

# 분체 이송관내 압력 조절을 위한 오리피스 주위에서의 입자 유동 및 마모 해석

조형희\* · 이재근\*\* · 박호동\*\*\* · 서태원\*\*\*\*  
(1997년 6월 18일 접수)

## Particle Laden Flows Around Orifice Plates for Pressure Control in Pulverized Coal Pipe Lines

Hyung-Hee Cho, Jae-Keun Lee, Ho-Dong Park and Tae-Won Seo

**Key Words:** Pulverized Coal(미분탄), Orifice Plate(오리피스), Pressure Control(압력제어), Particle Trajectory(입자궤적)

### Abstract

A numerical study is performed to investigate pressure drops, particle trajectories and erosion around orifice plates in pulverized coal pipe lines. Particle impaction rates change significantly with orifice shapes and Stokes numbers. At Reynolds number of  $5 \times 10^3$ , the pulverized coal flows well with streamlines and do not collide at the orifice plates at small sizes ( $\sim 20 \mu\text{m}$ ). However, the large particles (over  $70 \mu\text{m}$ ) impact on the front face of the orifice and erode the orifice surface. The pressure loss coefficients around the erode orifice are largely different from the designed original orifice.

### 기호설명

$C_D$  : 항력계수  
 $C_S$  : 미끄럼 보정계수 (slip correction factor)  
 $D$  : 이송관 내경 (= 540 mm)  
 $D_{er}$  : 입계직경  
 $d_p$  : 입자의 상응 직경  
 $H$  : 오리피스 높이  
 $k$  : 난류운동에너지  
 $r$  : 반경방향 좌표  
 $Re$  : 유동 Reynolds 수

$Re_p$  : 국소 입자 Reynolds 수  
 $(Re_p = \frac{d_p |\vec{v}_p - \vec{v}|}{\nu})$   
 $Stk$  : Stoke 수 ( $Stk = \frac{\rho_p d_p^2 VC_s}{18\mu D}$ )  
 $t$  : 시간  
 $Tu$  : 관입구 난류 강도  
 $V$  : 기준 속도  
 $\vec{V}$  : 무차원 유동속도 벡터  
 $(\vec{V} = \vec{v}/V)$   
 $\vec{V}_p$  : 무차원 입자속도 벡터  
 $(\vec{V}_p = \vec{v}_p/V)$   
 $\vec{v}$  : 유동 속도  
 $\vec{v}_p$  : 입자 속도  
 $W$  : 오리피스 두께

\* 회원, 연세대학교 기계공학과  
 \*\* 회원, 부산대학교 기계공학과  
 \*\*\* 회원, (주)한국중공업  
 \*\*\*\* 회원, 안동대학교 자동차공학과

- $X$  : 유동방향 좌표  
 $X_{equ}$  : 상용길이 (equivalent length)

## 그리스문자

- $\varepsilon$  : 난류운동에너지 소멸률  
 $\eta$  : 입자충돌계수  
 $\theta$  : 무차원 시간 ( $\theta = \frac{tV}{D}$ )  
 $\lambda$  : 분자 자유운동 거리  
 $\mu$  : 점성계수  
 $\mu_t$  : 난류점성계수  
 $\nu$  : 동점성계수  
 $\rho$  : 유체밀도  
 $\rho_p$  : 입자밀도

## 1. 서 론

미분탄을 미분기(pulverizer)에서 접선연소시스템(tangential firing System)으로 설계된 보일러의 화로바람상자(furnace windbox)까지 수송하는 미분탄 이송 시스템에서, 각각의 이송관마다 압력 강하 차이가 생기게 된다. 바람상자에서 각 분사관마다 균일한 유량과 분사속도를 갖기 원하지만, 분체 이송 시스템에서 파이프들 사이의 길이 차이나, 곡선관, 엘보(elbow) 또는 다관기(manifolder)에서 관들이 분리될 때의 압력 강하 차이에 따라 각 관마다 유량의 변화가 생긴다.<sup>(1,2)</sup> 그러므로 동일 량의 분체를 이송하기 위해서는 각 관마다 같은 크기의 압력 강하가 일어나도록 하는 것이 필요하다. 그 한 방법으로 관내에 오리피스(orifice plate)를 설치하여 압력 변화를 조정하고자 한다. 본 연구에서는 오리피스의 형상과 크기를 변화시키면서 압력 강하 정도를 계산하였다. 균일관내에 오리피스를 설치하는 경우, 유동은 그 곳으로부터 박리되고 복잡한 양상을 가지게 된다. 이송관내 오리피스나 노즐 같은 돌출부를 삼입함으로써, 공기 유동에 부유하여 이송되던 분쇄된 미분탄 입자들(평균 직경 45 $\mu\text{m}$ , 10~70 $\mu\text{m}$ )은 돌출부 표면에 충돌하게 된다. 입자가 충돌하는 정도는 돌출부의 형상, 유속, 입자의 크기, 부유 시작 위치 등에 영향받게 된다. 본 연구에서는 여러 종류의 오리피스 또는 노즐에 대하여 각기 다른 크기의 미분탄 입자들(10~150 $\mu\text{m}$ )을 상류에서 반경 방향으로 각각 다른 위치에

서 부유시켜서 그 궤적들을 추적하여(Lagrangian 방법) 충돌하는 입자의 양과 어느 위치에 가장 많이 충돌하는 지를 고찰하였다. 또한 오리피스의 재질에 따른 마모 정도를 예측하였다. 이를 통하여 주어진 조건에서 분진의 충돌을 줄일 수 있는 오리피스의 형상, 또는 주어진 오리피스 형상에서 충돌에 의한 마모를 가장 작게 할 수 있는 유속, 입자 크기의 제한 또한 재질 등의 조건을 구할 수 있다.

## 2. 수치 해석 방법 및 결과

## 2.1 압력 강하 해석

오리피스 주위에서의 압력 강하 해석은 주로 얇은 판형 오리피스(thin plate orifice)주위에 대하여 연구되어졌다. 하지만 분체 수송에 사용되어지는 오리피스는 큰 강도 및 마모에 견디게 하기 위하여 두꺼운 오리피스(thick plate orifice)로 하고 형상도 ASME standard<sup>(3)</sup>가 아닌 안정된 삼각 단면 형상을 주로 사용하고 있다. 두꺼운 오리피스 판의 경우, 오리피스 주위의 유동은 얇은 판형 오리피스의 경우와 다르다. 오리피스 형상에 따라서 전면 모서리(tip)에서 유동이 박리된 후 그 두께에 따라서 오리피스 뒷면에 재부착되기도 한다. 재부착된 유동은 곧 오리피스의 하단부에서 다시 박리되어 큰 후류 유동을 형성하게 된다. 이와 같이 두꺼운 오리피스 주위의 유동은 정체, 가속, 박리, 재부착, 후류 등을 포함하는 매우 복잡한 양상을 가진다. 본 연구에서는 유동장을 계산하는 데 있어서 수치 해석 방법으로 원통 좌표계에서 SIMPLER algorithm<sup>(4)</sup>을 사용하였고, 난류 모델로는 저레이놀즈수  $k-\varepsilon$  모델(Low-Reynolds-Number  $k-\varepsilon$  model)<sup>(5)</sup>을 사용하였다. 다음은  $k-\varepsilon$  식들과 난류 모델에 사용된 변수를 나타낸다.

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + (C_{\varepsilon 1} f_1 G - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} + E \quad (2)$$

여기서,

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

$$f_\mu = 1 - 0.95 \exp(-5 \times 10^{-5} R_t^2)$$

$$f_1 = 1.0$$

$$f_2 = 1 - 0.222 \exp(-R_t^2/36)$$

$$E = 1.44(1 - f_\mu) \left[ \frac{2\mu\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2 + 2\mu \left( \frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \right)^2 \frac{\epsilon}{k} \right]$$

$$+ \max \left[ 0.83 \frac{\epsilon^2}{k} \left( \frac{l}{C_l x_n} - 1 \right) \left( \frac{l}{C_l x_n} \right)^2, 0.0 \right]$$

유동경계 조건으로 관입구에서 완전 발달된 난류 유동(fully developed turbulence flow regime)으로 가정하여 검증된 실험 결과를 사용하였다. 수치계산에 사용된 격자수는 60×220으로 격자수 변화에 따라서 수치해석 결과의 변화가 없어지는 격자수를 택하였다. 미분탄 수송에서의 질량 혼합비(미분탄 질량/공기 질량)는 0.2~1.0으로 균일류를 형성하고 공기 유동장에 미분탄이 큰 영향을 미치지 않기 때문에, 본 연구에서는 미분탄이 존재하지 않는 상태에서 사각 및 삼각 오리피스에 대하여 고정된 폭(W=0.296D)에서 높이

(H=0.25W~0.625W)를 변화시키면서 유동장의 Reynolds수를 3×10<sup>5</sup>~9×10<sup>5</sup>까지 변화시키면서 유동장 계산을 수행하였다. 또한 분체 유동에 의하여 삼각 오리피스가 마모되는 경우, 즉 삼각 오리피스의 모서리 부분이 마모되어 없어진다는(오리피스 높이의 5~20%까지 마모) 가정에서 수치해석을 수행하였고, 입구유동 중심부에서의 난류강도가 변하는 경우(Tu=1~8%)에 대한 효과도 고찰하였다.

2.1.1 사각 및 삼각 오리피스

주어진 오리피스의 폭에 높이를 변화시키면서 높이 변화에 따른 압력 변화를 관찰하였다. Fig. 1(a)는 사각 오리피스 주위의 유동장을 보여주고 있다. 유선의 형태에는 명확히 나타나 있지는 않지만 오리피스 전면에도 이송관 벽 근처에 작은 와류가 존재한다. 오리피스 설치에 따른 관내 유동 단면적의 감소에 따라 유동은 가속되고 전면 모서리에서 박리되지만 오리피스의 두께 때문에 그 윗면에서 재부착된다. 재부착된 후 곧 오리피스의 후면 모서리에서 다시 박리되어 후면에 커다란 후류를 형성한다. 이 후류에 기인되어서 오리피스 주위에서 큰 압력강하를 얻을 수 있다. 오리피스의 높이가 높아질수록 후면에 있

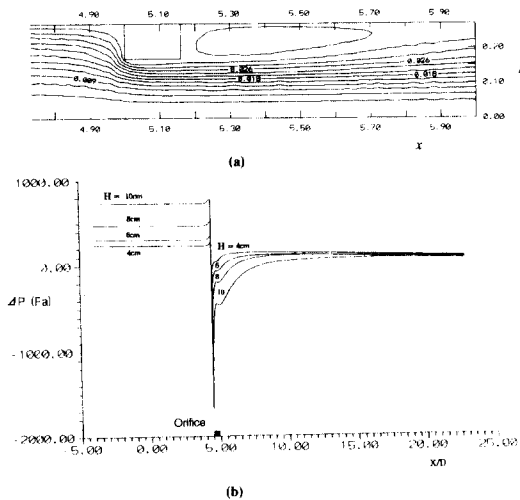


Fig. 1 Flows through rectangular orifice plate at Re = 5×10<sup>5</sup>  
 (a) Streamlines (H=10cm)  
 (b) Pressure distributions.

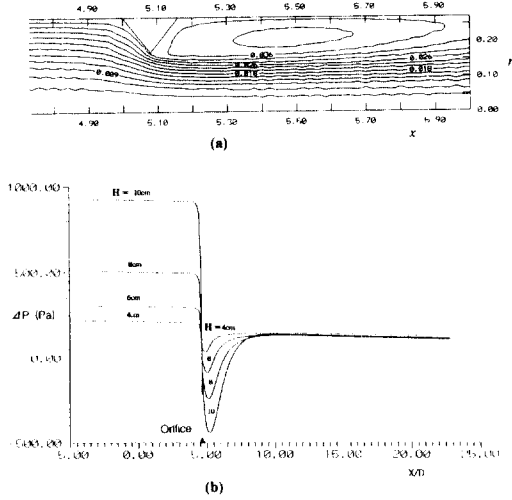


Fig. 2 Flows through triangular orifice plate at Re = 5×10<sup>5</sup>  
 (a) Streamlines (H=10cm)  
 (b) Pressure distributions.

는 후류는 더 커지게 되고 더 큰 압력강하를 예측할 수 있다. Fig. 2(a)에서 보는 것과 같이 삼각 오리피스의 경우 사각 오리피스와 다르게 단지 후면에 하나의 후류만 형성한다. 그 후류의 크기는 사각 오리피스의 경우와 같이 높이가 높아질수록 크다. 각 오리피스 주위의 압력변화는 Fig. 1(b)와 Fig. 2(b)에 나타나 있다. 압력의 기준점을 출구(대기압력)로 정하고 역으로 구하였기 때문에 입구에서의 각 압력은 다르게 나타나 있다. 오리피스의 높이가 커질수록 더 큰 압력차와 후류내의 더 큰 압력강하를 보여주고 있다. 이와 같은 경향은 삼각 오리피스 (Fig. 2(b)) 주위에서도 비슷하나 자세히 관찰하면 다른 양상을 보여주고 있다. 사각 오리피스의 경우 전면부에서 유동이 갑자기 오리피스 전면에 충돌함에 따라서 약간 증가 후 갑자기 감소하며 오리피스 중앙면에서 유동의 재부착에 의하여 다시 약간 증가한 후(작은 극대점) 후류내에서 감소하는 양상을 보여주고 있다. 이에 반하여 삼각 오리피스의 경우는 전면부에 압력증가 없이 감소하다가 사각 오리피스보다는 서서히 압력이 회복되는 양상을 보여준다.

이 결과를 이용하여 오리피스 설치에 따른 압력 강하를 관내의 압력 손실과 비교하여 관길이에 상응하는 값(equivalent length;  $X_{equ}/D$ )을 구하였다. 이 상응 길이를 계산할 때 오리피스에 의하여 혼동된 유동이 다시 안정된(fully developed)후, 즉 오리피스로부터 충분히 먼 거리에서 비교하여 구하였다. 각 경우에 있어서 오리피스의 높이를 고정하고 관내 Reynolds수를 운전 범위 내( $Re = 3 \times 10^5 \sim 9 \times 10^5$ )에서 변화시키면서 상응 길이를 계산하였는데, 그 결과는 Reynolds수(유속)에 크게 영향을 받지 않고 비슷한 상응길이 값을 얻을 수 있음을 보여주었다. Fig. 3은 고정된 유속(Reynolds수)에서 오리피스의 높이를 변화시키는 경우에 대한 결과이다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 조그마한 오리피스의 설치로 큰 압력강하(이송관 직경의 수백 배에 상응하는)를 얻을 수 있다. 상응길이( $X_{equ}/D$ )는 낮은 높이에서는 사각 오리피스의 경우 더 큰 값(더 큰 압력강하)을 가지지만 높이가 커짐에 따라 삼각 오리피스의 경우가 더 큰 값을 갖는다. 이것은 오리피스의 높이가 높은 때는 삼각 오리피스 전면의 각도가 더 커지고, 그 경사면을 따

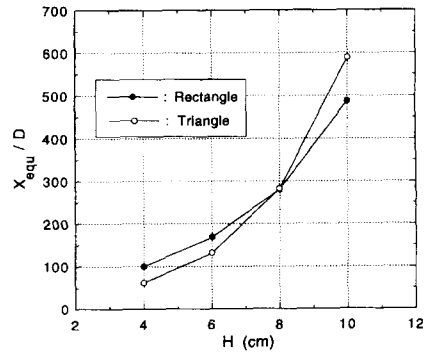


Fig. 3 Pressure drop(equivalent length) through orifice plates for  $W=16\text{cm}$  and  $Re=5 \times 10^5$ .

라 흐르는 유동이 더 적은 흐름목(vena-contracta area)을 가지므로 해서 더 큰 후류와 압력강하를 갖게된다. 이 결과로부터 주어진 높이에 따른 압력 강하(상응길이)의 관계식을 구하면 분체이송 시스템에서 각 관의 길이(압력손실)차이에 따라 오리피스를 결정할 수 있다.

### 2.1.2 모서리가 마모된 삼각 오리피스

분체 이송 시스템에서 미분탄에 의하여 오리피스의 모서리 부분이 쉽게 마모될 수 있다. 그 경우에 있어서 압력 강하의 변화를 보기 위하여 삼각 오리피스의 모서리 부분을 제거하면서 연구를 수행하였다. 10%마모된다는 것은 오리피스 높이 기준으로 끝 부분이  $0.1H$  만큼 없는 경우를 의미한다. 예상할 수 있듯이 마모되는 정도에 따라 압력 강하 정도 및 후류 크기가 변화한다. 그 값을 상응 길이로 바꾸는 경우 Fig. 4에서 보여주듯이 마모되는 양이 증가할수록 그 상응길이(압력강하)가 급격히 감소함을 알 수 있다. 이와 같이 오리피스의 마모에 따라 압력 강하되는 정도가 크게 다르기 때문에 정확하게 마모정도를 예측 또는 계측하는 것이 필요하겠다.

$H=0.625W$ 의 삼각 오리피스에서 20% 마모되었을 때의 오리피스 높이  $H=0.5W$ 로 마모 없이  $H=0.5W$ 인 오리피스 주위 유동의 경우와 비교하면 같은 높이에서 모서리 마모의 경우가 약간 더 낮은 압력 강하 정도를 보여주고 있다. 모서리 마모의 경우도 압력 강하 정도는 앞에서와 같이 주어진 범위 내에서 Reynolds수(유속)에 거의 변

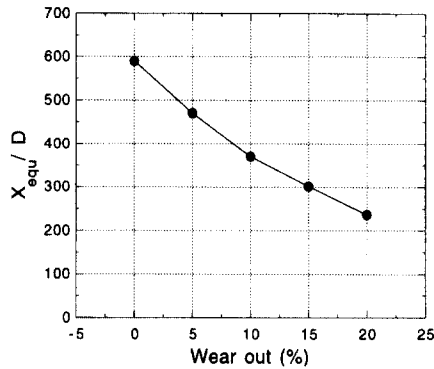


Fig. 4 Effects of orifice tip wear out for  $H=10\text{cm}$  and  $Re = 5 \times 10^5$ .

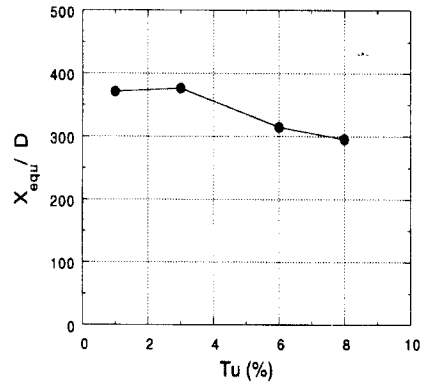


Fig. 5 Effects of inlet turbulent intensity for  $Re = 5 \times 10^5$ ,  $H=10\text{cm}$  and 10% wear out.

화를 받지 않음을 보여 주었다.

### 2.1.3 입구 난류강도 효과

이송관로 유입되는 유동의 난류 강도가 오리피스 주위의 압력강하에 미치는 영향을 보기 위해서 원형관 중심부에서의 난류강도를 1~8% 까지 변화시켜 보았다. 이 경우 오리피스는 삼각형과 끝이 10%마모된 형상을 선택하였다. 오리피스에 의해서 유동장이 크게 혼동되고 난류강도는 크게 증가한다. 그 효과는 입구유동의 난류강도가 높을수록 더 크게 나타난다. Fig. 5는 난류강도 변화에 따른 압력강하(상용길이)의 정도를 나타내 주고 있다. 난류강도가 3%보다 작은 경우는 같은 값을 가지지만 6%일 때는 상용길이가 약 18%정도 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 난류강도가 높은 경우 유동이 더 잘 혼동되기 때문에 압력 강하량이 감소하는 것으로 생각된다. 이 결과로부터 오리피스 설치에 따른 압력강하정도를 예측하기 위해서는 먼저 관내 유동장의 난류강도를 구하는 것이 필요하겠다.

### 2.2 오리피스 주위의 입자 궤도 추적 및 충돌 해석

이송관내에 분쇄된 미분탄(평균 직경  $45\mu\text{m}$ ,  $10\sim 70\mu\text{m}$ )을 사용하는 경우 압력강하량을 조정하기 위하여 설치한 오리피스면에 충돌하게 된다. 초기에는 최적의 오리피스 형상으로 사용되지만, 미분탄 충돌에 의해서 오리피스 표면이 마모되어 그 형상이 변하는 경우, 앞절에서 보였듯이 그에

따른 압력강하 또한 크게 변화하게 된다.

본 연구에서는 각각 다른 크기의 미분탄( $10\sim 150\mu\text{m}$ )을 상류에서 반경 방향으로 각각 다른 위치에서 부유 시켜서 그 궤적들을 추적하여 (Lagrangian 방법) 오리피스에 어느 정도 충돌하는지 또는 어느 위치에 가장 많이 충돌하는 지를 고찰하였다. 유동장에서 입자는 유체 저항력, 중력, 관성력, 브라운 운동 등의 영향을 고려한 입자의 거동 방정식을 사용하였다.<sup>(6, 8)</sup> 입자의 거동 방정식은 다음과 같다.

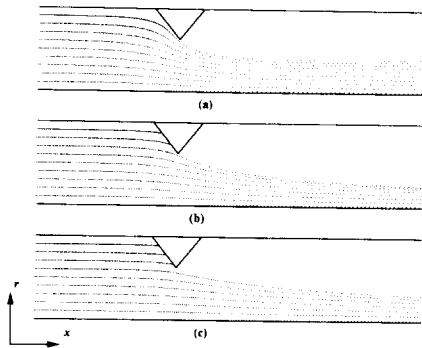
$$\frac{d\vec{V}_p}{dt} = C_D \frac{Re_p}{24Stk} (\vec{V}_p - \vec{V}) \quad (3)$$

여기서 항력계수  $C_D$ 와 slip correction factor  $C_S$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} C_D &= \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 0.1 \\ &= \frac{24}{Re_p} (1 + 0.0916 Re_p) \quad 0.1 \leq Re_p < 5 \\ &= \frac{24}{Re_p} (1 + 0.158 Re_p^{2/3}) \quad 5 \leq Re_p < 1000 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_S &= 1 + \frac{\lambda}{d_p} \cdot \\ &(2.514 + 0.8 \exp(-0.55 \frac{d_p}{\lambda})) \end{aligned} \quad (5)$$

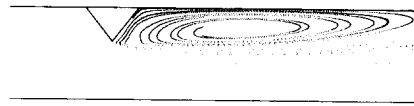
Fig. 6은 삼각 오리피스 주위에서 입자의 궤적



**Fig. 6** Particle trajectories around triangular orifice plate  
 (a) Stk=0.181 (20 $\mu$ m) (b) Stk=2.2 (70 $\mu$ m)  
 (c) Stk=10.1 (150 $\mu$ m).

을 보여주고 있다. 이에 대한 유동 조건은 앞절에서 구한 것으로 오리피스 높이는  $H=0.625W$  이고  $Re=5 \times 10^5$ 이다. 입구에서 입자의 부유 위치는 관중심에서 시작하여 0.1반경씩 증가하면서 궤적을 구하였다. Fig. 6(a)에서 보여주듯이 미세 입자(20 $\mu$ m, Stk=0.181)의 경우 거의 유선을 따라가므로 썩 오리피스면에 충돌하지 않고 있다. 하지만 입자의 크기가 커짐에 따라 Fig. 6(b)(70 $\mu$ m, Stk=2.2)에서 보여주듯이 입자가 큰 관성력을 가짐으로 유선에서 분리되어 오리피스면에 충돌하게 된다. 또 다른 특징은 입자의 크기가 70 $\mu$ m 인 경우 오리피스 후반부에서 입자들이 가장 근접하게 모이는 것을 볼 수 있다. 이것은 입자가 작은 경우(20 $\mu$ m)는 유선을 따라 가기 때문에 오리피스 주위에 모인 후 계속해서 일정한 영역에서 부유해가지만, 70 $\mu$ m의 경우는 입자의 관성에 의하여 입자들이 오리피스 주위에서 모이기 시작할 방향으로 계속해서 모여 관중심부에 주로 부유하게 된다. 이 결과로부터 70 $\mu$ m정도의 입자들이 오리피스 주위에서 가장 큰 궤적의 변화를 가져와 압력 손실이 공기 유동만의 경우와 크게 차이날 가능성이 있다. 더 큰 입자(150 $\mu$ m)의 경우는 Fig. 6(c)에서 보여주듯이 입자의 큰 관성력에 의하여 오리피스 주위에서 크게 휘지 않기 때문에 전체적으로 약간 중심부로 모인 상태에서 부유하게 된다. 이로 인해서 오리피스 전면부를 크게

전면에서 부유된 입자는 정상적으로 운전될 때



**Fig. 7** Particle trajectories in wake for 20 $\mu$ m and  $Re = 5 \times 10^5$ .

는 오리피스 후면에 전혀 유입하지 않는다. 하지만 난류 유동 및 비정상적으로 후류 내부로 유입되는 경우의 입자 거동을 보기 위해서 입자를 후류내에 부유시켜 보았고, 그 결과는 Fig. 7에서 보여주고 있다. Fig. 7에서 보여주듯이 작은 입자(20 $\mu$ m)의 경우는 후류 내부에서 오랫동안 회전하면서 부유하다가 후류 밖으로 빠져 나와 방출되었다. 이 경우는 입자가 관 벽면이나 오리피스 후면에 거의 충돌하지 않았다. 70 $\mu$ m 입자의 경우 부유 위치에 따라서 다른 양상을 보여주고 있는데 오리피스 후면에 가까운 곳에서 부유된 입자들은 바로 후류 밖으로 방출되었다. 하지만 후류중심부에 있던 입자들 중 일부는 순환하다가 후반부의 이송관 벽에 충돌하였다. 이 경우는 오리피스를 설치함에 따라서 하류 부근에 약간의 관 손상이 예측된다. 아주 큰 입자(150 $\mu$ m)의 경우는 순환하지 않고 후류 밖으로 방출되지만, 일부의 입자는 오리피스 후면에 충돌하였다. 이 경우 충돌 속도가 작기 때문에 마모되는 양은 전면부에 비해서 미약할 것이다. 대부분 입자들이 쉽게 후류에서 탈출하는 것을 알 수 있다.

지금까지는 이송관내 입자를 부유시켜 입자의 궤적을 추적함으로써 입자의 크기 및 부유 위치에 따른 오리피스 및 관의 마모 위치를 알아보았다. 대부분의 경우 오리피스는 상류에서 오는 입자들에 의하여 마모됨을 알 수 있다. 여기서 부유입자(coal particle)가 입자의 크기 및 관 유동 속도에 따라서 얼마만큼 오리피스 전면에 충돌하는지 정량적으로 알아보기 위해서 다음과 같이 충돌계수를 정의하였다. 관내 미분탄이 균일하게 분포한다는 가정 하에서 입자충돌계수는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\text{오리피스면에 충돌한 입자의 양}}{\text{전체 이송관내로 유입된 입자의 양}}$$

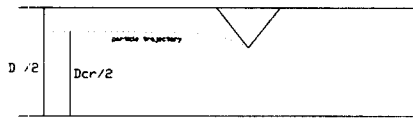


Fig. 8 Critical diameter for particle impaction.

Fig. 8에서 보여주듯이 전체 유입 입자중 반경이  $D_{cr}/2$ 보다 밖에서 부유하던 입자들은 오리피스에 충돌하게 된다. 이때 반경이  $D_{cr}/2$ 에서 부유된 입자는 오리피스의 끝에 충돌하는 임계반경을 나타낸다. 이 경우 입자충돌계수는 다음과 같다.

$$\eta = 1 - (D_{cr}/D)^2 \quad (5)$$

여기서  $\eta=0$ 은 관내의 입자가 하나도 오리피스에 충돌하지 않는 것을 의미한다.  $\eta$  값이 클수록 많은 입자가 충돌하여 오리피스면을 마모시킬 것이다.

Fig. 9는 삼각 오리피스에서 Reynolds수를 변화시키면서 미분탄의 크기에 따른 입자충돌계수이다. 예측할 수 있듯이 입자의 크기(Stokes수)가 커질수록 충돌되는 입자의 양이 증가된다. 여기서 가로축을 Stokes수로 사용하는 경우 속도(Reynolds수)에 관계없이 한 곡선 위에 오는 것

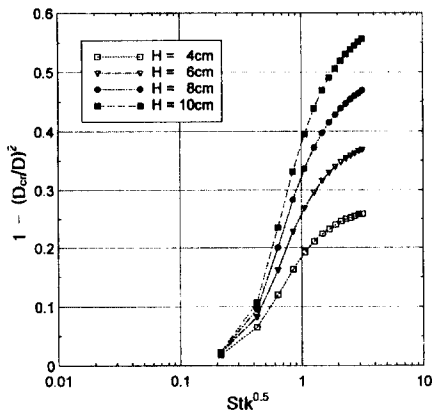


Fig. 9 Particle impaction efficiency on triangular orifice surface.

을 보여주고 있다. 여기서 보면 입자의 Stokes수(입자의 크기)가 증가할 때 급격히 입자충돌계수가 증가하다가 어느 이상에서는 일정한 값(점근값)에 근접함을 알 수 있다. 이 경향은 오리피스의 높이가 작은 경우도 비슷하다. Fig. 10은 고정된 Reynolds수( $5 \times 10^5$ )에서 오리피스 높이 변화에 따른 입자충돌계수를 보여주고 있다. 예측할 수 있듯이 충돌계수값은 오리피스의 두께가 작을수록 급격히 감소한다. 여기서 높이 10cm인 경우 입자충돌계수가 55%에 근접하므로써 실제 오리피스 단면적비 0.6에 근접함을 알 수 있다. 이것은 큰 입자의 경우 큰 관성력에 의하여 거의 직선운동을 하고 있음을 나타낸다.

삼각 오리피스 형상과 사각 오리피스 형상에 대한 입자 충돌 계수 변화는 Fig. 11에 나타나 있다. 전체적으로 보면 낮은 Stokes수(작은 입자)에서는 삼각 오리피스의 경우가 훨씬 낮은 입자충돌계수를 보여주고 있다. 이것은 삼각 오리피스의 경우가 훨씬 완만하게 오리피스 주위에서 유선의 곡률 변화에 기인하는 것으로 사료된다. 이 현상을 이용하여 삼각 오리피스 대신에 유선형 노즐(streamlined nozzle)을 설치하여 계산하는 경우 입자충돌계수는 더 감소하는 결과를 얻었다. 하지만 큰 입자(높은 Stokes수)의 경우는 두 경우 모두 비슷한 입자충돌계수 값을 가진다. 이것은 입자의 큰 관성력 때문에 오리피스 형상보다는 오리피스의 유동 단면적비에 더 크게 영향받는 것을 보여 주고 있다.

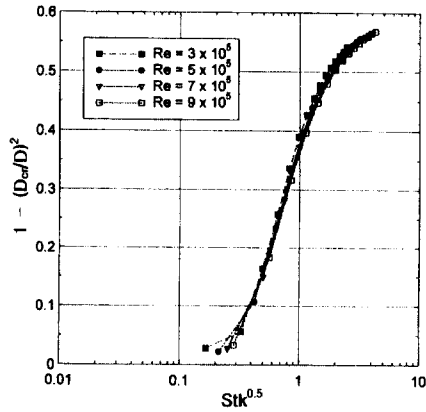


Fig. 10 Particle impaction efficiency for different orifice heights.

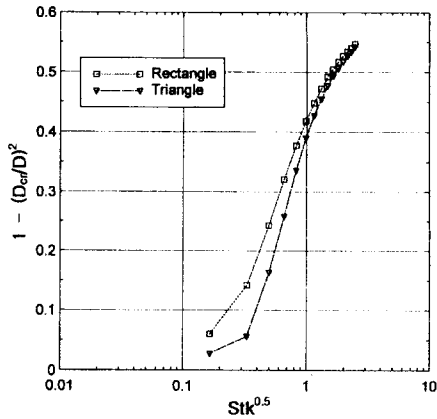


Fig. 11 Comparison of particle impaction efficiency for different orifice shapes.

2.3 오리피스 표면 마모특성 해석

오리피스는 충돌 입자의 입사각 및 입사속도 변화에 따라 재질마다 다른 표면 마모 특성을 갖는다. 그 효과를 고찰하기 위하여 일반 합금강과 표면을 보호하기 위하여 사용되는 코팅물질 (rhodium platinum aluminide)에 대하여 마모 특성을 알아보았다.

수치해석에 사용한 재질의 마모특성을 살펴보면, Fig. 12에서 보여주듯이 합금강의 경우가 코팅재질에 비해서 상대적으로 큰 마모율을 나타내

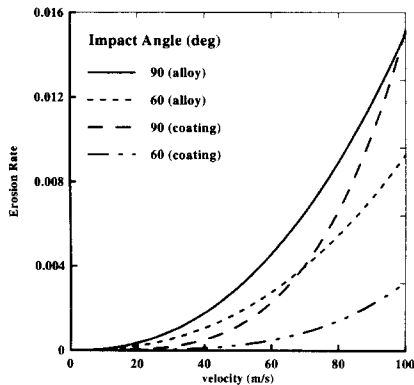


Fig. 12 Erosion rate about two materials as the impact angle.

는 것을 알 수 있으며, 동일 충돌각의 경우 충돌 속도가 빨라질수록 마모율이 코팅재에 비해서 상당히 증가하게 됨을 알 수 있다. 이러한 마모 특성을 오리피스 주위에서의 입자 유동에 적용시킬 경우 Fig. 13과 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 13은 삼각 오리피스의 높이  $H=10\text{cm}$ , 입자의 크기  $d_p=70\mu\text{m}$ 인 경우에 대해서 각 재질에 따른 오리피스 전면(front side)에서 위치별 마모율을 나타내고 있다. Fig. 13에서 볼 수 있는 것처럼 오리피스 중심부가 상대적으로 높은 마모율을 나타내고 있으며, 또한 Reynolds수가 증가함에 따라서 마모율도 크게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 두 가지 물질을 비교해 보면, 합금강의 경우가 코팅재에 비해서 상대적으로 매우 높은 마모율을 나타내는 것을 알 수 있는데, 이것으로써 오리피스를 적절하게 코팅하는 경우 마모율을 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 전체 마모량을 예측하기 위하여 오리피스 전면에서의 충돌밀도를 구하였다. Fig. 14는 오리피스 높이  $H=10\text{cm}$ ,  $Re=5 \times 10^5$ ,  $d_p=70\mu\text{m}$ 인 경우의 충돌밀도를 나타내는데, 이것은 오리피스 전면의 각 위치에서의 충돌 확률을 나타내고 있다. 충돌밀도는 오리피스 시작부분에서는 상당히 높은 것을 알 수 있으며, 오리피스 중심부에서는 그 값이 상대적으로 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 유선을 이탈한 입자가 오리피스 시작부분에서는 상대적으로 많이 충돌하며, 오리피스 중심부에서는 입자들이 유선을 따르는 유동 양상을 나타내기 때문에 상대적으로 충돌 확률이 낮은 것을 알 수 있다. Fig. 15는

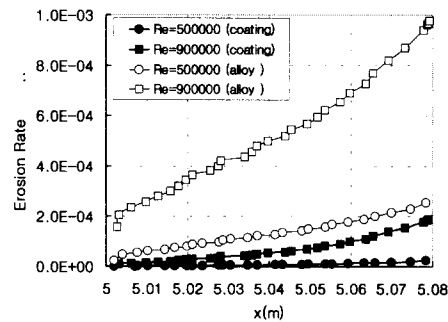


Fig. 13 Erosion rate of orifice about two materials as the Reynolds number.



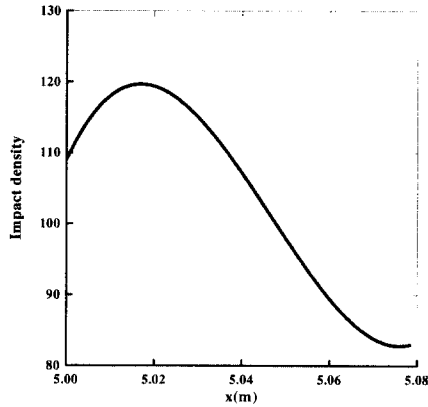


Fig. 14 Impact density on the triangular orifice surface  
(  $H=10\text{cm}$ ,  $Re=5 \times 10^5$ ,  $d_p=70\mu\text{m}$  ).

오리피스 높이  $H=10\text{cm}$ ,  $Re=5 \times 10^5$ ,  $d_p=70\mu\text{m}$ 인 경우 두 재질에 대한 오리피스 전면(front surface)에서 전체 마모량을 나타내고 있다. 마모량은 합금강의 경우가 코팅재에 비해서 전체적으로 상당히 큰 것을 알 수 있으며, 오리피스 중심부로 갈수록 더욱 많은 마모량을 나타내고 있다. 그러므로 사용시간 경과에 따라 앞절(2.1.2)에서 고찰한 오리피스 중심 모서리가 마모된 경우에 대한 계산 결과를 오리피스 설계시 고려할 필요가 있다. 오리피스 표면을 코팅시키는 경우 합금에 비해서 상당히 낮은 마모량 분포(약 1/15로 감소)를 나타내고 있고, 오리피스에의 적절한 코팅은 오리피스 수명을 크게 연장시킬 수 있다.

### 3. 결론

위의 결과로부터 분체 이송 시스템에서 압력제어 목적으로 오리피스를 설치하는 경우 유동 및 입자거동 수치해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주어진 오리피스 높이에서 이송관내 유동의 속도 변화에 따라 압력강하(상용길이)되는 정도는 크게 변하지 않는다. 오리피스 높이가 변화에 따라 압력강하(상용길이) 정도가 크게 변하는데, 높은 오리피스( $H \geq 0.5W$ )에서는 삼각 오리피스의 경우가 사각 오리피스보다 더 큰 압력강하를 얻을 수 있다.

(2) 오리피스 마모에 따라 압력강하 정도가 크게 변하므로, 정확한 마모정도의 예측 및 계측이

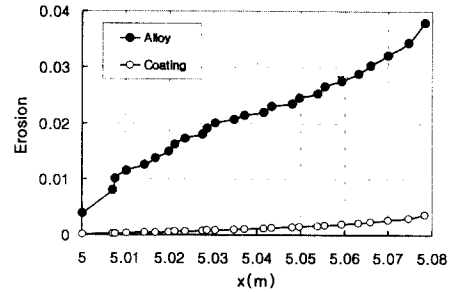


Fig. 15 Erosion on the triangular orifice surface about two metals  
(  $H=10\text{cm}$ ,  $Re=5 \times 10^5$ ,  $d_p=70\mu\text{m}$  ).

필요하다. 또한, 이송관 입구 유동의 난류강도에 따라 압력강하 정도가 20%정도 다르므로 관입구 유동의 난류강도 측정이 필요하다.

(3) 오리피스의 형태에 무관하게 삼각 및 사각 오리피스 모두 비슷한 입자 궤적을 보여주었다. 작은 미분탄( $\sim 20\mu\text{m}$ )의 경우는 유선을 잘 따라가기 때문에 오리피스면에 거의 충돌하지 않는다. 중간 입자 크기( $\sim 70\mu\text{m}$ )의 경우 입자의 관성력 때문에 많은 양의 입자가 오리피스면에 충돌하였다. 부유입자가 전체적으로 가장 크게 중심 부분으로 모이는 현상을 보여주어서, 입자에 따른 압력 손실 변화가 클 것으로 사료된다. 큰 입자( $\sim 150\mu\text{m}$ )의 경우 입자의 큰 관성력에 의하여 유선으로부터 쉽게 분리되어(거의 직선운동) 오리피스 벽면을 크게 손상시킬 것이다. 입자충돌계수는 입자 크기에 따라서 급격하게 증가하였고, 오리피스 높이  $H=0.625W$ 인 경우 오리피스 유로 단면적비 0.6에 근접한 약 55%에 도달하였다.

(4) 오리피스 또는 노즐의 단면 형상에 따라서 미분탄 입자의 입자충돌계수값은 크게 달라지므로, 오리피스를 유선형에 가깝게 설계할수록 부유입자에 의한 오리피스 표면의 마모를 어느 정도 줄일 수 있을 것이다.

(5) 오리피스 표면을 코팅하는 경우 마모량이 크게 감소하는 효과를 얻을 수 있으므로 적절한 코팅재질의 선택이 중요하다.

### 참고문헌

- (1) Miller, D. S., 1990, *Internal Flow Systems: design and performance prediction*, Second Edition, Gulf Pub. Co.

- (2) Benedict, R. P., 1980, *Fundamental of Pipe Flow*, John Willey & Sons.
- (3) ASME, 1961, *Flow Meter Computation Handbook*, ASME, New York.
- (4) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Pub. Corp..
- (5) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1994, "An Improved Low-Re-Number  $k-\epsilon$  Turbulence Model for Recirculating Flows", *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1495-1509.
- (6) Friedlander, S. K., 1977, *Smoke, Dust and Haze*, Wiley-Interscience, New York.
- (7) Fuchs, N. A., 1978, *Fundamentals of Aerosol Science*, D. T. Shaw, Ed..
- (8) Reist, Parker C., 1993, *Aerosol Science and Technology*, McGraw-Hill.