

## 세라믹 필터의 탈진설비의 최적화에 관한 연구

서양곤<sup>†</sup> · 최주홍

경상대학교 화학공학과 및 환경보전연구소  
(1999년 4월 20일 접수, 1999년 6월 9일 채택)

## A Study on Optimization of a Particulate Removal Facility with Ceramic Filter

Yang Gon Seo<sup>†</sup> and Joo Hong Choi

Department of Chemical Engineering and RIEP, Gyeongsang National University  
(Received 20 April 1999; accepted 9 June 1999)

### 요 약

IGCC와 PFBC에 적용될 수 있는 다공성 세라믹 필터의 펄스-젯 시스템을 최적화하기 위해서 탈진 성능에 영향을 미치는 인자에 대한 연구를 수행하였다. 동반류가 있는 시스템의 경우 경제적인 운전을 위해서는 노즐관의 크기, 확산기목의 크기 그리고 펄스-젯 압력이 중요한 요인이 되는데, 본 연구에서는 상온상압의 경우 노즐관의 크기가 0.4-0.6 cm, 확산기의 목은 2-3 cm 그리고 펄스-젯 압력이 4-5 atm의 범위가 최적 조건이었다. 또한 실제 현장에서 적용될 수 있는 고온고압과 확산기의 목이 2.5 cm의 조건에서는 노즐관의 직경이 약 0.4 cm이고 펄스-젯 압력이 50-60 atm인 경우가 최적이었다.

**Abstract** - To optimize the pulse-jet cleaning system of porous ceramic filters applied to IGCC and PFBC, the effects of factors on the cleaning performance were investigated at a temperature of 298.15 K and pressure of 1 atm and 723.15 K and 20 atm, respectively. The diameter of nozzle, the size of diffuser throat and pulse-jet pressure were the main factors of pulse-jet system. In case of 298.15 K and 1 atm, the effective diffuser throat size was 2 to 3 cm which depended on pulse-jet pressure, the diameter of nozzle 0.4 to 0.6 cm and pulse-jet pressure 4 to 5 atm, respectively. In case of 723.15 K, 20 atm and the diameter of diffuser throat was 2.5 cm, the optimum diameter of nozzle was about 0.4 cm and pulse-jet pressure 50 to 60 atm, respectively.

**Key words:** Particulate Removal Facility, Porous Ceramic Filter, Diffuser, Entrainment Flow, Pulse-Jet

### 1. 서 론

석탄가스화복합발전(Integrated Coal Gasification Combined Cycle Power Generation System: IGCC)과 가압유동층가스화발전(Pressurized Fluidized Bed Combustion: PFBC)에서 집진설비는 분진과 같은 대기 오염물질의 배출을 제어하고, 터빈의 마모를 줄이기 위한 필수적인 설비이다. IGCC용 집진설비로는 다공성 세라믹 필터가 아주 유용한 것으로 평가를 받고 있다[1]. 이러한 집진설비의 원활한 운전을 위해서는 집진과 역세기 모두 다공성 필터 내에서 유체의 일정한 흐름 분포를 유지하는 것이 매우 중요하다. 서 등[2]은 정상상태하에서 다공성 필터 내의 유체 흐름의 전산모사를 통하여 필터 내부의 흐름에 영향을 주는 인자에 대한 연구를 수행하여, 필터의 크기는 집진시보다 많은 양의 기체를 필터로 주입해야 하는 역세의 조건에 의해 결정됨을 보였다.

일반적으로 IGCC와 PFBC용 집진설비의 탈진을 위해서는 약 1초 전후의 짧은 시간 동안 역세기체를 필터 내부로 주입하는 충격기류(Pulse-Jet) 탈진법이 널리 이용되고 있다. 역세기 많은 양의 기체를 짧은 시간에 필터 내부로 주입하게 됨으로 역세 과정이 필터의 장기

운전에 매우 중요한 역할을 할 뿐만 아니라, 집진의 정상상태에서 역세의 새로운 정상상태에 도달하기까지의 전이상태가 존재하게 된다. 따라서 집진과 역세가 일어나는 전이상태의 추방향 유속과 압력의 거동을 파악하는 것은 집진설비의 설계를 위해서는 필수적인 요소가 된다. Chung 등[3]은 전이상태에 대한 수치해석을 통하여 펄스-젯 주입 후 약 50 ms가 되면 필터내부의 흐름이 새로운 정상상태에 도달함을 보여 주었다. 이것은 역세의 경우도 정상상태의 가정으로 해석하여도 무방함을 보여 주고 있다. 다만 펄스-젯 주입 초기에 필터의 입구 부분에서 상대적으로 높은 압력상승이 나타남으로 이를 완화시킬 수 있는 설비가 필요하게 된다. 다공성 필터를 장시간 사용할 때 특정부분에 손상을 준다고 알려져 있으며 실제 산업현장에서 이러한 현상이 자주 관찰되고 있다.

황과 공[4]은 여과집진기에서 여러 가지 형태의 분사 노즐과 직경 등을 이용하여 압력분포를 측정함으로써 최적조건을 구하였다. Schulz와 Durst[5]는 외부의 동반류 흐름이 없이 직접 저장조로부터 필터에 역세기체가 주입되는 시스템에서 펄스-젯을 실시할 경우 압력 강하에 의한 강한 진동이 관찰되었고, 동반류의 흐름이 있는 시스템에서는 이런 현상들이 일어나지 않았다고 발표하였다. 즉 동반류를 포함하는 확산기(diffuser)를 각 필터 입구에 설치할 경우 압력의 진동을 줄일 수 있어 필터를 보다 효율적으로 장기간 사용이 가능하게 된다는 것

<sup>†</sup>E-mail : ygseo@nongae.gsnu.ac.kr

을 의미한다. 특히 동반류를 포함하는 경우 낮은 온도의 역세기체와 고온의 주위의 기체가 혼합되어 역세기체의 온도가 상승되기 때문에 낮은 온도의 역세기체가 직접 필터 내부로 주입되는 시스템보다 열충격(thermal stress)에 의한 필터의 손상을 줄일 수 있는 장점도 있다. 또한 많은 주위의 기체를 동반할 경우 적은 양의 고압 역세기체를 이용하여 효과적인 역세를 실시할 수 있으므로, 고압의 역세기체를 압축하기 위한 비용 절감에도 효과가 있다.

일반적으로 동반류를 포함하는 확산기를 설치할 경우 확산기의 목 크기, 노즐의 크기와 펄스-젯 압력 등이 집진설비 운전에도 영향을 미치게 된다. 따라서 집진설비를 원활히 운전하고 경제적인 운전을 위해서는 이들을 적절한 크기로 설계할 필요가 있다. 그러나 현재까지 동반류의 비, 노즐의 크기 등이 집진설비에 미치는 영향 등에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 동반류를 포함하는 다공성 필터에서 동반류의 비, 노즐의 크기, 확산기 등이 집진설비 운전에도 미치는 영향에 대해 연구하였다.

## 2. 이론적 배경

다공성 필터에 부가되는 열 충격과 기계적인 충격을 완화시키기 위해서는 집진기의 주위의 기체를 역세기체와 동반하여 필터 내부로 주입하는 시스템이 추천되고 있다. 본 연구에서 다공성 필터의 역세 흐름을 Fig. 1에 나타난 바와 같이 구성하였다. 따라서 집진기는 역세기체의 저장조로부터 노즐로의 흐름, 노즐로부터의 펄스-젯, 젯류와 동반류의 확산기 내로의 흐름, 확산기 목의 흐름과 확산기의 확대관을 통해 필터 내부로의 흐름 등으로 구성된다. 따라서 이런 흐름을 해석하기 위해서는 각 부분 별로 나누어서 해석을 할 필요가 있다.

### 2-1. 저장조로부터 노즐 입구까지의 흐름

저장조로부터 직관 노즐 내로의 흐름은 등엔트로피(adiabatic)의 흐름이다. 등엔트로피 흐름은 시스템과 주위 사이의 열교환이 없는, 즉  $dQ=0$ 인 공정 중 하나이다. 그러므로 가역적인 등엔트로피 공정은 열역학 제1법칙을 적용하여 역세기체 저장조와 노즐관 입구의 압력비, 온도비 및 밀도비의 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)에서 (3)까지의 유도 과정은 McCabe 등[6]에 자세히 나타나 있다.

$$\frac{P_{ni}}{P_o} = \left[ \frac{2}{(\gamma-1)M_{ni}^2 + 2} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (1)$$

$$\frac{\rho_{ni}}{\rho_o} = \left[ \frac{2}{(\gamma-1)M_{ni}^2 + 2} \right]^{1/(\gamma-1)} \quad (2)$$

$$\frac{T_{ni}}{T_o} = \frac{2}{(\gamma-1)M_{ni}^2 + 2} \quad (3)$$

여기서  $M$ 은 Mach 수를 나타내고, Mach 수의 정의는 다음과 같다.

$$M^2 = \frac{\rho u^2}{g_c \gamma P} = \frac{u^2}{g_c \gamma T R / M_w} \quad (4)$$

### 2-2. 노즐 내의 흐름

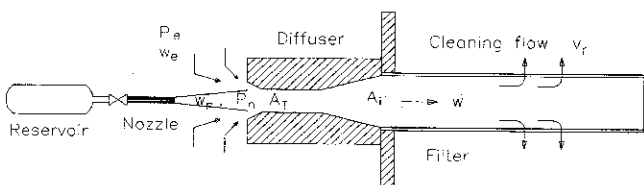


Fig. 1. Cleaning flow of pulse-jet system.

직관 노즐 내의 흐름은 단열마찰(Fanno)흐름이다. 단면이 일정하고 끝은 도관에서의 흐름에서 관벽을 통한 열전달이 무시되면 단열적이 되고, 유로가 길고 출구 압력이 낮으면 기체의 속도는 음속에 이르게 된다. 기체가 관을 들어 갈 때 Mach 수가 1보다 크면 Mach 수가 감소하겠지만 1보다 작아지지는 않는다. 배출 압력을 일정하게 유지하고 관의 길이를 늘려서 기체 흐름을 강제로 아음속에서 초음속이 되게 하거나, 또는 초음속에서 아음속이 되게 하려면, 이러한 변화를 막기 위해 질량유속이 감소한다. 이러한 영향을 초킹(choking)이라 한다.

단열마찰흐름에서 기계적 에너지 수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP}{P} + \frac{\rho u du}{P g_c} + \frac{\rho u^2 f dL}{2 P g_c r_H} = 0 \quad (5)$$

식 (5)를 해석하기 위해서는 Mach 수를 종속변수로, 마찰 매개변수를 독립변수로 하는 적분형을 구할 필요가 있다. 이러한 식을 구하기 위하여 식 (4)를 이용하여 식 (5)에서 밀도 인자를 소거하고, 연속식과 이상기체 상태방정식을 이용하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dP}{P} = - \frac{1 + (\gamma-1)M^2}{1 + [(\gamma-1)/2]M^2} \frac{dM}{M} \quad (6)$$

$$\frac{du}{u} = \frac{dP}{P} + 2 \frac{dM}{M} \quad (7)$$

이들 식을 식 (5)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 최종 미분방정식이 얻어진다.

$$f \frac{dL}{r_H} = \frac{2(1-M^2)dM}{\gamma M^3 \{1 + [(\gamma-1)/2]M^2\}} \quad (8)$$

입구지점 ni와 출구지점 n에 대하여 식 (8)을 적분하면

$$4f \frac{L_n}{D_n} = \frac{1}{\gamma} \left( \frac{1}{M_{ni}^2} - \frac{1}{M_n^2} - \frac{\gamma+1}{2} \ln \left[ \frac{M_{ni}^2(\gamma-1)M_{ni}^2+2}{M_n^2(\gamma-1)M_n^2+2} \right] \right) \quad (9)$$

여기서  $\bar{f}$ 는 두 끝점 마찰인자의 산술평균값  $(f_{ni}+f_n)/2$ 이고, 마찰계수 값은 Blasius식으로부터 구할 수 있다[7].

$$f = 0.0791 \text{ Re}^{-1/4} \quad (10)$$

또한 노즐관의 입구와 출구의 압력비, 온도비와 밀도비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_n}{P_{ni}} = \frac{M_{ni}}{M_n} \sqrt{\frac{(\gamma-1)M_{ni}^2+2}{(\gamma-1)M_n^2+2}} \quad (11)$$

$$\frac{T_n}{T_{ni}} = \frac{(\gamma-1)M_{ni}^2+2}{(\gamma-1)M_n^2+2} \quad (12)$$

$$\frac{\rho_n}{\rho_{ni}} = \frac{P_n T_{ni}}{P_{ni} T_n} = \frac{M_{ni}}{M_n} \sqrt{\frac{(\gamma-1)M_{ni}^2+2}{(\gamma-1)M_n^2+2}} \quad (13)$$

### 2-3. 확산기 입구의 흐름

확산기 입구에는 젯류가 유입됨에 따라 압력 저하가 예상된다. 그러나 흐름의 운동량은 전부 노즐로부터의 젯에 의해 제공되는 것이 아니고 동반류체의 에너지는 주위의 저유속의 유체가 가지고 있는 에너지에 젯의 에너지가 일부 전달되는 것이다. 따라서 노즐부의 압력에 주변 유체의 압력이 더하여 진다. 따라서 확산기 입구의 물질량, 운동량 그리고 에너지 수지식은 아래 식과 같다.

가) 물질수지

$$W_n + W_e = W \quad (14)$$

나) 운동량수지

$$W_n u_n + P_n A_n + P_e (A_i - A_n) = W u_i + P_i A_i = \bar{M} \quad (15)$$

다) 에너지 수지

$$W_n e_n + W_e e_e = W e \quad (16)$$

$$e_n = C_p T_n + \frac{1}{2} u_n^2 \quad (17)$$

$$e_e = C_p T_e \quad (18)$$

$$e = \frac{\gamma}{(\gamma-1)\rho_i} P_i + \frac{1}{2} u_i^2 \quad (19)$$

여기서  $W_n$ ,  $P_n$ ,  $P_e$ ,  $T_e$ ,  $\bar{M}$ ,  $e_n$ ,  $e_e$ 를 알고 있고, 흡입 비율  $\mu$  (entrainment ratio =  $W_e/W_n$ )을 가정하면  $u_n$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_n = \frac{\gamma}{(\gamma-1)(1+\mu)W_n} \left[ 1 - \sqrt{1 - 2 \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \frac{W_n^2}{\bar{M}^2} (1+\mu) (e_n + \mu e_e)} \right] \quad (20)$$

이로부터

$$W = (1+\mu) W_n \quad (21)$$

$$\rho_n = \frac{W}{u_n A_i} \quad (22)$$

$$P_n = \frac{\bar{M} - W u_i}{A_i} \quad (23)$$

$$T_n = \frac{P_n}{\rho_n R} \quad (24)$$

$$M_n = \frac{u_n}{\sqrt{\gamma R T_n}} \quad (25)$$

## 2.4. 확산기의 목 내의 흐름

확산기의 목 내의 흐름은 단열마찰흐름이므로 노즐 내의 흐름과 같은 방법으로 나타낼 수 있다.

$$4f \frac{L}{D} = \frac{1}{\gamma} \left( \frac{1}{M_i^2} - \frac{1}{M_o^2} - \frac{\gamma+1}{2} \ln \left[ \frac{M_o^2 (\gamma-1) M_i^2 + 2}{M_i^2 (\gamma-1) M_o^2 + 2} \right] \right) \quad (26)$$

$$\frac{P_o}{P_i} = \frac{M_i}{M_o} \sqrt{\frac{(\gamma-1) M_i^2 + 2}{(\gamma-1) M_o^2 + 2}} \quad (27)$$

$$\frac{\rho_o}{\rho_i} = \frac{M_i}{M_o} \sqrt{\frac{(\gamma-1) M_i^2 + 2}{(\gamma-1) M_o^2 + 2}} \quad (28)$$

$$\frac{T_o}{T_i} = \frac{(\gamma-1) M_i^2 + 2}{(\gamma-1) M_o^2 + 2} \quad (29)$$

## 2.5. 확산기 출구의 흐름

확산기의 출구에서는 식 (30)으로부터  $M_i$ 를 구할 수 있고, 압력비, 밀도비 그리고 온도비의 관계는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{A_i}{A_t} = \frac{M_o}{M_i} \left[ \frac{(\gamma-1) M_i^2 + 2}{(\gamma-1) M_o^2 + 2} \right]^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (30)$$

$$\frac{P_i}{P_o} = \left[ \frac{(\gamma-1) M_o^2 + 2}{(\gamma-1) M_i^2 + 2} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (31)$$

$$\frac{\rho_i}{\rho_o} = \left[ \frac{(\gamma-1) M_o^2 + 2}{(\gamma-1) M_i^2 + 2} \right]^{1/(\gamma-1)} \quad (32)$$

$$\frac{T_i}{T_o} = \frac{(\gamma-1) M_o^2 + 2}{(\gamma-1) M_i^2 + 2} \quad (33)$$

## 2.6. 다공성 필터 내의 흐름

필터 내에서의 흐름은 정상상태하에서의 수치해석 부분에서 구한 식을 사용하였고, 경계조건 중 필터 입구( $x=0$ )부분은 식 (32)에서 구한  $P_i$ 가 사용되었고, 필터의 끝부분( $x=L$ )에서는  $u=0$ 을 사용하였다. 다공성 필터 내에서의 흐름에 대한 식은 서 등[2]에 보다 자세히 나타나 있다.

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{4}{D} \rho u \left( \frac{f}{2} u - 2 v_w \right) \quad (34)$$

$$\frac{du}{dx} = -\frac{4}{D} \frac{1}{u_c^2 - u^2} \left[ \left( u_c^2 + \frac{\gamma+1}{2} u^2 + \frac{\gamma-1}{2} v_w^2 \right) v_w - \frac{\gamma}{2} f u^3 \right] \quad (35)$$

## 3. 계산방법

동반류가 있는 경우의 계산은 다음과 같이 수행되었다. 우선 노즐 관 입구의 적당한 압력을 가정한다. 직관이 충분히 긴 경우에는 노즐 출구에서는 초경현상에 의해 음속에 도달하게 된다. 이 경우 노즐 출구의 Mach 수는  $M_n=1$ 이 된다. 따라서 우선 노즐 내의 흐름 식, 즉 식 (1)과 (9)로부터  $M_n=1$ 이 되는 임계압력( $P_{oc}$ )을 결정한다.

주어진 펄스-젯 압력이 임계 압력 이상일 경우에는 노즐 출구의 Mach 수를  $M_n=1$ 로 고정한다. 그리고 주어진 저장조의 조건  $P_o$ ,  $\rho_o$  및  $T_o$ 를 이용하여 노즐 출구까지의 각 부분에 대한  $P_n$ ,  $\rho_n$ ,  $T_n$ ,  $M_n$ ,  $P_n$ ,  $\rho_n$  및  $T_n$  등의 값은 식 (1)부터 (13)까지를 이용하여 구할 수 있다. 만일 펄스-젯 압력이 임계압력 이하일 경우에는 노즐 출구의 압력을 주변의 압력과 같게 고정한다. 따라서 유사한 방법으로 노즐 출구까지의 각 부분에 대한 온도, 압력, 밀도 그리고 Mach 수를 주어진 식 으로부터 구할 수 있다. 구하여진 노즐관 입구에서의 압력과 앞에서 가정한 압력을 비교하여 적절한 오차 범위 내에 들면 다음 순서로 계산을 계속하고, 오차 범위 내에 들지 않을 경우 노즐관 입구의 압력을 다시 가정하여 위의 계산을 반복한다.

확산기 주위의 물질, 운동량 그리고 에너지 수지식은 주어진  $W_n$ ,  $P_n$ ,  $P_e$ ,  $T_e$ ,  $e_n$  및  $e_e$ 의 값으로부터 동반류의 비율  $\mu$  (entrainment ratio =  $W_e/W_n$ )을 가정하면 식 (20)에서 (25)로부터 필터 입구부분의 유속  $u_i$  등과 같은 물성치를 계산할 수 있다. 또한 다공성 필터 내의 식 (34)와 (35)를 필터 입구에서 끝부분까지 적분을 하면 필터의 끝부분의 축방향 유속을 계산할 수 있다. 필터 내의 축방향 유속과 압력은 서 등[2]과 같은 방법으로 구하였다. 계산된 축방향 유속이 경계조건에 해당하는  $u_{x=L}=0$ 과 비교하여 적당한 범위 내에 들지 않을 경우에는 동반류의 비율  $\mu$ 를 다시 가정하여 적당한 범위 내에 들 때까지 계속 반복하여 계산한다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 집진기의 최적화

식 (9)와 (26)에서 사용된 마찰 영향의 척도가 되는 기본량은 마찰 매개변수인  $4fL/D$ 이다. 단열마찰흐름에서는 기체의 온도가 변한다. 따라서 점도 역시 변하며, Reynolds 수와 마찰인자는 실제로 일정하지 않다. 그러나 본 연구와 같은 노즐과 확산기 목 내에서의 흐름에서는 온도의 변화가 크지 않게 된다. 따라서 온도의 변화에 대한 점도의 변화 역시 적으며, Reynolds 수가 마찰인자  $f$ 에 미치는 영향은 더욱 적다. 그러므로 실제 계산에서는  $f$ 의 값이 일정하다고 보고 사용하여도 무방하다. 그러나 필요하다면 도관의 두 끝에서  $f$ 를 계산하고, 그

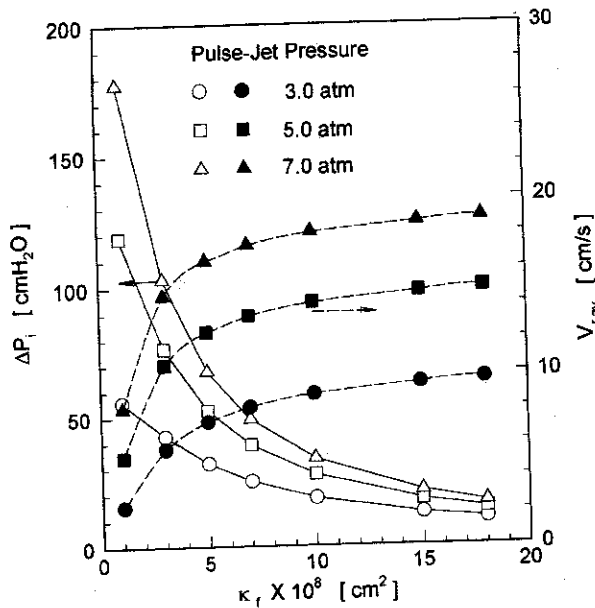


Fig. 2. Effect of permeability on cleaning pressure difference and average cleaning velocity.

산술평균을 상수로 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 산술평균값을 사용하였다.

Fig. 2에는 필터 주위의 압력과 필터 내부 입구의 압력차인 역세압력과 평균 역세속도에 대한 다공성 필터의 투과율이 미치는 영향을 나타내었다. 투과율이 커지면 평균 역세속도 또한 증가하지만, 투과율이 일정한 값 이상에서는 거의 일정한 역세속도를 나타내고 있다. 또한 역세 압력차는 투과율에 반비례하여 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 특히 투과율이 작은 다공성 필터를 사용하는 집진기의 경우 집진기 설계에서 적절한 투과율을 선택하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 충투과율은 Schumacher사에서 제조한 DIA-Schumalith10-20의 투과율인  $7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ 의 값을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 필터의 길이는 150 cm이었고, 외경 및 내경은 각각 4 cm와 6 cm이었다.

우선 집진기의 주위의 온도와 압력이 각각 298.15 K와 1 atm인 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. Fig. 3에 노즐관의 직경이 0.4 cm이고 길이가 50 cm일 경우의 동반류에 대한 확산기 목의 직경의 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 확산기의 목이 2-3 cm일 때 가장 큰 동반류를 나타내었다. 압력이 높고 확산기의 목이 작은 경우에는 많은 양의 기체가 확산기 내부로 주입되기 때문에 확산기 내부에서의 유속이 매우 빨라지게 되고, 경우에 따라서는 초음속에 도달하게 되어 수치해석이 불가능하였다. 흡입효과가 크다는 것은 역세시 많은 주위의 기체를 동반하여 필터 내부로 주입되므로 찬 역세 기체가 직접 필터에 주입됨에 의해 찬 역세 기체가 직접 필터에 주입되므로 일어날 수 있는 열 충격을 완화시킬 수 있다. 또한 적은 양의 고압가스에 의해 적절한 역세를 실시함으로 고압의 역세 기체의 압축에 의한 비용도 절감하는 효과도 있다.

Fig. 4에는 평균 역세속도에 대한 확산기 목의 직경의 영향을 나타내었다. 동반비가 최대가 되는 영역에서 평균 역세속도 역시 최대 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 필터의 원활한 운전을 위한 조건으로는 필터 표면에 부착된 분진을 적절히 탈진시키기 위해서는 평균 역세속도가 10 cm/s 이상 되어야 하고, 필터의 진동 등에 의한 손상을 방지하기 위해서는 필터의 입구에서 축방향 유속은 35 m/s 이하가 되어야 한다. 필터 내부의 흐름에서 기체를 비압축성이라고 가정하면

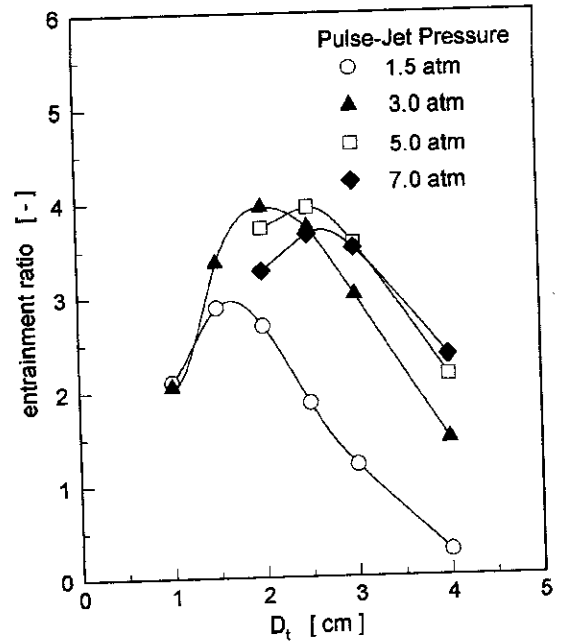


Fig. 3. Effect of diffuser throat on entrainment ratio.

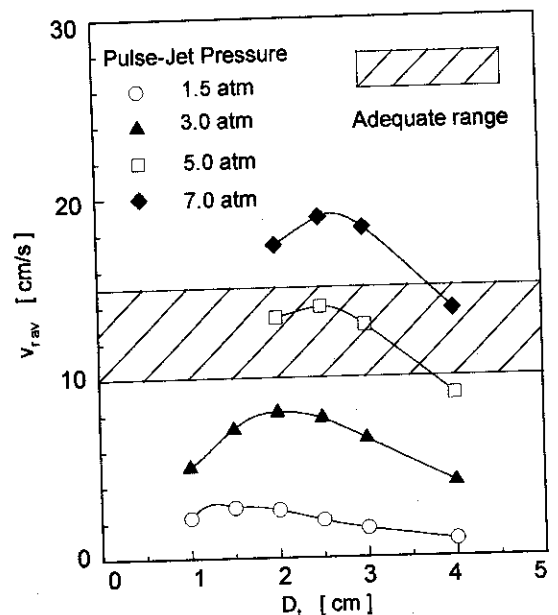


Fig. 4. Effect of diffuser throat on average cleaning velocity.

평균 역세속도와 필터 입구에서의 축방향 유속의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\pi}{4} u_i (D_o - 2\Delta r)^2 = \pi D_o v_{av} L \quad (36)$$

따라서 축방향 유속이 35 m/s 이하가 되게 하려면, 평균 역세속도는 15 cm/s 이하가 되어야 한다. 즉 적절한 평균 역세속도는 10-15 cm/s의 범위에 있어야 함을 의미한다. 따라서 Fig. 4에서 보는 바와 같이 노즐의 직경이 0.4 cm이고 확산기 목의 직경이 2-3 cm의 범위에 있을 경우 적절한 펄스-젯 압력 즉 역세 기체 저장조의 압력( $P_o$ )은 4-5 기압이 된다.

Fig. 5에는 확산기의 목이 3 cm일 때 동반류비에 대한 노즐의 직경의 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 펄스-젯 압력이 높

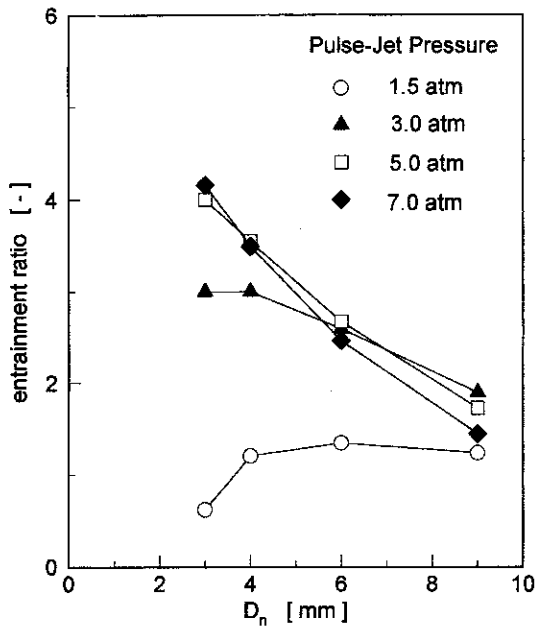


Fig. 5. Effect of nozzle diameter on entrainment ratio.

을 경우에는 노즐의 직경이 커지면 동반류의 비가 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 펄스-젯 압력이 임계압력(약 3 atm) 보다 작은 경우에는 동반류의 비가 증가하다가 어느 값 이상에서는 일정한 값을 나타내었다. 즉 펄스-젯 압력이 임계압력 이상일 경우에는 노즐의 직경이 적을수록 유리하다는 것을 알 수 있다. 노즐 출구 주위의 압력을 일정하게 유지하고 역세 기체 저장조의 압력을 높이면 노즐 내부의 기체의 질량유량은 압력에 따라 증가하게 된다. 그러나 저장조의 압력을 일정한 값(임계압력) 이상으로 계속 증가시키면 초빙현상에 의해 노즐 출구의 유속은 음속에 도달하고, 더 이상 질량유량은 증가하지 않는다. 노즐의 직경이 클 경우에는 비록 압력이 낮더라도 많은 양의 기체가 저장조로부터 주입되므로 노즐 출구의 유속이 음속에 도달하게 되어, 비록 압력이 높아지더라도 질량유속은 변함이 없다. 반면 노즐입구의 유속은 상대적으로 빨라지게 되어 노즐 내부에서 마찰에 의해 상대적으로 많은 에너지가 손실됨으로 노즐 직경이 큰 경우 3 atm에서의 동반류의 비가 5, 7 atm에서 보다 오히려 커지는 경향을 나타내었다.

Fig. 6에는 평균 역세속도에 대한 노즐 직경을 나타내었다. 노즐의 직경이 증가할수록 평균 역세속도는 비례하여 증가하였다. 노즐관의 직경이 작은 경우에는 역세기체의 유량 또한 줄어들어 충분한 역세 효과를 나타낼 수 없으므로 적절한 크기의 노즐관이 요구된다. 적절한 평균 역세속도의 범위를 고려한 경우 펄스-젯 압력이 높을수록 노즐의 직경이 작은 것이 유리하다. 따라서 0.4-0.6 cm의 직경을 가지는 노즐이 적절하다.

Fig. 7에는 동반류의 비에 대한 펄스-젯 압력( $P_0$ )의 영향을 나타내었다. 펄스-젯 압력이 증가하면 동반류의 비가 증가하다가 최대값을 지나 감소하거나 일정한 값을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 확산기의 목이 2-3 cm일 경우 가장 적절한 펄스-젯 압력은 3-5 기압이었다. 그리고 확산기 목의 크기에 따라 최적 펄스-젯 압력이 달라지므로 확산기 목 설계가 집진설비 설계에 매우 중요한 인자임을 알 수 있다. Fig. 8에는 펄스-젯 압력이 평균 역세속도에 미치는 영향을 나타내었다. 펄스-젯 압력이 증가할수록 평균 역세속도는 비례적으로 증가하였다. 적절한 평균 역세속도를 고려한다면 4-5 기압이 최적의 펄스-젯 압력으로 나타났다.

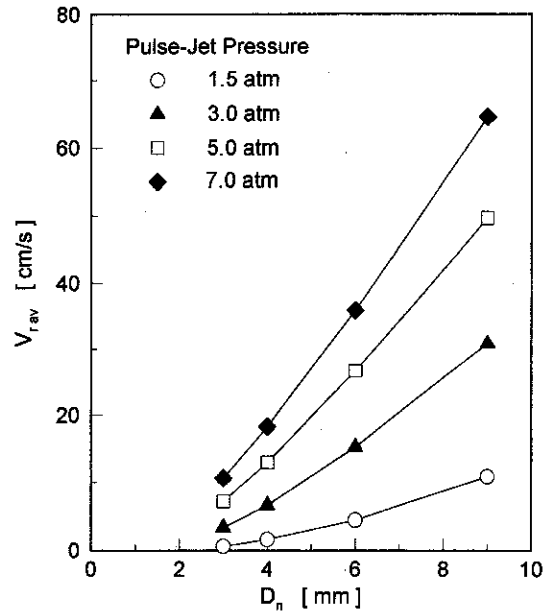


Fig. 6. Effect of nozzle diameter on average cleaning velocity.

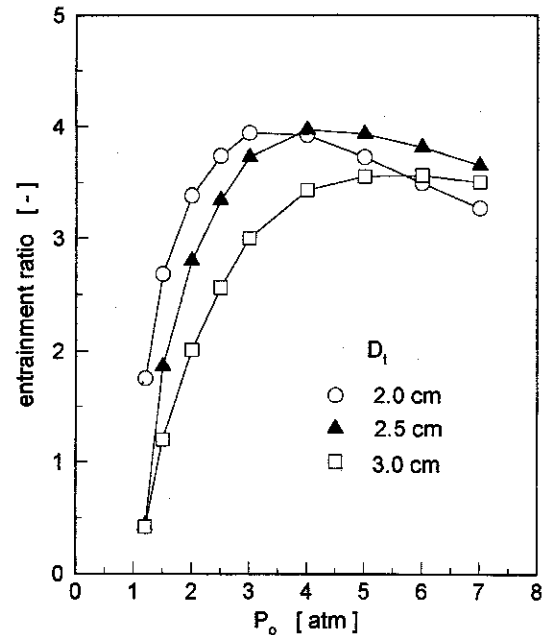


Fig. 7. Effect of pulse-jet pressure on entrainment ratio.

상업용으로 사용되고 있는 집진기의 운전 조건에 가까운 필터 주위의 온도와 압력이 723.15 K 그리고 20 atm이고, 역세기체의 온도는 373.15 K인 조건에서 계산을 수행하였다. 본 연구에서 온도에 따른 공기의 점도는 Lucas 법칙[8]에 의해 계산하였다. Fig. 9에 확산기의 목이 2.5 cm인 경우 동반류의 비에 대한 펄스-젯 압력과 노즐관의 직경의 영향을 나타내었다. 노즐관의 직경이 클수록 동반류의 비는 펄스-젯 압력에 큰 영향을 받지 않았다. 또한 노즐관의 직경이 작을수록 높은 동반류를 나타내었다. 그러나 작은 노즐관의 경우 아무리 큰 동반류의 비를 나타낸다 할지라도 역세기체의 유량이 적으므로 충분한 탈진효과를 나타낼 수 없다. 따라서 평균 역세속도를 고려했을 경우, 노즐관의 직경이 0.4 cm 전후로 펄스-젯 압력이 50-60 atm이 적당하였다.

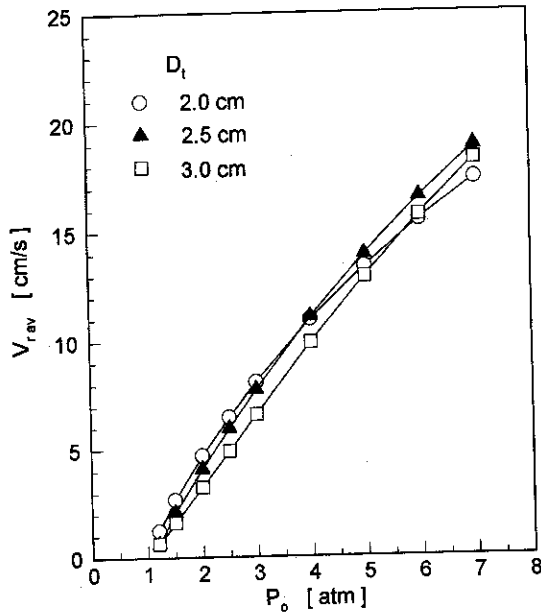


Fig. 8. Effect of pulse-jet pressure on average cleaning velocity.

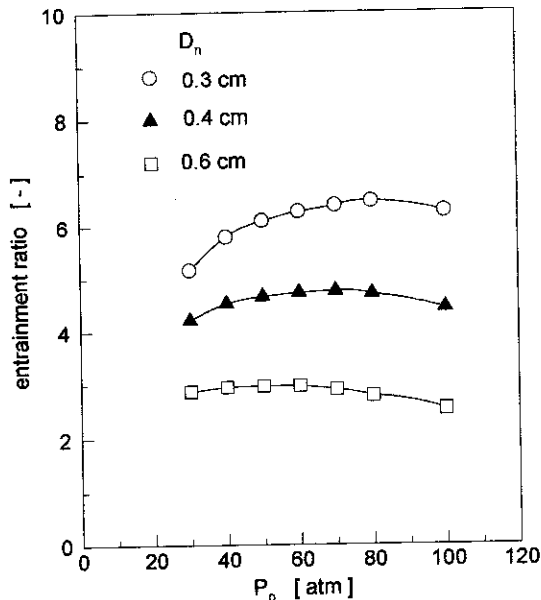


Fig. 9. Effect of pulse-jet pressure on entrainment ratio under high temperature and pressure.

#### 4.2. 상업용 집진설비의 개념설계

본 절에서는 250 MWe급(2,000 ton/d) 상업용 plant의 집진설비의 개념설계시 필터의 크기와 용기의 크기를 선택하는 과정을 나타내었다. 일반적으로 상업용 plant의 운전조건은 450 °C와 20 atm이고 기체의 부피 유속은 400,000 Sm<sup>3</sup>/h이고 분진의 농도는 10 g/Sm<sup>3</sup>이라 가정한다. 일반적으로 필터 외부에 부착된 분진층에 의해 압력손실이 급격하게 증가하므로 석탄가스의 집진속도는 1 cm/s가 된다. 그러므로 통상 1,370 m<sup>2</sup>의 집진 면적이 필요하게 된다. 이와 같이 집진 면적이 주어졌을 때 필터의 크기와 용기의 직경은 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다. 집진 면적을 A라고 하고 필터의 개수를 N이라고 하면

$$A = \pi D_o L N \quad (37)$$

과 같이 된다. 식 (36)으로부터 필터의 개수는 다음과 같이 나타낼

화학공학 제37권 제5호 1999년 10월

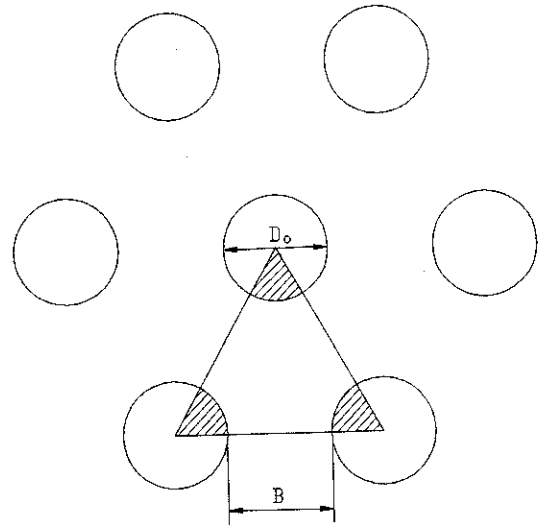


Fig. 10. Regular triangular arrangement of filter element.

수 있다.

$$N = \frac{4A}{\pi(D_o - 2\Delta r)^2} \frac{v_{rav}}{u_i} \quad (38)$$

필터를 용기에 설치할 때 각 필터 표면 사이의 넓이를 B로 하여 정삼각형으로 배치하면(Fig. 10 참조) 정삼각형 안에 포함되는 필터의 단면적은 필터 한 개가 차지하는 단면적의 1/2에 해당된다. 그러면 필터 한 개를 고정하기 위해 필요한 면적은

$$s = \frac{\sqrt{3}}{2} (D_o + B)^2 \quad (39)$$

따라서 용기의 단면적은

$$S = S_o + sN = S_o + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{v_{rav}}{u_i} A \frac{(1 + B/D_o)^2}{(1 + 2\Delta r/D_o)^2} \quad (40)$$

여기서 S<sub>o</sub>는 필터를 고정하기 위해 필요한 면적이다. 집진부분이 차지하는 부피는 다음과 같다.

$$V = (S - S_o)L = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} A \frac{(D_o + B)^2}{D_o} \quad (41)$$

필터의 두께가 1 cm이고 길이가 150 cm이면서 외부 표면 평균 역세 속도는 10 cm/s 이상을 유지하고 역세가스의 필터 입구 속도는 35 m/s 이하로 유지한다면

$$10 \leq v_{rav} = \frac{(D_o - 2\Delta r)^2}{4D_o L} u_i \leq \frac{(D_o - 2)^2}{4 \cdot 150 D_o} \cdot 3500 \quad (42)$$

$$\therefore D_o \geq 4.9 \text{ cm} \quad (43)$$

따라서 필터가 차지하는 면적은

$$S - S_o = \frac{2\sqrt{3} v_{rav}}{\pi u_i} A \frac{4D_o^2}{(D_o - 2)^2} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} A \frac{D_o}{L} = 100760 D_o \text{ cm}^2 \quad (44)$$

만일 S<sub>o</sub>를 S의 20%로 가정하고 탑 직경을 5 m 이내로 한다면, 필터의 직경은 1.1 cm 보다 작아야 한다.

우리가 적당한 필터의 크기를 선정하는데 있어 위의 두 가지 조건을 동시에 만족시킬 수 없고, 또한 용기 하나로 전 가스를 처리한다는 것은 실제로 어려우므로 6개의 용기로 구성된 집진장치를 구성하

면, 적절한 필터의 직경은 4.9-6.6 cm의 범위에 존재해야 한다. 따라서 직경이 6 cm인 필터가 적당하게 된다. 또한 필터의 개수는 약 3,116개가 된다. 따라서 용기 하나에 최소 520개의 필터를 설치하면 된다. 현재 독일의 Schumacher사에서 생산하고 있는 필터 용기는 직경이 4.2 m이고 48 element가 18 group 즉 용기 하나에 864개의 필터가 설치되어 있다.

## 5. 결 론

IGCC의 집진설비에 사용될 수 있는 집진기 필터 입구 부분에 확산기가 설치되어 역세기체와 함께 주위의 기체를 동반하여 필터에 주입되는 시스템에 대한 최적화 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

동반류가 있는 집진설비에서는 동반류의 비가 크면 열충격을 완화시키고, 압축비용이 절감되므로 경제적인 효과가 크게 된다. 상온상압하에서는 노즐관의 직경이 작으면 작을수록 동반류의 비가 높게 나타났고, 확산기 목이 2-3 cm, 노즐 직경이 0.4-0.6 cm 그리고 펄스-젯 압력이 4-5 atm일 경우 가장 적절한 역세효과를 나타낼 수 있는 조건이었다. 또한 확산기의 목이 2.5 cm이고, 필터 주위의 조건이 723.15 K 그리고 20 atm이고 역세기체의 온도가 373.15 K인 고온고압의 경우는 노즐관의 직경이 약 0.4 cm, 펄스-젯 압력이 50-60 atm인 경우가 최적의 조건이었다.

## 사용기호

A : area [cm<sup>2</sup>]  
 B : space between filters [cm]  
 D<sub>n</sub> : diameter of nozzle [cm]  
 D<sub>o</sub> : external diameter of filter [cm]  
 D<sub>t</sub> : diameter of diffuser throat [cm]  
 e : energy per unit mass [erg/g]  
 f : friction factor [-]  
 g<sub>c</sub> : Newton's-law proportionality constant [cm-g/dyne-s<sup>2</sup>]  
 L : length of filter [cm]  
 L<sub>n</sub> : length of nozzle [cm]  
 L<sub>t</sub> : length of diffuser throat [cm]  
 M : mach number [-]  
 M<sub>w</sub> : molecular weight [g]  
 M : momentum of cleaning gas [g-cm/s]  
 N : number of filter [-]  
 P : pressure [cmH<sub>2</sub>O]  
 P<sub>o</sub> : pressure of cleaning gas reservoir [cmH<sub>2</sub>O]  
 R : gas-law constant [erg/g-K]  
 Re : Reynolds number [-]  
 r : radius [cm]

r<sub>H</sub> : hydraulic radius of conduit [cm]  
 T : temperature [K]  
 t : time [s]  
 u : axial velocity [cm/s]  
 u<sub>c</sub> : local sonic velocity [cm/s]  
 v<sub>r</sub> : cleaning velocity at external surface of filter [cm/s]  
 v<sub>w</sub> : cleaning velocity at internal surface of filter [cm/s]  
 W : mass flow rate [g/s]  
 x : axial distance in filter tube [cm]  
 ΔP<sub>i</sub> : pressure difference between internal and external surfaces of filter at cleaning gas inlet [cmH<sub>2</sub>O]  
 Δr : thickness of filter wall [cm]  
 γ : ratio of specific heat at constant pressure to specific heat at constant volume [-]  
 κ<sub>f</sub> : permeability of filter [cm<sup>2</sup>]  
 μ : ratio of entrainment flow to cleaning gas flow [-]  
 ρ : gas density [g/cm<sup>3</sup>]

## 하첨자

av : denotes average value  
 e : denotes environment  
 i : denotes inlet of filter at cleaning  
 n : denotes exit of nozzle  
 ni : denotes inlet of nozzle  
 o : denotes cleaning gas reservoir  
 t : denotes diffuser throat  
 ti : denotes inlet of diffuser throat

## 참고문헌

1. 최주홍, 박영철, 서양곤, 서태원: "석탄가스화 복합발전용 고온고압 집진기술 개발(III)," 한전기술연구원 보고서(1995).
2. Seo, Y. G., Choi, J. H. and Cheng, J. D.: *J. Korean Soc. Env. Eng.*, **18**, 867(1996).
3. Chung, J. D., Seo, Y. G. and Kanaoka, C.: *Advanced Powder Technology*, **9**, 39(1998).
4. Hwang, K. S. and Gong, S. Y.: *J. Korean Soc. Env. Eng.*, **19**, 1193(1997).
5. Schulz, K. and Durst, M.: *Filtration and Separation*, January/February, 25(1994).
6. McCabe, W. L., Smith, J. C. and Harriott, P.: "Unit Operations of Chemical Engineering," 5<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, New York(1993).
7. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N.: "Transport Phenomena," John Wiley, New York(1960).
8. Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E.: "The Properties of Gases and Liquids," 4<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, New York(1987).