2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

화학제주입탱크에서 노즐위치가 농도분포에 미치는 영향

The Effect of Nozzle Location on the Concentration Profiles in Chemical Addition Tank

박병호, 김은기, 노태선, 이철호*
한국전력기술주식회사
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

원자력발전소 화학 및 체적제어계통의 일부인 화학제주입계통의 운전과 관련하여, 원통형탱크에 유입되는 유체에 의해 형성되는 유동특성 및 주입특성에 대해 수치해석을 이용하여 해석하였다. 본 연구는 탱크 내부에 disk block 이 설치되어 있는 현설계를 개선할 목적으로 수행하였으며, 수치해석은 상용 CFD 코드인 FLUENT 5 를 이용하였다. 해석결과 입구노즐은 탱크원통 상부에 접선방향으로 위치하고, 출구노즐은 하부 중앙에 위치할 경우 주입특성이 매우 양호한 것으로 나타났다.

Abstract

A numerical analysis of the flow and injection characteristics is performed for the flow field created by water injected into a cylindrical tank with an initially stationary fluid. The flow is relevant to the operation of the chemical addition system in the chemical and volume control system (CVCS) of nuclear power plants. This study is performed to improve the current design which has a disk block inside tank. The numerical analysis for the flow and injection characteristics in chemical addition tank are carried out using CFD code FLUENT 5. Results show that the inlet nozzle installed in tangential direction at the uppermost region of the tank cylinder and the outlet nozzle located at the center of the tank bottom is very effective in enhancing the injection in the tank.

1. 서론

원자력발전소의 1 차 계통은 원자로냉각재에 존재하는 불순물로 인해 계통을 구성하고 있는 배관 및 기기의 재질에 심각한 부식을 유발할 수 있으며, 생성된 부식생성물은 계통의 방사선준위를 높이는 요인이 된다. 따라서, 계통구성 재질의 부식억제 및 계통의 방사선준위를 최소화하기 위하여 원자로냉각재의 수화학 조절이 요

---

* 공주대학교 화학공학부, 314-701 충남 공주시 신관동 182

구되며, 원자로냉각재는 적절한 화학제를 함유하고 있어야 한다[1]. 특히 중요한 수화학 조절은 원자로냉각재에 존재하여 부식을 유발하는 용존산소(dissolved oxygen) 농도를 최소화하는 것이며, 부식 및 용해도 변화에 따라 방사선준위에 영향을 미치는 요인인 원자로냉각재의 pH 를 원하는 범위로 유지하는 것이다. 이러한 원자로냉각재의 수화학 조절은 화학 및 체적제어계통(CVCS, Chemical and Volume Control System)의 부속계통인 화학제주입계통(CAS, Chemical Addition System) 및 체적제어탱크(VCT, Volume Control Tank)에 의해 수행된다. 그 중 화학제주입계통은 원자로냉각재에 존재하여 부식을 일으키는 용존산소나 산화성물질(oxidizing species)의 농도를 최소화하기 위해 원자로냉각재의 평균온도가 65.6℃와 121.1℃ 사이에서 하이드라진(hydrazine, N_2H_4)을 주입하고, 모든 운전모드에서 원자로냉각재의 pH 조절 목적으로 Li^7(리튬-7)을 수산화리튬($LiOH \cdot H_2O$)의 형태로 주입하는 데 이용된다.

1996 년 발표된 연구에서는 화학제주입탱크의 주입효과를 높이기 위하여 탱크 내부에 disk block 을 설치하였다[2]. 탱크 내부에 disk block 을 설치할 경우 높은 주입효과를 나타내지만 제작 및 유지/보수 관점에서는 불리할 수 있다.

본 연구에서는 기존 연구에 적용된 화학제주입탱크의 기하학적 형상 및 운전조건을 기본으로 하여 탱크 내부의 disk block 을 제거하고 입구노즐 및 출구노즐의 위치를 변경한 4 가지 경우에 대해 수치해석을 수행하였으며, 주입특성이 양호한 한 경우에 대해 직경 대비 높이가 미치는 영향을 해석하였다. 이를 근거로 하여 disk block 이 없고, 주입유량이 낮은 경우에도 주입특성이 양호한 화학제주입탱크 노즐 위치 및 구조적형상을 평가하고자 한다.

2. 계산모델 및 지배방정식

화학제주입탱크의 용량은 원자로냉각재에 주입되는 하이드라진과 수산화리튬의 1 회 주입량 중 큰 용량을 기준으로 결정되며, 4.16×10^{-2} m^3 이다. 탱크의 기하학적 형상은 수직원통형이며, 탱크높이 대 직경의 비(H/D) 2 를 기준으로 할 때 직경은 0.3 m 이다. 또한, 화학제 주입유량은 수산화리튬의 주입유량에 의해 결정된다. 수산화리튬은 강염기성으로 주입점 후단의 배관 및 기기에 부식을 초래하기 때문에 수산화리튬에 의한 영향을 최소화하기 위하여 최대 주입유량이 제한되며, 허용 가능한 주입유량은 1.26×10^{-4} m^3/s 이다[2].

본 연구에서는 화학제주입탱크 내부에 disk block 이 없는 경우에 대한 화학제주입 특성을 해석하기 위해 몇 가지의 입구 및 출구노즐의 위치를 선정하였다. 본 연구에서 선정한 모델은 탱크의 용량, 주입유량 및 구조적 형상이 동일한 조건에서 case 1) 상부 중앙에서 유입되고 하부 중앙으로 유출되는 경우(Fig. 1(a)), case 2) 상부 지름 1/4 지점에서 유입되고 하부 중앙으로 유출되는 경우(Fig. 1(b)), case 3) 상부 중앙에서 유입되고 하부지름 1/4 지점으로 유출되는 경우(Fig. 1(c)), case 4) 탱크원통 상부의 접선방향으로 유입되고 하부 중앙으로 유출되는 경우(Fig. 1(d))이다. 각 경우에 대해 탱크의 상부로 원자로보충수가 유입되고 희석된 화학제는 아래로 유출되는 주입운전을 가정하여 탱크 내부에서의 시간에 따른 화학제 농도변화를 분석하였다.

해석은 초기상태(t<0)에서 탱크 내의 유동은 정지되어 있고, 초기 리튬농도를 1로 가정하여 시간 t=0에서 입구로부터 리튬농도가 0인 유체(원자로보충수)가 일정한 온도, 유속 및 농도로 유입할 때의 시간 변화에 따른 비정상상태의 농도분포 및 평균농도 변화를 구하였다.

본 연구에서 선정한 계산모델의 운전조건을 기준으로 할 때 입구노즐에서의 유동조건은 Reynolds 수가 약 3,900으로 난류영역에 속하지만 주입효과를 보수적으로 평가하고 낮은 주입유량으로 운전이 가능한 노즐위치를 선정하기 위해 층류모델을 이용하였다. Case 1의 유동특성은 축대칭으로 2차원 해석이 가능하지만 동일조건을 고려하여 모든 경우 3차원으로 해석하였으며, 유동에 대해 정상상태, 비압축성 및 층류유동으로 간주하였다. 주입탱크 내 유동을 기술하는 지배방정식은 다음과 같이 연속방정식, 운동량방정식 및 화학종 수송방정식으로 나타낼 수 있다[3].

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(r u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(r u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} + r g_i \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r m_A) + \frac{\partial}{\partial x_i}(r u_i m_A) = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_{A,i} \qquad (3)$$

위 식에서 r, u_i, p 및 m_i는 각각 밀도, 속도성분, 압력 및 농도성분을 나타낸다.

또한 응력텐서, t_{ij} 및 확산플럭스, $J_{A,i}$는 아래와 같다.

$$t_{ij} = m\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (4)$$

$$J_{A,i} = -r D_{A,m} \frac{\partial m_A}{\partial x_i} \qquad (5)$$

여기에서 $D_{A,m}$은 혼합물(mixture)에서 화학종 A에 대한 확산계수이다.

화학제주입탱크 입구에서의 경계조건은 0.096 m/s 속도조건, 출구에서의 경계조건은 압력조건, 노즐 및 탱크의 벽면에 대해서는 정지유속조건(no-slip condition)을 적용하였다.

3. 수치해석방법

화학제주입탱크의 유동특성 및 주입특성을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 FLUENT 5를 사용하였다. 수치계산 시 운동량 및 화학종 수송방정식에 있어서 시간 적분은 2차 후향 내재적 오일러법(second-order backward implicit Euler method)을 적용

하였으며, 공간적분은 대류항의 경우 1차 풍상도식(first-order upwind scheme), 확산항은 2차 중앙 차분 도식을 사용하여 이산화하였다. 속도와 압력을 연립시키기 위하여 분리형(segregated) 알고리즘인 SIMPLE 법을 적용하였다.

격자는 모든 경우 비정렬격자계를 사용하였다. 수치계산의 수렴성 및 정확성을 확보하기 위하여 격자 의존성을 확인하였으며, 농도변화 및 속도변화가 급격할 것으로 예상되는 입구경계, 출구경계, 탱크벽경계 및 재순환영역에는 상대적으로 격자를 집중(mesh adaption)시켰다. 또한, 이웃한 격자점의 간격은 1.2배가 넘지 않도록 하였다. 반복계산시 해의 수렴성을 개선하고 해가 발산하는 것을 방지하기 위하여 모든 종속변수에 대해 하향이완방법을 도입하였다. 이완계수는 수렴성을 고려하여 속도와 압력의 경우 0.3-0.6 범위를 사용하였으며, 농도에 대해서는 모든 경우 0.8을 적용하였다. 각 변수의 수렴조건으로 이산화방정식의 잉여값이 10^{-3} 이하에 도달하면 수렴한 것으로 간주하였으며, 속도장의 경우 수렴해를 얻기 위해서는 약 3,000-5,000회, 농도장의 경우 각 시간 간격에서 10-15회의 반복계산이 필요하였다.

4. 결과 및 고찰

원자로냉각재계통에 화학제를 주입할 때 대부분의 가압경수로(PWR, Pressurized Water Reactor) 원전은 주입탱크 상부로 원자로보충수(탈염수)가 유입되고 희석된 화학제는 하부로 유출되는 운전방식을 채택하고 있다. 이와 같은 운전방식에서 탱크 내부의 시간에 따른 농도변화를 해석하는 데 혼합흐름반응기(CSTR, Continuous Stirred-Tank Reactor)에 적용하는 이론식을 이용할 수 있다[4].

$$C = C_{IN} + (C_O - C_{IN})\exp(-\frac{w_{IN}}{W_{TANK}}t) \quad (6)$$

여기서, t=시간, (sec)
C_{IN}=주입되는 유체의 농도, (kg/kg)
C_O=탱크 내 유체의 초기 농도, (kg/kg)
w_{IN}=주입되는 유체량, (kg/s)
W_{TANK}=탱크 내 유체량, (kg)

그러나, 이와 같은 이론식은 각 시간 간격에 대해 혼합율을 100%로 가정하기 때문에 교반기가 없고 유체 속도가 느린 실제 유동장에서의 농도변화와는 차이가 있다.

Table 1은 본 연구에서 해석한 각 경우에 대해 주입운전을 시작하여 특정 시간이 경과한 후 탱크 내 평균농도이며, Fig. 2는 각각의 경우에 대하여 주입하고자 하는 화학제(리튬)의 탱크 내 평균농도가 1시간 동안 변화하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 2에서 보여주는 것처럼 case 1의 경우 주입하고자 하는 화학제의 양이 주입운전 1시간 후에도 탱크 내에는 70%의 화학제가 남아있음을 알 수 있다. 탱크 내부에 disk block을 설치한 경우 이론식(6)에 의한 곡선과 거의 동일한 농도변화 경향을 보였으나[2], case 4의 경우 또한 disk block은 없지만 주입효과가 매우 양호한 것으로

나타났다.

Fig. 3(a)는 case1의 주입운전 1시간 후 탱크높이 1/6, 1/2 및 5/6 지점 수평방향 단면의 등농도분포를 나타내며, (b)는 지름을 지나는 수직방향 단면의 등농도분포를 나타낸다. Case 1의 경우 입구노즐과 출구노즐이 동일선상에 위치하여 유체속도가 적을 경우 대부분의 유체가 중심선을 따라 통과하기 때문에 주입효과가 매우 나쁜 것으로 나타났다. 따라서, case 1과 같은 노즐위치는 주입유량이 낮을 경우 주입효과를 높이기 위해서 탱크 내부에 disk block을 설치하거나, 입구노즐 혹은 출구노즐의 위치변경이 요구된다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 입구노즐 혹은 출구노즐의 위치를 변경한 case 2, 3 및 4는 case 1과 비교할 때 높은 주입특성을 나타내었다. 위와 같은 주입특성의 차이는 탱크 내 유동장을 층류모델로 해석했기 때문에 나타난 결과로 판단되며, 난류모델을 적용할 경우 각각의 경우에 대한 주입효과는 큰 차이를 보이지 않을 것으로 예상된다.

Fig. 4, 5 및 6의 (a)는 각각 case 2, 3 및 4의 주입운전 5분 후 탱크높이 1/6, 1/2 및 5/6 지점 수평방향 단면의 등농도분포를 나타내며, (b)는 case 2, 3 및 4의 지름을 지나는 수직방향 단면의 등농도분포를 나타낸다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 case 4의 주입특성은 매우 양호하므로 case 4의 경우를 선정하여 H/D가 주입특성에 미치는 영향을 평가하였다. Fig. 7은 H/D가 1, 2 및 4의 경우에 대하여 주입하고자 하는 화학제의 탱크 내 평균농도가 1시간 동안 변화하는 경향을 보여주고 있으며, H/D가 클수록 주입특성이 양호한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 원자로냉각재계통에 화학제를 주입하기 위하여 대부분의 가압경수로 원전이 채택하고 있는 원자로보충수를 이용하는 운전방식을 적용하고 층류모델을 이용하여 화학제주입탱크 용량, 기하학적 형상 및 주입유량이 동일한 조건에서 노즐 위치가 주입운전 특성에 미치는 영향을 상용 CFD 코드인 FLUENT 5를 이용하여 해석하였다. 해석은 case 1) 상부 중앙에서 유입되고 하부 중앙으로 유출되는 경우, case 2) 상부 중앙에서 유입되고 하부지름 1/4 지점으로 유출되는 경우, case 3) 상부지름 1/4 지점에서 유입되고 하부 중앙으로 유출되는 경우, case 4) 탱크원통 상부의 접선방향으로 유입되고 하부 중앙으로 유출되는 경우로 구분하여 수행하였다. 또한, 해석한 경우 중에서 주입효과가 가장 양호한 경우를 선택하여 동일한 조건에서 탱크높이 대 직경의 비가 주입운전 특성에 미치는 영향을 해석하였다.

해석결과 입구노즐은 탱크원통 상부에 접선방향으로 위치하고, 출구노즐은 하부 중앙에 위치할 경우 주입특성이 가장 양호한 것으로 나타났으며, 탱크높이 대 직경의 비가 클수록 주입효과가 높음을 알 수 있었다. 위와 같은 주입특성의 차이는 탱크 내 유동장을 층류모델로 해석했기 때문에 나타난 결과로 판단되며, 난류모델을 적용할 경우 각각의 경우에 대한 주입효과는 큰 차이를 보이지 않을 것으로 예상되므로 추후 난류모델을 적용한 해석이 수행될 것이다.

6. 참고문헌

(1) EPRI, "PWR primary water chemistry guidelines, Rev.3", TR-105714, 1995.

(2) Chang, K.S., and Park, B.H., "A numerical study on mixing characteristics of the chemical injection tank", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 29, No. 1, 1997, pp. 38-67.

(3) "FLUENT 5 User's Guide", Fluent Inc., 1998.

(4) Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., "Transport phenomena", Wiley, New York, 1960.

(5) Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow", McGraw-Hill, New York, 1980.

(6) Versteeg, H.K., and Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method", Longman Scientific & Technical, 1995.

(7) Van Sonsbeek, H.M., van. Verlaan, P. and Tramper, J., "Hydrodynamics, mixing, and oxygen transfer in liquid-impelled loop reactors", Inter. Chem. E. Symposium 121(1990) 259-268.

(8) Yoo, G.J., and So, R.M.C., "Variable density effects on axisymmetric sudden-expansion flows", Inter. J. Heat Mass Transfer 32(1989) 105-120.

Table 1. Normalized average species concentration for various time.

	C_{ave}/C_o (t=5 min)	C_{ave}/C_o (t=10 min)	C_{ave}/C_o (t=15 min)	C_{ave}/C_o (t=20 min)
Case 1	0.959	0.932	0.906	0.881
Case 2	0.600	0.347	0.195	0.106
Case 3	0.607	0.354	0.201	0.111
Case 4	0.489	0.225	0.099	0.042

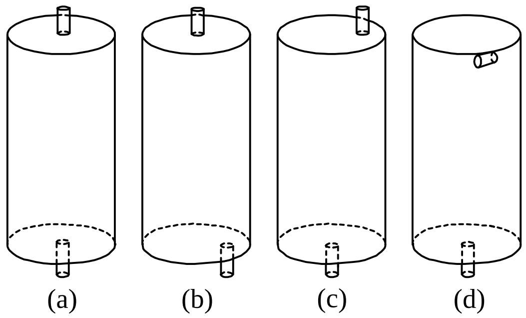

Fig.1 Inlet/outlet nozzle location for each case.

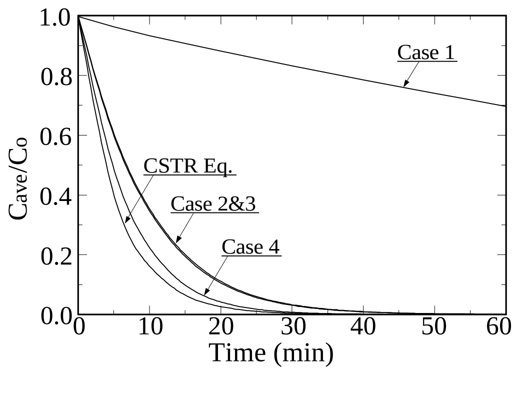

Fig. 2 Time dependent normalized average species concentration for various case.

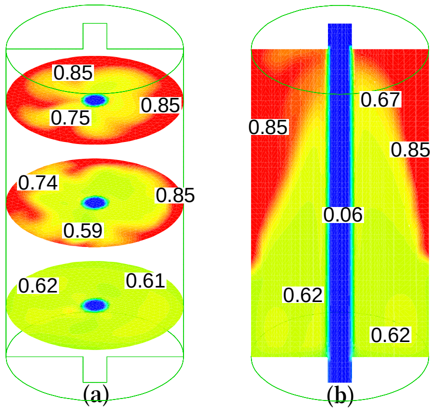

Fig. 3 Contours of concentration at the cross section for case 1 (time=60min).

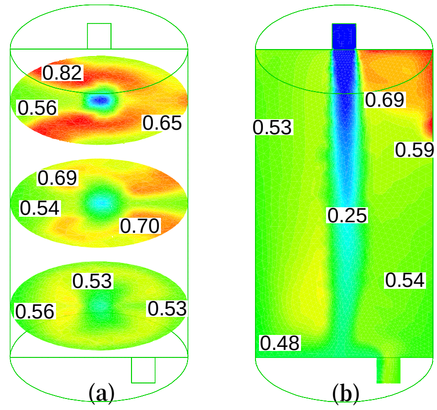

Fig. 4 Contours of concentration at the cross section for case 2 (time = 5 min).

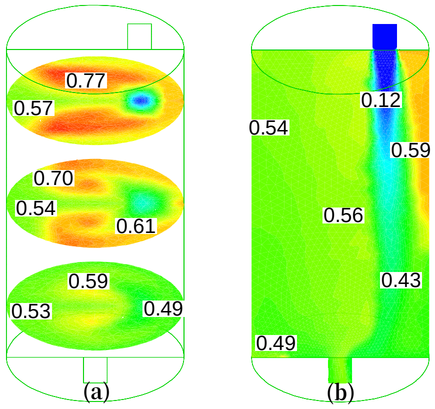

Fig. 5 Contours of concentration at the cross section for case 3 (time=5min).

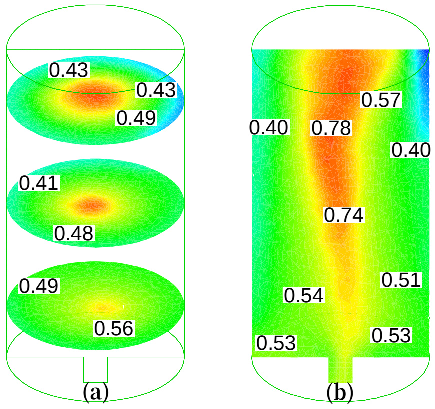

Fig. 6 Contours of concentration at the cross section for case 4 (time = 5 min).

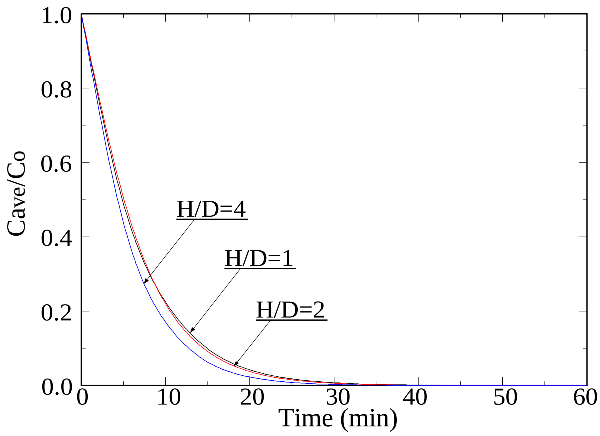

Fig. 7 Time dependent normalized average species concentration for various geometries (case 4).