

## CUPID 코드를 이용한 CANDU 원자로 칼란드리아 탱크 내부유동 열수력 예비 해석

최수룡 · 이재룡\* · 김형태\* · 윤한영\* · 정재준<sup>†</sup>

부산대학교 기계공학부, \*한국원자력연구원

(2014년 10월 10일 접수, 2014년 12월 2일 수정, 2014년 12월 5일 채택)

### Preliminary Thermal-Hydraulic Analysis of the CANDU Reactor Moderator Tank using the CUPID Code

Su Ryong Choi · Jae Ryong Lee\* · Hyoung Tae Kim\* · Han Young Yoon\* · Jae Jun Jeong<sup>†</sup>

School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

\*Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI)

(Received 10 October 2014, Revised 2 December 2014, Accepted 5 December 2014)

#### 요약

CUPID 코드는 기기 스케일(Component scale)의 2상 유동(Two-phase flow) 해석 코드로서 다양한 2상 유동 조건의 실험 자료를 이용하여 검증되어 왔다. 특히, CUPID 코드의 CANDU형 원자로 감속재 탱크 내부 유동 해석능력을 평가하기 위해 1/4 규모 축소 실험장치의 실험결과를 이용하여 검증한 바가 있다. 본 연구에서는 이전 연구를 바탕으로 CUPID 코드를 사용하여 실제 원자로 감속재탱크 내부의 열수력 거동을 해석하였다. 감속재 탱크의 내부 구조는 아주 복잡하기 때문에 다공질 매질 방법을 적용하였으며 탱크 입구노즐 또한 기기 스케일 코드의 취지에 부합하게 아주 단순화하여 모델하였다. 해석결과와 정확성을 결정하는 가장 중요한 요소는 입구노즐의 모델 방법에 있는 것으로 나타났다. 입구노즐을 단순하게 모델하여 입구유량을 경계조건으로 부여하고 발전소 정상운전조건으로 계산한 결과, 부력에 의한 열성층화 현상이 발생하였다. 이는 전혀 타당하지 않은 것으로 입구 유동의 모멘텀을 정확하게 모의하지 않아 발생한 것이 나타났다. 이를 개선하고자 입구 유량과 운동량을 동시에 보존시킬 수 있도록 입구 노즐 면적을 축소하고 속도는 증가시켜서 계산한 결과, 사실적인 내부 유동장을 얻을 수 있었다. 결론적으로 계산 비용효과가 뛰어난 다공질 매질 방법에 입각하여 CUPID 코드를 실규모 감속재 탱크 열유동 해석에 적용할 수 있음을 보였고, 입구노즐의 적절한 모델이 가장 중요한 요소임을 확인하였다.

주요어 : CANDU 원자로 감속재 탱크, 온도분포, CUPID 코드, 다공질 매질, 입구노즐 모델

Abstract - The CUPID code has been developed for a transient, three-dimensional, two-phase flow analysis at a component scale. It has been validated against a wide range of two-phase flow experiments. Especially, to assess its applicability to single- and two-phase flow analyses in the Calandria vessel of a CANDU nuclear reactor, it was validated using the experimental data of the 1/4-scaled facility of a Calandria vessel at the STERN laboratory. In this study, a preliminary thermal-hydraulic analysis of the CANDU reactor moderator tank using the CUPID code is carried out, which is based on the results of the previous studies. The complicated internal structure of the Calandria vessel and the inlet nozzle was modeled in a simplified manner by using a porous

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
School of Mechanical Engineering, Pusan National  
University, Busan, South Korea, 609-735 korea  
Tel : 051-510-2455 E-mail : jjjeong@pusan.ac.kr

media approach. One of the most important factors in the analysis was found to be the modeling of the tank inlet nozzle. A calculation with a simple inlet nozzle modeling resulted in thermal stratification by buoyance, leading to a boiling from the top of the Calandria tank. This is not realistic at all and may occur due to the lack of inlet flow momentum. To improve this, a new nozzle modeling was used, which can preserve both mass flow and momentum flow at the inlet nozzle. This resulted in a realistic temperature distribution in the tank. In conclusion, it was shown that the CUPID code is applicable to thermal-hydraulic analysis of the CANDU reactor moderator tank using the cost-effective porous media approach and that the inlet nozzle modeling is very important for the flow analysis in the tank.

**Key words** : CANDU moderator tank, temperature distribution, CUPID, porous media approach, inlet nozzle modeling

### 1. 서 론

캐나다가 개발한 CANDU형 원자로에는 칼란드리아 탱크(Calandria tank)라 불리는 수평원통형의 감속재 탱크가 설치되어 있다(그림 1 참조). 이 탱크 내부에는 연료 채널 380개가 축 방향으로 나란히 배열되어 있다. 그림 2에 나타난 바와 같이 각 연료 채널은 칼란드리아 관(Calandria Tube)과 그 내부에 설치된 압력 관(Pressure Tube)으로 구성되며, 두 관 사이에는 이산화탄소가 절연 가스로 충전되어 있다. 압력 관 내부에는 핵연료가 장착되어 있다. 칼란드리아 탱크 내부에는 중성자 감속재(Moderator)로 사용되는 중수(Heavy water)가 채워져 있다.

사고나 고장으로 인해 원자로냉각계통이 기능을 상실했을 때, 감속재 계통은 핵연료에서 발생하는 붕괴열(Decay heat)의 일부를 제거한다. 즉, 압력 관에서 칼란드리아 관으로 어느 정도 열전달이 발생한다. 그런데, 냉각재상실사고(Loss of coolant accident)가 발생하면 압력 관 내부의 냉각재가 핵연료의 붕괴열(Decay heat)을 제거하지 못하여 결과적으로 압력 관 내부 온도가 상승하게 된다. 그 결과, 그림 2에서와 같이 압력 관 일부가 팽창하여 칼란드리아 관과 국부적으로 접촉(PT/CT contact)하게 되면, 칼란드리아 관의 온도가 상승하여 외부 표면에서 막 비등(Film boiling)이 발생할 수 있다. 이 경우, 열전달이 급격히 저하되면서 핵연료 채널이 파손될 수 있다. 따라서, 채널의 건전성을 유지하려면 막비등을 방지해야 하는데, 이는 감속재의 과냉각도를 충분히 유지하면 가능하다.

그런데, 실제 원자로에서는 칼란드리아 탱크의 입구·출구 온도만을 측정하므로 탱크 내부의 감속재 온도 분포를 알 수 없다. 따라서, 감속재의 과냉각도를 확인하기 위해 탱크 내의 감속재의 유동 현상과 온도

분포를 정확하게 예측하는 능력이 필요하다[1].

지금까지, 칼란드리아 탱크 내부의 국부 온도를 예측하기 위해 많은 실험과 해석 연구가 진행되었다. 캐나다 STERN 연구소의 Huget et al.[2, 3]은 칼란드리아 탱크를 실물의 1/4 크기로 축소된 실험 장치를 만들어 정상상태와 과도상태 연구를 위한 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 이용하여 MODTURC 코드를 검증하였다. 캐나다 Chalk River 연구소는 규모가 좀 더 큰 실험 장비를 구축하여 실험과 해석을 병행하였다[4].

그런데, 수많은 관다발로 구성된 칼란드리아 탱크 내부의 열수력 유동 현상을 예측하기 위해 모든 관들을 정교하게 모델하는 것은 비효율적이다. 이에 대한

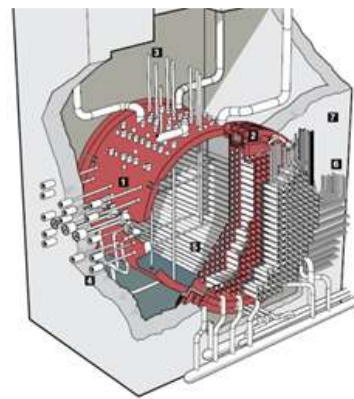


Fig. 1. 칼란드리아 탱크 개념도[9]

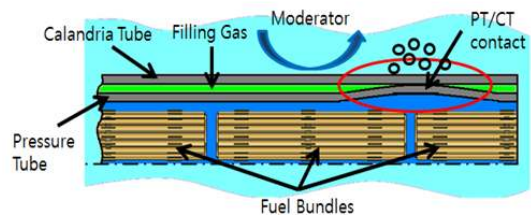


Fig. 2. 칼란드리아 관과 압력 관 개념도

대안으로 Hadaller et al.[5]은 관다발 영역에 다공성 매질 근사법을 적용했으며, 이를 위해 관다발 영역에 대한 비등방성의 압력강하 모델을 개발하고 MODTURC\_CLAS 코드에 구현했다. Yoon et al.[6, 7]은 CFX 코드에 다공질 매질의 압력강하 모델을 적용하여 칼란드리아 탱크의 3차원 계산을 수행하였다.

본 연구는 한국원자력연구원에서 개발한 기기 스케일(Component scale) 열수력 해석 코드인 CUPID[8-10]를 CANDU형 원자로 감속재 해석에 적용하기 위한 예비연구이다. 이전 연구에서 STERN 연구소의 실험결과를 이용하여 CUPID의 적용성을 평가한 바 있다. 이를 통해 CANDU 원자로 감속재 계통 해석기법을 개발하였고 CUPID 코드의 해석능력을 확인하였다. 본 연구에서는 이전 연구결과를 바탕으로 CUPID 코드를 실제 CANDU형 원자로 감속재 탱크 열수력 해석에 적용하였다. 기기 스케일 코드의 개념에 부합하게 감속재 탱크를 비유효효과가 뛰어난 다공성 매질 근사법으로 단순히 모델하여 정상 운전조건에서 탱크내부의 온도 분포, 즉, 과냉각도를 계산하고 그 결과의 타당성과 문제점을 밝히고자 한다.

## 2. CUPID 코드 개요 및 감속재 탱크 해석 적용성 평가

### 2-1. CUPID 코드 개요

CUPID 코드는 2상 유동을 해석하기 위해 과도, 2 유체, 3장 모델(Transient, two-fluid, three-field model)을 채택하고 있다. 3개의 장(Field)은 연속 액체, 액적(Droplets) 및 증기를 나타낸다. 각 장에 대한 질량, 에너지, 운동량 방정식은 별도로 수립하였으며, 각 장의 지배방정식은 계면(Interface)의 질량, 에너지 및 운동량 전달 모델에 의해 서로 연결된다.

-k-장에 대한 연속방정식:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) = \Omega_k, \quad (1)$$

여기에서

k=l, v, or d (Liquid, vapor or droplets),

$$\Omega_g = \Gamma_v + \Gamma_{wall} = -\Omega_l$$

- k-장에 대한 운동량 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k \underline{u}_k) = \\ -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\tau_k + \tau^{T_k})] \\ + \alpha_k \rho_k \underline{g} + \underline{M}_{ik}. \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서  $\underline{M}_{ik}$ 는 계면 운동량 전달 항이다. 난류 유동을 고려하기 위해서 표준  $k-\epsilon$  난류 모델을 이용한다. 한편, 액체와 액적은 열적평형 상태에 있다고 가정하였다. 따라서, 기체와 액체 장에 대한 에너지 방정식은 각각 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g e_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g e_g \underline{u}_g) = \\ -P \frac{\partial}{\partial t}(1 - \alpha_g) + E_i^D - P \nabla \cdot (\alpha_l \underline{u}_l) \\ + Q_{ig} - Q_{gi} + q_{wg}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \alpha_g) \rho_l e_l] + \nabla \cdot [(\alpha_l \underline{u}_l + \alpha_d \underline{u}_d) \rho_l e_l] \\ - P \frac{\partial}{\partial t}(1 - \alpha_g) + E_l^D - P \nabla \cdot (\alpha_l \underline{u}_l) \\ - P \nabla \cdot (\alpha_d \underline{u}_d) + Q_{il} + Q_{gl} + q_{wl}. \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서  $E_k^D$ 는 전도, 난류에너지 항과 점성 소멸 등의 확산항(Diffusion terms)을 나타낸다.  $Q_{ig}$ 와  $Q_{il}$ 는 계면 에너지 전달 항을 의미하며,  $Q_{gl}$ 은 비응축성 기체와 액체 사이의 단위 체적 당 열전달율이다.

상기 방정식 이외에 계면 견인력, 계면 열전달과 벽면 비등 모델, 상태 방정식 등이 Mathematical closure를 위해 필요하다. 위의 지배방정식은 비정렬 격자에 대해 반내재적(Semi-implicit) 수치 기법(유한 체적법)으로 풀고 있다[11-13].

그리고, 다공성 매질 영역(여기에서는 관다발 영역)의 압력 강하를 모의하기 위해서는 별도의 모델이 필요하다. 관다발의 유동 저항은 비등방성을 갖기 때문에 유동 입사각을 정의하고, 축 방향과 수직방향의 경험적 압력 강하 모델을 입사각의 함수로 상호 연계하여 비등방성 유동 저항을 표현할 수 있도록 하였다[8].

### 2-2. 감속재 탱크 해석 적용성 평가

CUPID 코드의 CANDU형 원자로 감속재 탱크 내부 유동 해석능력을 평가하기 위해 캐나다 STERN 연구소의 1/4 규모 축소 실험장치의 실험결과를 모의

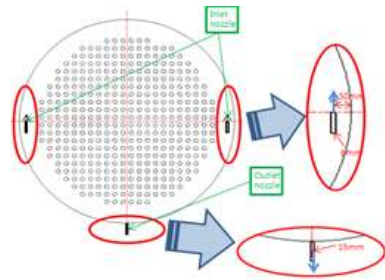
하고 평가한 바가 있다. 본 절에서는 해석방법과 주요 결과를 간략하게 설명한다.

STERN 연구소의 칼란드리아 탱크 축소 실험 장치는 그림 3(a)와 같이 구성된다. 탱크의 직경은 2m이고 축 방향 길이는 0.2m이다. 칼란드리아 탱크 내부에 직경 33mm인 인코넬 관 440개가 축 방향으로 71.5mm 간격으로 삽입되어 있다[10]. 이 관다발은 칼란드리아 관을 대신하여 열원 역할을 한다. 감속재 탱크 냉각을 위해 탱크 양쪽에 입구노즐 2개가 설치되어 있고 탱크하단에 출구노즐 1개가 설치되어 있다.

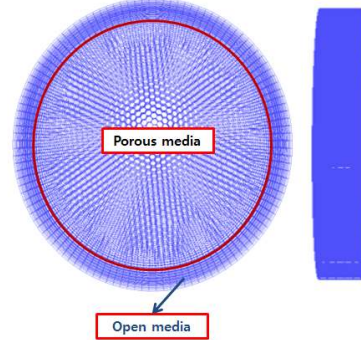
CUPID 코드로 탱크내부 유동을 모의하기 위해, 탱크 중심부에 있는 관다발 영역은 다공성 매질(Porous media)로 근사하고 다각격자로 표현했다. 관다발 외부의 순수한 유체 영역은 휘어진 정렬 격자를 사용하여 모델하였다. 격자민감도 계산결과, 관다발 영역의 격자에는 상대적으로 덜 민감했으나, 외곽 유체 영역의 격자에는 민감한 것으로 나타났다. 결론적으로 원주방향 2차원 단면에서 총 7,000개 이상의 격자를 사용하는 경우 감속재 온도분포가 일정한 값에 수렴하였으며 축 방향으로는 5개 층의 격자가 적절한 것으로 나타났다[15]. 탱크입구 노즐은 운동량속(Momentum flux)에 대한 불확실성을 최소화하기 위해 전체 격자수와 무관하게 단일격자 층으로 모델하였다.

CANDU형 원자로의 운전조건과 비슷한 정상 운전조건(입구유량 2.4kg/s, 열출력 100kW)의 실험을 모의한 결과가 그림 4-5에 나와 있다. 계산 초기에는 입구노즐에서 원통형 탱크 상부까지 좌우 대칭의 유동 형태를 보였고, 시간이 지나면서 수력학적 불안정성으로 인해 유동장이 오른쪽으로 기울어 졌다. 그림 5(a)는 y축의 중심에서 격자 개수에 따른 수직방향으로의 감속재 정상상태 온도 분포를 나타내며, 그림 5(b)는 y=0.57에서 수평 방향의 감속재 정상상태 온도 분포를 나타낸다. CUPID의 코드의 계산결과가 실험결과 및 MODTURC 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 보여준다.

칼란드리아 탱크 입구 유량을 정상상태 조건의 2.4kg/s에서 2.0kg/s으로 줄이고, 열출력은 100kW로 동일하게 유지하는 저유량 조건 실험도 모의하였다. 그림 6은 저유량 조건에서 정상상태 속도 벡터와 온도 분포를 보여준다. 내부 발열에 의한 부력이 입구 노즐 유동의 모멘텀 보다 커지게 되면서 탱크 내부에 부력에 의한 열성층화가 이루어졌다. 이 경우 정량적으로 비교할 수 있는 실험 데이터는 없지만, 비대칭



(a) STERN Lab. 칼란드리아 탱크 실험장치 개념도: 탱크 및 입·출구 노즐



(b) 칼란드리아 탱크 실험장치 격자

Fig. 3. STERN Lab. 칼란드리아 탱크 실험장치 개념도 및 격자[9]

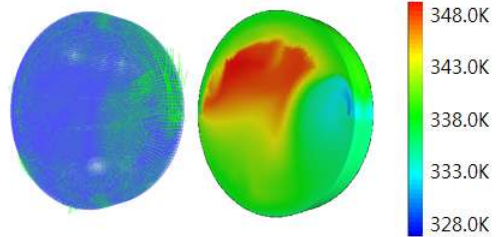


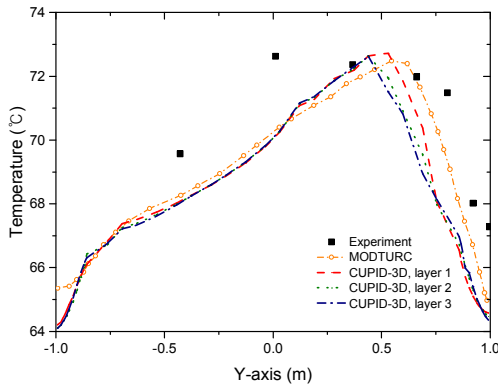
Fig. 4. 정상상태의 감속재 속도 벡터와 온도 분포 (정상운전조건)[10]

유동에서 열성층화 되는 유동의 형태로 전환되는 것을 CUPID 코드로 확인할 수 있었다.

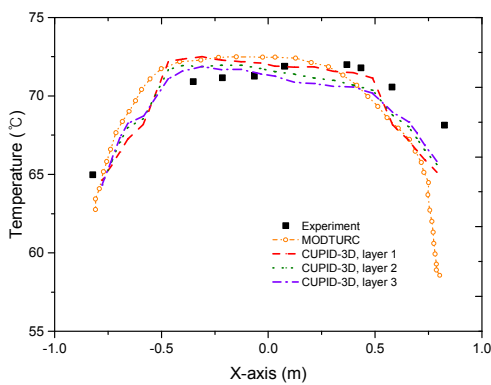
결론적으로 STERN 실험의 정상상태 해석을 통해서 CUPID 코드가 감속재 탱크 축소 실험장치의 유동현상을 다공질 매질 방식으로 잘 예측하는 것을 확인하였다.

### 3. CANDU 원자로 감속재 탱크 내부 유동해석

본 절에서는 이전 연구결과를 바탕으로 하여 실제 CANDU-6 원자로 감속재 계통의 전출력 정상상태 운전조건을 기기 스케일의 CUPID 코드로 모의하여 감속재 탱크내부 온도 분포를 계산하고, 그 결과의 타당성과 문제점을 고찰한다.



(a) 수직방향 감속재 온도 분포 (x=0m)



(b) 수평방향 감속재 온도 분포 (y=0.57m)

Fig. 5. 수직 및 수평 방향 감속재 온도[12]

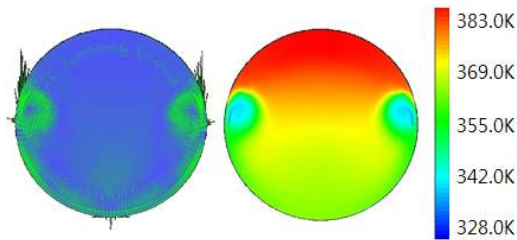


Fig. 6. 감속재 속도 벡터와 온도 분포 (저유량 조건) [10]

3-1. 탱크 모델링 및 경계조건

3-1-1. 칼란드리아 탱크 모델링

그림 7은 CANDU 원자로의 칼란드리아 탱크 개념도이다. 탱크의 직경은 7.6m이고, 축 방향 길이는 6m이다. 칼란드리아 탱크 내부에는 칼란드리아 관 380개가 축 방향으로 삽입되어 있다[6-7].

탱크 냉각을 위해 그림 7(a)와 같이 탱크 좌우에 각각 4개씩, 총 8개의 입구 노즐이 설치되어 있다. 그림 7(b)와 같이 X축과 탱크 중심에서 가까운 쪽의 입

구 노즐 모서리가 이루는 각도는 3.5°이고, 그림 7(c)와 같이 14° 만큼 기울어져 있다. 입구 노즐은 부채살 모양의 덕트이며, 4개로 나누어져 있다. 입구 노즐 구멍 하나의 가로-세로 길이는 각각 0.076m, 0.189m이다. 출구노즐은 그림 7의 (b)와 같이 X-Y 단면 (탱크 축의 수직인 단면)에서 6시 방향을 기준으로 반시계 방향으로 16.195°만큼 기울어진 위치에 있다.

칼란드리아 탱크 내의 관다발 영역은 앞 절의 연구 결과를 참조하여 다공성 매질 모델을 이용하여 다각 격자로 모델링한다. 칼란드리아 탱크의 다공성 매질 영역의 공극율은 그림 8의 핵연료 채널의 배열을 이용하여 계산하였다. 칼란드리아 관 사이의 간격(Pitch)은 0.286m이고, 칼란드리아 관의 직경은 0.131m이다. 공극율  $\gamma$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다[15].

$$\gamma = 1 - \frac{\pi D^2/4}{p \times p} = 1 - \frac{\pi 0.131^2/4}{0.286^2} \approx 0.835 \quad (5)$$

그리고, 투과율은 공극율과 같다고 가정한다.

그림 9는 CANDU 원자로 칼란드리아 탱크를 모델링한 격자 모습이다. 그림 9의 (a)와 같이 탱크 중심부의 붕 다발 영역은 다각 격자 1200개로 모델하였고, 외곽의 유체 영역은 휘어진 사각정렬 격자 1500개로 모델하였다. 유체영역 반경방향 길이(두께)는 0.4m인데 반경방향과 원주방향으로 격자 길이는 각각 0.04m, 0.139m의 격자를 썼다. 탱크 축 방향의 격자 길이는 최소 0.075m에서 최대 0.120m 사이이며, 비등간격의 62개 구간으로 나누었다. 축 방향의 앞뒤 1m는 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 sub-shell 없이 모델링하였다.

격자 생성은 먼저, 2차원으로 관다발 영역의 다각 격자 층과 외부 유체 영역의 휘어진 정렬 격자 층을 생성 후, 축 방향으로 적층하는 방식을 사용하였다. 해석에 사용된 3차원 격자의 수는 약 160,000개이다.

그런데, 복잡한 부채살 모양의 입구 노즐을 기기 스케일의 CUPID 코드로 정확하게 모델하기에는 한계가 있다(그림 7(c) 참고). 따라서, 그림 10과 같이 입구 노즐의 단면적은 같게 하고 유동 벡터를 3차원으로 표현함으로써 입구 노즐 격자 영역을 간략하게 모델링하였다. Yoon et. al.[16]은 감속재 계통 입구 노즐 유동을 CFX-10 코드로 해석하였는데, 정확하게 모델하려면 약 90만개 격자가 필요한 것으로 나타났다. 계산결과를 보면 입구노즐의 네 곳 출구에서 각

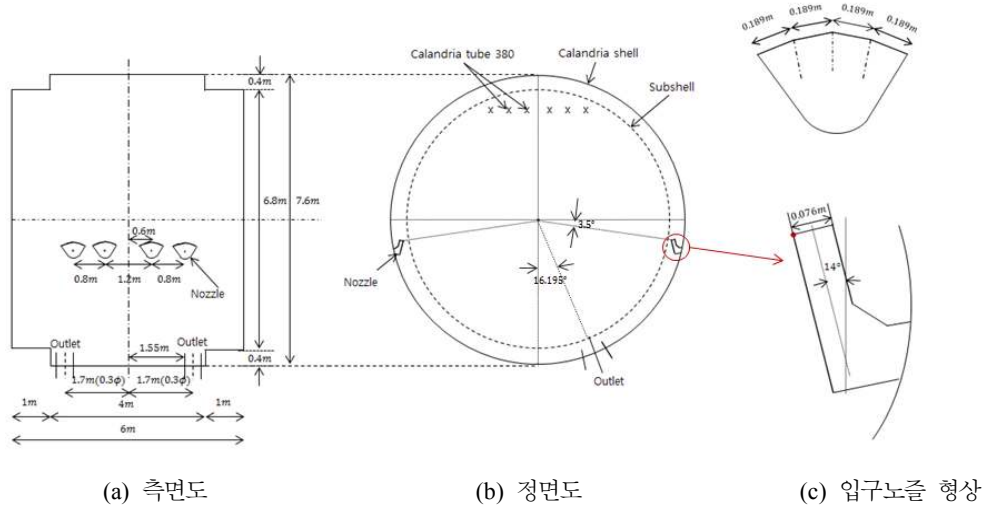


Fig. 7. 칼란드리아 탱크 측면도, 정면 및 입구노즐 형상

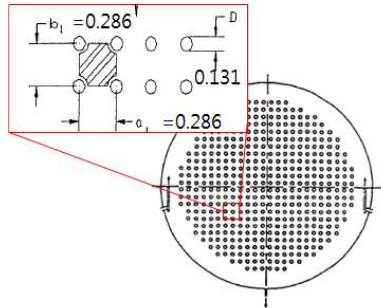


Fig. 8. 핵연료 채널의 배열[15]

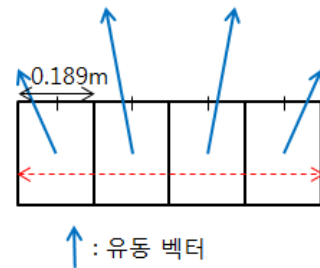


Fig. 10. 입구 노즐격자 모델링 간략화

각 가운데 유속이 크게 나타나고 가장자리에서는 역류가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 그림 10과 같이 단순한 4개 격자와 평균속도를 사용하는 경우, 노즐입구의 유체 운동량이 현저히 낮게 입력 될 수밖에 없다. 따라서, 본 연구에서는 다음 두 가지 계산을 시도하였다.

먼저, 단순히 입구 평균속도를 경계조건으로 사용하여 입구의 유량( $\rho u A$ )을 보존시켰다. 그 다음 계산에서는 Yoon et. al.[16]의 연구결과를 참조하여 노즐 입구면적을 적절히 축소하고 속도를 증가시켜 입구의 유량( $\rho u' A'$ )과 운동량( $\rho u' u' A'$ )을 동시에 보존할 수 있도록 하였다. 편의상, 전자를 “기본계산”이라 하고 후자를 “보정계산”이라 한다.

3-1-2. 열출력 분포

CANDU-6 중수로 감속재 계통의 거동을 모사하기 위해 실제 발전소의 노심 열출력 분포를 사용하였다 [17].

그림 11은 축 방향 시작점( $z=0.0m$ )으로부터 3.0m

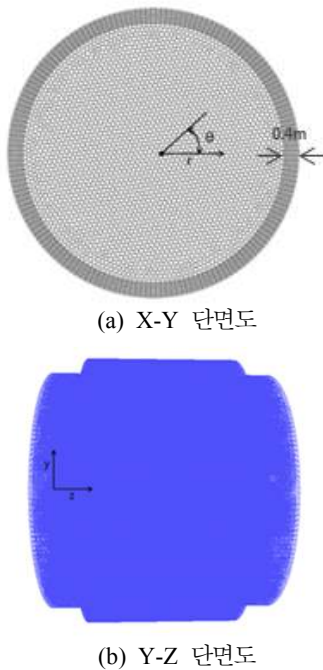


Fig. 9. CANDU 원자로 칼란드리아 탱크

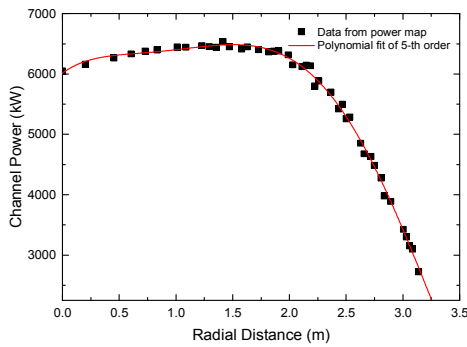


Fig. 11. 반경 방향의 출력 분포

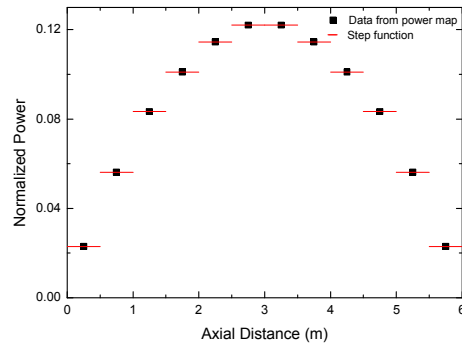


Fig. 12. 축 방향의 정규화 된 출력 분포

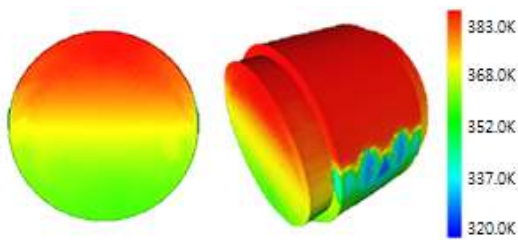


Fig. 13. 과도 상태의 감속재 온도 분포 (t=2300s)

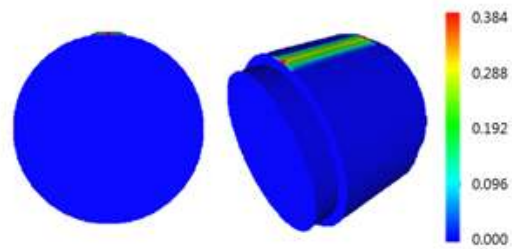


Fig. 14. 과도 상태의 감속재 기포율 분포 (t=2300s)

Table 1. 중수로 운전조건에서의 중수 물성치 및 초기 경계조건

변수	값
$\rho [kg/m^3]$	1085
$C_p [J/kg \cdot K]$	4207
$\dot{m} [kg/s]$	1019
$v_{in} [m/s]$	2.043
$q [MW]$	103
$T_{in} [K]$	320.0
$T_{out} [K]$	344.0

깊이의 위치에서 측정된, 노심 중심에서 반경방향의 평균 열출력 분포이다. 반경방향 열출력 분포는 노심의 중심에서 반경방향으로 대략 1.5m 떨어진 위치에서 최대 열출력을 나타냈다. 그림 12는 축 방향 거리에 따른 정규화 된 열출력 분포를 보여준다. 축 방향의 열출력 분포는 삼각함수 모양을 나타낸다. CUPID 계산에서는 축 방향 열출력 분포를 구간별 계단함수 형태로 나타내어 사용하였다.

3-1-3. 경계조건

입구노즐에서의 총 유량은 1019kg/s ( $v_{in}$  =2.043m/s)이고, 입구 온도는 320.0K이다. CUPID

코드는 경수(Light water)에 대한 해석만 가능하다. 따라서, 감속재를 중수 대신 경수를 사용하여 계산을 수행하였다. 경수는 중수보다 밀도가 작아서 입구속도를 증가시켜야 실제 발전소의 입구 유량과 동일해진다. 따라서, “기본계산”에는 2.123m/s의 입구속도를 사용하였다( $v_{in}$  =2.123m/s).

표 1은 중수로 운전조건에서의 중수 물성치 및 초기 경계값을 나타낸 것이다. 표에서 나타낸 중수의 물성치를 이용하여, 정상 상태 열평형을 계산하면 탱크출구의 온도는 344.16K가 된다[17]:

$$T_{out} - T_{in} = \dot{q} / \dot{m} C_p \tag{6}$$

여기에서  $\dot{q}$ 는 전체 열출력[W],  $C_p$ 는 평균 비열 [ $J/kg \cdot K$ ],  $\dot{m}$ 은 질량유량[kg/s]이다.

3-2. “기본계산” 결과

탱크내부 초기 유체온도를 320K로 균일하게 두고, 입구 유량과 출구 압력을 경계조건을 부여한 다음, Null transient 계산을 수행했다. 이 계산은 정상상태 (Steady state)에 도달하지 않았다.

그림 13, 14는 2300초 시점에서 감속재 탱크내부

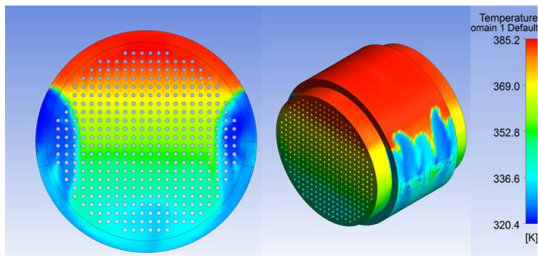


Fig. 15. 과도 상태에서의 감속재 온도 분포: CFX 코드[18]

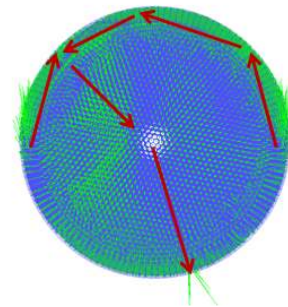


Fig. 16. 정상상태의 감속재 속도 벡터 (=4.245m/s, z=3.0m)

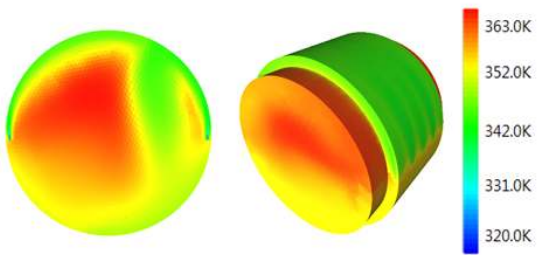


Fig. 17. 정상상태의 감속재 온도 분포 (=4.245m/s, z=3.0m)

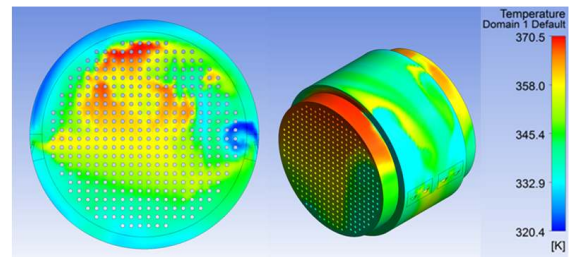


Fig. 18. 정상상태의 감속재 온도 분포: CFX 코드[18]

온도 및 기포율 분포를 보여준다. 계산 초기에는 좌우 입구 노즐에서 분사된 감속재가 칼란드리아 탱크 상부에서 만나 대칭적인 유동장을 형성했다. 그러나 450초부터 입구로 주입된 물이 칼란드리아 탱크 상부까지 도달하지 못하여 열성층화 현상이 점진적으로 나타났고, 2000초 정도에 이르러 탱크 상부부터 비등이 발생하였다. 이러한 열성층화 현상이 나타나는 이유는 입구노즐로 주입된 유체의 모멘텀 보다 부력의 영향이 더 커졌기 때문이다. 이는 STERN 실험장치의 저유량 조건의 해석과 정성적으로 유사하였다.

실제 CANDU-6 발전소에는 열성층화가 나타나지 않는다. 만약 열성층화가 발생하면 상부부터 점진적으로 비등이 발생하여 아래로 확산되기 때문에 원자로 운전이 불가능해진다. 따라서, 이와 같은 해석결과는 전혀 타당하지 않다.

참고로, 그림 15는 상용 코드 CFX를 이용하여 “기본계산” 조건과 유사하게 계산한 감속재 온도 분포이다[18]. 이 해석결과도 CUPID 해석결과와 마찬가지로, 입구 노즐로 주입된 유체가 칼란드리아 탱크 상부까지 도달하지 못하여 시간이 지남에 따라 열성층화 현상이 발생하였다. 두 코드의 해석결과에 나타난 이러한 열성층화 현상은 입구 노즐의 복잡한 형상을 단순화하면서 입구 유체의 모멘텀을 정확하게 모의하지 않아서 발생한 것으로 보인다.

### 3-3. “보정계산” 결과

앞에서 설명한 바와 같이 “보정계산”에서는 Yoon et. al.[16]의 연구결과에 나오는 노즐 출구에서 유체의 속도분포를 감안하여 유량( $\rho u' A'$ )과 운동량( $\rho u' u' A'$ )을 동시에 보존할 수 있도록 노즐 입구면적을 적절히 축소하였다. 여기에서는 각 노즐의 면적을 절반으로 축소하고 유체속도를 두 배 증가시켜, 결과적으로 유량은 변하지 않고 운동량은 “기본계산”에 비해 두 배 증가하도록 하였다.

이 계산은 약 1800초에 이르러 거의 정상 상태에 도달하였다. 그림 16, 17은 각각 축 방향의 수직한 단면에서 감속재의 속도 벡터와 온도 분포이다. 계산 초기에 입구로 주입된 유체가 칼란드리아 탱크 상부까지 도달하여 좌우 대칭한 유동장을 형성하다가, 시간이 지나면서 한쪽으로 치우치게 된다. 1800초에 이르러 유동은 정상상태에 도달하여 최종적으로 STERN 실험의 정상 운전조건 해석결과와 같이 비대칭적 유동장이 형성되어 유동 모멘텀과 부력 사이의 균형을 유지하게 된다.

그림 18은 CFX 코드를 이용하여 “보정계산”과 유사한 조건에서 계산한 정상상태의 감속재 온도 분포이다[18]. CFX 코드 해석결과 역시 CUPID 코드의 해석결과처럼 안정적인 비대칭적 유동장이 형성됨을 알 수 있다. 이 때, 탱크내부 국부최대온도는 370K이



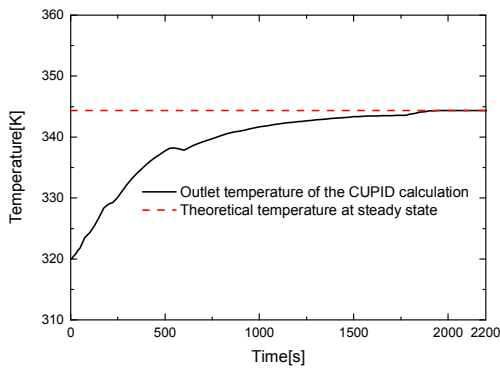


Fig. 19. 시간에 따른 출구온도 계산결과

었다. CUPID 코드 해석결과에서 감속재 국부최대온도는 363K로 두 코드의 결과 약 7K 차이가 났다. 두 계산에서 각각 중수와 경수가 사용되는 등의 차이가 있으므로 계산결과의 상세한 비교는 현 단계의 예비 계산에서 큰 의미는 없다. 다만, 두 결과의 정성적인 유사성은 아주 큰 것을 알 수 있다.

그림 19는 CUPID 코드의 시간에 따른 출구온도 계산 결과이다. 계산 결과를 보면 약 1800초 부근에서 정상상태에 도달하여, 출구 온도가 약 344.33K로 계산되는 것을 확인할 수 있다. 앞 절에서 이론적으로 계산한 출구온도 344.16K와 비교하였을 때 약 0.1% 정도의 오차가 발생하였다.

본 절의 계산결과를 통해서 입구 노즐 유동의 모멘텀이 중수로 감속재 온도 분포를 해석하는데 아주 중요한 인자임을 확인하였다. 추후 중수로 입구 노즐과 같은 복잡한 형상에 대한 모델링 및 해석 능력 개선이 CUPID 코드에 요구된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기기 스케일의 CUPID 코드를 이용하여 CANDU형 원자로 칼란드리아 탱크 내부의 열수력 해석을 수행하였다. 탱크 내부의 핵연료 관다발 영역은 다공성 매질 모델을 써서 단순하게 모델링 하였다. 형상이 복잡한 탱크 입구 노즐은 기기 스케일 코드의 취지에 부합하게 아주 단순한 격자로 모델하였다. 경계 조건 및 열출력 조건 등을 실제 발전소의 운전조건과 동일하게 적용하였다.

본 해석에서 노즐입구 경계조건의 중요성을 감안하여, “기본계산”과 “보정계산”을 각각 수행하였다. “기본계산” 결과, 계산초기에는 양쪽 입구유동이 칼

란드리아 탱크 상부까지 도달하여 대칭적인 유동양상을 보이다가 열성증화 유동으로 변화하였다. 이는 가열로 인한 부력이 입구 유동의 모멘텀 보다 지배적일 때 발생하는 현상으로 실제 발전소에서는 나타나지 않는다. 입구 노즐의 면적을 절반으로 줄이고 속도는 두 배 늘려 입구의 유량은 보존하되 모멘텀은 두 배 증가시킨 “보정계산”에서는 STERN 실험장치의 정상운전조건 실험결과와 유사하게 안정적이고 사실적인 비대칭 유동장이 형성됨을 확인할 수 있었다. 이 결과는 CFX를 이용한 해석결과와 정성적으로 유사하였다.

이와 같은 연구결과를 통해, CUPID 코드가 CANDU형 원자로 칼란드리아 탱크 내부 열수력 해석에 적용 가능함을 확인하였다. 특히, 다공성 매질 모델이 실험규모 원자로에 적용 가능하여 아주 적은 계산비용(Computational cost)으로 합리적인 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그리고, 감속재 탱크 내부 온도분포 예측에 있어 입구 노즐의 모델이 아주 중요한 요소인 것으로 나타났다. 따라서, 다중스케일 해석 기법을 이용하여 칼란드리아 탱크의 입구 노즐을 단순화시켜 모델 할 수 있는 체계적인 방법을 개발하면 더욱 정확한 감속재 온도 분포 해석이 가능할 것으로 보인다.

#### 후 기

이 논문은 원자력안전위원회(한국방사선안전재단)의 원자력안전연구센터 사업(과제번호 1305011)과 미래창조과학부(한국연구재단)의 원자력안전연구사업의 지원으로 수행되었다 (NRF- 2012 M2A8A4025964).

#### - 기호 설명 -

- $C_p$  : 비열
- $D$  : 직경
- $e$  : 내부에너지
- $E$  : 에너지 확산항
- $g$  : 중력가속도
- $\dot{m}$  : 질량유량
- $M$  : 계면운동량 전달항
- $p$  : 피치(Pitch)
- $P$  : 압력
- $q$  : 벽면 열전달항

$Q$  : 계면 열전달항  
 $T$  : 온도  
 $u, v$  : 속도

## 그리스문자

$\alpha$  : 부피 분율  
 $\gamma$  : 공극률  
 $\Gamma$  : 상변화율  
 $\rho$  : 밀도  
 $\tau$  : 전단력  
 $\Omega$  : 단위체적당 상간 질량 전달률

## 아래첨자

$d$  : 액적  
 $g$  : 기체  
 $gl$  : 비응축성 기체와 액상 간의 전달  
 $ig$  : 계면과 기상 간의 전달  
 $il$  : 계면과 액상 간의 전달  
 $k$  : 기상, 액상, 액적( $g, l, d$ )  
 $l$  : 액상  
 $v$  : 증기  
 $w$  : 벽면

## 위첨자

$T$  : 전단응력 텐서  
 $D$  : 확산항

## References

1. Fan, H.Z., Aboud, R., Neal P. and Nitheanandan, T.: "Enhancement of the Moderator Subcooling margin using Glass-peened Calandria tube in CANDU reactors", Proceedings of 30th CNS Conference, Calgary, Alberta, Canada, May 31-June 3, (2009).
2. Huget, R.G., Szymanski, J.K. and Midvidy, W.I.: "Status of Physical and Numerical Modelling of CANDU Moderator Circulation", Proceedings of 10th Annual Conference of the Canadian Nuclear Society, Ottawa, (1989).
3. Huget, R.G., Szymanski, J.K., Galpin, P.F. and Midvidy, W.I.: MODTURC- CLAS: "An Efficient Code for Analyses of Moderator Circulation in CANDU Reactors", Third International Conference on Simulation Methods in Nuclear Engineering, Montreal, Quebec, April 18-20, (1990).
4. Khartabil, H.F., Khartabil, W.W.R. Inch, Szymanski, J., Novog, D., Tavasoli, V. and Mackinnon, J.: "Three- Dimensional Moderator Circulation Experimental Program for Validation of CFD Code MODTURC\_CLAS", Proceedings 21-st Nuclear Simulation Symposium, Ottawa, Canada, Sep. 24-26, (2000).
5. Hadaller, G.I. et al.: "Frictional Pressure Drop for Staggered and In Line Tube Bank with Large Pitch to Diameter Ratio", Proceedings of 17th CNS Conference, Fredericton, New Brunswick, Canada, June 9-12, (1996).
6. Yoon, C. et al.: "Development and Validation of the 3-D Computational Fluid Dynamics Model for CANDU-6 Moderator Temperature Predictions", Nuclear Technology, vol.148, p.259-267, (2004).
7. Yoon, C. et al.: "Moderator Analysis of Wolsong Units 2/3/4 for the 35% Reactor Inlet Header Break with a Loss of Emergency Core Cooling Injection", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 43, No. 5, p.505-513, (2006).
8. Lee, J.R., Yoon, H.Y., Kim, H.T., Jeong, J.J.: "Development Moderator Temperature Prediction by using Porous Media Approach", Proceedings of ICONE20, Anaheim, CA, USA, (2012).
9. Park, S.G., Lee, J.R., Yoon, H.Y., Kim, H.T., Jeong, J.J.: "Preliminary Analysis of the CANDU Moderator Thermal-Hydraulics using the CUPID Code", Journal of Energy Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 331~337, (2012).

10. Park, S.K., Jeong, J.J., Lee, J.R., Yoon, H.Y., Kim H.T.: "Assessment of the CUPID code applicability to the thermal-hydraulic analysis of a CANDU moderator system", *Progress in Nuclear Energy* 75, p.72-79, (2014).
11. Jeong, J.J., Yoon, H.Y., Park, I.K., Cho, H.K., Lee, H.D.: "Development and preliminary access of a three-dimensional thermal hydraulic code, CUPID", *Nuclear Engineering AND Technology*, Vol.42, No.3, pp.279-296, (2010).
12. Jeong, J.J., Yoon, H.Y., Park, I.K., Cho, H.K.: "The CUPID Code Development and Assessment Strategy", *Nuclear Engineering AND Technology*, Vol.42, No.6, pp.636-655, (2010).
13. Yoon, H.Y. et al.: "CUPID Code Manual Volume I: Mathematical Models and Solution Methods", KAERI/TR-4403/2011, KAERI, (2011).
14. Tentner, A. et al.: "Computational Fluid Dynamics Modeling of Two-Phase Flow Topologies in a Boiling Water Reactor Fuel Assembly", *Proceedings of ICONE16, Orlando, USA*, (2008).
15. Lee, J.R., "Numerical Study of Heavy-Water Moderator System with CUPID", KAERI/TR-4509/2011, Korea Atomic Energy Research Institute, (2011).
16. Yoon, C., Park, J.H.: "Simulation of the Internal Flows of an Inlet Diffuser Assembly for the CANDU-6 Moderator Analysis", *Nuclear Technology*, vol. 160, pp.314-324, (2007).
17. 김형태: "MODTURC\_CLAS 코드를 이용한 감속재 3차원 열유동해석", KAERI/TR-3703/2008, Korea Atomic Energy Research Institute, (2008).
18. Kim, H.T., personal communication, (2014).
19. Lee, J.R., Park, S.K., Yoon, H.Y., Kim, H.T., Jeong J.J.: "Numerical Study for CANDU Moderator Temperature Prediction by using the Two-Phase Flow Analysis Code, CUPID", *Annals of Nuclear Energy* 59, 139-148, (2013).