2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로 제 2 정지계통의 액체주입계통에서 제트 유동 해석모델

Simulation Model for Jet Flow in Liquid Injection System of CANDU–6 SDS 2

채경명, 유성연
충남대학교
대전시 유성구 궁동 220

이보욱, 최항복
한국원자력연구소
대전시 유성구 유성우체국 사서함 105

요 약

중수로 제 2 원자로 정지계통의 성능해석을 위하여 액체주입정지계통에 의해 감속재탱크 내로 주입되는 독극물 제트의 유동 및 농도 해석을 위한 전산유체해석모델 개발을 수행하고 있다. 감속재 탱크인 칼란드리아 쉘과 액상 독극물 주입노즐 공지름비가 약 1055로 너무 커 분사된 제트 유동이 형성되는 감속재탱크 전체를 모사하는 모델 개발은 과다한 계산 격자수로 인해 비현실적이다. 따라서, 4 방향으로 대칭되게 분사되는 주입제트의 기하학적 대칭성을 이용하여 해석영역을 탱크 중앙에 위치한 5 핵연료채널 격자길이 만큼의 탱크부분을 해당 노즐중심선을 중심으로 90° 범위에 해당하는 1/4 디스크로 축소시켰으며 또한, 계산 영역의 격자 생성시 주입노즐 공지름에 의한 제한을 없애기 위하여 주입되는 입구유동 제트를 격자내의 질량, 운동량 및 농도 생성항으로 처리하였다. 1/4 모델의 대칭성에 대한 확인을 위하여 1/2 모델에 의한 계산을 시행하였으며, 입구유동의 생성항 처리의 타당성을 검토하기 위하여 가스 제트 실험자료와 생성항 처리에 의한 제트의 계산 결과값을 비교하였다. 본 연구에서는 1/2 모델 계산 결과와 비교하여 1/4 모델의 대칭성을 확인하였으며, 생성항 처리에 의한 계산 결과는 입구 근방에서 세밀한 격자를 쓰는 경우 실험값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Abstract

For the performance analysis of the secondary shut down system (SDS-2), a computational fluid dynamics (CFD) model for the poison jet flow is being developed to analyze the flow and poison concentration fields formed inside the moderator tank. As the ratio between Calandria shell and the nozzle hole diameter of the injection system is so big as 1055, it is impractical to develop a full size model encompassing the whole Calandria tank. To reduce the model to a manageable size, a quarter of the five-lattice-pitch length segment of the tank was modeled by using the symmetric nature of the jet and the injected jet was treated as source term to remove the limit caused by the small diameter of the injection nozzle hole, when the grid of the calculation domain was generated. A half model calculation was performed to show the symmetricity of the quarter model. For the validation of the source treatment of the inlet flow condition, the simulation result was compared with the experimental data of the gas jet. The symmetricity was confirmed by the results of simulation the half model calculation on the symmetric line and the result of simulation for the source treatment well agreed with the experiment when a fine mesh grid structure was used near the inlet.

1. 서 론

제 2차 원자로 정지계통 (Shut Down System Number 2, SDS2)[1]은 제 1차 정지계통 및 다른 안전 장치와는 완전히 독립적인 원자로 안전 장치 중 하나이다. SDS2 의 주 기능은 중성자 흡수체인 질산가돌리늄 용액 ($Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, Gadolinium nitrate solution)을 원자로에 주입시켜 원자로를 정지시키는 일이다. 이러한 액상 주입 장치를 정지계통으로 사용하는 원자로는 CANDU 원자로 (CANadian Deuterium Uranium Reactor)가 대표적이며, CANDU 원자로에 대한 SDS2에 대한 연구는 캐나다 와 인도[2] 등에서 연구되고 있다. 캐나다의 경우, 현재 우리나라에 도입된 CANDU 원자로의 SDS2를 개발하였으며, 인도의 경우는 SDS2를 독자적으로 개발하기 위하여 실험적 방법으로 연구하고 있다. 국내에는 월성에 CANDU 원자로가 운전 중에 있으며, DUPIC (Direct Used of Spent PWR fuel in CANDU Reactor) 핵연료를 CANDU 원자로에 장전하기 위하여 안전성 확보 측면에서 본 SDS2의 성능해석이 필요하게 되었다. 본 연구의 목적은 액체주입정지계통을 통하여 주입된 중성자 독극물에 의하여 원자로 감속재 탱크 내에 형성되는 유동장 및 농도 분포를 계산하는 전산해석 모델을 개발하는데 있다.

2. 지배 방정식

본 연구를 수행하기 위하여 등온상태에서의 원자로 내의 유동 및 농도 분포만을 고려하였다. 따라서, 연속 방정식, 운동량 방정식 및 물질 전달 방정식을 풀게 된다.

연속 방정식 (Continuity equation)

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

운동량 방정식 (Momentum equation)

$$\frac{\partial (r u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (r u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[m\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \overline{r u_i' u_j'} \right] + S \tag{2}$$

물질전달 방정식 (Mass transport equation)

$$\frac{\partial (r Y_A)}{\partial t} + \frac{\partial (r u_i Y_A)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{AB} \frac{\partial Y_A}{\partial x_i} \right) = 0 \tag{3}$$

식 (1)~(3)에서, m는 점성계수이고, u_i'는 fluctuation velocity이고, Y_A는 화학종 A의 mass fraction, D_{AB}는 종 B에서 종 A의 molar diffusion coefficient이다. 난류 계산을 위하여 k-ε 모델을 사용하였다. 난류 점성계수는

$$m_t = r C_m \frac{k^2}{e} \tag{4}$$

이며, 각 k와 ε에 대한 방정식 다음과 같다.

$$\frac{\partial(rk)}{\partial t} + \frac{\partial(ru_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(m + \frac{m_t}{s_k}\right)\left(\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)\right) + r(P - e) \tag{5}$$

$$\frac{\partial(re)}{\partial t} + \frac{\partial(ru_j e)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(m + \frac{m_t}{s_e}\right)\left(\frac{\partial e}{\partial x_j}\right)\right) + r\frac{e}{k}(C_1 P - C_2 e) \tag{6}$$

이며, 여기서, k는 난류 운동에너지, ε는 난류 에너지 소실율이다. 식 (4)~(6)의 상수값[3]은 다음을 사용하였다.

$$C_u = 0.09,\ \ C_1 = 1.44,\ \ C_2 = 1.92,\ \ s_k = 1.0,\ \ s_e = 1.217$$

3. 모델링

3.1 대칭 조건

주입 계통을 모델링하기 위하여 Fig. 1의 주입관의 단면에서 보이는 대칭선을 따라 1/4로 분할 하였다. 대칭 구조에 의한 1/4 분할에 의하여 계산 영역의 크기를 대폭 축소할 수 있게 되었다. 그러나, 실제 유동에서 대칭성이 보장되어야 하기 때문에 1/2 모델에 의하여 노즐과 노즐 사이의 대칭선을 따라 대칭적 유동이 나타남을 확인하였다 (Fig. 2).

3.2 생성항 처리

주입계통의 1/4 모델에도 불구하고 칼란드리아 쉘에 비하여 매우 작은 주입 노즐의 지름 때문에 모델링상의 어려움이 있다. 이러한 어려움을 해결하고, 그리드 생성을 보다 용이하게 하기 위하여 주입노즐을 모델링하지 않고 주입 노즐의 위치에 해당하는 그리드 셀에 대하여 생성항 처리에 의해 주입 제트를 모사하였다. 생성항 처리는 계산 코드인 CFX-4.3의 USER FORTRAN[3]을 이용하여 기술하였다. 식 (1) ~(3)의 이산화 방정식은,

$$a_p f_p = \sum_{all \quad neighbors} a_{nb} f_{nb} + S_p f_p + S_c \tag{7}$$

이다. 식(7)에서 a는 이산화 계수, f는 임의의 변수, S는 생성항의 선형화 계수이다. 첨자 p는 현재 위치, nb는 이웃한 모든 셀이다. 노즐에서 주입되는 제트의 속도, 유량 및 화학종을 모사하기 위해서는 식(7)에서 S_p와 S_c를 설정해 주면 된다. 예로, 운동량 방정식에서 속도를 고정시키기 위하여 S_p는 음의 mass flux를 S_c는 mass flux에 속도를 곱한 값을 준다. 이때, $S_p >> a$이 되어 생성항이 처리되는 위치의 셀에서 원하는 속도를 얻을 수 있다. 생성항은 Table 1과 같이 처리하였다.

3.3 계산 코드

본 계산은 AEA Technology 사에서 개발한 범용 CFX-4.3 코드를 사용하였다. CFX-4.3코드는 크게 Pre-processing, Solver, Post-processing의 3단계로 나뉜다. Pre-processing에서는 CFX_BUILD를 이용해 기하학적 구조와 격자를 생성하고, 문제 정의에 필요한 명령 파일을 만든다. 또한, 본 연구와 같이 특별히 사용자에 의하여 정의할 필요가 있을 경우, USER FORTRAN 파일을 이용하여 기술하는데, CFX-4.3코드는 30개의 user routine이 존재한다. CFX-4.3코드의 개략적인 구조는 Fig. 3에 나타내었다.

4. 생성항에 의한 free-jet 모사

생성항 처리의 타당성 검토를 위하여 1949년 Hinze 와 Zijnen의 실험자료[4]와 비교하였다. 그들은 다양한 가스-공기 혼합물을 대기중에 분출하는 free-jet 실험을 통하여 속도, 온도, 농도에 대한 측정을 시행하였으며, 본 연구에서는 속도와 농도에 대한 비교만 시행하였다.

4.1 계산 영역 및 방법

위에서 언급한 실험은 대기중에 분출하는 가스 제트의 실험이다. 가스는 길이가 약 1m, 지름 10cm 관을 따라 2.5cm의 노즐에서 대기중으로 분출된다. 이때, 길이 1m의 관을 흐르는 동안 완전 발달된 와류유동이 형성된다고 가정하고 입구유동 조건을 이에 해당하는 속도 프로파일로 가정하였다. 계산 영역은 Fig. 4에 나타냈다. 그림에서 보이는 바와 같이 2.75×1.4 m^2의 임의의 영역을 선택하였다. 분출 속도는 40 m/s이고 계산 격자는 171×100, 171×112, 171×224로 계산하였으며, 결과값은 171×100에 대한 값을 나타내었다.

4.2 계산 결과

속도는 제트가 분출되는 노즐 부근에서는 초기 속도를 유지하다가 x가 5d이상이 되면

감소하기 시작한다(potential core region). 이 영역을 지나면, 전 영역에 걸쳐 난류 혼합이 이루어지면서 제트는 성장하기 시작한다 (transitional region). 이후 속도는 계속 감소하면서, 속도 프로파일은 “similarity”를 나타나기 시작한다 (similarity region)[5]. 이러한 경향은 Fig. 5의 real-jet (실제 조건으로 계산한 유동에서의 제트)과 source-jet (분출되는 제트를 생성항으로 처리한 유동에서의 제트)의 속도 벡터에서 명확하게 나타난다. Fig. 5의 원 안의 속도 벡터를 보면, 초기 분출 속도가 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 점점 하류로 진행할수록 속도 프로파일이 일정한 모양을 유지하게 된다. Real-jet 계산과 source-jet 계산 결과는 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6은 축 방향 속도 프로파일을, Fig. 7은 농도 분포 예측값을 실험값과 비교한 그림이다. 속도 프로파일과 농도 분포는 실제 조건에서 계산한 것과 생성항 처리에 의하여 계산한 결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 오차는 약 4% 내외로 나타났다. 실험값과의 비교에서도 속도 프로파일은 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Potential core 영역에서는 분출 속도가 유지 되기 때문에, 축 방향 속도는 상류에서는 일정한 값을 보여주고 있다. Fig. 7의 농도 분포를 보면, 실험값은 제트가 분출되자 마자 농도가 감소하기 시작하는 것으로 나타났으나, 예측값은 속도와 마찬가지로 일정 영역 (약 x<5d)에서 일정한 값을 유지한 후 급속히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 대류의 영향을 그대로 반영한 결과로 보인다. 즉, 속도 프로파일에서 나타난 것처럼 분출된 제트가 그 속도를 유지 (potential core region) 하기 때문에 물질 전달의 경우에도 확산항 (식 3의 세번째 항) 보다는 대류항 (식 3의 두번째 항)의 영향이 크게 작용하기 때문으로 생각된다. 이 영역에서의 예측값의 최대오차는 약 17%이다. 이러한 결과들은 생성항 처리 기법에 의한 제트의 유동 모사가 타당함을 보여주는 것이다.

5. 결론

주입장치의 유동 및 농도 계산을 위하여 1/4 모델을 개발하였다. 이 모델의 적용 타당성을 검토하기 위하여 1/2 모델을 가지고 대칭조건에 대한 확인 계산을 수행하였다. 그 결과 노즐과 노즐 사이의 대칭선을 기준으로 완전 대칭성을 확인하였다. 또한, 칼란드리아 쉘에 비하여 상대적으로 매우 작은 노즐 공 지름 때문에 발생할 수 있는 격자 생성의 어려움을 해결하기 위하여, 생성항 처리 기법을 도입하였다. 이러한 생성항 처리 방법의 타당성은 2차원 축대칭 free-jet의 계산 결과가 실험값과 잘 일치하며, 실제 조건에서의 계산 결과와 거의 일치하는 것을 확인함으로써 입증되었다. 이러한 결과로부터 주입계통에 대한 전산해석에서 생성항 처리에 의한 제트의 모사가 가능하다는 결론을 얻었다. 또한 SDS2 평가를 위한 주입계통 계산에서 생성항 처리에 의한 입구유동의 모사를 통하여 계산 격자생성을 보다 융통성있게 할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구 개발 과제의 일환으로 수행되었습니다.

Nomenclature

a_{nb}	Coefficient for neighboring cell in discretization equation
a_p	Coefficient for present cell in discretization equation
D_{AB}	Diffusion coefficient
k	Turbulent kinetic energy
p	Pressure
S_p, S_c	Coefficient for the linearization of source term
u_i, u_j	Velocity component, u, v, w
u'_i, u'_j	Fluctuation velocity
x_i, x_j	Coordinate system, x, y, z
e	Turbulent energy dissipation
f_p	Arbitrary variable in present cell
m	Viscosity
m_t	Turbulent viscosity
r	Density
s_k	Prandtl number for turbulent kinetic energy
s_e	Prandtl number for turbulent energy dissipation

참고 문헌

1. "Design Manual Liquid Injection Shutdown Units", Revision 6, XX-31760-DM-000, AECL (1996).
2. S. Nawathe, M.K. Sapra, L.R. Mohan, M.K. Nema and S.C. Mahajan, "Development and Qualification of Liquid Poison Injection System (SDS-2) for 500 MW(e) PHWRs", Presented in Work shop on Reactor Shutdown System, IV.4.1, IGCAR, Kalpakkam (1997).
3. “CFX-4.2: SOLVER Manual”, AEA Tech. (1997)
4. J.O. Hinze and B.G. Van Der Hegge Zijnen, "Transfer of Heat and Matter in the Turbulent Mixing Zone of an Axially Symmetrical Jet", Appl. Sci. Res. **A1.**, 435 (1949).
5. Joseph A. Schetz, “Injection and Mixing in Turbulent Flow”, Progress in Astronautics and Aeronautics, **68**, 19, (1980)

Table 1 Source treatment for inlet conditions

	S_p	S_c
Mass flow rate	0.0	$ru_{inlet}A_{inlet}$
Momentum	$-ru_{inlet}$	$ru_{inlet}u_{inlet}$
Mass fraction	$-ru_{inlet}$	$ru_{inlet}Y_A$

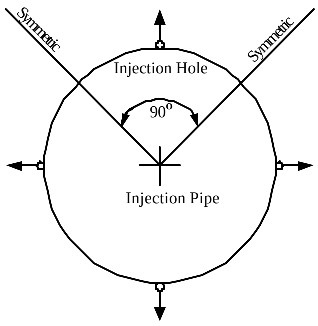

Fig. 1 Symmetric structure of the injection pipe in the cross section

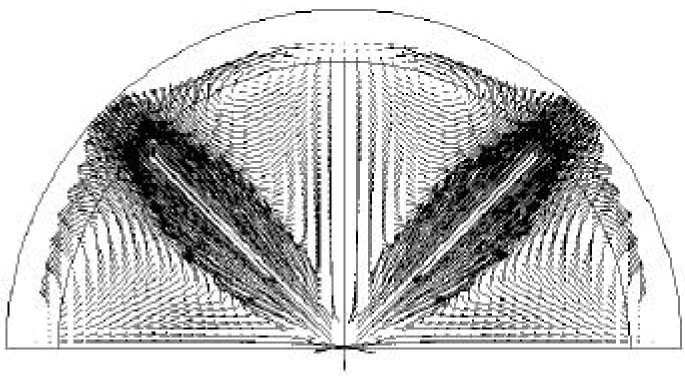

Fig. 2. Velocity vector for steady state jet flow

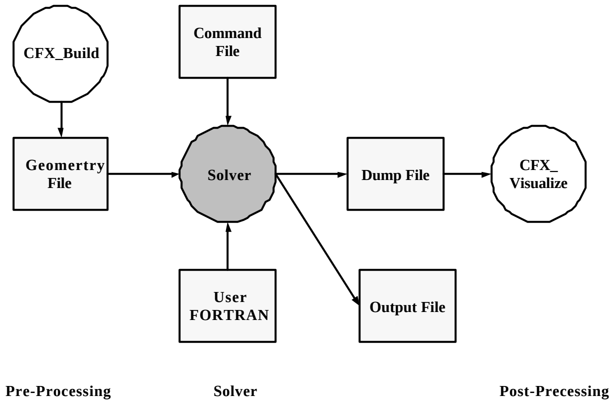

Fig. 3 Structure of CFX-4.3 code

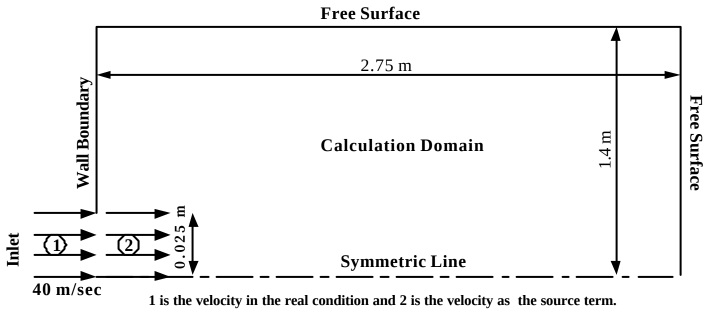

Fig. 4 Schematic diagram of the domain of free jet calculation

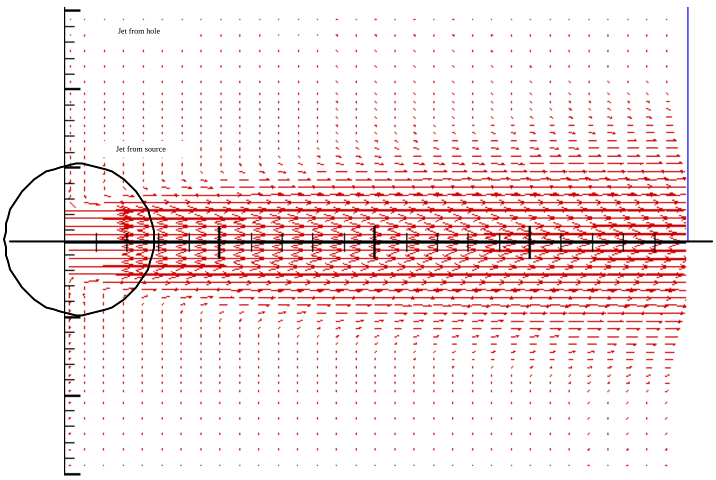

Fig. 5 Comparison of velocity vector for real- and source-jet

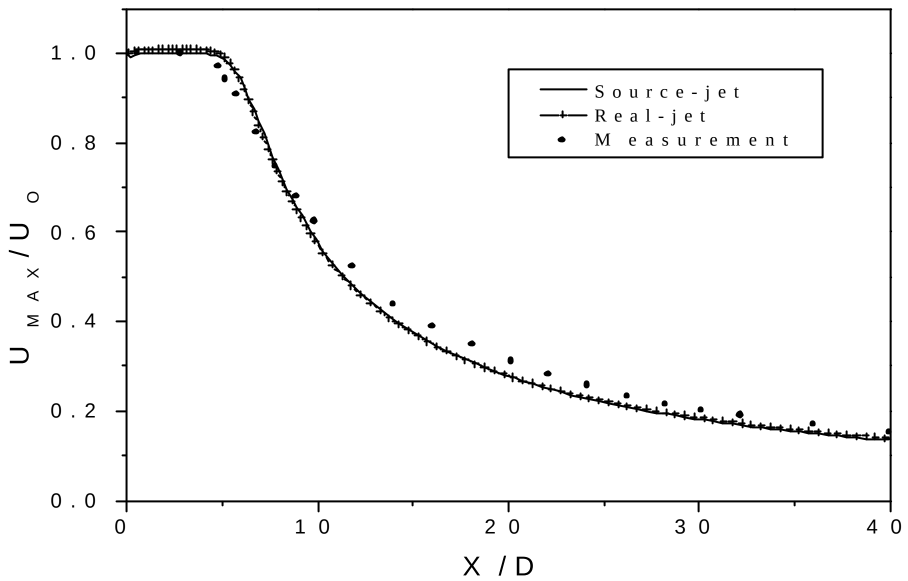

Fig. 6 Comparison of axial velocity profile

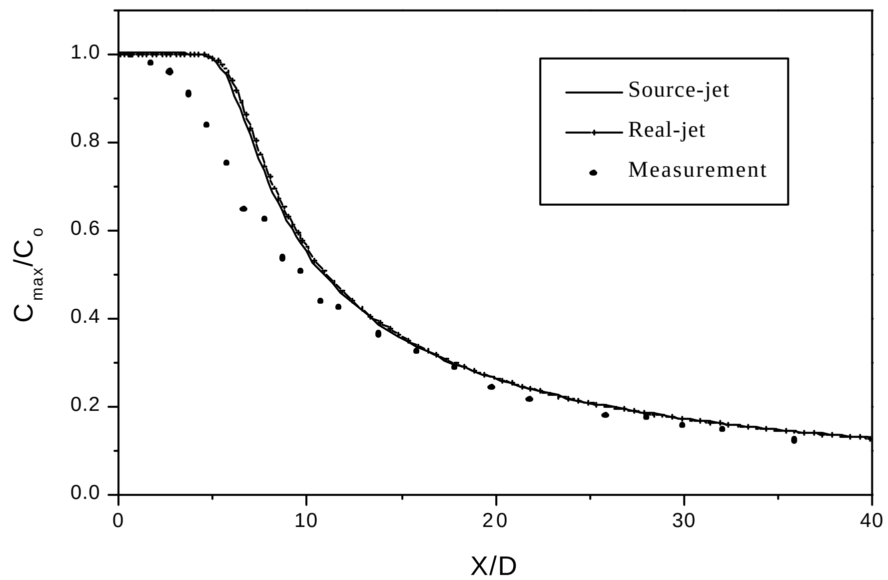

Fig. 7 Comparison of axial concentration distribution