2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 고온풀 자유액면 거동 해석 방법론 개발

Development of free surface motions in the hoot pool free surface of liquid metal reactors

김성오*, 심윤섭, 김의광

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 고온풀의 자유액면에서 중간열교환기를 통하여 전자기 펌프 및 노심으로 커버가스가 유입되는 현상을 방지하기 위하여 범용 전산해석 코드인 CFX4코드에 일차정도 VOF 자유액면 해석 모델을 적용하여 고온풀 자유액면 유동 현상에 대한 해석 방법론을 설정하였다. 설정된 해석 방법론을 KALIMER 원자로 자유액면 실험장치에 적용하여 해석한 결과를 실험자료와 비교한 결과 자유액면 유동 현상의 중요한 특성인 자유액면 구배가 거의 일치하였다. 설정된 해석 방법론을 이용하여 KALIMER 원자로 정격 출력 운전조건에 대한 해석을 수행한 결과 현재 설계된 KALIMER 고온풀 액위는 충분한 높이로 설정되어서 원자로 고온풀 자유액면에서 난류 Shear flow에 의한 가스 흡입 현상의 직접적인 원인이 되는 수력점프 및 Water fall과 같은 현상이 발생하지 않았다.

Abstract

An analysis methodology was developed for free surface motions between liquid metal coolant and cover gas in order to calculate the phenomena of gas entrainment in hot pool surface through IHX EMP and reactor core. The methodology was setup by applying the first order VOF convection model to CFX4 general purpose fluid dynamics analysis code. The methodology was confirmed by applying it to an experimental apparatus designed for free surface motions of KALIMR reactor. The distributions of free surface calculated by the present methodology were almost coincident with the experimental data. The developed methodology was applied to KALIMER reactor of full power operating condition. The shapes of free surface were nearly uniform. From the results, it was found that the altitude of the free surface from the IHX inlet nozzle of KALIMER reactor is enough high not to affect to free surface motions of generating gas bubbles from the turbulent shear flows such as hydraulic jump and water falls.

1. 연구목적

액체금속로형 원자로는 대부분의 경우 냉각재의 팽창에 의한 원자로 내부 압력 변화를 완화시

키기 위하여 기존 경수로와 다르게 원자로 상부에 커버가스를 충진시키는 방법을 사용한다. 이로 인해 액체 냉각재와 기체 커버가스 사이의 경계면인 자유액면이 존재하게 되므로 자유액면이 불안정해질 경우 액체금속 순환펌프 및 원자로 노심에 기체인 커버가스가 흡입되는 현상과 자유액면의 요동에 의한 구조물의 피로현상이 존재할 가능성이 있다. 중간 열 교환기를 통해서 흡입된 커버가스는 전자 펌프의 전류 및 전자기장에 영향을 주어 성능을 저하시키며 원자로 반응도에도 영향을 미칠 가능성이 있다.

액체금속로 고온풀 자유액면에서 기체가 흡입되는 현상은 자유액면의 와류(Vortex)에 의한 기체 흡입현상과 자유액면 표면에서 기포가 생겨 액체에 유입되는 현상이 주종을 이룬다. 와류에 의한 가스유입 현상은 자유액면 표면에서 발생하는 표면 와류에 의해 발생되고 표면 와류의 세기는 자유액면에서의 유체 유동 속도 및 방향에 의해 영향을 받는 것으로 알려졌다[1]. 또한 자유액면 표면에 발생되는 기포는 자유액면의 불연속면(Water fall) 및 표면 파동의 붕괴에 의해 발생되는 것으로 알려졌다[2].

또한 액체금속로의 자유액면은 노심을 통과하여 상승하는 냉각재의 난류특성 때문에 끊임없는 요동현상을 보이게된다. 이와 같은 요동현상은 자유액면이 접촉되는 구조물의 온도를 변화시킴으로서 구조물 건전성에 영향을 줄 가능성이 있으므로 구조물의 온도와 연계하여 분석되어야 한다.

이와 같은 현상에 대한 해석을 수행하기 위한 기본연구로서 본 연구는 액체금속로 고온풀 자유액면의 유동 특성을 분석하는 방법론을 설정하고 설정된 방법론을 이용하여 원자로 정격운전시 KALIMER 고온풀 자유액면 특성을 분석하기 위하여 수행된다.

2. 자유액면 유동 해석 방법론

2.1 이상 유체 유동 해석 방법

본 계산은 범용 전산유체 해석 코드인 CFX4[3]를 이용하여 압력,속도 등과 같은 유체 유동장을 해석하고 자유액면의 거동은 정밀 자유액면 해석 모델인 일차정도 자유액면 유동 해석 모델[4]을 사용자 프로그램으로 설정하여 계산을 수행한다.

CFX4 코드를 이용한 자유액면 유동 해석방법은 이상유동 해석 모델을 사용한다. 두 유체가 완전 혼합된 상태로 가정하는 Homogeneous 모델은 두 유체가 완전히 혼합된 것으로 가정하여 혼합유체의 질량, 운동량 및 에너지 보존식과 각 유체의 부피분율 보존식을 해석하고 혼합된 유체의 물성치(밀도, 점성계수)는 각 유체에 대한 부피분율(Volume fraction)을 이용한 가중 평균값을 사용하여 설정한다. 반면에 두 유체가 완전히 혼합되지 않은 상태로 거동하는 경우에 사용되는 IPSA(Inter Phase Slip Algorithm)모델은 각 상에 대한 별도의 질량, 운동량 및 에너지 보존량을 분리해서 계산하고 각 상 사이에서 발생하는 질량, 운동량 및 에너지 전달은 적절한 모델을 사용하여 계산하는 해석 방법을 사용하므로 일반적으로 이상유동 해석의 경우 IPSA 모델을 사용한 해석방법이 더 정확하나 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 따라서 해석하고자 하는 유동 특성과 계산시간을 고려하여 적절한 해석 방법을 선택하여 해석할 수 있다.

자유액면 유동해석도 일종의 이상유동 해석으로 해석대상 이상 유체의 특성에 따라 Homogenous model과 IPSA 모델을 사용하여 해석할 수 있다. 액체-액체 이상유동 혹은 물-증기와 같이 두 유체 사이에 질량, 운동량 및 에너지 전달이 활발하게 발생할 경우에는 IPSA 모델을 사용하여 해석하는 것이 적절할 것이다. 그러나 두 유체 사이의 점도, 밀도 차이가 크고 두 유체 사이에서 증발 및 응축 현상이 거의 없는 비활성 가스와 소듐과 같은 액체 금속으로 구성되는 이상유동의 경우 가스와 소듐사이에 질량 전달이 거의 없으며 주 해석 대상 물질인 소듐 유동이 가스 유동에 거의 영향을 받지 않는 경우에는 Homogeneous 모델을 사용하여 해석하더라도 소듐 유동장 및 소듐 자유액면 형상에 거의 영향을 주지 않을 것으로 판단되므로 본 계산에서는 자유액면 유동 해석을 위한 이상유체 유동 해석모형으로 Homogeneous모델을 사용한다.

2.2 자유액면 유동 해석 모델

이상 유체 유동의 일종인 자유액면 유동 해석을 계산하기 위해서는 유동장 내의 이상 유체 각각에 대한 부피 분율이 계산되어야 한다. 그런데 이상 유체의 경계면을 이루고 있는 자유액면은 두 물질 사이의 불연속선을 의미하므로 연속체(Continuous media)를 해석하는 경우에 사용되는 대류항 이산화 방법을 사용할 경우 수치해석 방법의 오차로 인해 부피 분율이 확산되어 자유액면이 모호하게 흐려진다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 노력으로 자유액면 유동 모델은 지금까지 다양하게 개발되었다. 지금까지 개발된 자유액면 유동 해석 방법을 간단하게 살펴보면 자유액면 형상이 심하게 변화되지 않는 경우에는 높이함수(Height function) 기법을 사용한다[5]. 높이함수 기법은 자유액면을 자유액면에 수직되는 높이함수로 정의하는 기법을 사용하므로 계산이 간결하고 계산시간이 적은 장점이 있는 반면에 자유액면이 형태가 높이함수를 정의하는 평면에서 심하게 기울어지는 경우에는 오차가 심하게 발생하고 자유액면이 겹쳐지게 발생하는 경우에는 해석이 불가능한 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 개발된 VOF(=Volume of fluid) 기법은 높이함수의 문제점을 해결할 수 있으나 계산방법이 복잡한 특성이 있다. 지금까지 가장 널리 사용되고 있는 VOF 해석 방법은 Hirt & Nichols에 의해 개발된 Donor-cell 해석 방법[6]으로서 계산방법이 단순한 반면에 정확성이 좋지 않은 특성이 있으므로 본 연구에서는 다양한 형태의 자유액면 계산을 정밀하게 수행하기 위하여 일차정도 VOF 기법[4]을 사용한다. 일차정도 VOF 해석 방법은 자유액면 분포를 일차식으로 설정하는 방법으로 상세한 해석 방법은 참고문헌에 기술되었다.

2.3난류 및 대류항 이산화 모델

난류 유동장 해석을 위한 난류 해석 모델은 요구되는 해석의 정확도와 계산시간을 고려하여 설정하여야 한다. 본 해석의 경우 주요 관심 부분인 자유액면 부근은 상대적으로 속도 구배가 작고 Re수가 상대적으로 크기에 벽함수 개념을 이용하는 RNG k-ε모델을 사용하였다. 또한 본 연구의 경우 자유액면 부근에서의 유동특성을 정밀하게 계산하기 위하여 대류항 이산화 방법은 CONDIF 방법[3]을 사용하였다. CONDIF방법은 이차정도 중심차분법을 기본적인 방법으로 채택하나 유동장 해석 매트릭스가 안정적이지 못한 경우에는 풍상차분법(upwind scheme)을 사용하여 해석의 정확성과 안정성을 증가시킨 방법이다.

2.4 해석 방법론 검증

본 계산에서 설정된 방법론의 타당성을 검증하기 위하여 KALIMER 액체금속 원자로 기하형상 1/4 척도로 설정된 장치의 실험결과[7]와 비교한다. 비교 대상 실험 장치는 그림-1과 같이 원주 방향으로 원자로 상부 플레넘의 1/4 형상으로 설정되었다. 냉각재가 유입되는 하단부는 유입속도를 균일화하기 위하여 하니컴을 사용하였으며 속도장을 제어하기 위하여 UIS에 vane을 부착하였다. 이와 같은 실험 구조물 형상에 대한 자유액면 구배를 계산하기 위해 해석 기하형상을 그림-2와 같이 설정하고 하단면은 균일한 속도로 유입되는 균일 속도 조건을 설정하였으며 상단부는 균일 압력조건 그리고 IHX 입구노즐은 질량평형(Mass balance) 조건을 설정한다. 해석에 사용된 유체의 특성은 실험에 사용된 조건과 동일하게 상온(25℃)의 물과 공기로서 각각의 특성은 표-1과 같이 설정한다.

표 1 자유액면 유동 실험 유체 물성치

	밀도(kg/m³)	점도(Pa-sec)
물	997	0.891×10^{-3}
공기	1.176	0.184×10^{-3}

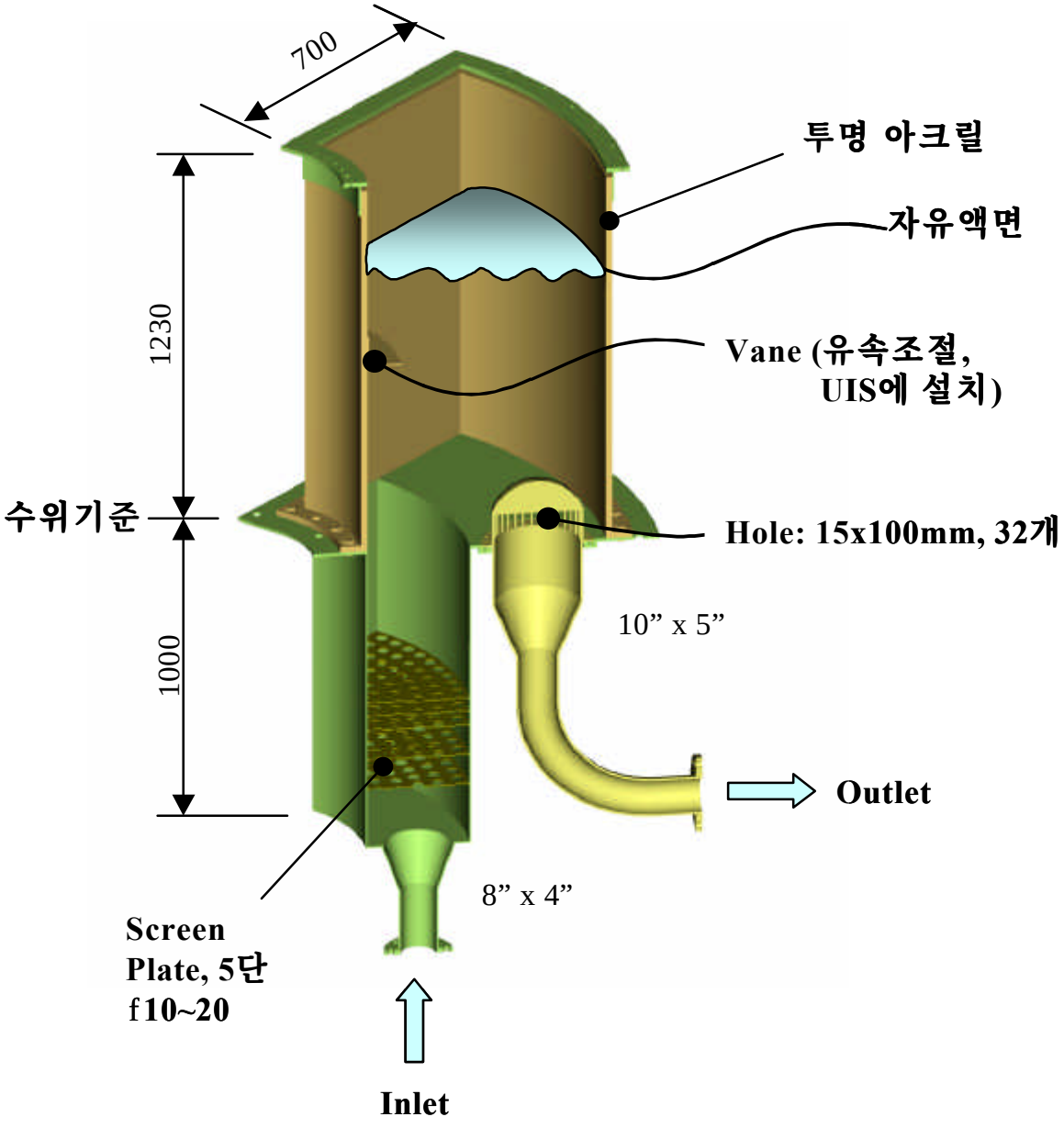

그림 1 가스혼입 실험부의 단면

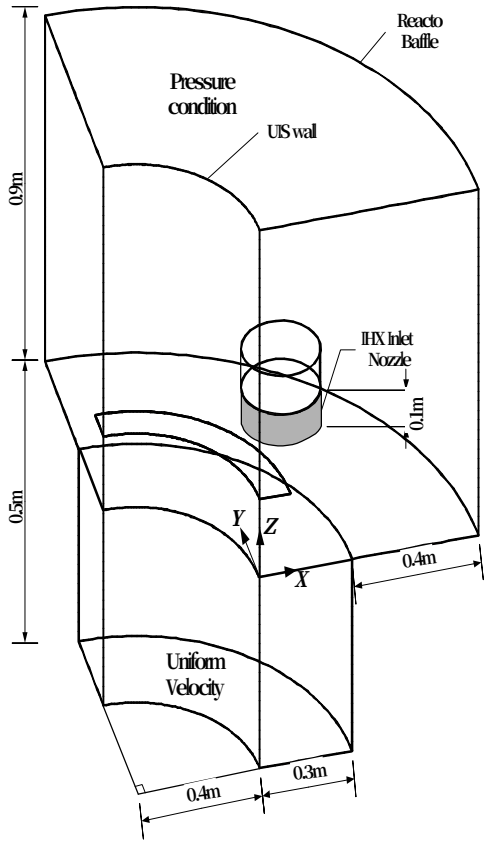

그림 2 실험장치 해석 기하형상

이와 같은 기하형상 및 경계조건에 대해 유입유량 35리터/초, 초기 액위 0.6m Vane 높이 0.4m의 조건에 대해 해석을 수행한 결과 평균 액위에서의 전체적인 자유액면 분포는 그림-3과 같은 분포를 보인다. 그림의 결과와 같이 액체의 자유액면 분포는 중심부위에서 낮고 IHX입구 부근에서 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

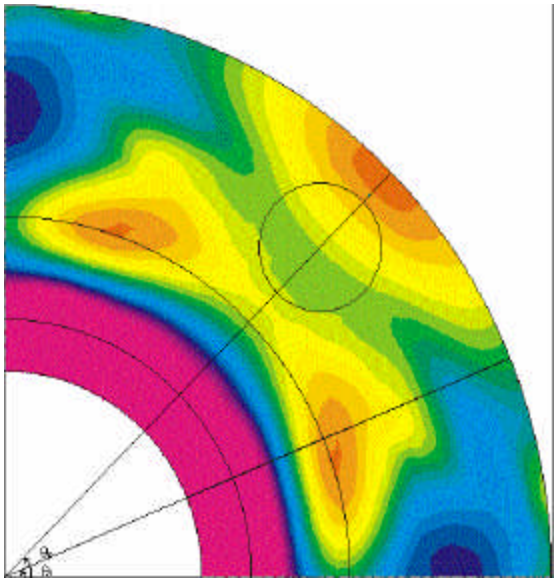

그림 3 자유액면 분포 (유입유량: 35 리터/초, 평균액위:0.6m)

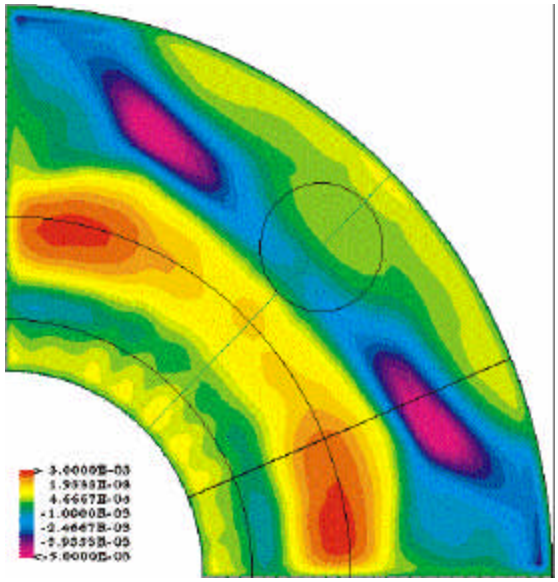

그림 4 평균 자유액면위치(Z=600mm) 에서의 수직방향 상승속도 분포

해석 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 원주방향 중심(θ_2,45°)에서 반경방향 자유액면 분포를 실험결과와 비교하여 그림-5와 같이 도시하였다. 그림의 결과와 같이 자유액면의 비례분포는 실험과 계산 값이 거의 유사하게 나타났다. 그러나 자유액면의 최고점과 최저점의 차이는 실험값이 약 2mm인 반면에 계산값은 1mm이내가 되었는데 이는 실험 보고서[7]에서 밝힌 액위 계측 감지기의 오차가 0.6mm이고 또한 자료처리기의 오차까지 감안하면 계측계통의 오차가 더 커질 것이므로 자유액면 액위차의 절대값에 대한 평가는 이와 같은 미소한 액위차이에 대한 실험 결과로서는 검증하기가 적절하지 않는 것으로 판단되어 더 큰 액위차에 대한 결과가 입수될 때까지 유보하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 또한 그림-3의 θ_1 지점인 θ=22.5°지점에서의 구배 분포는 그림-과 같다. 그림의 결과와 같이 그림-3의 결과에 비해 계산 값과 측정값의 일치성이 약하나 비교적 유사한 경향을 보이는 것을 알수 있다.

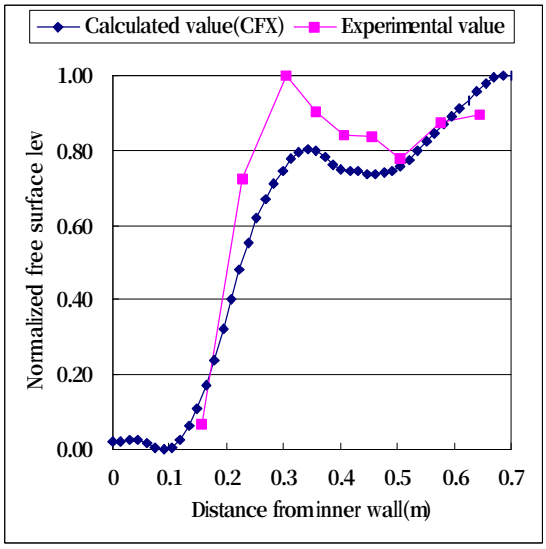

그림 5 반경방향 고온풀 자유액면 구배; 유량=35리터/초, 평균액위=600mm, vane 높이=400mm, 원주방향 위치θ=45°

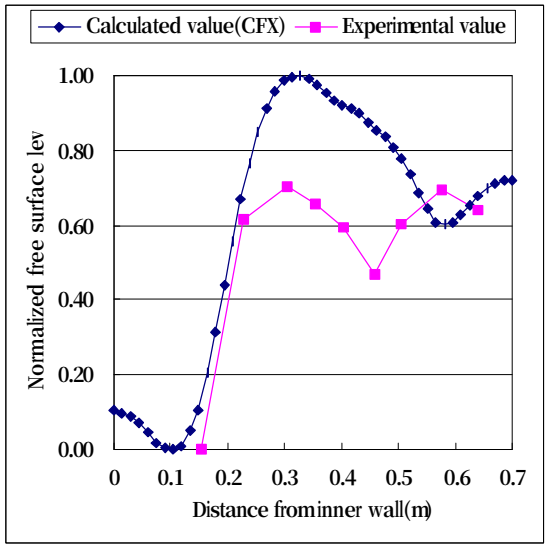

그림 6 반경방향 고온풀 자유액면 구배; 유량=35리터/초, 평균액위=600mm, vane 높이=400mm, 원주방향 위치θ=22.5°

해석 영역에서의 유동특성 분포를 알아보기 위하여 자유액면 평균액위 단면에서의 속도장 벡터와 액체 상승속도 분포를 그림-4,7에 도시하였다. 그림-7에서와 같이 원주 및 반경방향에서는 UIS부근의 내 벽면 쪽에서 외벽면쪽으로의 유동이 형성되며 외벽면 원주방향 양 모서리 부근에서는 순환유동이 발생되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 평균액위 단면에서의 수직방향 유동분포는 그림-4에 도시된 것처럼 UIS벽면에서 약 0.4m 외반경 방향의 위치 원주방향 양단부근에서 상승속도가 최대가 된다. 이는 그림-9,10에서와 같이 Z=400mm 위치에 설치된 Vane의 영향으로 상승 유동이 배플 쪽으로 꺽여지므로 상승유동 분포가 배플쪽으로 이동되며, IHX입구에서 흡입되는 유동영향에 의해 중심부보다는 원주방향 양단쪽에서 최대 상승 유동 지점이 발생되는 것으로 여겨진다. 또한 IHX 입구노즐과 원주방향 양단면 중간위치에서 최대 하강유동이 발생하고 있는데 이는 IHX 입구 노즐의 상단부가 덮개로 씌어져 있어서 IHX 입구노즐 직 상부에서는 하강유동이 반경방향에서는 하단부에서 유입되는 유동 효과와 벽면 효과에 의해 하강속도가 상쇄되므로 원주방향에서 최대 하강유동 현상이 발생하는 것으로 여겨진다. 또한 자유액면 부근의 Free Vortex 분포는 그림-8과 같이 원주방향 양단면 벽면부근과 양쪽 구석에서 발생하는 것을 알 수 있다. 벽면부근에서 발생하는 Vortex는 벽면 근처의 속도구배에 의해서 발생하지만 양쪽 구석에서 발생하는 Free vortex는 벽면에서 떨어져서 발생하므로 유입 및 유출 유량이 증가하게 되면 공기 흡입

현상이 발생될 가능성이 높을 것으로 예상된다.

이상의 결과로부터 본 계산에서 설정된 자유액면 유동특성 해석 방법론이 적절한 것으로 판단된다.

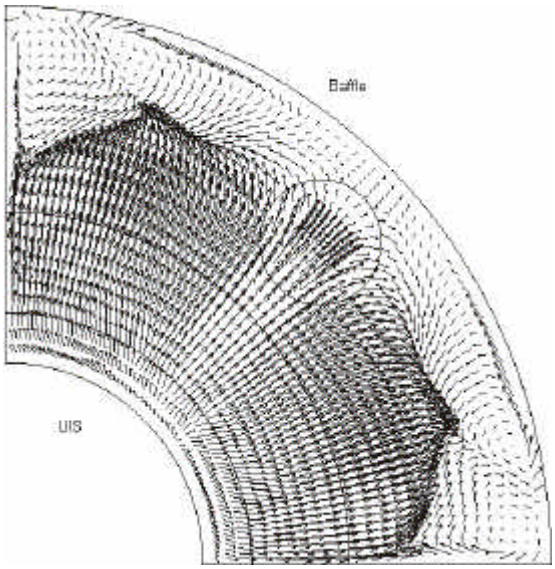

그림 7 평균 자유액면위치(Z=600mm)에서의 속도장 분포

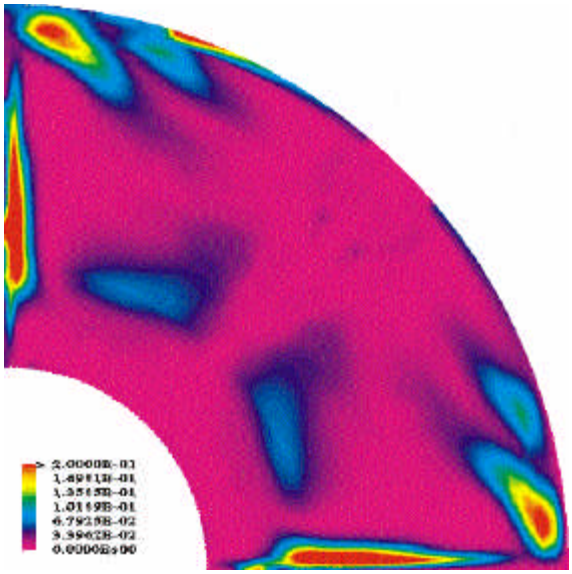

그림 8 자유액면 부근 Free vortex분포

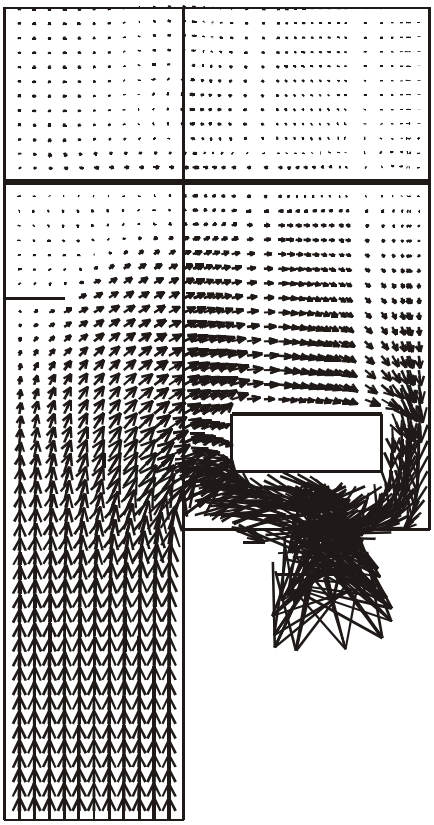

그림 9 원주방향 중심부 (θ=45°) 속도벡터 분포

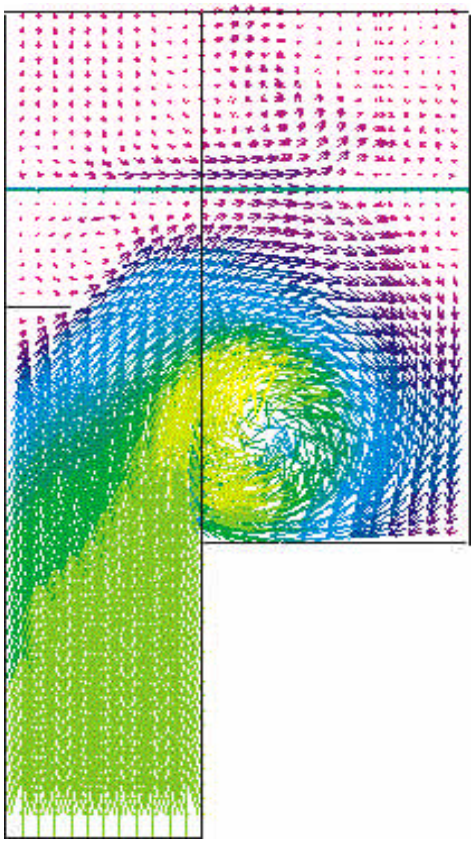

그림 10 원주방향 θ=22.5°지점 속도벡터 분포

3. KALIMER 고온풀 자유액면 거동해석

3.1 해석 대상 기하형성

해석을 수행하려고 하는 대상 액체금속 원자로는 150MWe급 KALIMER 원자로[8]이므로 기하형상은 이를 바탕으로 설정한다. 기하형상은 그림-11의 원자로 전체 모형에서 자유액면 유동에 직접영향을 주는 부분으로 한정하기 위하여 축 방향으로는 UIS 하단에서 고온 풀 자유액면까지를, 반경방향으로는 UIS 외벽에서 원자로 배플 표면까지로 설정한다. 또한 원주방향으로는 그림-12와 같이 원자로 냉각재 펌프와 중간 열교환기 배열의 대칭성을 이용하여 원주 방향으로 1/4 면만을 해석 기하형상으로 설정하면 해석대상 기하형상은 그림-13과 같은 해석 기하형태로 설정된다.

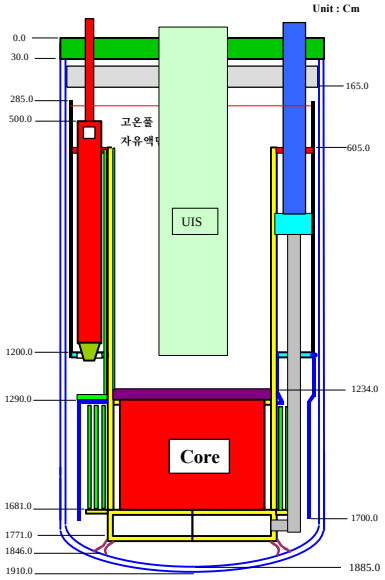

그림 11 칼리머(150MWe급) 측면 개념도

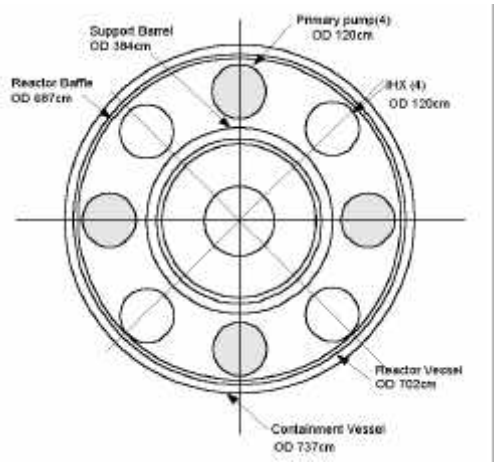

그림 12 원자로 상부 단면도

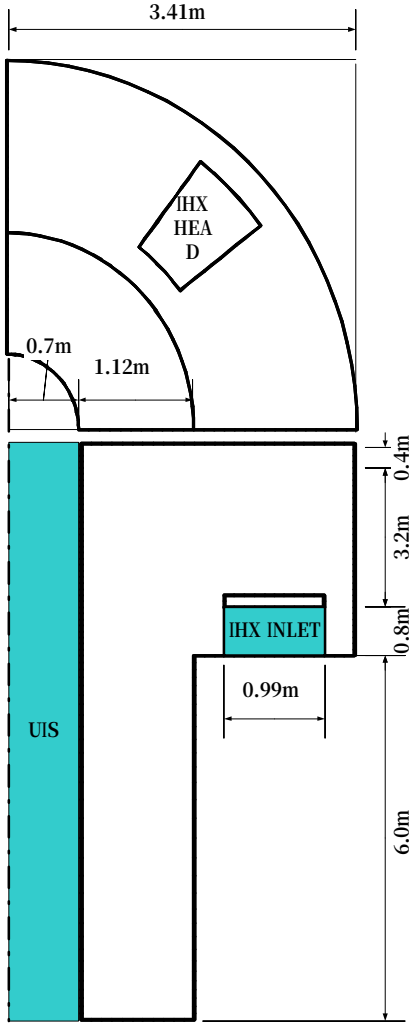

그림 13 전산해석 해석 기하형상 (Top view, Side view)

3.2 경계조건 및 유체특성

KALIMER 원자로 고온풀 자유액면 해석을 위한 경계조건은 실험장치와 유사하게 설정하였으므로 본 절에서는 구체적인 기술은 생략한다. 유체 특성은 KALIMER 원자로 100% 정격출력 조건에 따라 표-2와 같이 설정한다.

표 2 KALIMER 고온풀 유체특성

	소듐	He[3.7]
작동온도(℃)	530[3.5]	300[3.8]
밀도(kg/m³)	825.2	0.102
점도(kg-m/sec)	2.28×10^{-4}	2.693×10^{-5}

3.3결과 및 토론

KALIMER 원자로의 경우 노심을 통과하는 질량유량은 2,143kg/초이며 노심 출구 소듐온도를 530℃로 가정하면 2.60㎥/초의 유량으로 UIS와 원자로 배럴 사이의 환형공간을 통과하므로 입구에서의 유체의 평균속도는 0.29m/초가 된다. 또한 KALIMER 원자로의 정격운전 평균 액위는 IHX 입구 상단에서 약 2.2m 이다. 따라서 KALIMER 운전조건을 기준으로 유량 및 평균유속을 적절하게 변화시켜 해석을 수행하였다. 해석 수행 조건은 실제 KALIMER 설계조건보다 더 보수적인 유입속도인 0.5, 0.7, 0.9 m/초에 대하여 수행하였으며 평균액위는 IHX 입구 상단에서 0.7m, 1.7m 및 2.2m에 대해 총 9가지 경우에 대한 해석을 수행하였다.

각 경우에 대해 Non-steady해석을 수행하였다. 해석 시간 간격은 CFX 해석코드의 수렴성을 고려하여 10^{-2}초로 설정하였으며 계산시간은 계산 초기의 과도상태가 안정화 될 수 있다고 판단되는 5초동안 수행하였다.

각 경우에 대한 해석을 수행한 결과 자유액면의 분포는 입구 유속별로 원주방향 45°지점에서 반경방향에따른 분포특성을 그림-16,17,18에 도시하였다. 그림의 결과와 같이 고온풀 평균 액위가 IHX입구 상단에서 1.7m, 2.2m의 경우는 입구유속에 관계없이 고온풀 자유액면 분포는 1mm 이하로 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 반면에 고온풀 액위가 0.7m의 경우는 유속에 따라 다양한 형태로 변화되며 그 크기도 약 5mm 정도로 나타났다. 따라서 고온풀 자유액면의 분포는 지금까지의 많은 연구 결과와 같이 임의의 임계 액위 이하가 되면 불안정해진다는 것도 이와 같은 계산 결과에서 유추해 볼 수 있다. 이와 같은 계산 결과로부터 KALIMER의 경우 평균 액위가 2.2m이고 유입 속도가 0.29m/초이므로 고온풀 자유액면이 거의 일정하게 형성될 것으로 예측된다.

평균액위가 0.7m인 경우의 고온풀 자유액면 분포 특성을 살펴보면 그림-19와 같이 액위가 낮은 부분이 원주방향으로 거의 고르게 분포하고 있는 것으로부터 액위차의 발생은 Vortex 형성에 의한 현상보다는 유체 유동장 특성에 의한 Hydraulic 점프에 의한 것이라고 여겨진다. 이러한 사실은 그림-20에 도시된 것처럼 자유액면에서의 속도 벡터가 거의 방향을 바꾸지 않고 반경방향 쪽으로 진행되는 것으로도 알 수 있다.

또한 평균액위 0.7m에서의 자유액면 분포는 대체로 UIS쪽에서 낮고 원자로 Barrel쪽에서 높게 나타나지만 유속이 증가하면 UIS쪽도 증가되고 있다. 이는 유입속도가 증가 될수록 상승 모멘텀이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

축방향 및 반경방향 속도 분포를 살펴보기 위하여 입구속도 0.9m/초, 평균액위 IHX 입구 상단에서 0.7m인 유동에 대하여 원주방향 중심부분과 원주방향 양단에서의 속도분포를 그림-21에 도시하였다. 예상한 바와같이 양단에서는 심한 재순환 유동을 보이며 중심선에서는 IHX 입구 노즐을 통해 유체가 방출되는 것을 알 수 있다.

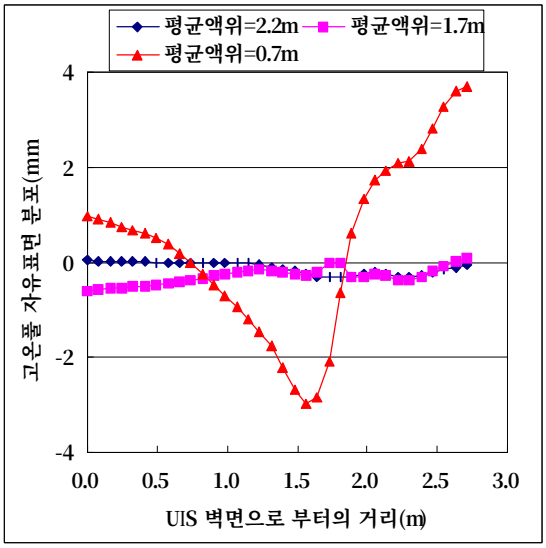

그림 14 반경방향 고온풀 자유액면 분포; 입구유속(0.9m/초); 원주방향(θ=45°)

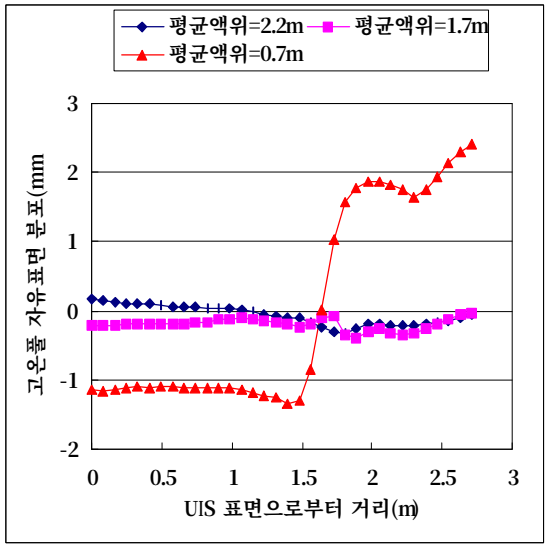

그림 15 반경방향 고온풀 자유액면 분포; 입구유속(0.7m/초); 원주방향(θ=45°)

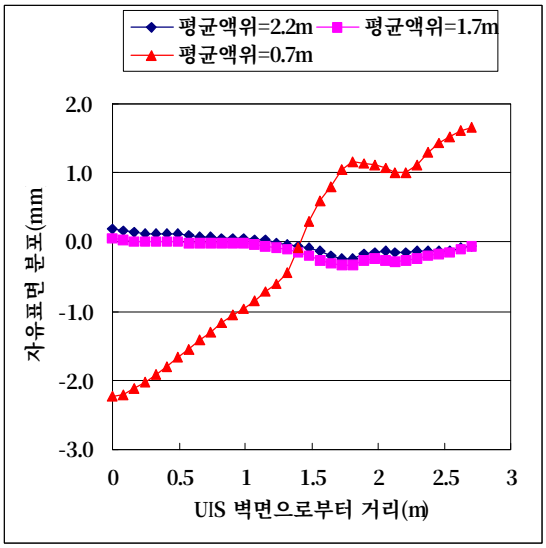

그림 16 반경방향 고온풀 자유액면 분포; 입구유속(0.5m/초); 원주방향(θ=45°)

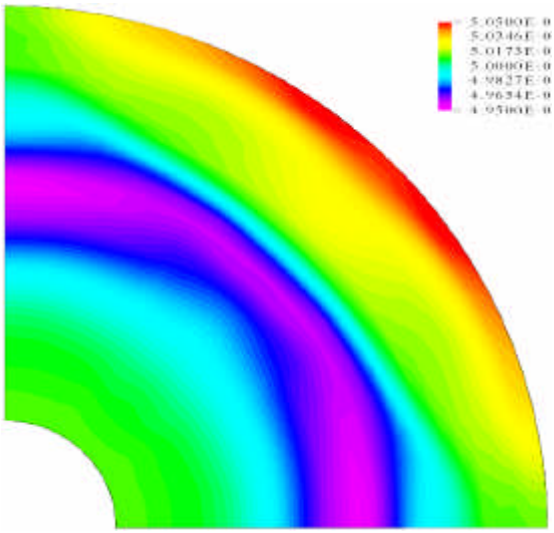

그림 17 고온풀 자유액면 분포; 유입 유체 속도(0.9m/초);평균액위(0.7m)

4.0 결론 및 향후 연구방향

본 계산은 액체금속로 고온풀 자유액면의 열 유동 특성을 분석하는 방법론을 설정하고 이 방법론을 이용하여 KALIMER 고온풀 원자로 특성분석을 위하여 수행되었다. 고온풀 자유액면 해석 방법론은 CFX4코드와 자유액면 정밀 해석 모델인 1차정도 VOF해석 모델을 결합시켜 해석 방법론을 설정하였다. 설정된 해석 방법론을 검증하기 위하여 자유액면 실험자료와 자유액면 분포 특성을 비교하였다. 비교결과 자유액면 분포특성이 실험결과와 거의 일치하므로 해석 방법론이 적절한 것으로 여겨진다.

또한 설정된 해석 방법론을 이용하여 KALIMER 원자로 고온풀 자유액면을 해석하였다. 해석결과 현재 설계된 KALIMER 고온풀 액위는 충분한 높이로 설정되어서 원자로 정격 출력 운전중 고온풀 액위가 거의 일정하게 유지 되는 것을 알 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 표면 와류에 의한 자유액면을 통한 공기 흡입현상 및 자유액면 요동현상에 대한 연구는 충분히 수행되지 못하였으므로 이에 대한 연구가 차후 수행되어야 된다고 판단된다.

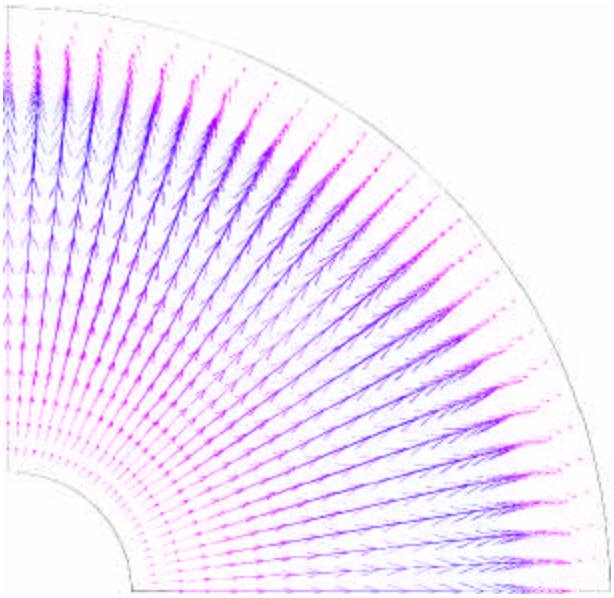

그림 18 평균액위 반경 및 원주방향 속도 분포;
유입 유체속도(0.9m/초); 평균액위(0.7m)

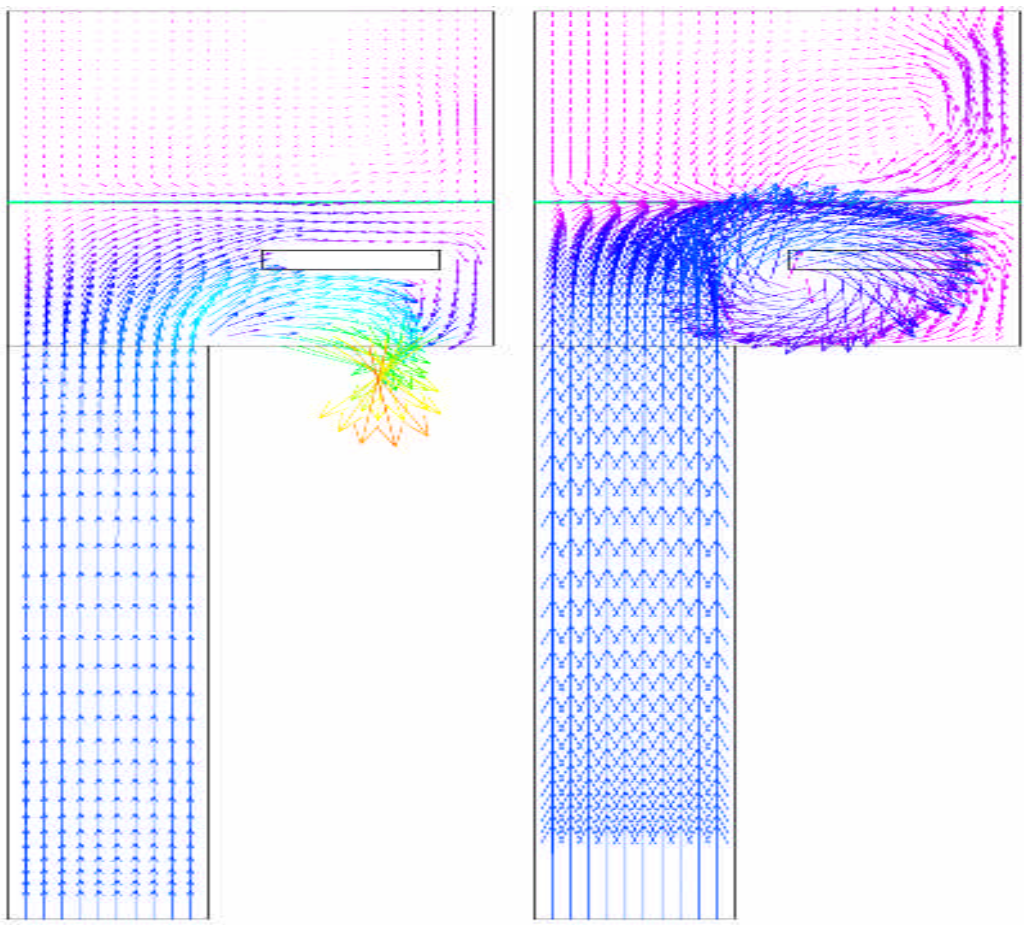

그림 19 축방향 속도 분포; 유입 유체속도(0.9m/초); 평균액위(0.7m) 좌: 원주방향 중심, 우:원주방향 양단

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Akalank K. Jain et. al, Vortex formation at vertical pipe intakes, Journal of hydraulics divisiton, 14104, Oct. 1978
2. Hubert CHANSON, Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows, Academic press 1996, ISBN 0-12-168110-6
3. AEA Technology, CFX-4 Manual, 1997
4. Seong-O. Kim et al., A first-order volume of fluid convection model in three-dimensional space, Int. J. for Meth. Fluids 36:185-204(2001)
5. Min-Joon Kim et al., A spectral method for free surface flows of inviscid fluids, Int. J. for Meth. Fluids 28:887-902(1998)
6. C.W. Hirt and B.D. Nichols, Volume of Fluid(VOF) methods for the dynamics of free boundaries, J .of Comput. Phys. 39, 201-225 (1981).
7. 남호윤 등, 상부플레넘 액면요동 물모의 실험, LMR/ST153-TD-01 Rev.0/01(ST1530000), 한국원자력연구소, 2002.1.31
8. KALIMER 예비 개념설계 보고서, KAERI/TR-1636/2000
9. J.P.Holman, Heat Transfer, International student edition, fifth edition,1981
10. 김성오, 핵연료 재장전 운전모드시 원자로 헤드 운도분포 계산 보고서,LMR/FS200-ER-05/01, 2002