

## 액체금속로 원자로용기내에서의 과도시 3차원 열유동 현상 분석

### Analysis of Three-Dimensional Thermo-Hydraulic Phenomena in the reactor core of LMFBR

허선, 이용범, 장원표, 하귀석, 정해용  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

액체금속로의 열성층화 현상, 원자로 내부 구조물의 열부화 계산 및 보다 정확한 반응도 계산을 위해서는, 원자로내의 3차원적인 열수력 현상을 보다 정확히 해석하고 이해할 필요성이 있다. 이에 본 연구에서는 3차원 해석코드인 COMMIX-1AR/P를 이용하여, 본 연구소에서 연구중인 액체금속로인 KALIMER-600의 원자로 노심내에서의 정상상태 및 사고시의 열수력 현상에 대해 조사하였다. 기본적인 입력데이터는 KALIMER-600의 설계자료를 이용하였으며, 노심출력 및 노심유량 등, COMMIX-1AR/P에서 모사할 수 없는 부분에 대해서는 SSC-K 해석 결과를 사용하였다. COMMIX-1AR/P 코드를 이용하여, 정상상태시 원자로 전체의 온도 및 유속 분포의 타당성을 설계 자료와 비교하여 확인하였다. 또한, 이를 토대로 비보호 유량상실 사고(UTOF: Unprotected Loss Of Flow)에 대한 3차원 COMMIX-1AR/P 계산을 수행하였으며, 사고시 원자로내의 온도 및 속도 분포를 확인하고, 자연순환모드에 대해 조사하였다.

#### Abstract

The mismatch between power and flow under the transient condition of LMFBR (Liquid Metal cooled Fast Breeder Reactor) core results in thermal stratification in hot pool. Since the fluid of hot pool enters IHXs, the temperature distribution of hot pool can alter the overall system response, therefore three-dimensional analysis of thermo-hydraulic phenomena is necessary. In this study, the thermo-hydraulic phenomena under normal operating condition and unprotected transient condition of LMFBR is investigated using which is the three-dimensional analysis code, COMMIX-1AR/P. The basic input data is based on the design data of

KALIMER-600, which is sodium-cooled fast breeder reactor developed by KAERI. COMMIX-1AR/P code has not a reactivity model and the power and core flowrate must be supplied in the input data. In this study, results of SSC-K calculation is used. The temperature and velocity distributions are calculated and compared with those of SSC-K calculation results. The UTOF(Unprotected Loss Of Flow) accident is calculated using COMMIX-1AR/P and the temperature and velocity distributions in the total reactor core are calculated and the natural circulation mode under this transient condition is investigated.

## 1. 서 론

액체금속로의 고온 풀은 일·이차계통 및 관련기기 등으로 인하여 복잡한 내부 형상을 가지고 있어 고온 풀에서의 열성층화 현상 및 원자로 내부 구조물의 열부하 계산을 위하여 정상상태 뿐만 아니라 사고시에도 이에 대한 상세한 열유체 현상 파악이 필요하다. 또한 고온 풀 출구에서의 정확한 냉각재 온도 예측은 노심 입구에서의 냉각재 온도를 보다 정확히 계산할 수 있도록 함으로써 노심내 반응도 효과 등의 계산 정확도를 높일 수 있도록 도와주어 전체적인 원자로 열유체 상태 예측의 정확성 및 신뢰도를 높일 수 있다.

액체금속로 안전분석 코드인 SSC-K에서는 기존에는 1차원 완전혼합 모델을 고온 풀 분석에 사용함으로써, 고온 풀 입구로 들어오는 냉각재의 온도 변화가 시간지연 효과 없이 그대로 고온 풀 출구 온도에 영향을 미치게 되어 고온 풀 출구의 냉각재 온도를 현실적으로 모사한다고는 볼 수 없었다. 이에 따라 2차원 고온 풀 모델을 개발하여 고온 풀의 열유체 현상을 현실적으로 파악할 수 있도록 하여 SSC-K의 사고해석 능력을 향상시키고, 고온 풀 소듐 냉각재의 수위 변동을 모사할 수 있도록 하였으며, 이에 따른 고온 풀에서의 저온 풀로의 Overflow 역시 모사할 수 있도록 하였다. 하지만, 2차원 고온 풀 해석모델만으로는 비대칭적인 현상과 같은 3차원적인 현상을 모사하는 데는 부족함이 있었다.

본 연구에서는 KALIMER-600의 열유체 현상 및 자연순환현상 파악을 위하여, 3차원 해석코드를 이용하여 KALIMER에서의 정상상태 및 비보호 사고시 열유체적 현상을 비교분석하였다. 3차원 코드로는 COMMIX-1AR/P를 선택하였으며 원자로 전체를 모사하였다. COMMIX-1AR/P 전산코드에는 액체금속로에서 가장 중요한 반응도 궤환 모델이 없으므로 COMMIX-1AR/P 만으로는 KALIMER에서의 비보호 사고를 모사할 수 없다. 따라서 SSC-K를 이용하여 비보호 사고시 계산되어진 출력과 유량을 COMMIX-1AR/P의 입력으로 사용하였다.

먼저 정상상태에 대한 COMMIX-1AR/P 계산을 수행하여 온도 및 유속 분포의 타당성을 설계 자료와 비교하여 확인하였다. 이를 토대로 비보호 유량상실 사고(UTOF: Unprotected

Loss Of Flow)에 대한 3차원 COMMIX 계산을 수행하였으며, HP2D의 2차원 모델을 사용한 SSC-K의 결과와도 비교하고 그 타당성을 평가하였다.

## 2. COMMIX 해석모델

### 2.1 격자배치

KALIMER 원자로 내부 구조물은 노심지지 구조물, 입구 플레넘, 지지 barrel, 원자로 baffle 판, 격리판, 유로 유도관, 전자기펌프 노즐, 입구측 파이프, 방사선 차폐 구조물들로 구성되어 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 원자로 baffle annulus라 불리는 환형의 내부 구조물은 원자로 baffle, 지지 barrel, 원자로 baffle 판, 격리판으로 구성되어지며 고온 및 저온 풀 소듐 사이의 열 차폐 역할을 한다. 원자로 baffle annulus 내의 정지된 소듐 온도는 정상운전시 안정적으로 성층화 되며 고온 및 저온 소듐 경계에서의 열적 불균형에 의한 thermal stress를 현저히 감소시키는 역할을 한다. 상부 내부 구조물 (UIS: Upper Internal Structure)은 원자로 헤드에 부착되어 있는 회전 플러그에 부착되어 있으며 원자로 고온 풀 내에 잠겨지게 된다. 그림 2에는 원자로 내에서의 정상상태시 냉각재 유로를 도시하였다.

해석에 사용한 COMMIX-1AR/P(Garner, 1992)의 좌표계는 원통 좌표계를 채택하였다. UIS의 IVTM (In-Vessel Transfer Machine)용 홈과 IVTM의 존재를 무시하고, 구조물의 대칭성을 이용하여 풀의 90°부분만 해석하였다. 해석 대상범위는 반경방향으로 원자로 중심과 Air Separator 사이, 축방향으로 원자로용기의 바닥에서 헬륨공간의 윗부분, 즉 하부절연판의 밑면까지, 원주방향으로는 펌프의 중심에서 DHX 중심까지이다. PSDRS를 구성하는 Air Downcomer는 포함하지 않았으며, Air Separator는 단열된 것으로 가정하였고, 원자로용기 밑바닥의 반구형상은 무시하였다. 해석영역에서 소듐과 헬륨은 서로 접하고 있지만, COMMIX 코드의 기능상 서로 물리적으로 분리되어 있어야 하므로 고온 풀과 헬륨 사이, 저온 풀과 헬륨사이에는 얇은 소듐 막이 있는 것으로 가정하였다.

격자간격은 격자면이 물리적으로 의미 있는 지점, 즉 배플, 용기, 파이프, 액위면 등의 위치와 일치하도록 배치하였다. 반경방향으로는 22개의 노드를 주었고, 이 중에서 support barrel 안쪽의 노심영역에 10개, 노심과 배플사이에 5개, 배플과 원자로용기 사이의 gap에 1개, 격납용기와 원자로용기 사이의 아르곤영역에 2개, air separator와 격납용기사이의 공기유로에 2개, 중간열교환기의 튜브 측에 1개를 주었으며, 한개의 노드는 확장용 볼륨으로 이용된다. 원주방향으로는 총 12개의 노드가 주어지고, 이 중 마지막에 위치한 1개는 소듐영역의 확장소자용(expansion cell)으로 주어졌다. 축방향으로는 총 38개의 노드가 주어졌고, 소듐영역에 29개, 헬륨공간에 8개, 마지막에 위치한 1개 노드는 헬륨과 아르곤영역의 확장소자용으로 주어졌다. 그림 3과 4에 수직 및 수평격자 배치단면을 도시하였다. 그림에서 실선은 셀 경계를 나타내고, 굵은 실선은 유로 경계면을 나타낸다.

## 2.2 주요 입력자료

COMMIX-1AR/P는 격자배치뿐만 아니라 노심내 핵연료 그룹별 외부반경 및 수력학적 반경 등의 입력을 필요로 한다. 본 보고서에서는 KALIMER-600를 대상으로 입력을 작성하였으며 상세한 내용은 참고문헌(S. Heo, 2004)에 수록하였다.

## 3. 정상상태 해석

COMMIX-1AR/P 전산코드를 이용하여 KALIMER-600의 정상상태 시 유속 및 온도분포를 계산하였다. 정상상태 시 열균형을 맞추기 위하여 노심내 출력 정상상태 값인 1589.3MW으로 조정하였으며, 계산결과에서 나온 값은 1575.7MW이었다. 또한 노심내 유량을 설계값인 8,662kg/sec으로 맞추기 위해서는 1차계통 펌프의 유량을 입력값으로 주어야 하므로 여러 번의 시도를 거쳐 표 1과 같이 노심내 유량을 설계값에 맞추었다.

이와 같이 노심내 출력 및 유량을 일정하게 유지하면서 2차측 조건을 변화시켜 노심내 입구온도를 설계값으로 맞추었다. 계산된 정상상태 시 노심 및 중간열교환기 입·출구에서의 온도와 설계값을 표 2에 나타내었다. 노심 입구온도의 설계값은 366.2°C이며 계산된 값은 367.7°C이다. 또한 노심 출구온도의 설계값은 510.0°C이며 계산된 값은 512.3°C이다. 코드에서 계산한 입구온도와 출구온도는 설계값보다 각각 1.5°C, 2.3°C 높게 나타났으나, 노심내 온도상승에 있어서의 설계값과 계산값 사이의 오차는 0.8°C로서, 계산 결과가 설계값에 근접함을 알 수 있다. 또한, 중간열교환기 1차측 입구측 온도는 495.3°C이며, 출구 노즐에서의 온도는 367.7°C로 나타났다. 이상의 결과로 볼 때 COMMIX-1AR/P를 이용하여 계산된 KALIMER의 정상상태 열균형은 설계값과 일치함을 알 수 있다.

그림 5에 정상상태 수직면 온도분포를, 그림 6에 수직면 유속분포를, 그림 7에 고온 풀 및 중간열교환기 내 상세 온도분포를 도시하였다. 그림 7로부터 고온 풀의 평균온도는 약 510°C에 근접함을 알 수 있으며, IHX의 1차측 출구온도는 약 367.7°C에 근접함을 알 수 있다. 저온 풀의 온도는 약 367°C로서 균일하며 노심 입구온도는 367.7°C이다.

그림 8에 수직면 재순환 영역을 도시하였다. 수직면에서 J=1은 펌프를 포함하는 단면이며 J=6은 IHX를 포함하는 단면이며, J=3은 펌프와 IHX사이의 저온풀이 가장 넓은 공간을 차지하는 수직단면이다.

## 4. 사고해석 (ULOF)

비보호 유량상실 사고(ULOF: Unprotected Loss Of Flow)는 노심으로 정상 유입되는 유량이 상실되는 사고이다. 노심 유량이 상실되면 노심에 발생하는 열생성율과 냉각유량에 의한 열제거율의 균형이 깨어져 순간적으로 핵연료가 과열될 수 있다. 사고 조건에 따라 여러 종류의 유량상실사고가 있을 수 있으나, 현재의 해석 모델에서는 1/4 노심을 대상으로 하고 있으며, 한대의 펌프만이 존재하므로, 본 해석에서는 모든 펌프가 동시에 Coastdown하는 대표적인 사고의 경우를 선택하여 해석을 수행하였다.

COMMIX-1AR/P에는 노심 냉각재 온도 변화등에 의한 반응도 계산 모델이나 그에 따른 노심 출력을 계산할 수 있는 모델이 없으므로, 사고시의 노심 출력변화를 입력값으로 제공해주어야 한다. SSC-K를 이용하여 유량상실 사고시 노심 온도 변화, 고온 풀의 온도, 자연순환 등의 현상을 분석하였으며(J.W. Chang, 2004), SSC-K에서 계산된 결과는 그림 9과 같다. 이 데이터를 근거로 COMMIX-1AR/P 계산에 필요한 유량 및 노심출력의 입력자료는 작성하였으며, 작성된 COMMIX-1AR/P는 그림 10과 같다. COMMIX-1AR/P에는 고온풀이나 저온풀의 수위변화를 모델할 모델이 없으므로, 초기 정상상태에도 저온풀의 수위가 고온풀과 같으며, DHX 또한 저온풀 소동에 잠겨있다고 가정하고 계산하였다. 단, 이때 DHX 2차측의 유량을 0로 하여, DHX를 통한 냉각효과를 무시할 수 있도록 하였다.

COMMIX-1AR/P를 이용하여, ULOF 사고시의 원자로내 열수력학 현상에 대한 해석을 수행하였다. 먼저, 이 계산에 의한 J=6 수직면에서의 온도분포의 변화를 그림 11에 표시하였다. J=6 수직면은 IHX를 포함하는 수직면이다. ULOF이후 저온풀의 온도는 거의 변화가 없지만, 고온풀의 경우에는 100초 이내에 국부최고온도가 600℃이상으로 증가함을 알 수 있다.

펌프를 포함하고 있는 J=1 수직면과 IHX를 포함하고 있는 J=6수직면에서의 속도분포의 변화 및 100초에서의 자연순환모드를 그림 12와 그림 13에 표시하였다. SSC-K 계산 결과에서의 노심 냉각재 유량이 그대로 COMMIX-1AR/P 입력값으로 주어졌으므로, 노심내 냉각재 유속 및 그 변화는 SSC-K와 일치하고 있으며, ULOF시 속도 분포는 정상상태 시 속도분포와 크게 상이하지 않음을 알 수 있다. 또한, 그림에서는 고온풀 상부와 하부에 국부적인 자연순환이 나타나고 있음을 잘 보여주고 있다.

## 5. 결론

SSC-K의 기존 고온 풀 분석 모델은 1차원 완전혼합 모델이므로 고온 풀 입구로 들어오는 냉각재의 온도 변화가 시간지연 효과 없이 그대로 고온 풀 출구 온도에 영향을 미치게 되어 고온 풀 출구의 냉각재 온도를 현실적으로 모사한다고는 볼 수 없다. 따라서 2차원 고온 풀 모델을 개발하여 고온 풀의 열유체 현상을 현실적으로 파악할 수 있도록 하여 SSC-K의 사고해석 능력을 향상시켰다.

본 연구에서는 HP2D 모델의 현상학적인 사고해석 능력을 검증하기 위하여 3차원 코드를 이용하여 KALIMER에서의 비보호 사고시 열유체적 현상을 비교분석하였다. 3차원 코드로는 COMMIX-1AR/P를 선택하였으며 원자로 전체를 모사하였다. COMMIX-1AR/P 전산코드에는 액체금속로에서 가장 중요한 반응도 케환 모델이 없으므로 COMMIX-1AR/P 만으로는 KALIMER에서의 비보호 사고를 모사할 수 없다. 따라서 SSC-K를 이용하여 비보호 사고시 계산되어진 출력과 유량을 COMMIX-1AR/P의 입력으로 사용하였다.

정상상태 시 열균형을 맞추기 위하여 노심내 출력을 1589.3MWth으로 고정하였으며 노

심내 유량을 설계값인 8,662kg/sec으로 맞추었다. 비보호 유량상실 사고시 SSC-K에서 계산된 출력을 COMMIX-1AR/P 입력으로, 원자로 전체의 사고시 온도 변화 및 속도분포를 계산하고, 자연순환모드를 확인하였다.

표 1 정상상태 시 그룹별 노심 유량 분포

	Design Data, kg/sec	Calculation, kg/sec	증감
inner driver	400	404.3	1.1%
inner driver	270	273.1	1.1%
middle driver	408	409.0	0.3%
middle driver	234	236.8	1.2%
middle driver	182	184.9	1.6%
outer driver	163	164.0	0.6%
outer driver	221	223.6	1.2%
outer driver	69	69.7	1.1%
outer driver	182	183.3	0.7%
reflector and shield	38	38.4	1.0%
Total	2,187	2,167	0.9%

표 2 정상상태 시 냉각재 온도 분포

	Design Data, °C	Calculation, °C
Core inlet	386.2	386.3 <sup>1)</sup>
Core outlet	510.0	531.7 <sup>2)</sup>
IHX primary side inlet	529.8	526.0 <sup>3)</sup>
IHX primary side outlet	385.0	380.7 <sup>4)</sup>
Note 1) I=10, J=6, K=3에서의 온도 2) I=1~8, K=12에서의 평균온도 3) I=10, J=1, K=31에서의 온도 4) I=12, J=1, K=12에서의 온도		

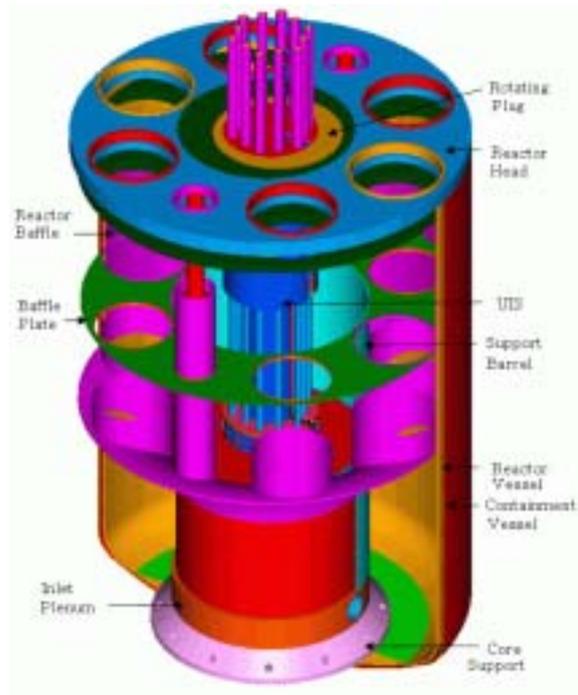


그림 1 1차계통 단면도

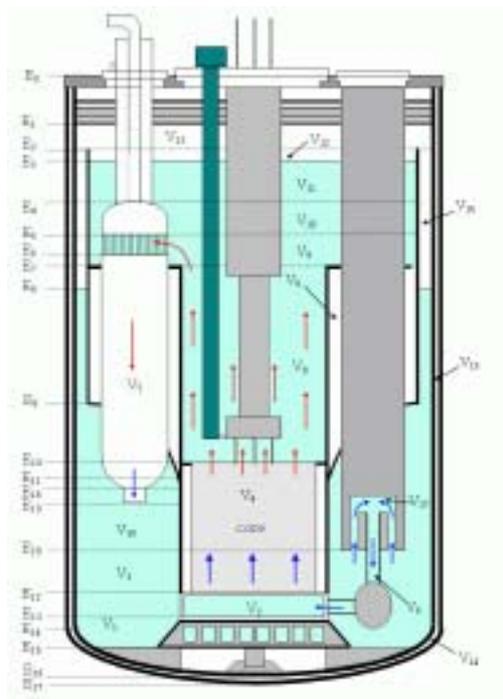
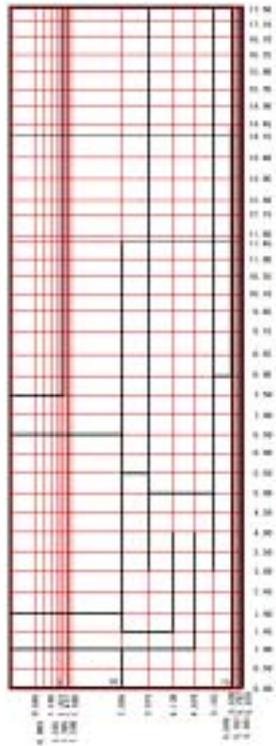
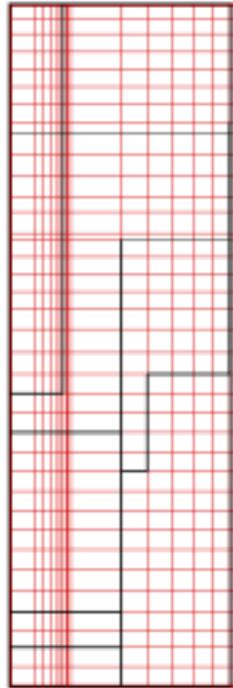


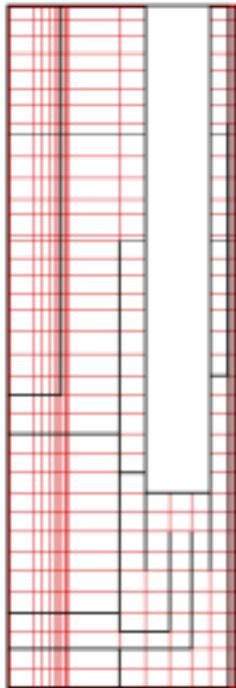
그림 2 1차계통 정상 소동 유로



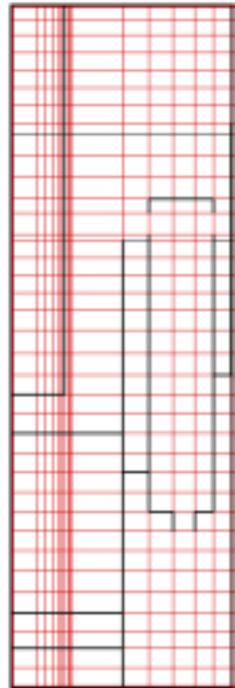
Dimension



J=1

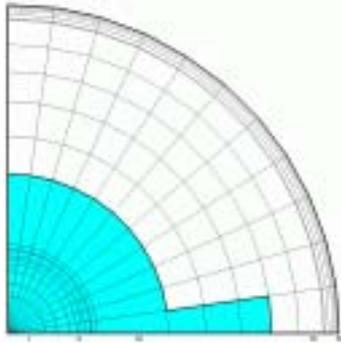


J=3

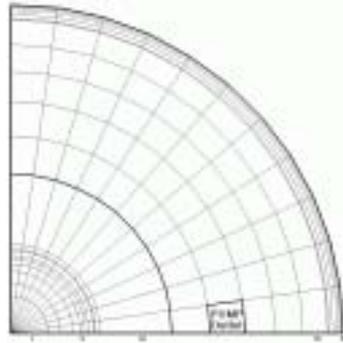


J=6

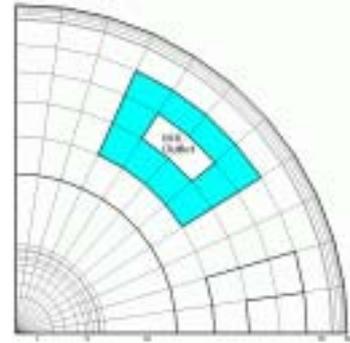
그림 3 해석모델 수직단면



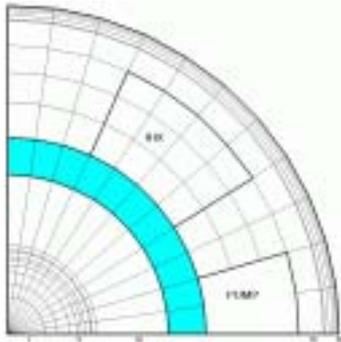
k= 3



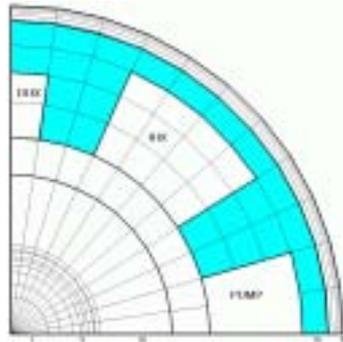
k= 6



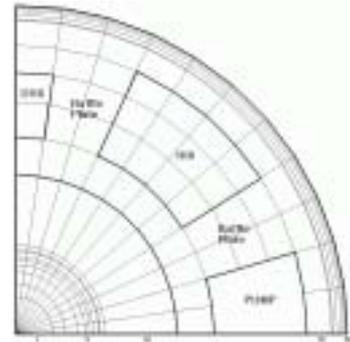
k=10



k=12



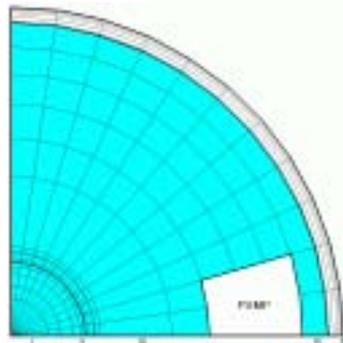
k=17



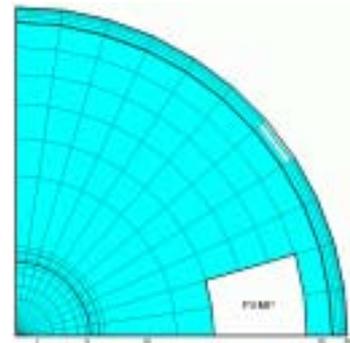
k=24



k=27

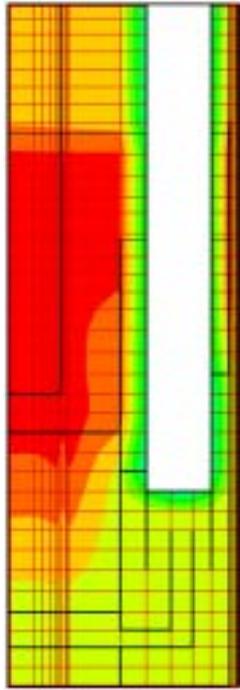


k=30

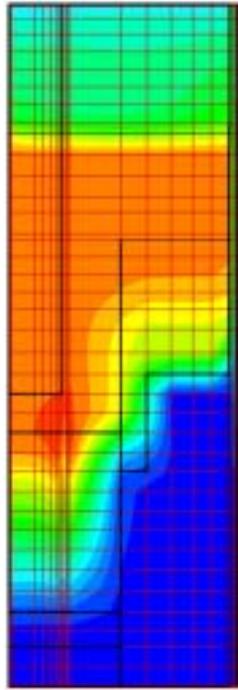


k=38

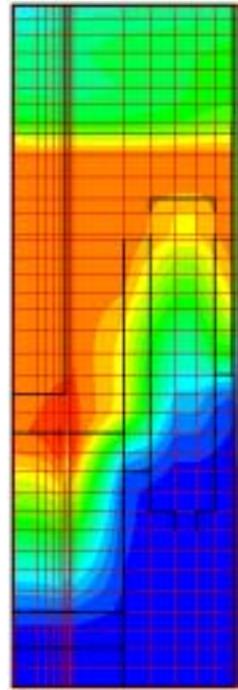
그림 4 해석모델 수평단면



J=1



J=3

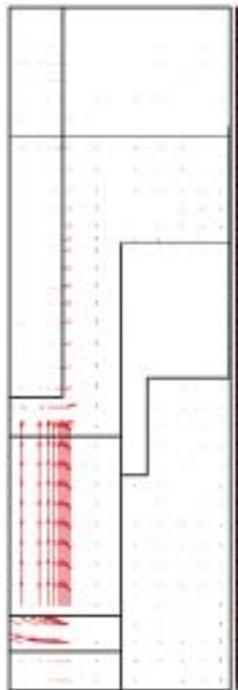


J=6

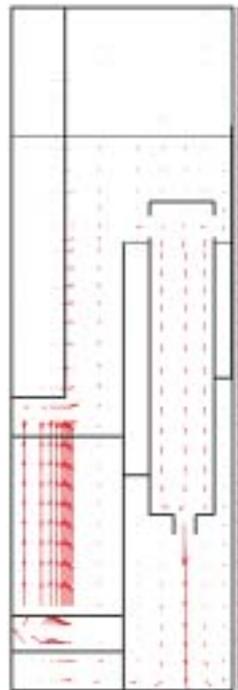
그림 5 정상상태 수직면 온도분포



J=1



J=3



J=6

그림 6 정상상태 수직면 유속분포

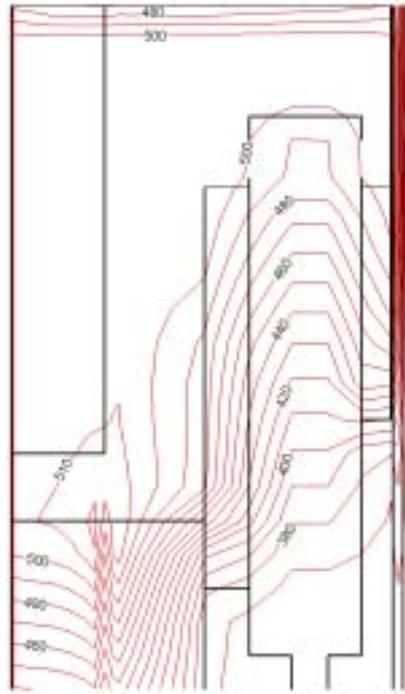
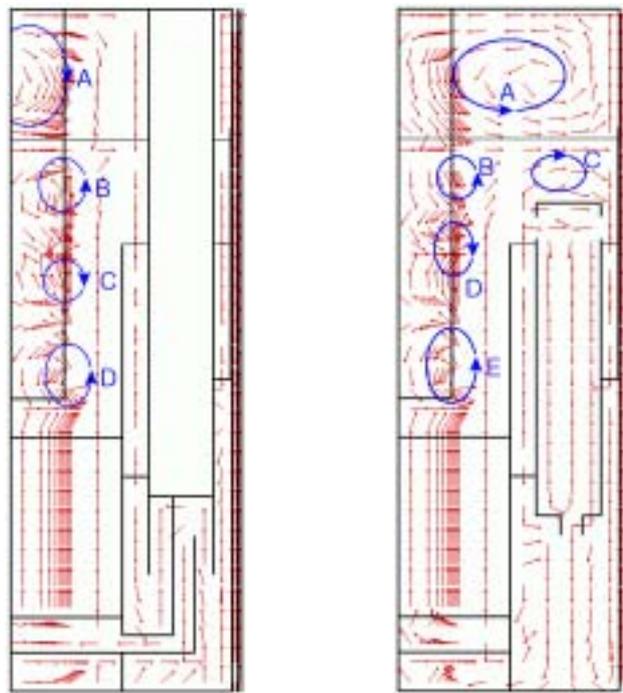


그림 7 정상상태 시 고온 플 및 IHX 내부 온도분포



J=1

J=6

그림 2-8 재순환 영역

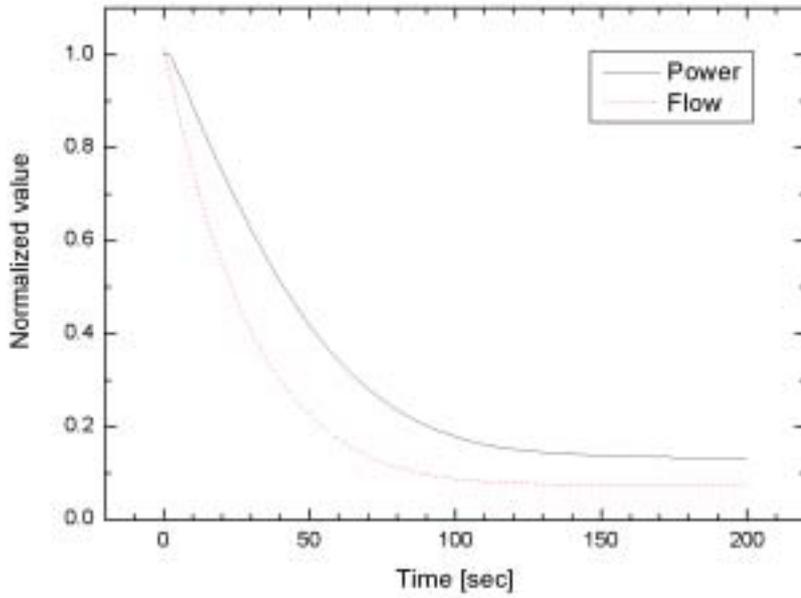


그림 9 ULOF시 노심출력 및 유량변화 (SSC-K 계산결과)

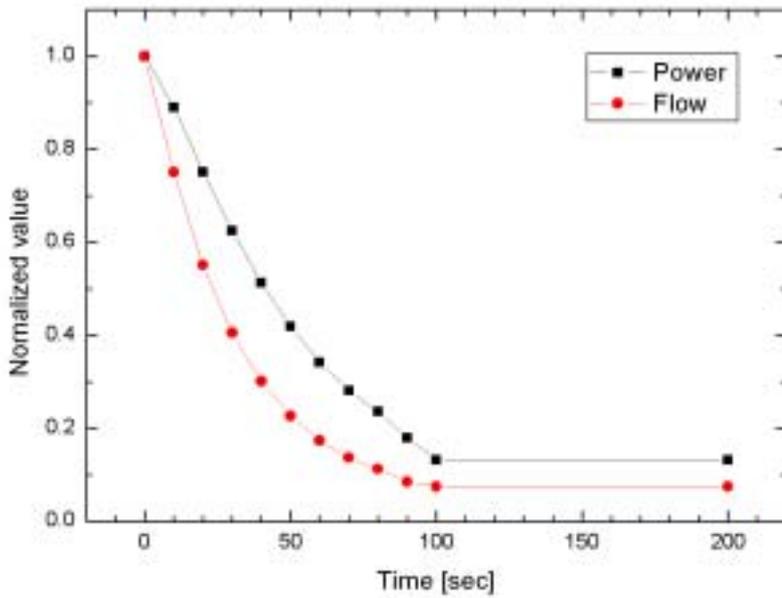


그림 10 ULOF시 노심출력 및 유량변화 (COMMIX 입력값)

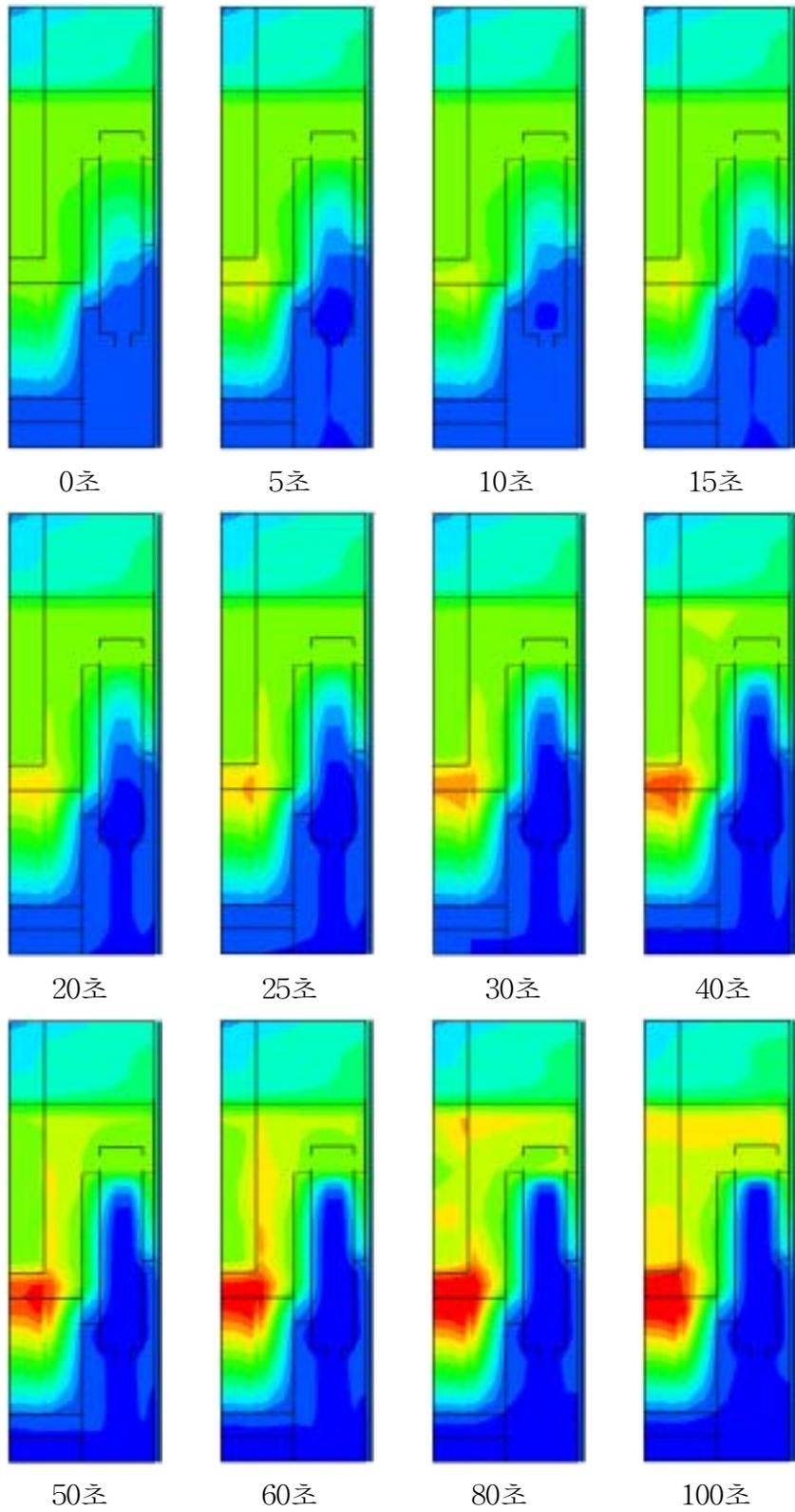


그림 11 ULOF 시 J=6 평면에서의 상세온도분포

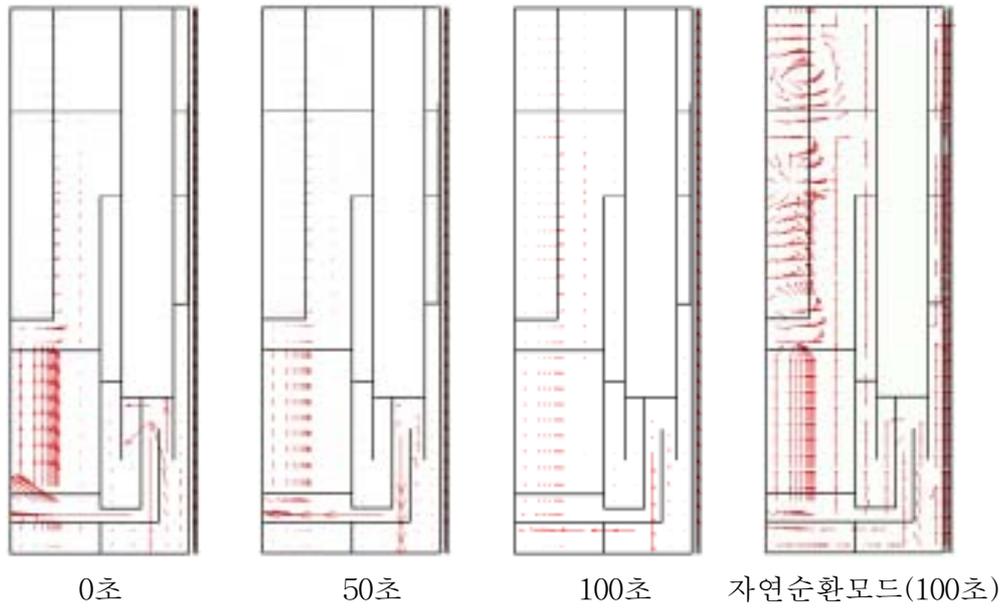


그림 12 ULOF 시 J=1 평면에서의 속도분포

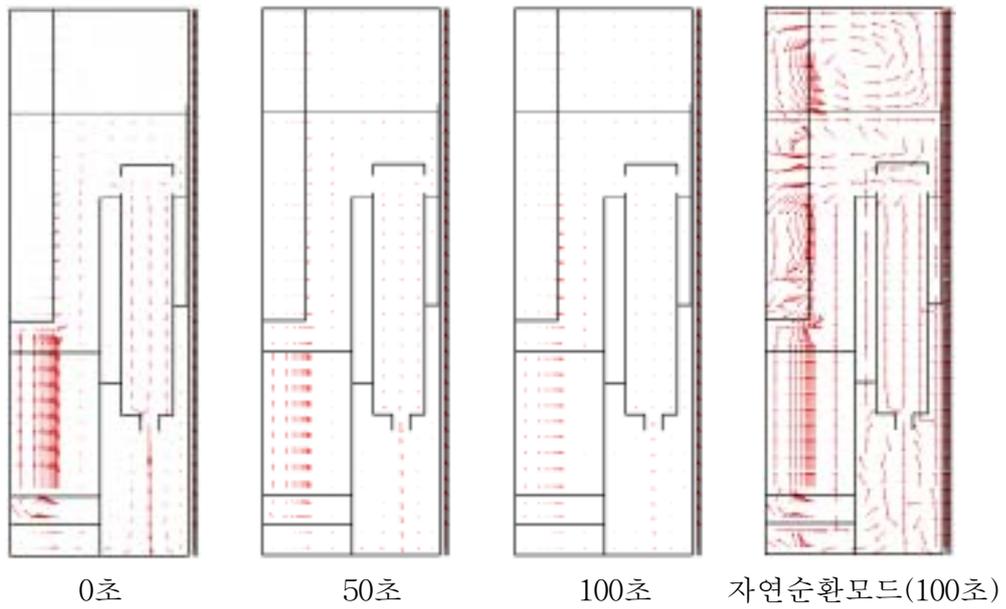


그림 13 ULOF 시 J=6 평면에서의 속도분포