

◎ 논문

연구용 원자로 유입 공동에서 다공형 차폐물에 의한 와류 감쇄효과 예측

박 증 학¹, 채 희 택², 박 철³, 김 헌 일⁴

Prediction of Vortex Reducing Effect by a Perforated Baffle in the Inlet Plenum of a Research Reactor

J. H. Park, H. T. Chae, C. Park and H. I. Kim

CFD analysis was performed to figure out flow behavior in the inlet plenum of new research reactor where coolant is injected to the flow tubes with the fuel assembly. The computation results showed that large-scale vortices are generated in the inlet plenum by flow stream injected from inlet pipe. These vortices are divided into small vortices and reversed their revolution. They may lead to flow-induced vibration of fuel assembly, moreover, which has been regarded as a cause of fretting wear of fuel assembly. Also there is another important thing that average velocity of each flow-tube is uneven showing difference in maximum 18%. So it has been suggested that perforated baffle will be installed to prevent the formation of vortex in the inlet plenum. Two perforated baffles, one is flow skirt and the other is muffler type flow straightener, were proposed and their effect was evaluated using commercial CFD code, Fluent. According to CFD analysis for two perforated baffles, it was confirmed that both of them can prevent or reduce vortex formation in the inlet plenum and make average velocity of each flow tube more even.

Key Words : 연구용 원자로(Research reactor), 다공형 차폐물(perforated baffle), 전산유체역학(CFD), 와류(vortex)

1. 서 론

향후 예상되는 국내의 연구로 수요에 대비하여 하나로 설계 및 운영경험을 바탕으로 새로운 연구로를 구상하고 있다. 연구용 원자로인 하나의 운전 경험으로부터 노심하부에 위치한 냉각수 유입공동(Inlet plenum)에 강한 와류가 발생하고 이러한 유동

이 핵연료집합체에 진동을 일으키며, 이로 인해 노심에 장전된 핵연료에 마모손상이 일어나는 것으로 추측되었다[1,2]. 유입공동에서의 와류발생은 최근에 수행된 CFD 해석결과에서도 예측되었다[3]. 따라서 하나로 구조를 기본으로 하는 새 연구로 역시 비슷한 문제가 발생할 것으로 예상되므로, 개념설계 단계에서 이러한 문제의 발생여부를 확인하고 해결 방안을 모색할 필요가 있었다.

본 연구에서는 상용 CFD 코드인 Fluent를 이용하여 예비 개념설계 중인 새 연구로의 노심하부 유입 공동에 대한 유동해석을 수행하여 유입공동에서의

* 2004년 2월 9일 접수

*1 정회원, 한국원자력연구소 하나로운영부

*2 비회원, 한국원자력연구소 하나로운영부

*3 비회원, 한국원자력연구소 하나로운영부

*4 비회원, 한국원자력연구소 하나로운영부

와류발생 여부와 와류가 유동관에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 해석결과를 통해 확인된 유입공동에서의 유동특성을 고려하여 와류발생을 방지 또는 감소시키기 위해 다공형 차폐물을 설치하는 방안을 제시하고, 그 효과를 평가하기 위해 다공형 차폐물의 형상을 고려한 3차원 모델을 만들어 유동해석을 수행하였다. 해석결과로부터 유입공동에서의 와류 발생여부와 유동관에서 와류감쇄효과, 유량배분을 고찰하였다.

2. 해석모델 및 방법

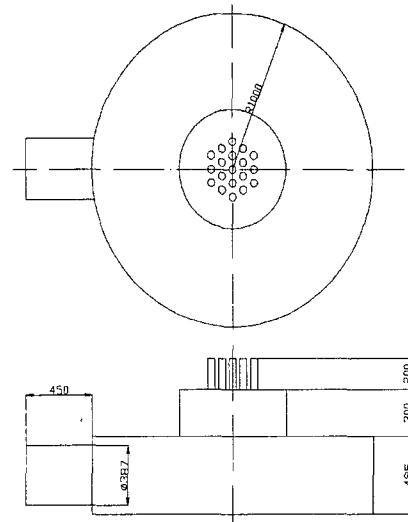
새 연구로에 적용 될 노심하부 유입공동은 Fig.1(a)과 같은 형상을 가지고 있으며, 하부 유입공동 주입관으로부터 3bar, 35°C 냉각수가 유입되어 상부 유동관들로 배분된다.

본 연구는 상용 CFD 코드인 Fluent를 사용하여 수행되었다. 유동해석을 위한 비정렬 계산격자가 Fig.1(b)에 보여지고 있는데, 유입공동 상부 유동관에서의 와류거동을 살펴 볼 수 있도록 조밀한 격자가 생성되어 있음을 볼 수 있다. 주입관을 중심으로 대칭적인 형상을 이루기는 하지만, 내부에서의 유동이 대칭적일 것이라고 예측하기는 어려우므로 실제 형상을 모두 고려하였다.

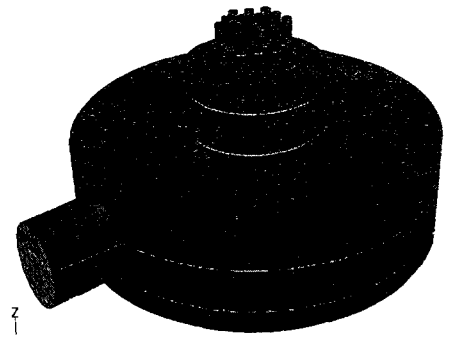
하부유입공동 주입관에서는 335.1kg/s의 질량유량이 흐르는 것을 설정하였는데, 이는 각 유동관에서 평균유속이 9m/s가 되는 값이다. Fig. 1에서 보는 것처럼, 입구(inlet)는 하나이지만 출구(outlet)는 여러 개이므로 모든 유동관의 출구조건을 압력출구(pressure outlet)조건으로 설정하였다.

유동해석을 위한 대류항의 이산화를 위해 1차 상류차분법(First Order Up-wind Scheme)이 사용되었다. 1차 상류차분법은 2차 상류 차분법이나 QUICK 차분법에 비해 상대적으로 정확도는 다소 떨어지지만 수렴성이 좋다[4]. 연속방정식과 운동량방정식의 압력항 및 속도항의 처리를 위해 SIMPLE 해법이 이용되었다.

난류모델로는 유동박리를 포함한 벽면 근처 유동이나 선회류(swirl flow)등을 잘 예측하는 것으로 알려진[4] RNG k- ϵ 모델이 사용되었고, 벽면 근처 격자처리를 위해 벽함수(wall function)가 사용되었다. 수렴판단 기준은 잔류항의 총합이 10^{-4} 이하로 설정하였다.



(a) geometry



(b) mesh

Fig. 1 Geometry and mesh for inlet plenum

3. 유입공동에서의 유동특성

유입공동 내에서의 전체적인 유동장의 흐름을 볼 수 있는 유동궤적이 Fig. 2(a),(b)에서 보여지고 있다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 입구에서 유입된 냉각수가 원통형의 하부 유입공동 반대편 벽에 부딪힌 후 벽면을 따라 다시 입구 쪽으로 흐르면서 주입관 양쪽으로 두 개의 큰 와류가 형성됨을 보여준다. 이러한 와류는 하나로 유입공동에 대한 CFD 해석에서도 나타난 현상이다[2]. 유동해석 결과를 살펴볼

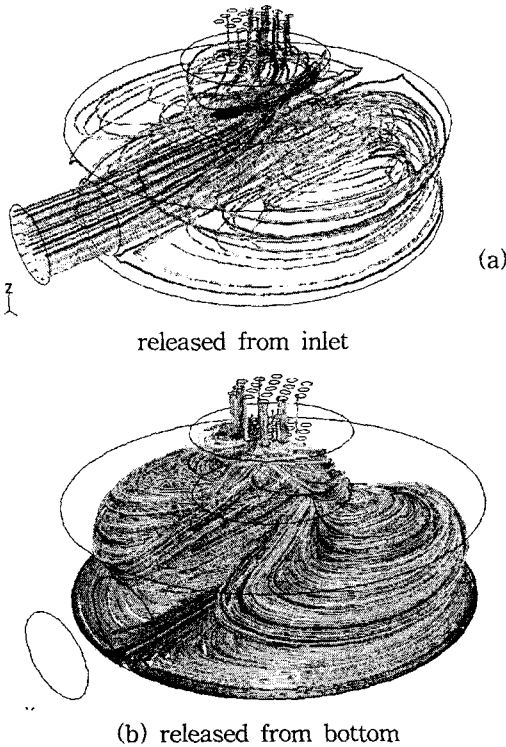


Fig. 2 Path-line in flow field of inlet plenum

때 하부공동에 이러한 큰 와류가 발생하는 원인은, 한쪽 측면에서만 냉각수가 주입되고, 하부공동의 크기가 주입관에 비해 상대적으로 커서 주입된 유동 양쪽으로 와류가 형성될 공간을 제공하기 때문이다. Fig. 2(b)에서는 와류의 특성을 좀 더 잘 파악할 수 있는데, 하부 유입공동에서 발생한 와류가 상부 유입공동으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 이 때 공동(plenum)의 크기가 작아짐에 따라 와류의 크기도 작아지게 되며, 각운동량보존을 고려하면 와류의 회전 반경이 작을수록 각속도는 증가하게 된다[5]. 따라서 하부 유입공동에서 발생한 와류[Fig. 3(a)]가 상부 유입공동[Fig. 3(b)]에서는 더 빨라지는 것을 볼 수 있다[Fig. 3].

4. 다공형 차폐물 및 해석모델

하나로 운전경험에 의하면 하부 유입공동에서 발생된 와류는 핵연료에 유체유발진동을 일

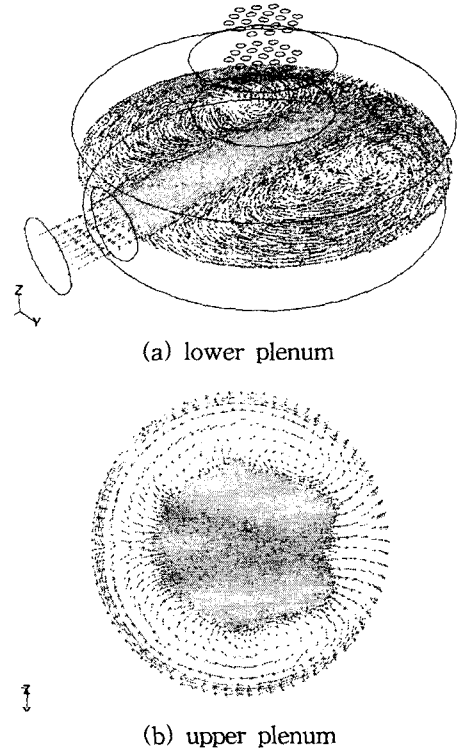


Fig. 3 Velocity vectors

으킬 뿐만 아니라 핵연료 집합체의 여러 부품에 기계적인 마모를 발생시키는 것으로 알려졌다. 앞서의 계산 결과에 따르면 하나로와 흡사한 유입공동을 고려하고 있는 새 연구로 역시 같은 문제를 일으키게 될 것으로 보이므로, 유입공동에서의 와류발생을 억제하기 위해 다공형 차폐물을 유입공동 내부에 설치하는 방안이 제시되었다.

현재 고려되고 있는 다공형 차폐물은 flow skirt와 flow straightener 두 가지이다. Flow skirt의 기본개념은 하부유입공동에 환형 격막을 설치하고 여기에 다수의 구멍을 뚫어주면[Fig. 4(a)] 주입관으로부터 유입된 냉각수가 격막의 구멍을 통해 모든 방향에서 안쪽으로 흐르게 함으로서 와류를 일으킬 수 있는 주유동이 사라지게 되어 하부유입공동에서 와류발생이 억제된다. Flow skirt는 현재 개발 중인 차세대 원자로에서도 핵연료 집합체의 유체유발진동을 막기 위해 설치가 고려 중이다[6].

또 다른 다공형 차폐물은 한쪽 끝이 반구형으로 막힌 다공형 파이프 형상을 갖는 muffler

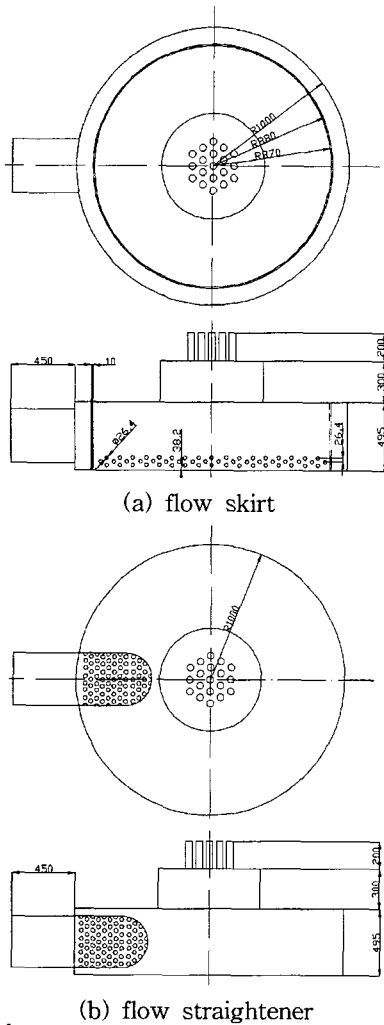


Fig. 4 Schematics of flow skirt and flow straightener

형 flow straightener[Fig. 4(b)]인데, 이것 역시 와류 발생을 억제하기 위한 기본 개념은 flow skirt와 동일하다. 특히 muffler형 flow straightener는 하나와 비슷한 노심하부 구조를 갖는 캐나다의 연구용 원자로에 설치되어 상당한 효과를 본 것으로 알려졌다[2]. 다공형 차폐물의 구멍의 위치나 크기, 배열, 차폐면에서 구멍의 면적이 차지하는 비율이 다공형 차폐물 설계의 중요한 변수[7]이지만, 본 연구의 목적은 다공형 차폐물에 의한 와류발생 억제효과와 유량배분 개선효과를 확인하는 것이므로 다공형 차폐물 두께(10mm), 구멍의 크기(직경 26.4mm)나 배열은 임의로 정하였다. 하지만 주입관의

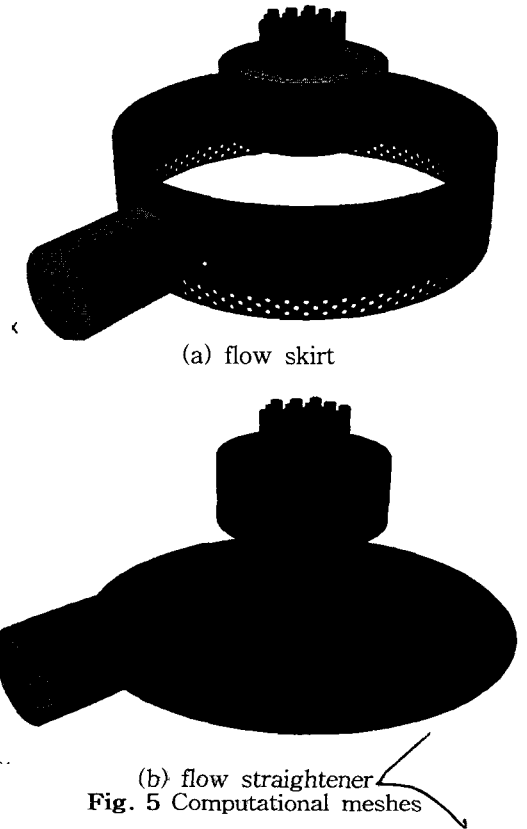


Fig. 5 Computational meshes

유로면적과 다공형 차폐물의 구멍면적이 동일하도록 하였다.

Flow skirt와 flow straightener를 해석하기 위한 격자가 Fig. 5에 보여진다. 다공형 차폐물의 두께가 구멍의 직경에 비해 무시할 만큼 얇다면 다공형 차폐물을 얇은 벽(thin wall)으로 모사해도 되겠지만 여기서는 차폐물의 두께를 고려하였다. 따라서 각각의 구멍단면을 24개, 축방향으로 5개인 격자가 생성 되도록 하여 구멍을 통한 유동을 모사할 수 있도록 하였다.

5. 다공형 차폐물의 해석결과

Fig. 6은 유입공동에 다공형 차폐물을 설치했을 때 유동의 흐름을 알 수 있는 유동궤적을 나타낸다. Flow skirt를 통과하는 유동은 어느 한쪽으로 치우침 없이 모든 방향에서 고르게 안쪽으로 유입됨을 볼 수 있다. Flow straightener를 통과한 유동 역시 유입공동 내에서 방사상을

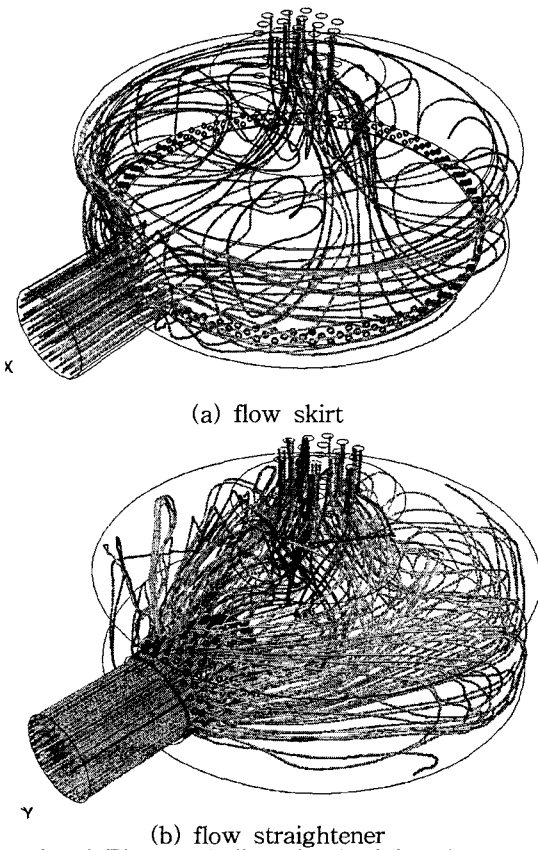


Fig. 6 Flow path-lines in the inlet plenum

로 분출되는 것을 알 수 있다. Flow skirt를 설치했을 때와 flow straightener를 설치했을 때 모두, 유입공동에서 대규모 와류가 보이지 않는다. 유속벡터 [Fig. 7]에서도 유입공동 내 유동장 형성에 영향을 줄만한 와류라고 생각되는 유동은 없다. 다공형 차폐물 설치에 의한 유동관 내부에서의 와류 영향을 알아보기 위해, Fig. 8에서는 유동관내 입의 단면에서 축방향 속도성분을 제거한 속도벡터를 나타내고 있다. 일부 유동관을 제외하고 대부분의 경우, 다공형 차폐물 설치 전보다는 설치 후에 유동관내에서의 와류가 감소되었음을 볼 수 있다. 그러나 하부공동에서의 대규모 와류가 사라졌음에도 불구하고 유동관에 와류가 나타나는 것으로 보아, 유동관에서의 와류가 하부공동의 대규모 와류에만 기인한 것은 아닌 것으로 추측된다.

다공형 차폐물 설치 전에는 Fig. 9(a)와 table

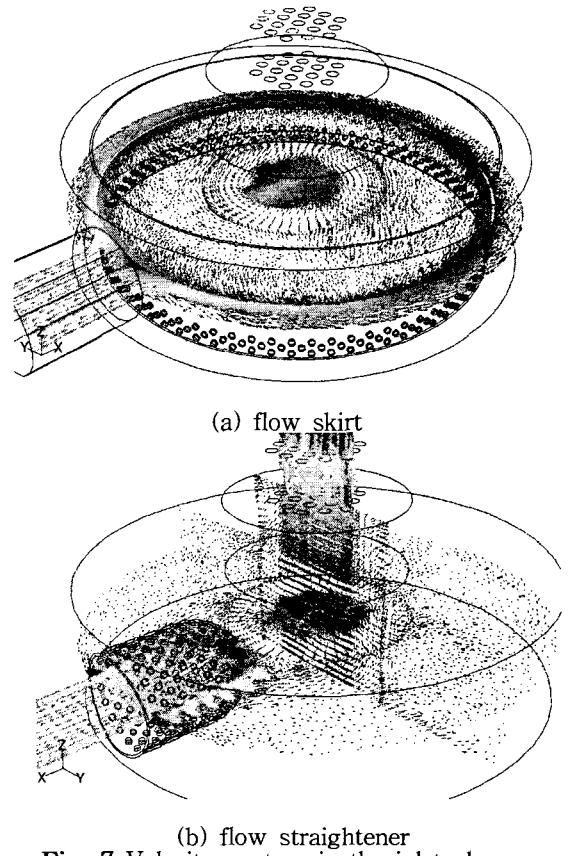


Fig. 7 Velocity vectors in the inlet plenum

1에서 보는 바와 같이 각 유동관마다의 평균유속의 차이가 최대 18%까지 나타날 것으로 예측되었다. 18%의 유속차이는 해당하는 만큼의 유량차이를 의미하므로 핵연료 냉각에 부정적인 영향을 끼치게 된다. 하지만 다공형 차폐물을 설치한 후에는 이러한 유속 불균형이 크게 개선되어, flow skirt와 flow straightener에 대해 각각 최대 약 5%와 4% 정도의 유속 편차를 보이는 것으로 나타났다.

6. 결론

연구용 원자로 하부유입공동 내에서 와류의 발생 뿐만 아니라 각 유동관에서 심각한 유량 불균형이 발생함을 예측하고, 그 대응 방안으로 제시된 유입공동 내 와류발생을 억제하기 위한 다공형 차폐물의 설치에 대한 효과를 CFD해석을 통해 평가하였다.

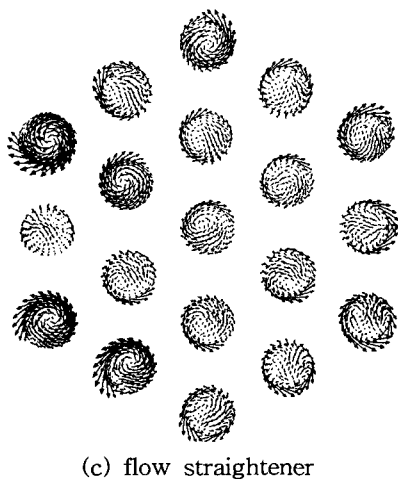
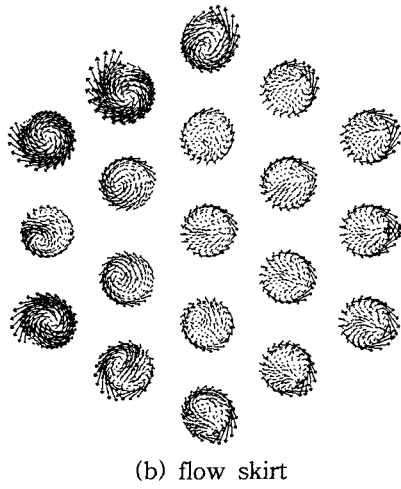
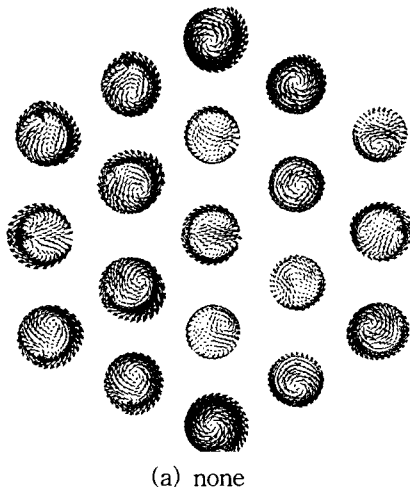


Fig. 8 Velocity vectors in the flow-tubes

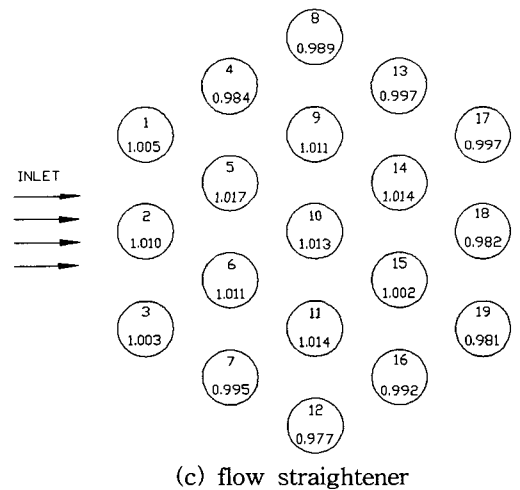
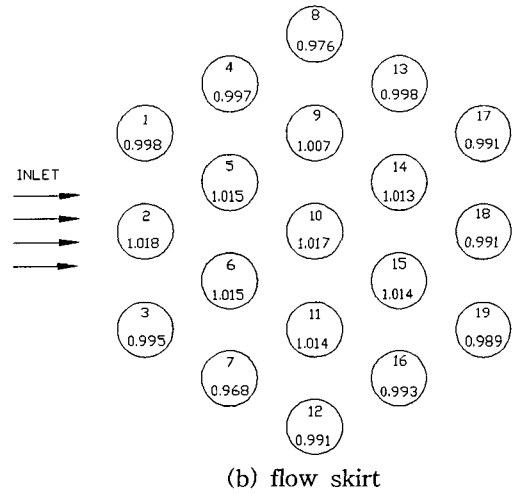
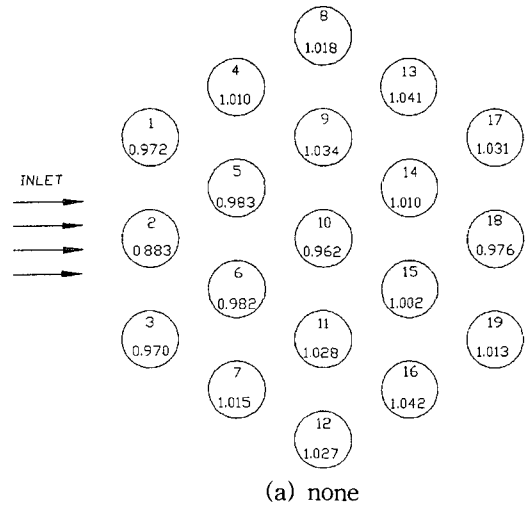


Fig. 9 Relative velocity on the each flow-tube

Table 1 Comparison of average velocity of each flow-tube for three cases

tube No.	none		flow skirt		muffler	
	V(m/s)	remark	V(m/s)	remark	V(m/s)	remark
1	8.54	0.972	8.74	0.998	8.80	1.005
2	7.76	0.883	8.92	1.018	8.85	1.010
3	8.53	0.970	8.72	0.995	8.79	1.003
4	8.88	1.010	8.73	0.997	8.62	0.984
5	8.64	0.983	8.89	1.015	8.91	1.017
6	8.63	0.982	8.89	1.015	8.86	1.011
7	8.92	1.015	8.48	0.968	8.72	0.995
8	8.95	1.018	8.55	0.976	8.66	0.989
9	9.09	1.034	8.82	1.007	8.86	1.011
10	8.46	0.962	8.91	1.017	8.87	1.013
11	9.04	1.028	8.88	1.014	8.88	1.014
12	9.03	1.027	8.68	0.991	8.56	0.977
13	9.15	1.041	8.74	0.998	8.73	0.997
14	8.88	1.010	8.87	1.013	8.88	1.014
15	8.81	1.002	8.88	1.014	8.78	1.002
16	9.16	1.042	8.70	0.993	8.69	0.992
17	9.06	1.031	8.68	0.991	8.73	0.997
18	8.58	0.976	8.68	0.991	8.60	0.982
19	8.90	1.013	8.66	0.989	8.59	0.981
Avg.	8.79		8.78		8.78	

두 가지 형태의 다공형 차폐물이 각각 연구용 원자로 유입공동에 설치된 경우에 대한 해석결과로부터, 두 가지 모두 유입공동 내 와류발생을 억제함을 알 수 있었으며, 특히 유동관에서의 평균유속 편차는 상당히 개선될 것으로 예측하였다. 하지만 유입공동에 와류가 사라짐에도 불구하고 유동관에 와류가 존재하는 이유에 대해서는 앞으로 좀 더 연구가

필요할 것으로 보인다. 또한 그 결과에 따라 새 원자로의 하부 구조물 형상 변경이 고려되어야 할 것으로 보인다.

본 연구의 결과로, 새 연구용 원자로의 예비 개념 설계 단계에서 CFD 해석을 적절히 이용함으로써 미리 문제점을 파악하고, 그 해결방법에 대한 효과를 예측하여 설계에 반영함으로써 핵연료의 건전성 및 원자로 안전성을 증대시킬 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] 김현일 외 5인, "하나로 열수력 Database 및 해석체 계구축," 연구보고서, KAERI/RR-2152 /2000, (2000).
- [2] 박철 외 12인, "수출 전략형 연구로 설계," 과제 연구보고서, KAERI/RR-2289/2002, (2002).
- [3] (주) CFTEch, "하나로 운전 중 동위원소 표적착 탈장치의 유동해석," 외부위탁연구보고서, (2003).
- [4] "Fluent User's Guide," Fluent Inc. (1998).
- [5] Hans, J. L., "자연과 기술에서의 와유동," 대영사, (1991).
- [6] 한성봉, 조연식, 정성호(한국중공업(주) 차세대원자로 T/F팀), "Flow skirt의 유체유발 진동해석," draft, 출처미상
- [7] Idelchik, I. E., "Handbook of Hydraulic Resistance," 3rd Ed. Begell House, (1996).