

## 감압용 배수탱크내의 분기형 증기분사기의 유동특성에 관한 연구

김 광 추<sup>†</sup>, 박 만 흥, 박 경 석<sup>\*</sup>  
한국전력기술(주), <sup>\*</sup>경희대 기계산업시스템공학부

### A Study on Flow Characteristics of Branch Type Sparger in Drain Tank for Depressurization

Kwang-Chu Kim<sup>†</sup>, Man-Heung Park, Kyoung-Suk Park<sup>\*</sup>

Korea Power Engineering Company, KyungGee 449-713, Korea

<sup>\*</sup>College of Mechanical and Industrial System Engineering, Kyung Hee Univ., KyungGee 449-701, Korea

(Received November 24, 2000; revision received February 7, 2001)

**ABSTRACT:** A numerical analysis on branch type sparger in drain tank for depressurization is performed to investigate the flow characteristics due to the change of design factor. As the result of this study, sparger's flow resistance coefficient ( $K$ ) is 3.53 at the present design condition when engineering margin for surface roughness is considered as 20%, and flow ratio into branch pipe ( $Q_s/Q_i$ ) is 0.41. The correlation for calculating flow resistance coefficients as design factor is presented. Flow resistance coefficient is increased as section area ratio of branch pipe for main pipe and outlet nozzle diameter of main pipe decreasing, but the effects of branch angle and inlet flow rate of main pipe are small. As the change rate of  $Q_s/Q_i$  becomes larger, the change rate of flow resistance coefficient increases. The rate of pressure loss has the largest change as section area ratio changing. The condition of maximum flow resistance in sparger is when the outlet nozzle diameter ratio of main pipe ( $D_e/D_i$ ) is 0.167, the section area ratio ( $A_s/A_i$ ) is 0.1 and the branch angle ( $\alpha$ ) is 55°.

**Key words:** Sparger(증기분사기), Flow resistance coefficient(유동저항계수), Flow ratio(유량비), Design factor(설계인자), Surface roughness(표면거칠기)

#### 기 호 설 명

$A$  : 단면적 [ $m^2$ ]

$C_p$  : 국소압력계수,  $\Delta p / (\rho V_i^2 / 2)$

$D$  : 관의 직경 [ $m$ ]

$E$  : 거칠기 상수

$R$  : 잉여값

$K$  : 유동저항계수,  $\Delta p_{tot} / (\rho V_i^2 / 2)$

$k$  : 난류운동에너지

$p$  : 압력 [ $N/m^2$ ]

$\Delta p$  : 정압차 [ $N/m^2$ ]

$\Delta p_{tot}$  : 전압차 [ $N/m^2$ ]

$Q$  : 유량 [ $kg/s$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-31-289-4293; fax: +82-31-289-4517

E-mail address: kkc@kopec.co.kr

- Re : 레이놀즈수,  $(\rho V_i D_i) / \mu$
- Re<sub>r</sub> : 거칠기 레이놀즈수,  $(u_\tau H_r) / \nu$
- u : 속도 [m/s]
- V : 유입 속도 [m/s]

**그리스 문자**

- $\alpha$  : 분기각 [°]
- $\eta$  : 무차원 거리
- $\epsilon$  : 난류운동에너지 소산율
- $\chi$  : Von Karman 상수
- $\mu$  : 점성계수 [kg/m · s]
- $\nu$  : 동점성계수 [m<sup>2</sup>/s]
- $\xi$  : 무차원 거리
- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\tau$  : 벽면전단응력 [N/m<sup>2</sup>]

**상첨자**

- + : 무차원 변수

**하첨자**

- i : 주관 입구
- e : 주관 출구
- s : 지관 출구

**1. 서론**

원자력분야 등과 같은 대형 플랜트 및 산업분야에서 널리 사용되는 안전감압계통(safety depressurization system, SDS)은 다중사고시 계통내의 고온, 고압의 가스를 응축과정의 열교환을 통해 제트 형태로 분사시켜 냉각시키는 안전장치이다. 따라서 이러한 안전감압계통의 전반적인 현상에 대한 연구와 이해는 기계적 건전성, 설비의 안전성 및 성능 확보를 위해 필요하다.

본 연구에서는 이러한 안전감압계통 중 국내 표준원전(PWR)에서 채택하고 있는 원자로배수탱크내의 분기형 증기분사기를 대상으로 다양한 설계인자에 따른 유동특성을 파악하였다. 이러한

증기분사기는 원전 사고시 원자로냉각계통으로부터 방출되는 고온, 고압의 증기를 효과적인 응축 및 고압의 증기 방출에 따른 큰 부하를 경감시키기 위하여 원자로배수탱크로 유도 및 방출하는 장치이다. 이때 성능이 우수한 증기분사기를 사용하면 용량이 작은 탱크를 설계하더라도 요구되는 설계요건을 만족시킬 수 있을 것이다.

국내 표준원전에서 실제로 사용하고 있는 원자로배수탱크의 분기형 증기분사기는 실험이나 유동특성에 대한 고찰 없이 대부분 공학용 핸드북(engineering handbook)에 의존하여 설계가 이루어지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 형상이나 유동조건에 있어서 꼭 일치하는 경우가 없어 분기관 및 단면축소에 따른 상관식을 조합하여 계산하고 있으며, 각도에 있어서도 가장 근접한 각도의 결과식을 사용함으로써 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 어렵다. 또한 상관식이 주관에 대한 지관의 유량분배비 및 각도의 함수로 정의되어 있어 설계자가 경험에 의해 임의로 유량분배를 가정하고 계산함으로써 계산오차가 발생할 수 있다.<sup>(3-5)</sup>

따라서 본 연구에서는 증기분사기 설계시 수반되는 설계인자들에 따른 유동특성을 고찰하였으며, 이를 바탕으로 현재의 증기분사기를 개량하고 효율적인 증기분사기의 설계를 위한 자료를 도출해내고자 한다.

**2. 이론해석**

**2.1 해석모델 및 연구방향**

가압경수로형 원전의 원자로냉각계통의 고온관에 연결된 가압기 및 증기방출계통에 대한 배관 및 계측도면은 Fig. 1과 같다. 정상조건하에서 가압기는 계통내의 압력을  $1.55 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 으로 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 안전감압탱크인 원자로배수탱크내에 장착된 증기분사기로서 Fig. 1의 우측 원형의 점선으로 표시된 부분이다. 이와 관련한 증기분사기에 대한 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다.

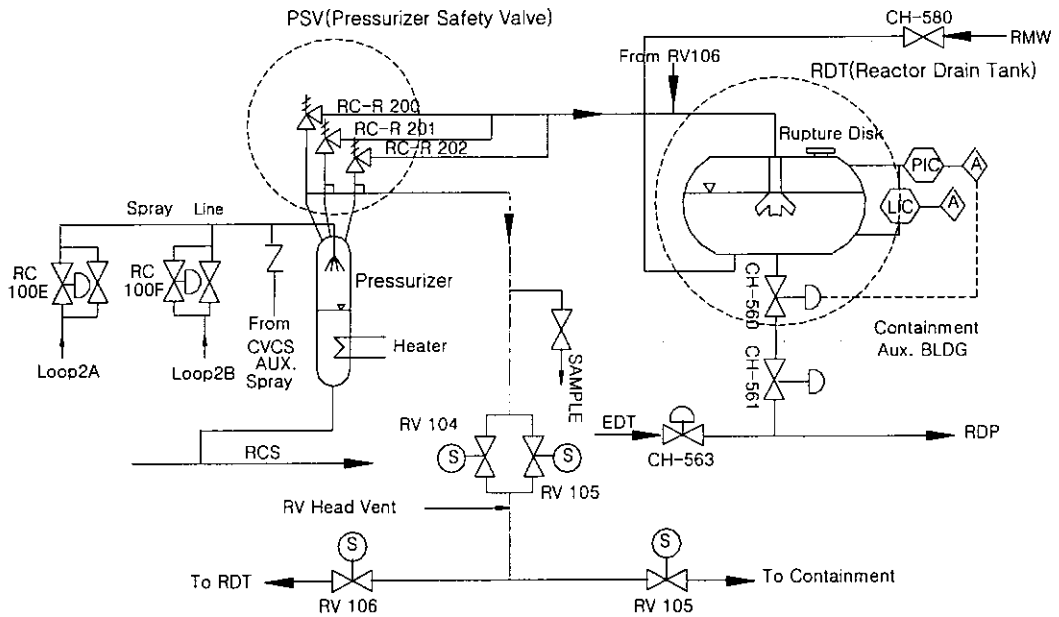


Fig. 1 P&ID of steam discharge system.

본 연구에서는 이러한 국내 원전에서 사용되고 있는 감압배수탱크내의 증기분사기를 대상으로 우선 현재의 기하학적 설계조건 및 유동조건에서의 증기분사기 내부의 유동양상을 고찰하고, 이를 토대로 증기분사기 입구에서의 레이놀즈수 조건, 분기각의 변화, 주관에 대한 지관의 단면적비의 변화 및 내부 벽면에서의 표면거칠기의 고려에 따른 유동특성을 손실압력 및 주관에 대한 지관의 유량분배비 등을 수치계산을 통하여 고찰하

였다. 또한 향후 설계변경에 대비하여 이들 설계인자에 따른 유동저항계수를 산출할 수 있는 상관식을 제시하였다.

2.2 지배방정식

증기분사기내의 유동을 3차원, 정상상태, 비압축성 및 난류로 간주하고 난류모델로는 재순환 유동 및 급격한 유동 단면적의 변화가 일어나는 난류 유동특성을 비교적 타당하게 예측할 수 있는 것으로 알려진 RNG  $k-\epsilon$  모델<sup>(6)</sup>을 사용하였다.

연속방정식

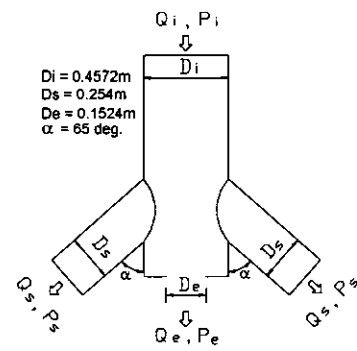
$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

유동량방정식

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

난류운동에너지 방정식

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



- $Q_i$  = Steam flow from PSV
- \* MIN. = 61.11 kg/s
- \* MAX. = 238.14 kg/s
- $Q_s$  = Side branch steam flow
- $Q_e$  = Straight passage steam flow
- $D_i$  = Sparger channel diameter
- $D_s$  = Side branch diameter
- $D_e$  = Straight passage exit diameter
- $\alpha$  = Side branch angle (deg.)
- $P_i, P_s, P_e$  = Pressure

Fig. 2 Geometry and dimensions of sparger.

난류운동에너지 소산을 방정식

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

윗식에서  $\rho$ ,  $u_j$ ,  $\mu$ ,  $k$ ,  $\epsilon$  및  $p$ 는 각각 밀도, 속도 성분, 점성계수, 난류운동에너지, 난류운동에너지 소산을 및 압력을 나타낸다. 또한 응력텐서  $\tau_{ij}$ , 난류 동점성계수  $\mu_t$ , 난류생성항  $G$  및 난류상수  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $\eta$ ,  $\eta_0$  및  $\beta$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij} = & -(\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \\ \mu_t = & C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad G = 2\mu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \eta = S \frac{\epsilon}{k} \\ C_1 = & 1.42, \quad C_2 = 1.68, \quad C_\mu = 0.085, \quad \beta = 0.012 \\ \sigma_k = & 0.719, \quad \sigma_\epsilon = 0.719, \quad \eta_0 = 4.38 \end{aligned} \quad (5)$$

윗식에서  $S_{ij}$  및  $S$ 는 다음과 같다.

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

증기분사기내의 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.<sup>(7)</sup>

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

윗식에서  $\Delta p_{tot}$ 는 증기분사기 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 주관의 직경이다.

2.3 표면거칠기

수치계산시 벽면에서의 표면거칠기의 효과는 균일모래연마거칠기(uniform-sand-grain roughness)를 가진 표면으로 가정하여 기존의 벽함수를 수정한 Javatileke<sup>(8)</sup>의 벽함수 공식을 이용하여 구하였다.

기존 벽함수의 대수영역의 속도  $u$ 의 관계식과 무차원수의 정의 및 계수값은 다음과 같다.

$$U^+ = \frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(u^+ E) \quad (9)$$

윗식에서 벽면전단응력  $\tau_w$ 에 의해 주어진 벽면마찰속도  $u_\tau$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (10)$$

여기서 벽면마찰속도를 사용하여 정의된 무차원거리  $y^+$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (11)$$

식(9)의  $\kappa$ 는 Von Karman 상수로서 약 0.42의 값을 가지며,  $E$ 는 거칠기 상수(roughness parameter)로서 무차원 거칠기 높이와 거칠기 레이놀즈수  $Re_\tau$ 의 함수이다. Javatileke<sup>(8)</sup>는 Nikuradse<sup>(9)</sup>의 실험결과를 토대로 아래와 같은 관계식을 개발하였다.

Hydrodynamically smooth :  $0 < Re_\tau < 3.7$

$$E = E_M \quad (12)$$

Transition :  $3.7 < Re_\tau < 100$

$$E = \frac{1}{[\alpha (Re_\tau / \beta)^2 + (1 - \alpha) / E_M^2]^{0.5}} \quad (13)$$

Fully rough :  $Re_r > 100$

$$E = \frac{\beta}{Re_r} \quad (14)$$

각 식에 사용된 변수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \beta &= 29.7 \\ \alpha &= (1 + 2X_c^3 - 3X_c^2) \\ X_c &= \frac{0.02248(100 - Re_r)}{Re_r^{0.564}} \end{aligned} \quad (15)$$

윗식에서  $\alpha$ 는 매끄러운 표면과 동일한 면적에 대한 실제요소의 돌출된 면적에 대한 비를 나타내며,  $X_c$ 는 거칠기 높이의 크기분포에 근거한 표준화된 거칠기 높이(normalised roughness height)를 나타낸다.

식(12)와 식(13)에서 사용된  $E_M$ 은 매끄러운 조건(smooth condition)일 경우의 거칠기 상수로서 본 연구에서는 8.6의 값이 사용되었다. 또한 거칠기 레이놀즈수는 다음과 같다.

$$Re_r = \frac{u_r H_r}{\nu} \quad (16)$$

여기서  $H_r$ 은 거칠기 높이의 절대값이다.

## 2.4 경계조건

증기분사기내의 작동유체는 단상의 증기로 물 성치는 일정하다고 가정하였다.

Density :  $\rho = 122.58 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Viscosity :  $\mu = 2.4310 \times 10^{-5} \text{ [kg/m} \cdot \text{s]}$

@  $1.721 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  saturated condition

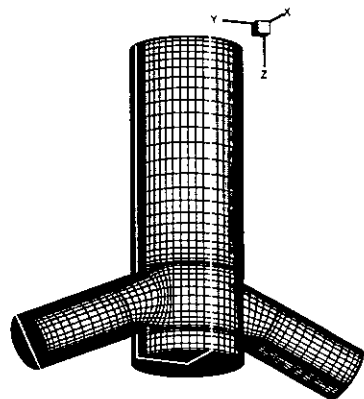
입구 경계조건으로는 균일속도조건을 사용하였으며 입구에서의 레이놀즈수의 변화에 따른 계산을 제외하고는 가압기 안전밸브(PSV) 3개가 모두 개방된 것으로 가정하여 238.14 kg/s의 최대유량이 흐른다고 가정하였다. 또한  $k$ 와  $\epsilon$ 의 초기 조건으로는 식(17)의 값을 사용하였다. 출구 경계조건으로는 탱크내의 압력을 대기압으로 가정하

고 출구 외부에 대해  $0 \text{ N/m}^2$ 의 압력경계조건을 사용하였다. 또한 벽면에 대해서는 점착조건을 부여하였다.

$$k_i = 0.003 V_i^2, \quad \epsilon_i = 0.009 k_i^{1.5} / 0.03 D_i \quad (17)$$

## 2.5 수치해석

본 연구에서는 유동해석을 위해 유한체적법을 사용하는 상용 프로그램인 PHOENICS V3.1이 이용되었다. 수치계산시 대류항과 압력장에 대해 하이브리드 도식과 SIMPLEST 방법을 사용하였으며, 격자를 구성하는 좌표계는 경계밀착좌표계를 사용하였다. 또한 분사기의 주관과 지관에 대해 각각의 격자를 생성한 후 이들 접촉 경계면을 통해 데이터를 주고받는 다중영역법(multi-block method)을 사용하였으며, 이를 위해 non-staggered grid를 사용하여 속도와 압력이 동일한 제어체적내에서 계산되도록 하였다. Fig. 3은 계산에 사용된  $65^\circ$ 의 분기각을 갖는 증기분사기에 대한 격자망이다. 실제 계산은 축대칭인 점을 고려하여 흰색의 실선으로 표시된  $x$ - $y$ 평면에 대해 1/4의 영역만을 모델링하여 계산하였다. 이때 격자수는 형상의 복잡성으로 인해 격자간의 적교성 및 계산시간을 감안하여 여러 가지 격자수에 대한 계산을 수행하였으며, 격자수 변화에 따른 중요변수의 차이가 5% 이내인 경우들 중에 최소격자수를 선택하였다. 본 연구에서의 격자수는 주관에 대해서는  $28 \times 20 \times 48$ 개, 지관에 대해서는 18



main :  $28 \times 20 \times 48$ , branch :  $18 \times 10 \times 14$

Fig. 3 Grid of sparger ( $\alpha = 65^\circ$ ).

×10×14개의 격자를 사용하였다. 반복계산시 하향이완을 도입하여, 압력장과 난류량에 대해서는 선형이완계수로서 각각 0.3과 0.2를 사용하였으며, 속도성분들에 대해서는 오류시간간격으로 0.01의 값을 부여하였다. 방정식을 계산하는 과정에서 해의 수렴은 식(18)과 같이 정의된 잉여값  $R$ 이 조사되었으며 이들 값이  $10^{-2}$  이하이면 수렴한 것으로 간주하였다. 그러나 유동조건에 따라 이를 만족하지 못할 경우는 입, 출구에서의 절량 유량의 차가  $10^{-3}$  이하이면 수렴한 것으로 간주하였다. 이들 수렴조건을 만족하기 위한 계산시간은 펜티엄 266 MHz에서 6시간 정도가 소요되었다.

$$R = \sum_{all\ domain} | \sum a_{nb} + b - a_p \phi_p | \quad (18)$$

### 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. 작동 유체는 상온(20℃)의 공기이며, 주관의 직경은 증기분사기의 직경과 동일한 0.4572 m로 고정하되 입구속도를 실험조건과 동일한 레이놀즈수( $Re=10^6$ )가 되도록 하였다. 주관 출구의 단면적은 주관 입구의 단면적과 동일하며 지관의 단면적은 주관 단면적의 0.4배이다. 분기점에서의 주관 입출구 및 지관 출구까지의 길이는 각 관직경의 3배가 되도록 하였다. Fig. 4는 이들 결과를 도시

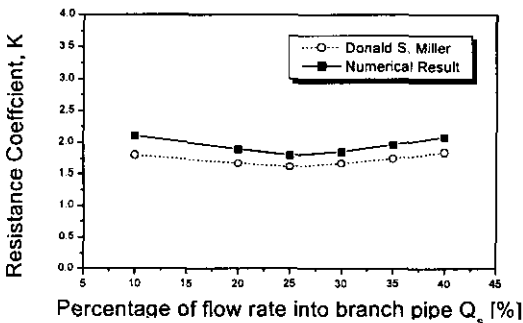


Fig. 4 Comparison with reference data<sup>(10)</sup> of flow resistance coefficients for various flow rate distributions.

한 것으로서 본 수치계산 결과가 Miller<sup>(10)</sup>의 결과에 비해 약 10% 정도 크게 나타났으나 대체적으로 유량배분에 따른 유동특성을 잘 파악하는 것으로 나타났다.

### 3.1 증기분사기내의 유동양상

Fig. 5~Fig. 7은 앞서 Fig. 2에서 언급한 현재 국내 원전에서 사용되고 있는 증기분사기( $\alpha=65^\circ$ )에 대한 유동해석 결과를 도시한 것이다. Fig. 5는 중심단면에 대한 압력분포를 도시한 것으로 지관의 선단 및 주관의 노즐 출구전에서 역압력구배가 발생하며 이러한 역압력구배로 인하여 Fig. 6의 중심단면의 속도분포에서 유동의 박리

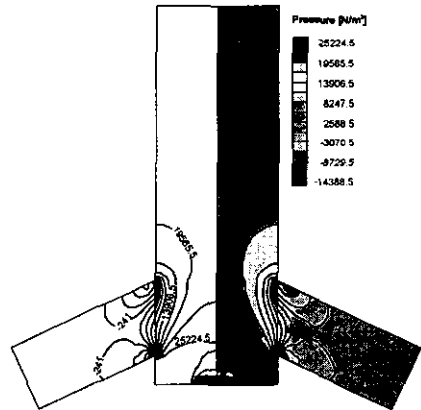


Fig. 5 Pressure distributions at the middle section area.

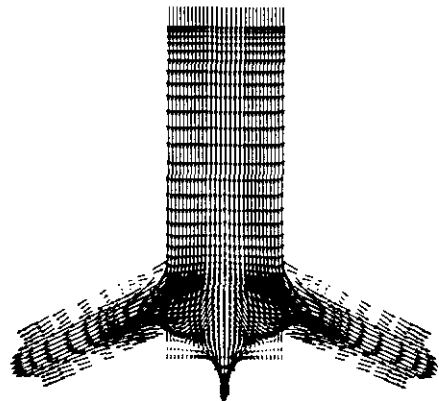


Fig. 6 Velocity distributions at the middle section area.

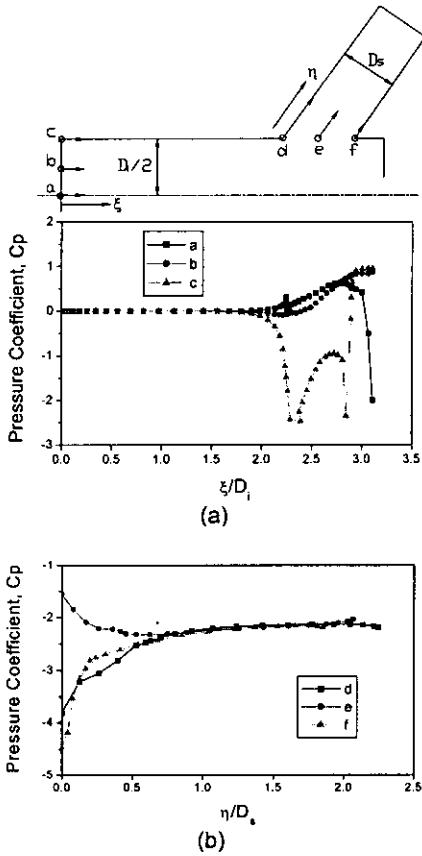


Fig. 7 Local pressure coefficients for  $\xi$  and  $\eta$ .

현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 박리 현상으로 인해 지관의 선단 상부 및 하부에서는 재순환 영역이 발생하기 시작하며 이는 출구 쪽으로 갈수록 감소하나 유동이 완전히 회복되지 못하고 출구 쪽으로 빠져나감에 따라 지관 출구에서의 유속형태는 불균일한 분포로 빠져나간다. Fig. 5와 Fig. 6의 입출구에서의 정압차 및 속도 값을 가지고 전압차를 구한 후 이를 앞서 정의된 식(7)에 대입하여 계산하면 유동저항계수  $K=2.94$ 이다.

Fig. 7은 식(19)와 같이 정의된 위치에 따른 국소압력계수(local pressure coefficient)의 분포로서 Fig. 7(a)는 주관 입구에서 출구지점까지의 주관 직경에 대한 무차원 거리  $\xi$ 에 따른 국소압력계수의 분포이며, Fig. 7(b)는 지관 입구에서 출구지점까지의 지관 직경에 대한 무차원거리  $\eta$ 에 따른 국소압력계수의 분포이다.

$$C_{p(\xi, \eta)} = \frac{(p_{\xi, \eta} - p_i)}{(\rho V_i^2 / 2)} \quad (19)$$

여기서  $p_{\xi, \eta}$ 는 임의의 지점에서의 정압이다.

Fig. 7(a)의 주관 직경에 대한 무차원 거리  $\xi$ 에 대한 국소압력계수의 분포를 보면 무차원 거리 1.7까지는 압력계수값의 변화가 관 중심에서 주관벽까지 거의 변화가 없으며 동일한 값을 나타냈다. 하지만 무차원 거리 1.7을 지나면서 a, b 및 c 선상에서의 압력계수의 변화가 일어나기 시작하며 c 선상을 따라 가장 극심한 변화를 나타냈다. 이는 지관으로의 유동분리에 따른 영향을 직접적으로 가장 크게 받기 때문이며 유동의 박리가 일어나는 무차원 거리 2.3과 2.8 지점에서는 역압력구배로 인한 압력값의 변곡점이 발생한 것을 볼 수 있다. 또한 주관 출구의 단면 축소로 인해 무차원 거리 2.9에서 출구지점까지 a 선상의 구배가 b 및 c 선상의 압력계수의 변화와 상이한 양상을 보여주었다. Fig. 7(b)의 지관에서의 무차원 거리  $\eta$ 에 대한 국소압력계수를 살펴보면, 유동의 박리가 일어나는 d 선상 및 f 선상에서의 압력계수값은 지관 입구에서부터 다시 상승하는 반면 박리의 영향이 비교적 심하지 않은 지관의 중심부인 e 선상에서는 압력계수값은 점차 하강하다 무차원 길이 0.9 지점부터 d 및 f 선상의 압력계수값과 거의 동일한 값을 나타내었다. 이는 지관의 출구 쪽으로 갈수록 박리의 영향이 감소됨에 따라 d, e 및 f 선상의 압력계수의 값이 무차원 거리 0.9 지점부터 거의 동일한 값을 가지는 것으로 사료된다. Fig. 7의 (a)와 (b)의 결과를 보면 가장 심한 역압력구배를 겪는 지점은 d 및 f 선상의 입구부근 및 a 선상의 출구부분이다.

### 3.2 입구 레이놀즈수의 변화에 따른 유동특성

Fig. 8의 (a) 및 (b)는 증기분사기 입구에서의 레이놀즈수의 변화에 따른 유동저항계수 및 유량분배비를 나타내고 있다. 레이놀즈수의 범위는 설계 최대유량조건(PSV 3개 개방)에서부터 설계 최소유량조건(PSV 1개 개방)까지 25%씩 유량을 감소시켜 가며 계산을 실시하였다. Fig. 8(a)는 입구 레이놀즈수의 변화에 따른 유동저항계수의 변화로서 최대 입구 레이놀즈수( $Re=2.731 \times 10^7$ )인

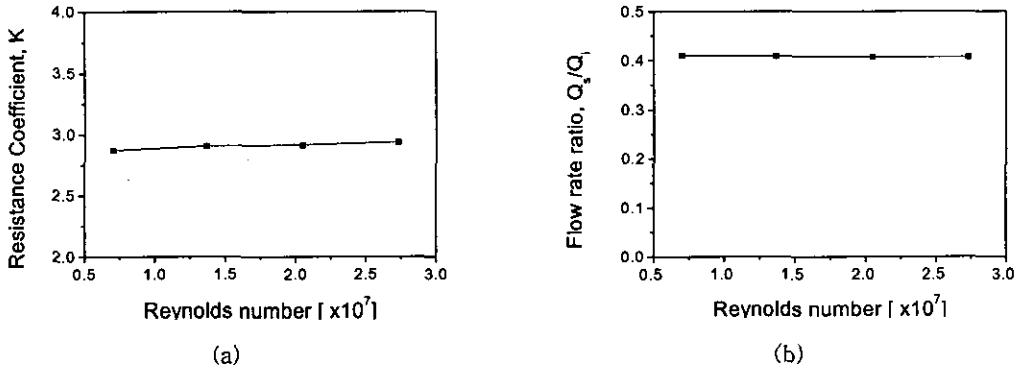


Fig. 8 Flow resistance coefficients and flow rate ratio for various inlet Reynolds numbers.

경우 유동저항계수  $K$ 는 2.94이며, 최소 입구 레이놀즈수( $Re=7.011 \times 10^6$ )인 경우 유동저항계수  $K$ 는 2.87이다. Fig. 8(b)는 입구 레이놀즈수에 따른 지관으로의 유량분배비의 변화를 도시한 것으로 최소 레이놀즈수에서 최대 레이놀즈수까지 지관으로  $Q_s/Q_i=0.41$ 의 일정한 유량비를 나타냈다. 입구 레이놀즈수 변화에 따른 계산 결과, 유동저항계수에 있어서는 최대에서 최소 레이놀즈수까지 2% 정도의 작은 차이를 보이며 감소하였으며, 유량분배에 있어서는 0.7% 정도 증가하였다. 이는 현재 설계조건과 같은 고레이놀즈 난류영역인 경우에서는 점성력의 효과가 현저히 작음으로 인해 입구 레이놀즈수의 변화가 유동저항계수나 유량분배비에 별 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

### 3.3 기하학적 형상의 변화에 따른 유동특성

Fig. 9~Fig. 13은 설계변경이 가능한 분기각,

Table 1 Computational conditions used in the study

$\alpha$	$D_e/D_i$	$A_s/A_i$
55°	0.167	0.1,0.2,0.3,0.4
	0.333	0.1,0.2,0.3,0.4
	0.667	0.1,0.2,0.3,0.4
65°	0.167	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5
	0.333	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5
	0.667	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5
75°	0.167	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5
	0.333	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5
	0.667	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5

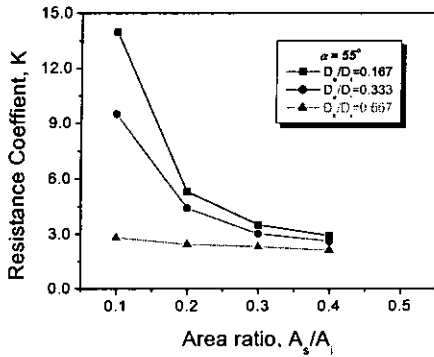
주관입구에 대한 지관의 단면적비( $A_s/A_i$ ) 및 증기분사기 입구의 직경에 대한 주관 출구 노즐의 직경비( $D_e/D_i$ ) 변화에 따른 유동저항계수( $K$ ) 및 유량분배비( $Q_s/Q_i$ )의 변화를 나타내고 있다. 계산 조건은 Table 1과 같다. 이때 분기각의 변화는 최소 55°에서 최대 75°의 범위로 정하였는데 이는 분기각이 55°인 경우는 현재의 설계조건에서 변경 가능한 최소 각도이며, 75°인 경우는 용축에 따른 증기의 팽창을 충분히 수용할 수 있는 거리로서 노즐출구로부터 탱크 벽면까지 최대 길이가 되는 분기각도이다.

Fig. 9의 (a)~(c)는 각 변화에 대한 유동저항계수값의 변화를 나타내었다.  $A_s/A_i$  및  $D_e/D_i$ 가 감소할수록 유동저항계수는 지수 함수적으로 증가하며  $\alpha$ 의 변화에 따른 영향은 분기각이 감소할수록 유동저항계수의 값이 다소 상승하기는 하나 그다지 큰 차이를 보이지는 않았다.

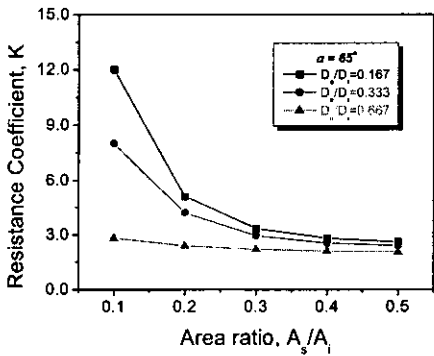
Fig. 10의 (a)~(c)는  $\alpha$ ,  $A_s/A_i$  및  $D_e/D_i$  변화에 따른 유량분배비의 변화를 도시하고 있다. 유동저항계수의 결과와 같이  $\alpha$ 에 따른 변화에 대해서는 유량분배비의 영향은 거의 나타나지 않았으나  $A_s/A_i$  및  $D_e/D_i$ 의 변화에 대해서는 유량분배비의 영향이 지수함수적으로 큰 변화를 나타냈다. 이는 주관에 대한 지관의 유량분배비가 유동저항계수값의 변화를 결정짓는 중요한 변수라는 것을 알 수 있다.

각 인자들이 유동저항계수값의 결정에 미치는 영향의 정도를 살펴보기 위하여 Fig. 11~Fig. 13에서는 각각의 인자에 대하여 관련인자들이 일정한 조건하에서 유동저항계수 및 유량분배비의 변

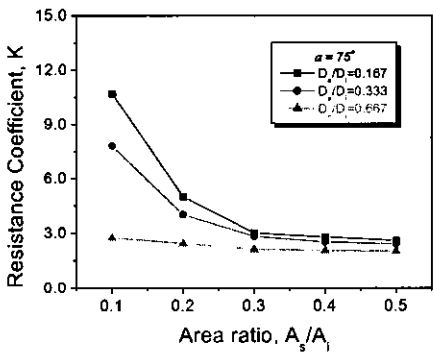




(a)



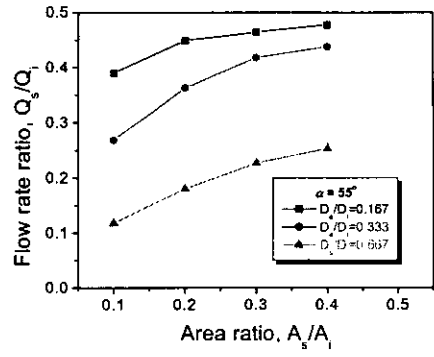
(b)



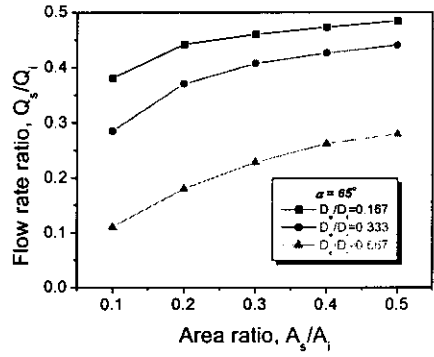
(c)

Fig. 9 Flow resistance coefficients for various diameter and area ratio in  $\alpha=55^\circ$ ,  $65^\circ$  and  $75^\circ$ .

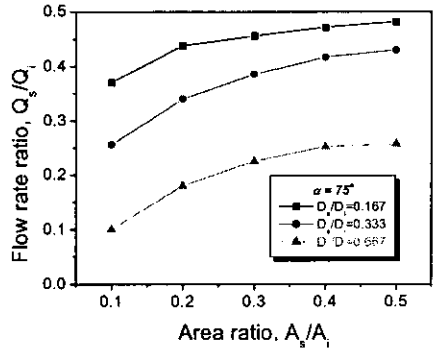
화를 살펴보았다. Fig. 11의 (a) 및 (b)는 증기분사기의  $D_e/D_i=0.333$ 인 경우에 대해  $A_s/A_i$ 의 변화에 따른 유동저항계수 및 유량분배비의 변화를  $\alpha$ 가  $55^\circ$ ,  $65^\circ$  및  $75^\circ$ 인 경우에 대해 도시하였다. 모든 분기각 조건에 대해  $A_s/A_i$ 가 감소할수



(a)



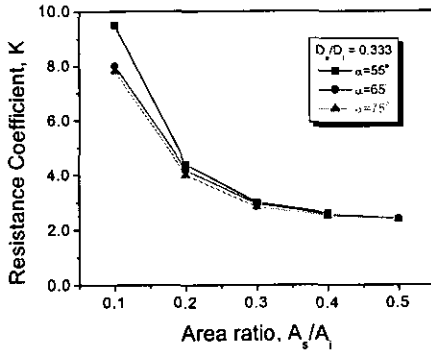
(b)



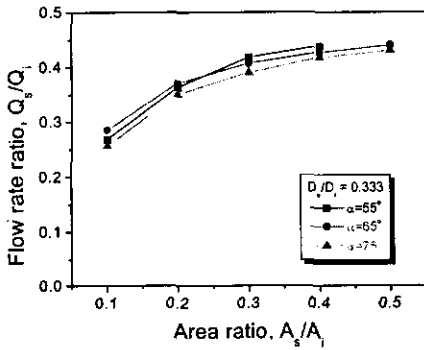
(c)

Fig. 10 Flow rate ratios for various diameter and area ratio in  $\alpha=55^\circ$ ,  $65^\circ$  and  $75^\circ$ .

록 유동저항계수의 값은 지수함수적으로 증가하며 유량분배비는 지수함수적으로 감소하였다. 또한 그 차이는 단면적비가 0.5인 경우가 0.1인 경우보다 70% 정도의 작은 유동저항계수값을 나타냈으며, 유량분배비에 있어서는 단면적비가 0.5인 경우가 단면적비가 0.1인 경우보다 50% 정도 높게 나타났다. Fig. 12의 (a) 및 (b)는  $A_s/A_i=0.3$



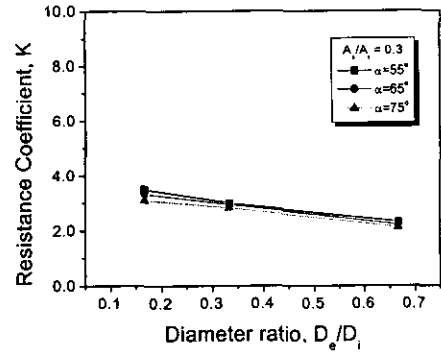
(a)



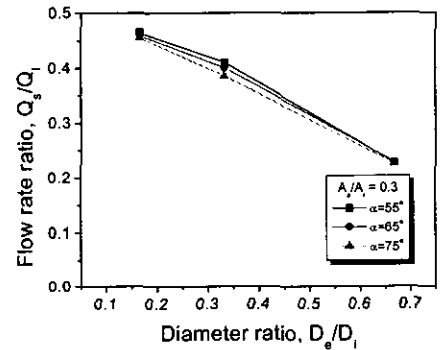
(b)

Fig. 11 Flow resistance coefficients and flow rate ratios for various area ratio in  $\alpha = 55^\circ, 65^\circ$  and  $75^\circ$ .

인 경우에 대해  $D_e/D_i$  변화에 따른 유동저항계수 및 유량분배비의 변화를 도시하고 있다. 모든 분기각에 대해  $D_e/D_i$ 가 증가할수록 유동저항계수



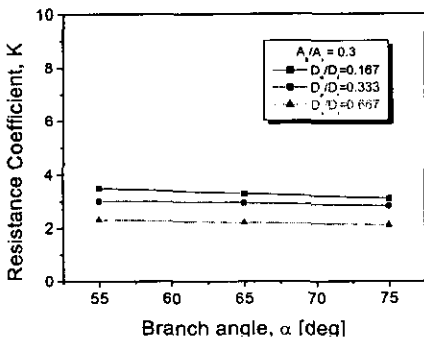
(a)



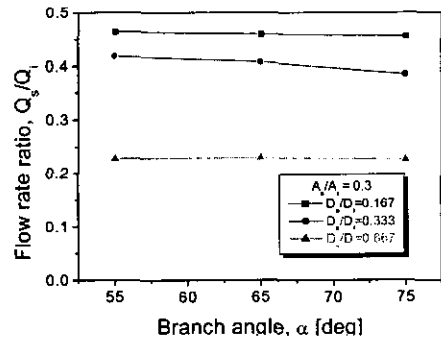
(b)

Fig. 12 Flow resistance coefficients and flow rate ratios for various diameter ratio in  $\alpha = 55^\circ, 65^\circ$  and  $75^\circ$ .

의 값과 유량분배비는 거의 선형적으로 감소하였다. 그러나 유동저항계수값의 변화량은 앞서 살펴본  $A_s/A_i$ 의 변화에 따른 변화보다 상당히 둔



(a)



(b)

Fig. 13 Flow resistance coefficients and flow rate ratios for various branch angle in  $D_e/D_i = 0.167, 0.333$  and  $0.667$ .

화되어져 나타났는데, 이는 현재 증기분사기내의 유동저항계수값은 주관에 대한 조건보다 지관에서의 조건변화에 더 큰 영향을 받는다는 것을 보여준다.  $D_e/D_i$ 의 변화에 따른 차이는 주어진 조건하에서 직경비가 0.667인 경우가 0.167인 경우보다 33% 정도의 낮은 유동저항계수의 값을 나타내었으며, 유량분배비도 49% 정도 감소하였다.

Fig. 13의 (a) 및 (b)는  $\alpha$ 에 따른 영향을 살펴보기 위하여  $A_s/A_i=0.3$ 이며  $D_e/D_i$ 가 0.167, 0.333 및 0.667인 경우에 대해  $\alpha$ 의 변화에 따른 유동저항계수 및 유량분배비를 도시하였다. 동일한 조건내에서  $\alpha$ 에 따른 유동저항계수 및 유량분배비의 변화는  $\alpha$ 가 감소할수록 다소 증가하기는 하나 그 변화량은 미소하며 거의 유사한 값들을 보여주었다. 따라서 증기분사기의 부하경감의 측면에서는 분기각이 55°인 경우가 다소 유리하게 보이기는 하나 응축과정에서 증기의 팽창에 따른 충분한 거리 및 탱크 벽면에서의 압력의 영향을 고려한다면 분기각도가 75°인 경우가 유리하므로 양쪽 측면을 모두 고려한다면 분기각도는 65°인 경우가 바람직할 것으로 판단된다.

이상의 기하학적 설계인자에 따른 증기분사기내의 유동저항계수( $K$ )의 영향을 종합해 보면, 유동저항계수에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 주관입구에 대한 지관의 단면적비( $A_s/A_i$ )이며 다음으로 증기분사기 입구 직경에 대한 주관 출구노즐의 직경비( $D_e/D_i$ )로 나타났고 주관과 지관간의 분기각( $\alpha$ )의 영향은 미소한 것으로 나타났다. 또한 이러한 설계인자들에 따라 증기분사기내의 주관에 대한 지관의 유량분배비( $Q_s/Q_i$ )는 변화하며 이때 유량분배비 곡선의 기울기 형태에 따라 유동저항계수의 변화곡선도 동일한 형태로 나타났다.

식(20)은 Table 1의 조건하에서 Fig. 9~Fig. 13의 결과를 토대로 제안된 유동저항계수의 상관식이다.

$$K = \left[ 40.5 - 55 \frac{D_e}{D_i} \right] \cdot e^{-[(A_s/A_i)/0.8]} + \left[ 2.8 - 1.2 \frac{D_e}{D_i} \right] \quad (20)$$

3.4 관내 표면거칠기의 변화에 따른 유동특성

Fig. 14는 Fig. 2와 같은 설계조건에서의 증기분사기에 대해 내부 벽면에서의 표면거칠기를 고려하였을 경우의 표면거칠기의 높이에 따른 유동저항계수의 변화를 나타내고 있다.

일반적으로 공학용 핸드북<sup>(7,10)</sup>이나 기존의 연구들을 보면 분기관에 대한 유동저항계수값의 산출식들이 매끄러운 상업용관에 대한 경우가 대부분이다. 그러나 현재의 증기분사기와 같이 고레이놀즈수의 난류영역일 경우 벽면에서의 표면거칠기가 유동저항계수값의 변화에 영향을 미칠 수 있으므로 본 연구에서는 표면거칠기를 고려하였을 경우에 대한 계산을 수행하였다.

표면거칠기를 고려하기 위한 수치방법으로는 앞서 설명한 Jayatilke<sup>(8)</sup>가 제안한 관계식을 벽함수 공식에 대입하여 표면거칠기에 따른 유동저항계수의 변화를 구하였다. 거칠기의 높이는 0.00001, 0.0001 및 0.001 m로 정하였다. 계산결과를 살펴보면 대수적으로 표현된 표면거칠기의 높이가 증가할수록 유동저항계수의 값은 선형적으로 증가하며 앞서 3.1에서 계산한 최대유량 조건하에서 표면거칠기를 고려하지 않은 경우( $K=2.94$ )보다 표면거칠기를 0.0001 m로 가정한 경우에 약 12.7%의 유동저항계수값의 증가를 보였으며, 최대 표면거칠기의 높이를 0.001 m로 가정한 경우에 약 19.3%의 증가를 보여주었다. 이를 공학적인 여유도로 보고 설계에 반영할 경우 계산된 유동저항계수값에 약 10~20%를 표면거칠기에 따른 공학적인 여유도로 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

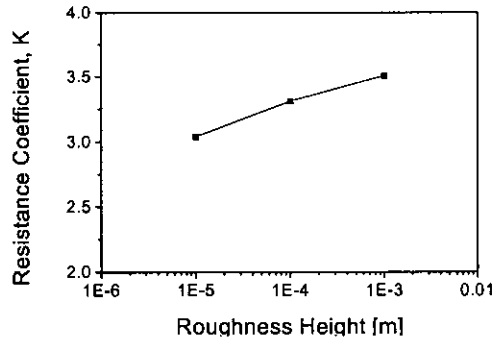


Fig. 14 Flow resistance coefficients for various surface roughness height.

이를 토대로 현재 국내 표준원전의 증기분사기의 경우에 최대유량 조건하에서 표면거칠기에 따른 영향으로 최대 20% 정도의 공학적인 여유도를 감안할 경우 유동저항계수값은 3.53이 된다.

#### 4. 결 론

감압용 배수탱크의 증기분사기에 대해 다양한 설계인자에 따른 유동특성에 대한 수치계산을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 국내 표준원전에 사용되는 감압용 배수탱크인 원자로배수탱크내의 증기분사기에 대해 최대유량조건 및 표면거칠기가 없는 경우에 유동저항계수값으로  $K=2.94$ 가 계산되었으며, 향후 설계변경에 대비하여 설계인자에 따른 유동저항계수를 산출할 수 있는 상관식을 제시하였다.

(2) 현재의 설계조건과 같은 그레이놀즈수 난류영역에서는 점성력의 효과가 현저히 작음으로 인해 입구 레이놀즈수의 변화가 유동저항계수 및 주관에 대한 지관의 유량분배비에 별 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

(3) 증기분사기내의 유동저항계수값을 결정짓는 주요 인자로는 주관입구에 대한 지관의 단면적비 및 입구직경에 대한 주관 출구노즐의 직경비이며 주관과 지관간의 분기각의 영향은 미소하였다.

(4) 현재의 설계변경조건하에서 주관입구에 대한 지관의 단면적비가 0.1이며 주관 출구노즐의 직경비가 0.167 및 분기각도가 55°인 경우가 현재의 설계조건에 비해 5배 정도 증가된 최대 유동저항계수의 값을 나타냈다.

(5) 전반적으로 유량분배비의 변화율이 클수록 유동저항계수의 변화율도 크게 나타나며, 유량분배비의 기울기 형태에 따라 유동저항계수의 기울기 형태도 동일한 양상으로 나타났다. 따라서 유동저항계수값의 변화형태를 결정짓는 중요한 변수는 주관과 지관간의 유량분배비이다.

(6) 표면거칠기의 높이가 대수적으로 증가할수록 유동저항계수값은 선형적으로 증가하여 최대 표면거칠기의 높이를 0.001 m로 가정할 경우에

표면거칠기를 고려하지 않은 경우보다 약 20% 정도의 증가를 나타냈다. 따라서 이를 공학적인 여유도로 고려할 경우 현재 국내 표준원전의 증기분사기의 유동저항계수의 값은 3.53이다.

#### 참고문헌

1. Kim, H. Y. et al., 1998, A study on the behavior of bubble in quenching tank and optimal sparger design, KAERI, TR-962/98.
2. Flow resistance coefficient for reactor drain tank, 1997, KOPEC, POSRV-CV-CA410.
3. Kim, K. C., Park, M. H. and Ahn, J. S., 1999, The flow characteristic and optimal design for RDT sparger, Proceedings of the KSME 1999 spring annual meeting B, pp. 333-338.
4. Kim, K. C., Park, M. H. et al., 1999, Flow characteristics and optimal design for RDT sparger, Trans. of the KSME, Vol. 11, No. 23, pp. 1390-1398.
5. Kim, K. C., Park, M. H. and Ahn, J. S., 1999, A study on the optimal design and flow characteristic of RDT sparger, KOPEC, 98- TR-806.
6. Ludwig, J. C., Qin, H. Q. and Spalding, D. B., 1989, The PHOENICS reference manual, TR/200, CHAM.
7. Idelchik, I. E., 1986, Handbook of hydraulic resistance, Hemisphere Publishing Co.
8. Jayatilleke, C. L. V., 1969, The influence of prandtl number and surface roughness on the resistance of the laminar sublayer to momentum and heat transfer, Prog. in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, Pergamon Press.
9. Nikuradse, J., 1933, Laws for flow in rough pipes, VDI-Forschungsheft 361, Series B, 4.
10. Miller, D. S., 1978, Internal flow systems, BHRA Fluid Eng., pp. 220-233.