

KALIMER Pool의 정상상태 열수력해석

Steady-State Thermal-Hydraulic Analysis of KALIMER Pool

김의광, 김성오, 김연식, 위명환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

COMMIX-1AR/P 코드를 이용하여 한국원자력연구소에서 개발중인 액체금속로 KALIMER Pool 내부의 정상상태 열수력거동을 분석하였다. 해석에 사용한 COMMIX-1AR/P 코드는 다공성매질 개념을 이용하고 기하학적 형태가 복잡한 3차원 정상상태 및 과도상태 열수력해석이 가능하다. 100% 정상상태 출력시 Hot Pool과 Cold Pool의 소뿔의 온도는 거의 등온분포를 보이며 열성층화 현상은 나타나지않았다. 피동잔열제거계통의 공기온도는 입구에서 40 °C 일때, 출구에서는 약 131 °C이다. IHX를 통과하지않고 피동잔열제거계통의 공기를 통하여 제거되는 열량은 약 0.4 Mw로 노심출력의 약 0.4%에 해당한다.

Abstract

A steady-state evaluation for the pool in the KALIMER PHTS is done using the COMMIX-1AR/P code, which is for the analysis of the three-dimensional steady-state and transient using the porous media concepts. The results of 100% steady-state condition showed that effective mixing is obtained inside hot pool and cold pool, and no thermal stratification was found. The temperature of the PSDRS was 131 °C at the outlet of the PSDRS chimney while the temperature of the air at the inlet was 40 °C. The amount of energy bypassing the IHX's through the air of the PSDRS was about 0.4 Mw, which was equivalent to 0.4% of core power

1. 서 론

액체금속로 Pool 내부의 3차원적인 흐름은 과도상태 및 정상상태 조건하에 Pool 내부구조물과

유동장에 불균일한 온도분포를 나타낼 수 있다. 따라서 각종 운전조건하에서 원자로용기와 구조물이 겪는 Thermal Stress, 구조물의 거동을 알아보기 위해서는 Thermal Condition을 정확하고 상세히 파악할 필요가 있다. 이와함께 Hot Pool에서의 열성층화 발생여부는 원자로구조물의 Stress 해석과 건전성 관점에서 중요한 대상이기 때문에 그 발생여부를 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 COMMIX-1AR/P코드를 이용하여 현재까지 국내에서 개발중인 액체금속로 KALIMER (Korea Advanced LIquid METal Reactor) 설계개념연구를 통하여 이루어진 설계자료와 연구결과를 바탕으로 KALIMER Pool 내부의 정상상태 100% 출력운전시 열유동장을 분석하였다.

2. COMMIX-1AR/P 전산코드

COMMIX-1AR/P코드는 COMMIX계열코드중의 한가지로 단상유동, 과도상태, 3차원 Mass, Momentum, Energy보존식으로 해를 구하고, 계산좌표계로는 직교좌표계와 실린더좌표계를 적용할 수 있다. 또한 Volume Porosity와 Directional Surface Porosity의 다공성매질 개념과 Distributed Resistance, Distributed Heat Sources을 이용하여 복잡한 모양의 기하학적 형상에도 적용이 가능하다. 그러나 KALIMER의 PHTS에서 나타나는 Hot Pool과 Cover Gas의 경계면의 Free Surface는 처리할 수가 없어 Rigid Boundary로 나타내어야 한다. 따라서 이전의 COMMIX 계열의 코드에서는 이와같은 밀폐된 공간에서 가열이 이루어질 때 수치적으로 불안정성이 나타났으나, 1AR/P버전에서는 Expansion Cell이라 불리우는 계산소자를 계산영역 상부에 붙여 유체가 확장할 수 있는 공간을 제공함으로써 이 문제점을 해결하였다. 이전의 COMMIX-1A에 비하여 1AR/P버전에 추가된 중요한 기능은 다음을 들 수 있다. 1) 물리적으로 분리된 계산영역별 다른 종류의 유체적용, 2) 펌프 모델링, 3) 복사열전달, 4) $\kappa - \epsilon$ 난류모델, 5) Expansion Cell.

3. COMMIX의 계산모델

3.1 기하형상 모델링 및 격자배치

KALIMER는 Pool형의 액체금속로로, 격납용기, 원자로용기, 원자로 Closure Head, 중간열교환기(IHX; Intermediate Heat Exchanger), 전자펌프(EM Pump), 원자로내부구조물 등으로 구성된다. 그림 1과 2에 원자로 구조물의 수직단면과 위에서 바라본 수평단면이 주어져 있다.

먼저 기하형상을 모델링하기 위해 좌표계는 실린더좌표계를 적용하였고, 구조물중의 핵연료이송장치인 IVTM의 존재를 무시하고, 구조물의 대칭성을 고려하면 전자펌프 또는 IHX의 중간위치 사이의 간격 90° 부분만으로 3차원해석이 가능하다. 본 해석에서는 전자펌프의 중심사이간격을 모델링하였다. 반경방향으로는 원자로용기의 중심부에서 피동전열제거계통의 Air Separator까지 묘사하였다. 축방향으로는 원자로용기 밑부분에서 원자로 내부수직 Baffle의 Overflow Slot의 윗

면까지 고려하였다. 원자로용기 밑부분의 Hemispherical Shape는 무시하였다. 앞에서 언급한 것과 같이 여러 종류의 유체가 계산영역에 적용가능하지만 각각은 물리적으로 분리되어야 한다. 따라서 Hot Pool과 Baffle/원자로용기사이의 소듐액위의 자유로운 거동은 묘사될 수 없으므로 이 공간은 소듐으로 채워져있다고 가정하고, Cover Gas 공간은 고려하지 않았다.

일반적으로 격자간격은 격자면이 구조물의 중요한 부분과 일치하도록 설정한다. 따라서 본 계산에서는 19(반경방향)x16(원주방향)x26(축방향)=7904개의 Cell을 사용하였다. 반경방향 19 개의 계산노드중에서 1에서 13까지는 중심에서 원자로용기까지, 14와 15번 노드는 원자로용기와 격납용기사이의 알콘영역에, 16, 17번 노드는 격납용기와 Air Separator사이의 공기유동영역에 할당하였다. 18번 노드는 비유동영역이고, IHX의 중간계통을 묘사하기 위해 19번 노드를 할당하였다. 노심영역은 총 6개의 노드가 주어졌으며, 1번에서 3번까지는 Driver영역으로, 4번은 Blanket영역, 5번과 6번은 나머지 반사체 및 차폐체, 노내저장집합체영역으로 할당하였다. 노심에서 발생하는 총 392.2 Mwt중 Driver영역에서 96.3%, Blanket영역에서 2.9%, 노심내 나머지 영역에서 0.8%의 출력이 발생한다. 따라서 각 영역의 발열량에 대응하여 필요한 유량은 노심입구의 오리피스로 조절하여 Driver영역에 총유량 2143 kg/s 중에서 90.7%를, Blanket영역에 6.83%, 기타 노심의 집합체와 집합체 사이로 흐르는 Bypass유량은 1.97%로 하였다. 원주방향으로는 16개의 노드가 주어졌고, 1번과 16번 노드는 펌프의 Return Pipe로 주어지고, 2번, 15번 노드는 펌프를 묘사하는데 사용하였다. 7번에서 10번까지는 IHX에 적용하였다. 원주방향의 격자간격은 실린더좌표계에서 Radian으로 주어진다. 축방향으로는 26개의 노드가 있고, 1번은 Cold Pool, 3번 노드의 윗면은 핵연료집합체의 밑부분을 나타낸다. 핵연료집합체는 4번에서 7번까지이고 Active Core는 5번 노드이다. 노드 9번에서 21번까지는 IHX에 주어지고, 펌프는 8번에서 17번까지이고, 26번 노드는 Expansion Cell이다. Fixed Shielding 부분의 Flow Skirt와 펌프입구와의 유로연결은 (I,J,K)=(9,2,7), (9,15,7)번 Cell의 윗면을 통하여 이루어진다. 이상과 같은 해석 격자계는 그림 3, 4, 5에 있다. 그림에서 실선은 Boundary Surface를 나타내고, 점선은 Cell Face를 나타낸다. 그림 3, 4의 수직단면은 원주방향으로 두군데 지점을 나타내는데 그림 3은 펌프 Return Pipe의 중심부를 포함하고, 그림 4는 IHX를 포함한다. 그림 5는 펌프 윗면에서 바라본 수평단면이다. 그림에서 펌프와 IHX는 사각형 단면을 갖는 것으로 묘사되어있으나 실제로는 두가지 모두 실린더 형태이므로 원형단면을 갖는다. 따라서 계산격자상의 단면적과 실제 면적과의 차이를 보완하기 위해 펌프와 IHX가 점유한 면적에 Porosity를 곱하여 코드내부에서 계산시에는 실제 면적값으로 계산되도록 하였다.

3.2 중요 입력자료

첫수

- Support Cylinder 반경 : 1.895 M
- 원자로 용기 반경 : 3.51 M

- 격납 용기 반경 : 3.685 M
- Air Separator 반경 : 3.965 M
- 원자로 용기 높이 : 17.6 M (정상소듐액위까지 높이: 15.1 M)

온도 및 유량

- 노심 총출력 : 392.2 Mwt
- PHTS 총유량 : 2143.1 kg/s
- PHTS ΔP : 0.8 MPa
- 피동잔열제거계통 입구공기온도 : 40 °C
- 피동잔열제거계통 총입구공기유량 : 17 kg/s
- 중간계통 IHX 입구온도 : 339.7 °C
- 중간계통 IHX 총입구유량 : 1803.6 kg/s

복사열전달 emissivity

- 원자로용기 외벽과 격납용기 내벽사이 : 0.77
- 격납용기 외벽과 Air Separator 내벽사이 : 0.85

난류모델

- Turbulent Viscosity: 2.0E-2
- Turbulent Conductivity : 6.0

수렴조건

- 각방향속도 및 엔탈피의 반복계산시 변화량과 계산영역내 최대량과의 상대오차가 5×10^{-4} 이내

4. KALIMER 정상상태 열수력 특성

그림 6은 J=9인 수직단면의 속도장을 속도벡터의 크기와 방향으로 나타내고 있다. 이 단면은 IHX를 포함한 단면이다. 소듐은 노심집합체를 통과하여 Hot Pool로 유입된다. Driver영역의 속도 성분은 약 3.5 m/sec이다. 노심출구영역에서 소듐의 흐름은 UIS 밑면 때문에 위로 직진하지 못하고 옆으로 방향을 바꾸어 고온측 소듐과 저온측 소듐이 혼합됨을 알 수 있다. Hot Pool의 소듐은 IHX 입구로 가서 아랫방향으로 유동한 후 Fixed Shielding을 통과한 후, 이 그림에서는 보이지 않으나 Fixed Shielding의 Flow Skirt 윗부분에 있는 펌프 Suction를 지나 펌프를 통과한 후 Return Pipe를 통하여 다시 노심입구로 유입된다. 그림 7은 J=9인 수직단면의 온도장을 나타내고 있다. 그림의 등고선분포로부터 노심영역에서 온도가 증가하여 IHX를 따라 열교환이 이루어진 후 점점 온도가 감소함을 볼 수 있다. Hot Pool의 온도는 약 530 °C, Cold Pool은 약 386 °C로 거의 균일한 온도분포를 보이고, 관심대상중의 하나인 열성충화현상은 발생하지 않았다. 노심에서 최고온도는 약 538 °C이고, 노심출구지역에서 소듐의 혼합이 잘 이루어진다. 피동잔열제거계통의 공기온도는 입구에서 40 °C 일때, 출구에서는 약 131 °C이다. IHX를 통과하지않고 피동잔열제거

계통의 공기를 통하여 제거되는 열량은 약 0.4 Mw로 노심출력의 약 0.4%에 해당한다. Support Barrel과 Thermal Baffle사이의 Buffering Zone은 대류에 의한 에너지전달을 최소화하여 고온풀과 저온풀사이의 열전달을 최소화하고, 또한 공간적 온도변화율을 최소화하여 구조물의 열적영향을 완화시키는 장치이다. 계산검토결과 유속은 거의 정체되어있으며, 온도분포는 525 °C에서 417 °C로 열성층이 이루어져 있음을 알 수 있었다. 알콘영역에서의 온도는 하부에서 약 320 °C, 상부에서 약 417 °C로 분포하고, IHX와 인접한 지역에서는 펌프가 접한 지역보다 상대적으로 약간 높은 온도가 나타나 알콘영역의 gap 내부에서 IHX와 인접한 지역에서는 상승유동이 존재하고, 펌프가 접한 지역에서는 아랫방향의 자연대류가 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

액체금속로 KALIMER Pool의 정상상태 열수력거동에 대한 분석을 수행하였다. 해석을 위해서 COMMIX-1AR/P 전산코드를 이용하였다. 100% 출력운전시 Hot Pool과 Cold Pool의 소듐은 혼합이 잘 이루어져 각각 약 530°C, 385°C로 거의 등온분포를 보이고, 열성층화현상은 나타나지 않았다. 노심출구영역에서 Driver영역노심을 통과한 고온소듐은 UIS의 밑면 때문에 반경방향으로 유로가 바뀌면서 저온영역의 소듐과 효과적으로 혼합됨을 알 수 있었다.

Acknowledgement : 본 연구는 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 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, Volume 2: User's Guide, ANL-92/33, Sep., 1992
2. C.K. Park et al., KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97, Jul. 1997
3. GE, PRISM Preliminary Safety Information Document, Dec., 1987
4. S.P. Vanka et. al, Steady-State Simulation of the FFTF In-Vessel Thermal Hydraulics, ANS Transaction Vol. 41, Jun., 1982
5. W.L. Baumann et. al, EBR-II In-Vessel Thermal-Hydraulic Transient Simulation Using the COMMIX-1A Comput Code, ANS Transaction Vol. 43, Nov., 1982

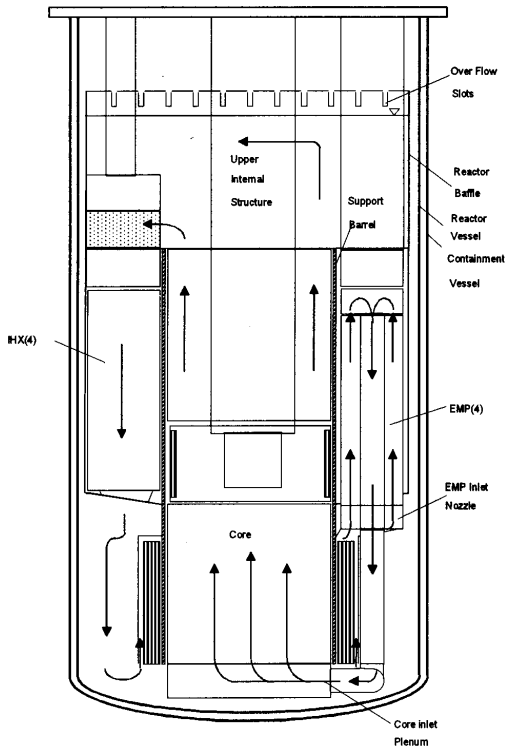


그림1 일차계통 정상소동 유로

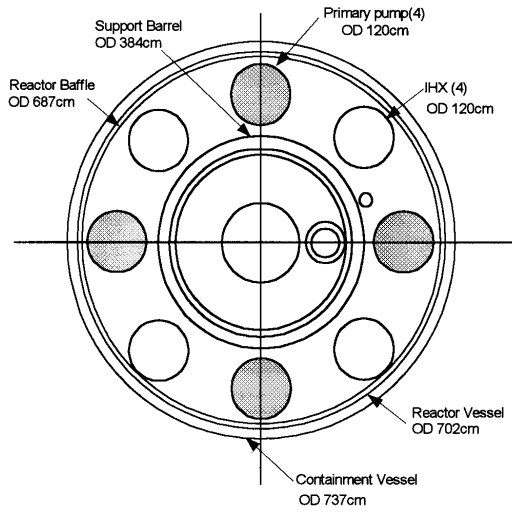


그림2 펌프및IHX의 수평배열

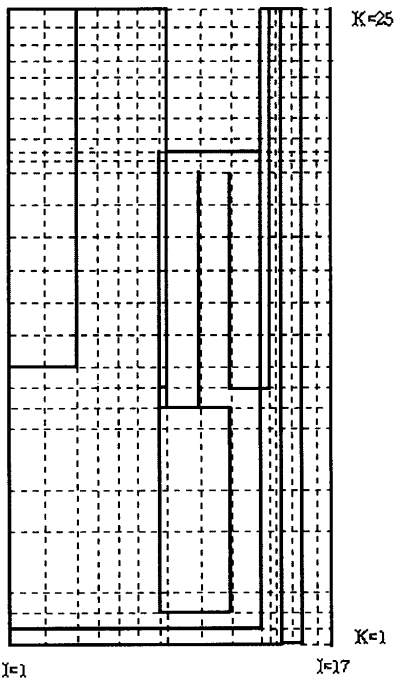


그림3 COMMIX해석수직배열(J=1)

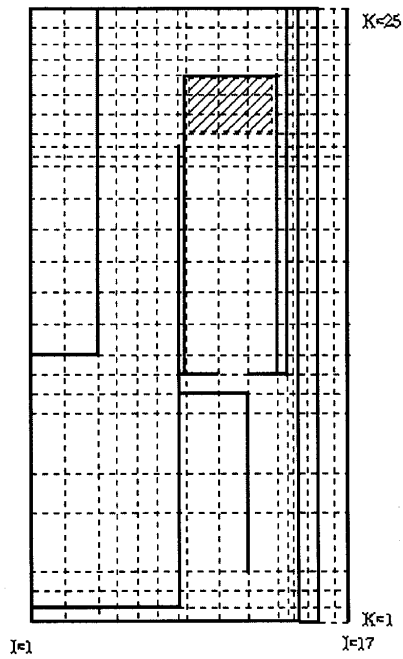


그림4 COMMIX해석수직배열(J=9)

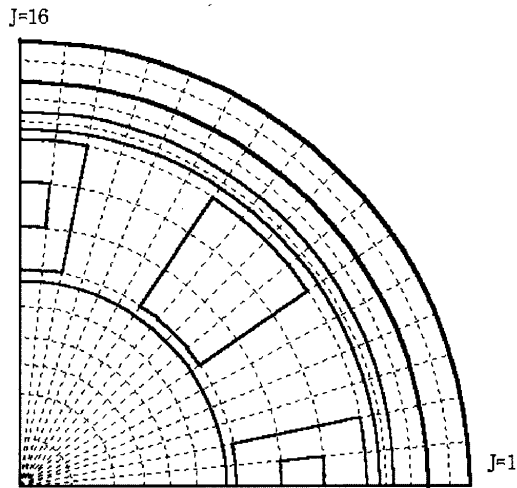


그림5 COMMIX해석 수평배열

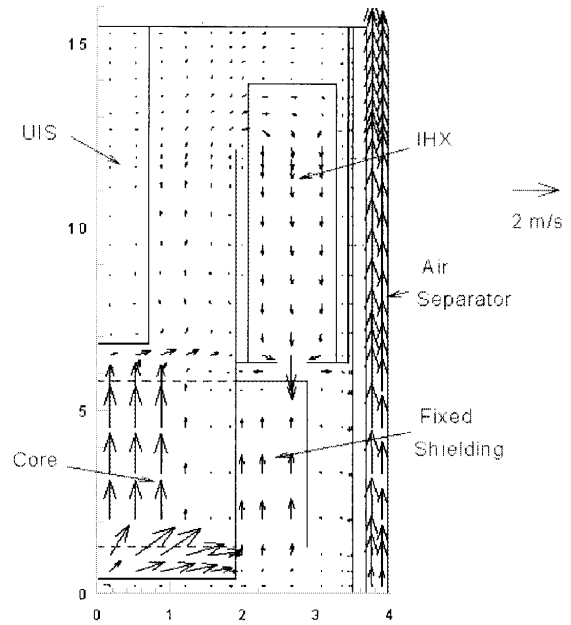


그림6 정상상태 속도분포 (J=9)

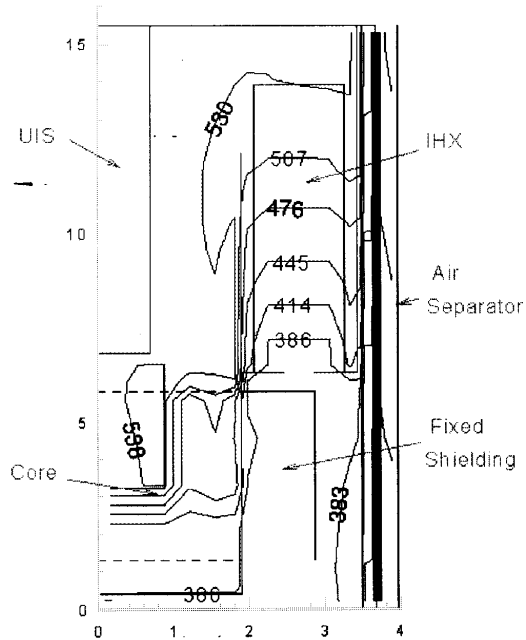


그림7 정상상태 온도분포 (J=9)