원자로 외벽냉각시 원자로공동에서의 자연순환 이상유동에 대한 수치적 연구

김홍민† · 서준우* · 김광용** · 박래준*** · 하광순*** · 김상백***

A Numerical Study on the Two-Phase Natural Circulation Flow in Reactor Cavity under External Vessel Cooling

Hong-Min Kim, Jun-Woo Seo, Kwang-Yong Kim, Rae-Joon Park, Kwang-Soon Ha, and Sang-Baik Kim

Key Words : Two-Phase Natural Circulation Flow(자연순환 이상유동), Reactor Cavity(원자로 공동), Insulator(단열벽), External Vessel Cooling(외벽냉각)

Abstract

This work presents a numerical analysis of two-phase natural circulation flow in reactor cavity under external vessel cooling. Steady, incompressible, three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations for multiphase flows with zero equation turbulence model are solved to predict the shear key effect on the circulation rate of cooling water and the distribution of void fraction according to the different mass flow of inlet air. Results show that shear key has a positive effect on the circulation rate of cooling water and induce a local increase of void fraction below the shear key, but not remarkably.

기호설명

γ : 체적점유율
ρ : 밀도
μ : 점성
$\vec{U}$: 속도성분
P : 압력
$\vec{g}$: 중력가속도
C_D : 항력계수
f_μ : 비례상수
V : 체적

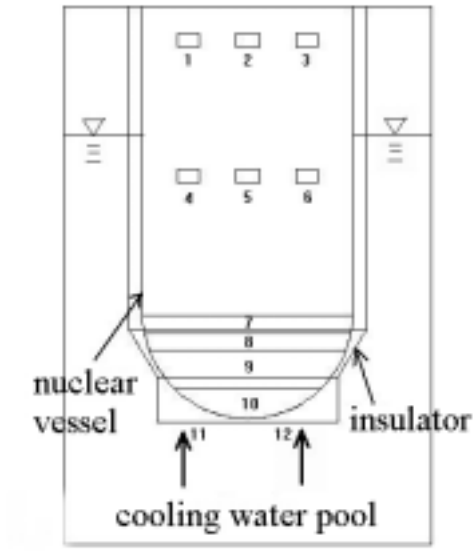
하첨자

α, β : 상(phase)

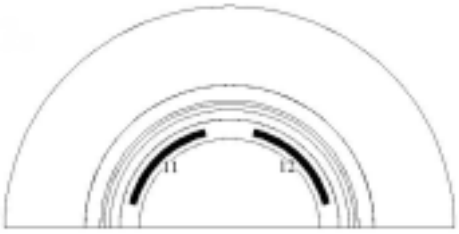
† 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과
E-mail : khm@inhavision.inha.ac.kr
TEL : (032) 860-7317 FAX : (032) 868-1716
* 인하대학교 대학원 기계공학과
** 인하대학교 기계공학부
*** 한국원자력연구소

1. 서 론

원자로 노심 손상, 용융과 같은 심각한 중대사고는 발생확률이 극히 희박하기는 하나, 사고 발생시 엄청난 인적, 물적 피해를 유발한다. 이를 방지하기 위해 원전에서 노심물질이 용융하는 중대사고 발생시 원자로용기가 파손(reactor vessel failure)되기 전에 원자로용기 외벽을 냉각(external vessel cooling)함으로써 노심용융물을 원자로용기 내에 가두어 두어 (IVR: In-Vessel corium Retention) 원자로용기의 안전성을 유지하는 방안이 세계적으로 고려되고 있다. 이와 같은 중대사고 관리 방안은 핀란드의 Loviisa 원전과 미국의 AP 600 원전에 반영이 되었고, 국내의 APR 1400 원전에서도 이를 반영하였다. APR 1400 은 효과적인 원자로 외벽의 냉각을 위해 원자로 외벽과 단열벽 사이에 냉각수가 채워져 있고, 이를 냉각수 수조가 둘러싸고 있는 구조로 설계되어 있다. 중대사고시 발생된 내부의 열은 원자로 용기를 둘러싸고 있는 냉각수를 증발시키고, 발생된 증기는 부력에 의해 상승함으로써 냉각수의 순환을 일으키는 과정을 통해 효과

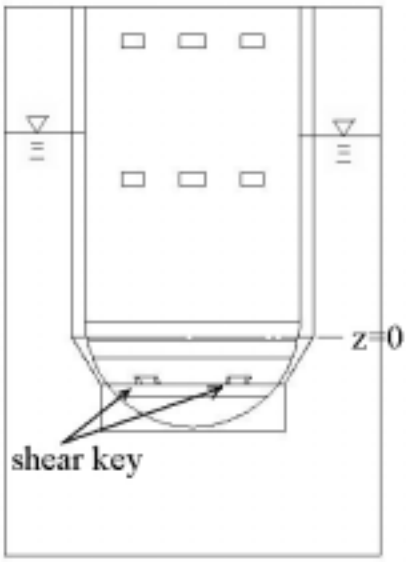


(a) Front view

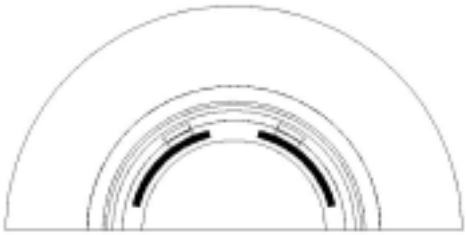


(b) Top view

Fig. 1 Reactor cavity without shear key



(a) Front view



(b) Top view

Fig. 2 Reactor cavity with shear key

적으로 원자로 외부로 방출된다. 이 때 원자로 공동에서의 국부적인 기공률(void fraction)의 증가로 인한 온도상승은 원자로의 파손을 유발할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 이상(two-phase)유동에 대한 연구가 반드시 선행되어야 한다.

원자로 내 이상유동에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔는데, 이중 상용 소프트웨어를 사용한 수치적인 연구로, Anglart 등[1,2]은 CFDS-FLOW3D 를 이용하여 연료봉 주위의 기공률과 압력강하를 계산하였고, Miettinen 과 Schmidt[3]는 FLUENT 를 이용하여 SWR 1000 원자로에서의 속도분포를 비교적 상세히 분석하였다. 또한, Lee 등[4]은 내부관이 가열되는 환형관에 대한 실험과 CFX-4.2 를 이용한 계산을 통해 반경방향으로의 기공률과 속도분포를 비교한 바 있다.

본 연구에서는 중대사고시 원자로용기 외벽냉각으로 원자로용기의 안전을 유지하는 방안을 채택한 APR 1400 원전에 대해 상용 소프트웨어인 CFX-5.6 을 이용하여 원자로 용기로부터 주입되는 공기량에 따라 원자로용기 외벽과 단열벽 사이의 냉각수 순환량을 계산하였다. 또한 shear key 의 유무에 따른 냉각수의 순환량을 비교하였으며, 기공률의 분포 및 냉각수의 수위상승을 계산하였다.

2. 유동해석

2.1 유동구조 및 경계조건

Fig. 1 과 2 는 shear key 의 유무에 따른 원자로공동의 구조를 나타내고 있다. 여기서 shear key 는 단열벽과 원자로 용기를 고정시키는 장치를 말한다. 원자로(nuclear vessel)와 단열벽(insulator) 사이의 공동은 1~6 과 11,12 의 통로를 통해 냉각수 수조(cooling water pool)와 연결되어 있고, 초기 상태에서 냉각수의 높이는 Fig. 2 의 z=0 인 위치로부터 2.3m 이다. 7~10 은 공기주입구의 위치를 나타내며, 각 위치에서의 공기주입량은 Table 1 에 나타내었다. 유동구조를 살펴보면, 주입된 공기는 부력에 의해 상승하여 자유표면을 통해 배출되는데, 이때 원자로와 단열벽 사이의 냉각수 상승을 유발하고, 상승된 냉각수는 1~6 의 통로를 통해 냉각수 수조로 유출되

Table 1 Mass flow rate of inlet air

inlet No.	location	$\dot{m}_{air}\,(kg/s)$	
		case A	case B
7	0 - 45 °	0.02069	0.04138
8	45 ° - 70 °	0.05629	0.11258
9	70 ° - 80 °	0.02517	0.05033
10	80 ° - 90 °	0.03576	0.07153

며, 단열벽 아래의 11 과 12 의 통로를 통해 유입되는 순환구조로 구성된다. 모든 벽에서 공기에 대해서는 비점착조건(free slip)을, 냉각수에 대해서는 점착조건(no slip)을 각각 사용하였다. 형상의 대칭성을 고려하여 계산시간의 절감을 위해 180° 영역을 계산영역으로 선정하였고, 이에 따라 대칭면에는 대칭(symmetry) 조건을 지정하였다.

원자로 공동과 냉각수 수조사이의 냉각수 유출입구(1~6, 11, 12)의 면적은 냉각수 순환량과 기공률(void fraction)의 분포에 상당한 영향이 있을 것으로 예상되지만, 본 연구에서는 1~6 의 면적을 각각 0.5 m^2, 11 과 12 의 면적은 각각 0.75 m^2 로 고정하였다.

2.2 지배방정식

본 연구에서는 원자로 공동에서의 삼차원, 정상상태, 비압축성 이상유동의 해석을 위해 상용 소프트웨어인 CFX-5.6 을 사용하였으며, 계산에 사용된 연속방정식과 와점성 가정(eddy viscosity hypothesis)을 적용한 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\gamma_\alpha \rho_\alpha\right)+\nabla\cdot\left(\gamma_\alpha \rho_\alpha \vec{U}\right)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\gamma_\alpha \rho_\alpha \vec{U}\right)+\nabla\cdot\left(\gamma_\alpha\left(\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha\right)\right) = -\gamma_\alpha \nabla p_\alpha+\nabla\cdot\left(\gamma_\alpha \mu_{eff,\alpha}\left(\nabla \vec{U}_\alpha+\left(\nabla \vec{U}_\alpha\right)^T\right)\right) + \vec{S}_{M,\alpha}+\vec{M}_\alpha \tag{2}$$

여기서 $\mu_{eff,\alpha}$ 는 분자점성계수(molecular viscosity)와 난류점성계수(turbulent viscosity)의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_{eff,\alpha}=\mu_\alpha+\mu_{t,\alpha} \tag{3}$$

난류점성계수는 계산의 수렴성을 고려해 0-방정식 모델을 이용해 계산하였고, 물과 공기에 대해 각각 다음과 같이 정의된다

$$\mu_{t,water}=\rho_{water} f_\mu U_{t,water} l_t \tag{4}$$

$$\mu_{t,air}=\frac{\rho_{air}}{\rho_{water}}\mu_{t,water} \tag{5}$$

여기서 f_μ 는 상수로 0.01 의 값을 가지며, U_t 는 난류의 속도 스케일로서 유동장의 최대속도이다. 그리고, l_t 는 난류의 길이 스케일로서 다음과 같이 정의된다.

$$l_t=\left(V^{1/3}\right)/7 \tag{6}$$

여기서 V 는 유동장의 체적이다.

그리고, 식 (2)에서 $\vec{S}_{M,\alpha}$ 과 $\vec{M}_\alpha$ 은 각각 밀도차로 인해 발생하는 부력과 각 상(phase) 사이의 상대운동으로 인해 발생하는 항력을 나타낸다.

$$\vec{S}_{M,\alpha}=\left(\rho_\alpha-\rho_{water}\right)\vec{g} \tag{7}$$

$$\vec{M}_\alpha=\frac{C_D}{8}A_{\alpha\beta}\rho_\alpha\left|\vec{U}_\beta-\vec{U}_\alpha\right| \tag{8}$$

여기서 C_D 와 $A_{\alpha\beta}$ 는 각각 두 상간의 항력계수와 두 상이 접하는 면적을 나타내며, 항력계수의 계산을 위해 GRACE drag 모델[5]을 사용하였다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서는 shear key 가 없는 경우(Fig. 1)와 있는 경우(Fig. 2)에 대해 Table 1 에 나타낸 바와 같이 두 가지의 공기주입량에 대한 유동해석을 수행하여 공기주입량에 따른 기공률(void fraction)의 분포와 순환되는 냉각수의 유량변화를 계산하였다. 여기서 기공률은 유로의 단면적 또는 체적 중에 기체가 차지하는 체적으로 정의된다.

Fig. 3 과 4 는 각각 shear key 의 유무에 따른 기공률의 분포를 나타내고 있다. 두 경우 모두 원자로의 하반구를 통해 유입된 공기가 상승함에 따라 기공률이 증가하고 있음을 볼 수 있다. 특히 Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 shear key 아래 부분에서 국부적인 기공률의 증가를 볼 수 있는데, 이는 shear key 로 인해 그 하부에 유동의 정체구역이 형성되기 때문으로 사료된다. 그러나, 이 부분에서의 기공률의 증가는 그리 크지 않은 것으로 보이며, 이

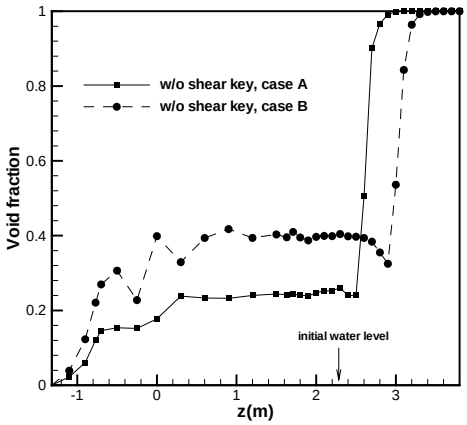


Fig. 3 Void fraction distribution (without shear key)

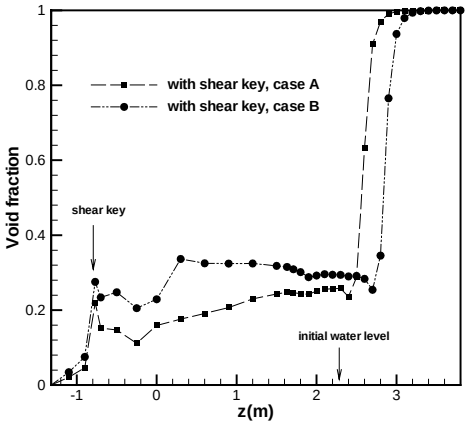


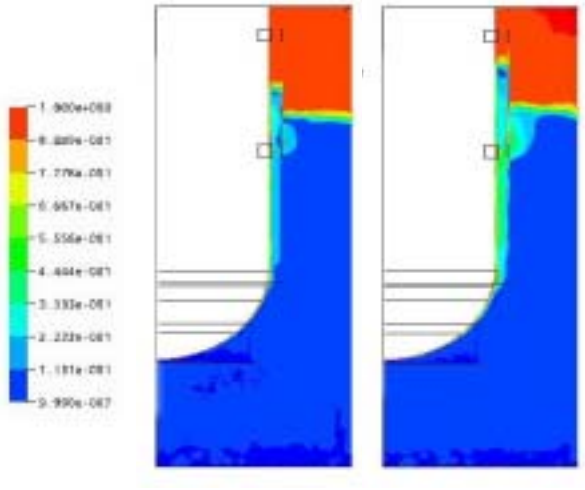
Fig. 4 Void fraction distribution (with shear key)

는 유동면적에서 shear key 가 점유하는 크기가 작기 때문으로 사료된다.

Fig. 5 와 6 에는 180° 계산영역의 수직한 중심평면에서의 기공률 분포를 나타내었다. 수직한 단면에서의 기공률 분포는 shear key 의 유무에 관계없이 유사하게 나타났으며, 주입된 공기는 원자로 벽을 따라 상승하여 외부로 유출되며, 이 중 일부는 냉각수조의 자유표면을 통해 유출됨을 볼 수 있다. 부력에 의한 공기의 상승으로 원자로 용기와 단열벽 사이를 채우고 있던 냉각수도 상승하여 수위가 높아짐을 볼 수 있으며, 주입되는 공기유

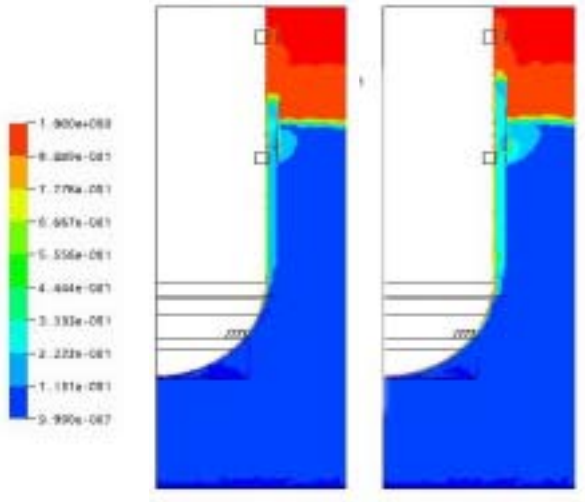
Table 2 Mass flow rate of cooling water and increase of cooling water level

	$\dot{m}_{water}(kg/s)$		Increase of Water level(m)	
	Case A	Case B	Case A	Case B
w/o shear key	80.76	89.40	0.7	1.1
with shear key	116.74	146.23	0.7	1.1



(a) case A (b) case B

Fig. 5 Void fraction contour of air at vertical plane (without shear key)



(a) case A (b) case B

Fig. 6 Void fraction contour of air at vertical plane (with shear key)

량에 따른 수위상승을 Table 2 에 나타내었는데, 이 경우에도 shear key 의 유무는 수위상승 높이에 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

또한, Table 2 에는 shear key 의 유무와 공기주입량에 따른 네 경우에서의 냉각수의 순환량을 표시하였다. 여기서 냉각수의 순환량은 단열벽의 아래에 설치된 입구(Fig. 1 의 11 과 12)를 통해 유입되는 유량을 의미한다. Shear key 가 없는 경우, 공기주입량이 2 배로 증가함에 따라 냉각수의 순환량은 10.7% 증가하였으며, shear key 가 있는 경우는 25.2% 증가하였다. 그리고, 동일한 공기주입량에 대해 shear key 가 있는 경우의 냉각수 순환량이

shear key 가 없는 경우에 비해, 각각 44%와 63% 증가하였음을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자로 중대사고시 원자로 공동에서의 물과 증기의 이상유동을 모의하기 위한 전단계로써 물과 공기의 이상유동을 해석하여 shear key 의 유무에 따른 기공률의 분포, 냉각수의 순환량과 냉각수 수위의 상승높이를 분석하였다. 해석결과, shear key 하부에서 국부적으로 기공률이 증가하였으며, shear key 의 유무는 냉각수 수위의 상승 높이에는 큰 영향이 없었다. 그러나, shear key 가 있는 경우 냉각수의 순환량은 shear key 가 없는 경우보다 상당히 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 향후 ICI nozzle 을 포함하는 실제 원자로 공동에 대해 물과 증기의 이상유동해석의 기초자료로써 유용하게 활용될 것이다.

참고문헌

(1) Anglart, H.and Nylund, O., 1996, “CFD Application to Prediction of Void Distribution in Two-Phase Bubbly Flows in Rod Bundlis,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 163, pp. 81 ~ 98

(2) Anglart, H., Nylund, O., Kurul, N. and Podowski, M. Z., 1997, “CFD Prediction of Flow and Phase Distribution in Fuel Assemblies with Spacers,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 177, pp. 215 ~ 228

(3) Miettinen, J. and Schmidt, H., 2002, “CFD Analyses for Water-Air Flow wit the Euler-Euler Two-Phase Model in the FLUENT4 CFD Code,” Proceedings of ICONE10, 10th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE10-22419

(4) Lee, T. H., Park, G. C. and Lee, D. J., 2002, “Local Flow Characteristics of Subcooled Boiling Flow of Water in a Vertical Concentric Annulus,” Internation Journal of Multiphase Flow, Vol. 28, pp 1351 ~ 1368

(5) *CFX-5.6 Solver Theory*, pp. 113 ~ 120