

CFX 코드를 이용한 SMART 노심하부 유동장 해석

A Study on the Lower Plenum Flow Field of SMART using CFX Code

강형석, 황영동, 이두정

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

SMART 일차계통의 설계는 노심입구에서 냉각재가 가능한 균일하게 분포되도록 설계를 수행하고 있다. 주냉각재펌프 3대 운전(1대 정지)시는 정지된 펌프로 인해서 각 증기발생기 카세트를 통과하는 냉각재의 유량분포 차이가 증가하게 된다. 이 비균일도를 감소시킨 다음 노심으로 냉각재를 보내기 위해서 노심하부에 유동거름판과 유동분배판을 설치하였다. 본 논문은 유동분배판과 유동거름판이 노심하부의 냉각재 유동분포에 미치는 영향을 분석하였고 유동분배판의 압력강하에 따른 노심입구의 유동분포를 평가하였다. 해석결과에 의하면 노심하부 유동분포에는 유동분배판이 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인하였고 주냉각재펌프 3대 운전조건에서 유동분배판에서 발생하는 압력강하가 약 8KPa에서는 노심입구의 최대 냉각재 속도차이가 약 0.2m/s이고 4KPa에서도 약 0.2m/s, 2KPa에서는 약 0.4m/s 임을 확인하였다. 본 해석에는 전산유체역학코드인 CFX4.3이 사용되었다.

Abstract

The uniform flow distribution of the primary coolant is required at the entrance region of the reactor core in SMART design. In three MCP(Main Coolant Pump) operation mode, the coolant passing through twelve steam generator cassettes becomes non-uniform due to the stopped pump. To reduce the non-uniformity of coolant, the comb assembly and the flow distribution plate(FDP) are installed at the plenum below the core in SMART design. This study investigates the effect of the comb assembly and the FDP on the flow field in the lower plenum and the coolant distribution at the core entrance region induced by the pressure drop of FDP. According to the analysis results, the FDP significantly influences the flow distribution in the lower plenum. For the three MCP operation mode, the maximum coolant velocity difference is about 0.2m/s at 8KPa of the pressure drop of FDP and 0.2 m/s at 4KPa, 0.4m/s at 2KPa, respectively. A CFD code, CFX4.3, was used for this study.

1. 서론

SMART는 열출력 330MW 일체형원자로로 주냉각재펌프, 증기발생기 및 가압기 등의 주요 기기가 하나의 압력용기 안에 Fig. 1과 같이 설치되어 있고 SMART의 주요 설계변수는 Table 1에 나타나 있다[1,2]. SMART에서는 모듈(module)형태의 증기발생기를 채택하여 12개의 증기발생기 카세트를 원자로용기와 노심지지원통사이의 공간에 설치하였고 주냉각재펌프 4대는 증기발생기 카세트 바로 위부분의 공간인 주냉각재펌프 압력헤더 위에서 원주방향으로 90° 간격으로 설치되었다. 따라서 4대의 주냉각재펌프를 통과한 일차계통 냉각재는 바로 밑부분의 압력헤더를 통과한 다음 12개의 증기발생기 카세트에 흘러간다. 이때 주냉각재펌프와 증기발생기 카세트간의 상대적인 거리차이와 압력헤더의 수력적 설계특성에 따라서 각 증기발생기 카세트를 통과하는 냉각재의 유량분포는 차이가 발생하게 된다[3,4,5,6]. 이 차이를 감소시키기 위해서 Fig. 1에서와 같이 증기발생기 카세트 하단에 오리피스를 설치하였다. 또한 Fig. 2와 같이 주냉각재펌프 바로 밑에 위치한 2개의 증기발생기 카세트에는 입구에 플레이트(plate)를 설치하여 50%씩 입구 유로를 막음으로서 주냉각재펌프 바로 밑에 위치한 증기발생기 카세트에 냉각재가 과도하게 흘러가는 것을 제한하고 있다[2,3,4,5,6,7]. 기존 해석 결과에 의하면 증기발생기 카세트 하단의 오리피스에서 발생하는 압력강하와 상단의 플레이트로 인해서 각 증기발생기 카세트를 통과하는 냉각재 유량분포의 차이는 5% 이내인 것 평가되었다 [3,4,5,6,7]. 그러나 주냉각재펌프 3대 운전(1대 정지운전)조건에서는 냉각재가 증기발생기 카세트를 통과하면서 발생하는 유량분포의 차이가 약 10%정도까지 증가하게 하는 것으로 나타났다[3,4,6,7]. SMART 일차계통 설계는 노심입구에서 가능한 냉각재가 균일하게 분포되도록 설계를 진행하고 있다. 따라서 주냉각재펌프 3대 운전시 원자로하향유로와 노심하부 지역에 존재하는 냉각재의 비균일한 분포를 감소시키기 위해서 Fig.3과 같이 노심하부와 노심입구 전단에 유동거름판(Comb Assembly)과 유동분배판(Flow Distribution Plate)을 설치하였다. 유동거름판은 일차계통유로에 흘러 다니는 불순물을 제거하는 기능도 같이 수행한다. 이 유동거름판과 유동분배판에서 발생하는 압력강하가 클수록 노심입구에서 균일한 냉각재의 유동분포를 얻을수 있지만 일차계통 전체의 압력강하를 증가시켜서 주냉각재펌프의 부하를 증가시키고 자연대류 운전조건에서는 냉각재의 유동을 방해하는 부정적인 면을 발생시킨다. 현재까지의 유동거름판과 유동분배판의 예비설계에 의하면 주냉각재펌프 4대 운전조건에서 유동거름판과 유동분배판에서 발생하는 냉각재의 압력강하는 각각 약 1KPa과 약 16KPa로 일차계통 전체 압력강하가 120KPa에 비하면 유동분배판이 약간 보수적으로 설계되었다[7,8,9]. 따라서 유동분배판에서 발생하는 압력강하를 최적화시키고 유동거름판과 유동분배판이 노심하부 유동장에 미치는 영향을 평가하기 위하여 전산유체역학코드인 CFX4.3을 사용하여 노심하부 유동장 해석을 수행하였다. 그리고 노심입구에서 냉각재 유동분포를 가능한 균일하게 분포하도록 하는 설계기준에 대하여 정량적인 자료가 없는데, 본 해석을 통해서 설계기준을 정하는데 참고가 되는 자료를 생산할 수 있을 것으로 판단된다. 현 단계에서 사용되는 유동거름판과 유동분배판의 설계변수는 Table 2, 3와 같다. 본 논문에서는 여러 설계 안에 대하여 노심하부 유동분포의 민감도 계산을 수행하였다. Table 4와 같이 주냉각재펌프 4대 및 3대 운전조건에서 현재의 유동거름판과 유동분배판의 예비 압력강하 값을 사용하여 해석을 수행하여 현 설계의 유동특성을 파악하였고(case1, case2), 유동거름판과 유동분배판이 노심하부 유동장에 미치는 영향을 조사하기 위해 유동거름판과 유동분배판을 하나씩 제거하여 해석을 (case3, case4) 수행한 다음 둘 다 제거하여(case5) 해석을 수행해 보았다. 그리고 유동분배판의 압력강하 값을 현재의 값에서 50% 및 25% 감소시켜서 해석을 수행하여 압력강하 값

에 따른 노심입구에서의 유동분포를 조사하였다(case6, case7).

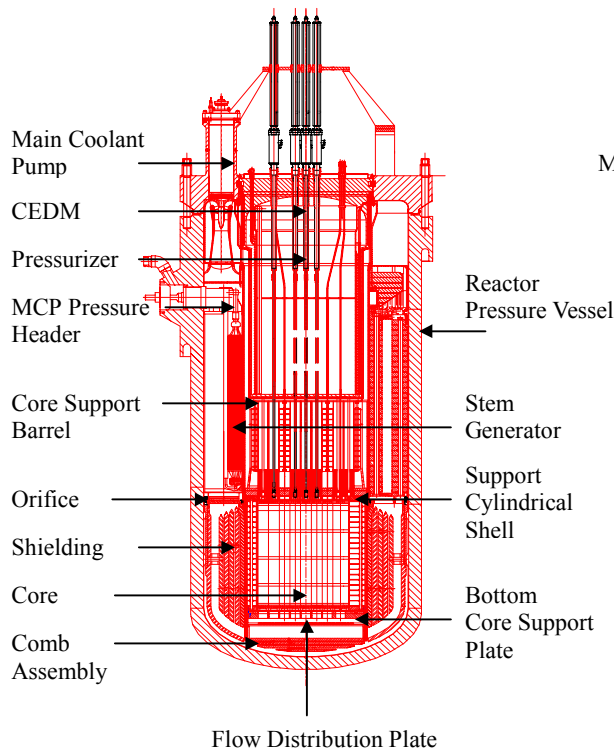


Fig. 1. SMART Vessel Assembly

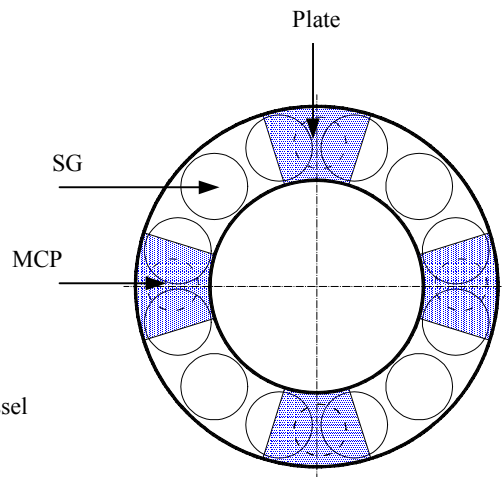


Fig. 2. Top View of MCP and SG

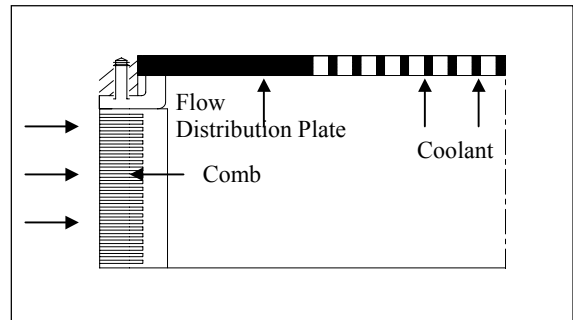


Fig. 3. The geometry of the FDP & Comb[9]

Table 1. Major Design Parameter of SMART[1,2]

Thermal Power of the Reactor	330 (MWt)
Pressure in Primary Circuit Nominal/Design	15.0/17.0 (MPa)
Coolant Temp. Rise at Core	40.0 (°C)
Coolant Flow Rate via the Core	1550.0 (kg/s)
Number of MCPs	4
Steam Output	152.4 (kg/s)

Table 2. Design Parameters of FD Plate [1,2,9]

Flow Distribution Plate		
Number of Hole	3200	-Pressure Drop at Normal Operation : 16KPa
Dia of Hole (mm)	20	
Dia. of Plate (mm)	2081	-Idelchik Handbook : 8-3 model
Thick. of Plate (mm)	30	

Table 3. Design Parameters of Comb Assem. [1,2,9]

Design Parameter of Comb		
Number of Solid Plate in Axial Direction	24	-Pressure Drop at Normal Operation : 0.958KPa
Height of Comb (mm)	240	
Height of Solid Plate (mm)	5*22 7*1 8*1	-Idelchik Handbook : 4-1, 4-9 model
Solid Plate Fraction in Axial Direction	0.52	

Table 4. Cases Studies for Optimization

Case	Operation Mode	Comb	FDP
Case 1	4MCP, 100% ¹	O	O
Case 2	3MCP*, 75% ¹	O	O
Case 3	3MCP, 75%	X	O
Case 4	3MCP, 75%	O	X
Case 5	3MCP, 75%	X	X
Case 6	3MCP, 75%	O	$\Delta P(\text{case2})/2$
Case 7	3MCP, 75%	O	$\Delta P(\text{case2})/4$

*3MCPs Op. : When One MCP is stopped
 1 : 100%, 75% Reactor Power Operation

2. 수치해석

2.1 해석대상 격자

본 해석을 위해서 SMART 증기발생기 카세트 출구부터 주냉각재펌프 입구 전단까지를 1/4 대칭모델로 모사하는 해석대상격자를 Fig. 4와 같이 CFX-Meshbuild로 생성하였다. 원자로하향유로에 있는 방사능차폐체는 CFX-Meshbuild로 모델링하지 않고 경계조건등을 지정해주는 CFX 입력파일에서 방사능차폐체의 위치를 지정한 다음 고체부분(solid patch)으로 정의하였다[10]. SMART에서는 5개의 방사능차폐체 플레이트가 환형형태로 있지만 CFX 해석을 위한 격자모델링에서는 유효 유로면적을 유지하면서 5개의 플레이트를 3개로 감소시켰다. 또한 유동거름판에서는 축방향으로 24개의 플레이트가 있지만 본 계산에서는 6개로 감소시켰다. 그리고 유동분배판, 노심하부 지지구조물(Bottom Core Support Plate), 노심 및 지지원통구조물(Support Cylindrical Shell)은 실제 형태를 모사하기가 어려워서 다공매질(porous media)로 모델링하였다. 다공매질로 모사할 때는 Table 5의 유효 유로면적과 기하학적 모양변화와 마찰에 의한 압력강하를 경계조건으로 지정해준다. 주냉각재펌프 3대 운전조건을 모사할 때는 Fig.4와 같이 정지된 펌프가 격자모델의 왼쪽에 위치해 있는 증기발생기 카세트(SG1) 위쪽에 위치한다고 가정하였다. 본 격자모델에서는 노심하부 영역을 다른 영역보다 세밀하게 격자를 분포시켰으며 유동거름판과 유동분배판의 모델은 각각 4,200, 6,125 격자 셀로 모사하였다. 그리고 생성된 총 격자 셀 수는 224,560개 이다.

Table 5. Volume Porosity and Pressure Drop

Porous Medium	Volume Porosity	Pressure Drop (KPa)	Source
FDP	0.34	16.0	Idelchik, 8-3
BCSP	0.48	0.95	Ref. [1,2]
Core	0.48	9.53	Ref. [1,2]
SCS	0.258	15.0	Idelchik, 11-15

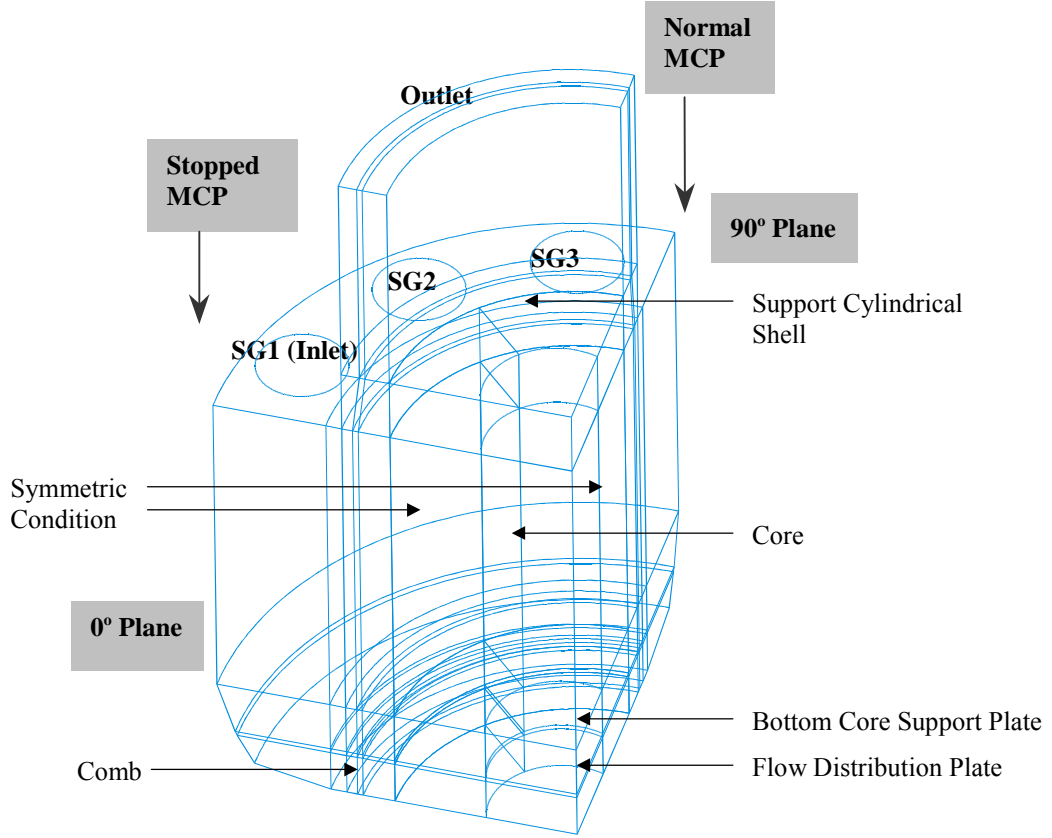


Fig. 4. The Grid Model

2.2 지배방정식 및 계산방법

SMART 노심하부 유동장을 비압축성, 난류 및 다공매질 유동장으로 가정하여 식(1)~(7)과 같이 질량보존 및 Navier-Stokes 운동량 방정식과 표준 k-ε 난류모델을 적용하여 3차원 정상상태 계산을 수행하였다. CFX 계산의 수렴성을 증가시키기 위해서 속도성분인 u, v, w와 k, ε에 대한 하향이완인자 (under relaxation factor)를 0.25로 감소시켜서 계산을 수행하였고 차분방정식은 AMG(Algebraic Multi-Grid) 방법을 사용하여 계산하였다[10]. 정상상태 계산에서는 질량에 대한 수치계산오차(residual)가 1×10^{-4} 가 될 때까지 약 6,000~8,000 반복계산을 수행하였다.

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho V \otimes V) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla V) = -\nabla P' + \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla V)^T) + B \quad (2)$$

$$B = B_F - (R_C + R_F |v|)v \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho V k) - \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) = P + G - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho V \epsilon) - \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) = C_1 \frac{\epsilon}{k} (P + C_3 \max(G, 0)) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_T, \quad \mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$P = \mu_{eff} \nabla V \cdot (\nabla V + (\nabla V)^T) \quad (7)$$

2.3 경계조건 및 다공매질 모델링

입구경계조건은 증기발생기 카세트 출구에(Fig. 4) 지정하여 속도, k 및 ϵ 에 대하여 기존에 수행한 결과[3,4,5,6,7]를 참고하여 Table 6과 같이 값을 주었고 출구경계조건은 주냉각재펌프 전단에 압력출구조건을 지정하고 “0Pa”을 참고압력 값으로 주었다. 주냉각재펌프 4대 운전조건에서 증기발생기 카세트 출구를 통과하는 냉각재의 유동분포는 약 5% 미만의 차이가 있지만 본 계산에서는 동일한 입구속도를 주었다. 본 해석에 사용되는 격자는 실제모형의 1/4만 모델링하였으므로 대칭조건을 격자모델의 0°와 90° 절단된 면에 지정하였다. 주냉각재펌프 4대 운전조건에서는 일차계통내의 유동현상이 주냉각재펌프 4대를 중심으로 대칭적이기 때문에 대칭조건 적용이 타당하며, 주냉각재펌프 3대 운전조건에서도 정지된 펌프와 정상가동하는 펌프가 격자모델의 0°, 90° 평면의 위쪽에서 50% 씩 위치하고 있기 때문에 대칭조건을 적용할 수 있다. 또한 해석대상격자의 벽면에는 정지유속조건(no-slip)이 적용되었다. 다공매질의 유효 유로면적은 SMART 설계자료를 바탕으로 해석대상 격자의 기하학적 자료를 참고하여 Table 5와 같이 주었다. 다공매질에서 발생하는 압력강하는 식 (2)~(3)에 있는 체적항의 R_F 를 사용하여 Table 5의 압력강하가 발생하도록 모사하였고(Case1, Case2) R_F 와 유동저항계수 “ ζ ”와 관계식은 식 (8)과 같다[10,11]. 유동저항계수 “ ζ ”은 SMART 설계자료와 Idelchik의 “Handbook of Hydraulic Resistance”에서 인용하였다[1,2,7,9].

Table 6. Inlet & Outlet Boundary Value [1,2,6,7]

	Inlet (Velocity, m/s)		Outlet (Pressure)
	4 MCP	3 MCP	
SG1	0.964	0.748	-0 Pa inlet value : $k_{in} = 0.002 V_{in}^2$ $\epsilon_{in} = k_{in}^{1.5} / (0.3 \times D)$
SG2	0.964	0.646	
SG3	0.964	0.612	

$$R_F = \zeta \frac{A \rho}{V 2} \quad (8)$$

2.4 해석결과

주냉각재펌프 4대 운전조건에서 유동분배관의 압력강하 값을 현재의 예비설계 값인 16KPa을 적용하여 계산한 Case1의 결과가 Fig. 5, 6에 나타나 있다. Fig. 5에서 격자모델의 0° 평면에서 축방향을 따라 그린 속도벡터가 (a)에 나타나 있고 노심하부영역에서 유동거름관과 유동분배관 주변의 속도벡터를 나타낸 것이 (b)에 있다. Fig. 5, (a)에서 알수 있듯이, 증기발생기 카세트를 통해들어온 냉각재는 원자로하향유로를 거쳐서 노심하부로 흘러간 다음 유동분배관과 노심을 통과하고 노심지지원통 구조물을 지나서 주냉각재펌프 입구쪽으로 흘러가는 것을 알수 있다. 여기서 원자로하향유로에서 속도벡터가 그려지지 않은 부분이 방사능차폐체이며, 유동분배관 전단에서는 유동거름관을 통과한 냉각재의 반경방향 운동량이 축방향 운동량보다 작아서 “A”와 같이 왼쪽부분에 치우쳐서 흘러가는 것을 알수 있고 유동분배관을 통과해서는 “B”와 같이 한쪽으로 치우치지 않고 비교적 균일하게 상부로 흘러감을 알수 있다. 이것은 냉각재가 유동분배관을 통과할 때 발생하는 약 16KPa의 압력강하 때문인

것으로 판단된다. 유동분배판 바로 밑의 노심하부 공간은 축방향으로 약 29cm의 길이인데, 이곳의 속도를 노심하부 바닥으로부터 축방향으로 2cm, 14.5cm, 27cm 높이에서 절단하여 등속도선으로 나타낸 것이 Fig. 5, (c)~(e)에 나타나 있다. (c)에서는 중앙과 바깥주변의 속도차이가 약 0.9m/s이고 중앙지역의 상당부분이 속도가 0.038m/s인 것으로 나타났는데, 이것은 Fig. 5, (b)에서와 같이 노심하부 바닥 지역은 대부분의 유동이 반경방향보다는 축방향으로 흐르므로 중앙지역은 유동이 약하기 때문이다. (d)에서는 (c)에 비하여 반경방향으로 0.038m/s에서 0.918m/s까지 비교적 균일한 간격으로 분포해 있는데, 이것은 노심하부 바닥에서 올라오는 냉각재가 약 45°의 기울기를 가지고 상승하는 것 때문인 것으로 판단된다. 유동분배판 바로 밑의 등속도선은 (e)에 나타나 있는데 중앙과 바깥주변과의 속도차이는 (d)에 비하여 약 0.5m/s로 50%정도가 감소하였다. 여기서 바깥주변의 저속도 영역은 격자모델의 바로 위부터 시작되는 유동분배판의 벽면영역 때문인 것으로 판단되며 이부분의 냉각재는 핵연료집합체 채널안으로는 흘러가지 않을 것으로 판단되기 때문에 앞으로의 유동분석에서는 벽면 근처에서 정지유속조건으로부터 야기되는 저속도 영역은 제외하기로 한다.

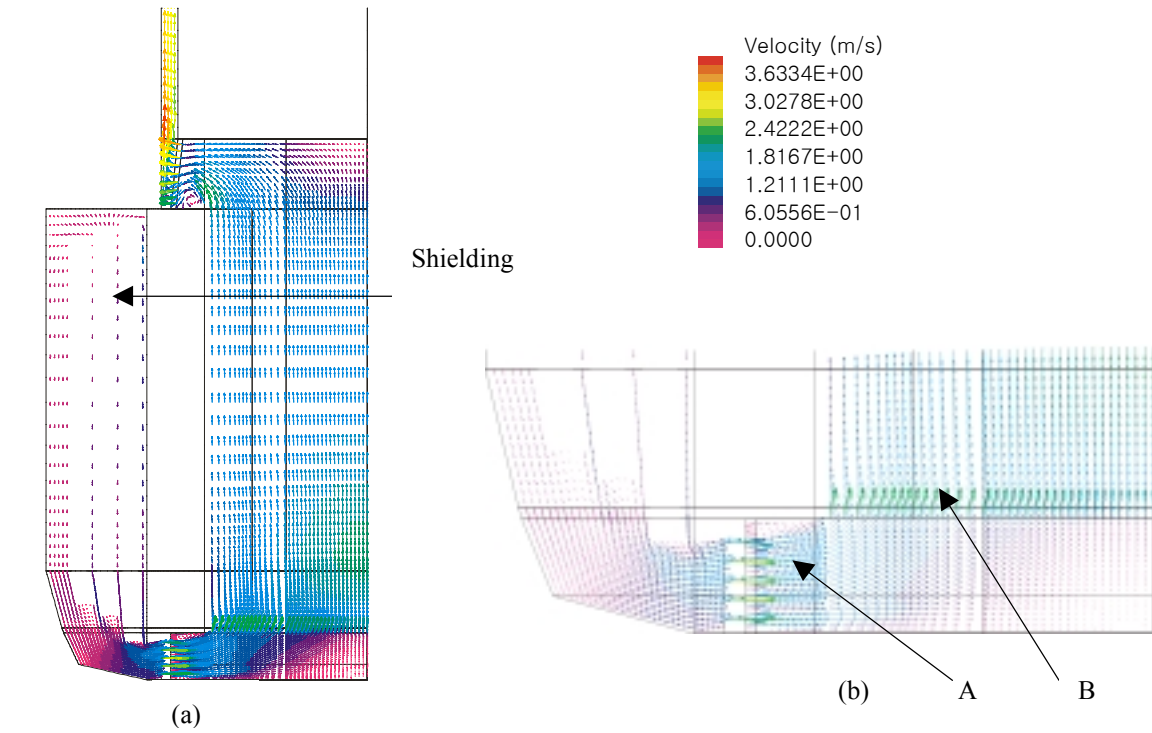
유동분배판을 통과한 냉각재의 등속도선은 Fig. 5, (f)에 나타나 있으며 중앙과 주변지역과의 최대 속도차이가 약 0.2m/s로, (e)에서 나타난 최대 속도차이 약 0.5m/s에서 약 40% 정도가 감소하였다. 이와 같이 냉각재가 유동분배판을 지나면서 고속과 저속의 최대 속도차이가 약 0.9m/s에서 0.2m/s로 약 80%가 감소한 것은 냉각재가 유동분배판을 통과할 때 발생하는 16KPa의 압력강하 때문인 것으로 판단된다. 유동분배판 이후의 높이에서는 등속도선을 나타내지 않았는데, 그것은 실제 SMART 유동장에 비하여 해석결과가 다를수 있기 때문이다. 실제 유동장에서는 노심하부 지지구조물부터는 각 핵연료집합체 채널사이를 분리하는 구조물이 있기 때문에 각 핵연료집합체 채널내로 들어간 냉각재는 전체 노심통과 유량의 5% 정도만이 채널사이를 횡방향으로 이동하고 대부분은 축방향으로만 이동한다. 그러나 본 해석에서는 이러한 구조물을 모사하지 않고 단지 유효 유로면적과 축방향으로 발생하는 압력강하만을 모사하였기에 노심지지원통 구조물부터의 냉각재 속도분포는 정확하지 않을수 있다.

Case1에서 격자모델의 0° 평면에서 축방향을 따라 총압력 분포를 그린 것이 Fig. 6, (a)에 나타나 있다. 다공매질로 가정하고 실제 유동장에서 발생하는 압력강하(Table 5)가 일어나도록 경계조건을 준 것이 유동분배판, 노심하부지지구조물 및 노심등인데 (a), (b), (c)에 나타난 결과에 의하면 실제 유동장과 유사한 압력강하가 발생하였음을 알수 있다. (c)에서 유동분배판 바로위의 압력분포가 동일한 색상이 아닌 것은 이 지점을 통과하는 냉각재의 속도가 Fig. 5, (f)와 같이 중앙부분이 바깥 벽면보다 더 빨라서 총 압력분포가 다르기 때문이다. 유동거름판은 다공매질로 모사하지 않고 실제 기하학적 모양과 유사하게 모델링하였기 때문에 CFX 코드에서 계산된 총압력 손실과 Idelchik의 핸드북을 이용하여 계산한 총압력 손실(Table 3)을 비교할 필요가 있는데, Fig. 6, (d)와 같이 약 1KPa로 Idelchik의 핸드북에서 제시하는 값인 0.95KPa과 거의 유사하게 나타났다.

주냉각재펌프 3대 운전조건에서 유동분배판의 압력강하 값을 현 설계 값으로 적용하여 계산한 Case2의 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 주냉각재펌프 3대 운전조건에서는 노심을 통과하는 냉각재 유량이 1550kg/s에서 1123kg/s로 감소하기 때문에 유동분배판에서 발생하는 압력강하는 관계식

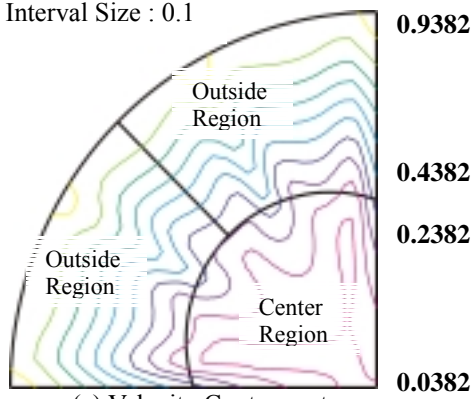
$\Delta P_1/\Delta P_2 = m_1^2/m_2^2$ 에 의하여 약 8.3KPa로 감소한다[2,6,7]. 유동분배관을 지나기 전의 냉각재 등속도선이 Fig. 7, (a)에 나타나 있고 유동분배관을 통과한 후의 등속도선은 Fig. 7, (b)에 나타나 있다. 냉각재가 유동분배관을 통과하기 전에는 고속과 저속의 최대 속도차이가 약 0.9m/s이지만 유동분배관을 통과한 후에는 약 0.2m/s로 감소한 것을 알 수 있다. 유동분배관을 통과하면서 속도차이가 약 80%가 감소하여 속도차이가 약 0.2m/s인 것은 Case1의 결과와 거의 유사하다. 주냉각재펌프 3대 운전조건에서 유동거름판을 제거한 다음 해석을 수행한 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 유동분배관을 통과하기 전에는 약 0.8m/s 속도차이인 것이 유동분배관을 통과한 다음에는 약 0.25m/s로 감소하였다. 유동분배관 바로 밑에서의 등속도선의 모양이 Case2와 다른데 이것은 유동거름판이 없기 때문에 유속이 Case2와 같이 2배정도 증가하는 지역이 없는 것이 영향을 미쳐서 다른 속도분포를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 격자모델의 0° 평면을 따라 노심하부 지역의 속도벡터를 나타낸 것이 Fig. 9에 있다. 이 그림과 Case1의 속도벡터를 비교해보면, Case1에서는 유동거름판에서 유로가 작아지면서 냉각재의 속도가 증가하여 반경방향으로 진행하다가 축방향으로 상승하는데 비해서 Case 3에서는 이런 효과가 없고 주로 냉각재가 노심하부로 내려와서 바닥에 충돌한 다음 다시 상승하여 위로 올라가는 유동현상을 나타내고 있다. 이와 같은 차이가 유동분배관 전단에서는 냉각재 등속도선의 모양에 영향을 미치다가 유동분배관을 통과한 후에는 사라지게 되는데, 이것은 유동분배관에서 발생하는 약 8KPa 정도의 압력강하 때문인 것으로 판단된다.

유동분배관 모델을 제거하고 유동거름판 모델만 있는 Case4에서의 해석결과가 Fig. 10에 나타나 있다. 여기서 등속도선이 그려진 위치는 Case2, 3과 동일한데, (a)에서의 약 0.8m/s의 최대 속도차이가 약 15%정도 감소하여 (b)에서는 약 0.7m/s인데, 이것은 Case 1, 2, 3에 비해서는 약 3.5배 정도의 큰 속도차이이다. Case3, 4를 통해서 유동분배관이 노심입구에서 냉각재의 속도분포를 균일하게 분포시키는데 가장 큰 역할을 하는 것을 알 수 있다. 주냉각재펌프 3대 운전조건에서 유동거름판과 유동분배관이 없는 Case5에서의 결과가 Fig. 11에 나타나 있다. 여기서도 등속도선이 그려진 위치는 Case2, 3, 4와 동일하다. (a)의 등속도선의 모양은 Case3과 거의 유사하며, (b)에서는 최대 속도차이가 약 0.5m/s로 Case4보다 약 0.2m/s가 감소하였다. 이것은 Case4에서는 유동거름판이 있기 때문에 냉각재의 속도가 가속이 되어 노심지지원통 구조물 지역을 지나지만 Case5에서는 이런 현상이 없어 Case4 보다는 저속으로 지나기 때문인 것으로 판단된다. 주냉각재펌프 3대 운전조건에서 유동거름판과 유동분배관 모델이 있고 유동분배관에서 발생하는 압력강하가 Case2의 50%인(약 4KPa) Case6을 계산 한 것이 Fig. 12에 나타나 있다. 여기서는 유동분배관 전단에서는 약 0.9m/s의 최대 속도차이가 유동분배관을 통과한 후에는 약 0.2m/s로 감소한 것을 알 수 있다. 약 0.2m/s의 최대 속도차이는 Case1, 2와 거의 유사한 값이다. 이로부터 유동분배관에서 발생하는 압력강하를 현 설계 값보다 50%를 감소시켜도 노심입구에서의 냉각재의 속도분포는 거의 변하지 않음을 알 수 있다. Case6과 동일한 조건에서 유동분배관에서 발생하는 압력강하를 Case2의 25%로 감소시켜 계산한 Case7의 결과가 Fig. 13에 나타나 있다. 여기서는 유동분배관을 통과한 냉각재의 최대 속도차이가 약 0.4m/s로 Case 2, 6의 약 2배가 된다.



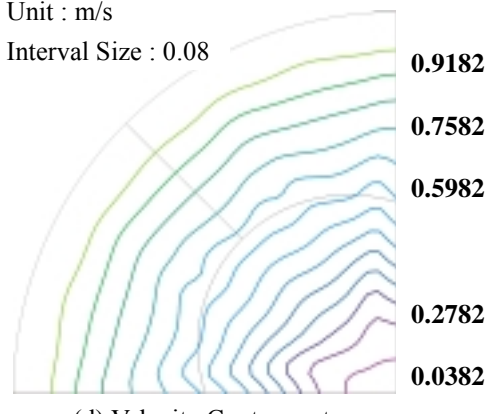
Unit : m/s

Interval Size : 0.1



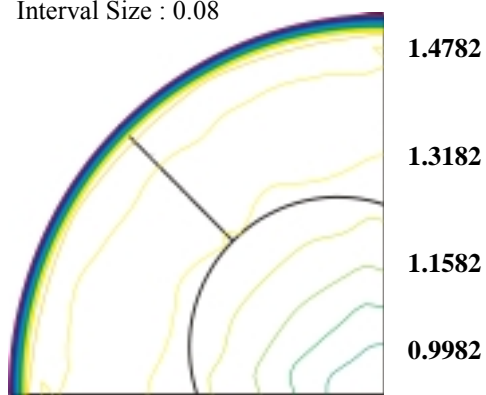
Unit : m/s

Interval Size : 0.08



Unit : m/s

Interval Size : 0.08



Unit : m/s

Interval Size : 0.1

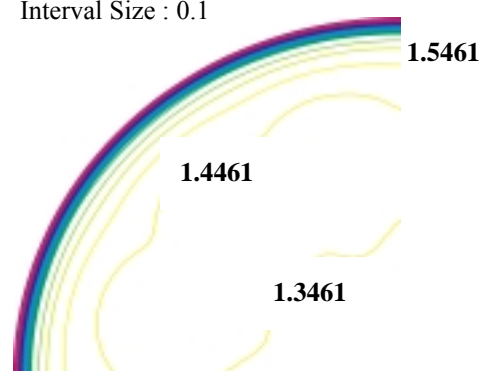
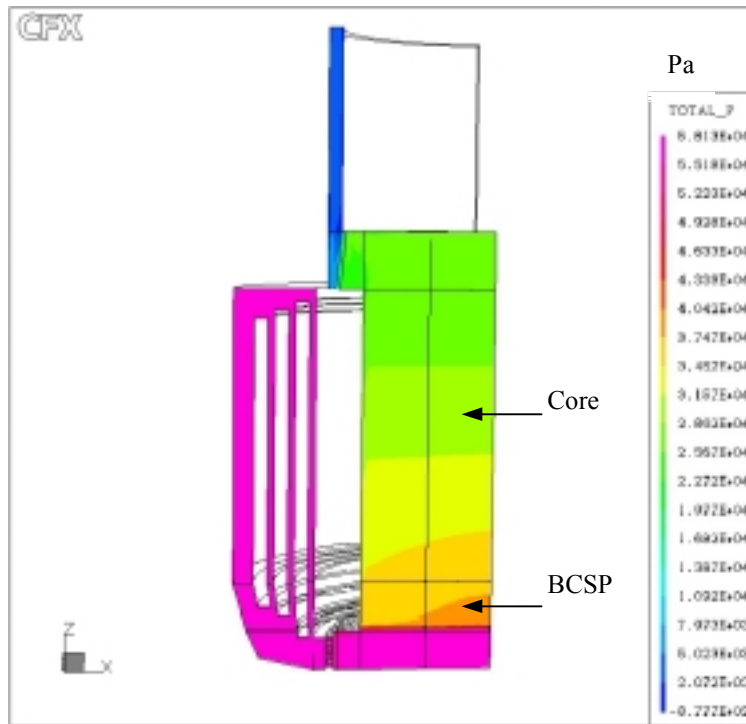
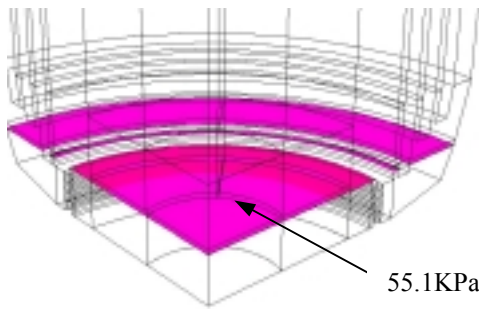


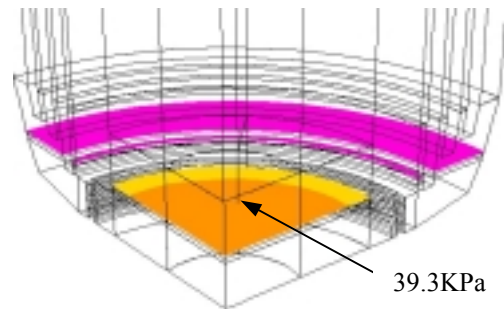
Fig. 5. Velocity Profile and Velocity Contours in Case 1



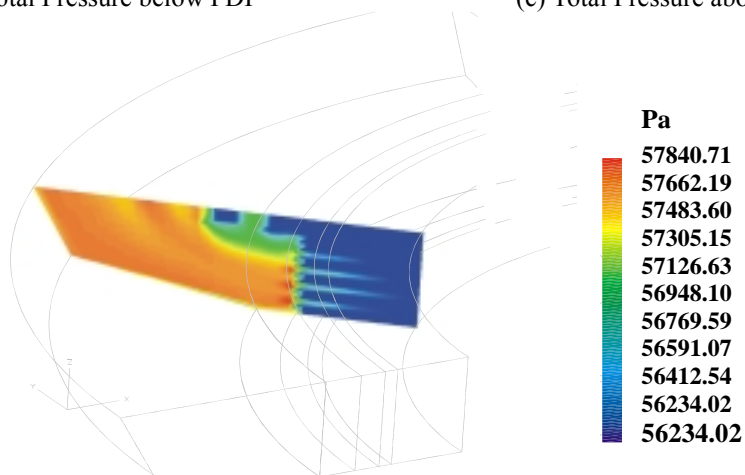
(a) Total Pressure Distribution on the 0° Plane



(b) Total Pressure below FDP



(c) Total Pressure above FDP



(d) Total Pressure around Comb Assembly on the 45° Plane

Fig. 6. Total Pressure Distribution in Case 1

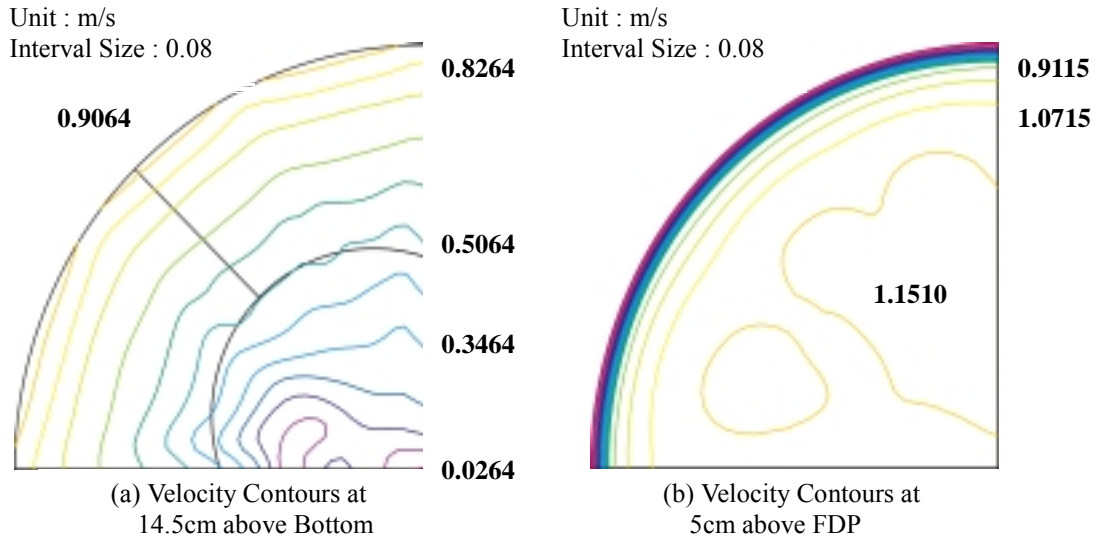


Fig. 7. Velocity Contours in Case 2

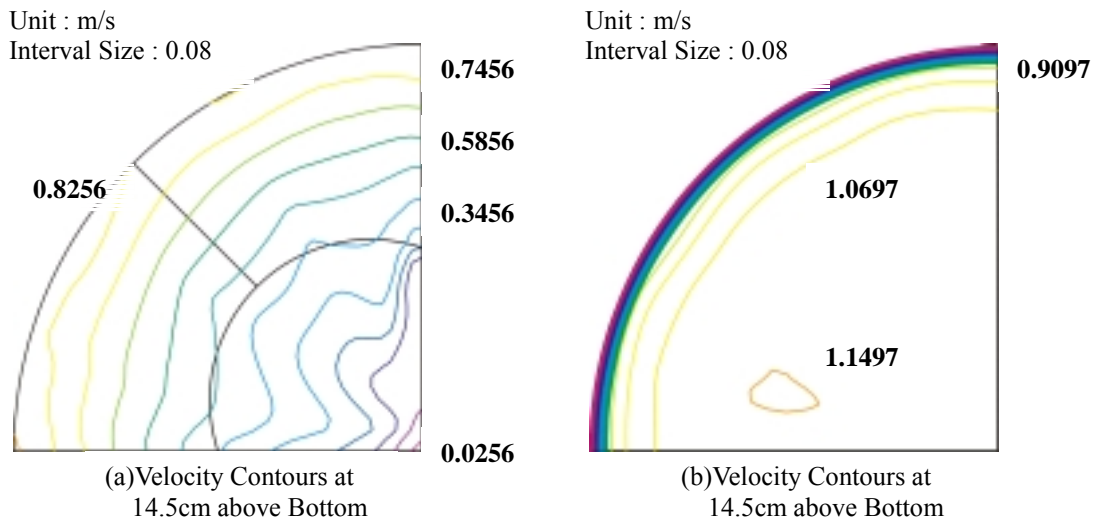


Fig. 8. Velocity Contours in Case 3

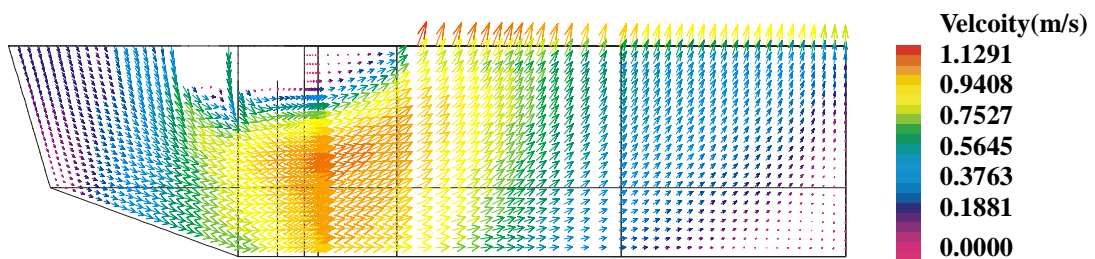
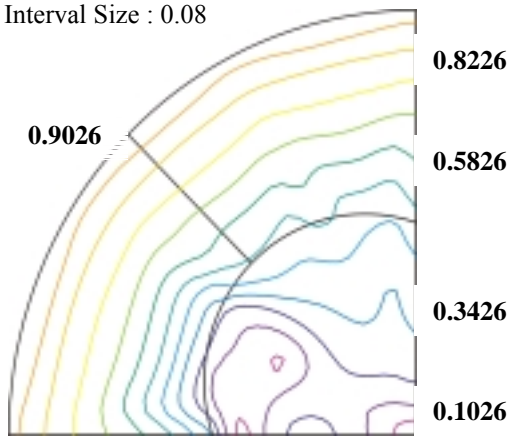


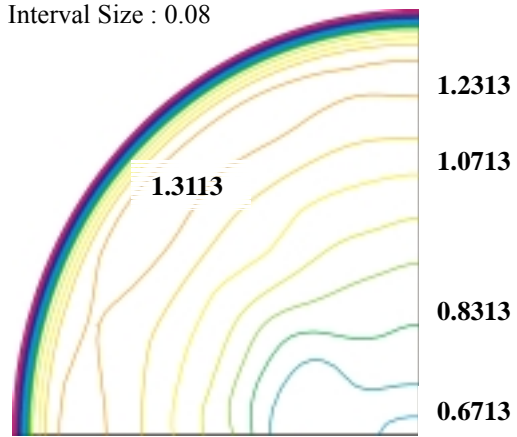
Fig. 9. Velocity Profile on the 0° Plane at Lower Plenum in Case 3

Unit : m/s
Interval Size : 0.08



(a) Velocity Contours at 14.5cm above Bottom

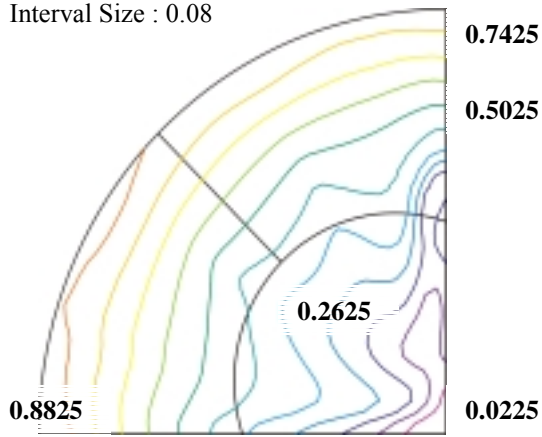
Unit : m/s
Interval Size : 0.08



(b) Velocity Contours at 5cm above FDP

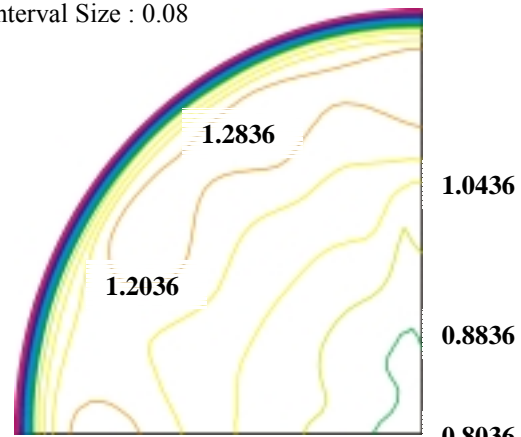
Fig. 10. Velocity Contours in Case 4

Unit : m/s
Interval Size : 0.08



(a) Velocity Contours at 14.5cm above Bottom

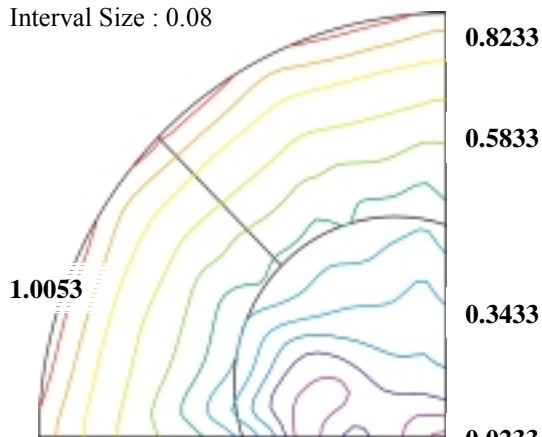
Unit : m/s
Interval Size : 0.08



(b) Velocity Contours at 5cm above FDP

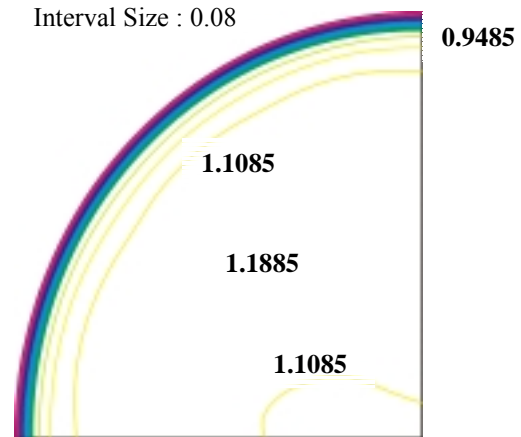
Fig. 11. Velocity Contours in Case 5

Unit : m/s
Interval Size : 0.08



(a) Velocity Contours at 14.5cm above Bottom

Unit : m/s
Interval Size : 0.08



(b) Velocity Contours at 5cm above FDP

Fig. 12. Velocity Contours in Case 6

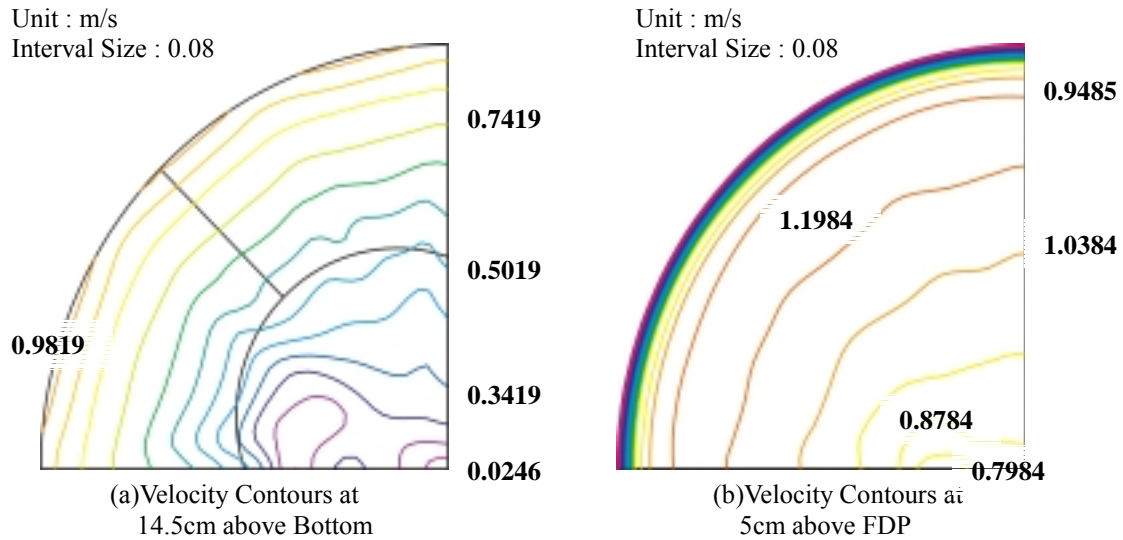


Fig. 13. Velocity Contours in Case 7

3. 결론 및 토의

SMART 노심하부 유동장을 주냉각재펌프 4대 운전조건과 3대 운전조건에서 여러 설계 안에 대하여 전산유체역학 코드인 CFX4.3을 사용하여 해석하였다. 노심하부 유동장에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 냉각재가 유동분배관을 지날 때 발생하는 압력강하인 것으로 확인되었다. 유동거름관은 노심하부의 유동분포에는 영향을 미치지 않지만 노심입구의 유동분포에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 유동분배관에서 발생하는 압력강하를 현재의 예비설계 값인 16KPa에서 50%와 25%로 감소시켜서 해석한 결과에 의하면 압력강하를 50% 감소시켜도 노심입구 냉각재 유동분포는 크게 변하지 않지만 25% 감소시키면 노심입구에서 최대 냉각재 속도차이의 크기가 0.2m/s에서 0.4m/s로 2배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 본 해석결과에 의하면 유동분배관의 압력강하를 50% 정도 감소시켜도 유량분포의 차이가 없기 때문에 압력강하를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났지만 유동분배관의 기계구조적인 설계측면도 고려해야 될 것으로 판단되며 실증실험도 필요한 것으로 판단된다. 또한 노심입구에서 어느 정도의 냉각재 유량분포 차이가 노심열수력 설계관점에서 허용되는 지에 대해서도 평가해야 될 것으로 판단된다. 노심의 핵연료집합체로 흘러가는 냉각재 유량을 정확하게 평가하기 위해서는 핵연료집합체를 모사하는 모델을 삽입하여 노심하부와 노심 유동장 해석을 수행할 필요가 있는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. H. Y. Kim etc, 1998, "System Description of SMART", Technical Report, SMART-FS-SD210, Rev. 00, KAERI.
2. D. J. Lee etc, 1999, "Development of Fluid System Design Technology for Integral Reactor", Technical Report, KAERI/RR-1883/98, KAERI.
3. H. S. Kang, and Y. Y. Bae, 1998, "Studies on Thermal Hydraulic Characteristics of Flow through MCP Pressure Header and Lower Plenum depending on SMART Operation Modes", Technical Report, KAERI.
4. H. S. Kang etc, 1998, "Effect of MCP Pressure Header on Coolant Mass Flow Distribution among SG Cassettes in the SMART", Proceedings, '98 Spring Korea Nuclear Society Conference, Vol. 1, PP. 617-622
5. H. S. Kang etc, 1998, "A Numerical Study on the Optimum Size for the Orifice Located on the Steam Generator Cassette of Integral Reactor", Proceedings, '98 Spring Korea Computational Fluid Dynamic Conference, Vol.1, PP. 75-81.
6. H. S. Kang etc, 2000, "A Study on the Thermal Hydraulic Characteristics of Flow in the Primary System of SMART Depending on the Operation modes", Proceedings, ICONE-8 Conference.
7. H. S. Kang etc, 2001, "A Numerical Study on the Primary System of SMART(to be published) ", SMART-FS-CA049-01, Rev. 01, Design Calculation Report, KAERI.
8. I. E. Idelchik, 1986, "Handbook of Hydraulic Resistance", Second Edition, Hemisphere Publishing Corporation
9. K. B. Park etc, 1999, "Development of Mechanical Design Technology for Integral Reactor", Technical Report, KAERI/RR-1888/98, KAERI.
10. CFX4.3 User Manual, 1999, AEA Tec..
11. T. Hohne, 1999, "Coolant Mixing in Pressurized Water Reactors", Proceedings, ICONE-7 Conference.