

2차원 고온 풀 열유체 해석모델에 대한 코드간 비교분석

A Code-to-Code Comparison Analysis for the Hot Pool Model between HP2D and CFX

이용범, 권영민, 장원표, 정관성, 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 KALIMER에서의 정상상태 및 과도상태 시 고온 풀에서의 열유체 현상을, 상용 전산코드인 CFX와 개발된 HP2D를 비교계산 함으로써 HP2D의 계산 신뢰성 검증을 수행하였다.

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 case of steady-state and transient conditions for the KALIMER design has been performed with developed two-dimensional hot pool model and the CFX 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 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.

원자력연구소에서 개발한 액체금속로용 과도안전해석 전산코드인 SSC-K[1]의 사고해석 능력을 향상시키기 위하여, 2차원 고온 풀 모델인 'HP2D'[2]를 개발하여 고온 풀에서의 열유체 현상을 현실적으로 파악할 수 있도록 하였다. 또한 고온 풀 소듐 냉각재의 수위 변동을 모사 할 수 있도록 하였고, 이에 따른 고온 풀에서의 저온 풀로의 Overflow

역시 모사 할 수 있도록 하였으며 개발된 모델을 검증하기 위하여 MONJU에서 수행된 실험 결과와의 비교 및 분석이 수행되었다[3,4].

본 논문에서는 KALIMER[5] 액체금속로에서의 정상상태 및 과도상태 시 고온 풀에서의 열유체 현상을 SSC-K 전산코드를 사용하여 분석하였으며, 이때 고온 풀에서의 열유동 현상 분석 능력을 HP2D와 기존 상용 전산코드인 CFX 사이에서 비교·평가함으로써 HP2D의 신뢰성을 검증하였다.

2. HP2D와 CFX의 비교계산

2.1 HP2D 및 CFX 전산 프로그램 개요

2.1.1 HP2D

액체금속로에서의 안전해석을 위해 개발된 계통코드인 SSC-K에 1차원 풀 모델을 대신하여 2차원 고온 풀 모델인 HP2D를 개발하였다. HP2D 프로그램에서의 해석영역은 여러 개의 사각형 제어체적들로 나누어져 있고, 지배방정식은 유한체적법을 사용하여 이산화하였다. 대류항들은 고차유계 해법인 HLLPA를 사용하여 근사화 하였고 비정상항은 후향차분기법을 사용하여 처리하였다. 또한 압력과 속도의 연계방식으로 Van Doormal과 Raithby가 개발한 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 경계조건 처리로 입구에서는 두 속도성분, 난류 운동에너지 및 난류 운동에너지 소산율을 입구조건으로 주었다. 출구에서는 구배가 없는 조건을 사용하였고, 속도성분들은 연속방정식을 만족하도록 각 계산 단계에서 보정하였다. 대칭선에서는 대칭조건을 적용하였다. 벽면 계산점에서 두 속도를 0으로 두었다. 벽면 근처의 제어체적면에서의 속도성분들은 벽면 전단응력을 벽에 평행하는 속도성분의 함수로 표시하였으며 벽면에 인접한 계산 지점에서는 벽함수법(wall function method)을 사용하였다. 좀더 상세한 HP2D 개발 이론 및 적용은 참고문헌에 상세히 기술되어 있다[2-4].

2.1.1 CFX

영국 AEA Technology에서 개발한 CFX 전산코드는 복잡한 형상 주위의 층류 및 난류 유동과 열전달 문제를 해석하기 위해 개발된 범용 프로그램이다. 비직교 물체 고정격자(Non orthogonal Body Fitted Grid)를 사용하여 일반적인 압축성 층류 및 난류 유동장 해석이 가능하다. 유동장 해석능력의 중요한 인자가 되는 난류 모델로는 $k-\epsilon$ 모델을 비롯하여 Algebraic Stress 모델과 미분 레이놀즈 스트레스 모델 등을 사용자가 정의하여 이용할 수 있다. 확산효과를 줄이기 위한 다양한 차분기법이 제공되며, 이차원 Adaptive Gridding 기법을 사용하여 보다 정확한 해석을 이룰 수 있다. CFX는 공학문제 해석에 폭넓게 적용 될 수 있는데, 자동차 외형 모델 및 엔진 유동해석, 생체내 유동, 건물내부의 화염전파와 같은 환경문제, 화학공정, 항공기 날개 주위의 유동장 해석, 원자력 발전소의 열유체 해석 등이 주요 연구분야이다.

코드가 다루는 기본유체는 뉴턴유체(Newton fluid)이며, 사용자 정의 방식으로 단순한 비 뉴턴유체에도 적용될 수 있다. 부력 및 누출-흡입영역, 다상유동에 광범위하게 적용

될 수 있으며, 화재해석을 위한 연소모델을 정의할 수 있다. 고체면 근처 유동장 경계조건으로 로그법칙이 사용되고, 복사열전달은 엔탈피 방정식의 생성항을 고려하여 해석할 수 있다. Non staggered 격자상에서 속도-압력 관계식을 유한체적법으로 차분화하여 SIMPLE, SIMPLEC, PISO 알고리즘을 적용한다. 시간중속항은 내연후방차분법(Fully Implicit Backward Differencing)과 시간중심 크랭크-니콜슨법(Time centered Crank Nicolson Method)으로 차분화 된다. 대류항 차분은 혼합차분(Hybrid Differencing)이 표준이고 선택 가능한 방법으로 Upwind, Central, QUICK 차분을 들 수 있다.

2.2 정상상태 비교계산

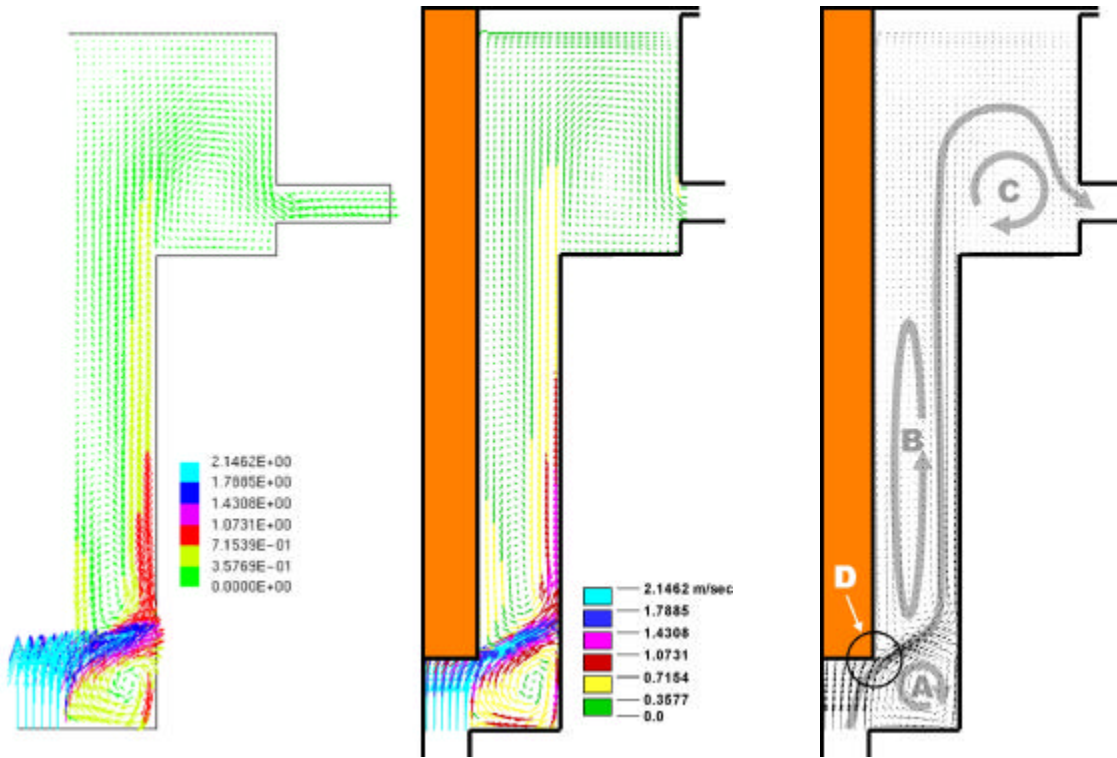
정상상태 계산 시 HP2D에 사용된 계산격자 수는 101×34 이며 CFX에 사용된 계산격자 수는 91×33 이다. 고온 풀 입구에서의 소듐 냉각재 온도는 530°C 이고 평균 유속은 2.146m/sec 이다. 그림 1에 정상상태시 고온 풀 내의 유속 분포도를 각각 도시하였으며 CFX와 HP2D가 예측하는 유속분포도는 일치하는 것으로 나타났다. 최대 유속인 $1.789 \leq V \leq 2.146\text{m/sec}$ 의 유속을 갖는 곳은 두 코드 모두 노심 출구에서 UIS 하단부 사이이며, $1.431 \leq V \leq 1.789\text{m/sec}$ 의 유속을 갖는 곳은 주 유로가 형성되는 UIS 하단부 주위에서이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 주 유로는 노심 상단에서 시작하여 UIS 하단 우측, 그리고 저온 풀 경계면을 따라 상승한 뒤 고온 풀 상단에서 소용돌이를 형성한 후 중간열교환기로 유입된다. 유속은 주 유로를 따라 점차 감소되어 고온 풀 상단에서의 유속은 0.3577m/sec 이하가 된다.

그림 2에 주 유로와 고온 풀 내 형성되는 소용돌이를 도시하였다. 형성되는 주 소용돌이는 노심 상단인 A지점, 고온 풀 중간 지점인 B지점 그리고 고온 풀 상부이며 중간열교환기 입구 부근인 C지점에서 나타난다. 소용돌이가 관찰되는 B지점을 상세히 보면 UIS 벽면 중단쯤에서 상부 벽면으로는 윗쪽으로 하부 벽면으로는 아래쪽으로 유로가 형성됨을 알 수 있다. 따라서 UIS 하단부 바깥 벽면 부근인 D지점에서는 서로 방향이 반대인 유체가 만나게 된다. 그림 1에서 본 바와 같이 정상상태를 계산한 두 코드, 즉 CFX와 HP2D가 예측하는 유속분포는 일치함을 볼 수 있어 정상상태 계산 시 HP2D의 계산능력을 신뢰할 수 있다.

2.2.3 과도상태 비교계산

과도상태 계산시 HP2D와 CFX에 사용된 계산격자 수는 정상상태 계산시와 마찬가지로 각각 101×34 와 91×33 이다. 과도상태 비교계산을 위하여 비보호 과출력사고(UTOP: Unprotected Transient OverPower)를 선정하였다.

비보호 과출력 사고는 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 운전하에서 제어봉이 초당 반응도가 2센트의 속도로 빠져나오는 경우를 가정하였으며 제어봉은 반응도가 30센트일 때 정지한다고 가정하였다.



(a) CFX

(b) HP2D

그림 1 정상상태시 유속 분포도

그림 2 고온 풀 내 유로 및 소용돌이

HP2D가 연계된 SSC-K를 이용하여 비보호 과출력 사고시 출력 및 유량 변화, 고온 풀의 온도, 반응도계수 그리고 소듐 준위를 그림 3~6에 도시하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 사고 15초 후 최대출력인 121% 출력에 도달하였으며 이후 부반응도 궤환효과에 의해 서서히 감소하여 102% 출력으로 안정화된다. 고온 풀 입구의 온도는 그림 4에서 보는 바와 같이 530°C에서 급격히 증가하여 19초 시 최대 온도 556.4°C에 도달한 후 서서히 감소하여 550.6°C에서 안정화되며 고온 풀 출구의 온도는 약 25초간 변화가 없으며 이후에 급격히 증가하여 약 152초경 최대치 552.5°C에 이르고 이후 서서히 감소하여 550.5°C에서 안정화된다.

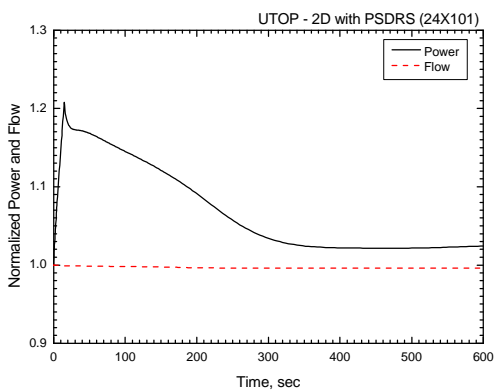


그림 3 UTOP시 출력 및 유량

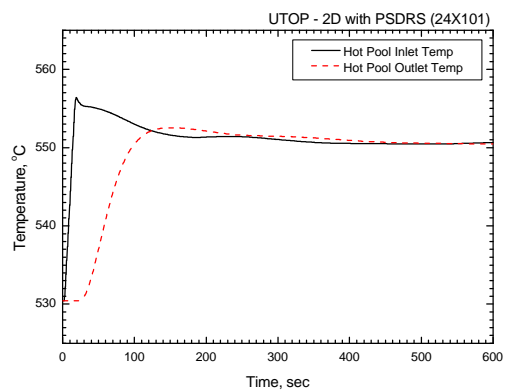


그림 4 UTOP시 고온 풀 입구 및 출구온도

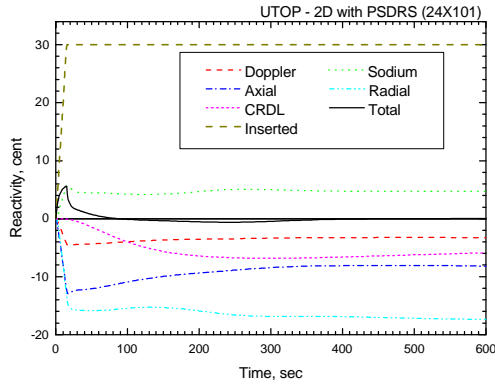


그림 5 UTOP시 반응도 계수

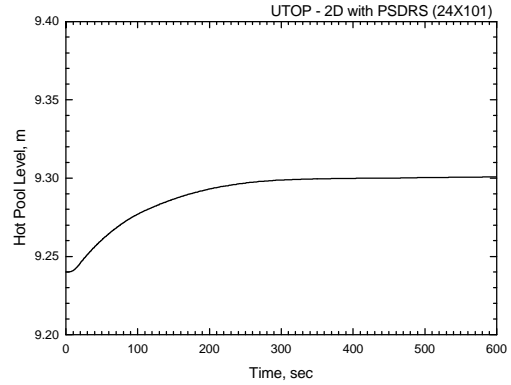


그림 6 UTOP시 고온 풀 소듐 준위

그림 7에 HP2D와 CFX가 예측한 소듐 냉각재의 고온 풀 출구 온도를 도시하였다. CFX의 경우 HP2D 보다 급격한 온도 증가 시각이 약 10여초 약간 뒤늦게 나타났으며 이로 인하여 40초~120초 사이에서는 CFX의 예측결과가 HP2D 보다 약 1~2°C 낮게 예측되었다. 그러나 120초 이후는 두 코드의 계산 값 차이는 0.5°C 이내로 일치함을 볼 수 있다. 이는 CFX 전산코드의 입력으로 사용되는 고온 풀 입구에서의 나트륨 냉각재 온도를 SSC-K에서의 계산결과를 이용하여 curve fitting하여 사용할 때 발생한 오차에 기인한 것으로 보인다. 전체적으로 HP2D 예측값과 CFX의 예측값 비의 평균은 1.0005이며 표준편차는 0.11% 이내로 일치함을 볼 수 있어 HP2D의 계산 결과에 신뢰성을 부여할 수 있다.

그림 8에는 두 전산코드가 예측한 고온 풀 내에서의 나트륨 냉각재 온도 분포를 시간에 따라 도시하였다. 그림 7을 통하여 알 수 있었듯이 약 25초까지는 고온 풀 입구에서의 온도 증가가 고온 풀 출구에서의 소듐 냉각재의 온도에 영향을 주지 못한다. 이후 고온 풀 출구에서의 냉각재 온도는 급격히 증가하여 약 152초에서 최대치 552.5°C에 이르고 이후 서서히 감소하여 550.5°C에서 안정화된다. 사고 초 고온 풀 내의 소듐은 530°C로 균질화 되어 있으며 0~20초 사이에 온도가 556°C 까지 급격히 상승한 소듐이 고온 풀 내로 유입되어 고온 풀 내의 평균 온도는 급격히 상승함을 그림에서 볼 수 있다. 그 이후 유입되는 소듐의 온도는 약 554°C 정도로 일정하며, 유입되는 소듐에 의한 고온 풀 내에서의 온도장 변화를 그림에서 볼 수 있다. 사고 후 200초 이후에는 고온 풀 내 소듐의 온도는 또다시 균질화 되며 600초 후에는 약 550°C로 균질화 됨을 알 수 있다. 가정된 UTOP시 유속의 변화는 0.4% 이내이므로 HP2D와 CFX 간 고온 풀 내에서의 유속 분포 비교분석은 생략하였다.

그림 9에 HP2D로 계산한 고온 풀 상단 및 하단에서의 온도 등고선을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 상단 및 하단에 온도 구배가 급격한 곳이 보이며, 하단부에서는 사고 후 20초를 전후하여 발생되며 상단부에서는 30~100초 사이에 발생된다. 이는 하단부의 경우 급격한 온도 상승이 있는 소듐의 유입으로 기인한 것이며, 상단의 경우 0~20초 사이에 입구에서 유입된 소듐이 상단으로 흐르는데 필요한 시간이 경과한 후 일어나게 된다. 이러한 급격한 온도구배는 그림 10에서 보는 바와 같이 상단 및 하단에서 생기는 소용돌이 때문에 발생되며 이는 구조재 건전성과 관련하여 주요한 관심거리가 될 수 있다.

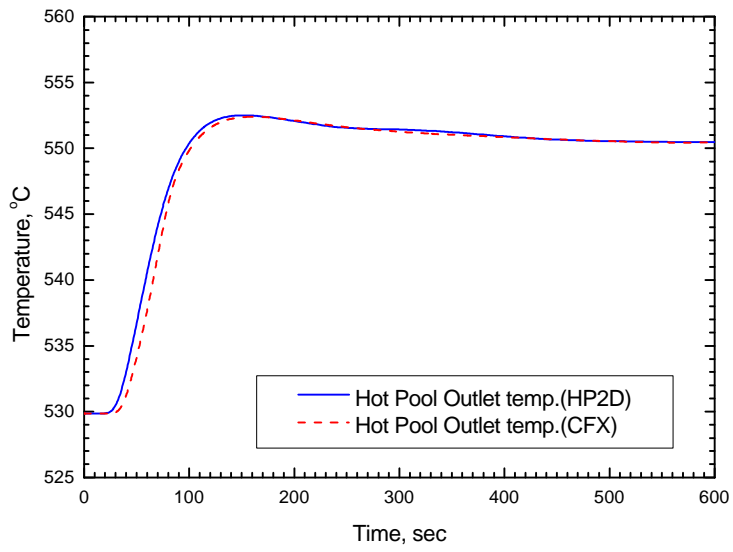


그림 7 UTOP시 HP2D 및 CFX의 고온 풀 출구온도 계산결과

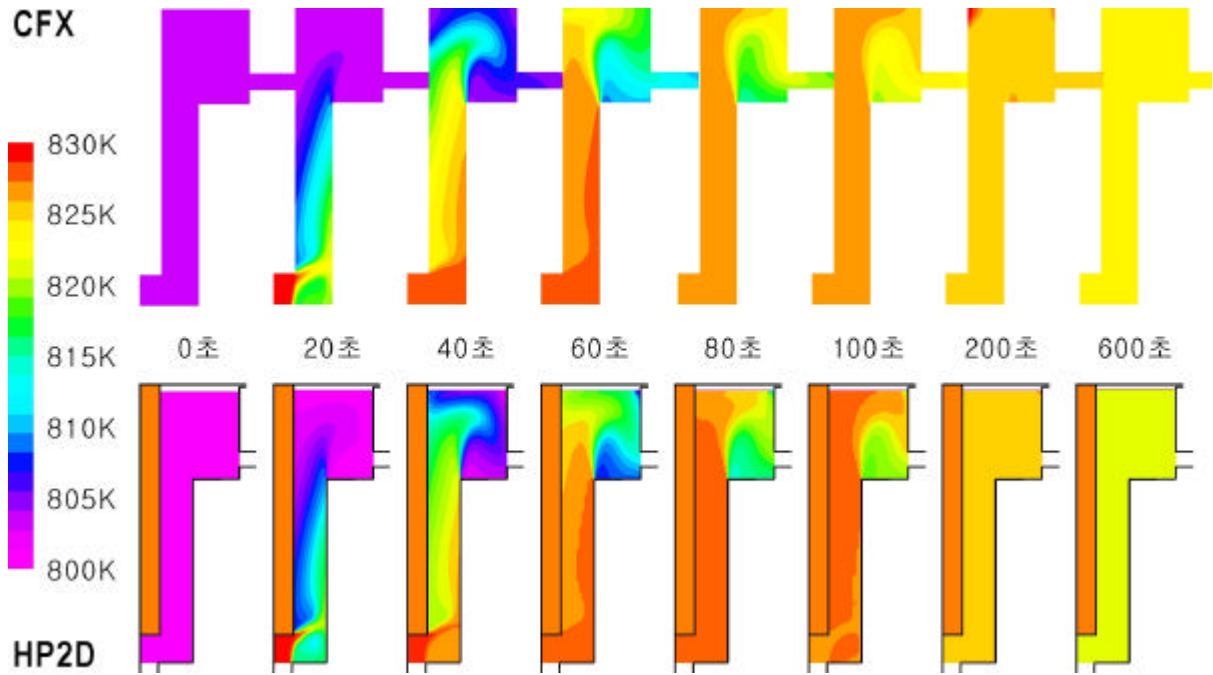
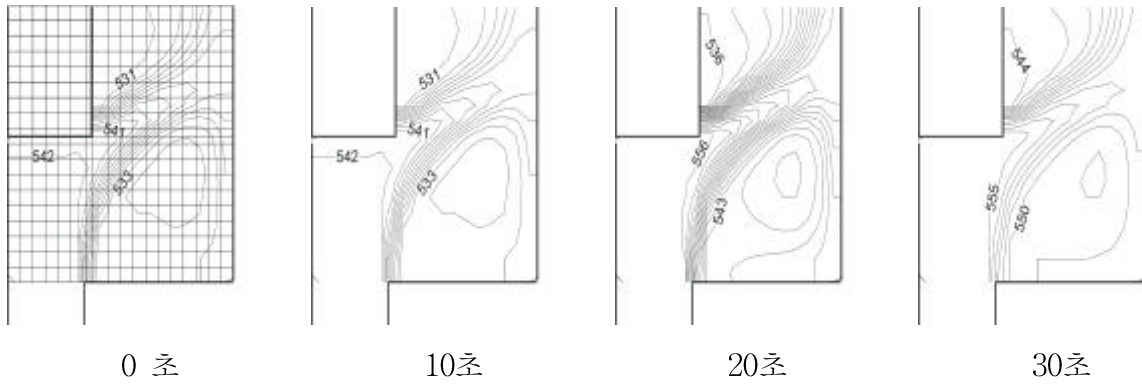
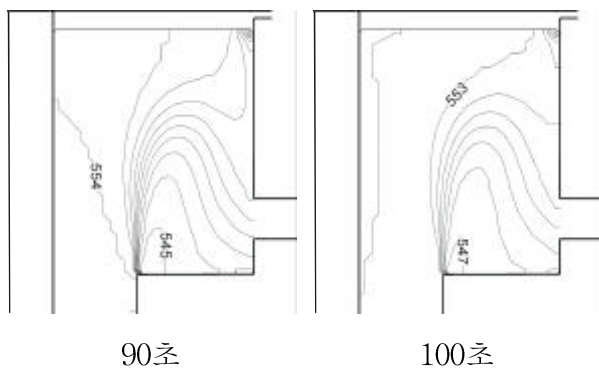
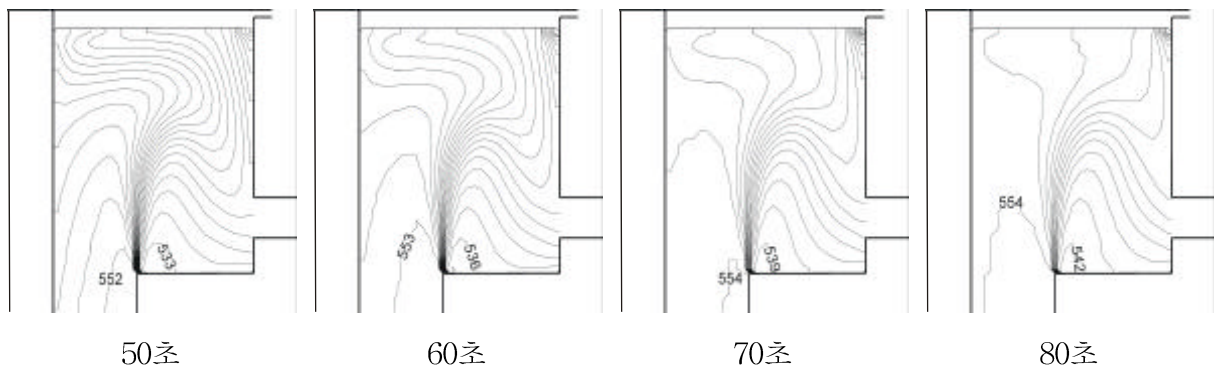
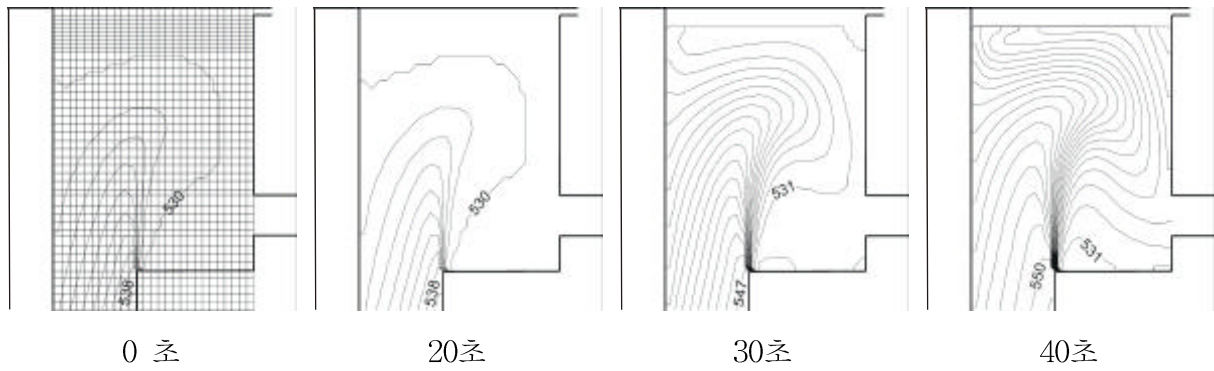


그림 8 UTOP시 고온 풀 내에서의 온도 분포 비교도

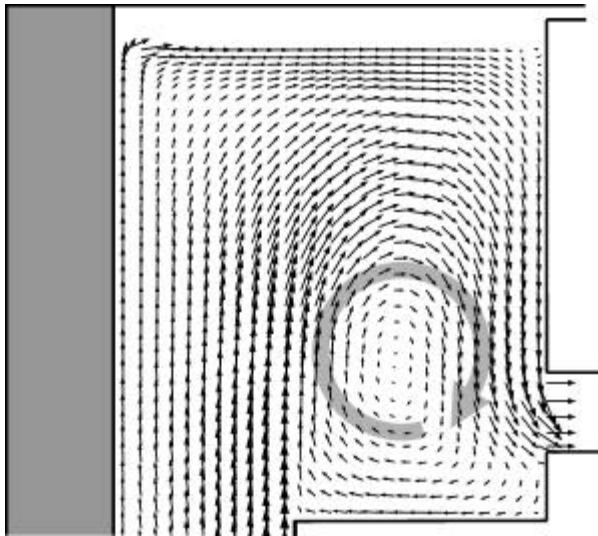


(a) 고온 풀 하단

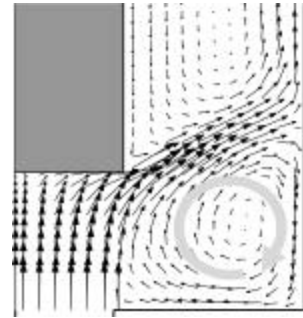


(b) 고온 풀 상단

그림 9 UTOP시 HP2D로 계산한 고온 풀 내에서의 온도 등고선



(a) 사고 60초 후 고온 풀 상단



(b) 사고 20초 후 고온 풀 하단

그림 10 UTOP시 HP2D로 계산한 고온 풀 상단 및 하단에서의 소용돌이

3. 결과 및 결론

액체금속로 고온 풀의 열유체 현상을 현실적으로 파악하기 위하여 개발된 ‘HP2D’ 2차원 고온 풀 모델을 SSC-K에 적용하여 KALIMER 액체금속로에서의 정상상태 및 과도상태 시 고온 풀에서의 열유체 현상을 분석하였으며, 이때 고온 풀에서의 열유동 현상 분석 능력을 HP2D와 기존 상용 전산코드인 CFX 사이에서 비교·평가함으로써 HP2D의 신뢰성을 검증하였다.

정상상태 계산 시 CFX와 HP2D가 예측하는 유속분포도는 일치하는 것으로 나타났으며 최대 유속인 $1.789 \leq V \leq 2.146 \text{m/sec}$ 의 유속을 갖는 곳은 두 코드의 경우 모두 노심 출구에서 UIS 하단부 사이이며, $1.431 \leq V \leq 1.789 \text{m/sec}$ 의 유속을 갖는 곳은 주 유로가 형성되는 UIS 하단부 주위에서이다. 또한 주 유로는 노심 상단에서 시작하여 UIS 하단 우측, 그리고 저온 풀 경계면을 따라 상승한 뒤 고온 풀 상단에서 소용돌이를 형성한 후 중간열교환기로 유입된다. 유속은 주 유로를 따라 점차 감소되어 고온 풀 상단에서의 유속은 0.3577m/sec 이하가 된다. 고온 풀 내에서 형성되는 소용돌이 또한 같은 위치에서 나타난다.

비보호 과출력사고를 가정하여 비교한 과도상태 시 HP2D와 CFX가 예측한 소듐 냉각재의 고온 풀 출구 온도 비의 평균은 1.0005이며 표준편차는 0.11% 이내로 일치함을 볼 수 있어 HP2D의 계산 결과에 신뢰성을 부여할 수 있다. 과도상태시 보여주는 고온 풀 내의 온도 분포 또한 두 코드 결과가 일치함을 볼 수 있다.

고온 풀 내에서의 나트륨 냉각재 온도 분포는 약 25초까지 고온 풀 입구에서의 온도 증가가 고온 풀 출구에서의 소듐 냉각재의 온도에 영향을 주지 못한다. 이후 고온 풀 출구에서의 냉각재 온도는 급격히 증가하여 약 152초에서 최대치 552.5°C 에 이르고 이후 서서히 감소하여 550.5°C 에서 안정화된다. 사고 초 고온 풀 내의 소듐은 530°C 로 균질화되어 있으며 0~20초 사이에 온도가 556°C 까지 급격히 상승한 소듐이 고온 풀 내로 유

입되어 고온 풀 내의 평균 온도는 급격히 상승함을 알 수 있다. 그 이후 유입되는 소듐의 온도는 약 554℃ 정도로 일정하다. 가정한 UTOP시 유속의 변화는 0.4% 이내이므로 HP2D와 CFX 간 고온 풀 내에서의 유속 분포 비교분석은 생략하였다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] Y.M. Kwon, et al., Development of a System Analysis Code, SSC-K, for Inherent Safety Evaluation of the Korea Advanced Liquid Metal Reactor, Journal of the KNS, Vol. 33, No. 2, pp.209-224 (2001).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [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] Dohee Hahn, et al., KALIMER Preliminary Conceptual Design Report, KAERI/TR-1636/2000, (2000).