난류모형을 사용함.

Table 2 Turbulence model test result

Case	Turb. Model	ΔP (kPa)	Deviation(%) (Exp.)	Remark
B21	Real	32.006	8.68	Selected
B22	RNG	35.191	0.4	Unstable
B23	STD	38.427	-9.63	-
B24	SST	61.586	75.71	Unstable

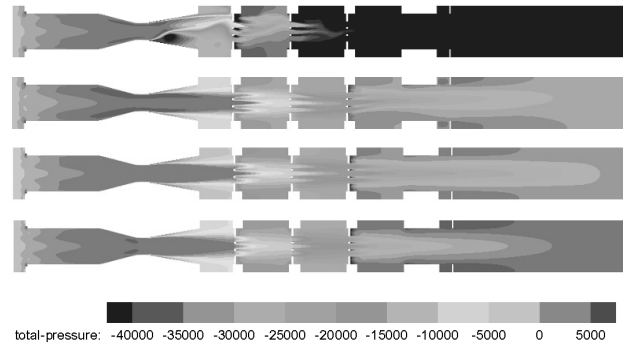


Fig. 4 Pressure distribution of turbulence model(SST-RNG-Real-STD)

교해가면서 격자민감도 분석을 수행하고, 선정된 격자에 대해 난류모형에 따른 유로저항 차이를 계산하였다.

Table 1은 격자민감도 테스트 결과를 나타낸 표이다. 격자수의 증가에 따라 미세하게 불규칙적인 경향성이 나타나는데, 이는 노심모의기가 연속적으로 설치된 3개의 다공판과 많은 횡방향 유로로 구성되어 있어, 복잡한 형상으로 인해 유동 자체가 다소의 불안정성을 갖기 때문이다. 그러나 해석한 모든 케이스에 대해 1.5% 이하의 작은 편차를 보이고 있다. 따라서 어떠한 격자를 쓰더라도 해석 결과에는 크게 영향을 주지 않을 것으로 예상되지만 계산속도와 정확도를 고려하여 A02의 격자를 선정하여 나머지 계산을 수행하였다.

Table 2와 Fig. 4는 난류모형 테스트 결과를 나타내었다. 난류모형에 따른 비교결과 Realizable k- ϵ 이 시험값⁽⁵⁾ 대비 작은 편차를 보이며 안정적인 수렴결과를 나타내었다. RNG k- ϵ 과 SST k- ω 의 경우는 불안정한 비정상상태(transient)의 유동이 나타나고 있어, 안정적인 정상상태의 해를 얻는데 어려움이 있다. 또한 RNG k- ϵ 의 경우에는 불안정한 유동을

보이고 있는데 해석종료 시점의 해석 결과가 시험값과 유사해 편차가 작은 것으로 나타난 것이다.

2.2.3 노심모의기 2개가 병렬로 연결된 경우

격자 및 난류모형 민감도 분석을 통해 선정된 격자와 난류모형을 이용하여 2개의 노심모의기가 병렬로 연결된 경우의 각 노심모의기 간의 횡방향 유동 특성을 분석하였다.

노심모의기 2개가 병렬로 연결된 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 횡방향 유로가 두 노심모의기 사이에 있으며, 이 유로에 의해서 횡방향 유동이 발생한다. 이때 각각의 노심 입구에서의 유량 편차가 발생할 경우 횡방향 유동의 증가가 예상되므로 이때의 횡방향 유동특성 변화를 평가하였다. 또한 횡방향 유로 단면적이 변할 경우 각각의 노심모의기의 유량 분배 특성이 어떠한지에 대해서도 평가하였다. 다만 횡방향 유로의 단면 형상이 횡방향 유동 특성에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단되어, 형상의 수정과 격자생성의 편의성을 고려하여 면적이 축소된 횡방향 유로 단면은 직사각형 모양으로 폭은 고정하고 높이만 변경하여 사용하였다. 입구 유량 편차 변화율은 0, 5, 10, 15, 20%이고 횡방향 유로 단면적 변화율은 설계값 대비 100, 90, 70, 50, 30, 20, 10%이며, 총 35케이스에 대해 해석이 수행되었다.

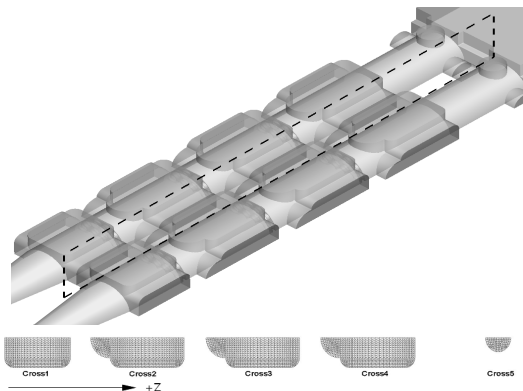


Fig. 5 Geometry of two parallel core simulators and cross flow holes between two core simulators

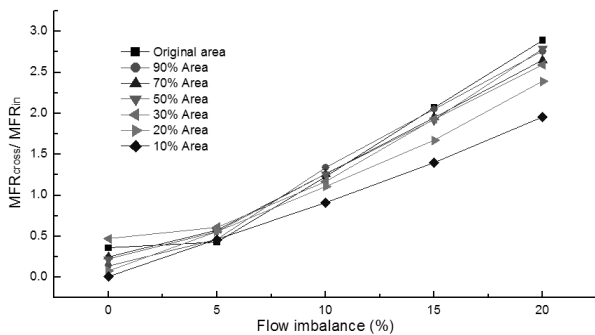


Fig. 6 Cross flow rate for two parallel core simulator

노심모의기 2개가 병렬로 연결된 경우의 입구 유량 대비 횡방향 유량의 변화 및 입, 출구 차압 변화를 Fig. 6, 7에 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 노심모의기 좌, 우 유량 편차가 커질수록 횡방향 유량이 점점 증가하고 있으며, Fig. 7에서와 같이 좌, 우 유량 편차가 크게 나타날수록 차압의 차이가 증가하며 횡방향 유로 단면적이 줄어들수록 차압은 감소하나 노심모의기 횡방향 유로 단면적이 설계값 대비 70% 이상 감소하는 구간에서는 차압의 감소율이 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 8에서와 같이 다공판을 지나는 유동은 급확대관에서의 유동 양상을 띄는데, 횡방향 유로 단면적이 좁아질수록 확대부의 영향이 줄어들어 다공판 이후에서 나타나는 급격한 압력강하 현상이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9와 10은 횡방향 유동 영역에서의 횡방향 유동 특성을 나타낸 그림이다. Fig. 10의 X축은 횡방향 유로가 존재하는 구간(H=0.3982~1.0)을 해당 구간의 높이로 무차원화한 것이고, Y축은 평균유량으로 무차원화한 종방향 단면의 유

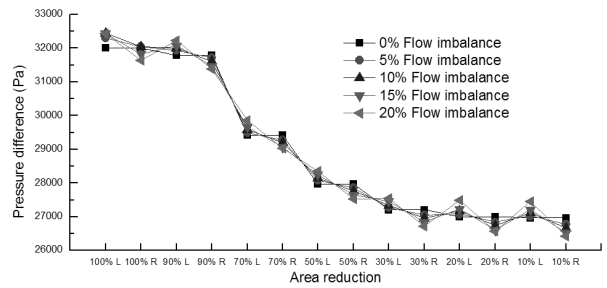
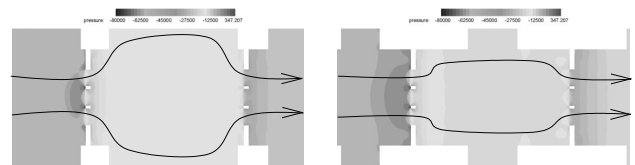


Fig. 7 Pressure difference in two parallel core simulators



(a) Cross flow area is 100% (b) Cross flow area is 50%

Fig. 8 Static pressure around the perforated tube

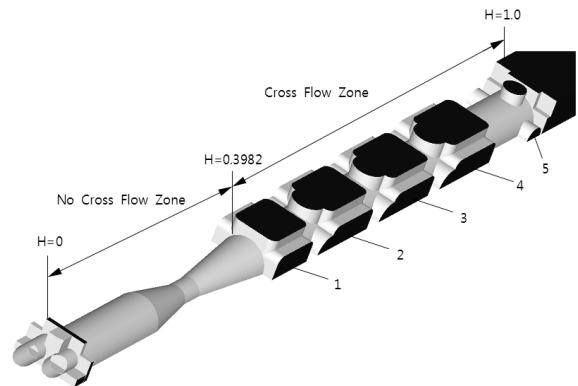
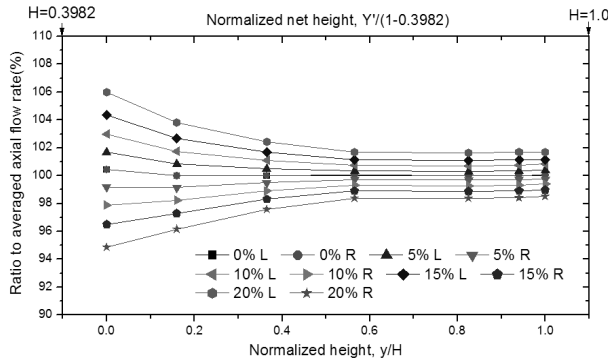
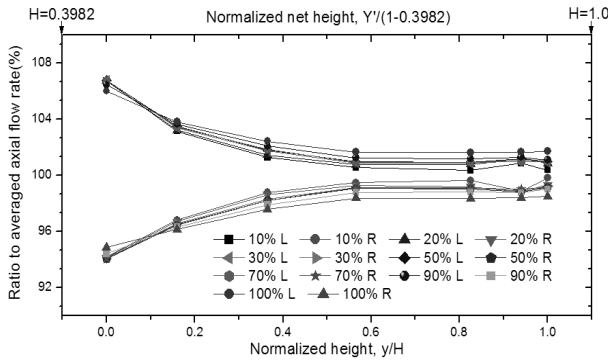


Fig. 9 Normalized height for core simulators



(a) 90% Cross flow area reduction



(b) 20% Flow imbalance

Fig. 10 Flow characteristics in cross flow area

량분포이다. Fig. 10의 (a)는 유량 편차가 10%일 경우의 횡방향 유로 단면적 변화에 따른 중방향 단면의 유량분포이고, (b)는 횡방향 유로 단면적을 90% 감소로 고정할 경우의 유량 편차에 따른 중방향 단면의 유량분포이다. 그림과 같이 노심 입구에서 발생한 유량 편차는 3번째 횡방향 유로를 지나면서 대부분 해소되는 양상을 볼 수 있다. 이는 입구에서 나타난 유량 편차가 노심모의기를 따라 상승하면서 유로저항에 의해 형성되는 횡방향 유동에 의해 소멸되어 유동이 균일해짐을 의미한다. 또한 횡방향 유로 단면적이 최대 90% 감소하더라도 최대 20% 유량 편차에서의 최종 유량편차가 약 1.5% 이내로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 횡방향 유로의 단면적이 크게 줄어들더라도 유량 편차의 감소와 같은 전반적인 유동 특성은 크게 변화하지 않는다는 것을 의미하며, 이는 해석한 대부분의 경우가 충분한 횡단면을 갖고 있어서 노심 입구의 유량 편차는 전체적인 유동 특성에 크게 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

2.2.4 노심모의기 3개가 병렬로 연결된 경우

노심모의기 3개가 병렬로 연결된 경우의 입구 유량 대비 횡방향 유량의 변화 및 입, 출구 차압 변화를 Fig. 11, 12에 나타내었다. Fig. 11에서와 같이 노심모의기 좌, 우 유량 편차가 커질수록 횡방향 유량이 점점 증가하고 있으며 횡방향 유로 면적이 좁아질수록 그 유량 또한 감소함을 알 수 있다.

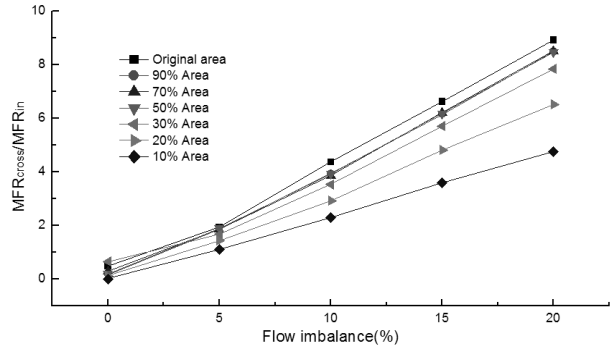


Fig. 11 Cross flow rate for three parallel core simulators

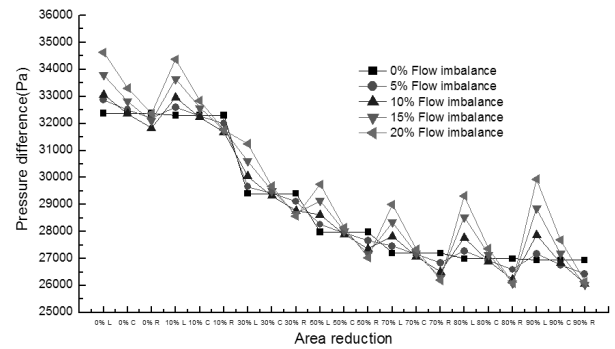


Fig. 12 Pressure difference in three parallel core simulators

또한 Fig. 12에서와 같이 좌, 우 유량 편차가 크게 나타날수록 차압의 차이가 증가하며, 횡방향 유로 단면적이 줄어들수록 차압은 감소하나 단면적이 70% 이상 감소하는 구간에서는 일정한 차압으로 수렴해감을 알 수 있다. 이는 앞서 노심모의기 2개가 병렬로 연결된 경우와 동일한 이유로 발생하는 현상인 것으로 판단된다.

Fig. 13은 횡방향 유동 영역에서의 횡방향 유동 특성을 나타낸 그림이다. 노심모의기 2개가 병렬로 연결된 경우와 동일하게 입구에서의 유량 편차가 노심모의기를 따라 상승하면서 유로저항에 의해 형성되는 횡방향 유동에 의해 해소됨을 알 수 있다. 다만, 본 경우에는 Fig. 13의 (b)에서와 같이 노심모의기 2개가 병렬로 연결된 경우보다 유량 편차가 덜 해소되지만 그렇다 할지라도 횡방향 유로 단면적이 최대 90% 감소되었을 때 20%의 유량 편차가 최종적으로 6% 이내로 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 횡방향 유로의 단면적 변화는 앞서와 마찬가지로 전반적인 유동 특성에는 크게 영향을 주지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 13의 (a)에서와 같이 횡방향 단면적 감소 비율이 30%인 경우부터는 유량 불균형이 급격히 감소하고, 50%인 경우부터는 거의 차이를 보이지 않으며, 70% 이상인 경우에는 거의 동일한 결과를 나타내고 있다. 따라서 노심에서의 정확한 유로 저항 및 유동 분배 특성을 모의하기 위해서는 해석의 정확성을 고려하여, 횡방향 유로 단면적 감소율은 70% 이상을 유지하는 것이 유량 불균형을 적절히 해소하면

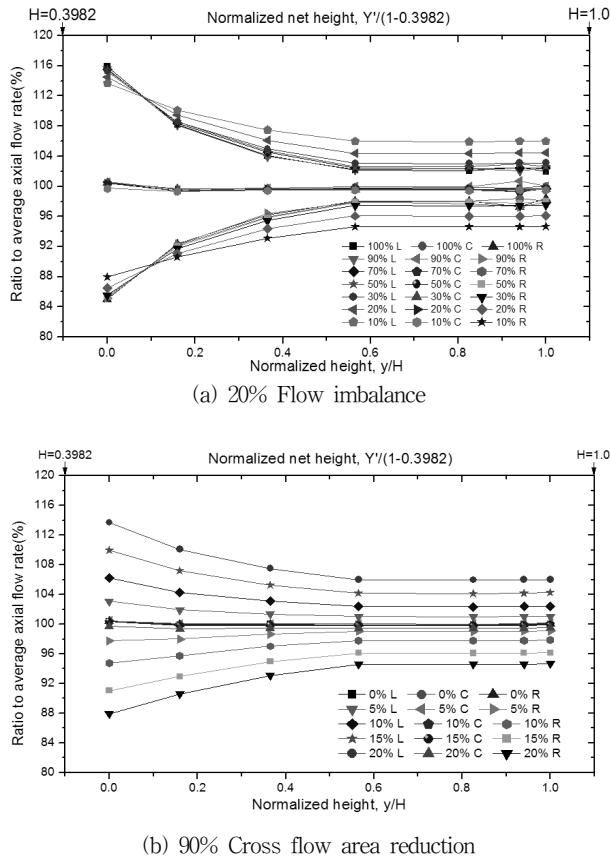


Fig. 13 Flow characteristics in cross flow area

서도 유로 저항에 크게 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

그리고 상기의 결과에서 3개의 노심모의기가 병렬로 연결된 경우가 2개의 노심모의기가 병렬로 연결된 경우보다 유량 편차가 2배 이상 발생한다. 그러나 이는 3개 모의기와 2개 모의기의 유동 발달 특성이 상이해서 동일한 조건으로 해석할 수 없어 나타나는 현상이다. 해석에서 최대 유량 편차가 나타나는 케이스의 경우 3개 모의기의 경우에는 80%와 100%와 120%, 2개 모의기의 경우에는 90%와 110%의 입구 유량 조건이 적용되었다.

6. 결 론

SMART 원자로 유동분포시험장치 노심모의기를 병렬로 연결하여 각 모의기 간의 유로 저항 및 유동 분배를 포함한 횡방향 유동 특성을 전산유체해석을 이용하여 평가하였다. 주요 평가결과는 다음과 같다.

- 1) 노심모의기 2개를 병렬로 연결한 경우는 입구 유량 대비 최대 3% 이내, 3개를 병렬로 연결한 경우는 입구 유량 대비 최대 9% 내외로 횡방향 유동이 발생하였고, 유량 편차가 증가할수록 횡방향 유동의 양은 증가하는 양

상을 보였다.

- 2) 시험장치의 노심모의기는 큰 횡방향 유로면적을 갖고 있어, 노심 입구에서의 유량 편차의 변화는 횡방향 유량 자체에는 영향을 주지만, 횡방향 유동 영역을 지나면서 유량 편차가 해소되는 특성에는 크게 영향을 주지 않는다. 입구에서의 유량 편차에 관계없이 모의된 모든 경우에서 입구 유량 편차는 횡방향 유동 영역을 지나면서 해소되어 출구 부분에서는 유동이 대부분 균일해지는 현상을 확인하였다.
- 3) 횡방향 유로의 단면적의 변화에 따른 영향을 분석한 결과, 단면적이 작아질수록 노심모의기에서의 전체적인 차압이 감소하는 양상을 보였다. 다공판을 지난 유동은 급확대관에서의 유동 양상을 보이는데, 횡방향 유로의 단면적이 줄어들수록 그 효과가 감소되어 나타나는 현상이다. 다만, 횡방향 유로 단면적이 70% 이상 감소하는 경우에는 다공판 확대부의 유로면적의 변화가 감소하면서 차압 감소율이 낮아진다.
- 4) 해석된 모든 경우에서 출구 부분의 유동이 균일해지는 현상은 모의기의 횡방향 유로 단면적이 충분히 확보되어 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 횡방향 유로 단면적이 100%인 노심모의기는 노심 출구의 압력분포에 거의 영향을 주지 않는다.
- 5) 노심에서의 정확한 유로 저항 및 유동 분배 특성을 모의하기 위해서는 해석의 불확실성을 고려하여, 단면적 감소 비율이 약 70%일 경우가 유량 불균형을 적절히 해소하면서도 유로 저항에 크게 영향을 주지 않으므로, 이 범위 내에서 유동 분배를 고려한 횡방향 유로의 단면적으로 사용하기에는 가장 적절하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 관련부서에 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

- (1) 어동진, 윤영중, 주인철, 이정운, 박재창, 김정택, 고영주, 박춘경, 권태순, 이성재, 2010, "SMART 원자로 유동분포 시험장치 척도 및 기본설계 보고서," KAERI 752-TF462-002.
- (2) J. Yoon, H. Bae, Y. I. Kim, Y. J. Chung, W. J. Lee, 2011, "Numerical Simulation on the Venturi in SMART Reactor Flow Distribution Test Facility," Korea Nuclear Society Spring Meeting.
- (3) 김영인, 윤정, 전유미, 배황, 정영중, 2011, "SMART 원자로 유동분포시험장치 핵연료집합체 모의기 유로저항 계산," KAERI 100-TH301-017.

- (4) I. E. Idelchik, 2005, "Handbook of Hydraulic Resistance," 3rd Edition, Begell house, New york, U.S.A., pp. 239~329.
- (5) 주인철, 윤영중, 고영주, 조영일, 신용철, 박춘경, 어동진, 권태순, 이성재, 2010, "SMART 원자로유동분포시험용 노심모의기 및 증기발생기 모의기의 검/교정 시험보고서," KAERI 752-TF-498-004.
- (6) J. H. Bae, D. J. Euh, T. S. Kwon, M. G. Kang, D. H. Kim, 2011, "Numerical Simulation for a Core Simulator of ACOP," Korea Nuclear Society Spring Meeting.
- (7) 2009, "FLUENT 12.0 Theory Guide," Ansys Inc., New Hampshire, U.S.A.
- (8) 2003, "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part 2: Orifice plates," International Organization for Standard.
- (9) K. H. Chun, Y. D. Hwang, H. Y. Yoon, H. C. Kim, S. Q. Zee, 2004, "Assessment of RANS Models for 3-D Flow Analysis of SMART," Journal of Korea Nuclear Society, Vol. 36, Num. 4, pp. 248~262.