2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수정 선형척도해석 방법론 검증을 위한 3 차원 수막퍼짐 효과의 계산

3-dimensional Calculation for Applicability of the Modified Linear Scaling Methodology to Liquid Film Spreading

권태순[a*], 최청렬[b], 윤병조[a], 송철화[a],

a) 한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동150
b) 경희대학교 대학원

요 약

비상노심 냉각수의 우회거동 파악을 위해 적용한 '수정 선형척도법'의 검증을 위해 FLUENT 코드를 이용해 3 차원 ECC 수막(Film) 폭에 대한 수치적 계산을 수행하였다 원자로용기 강수부(Downcomer)에서의 비상노심 냉각수 수막의 수치적 모사를 위해 체적비 (VOF: Volume of Fraction) 기법을 적용하였으며, 수정 선형척도법을 적용해 축소 모의한 1/1, 1/5,1/7 수치 모델들에 대해 계산을 수행하였다. 강수부의 초기 조건은 공기로 차있는 것으로 고려하였다. DVI 의 주입속도는 1/1(1.6 m/sec)로부터 1/(length scale)$^{0.5}$ 까지 계산되었다. 수막폭과 수막 파단에 대한 척도 영향이 고찰되었다. 척도 효과에 대한 다양한 결과로 부터, 수정 선형척도법이 APR1400 과 수막폭의 상사성을 보존할 수 있는 타당한 척도해석 방법론임을 알았다.

Abstract

A 3-dimensional numerical calculation of the ECC film spreading width for conforming the applicability of the modified linear scaling methodology to LBLOCA reflood phase for the DVI mode of ECC injection condition has been performed using the FLUENT code. The VOF(Volume of Fraction) technique was applied for the numerical simulation of ECC film spreading in the annular downcomer. The numerical models of 1/1, 1/5 and 1/7, scaled down based on the modified linear scaling methodology, were tested. The initial condition was considered filled with air in the downcomer. The ECC injection velocity through DVI nozzle was tested to cover the range of from1/1(1.6 m/sec) to 1/(length scale)$^{0.5}$ for the models. The scale effects on the film spreading width and break-up are numerically tested. From the calculation results for the scale effects, it is found that the modified linear scaling law gives a reasonable result to preserve the similarity of the film spreading width between scaled model and APR1499.

1. 서론

APR1400 의 가상적 대형 저온관 파단 사고시의 후기 재관수 기간 동안에 주입되는 고압 안전주입수는 저온관을 통해 강수부로 주입되는 과열증기에 의해 저온관 주변에서 쪼개지고, 증기에 실려 파단관으로 배출되게 된다(윤병조, 2000, 권태순, 2000). 강수부를 축소 모의할 때, 강수부의 높이, 직경, 및 비상노심 냉각수의 주입속도에 의해 ECC Film 의 폭과 두께가 결정된다. 이에 따라, 후기 재관수 기간의 강수부 증기 유동장을 축소 모의하는 경우 ECC Film 의 폭의 적절한 모사에 대한 필요성이 있다.

본 연구는 3 차원 전산해석 코드인 FLUENT 를 이용하여 이상유동의 수막폭을 계산하는 기법을 도출하고자 시도되었으며, 동시에 수정 선형척도해석 방법론에 따라 DVI 노즐을 축소 모의시 ECC Film 의 폭에 대한 상사성 유무를 수치적으로 검증하는 부수적 목적을 갖고 수행하였다. APR1400 의 1:1 원형에 대한 ECC Film 폭 계산과, 선형축소비 1/5 및 1/7 의 환형 강수부 모델에 대해 각각 DVI 주입 속도를 다양하게 변화시켰다. 계산된 ECC Film 의 폭을 무차원화시켜 수치 계산의 결과간에 상호 비교 및 실험결과와의 비교 시도하였다. 본 연구의 결과는 MIDAS 실험장치의 설계에 적용된 수정 선형 척도법의 ECC Film 폭의 상사성 검증에 간접 활용이 가능할 것으로 판단된다.

2. 수치 계산방법 및 조건

2.1 계산모델

ECC 주입 조건 및 기학학적 조건은 APR1400 DVI 설계 데이터에 근거하여 결정되었다. DVI 노즐의 직경과 후기 재관수 기간 동안에 작동되는 고압안전주입 펌프에 의한 최소 주입유량을 환산한 DVI 주입속도를 적용하였다. 강수부의 곡률효과를 고려하기 위하여 강수부의 직경 및 강수부 폭(Gap)을 기준으로 각각 1/1 척도비의 APR1400 환형 강수부 모델과 수정 선형 척도비의 축소 환형 강수부 모델을 수립하였다. 벽면의 열전달은 고려하지 않았으며, ECC Film 의 폭은 현재 FLUENT 코드가 적용 가능한 해석 범위인 정체 유동장에 대해서 해석되었다. 즉, 횡 유동(Cross flow) 효과는 고려되지 않았으며, 증기유동에 따른 응축 등도 고려되지 않았다. APR1400 의 실린더형 강수부를 180^{O} 의 반으로 2 등분한 1/2-실린더의 벽면 중앙에 한개의 DVI 노즐을 부착하여 단일 ECC 노즐에 의한 ECC Film 폭을 해석하였다. 따라서 ECC Film 간의 중첩이나 간섭은 본 계산에서 고려되지 않는다.

1/1 APR1400 모델은 DVI 노즐 직경, 주입속도, 강수부 직경 및 강수부 폭이 APR1400 과 동일하다. 축소비가 1/5 인 수정선형 축소 모델은 길이 축소비가 1/4.93 인 기하학적 축소 모델(Modified Linear Scaled Model)의 형상에 대한 DVI 주입조건은 수정 선형 척도해석법이 적용되었다. 따라서, 1/4.93 축소 모델의 강수부 직경, DVI 노즐 직경, 강수부 폭(Gap)은 각각 APR1400 의 1/4.93 의 선형 축소비를 갖는다. 주입 속도는 1/1, 1/2.2(수정선형 축소 비=$1/\sqrt{4.93}$), 1/2.918, 1/4.299 등의 다양한 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.

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

표 2 해석 모델 별 주요 치수

I. Geometry Shape	Symbol	APR1400	1/5 Model	1/7 Model
D/C Outer Dia.	Do	4.63 m	0.9391m	0.661 m
D/C Inner Dia.	Di	4.116 m	0.8349 m	0.588 m
DVI Nozzle Dia.	d	0.2159 m	0.0438 m	0.0308 m
D/C Gap	-	0.254 m	0.0515 m	0.0363 m
Scale Ratio	-	1/1	1/4.93	1/7
II. Injection Condition				
ECC Injection Velocity	V	1.6 m/sec	0.72 m/sec	0.604 m/sec
Scale Ratio	-	1/1	$(1/4.93)^{0.5}$	$(1/7)^{0.5}$

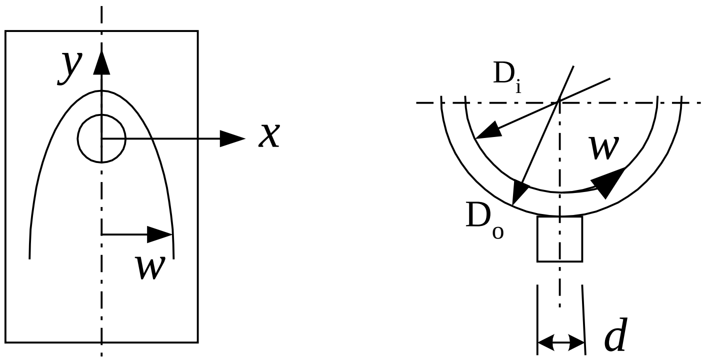


그림 1 Coordinate System

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 DVI 내의 유동특성을 해석하기 위해 3 차원 유한체적법을 사용하는 상용 전산유체 코드인 FLUENT Version 5.5 를 사용하였다. 비상노심 냉각수를 원자로 용기 강수관으로 직접 주입하는 경우 원자로 벽에서의 냉각수의 수막현상을 수치해석적으로 계산하기 위하여 기체-액체의 경계가 명확히 구분되어지는 경우에 적용할 수 있는 VOF(Volume of Fraction) model 을 사용하여 계산을 수행하였다. VOF model 은 체적분율이라는 개념을 도입하여 각 상들을 구분하고, 각 상들이 경계면을 서로 통과할 수 있는 연속체로 가정하여 유동장을 계산하는 방법이다. 체적분율은 고려중인 영역에서 각 상이 차지하는 체적의 비율을 의미하며 수식으로 표현하면 다음 식(1)과 같다.

Volume Fraction;

$$\alpha_q = \frac{V_q}{V_t} \tag{1}$$

여기서 α_q, V_t 와 V_q 는 각각 q 번째 상의 체적분율, 고려중인 영역의 전체체적 및 q 번째 상이 점유하고 있는 체적을 의미한다. 각 제어체적에서 모든 상들의 volume fraction 의 합은 1 이 된다. α_q 에 기초하여 각 셀에서의 물성치와 변수들이 결정되어진다. 각 셀에서 각 상의 volume fraction 은 volume fraction equation 을 계산함으로써 얻어진다. q 번째 상에 대해 이 방정식은 다음 식(2)와 같다.

Volume fraction equation;

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v}.\nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \tag{2}$$

우변항은 생성항을 의미한다. volume fraction 은 1 번째 상에 대해서는 volume fraction Equation 이 계산되어지지 않으나 다음과 같이 식(3)을 이용하여 계산되어진다.

$$\sum_{q=1}^{n} \alpha_q = 1 \tag{3}$$

Continuity equation;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho \vec{v}) = S_m \tag{4}$$

Momentum equation;

단일 운동량 방정식이 계산영역에서 계산되나, 물성치 ρ와 μ를 통하여 각상의 volume fraction 이 고려되어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla.(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla.\left[\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)\right] + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{5}$$

상태량의 계산;

각 수송방정식에 적용되는 상태량은 volume fraction 에 기초하여 각 셀에서 계산되어진다. 예를 들어 2 상유동인 경우 각 셀에서의 밀도는 다음과 같이 주어진다.

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2)\rho_1 \tag{6}$$

일반적으로 n 상유동인 경우 다음과 같이 계산되어진다.

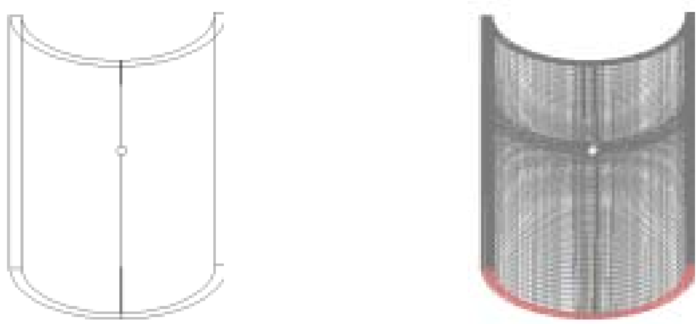
$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \tag{7}$$

점성계수 또한 위와 같은 방법으로 계산되어진다.

2.3 경계 및 초기 계산조건

해석은 DVI 노즐을 통하여 냉각수가 벽면에 주입되고 수막을 형성하는 과정을 모의하는 비정상상태 유동조건의 수치해를 구하였다. 초기조건으로는 계산영역의 내부는 공기로 가득차 있다고 가정하였다. 이 후 주입구를 통하여 냉각수가 유입되어 벽에 닿은 후 벽을 따라 아래로 흐르며, 시간이 지남에 따라 벽면에서의 수막의 형태가 일정하게 유지될 때 까지 계산을 수행하였다. 이런 전체 과정을 계산하기 위하여 비정상상태의 해석이 이루어졌다.

수치계산시 대류항의 차분기법으로는 고차의 도식을 사용하면 해의 수렴성이 좋지 않기 때문에, 수렴해의 정확도는 다소 낮지만 안정적인 해의 수렴성을 보여주는 First Order Upwind Scheme 을 사용하였다. 압력장을 얻기 위해서는 PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 방법을 사용하였다. 격자를 구성하는 좌표계는 경계밀착좌표계(Body Fitted Coordinate System)를 사용하였다. 계산에 사용되어진 격자는 육면체 격자를 사용하였음, 격자의 수는 87,450 개 이고, 그림 2 에 나타내었다. 유입구에서 냉각수의 유입속도는 균일 분포로 가정하였다. 벽에서는 N0 slip 조건을 적용하였다.



(a) configuration (b) mesh system

그림 2 The configuration and mesh system

반복계산시의 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향이완(Under-relaxation)을 도입하였다. 압력장에 대해서는 선형이완(Linear Relaxation)방법을 적용하여 이완계수로서 각 0.3 를 사용하였으며, 속도성분들에 대해서는 0.7 의 값을 부여하였다. 각 시간단계에서 해의 수렴은 잉여값이 10^{-3} 이하이면 수렴한 것으로 간주하였다.

3. 결과 및 토의

척도비가 1:1 인 APR140 의 원형 모델은 냉각수의 주입이 시간되고 2.4 초 후에 수막

의 형태가 안정화 되었으며, 1:1/5 와 1:1/7 의 선형 축소 모델은 각각 0.6 초와 0.5 초 정도에서 안정화된 수막의 형태를 얻을 수가 있었다. 안정화 상태에서의 각 경우의 수막의 형태를 그림 3 에 나타내었다. 여기서 수막의 경계는 벽면을 포함하는 계산 셀에서 건도가 0.5 이하인 영역이다. 반경방향으로 계산 셀의 두께는 표 3 에 정리하였다.

표 3 반경 방향 계산 셀의 두께와 최소 액막 두께.

Scale Ratio	1/1	1/4.93	1/7
D/C Gap	0.254 m	0.0515 m	0.0363 m
셀 두께	1.69 cm	0.34 cm	0.242 cm
최소 액막 두께	0.845 cm	0.17 cm	0.121 cm

3.1 Film 형상

수막의 폭을 DVI 노즐 내경과, 강수부 내경으로 무차원화 시키면 무차원 좌표는 식(8) 및 식(9)와 같다.

Dimensionless Film Height, y^*

$$y^* = \frac{y}{d_{inlet,nozzle}} \tag{8}$$

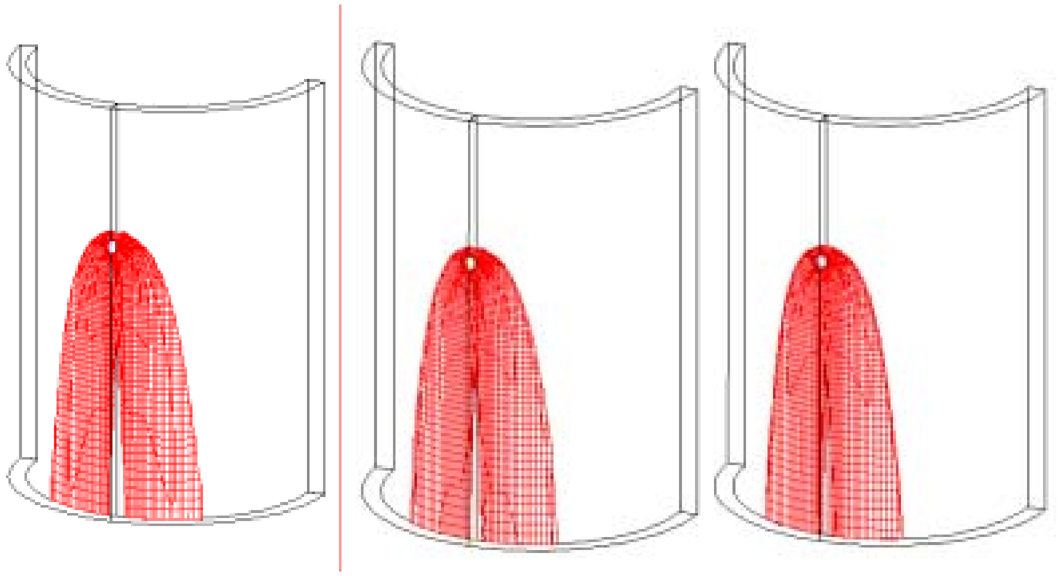
where, d is the diameter of DVI nozzle

Dimensionless Film Width, w^*

$$W^* = \frac{w(y)}{D_i} \tag{9}$$

where, Di is the inner diameter of the downcomer annulus

계산된 수막의 형상을 벽면 셀의 건도율 0.5 를 기준으로 나타내면 그림 3 과 같다. 건도 0.5 는 임의 설정값이며, 이때 1/7 모델에서 수막의 최소 두께가 1.21 mm 를 갖게 된다. 그림 3 은 APR1400, 1/5 및 1/7 선형 축소 모델을 무차원 폭(W^*)과 높이(y^*)로 나타낸 그림이다. 냉각수의 주입속도는 표 2 에 나타낸 바와 같이 각각 1.6 m/sec, 0.72 m/sec, 0.604 m/sec 이다. 가운데 Dry 영역처럼 보이는 곳의 건도율은 0.5 이상인 지역을 의미한다. 즉, 상대적으로 주변보다 얇은 수막이 형성되는 지역을 의미한다. 그 이외의 수막외곽 부분은 공기 지역을 의미하며, 수막 경계면 바깥쪽의 미소 셀의 건도율은 0.5~1 지역일수 있다. 실험의 관측결과에 의하면 횡류가 없을 경우 수막의 경계면이 육안으로 구분될 정도로 두꺼우므로 본 계산의 경계면은 표시한 영역 밖으로 크게 확장되지 않을 것이다.



(a) APR1400 1/1 Model (b) 1/5 Linear Model (c) 1/7 Linear Model

그림 3 ECC film 의 형태

척도에 따른 수막의 분포를 그림 4, 5, 7 에 각각 나타내었다. APR1400 1/1 모델과 이를 선형축소하고 속도비를 수정선형 척도비에 따라 주입하면, 무차원화된 수막의 폭이 잘 일치하고 있음을 보이고 있다. 1/5 선형 축소 모델과 1/7 선형 축소 모델의 주입속도를 1/1 로 하였을 경우 그림 4 의 (d)와 (e)에 나타낸 바와 같이 수막의 확장 폭은 크게 증가한다. 또한, 수막의 가운데 영역에서 수막의 두께가 얇은 영역이 넓어진다. 그림 4 에서 점선으로 표시된 부분은 수막의 확장시 보다 두꺼운 부분을 의미하는데 수막의 바깥쪽으로 확산되는 형태로 나타남을 의미한다. 그림 5 는 측면에서 바라 본 수막의 확산을 나타낸 그림이다. 수정 선형 축소비에 따라 축소한 수막의 무차원 형태가 원형과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그림 5 의 (d) 와 (e)는 주입속도가 1/1 일 때의 수막 확산을 나타내고 있다. 그림에서의 구형 궤적은 입자 덩어리를 의미하는 것으로 판단된다. 그림 7 의 (d)와 (e)에서 와 같이 주입속도가 빠르면 수막이 벽면에서 이탈되는 현상이 발생한다. 따라서 벽면에서의 계산 셀의 건도를 나타내는 그림 4 의 (d)와 (e)는 이탈된 수막을 나타내는 경우 더욱 크게 수막폭이 확장되어 표시되게 된다. 반면에, 주입속도를 수정선형 척도비로 축소한 경우 수막은 벽면에 부착된 형태로 형성된다.

그림 5 의 (a), (b), (c)는 벽에 부딪치는 제트의 형태가 상호 비슷함을 나타내고 있다. 그림 6 에서와 같이 ECC Water Jet 의 궤적의 곡선의 접선기울기는 식 (10)과 같이 표시할 수 있다.

$$\tan\theta = \frac{\vec{g}t}{V_o} = \frac{\vec{g}}{V_o^2} z \tag{10}$$

$$where, t = \frac{z}{V_O}$$

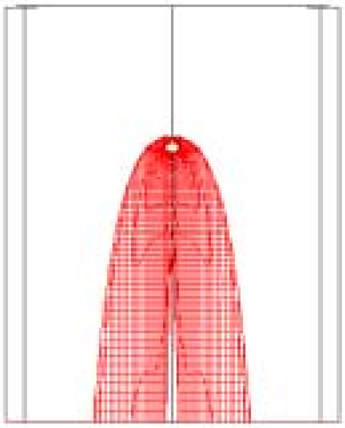
벽면에서의 ECC Jet 궤적이 갖는 경사각의 비는 다음과 같이 수정선형 척도법에 따를 경우 식 (11) 과 같이 보존된다.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\tan\theta_m}{\tan\theta_p}\right]_{R,\,at\,W} &= \frac{W_m}{W_p}\frac{V_{op}^2}{V_{om}^2} \\ &= l_R * (\frac{1}{V_R})^2 \\ &= l_R * (\frac{1}{\sqrt{l_R}})^2 \\ &= 1 \end{aligned} \tag{11}$$

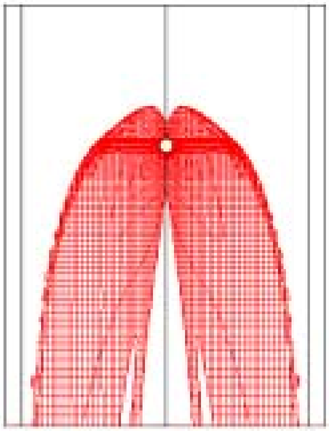
따라서, 벽면에 부딪치는 제트의 주입각도는 서로 일치하므로 Impinging ECC water Jet 의 척도비에 따른 왜곡이 그림 6 의 (a), (b), (c) 에서 각각 나타나지 않는다.

그림 8 은 APR1400 1/1 계산 모델, 1/5 및 1/7 기하학적 수정선형축소 모델의 유동조건을 수정선형 축소법에 따른 주입속도($V_{Injection} = \sqrt{l}$)로 주입한 경우와 APR1400 의 주입속도인 1.6 m/sec 로 주입한 경우의 수막폭을 DVI 노즐직경과 강수부 내경으로 무차원화 시켜 비교한 것이다. 주입속도비가 1/1 인 경우, 수막 폭이 훨씬 더 크게 확산되어 수막폭의 상사성이 상실되고 있다. 수정선형 축소법에 따른 주입속도로 주입한 경우에 대한 수치계산을 실험과 비교할 때 수막폭을 약간 크게 계산하지만 전체적인 상사성 검증 측면에서 상호 비교가 가능한 정도의 의미 있는 결과를 도출하고 있다.

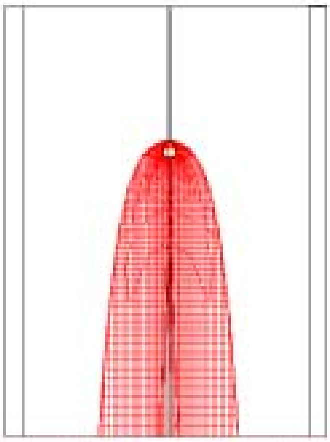
(a) 1/1 Plant



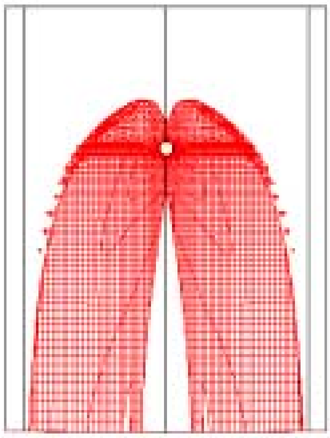
(b) 1/4.93 Linear Model



(d) 1/4.93 Linear Model (v=1/1)

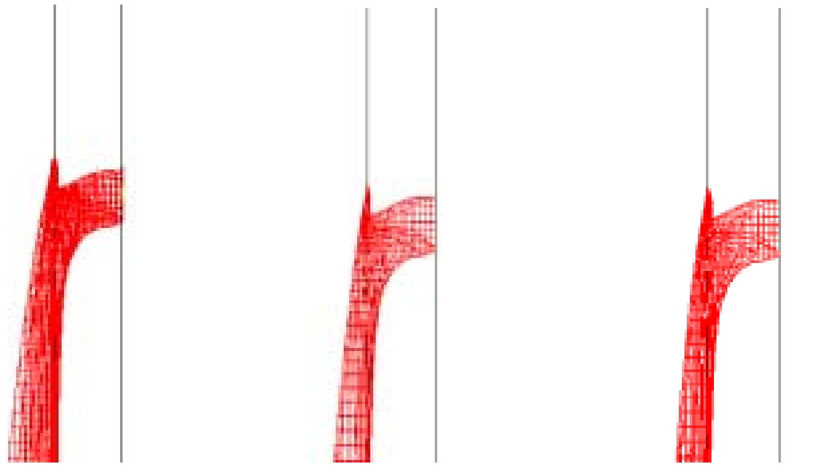


(c) 1/7 Linear Model

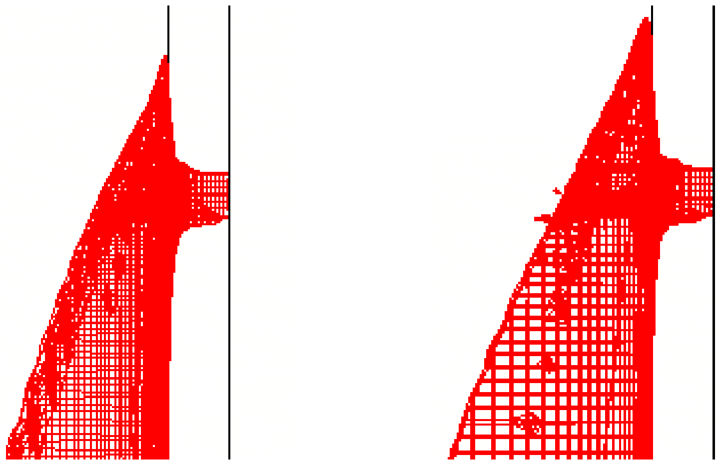


(e) 1/7 Linear Model (v=1/1)

그림 4 정면에서 본 수막 형태



(a) 1/1 Plant (b) 1/4.93 Linear Model (c) 1/7 Linear Model



(d) 1/4.93 Linear Model (v=1/1) (e) 1/7 Linear Model (v=1/1)

그림 5 측면에서 본 수막 형태

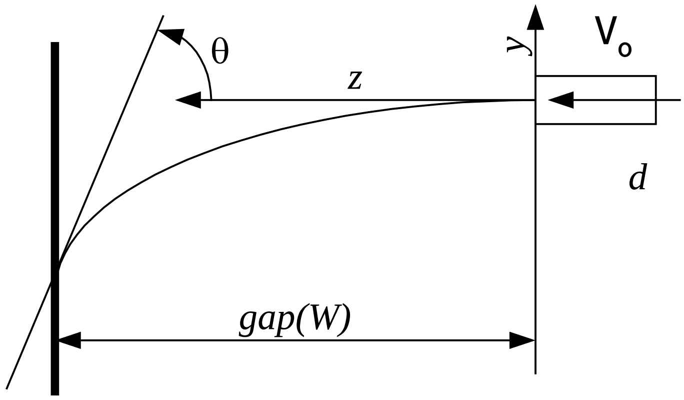
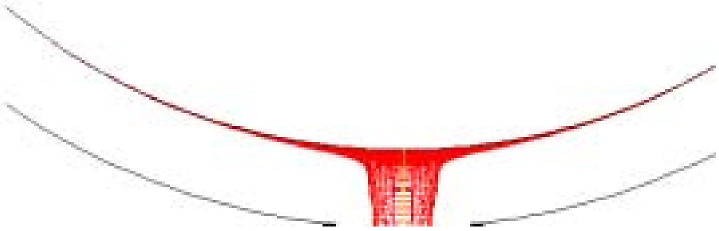
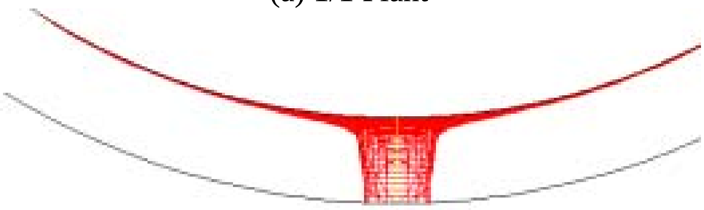


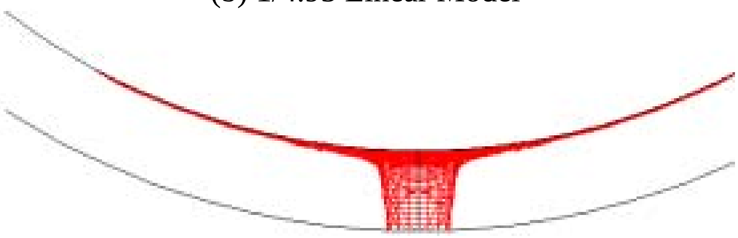
그림 6 ECC Jet 의 궤적



(a) 1/1 Plant

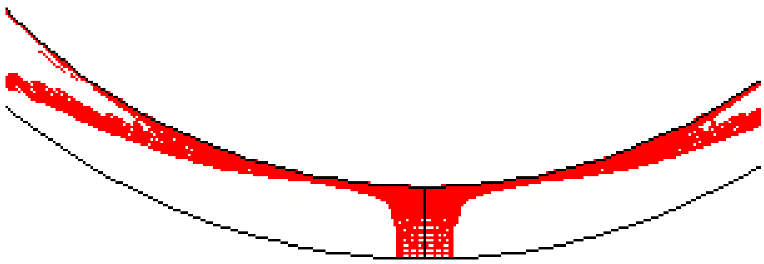


(b) 1/4.93 Linear Model



(c) 1/7 Linear Model

(d) 1/4.93 Linear Model (v=1/1)



(e) 1/7 Linear Model (v=1/1)

그림 7 위에서 본 수막 형태

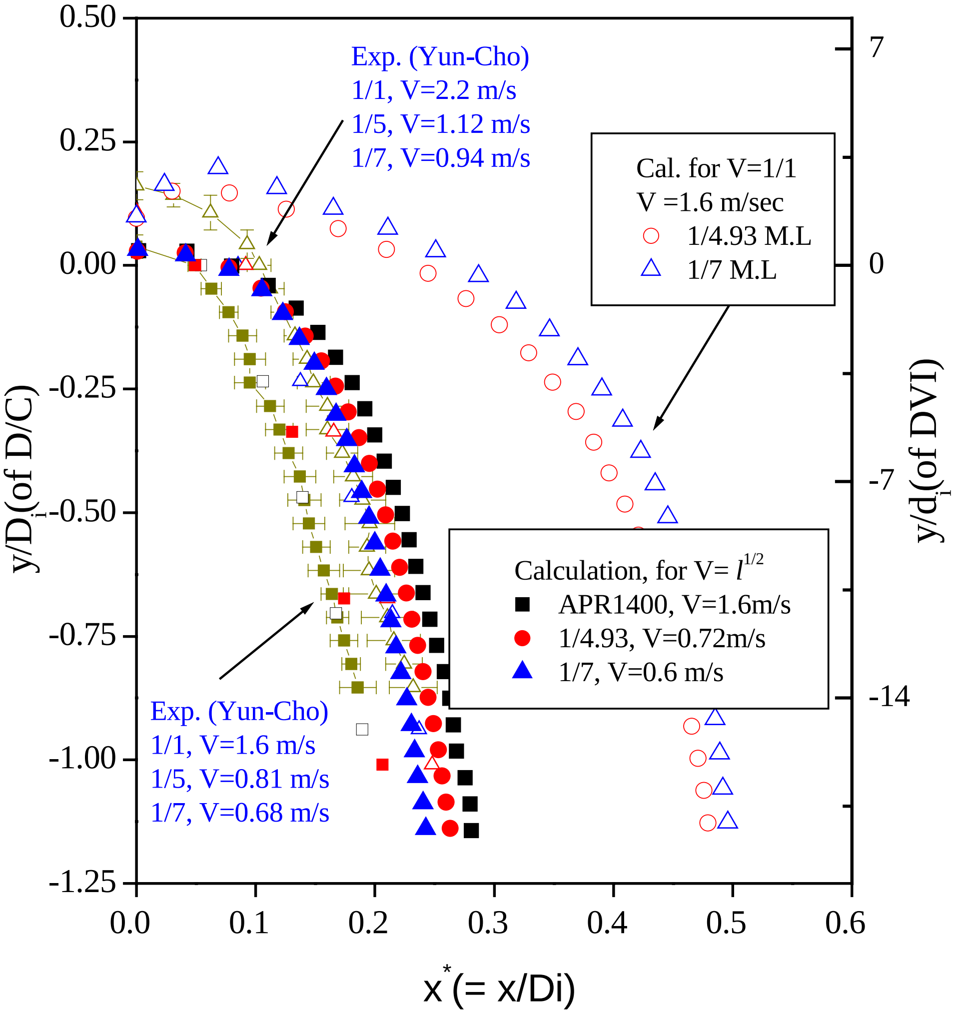


그림 8 무차원 ECC Film 폭

4. 결론

DVI 주입에 따른 수막 폭을 VOF 기법을 사용하여 수치적으로 계산하였다. 아직은 코드가 완벽하게 계산을 수행할 체계를 갖추지는 못하였지만, 그럼에도 불구하고 실험 결과와 비교할 때 상당히 의미있는 수준에 도달한 결과를 제시하고 있다.

수정 선형 축소 효과를 수치적으로 시험하기 위하여 APR1400 의 실제 사이즈를 갖는 1/1 해석모델과 수정 선형 척도법에 따른 1/5 선형 축소 모델에 대한 3 차원 비정상 상태 수치계산을 수행하였다.

여러 가지 다양한 계산결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. (1) 1/5, 1/7 선형 축소 모델의 경우 무차원화시킨 수막 폭은 APR1400 1:1 계산모델과 잘 일치한다, (2) 수치 계산 결과는 실험보다 약간 크게 수막 폭을 계산하지만 실험 오차범위내에 분포하고 있다. (3) CFD 전산코드를 활용한 수막 폭의 계산이 제한적으로 적용 가능하다고 사료된다.

감사의 글

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

참조문헌

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 실험장치의 척도해석", KAERI/TR-1878/2001, 2001.

4) 박찬억 외, " An Estimation of ECC Bypass during the Reflood Phase of a Cold Leg Break LOCA in KNGR", 1999 추계학술대회 논문집, 한국원자력학회, 1999