

## UIS 주변 칼리머 고온풀의 열유동특성분석

### Thermal-Hydraulic Analysis of KALIMER Hot Pool around UIS

김의광, 어재혁, 위명환, 김성오

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

정상상태 전출력시 칼리머 UIS 주변 고온풀의 열유동특성을 파악하기 위해서 고온풀을 대상으로 CFX 코드를 이용하여 3 차원 열유동해석을 수행하였다. 해석영역의 Inlet 경계는 노심집합체상단의 출구이고, Outlet 경계는 원자로 Support Barrel 의 끝단높이로 하였다. IVTM 용 홈통의 바닥입구로 유입되는 유량은 약 3%이며, 이 유량은 IVTM 용 홈통의 옆면으로 빠져 나간다. 이지역의 온도분포는 노심출구직후의 한정된 지역을 제외하고는 거의 균일한 온도분포를 보이고, UIS 를 감싸고 나오는 유속은 약 1.5m/s 의 큰 속도에 이른다

#### Abstract

A 3-dimensional thermal-hydraulic analysis was performed by using the CFX 4.4 code for the normal condition of KALIMER to investigate the thermal-hydraulic characteristics of the sodium flow around UIS. The inlet and outlet boundary conditions of the analysis region are the exit of fuel assembly and top of the reactor support barrel, respectively. The inlet flow rate through the bottom of the IVTM access slot is about the 3% of the rated flow, and this flow rate exits through the side face of the slot. The temperature distribution is almost uniform except the small region just after the core exit, and the exit flow velocity near the bottom of UIS reaches as high as about 1.5 m/sec.

## 1. 서 론

KALIMER 고온풀에 존재하는 UIS(Upper Internal Structure)는 원자로노심을 제어하는 제어봉의 지지와 계측센서의 안내를 수행하는 구조물로 원자로헤드에 부착되어 있다. 형상은 원통형 구조물로 한쪽이 개방되어 있어 IVTM(In-Vessel Fuel Transfer Machine)이 노심 핵연료집합체에 접근할 수 있도록 되어있다. 제어봉보호관과 계측기보호대는 UIS 바닥면에서 노심상단 근접한 곳까지 위치하기 때문에 소듐유체기인진동 가능성이 존재하고, 핵연료집합체의 냉각재출구온도를 가장 잘 예측하기위한 열전대의 위치선정을 위해서는

노심출구지역의 냉각재 유동형태와 온도분포특성을 파악할 필요가 있다. 또한 UIS의 지지는 상단부이외에는 측면지지장치를 갖고 있지않기 때문에 수평하중에 취약점을 가지고 있다. 따라서 한쪽이 개방되어 있는 UIS형상의 특성으로 UIS 주변의 유동분포가 비대칭적이 되어 구조물의 상단부에 고응력부위가 존재할 수 있다. 이를 점검하기 위한 구조물 주변부위의 유동분포계산이 필요하다.

원자로풀의 열유체적 해석은 다차원 상세열유체해석코드인 CFX 코드를 이용하였다. 이 논문에서는 먼저 CFX 계산모델과 해석대상을 소개하고, 계산결과에 대해 기술하기로 한다.

## 2. CFX 계산모델 및 경계조건

상부내부구조물(UIS ; Upper Internal Structure)은 원자로 뚜껑에 매달려 고온풀에 잠겨있고, 제어봉 구동축과 노심출구 계측관련 기기를 지지한다. UIS(그림 1)는 노심출구와 인접한 하부원통(그림 2), 중간원통, 상부원통, 하부원통의 아래위면의 지지평판 등으로 구성되고, IVTM이 출입할 수 있도록 원통의 한쪽이 터져있다. 현재까지 예비설계된 KALIMER 원자로 UIS의 3차원 모델의 주요치수는 다음과 같다. 노심출구에서 UIS 하부지지평판면까지의 거리는 95 cm 이고, IVTM 용 홈의 폭은 25 cm, 길이는 약 50 cm 이다. [참고문헌 1]

상부원통 외부직경 ; 140 cm
두께 ; 2.5 cm
길이 ; 500 cm
중간원통 외부직경 ; 74 cm
두께 ; 5.0 cm
길이 ; 468 cm
하부원통 외부직경 ; 140 cm
두께 ; 2.5 cm
길이 ; 92 cm

그림 1에서 하부원통의 아래지지평판에 돌출된 제어봉과 중성자 계측기보호관, 상부원통과 하부원통사이의 공간에 위치한 제어봉과 보호관은 모델시에 무시하였다. UIS의 IVTM용 홈통입구의 점선안의 특이부분(그림 3)과 IVTM의 존재는 무시하고, 구조물의 대칭성을 이용하여 고온풀의 180° 부분을 해석하였다. UIS 하부원통, 지지평판은 thin wall로 처리하고, 중간원통내의 소듐은 정지상태로 가정하여 solid 구조물로 모의하였다. 해석대상의 입구경계는 노심의 출구지역이고, Support Barrel 끝단에 위치한 고온풀을 출구경계로 적용하였다. 격자간격은 유동의 변화가 심한 하부원통과 노심출구지점에 격자간격이 조밀하도록 mesh seed를 조정하여 총 131360개의 노드를 주었다. 해석에 사용한 전산코드는 CFX-4.2 [참고문헌 2]를 이용하고, 3차원, Cartesian 좌표계, Body fitted grid, 비압축성, 정상상태 조건을 채택하였다. 그림 5, 그림 6은 수평 및 수직단면의 격자배치에 관한 그림이다.

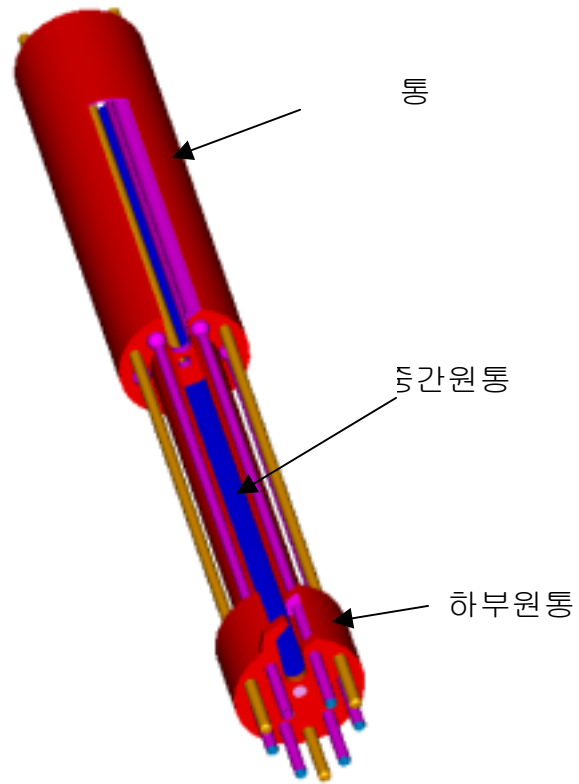


그림.1 UIS 전체모양

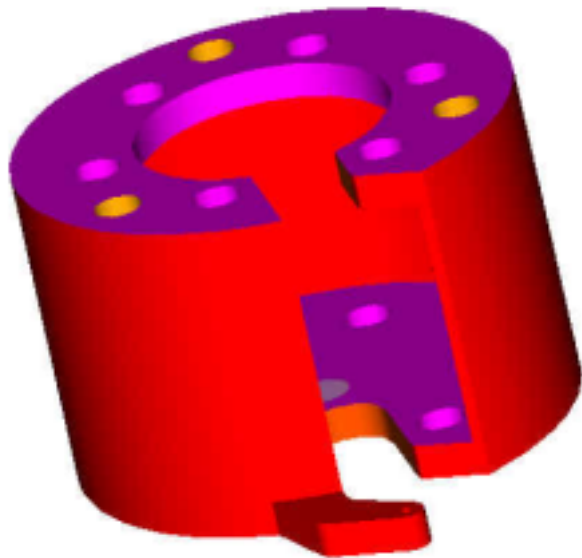


그림.2 UIS 하부원통

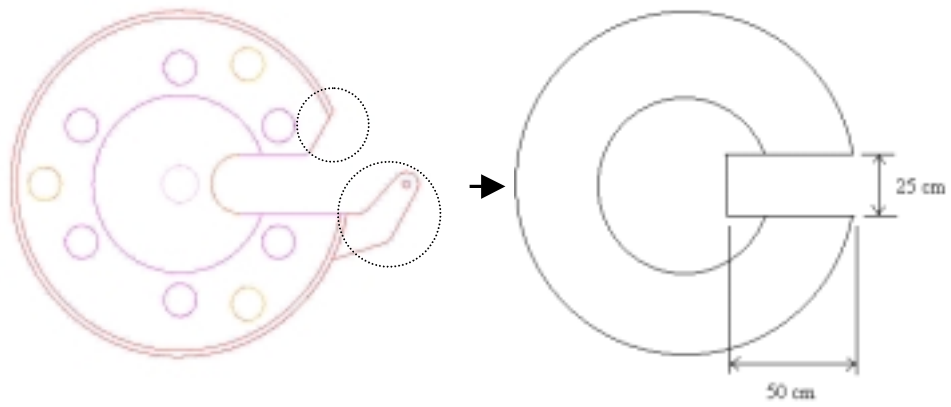


그림.3 UIS 하부원통 지지평판의 모델

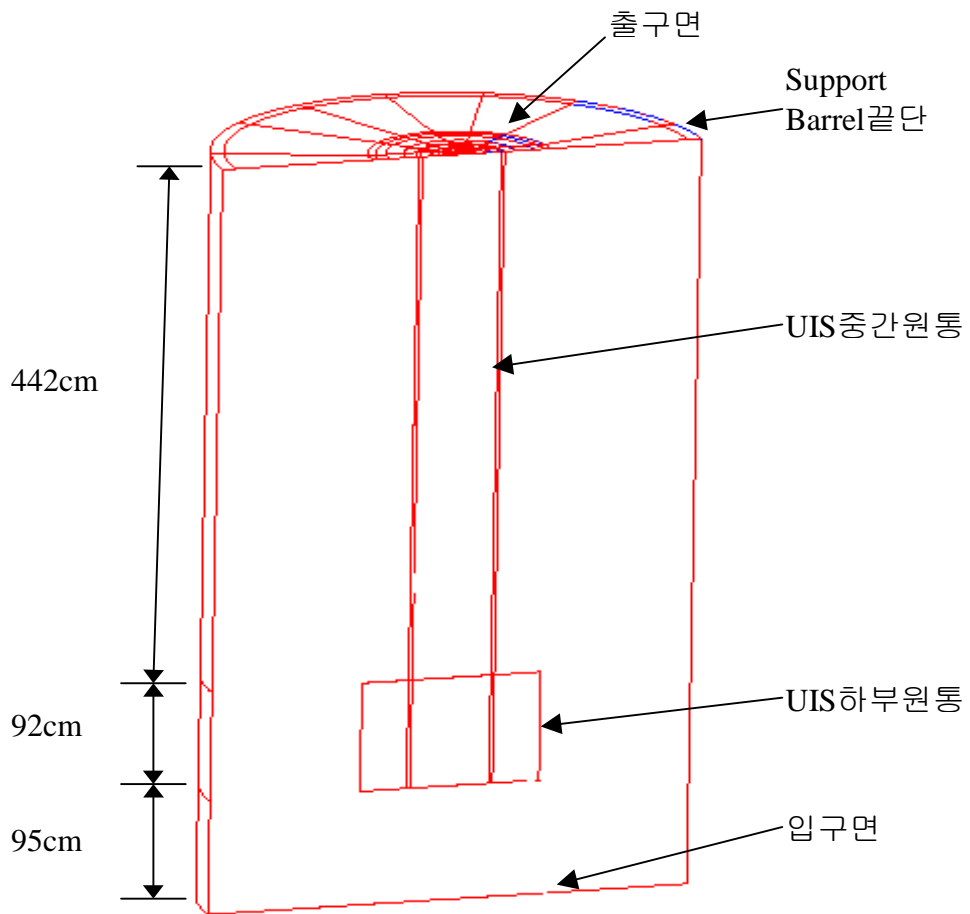


그림.4 해석공간의 전체형상

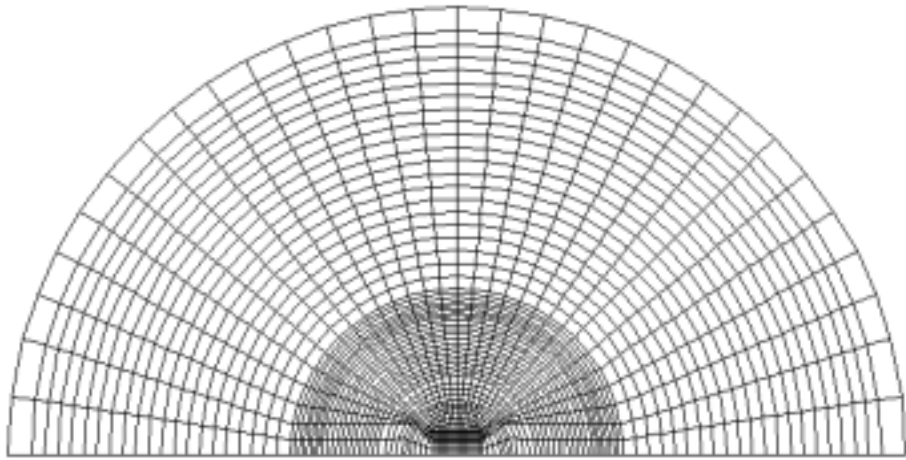


그림.5 수평단면 격자배치

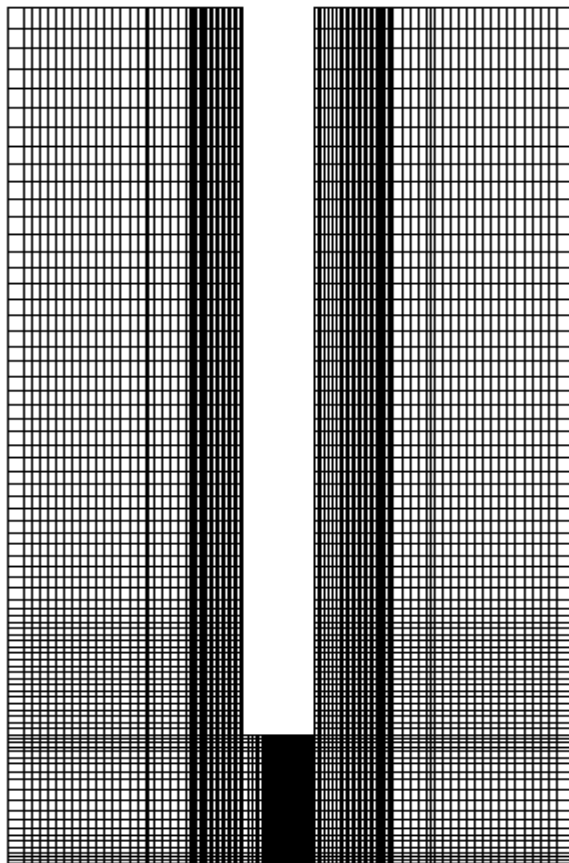


그림.6 수직단면 격자배치

노심은 Driver Fuel, Blanket Fuel, Control Rod, Reflector, IVS, Shield 등으로 구성되고, 그림 7는 노심배치도이다. 복잡한 노심배치의 특성상 그대로 입구경계조건을 적용하기는 어려움이 있으므로, 노심을 구성하는 동일종류의 집합체의 면적을 합하여 이와 동일한 환형 공간면적을 갖도록 반경방향 격자간격을 산정하고, 입구유속은 이에 따라 결정된다.

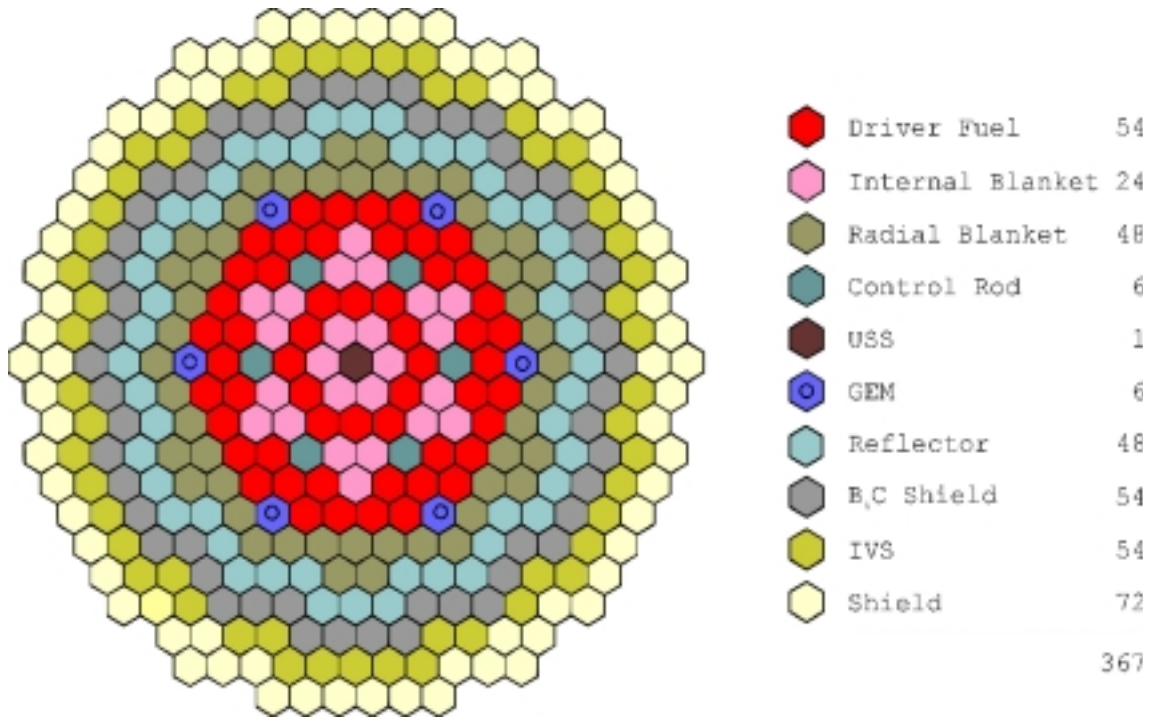


그림 7. KALIMER Breakeven 노심배치도 (150 MWe)

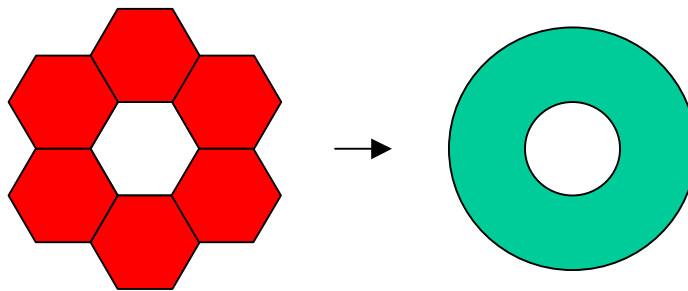


그림 8. 동일성격집합체의 등가환형면적

집합체종류는 USS+Inner internal blanket, Inner driver fuel, Outer internal blanket + Control rod, Outer driver fuel, Radial blanket + GEM, 반사체+Shield+IVS 등 Core 반경까지 등으로 동일성격의 집합체별로 그룹화하여 등가반경을 구하였다. 여기서 Core 반경은 1.7215m, Support barrel 내부반경은 1.82m 이다.

$$r_1 = 0.2236m$$

$$r_2 = 0.2928m$$

$$r_3 = 0.4141m$$

$$r_4 = 0.5478m$$

$$r_5 = 0.6211m$$

$$r_6 = 1.7215m$$

$$r_7 = 1.82m$$

노심영역별 유속은 앞 절에서 구한 격자간격 배치시 주어진 집합체의 유동면적과 Orifice Group 별 집합체 유량[참고문헌 3]으로 구한다. 집합체사이의 duct 를 통과하는 bypass 유량은 전체냉각유량의 약 2%가 되므로 이를 영역별 집합체수만큼 배분하여 영역별 총유량을 산정하였다. 입구온도는 집합체별 출구온도를 적용하였다. 반사체+Shield+IVS 를 통과하는 냉각재의 온도는 참고문헌에 나와있지 않으므로 고온풀 평균온도인 530°C 를 적용하였다.

유속계산에 적용한 소듐의 밀도는 고온풀 평균온도인 530 °C 의 824 kg/m<sup>3</sup>을 적용하였고, 표 1 은 집합체별 유속과 온도이다.

난류모델은 RNG k-ε 모델을 채택하고, 난류입구조건은 참고문헌 2 에 따라

- turbulence intensity = 0.037
- dissipation length scale = 집합체 수력직경

을 적용하였다.

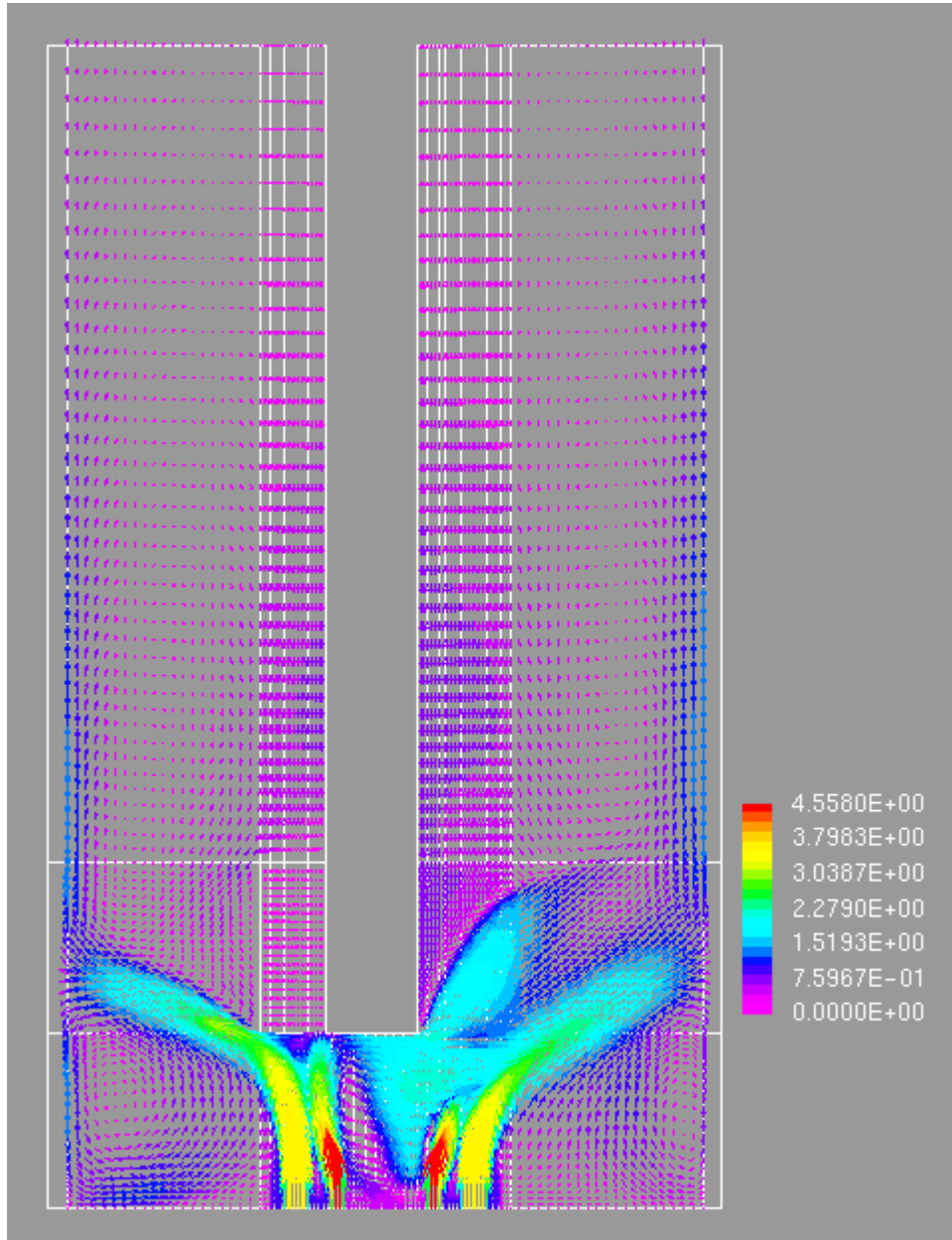
표 1. 입구경계조건

노심영역	반경 (m)	유량(kg/s)	유속(m/s)	온도(°C)
1	0.2236	56.496	0.436	516.2
2	0.2928	421.151	4.558	534.5
3	0.4141	185.902	0.838	516.3
4	0.6211	1236.428	3.714	534.3
5	0.675	220.579	0.995	517.5
6	1.7215	21.868	0.003	(530°C 적용)
7	1.82	거의 없음	0.0003	(530°C 적용)

### 3. 해석결과

그림 9 은 수직단면(IVTM 홈통의 수직대칭면에서 원주방향으로 0, 180degree)의 속도분포이다. 그림에서 단면의 오른쪽은 IVTM 용 홈통이 위치한 면이다. 노심의 구조상 UIS 아랫면에 위치한 driver fuel 집합체와 blanket fuel 집합체에서 대부분의 유동이 유입된다. 유입된 유동은 UIS 바닥면과 부딪혀 약 1.5 m/s 의 속도로 UIS 바닥을 감싸고 나온다. 전반적인 유동형태는 오른쪽면은 IVTM 용 홈통의 영향으로 빠른 속도의 유동이 IVTM 용 홈통의 옆면에서 빠져나오고, 왼쪽은 UIS 바닥면을 거쳐 감싸고 나온다. UIS 바닥면 높이에서 UIS 옆면과 Support Barrel 사이의 환형좌우단면과 IVTM 홈통바닥면을 통과하는 유량은 각각 오른쪽(0~90 degree)은 전체유량의 51.7%, 왼쪽(90~180 degree)은 전체유량의 45%, IVTM 홈통바닥면은 약 3.3%이다. 따라서 IVTM 홈통이 존재하는 오른쪽 환형단면으로 전체유량대비 55%의 보다 많은 유량이 흐른다. 양쪽수직단면의 아래위쪽에는 재순환유동이

발생하며, 왼쪽아래는 UIS 바닥면에서 위로 약 30 cm 높이의 Support Barrel 면에 오른쪽아래는 약 60 cm 높이의 Support Barrel 면에 채부착점이 있다. 그림 10는 수직단면(IVTM 홈통의 수직대칭면에서 90degree)의 속도분포로서 그림 9의 수직단면(IVTM 홈통의 수직대칭면에서 180degree)의 속도분포와 유사하고, 반경방향으로 IVTM 홈통 부근(0 degree)을 제외하고는 이와 비슷한 유동형태를 보인다.



180 degree

0 degree

그림 9 수직단면의 속도분포 (0, 180 도)



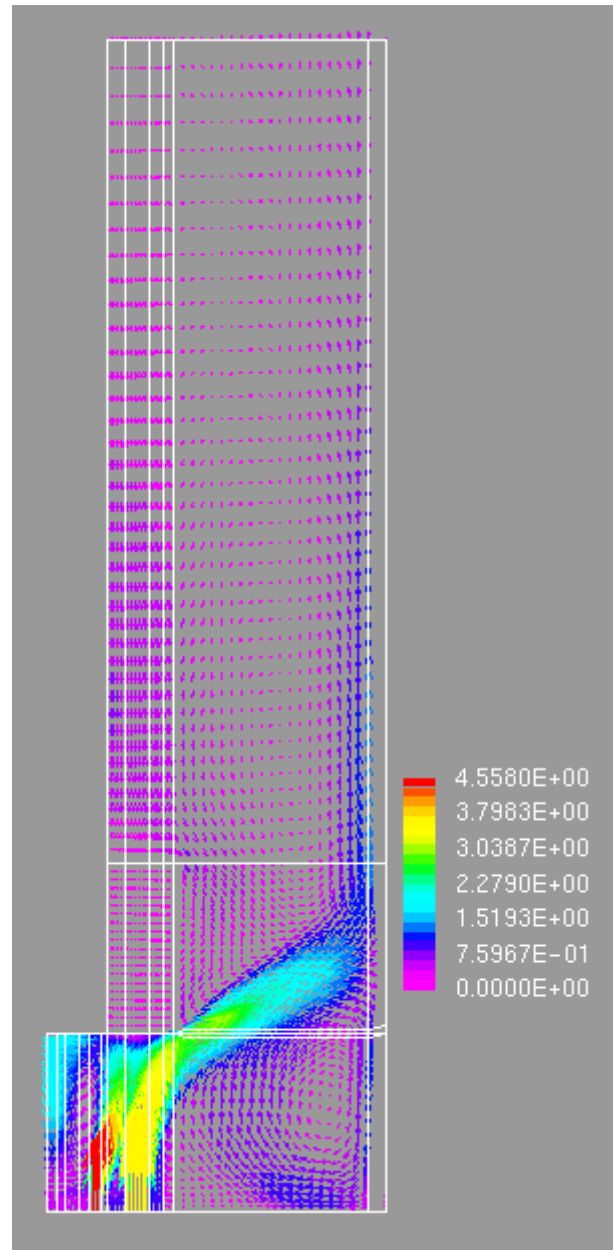


그림 10 수직단면의 속도분포 (90 도)

그림 11 은 수직단면의 온도분포다. 노심출구에서 약 20cm 떨어진 지점부터 UIS 바닥면까지 활발한 혼합이 이루어져 이후 상부까지 거의 균일한 분포를 보이고 있다. 그림 12, 13 은 원자로중심에서 노심의 집합체그룹별 반경방향위치에서 노심출구와 UIS 사이의 냉각재 반경방향 온도분포이다. 그림 13 에서 inner blanket 집합체의 온도분포는 약 3cm 부터 급격히 변화함을 볼 수 있어 노심출구온도를 정확히 측정하기위해서는 이 높이이내로 위

치하여야 할 것으로 판단된다. 노심출구에서 약 20cm ~ 40cm 사이에서 활발한 혼합이 이루어짐을 볼 수 있다. 그림 14, 15 는 같은 지점의 반경방향유속으로 노심의 바깥에 위치한 지점의 반경방향유속은 UIS 면에 가까워지면서 속도가 증가하여 radial blanket 이 위치한 지점의 경우 약 1.5m/s 에 이른다.

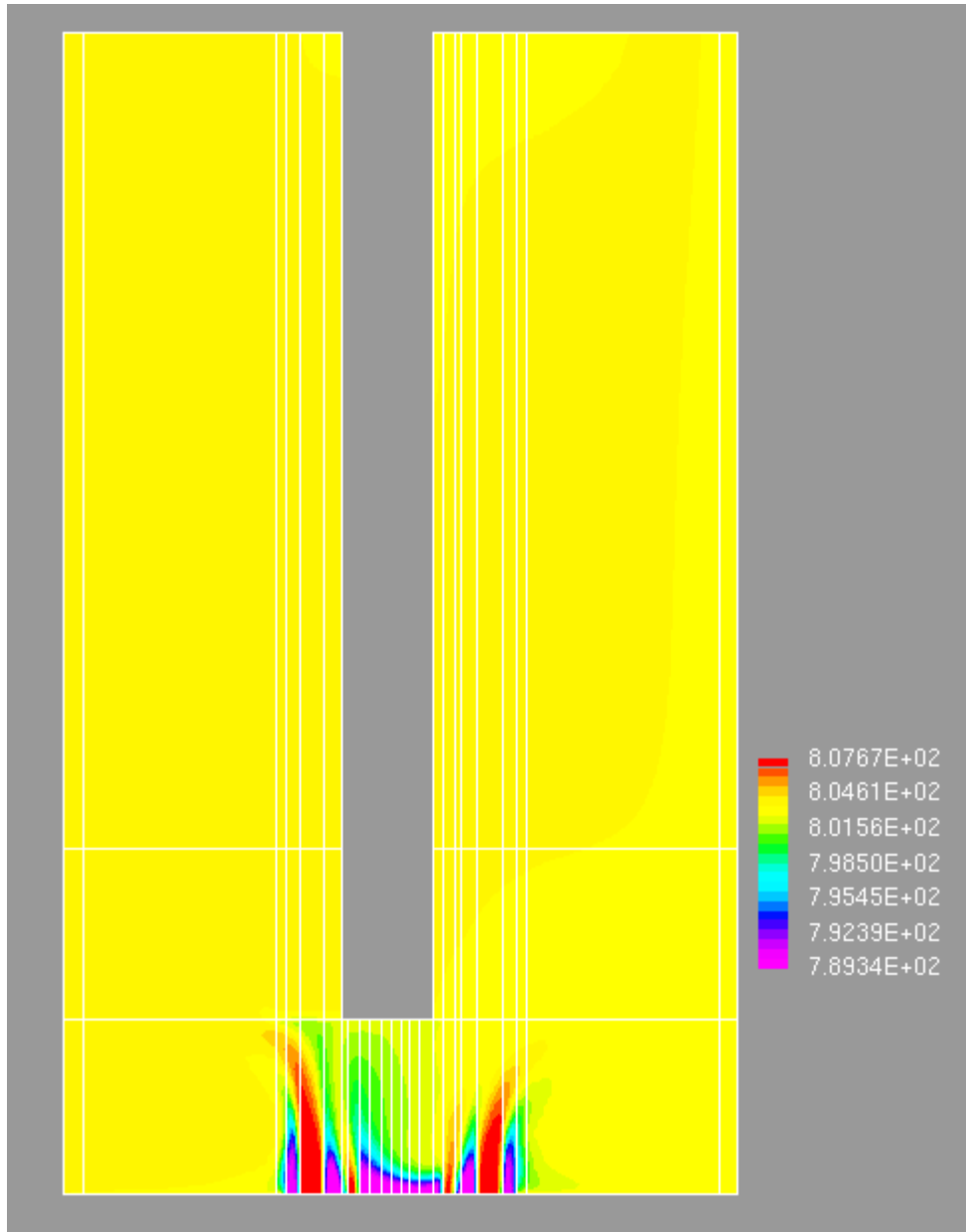


그림 11 수직단면의 온도분포

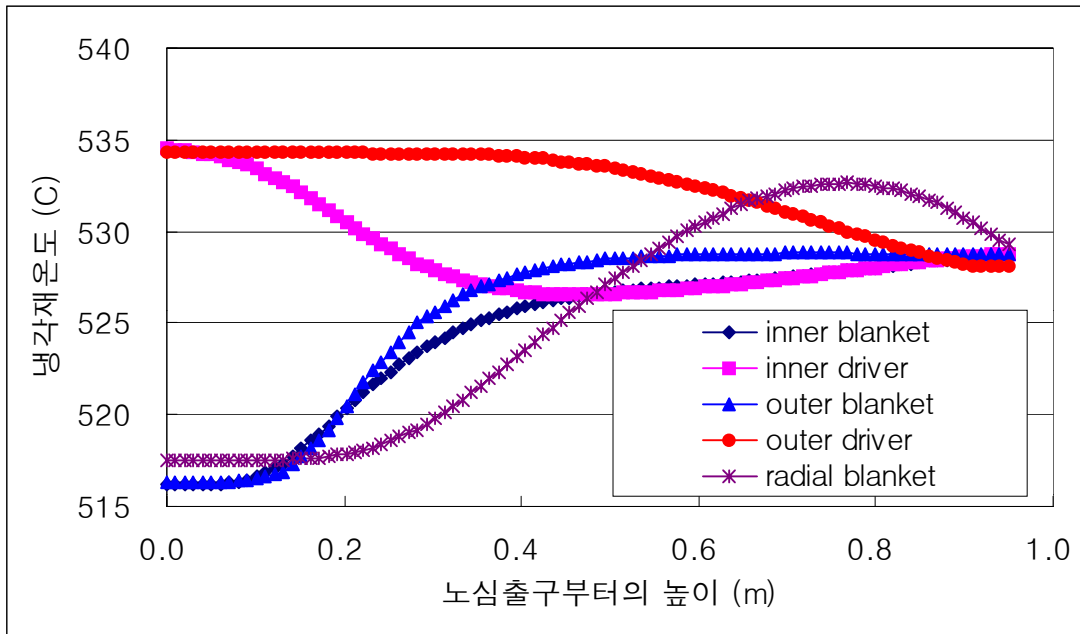


그림 12 노심출구와 UIS 사이 냉각재 축방향온도의 반경방향분포(180 도)

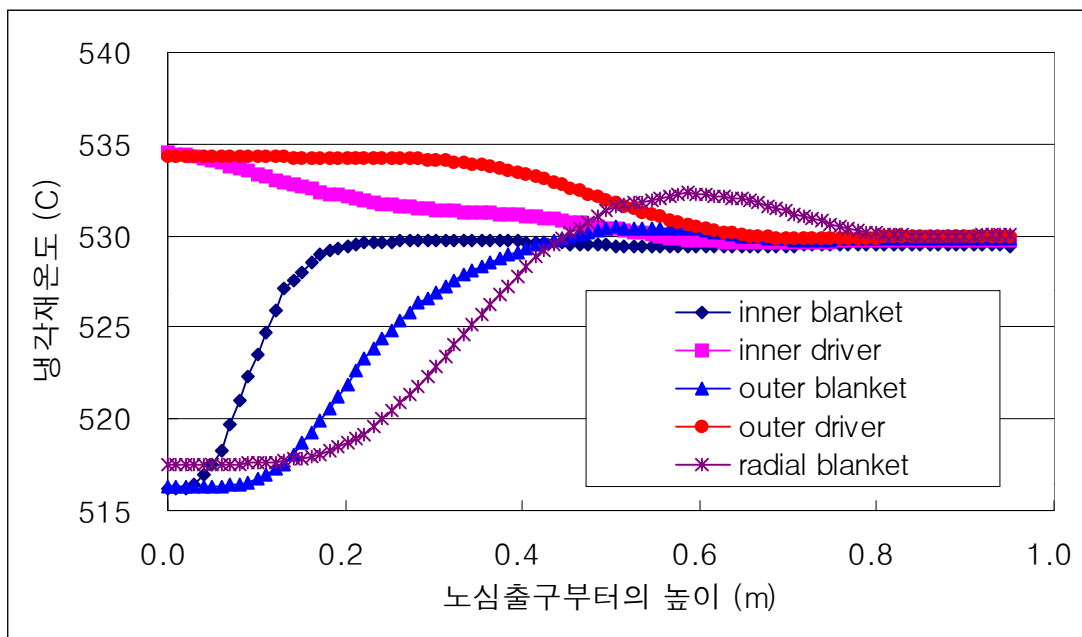


그림 13 노심출구와 UIS 사이 냉각재 축방향온도의 반경방향분포(0 도)

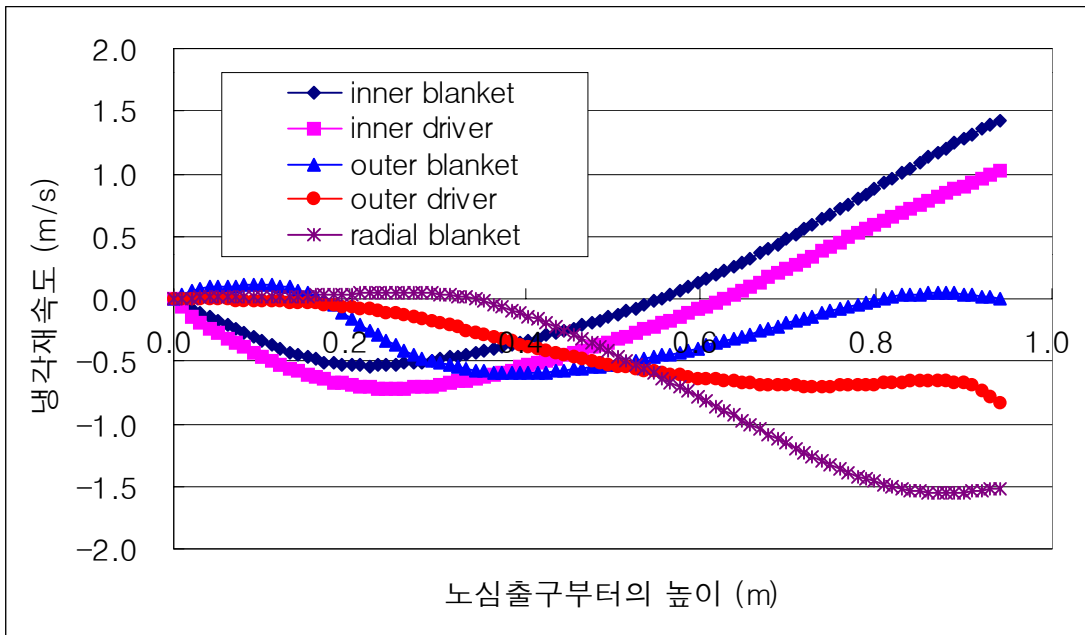


그림 14 노심출구와 UIS 사이 냉각재 축방향속도의 반경방향분포(180 도)

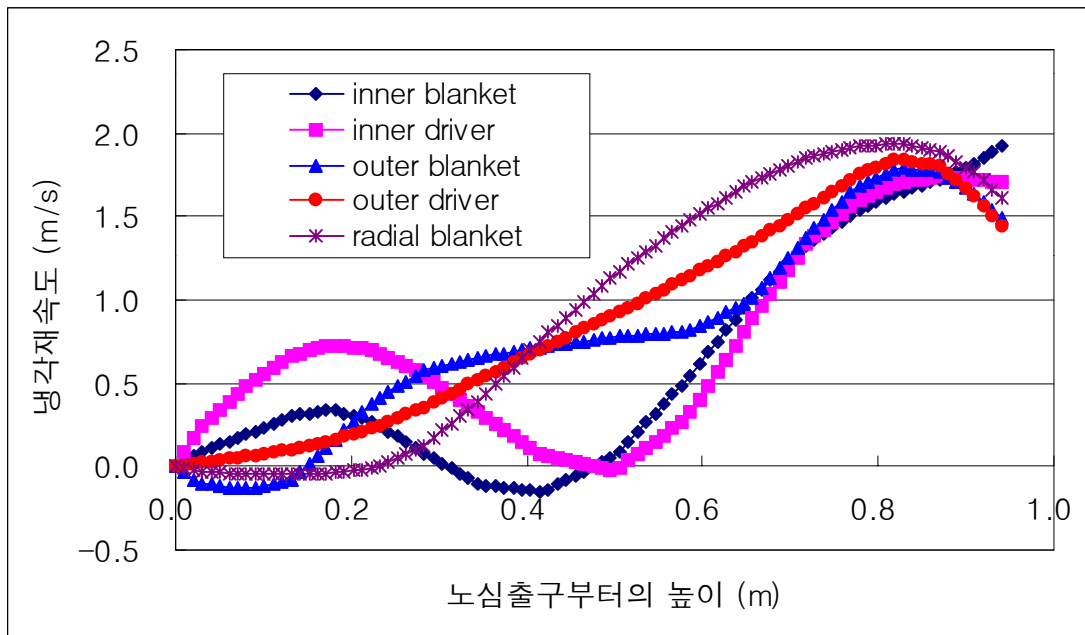


그림 15 노심출구와 UIS 사이 냉각재 축방향속도의 반경방향분포(0 도)

## 4. 결론

UIS 주변고온풀의 유동현상을 확인하기 위해 100% 정상상태 출력시 KALIMER 고온풀을 대상으로 CFX 코드를 이용하여 3차원 열유체해석을 수행하였으며, 주요결과는 다음과 같다.

- IVTM 용 흡의 바닥입구로 유입되는 유량은 전체냉각유량의 약 3%이고, 유입유량은 대부분은 상부유로로 빠지지 않고 중간에서 하부원통 IVTM 용 흡의 옆면으로 빠져 나가며, UIS 를 감싸고 나가는 유속은 약 1.5m/s 의 높은 속도가 된다.
- 노심출구와 UIS 사이의 냉각재 온도분포는 노심출구에서 약 40cm 높이 이후 거의 균일하다. 집합체별 출구온도를 정확히 측정하기 위해서는 온도측정소자를 노심출구에서 약 3cm 높이 이내로 설치하는 것이 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구계획의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 이재환 외, “액체금속로 상부내부구조물 구조동특성 및 지진응답해석, “KAERI/TR-1538/2000, 2000. 3
- [2] CFX-4.2: Solver manual, AEA Technology, Dec. 1997
- [3] Breakeven 노심구성 및 유량분배 계산결과, IOC-CD-010-2001, 한국원자력연구소, KALIMER 기술개발팀, 2001. 7