2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수정 선형척도법의 적용 타당성 검증을 위한 3차원 단상유동 계산

3-dimensional Calculation for Applicability of the Modified Linear Scaling Methodology to ECC Bypass Phenomena

권태순[a*], 윤병조[a], 송철화[a], 최청렬[b]

a) 한국원자력연구소, b) 경희대학교 대학원
대전광역시 유성구 덕진동150

요 약

'수정 선형척도법'에 따른 척도해석 방법론의 적용 타당성 검증을 위하여 FLUENT 코드를 이용한 3 차원 단상유동 계산을 원자로용기 강수부(Downcomer)에 대해 수행하였다. 수정 선형척도 축소모델은 강수부의 갭, 높이, 저온관 직경에 대해 1/4.93 길이 축소비를 갖는다. APR1400 의 대형냉각재 상실사고의 후기 재관수 기간동안의 증기 주입조건을 모사하기 위하여 공기 주입을 고려하였다. 축소 모델의 유동패턴, 압력 분포, Impinging Jet 의 상사성에 관한 척도 효과를 수치적으로 모의하였다. 축소 효과에 대한 여러 결과로부터, 1/5 수정 선형척도 축소모델과 APR1400 은 비슷한 유동장을 갖는 것을 파악하였으며, MIDAS 실험장치 설계에 적용된 '수정 선형척도법'은 APR1400 모의 실험결과의 상사성을 확보할 수 있는 의미 있는 결과를 보인다.

Abstract

A 3-dimensional calculation using the FLUENT code has been performed for conforming the applicability of the modified linear scaling methodology to ECC bypass during LBLOCA reflood phase. The modified linear scaled model has a 1/4.93 length scale for the downcomer gap, height, and cold leg diameter. The air flow condition is considered to simulate a steam discharge condition during the late reflood phase of the APR1400 LBLOCA. The scale effects on the similarity of flow patterns, pressure distributions and impinging jet are numerically tested for both APR1400 and MIDAS facility. From the calculation on various parameters, it is found that the 1/5 modified linear scaled model and APR1400 show similar flow fields. And it is believed that the modified linear scaling law, applied the design of the MIDAS, give a reasonable results to preserve hydrodynamic similarity to APR1400.

1. 서론

APR1400 의 가상적 대형 저온관 파단 사고시의 후기 재관수 기간 동안에 주입되는 고압 안전주입수와 강수부에 축적된 냉각수는 저온관을 통해 강수부로 주입되는 과열증기에 의해 다차원적 거동을 보인다(윤병조, 2000, 권태순, 2000). 이러한 강수부 열수력 거동은 단순화된 강수부 모델을 적용하여 해석되며 해석모델은 평균속도에 기초하고 있다. 따라서, 다루고자 하는 계산 체적내의 속도 분포가 균일할 수록 평균 강수부 모델의 계산 정확도는 증가한다. 그러나, 강수부내 계산 체적의 평균 속도 분포의 균일성이 보장되지 않고, 속도의 크기 및 방향 등이 다양할 경우 평균속도에 근거한 계산의 오차는 증가하게 된다. 최근의 다차원 분석코드는 강수부 유동을 보다 세밀하게 모델하여 국부적 속도분포 등을 모의하고자 시도되고 있다(김영인,1999, 정법동, 1999). 이에 따라, 후기 재관수 기간 동안의 발생하는 다차원 강수부 증기 유동장의 특성에 대한 이해의 필요성이 증대되고 있다.

본 연구는, 다차원적 강수부 증기유동장의 속도 특성과, 이를 수정 선형척도법에 따른 척도해석 방법론에 따라 축소 모의시 강수부 내부 유동장의 상사성 유무를 검증을 목적으로 수행하였다. 전산해석을 위하여 FLUENT 코드를 이용하였다. APR1400 의 1:1 원형에 대한 속도장 분석 계산을 수행한 결과와 선형축소비 1/5 의 환형 강수부 모델에 대해 각각 축소된 속도를 다양하게 변화시켜 상호 무차원 속도장의 특성을 비교하였다. 강수부내의 다차원적 유동 특성인 Impinging Wall Jet 특성과, 무차원 상수부의 횡 방향 속도 및 수직방향 무차원 속도 특성을 비교하였다. 이 밖에도 국부적인 유동 형태와 다차원적 강수부의 유동 특성을 자세하게 관찰하였다.

2. 계산방법 및 조건

2.1 계산모델

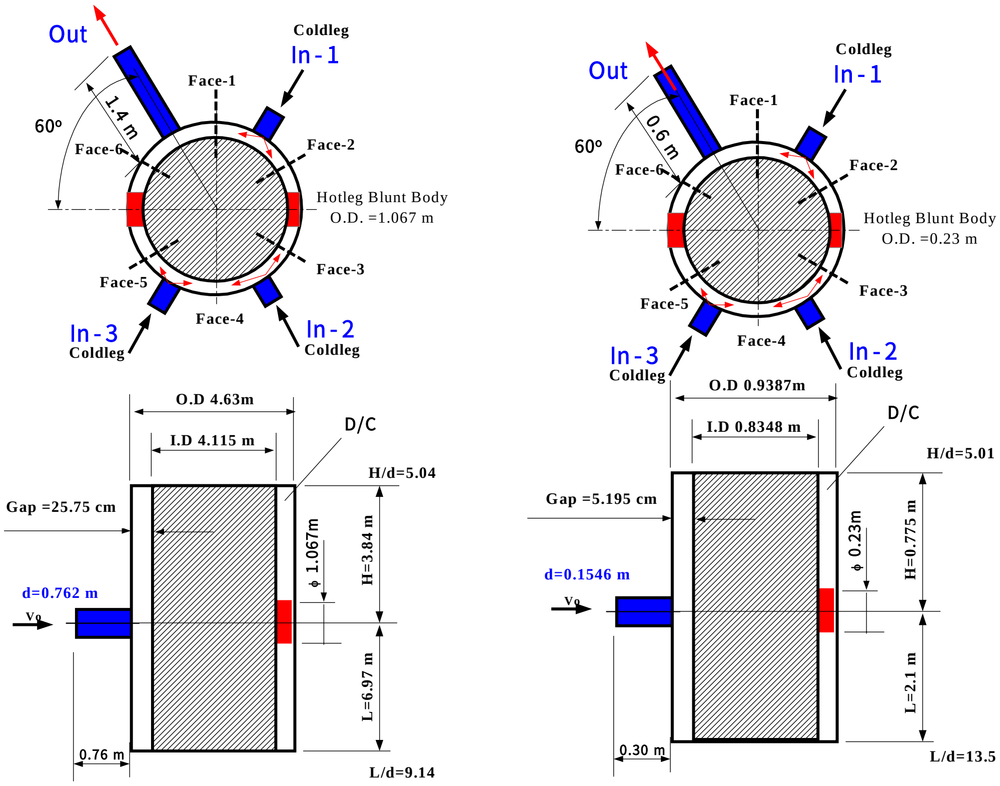
APR1400 의 FLUENT 계산에 적용된 참조 유동조건은 TRAC 코드를 이용한 APR1400 의 대형저온관 양단순시 파단사고(Cold leg Double Ended Guillotine Break)의 후기 재관수 기간에 대한 계산 결과를 기준조건으로 결정하였다. 비상노심냉각수는 주입되지 않는 상황하에서 3 개의 저온관을 통해 과열증기가 강수부로 주입될 때 강수부의 과열증기 유동장을 계산 대상으로 하였다. 즉, 강수부의 벽면 열전달, 증기의 응축, 비상노심 냉각수에 의한 증기 응축이 없는 과열 증기만의 속도장을 대상으로 한 3 차원 계산이다. APR1400 의 기준 증기 유동장은 강수부의 증기압이 180Kpa 이고, 과열증기의 온도는 197^{o}C 이다.

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

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 해석기준에 대해 Reynolds Number 보존에 의한 상사법칙을 적용하였다. 따라서, 벽면 마찰과 운동에너지의 비가 보존되는 동일 유동장에 대한 해석이다. 1/5 수정 선형 축소 모델은 길이 축소비가 1/4.93 인 기하학적 축소 모델(Modified Linear Scaled Model)의 형상에 유동 조건은 수정 선형 축소 조건이 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 1:1 원형 모델과 축소모델의 간략한 기하학적 형상과 치수는 그림 1 에 나타내었다.



(a) APR1400 계산형상 (b) 1/5 선형축소 계산 형상

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

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 일어

나는 난류유동 특성을 비교적 타당하게 예측할 수 있는 것으로 알려진 standard k-ε모델을 사용하였다(인왕기,1999, 김영인, 1999). 강수부 증기 압력 180Kpa, 주입 증기 온도 197°C 의 과열 증기 유동장을 공기에 의한 유동장으로 대체 모의하였다. 따라서, 계산 체적내에서의 상변화는 고려되지 않았으며, 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.

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

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

여기서, τ 는 응력텐서이고, 뉴턴유체의 경우 응력텐서는 속도와 압력으로부터 다음과 같이 식 (3)으로 기술된다.

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

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

난류운동에너지 방정식은 아래의 식(4)와 같다.

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

난류운동에너지 소산율 아래의 식(5)와 같다.

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

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.

$$\mu_t = \rho C\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (7)$$

모델 상수 $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ, σ_k 와 σ_ε 는 다음 식 (8)과 같다.

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

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 를 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 표 2 에 나타낸 것과 같이 모두 5 가지의 경우가 해석되어졌다. APR1400 1/1 모델에 대해서는 저온관 공기주입 속도가 39.80m/s 인 경우가 계산의 기준이 되는 주입속도이다. 선형축소모델에 대해서는 원형 모델의 유입속도 39.80m/s, 30.00m/s, 그리고 20.00m/s 에 표 1 에 나타낸 축소비를 적용한 39.80m/s, 18.09m/s, 13.64m/s, 그리고 9.09m/s 에 대하여 계산을 수행하였다.

표 2 저온관에서의 주입 속도비

CASE	**Geometry**	**Inflow Velocity before Scale**	**Scaled** Velocity
APR1400	**APR1400**	**39.80m/s**	**39.80m/s**
ML_Model_3980	**ML_Model**	**87.56m/s**	**39.80m/s**
ML_Model_1809	**ML_Model**	**39.80m/s**	**18.09m/s**
ML_Model_1364	**ML_Model**	**30.00m/s**	**13.64m/s**
ML_Model_0909	**ML_Model**	**20.00m/s**	**9.09m/s**

노즐 입구에서는 주입속도분포는 표 2 에 나타낸 유입속도로 단면의 각 지점에서 균일하게 유입된다고 설정하였다. 각 계산에서 D/C 에서의 절대압력이 180kPa 이 되도록 출구 압력을 설정하였다. 벽면에서는 No slip 조건을 적용하였고, 벽면을 통한 열전달은 고려하지 않았다. 계산에 사용된 격자는 전체적으로 육면체격자를 사용하였으며, APR1400

과 수정선형 축소 모델의 형상을 위해 사용 되어진 격자의 수는 각각 413,595 개와 451,050 개 이며, 강수부는 반경방향으로 15 개로 셀로 나눴다.

3. 결과 및 토의

3.1 압력분포

APR1400 에 대한 1/1 모델의 각 지점에서의 주입노즐 위치에 따른 압력의 변화를 살펴보았다. 표 3 에 각 주입 노즐 위치에 따라 압력을 정량화하였다. 각 저온관에서의 압력과 강수부에서의 압력 조건이 비교적 초기조건에 잘 일치되고 있다. 표 4 에는 출구노즐과 Inlet 1, Inlet 2 , Inlet 3 의 각 노즐간 압력차를 요약한 것이다. 간 단면에서의 유속은 압력차에 의해 결정되므로, 출구와 각 노즐간의 압력 차의 비는 속도의 제곱으로 표현되는 동압의 비와 거의 일치한다. 수정선형 축소법에 따라 속도가 축소되면 기하학적 축소에 따른 곡률효과가 보존된다. 즉 구심 가속도항이 아래 식(9)와 같이 보존된다.

$$(a_r)_R = \frac{(V_\theta^2)_R}{R_R} = \frac{\sqrt{l_R}}{\sqrt{l_R}} = 1 \qquad (9)$$

따라서 구심 가속도에 의한 영향은 1/1 모델과 1/5 선형 축소 모델에서 발생하지 않을 것으로 것이다.

표 3 각 노즐에서의 Pressure

(압력단위:Pa)

	Inlet 1	Inlet 2	Inlet 3	Outlet	D/C
APR1400	180160	180394	180264	167007	179994
ML Model_3980	180202	180470	180336	166916	179997
ML Model_1809	180040	180096	180069	177286	180000
ML Model_1364	180022	180054	180038	178454	180000
ML Model_0909	180008	180022	180016	179310	180000

표 4 출구와 각 노즐간 압력차와 속도비의 제곱

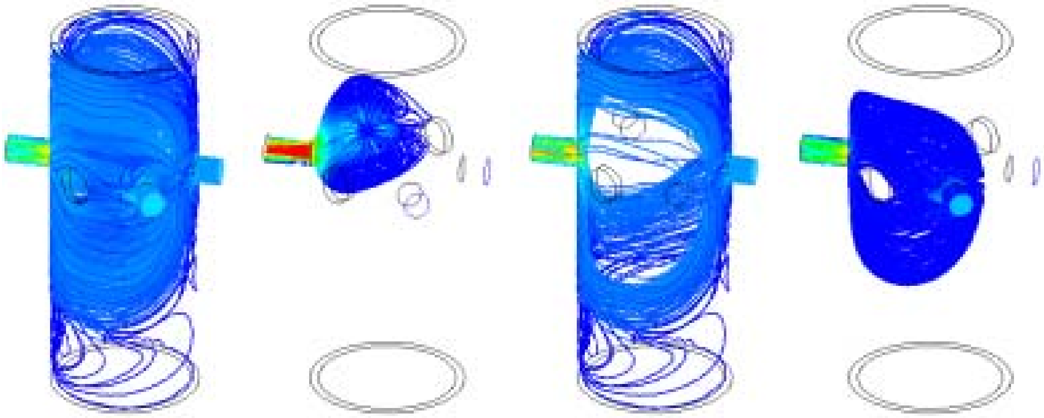
(압력단위:Pa)

	Inlet 1	Inlet 2	Inlet 3	$(\text{Velocity})^2$ to APR1400	Pressure to APR1400
APR1400_3908	13153	13386	13257	1/1	~ 1/1
ML_Model_3980	13286	13420	13420	1/1	~ 1/1
ML_Model_1809	2754	2783	2783	1/4.666	~1/4.809
ML_Model_1364	1568	1585	1585	1/8.509	~1/8.445
ML_Model_0909	698	706	706	1/18.481	~/18.960

3.2 Streak Line 유동분포

그림 2 는 APR1400 의 1/1 기하학적 모델에 노즐 주입속도를 축소비 1/1 인 39.8 m/sec 로 주입했을 때의 각 노즐별로 주입한 제트의 궤적인 Streak Line 을 나타낸 그림이다. 입

자는 노즐 단면에 균일 분포시켰다. 그림 2 에서 (a)는 세 개의 노즐로 주입된 제트의 모든 Streak Line 을 나타내고 있다. 그림 2 의 (b)는 Inlet 1 으로 주입된 입자의 Streak Line 을 나타내고 있다. 파단 저온관에 가장 가까이 위치한 Inlet 1 으로 주입된 제트는 Inlet 2 로 주입된 제트의 후류 Wake 에 휩싸여 Inlet 1 의 제트 영역이 확장되지 못하여 세 개의 주입 제트중 제트 유효 영역이 가장 작다. 그림 2 의 (c)는 Inlet 2 로 주입된 제트의 Streak Line 을 나타내고 있다.



(a) All (b) Inlet-1 (c) Inlet-2 (d) Inlet-3

그림 2 APR1400 의 각 저온관에서의 Streak Line

그림에서 보듯이, Inlet 2 로 주입된 제트는 Inlet 1 및 Inlet 3 로 주입된 제트의 확장에 따른 횡유동 방해로 상하로 더 강하게 퍼지는 특성이 있다. 상하로 퍼진 Inlet 2 의 제트는 Inlet 3 의 제트를 외곽에서 감싸듯이 파단 저온관 쪽으로 흐른다. 따라서, Inlet 2 의 제트는_횡유동보다 상하방향의 유동 성분이 보다 강하게 나타난다. 이러한 유동 특성에 의해 Inlet 2 상부에 위치한 DVI 노즐은 다른 곳 보다 상대적으로 강한 수직 속도 성분에 노출되게 된다. 반면에 Inlet 1 과 Inlet 3 의 DVI 는 보다 강한 횡 유동에 노출되는 유동 특성이 있다. 강수부의 상부지역에서의 횡 유동은 Inlet 1 과 Inlet 3 에 의한 것이 아니라 Inlet 2 로 주입된 제트에 의해 주로 형성되는 것임을 그림 2 의 (c) 그림이 보여 주고 있다.

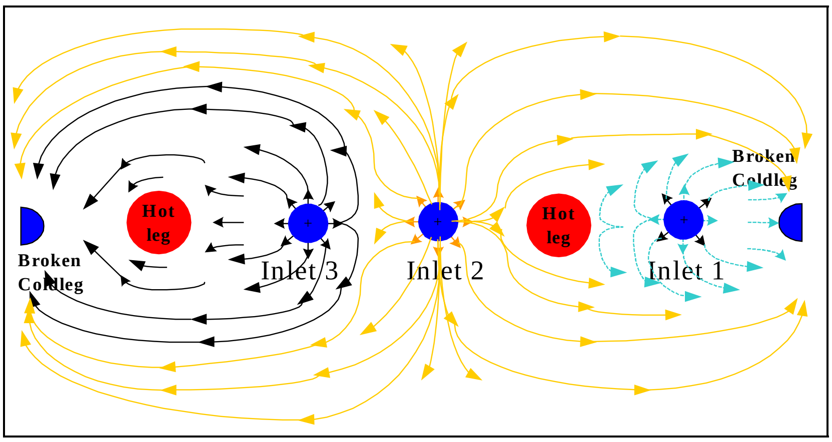
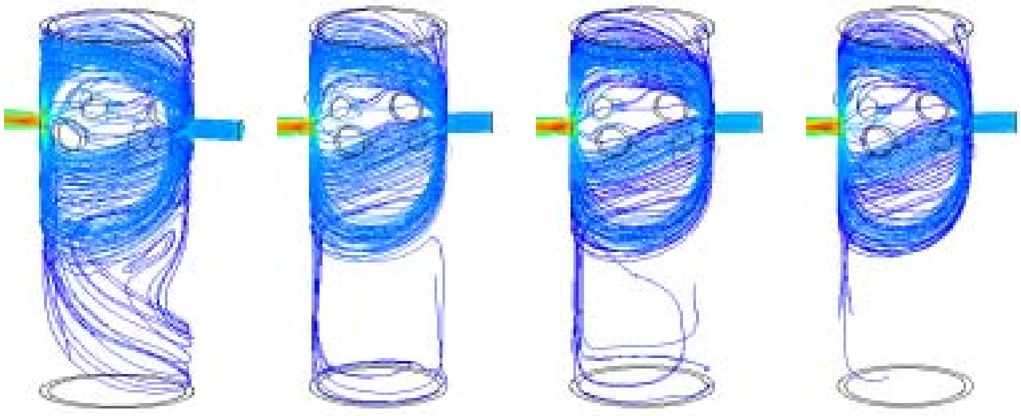


그림 3 APR1400 의 각 저온관 제트 유효 영역 도시화

. 각 제트의 유효영역의 크기에 대한 스케치를 그림 3 에 나타내었다. Inlet 2 제트초기 발달 과정에서 주로 상하 영역으로 발달하고 있다.

그림 4 의 (a)에서 (d)까지는 1/5 축소 모델에서 각 노즐의 주입속도를 각각 다르게 하였을 경우의 Inlet 2 제트의 궤적을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 주입속도에 거의 무관한 형상의 제트 궤적을 보여주고 있다. 기하학적 형상이 선형 축소된 경우 유동장의 형태는 주입속도에 영향을 받지 않는다.



(a) 39.8 m/sec (b) 18.09 m/sec (c) 13.64 m/sec (d) 9.09 m/sec

그림 4 1/5 모델에서의 저온관 주입 속도에 따른 Inlet-2 의 Streak Line

3.3 재순환 유동구조

그림 5 는 세 개의 저온관으로 주입된 제트의 강수부 내에서의 횡유동 속도 분포중 노즐 좌우의 재순환 와류 유동형태를 보여주고 있다. 와류는 주입노즐 좌우로 각각 럭비공 형태로 형성된다. 와류 구조의 크기는 원주방향으로 주입 노즐 직경정도이며, 반경방향의 최대 크기는 강수부 Gap 의 3/4 정도, 높이는 주입 노즐의 2 배의 정도의 체적이다. Inlet 1, Inlet 2 와 Inlet 3 로 주입된 제트는 각각 좌우에 강한 재순환 와류를 형성한다. Inlet 2 와 Inlet 3 경계구역에서는 가장 강한 크기의 회전강도(Intensity of Vorticity)를 갖는 두 와류가 서로 반대방향으로 회전하며 부딪치는데 이때 정체축이 상하방향으로 형성된다. 이 정체축에서는 횡 방향 속도가 현저하게 감소하여 국부적으로 정체에 가까운 거동을 보인다.

그림 6 에서 $y/d_{Coldleg,\ inlet}$=(+)1.0 에서 (-)1.0 의 영역까지 와류강도(Vorticity)를 관측하면 재순환영역의 크기는 대략 주입 노즐 직경(d) 의 2 배 정도이다. 그림 7 은 강수부의 축방향으로 $y/d_{Coldleg,\ inlet}$ =(-)0.5, (+)0.5 까지의 영역에서 강한 재순환 구조가 유지되고 있음을 보이고 있다. 이러한 재순환 와류가 존재하는 강수부 지역은 강수부 내부의 두 벽면에서의 유동 방향이 반대이다. 강수부 유동의 주 유동 방향은 각 주입 노즐에서 파단관으로

향하는 횡 방향이다. 바깥쪽 실린더 벽면근처에서의 유동 방향은 강수부 횡 방향의 주 유동방향과 반대 방향이다. 그림 8 은 그림 7 의 정체지역의 와류를 동일한 척도를 갖는 기하학적 계산 체적내에서 주입 노즐의 주입속도에 따른 재순환 와류의 세기를 관찰한 것이다. 주입속도가 $1/2.2(=1/\sqrt{4.93})$ 인 18.09 m/sec 로부터 이보다 훨씬 작은 9.09 m/sec 까지의 범위내에서는 주입 속도에 의해 재순환 와류의 구조가 변하지 않음을 보이고 있다. 즉, 정체 재순환 와류의 크기는 저온관 주입 속도에 무관한 형상을 하고 있다.

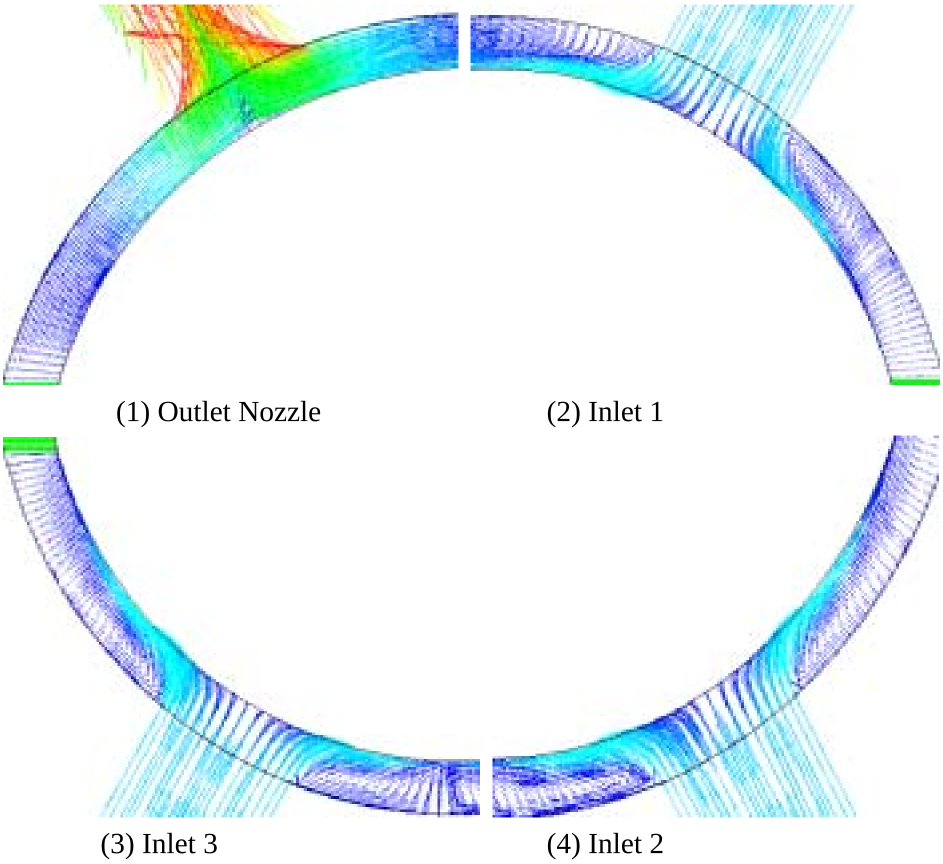


그림 5 1/5 모델의 저온관 중심선 고도단면의 강수부 재순환 Vortex(V=18.09 m/sec),

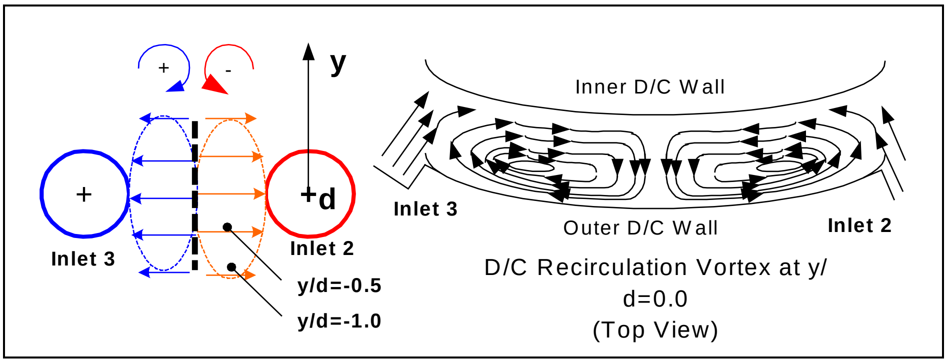
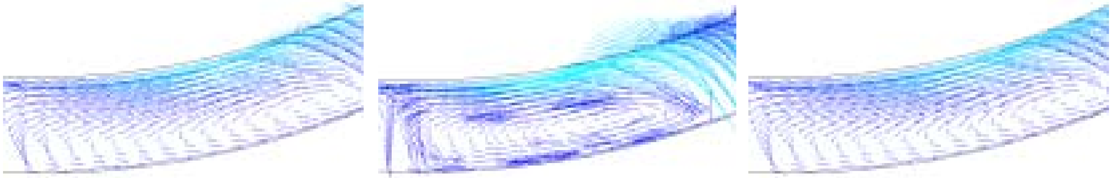
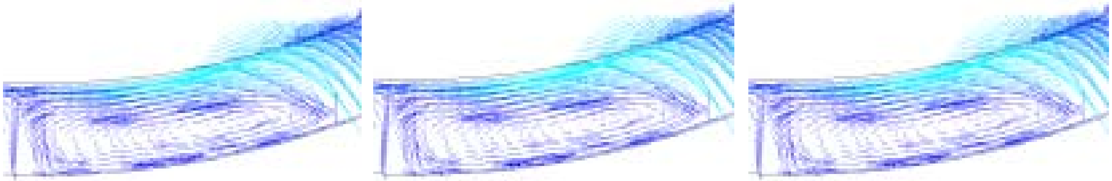


그림 6 재순환 와류 크기 및 회전 방향



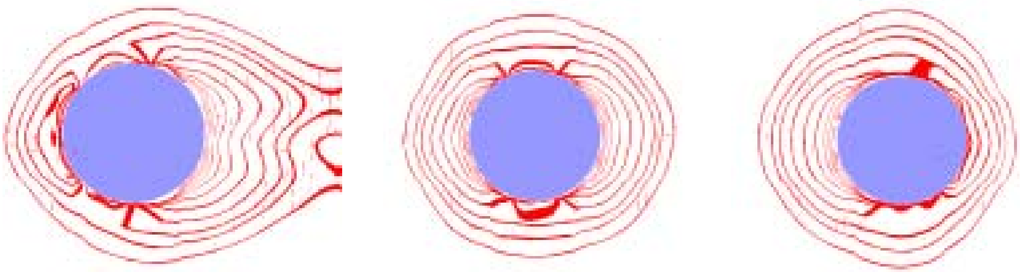
(a) y/$d_{Coldleg,\ inlet}$ = (+)0.5 (b) y/$d_{Coldleg,\ inlet}$ =0.0 (c) y/$d_{Coldleg,\ inlet}$ =(-)0.5

그림 7 실린더 축 방향에 따른 재순환 와류의 세기 변화 (V=18.09 m/sec)



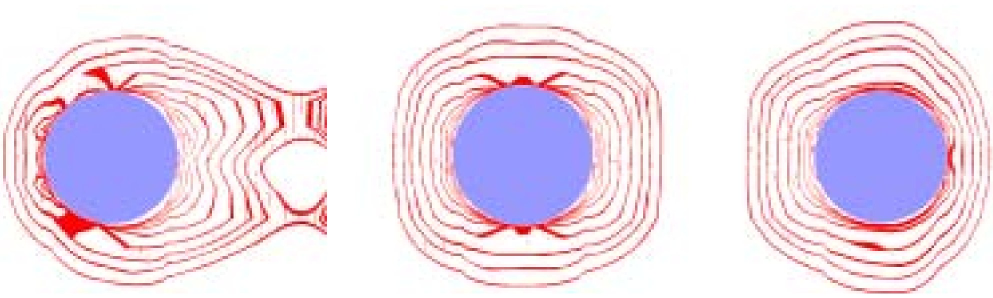
(a) 18.09 m/sec (b) 13.64 m/sec (c) 9.09 m/sec

그림 8 주입속도 변화에 따른 강수부에서의 재순환 Vortex 의 변화(y/d=0.0)



Inlet 1 Inlet 2 Inlet 3

(a) Inlet 1,2,3 주입노즐의 Impinging Jet : APR1400 and V=39.8 m/sec



Inlet 1 Inlet 2 Inlet 3

(b) Inlet 1,2,3 주입노즐의 Impinging Jet : 1/5 Model and V=18.09 m/sec

그림 9 V/Vo(주입속도) =1.0 인 Jet Impingement Area

3.4 Impinging Jet 특성

그림 9 는 APR1400 과 1/5 모델의 각 주입노즐에서의 방사형 속도 분포를 주입속도로 무차원화 시켰을 때의 등속도 경계면을 나타낸 Impinging Jet 의 크기를 나타내는 그림이다. 주입속도와 같은 크기의 확산속도를 갖는 Impinging Jet 의 경계면의 반경 크기는 식 (10) 과 같이 대략 주입노즐과 같은 정도이다. 그림에서 (a) 의 세 그림은 APR1400 을 (b) 의 세 그림은 1/5 모델의 결과이다. 그림 Inlet 1 의 우측에는 파단관이 위치하여 Inlet 1 의 제트는 파단관쪽으로 치우치고, Inlet 2 는 파단관의 정반대쪽에 위치하여 대칭성이 강하게 나타난다. Inlet 3 는 오른 쪽에 위치한 Inlet 2 제트의 영향으로 파단관쪽으로 약간 치우친 형태를 띠고 있다. 그림 (a)와 그림 (b) 각 각각 거의 동일한 형태를 띠고 있어 노즐 축소시 Impingement 제트의 크기 특성은 상사성이 있음을 보여주고 있다.

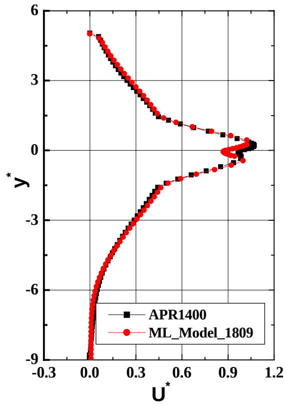
$$\left[\frac{r(v_r'=1)}{d_{Coldleg,inlet}}\right]_R \approx 1 \text{ , where } V_r' = \frac{v_r(r)}{V_{Coldleg,inlet}} \qquad (10)$$

3.5 속도분포 및 상사성

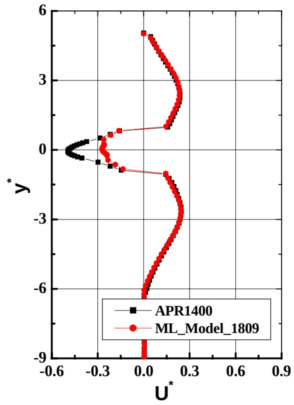
그림 10 은 그림 1 에서 표시한 각 Face 에서의 횡방향 속도 성분을 실린더 바깥쪽에서 실린더 벽면으로 투영 시켜, y 축의 각 지점에서의 최대/최소 속도분포를 나타내었다. 여기서 각 좌표 축은 식(11)과 같이 무차원화시켰다.

$$y^* = \frac{y}{d_{Coldleg,inlet}} \text{ ,and } U^* = \frac{u}{V_{Coldleg,inlet}} \qquad (11)$$

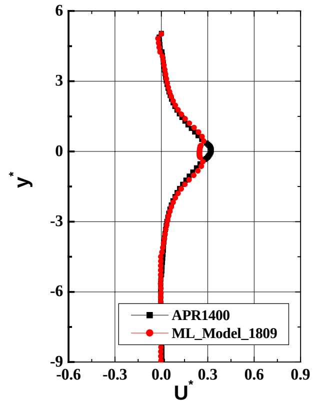
그림 10 (a)는 파단관과 Inlet 1 노즐 사이의 수직 축 선상의 횡 방향 무차원속도(U^*)를 나타내고 있다. 각 속도는 파단관의 출구 속도에 가까운 속도 분포를 보이고 있다. APR1400 의 1/1 속도에 대한 1/5 수정 선형 축소 모델과 속도 분포가 잘 일치하고 있다. 그림 10 (b)는 Inlet 1 과 고온관 사이의 속도분포를 나타내고 있다. 가운데의 $y^* \leq (\pm)1.0$ 지역에서 나타나는 (-) 속도는 Inlet 1 의 Impinging Jet 의 영향으로 나타나며, 파단관쪽으로 향하는 상-하 제트와 반대 방향으로 Impinging Jet 가 확산되고 있음을 의미한다. 그림 10 (c)와 (d)는 Inlet 2 의 제트에 의해서 형성되는 속도 분포이다. 그림 2 와 그림 3 에서 설명하였듯이, Inlet 2 의 제트는 Inlet 2 및 Inlet 3 의 제트의 방해로 횡축인 좌-우로 크게 확산되지 못하고 종 축인 상-하 방향으로 더 활발히 확산된다. 이러한 이유로, 그림 10 (c)와 (d)의 속도가 다른 영역에 비해 작게 발달한다. 그림 10 의 (a)-(f)는 APR1400 의 1/1 속도에 대한 1/5 수정 선형 축소 모델과 속도 분포가 잘 일치하여 두 속도장 사이의 상사성을 잘 보여 주고 있다.



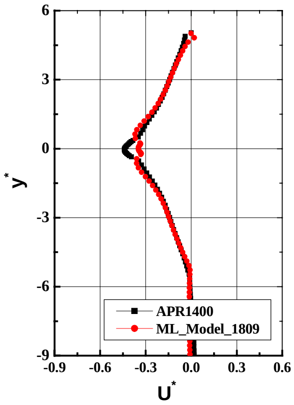
(a) Face-1



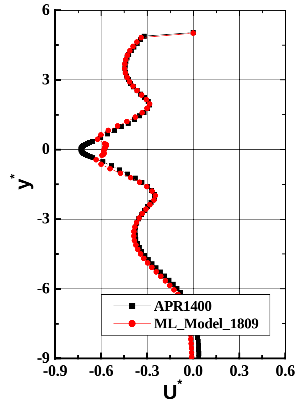
(b) Face-2



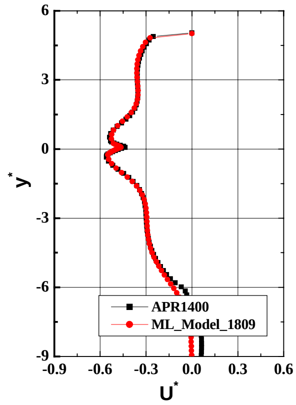
(c) Face-3



(d) Face-4



(e) Face-5



(f) Face-6

그림 10 APR1400 과 1/5 수정선형축소 모델의 각 단면 횡속도분포 비교

그림 11 은 축 방향 속도 성분을 실린더 바깥쪽에서 실린더 벽면으로 투영 시킨 무차원 수직속도 분포를 나타내고 있다. APR1400 의 1/1 속도에 대한 1/5 수정 선형 축소 모델과 속도 분포가 잘 일치하여 두 속도장 사이의 상사성을 잘 보여 주고 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^* $(y/d_{Coldleg,\ inlet}=$ (+)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. 이는 DVI-1,3,4 의 하향 ECC Film 은 하향 증기의 순방향 유동장에 놓이게 되고, DVI-2 의 하향 ECC Film 은 반대로 상향 증기의 역방향 유동장에 놓이게 되는 Counter-Current Flow 상황을 의미한다.

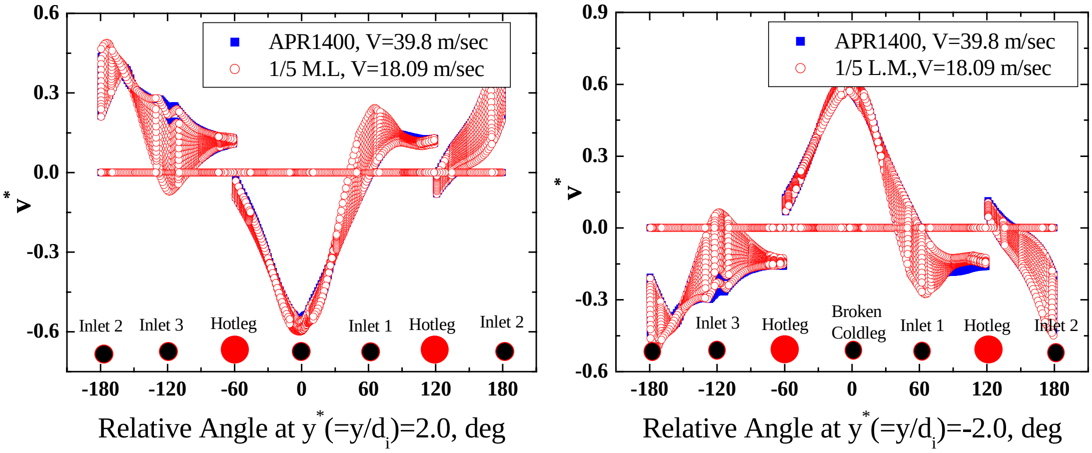
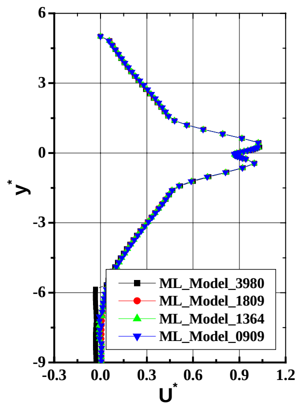
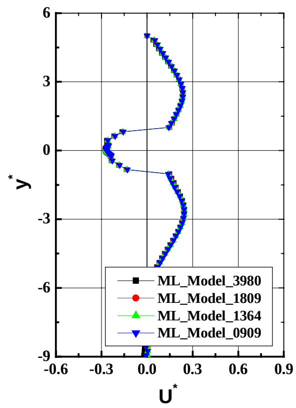


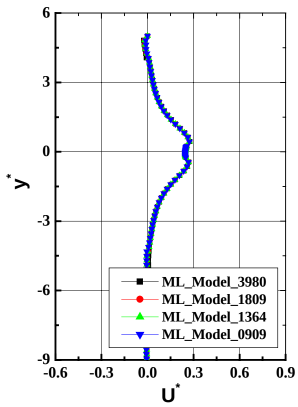
그림 11 APR1400 과 1/5 수정선형축소 모델의 축 방향 속도분포 비교



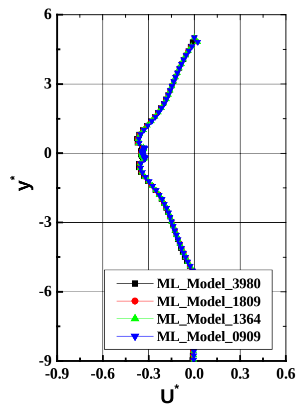
(a) Face-1



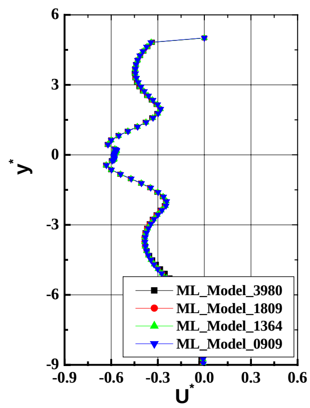
(b) Face-2



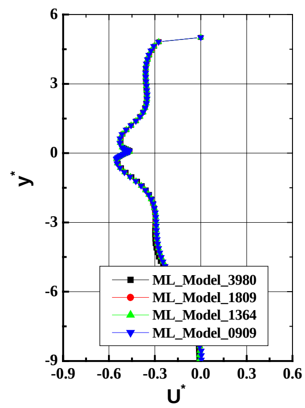
(c) Face-3



(d) Face-4



(e) Face-5



(f) Face-6

그림 12 수정선형축소 모델의 w 주입속도 변화에 따른 각 단면 속도분포 비교; V=38.9 m/sec, 18.09 m/sec, 13.64 m/sec, and 9.09 m/sec

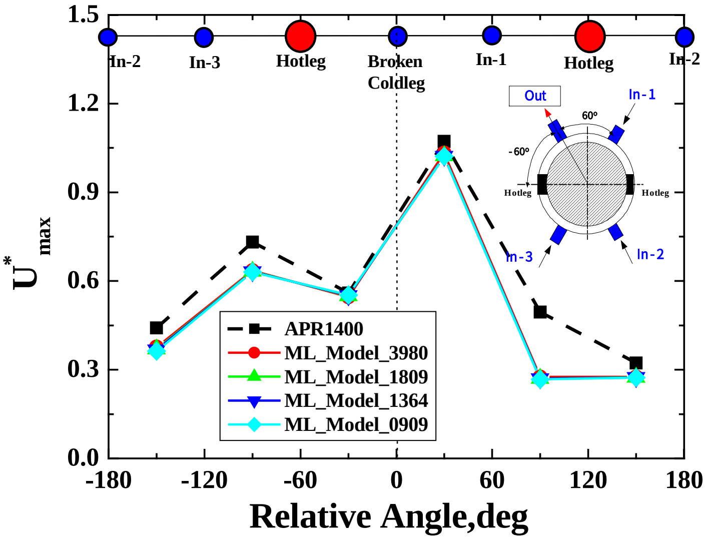


그림 13 축소비 및 주입속도에 따른 각 단면에서의 최대 속도 비교

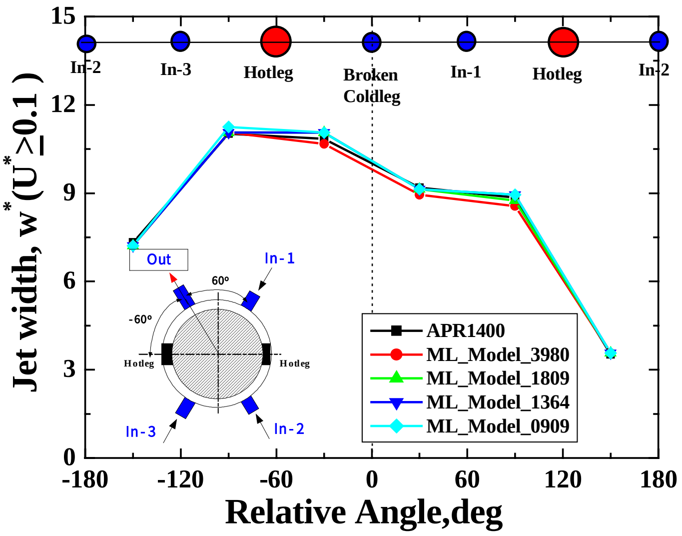


그림 14 축소비 및 주입속도에 따른 각 단면에서의 제트의 폭 비교

그림 12 의 (a)-(f)는 1/5 수정선형축소 모델에서 각 노즐의 주입속도를 1/1 , 1/2.22, 1/2.91, 1/4.29 까지 축소하여 속도 분포의 상사성을 검증한 것이다. 주어진 기학학적 형상이 고정되면, 주입속도의 크기에 관계없이 제트 유동장의 형태는 일정함을 보여주고 있다.

그림 13 은 Face-1 에서 Face-6 까지 6 개 단면에서 구한 무차원 횡 방향 속도 성분의 최대값을 비교한 그림이다. 파단관 좌우 $\pm 60^{O}$ 범위 지역에서의 횡 방향 속도의 최대 값은 APR1400 및 선형 축소 모델이 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 상대적으로 재순환 와류의 세기가 큰 영역인 Inlet 2 와 Inlet 3 및 $(+)120^{O}$ 고온관 후류(Wake) 지역에서의 불일

치 정도가 크다.

그림 14 는 Face-1 에서 Face-6 까지 6 개 단면에서 구한 횡 방향 제트의 U^* >0.1 인 무차원 폭을 비교한 그림이다. 제트의 폭은 APR1400 및 선형 축소 모델이 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 제트의 폭이 오른 쪽 (+)상대각 영역보다 (-)상대각 영역이 더 넓게 발달하는 이유는, Inlet 1 의 제트는 넓게 발달하지 못하고 파단관으로 일찍 빠져나가는 반면에 Inlet 3 는 고온관을 지나며 상하로 보다 넓게 발달하기 때문이다.

4. 결론

수정 선형척도법의 적용에 따른 축소효과를 수치적으로 시험하기 위하여 APR1400 의 실제 사이즈를 갖는 1/1 해석모델과 수정 선형척도해석법을 적용한 1/5 선형 축소 모델에 대한 3 차원 수치계산을 수행하였다.

여러 가지 다양한 계산결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. (1) 1/5 선형 축소 모델의 경우 압력분포의 유사성 및 각 주입 노즐로부터 출구까지의 차압분포는 APR1400 1:1 계산모델과 잘 일치한다, (2) 환형부에서의 횡방향 제트의 확산 폭은 1/5 선형 축소 계산모델과 APR1400 1:1 계산모델이 비교적 잘 일치한다, (3) 무차원 횡방향 최대 속도 분포는 1/5 축소 모델이 약간 작다. 무차원 속도 분포 및 제트 폭 형상은 제트의 주입속도에 무관한 특성을 보인다. 본 계산의 결과는 강수부의 다차원 거동을 세밀하게 계산하는 MARS 등 다차원 코드의 속도계산 검증용으로 활용할 수 있다.

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) 윤병조 외, "차세대원자로 대형냉각재 상실사고 모의를 위한 열수력 실험 장치의 척도해석",KAERI/TR01878/2001, 2001.

4) 인왕기, 오동석, 전태현, "비선형 k-e 난류모델의 CFX 코드 적용을 통한 난류유동 수치해석", 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.