

무제어봉 원자로의 고유안전 개념을 지니는 Density Lock 내부 열성층화 불안정성에 대한 고찰

정주훈* · 방인철*†

Investigation of Stratification Instability in the Density Lock for Inherent Safety Features of Nuclear Reactors without Control Rods

Ju Hun Jung*, In Cheol Bang*†

Key Words : PIUS-type reactor(PIUS 노형), Stratification instability(성층화 불안정성), Inherent safety(고유안전성), Density lock, Core reactivity(노심 반응도)

ABSTRACT

After several major nuclear accidents, extensive research has been conducted on passive and inherent safety concepts to improve the safety of nuclear reactors for decades. However, research on inherent safety concepts that always maintain the reactivity coefficient of the core as a negative value is somewhat lacking compared to passive safety concepts. Therefore, in this study, thermal-hydraulic analysis of the density lock used in the PIUS-type reactor, which enhances the inherent safety of the reactor and enables operation without control rods, was conducted. The density lock with open ends isolates the primary system from a large borated-water pool using the thermal-hydraulic characteristics, without relying on mechanical devices such as valve components. However, instability occurs at the hot/cold fluids interface inside the density lock and unintentionally affects the core reactivity under normal operation. Therefore, the PIUS-type reactor was simulated using the one-dimensional thermal-hydraulic numerical simulation code, the MARS-KS code. The analysis results showed that stratification instability generates heat losses caused by convection and conduction, and also decreases the core reactivity due to the continuous boron molecule leakage toward the primary side. To ensure stable operation without control rods in the PIUS-type reactor, additional reactivity coefficient control will be required. This study not only emphasizes the inherent safety of nuclear reactors to ensure their reliability and safety but also suggests it as an innovative safety technology for nuclear reactors in the future, contributing to the safe operation of nuclear reactors.

1. 서 론

원자력발전소의 여러 중대 사고가 발생한 이후, 원자력 산업에서는 원자로 안전에 대한 중요성을 수십 년간 강조해오고 있다. 원자로 안전성을 확보하는 방법의 하나는 원자로의 피동 및 고유안전 개념을 사용하는 것으로, 이를 통해 원전 내 비정상적인 거동이나 안전을 위협하는 사고 발생 시 작업자의 개입 없이도 원자로를 안전하게 정지 상태로 도달시킬 수 있다⁽¹⁾.

여러 피동 및 고유안전 개념의 핵심 구성 요소는 자연순환 원리이다. 자연순환 원리는 작업자의 개입이 요구되지 않고 오직 중력만으로 작용하기 때문에, 원자로 안전성에 대한 신뢰도를 상승시킬 수 있다. 전 세계 가압경수로의 다양한 계통에 적극적으로 적용되고 있으며, 이에 관한 연구들도 활발하게 진행 중이다⁽²⁾. 대표적인 예시로, 미국의 NuScale Power사에서 개발한 소형 모듈형 원자로인 NuScale 원자로는 1차 계통, 안전 계통, 보조 계통 등의 대부분에 자연순환 원리를 적용하여 피동 안전성을 확보하였다. 또한, 증기발생기를 1

* 울산과학기술원 원자력공학과(Ulsan National Institute of Science and Technology, Department of Nuclear Engineering)

† Corresponding author, E-mail : icbang@unist.ac.kr

2023 한국유체기계학회 하계학술대회 발표 논문, 2023년 7월 5일~7월 7일, 평창 알펜시아

The KSFJ Journal of Fluid Machinery: Vol. 26, No. 6, December 2023, pp.50~56(Received 17 Jul. 2023; revised 15 Aug. 2023; accepted for publication 20 Aug. 2023)

차 측에 내장한 일체형 구조를 통하여 대형 냉각재 상실 사고의 발생을 고유적으로 배제할 수 있으며, 원자로 격납 용기가 대형 수조에 잠겨 있어 원자로 정지 이후에 발생하는 잔열을 장기적으로 냉각시킬 수 있다. NuScale 원자로의 1차 측 냉각재는 12.7 MPa 압력 조건에서 재순환 펌프 없이 자연순환 구동력만으로 노심에서 증기발생기로 피동적으로 열을 전달한다. 이외에 비상 안전 계통, 잔열 제거 계통에도 자연순환 원리를 적용하여 원자로 안전에 대한 신뢰도를 향상했다⁽³⁾. 국내의 경우, 한국원자력연구원에서 개발한 System-integrated modular advanced reactor (SMART)는 원자로 압력 용기에 12 개의 나선형 증기발생기를 내장한 일체형 원자로이다. SMART 원자로의 잔열 제거 계통은 자연순환 원리를 사용하여 작업자의 개입 없이 노심 정지 이후 발생하는 잔열을 피동적으로 제거한다⁽⁴⁾. 자연순환 원리를 포함한 피동 및 고유안전 개념은 현재 및 미래의 원자로 안전 설계에 있어서 중요한 요소이며, 원전의 안전한 운영에 이바지할 수 있는 대표적인 수단이다.

Process Inherently Ultimate Safety (이하, PIUS) 개념은 1980년대 스웨덴의 ABB-ATOM 사에서 최초로 제안한 고유안전 개념이다. Fig. 1에 나타나 있듯이 PIUS 노형은 격납 용기가 봉소가 함유된 대형의 저온 수조에 잠겨 있는 특징을 지니며, density lock의 특수한 구조체를 사용하여 1차 측과 수조 측을 분리한다. 격납 용기의 상부와 하부에 각각 위치한 density lock은 판다발로 이루어져 있으며 양 끝의 상시 개방 상태에서 오직 열수력 특성만을 이용하여 밸브의 기능을 수행함으로써 기계적인 오류를 배제할 수 있는 장점을 지닌다. Density lock 내부에서는 압력 균형을 기반으로

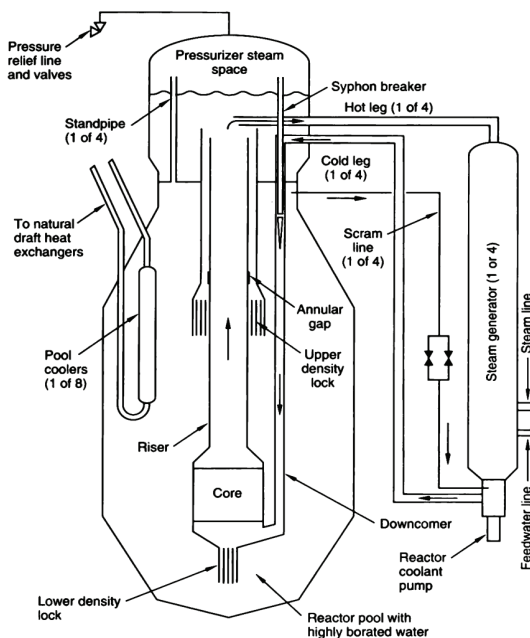


Fig. 1 Schematic of a PIUS-type reactor⁽¹⁾

1차 측 고온의 유체와 수조 측 저온의 유체 간의 경계층이 형성되어 있으며, 원자로 재순환 펌프를 제어함으로써 경계층을 생성 및 붕괴시켜 봉산수의 유입을 조절할 수 있다. 따라서, PIUS 노형의 대표적인 특징인 density lock 구조체의 적용이 기존 경수로 반응도 조절 계통인 제어봉 구동 장치를 대체할 수 있고, 노심 반응도 조절은 원자로 재순환 펌프를 제어함으로써 운영 유연성을 확보하여 원전의 우수한 부하 추종 운전이 가능하다⁽¹⁾.

PIUS 노형에서 사용되는 density lock은 고유안전성을 확보하기 위한 중요한 요소이며, 이를 해석적 및 실험적으로 연구한 결과가 다수 선행되었다. Tasaka et al.은 대기압 조건에서 운전하는 PIUS 노형의 축소 실험 장치를 상사 설계 하였으며 재순환 펌프의 제어를 통한 density lock의 적용 가능성을 검증하기 위한 실험 및 시뮬레이션을 수행하였다⁽⁵⁾. Ito et al.은 PIUS-600 원자로에 대해 1/5300의 체적비와 1/2의 높이비로 축소된 EARTH 실험 장치를 이용하여 원자로 시동 및 비상 정지 이후 재가동 시나리오를 실험 및 시뮬레이션하였다. 재가동 과도 조건에서 실험 장치 내부 열 침체 현상이 관찰되었고, 열 경계층 재형성을 위해서 1차 측 냉각재에 대한 예열 과정의 필요성을 제시하였다⁽⁶⁾. 또한, 상승관 내부 온도와 유속에 의한 압력의 균형에 기인한 1차 측과 수조 측의 안정적인 열적 분리를 위해서 추가적인 재순환 펌프 제어 과정의 요구가 필요하였다⁽⁷⁾. Sibamoto et al.은 재순환 펌프 속도의 섭동에 대한 density lock 내부 고온 및 저온 유체 경계면의 동적 응답을 연구하였다. 유체 경계면에 대한 동적 응답은 판다발로 구성된 density lock의 비정형적인 구조를 비롯하여 1차 측 유체와 수조 측 유체 간의 작은 밀도 차이에 의하여 영향을 받았다⁽⁸⁾. PIUS 노형 축소 실험 장치에 대한 여러 실험적 연구들에 따르면, 재순환 펌프의 제어를 통하여 과도기를 모사하였고 상부 및 하부 density lock 사이의 자연순환 경로가 형성되어 실험 장치 내부 열수력 인자들이 안전 정지 상태에 도달함을 보였다^(5,6,7,8). 하지만 density lock을 적용한 SMR 크기의 PIUS 노형을 모델링하여 전산 유체 해석을 진행한 Zhang의 연구 결과⁽⁹⁾에 따르면, 실제 원자로의 사고 발생 이후 상부 및 하부 density lock 사이의 자연순환 경로 형성보다는 저온 봉산수 수조의 전체적인 온도 경향에 의해서 장기 냉각 과정에 도달함을 보였다. 전반적으로, 선행 연구는 PIUS 노형의 안전과 신뢰성 보장에 있어서 중요하게 여겨지는 다양한 과도 조건과 관련된 기본적인 물리 메커니즘에 관하여 가치 있는 통찰력을 제공하였다.

하지만 선행 연구를 기반으로 하여 고유안전성을 확보한 PIUS 노형은 다음과 같은 한계점들로 인하여 현실적으로 건설 및 운영되지 않았다⁽⁶⁾.

- 1) 원자로 시동 및 재가동 과정에서 열 성층화 현상을 형성하기 위한 적절한 압력 균형의 확보가 어렵다.

PIUS 노형은 density lock 내부 열적 경계층의 형성과 노심 반응도 조절을 통한 원자로 시동 절차가 동시에 이루어져야 하지만 서로 밀접하게 연계되어 있어 둘의 동시적인 균형 상태를 유도하기 위해서는 복잡한 시동 및 재가동 절차가 요구된다. 여러 저자들이 density lock 내부 고온 및 저온 성층화 현상의 형성 절차에 대한 한계점을 극복하고자 보다 개선된 시동 및 재가동 절차를 제안하였지만, 소규모 실험 및 시뮬레이션에 국한되었다⁽⁷⁾.

2) 대량의 저온 붕산수를 담기 위한 콘크리트 구조체를 지니는 격납 용기에 의하여 경제성 확보가 어렵다.

PIUS 노형의 특성상 대량의 저온 붕산수를 저장할 수 있는 거대한 콘크리트 수조 설치가 요구됨에 따라서 원자로의 초기 설계 비용이 증가하게 된다. 이를 통해서 원자로 운용과 관련한 결정적인 요소 중 하나인 경제성에 영향을 끼친다⁽¹⁰⁾. 따라서 건설 및 운영 비용을 포함한 전체적인 비용과 관련하여 다른 경수로 대비 충분한 경쟁성을 지님을 증명해야 한다.

3) 정상 운전 시, density lock 내부에서 발생하는 성층화 불안정성이 원자로의 열수력학적 및 핵적으로 비정상적인 거동을 초래한다.

선행 연구는 대부분 PIUS 노형의 과도 조건에 중점을 두었으며 정상 상태 조건의 density lock 내부 현상을 연구한 결과는 거의 없다. 1차 측과 수조 측 사이의 압력 평형 원리를 바탕으로 유체 간의 성층화 현상을 형성하는 density lock 구조체는 원자로의 하부 플래넘에 위치하여 고농축된 차가운 붕산수가 원자로 노심으로 유입하려는 것을 방지한다. 즉, 붕산수의 유입 및 유출은 불특정한 상황 혹은 노심 반응도 조절이 요구되는 조건에서만 발생해야 한다. 그러나 density lock 상부에서의 난류 유동 특성은 정상 운전 시에도 높은 체적 유량으로 인하여 고온 및 저온 경계층에서 성층화 불안정성을 초래한다⁽¹¹⁾.

위의 3가지 한계점 중 density lock 구조체의 적용이 정상 상태에서 원자로 1차 측에 끼치는 영향을 해결하기 위해서 원자로 정상 운전 시 추가적인 과정 및 절차가 요구되는 사항이며, 이는 PIUS 개념의 상위 분류인 원자로 고유안전 개념을 저해시키는 요소이므로 불안정성에 대한 근본적인 원인을 조사 및 해결하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 PIUS 노형 설계의 고유안전 개념에 대한 신뢰성과 그 효과를 향상하기 위해 정상 상태에서 density lock 내부 성층화 불안정성이 1차 측의 열수력학적 및 핵적 거동에 미치는 영향을 열수력 안전 해석 코드를 통하여 확인하고, 근본적인 원인에 대하여 유체역학 관점에서 조사하는 것을 목적으로 한다.

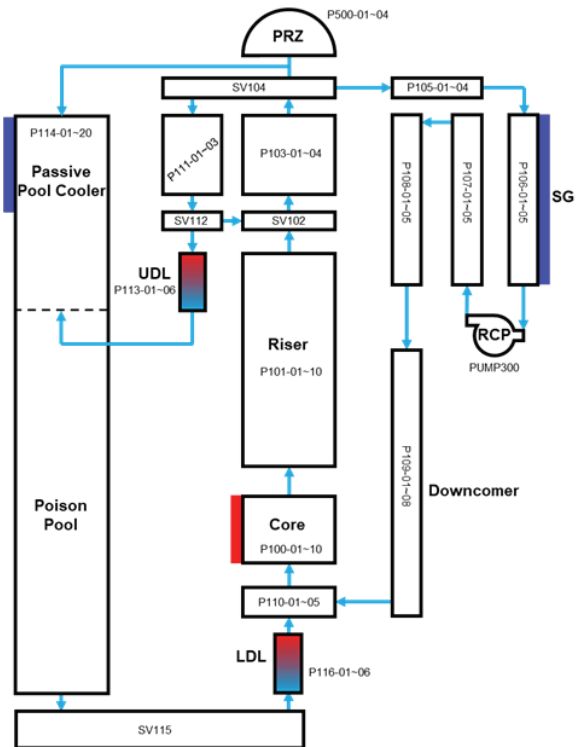


Fig. 2 PIUS-600 reactor nodalization for MARS-KS

2. 해석적 모델

2.1 PIUS-600 수치적 모델링

PIUS-600 원자로는 ABB-ATOM 사에서 개념적으로 설계한 2000 MW의 열 출력을 가지는 원자로이다. 본 연구에서는 사용된 MARS-KS 코드는 1차원 운동량 방정식을 기반으로 PIUS-600 원자로를 모델링하고 정상 상태에서 각 체적의 열수력 매개변수를 계산하는 데 활용되었다. MARS-KS 코드는 모사된 과도 조건에서 원전의 열수력학적 현상에 대한 수치적 해석을 위하여 한국원자력연구원에서 개발한 표준 안전 해석 코드이다. 본 연구에서는 PIUS-600 원자로에 적용된 density lock의 기능과 내부 유체 거동 및 온도 특성을 MARS-KS 코드를 사용하여 검증하였다. Fig. 2는 MARS-KS 시뮬레이션을 위해 모델링 된 PIUS-600 원자로의 입력 모델을 보여주고 있다.

2.2 Density lock 이론적 모델링

1차원으로 모사된 PIUS-600 원자로는 3개의 병렬 채널로 구성되어 있다. 해석 모델은 상부 및 하부 density lock 사이의 붕산수 수조를 구성하는 1개의 채널(A)과 1차 측 유로를 구성하는 고온 관(B)과 저온 관(C)으로 총 3개의 채널로 구성되며, 이들을 구분하기 위해 각 유로가 병합 및 분리

되는 영역에서의 위치(I , II)가 정의된다. 정상 상태 및 과도 조건에서의 해석을 위하여 3개의 채널에 대한 이론적 모델링이 수행되었다⁽⁶⁾. MARS-KS 코드의 기반으로 사용되는 비압축성 유동의 1차원 운동량 방정식은 식 (1)로 표현할 수 있으며, 각 변수에 대한 위치의 정보는 하첨자로 표시하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \cos\theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \delta P}{\partial x} \quad (1)$$

식 (1)을 3개의 채널에 대하여 길이 방향으로 적분하고 Boussinesq 근사를 적용하면 유로 단면적(A) 및 체적 유량(q), 압력(P), 유로 내부 비가역 압력손실(δP), 펌프 토출 압력(δP_p), 노심과 증기발생기의 열적 중심 높이 차이(H), density lock 중심부로부터 높이(L)에 대한 식 (2)–(4)을 얻을 수 있다⁽⁸⁾.

$$\rho_c \frac{\partial q_A}{\partial t} \int_I^{II} \frac{1}{A} dx + \frac{\rho_h}{2} \left(\frac{1}{A_{II}^2} - \frac{1}{A_I^2} \right) q_A^2 = -(P_{II} - P_I) - g[\rho_h(L_{II} - L_I) + \rho_c(L_{riser} - (L_{II} - L_I))] - \delta P_A \quad (2)$$

$$\rho_h \frac{\partial q_B}{\partial t} \int_I^{II} \frac{1}{A} dx + \frac{\rho_h}{2} \left(\frac{1}{A_{II}^2} - \frac{1}{A_I^2} \right) q_B^2 = -(P_{II} - P_I) - \rho_h g L_{riser} - \delta P_B \quad (3)$$

$$\rho_h \frac{\partial q_C}{\partial t} \int_I^I \frac{1}{A} dx + \frac{\rho_h}{2} \left(\frac{1}{A_I^2} - \frac{1}{A_{II}^2} \right) q_C^2 = -(P_I - P_{II}) + \rho_h g L_{riser} - \delta P_C + \delta P_h + \Delta \rho_h g H \quad (4)$$

PIUS-600 원자로를 구성하는 위 3개의 채널 이외에 정상 상태에서 외부로부터 유입 및 유출되는 유량은 없다고 가정한다.

$$q_C = q_A + q_B \quad (5)$$

다음으로 각 채널 내부 체적 유량에 의한 유로 압력손실에 관하여 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\delta P_j = \rho_h \zeta_j \frac{q_j^2}{2} \quad (6)$$

정상 상태에서 상부 및 하부 density lock이 정상적으로 작동함에 따라서 수조 측 채널에서의 유량은 없으므로 $q_B = q_C$ 이다. 결과적으로 식 (2)–(4) 모두 각 채널의 체적 유량 및 유로 압력손실, 정수압, 자연순환 구동력, 펌프 토출

압력 사이의 관계를 도출할 수 있다. 따라서 상시 개방 상태인 density lock 구조체를 지나는 PIUS 노형은 열수력 매개 변수와 펌프 제어를 통하여 열 경계층의 형성 및 붕괴를 결정할 수 있으며, 최종적으로 1차 측 유로로 봉산수를 유입시켜 원자로 노심의 반응도를 제어할 수 있음을 알 수 있다.

3. 해석 결과

3.1 PIUS-600 정상 상태 시뮬레이션

Table 1은 1차원으로 모델링 된 PIUS-600 원자로의 정상 운전 조건에서 MARS-KS 코드 계산 결과를 보여주고 있다. 또한, 본 연구에서 계산된 열수력 매개변수는 미국 원자력 규제 위원회(NRC: Nuclear Regulatory Commission)에 제출된 PIUS-600 원자로의 예비 안전성 분석 보고서(PSID: Preliminary Safety Information Document)에 수록된 값^(12,13)과 비교하였다. PSID 자료를 기준으로 비교한 결과로써, 열수력 매개변수에 대하여 1.0% 미만의 오차와 함께 좋은 정확도를 보이며 원자로가 정상 상태에 도달했음을 보였다.

PIUS-600 원자로 내부의 1차 측 냉각재는 상승관 유로를 통하여 이동하며 상부 플래넘으로부터 상부 density lock까지 냉각재 일부가 우회한다. 상부 density lock의 열 경계층의 형성 기준은 1차 측 냉각재의 재고 체적 및 유속에 의해 결정된다⁽¹⁾. 이후 상부 density lock으로 우회된 유량이 annulus hole을 통해 상승관 내부에서 흐르는 유량과 합쳐지며 자연순환 유로가 형성된다. 이후 노심을 지난 냉각재는 4개의 증기발생기로 흐르며 열을 전달한다. 1차 측 냉각재는 증기발생기 아래에 배치된 재순환 펌프에 의해 하부 density lock으로 이동한다. 증기발생기를 지난 냉각재는 하부 density lock 내부의 열 경계층 생성을 위해 일정 유속으로 완충 운동량을 제공하며 Fig. 3과 같이 열 성층화 경계층이 정상적으로 형성됨을 수치상으로 관찰하였다. 결과적으로 PIUS-600 원자로의 정상 운전 시, 상부 및 하부 density lock을 통한 유체의 주 유동은 거의 발생하지 않았다.

Table 1 Comparison MARS-KS calculation values with PSID^(12,13) information

Parameter	PSID	MARS-KS	Error
Power(MWth)	2000	2000	0.00 %
Pool Temp.(K)	288.15	288.15	0.00 %
Core inlet Temp.(K)	533.15	532.65	0.09 %
Core outlet Temp.(K)	562.45	561.41	0.18 %
Operating pressure(MPa)	9.0	9.0	0.00 %
Primary mass flow rate(kg/s)	12800	12882	0.02 %
Boron content in a pool(ppm)	2200	2200	0.00 %
Boron content in a core(ppm)	400	400	0.00 %

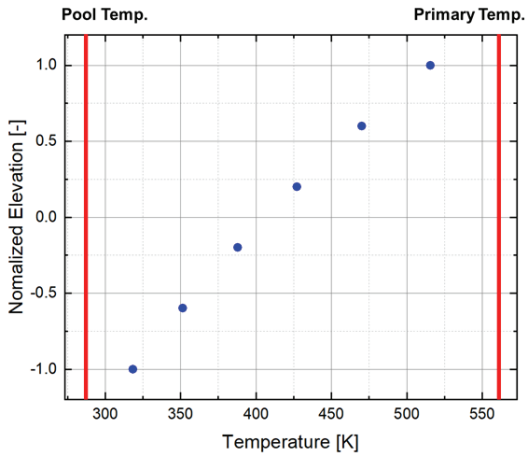


Fig. 3 Lower density lock temperature profile in a steady state

3.2 성층화 불안정성이 끼치는 영향

$$F_{hydrostatic} + F_{velocity} + F_{buoyancy} = \frac{d(mv)}{dt} \quad (7)$$

Fig. 4와 식 (7)은 PIUS 노형의 정상 운전 시, 열수력학적 압력 균형 원리를 기반으로 한 density lock 내부의 열 성층화 현상과 원리를 나타낸다. 2장 2절에서 서술하였듯이, 저온의 붕산수 유입이 없는 정상 상태 조건에서 고온의 냉각재와 저온의 붕산수 사이의 밀도 차이에 의한 정수압과 1차 측의 유속으로 인한 운동량의 균형에 의해 생성된다. 하지만 density lock 제어 체적의 상부와 하부 사이의 수직 방향으로의 유속 차이에 의해 성층화 불안정성이 발생한다. 또한 성층화 불안정성은 고온 및 저온 유체 사이의 온도구배 영역에서 발생하며 불안정성이 증가할수록 해당 영역의 길이가 증가한다⁽⁹⁾. 성층화 불안정성은 유체의 부력과 전단 흐름에 의한 힘의 비에 대한 무차원수인 Richardson 수를 기반으로

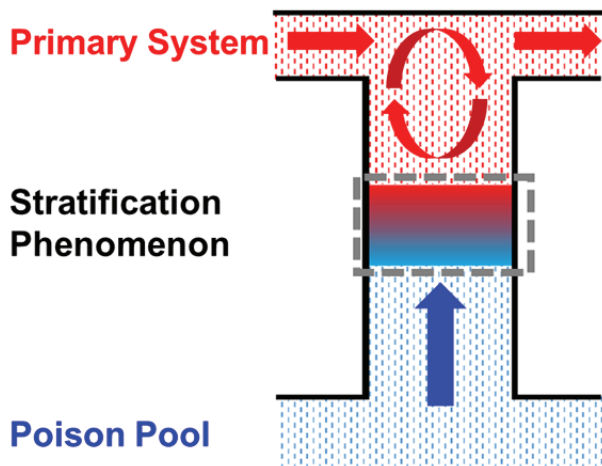


Fig. 4 Stratification principle in a density lock

평가할 수 있다. 본 연구에서 구현된 density lock 제어 체적에 대한 Reynolds 수 및 Richardson 수는 각각 식 (8), (9)로 정의할 수 있다.

$$Re = \frac{uL_{DL}}{\nu} \quad (8)$$

$$Ri = \frac{g(\rho_c - \rho_h)L_{DL}}{\rho_h u^2} \quad (9)$$

본 연구에서 MARS-KS 코드를 사용하여 PIUS-600 원자로 정상 상태 해석 결과로부터 얻은 열수력 매개변수를 기반으로 식 (9)을 사용하였으며, density lock 상부에서의 난류 속도를 정확하게 계산하는 것에 있어서 한계가 있으므로 제어 체적으로 흐르는 원자로 하부 플레넘에서의 냉각재 유속을 사용하였다. Richardson 수가 0.25보다 큰 값을 가지면 유체 간의 계면이 유체역학적으로 안정적이라고 평가할 수 있다^(5,9).

본 연구에서 구현된 PIUS-600 원자로의 경우, 높은 유속으로 인하여 Reynolds 수는 식 (8)를 기반으로 24.4×10^6 의 값을 가지며, 이를 통해 density lock 상부에서 난류 유동이 발생하고 있음을 유추할 수 있다. 따라서, density lock 상부에서 높은 Reynolds 수를 기반으로 난류 유동이 형성되고 있으므로 성층화 계면으로부터의 유체 확산보다 난류에 의한 확산 현상이 지배적이다. Richardson 수의 정의로부터, Reynolds 수와 비례하는 하부 플레넘의 유속, 즉 냉각재의 유량이 증가할수록 불안정성에 의한 영향이 커지며, 정상 운전 시의 지속적인 유속 전단에 의해 Kelvin-Helmholtz 불안정성이 발생함을 유추할 수 있다⁽¹¹⁾. 결과적으로 Fig. 3에서 density lock 제어 체적에 대하여 전반적으로 온도구배 영역이 관찰되었으며, 내부에서 발생하는 성층화 불안정성으로 인하여 난류 유동, 내부파동, 유량 진동의 현상이 발생함을 알 수 있다. 더욱이 불안정성에 의해 발생하는 비선형적 현상은 경계층 부근에서 분자 확산, 운동량 수송, 대류 열수송 등의 효과를 초래한다⁽¹⁴⁾. 이와 함께 density lock 상부의 유속 전단으로 인해 발생하는 난류 유동과 혼합되어 1차 측으로 유출된다. 따라서 원자로의 정상 운전 시, density lock 내부에서 복합적 및 비선형적 현상으로 인하여 열성층화 계면으로부터 노심이 영향을 받으며, 최종적으로 의도치 않은 열 출력 감소와 함께 열수력학적 및 핵적 거동에 대한 비정상적 결과를 초래할 수 있다.

Fig. 5는 대형의 저온 붕산수 수조에 함유된 붕소 분자들이 비선형적 현상을 통하여 노심 측으로 유출되는 거동을 나타내고 있다. 노심 내 초기 평균 붕소 농도는 400 ppm 근처에서 시작하여 density lock의 정상적인 기능 활성화에도 불구하고 점차 증가하는 거동을 보인다.

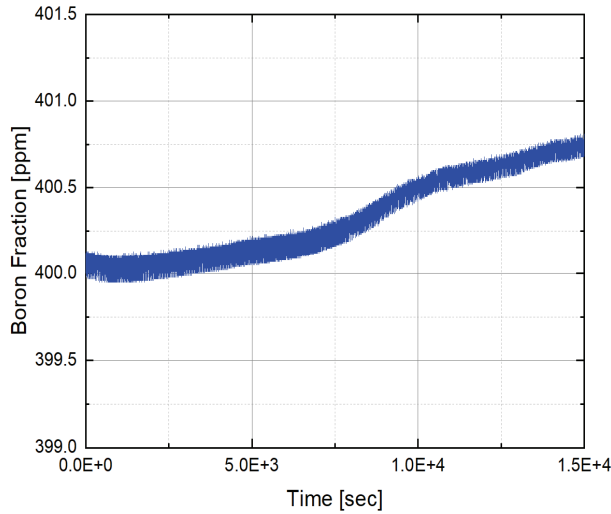


Fig. 5 Core boron content in a steady state

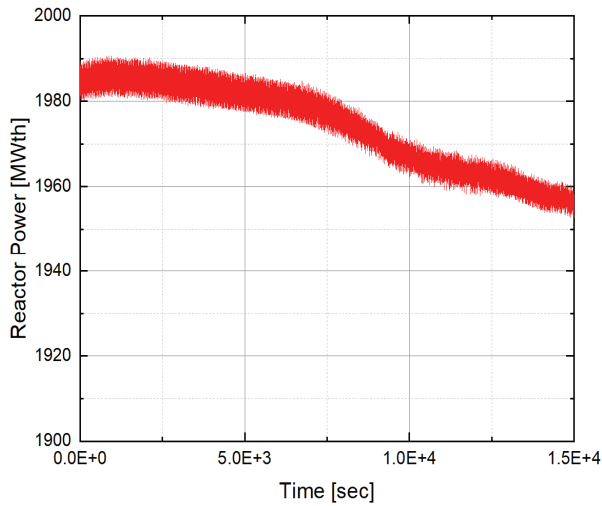


Fig. 6 Total reactor power in a steady state

Fig. 6은 노심 내 평균 붕소 농도의 증가가 동시에 노심의 음의 반응도 궤환 계수를 유발하여 전체적인 원자로 출력 감소로 이어짐을 나타낸다. 하지만 음의 반응도 궤환 계수에 의한 원자로의 열 출력 거동이 노심 평균 붕소 농도의 거동과 거의 반비례하게 나타나고 있으므로 불안정성으로 인한 대류 열 수송에 의한 감속재 온도 궤환 계수의 변화는 지배적이지 않음을 알 수 있다.

따라서 원자로 열 출력의 지속적인 감소를 방지하기 위해 정상 운전 중에 추가적인 조치가 필요하다. 추가적으로 density lock 구조를 판다발로 구성하는 honeycomb 구조를 적용하는 것을 본 연구에서 확인된 불안정성을 줄이기 위한 잠재적인 해결책으로 기대한다. 그러나 MARS-KS 코드가 1차원 방정식을 기반으로 열수력 매개변수를 계산하기 때문에 여러 판다발을 구현하는 것은 어려울 수 있다.

4. 요약 및 향후 계획

원자로 안전성을 향상하기 위해서 고유안전 개념을 이해하고 적용하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 MARS-KS 수치해석 코드를 활용하여 고유안전 개념을 포함한 PIUS-600 원자로의 주요 요소 중 하나인 density lock에서의 열수력학적 및 핵적 거동과 관련된 성층화 불안정성을 확인하였다. 해석 결과를 바탕으로 density lock 내부에서 발생하는 성층화 불안정성에 대하여 유체역학적으로 분석하였으며 온도 및 질량 유량의 진동 거동을 포함하여 그 영향을 설명하였다. Density lock 제어 체제에 대하여 전반적인 온도구배 영역의 관찰을 근거로, 1차 측의 높은 냉각재 체적 유량 및 유속으로 인하여 density lock 상부에서 난류 유동 및 난류 소용돌이를 발생시켰음을 유추할 수 있다. 따라서 density lock 내부에서 분자 확산, 운동량 수송, 대류 열 수송 등의 비선형적인 효과가 나타났다. 불안정성으로 인한 비선형적 현상 중 붕소 분자의 확산이 가장 지배적이었으며, 이는 노심 평균 붕소 농도의 지속적인 증가가 노심 음의 반응도 궤환 계수를 유발하여 비정상적인 원자로 열 출력 감소로 이어지게 되었다.

본 연구를 통하여 PIUS 노형에서 사용된 density lock에서 발생하는 정상 운전 조건에서의 비정상적인 거동을 방지하기 위한 추가적인 반응도 조절 조치 혹은 이를 근본적으로 해결할 수 있는 구조적인 설계 변경 등과 같은 조치의 필요성이 제기된다. 본 연구는 density lock 구조체의 기존 한계를 극복하고, 고유안전성을 적용한 PIUS 노형에 대한 설계 개발 가능성을 높일 수 있는 근본적인 통찰력의 제공을 기대하는 바이다.

본 연구의 결과를 바탕으로, 향후 전산 유체 해석 코드를 활용한 연구를 진행하여 3차원 구조 형상의 효과를 반영한 density lock 내부의 불안정성에 대하여 보다 상세한 결과를 제공할 예정이다. 성층화 불안정성을 시각화하고 density lock 구조체에 대한 해결책 및 개선 사항을 도출하기 위한 실험도 계획되어 있다. 열 경계층 안정화의 목적으로 honeycomb 구조와 density lock의 축 방향 단면적을 달리하는 구조를 실험적인 분석을 기반으로 한 해결책으로 기대하고 있다. 또한, 소형 모듈형 원자로에 대한 density lock의 적용 가능성을 검토하여 원자로 안전 계통으로써 활용 범위를 확대하고자 하며, 추가적인 코드 기반 분석을 통해 붕산수 수조에 대한 실증의 한계를 극복할 예정이다. 마지막으로, density lock 내부에서 생성된 불안정성을 허용할 수 있는 수준으로 감소시키고 향후 원자로 설계에서 고유안전 개념에 대한 구현 및 적용을 실현하고자 한다.

후 기

본 논문은 한국수력원자력(주)에서 재원을 부담하여 “해오름 원자력 혁신 센터”의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

References

- (1) Pedersen, T., 1992, “PIUS – Status and Perspective,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 132, pp. 167-177.
- (2) Vijayan, P. K., and Nayak A.K., 2010, “Natural Circulation Systems: Advantages and Challenges,” IAEA – Natural Circulation Training Course, Trieste, Italy, 2152-21.
- (3) José, N., and Reyes Jr., 2012, “NuScale Plant Safety in response to Extreme Events,” *Nuclear Technology*, Vol. 178, No. 2, pp. 153-163.
- (4) International Atomic Energy Agency, 2011, “Status of Small and Medium Sized Reactor Designs,”.
- (5) Tasaka, K., Tamaki, M., Imai, H., Koheketsu, H., Anoda, Y., Murata, H., and Kukita, Y., 1992, “Atmospheric-pressure Small-scale Thermal-hydraulic Experiment of a PIUS-type Reactor,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 29, No. 12, pp. 1152-1161.
- (6) Ito, T., Oyamatsu, K., Tsuji, Y., Tamaki M., and Kukita, Y., 1998, “Development of an Advanced Startup Procedure for a PIUS-type Reactor,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 35, No. 8, pp. 554-563.
- (7) Ito, T., Tsuji, Y., Tamaki M., and Kukita, Y., 1997, “Recoupling and Decoupling of Parallel Loops in Simulated PIUS-type Reactor Shutdown and Restart Transients,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 34, No. 11, pp. 1067-1078.
- (8) Sibamoto, Y., Yonomoto, T., Kukita, Y., Tsuji, Y., and Tamaki, M., 1996 “Dynamic Response of Hot/Cold Liquid Interfaces to Pump Speed Perturbations in a Thermal-hydraulic Loop Simulating a PIUS-type Reactor,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 33, No. 9, pp. 703-711.
- (9) Zhang, T., 2020, “Passive Shutdown and Decay Heat Removal of a Small Modular Reactor with Density Locks,” Ph. D. Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany.
- (10) Weinberg, A. M., and Spiewak, I., 1984, “Inherently Safe Reactors and a Second Nuclear Era,” *Science*, Vol. 224, No. 4656, pp. 1398-1402.
- (11) Chen, J., 2016, “Stability of a Stratified Fluid on a Wall and in a Channel,” Ph. D. Thesis, École Centrale Marseille, Marseille, France.
- (12) Boyack, B. E., Steiner, J. L., Harmony, S. C., Stumpf, H. J., and Lime, J. F., 1995, “Transient Analysis of the PIUS Advanced Reactor Design with the TRAC-PF1/MOD2 Code,” *Nuclear Safety*, Vol. 36, No. 2, pp. 249-277.
- (13) Pedersen, T., 1996, “Basic Information on Design Features of the PIUS Nuclear Plant,” IAEA-TECDOC—861.
- (14) H. Ekander, and R. Gebart, 1990, US Patent No. 4939754.