2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

환형 강수부의 속도장에 대한 FLUENT 와 MARS 3-D 비교 계산

A Comparison Calculation of FLUENT and MARS 3-D for the Velocity Field in the Downcomer Annulus

권태순, 배규환, 송 철화

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동150

요 약

MARS 3-D 와 FLUENT 3-D 코드결과 사이의 속도 상사성에 대한 검증을 위하여 APR1400 의 환형 강수부에서 속도장을 비교 계산하였다. 수정선형축소방법론의 검증을 위하여 FLUENT 코드를 이용한 3 차원 계산을 수행하였다. APR1400 의 대형냉각재 상실사고 재관수기간 동안의 MARS 3-D 강수부 계산을 위해서는 증기 주입 조건을 고려하였고, FLUENT 모의를 위해서는 공기의 주입 조건을 고려하였다. 수정선형축소 모델은 강수부의 유동분포를 모의하기 위해서는 1/4.93 길이 축소비를 갖는다. 유동분포에 대한 척도 효과를 보기 위하여, 수정선형 척도법으로 축소된 모델을 위한 속도는 1/1 로부터 1/4.29 까지 변화시켰다. MARS 와 FLUENT 결과는 비슷한 유동장을 갖는 것을 알았다.

Abstract

A comparison calculation of velocity fields for the downcomer annulus of APR1400 has been performed for a conformation of the velocity similarity between MARS 3-D and FLUENT 3-D code results. The air discharge condition is considered to simulate a steam discharge condition during the late reflood phase of the APR1400 LBLOCA for the FLUENT simulation, while the steam discharge condition is considered for the MARS 3-D calculation. The downcomer model is a 1/4.93 length scaled model by the modified linear scaling law. To study the scale effects on the flow distribution, the velocity was varied from 1/1 to 1/4.29 for the model that is scaled down by the modified linear scaling law. It is found that the MARS and FLUENT results have the similar flow fields.

1. 서론

APR1400 의 저온관 대형 냉각재 상실 사고시의 후기 재관수 기간 동안에 주입되는 고압안전주입수와 강수부에 축적된 냉각수는 저온관을 통해 강수부로 주입되는 과열증기에 의해 다차원적 거동을 보인다(윤병조, 2000, 권태순, 2000). 이러한 강수부 열수력 거동

은 단순화된 강수부 모델을 적용하여 해석되며 해석모델은 평균속도에 기초하고 있다. 따라서, 다루고자 하는 계산 체적내의 속도장이 균일할수록 평균 강수부 모델의 계산 정확도는 증가한다. 그러나, 강수부내 계산 체적의 평균속도장의 속도 균일성이 보장되지 않고, 속도의 크기 및 방향 등이 다양한 경우 평균속도에 근거한 계산의 오차는 증가하게 된다. 최근의 다차원 분석코드는 강수부 유동을 보다 세밀하게 모델하여 국부적 속도 분포 등을 모의하도록 모의되고 있다(김영인,1999, 정법동, 1999). 이에 따라, 후기 재관수 기간 동안 강수부 증기 유동장의 특성에 대한 이해의 필요성이 증대되고 있다.

본 연구는, 다차원적 강수부 증기유동장의 속도 특성과, 이를 수정 선형 척도법에 따라 축소 모의시 강수부 속도장의 상사성 유무를 검증하는 목적으로 수행하였다. 전산해석을 위하여 FLUENT 코드를 이용하였으며, APR1400 의 1:1 원형에 대한 속도장 분석 계산을 수행한 결과와 선형축소비 1/5 환형모델에 대해 축소된 속도를 다양하게 변화시켜 상호 무차원 속도장의 특성을 비교하였다. 강수부내의 다차원적 유동 특성인 Impinging Wall Jet 특성과, 강수부의 횡 방향 속도 및 수직방향 속도 특성을 비교하였다. 이 밖에도 국부적인 유동 형태와 다차원적 강수부의 유동 특성을 자세하게 관찰하였다.

2. 계산방법 및 조건

2.1 계산모델

FLUENT 계산에 적용된 참조 유동조건은 TRAC 코드를 이용한 APR1400 의 저온관 양단순시 파단사고(Coldleg Double Ended Guillotine Break)의 후기 재관수 기간에 대한 계산 결과에 근거하여 결정하였다. 비상노심냉각수 rk 주입되지 않는 상황에서 3 개의 저온관을 통해 과열증기가 강수부로 주입될 때 강수부의 과열증기 유동장을 계산 대상으로 하였다. 즉, 강수부의 벽면 열전달, 증기의 응축, 비상노심 냉각수에 의한 증기 응축이 없는 과열 증기 속도장을 대상으로 한 3 차원 계산이다. APR1400 의 기준 증기 유동장은 강수부의 증기압이 180 kPa 이고 과열증기의 온도는 197^{o}C 이다. APR1400 의 3 차원 유동장 해석은 실제 원자로의 강수부를 대상으로 모사하였으며, 길이 축소비가 1:1 인 환형 강수부의 기하학적 모델에 APR1400 과 동일한 증기온도, 압력을 해석기준으로 하였다. 1/5 수정선형 축소 모델(Modified Linear Scaled Model)은 길이 축소비가 1/4.93 인 형상에 유동 조건은 수정선형 축소 비가 적용되었다. 주입 속도는 1/1, 1/2.2(=$1/\sqrt{4.93}$), 1/2.918, 1/4.299 등의 축소비를 적용하여 상사성 보존 유무를 검증하였다. 축소 모델에 적용된 기하학적 형상과 유동조건에 관한 척도비는 표 1 에 나타내었으며, APR1400 의 1:1 원형 모델과 축소모델의 간략한 기하학적 형상과 치수는 그림 1 에 나타내었다. 각 단면에서의 비교 영역은 표 2 에 정리하였다.

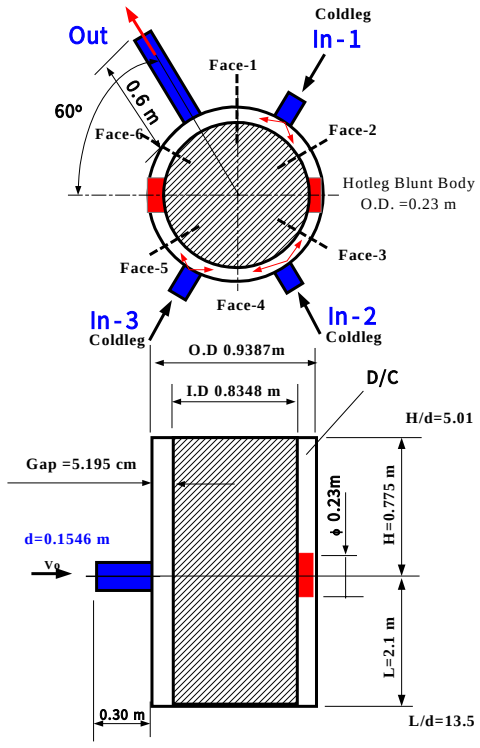
표 1 주요 척도비

Parameter	Scale	Scale Ratio*
Length	L	1/4.93
Area	L^2	1/24.3
Velocity	$L^{1/2}$	1/2.2
Flow rate	$L^{5/2}$	1/54
Pressure	*1*	1
Temperature	*1*	1

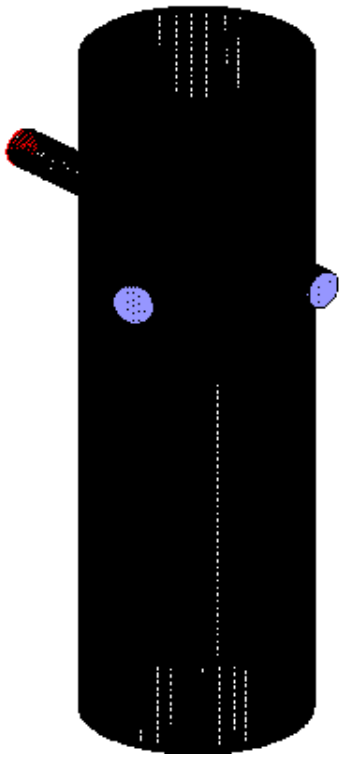
*: 윤 병조외, 2001

표 2 MARS Channel 과 FLUENT Face 관계

Relative Angle	FLUENT	MARS	Remark
0 도	Broken Coldleg	Channel 12 (Gap-11-12)	
30 도	Face-1	Gap-13 (Chan13-14)	
90 도	Face-2	Gap 16 (Chan 16-17)	
150 도	Face-3	Gap 19 (Chan 19-20)	
-150 도	Face-4	Gap-4 (Chan22-5)	
-90 도	Face-5	Gap-7 (Chan7-8)	
-30	Face-6	Gap-10 (Chan10-11)	



(a) 1/5 선형축소 계산 형상



(b) FLUENT Code 용 Mesh System

그림. 1 APR1400 및 1/5 수정 선형 축소 모델의 기하학적 형상

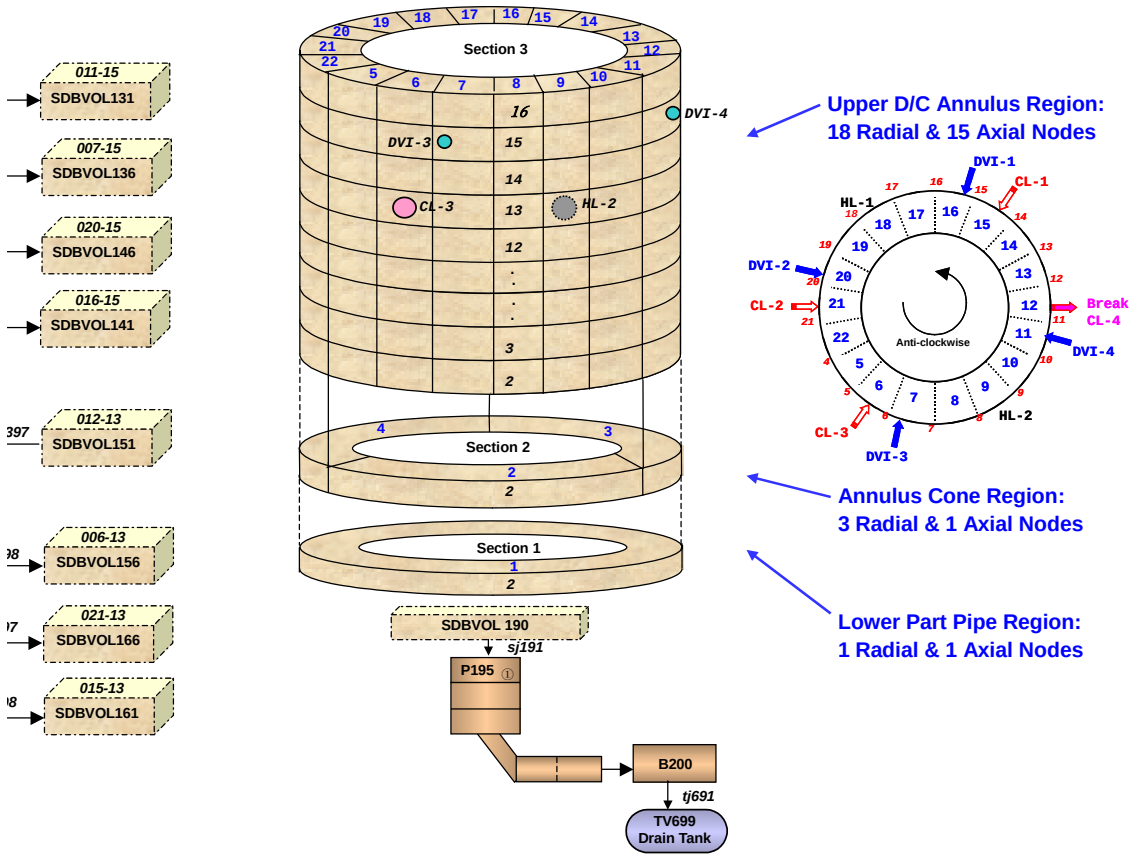


그림 2 MARS Nodalization

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 DVI 내의 유동특성을 해석하기 위해 3 차원 유한체적법을 사용하는 상용 전산유체 코드인 FLUENT Version 5.5 를 사용하였다. 격자는 Structured Grid 를 사용하였으며, 난류유동을 고려하기 위하여 재순환 유동 및 급격한 유동단면적의 변화가 일어나는 난류유동 특성을 비교적 타당하게 예측할 수 있는 것으로 알려진 Standard k-ε모델을 사용하였다(인왕기,1999, 김영인, 1999). 강수부의 증기 압력이 180 kPa 이고, 주입 증기 온도가 197 ℃ 인 과열 증기 유동장을 공기에 의한 유동장으로 대체 모의하였다. 따라서, 계산 체적내에서의 상변화, 에너지 전달 및 부력항 등은 고려하지 않았다. 이때 필요한 동적 상사성이 보장되도록 증기 속도장과 공기 속도장의 Reynolds Number 를 동일하게 보존하였다. 강수부 내의 유동은 정상상태 난류유동으로 가정하였으며 이의 계산을 위하여 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지 방정식 그리고 난류운동에너지 소산율 방정식을 사용하였다. 각각의 지배 방정식은 아래와 같다. 정상상태의 지배방정식은 좌표계에

관계없이 다음과 같이 식(1)과 식(2)로 기술된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho V) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla \bullet (\rho VV) = -\nabla p + \nabla \bullet \bar{\tau} + \rho \bar{g} + \bar{F} \tag{2}$$

여기서, τ 는 응력텐서이고, 뉴턴유체의 경우 응력텐서는 속도와 압력으로부터 다음과 같이 기술된다.

$$\bar{\tau} = -(p + \frac{2}{3}\mu div\vec{V})\vec{I} + \mu D \tag{3}$$

여기서, μ 는 점성계수 I 는 단위텐서 D 는 변형율텐서를 각각 나타낸다.

난류운동에너지 방정식은 아래의 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right]\frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{4}$$

난류운동에너지 소산율 방정식은 아래의 식(5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right]\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{5}$$

식 (4)와 식 (5)에서 G_k 는 평균속도 구배에 의한 난류운동에너지의 발생을 나타내고, G_b 는 부력에 의한 난류운동에너지의 발생을 나타낸다. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ 와 $C_{3\varepsilon}$ 는 상수이다. σ_k 와 σ_ε 는 k 와 ε 의 Prandtl number 이다. S_k 와 S_ε 는 k 와 ε 방정식의 생성항이다. 난류점성계수 μ_t 는 k 와 ε 을 조합하여 아래와 같이 계산된다.

$$\mu_t = \rho C\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{7}$$

모델 상수 $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ, σ_k 와 σ_ε 는 다음과 같다.

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \tag{8}$$

수치계산 시 대류항의 차분기법으로는 DVI 내의 형상이 매우 복잡하므로, 고차의 도식을 사용하면 해의 수렴성이 좋지 않다. 때문에, 수렴해의 정확도는 다소 낮지만 안정적인 해의 수렴성을 보여주는 1 차 상류도식(First Order Upwind Scheme)을 사용하였다. 본 계산에서는 평균속도분포의 거동에 촛점이 맞추어져 있으므로 작은 크기의 에디 및 Secondary 거동은 관심의 대상이 아니다. 압력장을 얻기 위해서는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 방법을 사용하였다. 격자를 구성하는 좌표계는 경계밀착 좌표계(Body Fitted Coordinate System)를 사용하였다.

반복계산시의 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향이완

(Under-relaxation)을 도입하였다. 압력장과 난류량에 대해서는 선형이완(Linear Relaxation)방법을 적용하여 이완계수로서 각각 0.3 과 0.8 을 사용하였으며, 속도성분들에 대해서는 0.7 의 값을 부여하였다. 방정식을 계산하는 과정에서 해의 수렴은 잉여값이 10^{-3} 이하이면 수렴한 것으로 간주하였다.

2.3 경계 및 계산조건

해석은 모두 5 가지에 대해 이루어졌다. APR1400 1:1 모델에 대해서는 저온관 공기주입 속도가 39.80m/s 인 경우가 계산의 기준이 되는 주입속도이다. 선형축소모델에 대해서는 원형 모델의 유입속도 87.56 m/s, 39.8 m/s, 30.0m/s, 그리고 20.0 m/s 에 표 1 에 나타낸 축소비를 적용한 39.8 m/s, 18.09 m/s, 13.64 m/s, 그리고 9.09 m/s 에 대하여 계산을 수행하였다.

표 3 저온관에서의 주입 속도비

CASE	**Geometry**	**Inflow Velocity before Scale**	**Scaled** Velocity
APR1400(Reference)	**APR1400**	**39.80m/s**	**39.80m/s**
ML_Model_1809	**ML_Model**	**39.80m/s**	**18.09m/s**

노즐 입구에서의 주입속도분포는 노즐 단면의 각 지점에서 균일하게 유입된다고 설정하였다. 각 계산에서 D/C 에서의 절대압력이 180 kPa 이 되도록 출구 압력을 설정하였다. 벽면에서는 No slip 조건을 적용하였고, 벽면을 통한 열전달은 고려하지 않았다. 계산에 사용된 격자는 전체적으로 육면체격자를 사용하였으며, APR1400 과 수정형 선형 척도법의 형상을 위해 사용 되어진 강수부는 반경방향으로 15 개의 셀로 나눴다.

3. 결과 및 토의

3.1 압력분포

APR1400 에 대한 1/1 모델의 주입노즐 위치에 따른 각 지점에서의 압력 변화를 살펴보았다. 표 4 에 각 주입 노즐 위치에 따라 압력을 정량화하였다. 각 저온관에서의 압력과 강수부에서의 압력 조건이 비교적 초기조건과 잘 일치하고 있다.

표 4 각 노즐에서의 Pressure 비교

(압력단위:Pa)

CASE	Geometry	Pressure at Inlet 2 (Pa)	Outlet Pressure (Broken Coldleg) (Pa)
MARS 3D	**APR1400**	**180,000**	**179,674**
FLUENT 3D	**ML_Model**	**180,096**	**180,066**

3.5 속도분포 및 상사성

FLUENT 에서 계산된 각 셀의 횡 방향 속도는 반경 방향으로 투사시켰다. 각 Face 에서의 횡방향 속도 성분을 DVI 주입 노즐의 속도, V_o, 로 무차원화시켰다. 각 좌표 축은 식(9)와 같이 무차원화시켰다.

$$y^* = \frac{y}{d_{inlet,nozzle}} \text{ ,and } \quad U^* = \frac{u}{V_{inlet,nozzle}} \qquad (9)$$

그림 3 의 (a)는 저온관 중심축의 고도로 부터 y/d=(+) 2 인 지점에서의 무차원 수직방향 속도 성분을 나타내며, 그림 3 의 (b)는 y/d=(-)2 인 지점에서의 무차원 수직 속도 성분을 각각 비교한 그림이다. 축방향 속도 성분을 실린더 바깥쪽에서 실린더 벽면으로 투영시킨 무차원 속도분포를 나타내었다. FLUENT 는 반경방향의 각 셀에서의 횡방향 속도를 모두 나타내고, MARS 는 각 체널에서의 속도로서 반경 방향을 1 개의 셀로 모의하므로 평균 속도의 의미를 내포한다. 그림에서 보이듯이 FLUENT 의 3 차원 계산 값과 MARS 의 계산 속도값이 비교적 잘 일치하고 있다. FLUENT 계산에서는 Inlet 3 와 Hotleg Blunt Body 가 존재하는 영역에서의 속도장은 반경방향으로 변화가 심하나, 이러한 속도장을 평균적으로 MARS 가 잘 예측하고 있다. 파단면으로부터 $\pm$ 120^O 인 좌우 두 지역에서의 속도 불일치도가 증가하고 있다. 파단면으로부터 $\pm$ 180^O 의 대칭선상에 위치한 Inlet 2 의 제트가 상하 축으로 발달하는 특성을 잘 보여 주고 있다.

y^* (y/d_i)= (+)2 에서의 무차원화된 수직 속도가 V^* =0.5 정도로써 최대 수직제트의 크기가 주입 노즐 속도의 50 % 정도이다. 이에 비해 다른 노즐에서의 수직 방향 속도는 크지 않으며, 파단 노즐 근처에서는 하향 속도가 U^*=0.6 정도로 매우 큼을 알 수 있다. 수직속도 성분에 대한 1/5 수정선형 축소 모델의 속도 상사성에 대한 두 코드의 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

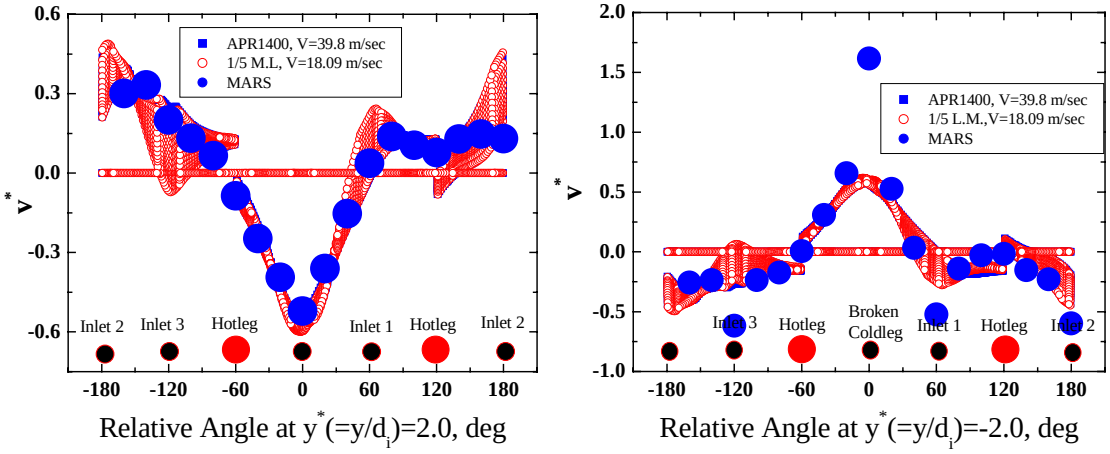
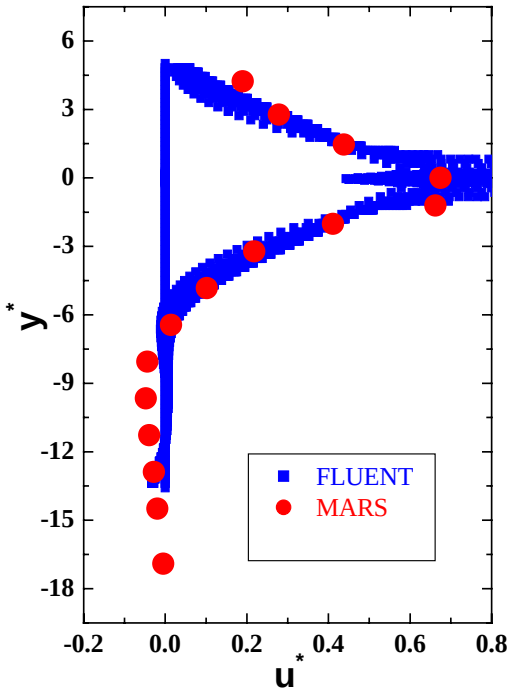
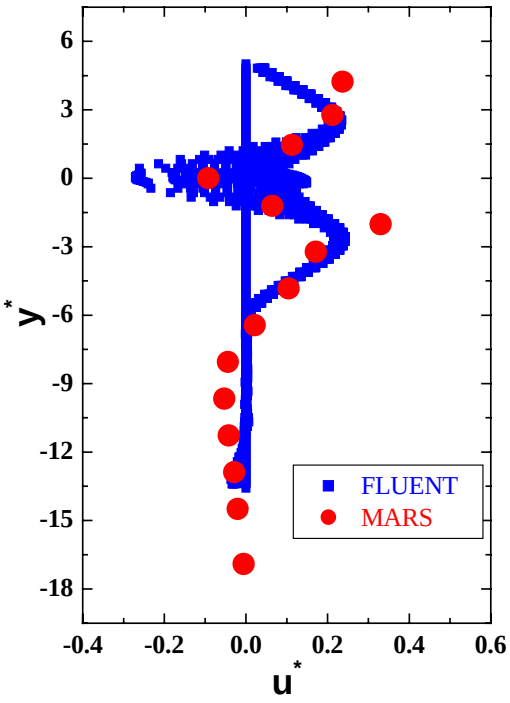


그림 3 APR1400 과 1/5 수정선형축소 모델의 축 방향 속도분포 비교

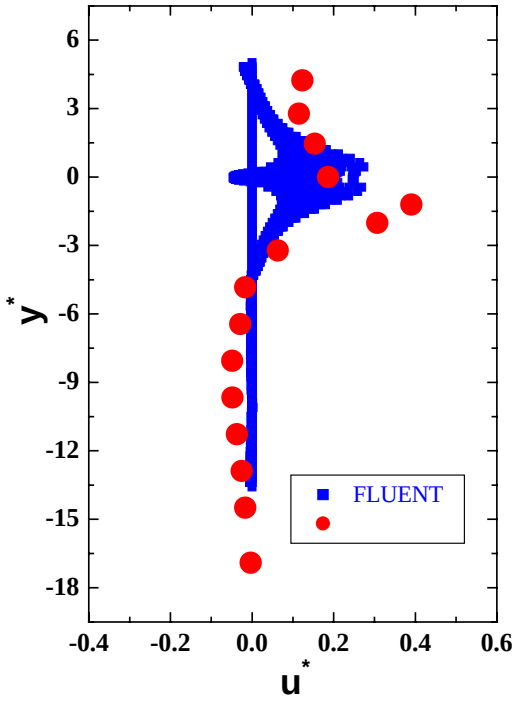
그림 4 는 횡 방향의 무차원속도(U^*)를 나타내고 있다. FLUENT 는 반경방향으로 15 개의 셀로 나뉘었으므로 투영된 횡 방향 속도는 강수부의 각 반경 지점에서의 횡 방향 속도를 의미한다. 그림 4 (b)-(f) 까지의 각 Face 단면은 주입된 제트가 재순환하는 유동 영역이다. 이러한 재순환 영역에서의 강수부 횡 방향 속도 성분은 반경에 따라 차이가 심하며, 안쪽 실린더 쪽에는 고속의 유동장이, 바깥 실린더 쪽에서는 (-) 속도를 갖는 역류 지역이다. MARS 의 계산 결과는 이러한 재순환 유동 구조가 존재하는 강수부의 횡 속도분포를 편균 Gap 속도로 잘 모사하고 있다. 그림 4 의 (a)-(f)는 1/5 수정 선형 축소 모델의 무차원 횡 방향 속도 분포를 두 코드가 유사하게 예측함을 보이고 있다. 따라서, 반경 방향의 각 지점에서의 평균 속도에 기준을 둔 두 속도장 사이의 상사성이 있는 것으로 판단된다.



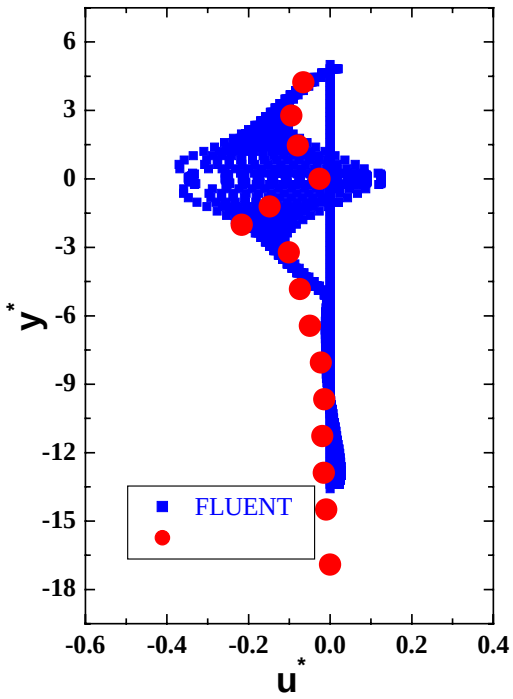
(a) Face-1



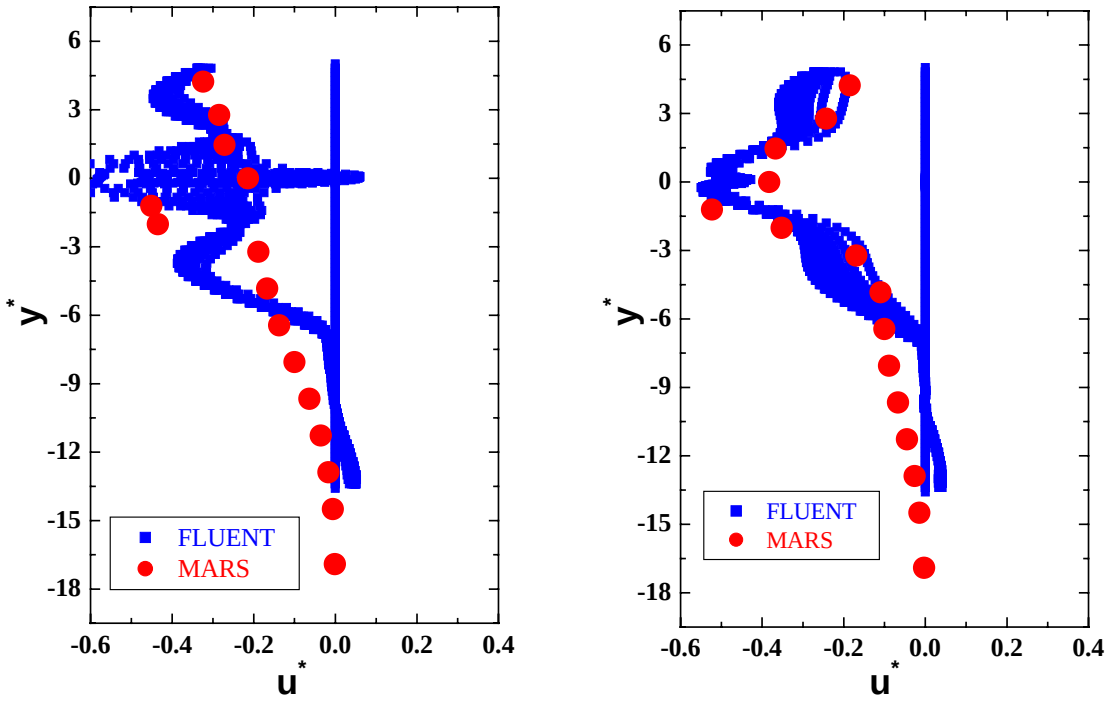
(b) Face-2



(c) Face-3



(d) Face-4



(e) Face-5 (f) Face-6

그림 4 수정선형축소 모델의 각 단면 속도분포 비교

4. 결론

FLUENT 3 차원 해석을 통하여 MARS 의 평균 속도장에 대한 평가 능력을 검증하였다. 이를 위해 강수부를 18 체널의 비교적 작은 체적으로 계산을 수행하여 미소 체적의 FLUENT 3-D 계산 결과와 비교 하였다.

무차원화된 횡 방향 속도 성분과, 축방향의 수직 속도 성분을 1/5 선형 축소 모델의 각 주요 단면에서 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. (1) FLUENT 3 차원 계산 결과와 MARS 의 압력 계산은 일치한다. (2) 강수부의 축방향 속도는 평균 적으로 잘 일치 된다. 단, 반경방향의 국부적인 속도는 MARS 에서 제공되지 않으므로 비교 대상에서 제외하였다.(3) FLUENT 의 무차원 횡방향 속도 분포의 평균치와 MARS 의 Gap 속도가 잘일치하고 있다.

MARS 를 강수부의 다차원 거동을 세밀하게 계산하는 경우는 다차원 속도장의 평균치를 각 단면에서 잘 예측하고 있음을 본 검증 계산 결과를 통해 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 중장기 연구개발과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 심심한 감사를 표합니다.

참고문헌

1) Byung Jo Yun, Tae Soon kwon, Chul Hwa Song, et al., “Experimental Observation on the Hydraulic Phenomena in the KNGR Downcomer during LBLOCA Reflood Phase”, Proceedings of the Korea Nuclear Society Spring Meeting, Kori, Korea, May 2000.

2) 권태순, 윤병조, 송철화, 박종균, "Pre-test Analysis for the KNGR DVI Performance Test Facility Using FLUENT", 2000 추계학술대회 논문집, 한국원자력학회,2000.

3) 윤 병조외, "차세대원자로 대형냉각재 상실사고 모의를 위한 열수력 실험 장치의 척도 해석",KAERI/TR01878/2001, 2001.

4) 인왕기, 오동석, 전태현, "비선형 k-e 난류모델의 CFX 코드 적용을 통한 난류유동 수치 해석", KAERI/TR-451/99. 한국원자력연구소. 1999.

5) 김영인 외, "An Analysis on Boron Dilution Events during SBLOCA for the KNGR", KAERI/TR-1228/99, 1999.

6) B.D. Chung et al.,"Development of a multi-dimensional thermal-hydraulic system code, MARS 1.3.2", Nuclear Energy 26, p1611-1642, 1999.

7) 권 태순 외, "수정 선형 축소법 검증을 위한 3 차원 계산", 2002 춘계학술대회 발표예정,2002.