

2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU-6 제2차 정지계통의 독극물 주입계통 유동 및 농도장 해석모델 개발

A Model for Analyzing CANDU-6 SDS No.2 Poison Injection System

윤혜정, 장동순
충남대학교
대전시 유성구 궁동 220

이보욱, 정창준
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150번지

요 약

CANDU 원자로에서 두 개의 정지 계통 중 SDS2는 액상 독물질 주입계통으로 고압화된 중성자 독물질을 노즐의 주입공들을 통해 원자로 감속재 내로 주입시키는 방법이다. 사고 발생시 원자로에 부반응도를 주어서 원자로를 안전하게 급속 정지시키기 위해 액상 독물질을 수초 내에 고속 제트의 형태로 주입한다. 이때 SDS No.2의 성능 요건 만족여부 확인을 위해 과도 상태 독극물 농도 분포를 알아내야 하며, 이를 위해 해석 모델을 개발하였다. 본 연구에서는 독극물 주입계통에서 고압 가스에 의해 주입되는 독극물 제트에 의한 과도 상태 독극물 농도 분포에 관한 해석을 위해 개발된 1D Hydraulics 모델과 3D CFD 모델을 제트 성장에 의한 독극물 농도 분포를 생성하는데 이용하였다. 1차원 수력학적 과도 상태를 모사하는 ALTRIG 코드를 사용하여 독극물 주입율을 계산하였고, 이것을 CFX-4 코드를 사용하여 환형 용기 내 독극물 제트 커튼을 모사하는 3D CFD 모델의 경계 조건으로 사용하였다. 독물질 주입 실험에 관하여 이 모델을 검증하기 위해 가용한 실험에 대해 검증 계산을 수행하였으며, 그 결과를 제시하였다.

Abstract

In CANDU reactor one of the two reactor shutdown systems is the liquid poison injection system which injects the highly pressurized liquid neutron poison into the moderator tank via small holes on the nozzle pipes. To ensure the safe shutdown of

a reactor it is necessary for the poison curtains generated by jets provide quick, and enough negative reactivity to the reactor during the early stage of the accident. In order to produce the neutron cross section necessary to perform this work, the poison concentration distribution during the transient is necessary.

In this study, a set of models for analyzing the transient poison concentration induced by this high pressure poison injection jet activated upon the reactor trip in a CANDU-6 reactor moderator tank has been developed and used to generate the poison concentration distribution of the poison curtains induced by the high pressure jets injected into the vacant region between the pressure tube banks. The poison injection rate through the jet holes drilled on the nozzle pipes is obtained by a 1-D transient hydrodynamic code called, ALTRIG, and this injection rate is used to provide the inlet boundary condition to a 3-D CFD model of the moderator tank based on CFX4.3, a CFD code, to simulate the formation of the poison jet curtain inside the moderator tank.

For the validation, an attempt was made to validate this model against a poison injection experiment performed at Bhabha Atomic Research Center (BARC) of India.

The interim progress will be presented and the validation analysis result is discussed.

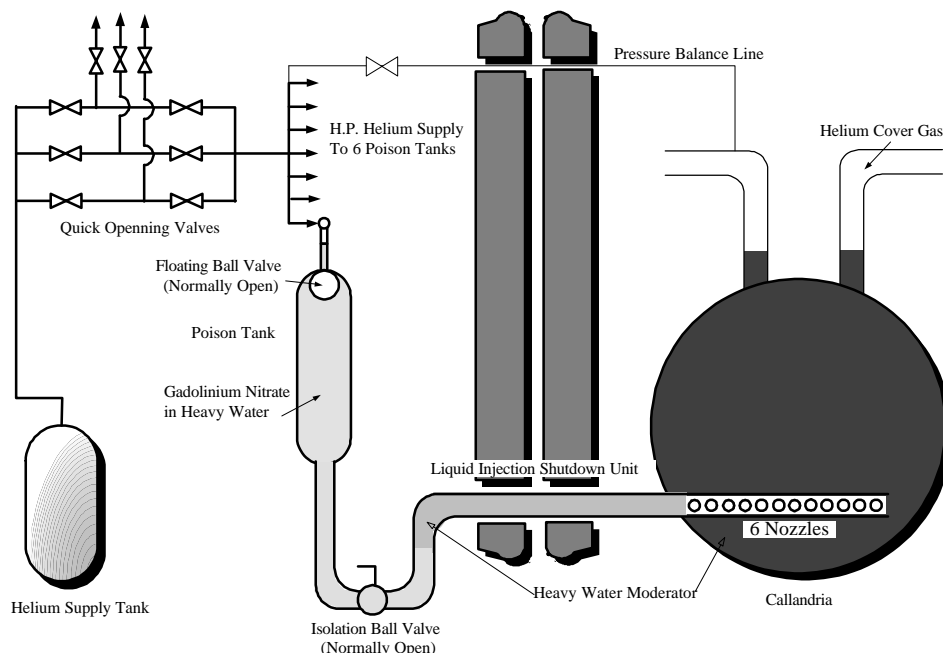


Fig. 1-1 Schematic of Liquid Injection Shutdown System

1. 서론

중수형 원자로의 제2차 정지계통은 액체 독극물을 원자로 감속재 내로 주입시켜 원자로를 급속 정지시키는 방법으로 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)에서 연구 개발하였고, 현재 국내에는 월성 1, 2, 3 및 4호기에 설치되었다.

SDS2는 사고가 발생하면 중성자 흡수 물질인 질산 가돌리늄 용액을 고압의 헬륨 가스를 이용하여 고속 제트 형태로 짧은 시간 내에 환형 용기(calandria shell)내의 감속재 안으로 주입하도록 설계되었다. 이렇게 생긴 고속 제트에 의해 감속재내에 유동장이 형성되고 확산과 대류에 의한 물질 전달이 발생한다. 보통 독극물 탱크내의 액상 독극물은 1.5초 내에 주입이 완료되므로 이 기간동안 감속재내로 퍼지는 독극물의 과도 상태 농도 해석이 필요하다.

본 연구는 독극물 주입 계통의 수력학적 과도 상태를 모사하고 독극물 제트에 의한 유동 특성과 물질 전달 현상을 해석하여 농도 분포와 제트 성장을 살펴보는 것이 목적이다. 또한 가용한 적용 가능한 실험 자료를 모사하며 타당성을 평가하였다.

2. 지배방정식 및 기타 주요방정식

SDS2는 그림 1-1과 같이 고압 헬륨 탱크, 독극물 탱크, 주입 노즐, 환형 용기로 이루어져 있다. 주입 계통의 고압 헬륨 탱크에서 환형 용기까지를 계산영역으로 정하여 노즐의 압력 변화, 노즐 주입구에서 주입되는 독극물의 주입 유량과 주입 속도, 질산가돌리늄 용액이 노즐의 주입구에 도달하는 시간 등을 살펴보기 위한 것이다. 이 계산은 AECL에서 개발한 ALITRIG 코드¹⁾를 사용하여 수행하였다.

주입계통의 독극물 주입 해석을 위해 질량방정식, 연속방정식, 에너지방정식, 운동량 방정식을 쓴다. 액상독극물은 비압축성이며 열 전달이 없는 유체로 가정하였다.

$$\text{Mass equation: } \frac{dM_j}{dt} = W_j \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, N$$

$$\text{Continuity equation: } \frac{dV_j}{dt} = Q_j$$

$$\text{Energy equation: } \frac{dE_j}{dt} = h_H W_j - P_j Q_j$$

$$\text{Momentum equation: } \frac{dQ_j}{dt} = B_j(P_j - P_{nj}) - C_j Q_j^2$$

각각의 주입배관에 관한 운동량 방정식의 B_j 와 C_j 항은 각 배관의 유체로 채워진 배관부분 (Segment)에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_j = 1 / \left[\sum_{i=1}^n \rho_i \frac{L_i}{A_i} \right]_j$$

$$C_j = \frac{1}{2} B_j \left[\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{A_i^2} \left(1 - \frac{A_i^2}{A_{i-1}^2} + K_i + \frac{f_i L_i}{D_i} \right) \right]_j$$

또한 n개의 파이프 부분에 관한 전체 압력강하는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i^- - P_i^+ = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{A_i^2}{A_{i-1}^2} + K_i \right) \rho_i v_i |v_i| \quad ; \quad i = 2, 3, \dots, n$$

이 식에서 f 는 Darcy's friction factor이다.

이 모델은 관성, 파이프 마찰력, 구부러진 부분의 손실, 유체 면적 변화에 의한 회복 불가능한 손실 등 수력 저항의 세밀한 계산을 포함한다. 과도해석은 액상 독극물이 주입 노즐의 첫 번째 주입공에서 역류할 때까지 각 주입 노즐의 감속하는 독극물 주입을 모사한다.

Growth of the Poison Jet Curtain

제2차 정지 계통이 작동되기 시작하면, 고압 가스에 의해 독극물 탱크 속의 독극물이 주입배관을 통해 환형 용기(Calandria shell)로 주입된다. 이때 독극물 탱크와 주입 노즐 사이에 이미 차있던 감속재가 먼저 빠져나간 후 독극물이 주입되는데, 독극물이 주입 노즐에 도달했을 때 감속재 제트는 이미 정상 유동 패턴을 보인다고 가정한다. 제트 유동이 정상상태라면, 제트류 형태의 독극물 성장을 평가할 수 있을 것이다. 이것은 R. Abel 의 'A model to predict curtain growth during poison injection' 보고서²⁾에 근거하였다.

단일 주입공로부터 빠져나가는 제트를 다음과 같이 나타낼 수 있다. ¹⁾

$$\left(\frac{V_{CL}}{v_0} \right) = \frac{C_1 d}{x}$$

이 식에서 V_{CL} 은 제트 중심을 따른 속도이며 v_0 는 주입구로부터 제트 유출 속도, d 는 주입공 반경, x 는 액상 독극물을 포함한 제트 길이이다. $k_{\infty} = \sqrt{2C_1}$ 이고 $C_1 = 6.50$ 이면,

$$x = k \sqrt{v_0 d} t^n$$

성장 상수 k 는 단일 선대칭 제트에 관한 값이며, 칼란드리아 튜브(calandria tube)와 주입공 간격에 관한 관련 인자이다. k 의 값은 칼란드리아 튜브 피치 p 와 주입 노즐의 주입공 간의 간격 s 가 무한대로 근접할 때 k_{∞} 로 근사되어야 한다. 그리고 실험 자료와 잘 맞는 k 값을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. ¹⁾

$$k = k_{\infty} \left[\left(1 - e^{-\frac{(\rho-D)C_T}{D}} \right) \left(1 + e^{-\frac{B_0}{d}} \right) \right]$$

$$n = 0.5 \left(1 + e^{-N_1 S/d} \right) \left(1 - A e^{-\frac{\rho-D}{D} N_2 S/d} \right)$$

$$C_T = 0.0421 v_0^{1.151}$$

이 식에서 C_T 는 칼란드리아 튜브 소멸 상수이며 B 는 주입구 간격 소멸 상수이다. B , A , N_1 , N_2 는 이 모델에 사용한 상관계수 값으로 실험 자료와의 fitting에 의해 결정된

다.

CFX-4.3을 이용한 CFD 모델의 지배 방정식은 다음과 같다. 유동장 해석을 위해서 연속 방정식과 운동 방정식을 풀고, 물질 전달 현상을 해석하기 위하여 물질전달 방정식을 푼다. 그리고 난류 해석을 위해 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} (\nabla \mathbf{U})^T) + \mathbf{B}$$

$$\frac{\partial \rho Y_A}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} Y_A - (\rho D_{AB} + \frac{\mu_t}{\sigma_A}) \nabla Y_A) = 0$$

난류 점성 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

난류 에너지와 소산율에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) - \nabla \cdot ((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \nabla k) = P + G - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \epsilon) - \nabla \cdot ((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \nabla \epsilon) = C_1 \frac{\epsilon}{k} (P + C_3 \max(G, 0)) - \frac{\epsilon}{k} (C_2 \rho \epsilon)$$

이며, 여기서, k 는 난류 운동에너지, ϵ 은 난류 에너지 소산율이다. CFX-4.3에서 이 모델의 경험 상수값은 $C_\mu=0.09$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.217$ 이다.

3. 생성항을 이용한 입구유동 모델링

독극물 주입공에서의 경계 조건을 질량, 운동량 및 독극물 농도의 생성항으로 처리함으로써 주입구 근처에서의 격자 생성에서 지나치게 조밀한 격자를 잡아야 하는 제약에서 좀 더 자유로울 수 있다. 이러한 이점으로 생성항 처리 방법이 선택되었으며, 생성항 처리가 아닌 실제 조건하에서의 제트류와 유사한 경향을 보이도록 모델이 개발되었다.³⁾ 생성항 처리를 모사하기 위해서 CFX-4.3 코드에서는 USRSRC 서브루틴을 사용한다. 이것은 경계 조건이나 유동 영역내의 밀도나 비열과 같은 상태량의 변화 등 정확하게 기술하지 못하는 경계 조건을 좀 더 구체적으로 지원할 수 있도록 하는 사용자 포트란이다. USRSRC 서브루틴을 사용하여, 각각의 노즐 주입구에서 주입되는 독극물 제트에 의한 환형 용기 내의 제트의 속도, 질량 유량, 농도를 계산하였다. 생성항은(Convection-Diffusion = Source) $\sum_m a_m (\phi_P - \phi_m) = S_c + S_P \phi_P$ 같이 표현된다. 이 식에서 S_P 와 S_c 는 표 3-1과 같이 나타낼 수 있으며, ϕ 가 속도일 때 운동량 방정식의 생성항에서 $S_P = -c$, $S_c = c \cdot \text{value}$ 로 나타내고 c 는 제어체적의 최소 질량플럭스, value 는 생성항에 대하여 필요한 속도이다.

Table 3-1 Source Terms for Boundary Condition

	Velocity	Mass fraction
S_c	$-\rho V_{inlet}$	$-\rho V_{inlet}$
S_P	$\rho V_{inlet} V_{inlet}$	$\rho V_{inlet} \cdot \text{value}$

3D 해석 모델의 형상은 노즐 주입구의 대칭적 구조를 이용하여 계산 영역을 1/4로 축소하였다. 그리고 주입되는 질산게돌리늄 용액에 의한 제트 유동은 계산 영역에서 노즐이 위치한 곳의 첫 번째 격자에서 생성항을 이용하여 주입을 계산하였다.

원자로에 설치된 독극물 주입 노즐은 6개이며 각 노즐 당 주입구는 336개이다. 주입 노즐의 주입구는 90°각도로 4개의 열이 있으며 노즐 1피치 당 16개의 주입구가 있다. 노즐은 총 21 피치이며 한 피치당 28.575cm이다.

본 연구에서는 SDS2가 시작되면, 독극물 탱크와 주입 노즐에 사이에 차있던 감속재가 먼저 주입되는 시간을 고려하여 독극물이 주입되는 시각을 유추하였고, 독극물 탱크의 폴리에틸렌 공이 탱크 바닥으로 가라앉은 이후부터 제트의 유동이 더 이상 고압의 He 가스에 영향을 받지 않는 시점을 고려하여 계산하였다. 노즐 한 피치 내의 주입 속도는 일정하다고 가정하였다. 노즐 한 피치에서 주입공들은 축방향으로 1 pitch길이에 해당하는 노즐부분의 한 가운데로 몰려서 배치되어 있으며 한 pitch내의 주입공 사이 간격에 비해 인접 피치의 주입공까지의 간격이 훨씬 크므로 인접 피치간의 제트의 간섭 영향이 작다고 가정하여 한 피치에 해당하는 감속재 영역만을 분리하여 모사하였다. 계산 영역은 그림 3-1와 같다.

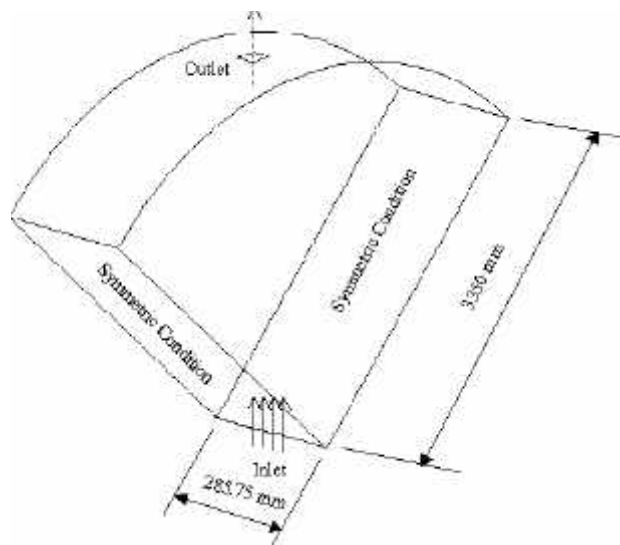


Fig. 3-1 Segment of Calandria Tank Used for 3-D Jet Simulation

4. 인도 BARC SDS-2 주입 실험의 제트 모사

제2차 정지 계통을 고려한 제트의 주입 속도를 이용한 제트 모사의 적용 타당성을 검토하기 위하여 1991년 인도 BARC에서 수행한 SDS2 실험⁴⁾을 모사하였다. 실험 결과를 검토하여 적용이 가능한 부분인 질소 가스 압력이 10, 15, 20 kg/cm² 각각의 경우를 실험하였다. 표 4-1은 실험 자료에 나타난 제트 성장 상수이다. 제트 성장은 25 frame/sec의 비디오 카메라로 사진을 찍어서 측정하였다. 단일 주입공 실험에서 측정된 제트의 속도와 제트 길이의 상관성으로부터 주입되는 독극물 제트의 평균 속도를 3-D 제트 모사에 적용하였다. 실험 자료와 비교한 제트 길이와 독극물 농도 분포의 상관성을 확인할 수는 없지만, 독극물 농도 0.001 ppm~1.0 ppm 정도에 해당하는 부분이 제트 머리가 될 것으로 보여진다. 그림 4-1, 4-2와 4-3은 단일 주입구 실험의 세 가지 경우를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 압력이 커질수록 독극물 농도가 높은 부분이 넓어지는 것을 볼 수 있다.

Table 4-1 Jet Growth Constant for Single Hole Case at 10, 15, 20 kg/cm²

Y ²	v ₀ t√A ₀	c	v ₀ t√A ₀	c	v ₀ t√A ₀	c
20 ²	24.376	16.41	86.31	18.53	---	---
30 ²	48.75	18.46	---	---	---	---
34 ²	---	---	---	---	---	---
40 ²	85.32	18.753	---	---	78.35	20.42
42 ²	---	---	---	---	---	---
50 ²	---	---	129.47	19.31	---	---
60 ²	170.632	21.10	172.62	20.85	156.70	22.97
70 ²	219.38	22.34	230.16	21.29	203.71	24.05
80 ²	280.32	22.83	302.10	21.19	266.40	24.02
90 ²	353.45	22.92	388.40	20.85	344.75	23.49
100 ²	450.96	22.175	489.10	20.44	438.77	22.79
110 ²	---	---	---	---	579.80	20.86

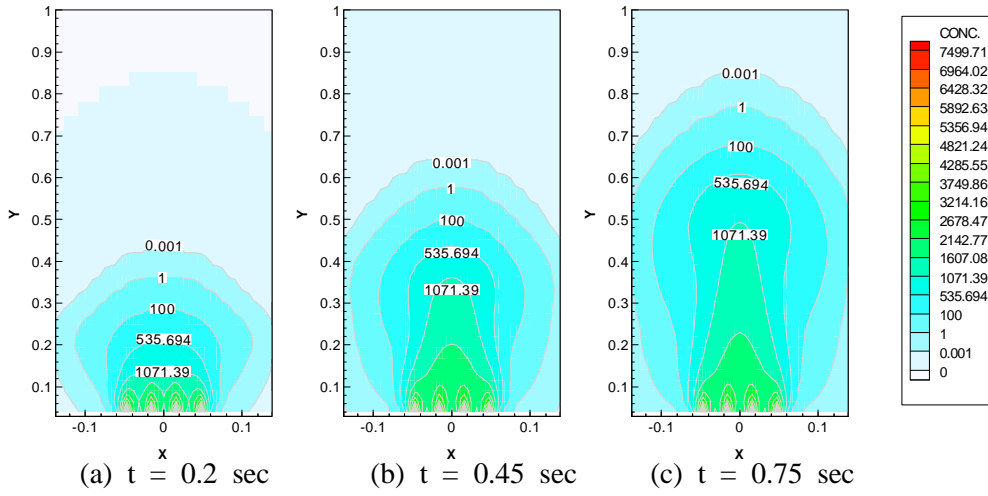


Fig. 4-1 Poison Jet Propagation with Time for He Pressure of 10 kg/cm^2

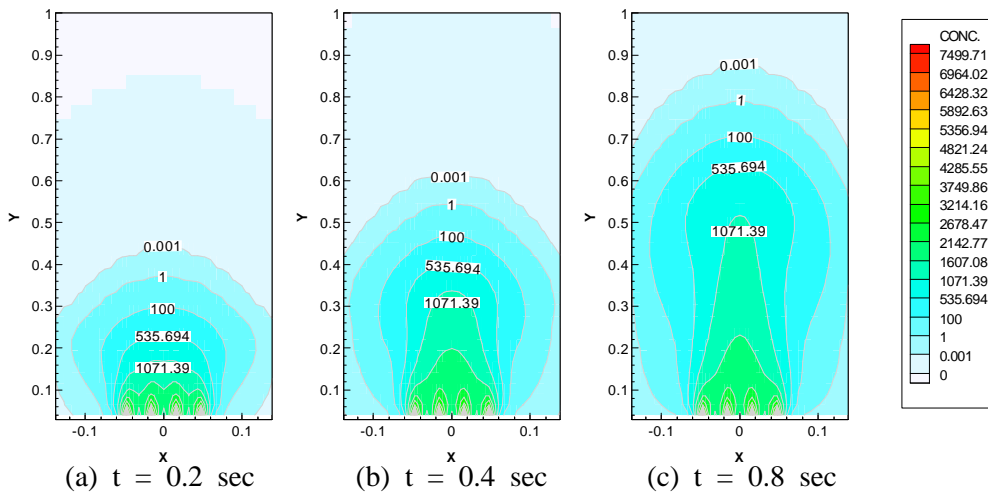


Fig. 4-2 Poison Jet Propagation with Time for He Pressure of 15 kg/cm^2

그림 12

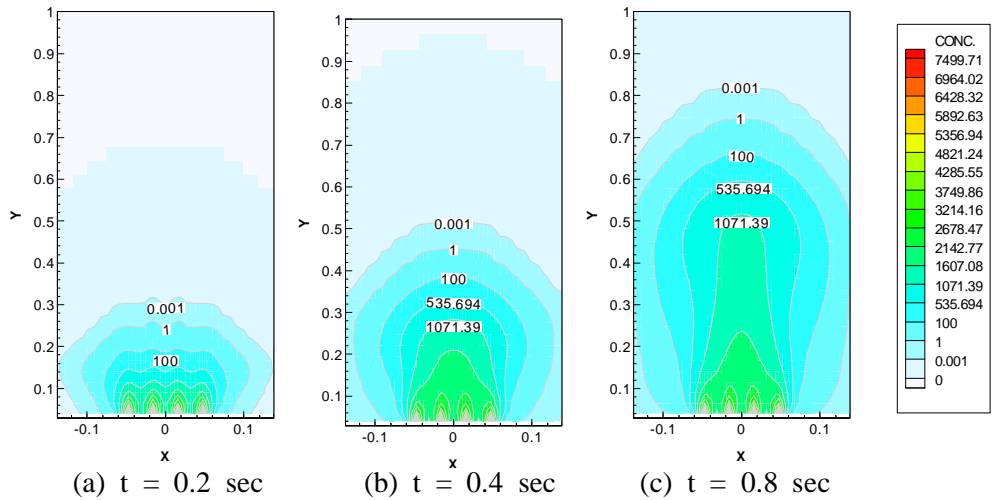


Fig. 4-3 Poison Jet Propagation with Time for He Pressure of 20 kg/cm²

5. CANDU-6 주입 계통 모델에 대한 ALITRIG와 CFX4.3 모사

다음은 CANDU-6 원자로 SDS2 독극물 주입계통에 대한 모사 결과이다. 모사에 사용된 액상독극물 주입계통의 주요 설계변수, 물성치 및 경계조건은 표 5-1과 같다. 해석결과 고압 헬륨 가스에 의한 노즐 내부의 압력은 그림 5-1과 같으며 점차 감소하다 폴리에틸렌 공이 탱크 바닥에 내려앉는 시각인 ball seating time 이후에는 아주 낮은 압력을 유지한다.

Table 5-1 Boundary Condition

Boundary condition	CANDU-6	
Moderator density	1098	kg/m ³
Poison density	1127	kg/m ³
Liquid viscosity	0.85×10 ⁻³	kg/m ² s
Active nozzle length	6.952	m
Nozzle hole diameter	0.0032	m
Lattice pitch	0.28575	m
Driving gas pressure	8.3	MPa
Poison concentration	8.0	kg/m ²

그림 5-2는 환형 용기 내로 주입되는 독극물 양을 나타낸 그림이다. 독극물 탱크와 환형 용기 사이의 노즐에 차있던 감속재가 먼저 주입되고 독극물이 주입된다. 노즐 위치에 따

라 주입 시각의 차이가 있다. 그림 5-3은 노즐 주입구에서 주입되는 독극물 제트의 출구 속도 프로파일이다. 주입이 시작되면 아주 빠른 속도로 주입되고 불이 가라앉은 후에는 속도가 급히 낮아진다. 그림 5-4는 독극물 제트에 의한 독극물 커튼의 길이를 나타낸 것이다. 주입부 제트 높이가 높게 나타나며 압력의 영향이 낮은 노즐 하단으로 갈수록 제트 높이도 낮게 나타났다. 그림 5-5는 CFX4.3 코드를 사용하여 계산한 독극물 제트에 의한 감속제 속도 벡터이다. 주입이 시작되면 아주 빠른 속도로 주입되며 주입이 끝나면 주입 속도가 감소하고 이미 주입된 독극물의 운동량과 농도가 천천히 감속제 내부로 확산된다. 그림 5-6는 독극물 제트 주입에 의해 형성되는 압력 분포이다. 생성항에 의한 주입으로 주입부 압력이 아주 높게 나타나나 전체 계산 영역에 비해 작은 부분이므로 속도장 형성에 큰 영향을 주지 않을 것으로 생각된다. 제트 선단의 압력이 상대적으로 높게 나타났다.

그림 5-7은 점성 계수를 나타낸 그림이다. 그림 5-8은 환형 용기 내 반경 방향으로의 중수에 대한 독극물의 농도분포(ppm)를 나타낸 그림이다. 독극물이 주입되기 이전에는 농도가 나타나지 않으며 시간에 따라 제트가 높이가 성장하는 것을 볼 수 있다.

그림 5-9는 반경방향 특정 위치에서의 독극물 농도분포이다. 주입이 시작될 때 주입공 부분의 농도는 아주 높게 나타나며 점점 감소하고 주입이 끝난 후에는 낮은 농도이나 내부로 확산되는 것을 볼 수 있다.

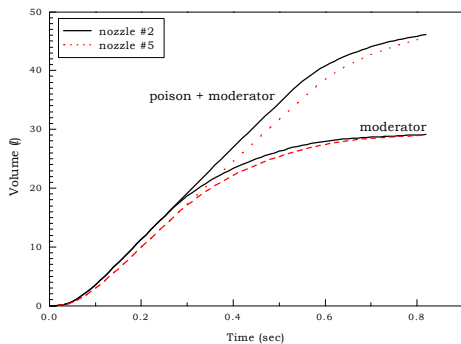
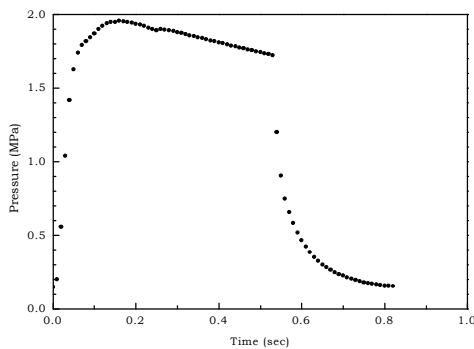


Fig. 5-1 Nozzle Inlet Pressure Profile

Fig. 5-2 Injected Volumes

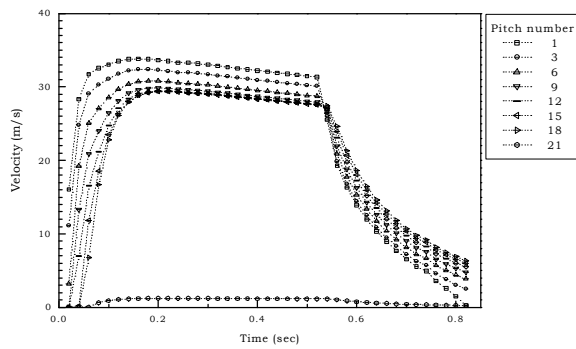


Fig. 5-3 The Velocity Profile of Poison Flowing through the Nozzle Holes

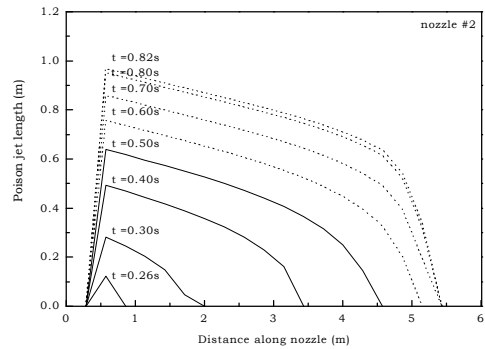


Fig. 5-4 Jet Length

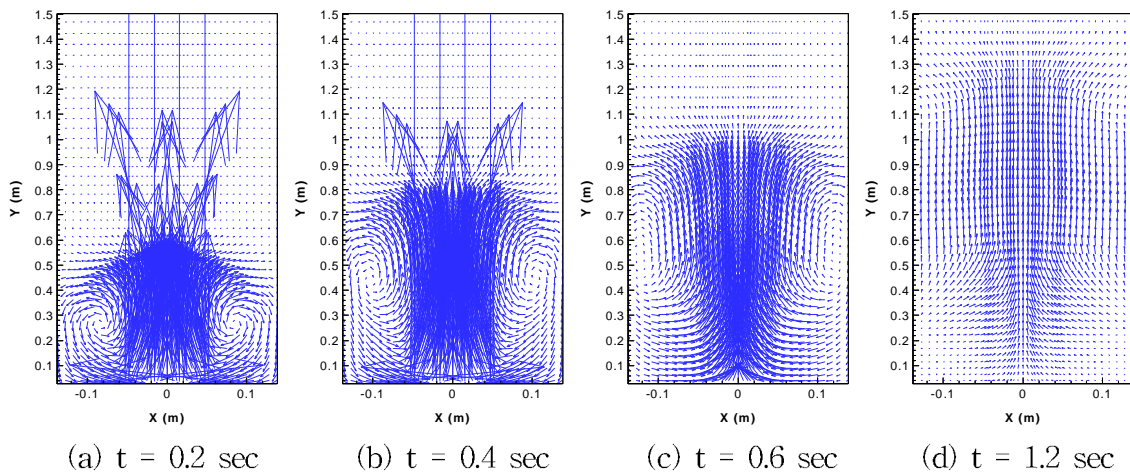


Fig. 5-5 Velocity Vector Plot in r-x Plane for the First Pitch (K=23)

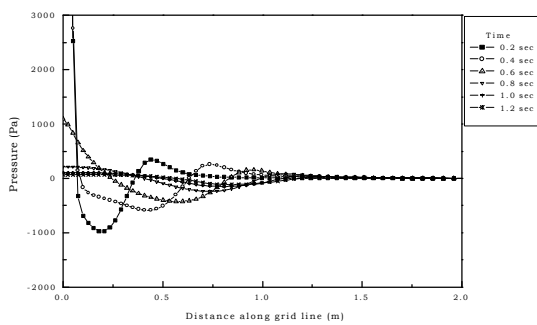


Fig. 5-6 Pressure Distribution in Radial Direction for the First Pitch

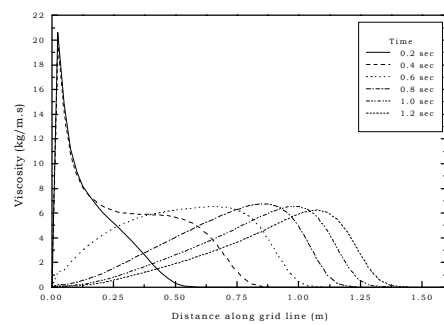


Fig. 5-7 Turbulent Viscosity in Radial Direction Grid Line for Nozzle #2

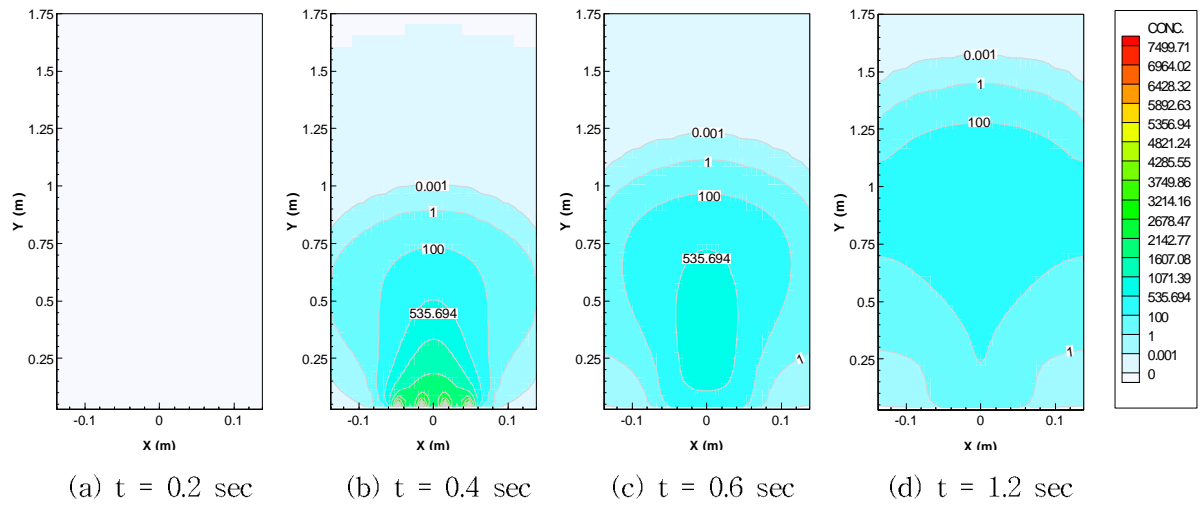


Fig. 5-8 Concentration Contour Plot in r-x Plane for the First Pitch (K=23)

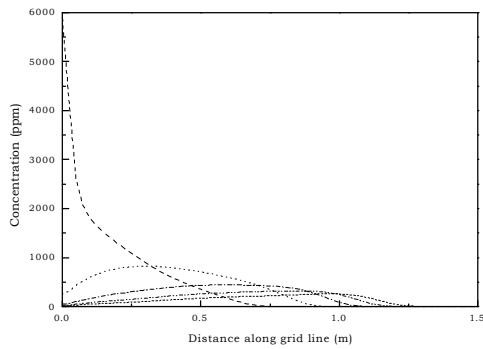


Fig. 5-9 Concentration in Radial Direction

6. 결론

중수형 원자로의 제 2 정지계통의 성능요건 만족 확인을 위한 일련의 작업중 중성자 흡수 단면적 생상을 위한 독극물의 과도 농도분포를 수행할 수 있는 모델을 개발하였다. 독극물 주입계통에서 고압 가스에 의해 주입되는 독극물 제트에 의한 과도 상태 독극물 농도 분포에 관한 해석을 위해 기 개발된 1D Hydraulics 모델인 ALITRIG와 상용 CFX4.3코드를 이용한 3D CFD 모델을 개발하여 제트 성장에 의한 독극물 농도 분포를 생성하는데 이용하였다. 1차원 수력학적 과도 상태를 모사하는 ALITRIG 코드를 사용하여 독극물 주입율을 계산하였고, 이것을 CFX-4 코드를 사용하여 환형 용기 내 독극물 제트 커튼을 모사하는 3D CFD 모델의 경계 조건으로 사용하였다. 독극물 주입 실험에 관하여 이 모델을 검증하

기 위해 BARC의 SDS2 독극물주입 실험에 대해 검증 계산을 수행한 결과 고무적인 결과를 얻었으며, 전체 모델의 평가를 위해 CANDU-6 SDS2 액상독극물 주입계통에 대해 모사를 수행하였다. 전체적인 모델의 성능은 물리적으로 합당한 경향의 결과를 보여주어 개발된 모델의 타당성을 정성적으로 입증하였다.

NOMENCLATURE

A	-Flow area	B	-Spacing decay-constant
E	-Helium gas energy inside a volume	C_1	-Correlating factor for axisymmetric jets
K	-Loss coefficient	C_T	-Calandria tube decay-constant
L	-Length of a liquid column	d	-Hole diameter
P	-Pressure	p	-Calandria tube pitch
v	-Liquid velocity inside the piping element	s	-Hole spacing
V	-Liquid volume	t	-Time since poison first leaves a particular nozzle hole
W	-Mass flow, helium outflow into a volume is positive	v_0	-Jet exit velocity from nozzle hole
ρ	-Mass density of the fluid	V_{CL}	-Jet center-line velocity
		x	-Length of jet containing poison

참고문헌

1. AECL, 1991, "Poison Injection Code-ALITRIG", TTR-372,
2. R. Abel, 1975, "A model to predict curtain growth during poison injection", AI-491 EXT.2, pp 2B-1of TTR-372, 1991, AECL.
3. K.M. Chae, S.Y. Yoo, B.W. Rhee, H.B. Choi, 2001, "A Numerical Study on Transient High Speed Free Jet into a Confined Enclosure", ICON-9
4. S. Nawathe, P. Umashankari, K. Balakrishnan, S.C. Manhajan, A. Kakodkar, "Development of liquid poison injection system (SDS-2) FOR 500 MW(e) PHWRs", 1991, BARC