2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART-P 증기발생기 유동분배판에 대한 전산유체해석

CFD analysis on the flow distributing plate of SMART-P SG

김영인, 김성훈, 유승엽, 최병선, 윤주현
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
박종호
충남대학교
대전시 유성구 궁동 220

요 약

일체형원자로 SMART-P 증기발생기 상단에는 유동분배판이 설치된다. 유동분배판의 기존 설계는 MCP로부터 토출되는 냉각수의 수직모멘트를 수평모멘트로 전환해주는 역할 만을 수행하며, 증기발생기 하단에 설치되어 있는 오리피스와 증기발생기 튜브의 저항에 의해 유량평형이 이루어진다. 설계 개선(안)은 공통헤더 전 영역에 환형 다공성 평판을 설치하는 것으로 증기발생기 유동편차는 오리피스와 증기발생기 튜브의 저항과 함께 유동분배판에 저항을 걸어 유동편차를 바로잡는 방안이다. 본 논문에서는 전산해석적 방법으로 유동분포를 개선하기위해 설치되는 유동분배판과 오리피스에 관련된 설계인자들이 유량분포에 미치는 영향을 분석하였다. 전산해석결과 설계개선(안)에서 최대유량편차는 약 0.1%미만 까지 감소하고, 압력손실은 약 30% 절감하는 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 설계개선(안)이 유동편차 감소측면과 압력손실 감소 측면에서 모두 매우 큰 효과가 있는 것으로 나타났다.

Abstract

Flow distributing plates are installed in the Steam Generator(SG) upper annular of SMART-P. The current flow distribution plates changes the direction of MCP discharge flow from vertical to horizontal. The flow balance on the SG cassettes are made by SG orifice only. However, it couldn't get uniform flow distribution on each SG cassette. To overcome this drawbacks, design concept of improving flow distribution on the SG cassettes is introduced to the ring-shaped perforated plate instead of the current distributing plates. In this paper the related effects between SG orifice and flow distributing plate to the SG is evaluated to analyze the design parameters affecting flow distribution using a developed 2D CFD code. RNG k-e model, 2nd Upwind scheme, staggered grid, and SIMPLE algorithm was adopted in the 2D CFD code to analyze this model. The maximum flow distribution error on the SG cassettes was reduced to about 0.1%. The pressure loss from the SG header to SG orifice was also reduced about 30%. As a results, much improvement was made in flow balancing on the SG cassettes and in the pressure loss reduction by introducing the ring-shaped perforated plate.

1. 서 론

SMART-P는 전원상실사고, 소형냉각재상실사고와 같은 비상사고시에도 원자로를 안전하게 정지하고 노심 잔열을 제거할 수 있도록 자연대류방식의 4계열(train)로 이루어지는 피동잔열제거계통을 채택하고 있다. 피동잔열제거계통은 증기발생기 각 섹션에 연결되어 증기발생기를 통해서 원자로냉각재계통을 냉각시킨다. 원자로냉각재계통 또한 증기발생기와 노심의 온도차에 의해 발생되는 자연대류를 이용해 순환되도록 설계된다. SMART-P의 안전성 향상을 위해 채택된 피동력 즉, 자연대류를 이용한 안전 특성을 만족하기 위해서는 원자로냉각재계통 유로에서의 압력손실(압력강하)을 가능한 한 작게 설계하는 것이 바람직하다.

본 연구는 다음과 같은 두 가지를 목적으로 수행되었다. 첫째 증기발생기 간 유량편차를 감소시키는 방안을 모색한다. 증기발생기간의 유량편차가 증가하면 증기발생기로를 통과하는 냉각재의 온도편차가 증가하고, 결과적으로 노심으로 유입되는 냉각재 간의 온도차가 증가하여 노심의 온도편차가 증가한다. 노심의 온도편차가 증가하면 국부적으로 노심 온도가 상승하게 된다. 반대로 증기발생기 간의 유량편차가 감소하면 균질한 온도의 냉각수가 노심에 유입될 수 있어 국부적인 온도 불균형이 감소한다.

둘째 유로의 유동저항을 감소시킨다. 압력손실계수가 감소한다면 MCP가 소비하는 소비전력을 감소시켜 전력생산량을 증가시키는 효과가 있다. 또한 전술한 바와 같이 SMART-P에서는 안전성 향상을 목적으로 피동잔열제거계통과 원자로냉각재계통에서 자연대류를 이용한다. 원자로냉각재계통의 유동저항이 감소하면 원자로냉각재계통의 자연순환유량이 증가하여 증기발생기와 노심의 온도차가 감소하여 노심이 손상될 가능성이 감소한다.

본 논문에서는 상술한 목적을 위해 SMART-P의 MCP 후단과 증기발생기 사이의 유로에 대한 분석을 수행하고자 한다. MCP후단으로부터 증기발생기 상단의 유로는 그림 1과 같이 MCP 후단에 공통헤더가 위치한다. 공통헤더에는 MCP로부터 토출되는 수직 방향 유동을 수평방향을 분산시키기 위해 유동분배판이 설치된다. 현 유동분배판은 그림 2와 같이 각각의 MCP 후단 토출구에 공통헤더 면적의 1/12로 2개가 설치된다. 증기발생기는 헬리컬 타입이며 오리피스를 제외한 증기발생기의 압력손실은 약 9KPa이다. 증기발생기 후단에는 각 증기발생기로의 유량 배분을 균일하게 하기 위해 적절한 압력손실이 발생하는 오리피스(orifice)가 설치된다.

본 논문에서는 증기발생기의 유량편차를 개선하기 위해 기존 유동분배판(그림 2(a))을 1개의 환형 다공성 유동분배판(그림 2(b))으로 변경하고, 유량편차를 가능한 한 작게 할 수 있도록 다공성 유동분배판과 증기발생기 후단의 오리피스의 압력손실률을 조절하고자 한다. 본 연구와 관련된 기존 연구들은 저레이놀즈수 층류유동이거나, 압력손실계수를 실험상관식으로부터 구할 수 있는 분지관 관련 유동, 입구유동이 균일한 유동 등 해석적(analytical)으로 모델링이 가능한 유동에 관하여 것들과 형상의 영향을 직접 받는 유동에 대하여 실험적, 전산해석적 접근 것들이다[1~4]. 본 논문에 수행하고자 하는 유동은 입구유동의 수직방향 모멘트가 분지관의 유량분포에 영향을 주는 고레이놀즈수 난류유동으로 형상의 영향을 많이 받으므로 기존 연구들과 직접적인 관련이 없다. 본 논문에서는 전산해석적 방법으로 유동분포를 개선하기위해 설치되는 유동분배판과 오리피스에 관련된 설계인자들이 유량분포에 미치는 영향을 분석하여 설계개선(안)의 타당성을 조사하고자 한다.

2. 지배방정식 및 난류모델

2.1 지배방정식

원자로냉각재계통의 냉각재는 비압축성 유체로 2차원 연속방정식 및 운동량방정식은 아래와 같다.

연속방정식

$$div(\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$x \text{ 방향 : } \rho\frac{\partial u}{\partial t} + \rho\, div(u\mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\, div\, grad\,(u)$$

(2)

$$y \text{ 방향 : } \rho\frac{\partial v}{\partial t} + \rho\, div(v\mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\, div\, grad\,(v)$$

난류유동에서 운동량방정식(Navier-Stokes equation)의 각 성분을 평균성분과 변동성분으로 분해하여 재구성하면 레오놀즈 평균(Reynolds-averaged) 운동량방정식을 얻을 수 있다. 난류의 불규칙변동을 제외시키기 위해 속도 $\mathbf{u}$를 평균속도 $\mathbf{U}$와 그 주변의 속도 변동성분 $\mathbf{u}'$으로 분해하면 아래와 같으며 압력 $\mathbf{p}$ 에 대해서도 동일하게 적용한다.

$$\mathbf{U} = \frac{1}{t_1 - t_0}\int_{t_0}^{t_1}\mathbf{u}(t)\,dt \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{U} + \mathbf{u}' \quad (4)$$

식(4)를 식(1), (2)에 대입하고 변동성분 $\mathbf{u}'$의 시간평균이 0인 사실을 이용하면 식(1), (2)는 시간평균(time averaged) 방정식으로 표시할 수 있고 이를 2차원 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$div(\mathbf{U}) = 0 \quad (5)$$

$$x\text{방향: } \rho\frac{\partial U}{\partial t} + \rho\, div\,(U\mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu\, div\, grad\,(U) - \rho\left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y}\right)$$

(6)

$$y\text{방향: } \rho\frac{\partial V}{\partial t} + \rho\, div\,(V\mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu\, div\, grad\,(V) - \rho\left(\frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x}\right)$$

식(2)와 비교해 식(6)에는 새로운 항 $-\rho\,\overline{u_i'u_j'}$ 이 나타난다. 이 항은 난류에 의해 발생하는 난류응력으로서 레이놀즈응력이라도 하며 속도 변동성분에 의한 운동량수송의 변화량을 나타낸다.

2.2 RNG $k-\varepsilon$ 모델[5~8]

등방성 난류점성계수 가정을 이용하면 레이놀즈 응력항은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho\,\overline{u_i'u_j'} = \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} - \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (7)$$

RNG $k-\varepsilon$ 모델의 난류에너지 생성율(k) 수송방정식은 표준 $k-\epsilon$ 방정식과 동일하며, 난류에너지 소산율(ϵ) 수송방정식에는 표준 $k-\epsilon$ 방정식과는 다른 생성항($-\rho R$)이 추가된 형태이다. 2차원, 비압축성, 정상상태 유동에서 RNG $k-\varepsilon$ 모델의 k, ϵ 방정식은 다음과 같이 정의된다.

i 방향에 대한 k, ϵ 방정식

$$\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial^2 k}{\partial x_i^2} + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho\varepsilon \tag{8}$$

$$\rho U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_i^2} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \tag{9}$$

여기서

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \tag{10}$$

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{11}$$

차원해석에서 RNG $k-\epsilon$ 모델에서 난류점성계수(μ_t)는 표준 $k-\epsilon$ 모델과 동일하고 C_μ 값만 다소 다르나, 저 Reynolds 수 효과를 고려하기 위해 다음과 같은 형태로 난류 점성계수를 사용하기도 한다.

$$\mu_t = \mu\left[1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\mu}} \frac{k}{\sqrt{\varepsilon}}\right]^2 \tag{12}$$

RNG $k-\epsilon$ 모델에서는 R 항은 다음과 같이 처리된다.

$$R = C_\mu \rho \frac{\eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{13}$$

$$\eta = \sqrt{(2S_{ij} \cdot S_{ij})} \frac{k}{\varepsilon} \tag{14}$$

$$\beta = 0.012$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{C_2 - 1}{C_\mu (C_1 - 1)}}$$

2차원에서

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)$$

$$S_{ij} \cdot S_{ij} = \left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)\right]^2$$

RNG $k-\varepsilon$ 모델에서 각 계수는 다음과 같이 정의된다.

C_μ	C_1	C_2	α_k	α_ε
0.0845	1.42	1.68	1.39	1.39

RNG $k-\varepsilon$ 모델에서 R항은 변형율(rate of strain)을 나타내는 항이며, $\eta(=Sk/\epsilon)$는 난류와 평균병형율의 시간 척도비를 나타내고, $S^2(=2S_{ij}\cdot S_{ij})$는 변형율의 크기를 나타낸다. 표준 $k-\varepsilon$ 모델은 유선의 곡률로 인한 유동변형율의 영향을 잘 나타내지 못하며 주 유동방향 변형율은 난류에너지를 과도하게 생성시키므로 난류점성계수를 과도하게 예측한다. 과도하게 생성된 난류운동에너지는 대체로 대류유동에 의해 수동되어 전단류가 존재하는 유동영역에서 부정확한 난류확산과정을 예측하게 된다. RNG $k-\varepsilon$ 모델의 식(13)에서 η값과 η_0의 상대적인 크기를 살펴보면 η가 η_0에 비해 상대적으로 작은 값을 갖는 유동에서는 변형율항 R은 C_2값을 증가시키고 난류점성계수를 다소 증가시킨다. 그러나 η가 η_0에 비해 상대적으로 큰 값을 갖는 유동에서는 변형율항 R의 부호가 변하기 때문에 C_2값을 감소시키고 난류점성계수는 훨씬 더 감소하게 된다. C_2값의 감소는 난류운동에너지 수송방정식에서의 생성항과 난류에너지 소산율(ε) 방정식에서의 소산항을 감소시켜 상대적으로 작은 난류점성계수를 가지게 된다.

RNG $k-\varepsilon$ 모델의 수송방정식의 이러한 특성으로 인해 큰 전단유동이 일어나는 영역의 강한 비등방성을 잘 나타낼 수 있으므로 큰 박리유동과 비등방성을 갖는 큰 난류 척도 와동을 예측하는데 표준 $k-\varepsilon$ 모델에 비해 개선된 결과를 얻을 수 있다.

4. 결과분석

난류모델로 RNG $k-\epsilon$ 모델을 차분화도식으로 2차 상류도식을 격자계는 엇갈림(staggered) 격자계를 사용하고, MCP 유로를 2차원으로 모델링하여 설계변수에 대한 민감도를 분석을 수행하였다. 입구에서의 속도, k, ϵ 등은 참고문헌[18]의 계산결과를 활용하였다(그림 3). SMART -P의 주냉각재펌프와 증기발생기의 배치는 그림 1과 같이 1/4 대칭구조를 하고 있다. 3차원 구조의 MCP 후단 공통헤더로부터 증기발생기오리피스까지의 영역을 Euler Number($E=\rho v2/\Delta p$)를 이용하여 그림 4와 같이 2차원화하였다. SG와 MCP 사이의 공통헤더 형상은 그림 1과 같이 펌프를 기준으로 좌우측으로 6개의 증기발생기가 위치한다. 2개의 증기발생기 상단 중앙에 주냉각재펌프가 위치하므로 다공성 환형평판을 사용할 경우 타 증기발생기에 비해 하단의 증기발생기 4개가 펌프에서 분사되는 유동에 의해 직접적인 영향을 크게 받을 수 있다. 따라서 3차원 형상을 2차원화함에 따른 영향을 보완하기 위해 2차원 해석모형은 그림 4(a)와 (b) 같이 두 가지로 형태로 모델링하였다.

결과분석에 사용된 증기발생기간의 유량(Q_i)과 유량편차는 가독성 측면을 고려하여 다음과 같이 정의한다.

$$\theta_{diff}(i) = \frac{Q_i - Q_{ideal}}{Q_{ideal}} \times 100 \ [\%] \qquad (15)$$

$$\theta_{max} = |\theta_{diff\ max} - \theta_{diff\ min}| \ [\%]$$

$$Q_{ideal} = \frac{Q_{total}}{N_{SG}}$$

여기서 θ_{diff}는 각 증기발생기의 유량편차를 나타내며, $\theta_{\max}$는 최대유량편차로 유량편차가 가장 큰 증기발생기와 유량편차가 가장 작은 증기발생기간의 차를 나타낸다.

해석격자, 입구속도, 출구형상 등에 대한 영향을 조사하였다. 격자민감도 분석은 Case E3 중 (표 3) 유동분배판의 평균압력손실이 1.0 KPa 오리피스와 증기발생기(이하 오리피스라 함)의 압력손실이 10 KPa인 경우를 대상으로 수행하였다. 격자에 대한 민감도를 조사한 결과 증기발생기간의 유량편차는 전 경우에 대해 해석결과가 크게 변하지 않는 것으로 조사되었으며(표 2), 증기발생기 공통헤더 유동분배판 전단에서 미세한 유동차가 A1, A2와 A3에서 발생하였으나, A3와 A4에서는 거의 동일한 유동이 관측되었다(그림 6). 해석 Case에 따른 유동변화를 고려하여 406×224 격자를 선정하였다.

입구유동이 해석결과에 미치는 영향을 조사하기 위해 격자민감도 분석에서 선정된 격자를 사용하고, 입구에 대하여 그림 3과 같이 두 가지 유동조건으로 가정하고, 유동분배판의 평균압력손실이 0.1 KPa 오리피스의 압력손실이 10 KPa인 경우를 대상으로 해석을 수행하였다.

출구형상이 해석결과에 미치는 영향을 조사하기 위해 출구형상을 그림 5와 같이 4가지 형상으로 모델링하고, 입구유동은 case B1의 유동을 사용하고, 유동분배판의 평균압력손실이 0.1 KPa 오리피스와 증기발생기의 압력손실이 10 KPa인 경우를 대상으로 해석을 수행하였다. (표 2)

표 1. 격자민감도, 입구유동, 출구영향 조사 해석Case

구분	Case	유동분배판 ΔP [KPa]	SG+Orifice ΔP [KPa]	해석 모형	비고
격자민감도	A1	1.0	10	A	271×169
	A2	1.0	10	A	406×169
	A3	1.0	10	A	406×224
	A4	1.0	10	A	406×317
입구유동	B1	0.1	10	A	
	B2	0.1	10	A	
출구영향	C1	0.1	10	A	
	C2	0.1	10	A	
	C3	0.1	10	A	
	C4	0.1	10	A	

표 2. 격자민감도, 입구유동, 출구영향 해석결과

구분	Case	Q_i / Q_{ideal}[%]			해석 모형	비고
		SG1	SG2	SG3		
격자민감도	A1	99.989	100.007	100.004	A	271×169
	A2	99.988	100.006	100.006	A	406×169
	A3	99.989	100.007	100.004	A	406×224
	A4	99.989	100.006	100.005	A	406×317
입구유동	B1	100.10	99.83	100.07	A	
	B2	100.11	99.82	100.06	A	
출구영향	C1	100.09	99.84	100.07	A*	
	C2	100.08	99.87	100.05	A*	
	C3	100.10	99.83	100.07	A*	
	C4	100.10	99.84	100.06	A*	

입출구 영향에 대한 해석결과 입구의 유속, k, ϵ 분포의 변화에 따른 영향은 크지 않으며, 출구유로면적은 case C2 이상의 면적에서는 해석결과에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 따라서 입구유동은 B1을 선정하였으며, 출구형상은 C3을 선정하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

격자 민감도 및 입구유동, 출구형상에 따른 영향분석을 통해 선정된 모델 (해석격자 406×224, 입구 유동조건 Case B1, 출구형상 Case C3)을 이용하여 설계변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 설계변수 민감도 분석을 위해 선정된 Case는 표 3과 같다.

기존 MCP와 증기발생기 사이의 공통헤더 설계 형상은 그림 1과 같이 주냉각재펌프 하단에 공통헤더 유로면적의 1/12에 해당하는 유로에 유동분배판을 펌프 당 1개 씩 총 2개가 설치된 형상이다. 본 논문에서는 이 공통헤더 형상을 Euler number를 이용하여 그림 7와 같이 2차원으로 모델링하고 오리피스의 압력손실을 15KPa, 20KPa 두 가지로 가정하고, 펌프의 유속을 고속 및 저속(표 3 Reynolds 수 참조) 두 가지로 가정하여 해석을 수행하였다.

기존설계에 대한 해석결과(case D1~D4) 각 증기발생기간의 최대유량편차(θ_{max})는 오리피스의 평균압력손실이 15 KPa 일 때 약 3.5 %, 20 KPa 일 때 약 2.8%로 계산되었다. 이 결과에서 알 수 있듯이 오리피스의 압력손실은 25% 증가하였으나 유동분포 개선효과는 약 0.7%로서 매우 작다. 따라서 현재의 설계형상을 유지하면서 증기발생기간의 최대유량편차(θ_{max})를 줄이기 위해서는 압력손실이 매우 큰 오리피스를 사용해야 할 것으로 판단된다. 본 해석은 구조물에 대한 영향을 고려하지 않은 것으로 구조물에 의해 유동이 크게 영향을 받는 경우에는 증기발생기간의 최대유량편차(θ_{max})가 더 크게 발생할 수 있다.

표 3. 설계변수 해석 Case

	입구Reynolds수 ($\rho vH/\mu$)	Case	유동분배판 ΔP [KPa]	SG+Orifice ΔP [KPa]	해석모형
기존설계	2.04E6	D1	0	15	A**
	1.02E6	D2	0	15	A**
	2.04E6	D3	0	20	A**
	1.02E6	D4	0	20	A**
개선(안)	2.04E6	E1	5 -0.01	10~14.99	A
	2.04E6	E2	5 -0.01	10~14.99	B
	2.04E6	E3	5 -0.01	10	A
	2.04E6	E4	5 -0.01	10	B
	1.02E6	E5	5 -0.01	10	A

표 4. 증기발생기 유량 및 최대유량편차(기존설계)

구분	Case	Q_i/Q_{ideal}[%]			$\theta_{diff\ max}$	해석 모형
		SG1	SG2	SG3		
격자민감도	D1	99.82	98.68	101.50	2.82	A
	D2	99.84	98.68	101.48	2.80	A
	D3	99.75	98.35	101.90	3.55	A
	D4	99.76	98.35	101.89	3.53	A

Case E는 설계개선(안)으로 제시된 유동분배판을 다공판(perforated plates) 형태로 공통헤더 전체에 환형으로 설치하는 방안에 대한 해석이다.

Case E1과 E2는 유동분배판과 오리피스와 증기발생기의 총 압력손실률을 15KPa로 가정하고 유동분배판의 압력손실률을 0.01KPa에서부터 5KPa까지 증가시키고 상대적으로 오리피스의 압력손실률을 14.99 KPa에서부터 10KPa까지 감소시키면서 해석을 수행한 경우다. 그림 8에는 Case E1, E2의 최대유량편차(θ_{max})를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 오리피스와 유동분배판의 총압력손실이 동일한 경우에도 유동분배판의 압력손실률이 증가할수록 각 증기발생기의 유량편차는 급격히 감소하는 경향을 보였다.

Case E1에서는 유동분배판의 압력손실이 약 50Pa이상에서는 유량편차가 0.5% 이하로 감소하였다. 유동분배판의 압력손실이 10 Pa~1 KPa인 영역에서는 펌프에 수직하는 위치하는 증기발생기 사이의 공간 영향으로 미세한 유동변화가 발생하여 유량편차가 변동하고 있다(그림 12). 유동분배판의 압력손실이 1KPa 이상인 영역에서는 증기발생기 간의 유량편차가 매우 작아지는 것으로 계산되었다. Case E2에서 유동분배판의 압력손실이 약 200Pa이상에서는 유량편차가 0.5% 이하로 감소하였다. 이 경우는 증기발생기가 펌프 수직하단에 위치하므로 Case E1에서 발생하는 증기발생기 사이의 공간 영향에 의한 유동변화는 발생하지 않았다. Case E2에서 유동분배판의 압력손실이 1KPa 이상인 영역에서는 Case E1의 경우와 유사하게 증기발생기 간의 유량편차가 매우 작아지는 경향을 보였다.

Case E3과 E4는 오리피스와 증기발생기의 압력손실률을 10KPa로 고정하고 유동분배판의 압력손실률을 5KPa로부터 0.01KPa까지 감소시키며 해석을 수행한 경우이다. 그림 9에는 Case E3, E4의 최대유량편차(θ_{max})를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 Case E3, E4의 경우에도 Case E1, E2의 경우와 동일하게 유동분배판의 압력손실률이 증가할수록 각 증기발생기의 유량편차는 급격히 감소하는 경향을 보였다.

Case E3에서는 유동분배판의 압력손실이 약 75Pa 이상에서는 유량편차가 0.5% 이하로 감소하였다. 유동분배판의 압력손실이 10 Pa~1 KPa인 영역에서는 Case E1과 동일한 현상을 보였다. 또한 유동분배판의 압력손실이 1KPa 이상인 영역에서는 Case E1, E2와 유사하게 증기발생기 간의 유량편차가 무시할 수 있을 정도로 작아지는 경향을 보였다. Case E4에서 유동분배판의 압력손실이 약 300Pa이상에서는 유량편차가 0.5% 이하로 감소하였다. 이 경우는 증기발생기가 펌프 수직하단에 위치하므로 Case E2와 동일하게 Case E1, E3에서 발생하는 증기발생기 사이 공간 영향에 의한 유동변화는 발생하지 않았다. Case E4에서 유동분배판의 압력손실이 1KPa 이상인 영역에서는 Case E1~E3의 경우와 유사하게 증기발생기 간의 유량편차가 무시할 수 있을 정도로 작아지는 경향을 보였다.

유량편차가 0.5% 이하로 감소할 때는 Case E1에서 유동분배판 압력손실 약 50Pa 오리피스압력손실 14.95KPa, Case E2에서 유동분배판 압력손실 약 200Pa 오리피스압력손실 14.80KPa, Case E3에서 유동분배판 압력손실 약 75Pa 오리피스압력손실 10KPa, Case E4에서 유동분배판 압력손실 약 300Pa 오리피스압력손실 10KPa일 때이다. 이때 공통헤더와 오리피스의 압력손실을 합친 총 압력손실의 차이는 Case E1과 Case E3이 4.925 KPa, Case E2와 Case E4가 4.7 KPa로서 오리피스의 압력손실이 수 KPa 감소하였으나 공통헤더의 압력손실을 수십~수백 Pa 증

가함으로써 유사한 효과를 내고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 오리피스에 비해 유동분배판의 압력손실이 유동편차 개선에 더욱 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그림 10(a), (b)에는 오리피스의 압력손실이 변하는 Case E1, E2와 압력손실이 일정한 Case E3, E4의 경우에 대한 최대유량편차 비교하였다. 유동분배판의 압력손실이 작은 영역에서는 오리피스의 영향이 크나 유동분배판의 압력손실이 증가함에 따라 오리피스의 영향이 급격히 감소함을 알 수 있다.

그림 11에는 입구 Reynolds수 변화가 최대유량편차에 미치는 영향을 비교하였다. 유동분배판의 압력손실이 작은 영역에서는 입구유동의 변화에 따라 유동편차가 다소 영향을 받으나 유동분배판의 압력손실이 약 50Pa 이상에서는 입구유동의 영향이 급격히 감소함을 알 수 있다.

6. 결 론

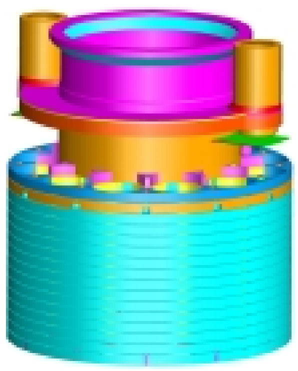
RNG $k-\epsilon$ 모델, 2차 상류도식, 엇갈림(staggered)격자, SIMPLE 알고리즘 등을 포함한 정렬격자에 대한 2차원 전산유체해석코드를 개발하여 실험과 비교 검증하였다. 개발된 코드를 이용하여 SMART-P의 증기발생기 간의 유량편차를 개선하기 위해서 MCP 후단 방출유로와 증기발생기 사이의 유동분배판에 대한 전산유체해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 기존 공통헤더설계(1/12면적 유동분배판)에 대한 2차원 해석결과(case D1~D4) 각 증기발생기 간의 최대유량편차(θ_{max})는 오리피스의 평균압력손실이 15 KPa일 때 약 3.5 %, 20 KPa일 때 약 2.8%로 계산되었다. 단, 본 해석은 증기발생기 급수 및 증기관 등의 구조물에 대한 영향을 고려하지 않은 것으로 구조물에 의해 유동이 크게 영향을 받는 경우나 3차원 유동효과가 클 경우에는 유량편차가 더 크게 발생할 수 있다.

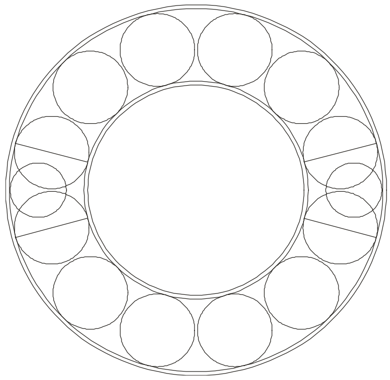
나. 개선(안)의 공통헤더설계(전체 다공성 환형 유동분배판)에 대한 설계민감도 분석결과 분석된 전 경우에 대해서 유동분배판의 압력손실이 약 300Pa 이상 일 때에는 최대유량편차가 0.5% 이하로 감소하였으며, 1KPa 이상 일 때에는 유량편차가 무시할 수 있을 정도로 작아지는 경향을 보였다.

다. 전산해석결과는 설계개선(안)의 유동분배판의 압력손실을 보수적으로 1KPa로 설정하는 경우에 증기발생기 세관과 오리피스의 압력손실을 10KPa 로 감소시켜도 최대유량편차는 기존설계 약 3.5~2.8% 에서 개선(안) 약 0.1% 이하로 큰 유량편차 개선효과가 있으며, 개선(안)의 압력손실은 상대적으로 15KPa에서 11KPa로 약 4KPa을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

라. 유동분배판에 대한 설계민감도 분석결과를 종합하면 오리피스의 압력손실에 비해 유동분배판의 압력손실이 유동편차 개선에 더욱 큰 영향을 미치며, MCP와 증기발생기 사이의 유동분배판은 기존 설계보다 공통헤더 전체에 환형 다공성 유동분배판을 설치하는 것이 유량편차의 개선효과가 뛰어난 것으로 평가되었다.



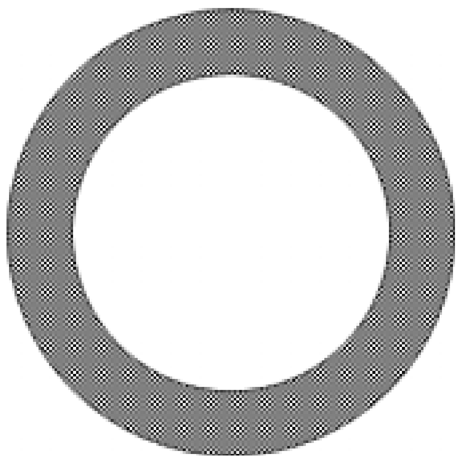
MCP/SG header



MCP/SG header section

Fig. 1. SMART-P schematic diagram

(a) Existing flow distributor



(b) Improved flow distributor

Fig. 2. Flow Distributor

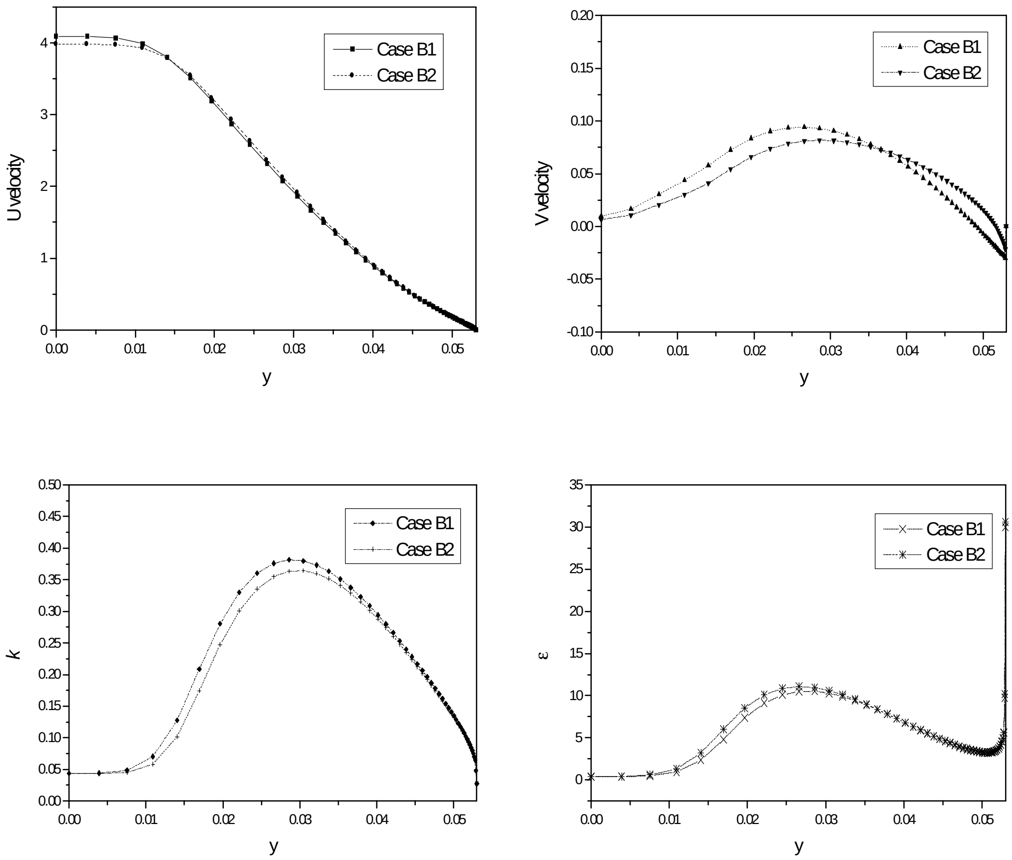
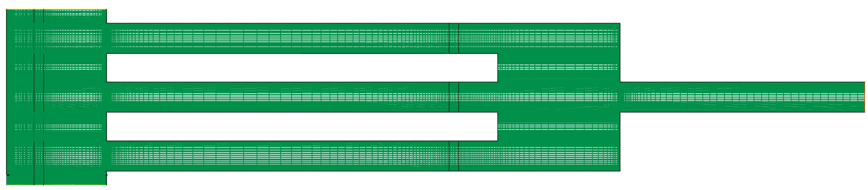
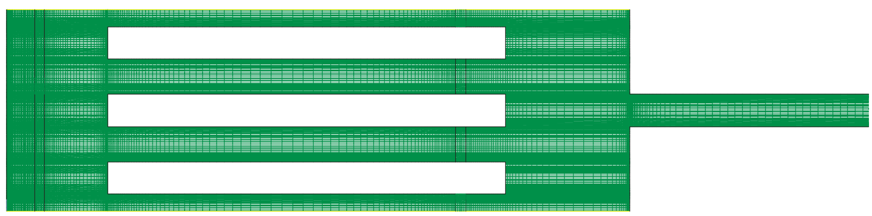


Fig. 3. Inlet U, V, k, ϵ Profile

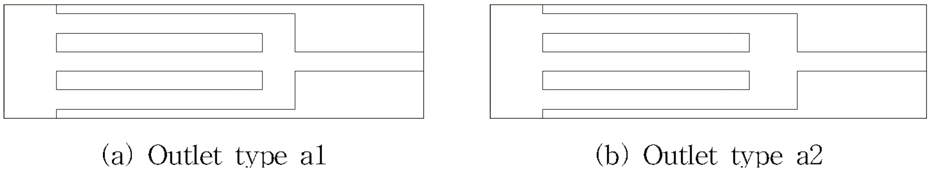


(a) Type A



(b) Type B

Fig. 4. MCP 2D analysis model



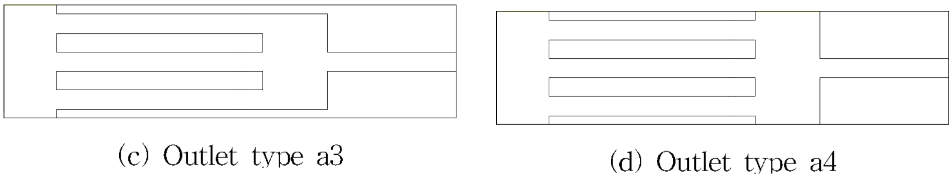


Fig. 5. Outlet region shape

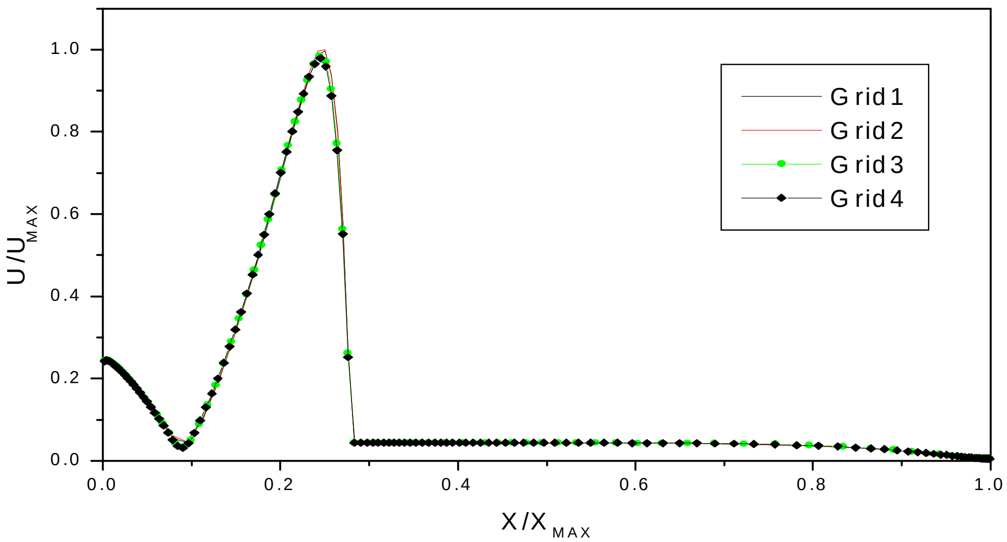


Fig. 6. Velocity of header section between SG1 and SG2(Grid Sensitivity)

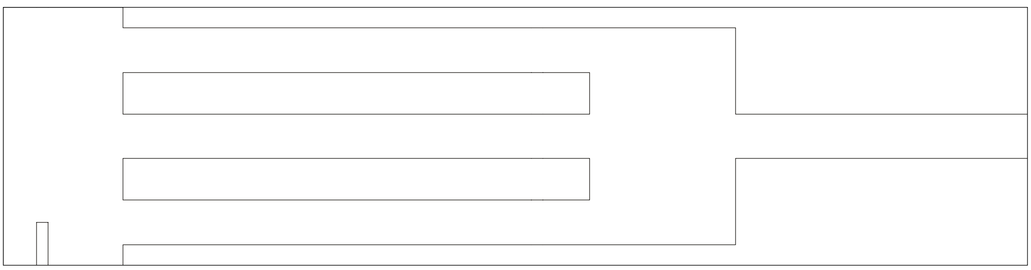


Fig. 7. 2D analysis model of the existing MCP header

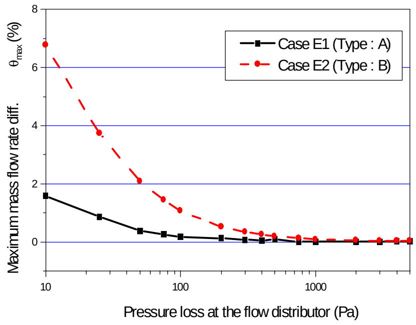


Fig. 8. Maximum flow rate difference(θ_{max})

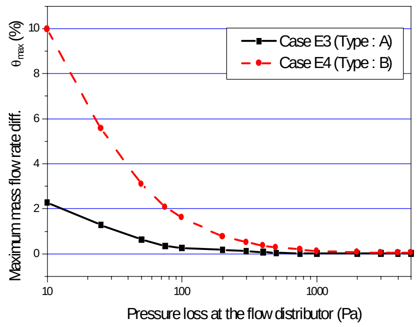
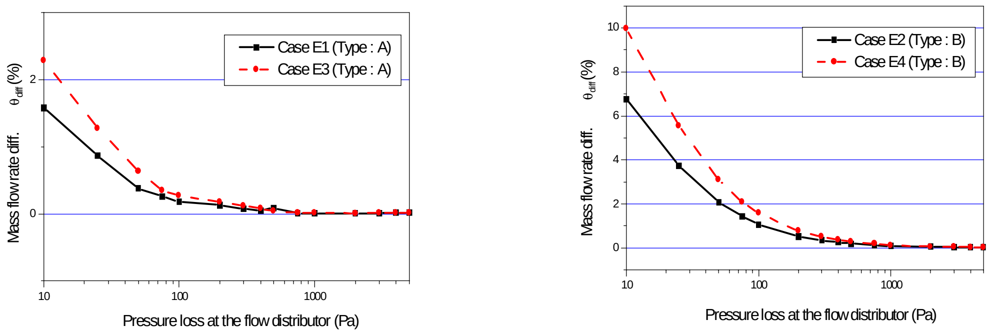


Fig. 9. Maximum flow rate difference (θ_{max})



(a) Type A (b) Type B

Fig. 10. Variation with the orifice ΔP of maximum flow rate diff.(θ_{max})

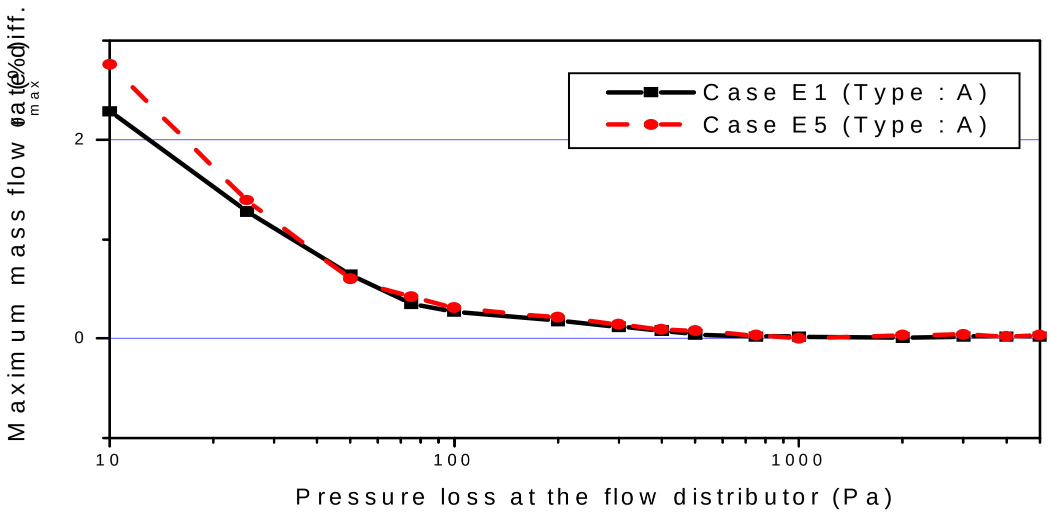


Fig. 11. Variation with inlet Reynolds no. of maximum flow rate diff. (θ_{max})

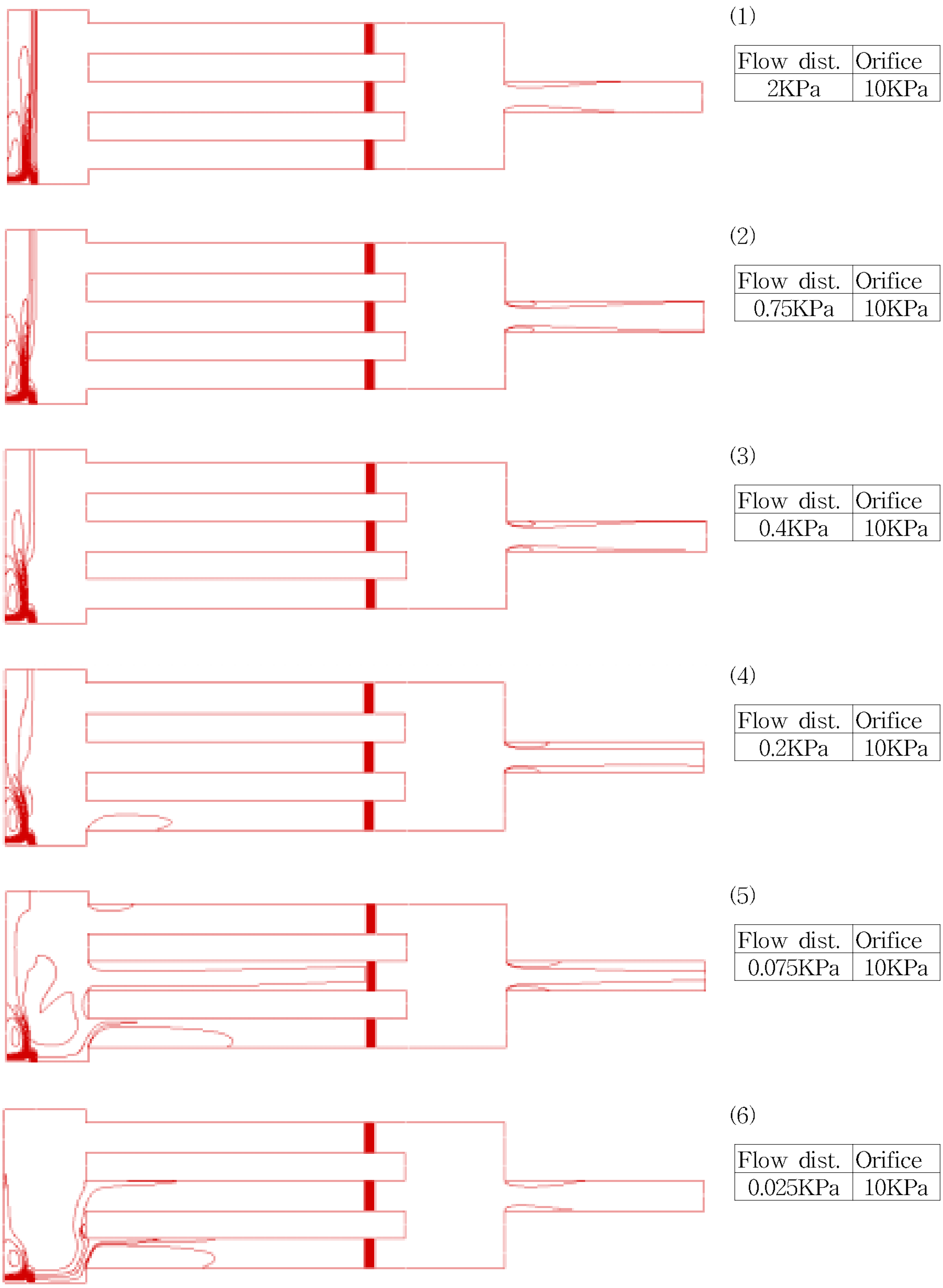


Fig. 12. Total pressure distribution contours of case E3

Reference

[1] 노병준, 박종호, "기본유체역학", 동명사, 1998

[2] Y. Nakamura, W. Jia and M. Yasuhara, "Incompressible flow through multiple passages", Numerical Heat Transfer, Vol. 16, pages 451-465. 1989

[3] Choi, S. H., Shin, S. and Cho. Y. I., "The effect of area ratio on the flow distribution in liquid cooling module manifolds for electronic packaging", Int. Comm Heat Mass Transfer, Vol. 20, pages 221-234, 1993

[4] S.V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation, 1980

[5] V. Yakhot and S.A. Orszag, "Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory", Journal of Scientific Computing, 1(1), 3-51, 1986

[6] V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski and C. G. Speziale, "Developments of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique", Physics of Fluids A, 4(7), 1510-1520, 1992

[7] S A Orszag, V Yakhot, W S Flannery and F Boysan, "Renormalization Group modeling and turbulence simulations", Near Wall Turbulent Flows, 1993

[8] S. F. Lien and M. A. Leschziner, "Assesment of Turbulent Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure", Computers and Fluids, 23(8):983-1004, 1994

[9] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method", Longman Press, February, 1996

[10] C.A.J. Fletcher "Computational Techniques for Fluid Dynamics", Springer-Verlag, 1988

[11] Jean Mathieu and Julian Scott, "An Introduction to Turbulent Flow", Cambridge Univ. Press, 2000.

[12] David C. Wilcox "Turbulence modeling for CFD", DCW Industries., 1998

[13] Chuichi Arakawa, "Computational Fluid Dynamics for Engineering(수치유체공학)", 명현국 번한, 한미, 1993

[14] 박주엽, 인왕기, 전태현, 오동석, 정연호, "이차원 직교좌표계에서 다양한 난류모델 및 수치 차분구조를 포함하는 유체유동해석 프로그램 TFC2D 개발", KAERI/TR-1448/200, 2002.2

[15] Fluent Inc., "FLUENT 5 User's Guide", July, 1998

[16] J. Kim, S. J. Kline and J. P. Johnston, "Investigation of a Reattachment Turbulent Shear Layer: Flow over a Backward-Facing Step", Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, 102, 302-308, 1980

[17] G.G. Speziale and Tuan ngo, "Numerical solution of turbulent flow past a backward facing step using a nonlinear $k-\epsilon$ model", International Journal of Engineering Science, Volume 26, Issue 10, Pages 1099-1112, 1988

[18] 김영인, 이 준, 황영동, 이두정, 장문희,"SMART 일차계통 곡면유로의 유동장 해석", 2001 Fluent User's Group Meeting, 2001