

CANDU-6 감속재 열유동 해석방법론 개발 (II)

Thermal-hydraulic Characteristics of Moderator for CANDU-6 Reactors

유선오, 김만웅, 김효정

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

윤철, 민병주

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중수형 원자력발전소(CANDU)는 냉각재상실사고(LOCA: Loss of Coolant Accident)시 칼란드리아관과 압력관의 접촉으로 관 표면에서 드라이아웃이 발생할 경우 핵연료 핵연료채널의 손상을 초래할 수 있기 때문에, 감속재는 충분한 과냉각도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 그러나 핵연료채널의 건전성을 확인하기 위한 감속재의 열침원으로서의 성능평가가 만족할만한 수준으로 검증되지 않아 캐나다 규제기관인 CNSC(Canadian Nuclear Safety Commission)의 일반안전현안(GAI : Generic Action Items)으로 지정되어 있다. 이에 본 연구에서는 일반안전현안에 대한 대처기술개발의 일환으로 중수형 원자로인 CANDU-6의 감속재 거동을 해석하기 위한 전산유체역학 모델을 개발하였다. 이를 위하여 칼란드리아 내부에 설치되어 있는 380개 핵연료채널에 대하여 다공성매질 모델과 380개 실 모델로 모사하여 정상상태시 감속재내 핵연료채널 사이에서의 열유동 특성을 고찰하였다. 해석결과 정상상태시 칼란드리아 내부에서의 감속재 최대온도는 각각 82.75℃와 95.19℃로 예측되어 비등은 발생하지 않는 것으로 예측되었다. 한편 감속재의 유동양식은 관성력주도 유동(Moment Dominant Fluid Flow)과 부력주도 유동(Buoyancy Dominant Fluid Flow)의 혼합형 유동(Mixed Type Fluid Flow)형태임을 확인할 수 있었다. 한편 칼란드리아 내부유동이 부력과 관성력의 조합으로 인해 느리게 움직이고 있는 이차유동을 볼 수 있었다. 향후 본 연구의 해석결과는 사고시 과도해석을 위한 초기조건으로 활용할 예정이다.

ABSTRACT

The CFD models for analyzing the CANDU-6 moderator circulation are developed. One model uses a structured grid system with the porous media approach for the 380 Calandria tubes in the core region. The other uses a unstructured grid system on the real geometry of 380 Calandria tubes, so that the detailed fluid flow between the Calandria tubes can be observed. The results obtained by using the developed two models are compared. Since the predicted maximum temperature of the moderator inside the Calandria vessel under normal operating conditions are 82.75°C and 95.19°C respectively for each model, it is proven that boiling does not occur. The moderator circulation is found to be the mixed-type flow pattern, and the slowly moving secondary flows are observed due to the combination of buoyancy forces and inertial forces. The results of current study will be used as a initial condition for the up-coming transient moderator analyses.

1. 서 론

중수형 원자력발전소(이하 “원전”이라 함)에서 냉각재상실사고로 인한 칼란드리아관과 압력관의 접촉으로 관 표면에서 드라이아웃(dry-out)가 발생할 경우 핵연료 채널이 파손될 수 있기 때문에, 감속재는 충분한 과냉각도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 따라서 그동안 압력관 건전성 확인을 위한 감속재의 열유동 특성이 몇몇 전산코드에 의해 수행되었으며, 캐나다 규제기관인 CNSC는 현재의 안전여유도가 매우 빈약한 상황을 고려할 때 칼란드리아 내의 감속재 온도해석은 적절한 검증을 거치지 않고 있다는 입장을 가지고 있어, 감속재 온도해석에 대하여 많은 관심을 보이고 있다.

냉각재 상실사고 안전해석에서 감속재의 과냉각도를 평가하기 위해 칼란드리아 내의 감속재 온도에 대한 정보가 필요하지만, 실제 원전에서는 감속재의 칼란드리아 입, 출구 온도만을 측정할 수 있기 때문에 감속재 열유동 특성을 분석하기 위해서는 실증실험 또는 전산유체역학을 활용한 전산해석을 통하여 감속재의 유동양식과 온도를 예측할 수밖에 없다. 따라서 캐나다 온타리오 전력사(OPG)에서는 MODTURC_CLAS코드를 이용한 감속재 열유동 특성 해석과 모델에 대한 적절성을

검증하기 위하여 2-D 실험데이터를 사용하였다. 그러나 1995년 CNSC는 감속재 온도해석결과의 불확실도가 너무 크다고 판단하여 CANDU 원전 사업기관에게 3-D 실험을 통하여 타당성을 입증토록 요구한 바 있으며, 특히 CANDU 원전의 인허가 조건사항으로 캐나다 원자력공사(AECL)로 하여금 3-D 실증실험을 실시토록 요구하였다. 이에 AECL의 초크리버연구소(CRL: Chalk River Laboratory)에서는 1/4-크기의 3-D 실험설비를 제작하여 감속재 유동특성 실험을 수행하였다. 이밖에 CNSC는 캐나다 내 CANDU 원전에 대하여 발전소 고유조건에 따라 특성실험을 수행하도록 요구하고 있다.

현재 우리나라에서도 중수로 일반안전현안에 대한 대처기술개발의 일환으로 칼란드리아 내 감속재의 유동양식과 온도분포에 해석을 위하여 FLUENT 및 CFX 범용 열유체 해석코드를 이용한 전산해석연구가 수행되었다[1, 2]. 본 연구에서는 CANDU 원전 감속재에 대한 축소모형 실험인 STERN 및 SPEL 실험에 대한 열유동 평가 연구[1]의 연장으로써, CANDU-6의 정상운전 시 칼란드리아 내부에서의 감속재 온도분포를 예측하여 감속재의 열침원 성능을 평가하기 위한 두개의 모델을 개발하였다. 즉, 첫 번째 모델은 칼란드리아 내부에 설치되어 있는 380개 핵연료채널을 다공성매질로 모사하였고, 또 다른 모델은 핵연료채널을 실제로 모사하여 채널 사이에서의 유동을 관찰할 수 있도록 하였다. 개발된 두 모델을 적용하여 얻어진 감속재의 유동양식과 온도, 속도분포를 상호 비교·평가하였다.

2. CANDU-6 열유동 특성해석

2.1 해석모델

감속재가 있는 CANDU-6의 칼란드리아 용기는 그림 1과 같이 양 옆에 8개의 입구가 설치되어 있고, 한쪽 면에 각각 4개의 입구노즐이 축방향으로 약간 비대칭으로 설치되어 있다. 내부영역은 그림 1과 같이 380개의 핵연료 채널 (지름=0.131m)을 포함하여 반응도 제어기기, 계측제어기기 등 많은 기기들이 설치되어 복잡한 내부구조를 가지고 있기 때문에 칼란드리아 실제모형을 모사하는 데 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 두 경우 모두 제어계측을 위한 기기들은 생략하고 핵연료채널에 대한 모사를 위하여 두가지 모델을 사용하여 감속재의 유동해석을 수행하였다. 즉 첫번째로는 칼란드리아 내부의 핵연료채널이 있는 노심부분을 다공질 매질(모델 1)로 모사한 것이고, 두번째는 380개 핵연료채널을 실제로 모사(모델 2)하여 관 사이에서의 유동을 관찰할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 전산해석을 위해 사용한 CANDU-6의 격자구조는 그림 2와 같으며, 전

산해석을 위해 사용된 격자수는 전산 수렴도에 대한 민감도 분석을 통하여 모델 1의 경우 약 38,000개, 모델 2의 경우 약 830,000개이다. 특히 모델 2의 경우 감속재가 채널 주위를 흐를 때 채널경계효과를 고려하여 채널과 채널 사이에 평균 5개의 격자로 구성하였다.

칼란드리아 내부에서 일어나는 주요 열수력학적 현상은 입구노즐로부터 주입되는 감속재의 강제순환유동과 핵연료채널로부터 발생하는 열에 의한 자연대류유동에 의해 영향을 받는다. 이를 위해 감속재의 밀도변화는 Boussinesq 가정을 적용하였으며 난류모델은 민감도 분석을 통하여 유체가 핵연료채널 집합체 주위를 흐를 때 최적으로 확인된 표준 $k-\epsilon$ 모델을 벽함수와 함께 사용하였다.

감속재 운전조건으로는 CANDU-6원전의 정상운전조건을 적용, 입구노즐에서 주입되는 940 l/s의 감속재 유량과, 45°C의 입구온도를 적용하였으며 칼란드리아 외벽은 단열상태로 고려하였다. 한편 칼란드리아 내부의 정상상태시 열적조건은 표 1과 같이 핵연료채널에서 발생하는 감마선이나 중성자가 감속재와 반응하여 발생하는 직접가열(direct heating)이 대부분의 열량을 차지(약 95%)하고 있으며, 핵연료채널로부터 감속재로의 전달되는 열량은 상대적으로 적다 [1]. 이에 본 연구에서는 정상운전시 감속재에 전달되는 총 열량을 보수적으로 103MW로 가정하였고, 그 중 약 4.3MW (약 4.2%)만이 핵연료 채널로부터 전달된다고 가정하였다. 특히 핵연료 채널로부터 감속재로 전달되는 열량 (4.3MW)은 380개의 채널로부터 균일하게 전달되고, 채널의 축방향 열분포도 균일한 것으로 가정하였다. 또한 감마선이나 중성자로 인한 유체의 열량인 98.7MW는 유체에서 직접 발생하는 것으로 모사하였다.

2.2. 해석결과

감속재 열유동 특성 평가

CANDU-6의 정상운전을 모의하여 모델 1과 2에 대해 계산한 결과, 칼란드리아 축방향 중심(One end tubesheet으로부터 축방향으로 3 meter 떨어진)에서 감속재의 온도와 속도분포는 그림 4에 도시된다. 이때, 칼란드리아 내부에서 감속재의 유동은 전체적으로 왼편으로 편향된 유동양식을 보여주고 있다. 즉 칼란드리아 오른편에 있는 입구노즐로부터 주입되는 유체(감속재)는 거의 반대편까지 도달하나, 왼편 입구노즐로부터 주입되는 유체는 오른편 주입유동과의 교차로 비교적 짧은 거리를 이동한 후에 하향유동(Jet Reverse Flow)이 나타나는 것으로 나타났다. 한편 칼란드리아 축방향 중심에서 온도와 속도의 수직분포는 그림 5와 6과 같이 높은 온도의 감

속재는 부력에 의해 상부에 치우쳐 있음을 볼 수 있고, 출구가 있는 하부에서는 온도분포가 완만히 감소하는 것을 볼 수 있다. 한편 출구가 위치한 오른쪽보다는 왼쪽에서 감속재 온도가 상대적으로 낮아 좌우가 비대칭인 유동형태를 갖는 것으로 나타났다.

칼란드리아 내부에서의 보다 상세한 유동특성을 살펴보기 위하여 임의의 내부평면(칼란드리아 상부 중앙 원편으로 3×3 채널)의 핵연료 채널 주위 유동특성을 분석한 결과 그림 7과 같이 핵연료 채널들 사이에서는 부력과 관성력에 의한 유동, 핵연료 채널 주위에서의 난류유동, 이차유동의 발생 등으로 복잡한 유동양상을 보이며, 이로 인하여 칼란드리아내 감속재의 유동양식에 영향을 미치는 것으로 보인다.

CANDU-6의 정상운전시 열유동 특성을 평가한 결과, 모델 1, 2의 감속재의 온도와 속도분포에 대한 모사결과는 유사하게 나타났다. 다만 칼란드리아 내부에서의 감속재 최대온도는 모델 1인 경우 82.75℃이고 출구온도는 68.60℃로 예측되었고, 모델 2는 95.19℃와 68.98℃으로 예측되어, 모델 2(실 모사모형)이 다소 높은 것으로 나타났다. 이는 모델 1에서 모사할 수 없는 이차 유동에 의한 열전달 저하 등에 의해 다소 차이가 나타나는 것으로 보이나 두 경우 모두 칼란드리아 내 감속재에서 비등이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

감속재 유동형태 평가

칼란드리아 내부에서 유체의 강제순환(관성력)과 내부 발생열에 의한 자연대류(부력)가 서로 상호작용을 일으켜 주입유량과 발생열량이 유동양식을 결정하는 주요 인자로 작용하고, 그 유동양식은 크게 세 가지 유동형태(Momentum Dominated Flow, Mixed Type Flow, Buoyancy Dominated Flow)로 나타난다 [2, 3].

따라서 칼란드리아 내부의 유동형태를 분석하기 위하여 아래와 같은 무차원 변수(Ar)를 적용하였다. 무차원 변수(Ar)는 정상운전시 자연대류와 강제순환유동이 공존하는 경우, 유동양식을 판단하는 중요한 척도로 활용할 수 있으며 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Ar &= \frac{\text{Buoyancy Force}}{\text{Inertia Force}} = \frac{g\alpha QD}{C_p\rho A_i V_i^3} \\ &= 0.2445 \end{aligned} \quad (1)$$

이 때,

g = 중력가속도, $[m/s^2]$

α = 열팽창계수, [1/K]
 Q = 열량, [W]
 D = 칼란드리아 직경, [m]
 ρ = 감속재 밀도, [kg/m³]
 C_p = 감속재 비열, [J/kg-K]
 A_i = 주입노즐의 면적, [m²]
 V_i = 감속재 입구속도, [m/s]

칼란드리아 축방향 중심에서는 칼란드리아 내부열로 인한 부력으로 높은 온도의 감속재는 위쪽으로 이동하다가 입구노즐의 주입유동으로 인해 칼란드리아 상부까지 오르지 못하고 중간영역에서 느리게 순환한다. 칼란드리아 좌우의 유동 및 온도는 비대칭으로 분포되며 유동은 혼합유동형태(Mixed Type Flow)로 나타났다. 따라서 부력과 관성력이 상호작용을 할 경우 주입유량과 발생열량이 유동형태를 결정하는 인자임을 확인하였으며, 향후 연구에서는 이들 인자에 대한 개별영향실험 및 민감도 분석 등을 수행할 계획이다

3. 결 론

가압중수로 핵연료 채널의 건전성 확보를 확인하고 칼란드리아 내 감속재의 열침원으로서의 성능을 확인하기 위하여, CANDU-6 원자로의 정상운전시 칼란드리아 내부에서의 감속재유동에 관하여 전산해석을 수행하였다. 특히 본 연구에서는 칼란드리아 내부영역을 단순화하기 위해 다공성 매질로 가정한 모델과 380개의 핵연료채널을 직접 모사한 모델을 사용하여 계산을 수행한 결과 다음과 같다.

- (1) 정상운전시 칼란드리아 내부에서의 감속재 최대온도가 각각 82.75℃와 95.19℃로 예측되어 비등이 발생하지 않는 것으로 예측되었다. 두 경우 모두 최대온도 발견 위치는 subshell의 윗 벽면 근처로서, 이 수심에서 중수의 끓는점은 약 107.67℃이므로 감속재 과냉각도는 각각 24.92℃와 12.48℃이다.
- (2) 칼란드리아 축방향으로 중심면에서 본 온도의 수직분포에서, 높은 온도의 감속재는 부력으로 인하여 윗부분에 위치하여 감속재의 유동양식이 혼합유동형태(mixed type flow pattern)임을 확인할 수 있었고, 속도의 수직분포에서는 대부분의 속도구배가 칼란드리아 벽면에 집중되어 있었고, 칼란드리아 내부에서는 유동이 부력과 관성력의 조합으로 인해 느리게 움직이고 있는 이차유동을 볼 수 있다.
- (3) 칼란드리아 내부에서의 유동양식은 부력과 관성력의 조합뿐만 아니라, 특히 모

텔 2인 경우 핵연료채널의 존재로 인하여 유동은 더욱 복잡한 형태로 흐르고 있는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Y. I. Kim and K. Y. Kim, "Radiation Heating Report, Rev. 2", 86-03320-AR-004, 1995.
- [2] M. W. Kim et al., "Development of Thermal-Hydraulic Evaluation Codes of CANDU Reactors," KINS/RR-187, 2003.
- [3] K. H. Bang, M. Kim, S. O. Yu, and H. J. Kim, "A Three-Dimensional Analyses of Fluid Flow and Heat Transfer for Moderator Integrity Assessment in PHWR," Proceeding of KNS Spring Meeting, May, Gwangju, 2002.
- [4] C. Yoon, B. W. Rhee, and B. J. Min, "3-D CFD Analysis of the CANDU-6 Moderator Transient for the 35% RIH Break with Loss of ECC Injection," The 10th international Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, Oct. 2003.

표 1. 전출력 정상운전시 감속재계통의 열분포

Component	Heat Load [MW]
Heat generated in	
a) Moderator	78.7
b) Reflector	5.9
c) Calandria Tubes	4.3
d) Guide Tubes and Reactivity Mechanisms	2.7
Heat transfer from	
a) Calandria Shell and Tubesheets	1.7
b) Fuel Channels	3.0
Heat loss from	
a) Moderator pipings	-0.3
Heat gain from	
a) Moderator pumps	0.7
Total	96.7

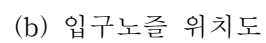
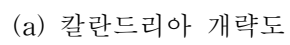
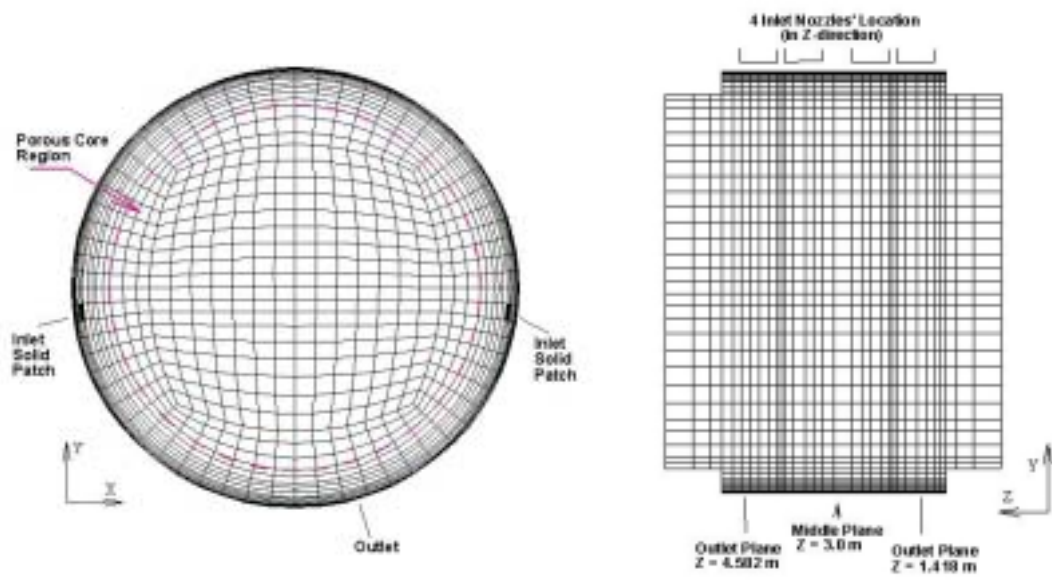
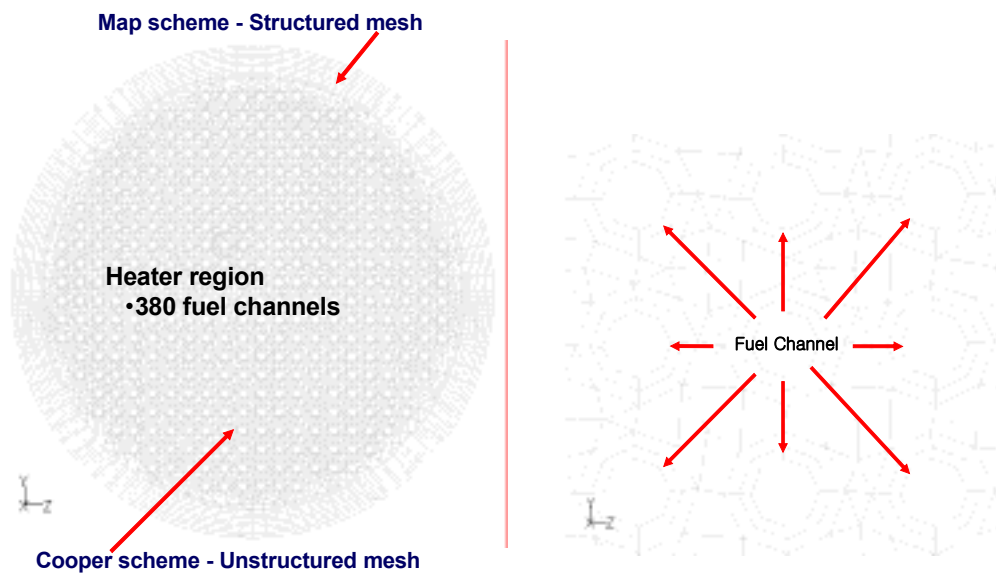


그림 1. CANDU-6 칼란드리아 개략도

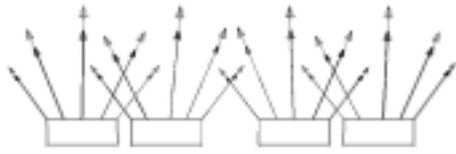


(a) 모델 1

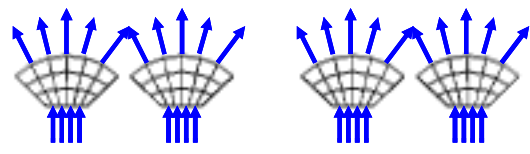


(b) 모델 2

그림 2. CANDU-6 해석을 위한 격자

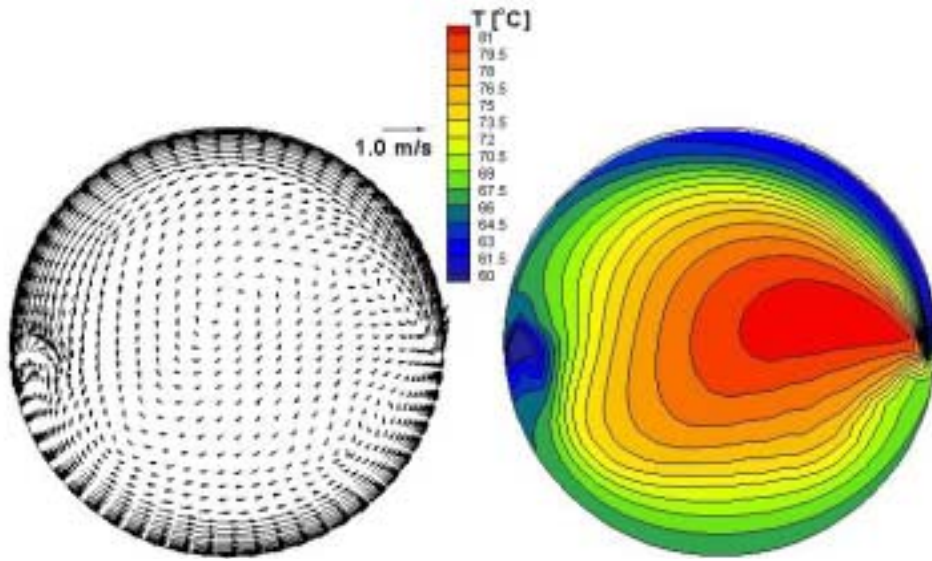


(a) 모델 1

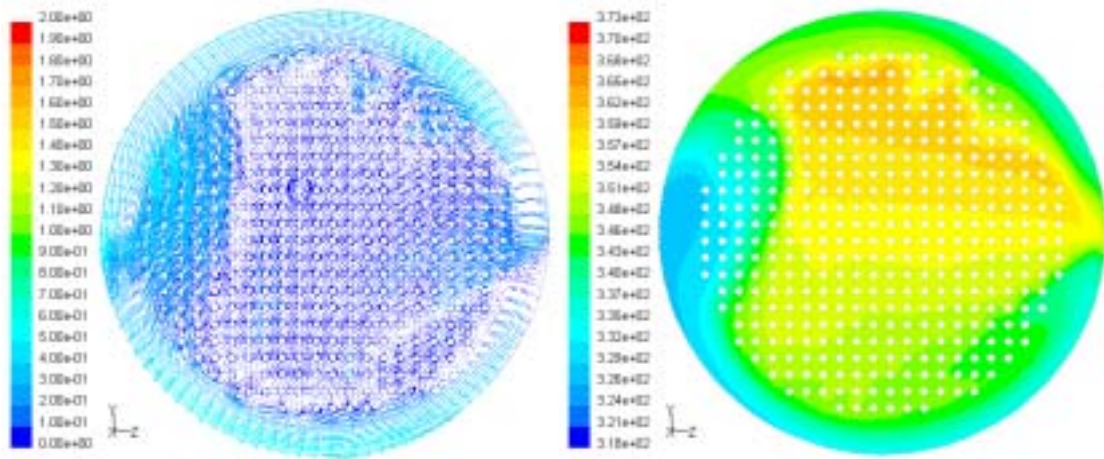


(b) 모델 2

그림 3. CANDU-6 칼란드리아의 입구노즐 형상

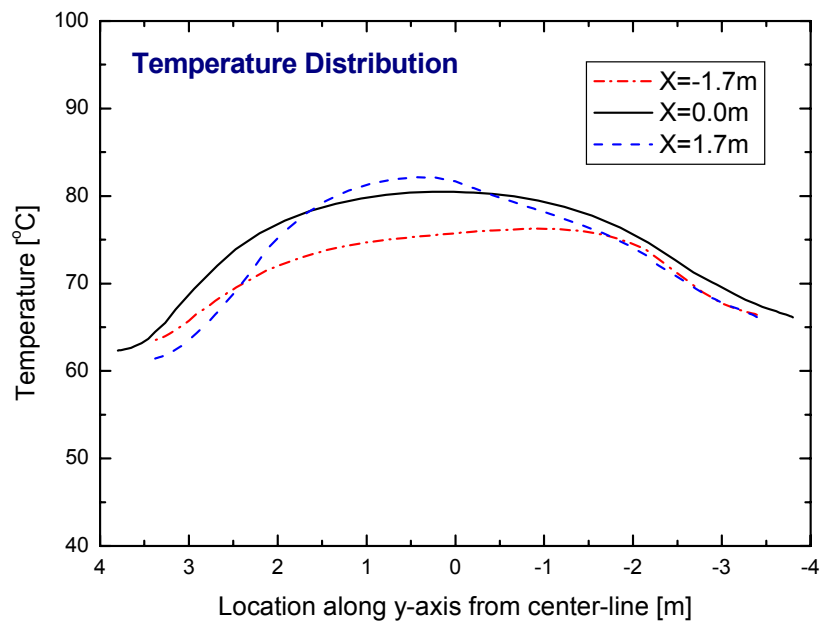


(a) 모델 1

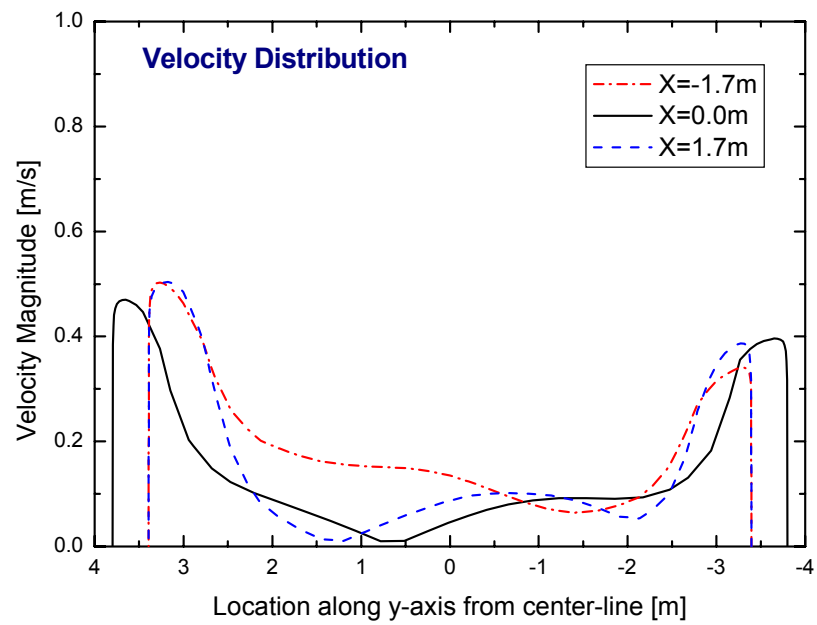


(b) 모델 2

그림 4. 정상운전시 감속재의 온도 및 속도분포 (축방향 중간)



(a) 수직방향의 온도분포



(b) 수직방향의 속도분포

그림 5. 감속재 온도와 속도의 수직분포 (모델 1).

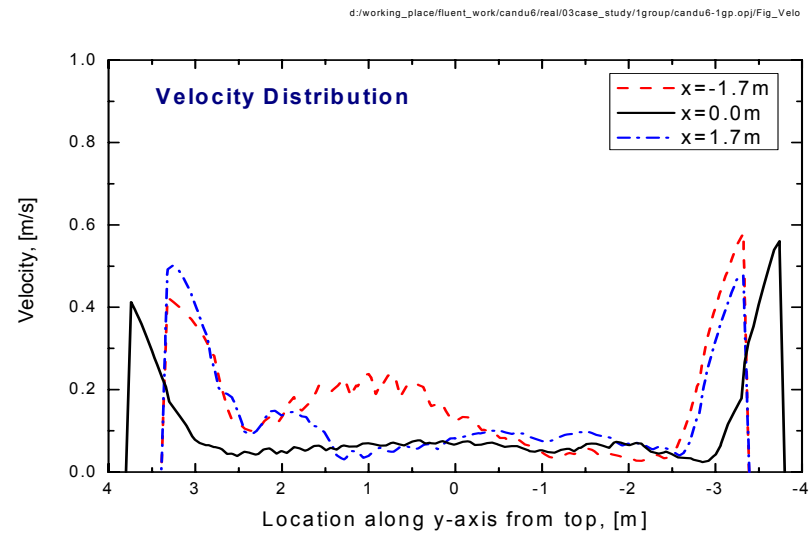
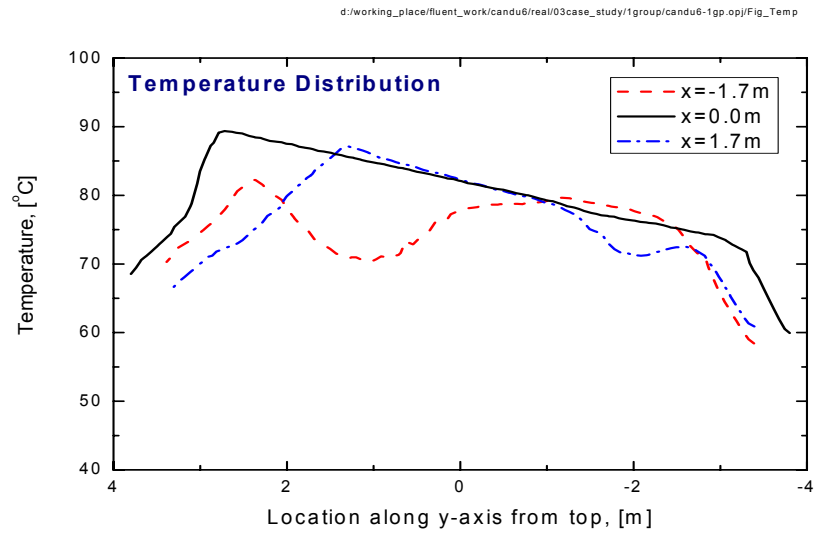


그림 6. 감속재 온도와 속도의 수직분포 (모델 2).

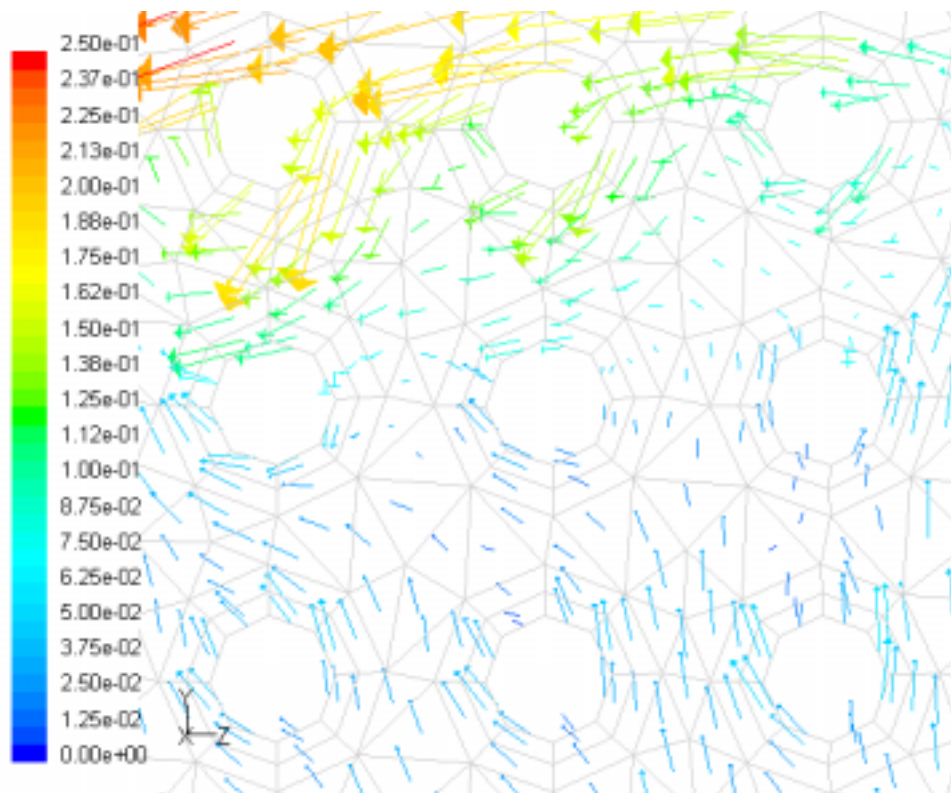


그림 7. 핵연료채널 주위 유동 (yz평면).