

## 일체형원자로내 주순환펌프 압력헤더가 증기발생기 카세트로 흐르는 냉각수 유동분포에 미치는 영향분석

강형석, 윤주현, 김주평, 조봉현, 이두정

한국원자력연구소

### 요 약

일체형원자로인 SMART에서는 증기발생기와 주순환펌프가 배관으로 연결되어 있지 않고 주순환펌프를 통과한 냉각수가 압력헤더를 통하여 12개의 증기발생기 카세트로 흐르게 된다. 각 증기발생기 카세트를 통과하는 냉각수 유량분포의 비균일도를 운전모드에 따라 계산하여 이 압력헤더가 각 증기발생기 카세트로 흐르는 냉각수 유동분포에 미치는 영향을 분석하고 SMART 주순환펌프 압력헤더의 설계가 설계기준을 만족시키는지를 검증하였다. 검증계산 결과 비균일도가 정상운전시는 0.8%, 비정상운전시는 7.1%로 설계기준을 만족시키는 것을 확인하였다.

### 1. 서론

한국원자력연구소는 해수담수화 등의 다목적용으로 안전성과 경제성이 향상된 열출력 330MWt급의 일체형원자로인 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)를 개발하고 있다. SMART의 주요 설계 제원은 표 1과 같다. SMART에서는 관류식 나선형 증기발생기, 밀봉형 원자로 주순환펌프, 자기 가압기와 같은 주요 기기들이 원자로용기내에 설치된다. 증기발생기가 원자로용기안에 설치됨에 따라 주순환펌프 후단과 증기발생기 사이에는 그림 1과 같은 압력헤더가 존재하게 되며 냉각수는 이 압력헤더를 통하여 12개의 증기발생기 카세트로 흘러간다. 그러므로 압력헤더의 수력적 설계특성이 냉각수의 유동분포에 영향을 미치게 된다. 각 증기발생기에서 발생하는 증기가 요구되는 온도와 압력을 가지기 위해서는 1차 계통 냉각수가 각 증기발생기 카세트로 가능한 한 균일하게 분포되어야 하며 정상운전 조건에서는 식 (1)의 비균일도가 5% 이하, 주순환펌프 한대가 정지된 비정상운전 조건에서는 비균일도가 10% 이하여야 한다[1,2,3]. 본 논문에서는 개념 설계단계에 있는 SMART의 주순환펌프 압력헤더가 증기발생기 카세트로 흐르는 냉각수의 유량분포에 미치는 영향을 분석하고 운전모드에 따른 냉각수 유량분포의 비균일도를 계산하여 압력헤더 설계기준을 만족시키는지를 검증하였다. 수치 계산에는 상용 전산유체코드인 CFX를 사용하였으며 정상상태, 3차원 계산을 수행하였다.

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

표 1 SMART의 주요 제원

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)	45.1
정격증기압력 (MPa)	3	급수온도 (°C)	180
증기량 (kg/sec)	152.4	증기발생기 일차측 유효면적 (m <sup>2</sup> )	0.1054
증기발생기 카세트 수	12	증기/급수 튜브다발 지름 (mm)	226.7/136.6

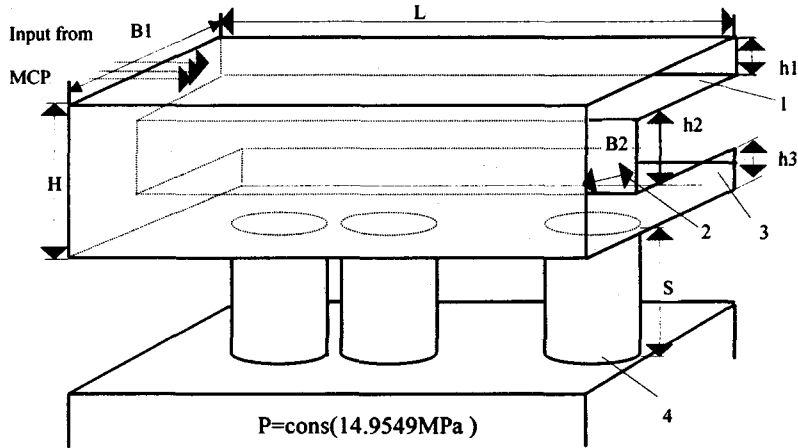


그림 1 주순환펌프 압력헤더의 개략도

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

## 2. 압력헤더 설계기준 및 수치해석의 필요성

일체형원자로내 압력헤더를 설계할 때 일반적으로 고려하는 설계인자는 압력헤더내로 들어오는 냉각수의 동적헤더와 압력헤더에서 발생하는 압력강하의 비율이 10 이상이 되도록 하는 것이다[1,2,3,4]. 이것을 Euler 설계인자라고 한다. 이 Euler 설계인자가 10 이상이 되면 압력헤더내에서의 냉각수 유량분포는 비교적 균일하게 된다. 이 설계기준을 따라 SMART에서는 증기발생기 하단에 오리피스를 설치하였으며 이 오리피스에서 발생하는 압력강하는 전체 증기발생기에서 발생하는 압력강하의 25%를 차지한다. SMART의 정상운전 조건에서 주순환펌프 압력헤더의 Euler 설계인자는 14.8이 되어 일체형원자로 압력헤더 설계기준을 만족시킨다. 그러나 이러한 설계기준은 일반적인 압력헤더의 설계기준이다. SMART 주순환펌프 압력헤더내에서의 유량분포는 주순환펌프 압력헤더의 기하학적인 모양과 수력학적 특성에 크게 의존한다. 따라서 SMART의 상세설계, 인허가와 건설을 위해서는 주순환펌프 압력헤더내에서의 유량분포를 운전모드에 따라 실험과 수치해석에 의하여 검증해야만 한다. 특히 주순환펌프 한대가 정지된 비정상운전조건에서는 정지된 펌프쪽으로 역류하는 유량이 있기 때문에 압력헤더내의 유량분포가 상당히 비균일해질 수 있다. 따라서 실험과 수치해석을 통해서 비정상운전 조건에서 각 증기발생기 카세트를 통과하는 냉각수의 유량분포가 설계기준인 비균일도 10% 이하를 만족하는지 반드시 평가할 필요가 있다. SMART의 운전모드는 표 2와 같고 정지한 펌프쪽으로 역류하는 유량은

공급자에 의해 제공된다. 주순환펌프 압력헤더의 평면도는 그림 2 에 나타나 있다.

표 2 SMART 운전모드

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

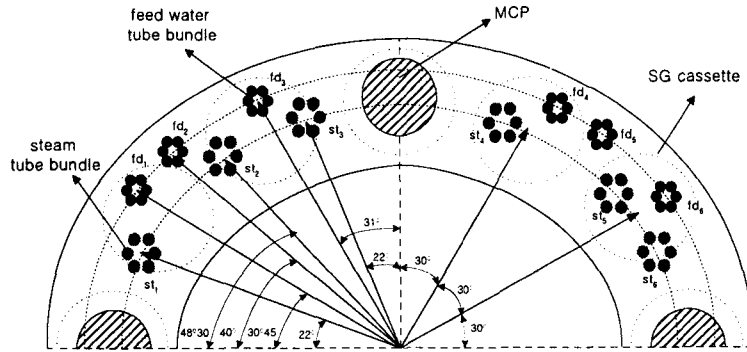


그림 2 주순환펌프 압력헤더 평면도

### 3. 수치해석

주순환펌프 압력헤더내에서의 유량분포를 계산하기 위해 상용 전산유체코드인 CFX 를 사용하여 정상 상태, 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, 비정렬격자와 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 알고리즘을 사용하며 Navior-Stokes 운동량 방정식을 푼다.

#### 3.1 해석대상 격자

주순환펌프 압력헤더의 실제 모양은 환상형이며 증기및 급수튜브다발이 압력헤더내를 매우 복잡한 모 형태로 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 유로면적과 일치시키기 위해 체적다공도(volume porosity)를 주었다. 압력헤더내에 위치해 있는 증기 및 급수튜브다발에서 발생하는 압력손실이 유동장에 영향을 미칠수 있기 때문에 본 계산에서는 이 압력손실을 정확하게 표현하기 위해 해석 대상격자를 그림 3 과 같이 다중블럭으로 구성하여 튜브다발이 관통하는 블록은 다공매질로 가정하여 실제와 같은 압력강하가 일어나도록 CFX 의 입력자료를 지정해주었다. 정상운전 조건에서는 1/4 대칭 조건을 이용하여 해석대상 격자의 상부헤더 양쪽에서 냉각수가 들어오도록 경계조건을 주었고 비정상 운전 조건에서는 1/2 대칭조건을 이용하여 해석대상 격자의 상부헤더 왼쪽과 중간 부분에서 펌프를 통과한 냉각수가 들어오고 상부헤더 오른쪽에서는 정지된 펌프쪽으로 역류하는 유량이 있도록 경계조

건을 주었다. 1/4 과 1/2 해석대상격자는 각각 15,350 셀과 21,312 셀이 형성되었다.

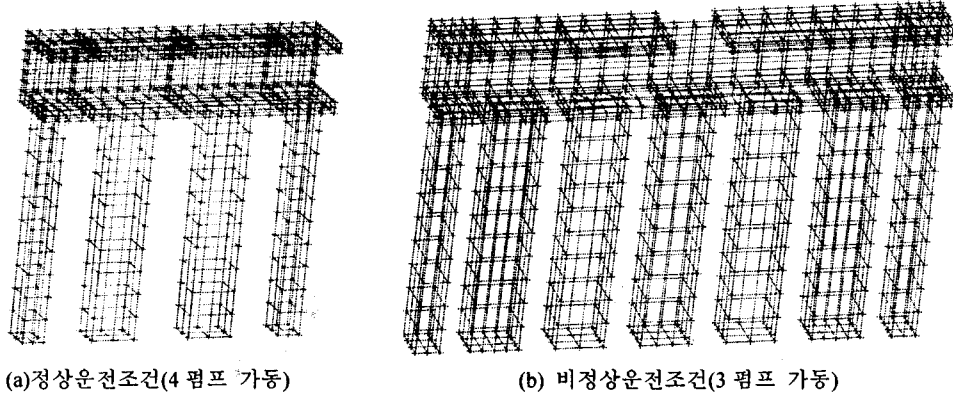


그림 3 해석대상격자

### 3.2 경계조건과 압력손실조건

주순환펌프 압력헤더의 해석모형 격자에서의 입구조건은 Dirichlet 조건을 사용하기 때문에 속도, k 와  $\epsilon$  을 지정해 주었으며 증기발생기 카세트 출구는 Neumann 조건인 압력경계조건을 사용하였다. 이 압력 경계조건은 압력은 알고 있었으나 흐르는 유량을 모를 때 사용하는 일반적인 경계조건이다. 1/2 과 1/4 해석모형에서 주순환펌프 바로밑에 위치하는 1/2 증기발생기 블록의 바깥면은 대칭조건을 적용하였다. 주순환펌프 압력헤더내를 관통하는 증기 및 급수튜브다발에서 발생하는 압력강하를 정량적으로 평가 하기위해 Idelchik 의 핸드북을 이용하여 압력손실계수를 결정하고 주어진 유량에서의 압력강하를 계산 하여 그 만큼의 압력강하가 수치계산상에서 발생하도록 CFX 의 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 CFX 의 입력자료로 주었다

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

( $\zeta$ : 압력손실계수, D: 수력지름, V: 평균 속도,  $F_1$ : 상부헤더 유로면적,  $F_0$ =F<sub>1</sub>-튜브다발 면적)

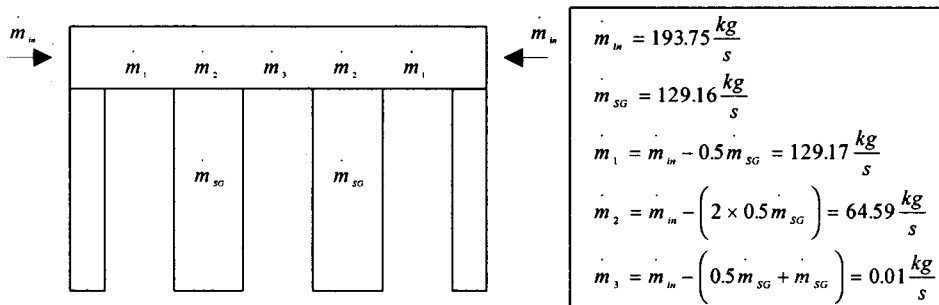


그림 4 튜브다발의 압력손실계수 계산을 위한 냉각수 유량 가정

표 3 정상운전 조건에서 증기와 급수 튜브다발에서 발생하는 압력강하

정상운전(4 펌프 가동)			
튜브다발	압력손실계수( $\zeta$ )	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

비정상운전시에 증기와 급수 튜브다발에서 발생하는 압력강하는 정상운전시 발생하는 압력강하를 기준으로  $\Delta P_1 = \dot{m}_1^2 / \dot{m}_2^2 \Delta P_2$ 의 관계식을 이용하여 구하였으며 튜브다발을 지나가는 유량은 표 2에 제시된 유량을 이용하였다.

### 3.3 해석결과

정상운전조건에서의 주순환펌프 압력헤더내의 유동분포를 CFX로 해석한 결과 압력헤더내에서 속도분포와 증기발생기 카세트를 통과하는 유량분포는 그림 5와 같다. 그림 5에서 알수 있듯이 압력헤더의 두 입구를 통해 들어온 냉각수는 압력헤더 중간지점에 기준으로 대칭적인 유동분포를 나타낸다. 입구를 통해 들어온 냉각수는 상부헤더 중간지점에 도달하기전에 하부헤더로 흘러가 증기발생기 카세트로 흘러가고 이중 일부는 증기발생기에서 발생하는 큰 압력강하로 인한 유동저항 때문에 압력헤더 입구 쪽의 증기발생기쪽으로 흘러간다. 이와 같은 유동현상 때문에 각 증기발생기 카세트로 흐르는 유량이 거의 유사하고 비균일도는 0.8%가 된다. 만약 증기발생기에서 압력강하가 발생하지 않는다면 비균일도는 매우 커질것이다. 비정상운전조건에서의 압력헤더내의 속도분포와 증기발생기 카세트를 통과하는 유량분포는 그림 6과 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 7.1%가 된다

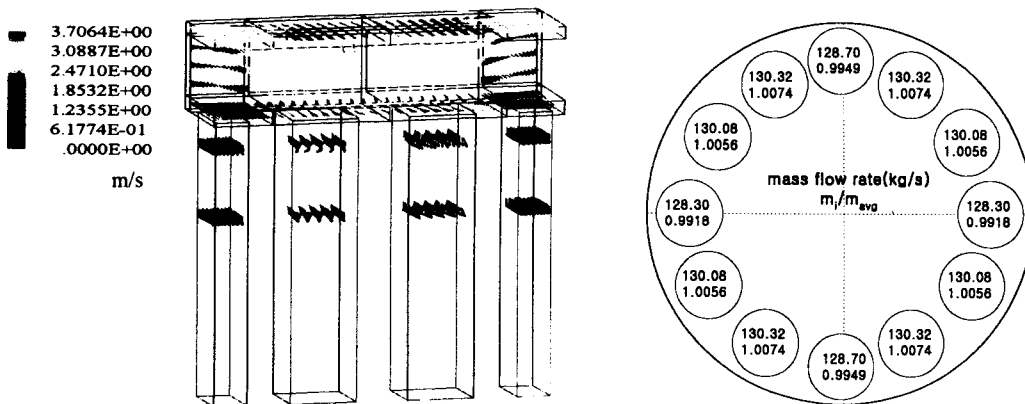


그림 5 정상운전시 압력헤더내의 유동분포와 증기발생기를 통과하는 유량

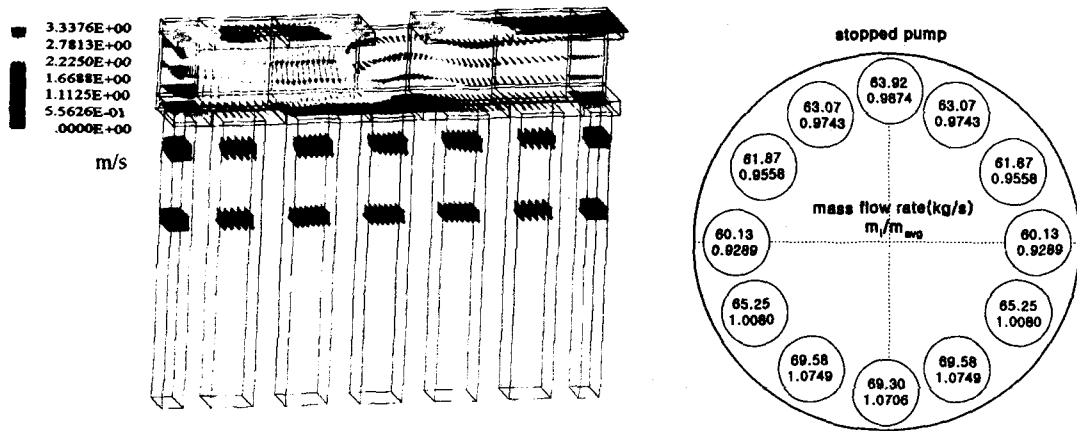


그림 6 비정상운전시 압력헤더내의 유동분포와 증기발생기를 통과하는 유량

#### 4. 결론

개념설계 단계에 있는 SMART의 주순환펌프 압력헤더가 증기발생기 카세트로 흐르는 유동에 미치는 영향을 분석하고 각 증기발생기 카세트로 흐르는 유량을 조사하기 위해 상용 전산유체코드인 CFX를 이용하여 SMART 운전조건에 따라 3차원 계산을 수행하였다. 그 결과 정상운전 조건에서는 각 증기발생기 카세트로 흐르는 냉각수의 비균일도가 0.8%, 주순환펌프 한대가 정지된 비정상운전 조건에서는 비균일도가 7.1%로 계산되어 일체형원자로 설계기준을 만족시켜 압력헤더의 설계의 타당함이 검증되었다. 그러나 SMART의 인허가와 건설을 위해서는 주순환펌프 압력헤더에 대한 실험적 검증이 반드시 수행되어야 할 것이다.

#### 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 Energia, 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.
5. Idelchick I.E. Handbook on hydraulic resistances. Moscow, Mashinostroenie, 1975.
6. CFX-4.2 Manual, AEA, 1997.