2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER-600 원자로 풀 열유동 특성 해석
Analysis of Thermal and Flow Characteristics in the KALIMER-600 Reactor Pool

전원대, 김의광, 위명환, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

정상상태 100%출력운전시 열유동 특성을 COMMIX-1AR/P 코드를 이용하여 해석하였다. 저온풀과 노심 입구영역에서의 온도는 366.2℃로 균일하고 고온풀의 온도는 510℃로 나타났다. UIS 하부영역에서의 반경방향 온도분포는 512℃에서 514℃로 나타나는데 UIS하부에서의 온도구배에 의한 열하중에 대한 고려가 상당히 완화될 것으로 보인다. 전반적인 결과로 정상상태 해석은 소듐이 상당히 잘 섞여져서 고온 영역과 저온 영역에서의 온도가 거의 균일하게 분포하여 설계자가 걱정하는 예기치 않은 상태는 나타나지 않았다.

Abstract

Analysis has been made for the thermal and flow characteristics at the steady-state operating condition at 100 % power using the COMMIX-1AR/P code. The temperature in the cold pool, and core inlet plenum is uniform at 366.2℃, and that in the hot pool is at 510℃. Since the radial temperature distribution is 512℃ through 514℃ at the bottom of the UIS, it seems that the thermal load due to the radial temperature gradient is not as severe as at the bottom of the UIS. The results of the steady-state analysis shows that the sodium is well mixed and nearly at on isothermal condition in the hot and cold plena, and there are no unexpected conditions that are of concern to the designer.

1. 서 론

원자로내에는 다양한 구조물과 기기로 구성되어 유동에 방해 및 간섭이 일어나게 된다. 이러한 원자로 풀 내부의 열유동을 해석하는데 일반적인 상용코드를 사용하게되면 큰 해석영역으로 인하여 많은 해석노드가 필요하게 되므로 인하여 과도한 해석시간이 소요되게 된다. 뿐만 아니라 다양한 기기를 모사하므로 인하여 해석에 많은 어려움을 겪게된다. 따라서 일반적으로 원자로 내의 풀 해석에는 주로 COMMIX 코드를 사용하고 국부적인 해석에는 상용코드를 사용하게 된다.

COMMIX 코드는 원자로 풀해석용으로 개발된 코드로 내부기기의 모사를 간략하게 모델화하여 모사 가능하게 하여 원자로 풀 해석에 뛰어난 장점을 가진다. 현재까지 KALIMER-150에 관한 해석이 정상상태 뿐만 아니라 과도상태해석까지 마무리되어 있다. 따라서 본 연구에서는 COMMIX 코드를 이용하여 현재 연구수행중에 있는 KALIMER-600의 원자로 풀 해석을 위하여 과도상태해석을 하기위한 전단계로써 정상상태 풀 열유동 특성 평가를 수행한다.

2. COMMIX 해석 모델

2.1 기하모델링 및 격자배치

KALIMER-600은 풀(pool)형 액체금속로이다. 원자로는 원자로용기, 배플, 격납용기, 원자로헤드, 중간열교환기(IHX), 펌프, 원자로내부구조물, IHTS piping으로 구성된다. 그림 1, 2는 풀(pool)의 수직 단면과 수평 단면이다.

해석에 사용한 전산코드는 COMMIX-1AR/P[1]를 이용하고, 실린더좌표계를 채택하였다. UIS의 IVTM용 홈과 IVTM의 존재를 무시하고, 구조물의 대칭성을 이용하여 풀(pool)의 90°부분만 해석하였다. 해석대상범위는 반경방향으로 원자로중심과 Air Separator사이, 축방향으로 원자로용기의 바닥에서 고온풀의 소듐 액위면까지, 원주방향으로는 펌프의 중심에서 DHX 영역의 중심까지로 한다. PSDRS를 구성하는 Air Downcomer는 포함하지 않았으며, Air Separator는 단열된 것으로 하였다. 원자로용기 밑바닥의 반구형형상은 무시하였다. 해석영역에서 소듐과 헬륨은 서로 접하고 있지만, COMMIX코드의 기능상 서로 물리적으로 분리되어있어야 하므로 저온풀과 헬륨사이에는 얇은 소듐막이 있는 것으로 가정하였다. 격자간격은 격자면이 물리적으로 의미있는 지점, 즉 배플, 용기, 파이프, 액위면 등의 위치와 일치하도록 배치한다. 반경방향으로는 34개의 노드를 주었고, 이중에서 Support Barrel 안쪽의 노심영역에 10개, 배플과 원자로용기사이의 공간에 2개, 격납용기와 원자로용기사이의 아르곤영역에 2개, Air Separator와 격납용기사이의 공기유로에 2개, 중간열교환기의 튜브측에 1개를 주었다. 원주방향으로는 총 13개의 노드가 주어지고, 축방향으로는 총 39개의 노드가 주어졌고, 가장 위에 위치한 1개의 노드는 소듐, 헬륨 그리고 아르곤영역의 확장소자용(Expansion Cell)으로 주어졌다.

그림 3~6에 격자배치단면이 주어져 있다. 그림에서 실선은 경계면을 나타내고 , 점선은 셀면을 나타낸다. 그림 3은 펌프를 포함하는 수직단면을 나타내고, 그림 4는 중간열교환기를 포함하는 수직단면을 나타내며, 그림 5의 수직면에는 DHX영역에 해당하는 단면이 포함되어 있다. 그림 5는 수평단면에 대한 것으로, 펌프와 IHX그리고 DHX영역은 사각형 단면을 갖는 것으로 모의하였다. 펌프상부 구조물과 DHX 가 존재하는 영역 그리고 UIS상부영역은 해석 영역에서 제외하였다.

2.2 노심영역의 격자배치

증식특성노심에 대한 노심배치도는 그림 7과 같고, 노심은 Blanket이 빠진 Driver Fuel,

Control Rod, Reflector, IVS, Shield 등으로 구성되어 있다. 노심을 구성하는 집합체 Duct는 육각형이므로 실린더 좌표계를 적용하는 해석에서는 동일노심성격의 집합체 그룹을 합하여 그림 8과 같이 동일 면적을 갖는 실린더형태의 면적으로 반경방향 격자간격을 산정한다. 집합체 1개가 차지하는 면적을 산출하기위해 집합체가 차지하는 Pitch간격으로부터 집합체 면적을 계산하면 집합체 Pitch는 161mm이고 단일 집합체면적 A는 22448.2 mm^2 이다. 노심의 중심에 위치한 USS부터 시작하여, 반경방향으로 동일성격의 집합체별로 그룹화하여 동일성격 집합체의 면적을 합하여 총면적을 구하고, 이에 상응하는 환형공간의 등가면적 외부반경을 다음과 같이 구한다.

동일성격 집합체의 총면적

$$A_{total} = \pi(R_{out}^2 - R_{in}^2)$$

따라서,

$$R_{out} = \sqrt{\frac{A_{total}}{\pi}}$$

계산된 동일성격 집합체 각각의 외부반경은 다음과 같다.

① USS (집합체 개수 : 1개)

$r = 0.085m$

② Inner driver fuel (90개)

$r = 0.806m$

③ Middle driver fuel (108개)+ Control rod(12개)

$r = 1.228m$

④ Outer driver fuel (120개)

$r = 1.538m$

⑤ Reflector(66개)+B4C Shield(72개)+IVS(114개)+shield(96개)

$r = 2.203m$

⑥ 나머지 Support Barrel까지[2]

$r = 2.88m$

USS의 반경과 Middle driver fuel 구간을 격자 하나씩 잡고 그외 네 구간은 각각 2개의 격자를 배치하므로 전체적으로 노심영역에 총 10개의 격자를 배치하였다.

2.3. 입력자료를 위한 계수 결정 및 열유동 모델

2.3.1 노심영역별 다공성계수 및 유속결정

노심냉각에 필요한 유량을 노심영역별로 분배하기위해서는 노심입구의 오리피스를 설계하여야 한다. 오리피스의 손실계수를 결정하기위해서는 노심입구에서 출구사이의 총 압력손실에서 연료봉 bundle에 의한 압력강하치를 제외한 나머지 압력손실치를

오리피스에서 강하시키는 것으로 하여, $\Delta P = k\frac{\rho v^2}{2}$ 에서 손실계수 k 를 결정할 수 있다. 이를 위하여 유속을 결정하여야 하며, 유속결정을 위해서는 유량과 다공성계수가 필요하다. 노심영역별 다공성계수는 앞 절에서 구한 격자면적과 격자간격 배치시 주어진 집합체의 유동면적으로 구하고, 각각의 유속은 참고문헌 2와 3에 주어진 Orifice Group별 집합체 유량에서 구할 수 있다. 이를 위한 가정으로 노심의 모든 집합체 제원은 동일하고, Bundle의 유로면적은 0.0071 m^2[3][4]로 하며 USS 및 제어집합체로는 소량의 유량이 흐르거나, 흐르지 않으므로 무시한다. 여기서 USS는 Inner driver fuel 영역에 포함하여 다공성계수를 계산한다. 소듐밀도는 노심입구 소듐온도 366.2℃의 859 kg/m^3을 적용한다.

격자면적

$$A_{grid} = \pi r^2$$

유로면적 (Bundle의 유로면적과 집합체 개수의 곱)

$$A_{flow} = 0.0071 \times N$$

따라서, 다공성 계수와 유속은 다음과 같이 구해진다.

$$\gamma = \frac{A_{flow}}{A_{grid}}$$

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A_{flow}}$$

① Inner driver fuel

Porosity $\gamma = 0.3131$

유속 $v = 4.3123(m/s)$

② Middle driver fuel

Porosity $\gamma = 0.2844$

유속 $v = 4.2909(m/s)$

③ Outer driver fuel

Porosity $\gamma = 0.3163$

유속 $v = 3.8548(m/s)$

④ Reflector+B4C Shield+IVS+Shield

Porosity $\gamma = 0.3161$

유속 $v = 0.0694(m/s)$

⑤ Core외경에서 Support Barrel사이

Porosity 와 유속은 ④와 동일한 것으로 가정한다

2.3.2 압력강하 및 손실계수

PHTS 계통내 주압력손실은 노심, 방출배관, IHX Shell, IHX 출구노즐에서 나타나므로[5], 이에 따라 손실계수를 설정하고, 노심입구 오리피스의 손실계수는 앞 절에서 언급한 방법으로 결정한다.

1) 노심

노심의 총압력손실은 0.4874 MPa으로 한다.[4] 연료봉 bundle에 의한 압력강하치의 산정은 노심의 집합체종류에 상관없이 duct와 pin의 제원은 모두 동일하다고 가정하고, 동일한 압력강하 상관식을 적용한다. 마찰계수 상관식은 Blasius 상관식[6]을 적용하고, pin의 wire wrap영향은 수정인자 M 을 이용하면,

$$f = M\ f_{smooth}$$

$$f_{smooth} = \frac{0.316}{\mathrm{Re}^{0.25}}$$

$$M = \left(\frac{1.034}{\left(\frac{P}{D}\right)^{0.124}} + \frac{29.7\left(\frac{P}{D}\right)^{6.94}\mathrm{Re}^{0.086}}{\left(\frac{H}{D}\right)^{2.239}} \right)^{0.885}$$

pin외경 D = 7.4 mm=0.0074m

$$\frac{pin\ \ pitch}{D} = \frac{P}{D} = 1.203$$

$$\frac{wire\,wrap\,lead}{D} = \frac{H}{D} = \frac{187.2}{7.4} = 25.3$$

따라서

$$M = 1.183$$

$$f = (1.183)\frac{0.316}{\mathrm{Re}^{0.25}} = \frac{0.3738}{\mathrm{Re}^{0.25}}$$

pin영역의 압력강하가 발생하는 길이 L은

$$L = 0.5 \times Z(6) + Z(7) + \cdots + Z(14) + 0.5 \times Z(15)$$
$$= 0.5 \times (0.4) + 3.7 + 0.5 \times (0.5) = 4.15\ (m)$$

여기서 구한 마찰계수식과 길이를 이용하여 bundle의 압력강하치를 계산하고, 오리피스의 손실계수를 결정한다.

결정된 손실계수의 값은 다음과 같다.

① Inner driver fuel

오리피스 손실계수 $k = 38.84$

② Middle driver fuel

오리피스 손실계수 $k = 46.84$

③ Outer driver fuel

오리피스 손실계수 $k = 53.63$

④ Reflector + IVS + Shield

오리피스 손실계수 $k = 3821.51$

⑤ Core외경에서 Support Barrel사이

이 지역의 유동은 거의 없으므로 오리피스의 손실계수는 임의의 큰 값으로 가정한다.

오리피스 손실계수 $k = 10 \times 10^6$

2) 방출배관

방출배관의 손실계수는 90° 엘보우 손실계수는 1.18, 급작팽창 손실계수는 2.0 이다.[5]

3) IHX 및 펌프

IHX shell에서 유량변화에 따라 일어나는 ΔP 는 baffle을 통과하는 유량에 의한 ΔP, 횡류에 의한 ΔP, 평행류에 의한 ΔP, leakage에 의한 ΔP 등 여러 요인이 있으나, 본 해석에서는 bundle사이의 ΔP 와 같은 $\Delta P_{IHX\ shell} = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho v^2}{2}$ 함수형태를 설정한다.

IHX Shell측의 압력강하는 24.7 KPa이다.[7]

압력강하가 발생하는 길이 L은

$$L = 0.5Z(IHX1) + Z(IHX2) + \cdots + Z(IHX(n-1)) + 0.5Z(IHX(n))$$
$$= 0.5 \cdot Z(16) + Z(17) + \cdots + Z(31) + 0.5 \cdot Z(32)$$
$$= 0.5(0.25) + 5.35 + 0.5(0.15) = 5.55\ (m)$$

셀측유량

$\dot{m}_{shell} = 2165.43$ kg/s

평균밀도

$\rho = 842.6$ kg/m^3

셀 내경

$D_{id} = 2.124$ m

셀 내부면적

$$Area = \frac{\pi D_{id}^2}{4} = 3.5432 \text{ m}^2$$

전열관 외경

d = 0.0127 m

전열관 개수

n = 6912 개

전열관에 의한 blockage면적은

$$Area = (6912)\frac{\pi d^2}{4} = (6912)\frac{\pi \times 0.0127^2}{4} = 0.8756 \ \text{m}^2$$

따라서 유동면적은

$$A_{flow} = 3.5432 - 0.8756 = 2.6676 \ m^2$$

셀내부 유속은

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A_{flow}} = \frac{2165.43}{(842.6)(2.6676)} = 0.9634 \ m/s$$

수력직경 및 Reynolds 수는

$$D_h = \frac{4A_{flow}}{P_w} = \frac{4 \times 2.6676}{6912 \times \pi \times (0.0127) + \pi \times (2.124)} = 0.0378 \ m$$

$$\text{Re} = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{(842.6) \times (0.9634) \times (0.0378)}{2.5227 \times 10^{-4}} = 121633$$

IHX 내부유동은 조건에 따라 난류 혹은 층류유동이 되므로 각각의 경우에 대한 모형계수값을 다음과 같이 구한다. IHX내부유동은 조건에 따라 난류 혹은 층류유동이 되므로 각각의 경우에 대한 모형계수값을 다음과 같이 구한다.

먼저 난류의 경우에 마찰계수 상관식을 $f = \frac{C_t}{\text{Re}^{0.25}}$ 형태로 설정하면

$$\Delta P_{IHX\ shell} = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} = f \frac{5.55}{0.0378} \frac{842.6 \times (0.9634)^2}{2} = 24.7 \times 10^3$$

따라서 $f = 0.4302$, $C_t = 8.034$ 이다.

그리고, 층류의 경우 마찰계수 상관식을 $f = \frac{C_l}{\text{Re}}$ 형태로 설정하고, 층류와 난류사이의 경계 레이놀즈수를 1200로 가정하면 $\frac{C_l}{\text{Re}} = \frac{C_t}{\text{Re}^{0.25}} = \frac{8.034}{\text{Re}^{0.25}}$ 이므로 $C_t = 1638.0$ 이다.

IHX의 출구노즐에서의 손실계수는 2.0으로 한다. 또한 펌프의 경우 펌프입구에서의 손실계수는 0.5이고, 펌프내 180° 회전에 의한 손실계수는 1.0 이다.[5]

4) Core Inlet Plenum과 Horizontal Baffle

Core Inlet Plenum 내부의 손실계수는 관내부 유동경우의 1/500배이고 Horizontal Baffle의 경우에는 Porosity = 0.2일때 손실계수를 60[8]으로 하였다.

2.3.3 열적구조물

유체내부의 구조물은 유체와 에너지교환이 이루어지고, 유체의 온도분포에 영향을 미친다. 이를 모의하기위해 COMMIX는 열적구조물모형을 이용한다. 칼리머에서 열은 노심,

펌프에서 발생하고, IHX, PSDRS, 상부경계면을 통하여 제거된다. 노심의 단위체적당 열발생율은 참고문헌 2에 주어진 집합체출력을 근거로 계산한다. 전체출력대비 출력비율은 노심영역에서 98.689%, 나머지 부분에서1.311%[4]이고, 전출력이 1589.3 Mwt이므로 각 영역의 출력은 다음과 같다.

① Inner driver fuel

$$Q = 547.638\,MWt$$

② Middle driver fuel

$$Q = 625.338\,MWt$$

③ Outer driver fuel

$$Q = 407.7\,MWt$$

④ Reflector + IVS + Shield

$$Q = 8.624\,MWt$$

각 영역의 단위체적당 발열량은 각 영역의 출력을 연료봉 체적으로 나눈 값이다. Shield, 차폐체, 반사체 집합체는 동일제원의 pin을 갖는 집합체로 가정하였다. 노심 집합체간의 열전달을 모의하기 위해서 Duct사이 틈새의 소듐은 거의 정체되어있으므로 전도열전달이 이루어지는 열적구조물 재질중의 하나로 모의하였다. duct외부표면사이 간격은 4mm이고, duct의 두께는 3.7mm이다. Support Barrel 외부의 고정차폐체는 두께가 두꺼운 원통모양의 구조물이나, 단위체적당 열출력은 봉형상으로 가정하고, 제원은 앞 절의 반사체 등의 것과 같다고 가정하여 산정하였다.

펌프 1 대당 발생열은 8MWe이다.[6]

2.3.4 대류열전달계수[1]

① For sodium flows around fuel pins

$$Nu = 5.0 + 0.401\,\mathrm{Re}^{0.45}\,\mathrm{Pr}^{0.45}$$

② For sodium flows in IHX tube side

$$Nu = 5.0 + 0.025\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.8}$$

③ For sodium flows in IHX shell side

$$Nu = 6.5484 + 0.2809\,\mathrm{Re}^{0.653}\,\mathrm{Pr}^{0.653}$$

④ For sodium flows over flat plates

$$Nu = 5.0 + 0.025\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.8}$$

⑤ For sodium flows inside support barrel surface

$$Nu = 5.0 + 0.172\,\mathrm{Re}^{0.45}\,\mathrm{Pr}^{0.45}$$

⑥ For argon flows over flat plates

$$Nu = 1.0 + 1.22\,\mathrm{Re}^{0.457}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$$

⑦ For air flows over flat plates

$$Nu = 1.0 + 1.22\,\mathrm{Re}^{0.457}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$$

2.3.5 복사열전달과 난류모델

배플과 원자로용기, 원자로용기와 격납용기, 격납용기와 Air Separator사이의 복사열전달모의시 안쪽의 동심원통에서 바깥쪽 동심원통으로 향한 View Factor값은 무한평판의 경우와 같이 1로 한다. 원자로용기와 격납용기, 격납용기와 Air Separator 면의 emissivity는 0.8 이다.[9]

해석에 적용한 복사면은 총 48개이며, 배플과 원자로용기사이에는 24 개, 원자로용기와 격납용기사이에는 18 개, 격납용기와 Air Separator사이에는 6 개를 적용하였다.

COMMIX의 난류모델중의 하나인 constant turbulent diffusivity 모델을 채택하였다.

2.4. 운전 및 경계조건

정상상태 100% 출력운전시 계통작동조건은 IHTS total flow rate이 6769.0 kg/sec이므로 IHX의 튜브측 입구유속은 2.943 m/sec 이다. 그리고, IHX의 튜브측 입구온도는 계통작동조건[7]에 의하면310.7℃이나, COMMIX의 first-order finite-difference formulation에 기인한 수치적 에러[1]로 인하여 PHTS의 평균온도가 높게 계산되므로 IHX에 보다 많은 격자를 배치하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 이를 보정하기 위해 IHX의 튜브측 입구온도를 307.7 ℃으로 하였다.

격납용기와 air separator 사이 공간에서 공기의 입구유속은 3.176 m/sec이며 이 때 공기입구온도는 40 ℃이다.

3. 결과 및 토의

전반적인 계산결과를 검토하기 위해 전체 에너지평형을 보면 1/4 계산 모형에서 노심과 펌프에서 각각 397.325 MW, 4.0 MW의 열이 발생하고, IHX를 통하여 400.125 MW, PSDRS를 통하여 1.2 MW의 에너지가 제거되었다.

해석결과 노심입구온도는 366.2℃로, 노심출구의 유량가중치에 근거한 평균온도는 510℃로 나타나 원자로 풀 내에서 전반적인 에너지 평형을 만족하였다. PSDRS의 공기의 온도는 입구공기온도가 40℃일 때 출구온도가 163.7℃로 나타난다.

그림 9는 IHX가 위치한 수직단면(J=8)의 유동장 온도분포이다. 온도는 노심 집합체영역을 통과하면서 높아지며 노심출구와 UIS 밑면 사이에서 혼합이 잘 이루어져 512 514℃ 사이로 거의 균일하고 이후 고온풀에서 평균온도가 510℃로 균일한 분포를 보인다. IHX의 Primary계통으로 유입된 소듐은 IHX 내부의 열교환으로 인해 온도가 감소하여, 저온풀에서는 366℃의 균일한 온도분포를 보이고 있다. IHX 아래영역에서는 유동을 저해하는 요인이 없으므로 인해 뛰어난 혼합효과로 인해 온도분포가 고르게 나타난다.

그림 10은 동일 수직단면의 속도분포이다. 원자로 풀 내에서 소듐의 유로는 inlet

plenum에서 노심을 거쳐 고온풀을 통과하고, IHX에서 IHX 튜브사이를 지나 아래로 향한 후 저온풀 내에서 잘 섞여지고 펌프로 유입된 뒤 방출 배관을 통과하고, 다시 inlet plenum으로 유입하여 PHTS의 한 회로를 이룬다.

4. 결론 및 향후계획

KALIMER-600 과도상태해석을 위한 전 단계로 정상상태에서의 원자로 풀 열유동 해석을 수행하였다. 원자로 풀 내부에서의 에너지 평형 뿐만 아니라 혼합효과가 비교적 잘 나타나 우려하던 열성층현상은 나타나지 않았고 이러한 결과는 과도상태해석에 입력자료로 활용할 것이다.

하지만, KALIMER-600에서는 KALIMER-150에 있던 flow guide를 제거하였는데 정상운전시에는 IHX 출구를 통해 저온풀이 상당히 잘 섞여지는 것을 볼 수 있으나 과도상태가 되면 IHX의 유량감소에 따른 유동의 변화에 따른 유동안정성의 문제를 확인할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] COMMIX-1AR/P Volume 2; User's Guide, Sep.,1992
[2] INERI과제 수행을 위한 KALIMER-600 설계자료, IOC-CD-005-2003, Jun. 2003
[3] 원자로 pool유동특성 분석보고서, KALIMER/FS200-AR-02/1999, Sep.,1999
[4] 신개념 안전성 예비분석용 노심 설계자료, IOC-CD-008-2003, Nov. 2003
[5] KALIMER PHTS계통압력손실, KALIMER/FS200-CN-03/1999, Apr. 1999
[6] Fast Breeder Reactors, A.E. Walter, A.B. Reynolds, Pergamon Press
[7] 유체 및 계측제어분야 안전해석 입력자료, IOC-SA-012-2003, Dec. 2003
[8] Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd Edition, I.E. Idelchik
[9] KALIMER 원자로헤드 열전달특성 분석보고서, KALIMER/FS200-ER-06/1999, 한국원자력연구소, KALIMER개발팀, Mar., 3, 1999

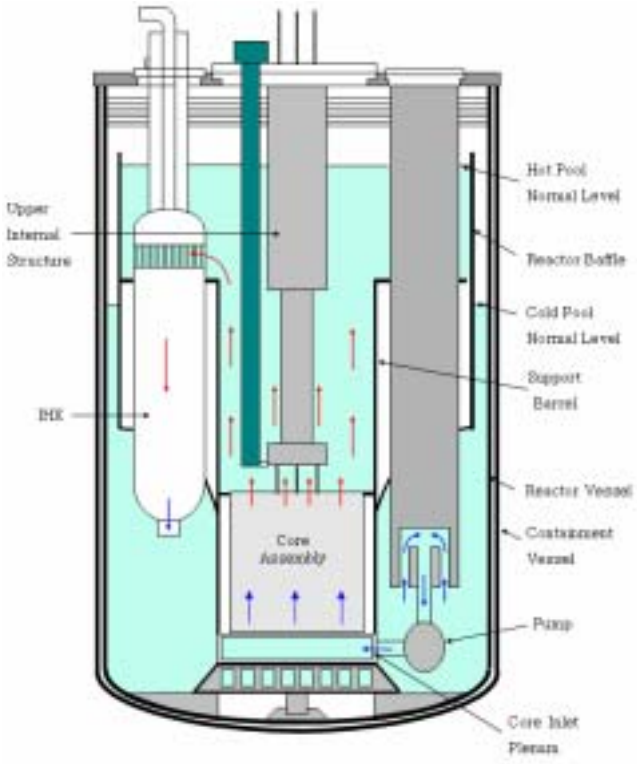

그림 1. 1 차계통 정상 소듐유로

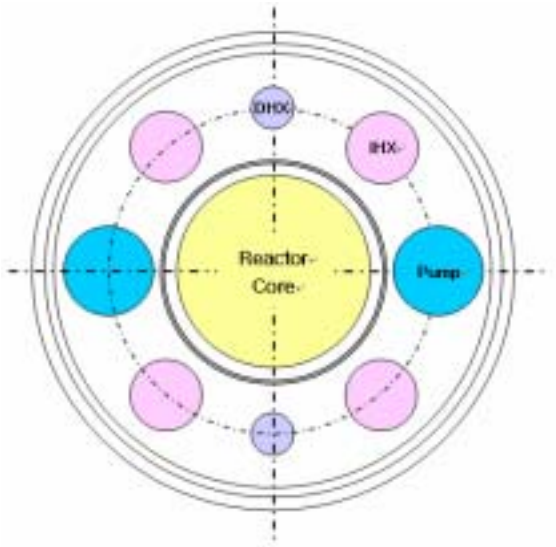

그림 2. 1차계통 펌프와 중간열교환기의 수평단면배치도

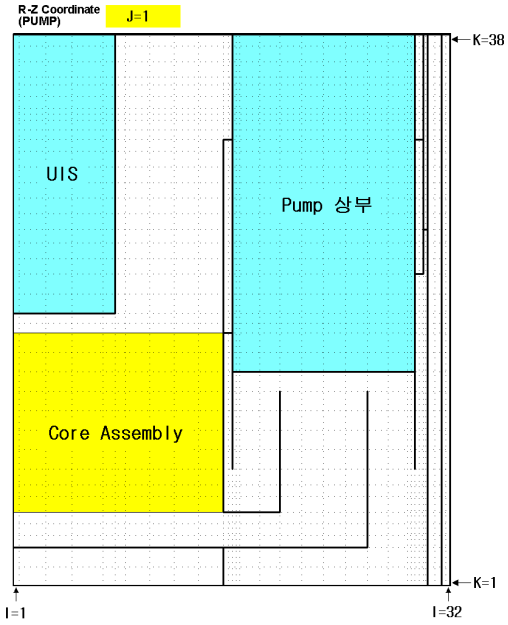

그림 3 COMMIX 해석모델의 수직단면 (J=1)

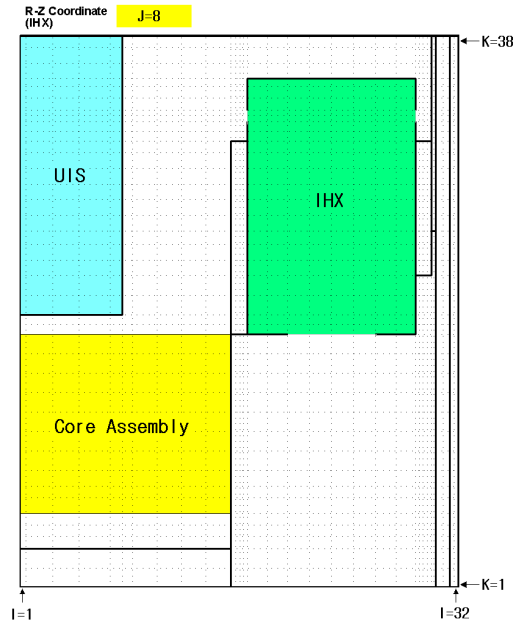

그림 4 COMMIX 해석모델의 수직단면 (J=8)

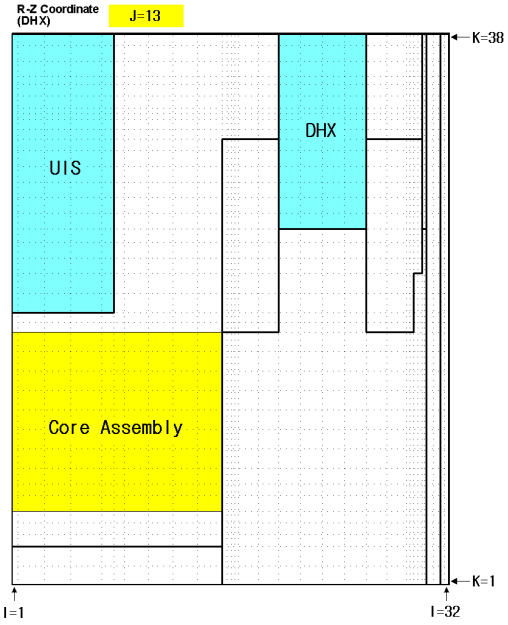

그림 5 COMMIX 해석모델의 수직단면 (J=13)

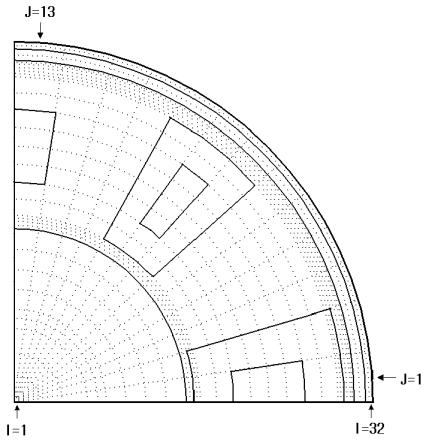

그림 6 COMMIX 해석모델의 수평단면

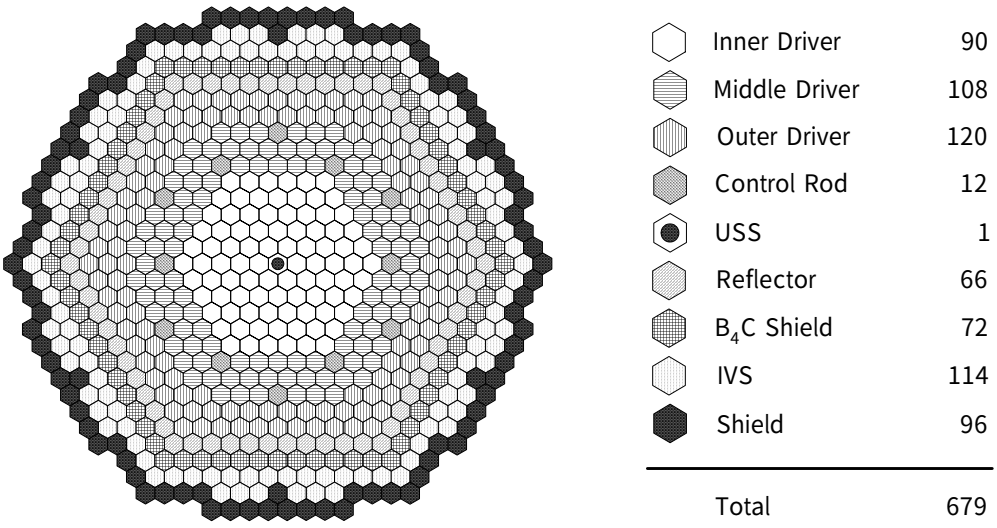

그림 7 KALIMER 증식특성노심배치도 (600 MWe)

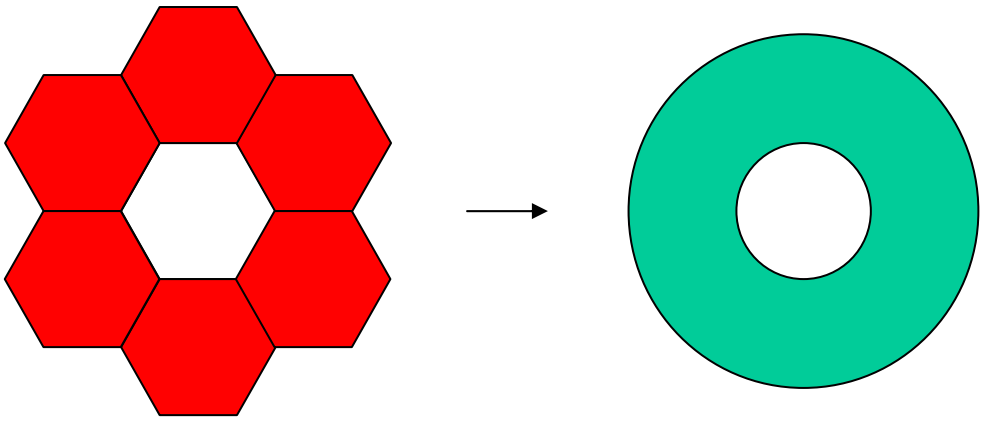

그림 8. 집합체의 등가면적

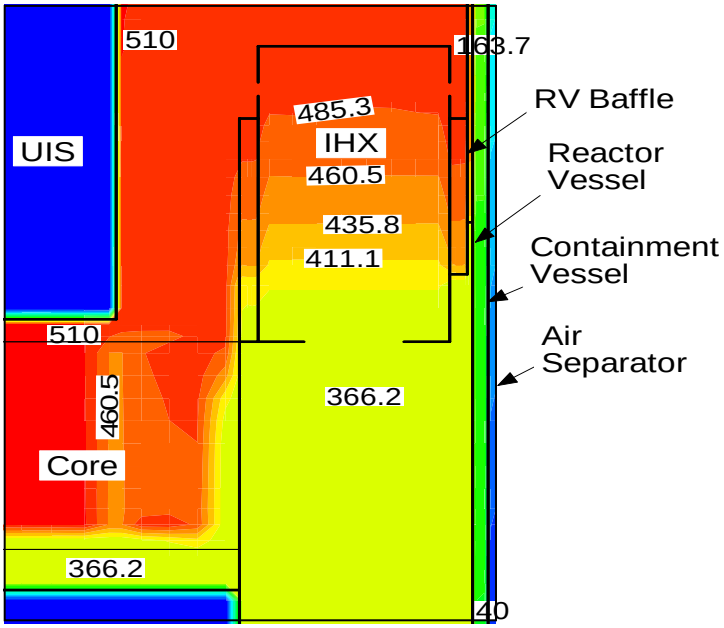

그림 9 수직단면의 유동장 온도분포(J=8)

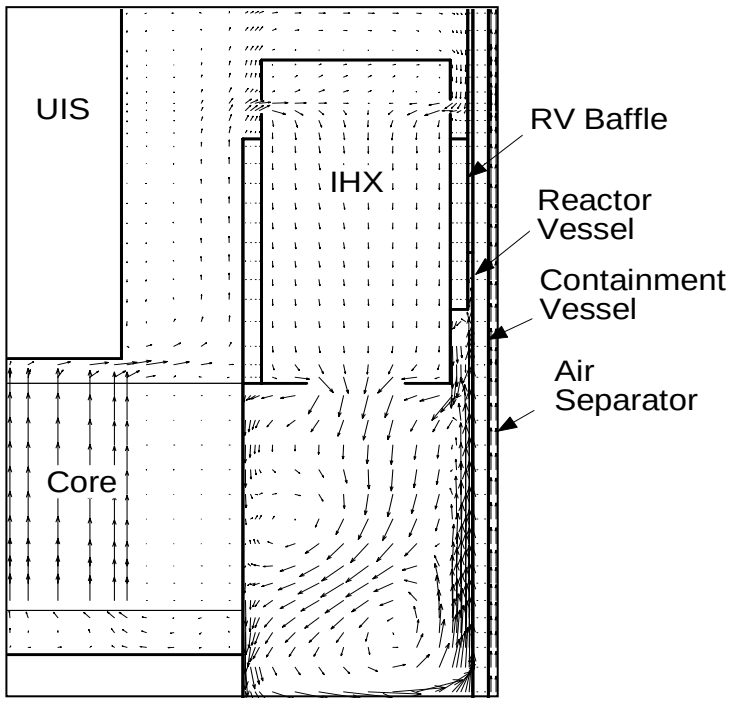

그림 10 수직단면의 유동장 속도분포(J=8)