

일체형원자로 증기발생기 카세트 하단에 설치된 오리피스들의 최적설계 연구

A numerical study on the optimum size for the orifice located on the steam generator cassette of integral reactor

강형석¹ 윤주현² 김환열³ 조봉현⁴ 이두정⁵

Hyung Seok Kang, Juhyeon Yoon, Hwan Yeol Kim, Bong Hyun Cho, Doo Jeong Lee

A new advanced integral reactor of 330 MWt capacity named SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) is currently under development at KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute). One of the major design features of the integral reactor is locating the steam generators(SG) inside reactor vessel and eliminating the possibility of LB LOCA(large Break Loss of Coolant Accident). Orifices are fitted at the low part of steam generator cassette to stabilize and balance coolant flow distribution in the MCP (Main Circulation Pump) pressure header. A sensitivity analysis is conducted to determine the optimum orifice size using computer code "CFX".

1. 서론

한국원자력연구소는 산업적 활용 다원화 목적으로 안전성과 경제성이 향상된 열출력 330MWt 급의 일체형원자로인 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)를 개발하고 있다. 개념설계 단계에 있는 SMART에서는 관류식 나선형 증기발생기, 밀봉형 원자로 주순환펌프, 자기가압기와 같은 주요 기기들이 원자로용기내에 설치된다. 기존 상용원자로와는 달리 증기발생기와 주순환펌프가 배관으로 연결되어 있지않고 주순환펌프를 통과한 냉각수가 압력헤더를 통해서 12개의 증기발생기 카세트에 흐르게 된다. 각 증기발생기에서 발생하는 증기가 요구되는 온도와 압력을 가지기 위해서는 일차계통 냉각수가 각 증기발생기 카세트에 가능한 한 균일하게 분포되어야 한다. 정상운전 조건에서는 식 (1)의 비균일도가 5% 이하, 주순환펌프 한 대가 정지한 비정상운전 조건에서는 비균일도가 10% 이하야 한다. 이를 위해서 증기발생기 카세트 하단에 높은 유동저항을 가진 오리피스를 설치하여 주순환펌프 압력헤더에서의 유동분포를 안정화 시키고 각 증기발생기로 향하는 유량을 균일하도록 만든다. 일반적으로 일체형원자로의 압력헤더를 설계할 때 고려하는 사항은 Eu 설계인자($Eu = \frac{\Delta P}{0.5\rho V_{in}^2}$)

가 10 이상이 되도록 하는것이다. 현재 고려중인 증기발생기 하단의 오리피스 압력강하는 11.27KPa 이며, 증기발생기 카세트에서 발생하는 압력강하는 30.0KPa 이고, 주순환펌프 압력헤더내로 들어오는 냉각수의 동적헤더는 3.04KPa 이다. 유량분포 관점에서는 Eu 설계인자가 13.75 로 보수적이다. 따라서 이

¹ 한국원자력연구소 동력로계통기술개발팀

² 한국원자력연구소 동력로계통기술개발팀

³ 한국원자력연구소 동력로계통기술개발팀

⁴ 한국원자력연구소 동력로계통기술개발팀

⁵ 한국원자력연구소 동력로계통기술개발팀

러한 보수적인 압력강하를 강제순환의 추가적인 자연순환능력 확보관점에서는 완화시킬 필요가 있으며, 이를 위해서 필요한 자료생산 및 평가를 위해서 오리피스 크기를 현재보다 50%와 20%로 감소시켜서 압력헤더내에서 증기발생기 카세트로 향하는 유량을 수치해석적으로 평가하였다. 본 해석을 위해서 상용전산유체코드인 CFX 를 사용하였다.

$$\text{비균일도}(\kappa) = \frac{m_{\text{avg}} - m_{\text{min}}}{m_{\text{avg}}} \times 100 \quad (1)$$

2. SMART 주순환펌프 압력헤더와 운전모드

개념 설계 중인 SMART 에서 주순환펌프 압력헤더는 주순환펌프 후단과 증기발생기 카세트사이에서 위치하며 압력헤더의 개략도와 평면도는 그림 1 과 그림 2 와 같다. SMART 의 주요 설계자료는 표 1 과 같다. SMART 일차계통 냉각수는 주순환펌프를 통과한 다음 압력헤더를 통하여 증기발생기 카세트로 흘러간다. 따라서 주순환펌프 압력헤더의 기하학적인 모양과 수력학적 설계특성이 압력헤더내의 냉각수 유동현상과 증기발생기 카세트로 향하는 유량분포에 영향을 미친다. 또한 압력헤더내에는 증기발생기와 연결되어 있는 급수튜브 및 증기튜브가 매우 복잡한 모양으로 지나가는데, 이러한 튜브들에서 발생하는 냉각수의 압력강하가 증기발생기 카세트로 향하는 유동분포에 영향을 미칠 수 있다. SMART 는 두가지의 운전모드를 가지고 있는데 하나는 주순환펌프 4 대가 정상 작동하는 정상운전 조건과 다른 하나는 주순환펌프 1 대가 정지한 비정상운전 조건이다. 운전모드에 따라서 주순환펌프를 관통하는 냉각수 유량과 펌프에서 발생하는 수두는 표 2 와 같다.

표 1 SMART 의 주요 설계자료

원자로 정격출력 (MWt)	330	일차측 정상운전 압력 (MPa)	15.0
주순환펌프 수	4	노심관통 냉각재 유량 (kg/sec)	1550
정상출력운전시의 냉각재 온도, 노심출구/노심입구 (°C)	310.0/270.0	정상운전시의 증기발생기에서 발생하는 압력손실 (KPa)	30.0
정격증기압력 (MPa)	3	급수온도 (°C)	180
증기량 (kg/sec)	152.4	증기발생기 일차측 유효면적 (m ²)	0.1054
증기발생기 카세트 수	12	증기/급수 튜브다발 지름 (mm)	226.7/136.6

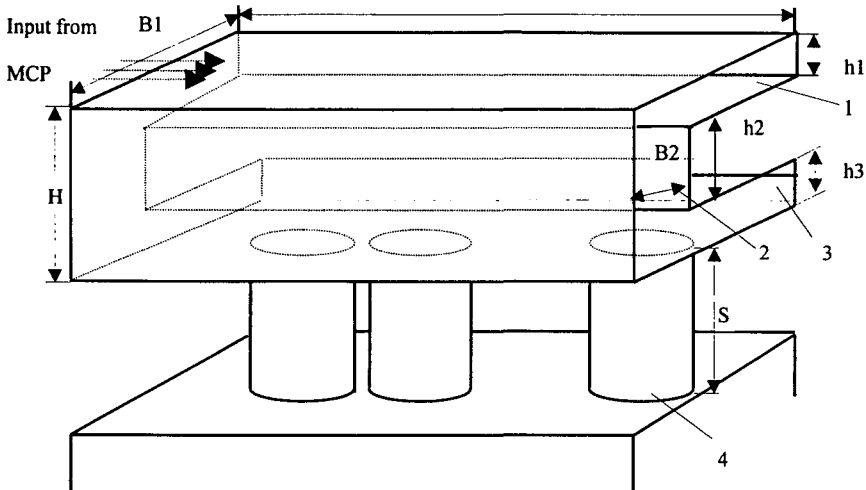


그림 2 주순환펌프 압력헤더의 개략도
 B1-720mm, B2-80mm, H-930mm, h1-130mm, h2-650mm, h3-150mm,
 L-9362mm, S-3000mm, 1-상부헤더, 2-중간헤더, 3-하부헤더, 4-증기발생기 카세트

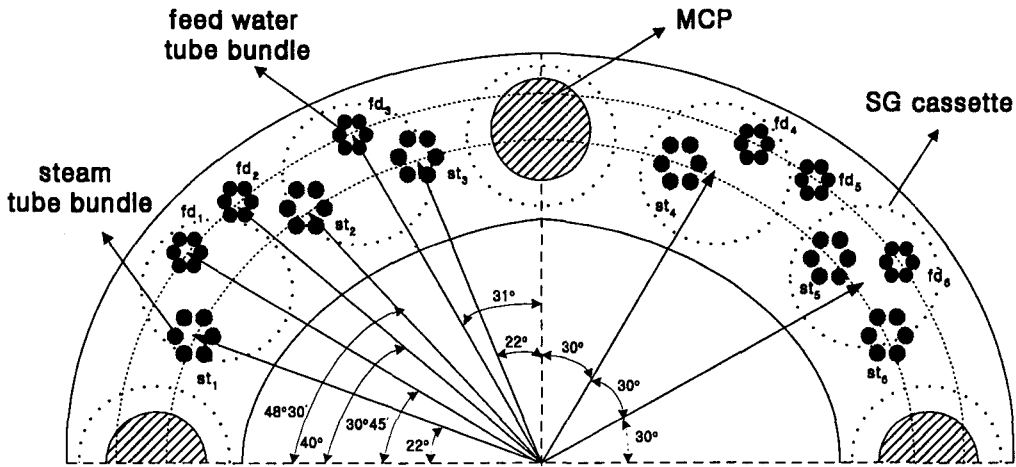


그림 3 주순환펌프 압력헤더의 평면도

표 2 SMART 운전모드

운전중인 펌프 수	유량 (kg/sec)	헤드 (m)	정지한 펌프로 역류하는 유량 (kg/sec)
정상운전 (4 펌프가동)	1550	13.5	-
비정상운전(3 펌프가동)	1113	8.6	232.5

3. 수치해석

주순환펌프 압력헤더내에서의 유량분포를 계산하기 위해 상용 전산유체코드인 CFX 를 사용하여 정상상태, 3 차원 조건에서 계산을 수행하였다. 본 계산에서는 유동장을 비압축, 난류, 다공매질 유동으로 가정하였으며 사용된 난류모델은 k-ε 이고 벽면조건으로는 no-slip 조건을 사용하였다. CFX 는 body fitted coordinate, 제어체적방법, 비엇물림 격자와 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 알고리즘을 사용하며 Navier-Stokes 운동량 방정식을 푼다.

3.1 해석대상 격자

주순환펌프 압력헤더의 실제 모양은 환상형이며 증기 및 급수튜브다발이 압력헤더내를 매우 복잡한 모형으로 관통하지만 본 해석에서는 일직선으로 압력헤더를 관통한다고 가정하였다. 격자생성의 편리와 계산시간의 절약을 위해서 해석결과에 큰 영향을 미치지 않는 범위내에서 압력헤더와 증기발생기 카세트를 직사각형으로 가정하였다. 증기발생기 카세트는 일차측 냉각수의 유로면적에 일치시켜서 격자를 생성하였고 하단에 설치 되어있는 오리피스를 모사하기 위한 블록이 형성되었다. 이 오리피스 블록에서 원하는 압력강하가 일어나도록 다공매질로 가정한 다음 CFX 입력자료를 주었다. 압력헤더내에 위치해 있는 증기 및 급수튜브 다발에서 발생하는 압력손실이 유동장에 영향을 미칠 수 있기 때문에 본 해석에서는 이 압력손실을 정확하게 표현하기 위해 해석대상격자를 그림 3 과 같이 다중

블록으로 구성하여 튜브다발이 관통하는 블록은 다공매질로 가정하여 실제와 같은 압력강하가 일어나도록 CFX 의 입력자료를 지정해주었다. 정상운전 조건에서는 1/4 대칭조건을 이용하여 해석대상 격자의 상부헤더 양쪽에서 냉각수가 들어오도록 경계조건을 주었고 비정상운전 조건에서는 1/2 대칭조건을 이용하여 해석대상 격자의 상부헤더 왼쪽과 중간 부분에서 펌프를 통과한 냉각수가 들어오고 상부헤더 오른쪽에서는 정지된 펌프쪽으로 역류하는 유량이 있도록 경계조건을 주었다. 1/4 과 1/2 해석대상격자는 각각 6,800 격자 셀과 16,200 격자 셀이 형성되었다.

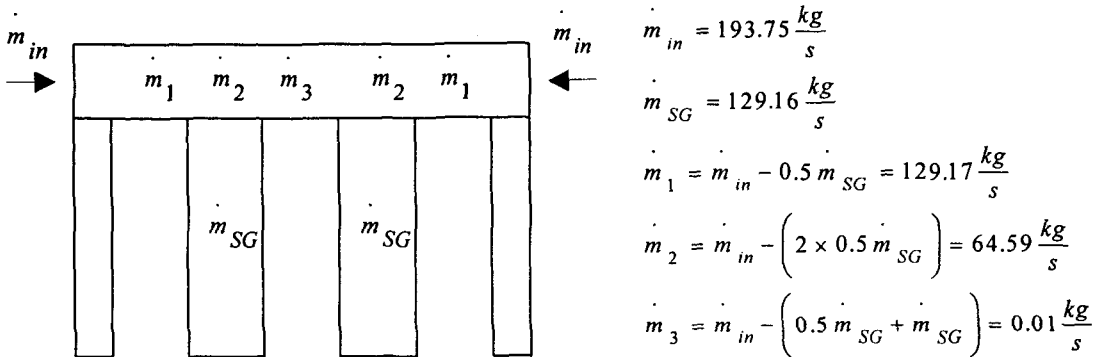
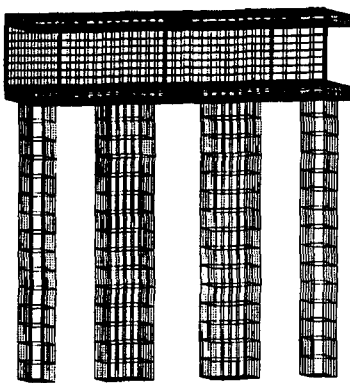


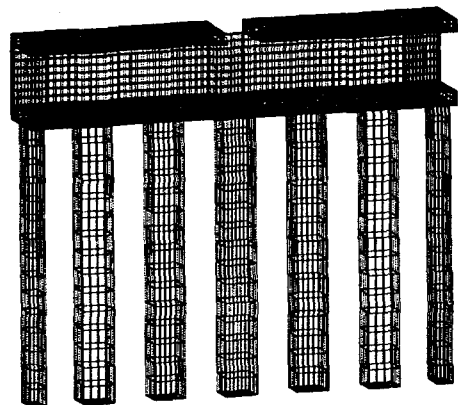
그림 4 튜브다발의 압력손실계수 계산을 위한 냉각수 유량 가정

표 3 정상운전 조건에서 증기와 급수튜브다발에서 발생하는 압력강하

정상운전(4 펌프 가동)			
튜브다발	압력손실계수(ζ)	튜브를 지나가는 유량(kg/s)	압력강하(Pa)
St ₁	0.211	129.17	285.1
St ₂		0.01	0.0
St ₃		129.17	285.1
Fd ₁	0.054	64.59	18.2
Fd ₂		0.01	0.0
Fd ₃		64.59	18.2



(a) 정상운전조건(4 펌프 가동)



(a) 비정상운전조건(3 펌프 가동)

그림 5 해석대상격자

3.2 경계조건과 압력손실조건

주순환펌프 압력헤더의 해석모형 격자에서의 입구조건은 Dirichlet 조건을 사용하기 때문에 속도, k 와 ϵ 를 지정해 주었으며 증기발생기 카세트 출구는 Neumann 조건인 압력경계조건을 사용하였다. 이 압력경계조건은 압력은 알고 있었으나 흐르는 유량을 모를 때 사용하는 일반적인 경계조건이다. 1/2 과 1/4 해석모형에서 주순환펌프 바로 밑에 위치하는 1/2 증기발생기 블록의 바깥면은 대칭조건을 적용하였다. 주순환펌프 압력헤더내를 관통하는 증기 및 급수튜브다발에서 발생하는 압력강하를 정량적으로 평가하기 위해 Idelchik의 핸드북을 이용하여 압력손실계수를 결정하고 주어진 유량에서의 압력강하를 계산하여 그 만큼의 압력강하가 수치계산 상에서 발생하도록 CFX의 입력자료로 주었다[5,6]. 압력손실계수와 압력강하는 표 3 과 그림 4 에 나타나 있다. 또한 실제 증기발생기 카세트에서 발생하는 압력강하도 해석대상 격자의 증기발생기 블록에서 발생하도록 다공매질로 가정한 다음 CFX의 입력자료로 주었다

$$k_{in} = 0.002V_{in}^2 \quad \epsilon_{in} = \frac{k_m^{1.5}}{0.3D} \quad \zeta = \frac{\Delta P}{\rho V / 2} \approx \left[1 - \frac{F_0}{F_1} \right] \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2 \quad (2)$$

(ζ : 압력손실계수, D: 수력지름, V: 평균 속도, F_1 : 상부헤더 유로면적, F_0 =F₁-튜브다발 면적)

4. 해석 결과

정상운전조건에서의 주순환펌프 압력헤더내의 유동분포를 CFX로 해석한 결과 압력헤더내에서 속도분포와 증기발생기 카세트를 통과하는 유량분포는 그림 6 과 표 4 와 같다. 그림 6에서 알 수 있듯이 압력헤더의 두 입구를 통해 들어온 냉각수는 압력헤더 중간지점을 기준으로 대칭적인 유동분포를 나타낸다. 입구를 통해 들어온 냉각수는 상부헤더 중간지점에 도달하기 전에 속도가 감소하면서 하부헤더로 흘러 내려가 증기발생기 카세트로 흐른다. 압력헤더 입구 바로 밑의 중간헤더에서는 국부적으로 순환하는 유동이 존재하기 때문에 입구 바로 밑의 증기발생기 카세트로 향하는 유동은 이 순환 유동을 선회하여 내려간다. 이와 같은 유동현상 때문에 각 증기발생기 카세트로 흐르는 유량이 오리피스 크기에 상관없이 거의 유사하며 비균일도는 1% 미만이 된다. 비정상운전조건에서의 압력헤더내의 속도분포와 증기발생기 카세트를 통과하는 유량분포는 그림 7 과 표 4 와 같다. 정상 가동하는 펌프사이의 상부헤더 영역에서는 냉각수가 입구를 통해서 들어와 즉시 하부헤더로 흘러가 증기발생기로 향하는데 이중 중앙 펌프쪽에 가까이 위치해 있는 냉각수는 정지된 펌프쪽으로 역류하는 냉각수의 영향으로 정지된 펌프쪽으로 향하게 된다. 이로 인해 정지된 펌프쪽의 증기발생기로 흐르는 유량이 압력헤더 중간영역에 위치한 증기발생기로 흐르는 유량보다 많게 된다. 그리고 압력헤더 중간에 위치한 펌프 하부에서는 국부적으로 순환하는 유동이 바로 밑의 증기발생기로는 향하는 유동을 방해한다. 이와 같은 유동현상으로 인해 각 증기발생기 카세트로 흐르는 냉각수 유량의 비균일도는 정상운전 조건보다 크며 오리피스에서 발생하는 압력강하가 작을수록 비균일도는 더 커져 8% ~ 10% 정도가 된다. 그러나 세종류의 오리피스 압력강하가 설계기준인 비균일도 10% 이하는 모두 만족한다.

표 4 오리피스에서 발생하는 압력강하에 따른 증기발생기 카세트로 향하는 유량분포

	정상 운전 (주순환펌프 4 대 가동)			비정상 운전 (주순환펌프 3 대 가동)		
	2.25 KPa	5.63 KPa	11.27 KPa	2.25 KPa	5.63 KPa	11.27 KPa
SG 1	128.25	128.70	128.64	64.48	66.30	63.84
SG 2	130.80	130.32	129.30	66.05	65.67	64.32
SG 3	130.80	130.08	129.30	60.33	59.04	60.09
SG 4	128.50	128.30	128.64	55.59	55.65	56.24
SG 5	130.80	130.08	129.30	60.00	59.91	60.49
SG 6	130.80	130.32	129.30	61.26	62.48	62.61
SG 7	128.25	128.70	128.64	62.00	63.14	63.56
SG 8	130.80	130.32	129.30	61.26	62.48	62.61
SG 9	130.80	130.08	129.30	60.00	59.91	60.49
SG 10	128.50	128.30	128.64	55.59	55.65	56.24
SG 11	130.80	130.08	129.30	60.33	59.04	60.09
SG 12	130.80	130.32	129.30	66.05	65.67	64.32

*주순환펌프는 증기발생기(SG) 1, 4, 7, 10 위에 위치함. 정지한 주순환펌프는 SG 7 위에 있는것으로 가정

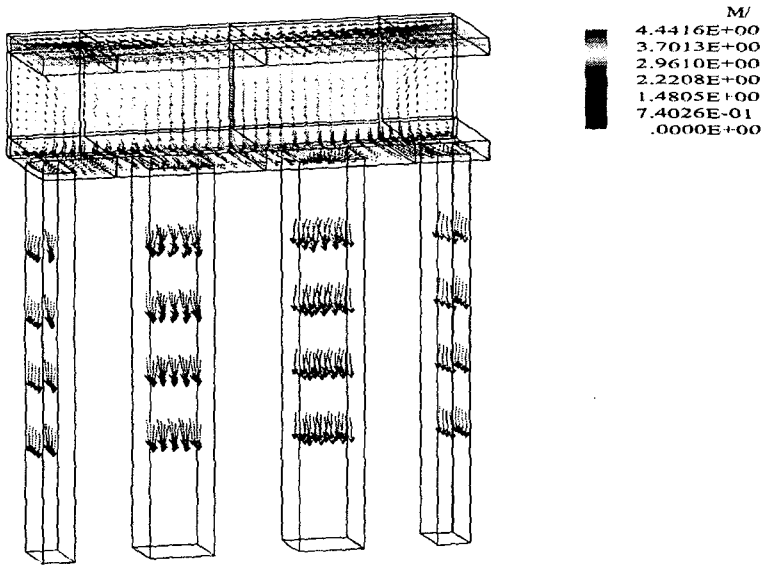


그림 6 정상운전조건에서 속도분포($\Delta P=11.27\text{KPa}$)

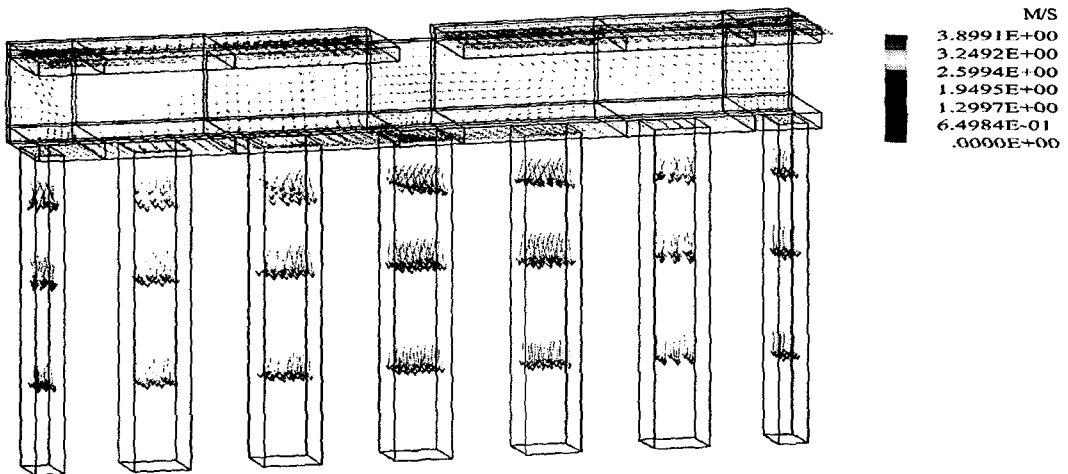


그림 7 비정상운전조건에서 속도분포($\Delta P=11.27\text{KPa}$)

5. 결론

개념설계 단계에 있는 SMART의 증기발생기 카세트 하단의 오리피스 압력강하의 보수성을 완화시키기 위한 자료 생산 및 평가를 위해서 현재의 오리피스 압력강하보다 50%와 20%로 줄여서 민감도 분석을 상용 전산유체코드인 CFX로 수행하였다. 세 가지 종류의 오리피스에 대하여 정상운전 조건과 비정상운전 조건에서 주순환펌프 압력헤더내에서 증기발생기 카세트로 향하는 유량을 분석한 결과 정상운전 조건에서는 오리피스에 크기에 상관없이 거의 균일한 유량이 증기발생기 카세트로 흘러감을 알 수 있었고 비정상운전 조건에서는 세가지 오리피스 종류에 대해 비균일도가 8%~10%를 나타내며 오리피스의 발생하는 압력강하가 클수록 균일한 유량분포가 흘러감을 알 수 있었다. 그러나 설계기준인 비균일도 10% 이하는 다 만족시키는 것으로 검증되었다. 따라서 주순환펌프 압력헤더내에서의 유량분포 관점에서는 오리피스에서 발생하는 압력강하가 제일 작은 2.25KPa을 설치하는 것이 최적설계로 판단된다. 증기발생기 하단에 설치 될 오리피스의 크기를 최종적으로 결정하기 위해서는 유량분포 뿐만 아니라 유동불안정성 분석을 반드시 수행 해야하고 실증시험을 통해 검증해야만 한다.

참고 문헌

1. Smirnov V.P., Latynin V.A., Batashova G.N. Methodology for non-steady thermal hydraulic analysis of the core as a porous body. Atomnaya Energiya, vol. 75, issue 4, October 1993.
2. V.I. Subbotin, M.H. Ibragimov, P.A. Ushakov, Hydrodynamics and heat transfer in nuclear power facilities. M. Atomizdat, 1975
3. Engineering Guideline 1604, Part II, IPPE, 1989
4. V. A. Reshetov, On calculations of round distribution header for vessel-type nuclear reactor, RDIPE, 1970.
6. Idelchick I.E. Handbook on hydraulic resistances. Moscow, Mashinostroenie, 1975.
7. CFX-4.2 Manual, AEA, 1997.