2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

그루브형 노심베럴 벽면에서의 수막폭 수치계산

NUMERICAL SIMULATION OF ECC WATER FILM SPREADING WIDTH ON A GROOVED CORE BARREL WALL

Tae-Soon Kwon [1], Choeng-Ryul Choi [2], Chul-Hwa Song [1]

1: Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Rep. of Korea, tskwon@kaeri.re.kr
2: Anyang University, Anyang, Rep. of Korea, crchoi@anyang.ac.kr

요약

그루브형 벽면에서 비상노심냉각수 수막의 퍼짐 폭을 평가하기 위하여, 수직으로 그루브가 난 강수부 벽면과 매끄러운 강수부 벽면의 수치적 모델을 수립하였다. 수막 퍼짐폭과 수막의 파괴를 모사하기 위하여 1/1 모델과 1/5 축소비의 모델을 평가하였다. 해석결과 매끄러운 벽면의 수막 퍼짐폭이 그루가 있는 벽면의 것 보다 더 넓게 퍼졌다. 결론적으로, 파단 저온관간 근처의 비상노심냉각수 우회율은 그루브에 의해 더 증가할 것이란 결론을 얻었다.

ABSTRACT

To evaluate the ECC water film spreading width on the grooved wall, numerical models of smooth downcomer and vertically grooved-downcomer walls have been considered. The scaled-down models of 1/1 and 1/5 have been tested to evaluate the groove effects on the film spreading width and break-up. The result showed that the ECC water film spreading width on a smooth wall was wider than that of the grooved wall. Consequently, we obtained the conclusion that the ECC bypass fraction would be increased at near the broken cold leg in the case of the grooved wall.

1. 서론

비상노심냉각수의 수막분포는 우회율에 직접 영향을 미치는 중요한 요소중 하나이다. 특히, 강수부 파단 저온관 근처에서의 수막의 분포는 파단 저온관의 흡입영역의 크기이내에 분포하게 되면 모두 파단저온관으로 배출되게 되므로 우회율 증가에 크게 영향을 미칠 수 있다. 이러한 매끄러운 표면을 갖는 강수부 벽면에 대비되는 개념으로 강수부 벽면에 작은 돌기의 그루브를 부착하면 주유동인 횡유동으로 부터 직각으로 회전축을 갖는 와류를 형성시킬 수 있으며, 이로부터 액적 입자를 포집할 수 있다. 본 논문에서는 그루브가 노심배럴면에 형성될 경우에 주입되는 비상노심냉각수의 퍼짐폭이 미치는 영향을 사전 평가하고자 한다. 강수부 실린더 축과 나란하게 수직의 그루브를 강수부의 원자로용기 벽면과 노심배럴의 외주면에 부착했을 때, 주입되는 비상노심냉각수의 수막 퍼짐 정도를 사전 평가하고자 함은 파단 저온관 근처에서의 비상노심냉각수 수막의 확장폭에 따른 우회율 저감정도를 예측할 수 있기 때문이다. 그루브의 부착에 따라 수막의 확장폭이 감소하게 된다면 파단 저온관 근처에서의 비상노심냉각수 우회율 증가를

예상할 수 있다. 본 연구에서 다루는 전산모델은 매끄러운 평판, 그루형 평판, 매끄러운 곡률판, 그루브형 곡률판 등에 대해 단일 주입노즐에 대한 수막퍼짐을 VOF(Volume of Fraction) 방법을 사용하여 평가하였다.

2. 해석 모델

곡률 및 평판의 모델은 표 1 과 같이 APR1400 대비 1/1 실물크기의 노심배럴 모델과 1/5 축소모델을 대상으로 하였다.

표 1. APR1400 대비 1/1 실 크기 모델 및 1/5 축소 모델.

Geometry shape	Symbol	1/1 model (full-scale)	1/5 model
Downcomer O/D [m]	D_O	4.63	0.9391
Downcomer I/D [m]	D_I	4.116	0.8349
DVI nozzle I/D [m]	d	0.2159	0.0438
Downcomer gap [m]	g	0.254	0.0515
Scale ratio	-	1/1	1/4.93
Injection condition of ECC			
Injection velocity [m/s]	V_{water}	1.6	0.72
Scale ratio	-	1/1	$1/\sqrt{4.93}$

그림 2 는 1/1 실크기 모델의 개념도를 나타내고 있으며, 그림 3 은 표 1 에 나타낸 비율에 따른 각 모델의 3 차원 모형을 나타내고 있다.

2.1 지배방정식

각 상의 체적분율은 다음과 같다.

$$\alpha_q = \frac{V_q}{V_{total}} \tag{1}$$

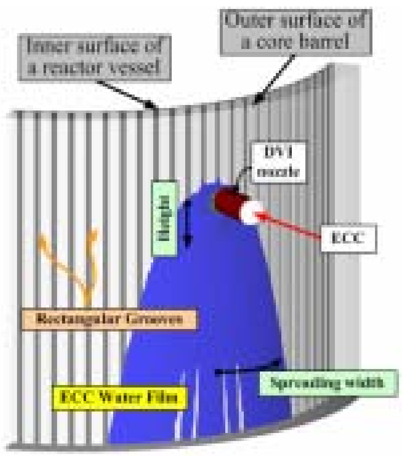
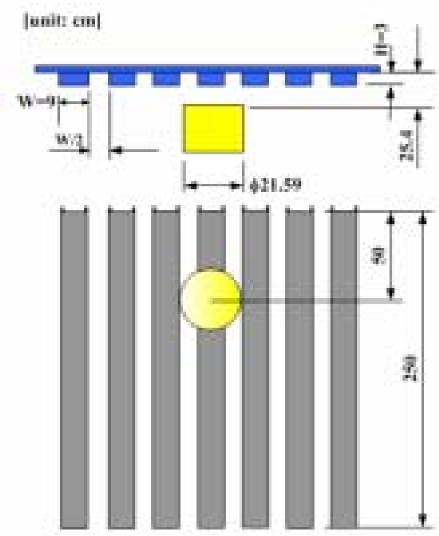
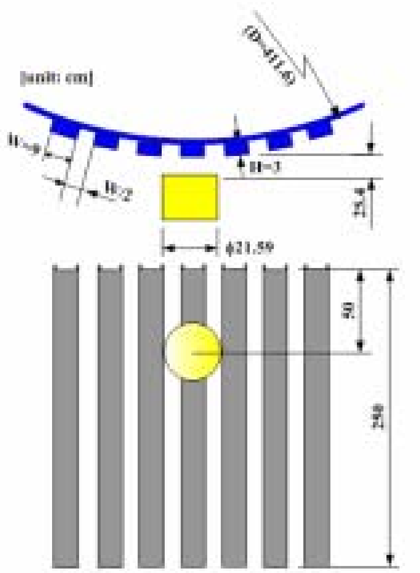


그림 1. 그루브형 곡률판 평가 개념도

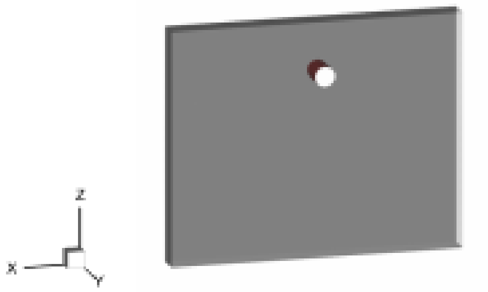


(a) flat wall

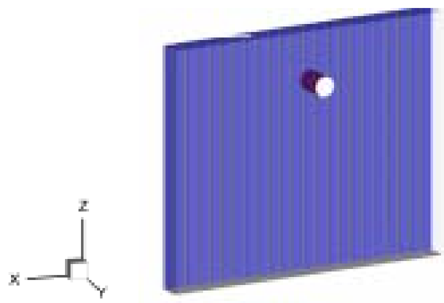


(b) curved wall

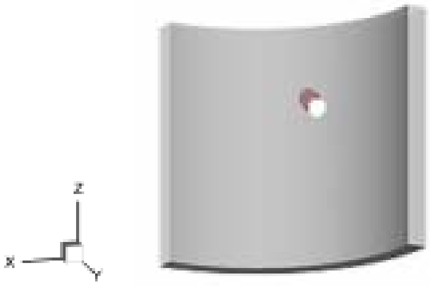
그림 2. 1/1 모델 (1:1 model).



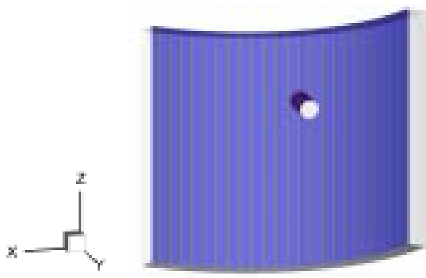
(a) smooth wall without a groove



(b) smooth wall with grooves



(c) curved wall without a groove



(d) curved wall with grooves

그림 3. 해석 도형 3 차원 형상

여기서, α_q 는 q 상의 체적분율을, V_q 는 q 상의 체적을, 와 V_{total} 는 총 체적을 나타낸다. 모든 상의 체적분율의 합은 1 이다.

체적분율 방정식은 다음과 같다.

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

위 방정식의 우변항은 생성항을 의미한다.
주상(primary phase)의 분율은 다음의 관계식에 의해 구한다.

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

운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla.(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla.\left[\mu(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^{T})\right] + \rho\vec{g} + \vec{F} \tag{4}$$

밀도는 각 분률에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1-\alpha_2)\rho_1 \tag{5}$$

평균밀도는 다음과 같다.

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \tag{6}$$

다른 모든 물성도 위와 동일한 방법으로 구한다.

2.2 해석과정

비정상 유동해를 구하였다. 초기에는 유동장이 공기로 차있는 공간을 가정하였으며, 비상노심냉각수가 벽면으로 주입되는 과정에 대하여 수막의 퍼짐을 구하였다. 계산은 수막의 형상이 변하지 않을 때까지 계속하였다. "Body-fitted" 좌표계를 사용하였으며, "first-order upwind"을 사용하였다. 압력은 PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 방법론을 사용하여 해를 구하였으며, 비상노심냉각수의 속도는 균일하고, 벽면에서는 "No-slip" 조건을 적용하였다.

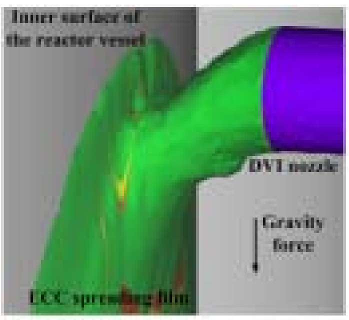


그림 4. Film Shape

3. 해석 결과

매끈한 평판, 그루부착 평판, 매끈한 곡면, 그루브 부착 곡면의 각 쌍에 대하여 1/1 모델과 1/5 모델을 비교하였다. 그림 4 는 수막의 형성 모양을 나타내고 있다. 그림의

하부 방향이 중력의 방향이며, 액상의 분류에 따라 필름의 폭은 다소 변화될 수 있다. 벽면에 부딪친 액상의 형성 모습을 잘 보여 주고 있다. 수막의 퍼짐은 주입속도에 따라 약간 달라지며 되말림 수막의 높이와 수막깨짐의 분포도 속도에 따라 변화한다. 본 결과는 단일 노즐에 의해 형성되는 수막이므로 이웃한 수막 사이의 간섭이나 중첩은 모의되지 않았다.

수막의 폭과 높이는 다음과 같이 강수부의 직경으로 무차원화하였다.

$$W^* = \frac{ECC\ spreading\ film\ width}{Inner\ diameter\ of\ downcomer} = \frac{W}{D_I} \quad (7)$$

$$H^* = \frac{Height\ from\ DVI\ nozzle\ (z-dir.)}{Inner\ diameter\ of\ downcomer} = \frac{Z}{D_I} \quad (8)$$

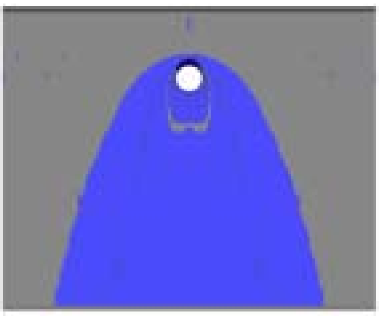
그림 5 는 1/1 실크기 모델을, 그림 6 은 1/5 모델의 결과를 각 각 나타낸 것이다. 그림 5(a)와 그림 6(a)를 비교하면, 평판의 경우 축소 모델의 수막 퍼짐폭이 작게 계산되었다. 이는 수정형 선형척도법을 곡률이 존재하지 않는 평판에 적용하여 곡률 보상이 이루어지지 않았기 때문에 퍼짐 모멘트비가 원통형 실린더에서 보다 더 작아서 발생되는 현상이다. 이는 매끈한 곡률면의 경우인 그림 5(c)와 그림 6(c)를 비교하면 확인할 수 있다. 1/1 실 크기 모델이며 평판의 경우인 그림 5(a)와 그림 6(a)를 비교하거나, 곡면의 경우인 그림 5(c)와 그림 5(d)를 비교하면 그루브형의 경우가 수막의 퍼짐 폭이 작음을 알 수 있다. 1/5 축소 모델의 경우도 동일한 결과를 보이고 있다.

그림 7 은 수막의 폭을 강수부 직경으로 무차원화시켜 수막의 퍼짐폭을 나타낸 곡선이다. 그림 5 와 그림 6 에서 설명한 바를 수치적으로 확인 할 수 있다. 즉, 강수부의 노심배럴면에 부딪친 수막이 매끄러운 표면의 실린더보다 그루브를 부착한 강수부 배렐에 부딪친 수막의 퍼짐 폭이 더 작음을 의미한다. 이러한 필름의 퍼짐폭의 특성에 미루어 파단면에서의 비상노심냉각수 우회율은 오히려 증가 할 수도 있을 것으로 판단된다. 수막이 파단 저온관의 흡입영역을 크게 벗어나지 못할 것이기 때문이다.

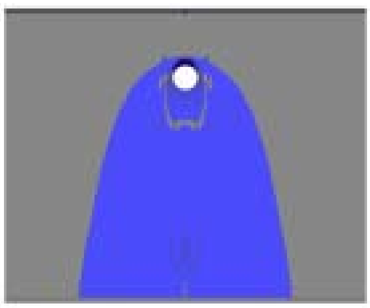
4. 결론

그루브를 부착한 강수부의 노심배럴면에서 비상노심냉각수의 수막의 퍼짐폭을 평가하기 위하여 APR1400 의 강수부 크기에 준하는 1/1 실크기 모델과 1/5 축소 모델에 대하여 수직으로 그루브를 설치한 모델과 매끄러운 표면의 모델에 대하여 각각 비교 계산하였다.

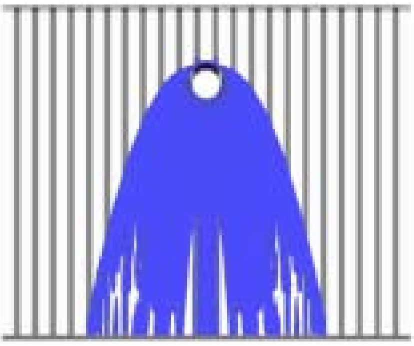
강수부의 노심배럴면에 부딪친 수막은 퍼짐폭은 매끄러운 표면의 실린더에서 보다 그루브를 부착한 강수부 배럴에 부딪친 수막의 퍼짐 폭이 더 작게 계산되었다. 이러한 필름의 퍼짐폭의 특성에 미루어 그루브를 부착한 노심배럴의 강수부에서는 파단면 근처에서 오히려 비상노심냉각수 우회율이 증가할 수도 있을 것으로 판단된다.



(a) smooth wall

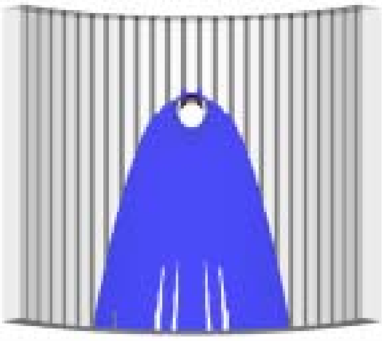


(a) smooth wall



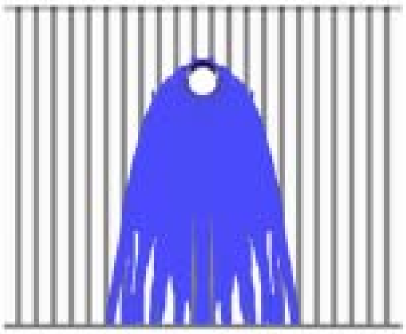
(b) flat wall with grooves

(c) curved wall without grooves

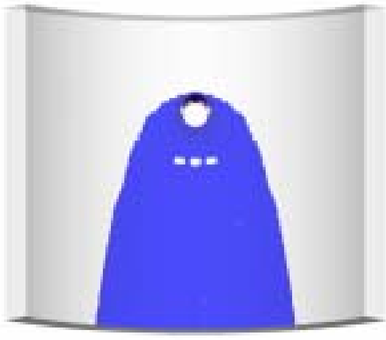


(d) curved wall with grooves

그림 5. ECC Film Shape (1/1 model).



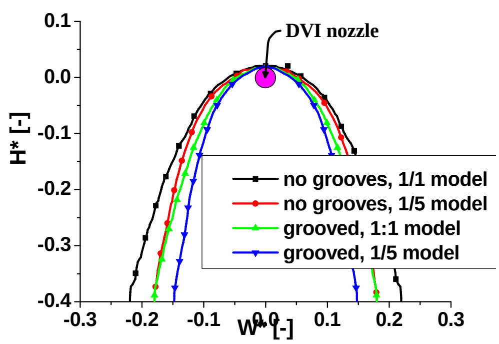
(b) flat wall with grooves



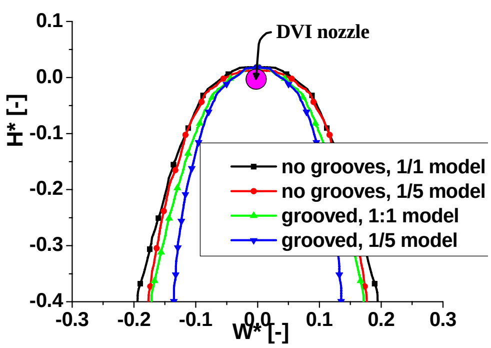
(c) curved wall without grooves

(d) curved wall with grooves

그림 6. ECC Film Shape (1/5 model).



(a) flat wall



(b) curved wall

(c) 1/1 model (d) 1/5 model

그림 7. ECC Water Film Spreading Width

참고문헌

1. J.O. Hinze, 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill Publishing Co., New York.
2. Haider and O. Levenspiel, 1989, Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles. *Powder Technology*, **Vol. 58**, pp.63-70.
3. P. S. Damerell, 1993, International Agreement Report, *NUREG/IA-0127 (GRS-101, MPR-1346)*, Location, July, Vol. n, pp.134-156.
4. S. V. Patankar, 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, D.C..
5. T. S. Kwon, C. R. Choi, and C.-H. Song, 2003a, Three-dimensional analysis of flow characteristics on the reactor vessel downcomer during the late reflood phase of a postulated LBLOCA, *Nuclear Engineering and Design (NED)*, **Vol. 226**, pp.255-265.
6. T. S. Kwon, C.-H. Song, B. J. Yun, and H. K. Cho, 2003b, Effect of the Yaw Injection Angle on the ECC Bypass in Comparison with the Horizontal DVI, *Nuclear Engineering and Design (NED)*, **Vol. 225**, pp.295-304.