2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

그루브형 노심베럴 벽면에서의 비상노심냉각수 우회현상 수치계산

NUMERICAL SIMULATION OF ECC BYPASS BEHAVIOR ON A GROOVED ANNULUS 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

환형 강수부 벽면에 작은 사각 단면을 갖는 수직 그루브를 부착하는 강수부에 의한 비상노심냉각수 침투효과를 전산코드를 이용하여 수치적으로 모사하였다. 그루부내에서 작은 규모의 와류 유동구조가 DVI 방식의 안전주입계통을 갖는 원자로의 대형 냉각재 상실사고 발생시 후기 재관수 기간 동안에 비상노심냉각수의 우회율을 감소시키기 위해 고속의 강수부 횡류에 의해 유발되었다. 그루브형 환형 강수부 벽면의 비상노심냉각수 우회율 저감 성능을 평가하기 위하여 강수부의 바닥에서의 입자 하향 침투율을 평가하였다. 그루브사이에서 액적 입자를 포집하는데 와류경계지역의 중요성을 보여주고 있다. 비상노심냉각수의 포집율을 피치와 길이비가 감소함에 따라 증가한다. 이러한 사실은 비상노심냉각수의 액적 우회율은 그루브 간격이 증가함에 따라 증가함을 의미한다. 결론적으로, 정체 와류와 그루브에 의해 유발되는 곡선형 유선은 비상노심냉각수의 하향 침투를 강화시키리라는 결론을 얻었다.

ABSTRACT

The effect of ECC penetration by the grooved downcomer having a vertically small rectangular-shaped cross-section on the downcomer annulus wall has been numerically simulated by CFD code. The small scale vortex structures in the grooves are induced by the high-speed crossflow in the downcomer to reduce the ECC bypass during a late reflood phase of LBLOCA in a reactor with a DVI type of safety injection system. To evaluate the ECC bypass reduction capability of the grooved downcomer annulus wall, the particle penetration fraction was evaluated at the bottom of the downcomer. The results show the importance of the vortex edge area to capture the liquid drop between the adjacent grooves. The capturing rate of ECC droplets is increased as the groove pitch-to-length ratio is decreased. This means that the bypass rate of ECC droplets may increase with the interval of grooves. Consequently, we obtained the conclusion that the stagnant vortex and the curved flow stream induced by grooves would enhance the ECC penetration.

1. 서론

강수부 직접주입(DVI)형 비상노심냉각 계통을 장착한 APR1400 에서는 비상노심냉각수의 직접우회는 강수부의 고속 횡류에 의해 발생하며, 이러한 고속 횡류는 대형

냉각재상실사고에서는 피할 수 없는 강수부의 물리적 유동 현상이다. 그러나, 이러한 고속의 강수부 횡유동이 발생하는 강수부에 수직으로 사각 그루브를 설치하면 그 단면에는 이차와류가 형성된다. 이러한 와류는 수직 그루브에 갖힌 유동구조를 갖는다. 즉, 횡방향 가속력이 전혀 없는 정체 와류에 포집된 비상노심냉각수 수막이나 액적 입자는 수직 그루브를 타고 중력에 이끌려 강수부 하부로 강하할 수 밖에 없게 된다. 이러한 유동원리를 활용하기 위하여 강수부의 원자로 용기 벽면과 노심베럴 외면에 수직으로 그루브를 설치한 강수부를 구상할 수 있다. 강수부에서 노심배럴의 벽면을 따라 횡방향으로 흐르는 입자의 구심가속도의 방향은 노심배럴 벽면의 법선과 반대방향이므로 쉽게 노심배럴의 표면으로부터 이탈하는 반면에, 원자로용기의 벽면을 따라 횡으로 흐르는 입자의 구심가속도의 방향은 원자로용기 벽면의 법선방향과 일치하므로 원자로용기 벽면으로 부터 쉽게 이탈되지는 않는다. 다만 횡방향 유동에 따라 원자로용기의 벽면을 따라서 좌우로 흐르게 된다. 이러한 원리로 강수부 횡류에 존재하는 액적 입자가 균일할 때, 원자로용기의 벽면 강수부에 설치한 그루브에 포집되는 비상노심냉각수 입자의 량이 노심배럴 벽면에 설치한 그루브에 포집되는 량보다 클 것임을 예측할 수 있다.

한국원자력연구소의 MIDAS (Multi-dimensional Investigation in Downcomer Annulus Simulation) 실험장치에서 생산되는 물-증기 실험결과를 분석하기 위해 시도된 강수부의 다차원 유동구조에 대한 해석결과를 보면, 강수부 횡유동은 저온관 지역의 고도에 준하는 지역에 고루 분포함을 보이고 있다(Kwon et al., 2003). 따라서, 강수부의 그루부는 이들 지역을 수직으로 포함하는 높이에 설치하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다. 강수부의 상하부에서는 회유동의 크기가 상대적으로 약하기 때문에 그루브의 와류가 상대적으로 약하므로 액적의 포집력을 기대하기 어렵기 때문이다.

그림 1 은 강수부에서의 유선을 나타낸 그림이다(Kwon et al., 2003). 그림 2 는 원자로용기 벽면과 노심배럴 외주면에 설치한 그루브형 강수부의 개념을 나타내고 있다. Yaw 주입각 물-공기 실험(Kwon et al., 2003)에 의하면 파단 저온관 근처에 주입된 비상노심 냉각수는 파단류에 휩쓸려 나가는 경향이 매우 강하다. 따라서 파단저온관 근처에 밀집된 비상노심냉각수 수막은 오히려 비상노심냉각수의 우회율을 증가시키는 역효과를 발생시킬 수 있다.

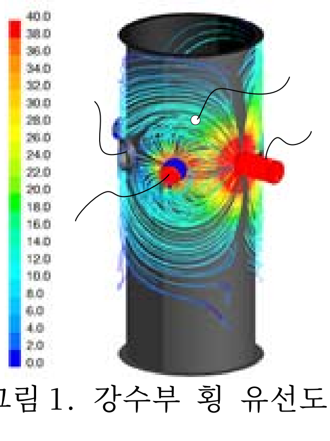


그림 1. 강수부 횡 유선도

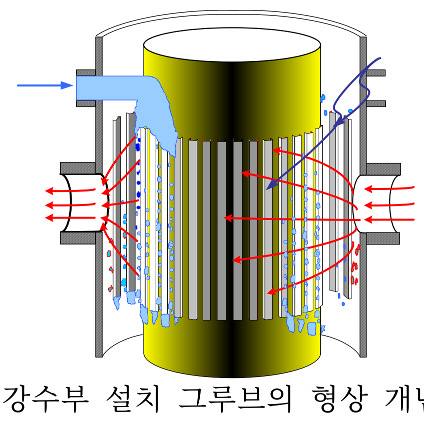


그림 2. 강수부 설치 그루브의 형상 개념도

따라서, 파단저온관 방향의 DVI 에 의한 수막은 가급적 넓게 퍼트리고 하방으로 떨어지는 비상노심냉각수를 그루부에 포집하는 형태가 바랍직하다. 이러한 원리를 종합하면 그루브의 상부는 저온관과 DVI 노즐 사이 정도에 위치하는 것이 유리하다고 생각되면 이러한 원리를 종합하면 그림 2 와 같은 형상을 고려할 수 있다.

2. 그루브 효과 분석 모델

그루브의 효과가 가장 크다고 판단되는 원자로용기의 벽면에 설치한 사각 그루브 효과를 3 차원 유동유동장 모델로 해석하기 위하여 그림 3 과 같은 해석형상을 고려하였다. 그루부는 속이 찬 사각형 단면을 갖되, 횡 방향 피치는 그루브 길이의 비로 증가시켜 변화시킨다. HPSI 가 주입되는 상황에 준하는 모사 조건을 고려하였다.

횡류의 속도는 $10m/s$ 와 $1kg/s$ 의 물이 주입되며 액상의 입자 직경은 $0.1mm$ 균일한 경우이다. 공동(cavity)의 길이(L) 와 높이(H)의 비가 1.9 (model-1), 5.7 (model-2), and 9.4 (model-3)에 대하여 각각 비교하였다. 그루브의 높이는 3 cm 로 하였다. 현실적으로 강수부의 간격의 1/25~3/25 *Gap 을 적용 가능한 그루부의 높이로 생각되기 때문이다.

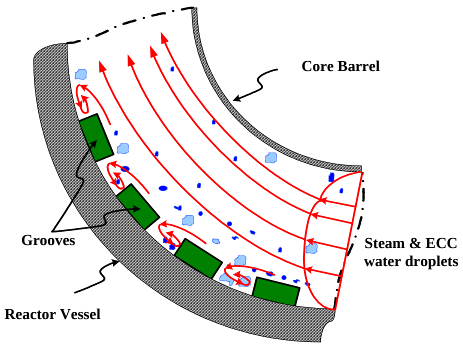


그림 3. 단순화된 해석 모델

표 1. Dimension of Geometry

Geometry shape	Symbol	1/1 model (full-scale)
Downcomer O/D [m]	D_O	4.63
Downcomer I/D [m]	D_I	4.116
Downcomer gap [m]	g	0.254
Groove height [m]	H	3
Groove width [m]	W	9
Scale ratio	-	1/1

2.1 수치 모델

수치계산은 3 차원 정상상태계산을 수행하였다. 연속방정식과 운동량방정식과 표준. $k-\varepsilon$ 난류모델을 적용하였다. 입자 방정식은 Lagrangian 기법을 사용하였다.

연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i' u_j'}) \tag{2}$$

위 방정식 2 의 Reynolds 응력은 근사적으로 모사하였으며, Boussinesq 가설(J.O. Hinze, 1975)의 Reynolds 응력은 다음과 같다.

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

난류운동에너지, k,와 난류소산율, ε,은 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

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

이 방정식에서, G_k 는 평균속도 구배로 인한 난류에너지 생성을 나타낸다. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 는 각각 상수이다. σ_k와 σ_ε는 k과 ε에 대한 난류 Prandtl 수를 나타낸다.

난류점성계수, μ_t , k와ε 로 나타낸다

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6}$$

그외의 모델 상수는 다음과 같다..

$$C_{1\varepsilon}=1.44,\ C_{2\varepsilon}=1.92,\ C_\mu=0.09,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.3 \tag{7}$$

<u>입자 운동방정식</u>

Lagrangian 격자계에서 입자지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{du_p}{dt}=F_D(u-u_p)+\frac{g_x(\rho_p-\rho)}{\rho_p}+F_x \tag{8}$$

여기서, F_D 는 입자의 저항력이다.

$$F_D=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^{\ 2}}\frac{C_D\,\mathrm{Re}}{24} \tag{9}$$

여기서, u 는 액상 속도, u_p 는 입자 속도, μ 는 유체 분자점성계수, ρ 유체 밀도, ρ_p는 입자밀도, 그리고 d_p는 입자 직경이다. Re 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho d_p \left| u_p - u \right|}{\mu} \qquad (10)$$

저항계수, C_D, 는 다음과 같다.

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}}\left(1 + b_1 \mathrm{Re}^{b_2}\right) + \frac{b_3 \mathrm{Re}}{b_4 + \mathrm{Re}} \qquad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} b_1 &= \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2) \\ b_2 &= 0.0964 - 0.5565\phi \\ b_3 &= \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3) \\ b_4 &= \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3) \end{aligned} \qquad (12)$$

의 Haider & Levenspiel (1989) 모델을 사용하였다.

형상계수, ϕ, 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{s}{S} \qquad (13)$$

여기서, s 는 입자 체적과 동일한 구의 표면적을 나타내며, S 는 입자의 실제 표면적을 나타낸다

해를 구하기 위하여, First-order upwind scheme 을 staggered grid system 에 대하여 적용하였다. 압력-속도해는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, Patankar, 1980)를 이용하여 구하였으며, 벽면에서는 No-slip 조건을 적용하여 정상해를 구하였다.

3. 해석결과

APR1400 강수부와 동일한 크기를 갖는 해석 모델의 원자로용기 벽면에 사각형 그루브를 부착한 강수부에서의 횡유동에 따른 유선을 그림 4 에 나타내었다. 횡류와 액적입자는 그림의 왼쪽에서 유입된다. 또한 이 높이는 HPSI 가 주입될 때 하부에서의 ECC Film 의 수막 두께를 고려하였을 경우 포집 가능한 그루브의 높이를 고려한 크기이다.

공동(Cavity)의 길이 (L) 와 높이 (H) 의 비가 1.9 (model 1) 에서 5.7 (model 2), 그림 5 와 그림 6 에 나타내었다. 그림 (a)는 속도를, (b) 는 액적의 궤적을, (c) 는 우회 유선을, (d) 는 액적의 괘적을 각각 나타내고 있다. 그림 5(a) 에서는 단일 와류가 나타나고 있다. 이에 비해 그림 6(a)에서는 그루브의 후면(Backward face)에는 대형 와류가, 그루브의 전면(Front Face)에는 소형 와류가 나타나고 있다. 그림 5(b) 와 그림 6(b) 는 비상노심냉각수 액적의 입자의 궤적을 각각 나타내고 있다. 유선의 형태는 원심력에 의해 액적이 구심으로부터 멀어지는 방향을 향하여 바깥쪽 벽면으로 휘어짐을 보이고 있다. Forward Step 에 발생한 소형 와류에 갇힌 액적은 중력에 의해 수직

하방향으로 낙하됨을 보이고 있다. 이때, 그루브 길이와 높이의 비가 작은 모델-1 이 더 많이 낙하함을 보이고 있다.

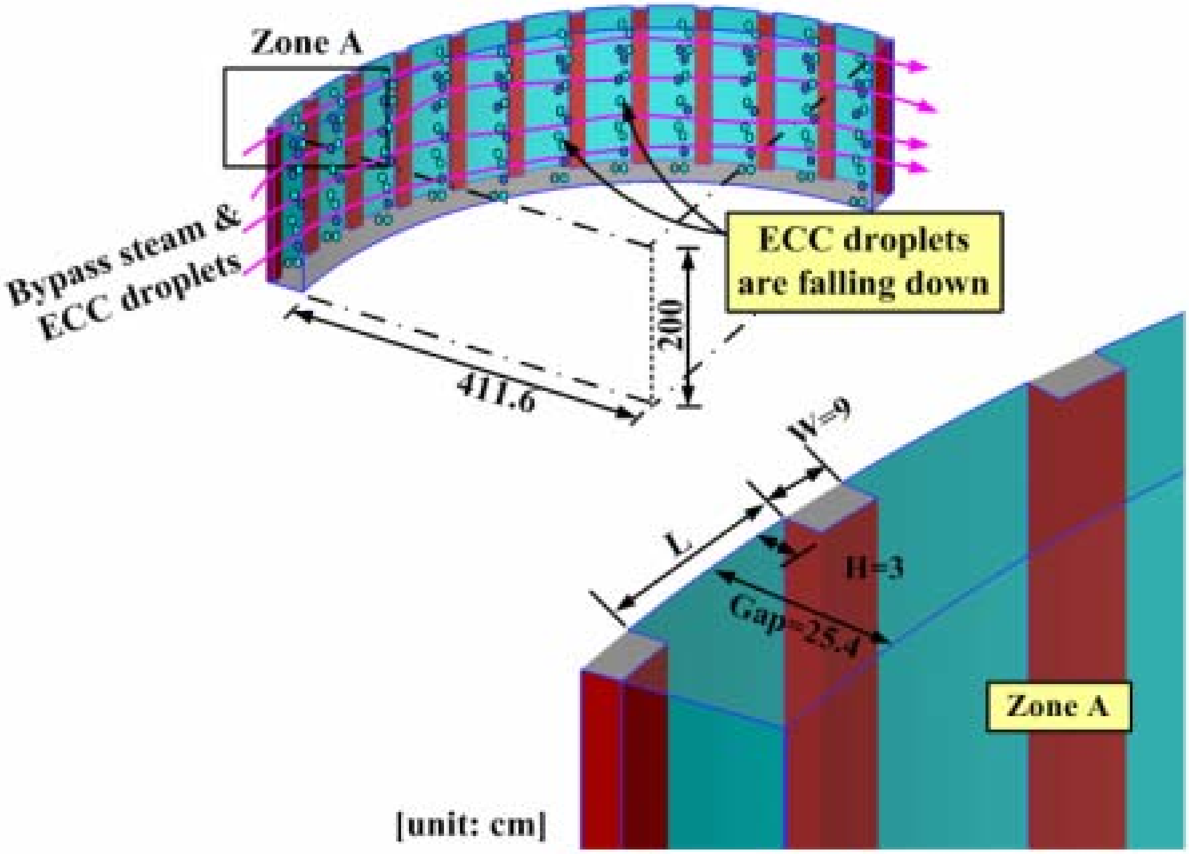
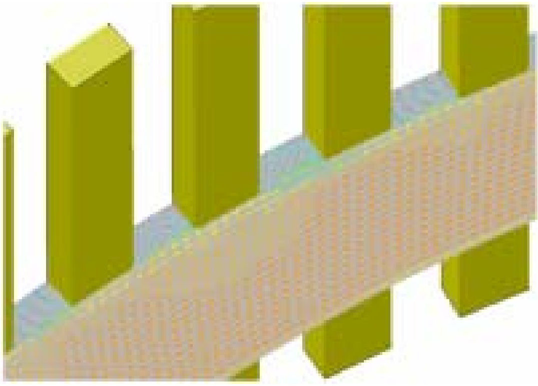


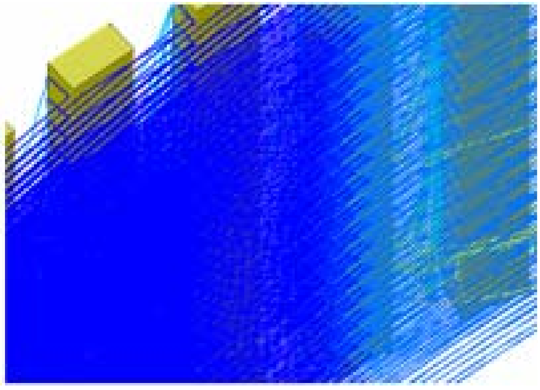
그림 4. Configuration of model (H:L = 1: 5.7).

그림 5 와 그림 6 의 (c) 와 (d) 는 액적의 속도 벡터장을 나타내고 있다. 비상노심냉각수의 액적중 일부는 낙하중에 다시 횡류에 휩쓸려 나감을 보이는 형태이다. 그루브 길이와 높이의 비가 작은 모델에서 액적의 우회 비율이 더 작음을 확인할 수 있다. 즉, 액적의 우회 비율은 그루브 길이와 높이의 비가 증가 할 수록 더 증가한다. 그루브의 피치가 커질 때, 액적의 일부는 그루부와 그루부의 사이의 원자로용기 외면에 재부착점이 형성됨에 따라 와류에 완전하게 포집되지 못하고 횡류에 다시 이끌려 우회되는 현상이 나타난다. 그러므로, 액적입자는 그루브와 그루브 사이의 와류에 포집되어 강한 횡류에 노출되지 않아야만 횡류를 따라 우회되지 않는다. 따라서, 재부착점은 그루브와 그루브 사이의 바닥에 존재하지 않는 것이 좀더 우회율 저감에는 유리하며, 그루브 피치를 작게 하면 된다.

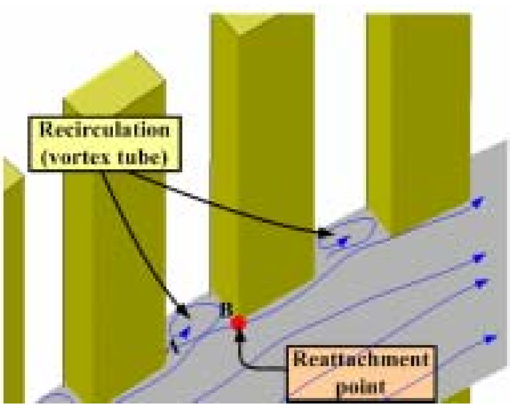
그림 7 에는 그루브의 피치를 변화시킨 모델에 대해 주입점으로 부터의 거리에 따른 강수부 하부로의 침투 액적 수를 나타낸 그림이다. 주입점으로 부터 짧은 구간에서와 먼 구간에 대해 각각 그루브 피치가 작은 경우가 동일한 속도에 대해 하방 침투 액적 수가 더 많음을 나타내고 있다.



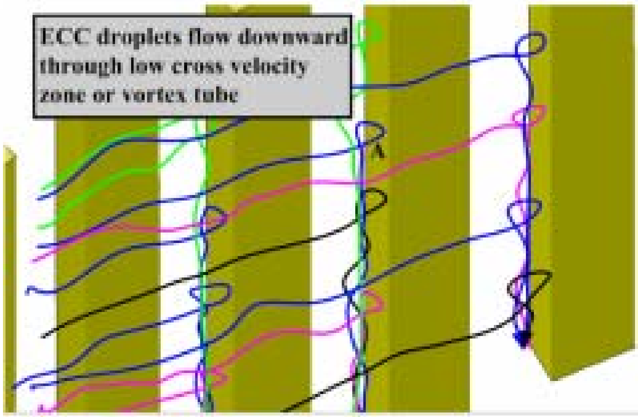
(a) velocity vectors of bypass steam



(b) traces of ECC droplets

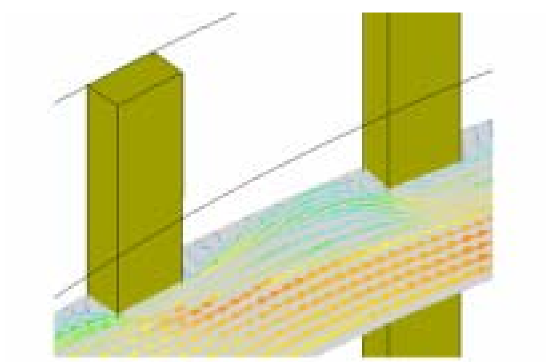


(c) flow pattern of bypass steam

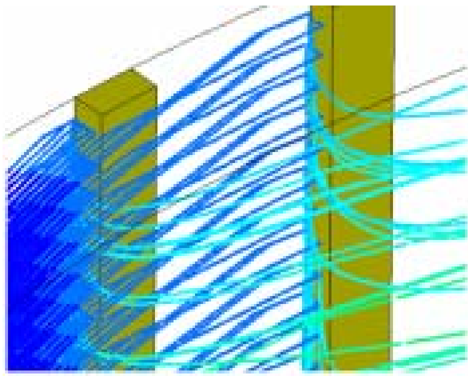


(d) flow pattern of ECC droplets

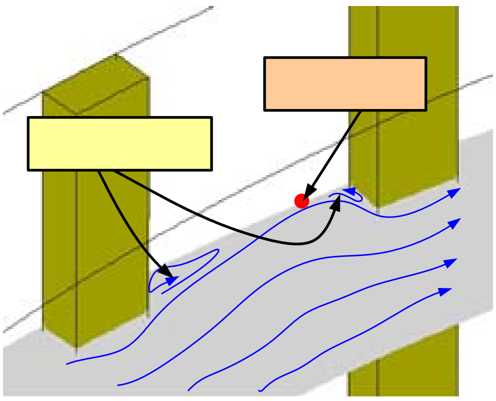
그림 5. Flow patterns of ECC droplets (H:L = 1: 1.9).



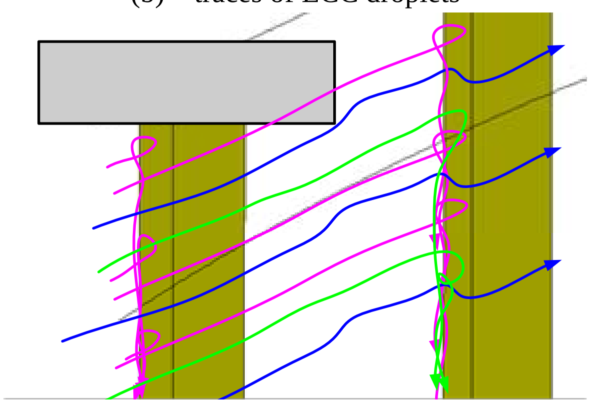
(a) velocity vectors of bypass steam



(b) traces of ECC droplets



(c) flow pattern of bypass steam



(d) flow pattern of ECC droplets

그림 6. Flow patterns of ECC droplets (H:L = 1: 5.7).

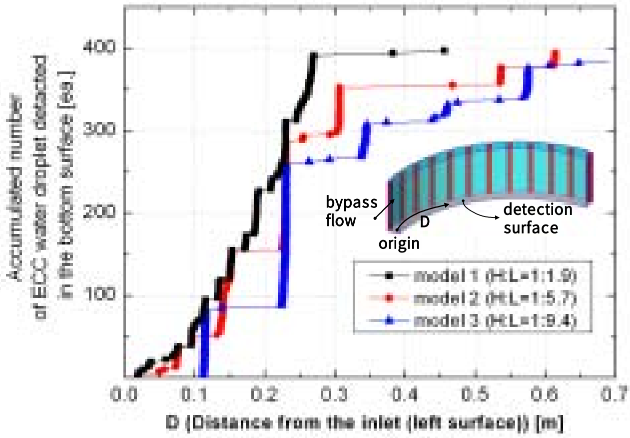


그림 7. 주입점 거리에 따른 하방침투(Penetration) 액적 수

4. 결론

DVI 방식의 안전주입계통을 장착하는 원자로에 대해 비상노심냉각수 직접우회율을 저감시킬 수 있는 방안에 대한 그루브 모델에 대하여 수치해석을 수행하였다.

대형 냉각재상실사고의 후기 재관수 기간에 해당하는 유동조건에 대한 비상노심냉각수의 직접우회율 저감을 위하여 강수부의 벽면에 설치하는 그루브 모델의 성능을 사전 분석하기 위하여 액적 모델에 대한 성능 평가를 수행하였다.

파단에 따른 횡증기 유동장의 강수부 벽면에 수직으로 사각형 그루브 즉, 공동(Cavity)를 설치하면 횡 유동인 주유동에 수직으로 이차 와류가 발생하며, 이와류는 공동에 갇혀 정체와류가 형성된다. 이에 정체 와류에 포집된 비상노심냉각수 수막이나 액적은 횡방향 가속도를 잃게 되며, 곧 중력에 이끌려 강수부 하방으로 낙하한다. 이와 같은 그루브의 형상에 대한 피치비 변경에 따른 결과는 그루부의 피치와 높이의 비가 증가할 수록 액적의 포집 비율이 작음을 보여주고 있다. 즉, 그루브에 의한 정체와류에 액적을 가능한한 많이 포집시켜 강수부 하부로 침투시키기 위해서는 그루브 피치를 작은 만드는 것이 보다 유리하다.

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.