

SMART 자기가압기 주변 및 중앙공동 내의 열수력적 특성 분석

강형석, 김주평, 윤주현, 김환열, 이두정

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

SMART는 원자로의 압력을 조절하는 가압기를 저온상태로 유지하면서 가압기내의 냉각수 포화증기 및 질소기체의 혼합매질을 이용하여 피동적으로 원자로의 압력을 조절하는 방식으로 개념설계 되었다. 자기가압기를 저온상태로 유지하기 위해 주변공동 바깥쪽인 가압기 외벽에 습식단열재를 설치하였고 주변공동 내에서는 중앙공동의 밑부분인 냉각수 영역을 냉각기가 환형모양으로 감싸면서 냉각하고 있다. 이러한 구조를 갖는 자기가압기는 자연대류 및 온도성층화가 발생할 수 있으므로 가압기의 열수력적 특성을 분석하여 개념설계의 타당성을 검증하고 현재 진행중인 냉각기 크기산정 작업에 필요한 평가자료를 생산할 필요가 있다. 따라서 범용 전산유체코드인 CFX4.2를 사용하여 해석을 수행하였다. 분석결과 자연대류 관점에서 보수적인 가정하에 계산을 수행하였음에도 자연대류가 발생하여 중앙공동의 질소기체 온도가 지속적으로 상승되지 않아 개념설계의 타당성을 검증하였으나 전체적인 열전달 관점에서는 냉각기를 질소영역까지 확대하는 방안에 대한 구체적인 분석이 필요한 것으로 평가되었다.

Abstract

The pressure in the SMART primary system is automatically regulated by thermo-dynamic interaction of water/steam and nitrogen gas in the pressurizer and by maintaining low PZR temperature. For this purpose, a PZR cooler is installed in the intermediate cavity and a wet thermal insulator is placed between the PZR and the primary system to reduce conductive heat transfer. The water/steam and nitrogen gas in the PZR tend to be stratified or circulated naturally. Therefore the thermal hydraulic characteristics of PZR should be investigated to verify the design feature of PZR and to produce evaluation data needed for cooler thermal sizing. The computational fluid dynamics code, CFX4.2, is used for the investigation. The results show that the temperature of nitrogen gas in the end cavity does not increase continuously due to development of natural convection in the cavity, verifying the design feature of PZR. However the investigation for extending the cooler to the upper part of intermediate cavity needs to be conducted.

1. 서론

SMART는 원자로의 압력을 조절하는 가압기를 저온상태로 유지하면서 가압기내의 냉각수 포화증기 및 질소기체를 혼합한 가압매질을 이용하여 피동적으로 원자로의 압력을 조절하는 방식으로 개념설계 되었다[1,2]. 따라서 자기가압기를 저온상태로 유지하기 위해 주변공동 바깥쪽인 가압기 외벽에 습식단열재를 설치하였고 주변공동 내에서는 중앙공동의 밑부분인 냉각수 영역을 냉각기가 환형모양으로 감싸면서 냉각하고 있다. 이와 같이 개념설계된 자기가압기는 전체적인 구조상 주변공동 내의 냉각수는 환형공동쪽 및 주변공동 밑바닥을 통하여 원자로냉각재의 열을 전달받고, 가압기 내벽 상부를 통해서 중앙공동 상부의 질소기체로 열전도 현상에 의해 열을 빼앗기고 하부에서는 냉각기에 의해서 냉각된다. 그리고 중앙공동 상부의 질소기체는 가압기 내벽을 통해서 주변공동으로부터 열을 전달받고 최상부의 원자로용기 헤드로 열을 빼앗기며, 하부의 냉각수는 중앙공동 밑바닥으로부터 열을 전달받고 가압기 내벽 바깥쪽의 냉각기에 의해 냉각된다. 이러한 가압기 내의 열전달 메카니즘은 자연대류 현상을 발생시켜 열혼합이 일어날 수 있으며 냉각기가 주변공동 하부에만 위치함으로 인해 주변 및 중앙공동 내의 냉각수와 질소기체를 성층화 시켜 질소기체 온도가 어느정도 상승할 수 있다. 만약 온도성층화로 인해 질소기체의 온도가 어떤 한계치 이상으로 상승하면 원자로계통의 압력이 상승할 수 있고 질소기체의 용해도도 증가하여 증기발생기 열효율 측면과 원자로계통 성능 관점에서 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 기 수행된 자기가압기 영역별 온도분포 해석 결과를 바탕으로 자기가압기 내의 열수력적 특성을 분석하여 자연대류현상이 원자로계통 압력을 결정하는 질소기체 온도에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하고 개념설계된 자기가압기 설계 타당성을 검증 할 필요가 있다[3,4]. 또한 이런 분석을 통해서 현재 고려중인 중앙공동 냉각수 영역만 냉각하도록 되어있는 냉각기 위치를 질소기체 영역까지 확대하는 방안에 대해서 평가자료를 도출 할 수 있다. 이와 같은 자기가압기 열수력적 특성분석을 위해서는 범용 전산유체코드인 CFX4.2를 사용하였다.

2 SMART 자기가압기 설계특성

SMART의 가압기는 일체형원자로 특성상 원자로용기 안에 위치시키기 위해서 가압기의 체적을 최소화시켰고 상용로와 같은 복잡한 제어계통을 제거하기 위해 피동적으로 작동 되도록 설계하였다. 또한 포화증기 및 질소가스의 혼합매질을 사용해서 가압하여 원자로 노심출구온도에 해당하는 포화증기압만을 이용할 경우 발생할 수 있는 노심에서의 냉각수 비등을 방지하였다[1,2]. 이것은 질소가스를 가압기 내에 주입하여 가압기 내의 압력을 가압기 내의 냉각수 온도에 해당하는 증기분압 및 질소가스의 분압의 합으로 하여 노심 출구온도에 해당하는 포화증기압보다 높게 유지함으로써 가능하다. 그리고 가압기가 원자로용기내에 위치함으로 인해 가압기내의 냉각수 온도가 노심출구에서의 냉각수 온도와 같을 수 있으며, 이로 인해 가압기 내의 냉각수 압력이 원자로 천이운전시 발생하는 노심출구온도 변화에 매우 민감하게되어 압력변화가 상당히 크게된다. 따라서 본 자기가압기 냉각수의 온도를 저온

으로 유지하는 방법을 채택하였다. 이를 위해서 가압기 외벽에 습식단열재를 설치하여 일차 계통 냉각수로부터 외벽을 통한 열전달 양을 최소화하였고 가압기 내벽에는 튜브형태의 냉각기를 환형모양으로 설치하여 가압기를 냉각시킴으로써 가압기내의 냉각수를 항상 저온으로 유지하는 개념을 채택하였다. SMART 저온 자기가압기의 개략도 정면도는 각각 그림 1 과 그림 2에 나타나 있다. 가압기의 구조는 중앙공동, 주변공동, 가압기 내벽, 가압기 외벽, 밀림관, 습식단열재 및 냉각기로 구성되며, 질소 가스탱크는 배관을 통하여 중앙공동에 연결된다. 습식단열재는 가압기 외벽 바깥쪽에 설치되어 있으며 냉각기는 가압기 내벽 바깥부분을 따라서 튜브가 환형모양으로 내벽주위를 감싸도록 설치되어 있으며, 튜브내를 흐르는 약 60℃ 정도의 냉각수는 기기냉각계통으로부터 공급받는다. 정상운전 중 환형공동은 고온의 냉각수로 가득차 있으며 이 냉각수의 온도는 원자로노심 출구온도와 동일하다. 반면 냉각기가 설치되어 있는 주변공동은 주위에 습식단열재가 설치되어 있고 내부에 냉각기가 설치되어 있어서 온도가 가장 낮게 유지되고 환형공동과 주변공동의 연결은 환형공동의 가장 상부와 주변공동의 바닥이 2차 밀림관을 통하여 서로 연결되어 있다. 실제 가압기 역할을 수행하는 중앙공동은 내부에 50:50으로 증기와 고압질소 혼합상태인 기체부분 및 저온의 냉각수가 서로 공존한다. 주변공동과 중앙공동의 연결은 주변공동의 가장 상부와 중앙공동의 바닥이 1차 밀림관을 통하여 서로 연결되어 있다. 중앙공동 상부는 고압질소 탱크와 연결되어 있으며 정상운전시 질소탱크와 연결하는 밸브를 차단시키거나 열어 놓을 수 있다. 원자로 가열운전중 일차계통 냉각수 온도가 상승하면 일차계통 냉각수가 2차 밀림관을 통하여 주변공동으로 유입되고, 주변공동내의 저온 냉각수는 중앙공동으로 밀려들어가면서 주변공동의 냉각수 온도가 조금 상승하나, 곧 냉각기에 의하여 다시 냉각된다. 따라서 일차계통 냉각수의 온도변화가 중앙공동의 온도를 변화시키지 못하며, 이에 따라 가압기 내부 온도는 항상 일정하게 유지되므로 가압기내의 증기분압 변화가 발생하지 않도록 하였다[1.2].

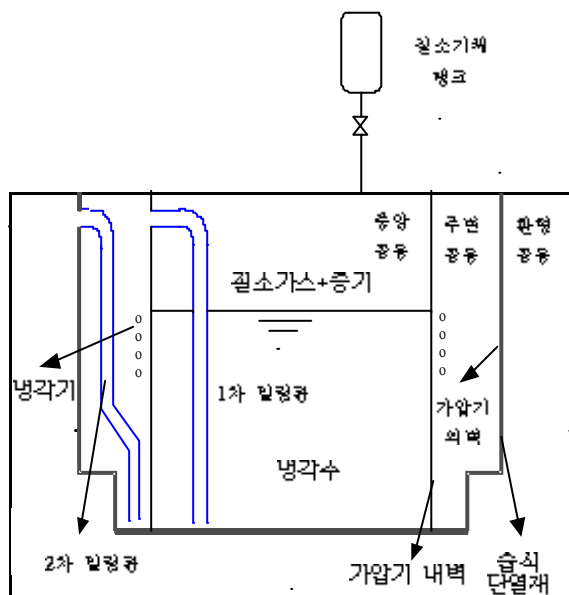


그림 1 저온 자기가압기 개략도

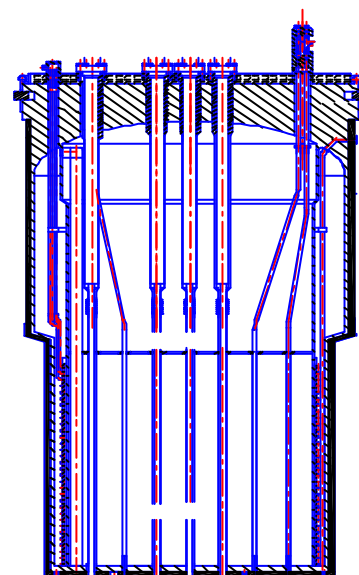


그림 2 저온 자기가압기 정면도

3. 수치해석

3.1 지배방정식 및 계산알고리즘

본 계산에 사용된 범용 전산유체코드인 CFX4.2는 경계밀착좌표계(body fitted coordinate), 제어체적방법(control volume method), 비엇물림격자(non staggered grid), 정렬 격자(structured grid)와 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 알고리즘을 사용한다. 본 계산은 자기가압기 주변 및 중앙공동 내의 냉각수와 질소기체의 자연순환 유동등의 열수력적 특성을 평가하기 위한 것으로 Navier-Stokes 운동량 방정식, 에너지방정식, k-ε난류방정식, Boussinesq 가정과 multi-phase homogeneous 모델을 사용하여 유동장을 모델링하였다. Boussinesq 가정은 지배방정식에서 부력에 의한 체적항(body force term)을 제외한 다른 항에서는 밀도가 일정하다고 가정하며 체적항은 식 (1)과 같이 열팽창계수 β를 이용하여 식 (2), (3), (4), (5)와 같이 근사한다. Multi-phase homogeneous 모델은 중앙공동 안에서 자유수면을 형성하고 있는 질소가스와 냉각수의 유동장을 모사하기 위한 것으로 체적비만 식 (6)과 같이 각 상의 연속방정식을 풀어서 구하고 나머지 해는 상의 구분없이 물성치 값을 평균하여 동일하게 같이 구하며 상간의 질량 및 에너지 전달은 없다고 가정한다.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (\rho - \rho_o) g \cong -\rho_o \beta (T - T_o) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \otimes V) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla V) = -\rho_o \beta (T - T_o) - \nabla P + \nabla \cdot [\mu_{eff} (\nabla V)^T]$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V k) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = P + G - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \varepsilon) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] = C_1 \frac{\varepsilon}{k} [P + C_3 \max(G, 0)] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$G = \frac{\mu_{eff}}{\sigma_T} \beta g \cdot \nabla T - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_Y} \alpha g \cdot \nabla Y \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (\gamma_\alpha \rho_\alpha V_\alpha) = 0 \quad \sum_{\alpha=1}^{N_p} \gamma_\alpha = 1 \quad (6)$$

γ_α : Phase volume fraction

3.2 해석대상 격자

본 유동장을 모사하기 위한 해석대상 격자는 그림 3과 같이 CFX의 전처리기인 CFX-Meshbuild를 이용하여 주변 및 중앙공동과 가압기 내벽을 2차원으로 모사하였다. 본

해석대상 격자에서는 계산상의 편리를 위하여 주변공동 바깥쪽의 습식단열재 및 외벽과 주변 및 중앙공동의 윗부분에 있는 원자로용기 헤드 구조물을 고려하지 않았으며 윗부분의 모양도 실제와 같이 곡선으로 처리하지 않고 직선모양으로 가정하였다. 또한 주변공동 안에 있는 냉각기는 냉각기를 모사하는 블록을 형성하지 않고 경계조건으로 처리하였다. 이와 같이 생성된 격자의 총 격자 셀 수는 9000 셀이며 블록에 따른 격자 수는 표 1과 같다.

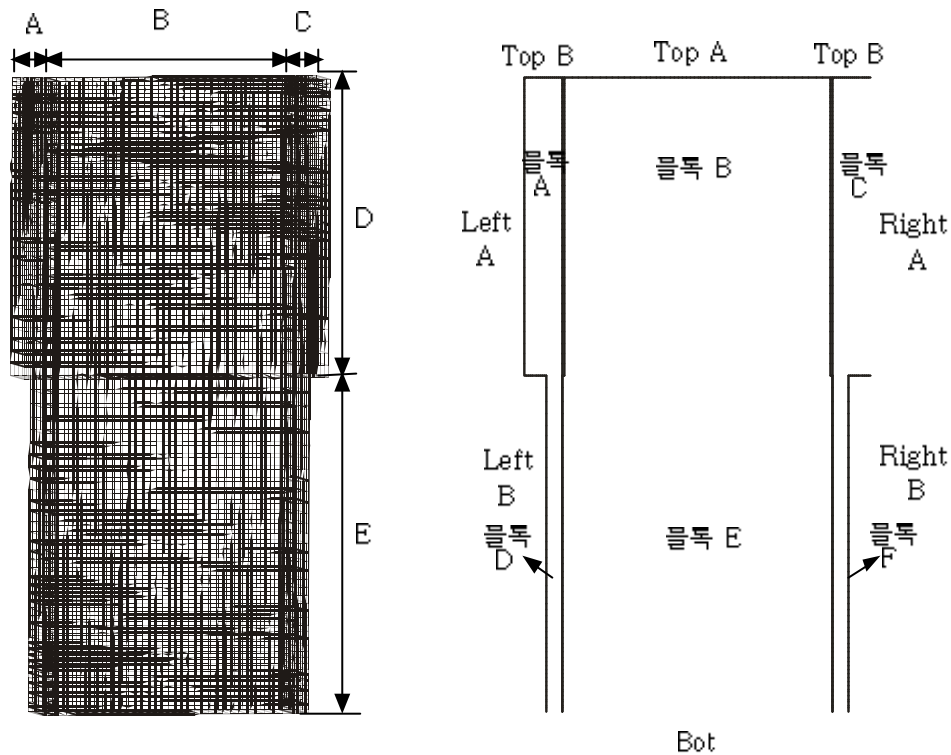


그림 3 해석대상 격자

표 1 격자 셀 수와 기하학적인 자료

항 목	주변 및 중앙공동 격자	
	격자 셀 수	거 리 (m)
A	20	0,22
B	50	1,60
C	20	0,22
D	50	1,99
E	50	2,25

3.3 경계조건 및 해석방법

주변공동 및 중앙공동 내의 자연순환 현상은 밀폐된 공간에서 온도차이에 의한 부력으로 유동이 발생한다. 따라서 본 해석에서 입구조건이나 출구조건은 필요하지 않으며 경계조건

으로 벽면 온도조건만 필요하고 각 블록의 초기온도를 User FORTRAN를 사용하여 초기조건으로 주었다. 여기서 벽면 온도조건과 각 블록의 초기조건은 기 수행된 자기 가압기 영역별 온도분포 계산결과를 활용하여 습식단열재와 가압기 내외벽의 열전도를 고려하여 자연대류 관점에서 보수적으로 주었으며 벽면 온도조건과 각 블록의 초기조건은 표 2와 같다[3,4]. 또한 본 해석은 계산의 수렴성을 향상시키기 위해 천이과정으로 계산결과가 큰 변화가 없을 때까지 1×10^{-3} 초 시간간격으로 약 50초 정도 계산을 수행하였고 false time step을 사용하였다. 각 시간간격에서 질량보존의 오차가 1×10^{-12} 이하가 될 때까지 반복계산을 수행하였다.

표 2 벽면 온도조건 및 초기조건 (단위 : °C)

항 목	초기조건	항 목	경계조건
블록 A	250	Left A	270
블록 B	170	Left B	270
블록 C	250	Right A	270
블록 D	80	Right B	270
블록 E	90	Top A	150
블록 F	80	Top B	230
가압기 내벽 열전도 값	40 W/mK	Bot	270

3.4 해석결과

SMART 자기가압기 주변 및 중앙공동 내에서의 자연순환유동 발생여부 및 열혼합 정도를 평가한 결과 속도분포 및 온도분포는 그림 4~5와 같다. 그림 4에서 왼쪽그림은 속도분포를 벡터로 나타낸 것이고 오른쪽 그림은 속도분포를 등속도선으로 표현한 것이다. 그림 5에서 “가”, “나”와 같이 냉각수가 약 0.13 m/s로 왼쪽벽면을 따라 상승하고 “다”, “라”와 같이 오른쪽 벽면을 따라 약 0.1 m/s로 하강함을 알 수 있고 주변공동 내 최상부와 최하부에서는 약 0.05 m/s로 유동방향이 전환되는 것을 볼 수 있다. 중앙공동영역 내의 속도분포는 “마”와 같이 0.25 m/s로 질소가스가 가압기 내벽을 따라 상승하다가 중앙공동 최상부의 중간지점인 “바”에서 유동방향을 전환하여 하부로 약 0.2 m/s로 내려가다가 “사”에서 양쪽 벽면으로 흘러감을 알 수 있다. 중앙공동영역 하부에 위치해있는 원자로냉각재는 “아”와 같이 양쪽벽면을 따라 약 0.06 m/s로 하강하다가 “자”에서 유동방향을 변환하여 약 0.02 m/s로 중앙공동 중간지점으로 상승하다가 다시 “차”지점에서 양쪽벽면으로 흘러간다. 원자로냉각재의 속도가 질소가스의 속도보다 작은 것은 원자로냉각재의 온도차이가 질소가스의 온도차이보다 작고 온도차에 따른 밀도차이가 기체보다는 액체가 작기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 속도분포는 그림 5에 나타난 온도분포에 기인하는 것으로 판단된다. 주변공동 상

부 및 하부영역 중간지점의 온도는 그림 5의 “가”, “나”와 같이 약 256℃, 96℃로 상부영역은 초기조건 온도인 250℃에서 거의 변화가 없고 하부영역은 초기온도인 75℃에서 약 20℃ 정도 상승하였다. 주변공동영역 내에서 가압기 외벽면 부근의 온도는 “다”, “라”와 같이 약 260℃, 190℃이고 가압기 내벽면 부근의 온도는 “마”, “바”와 같이 235℃, 120℃이며 밑바닥 부분의 온도는 약 260℃ 이다. 주변공동영역 안에서 왼쪽 벽면과 오른쪽 벽면 부근의 온도 차이가 상부영역은 약 25℃, 하부영역은 약 70℃ 임을 알 수 있다. 이와 같은 온도차이가 주변공동영역 안에서 자연순환유동을 일으키는 것으로 판단되며 온도성층화가 여전히 유지되거나 주변공동 하부영역의 온도가 약 20℃ 정도 상승하여 어느 정도 열혼합이 발생함을 알 수 있다. 질소기체가 위치해 있는 중앙공동 상부영역의 온도분포는 “사”와 같이 약 180℃로 초기온도가 계산시작 후 약 50초에서도 대체로 유지되고 가압기 내벽면 부근인 “아”에서는 지점은 약 190℃이므로 10℃ 정도의 온도차이가 발생하며, 하부영역의 원자로냉각재의 온도분포는 중심지점인 “자”에서는 약 100℃로 초기온도를 유지하며 양쪽벽면 부근의 온도인 “차”에서는 약 80℃이다. 중앙공동에서는 온도성층화가 대체로 유지되면서 양쪽벽면 부근등에서 국부적으로 열혼합이 일어남을 알 수 있다.

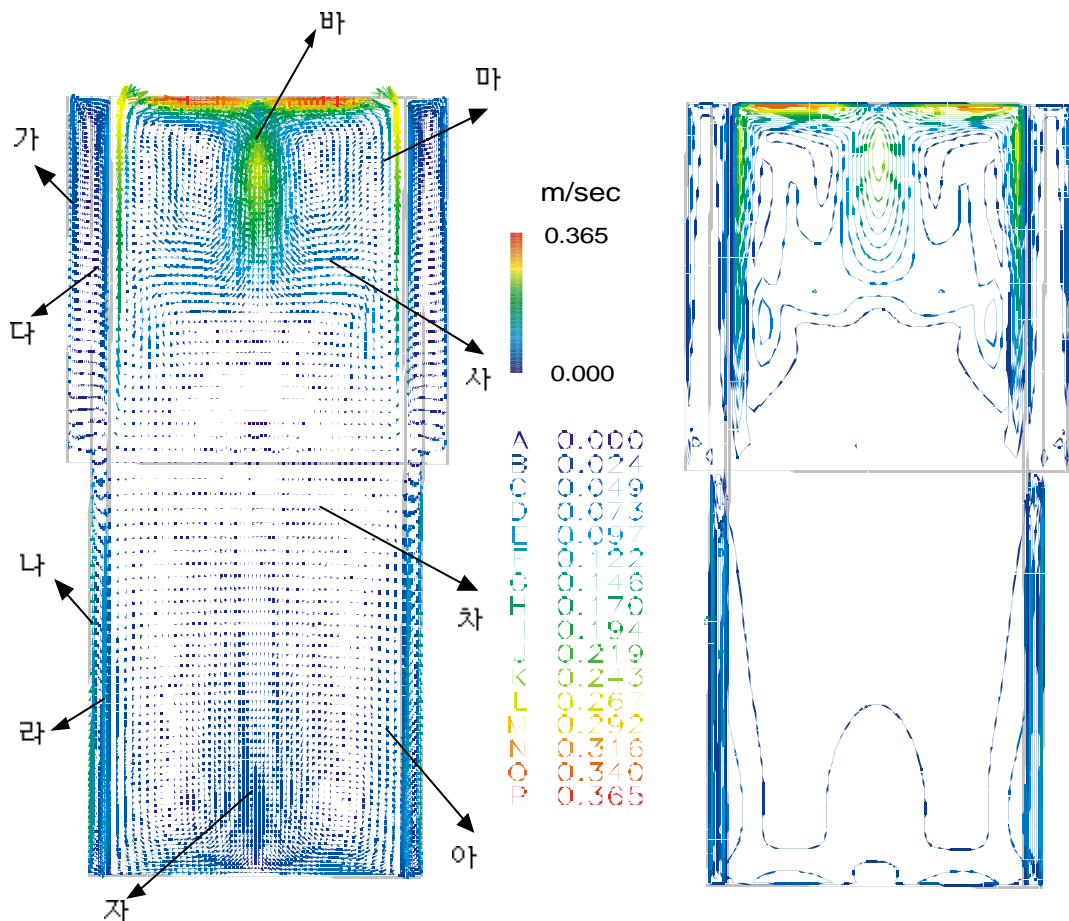


그림 4 주변 및 중앙공동 내의 속도분포 (벡터, 등속도선)

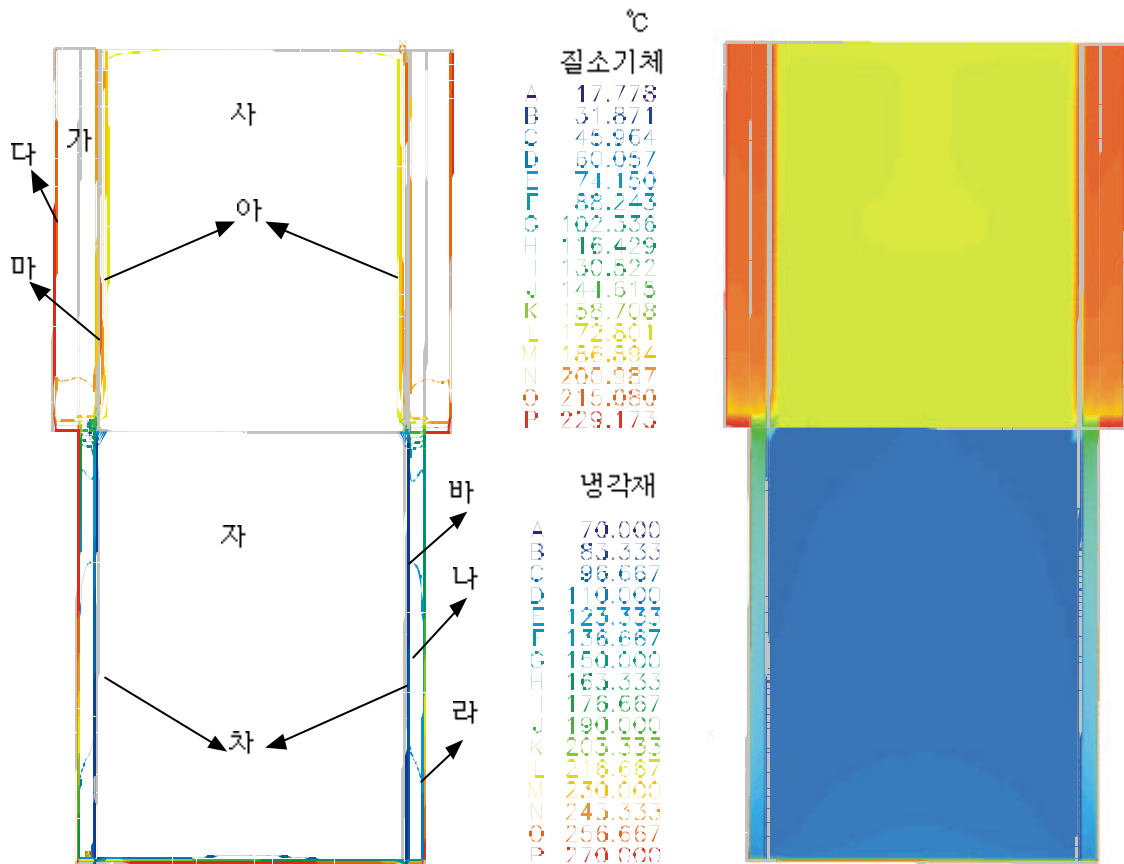


그림 5 주변 및 중앙공동 내의 온도분포

4 결론 및 향후 연구과제

SMART 저온 자기가압기 주변 및 중앙공동 내의 열수력적 특성을 범용 전산유체코드 CFX4.2를 사용하여 평가하였다. 자기가압기 냉각기가 주변공동 내 하부에만 위치함으로 인해 주변공동 내의 냉각수 온도성층화가 어느 정도 나타났지만 가압기 외벽과 내벽간의 온도 차이로 인해 자연대류도 미세하지만 발생하여 국부적으로 열혼합이 일어나는 것으로 나타났다. 중앙공동 상부의 질소기체는 열팽창계수가 냉각재보다 두 배가 크고 중앙공동의 폭이 상당히 커서 주변공동 냉각재보다는 자연대류가 강하게 발생하며 하부의 냉각재도 미세하지만 밑바닥으로부터 열을 전달받고 가압기 내벽으로 열을 빼앗기기 때문에 자연대류가 발생한다. 이와 같은 자연대류 현상은 질소기체의 온도가 지속적으로 상승하는 것을 방지하여 자연대류 관점에서 보수적으로 설정한 초기온도 170°C에서 크게 상승하지 않음을 확인하였다. 따라서 SMART 자기가압기 열수력적 설계특성의 타당함이 검증되었으며 현재 진행중인 최적의 냉각기 크기 산정작업에 평가자료로 활용할 수 있다. 그러나 자기가압기 열수력

적 특성을 좀 더 정확하게 평가하기 위해서는 중앙공동 내의 질소기체와 원자로냉각재 사이의 열전달 양과 보수적으로 설정한 가압기 외벽 안쪽의 온도와 원자로용기 헤드쪽의 온도에 대한 평가를 수행할 필요가 있다. 또한 냉각기를 질소영역까지 냉각하는 방안에 대해서도 해석을 수행하여 본 해석과 비교할 필요가 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고 문헌

1. 일체형원자로 계통설계기술개발 최종보고서, 한국원자력연구소 동력로기술개발팀, 1999, 3
2. 습식단열재와 냉각재를 이용한 저온 자기가압기, 특허출원서, 한국원자력연구소 동력로기술개발팀, 1998, 9
3. 강연문, SMART의 Heatup시 자기가압기의 영역별 온도 및 계통압력 변화 해석과 습식 단열재 및 냉각기 크기 계산, KAERI/TR-1253/99, 한국원자력연구소, 1999,3
4. 강연문, SMART 자기가압기 Intermediate Cavity의 온도성층화 현상을 고려한 계통압력 및 영역별 온도해석, KAERI/TR-1254/99, 한국원자력연구소, 1999,3
6. CFX-4.2 User Manual, AEA, 1997.