

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU-6 제 2 정지계통의 액상 독물질 주입해석모델 개발 및 검증
Development and Validation of a Model for CANDU-6 SDS2 Poison Injection Analysis

이보욱, 정창준, 민병주
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150번지
윤희정, 최재호, 장동순
충남대학교
대전시 유성구 궁동 220

요 약

CANDU-6 원자로에는 두 개의 독립적인 정지계통이 있다. 이중 제 2 정지계통(SDS2)은 액상 독물질을 감속재 탱크 안에 고속으로 주입, 핵반응을 정지시키는 계통이다. DUPIC 핵연료나 저농축 우라늄핵연료가 장전된 원자로의 경우, 사고 발생 시 현재의 정지계통으로 원자로에 충분한 부 반응도를 주어서 원자로를 안전하게 급속 정지시켜야 하는 정지계통 성능요건을 여전히 만족시킬 수 있는지 확인할 필요가 있다. 이러한 해석을 위해 필요한 액상독극물에 의한 열중성자 흡수효과를 나타내는 증분단면적표를 생성하기 위하여 필요한 과도 독극물농도분포를 생산하고자 본 연구가 수행되었으며, 상기 증분단면적을 생산하는 일련의 해석코드들은 현재까지 기술이전이 되지않은 부분이다. 본 연구에서는 이를 위하여 독물질 주입계통에서 고압에 의해 노즐 주입공을 통해 주입되는 독물질 제트에 의한 과도 상태 독물질 농도장 분포에 관한 해석을 위해 개발된 모델을 기술하였으며, Generic CANDU-6의 SDS2 설계대로 제작한 독극물 주입 및 이로 인해 생성된 독극물 제트의 성장을 측정한 실험결과에 대해 검증계산을 수행하였다. 1차원 수력학적 과도 상태를 모사하는 ALITRIG 코드를 사용하여 독물질 주입율을 계산하였고, 이것을 범용 CFX-4 코드를 사용하여 개발한 제트유동 모델의 과도경계자료로 사용, 감속재 탱크 내 독물질 제트 커튼의 성장을 예측하였다. 모사결과 제트의 머리가 독극물 농도 200ppm에 해당된다고 가정할 때 실험자료를 근사하게 예측함을 밝힐 수 있었다. 추가 실험자료에 대한 검증계산이 계획되고 있다.

Abstract

In CANDU-6 reactor there are two independent reactor shutdown systems. The shutdown system no. 2 (SDS2) injects the liquid poison into the moderator tank by high pressure via small holes on the 6 nozzle pipes and stops the nuclear chain reaction. To ensure the safe shutdown of a reactor loaded with either DUPIC or SEU fuels 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. The motivation for this work arose from the fact that the computer code package for performing this task is not transferred to Korea yet.

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, ALITRIG, 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 commercial CFD code developed by AEA technology, to simulate the formation of the poison jet curtain inside the moderator tank.

For the validation, a simulation for a generic CANDU-6 SDS2 design poison jet growth experiment was made to evaluate this model's capability against experiment. As no concentration field was measured and only the growth of the poison jet height was obtained by high speed camera, the validation was limited as such. The result showed that if one assume the jet front corresponds to 200 ppm of the poison the model succeed to predict the jet growth quite closely throughout the transient. Further simulation is planned to extend the model validation.

1. 서 론

CANDU-6 원자로의 제 2 정지계통은 액체 독물질을 원자로 감속재 내로 주입시켜 원자로를 급속 정지시키는 방법으로 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)에서 개발되어, 국내 월성 1, 2, 3 및 4호기에 설치, 가동되고 있다.

SDS2는 사고시 원자로 트립신호가 발생되면 중성자 흡수 물질인 질산 가돌리늄 용액을 고압의 헬륨 가스를 이용하여 고속 제트 형태로 짧은 시간 내에 환형 용기(calandria shell)로 주입하도록 설계되었다. 독물질 주입 시 발생하는 고속 제트에 의해 유동장이 형성되고 확산과 대류에 의한 물질 전달이 발생한다. DUPIC 핵연료나 저농축 우라늄핵연료가 장전된 원자로의 경우, 사고 발생 시 현재의 정지계통으로 원자로에 충분한 부 반응도를 주어서 원자로를 안전하게 급속 정지시켜야 하는 정지계통 성능요건을 여전히 만족시킬 수 있는지 확인할 필요가 있다. 이러한 해석을 위해 필요한 액상독극물에 의한 열중성자 흡수효과를 나타내는 증분단면적표를 생성하기 위하여 필요한 과도 독극물농도분포를 생산하고자 본 연구가 수행되었으며, 상기 증분단면적을 생산하는 일련의 해석코드들은 현재까지 기술이전이 되지않은 부분이다. 본 연구에서는 이를 위하여 독물질 주입계통에서 고압에 의해 노즐 주입공을 통해 주입되는 독물질 제트에 의한 과도 상태 독극물 농도장 분포에 관한 해석을 위해 개발된 모델을 기술하였으며, Generic CANDU-6의 SDS2 설계대로 제작한 독극물 주입 및 이로 인해 생성된 독극물 제트의 성장을 측정한 실험결과에 대해 검증계산을 수행하였다.

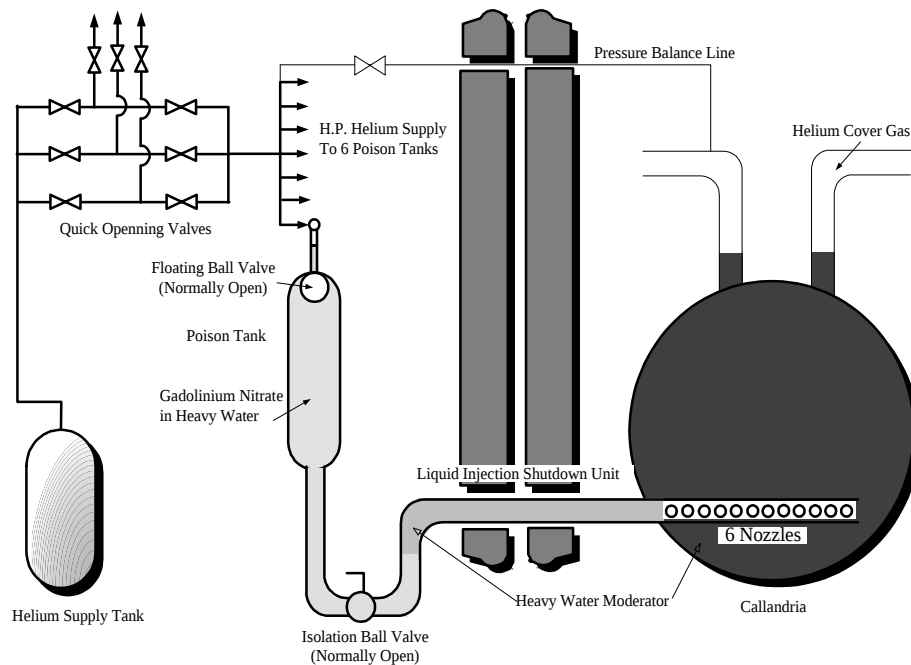


Fig.1 Schematic of liquid injection shutdown system

2. 지배방정식

SDS2는 그림 1과 같이 고압 헬륨 탱크, 독물질 탱크, 주입 노즐, 환형 용기로 이루어져 있다. AECL에서 개발한 ALITRIG 코드[1]를 사용하여 수행한 본 해석은 주입 계통의 고압 헬륨 탱크에서 환형 용기까지를 계산영역으로 정하여 노즐관 내의 압력 변화, 노즐 관 길이를 따라 설치된 주입공을 통해 주입되는 독물질의 주입 유량과, 질산 게돌리늄 용액이 노즐관의 주입공에 도달하는 시간 등을 살펴보기 위한 것이다.

액상 주입계통의 독물질 주입 해석을 위해 질량방정식, 연속방정식, 에너지방정식, 운동량 방정식을 쓴다. 독극물은 비압축성이며 열 전달이 없는 유체로 가정하였다.

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

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

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

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

$Q_j (= v_i A_i)$ 에 따른 총 유체의 운동량 방정식(Newton's 2nd law)이다. 각각의 주입 라인에 대한 운동방정식의 B_j 와 C_j 항은 각 라인의 유체로 채워진 파이프 부분에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

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. 유체가 주입 노즐의 첫 번째 주입공에서 역류할 때까지 각 주입 라인의 감속하는 독물질 주입도 모사한다.

ALITRIG의 독극물 제트 성장모델

제 2차 정지 계통이 작동되기 시작하면, 고압 가스에 의해 독물질 탱크 속의 독물질이 주입라인 및 주입노즐관을 통해 감속재 탱크로 주입된다. 이때 독물질 탱크와 주입노즐 사이에 이미 차있던 감속재가 먼저 빠져나간 후 독물질이 주입되는데, 독물질이 주입 노즐에 도달했을 때 감속재 제트는 이미 정상 유동 패턴을 유지할 것으로 예상되어 그렇게 가정한다. 제트 유동이 정상상태라면, 자유제트(free jet) 류 형태의 독물질 성장을 평가할 수 있을 것이다.

단일 주입구로부터 빠져나가는 제트를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

이 식에서 V_{CL} 은 제트 중심선에서의 축방향으로의 제트유동속도이며 v_0 는 주입공에서의 제트 유출 속도, d 는 주입공 반지름, x 는 free jet의 중심선을 따라 켄 중심선상 임의의 점의 축방향 위치이다. V_{CL} 의 정의에 따라 위식을 적분하여 t 의 지수를 n 으로 일반화시키면 아래의 식을 얻는다.

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

여기서 성장 상수 k 는 단일 선대칭 제트에 관한 값이며, 칼란드리아 튜브(calandria tube)와 주입공 간격에 영향받는 관련 인자이다. k 의 값은 칼란드리아 튜브 피치 p 와 주입 노즐의 주입구 간격 s 가 무한대로 근접할 때 k_∞ 로 근접되어야한다. 그리고 여러 값의 칼란드리아 튜브 피치 p 와 주입 노즐의 주입구 간격 s 에 대한 제트실험 자료와 잘 맞는 k 값을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있었다.

$$k = k_\infty f_1\left(\frac{p-D}{D}\right) f_2\left(\frac{Bs}{d}\right)$$

$$n = 0.5 f_3\left(\frac{s}{d}\right) f_4\left(\frac{p-D}{D}, \frac{s}{d}\right)$$

$$C_T = C v_0^a$$

이 식에서 k_∞ 는 노즐 주입공 간의 간격이 무한대이고, 칼란드리아 튜브가 존재하지 않는 경우에 대한 k 값이다. 또한 C_T 는 칼란드리아 튜브의 영향으로 인한 제트성장 억제효과를 나타내는 튜브 감쇄상수이며 B 는 주입공 간격 감쇄상수이다. 이 모델에 사용한 상관계수 B , A , N_1 , N_2 , C , a 값들은 Generic CANDU-6 발전소 설계특성을 감안한 SDS2 실험장치에서 수행된 여러 가지 독극물 제트실험 결과를 잘 예측하도록 찾은 값들이다.

이와같은 단일 선대칭 제트의 기본 모델식에 근거한 경험적(empirical) 제트성장모델과는

달리 본 연구에서는 상기 ALITRIG코드에서 계산한 주입공을 통한 독극물 주입률을 경계조건으로하여 감속재 공간에 주입되는 3차원 독극물 제트의 유동장 및 농도장을 3차원 CFD 코드 CFX-4.3을 이용하여 해석하는 모델을 개발하였다.

CFX-4를 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 는 난류 에너지 소실율이다. CFX-4에서 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 모델링

입구에서의 경계 조건을 생성항으로 처리함으로써 입구에서의 격자 생성에서 좀 더 자유로울 수 있다. 이러한 잇점으로 생성항 처리 방법이 선택되었으며, 생성항 처리가 아닌 실제 조건하에서의 제트류와 유사한 경향을 보이는 것이 확인되었다[2].

Table 1 Source terms for boundary condition

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

모델의 형상은 노즐관 및 주입공의 기하학적 배치의 대칭적 구조를 이용하여 계산 영역

을 감속재 탱크 공간 중 칼란드리아 튜브 1 피치에 해당하는 노즐관 길이에 해당하는 영역의 1/4로 축소하였다. 이렇게 모사한 이유는 노즐 한 피치내에 일렬로 설치된 4개의 주입공은 피치 중앙부에 몰려서 설치되어 있으며 주입공 간격에 비해 인접 피치의 주입공까지의 간격이 훨씬 크므로 인접 피치간의 간섭영향이 작다고 가정하여 한 피치씩 분리하여 계산하였다. 그리고 주입되는 질산게돌리늄 용액에 의한 제트 유동은 계산 영역에서 노즐이 위치한 곳 전방의 첫 번째 격자에서 생성향을 설치하여 주입을 모사하였다.

원자로에 설치된 독물질 주입 노즐은 6개이며, 각 노즐은 총 21피치로 구성되며 한 피치당 길이는 28.6cm이다. 주입 노즐의 각 피치당 설치된 주입공은 90°각도로 4개의 주입공이 일렬로 설치되어 있어 노즐 1피치 당 16개의 주입공이 있다.

본 연구에서는 SDS2가 시작되면, 독물질 탱크와 주입 노즐에 사이에 차있던 감속재가 먼저 주입되는 시간을 고려하여 독물질이 주입되는 시각을 이용하였고, 독물질 탱크의 폴리에틸렌 공이 탱크 바닥으로 가라앉은 이후부터 제트의 유동이 더 이상 고압의 He 가스에 영향을 받지 않는 시점을 고려하여 계산하였다. 노즐 한 피치 내에 일렬로 설치된 4개의 주입공을 통해 주입되는 유체의 주입 속도는 균일하다고 가정하였다. 노즐 한 피치에서 주입구는 노즐 가운데로 집중되어 있으며 주입구 간격에 비해 인접 피치의 주입구까지의 간격이 훨씬 크므로 인접 피치간의 영향이 작다고 가정하여 한 피치씩 계산하였다. 계산 영역은 그림 2와 같다.

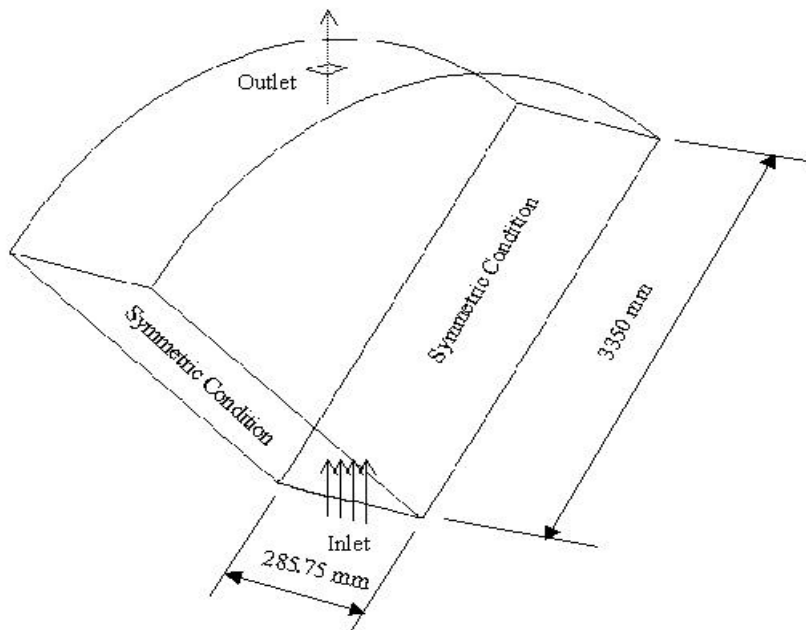


Fig. 2 Segment of calandria tank used for 3-D jet simulation

4. Generic CANDU-6 원자로 제 2 정지계통 액상독극물 주입실험에 대한 검증해석

본 연구에서 개발된 3차원 독극물 제트의 유동장 및 농도장 해석용 CFD 모델의 성능을 평가, 검증하기 위하여 캐나다 AECL에서 수행된 Generic CANDU-6 원자로의 액상독극물 주입계통의 실험[3]을 모사, 평가하였다. 실험은 액상독극물 주입계통의 Mockup실험시설에서 수행된 것으로, 원자로 트립 신호에 의해 고압헬륨탱크 하단의 밸브를 연 시각으로부터 원자로내에 설치된 독극물주입 노즐관의 노즐공을 통해 주입되는 고속 액상독극물이 형성하는 고속제트의 성장과정을 설치된 고속 카메라를 통하여 측정, 기록하였다. 본 해석에서는 이 과정을 ALITRIG로 해석하여 노즐관의 특정위치에 설치된 노즐공을 통해 주입되는 액상독극물 양을 계산하였고, 이에 근거한 상기 제트성장모델에 의거 제트성장율을 계산하였으며, 이와는 별도로 ALITRIG에서 계산된 독극물 주입율을 3차원 CFD 코드인 CFX-4.3 모델에 경계조건으로 사용하여 독극물 제트의 성장을 예측하였다. 상기 실험자료 및 이에대한 ALITRIG코드의 예측과 함께 그림 1에 기술된 본 모델의 해석결과에 따르면 제트 머리(front)의 독극물 농도가 200 ppm에 해당된다고 가정할 때에 실험결과를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다. 앞서 발표된[4] 인도 BARC의 실험자료에 대한 본 모델의 예측능력과 본 해석에서 보여준 예측능력을 평가해 볼 때 본 연구에서 개발된 3D CFD 제트해석모델은 독극물 고속주입으로 인해 감속재탱크내에 형성되는 제트의 성장과 이로인한 농도장 특성을 잘 기술한다고 말할 수 있다.

5. 결 론

DUPIC 핵연료나 저농축 우라늄핵연료가 장전된 원자로의 경우, 사고 발생 시 현재의 정지계통으로 원자로에 충분한 부 반응도를 주어서 원자로를 안전하게 급속 정지시켜야 하는 정지계통 성능요건을 여전히 만족시킬 수 있는지 확인해야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 독물질 주입계통에서 고압에 의해 노즐 주입공을 통해 주입되는 독물질 제트에 의한 과도 상태 독물질 농도장 분포에 관한 해석을 위해 개발된 모델을 기술하였으며, Generic CANDU-6의 SDS2 설계대로 제작한 Mockup 실험시설에서 독극물 주입 및 이로 인해 생성된 독극물 제트의 성장을 측정한 실험결과에 대해 검증계산을 수행하였다. 1차원 수력학적 과도 상태를 모사하는 ALITRIG 코드를 사용하여 독물질 주입율을 계산하였고, 이것을 범용 CFX-4 코드를 사용하여 개발한 제트유동 모델의 과도경계자료로 사용, 감속재 탱크 내 독물질 제트 커튼의 성장을 예측하였다. 모사결과 제트의 머리가 독극물 농도 200ppm에 해당된다고 가정 할 때 실험자료를 근사하게 예측함을 밝힐 수 있었다. 기 발표된[4] 인도 BARC의 실험자료에 대한 예측능력과 본 해석에서 보여준 예측능력을 평가해 볼 때 본 연구에서 개발된 3D CFD 제트해석모델은 독극물 고속주입으로 인해 감속재탱크내에 형성되는 제트의 성장과 이로인한 농도장 특성을 잘 기술한다고 결론 내릴 수 있다. 추가 실험자료를 확보하는 대로 본 연구에서 개발된 3D CFD 제트성장모델의 타당성을 입증하기 위한 검증계산을 수행할 예정이다.

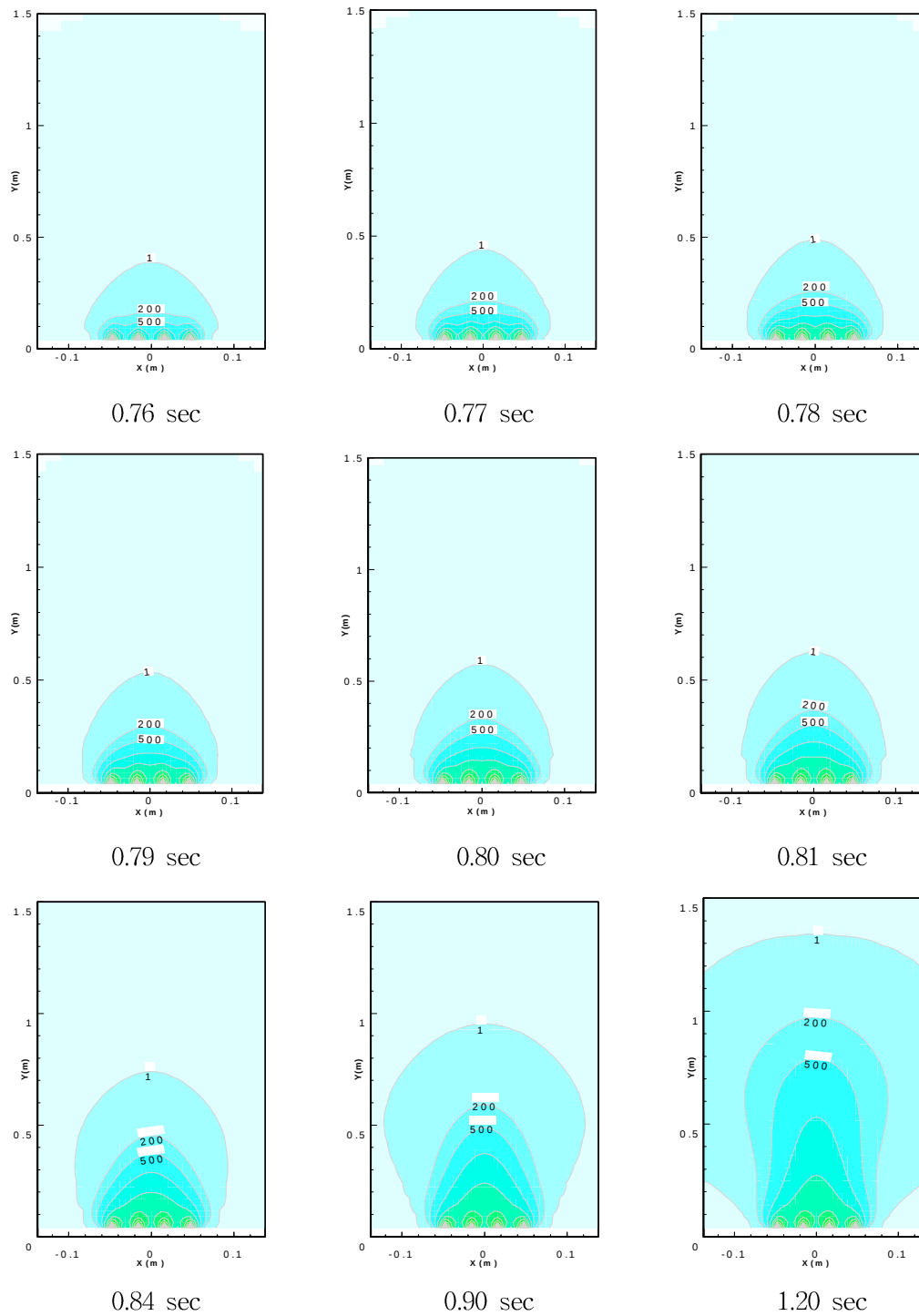


Fig.3 Concentration profile at 9 pitch of nozzle#1 for Generic CANDU-6
(delay time : 0.7578 sec)

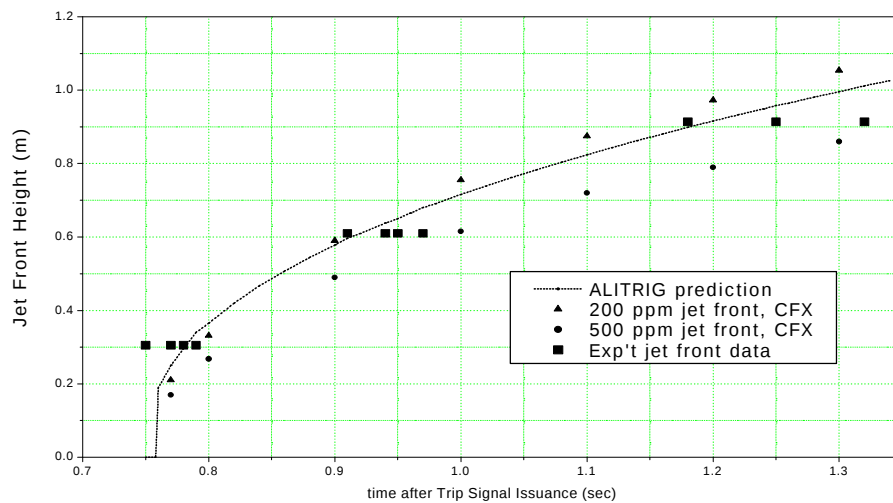


Fig.4 Jet Growth Exp't Data for CANDU-6 Generic Case with Calandria Tubes

참고문헌

- (1) Poison Injection Code-"ALITRIG" Version 1.10, TTR-372, AECL, AECL Proprietary.
- (2) 생성항을 이용한 중수로 주입계통의 중성자 흡수용액의 유동 및 농도해석, 채경명, 2001, 기계설계공학과 열유체 및 제어전공 석사논문, 충남대학교.
- (3) Validation of the New Version of ALITRIG Code Using Test Rig Results, S.A. Bajwa, 1991, 74-34700-AR-001, AECL, AECL Proprietary.
- (4) A CFD Model for High Pressure Liquid Poison Injection for CANDU-6 Shutdown System No. 2, B.W. Rhee and et. al., Proceedings of ICONE10, Tenth International Conference on Nuclear Engineering, April 14-18, 2002, Virginia, USA.

후기 (Aknowledgement)

본 연구는 논문 내용중 "CANDU-6 Generic"관련 자료는 한국원자력연구소와 캐나다 원자력공사 간의 공동연구협력협정(Join Research Agreement between KAERI and AECL)에 의거 사용이 허락되었음을 알리며, 사용을 허락한 캐나다원자력공사에 감사드립니다. 또한 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.