

UTOP 사고시 KALIMER 고온 풀 내부 열유동 현상에 대한 코드간 비교분석

A Code-to-Code Comparison Analysis for the KALIMER Hot Pool for UTOP accident

이용범, 하귀석, 정해용, 장원표, 한도희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 고온 풀의 열유체 현상을 현실적으로 파악하기 위하여 'HP2D' 2차원 고온 풀 모델을 개발하여 액체금속로 계통과도 안전해석 전산코드인 SSC-K에 적용함으로써 이의 사고해석 능력을 향상시켰으며, 개발된 HP2D 모델은 실험결과와의 비교분석을 통하여 검증이 수행하였다. 본 논문에서는 개선된 SSC-K 및 COMMIX-1AR/P를 이용하여 KALIMER에서의 정상상태 및 UTOP 사고시 고온 풀에서의 열유체 현상을 상세분석하였으며 개발된 'HP2D' 2차원 고온 풀 모델의 계산 신뢰도를 평가하였다.

Abstract

A two-dimensional hot pool model has been developed and is applied to the SSC-K code that is developed at KAERI for the safety analysis of a pool-type LMR. The comparison analyses of the model with experimental data has been performed. In this paper a preliminary evaluation of thermohydraulic phenomena in the KALIMER hot pool for the steady-state and UTOP has been performed with developed two-dimensional 'HP2D' model and the COMMIX-1AR/P code.

1. 개 요

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.

하지만 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 모사 한다고는 볼 수 없다. 따라서 2차원 고온 풀 모델을 개발하여 고온 풀의 열유체 현상을 현실적으로 파악할 수 있도록 하여 SSC-K의 사고해석 능력을 향상시켰다[1-3]. 또한 고온 풀 소듐 냉각재의 수위 변동을 모사 할 수 있도록 하였으며, 이에 따른 고온 풀에서의 저온 풀로의 Overflow 역시 모사 할 수 있도록 하였다. 개발된 모델을 검증하기 위하여 MONJU에서 수행된 실험 결과와 비교 및 분석하였다[4-6].

본 논문에서는 HP2D 모델의 현상학적인 사고해석 능력을 검증하기 위하여 3차원 코드를 이용하여 KALIMER에서의 비보호 과출력 사고시 (UTOP: Unprotected Transient OverPower) 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.

먼저 정상상태에 대한 COMMIX-1AR/P 계산을 수행하여 온도 및 유속 분포의 타당성을 설계 자료와 비교하여 확인하였다. 이를 토대로 비보호 과출력 사고(UTOP: Unprotected Transient OverPower)에 대한 3차원 COMMIX 계산을 수행하여 HP2D의 2차원 모델을 사용한 SSC-K의 결과와 비교하고 그 타당성을 평가하였다.

2. 정상상태 해석

2.1 COMMIX 해석모델

2.1.1 격자매치

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 1과 2에 원자로 수직 및 수평 단면을 도시하였다.

해석에 사용한 COMMIX-1AR/P[7]의 좌표계는 원통 좌표계를 채택하였다. UIS의 IVTM (In-Vessel Transfer Machine)용 홈과 IVTM의 존재를 무시하고, 구조물의 대칭

성을 이용하여 풀의 90°부분만 해석하였다. 해석 대상범위는 반경방향으로 원자로 중심과 Air Separator 사이, 축방향으로 원자로용기의 바닥에서 헬륨공간의 윗부분, 즉 하부 절연판의 밑면까지, 원주방향으로는 중간열교환기의 중심에서 그 다음 중간열교환기의 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 9개, 배플과 원자로용기 사이의 gap에 2개, 격납용기와 원자로용기 사이의 아르곤영역에 2개, air separator와 격납용기사이의 공기유로에 2개, 중간열교환기의 튜브 측에 1개를 주었다. 원주방향으로는 총 12개의 노드가 주어지고, 이 중 마지막에 위치한 1개는 소듐영역의 확장소자용(expansion cell)으로 주어졌다. 축방향으로는 총 47개의 노드가 주어졌고, 소듐영역에 38개, 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.

2.1.2 주요 입력자료

COMMIX-1AR/P는 격자배치뿐만 아니라 노심내 핵연료 그룹별 외부반경 및 수력학적 반경 등의 입력을 필요로 한다. 본 논문에서는 KALIMER breakeven core를[8] 대상으로 입력을 작성하였으며 상세한 내용은 참고문헌[9]에 수록하였다.

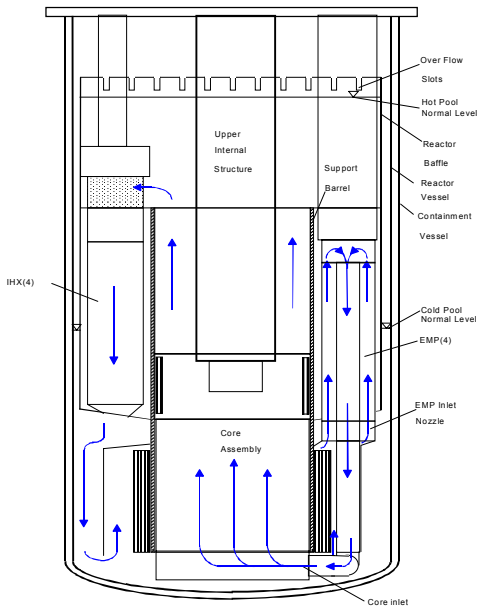


그림 1 1차계통 정상 소듐 유로

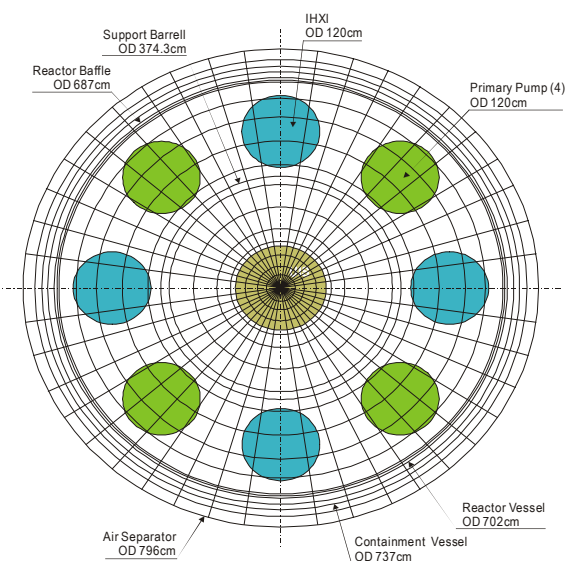
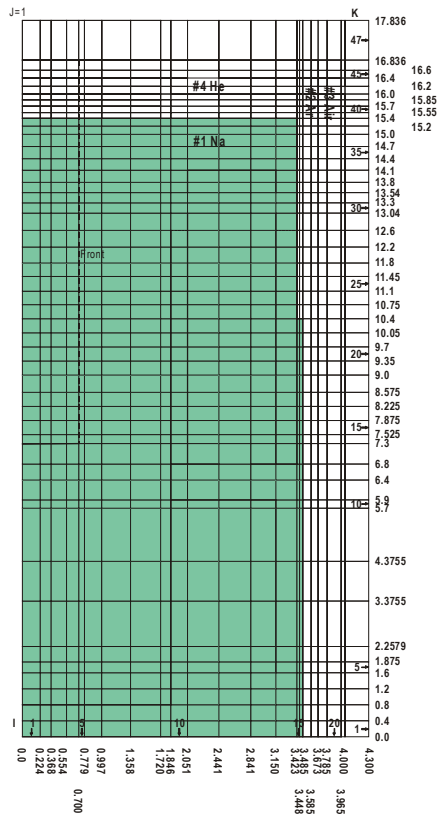
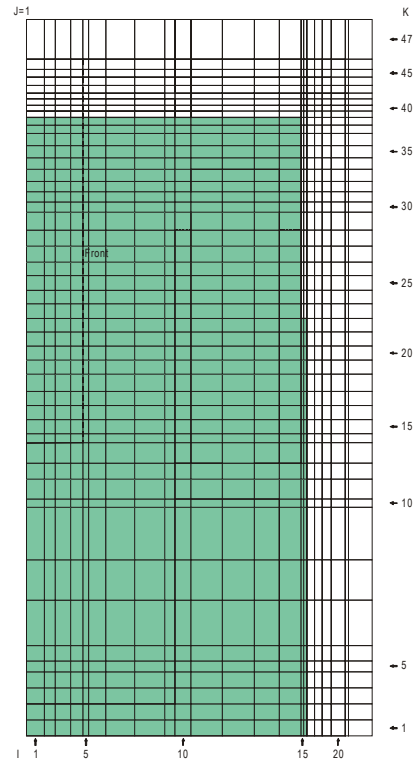


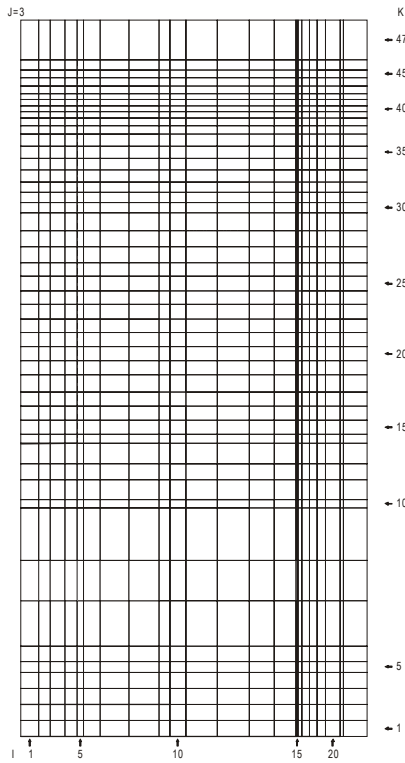
그림 2 1차계통 단면도



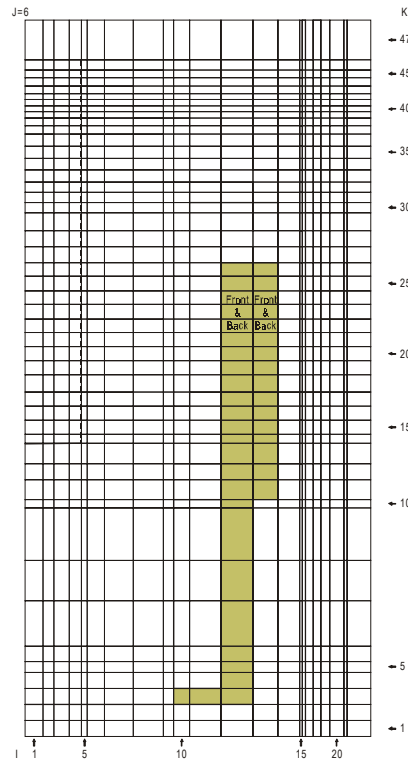
Dimension



J=1

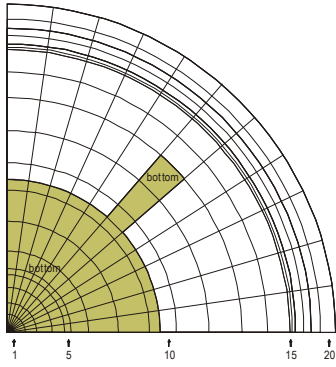


J=3

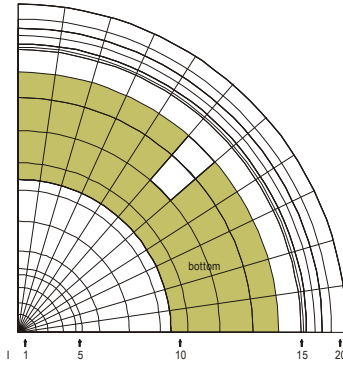


J=6

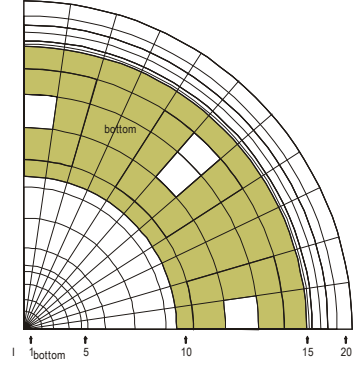
그림 3 해석모델 수직단면



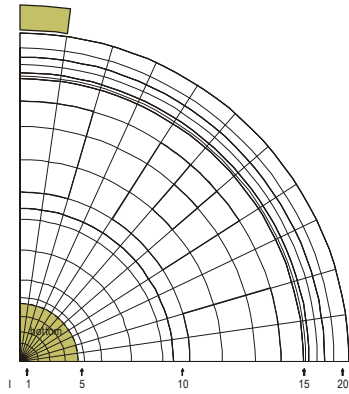
K=3



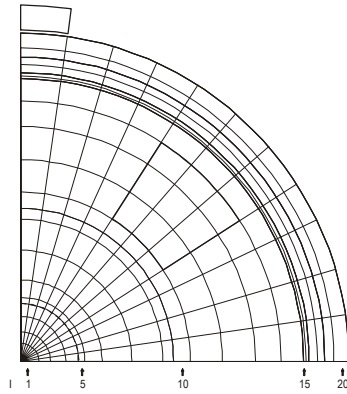
K=11



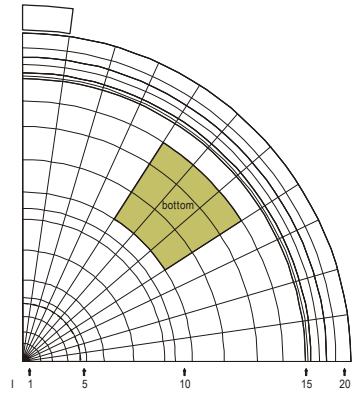
K=13



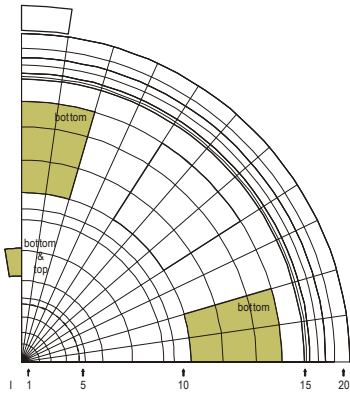
K=14



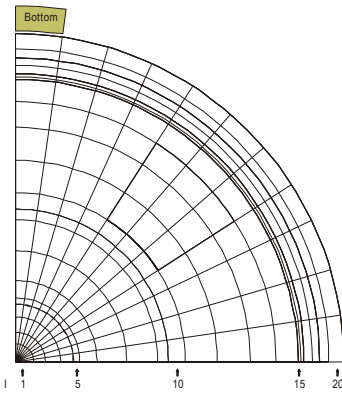
K=30



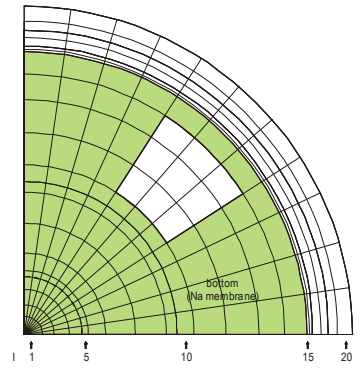
K=31



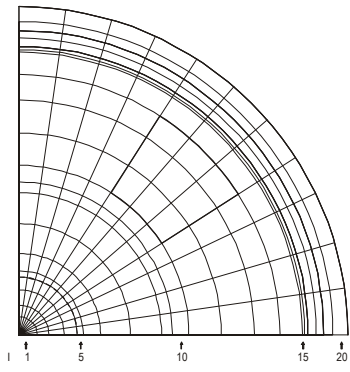
K=34



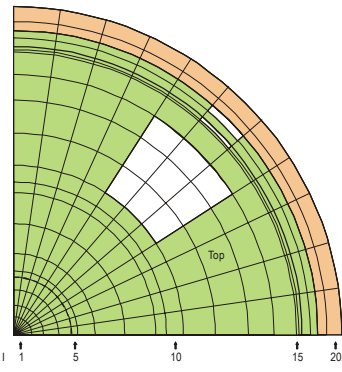
K=35



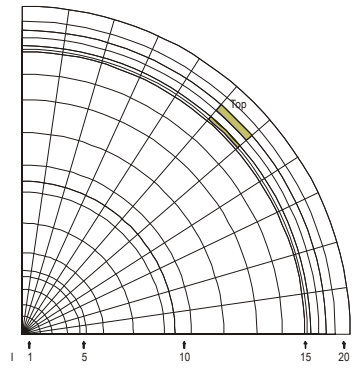
K=39



K=43



K=46



K=47

그림 4 해석모델 수평단면

2.2 결과

COMMIX-1AR/P 전산코드를 이용하여 KALIMER의 정상상태 시 유속 및 온도분포를 계산하였다. 정상상태 시 열균형을 맞추기 위하여 노심내 출력을 392.2MWth으로 고정하였다. 또한 노심내 유량을 설계값인 2,143kg/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 386.2°C이며 계산된 값은 386.3°C이다. 그러나 노심 출구온도의 설계값은 530.0°C인 반면 계산된 값은 531.7°C로서 다소 높게 예측되지만 계산된 값은 격자 I=1~8, K=12에서의 평균온도이므로 실제 노심 출구온도보다 높을 수 있다. 또한 노심내 유량 및 열출력을 설계자료로 맞추었으므로 계산된 값은 신뢰성을 갖는다.

표 2에 중간열교환기 1차측 입·출구 온도는 설계값보다 약 4°C 낮게 예측되는 것처럼 보인다. 하지만 계산시 격자 I=12, J=1, K=12에서의 온도는 거의 저온 풀의 온도에 근접된 온도이며, 실제 중간열교환기의 2차측 열전달이 이루어지는 가장 낮은 위치의 격자인 K=15, 16에서의 온도는 각각 380.7°C와 394.5°C로서 중간열교환기 내에서의 열균형은 설계값을 따른다고 할 수 있다. 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 529°C에 근접함을 알 수 있으며, IHX의 1차측 출구온도는 약 385°C에 근접함을 알 수 있다. 저온 풀의 온도는 380.7°C로서 균일하며 전자펌프에서 발생하는 열량으로 노심 입구온도는 386.3°C로 증가된다. 또한 PSDRS에서의 공기 입·출구 온도는 각각 40.0°C, 102.1°C로서 이를 통해 유출되는 열량은 $4 \times 0.274\text{MW}$ 이다. 이는 노심에서 생산되는 총 출력의 0.28%에 해당된다. 그림 8에 수직면 재순환 영역을 도시하였다. 수직면에서 J=1은 IHX를 포함하는 단면이며 J=3은 IHX와 펌프 중간 그리고 J=6은 펌프를 포함하는 수직단면이다.

표 1 정상상태 시 그룹별 노심 유량 분포

	Design Data, kg/sec	Calculation, kg/sec	증감
inner blanket	56	57	1.3%
inner driver fuel	420	422	0.5%
outer blanket	184	184	0.2%
outer driver fuel	1,230	1,236	0.5%
radial blanket	215	215	0.2%
reflector and shield	38	42	9.6%
Total	2,143	2,156	0.6%

표 2 정상상태 시 냉각재 온도 분포

	Design Data, °C	Calculation, °C
Core inlet	386.2	386.3 ¹⁾
Core outlet	530.0	531.7 ²⁾
IHX primary side inlet	529.8	526.0 ³⁾
IHX primary side outlet	385.0	380.7 ⁴⁾

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

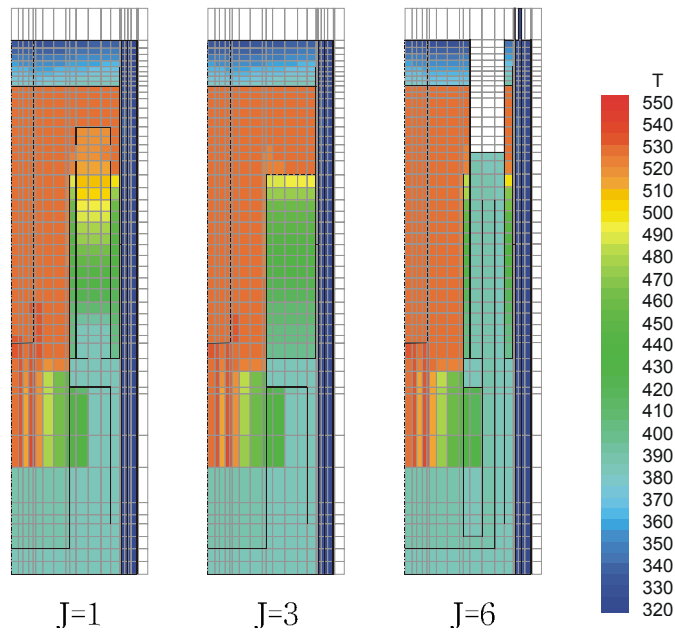


그림 5 정상상태 수직면 온도분포

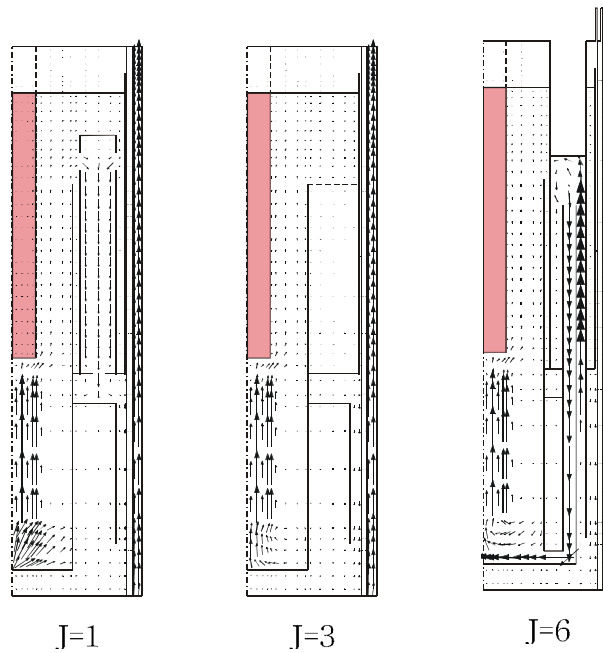


그림 6 정상상태 수직면 유속분포

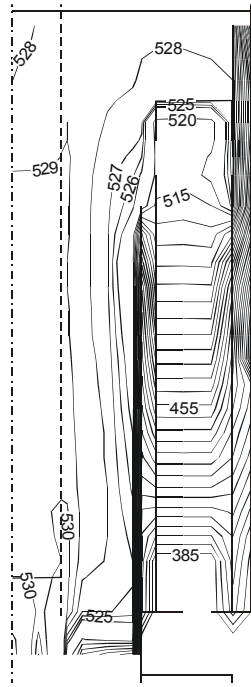


그림 7 정상상태 시 고온 풀 및 IHX 내부 온도분포

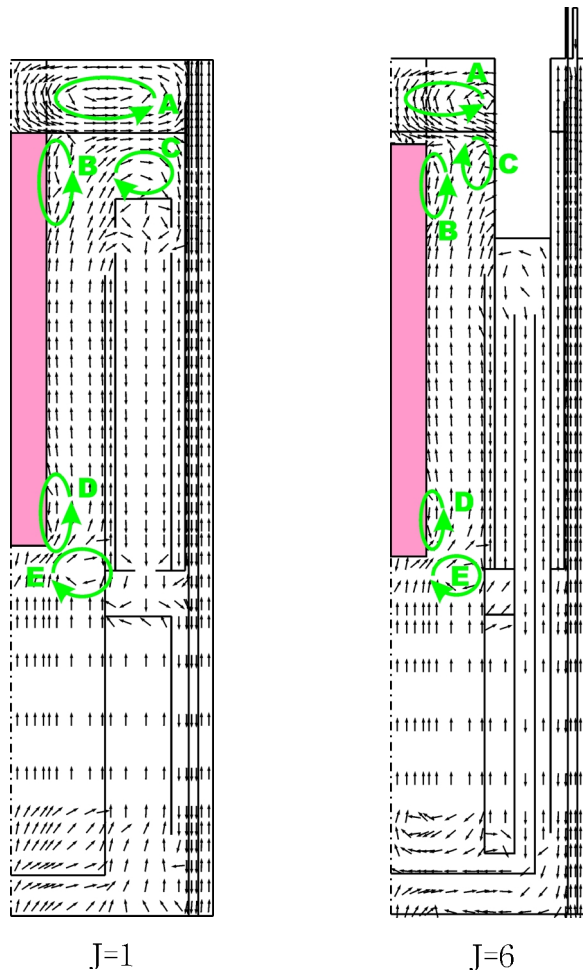


그림 8 재순환 영역

3. 사고해석

3.1 UTOP

비보호 과출력 사고(UTOP: Unprotected Transient OverPower)는 노심내에 부적절한 양의 반응도가 삽입될 때 원자로 정지가 이루어지지 않은 경우의 사고이다. 극한 사고의 가정은 모든 제어봉이 빠져 나오는 사고를 들 수 있다. 사고는 원자로가 정격 출력 운전 하에서 제어봉이 초당 반응도가 2센트의 속도로 빠져나오는 경우를 가정하였으며 제어봉은 반응도가 30센트일 때 정지한다고 가정하였다.

SSC-K를 이용하여 비보호 과출력 사고시 출력 및 유량 변화, 고온 풀의 온도, 반응도 계수 등의 변수를 분석하였으며[6], SSC-K에서 계산된 출력을 COMMIX-1AR/P 입력으로 원자로 전체의 온도 및 유속 분포를 계산하였다. COMMIX-1AR/P를 이용하여 계산된 고온 풀의 입·출구 온도를 그림 9에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 고온 풀의 입구온도는 SSC-K의 결과와 일치하며 출구온도는 약10여초 이른 시각에 온도상승이 이루어진다. 이는 고온 풀 내의 소듐 냉각재량, 열적 구조물 등의 상이함으로 인해 야기 되는 것으로 분석되며 사고초기, 즉 100초 이내에서는 SSC-K 결과와 COMMIX-1AR/P의 결과는 일치하는 것으로 판단된다.

사고 중·후기에서의 계산결과는 COMMIX-1AR/P의 경우에서가 약간 낮아지는 경향을 볼 수 있는데 이는 고온 풀내의 소듐 냉각재 양, 열적 구조물 등의 상이함뿐만 아니라 저온 풀내의 소듐 냉각재 양, 열적 구조물의 상이함 그리고 노심유량의 상이함 등으로 인한 것이다. 이와 같은 이유로 그림 10에서 보는 바와 같이 COMMIX-1AR/P의 경우 저온 풀의 온도가 SSC-K의 경우 보다 낮게 예측되며, 이러한 효과가 다시 feedback 되어 사고 중·후기에서 두 계산 결과가 차이 나게 된다. 따라서 사고 중·후기에서의 두 계산결과의 상이함은 그리 큰 의미를 갖지 못한다. 결론적으로 2차원 고온 풀 모델을 사용하는 SSC-K의 계산능력은 현상학적으로 타당한 것으로 판단된다. 그림 11에 고온 풀 및 중간 열교환기에서의 상세 온도 등고선을 도시하였다. 그림 12, 13에는 J=1 및 J=6 평면에서의 속도분포를 도시하였으며 UTOP시 속도 분포는 정상상태 시 속도분포와 크게 상이하지 않음을 알 수 있다.

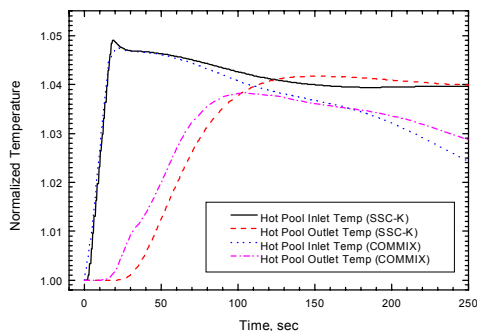


그림 9 UTOP 시 고온 풀의 입구 및 출구온도

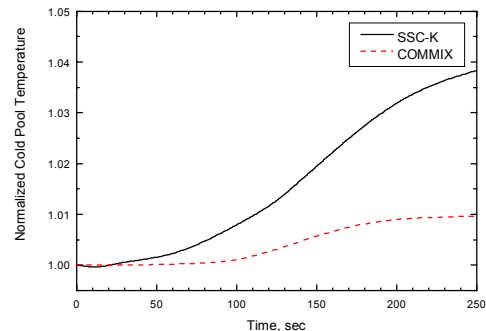
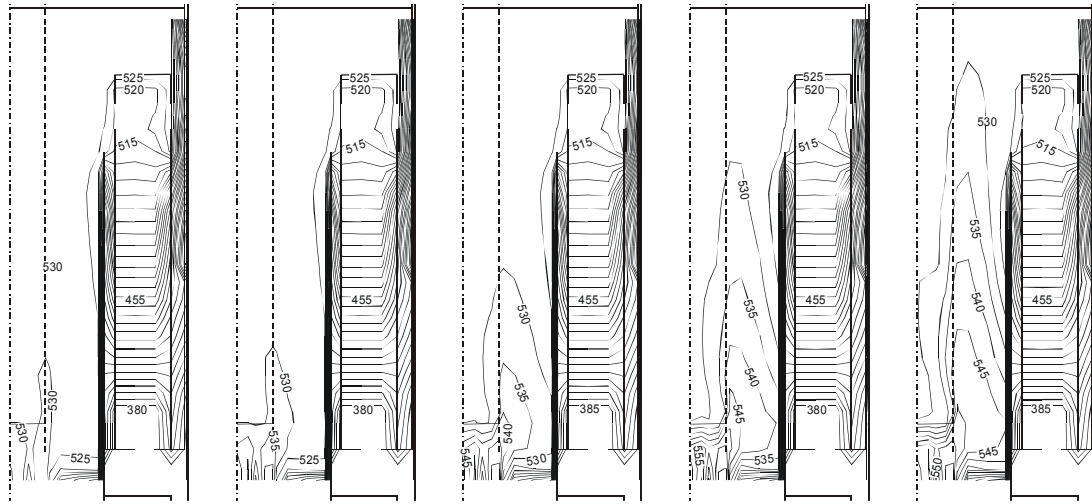


그림 10 UTOP 시 저온 풀 온도



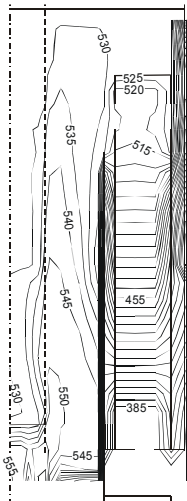
0.0 초

5.0 초

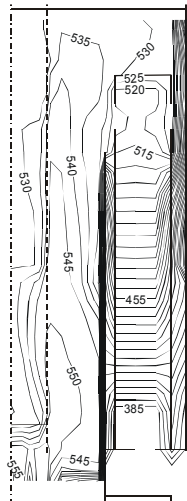
10.0 초

15.0 초

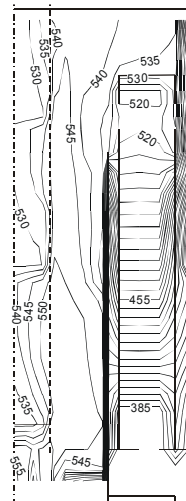
20.0 초



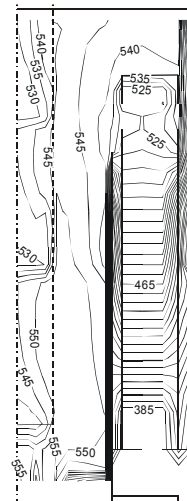
25.0 초



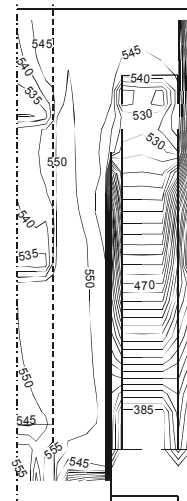
30.0 초



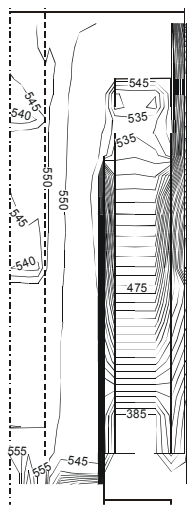
40.0 초



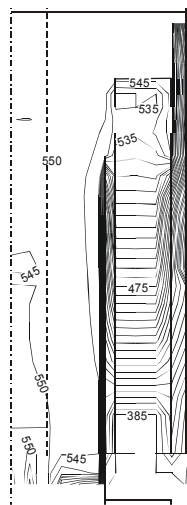
50.0 초



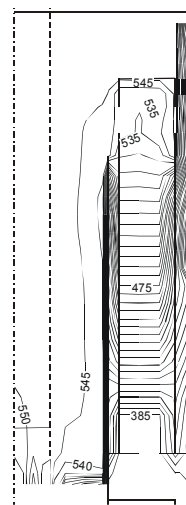
70.0 초



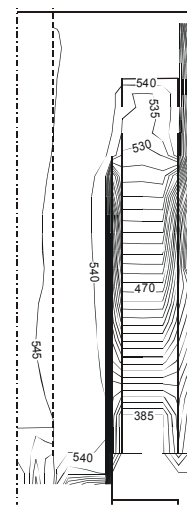
100.0 초



150.0 초



200.0 초



250.0 초

그림 11 UTOP 시 J=1 평면에서의 상세온도분포

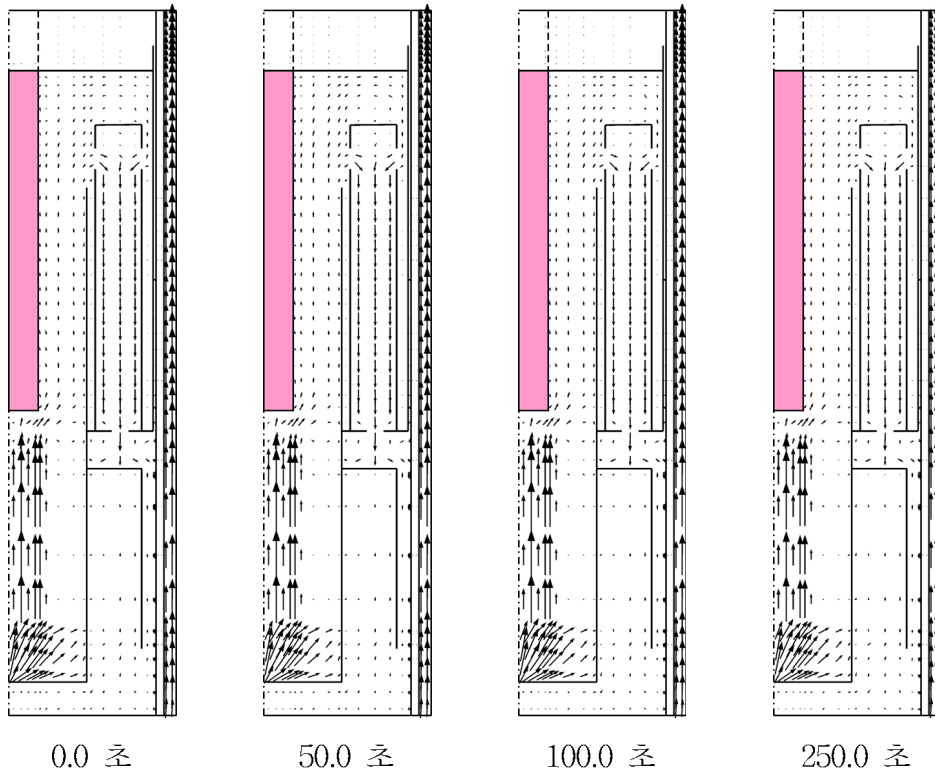


그림 12 UTOP 시 J=1 평면에서의 속도분포

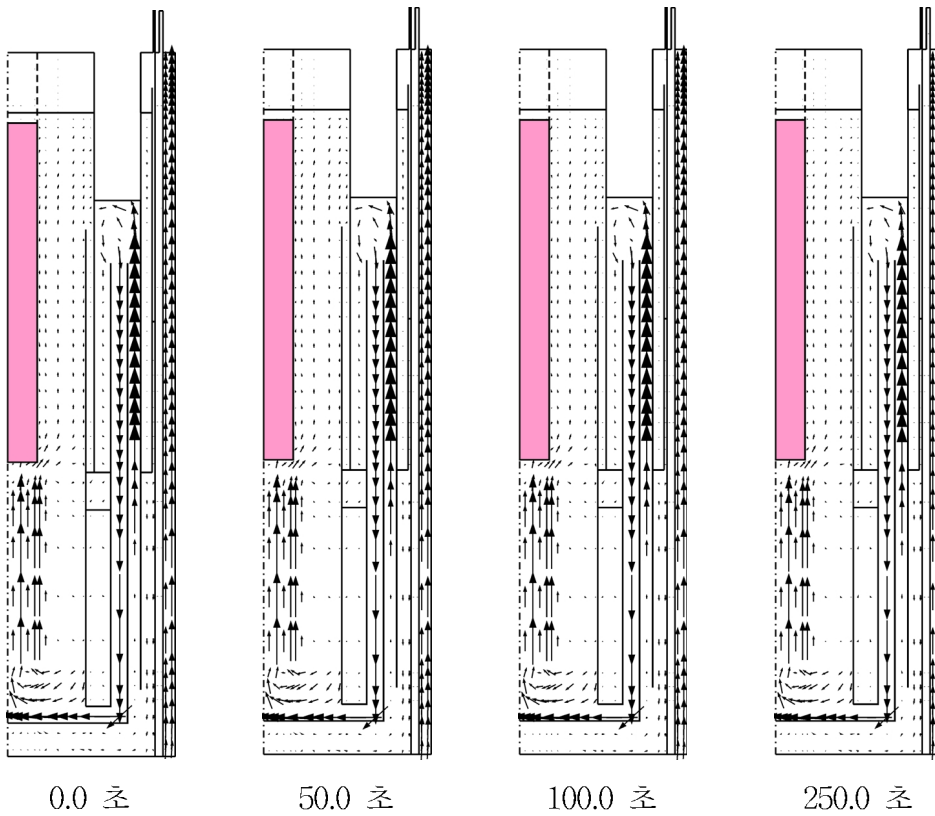


그림 13 UTOP 시 J=6 평면에서의 속도분포

4. 결 론

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 논문에서는 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 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.

정상상태 시 열균형을 맞추기 위하여 노심내 출력을 392.2MWth으로 고정하였으며 노심내 유량을 설계값인 2,143kg/sec으로 맞추었다. 비보호 과출력 사고시 SSC-K에서 계산된 출력을 COMMIX-1AR/P 입력으로 원자로 전체의 온도 및 유속 분포를 계산하였다. 사고 시 고온 풀의 입구온도는 SSC-K의 결과와 일치하며 출구온도는 약10여초 이 큰 시각에 온도상승이 이루어진다. 하지만 이는 고온 풀내의 소듐 냉각재양, 열적 구조물 등의 상이함으로 야기되는 것으로 분석되며 사고초기, 즉 100초 이내에서는 SSC-K 결과와 COMMIX-1AR/P의 결과는 일치하는 것으로 판단된다. 따라서 HP2D 2차원 모델을 사용하는 SSC-K는 UTOP 시 현상학적으로 이를 모사한다고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기과제 중 “액체금속로 안전해석 기술개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] Y.B. Lee et al., Development of Two-Dimensional Hot Pool Model, KAERI/TR-1566/2000 (2000).
- [2] Y.B. Lee et al., Development of Two-Dimensional Hot Pool Model and Analysis of the ULOHS Accident in KALIMER Design, KAERI/TR-1653/2000 (2000).
- [3] Y.B. Lee et al., Development of Two-Dimensional Model for the Thermohydraulic Analysis of Hot Pool in Liquid Metal Reactors, Annals of Nuclear Energy, Vol.29, Issue 1, pp.21-40 (2002).
- [4] Y.B. Lee et al., Development of the Two-Dimensional Hot Pool Model for Pool-Type Liquid Metal Reactors, Proceedings of the Korean Nuclear Society

Spring Meeting, Kori, Korea, May 2000 (2000).

- [5] Y.B. Lee et al., Analysis of Thermohydraulic Phenomena in the Hot Pool of KALIMER Design, Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Taejon, Korea, October 2000 (2000).
- [6] Y.B. Lee et al., A Code-to-Code Comparison Analysis for the Hot Pool Model between HP2D and CFX, KAERI/TR-1974/2001 (2001).
- [7] P.L. Garner, et al., COMMIX-1AR/P: A Three-Dimensional Transient Single-Phase Computer Program for Thermal Hydraulic Analysis of Single and Multicomponent Systems, ANL-92/33 (1992).
- [8] Dohee Hahn, et al., KALIMER Conceptual Design Report, KAERI/TR-2204/ 2002 (2002).
- [9] Y.B. Lee et al., 3-Dimensional Thermohydraulic Analysis of KALIMER Reactor Pool during Unprotected Accidents, KAERI/TR-2364/2003 (2003).