

# 유동관에 형성된 Cavity로부터의 입자확산현상 연구

## A Study of Particle Diffusion from a Cavity in Flow Tube

이 진 원\*, 구 재 학\*, 김 현 영\*\*,  
J. W. Lee, J. H. Goo, H. Y. Kim,

**Key words:** Cavity(공동), Particle(입자), Diffusion(확산)

### Abstract

Particle contamination into and out of a cavity-cylindrical cavities with aspect ratios(width/depth) less than, equal to 1 and larger than 1, and also three dianensional T's attached to a cylindrical flow tube was studied numerically, using a finite difference method. In the process of unsteady particle diffusion, the particles contained in a concentration boundary layer near the tube wall plays an important role in the initial stage, after which a quasi-steady concentration profile is developed inside the cavity, resulting in an exponential change of concentration with time. Average concentration and its rate of change are observed to be closely correlated by a power law function in terms of Reynolds number and the logarithm of Schmidt number. Effects of the three parameters-Re, Sc, and aspect ratio-are analysed and well explained.

### 기 호 설 명

$A$  : 면적  
 $AR$  : 종횡비  
 $c$  : 입자농도  
 $Cc$  : Cunningham slip correction factor  
 $D$  : 입자 확산계수  
 $d$  : 관 직경  
 $d_p$  : 입자 직경  
 $h$  : 공동(cavity)의 높이  
 $h_w/h_o$  : 평균전달계수  
 $k$  : 볼츠만 상수  
 $p$  : 압력  
 $t$  : 시간  
 $u, v$  : 속도 성분  
 $w$  : 공동의 폭  
 $x, y$  : 좌표축  
 $Re$  : Reynolds수  
 $Sc$  : Schmidt수(= $\mu/\rho D$ )  
 $\rho$  : 공기 밀도

$\mu$  : 공기의 동점성 계수  
 $s$  : 평균 자유행로

상첨자  
 $*$  : 무차원 변수

하첨자  
 in : 관 입구의 상태  
 out : 관 출구에서의 상태  
 c : 공동(cavity) 내부의 상태

## 1. 서 론

반도체를 포함한 극미세가공 분야에서 가공 최소 크기는 계속 감소하여 0.1  $\mu\text{m}$  이하로 내려가 있으며, 따라서 작업수율 유지에 필요한 제어대상 오염 물질의 크기도 이와 함께 같은 범위로 내려와 있다.<sup>(1)</sup> 동시에 오염원의 상대적 기여도도 예전의 작업자나 작업실내 발생오염으로부터 점차 공정기체나 가공장치에 의해 발생하는 입자 오염으로 증가하고 있으며, 1995년 경에는 이에 의한 입자 오염

\*포항공과대학 기계공학과  
 \*\*금성사 생활시스템 연구소

이 전체 입자 오염을 중 90% 정도가 될 것으로 예상된다.<sup>(2)</sup> 공정기체는 필터를 거쳐 공급장치에 의해 작업장으로 공급되나, 외부에서 가해지는 갑작스런 충격이나 밸브조작 등에 의해 프로세스 장비 내부에 순간적으로 많은 입자가 생기게 되면 이 입자들은 장치내의 밸브나 분지관등에 생성된 유동의 재순환 영역속에 체류하면서 시간에 따라 확산, 침전 등을 한다. 비교적 크기가 큰 입자는 중력에 의해 침전되거나 관성력에 의해서 관내에 부딪혀 쉽게 제거되지만 크기가 작은 입자들은 유선을 따라 움직이며 확산 작용에 의해 재순환 영역 밖으로 나오게 되고 따라서 지속적인 오염의 원인을 제공한다. 입자는 유체내에서 Brownian운동에 의한 확산 운동과 관성력에 의한 관성 운동을 하며 입자의 크기에 따라 주된 운동이 결정된다. 보통 공기역학적 직경(aerodynamic diameter)이  $0.1 \mu\text{m}$  이하일 때는 확산운동이 주된 운동이 되며  $1 \mu\text{m}$  이상일 때는 관성 운동이 주된 운동이 된다. 그리고  $0.1 \mu\text{m}$ 부터  $1 \mu\text{m}$  정도의 지름을 가진 입자는 두가지의 효과가 공존한다.<sup>(3)</sup> 본 논문에서는 이와 같이 유동관에 형성된 공동(cavity)으로 부터의 입자 재확산 오염현상에 대한 1차적 연구로서  $0.1 \mu\text{m}$  이하의 입자를 대상으로 하여 층류유동중의 Brownian확산을 고려한 해석을 시도하였다. 이는 3차원 정상 유동중의 비정상 농도변화 해석문제로서 입자의 관성력을 무시하면 일반적인 대류열전달 방정식과 같은 형태의 식으로 되지만, 지금까지 공동이 있는 형상에서의 유동과 열전달에 관한 연구들에서는<sup>(4)-(6)</sup> 대개 2차원이나 준정상상태를 대상으로 하고 특히 벽면과의 전달현상에 관심을 둔 반면, 본 연구에서는 공동내의 유동 및 입자농도가 관의 주유동과 연관되어 있고 관 입구에서의 비정상전달양을 목표로 하고 있는 점이 다르다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 해석 모델

해석모델은 직선형 원관의 측면에 공동이 형성되어 있는 구조로서, 관의 이음새나 연결부품등을 고려한 2차원적 축대칭 공동과 밸브등을 고려한 3차원 T의 두 종류를 대상으로 하였다. 먼저 2차원 모델에서는 축대칭을 택하고 이를 다시 광폭공동(wide cavity)과 협폭공동(narrow cavity)으로 나누어, 광폭에서는 공동의 깊이(또는 높이)를 관 반

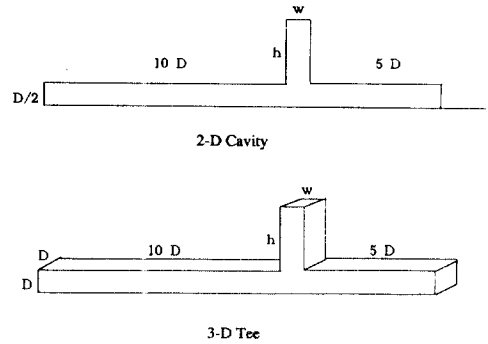


Fig. 1 Schematic of the model for analysis

경과 같게하고 중횡비(폭/깊이)를 각각 1, 2, 4로 변화하였으며, 협폭의 경우에는 공동의 깊이를 직경과 같게 하고 중횡비를 1, 1/2, 1/4로 하였다. 3차원 모델로는 해석의 편의를 위하여 정사각 단면의 분지관을 택하고, 중횡비는 공동의 깊이를 변화시켜 각각 1, 1/2, 1/4로 하였다. 어느 경우에도 관 입구로 부터 공동 시작점까지는 Fig. 1과 같이 관 직경의 10배, 그리고 공동 끝에서 관 출구까지는 관 직경의 5배로 하였다.

### 2.2 지배 방정식

관내의 공기유동은 정상 상태의 층류유동으로 가정할 수 있으므로, 다음과 같은 비압축성 유동에 대한 연속 방정식과 운동량 방정식이 기본식이 된다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2)$$

공기역학적 직경이  $0.1 \mu\text{m}$  이하인 입자의 경우 입자의 중력과 관성력을 무시할 수 있고 따라서 입자의 속도는 그 위치에서의 유체의 속도와 같으므로, 비정상상태의 입자농도방정식은 Brownian운동에 의한 확산만을 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = D \nabla^2 c \quad (3)$$

여기서,  $c$ 는 입자의 농도이고  $D$ 는 입자의 확산계수이다. 확산계수는 입자의 크기에 따라 다른 값을 가지며 다음의 Stokes-Einstein식으로 나타내어진다.

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (4)$$

$C_c$ 는 Cunnighan slip correction factor이며 다음의 실험식을 사용하였다.<sup>(3)</sup>

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[ 2.514 + 0.800 \exp(-0.55 \frac{d_p}{\lambda}) \right] \quad (5)$$

위의 식 (1)~(3)을 관 직경  $d$ 와 관내 평균유속  $U$  그리고 관입구에서의 농도  $c_m$ 으로 무차원화하면(시간은  $d/U$ 로 무차원화 함) 다음의 식이 도출된다.

$$\nabla^* \tilde{v}^* = 0 \quad (6)$$

$$(\tilde{v}^* \cdot \nabla^*) \tilde{v}^* = -\nabla^* p^* + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} \tilde{v}^* \quad (7)$$

$$\frac{Dc^*}{Dt^*} = \frac{1}{Re \cdot Sc} \nabla^{*2} c^* \quad (8)$$

이상의 세 식이 본 해석의 기본 방정식이며, 따라서 속도와 농도분포의 시간변화에 대한 해는 모델의 기하학적 변수와  $Re$ ,  $Sc$  및  $t^*$ 의 함수로 표현된다.

### 2.3 초기 조건 및 경계조건

입자 오염에 의하여 농도는 비정상변화상태에 있지만 유동은 정상상태를 유지한다고 가정하여도 무방하므로 유동의 경계조건은 다음과 같이 부가하였다.

- 관 입구 : 완전 발달 유동
- 관 출구 : Neumann조건
- 벽면 : no slip조건

입자농도에 있어서는 관 입구에서 오염입자가 유입됨으로 인한 공동의 오염과정과, 공동의 오염이 정상상태에 도달한 후에 관 입구에서 다시 청정된 공기가 유입될 때 공동의 청정화 과정을 해석하고자 하는 것이므로, 입자농도 해석을 위한 경계조건들은 다음과 같이 쓸 수 있다.

- 관 입구 :  $c^* = 1$ ; 오염과정  
 $c^* = 0$ ; 청정과정
- 관 출구 : Neumann조건
- 벽면 :  $c^* = 0$

### 2.4 수치해석

본 계산은 2차원의 경우 기존의 EL2D 프로그램을 이용하였고<sup>(7)</sup> 3차원 계산은 EL2D 프로그램을 바탕으로 3차원 계산이 가능하도록 수정된 프로그램

으로써 수행하였다. 엇갈림 격자(staggered grid)를 사용하여 각 격자점은 제어체적의 중심에 위치하며, 대류항과 확산항은 hybrid-scheme을 써서 차분화하였고 시간에 대하여는 전방차분화(forward-differencing)하였다. 이산화식의 수행은 선순법을 이용하여 계산하였으며  $x$ 방향,  $y$ 방향,  $z$ 방향으로 반복적으로 수행하였고, 값의 발산을 막기 위하여 이완계수(relaxation factor)를 도입하였다. 압력장과 속도장의 계산에는 잘 알려진 SIMPLER 알고리즘을 이용하였으며<sup>(7)</sup> 유동 방정식에서 수렴의 평가는 각 제어체적의 속도 수정의 차이를 이용하여 하였다. 즉, 연속방정식을 만족시키기 위한 질량생성의 값으로서 수렴의 평가를 하였다. 수렴의 정도는 2차원 계산에서는 각 제어체적에서의 질량생성의 값중에서 가장 큰 값이  $10^{-6}$  이하일 때 수렴된 것으로 간주하였으며, 3차원의 경우는  $10^{-3}$  이하에서 각 격자면에서의 속도의 변화가 거의 없을 때 수렴된 것으로 간주하였다.

농도방정식에서 수렴의 평가는, 반복계산간의 농도값의 상대변화량을 계산하여 모든 격자점(node)에서 변화량이  $10^{-8}$  이하가 되었을 때 수렴된 것으로 간주하였다.

계산격자는 벽 근처에서 조밀하도록 형성된 직선형의 비균일 격자를 사용하였다. 2차원 축대칭 문제에서, 종횡비가 1, 2, 4인 광폭공동의 경우 관내의 격자의 개수는 각각  $40 \times 18$ ,  $50 \times 18$ ,  $60 \times 18$ 이고 공동안의 격자의 개수는 각각  $10 \times 10$ ,  $20 \times 10$ ,  $30 \times 10$ 이며, 종횡비가 1, 1/2, 1/4인 협폭공동의 경우 관내격자의 수는 각각  $40 \times 18$ ,  $40 \times 28$ ,  $40 \times 38$ 이고 공동안의 격자개수는  $10 \times 10$ ,  $10 \times 20$ ,  $10 \times 30$ 이다. 3차원 T자형 사각 단면관에 대하여는 종횡비는 1, 1/2, 1/4에 대해 관내 격자의 개수는  $30 \times 20 \times 10$ ,  $30 \times 30 \times 10$ ,  $30 \times 40 \times 10$ 이며 공동안의 격자개수는  $10 \times 10 \times 10$ ,  $10 \times 20 \times 10$ ,  $10 \times 30 \times 10$ 이다.

계산은 입자가 유동장을 교란하지 않는다고 가정하여 유동장을 먼저 계산한 다음 이 유동장에서 입자농도 방정식을 계산한다. 본 프로그램은 전체 영역을 모두 계산 영역으로 간주하도록 프로그래밍되어 있으므로, 일부의 제어체적들은 매우 큰 확산계수를 ( $\mu$ ,  $D$ ) 적용함으로써<sup>(7)</sup> 비활성화시킨다. 비정상 상태의 입자농도 방정식 계산에서는 각 시간 단위마다 5번의 반복 수행만 거치도록 하였다. 한 시간 단위에서의 계산에서 반복 과정은 바로 전 반복

수행의 값으로 수행하였으며, 이때 농도 방정식이 선형방정식이므로 5번의 반복수행으로도 충분히 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 해석결과 및 고찰

중횡비( $AR=w/h$ )가 1, 2, 4인 광폭공동을 가지는 2차원 축대칭 원관과 중횡비가 1, 1/2, 1/4인 협폭공동이 있는 2차원 축대칭 원관, 그리고 3차원 T자형 사각단면관에 대하여, 관 입구에서 일정 농도의 입자를 유입시켰을 경우의 공동내 유동과 정상상태농도 분포, 그리고 정상상태 도달 후 관 입구의 입자농도를 0으로 하였을 때 시간에 따른 공동내의 입자농도 변화와 관의 출구에서의 평균 입자유속(flux)의 변화율을 구하였다. 이때 변수로서  $Re$ 는 200, 1000, 2000으로 변화시켰으며,  $Sc$ 는 공기중에 부유된 지름 0.001, 0.01, 0.1  $\mu\text{m}$ 의 입자를 대상으로 하여 2.92,  $2.87 \times 10^2$ ,  $2.22 \times 10^4$ 으로 변화시켰다. 한편 본 연구에서 사용된 프로그램과 격자계의 타당성을 검증하기 위하여 공동유동(cavity flow)의 유동장 및 단순관내 유동중의 입자농도 분포에 관한 기존 문헌들<sup>(8),(9)</sup>과의 비교 결과 매우 우수하게 일치함을 확인하였다.

#### 3.1 공동 내부의 유동장

관과 공동내부의 유동장은 Fig. 2와 같이, 관 입구에서의 완전발달유동을 가정하였으므로 입구측 관 내의 유동은 공동 입구부까지는 거의 완전 발달된 상태를 유지하고 있고, 공동부와 만나는 점에서부터 관내 유동이 변화되어 공동 하류부를 제외하고는 매우 완만한 변화를 보인다. 공동내 유동장의 공통된 특성은 우선 계의 기하학적 형상(중횡비 1/4, 1/2, 1, 2, 4의 2차원 공동 및 중횡비 1/4, 1/2, 1의 3차원 T자형관)과  $Re(200 \sim 2000)$ 의 변화에 무관하게 공동내의 유동이 하나의 커다란 유동셀(cell)로 지배되고 있는 점이다. 광폭 공동의 경우에는 유동이 공동 내부 전체에 걸쳐 상당한 속도 크기를 보여주고 있으나, 협폭의 경우에는 깊이가 폭의 1.5배 이상인 곳의 속도가 매우 낮아서 거의 정체된 상태를 나타내고 있다. 3차원 T자형관의 경우에는 일반적 특성이 2차원 협폭 공동과 같으나 셀의 중심이 관에 보다 가깝게 위치해 있으며, 따라서 내부 정체 영역도 2차원 경우에 비하여 커지는 경향이 있고, 이는 3차원 유동시 2차원에 비하

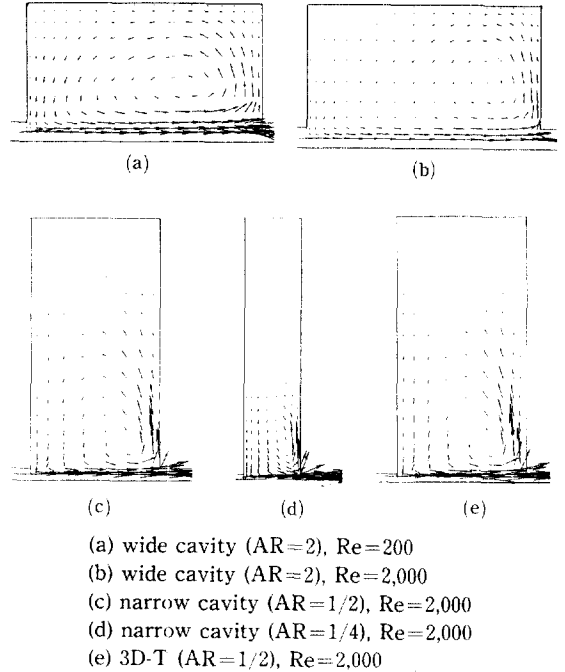
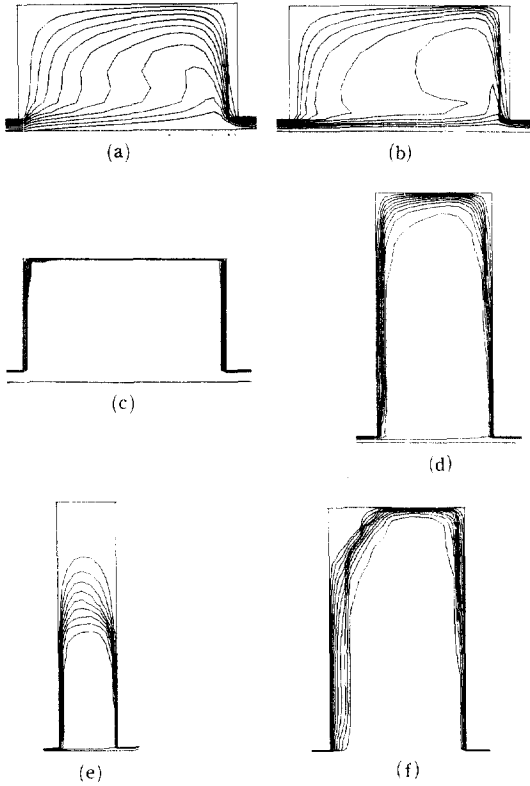


Fig. 2 Flow fields in the form of x-y vector plots

여 벽면에 의한 유동저항이 크기 때문이다. 그림에는 자세히 나와있지 않으나, 3차원 유동의 경우에는 왼쪽 윗부분의 구석에 약한 이차 유동 vortex가 형성되어 있다. 2차원과 3차원 유동에서의 이러한 차이는 2차원 공동의 경우 유동이 공동속으로 진행하면서 원통형구조의 반경증가로 인하여 유동면적이 크게 증가하면서 평균속도가 감소하기 때문이다.

#### 3.2 정상 농도 분포

본 연구에서와 같이 대류확산(convective diffusion)이 주된 현상인 경우에는 앞절의 유동장 결과와  $Sc$ 에 의한 확산속도를 조합하면 정상상태의 농도분포를 예측할 수 있다. Fig. 3(a, b)와 같이 가장 확산속도가 빠른  $Sc=2.92$ 일 때의 광폭공동의 경우를 보면 대류와 확산의 상대적 속도를 알 수 있으며,  $Re$ 가 클 때 유동의 영향으로 농도분포가 공동안으로 더욱 휘어져 들어간 형상을 나타낸다. Fig. 3(c)와 같이  $Re$ 가 2000이고 중횡비가 2일때,  $Sc$ 를 2.92에서  $2.22 \times 10^4$ 로 증가시키면 공동내의 깊은 부분까지 거의 전 영역이 높은 입자농도로 오염되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 입자의 크기가



(a) wide cavity (AR=2), Re=200, Sc=2.92  
 (b) wide cavity (AR=2), Re=2,000, Sc=2.92  
 (c) wide cavity (AR=2), Re=2,000, Sc=2.22 × 10<sup>4</sup>  
 (d) narrow cavity (AR=1/2), Re=2,000, Sc=2.87 × 10<sup>2</sup>  
 (e) narrow cavity (AR=1/4), Re=2,000, Sc=2.87 × 10<sup>2</sup>  
 (f) 3D-T (AR=1/2), Re=2,000, Sc=2.87 × 10<sup>2</sup>

Fig. 3 Concentration contours in steps of 0.1 in the steady state :

클 경우에 확산속도가 낮아서 대류에 의해 입자가 축적이 되기 때문이며, 이 경우에는 추후 오염의 자체 세정기간이 아주 길어짐을 의미한다. 종횡비가 다른 광폭공동의 경우에도 일반적인 결과는 유사하여 Re나 종횡비의 영향은 Sc의 영향에 비하여 아주 작으며, 수치적으로 볼 때는 Fig. 4(a)와 같이 0.1 μm 입자의 경우 속도나 종횡비에 거의 무관하게 평균농도가 거의 1이며, 0.01 μm 입자에서는 종횡비의 영향은 거의 없는 반면 Re가 200에서 2000으로 증가함에 따라 평균 농도가 0.4에서 0.7까지 증가한다. 확산속도가 아주 큰 0.001 μm

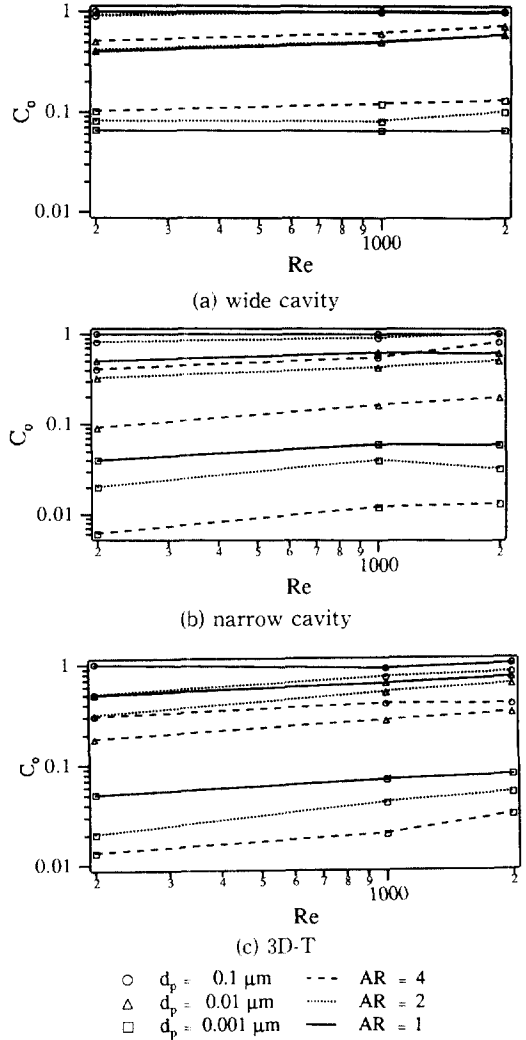


Fig. 4 Average concentration inside a cavity versus Re in the steady state

의 경우에는 종횡비의 속도 모두에 따라 평균농도가 1.5배 정도씩 증가하여 0.06~0.1 사이의 값을 갖는다. 즉 입자의 크기가 감소함에 따라 종횡비나 속도의 영향은 점점 증가한다.

협폭공동의 경우에는 Re에 따른 농도분포의 변화가 광폭공동에 비하여 매우 작으며 이는 협폭공동의 경우에 측면의 영향으로 인하여 Re에 따른 유동의 변화가 작다는 점으로부터 충분히 예상될 수 있는 결과이다. 기하학적 형상의 영향을 보면, Fig. 3(d, e)와 같이 종횡비가 1/2인 경우에는 측면과 내면 모두가 거의 균일하게 입자의 확산에 기여

하고 있는 반면 종횡비 1/4인 경우에는 측면의 반 정도만이 입자확산에 기여하고 있음을 알 수 있으며, 이로 부터 종횡비가 더욱 작은 깊은 공동의 경우에는 측면벽의 입구측 일부분, 즉 입구 폭의 1.5~2배 되는 부분만이 입자확산에 기여할 것이라는 것을 예측할 수 있다. 이 경우에도  $Sc$ 가 가장 큰 영향을 미치지만  $Re$ 와 종횡비의 영향이 광폭의 경우보다는 커서 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 종횡비 1의 농도가 1/4의 경우에 비해 5배 정도에 이른다. 평균농도가  $Re^a$  형태의 변화를 보인다고 하면 협폭의 경우  $a$ 는 약 0.2이고 광폭의 경우는 약 0.1 정도이다. 평균농도의 질대치는 0.1, 0.01 및  $0.001 \mu\text{m}$ 에서 각각 대략 0.4~1.0, 0.1~0.5, 0.0005~0.05의 범위에 있다.

T자형관의 경우에도 일반적인 경향은 같은 종횡비의 2차원 협폭공동과 같으나, 왼쪽 구석부의 이차유동(secondary flow) 영향으로 농도분포가 약간 다르며, 또한 측면 벽들의 영향이 큰 관계로 대체적으로 볼 때 농도구배가 2차원 경우보다 약간 완만하다. Fig. 4(c)에 보인 바와 같이 종횡비에 따른 농도의 변화는 협폭공동의 경우보다는 덜 민감하나 광폭공동보다는 급격하며,  $Re$ 에 따른 변화는 협폭공동보다도 약간 더 급하다. 같은 종횡비와 속도에서 평균농도는 협폭공동보다 약 10% 정도 높은데, 이는 2차원 공동에서는 저농도인 깊은 곳의 체적이 원통형구조 때문에 3차원 공동에 비해 크게 증가하기 때문이다.

실제로는 3개의 주요 변수인 종횡비,  $Re$ ,  $Sc$ 의 영향이 서로 연관되어 있으나, 이들의 영향이 서로 독립적이라고 가정한 후에 최소자승법을 이용하여 평균농도의 상관식을 구해보면 다음과 같다.

$$2\text{D 광폭공동} : c_0 = 0.1000 AR^{0.2846} Re^{0.0721} (\log Sc)^{1.0378}$$

$$2\text{D 협폭공동} : 0.0356 AR^{0.9338} Re^{0.2149} (\log Sc)^{1.5470}$$

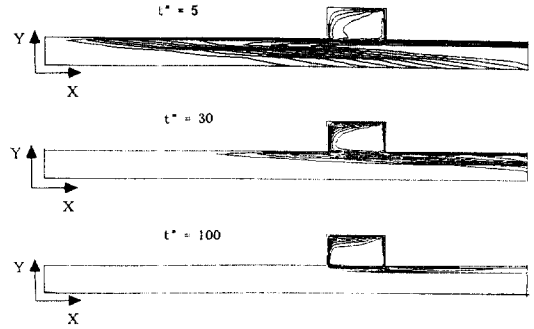
$$3\text{D T자형관} : 0.0366 AR^{0.7376} Re^{0.2346} (\log Sc)^{1.3311}$$

(9)

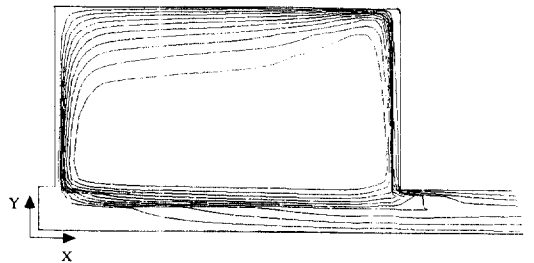
여기서 한가지 특기할 것은  $Sc$ 의 영향은  $Sc$ 의 멱함수로는 적절한 근사를 시킬 수 없고  $\log Sc$ 의 함수로만 적절한 fitting이 가능하였다.

### 3.3 공동내부의 입자농도 감소 특성

오염입자의 농도분포가 정상상태에 도달한 후에 관의 입구에서 입자농도가 0인 깨끗한 공기를 공급하기 시작하면, 먼저 관내의 관 벽 근처에 있는 입



(a) at  $t^* = 5, 30$  and  $100$ , for wide cavity ( $AR = 2$ ),  $Re = 2,000$  and  $Sc = 2.92$



(b) concentration profile in the quasi-steady state

Fig. 5 Change of concentration profiles

자농도 경계층이 재발달하기 시작하면서 공동내의 농도장이 변화하게 된다. 하나의 예로서 Fig. 5와 같이  $Re$  2000, 종횡비 2,  $Sc$  2.92일 때의 결과를 보면  $t^*$ 가 5일 때는 높은 농도의 입자가 공동내와 관의 벽근처에 존재하는 것을 볼 수 있으며  $t^*$ 가 30일 때는 관벽쪽의 입자가 아직도 계속 출구쪽으로 밀려나오는 것을 볼 수 있고( $t^* = 10$ 일 때 관의 평균유동이 공동부에 도달 함),  $t^*$ 가 100이상일 때는 벽근처의 입자는 다 제거되고 공동내의 입자만이 확산되어 나오는 것을 보인다. 이 때 공동내의 농도분포를 보면,  $t^*$ 가 5일 때는 정상 상태분포와 별 차이를 보이지 않지만  $t^*$ 가 30보다 커지면서 공동 내부로부터 관쪽으로는 확산때문에 공동 중앙부가 가장 농도가 높고 벽과 관쪽으로 오면서 농도가 점차로 감소하는, 정상상태와는 상당히 다른 분포를 보인다. 즉 관의 입자가 다 제거된 후에는 공동내의 농도분포는 전체적으로 분포의 형태는 일정하게 유지되면서 농도의 값만이 감소하는 Fig. 5 (b)와 같은 준정상분포 상태에 도달한다. 공동내의 평균 입자농도를 시간에 대해 구하여 보면, 초

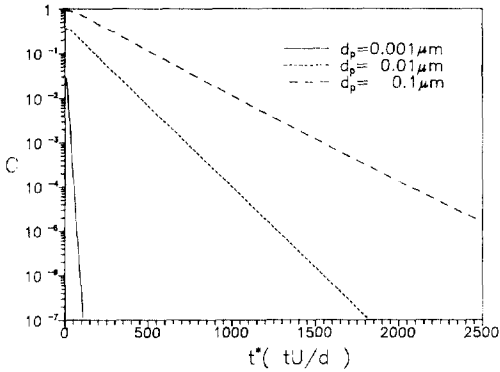


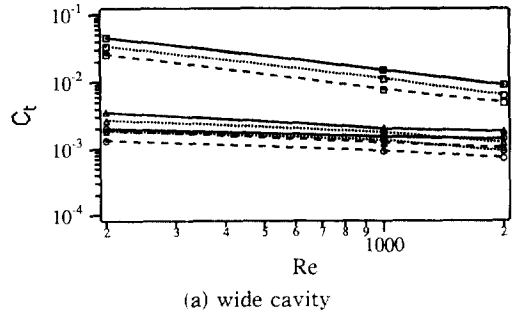
Fig. 6 Change of average concentration inside a wide cavity (AR=1) for Re=200

기에는 관벽 근처의 입자가 공동부쪽으로 밀려오면서 공동으로부터 관으로의 입자확산이 억제되어 공동내부의 입자농도감소속도가 느리지만, 관벽부근의 입자가 거의 제거되고 공동내 입자분포가 준 정상상태에 도달한 후에는 공동내의 입자농도는 Fig. 6과 같이 지수함수적으로 감소하게 된다. 즉,

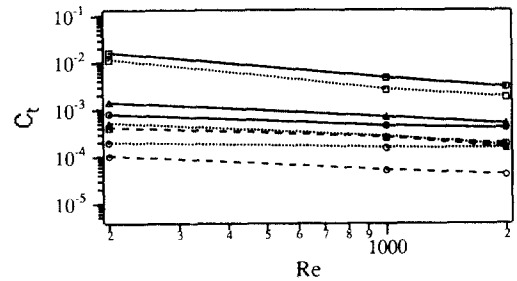
$$c(t^*) = c_0 \exp(-c_1 t^*) \quad (10)$$

식 (10)에서  $c_1$ 는 감소율을 나타내는데  $c_1$ 의 값이 큰것은 감소율이 크다는 것을 의미하고  $c_0$ 는 초기 농도의 값을 의미한다.

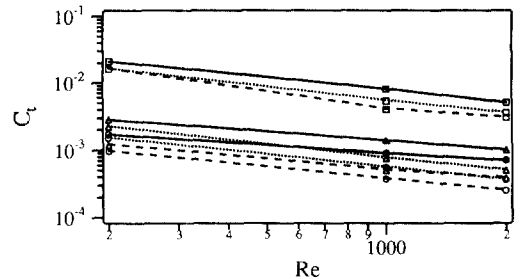
먼저 Fig. 7(a)와 같이 광폭공동의 경우에 대하여 계산결과로부터 무차원 농도감소율  $c_1$ 의 값을 구하여 보면  $Re$ 가 감소,  $Sc$ 가 감소, 종횡비가 감소할수록 큰 값을 나타낸다. 즉 공동내의 입자농도의 감소율이 크다. Fig. 2의  $Re$ 에 따른 속도분포 변화에 보이듯이,  $Re$ 가 작을때에 공동 안의 상대속도(관내 평균속도에 대한)가 크고 공동의 전체영역에서 유동이 보이며, 따라서 농도의 구배가 커지고 벽이나 관으로의 확산 현상이 빨리 일어나서 입자농도의 감소율이 크다.  $Sc$ 가 감소하면 입자의 확산 계수가 커지므로 공동내의 벽이나 관쪽으로 입자의 확산량이 증가하여 농도가 급격히 떨어지며, 종횡비가 증가하면 체적에 비해 벽의 면적이 작아지므로 벽으로의 입자 flux가 감소하여 농도의 감소율이 둔감된다. 앞서의 평균농도에서와 마찬가지로 작은 입자일수록 무차원 농도변화율이  $Re$ 의 증가에 따라 빨리 감소하는데, 이는 실질 시간에 대한 농도감소율(=무차원 감소율  $\times U/d$ )이 작은 입자의 경우에  $Re$ 에 따라 보다 천천히 증가함을



(a) wide cavity



(b) narrow cavity



(c) 3D-T

- $d_p = 0.1 \mu\text{m}$     --- AR = 4
- △  $d_p = 0.01 \mu\text{m}$     ···· AR = 2
- $d_p = 0.001 \mu\text{m}$     — AR = 1

Fig. 7 Dimensionless rate of concentration decay inside a cavity versus  $Re$  :

의미한다.

무차원 농도감소율은 수치적으로 볼 때,  $0.01 \mu\text{m}$  입자에 대해서는  $1 \sim 4 \times 10^{-3}$  범위에 있으며,  $0.1 \mu\text{m}$  입자에 대해서는 같은  $Re$ 와 종횡비에서  $0.01 \mu\text{m}$  경우의 1/2 정도이다. 즉, 오염된 공동의 청정시간이 유동시간의 1000배 정도임을 의미한다. 종횡비에 따라서는 대략 종횡비 1의 농도감소율을 기준으로 할 때 종횡비가 2와 4로 됨에 따라 각각 70%, 50%의 수준으로 감소한다.

Fig. 7(b)인 협폭 공동내의 평균 입자농도의 변

화율을 보면,  $Re$ 와  $Sc$ 가 증가할 수록  $c_t$ 의 값이 감소함을 볼 수 있고 즉 감소율이 작아지며, 이것은 종횡비가 1보다 클 때의 결과와 동일하다. 농도 변화율의  $Re$ 와  $Sc$ 에 따른 경향도 광폭의 경우와 대동소이하다. 그러나 종횡비에 따른 결과는 종횡비가 작을 수록 작은 값을 가진다. 즉, 종횡비 1의 광폭공동의 농도감소율을 1이라할 때 협폭공동의 감소율은 종횡비 1, 1/2, 1/4에 대하여 각각 0.3, 0.1~0.2, 0.05~0.1 정도의 값을 갖는다. 여기서 확산현상에 의한 농도감소율이 가장 큰 경우는 종횡비가 1일 때임을 알 수 있고, 이는 이 종횡비에서 가장 유동의 영향을 심하게 받으며 공동의 체적에 비해 입자확산에 기여하는 유효벽의 면적이 가장 넓기 때문으로 생각된다. 광폭의 경우와 비교하면 감소율이 상당히 작으며  $Sc$ 가  $2.87 \times 10^{-2}$  이상일 때는 대략 5배 이상의 차이가 나는 것을 볼 수 있고, 따라서 협폭의 경우에 확산시간이 길다.

3차원 T자형관의 경우에는 Fig. 7(c)에 나타난 바와 같이 기본 특성이 2차원 협폭공동의 경우와 비슷하며, 농도감소율은 2차원 협폭의 경우보다 약 2배 정도 높다. 이는 정상농도의 특성과 관련하여 설명된 바와 같이 3차원에서는 반경방향으로의 깊이가 증가하더라도 단면적이 일정한 반면 2차원에서는 반경방향으로의 깊이에 따라 단면적/체적이 크게 증가하기 때문으로 생각된다.

앞서와 마찬가지로 농도감소율도 세 가지 변수의 멱함수의 곱으로 가정하고 최소자승법으로 근사식을 구하면 다음과 같이 요약될 수 있다. 여기서 특기할 일은  $Re$ 에 따라서는 대개  $-0.5$ 승에 비례하고  $\log Sc$ 에는 역비례함을 알 수 있으며, 무차원 감소율에  $U/d$ 에 곱하여 실시간 변화율을 구하면 결국 유속의  $+0.5$ 승에 비례하게 되어, 일반적인 층류유동중 확산현상으로 근사될 수 있음을 알 수 있다.

2D 광폭공동 :

$$c_t = 0.1562 AR^{-0.4663} Re^{-0.4628} (\log Sc)^{-1.1427}$$

2D 협폭공동 :  $0.0660 AR^{1.6132} Re^{-0.5090} (\log Sc)^{-0.9841}$

3D T자형관 :  $0.1122 AR^{0.4540} Re^{-0.5077} (\log Sc)^{-1.0156}$

(11)

3.4 관 출구에서의 입자 오염율 변화

실질적인 오염 재방출의 정도를 나타내는 것은 관의 출구에서의 입자의 유속으로서, 앞서의 공동 내 입자농도변화와 같이 시간에 따른 관 출구에서

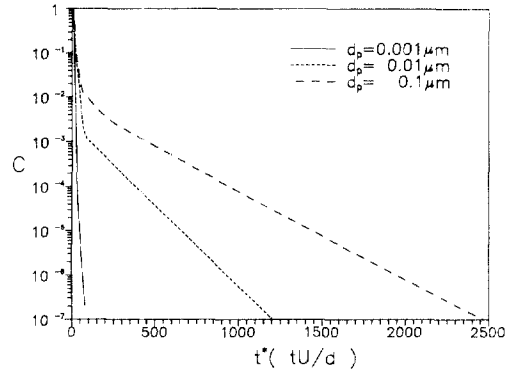


Fig. 8 Change of dimensionless particle flux at the outlet of a wide cavity (AR=1) for Re=200

의 입자농도의 변화를 보면 Fig. 8과 같이 초기에 급격한 농도감소를 보이다가  $t^* = 100$  정도 이후부터 상당히 완만한 감소를 나타내는 양상을 보인다. 초기의 급격한 농도감소 구간은 관의 중심부근에 있던 입자들이 대류에 의해 밀려나오는 과정이며, 관 내의 입자들이 대류에 의해 어느 정도 제거된 후부터는 공동내의 입자농도분포가 준 정상상태에 도달하고 관 출구에서의 입자농도변화가 공동으로부터 관으로의 입자확산에 의해 지배되게 된다. 따라서 관 출구에서의 농도변화도 공동안의 입자농도와 마찬가지로 확산현상이 지배적인 지수함수적으로 변화할 것이 예상된다.

초기의 높은 농도감소속도 구간에서는 관 내부와 관벽 근처의 농도 경계층, 그리고 공동으로부터의 확산등이 복합되어 해석이 어려우나, 후기의 확산 지배영역에 대한 농도변화속도는 공동내의 농도변화와 마찬가지로 시간에 대해 완전히 지수함수적인 감소를 보이며, 그 감소율을  $c_{t,o}$ 라 하고 이의 값을 구해보면 공동내의 농도감소율과 거의 완벽히 일치함을 보여주고 있다. 이것은 광폭과 협폭의 2차원 공동 및 3차원 T등 모든 경우에 공통된 것이며, 다만 3차원 T에서는 두 개 다른 감소속도 구간이 중첩되는 기간이 2차원의 경우의 2~3배 정도에 달하는 것만이 다른 점이다.

2D 광폭공동 :

$$c_{t,o} = 0.1615 AR^{-0.3964} Re^{-0.4735} (\log Sc)^{-1.070}$$

2D 협폭공동 :

$$= 0.0602 AR^{1.1547} Re^{-0.5019} (\log Sc)^{-0.8238}$$

3D T자형관 :

$$= 0.1142 AR^{0.4234} Re^{-0.4174} (\log Sc)^{-1.0991} \quad (12)$$



### 3.5 종합 고찰

이상에서는 대상계를 기하학적 형상에 따라 광폭과 협폭의 2차원 축대칭 형상 및 3차원 T자형관의 세 가지로 나누어 해석하였으며, 이 세 가지 다른 계에 대한 결과를 보다 근본적인 기하학적 변수인 -확산과정의 해석에 있어서- 표현적이거나 체적등으로 표현하면 형상에 따라 구분할 필요없이 하나의 일반적인 관계식을 도출하는 것이 개념적으로 가능하다. 예를 들어 공동의 벽면면적과 평균입자전달계수를  $A_w, h_w$  그리고 공동입구부의 그것을 각각  $A_o, h_o$ 라고 하면 공동 내부의 정상평균농도  $c_o$ 는 공동입구를 통한 입자의 유입과 벽면으로의 입자손실간의 평형조건으로부터 식(13)과 같이 쓸 수 있으며, 준정상 농도감소율  $c_t$ 는 공동의 입구와 공동 벽면 모두로의 입자손실을 고려하면 식(14)와 같이 쓸 수 있다.

$$c_o = \frac{1}{1 + A_w h_w / A_o h_o} \quad (13)$$

$$c_t \sim U \frac{A_w h_w + A_o h_o}{V} \sim U \frac{(A_o/V) h_o}{c_o} \quad (14)$$

광폭공동의 경우에 대한 결과를 위의 식과 비교해 보면 위의 식이 상당히 정확한 예측을 할 수가 있고, 정상평균농도가  $Re$ 에 거의 무관하다는 결과로부터 벽과 입구에서의 평균전달계수가  $Re$ 에 따라 비슷하게 변함을 알 수 있다. 그러나 2차원 협폭공동과 3차원 T자형관의 경우에는 윗식의 예측과 상당히 다른 경향을 보이는데, 그 이유는 윗식과 같은 lumped formulation이 정확한 결과를 주려면 어느 기하학적 형상에 있어서 정상농도 상태와 비정상상태에서 최대농도 또는 평균농도를 나타내는 점의 위치가 같아야 하는데, 광폭공동의 경우에는 이 가정이 정확하지만 협폭과 3차원 T에서는 이 위치가 크게 변하기 때문이다. 예를 들어 협폭의 경우에 정상상태에서는 입구에서 입자가 유입되어 안 쪽으로 확산되어 가는 과정에서 확산속도가 빠른 입구근처에 최대농도점이 위치하지만 비정상상태에서는 오히려 확산속도가 느린 중간-내면으로 최대점이 옮겨간다. 이 위치변동의 정도도 입자의 크기와  $Re$ 에 따라 바뀌게 되므로 이에 대한 별도의 고찰이 이루어져야만 종합적인 이론정립이 가능하다. 즉, 벽면의 평균성질에 근거한 평형식으로 광폭의 구조는 해석이 가능하지만 협폭의 구조는 2차원과 3차원을 막론하고 국부적인 전달과정이 그대로 해석되어야 한다.

이와 같은 계산 결과를 실험적으로 입증하기 위해서는 농도변화의 시간정수보다 짧은 시간정수를 가지면서 동시에 측정시의 입자농도 변화를 최소화할 수 있도록 샘플링(sampling)을 이용하지 않는 입자측정시스템이 요구되므로, 기존의 응축핵측정기등으로서는 불가능하고 새로운 실험기법이 개발되어야 한다.

## 4. 결 론

유동관에 부착된 공동에 있어서 관 입구로부터 공급되는 오염입자의 공동내의 유입과 오염된 공동으로부터 유동관으로의 입자의 재방출 현상을 입자의 관성이 무시된 대류확산 영역에 대하여 수치적인 방법으로 해석한 결과 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

(1) 2차원 광폭 및 협폭공동에 있어서 공동내부의 유동은 하나의 커다란 유동 셀에 의하여 지배되며, 3차원 T자형관에는 구석부에 2차 유동의 형성이 관측된다.

(2) 폭에 비하여 깊이가 2배 이상되는 2차원 협폭공동 및 3차원 T자형관에서는 공동폭의 1.5~2배 깊이 까지만이 입자의 확산에 기여한다.

(3) 관 입구에서 오염입자가 공급될 경우의 공동내 최대 오염율은 주로  $Sc$ 에 의해 결정되며,  $Re$ 의 영향은 아주 작다.

(4) 공동이 오염된 후 관 입구에서 다시 깨끗한 공기를 공급할 경우의 오염입자 재방출에 있어서, 공동내부의 입자농도 분포는  $t^* = 100$ 정도 이후부터 준정상분포를 가지며 따라서 농도가 지수함수적으로 감소한다.

(5) 공동내의 평균농도나 농도의 감소율은 대체로 보아  $Re, \log Sc$  및 종횡비의 멱함수형태로 표현할 수 있다. 최소 사승법에 의한 근사식은 본문에 요약하였다.

(6) 관 출구에서의 입자유출속도는 초기의 관내 입자유출에 의한 급속한 감소구간과 공동으로부터의 준정상적 방출에 의한 지수함수적 감소구간으로 나뉘며, 준정상상태의 입자유출량 감소율은 공동내 평균농도 감소율과 같다.

## 후 기

이 논문은 1992년도 교육부 지원 한국학술진흥재

단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- (1) Tollover, D. L., 1984, "Contamination control ; new dimensions in VLSI manufacturing," Solid State Technology, pp. 129~137.
- (2) Simon, R., 1990 Oct., "State-of-art of clean room system technology," 유럽에서의 초정정 기술 세미나, pp. 34~35.
- (3) Friedlander, S. K., 1977, Smoke, Dust and Haze, John Wiley & Sons, New York.
- (4) Ghaddar, N.K., Korczak, K.Z., Mikic, B.B. and Patera, A.T., 1986, "Numerical investigation of incompressible flow in grooved channels," J. of Fluid Mechanics, Vol. 163, pp. 99~127.
- (5) Bhatti, A. and Aung, W., 1984, "Finite difference analysis of laminar separated forced convection in cavities," J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 49~54.
- (6) Kakac, S., Li, W., and Cotta, R. M., 1990, "Unsteady laminar forced convection in ducts with periodic variation of inlet temperature," J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 913~920.
- (7) Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw Hill, New York.
- (8) Ghia, U., Ghia, K. N. and Shin, C. T., 1982, "High Re solution for incompressible flow using the Navier Stokes equations and a multigrid method," J. of Computational Physics, Vol. 48, pp. 387~411.
- (9) Dhatt, G. and Hubert, G., 1986, "A study of penalty elements for incompressible laminar flows," J. for Numerical Methods in Fluid, Vol. 6, pp. 1.