

원자로배수탱크내 Sparger 에 대한 유동특성 및 최적설계

김광추* · 박만홍** · 박경석*** · 이종원***
(1999년 3월 29일 접수)

Flow Characteristics and Optimal Design for RDT Sparger

Kwang-Chu Kim, Man-Heung Park, Kyoung-Suk Park and Jong-Won Lee

Key Words : RDT Sparger(원자로배수탱크 Sparger), Flow Resistance Coefficient(유동저항계수), Flow Ratio(유량비), Branch Angle(분기각), Section Area Ratio(단면적비), Outlet Nozzle Diameter(출구노즐직경)

Abstract

A numerical analysis for RDT sparger of PWR(Pressurized Water Reactor) is carried out. Computation is performed to investigate the flow characteristics as the change of design factor. As the result of this study, RDT sparger's flow resistance coefficient is $K=3.53$ at the present design condition if engineering margin is considered with 20%, and flow ratio into branch pipe is $Q_1/Q_0=0.41$. Velocity distribution at exit is not uniform because of separation in branch pipe. In the change of inlet flow rate and section area ratio of branch pipe for main pipe, flow resistance coefficient is increased as Q_1/Q_0 decreasing, but in the change of branch angle and outlet nozzle diameter of main pipe, flow resistance coefficient is decreased as Q_1/Q_0 decreasing. As the change rate of Q_1/Q_0 is the larger, the change rate of flow resistance coefficient is the larger. The change rate of pressure loss is the largest change as section area ratio changing. The optimal design condition of sparger is estimated as the outlet nozzle diameter ratio of main pipe is $D_1/D_0=0.333$, the section area ratio is $A_1/A_0=0.2$ and the branch angle is $\alpha=55^\circ$.

기호설명

a : 이산화방정식의 계수
 A : 관의 단면적
 b : 이산화방정식의 상수
 D : 관의 직경
 E : 잉여값
 K : 유동저항계수
 k : 난류운동에너지
 L : 축소영역의 길이
 P : 압력
 R : 반경
 Q : 유량
 Re : 레이놀즈수

V : 속도

그리스 문자

α : 분기각
 ϵ : 난류운동에너지 소산율
 ϕ : 종속변수
 λ : 마찰계수
 μ : 점성계수
 ρ : 밀도
 Δp : 압력손실

하첨자

e : 주관 출구
 i : 주관 입구
 nb : 인접격자점
 p : 계산격자점
 s : 지판
 st : 주관

* 한국전력기술㈜

** 회원, 한국전력기술㈜

*** 회원, 경희대학교 기계공학과

1. 서론

국내 표준원전(PWR)에서 채택하고 있는 증기방출계통은 안전감압계통(SDS) 및 안전밸브(PSV)를 통해 원전사고시 원자로냉각재계통(RCS)으로부터 방출되는 고온, 고압의 증기를 원자로배수탱크(RDT)로 방출 및 유도하는 계통이다. 방출 증기는 효과적인 응축 및 고압의 증기 방출에 따른 큰 부하를 경감시키기 위하여 Sparger를 통해 거대한 응축수조인 원자로배수탱크내로 분사되어 과냉각상태의 물과 직접 접촉에 의해 응축하게 된다. 이때 원자로배수탱크내의 압력은 상승하게 되며 내부압력이 설계압력 $1.0 \times 10^6 \text{N/m}^2$ 이하의 일정치 $8.55 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 이상으로 상승하면 탱크 상단에 설치되어 있는 파열판(Rupture Disk)이 터져서 방출물은 격납용기내의 대기중으로 방출되어 과압력으로부터 보호를 받도록 설계되어 있다. 이와 같은 원자로배수탱크의 설계목표는 궁극적으로 요구되는 모든 설계요건을 만족시키는 최소 용량의 원자로배수탱크를 설계하는 것이며, 또한 파열판이 파열하면 방사성물질로 격납용기내를 심각하게 오염시키므로 가능한 이 파열판을 파열시키지 않도록 설계하는 것이 바람직하다. 이 원자로배수탱크내의 압력상승은 수조의 물의 양 및 Sparger의 성능 등에 직접적으로 영향을 받으므로 이의 성능은 최소 용량의 원자로배수탱크를 설계하기 위해 대단히 중요한 변수이다. 성능이 우수한 Sparger를 사용하면 용량이 적은 원자로배수탱크를 설계하더라도 요구되는 설계요건을 만족시킬 수 있을 것이다. 국내 표준원전에서 실제로 사용하고 있는 원자로배수탱크의 Sparger는 삼발이형 Sparger로서 KWU의 T형 Sparger와 비슷하나 Sparger의 양쪽 끝이 열려 있는 형태이다. 이러한 삼발이형 Sparger는 ABB-CE사에서 개발되었으며, Sparger 및 원자로배수탱크의 설계는 상세한 계산이나 실험 없이 유체의 진동과 관련된 하중만을 고려하여 결정되었다. 그러므로 이러한 형상의 Sparger가 과연 발전소의 운전조건이나 RDT 형상을 고려하여 볼 때 우수한 효과를 지니고 있는지는 상세한 검토와 계산이 필요하다.⁽¹⁾ 이와 관련하여 최근에 여러 연구기관⁽²⁻⁵⁾에서 이를 검증하기 위한 연구가 진행되고 있으나 대부분 증기응축현상에 국한하여 연구되어지고 있다. 그러나 Sparger의 목적이 방출 증기에 의한 탱크내의 압력상승에 따른 부하 경감에 있으므로 Sparger 출구에서의 응축에 따른 유동특성에 앞서 Sparger 내부의 유동특성을 파악함으로써 설계인자에 의한 최적의 Sparger를 찾아내는 것은 중요한 문제이다. 또한 이와 관련된 연구는 현재 차세대

원전(KNGR)에 처음 도입되는 격납건물내에 설치되는 재장전수조(IRWST)에 Sparger를 장착하여 고온, 고압의 증기를 응축수조내로 방출시킨다는 점에서 규모만 다를 뿐 동일한 유체 현상의 개념을 지니고 있어 본 연구를 통해 얻어진 결과들은 현재 설계중에 있는 원전을 포함하여 향후 진행될 원전의 증기방출계통내의 Sparger설계시에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 Sparger의 입구 유동 조건 및 기하학적 조건 등의 설계인자에 따른 유동 특성 등을 고찰하고 최적의 설계조건을 찾고자 한다.

2. 이론해석

2.1 해석모델

가압정수로형 원전의 원자로냉각재계통의 고온관에 연결된 가압기 및 증기방출계통에 대한 배관 및 계속도면(P&ID)는 Fig. 1과 같다. 정상조건에서 가압기는 계통내의 압력을 $1.55 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 로 유지시킨다. 그러나 다중사고에 의해 계통내의 압력 및 가압기의 압력이 $1.72 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 이상이 되면 Fig. 1과 같은 가압기 증기방출계통이 작동하게 되고 증기는 3개의 가압기 안전밸브 및 배관을 통해 원자로배수탱크내로 유입된다. 본 연구에서 수행하고자 하는 부분은 이러한 증기방출계통중의 원자로배수탱크내에 장착된 Sparger에 대한 최적설계 방안을 모색해 보는 것으로서 Fig. 1의 우측 원형의 점선으로 표시된 부분이다. 이와 관련한 원자로배수탱크 및 Sparger에 대한 형상 및 치수는 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 삼발이형 Sparger는 현재 설계중인 YGN 5&6을 포함하여 국내 표준원전에 사용되고 있는 원자로배수탱크내의 Sparger로서 1개의 주관과 2개의 지관이 대칭적으로 분기되어진 삼발이 형태의 분기관 형태로서 주관의 입구 및 출구의 직경은 각각 $D_1=0.4572 \text{ m}$, $D_2=0.1524 \text{ m}$ 이며 지관의 직경 D_3 는 0.254 m 로서 원자로배수탱크의 상면으로부터 1.067 m 하부에서 양쪽으로 65° 의 각도를 이루며 대칭적으로 분기되어져 있다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같은 원자로배수탱크내의 Sparger를 해석모델로 하여 현재 설계된 기하학적 조건 및 유동조건에 따른 Sparger 내부의 유동양상 및 핸드북⁽⁶⁾에 근거한 설계계산서의 유동저항계수 산출에 대한 타당성을 고찰하고, 입구에서의 유량조건, 분기각의 변화, 주관에 대한 지관의 단면적비의 변화 및 주관 입구에 대한 주관 출

구노즐의 직경비 변화에 따른 Sparger 내부의 유량분배 및 손실압력의 변화 등을 수치계산을 통하여 고찰해 보겠다 한다.

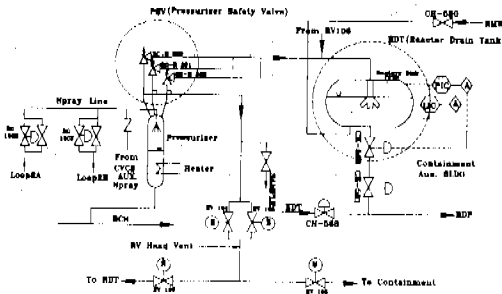


Fig. 1 P&ID of steam discharge system.

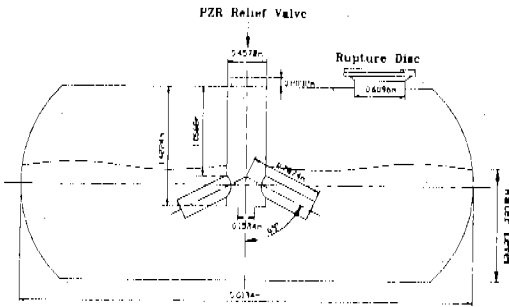
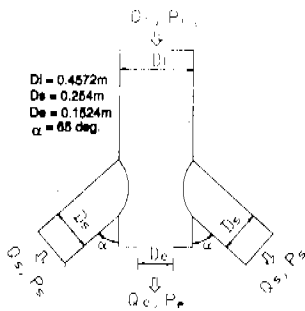


Fig. 2 Schematic of reactor drain tank.



- Qi = Steam flow from PSV
 - MIN. = 81.11 kg/s
 - MAX. = 236.14 kg/s
- Qs = Side branch steam flow
- Qe = Straight passage steam flow
- Di = Sparger channel diameter
- De = Side branch diameter
- De = Straight passage exit diameter
- alpha = Side branch angle (deg.)
- Pi, Ps, Pe = Pressure

Fig. 3 Geometry and dimension of RDT Sparger.

2.2 지배방정식

Sparger 내의 유동을 3 차원, 정상상태, 비압축성 및 난류로 간주하고 난류모델로는 재순환 유동 및 급격한 유동단면적의 변화가 일어나는 난류 유동 특성을 비교적 타당하게 예측할 수 있는 것으로 알려진 RNG(ReNormalized Group) k-epsilon 모델(7)을 사용하였다. 또한 Sparger 벽면에서의 열전달 효과를 무시하였을 경우, Sparger 내의 유동장을 기술하는 지배방정식은 아래와 같이 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지 방정식 및 난류운동에너지 소산을 방정식으로 나타낼 수 있다.

연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

난류운동에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G - \rho \epsilon \tag{3}$$

난류운동에너지 소산을 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \\ &+ \frac{\epsilon}{k}(C_1 G - C_2 \rho \epsilon) - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \end{aligned} \tag{4}$$

윗식에서 $\rho, u_j, \mu, k, \epsilon$ 및 p 는 각각 밀도, 속도 성분, 점성계수, 난류운동에너지, 난류운동에너지 소산율 및 압력을 나타낸다. 또한 응력텐서, τ_{ij} , 난류동점성계수 μ_t , 난류 생성항, G 및 난류상수, $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon, \eta, \eta_0$ 및 β 는 아래와 같다.

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad G = 2\mu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \eta = S \frac{\epsilon}{k}$$

$$C_1 = 1.42, \quad C_2 = 1.68, \quad C_\mu = 0.085,$$

$$\sigma_k = 0.719, \quad \sigma_\epsilon = 0.719, \quad \eta_0 = 4.38, \quad \beta = 0.012 \tag{5}$$

윗식에서 S_{ij} 및 S 는 다음과 같다.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad S = \sqrt{(2S_{ij}S_{ij})} \quad (6)$$

Sparger 내부의 손실압력의 크기를 알아보기 위하여 무차원수인 유동저항계수를 구하였으며, 이에 대한 정의는 식 (7)과 같이 입구에서의 동압 (Dynamic Pressure)에 대한 입출구 사이의 전압손실 (Total Pressure Loss)의 비로 정의하였다. (6X8X9X11)

$$K_i = \frac{\Delta p_{tot}}{\rho V_i^2 / 2} \quad (7)$$

윗식에서 Δp_{tot} 는 Sparger 입출구 사이의 전압차이며 V_i 는 입구에서의 유입속도이다.

레이놀즈수의 정의는 다음과 같다.

$$Re = \frac{\rho V_i D_i}{\mu} \quad (8)$$

여기서 D_i 는 주관 입구의 직경이다.

2.3 경계조건

Sparger 내의 작동유체는 단상의 증기(Steam)로 가정하고 물성치는 일정하다고 가정하였다. 계산에 사용된 유체의 물성치는 다음과 같다.

Density : $\rho = 122.58 \text{ kg/m}^3$
 Viscosity : $\mu = 2.43 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$
 @ $1.72 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
 Saturation Condition (9)

입구에서는 경계조건으로 균일속도조건을 사용하였으며 속도의 크기는 입구에서의 유량변화에 따른 계산을 제외하고는 가압기 안전밸브 3 개가 모두 개방된 것으로 가정하여 238.14kg/s 의 최대 유량이 흐른다고 가정하였다. 입구에서의 k 와 ϵ 의 초기조건으로는 식 (10)의 값을 사용하였으며, 출구경계조건으로는 탱크내의 압력을 대기압으로 가정하고 출구외부에 대해 0N/m²의 압력경계조건을 사용하였다. 또한 벽면에 대해서는 점착경계조건을 부여하였다.

$$k_i = 0.003V_i^2, \quad \epsilon_i = \frac{0.009k_i^{1.5}}{0.03D_i} \quad (10)$$

2.4 수치해석

본 연구에서는 원자로배수탱크내의 Sparger 에 대한 유동특성을 해석하기 위해 유한체적법을 사용하는 상용 프로그램인 PHOENICS v3.1 이 이용되었다. 수치계산시 대류항에 대해서는 하이브리드 도식(Hybrid Scheme)을 사용하였으며, 압력장을 얻기 위해서는 SIMPLEST 방법을 사용하였다. 격자물 구성하는 좌표계는 경계밀착좌표계(Body Fitted Coordinate System)을 사용하였으며 Sparger 의 주관과 지관을 각각 별개의 영역으로 가정하여 격자를 생성한 후 이들 접촉 경계면을 통해 데이터를 주고 받는 Multi-Block 방법을 사용하였다. 이러한 Multi-Block 방법은 서로의 경계에서의 제어체적을 공유하여 계산하게 됨으로써 속도와 압력을 동일한 제어체적내에서 계산하는 Non-Staggered Grid 방식을 사용하여 계산한다.

Fig. 4 는 계산에 사용된 65°의 분기각을 갖는 Sparger 에 대한 격자망이다. 실제 계산은 축대칭인 점을 고려하여 흰색의 실선으로 표시된 x-y 평면에 대해 1/4 의 영역만을 모델링하여 계산하였다. 이때 사용된 격자수는 주관에 대해서는 28x20x48 개이며 지관에 대해서는 18x10x14 이다. 이 격자수는 분기각의 변화, 주관에 대한 지관의 단면적 비 변화 및 주관 입구에 대한 주관 출구노즐의 직경비 변화에 따른 기하학적 형상 변화 및 입구 유동조건에 따른 계산시 모두 동일한 격자수가 적용되었다.

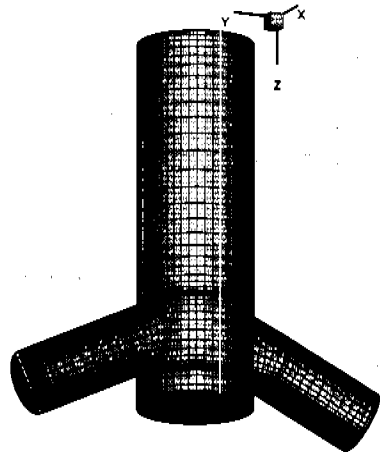


Fig. 4 Grid of RDT Sparger ($\alpha=65^\circ$)
 (Main : 28x20x48 , Branch : 18x10x14).

반복계산시의 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향이완(Under-relaxation)을 도입하였으며, 압력장과 난류량에 대해서는 선형이완(Linear Relaxation)방법을 적용하여 이완계수로서 각각 0.3 과 0.2 를 사용하였으며, 속도성분들에 대해서는 오류시간간격이완(False Time Step Relaxation)방법을 적용하여 오류시간간격으로 0.01 의 값을 부여하였다. 방정식을 계산하는 과정에서 해의 수렴은 아래와 같이 정의된 잉여값,⁽⁷⁾ E 가 조사되었으며 이들 값이 10⁻² 이하이면 수렴한 것으로 간주하였다. 그러나 유동조건에 따라 이를 만족하지 못할 경우는 입, 출구에서의 질량유량의 차가 10⁻³ 이하이면 수렴한 것으로 간주하였다.

$$E = \sum_{\text{all domain}} \left| \sum a_{nb} + b - a_p \phi_p \right| \quad (11)$$

3. 결과 및 고찰

프로그램의 검증 및 수치해의 타당성을 조사하기 위하여 60°의 분기각을 갖는 분기관에 대해 지관으로의 유량배분에 따른 유동저항계수값을 구하여 이를 관련 실험결과와 비교하였다. 작동유체는 상온(20°C)의 공기이며, 주관의 직경은 Sparger 의 직경과 동일한 0.4572m 로 고정하되 입구속도를 실험조건과 동일한 레이놀즈수(Re=10⁵)가 되도록 하였다. 주관 출구의 단면적은 주관 입구의 단면적과 동일하며 지관의 단면적은 주관 단면적의 0.4 배이다. 분기점에서의 주관 입출구 및 지관 출구까지의 길이는 각관 직경의 3 배가 되도록 하였다. Fig. 5 는 이들 결과를 도시한 것으로서 본 수치계산 결과가 Miller⁽⁹⁾의 결과에 비해 약 10% 정도 크게 나타났으나 대체적으로 유량배분에 따른 유동특성을 잘 파악하는 것으로 나타났다.

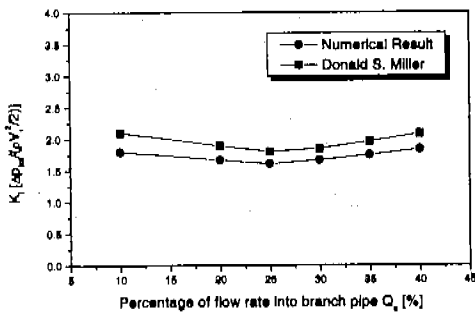


Fig. 5 Comparison with reference data⁽⁹⁾ of K₁ for various flow rate distributions.

3.1 원자트배수탱크 Sparger 내의 유동양상

본 연구에서는 현재 표준원전에서 사용되고 있는 Fig. 3 과 같은 Sparger 모델에 대해 유동양상 및 유동저항계수에 대한 설계값의 타당성을 검토하였다. Fig. 6 은 중심단면에 대한 압력분포 및 속도분포이다. 압력분포를 살펴보면 지관의 선단 및 주관의 노즐 출구전에서 역압력구배가 발생하며 이러한 역압력구배로 인하여 속도분포에서 유동의 박리현상이 발생하는 것을 볼 수 있다.⁽¹⁰⁾ 이러한 박리현상으로 인해 지관의 선단 상부 및 하부에서는 재순환 영역이 발생하기 시작하며 이는 출구쪽으로 갈수록 감소하나 유동이 완전히 회복되지 못하고 출구쪽으로 빠져 나감에 따라 지관 출구에서

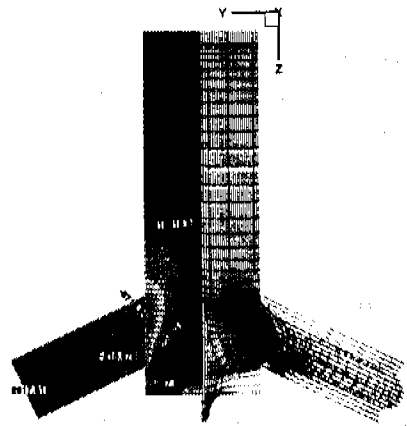


Fig. 6 Velocity and pressure distributions at the middle section area.

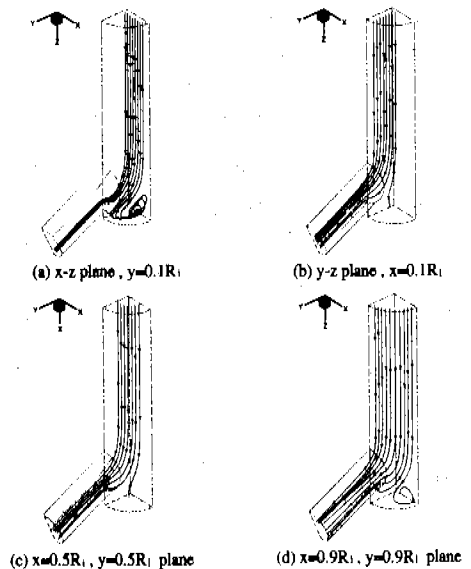


Fig. 7 Streakline distributions for various positions.

의 유속형태는 불균일한 분포로 유출된다.

Fig. 7 은 Sparger 입구에서의 임의의 지점들에 대한 유체입자가 그리는 유적선을 도시한 것으로 Sparger 형상의 복잡성으로 인하여 입구에서의 유체입자는 지점마다 다양한 형태의 유적선을 그리며 Sparger 내를 빠져나가게 되고, 지판의 하단에서 주판 출구노즐사이에는 유체입자가 소용돌이 유동형태를 보이며 출구로 빠져 나간다. Fig. 6 과 Fig. 7 의 결과에서 속도분포의 중심부를 보면, 유입된 증기는 지판이 시작되는 기점으로부터 지판 직경의 1.5 배 전단에서부터 유동이 지판으로 치우쳐 흐르기 시작함에 따라 중심부의 속도분포가 상대적으로 낮아지게 되어 마치 유동이 분리되는 것과 같은 속도 경계면을 보이며 그 모양은 삼각형 모양을 갖는다.

일반적으로 설계시에 계산하는 유동저항계수값은 Engineering Handbook⁽⁶⁾에 의존하여 계산을 실시하고 있지만 그 형상이나 유동조건에 있어서 꼭 일치하는 경우가 없어, 현재와 같은 Sparger 의 경우에도 분기판 및 단면축소에 따른 상관관계식을 조합하여 계산하고 있으며 그 각도에 있어서도 가장 근접한 각도의 결과식을 사용함으로써 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 어렵다. 또한 계산식이 주판과 지판의 유량분배비 및 각도의 함수로 정의되어 있어 설계자가 경험에 의해 임의로 유량분배를 가정하고 계산함으로써 계산 오차가 발생할 수 있다. 식 (12) ~ 식 (14)는 설계시에 사용하고 있는 실험식들⁽⁶⁾로서 Sparger 에 대한 유동저항계수의 계산도 이들 식을 조합하여 구한다.

$$K_s = \frac{\Delta p_s}{\rho V_i^2 / 2} = A' \left[1 + \left(\frac{V_s}{V_i} \right)^2 - 2 \left(\frac{V_s}{V_i} \right) \cos \alpha \right] \quad (12)$$

$$K_{st} = \frac{\Delta p_{st}}{\rho V_i^2 / 2} = 0.4 \left(1 - \frac{V_d}{V_i} \right)^2, \quad V_d = \frac{Q_d}{A_i} \quad (13)$$

$$K_{e, st} = 0.5 \left(1 - \frac{A_e}{A_i} \right)^4 + \lambda \frac{L}{D_e} \quad (14)$$

윗식에서 λ 는 마찰계수(Friction Coefficient)이며 보정계수 A' 는 Table 1로부터 결정된다.

Table 1 Values of correction factor A.

A/A _i	< 0.35		> 0.35	
Q/Q _i	< 0.4	> 0.4	< 0.6	> 0.6
A'	1.1-0.7Q/Q _i	0.85	1.0-0.65Q/Q _i	0.6

식 (12) 및 식 (13)은 매끈한 상업용 분기판에 대한 주류 및 지류에 대한 손실계수이며, 식 (14)는 단면축소에 따른 손실계수이다. 식 (12) 및 식 (13)의 유동조건은 입구유동은 균일 속도조건, 레이놀즈수는 10⁴ 이상, 0 < α < 60°, 주판에 대한 지판의 직경비는 2/3 이하이며, 식 (14)의 유동조건은 레이놀즈수가 10⁴ 이상이며 L은 축소부분의 판 길이로서 본 논문의 Sparger 형상에서는 0이다. 상기의 식 (12) ~ 식 (14)를 이용하여 계산된 유동저항계수값, K는 3.13이며, 이를 수치계산 결과인 Fig. 6의 입출구에서의 정압차 및 유량분배에 의한 속도값을 가지고 전압차를 구한 후 이를 앞서 정의된 식 (7)에 대입하여 계산한 입구속도에 대한 유동저항계수값, K는 2.94로 윗식에 의한 계산결과값과 비교하면 6%정도의 작은 차이를 보였다. 이는 3.3 절의 분기각에 따른 유동특성 결과에서 분기각이 60°인 경우에 K=3.05의 값을 나타내었으며 분기각이 작을수록 조금씩 값이 증가하는 결과를 볼 때, 식 (12) ~ 식 (13)은 분기각이 60°이내인 경우에 대한 실험식이므로 설계값이 다소 높게 계산된 것으로 보인다. 일반적으로 실제판에 있어서 유동저항계수값은 판벽의 거칠기인 표면조도에 의해서도 달라지므로 이를 고려하기 위한 방법으로 관련문헌⁽⁶⁾에서는 계산된 유동저항계수값에 1.1 ~ 1.2를 곱하도록 제안하고 있다. 이를 본 수치계산을 통해 구해진 값에 적용하기 위해 20%의 공학적인 여유도(Engineering Margin)를 감안하면 K=3.53의 값이 본 Sparger 에 대한 유동저항계수값으로 설계시 적용할 수 있을 것이다.

3.2 입구유량 변화에 따른 유동특성

Fig. 8 및 Fig. 9는 Sparger 입구에서의 유량을 최대유량에서부터 최소유량까지 25%씩 유량을 감소시켜가며 입구유량에 따른 유동저항계수 및 유량분배비를 나타내고 있다. Fig. 8은 입구유량 변화에 따른 유동저항계수의 변화로서 최대유량일 경우 식 (8)에 의해 계산된 입구 레이놀즈수는 2.73×10⁷이며 유량은 238.14kg/s 이고, 이때의 유동저항계수, K는 2.94로 계산되었다. 최소유량일 경우는 레이놀즈수가 7.01×10⁶이며 유량은 61.11kg/s로서 최대유량의 약 25%에 해당하며 계산된 유동저항계수, K는 2.87이다. Fig. 9는 입구유량에 대한 지판으로의 유량분배비의 변화를 도시한 것으로, 최소유량에서 최대유량까지 지판으로 Q_i/Q_i=0.41의 거의 일정한 유량비가 나타났다. 입구유량을 최대유량에서 25%씩 최소유량까지 감소시켜가며 계산한 결과, 유동저항계수에 있어서는 최대유량

에 대해 최소유량까지 2%정도의 작은 차이를 보이며 감소하였으며, 유량분배에 있어서는 최대유량에 대해 최소유량까지 0.7%정도 증가하였다. 결론적으로 현재의 설계조건에서 최대유량에서 최소유량까지의 유동저항계수나 유량분배비의 변화는 거의 없음을 알 수 있다.

3.3 분기각 변화에 따른 유동특성

Fig. 10 와 Fig. 11 은 분기각 변화에 따른 유동저항계수 및 유량분배비를 나타내고 있다. Fig. 10 은 분기각을 최대 75°에서 최소 55°까지 5°씩 감소시켜가며 계산한 유동저항계수로서 최소 분기각 55°는 현재의 설계조건에서 변경 가능한 최소 각도이다. 분기각이 감소함에 따라 유동저항계수는 증가하며, 그 차이는 분기각이 55°인 경우가 K=3.2 로 분기각이 75°인 경우의 K=2.76 에 대해 16%정도 높게 나타났다. 분기각이 감소할수록 유동저항계수의 값은 선형적으로 증가하나 분기각이 65°인 경우와 75°인 경우는 유동저항계수값의 변화가 다

른 분기각에 비해 아주 작게 나타났다. Fig.11 의 유량분배비를 살펴보면, 분기각이 75°인 경우에 비해 55°인 경우가 5%정도 유량분배비가 크게 나타났다며 분기각이 증가함에 따라 유량분배비는 선형적인 증가를 나타냈다. 이상의 분기각 변화에 따른 결과에서 주관과 지관의 속도차를 최소화하며 손실압력을 극대화할 수 있는 조건으로는 분기각이 55°인 경우가 가장 최적의 설계조건으로 판단된다. 식 (15)는 설계에 이용될 수 있도록 Fig. 10 의 결과를 토대로 제안된 분기각의 변화에 따른 Sparger 의 유동저항계수에 대한 상관관계식이다.

$$K = 2.6811 - 0.23543 \cos \alpha + 1.94268 (\cos \alpha)^2$$

$$55^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ \quad (15)$$

3.4 단면적비 변화에 따른 유동특성

Fig. 12 및 Fig. 13 은 주관에 대한 지관의 단면적비에 따른 유동저항계수 및 유량분배비를 나타낸다. Fig. 12 의 유동저항계수의 변화를 보면 단면적

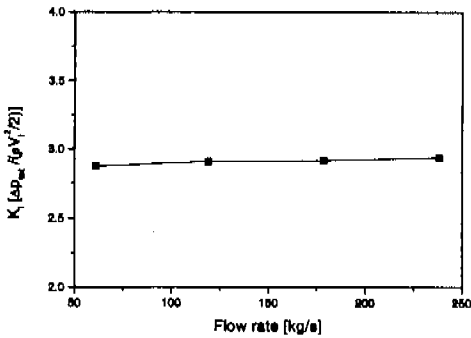


Fig. 8 K₁ for various inlet flow rates.

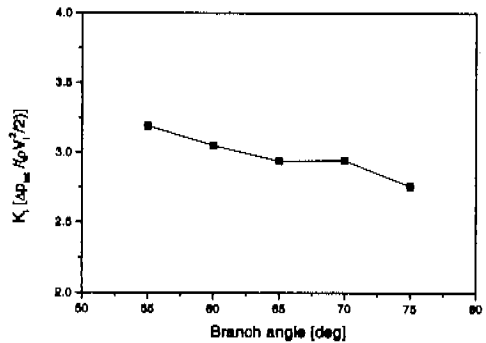


Fig. 10 K₁ for various branch angles.

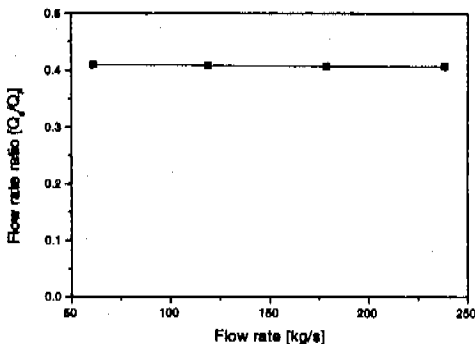


Fig. 9 Flow rate ratio for various inlet flow rates.

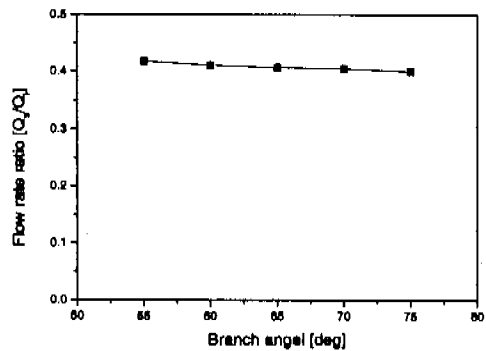


Fig. 11 Flow rate ratio for various branch angles.

비가 증가할수록 유동저항계수의 값은 지수함수적으로 감소하며 그 차이는 단면적비가 0.5 인 경우가 단면적비가 0.1 인 경우에 대해 70%정도의 작은 유동저항계수값을 나타냈다. Fig. 13 의 지판으로의 유량분배에 있어서는 단면적비가 증가할수록 유동저항계수의 변화와 같이 지판으로의 유량분배는 증가하며 그차이는 단면적비가 0.5 인 경우가 단면적비가 0.1 인 경우에 대해 50%정도 높게 나타났다. 주관에 대한 지판의 단면적비의 변화에 따른 결과에서는 단면적비가 0.1 인 경우가 손실압력이 가장 큰 것으로 나타났지만 주관과 지판의 유출구에서의 유출속도를 고려한다면 단면적비가 0.2 인 경우가 가장 최적의 설계조건으로 판단된다. 식 (16)은 Fig. 12 의 계산결과를 토대로 제안된 주관에 대한 지판의 단면적비에 따른 Sparger 의 유동저항계수에 대한 상관관계식이다.

$$K = 1.87357 + 4.90578e^{-((A_p/A_s)-0.1)0.08268} + 1.06032e^{-((A_p/A_s)-0.1)0.43153} \quad (16)$$

$0.1 \leq A_p/A_s \leq 0.5$

3.5 직경비 변화에 따른 유동특성

Fig. 14 및 Fig. 15 는 주관 입구직경에 대한 주관 출구노즐의 직경비 변화에 따른 유동저항계수 및 유량분배비를 나타내고 있다. Fig. 14 의 유동저항계수값의 변화를 보면, 직경비가 증가할수록 유동저항계수값은 선형적으로 감소하며 그 차이는 직경비가 0.667($D_p=0.3048m$)인 경우가 직경비가 0.167($D_p=0.0762m$)인 경우에 비해 33%정도의 낮은 값을 나타내었다. Fig. 15 의 유량분배비의 변화를 보면, 직경비가 증가함에 따라 지판으로의 유량분배는 감소하며, 그 차이는 직경비가 0.667 인 경우가 직경비가 0.167 인 경우에 비해 49%정도 감소하였다. 주관 입구직경에 대한 주관 출구노즐의 직경비 변화에 따른 결과에서는 직경비가 0.167 인 경우가 손실압력은 크지만 주관으로의 유량이 너무 작아 부적합하며 직경비가 0.333($D_p=0.1524m$)인 경우가 압력손실의 크기나 주관 및 지판의 유속에 있어 가장 최적의 설계조건으로 판단된다. 식 (17) 은 Fig. 14 의 계산결과를 토대로 제안된 주관 입구 직경에 대한 주관 출구노즐의 직경비 변화에 따른

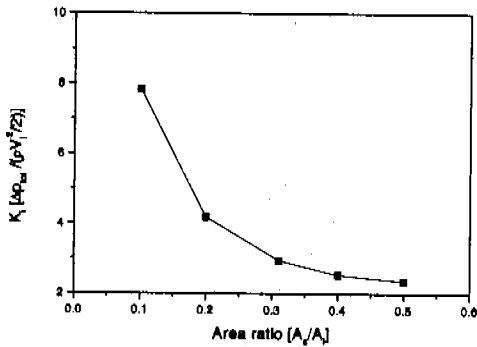


Fig. 12 K₁ for various section area ratio.

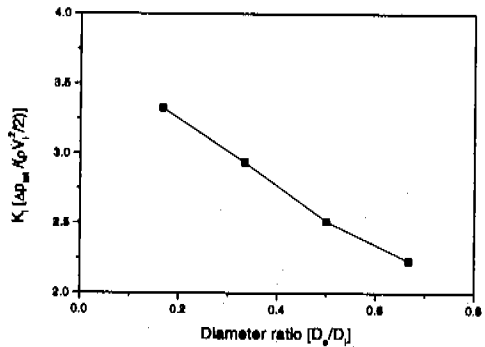


Fig. 14 K₁ for various diameter ratios.

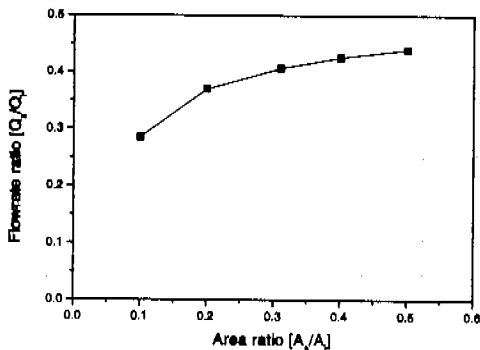


Fig. 13 Flow ratio for various section area ratio.

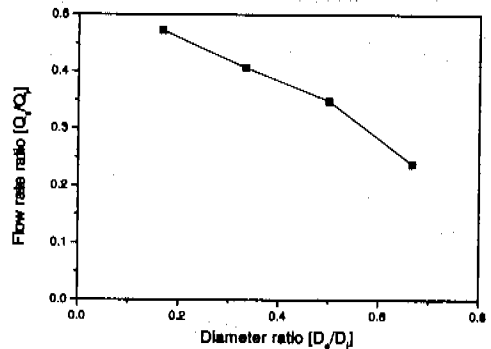


Fig. 15 Flow rate ratio for various diameter ratios.

Sparger의 유동저항계수에 대한 상관관계식이다.

$$K=3.80846-3.00341(D/D_1)+0.93579(D/D_1)^2 \\ 0.167 \leq D/D_1 \leq 0.667, D_1=0.4572m \quad (17)$$

4. 결론

표준원전의 원자로배수탱크 Sparger에 대해 다양한 설계인자에 따른 유동특성에 대한 수치계산을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 현재의 설계조건에 대한 Sparger 내부의 유동저항계수의 값으로 공학적인 여유도를 고려하여 $K=3.53$ 의 값을 제시하였으며, 각종 설계인자에 따른 유동저항계수를 산출할 수 있는 상관관계식들을 제시하였다.

(2) Sparger 내의 유동양상을 보면 지관의 선단 및 주관의 출구노즐전에서 유동의 박리현상이 일어나며 이러한 박리현상으로 인하여 지관 출구에서의 유동은 완전히 회복되지 못하고 유속이 불균일한 분포로 빠져나가며, 지관 하단에서 주관 출구노즐 사이에는 유체입자가 소용돌이 유동형태를 보이며 출구로 유출된다.

(3) Sparger 입구에서의 유량변화 및 주관에 대한 지관의 단면적비의 변화에 있어서는 유량분배비가 감소할수록 유동저항계수의 값은 증가하는 반면, 분기각의 변화 및 주관 입구직경에 대한 주관 출구노즐의 직경비의 변화에 대해서는 유량분배비가 감소할수록 유동저항계수의 값은 감소하는 경향을 보였다.

(4) 모든 경우에 대해 주관과 지관간의 유량분배비의 변화율이 크면 클수록 유동저항계수의 변화율도 크게 나타났다. 이는 주관과 지관간에 유량분배비가 유동저항계수값의 변화를 결정짓는 중요한 변수임을 알 수 있다.

(5) 설계조건에 따른 유량분배비 및 유동저항계수값의 변화를 보면 유동저항계수값에 있어서는 주관과 지관의 단면적비에 따른 변화가 지수함수적으로 가장 크게 나타났으며, 주관 입구에 대한 주관 출구노즐의 직경비 변화, 분기각에 따른 변화 및 입구 유량 변화의 순으로 크게 나타났다. 그러나 지관으로의 유량분배에 있어서는 주관 입구에 대한 주관 출구노즐의 직경비 변화가 가장 큰 변화를 나타냈으며 단면적비의 변화, 분기각의 변화 및 입구 유량조건에 따른 변화의 순으로 나타났다.

(6) Sparger의 목적에 부합하는 최적의 설계조건으로 유속길이를 고려한 주관과 지관간에 적절한 유량분배 및 내부에서의 큰 압력손실을 고려할 경우, 입구에서의 유량조건은 무시할 수 있으며, 현재의 설계조건에서 주관 입구에 대한 주관 출구노즐의 직경비는 0.333인 경우가, 주관에 대한 지관의 단면적비는 0.2인 경우가, 분기각은 설계변경 최소각도인 55°인 경우가 가장 최적의 설계조건으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 김환열, 배윤영, 조봉현, 송철화, 조석, 원순연, 허진, 고득윤, 1998, "Quenching Tank 내 Bubble 거동과 최적 Sparger 설계에 관한 연구," 한국원자력연구소, 기술보고서.
- (2) 조석, 김환열, 송철화, 배윤영, 정문기, 1998, "과냉각수에 분사된 증기제트의 유속특성에 관한 실험," 한국원자력학회 98년도 춘계학술발표회 논문집, pp. 571~576.
- (3) 이한춘, 박순기, 김부환, 1998, "혼합증기(수증기/공기)와 물의 직접 접촉 응축 열전달 현상," 한국원자력학회 98년도 춘계학술발표회 논문집, pp. 577~583.
- (4) 김상녕, 김용식, 고종현, 1998, "IRWST 배관내의 열수력적 현상 모델링," 한국원자력학회 98년도 춘계학술발표회 논문집, pp. 596~602.
- (5) 김광주, 박만홍, 안장선, 1999, "원자로배수탱크 Sparger의 유동특성 및 최적설계 방안에 관한 연구," 한국전력기술㈜, 기술보고서.
- (6) I.E. Idelchik, 1986, "Handbook of Hydraulic Resistance," Hemisphere Publishing Co.
- (7) Ludwig, J. C., Qin, H. Q. and Spalding, D. B., 1989, "The PHOENICS Reference Manual," TR/200, CHAM.
- (8) 윤준규, 이택희, 박용남 역, 1999, "유체역학," 대광서림
- (9) Donald S. Miller, 1978, "Internal Flow Systems," BHRA Fluid Eng.
- (10) 서상호, 최윤, 노형운, 도덕희, 1999, "입자영상 유속계와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 분기관내 유동해석," 대한기계학회 논문집, 제 23권, 제 1호, pp. 123~130.
- (11) "Flow Resistance Coefficient for Reactor Drain Tank(RDT)," 1997, KOPEC, POSRV-CV-CA410.