

중수형 원자로 칼란드리아 내부 감속재 건전성평가를 위한 3차원 유동 및 온도 분포해석

A Three-Dimensional Analyses of Fluid Flow and Heat Transfer for Moderator Integrity Assessment in PHWR

방광현*, 이재영**, 유선오***, 김만웅***, 김효정***

* 한국해양대학교, 부산광역시 영도구 동삼동 1

** 한동대학교, 경북 포항시 북구 흥해읍 남송리 3번지

*** 한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

중수로(CANDU) 원전에서 냉각재 상실사고 시 핵연료 채널의 건전성은 감속재의 열 침원 (heat sink)으로서의 기능을 갖고 있어, 냉각재상실사고시 압력관의 건전성을 유지시킨다. 그러나 캐나다 규제기관인 CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission)에서는 현재 안전여유도가 충분하지 않아 감속재 온도 해석을 일반안전현안으로 분류하고 있으며, 3차원 실험 (1/4-scale 3차원 실험)을 통하여 평가코드에 대한 검증과 각 발전소별 개별조건에 대해 각각 실험을 수행하도록 하고 있다.

본 연구에서는 칼란드리아 내부 감속재 3차원 유동과 온도 분포를 해석하였다. 해석 모델의 검증을 위해 SPEL 실험을 모사하여 실험데이터와 비교하였으며, CANDU-6로형에 대한 검증을 위하여 월성 2호기의 칼란드리아에 대하여 정상상태 열유동 해석을 상용 열유체 해석코드인 FLUENT코드 버전 5.4를 사용하여 수행하였다. 평가결과 감속재 최대 온도는 347 K (74°C)로 냉각재상실사고시에도 압력관의 건전성을 유지시킬 수 있도록 감속재가 충분한 과냉도를 가지고 있는 것으로 평가되었다.

ABSTRACT

Three-dimensional analyses of fluid flow and heat transfer has been performed in this study. The simulation of SPEL experimental work and comparison with experimental data has been carried out to verify the analyses models. Moreover, to verify the CANDU-6 reactor type, analyses of fluid flow and heat transfer in the Calandria under the condition of steady state has been performed using FLUENT code, which is the conventional code for

thermal-hydraulics.

It is found that the maximum temperature in the moderator is 347K (74°C), so that the moderator has the enough subcoolability to ensure the integrity of pressure tube during LOCA conditions.

I. 서론

중수로(CANDU) 원전에서 냉각재 상실사고시 핵연료 채널의 건전성은 감속재의 열침원(heat sink)으로서의 능력에 의존한다. 만약 칼란드리아관 외벽에 dry-out이 발생할 상대라면 핵연료 채널은 파손될 가능성이 높다. 그러나 감속재가 충분한 과냉도를 가지고 열침원 역할을 할 수 있다면 냉각수 상실사고 (LOCA: Loss of Coolant Accident)시 압력관은 칼란드리아관과 접촉하게 되어 파손을 방지할 수 있다. 압력관의 건전성을 보이기 위한 해석 계산은 몇 개의 전산코드에 의존하고 있으며, 캐나다의 CNSC는 현재의 안전여유도가 매우 빈약한 상황을 고려할 때 감속재 온도 해석은 적절한 검증을 거치지 않고 있다는 입장을 가지고 있다.

이러한 감속재 온도 해석에 대한 안전문제 (GAI95G05)로 현재 관심을 보이고 있다. 냉각재 상실사고 안전해석에서는 감속재의 과냉도를 평가하기 위해 감속재 온도를 알아야 한다. 실제 원전에서는 감속재의 칼란드리아 입출구 온도만이 측정되므로 보통 전산코드 MODTURC_CLAS를 사용하여 감속재의 유동패턴과 온도를 계산한다. 이 코드의 검증에는 2차원 실험데이터가 사용되었는데, 1995년에 CNSC는 감속재 온도 해석에 불확실도가 너무 크다고 판단하여 CANDU 피인허가자에게 3차원 실험을 수행하도록 요청한 바 있다. 또한 AECL (Atomic Energy of Canadian Limit)에게 CANDU-9의 인허가 전제조건으로 3차원 실험의 필요성을 제시하였다.

이에 대해 CRL (Chalk-river Lab.)에서 1/4-scale 3차원 실험설비 (MTF)가 제작되었으며 CANDU-9에 대해 많은 실험이 수행되었다. 캐나다 내의 CANDU에 대해서는 CNSC가 각 발전소의 개별조건에 대해 각각 실험을 수행하도록 하고 있다. MODTURC_CLAS 코드는 이러한 3차원 실험데이터로 1999년에 검증을 다시하였으며, 그 결과 CANDU-9에 대해서는 코드가 실험데이터를 잘 예측하고 있음을 보였다.

본 연구에서는 상용 열유체 해석코드인 FLUENT코드 버전 5.4를 사용하여 칼란드리아 내부 감속재 3차원 유동과 온도 분포를 해석하고자 하였다. 우선 해석모델의 검증을 위해 SPEL (Sheridan Park Engineering Lab.)실험을 모사하여 실험데이터와 비교하였으며, 월성의 CANDU-6에 대해 칼란드리아 노드화 및 정상상태 열유동 해석을 수행하였다.

II. 감속제 건전성 평가

1. SPEL 실험 해석

SPEL 실험은 CANDU 원자로에서 칼란드리아 탱크안의 감속제 순환의 이해를 증진시키기 위한 것으로서, 실제 CANDU 원자로의 축소된 모형은 아니나, 전형적인 CANDU 원자로의 독특한 특성들을 가지고 있다. 그 특성들은, 원통형 통 (Calandria) 안에서 제트에 의해 형성된 재순환 유동의 존재, 통 안에서 체적당 열 생성에 의한, 비등이 없는 유체의 가열, 그리고 원통의 축에 평행하게 나열된 수평 관들의 2차 배열 (matrix) 등이다.

SPEL 실험의 모형 칼란드리아 개략도는 그림 1과 같다. 이 실험 장비의 구조와 특성은 표 1에 제시되어 있다. 냉각수 유량이 0.5 kg/s이고 열 부하가 10 kW인 경우 부력이 주도적인 유동으로 관찰되었는데, 이 경우를 대표적 실험결과로 하여 본 연구의 계산 대상으로 하였다.

가. 해석모델

상용 열유체 해석코드인 FLUENT는 유한체적법을 사용하며 일반적인 열유체 해석 및 난류, 2상유동 등의 해석에 사용될 수 있는 범용 코드이다. 본 연구의 대상이 작은 냉각수 강제순환과 내부 발열에 의한 자연대류가 공존하는 경우이므로 부력을 모사하기 위해 Boussinesq 가정을 적용하여 부력을 모사하기 위한 밀도의 변화가 온도에 선형으로 비례하도록 하였다. 난류모델로 표준 k-ε 모델을 벽함수 (Logarithmic Wall Function)과 함께 사용하였다. 수평관이 일정한 사각 피치로 배열되어 있는 내부 영역에는 다공매질 (porous media) 모델을 적용하였다. 해석 대상 실험은 발열량 10 kW, 냉각수량 0.5 kg/s, 냉각수 입구온도 303 K (30°C)이다.

SPEL 시험장치의 격자는 그림 2와 같으며, 그림 3에서 정면과 측면에서의 격자모양을 보여주고 있다. 격자구조는 원통 외부영역에 대해서는 정형격자 (structured mesh)로 하였으며, 내부는 비정형격자 (unstructured mesh)를 설정하였다. 입구 및 출구의 사각 모양의 실제구조는 단순화하여 입구는 원통 측면 내부에 2개의 별도 체적을 설정하여 내부에서 냉각수가 유입되는 형태로 하였으며, 출구로는 아래쪽 경계면의 일부를 설정하였다.

FLUENT의 다공매질의 운동량 모델은 운동량 생성항을 아래와 같이 추가하여 계산한다. 균질 다공매질의 경우,

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_{IR} \frac{1}{2} \rho |v_i| v_i \quad (1)$$

와 같이 생성항이 정의되며, 여기서 α 는 투과율 (permeability), C_{IR} 은 마찰저항계수 (Inertial Resistance Factor)이다. 다공매질모델로 관다발 형태의 영역이 적절히 모델될러

면 이 두 인자의 정의가 적절해야 한다. 여기서는 packed bed에 대한 Ergun 식을 적용하여 다음과 같은 α 및 C_{IR} 값을 산출하였다.

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \quad (2)$$

$$C_{IR} = \frac{3.5}{D_p} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \quad (3)$$

여기서 D_p 는 평균입자직경 (mean particle diameter), ϵ 는 기공율이다. SPEL 실험의 내부 관외경을 $D_p=0.038$ m, 기공율(porosity) $\epsilon=0.8$ 을 적용하면 $1/\alpha = 8000$, $C_{IR} = 36$ 이다.

나. 해석결과

냉각수 유량 0.5 kg/s, 발열량 10 kW의 경우에 대해 해석한 결과, 속도분포는 그림 4와 같으며, 온도 분포는 그림 5에 나타난 바와 같다. 상향의 입구 냉각수는 대략 30도 위에서 아래로 방향이 바뀌는 제트역류현상 (Jet Reversal)이 보이며, 이는 실험결과와 대략 일치한다. 원통내 최대온도는 311 K (38°C) 정도로 실험의 314 K (41°C)보다 다소 낮게 나타났다.

2. CANDU-6 감속계통 해석

CANDU-6 감속재 계통의 주요한 특징은 그림 6에 도시한 것과 같다. 칼란드리아 용기는 약 6.0 m 길이에, 중심부 4 m에 대해서는 7.6 m 지름, 양쪽 측면 1 m 씩에 대해서는 직경 6.8 m의 누운 모양의 원통형이다. 칼란드리아 안에는 380개의 칼란드리아 관들이 축방향으로 늘어서 있고, 이 관들은 칼란드리아 용기 전체 체적의 약 12 %를 차지하고 있다. 추가로, 용기 안에는 수평, 수직으로 설치된, 다수의 반응도 조절 장비가 존재한다. 감속재는 중수이며, 그 순환을 위해 좌우로 대칭한 8개의 주입관과 아래쪽에 두 개의 방출관이 설치돼 있다. 대략 주입관의 내경은 0.15 m, 방출관의 내경은 0.30 m이다.

가. 칼란드리아 노드화

칼란드리아 격자는 그림 7과 같으며, 그림 8에 정면과 측면에서의 격자모양을 보여주고 있다. 격자구조는 칼란드리아 외부영역에 대해서는 정형격자 (structured mesh)로 하였으며, 내부는 비정형격자 (unstructured mesh)를 설정하였다. 입구 및 출구관의 실제 구조를 단순화하여 입구는 칼란드리아 좌우 측면 내부에 4개씩의 별도 체적을 설정하여 내부에서 냉각수가 유입되는 형태로 하였으며, 출구로는 아래쪽 경계면의 일부를 설정하였다.

나. 경계조건

월성 2호기의 칼란드리아에 대하여 정상상태 열유동 해석을 위하여 103% 전 출력을 대상으로 수행하였으며, 각 관련 변수들의 값은 표 2와 같다.

다. 정상상태 결과

칼란드리아 내부 감속재의 유속 및 온도 분포를 방출관이 있는 앞 뒤 1.5 m 위치와 중심면에 대해 그림 9 - 11에 보여주고 있다. 그림 12는 측면에서의 속도 및 온도분포이다. 감속재 최대 온도는 347 K (74 °C)로 나타났다.

다공매질모델의 저항계수의 영향을 관찰하기 위해 기준값의 50% 및 200%에 대해 계산을 수행한 결과를 온도분포에 대해 그림 13 및 14에 나타내었으며, 이 범위에서의 이들 인자들의 영향은 미미하였다.

III. 결 론

본 연구에서는 냉각재 상실사고 시 핵연료 채널의 건전성을 확보하기 위하여 감속재의 열침원 (heat sink)으로서의 성능을 확인하기 위하여 칼란드리아 내부 감속재 3차원 유동과 온도 분포를 해석하였다. 해석모델의 검증에 위해 SPEL 실험을 모사하여 실험데이터와 비교하였으며, CANDU-6로형에 대한 검증을 위하여 월성 2호기의 칼란드리아에 대하여 정상상태 열유동 해석을 수행하였다. 평가결과 감속재 최대 온도는 347 K (74°C)로 냉각재상실사고시에도 압력관의 건전성을 유지시킬 수 있도록 감속재가 충분한 과냉도를 가지고 있는 것으로 평가되었다. 그러나 실제 원전에서는 감속재의 칼란드리아 입출구 온도만이 측정되므로 전산코드를 사용하여 감속재의 유동과 온도를 계산하는 데 있어 신뢰도 확보가 필요하다. 이를 위해 다음과 같은 연구가 보완될 필요가 있다.

1. 평가에 사용된 셀 및 유로 모델링의 불확실도 분석을 위하여 이에 대한 민감도 분석이 요구된다.
2. 코드의 검증에는 2차원 실험데이터 (SPEL)가 사용되었는데, 3차원 실험 (CRL에서 1/4-scale 3차원 실험)에 대한 추가 검증이 필요하다.
3. 냉각재상실사고시 감속재 열침원 성능평가를 위한 과도해석이 필요하며, 각 개별발전소에 대한 평가가 필요하다.

참고문헌

1. Generic Safety Issues for Pressurized Heavy Water Reactor Power Plants and Measures for their Resolution, International Atomic Energy Agency, 2000.
2. D. Koroyannakis, R. D. Hepworth, G. Hendrie, An Experimental Study of Combined Natural and Forced Convection Flow in a Cylindrical Tank, TDVI-382, AECL, 1983.
3. 월성 가압중수로 계통실무, 한국원자력안전기술원, 1993.
4. GAMBIT Modeling Guide, Fluent Inc., 1998.
5. FLUENT 5 User's Guide, Fluent Inc., 1998.

표 1. SPEL 실험장치 주요 제원

	내경	외경	길이	비고	개수
Test Vessel	0.74 m	0.775 m	0.254 m		1
Heater Tubes		0.038 m	0.254 m	0.075 m square pitch	52

표 2. CANDU-6 감속재 운전 변수

PARAMETERS	VALUE
Heat Load	100 MW
Inlet Temperature	318 K (45.0°C)
Exit Temperature	342 K (69.0°C)
Total Moderator Flow Rate	940 kg/s

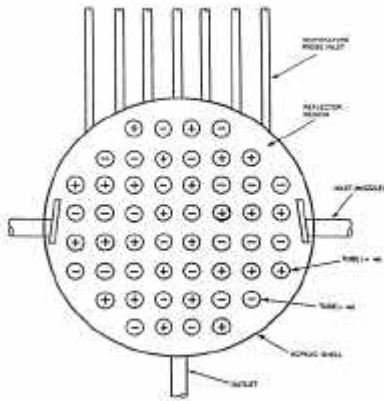


그림 1. SPEL 실험 시험부

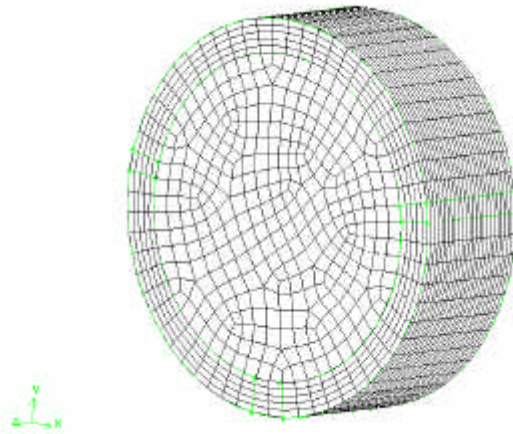


그림 2. SPEL 실험 Mesh

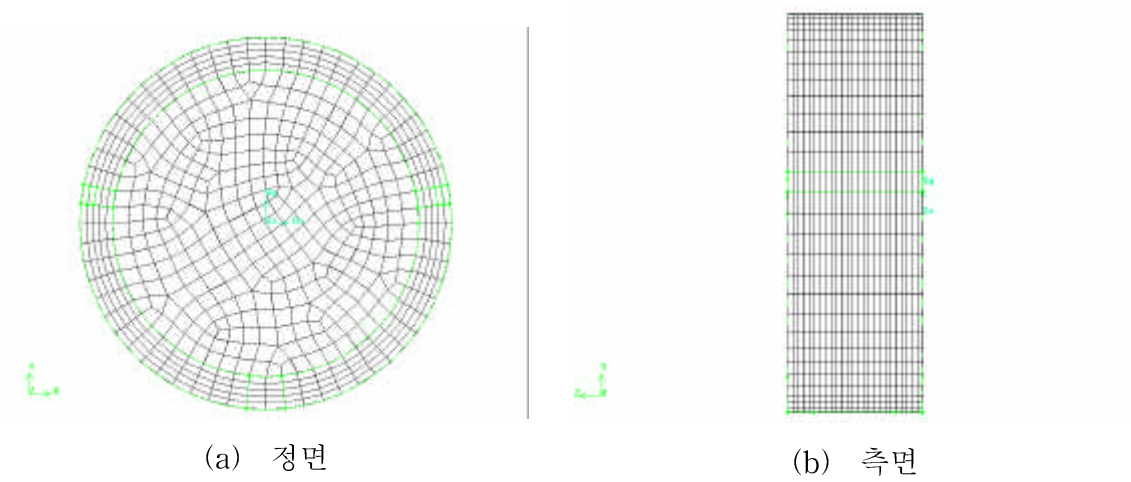


그림 3. SPEL 실험 mesh 정면 및 측면

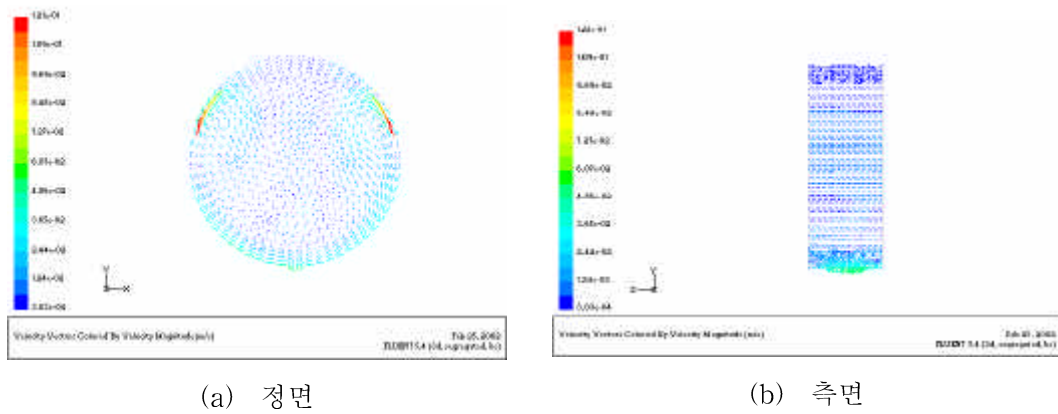


그림 4. SPEL 속도분포 (Midplane)

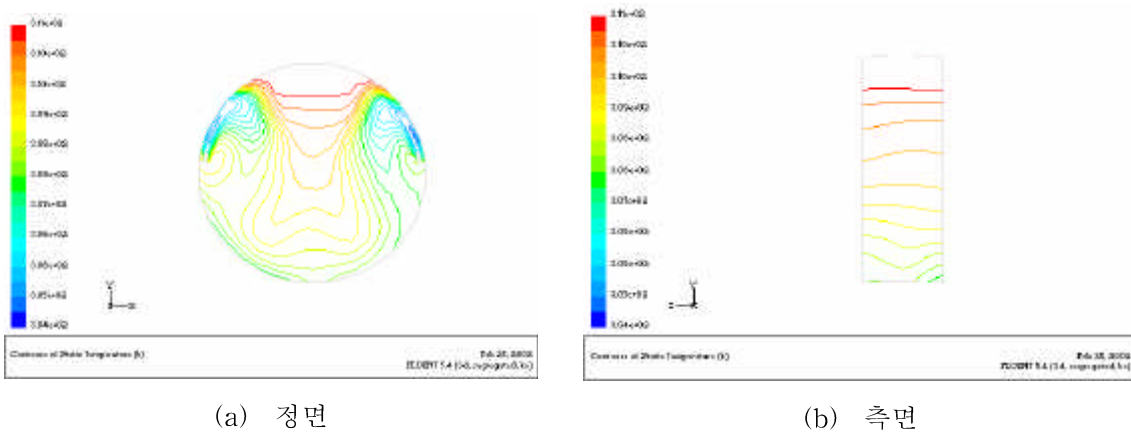


그림 5. SPEL 온도분포 (Midplane)

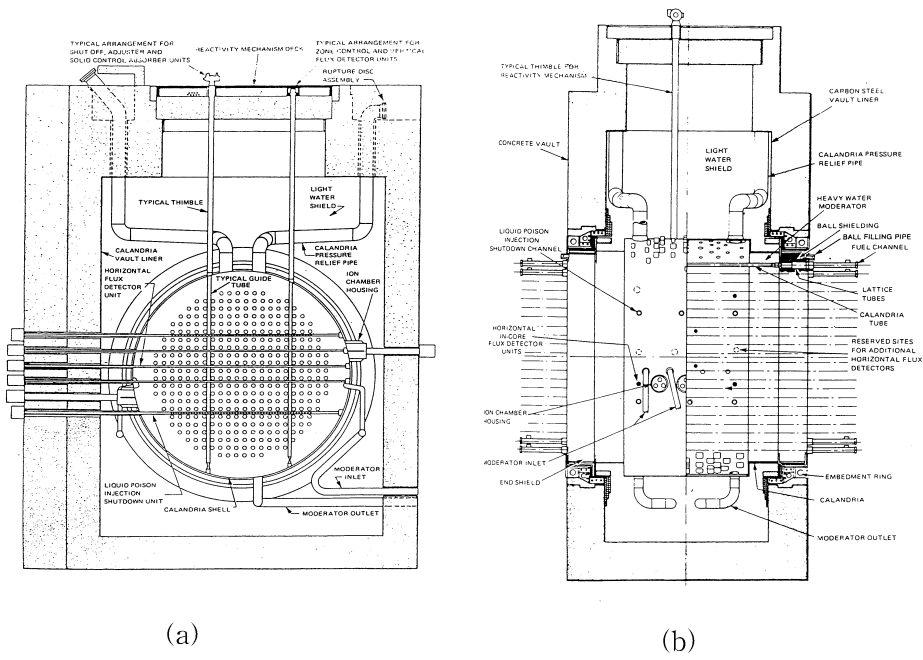


그림 6. CANDU-6 감속재 계통 상세도

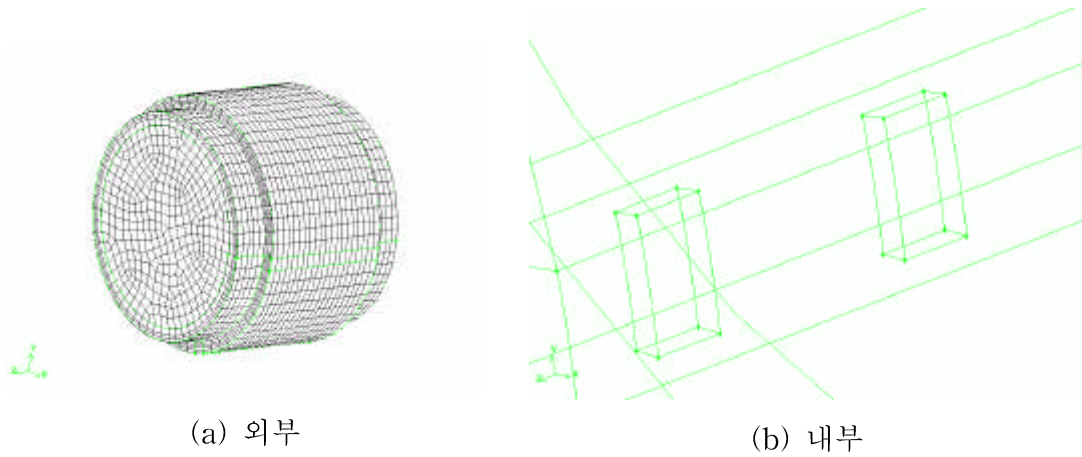


그림 7. 칼란드리아 외부 및 내부 주입구 mesh

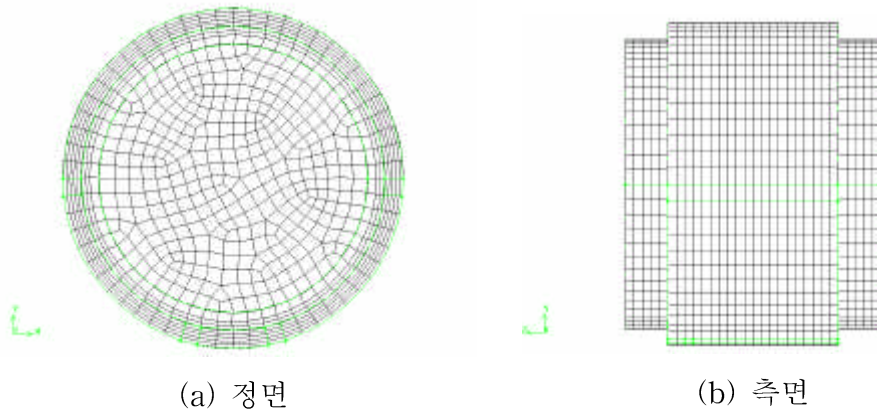


그림 8. 정면과 측면의 칼라드리아 mesh

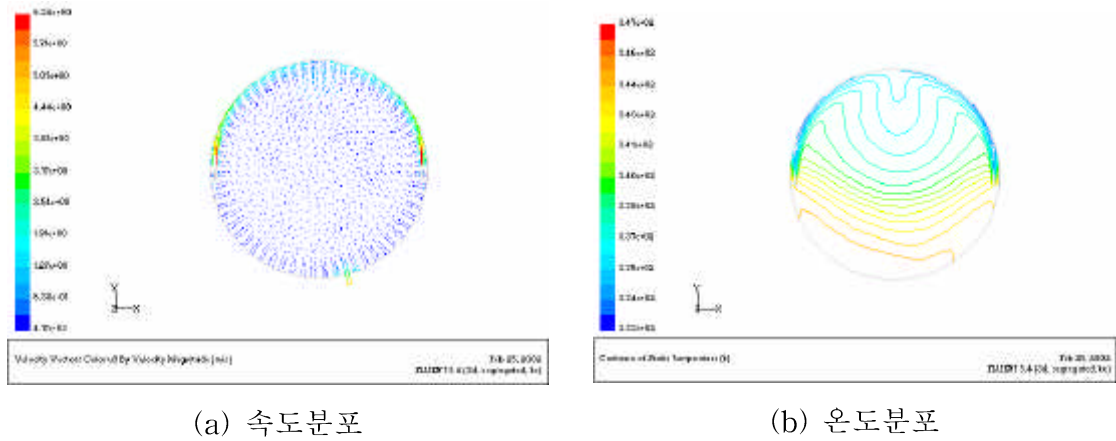


그림 9. 감속재 속도 및 온도 분포 ($Z=1.5$ m)

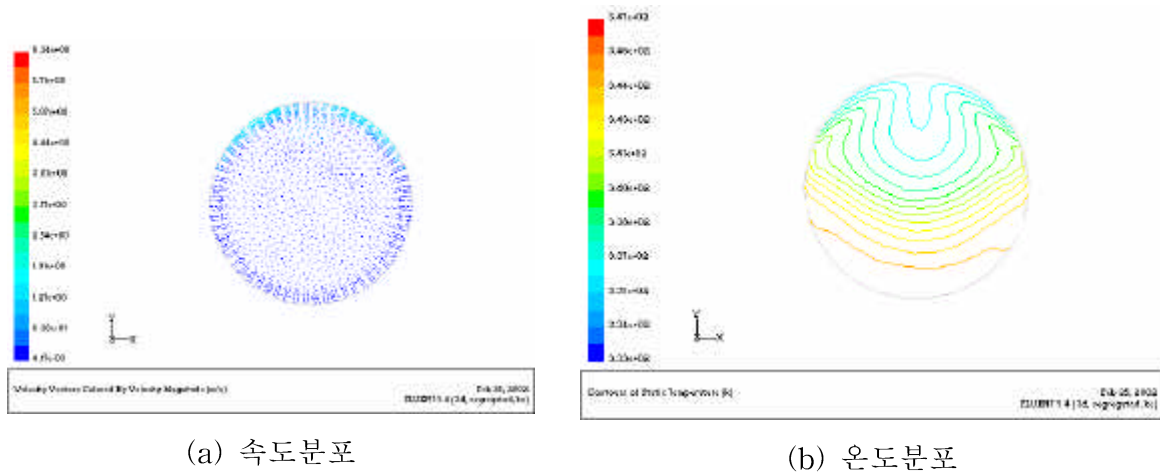
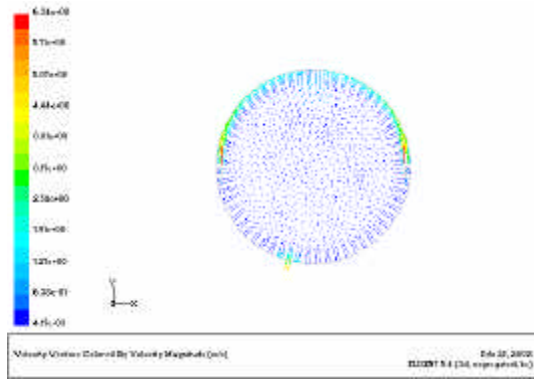
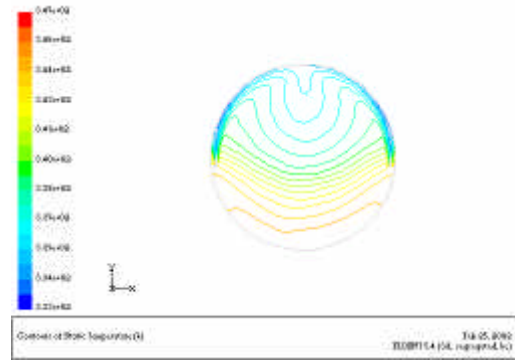


그림 10. 감속재 속도 및 온도 분포 ($Z=0$ m)

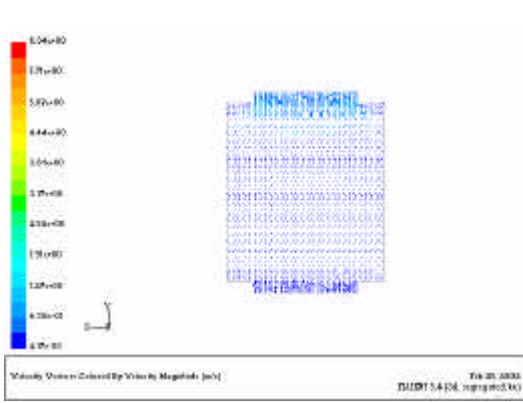


(a) 속도분포

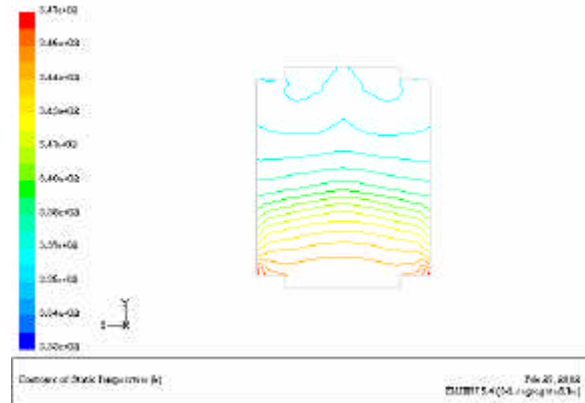


(b) 온도분포

그림 11. 감속재 속도 및 온도 분포 ($Z=-1.5$ m)

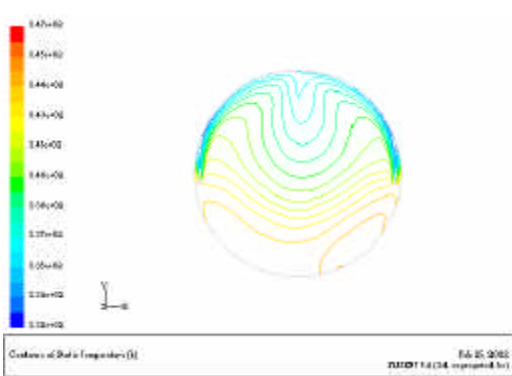


(a) 속도분포

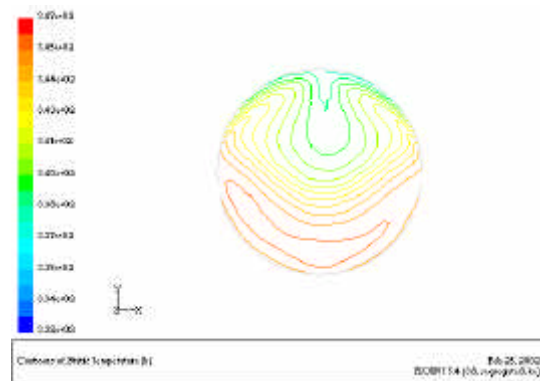


(b) 온도분포

그림 12. 감속재 속도 및 온도 분포 (측면 midplane)

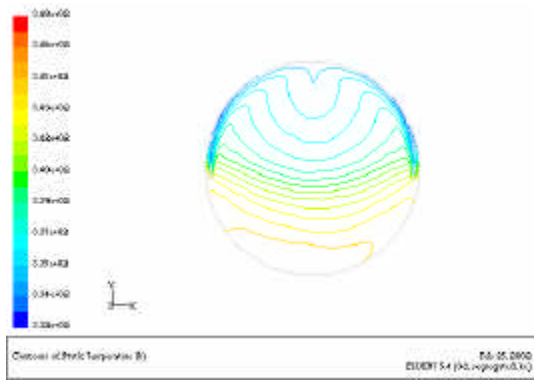


(a) $Z = 1.5$ m

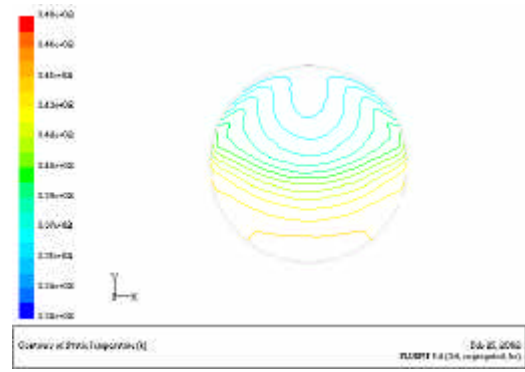


(b) $Z = 0.0$ m

그림 13. 다공매질의 저항계수 반감에 따른 감속재 온도 분포 ($Z=1.5$ m & 0 m)



(a) $Z = 1.5$ m



(b) $Z = 0.0$ m

그림 14. 다공매질 저항계수 증배에 따른 감속재 온도 분포 ($Z=1.5$ m & 0 m)