

# 채널 내 자유 낙하하는 2차원 원형 실린더의 운동 특성에 관한 수치적 연구

정해권\* · 윤현식\*\* · 하만영†

(2008년 12월 29일 접수, 2009년 5월 20일 수정, 2009년 5월 26일 심사완료)

## Numerical Study on the Motion Characteristics of a Freely Falling Two-Dimensional Circular Cylinder in a Channel

Haekwon Jeong, Hyunsik Yoon and Manyeong Ha

**Key Words :** Freely Falling Circular Cylinder(자유 낙하하는 원형 실린더), Gap Ratio(벽과 실린더 사이의 거리), Density Ratio(밀도비), Transverse Motion(수평방향 운동), Transverse Force(수평방향 힘)

### Abstract

A two-dimensional circular cylinder freely falling in a channel has been simulated by using immersed boundary – lattice Boltzmann method (IB-LBM) in order to analyze the characteristics of motion originated by the interaction between the fluid flow and the cylinder. The wide range of the solid/fluid density ratio has been considered to identify the effect of the solid/fluid density ratio on the motion characteristics such as the falling time, the transverse force and the trajectory in the streamwise and transverse directions. In addition, the effect of the gap between the cylinder and the wall on the motion of a two-dimensional freely falling circular cylinder has been revealed by taking into account a various range of the gap size. As the cylinder is close to the wall at the initial dropping position, vortex shedding in the wake occurs early since the shear flow formed in the spacing between the cylinder and the wall drives flow instabilities from the initial stage of freely falling. In order to consider the characteristics of transverse motion of the cylinder in the initial stage of freely falling, quantitative information about the cylinder motion variables such as the transverse force, trajectory and settling time has been investigate.

### 1. 서 론

입자-유체의 상호작용(particle-fluid interaction)에 관한 문제는 화학, 항공, 환경, 지질학 및 생물학 등 많은 분야에서 활용된다. 예를 들어 물 속에서

의 침전물에 의한 방사능 핵종(radio-nuclides)의 수송부터 유동상 반응기(Fluidized bed reactor), 플라즈마 스프레이 코팅(Plasma spray coating) 그리고 물방울 형성 및 연소에 이르기까지 많은 분야에서 중요한 비중을 차지한다. 또한 구조 분야에서도 입자의 운동이 구조물에 영향을 미침으로 인해 발생하는 입자-유체-구조물 사이의 상호작용은 구조물의 응답과 안정성에 영향을 준다. 위에서 간략히 열거한 바와 같이 다양한 분야에서 입자-유체 상호작용은 상당한 주목을 받고 있으며, 이로 인

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail : myha@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2440 FAX : (051)515-3101

\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학부

\*\* 회원, 부산대학교 첨단조선공학연구소

해 많은 연구자들이 실험<sup>(1~4)</sup> 및 수치해석<sup>(5~23)</sup> 방법들을 사용하여 입자-유체 상호작용에 관한 연구를 진행해오고 있다. 대표적인 연구를 간략하게 기술하면 아래와 같다.

Cate 등<sup>(1)</sup>은 밀폐된 상자에 실리콘 오일(Silicon oil)을 채운 후 구의 자유 낙하 실험을 수행하여 구의 궤적과 속도를 측정하였다. Horowitz 과 Williamson<sup>(2)</sup>는 물로 채워진 상자 내부에서 실린더의 상승 및 자유 낙하에 대한 연구를 수행하였다. Jenny 등<sup>(3)</sup>은 한 개의 구가 상승 또는 자유 낙하시 구의 궤적을 추적하였다. 입자-유체간의 밀도비(density ratio)와 갈릴레오수(Galileo number,  $Ga = \sqrt{(\rho_p / \rho_f - 1)gD^3} / \nu_f$ ; 여기서  $\rho_p$ ,  $\rho_f$ ,  $g$ ,  $D_p$  와  $\nu_f$  는 입자와 유체의 밀도, 중력가속도, 입자의 직경과 유체의 동점성 계수를 각각 나타낸다)를 이용한 파라메트릭 연구(parametric study)를 수치 및 실험적으로 수행하여 구의 궤적과 운동 패턴을 구분하여 설명하였다. Veldhuis 과 Biesheuvel<sup>(4)</sup>은 구의 자유 낙하 및 상승에 관한 실험을 통하여 Jenny 등<sup>(3)</sup>의 연구 결과와 비교하고 구의 이동 궤적과 불안정성에 대해 설명하였다. Namkoong 등<sup>(5,6)</sup>은 무한 유체 내에서 실린더의 자유 낙하에 대해 수치적 연구를 수행하였다. 고정된 레이놀즈수(Reynolds number,  $Re$ )에 대하여 정지된 실린더 주위의 유동에서의 스트로할수(Strouhal number,  $St$ )를 비교하고 무한 유체 내에서 자유 낙하하는 실린더의  $St$  가 줄어드는 메커니즘을 제시하였다. Ladd<sup>(7-9)</sup>는 다수의 미립자들이 존재하는 유체 내부에서의 입자의 침강에 따른 주변 유동의 섭동과 브라운 운동(Brownian motion)에 대한 수치적 연구를 수행하였다. Jones 과 Kutteh<sup>(10)</sup>는 콜로이드 형태를 가지는 미립자들에 외력을 가하여 벽면으로 이동시킨 후 입자와 벽면 사이의 상호작용에 관한 수치적 연구를 수행하였다.

Feng 등<sup>(11)</sup>은 다양한 크기의 폭을 가지는 채널 내부에서 원형 실린더의 자유 낙하 운동 특성에 관한 2차원 수치적 연구를 실시하였다. 실린더의 평균 종속(terminal velocity)과 직경에 기반을 둔  $Re$  를 정의하고,  $Re$  에 따른 영역을 구분하여 실린더의 운동 패턴을 체계적으로 설명하였다. 또한 높은  $Re$  영역에서 실린더가 낙하할 때 와홀림(vortex shedding)의 발생에 따른  $St$  는 동일한  $Re$  를 가지는 정지해 있는 실린더 주변 유동의  $St$  보다 작음을 보였다. 그러나 이들은 이와 같은 결과

가 채널의 벽효과(wall effect)에 의한 것인지 아니면 실린더의 운동 특성에 의한 것인지에 대한 자세한 언급은 하지 않았다. Aidun 과 Ding<sup>(12,13)</sup>은 입구와 출구가 막힌 채널 내에서 두 개의 입자가 침강할 낮은  $Re$  범위 내에서 때 두 입자의 운동 특성을 수치적 방법을 사용하여 해석하였다. Glowinski와 그의 동료들<sup>(14-16)</sup>은 미립자의 침강을 모사하기 위한 수치기법을 제시하면서 밀폐된 채널 내부에서 자유 낙하하는 실린더와 구의 궤적 및 속도를 예측하였으나 현상에 대한 자세한 물리적인 설명은 언급하지 않았다.

저자들의 문헌조사에 따르면, Feng 등<sup>(11)</sup>이 수행하였던 출구가 개방된 채널 내부에서 자유 낙하에 대한 연구를 제외하고, 바닥이 존재하는 채널 내부에서 원형 실린더의 자유 낙하에 관한 연구들은 대부분 개발된 수치해석 방법을 검증을 위하여 수행되었으며,<sup>(12-22)</sup> 현상에 대해 체계적인 물리적 해석을 수행한 연구는 드물다.

따라서 본 연구에서는 Glowinski 등<sup>(14-16)</sup>과 Wang 등<sup>(22)</sup>이 수행하였던 계산 조건을 바탕으로 2차원 채널 내에서 원형 실린더의 자유 낙하 운동에 대한 체계적인 연구를 진행하였다. 원형 실린더-유체간 밀도비와 실린더와 채널 벽 사이 간격의 변화에 따른 2차원 채널 내에서 실린더의 운동 특성을 예측하기 위하여 격자 볼츠만 법(lattice Boltzmann method, LBM)과 가상 경계 법(immersed boundary method, IBM)을 사용하여 수치 해석을 실시하였다.

2장에서는 지배 방정식과 해를 구하기 위하여 도입한 격자 볼츠만 법(lattice Boltzmann method)에 대해 간단히 소개하고, 이 방법을 통해 얻은 결과들을 선행 연구 결과들과 비교를 통해 수치해석 기법에 대한 검증을 실시하였다. 3장에서는 실린더와 유체간 밀도비와 실린더의 초기 위치에 따른 실린더의 운동 특성을 시간에 따른 유동장의 변화, 실린더가 받는 힘과 실린더의 낙하궤적 등을 통해 분석하였다. 본 연구에서는 자유 낙하하는 실린더가 채널의 바닥 벽과 충돌한 이후에 대한 유동 패턴과 실린더의 운동은 다루지 않았다.

## 2. 이론적 연구

### 2.1 지배 방정식

Fig. 1은 본 연구에서 고려하는 2차원 채널의 형상 및 좌표계를 보여주고 있다. 본 연구에서 고려

한 문제를 지배하는 비압축성 연속 방정식과 운동량 보존 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{u}$ ,  $p$ ,  $\rho_f$ ,  $\nu$ ,  $\mathbf{f}$  는 각각 유체의 속도 (velocity), 압력 (pressure), 유체 밀도 (fluid density), 동점성 계수 (kinematic viscosity) 그리고 외력 (external force)을 나타낸다. 본 연구에서는 식 (1) 과 식 (2)의 해를 구하기 위하여 격자 볼츠만 법 (lattice Boltzmann method: LBM)을 사용하였다. 아래의 식 (3)은 LBM의 지배 방정식으로써 볼츠만 방정식 (Boltzmann equation)에 기원을 두고 있는 격자 BGK (Bhatnager-Gross-Krook) 방정식 (lattice BGK equation)이다.<sup>(23)</sup>

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)] \quad (3)$$

여기서,  $f_i$ ,  $\mathbf{x}$ ,  $c$ ,  $\mathbf{c}_i$ ,  $\tau$ ,  $f_i^{eq}$  는 각각 밀도 분포 함수 (density distribution function), 위치 벡터 (position vector), 입자 속도의 크기 (lattice speed,  $c = \Delta x / \Delta t$ ), 입자 속도 벡터 (lattice velocity vector), 단일 완화 시간 (single relaxation time) 그리고 평형 밀도 분포 함수 (equilibrium density distribution function)를 나타낸다. 하첨자  $i$  는 입자의 방향을 의미하며, 격자 모델 (lattice model)에 따라 다르다. 거시적인 밀도 ( $\rho_f$ ), 속도 ( $\mathbf{u}$ )는 식 (4)의 구속 조건 (constraints)에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} \rho_f &= \sum_i f_i \\ \rho_f \mathbf{u} &= \sum_i f_i \mathbf{c}_i \end{aligned} \quad (4)$$

$$f_i^{eq} = \omega_i \rho_f \left[ 1 + \frac{3\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u}}{c^2} + \frac{9(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2}{2c^4} - \frac{3\mathbf{u}^2}{2c^2} \right] \quad (5)$$

식 (5)는 D2Q9 모델에 대한 평형 밀도 분포 함수이며,  $\omega_i$  는 가중 계수 (weighting coefficient)로써, 방향에 따라  $\omega_0 = 4/9$ ,  $i = 0$ ,  $\omega_i = 1/9$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ,  $\omega_i = 1/36$ ,  $i = 5, 6, 7, 8$  이다. 동점성 계수는 단일 완화 시간 (single relaxation time)의 함수로 나타낼 수 있으며,  $\nu = (2\tau - 1)(\Delta x)^2 / (6\Delta t)$ 의 관계를 가진다.<sup>(23)</sup>

Fig. 1의 계산 영역 ( $\Omega_f$ )은 오일러안 좌표계 (Eulerian coordinate)로 표현되어 있으며 원형 실린더의 경계와 내부는 라그랑지안 점 (Lagrangian point)들로 구성되어 있다. 이와 같이 서로 다른 격자 체계에 대한 운동 방정식의 해를 구하기 위하여 격자 볼츠만 법 (lattice Boltzmann method, LBM)과 함께 DF/FD (direct forcing/ fictitious domain) 기법<sup>(19-23)</sup>을 결합한 가상경계 격자 볼츠만 법 (immersed boundary - lattice Boltzmann method, IB-LBM)을 사용하였다. 주변 유체와 실린더간의 상호작용력 (interaction force)은 DF/FD 기법에 의해 계산되며, 평형 속도 기법 (equilibrium velocity approach)<sup>(24,25)</sup>를 통해 외력의 형태로 지배방정식에 도입된다.

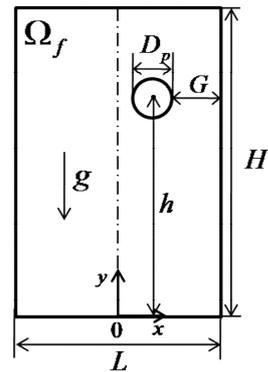
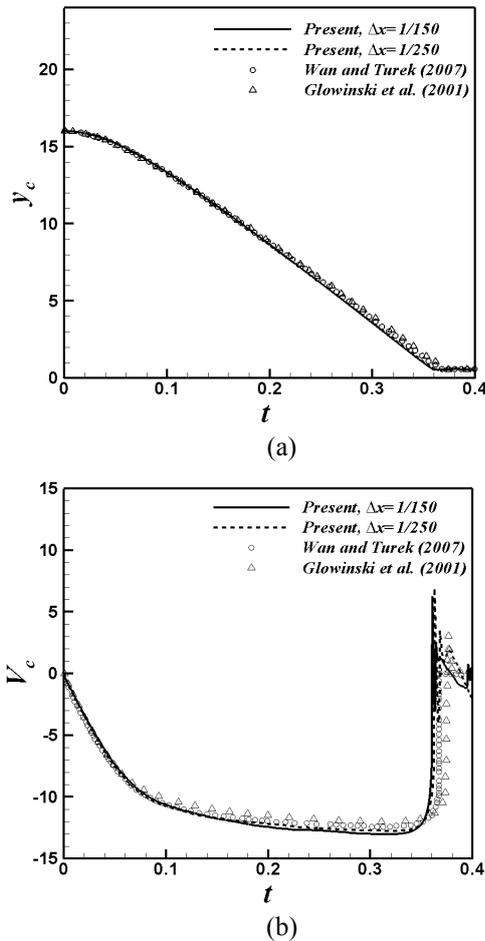


Fig. 1 Schematics of system

Table 1 Comparisons of the maximum particulate Reynolds number ( $Re_{p,max}$ ) during a cylinder sedimentation

		Present	Glowinski et al.[16]		Wan and Turek[21]		Wang et al.[22]			
$\rho_p / \rho_f = 1.25$	$\Delta x$	1/50	1/100	1/192	1/256	1/48	1/96	1/72	1/144	1/256
	$Re_{p,max}$	16.87	17.24	17.27	17.31	17.42	17.15	16.962	17.216	17.307
$\rho_p / \rho_f = 1.5$	$\Delta x$	1/150	1/250	1/256	1/384	1/48	1/96	1/72	1/144	1/256
	$Re_{p,max}$	489.1	478.69	450.7	466	442.19	465.52	502.37	503.26	503.38



**Fig. 2** Time histories of (a) streamwise trajectory and (b) streamwise velocity of the center of a circular cylinder for  $\rho_r = 1.5$  and  $\mu = 0.01 \text{ g/(cm s)}$

## 2.2 문제의 정의

본 연구에서는 Fig. 1에 도시된 채널 안에서 원형 실린더가 자유 낙하 시 실린더의 운동 및 유동 패턴을 연구하였다. 실린더의 직경은  $D_p = 0.25 \text{ cm}$  이고, 채널 폭은  $L = 8D_p$  이며, 채널 높이는  $H = 60D_p$  이다. 직경이  $D_p = 0.25 \text{ cm}$  인 실린더는 폭  $L = 8D_p$ , 높이  $H = 60D_p$  인 수직 채널 내부에서 우측 벽으로부터  $G_r$  바닥으로부터  $h = 56D_p$  인 위치에 놓여있다. 유체의 밀도와 점성은 각각  $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$  이고  $\mu = 0.01 \text{ g/(cm s)}$  이다. 실린더의 밀도로써  $\rho_p = 1.25 \text{ g/cm}^3$ ,  $1.5 \text{ g/cm}^3$  그리고  $1.75 \text{ g/cm}^3$  의 서로 다른 세가지 경우를 고려하였다. 따라서, 실린더와 유체의 밀도비  $\rho_r (= \rho_p / \rho_f) = 1.25, 1.5$ 와  $1.75$ 이다. 중력 가속도  $g = 981 \text{ cm/s}^2$  이며 채널의 바닥을 향한다.  $G_r (= G/D_p)$  은  $0.1$ 부터  $3.5$ 까지 변화시켰다.

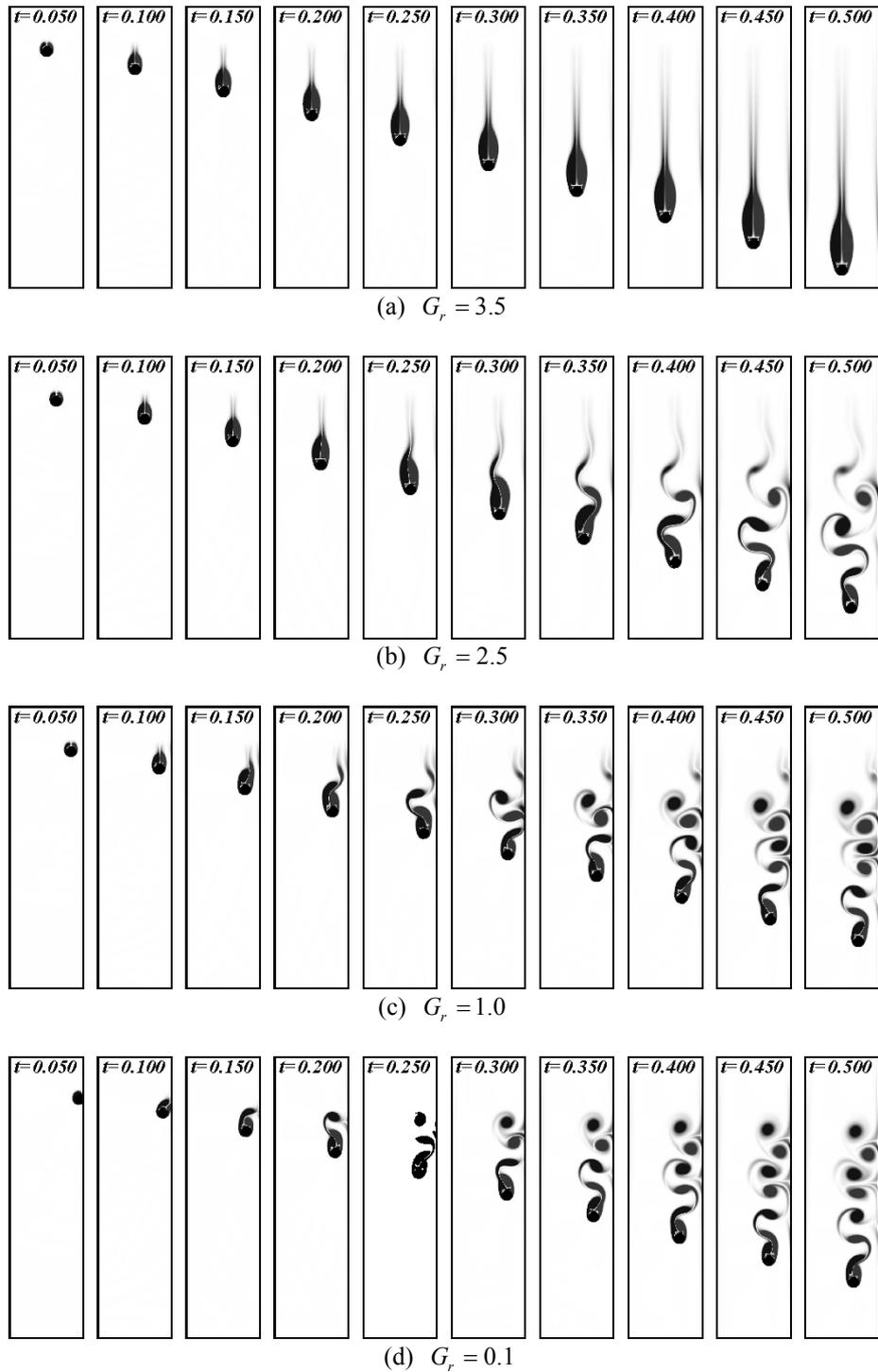
$G_r = 0.1$  은 실린더가 벽면에 가장 인접했을 경우이며,  $G_r = 3.5$  는 채널의 수평방향 중심에 위치했을 경우를 나타낸다. 계산 초기에 원형 실린더의 중심은 채널의 바닥으로부터  $h = 56D_p$  에 놓여있다. 전 계산 영역에 걸쳐  $301 \times 2251 (x \times y)$  의 균일 격자를 사용하였다. 본 연구에서 고려한 모든 경우에 대해 시간 간격  $\Delta t = 5 \times 10^{-5} \text{ sec}$  이다. 계산 초기에 유체는 정지해있으며, 채널의 모든 벽은 점착 조건을 만족한다. 초기에 정지한 실린더는 중력에 의하여 갑자기 자유 낙하 운동을 시작하게 된다.

## 2.3 수치해석 방법의 검증

본 연구에서 사용한 수치해석 방법을 검증하기 위하여 닫힌 채널 내에서 한 개의 원형 실린더가 자유 낙하하는 경우에 대해 선행 연구들<sup>(16,21,22)</sup>과 비교하였다. 검증에 사용된 형상은 위에서 언급한 Fig. 1과 같으나, 계산 영역의 크기는 다음과 같이 정의된다. 원형 실린더의 직경은  $D_p = 0.25 \text{ cm}$  이고, 채널의 폭과 높이는 각각  $L = 8D_p$  과  $H = 24D_p$  이다. 수직 및 수평방향의 초기 실린더의 위치는  $h = 16D_p$  과  $G_r = 3.5$  이다. 중력 가속도 ( $g = 981 \text{ cm/s}^2$ ) 는 채널 바닥을 향한다. 채널 벽면들에는 점착 조건(no-slip condition)을 부여하였다. 검증에 사용된 실린더의 밀도는  $\rho_p = 1.25 \text{ g/cm}^3$  과  $1.5 \text{ g/cm}^3$  이며 유체의 점성 계수는  $\mu = 0.1 \text{ g/(cm s)}$  과  $0.01 \text{ g/(cm s)}$  이다. 격자수의 의존성을 고려하기 위하여 격자 간격( $\Delta x$ )으로  $1/50, 1/100, 1/150, 1/250$  을 사용하였다. 모든 경우에 대하여 시간 간격( $\Delta t$ )은  $5 \times 10^{-5} \text{ sec}$  로 고정하였다.

본 연구에서 도입한 수치해석기법을 검증하기 위하여 자유 낙하하는 원형 실린더가 가지는 입자 레이놀즈 수(particle Reynolds number,  $Re_p = \rho_p D_p \sqrt{U_c^2 + V_c^2} / \mu$ , 여기서  $U_c$  와  $V_c$  는 실린더 중심의 수평 및 수직 방향 속도 성분을 각각 나타낸다)의 최대값과 선행 연구 연구들<sup>(16,21,22)</sup>에서 얻은 결과들을 Table 1에서 비교하였으며, 이를 통해 본 연구의 결과가 선행연구결과들을 잘 재현하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2는  $\rho_r = 1.5$ 와  $\mu = 0.01 \text{ g/(cm s)}$  의 경우에 대하여 실린더 중심의 시간에 따른  $y$ -방향 궤적 변화와  $V_c$  의 변화를 선행 연구 결과들<sup>(16,21)</sup>과 비교한 것을 보여주고 있으며, 이전 결과들과 잘 일치함을 알 수 있다.



**Fig. 3** Evolution process of vorticity field and a cylinder position during freely falling for  $\rho_r = 1.5$  and various gap ratios. (vorticity range: -50 ~ 50)

### 3. 결과

#### 3.1 유동장 분포

Fig. 3은  $\rho_r = 1.5$  일 때,  $G_r = 0.1, 1.0, 2.5$  및  $3.5$ 에

서 시간에 따른 순간 등와선(contours of vorticity)을 보여주고 있다. 실린더가 채널의 수평방향 중심에 놓인  $G_r = 3.5$ 에서는 실린더 후류에서 발생한 한 쌍의 와(실린더의 좌측 후류에서는 음의 와가, 우

측 후류에서는 양의 와가 발생한다)가 실린더의 중심을 기준으로 대칭을 이루며 시간이 지남에 따라 성장하지만, 후류에 와홀림 현상이 나타나지 않는 것을 Fig. 3(a)에서 확인할 수 있다. 이와는 달리, 실린더의 초기위치가 채널의 우측 벽에 조금 더 인접한  $G_r=2.5$ 의 경우에는, 실린더가 좌우 벽면으로부터 받는 힘의 불균형이 시간이 지남에 따라서 증가하여, 실린더 후류에서는 주기적인 와의 홀림이 발생하고, 후류에서 짧은 Karman 와열 (two-row vortex street)이 생성되는 것을 Fig. 3(b)에서 확인할 수 있다. 그러나 실린더 근접 후류에서 벽에 인접한 와는 채널의 벽면과 작용하여 벽면에 약한 전단층을 생성된다.

Fig. 3(c)로부터 알 수 있듯이, 실린더가 벽면에 더욱 근접한 경우 실린더가 낙하 시 실린더 후류의 와홀림이 일찍 발생한다. 벽면의 영향과 와의 홀림에 의해 유발되는 힘의 비대칭성에 의해 초기에 와홀림이 발생된다.

특히,  $G_r=0.1$ 인 경우는, 실린더와 벽면 사이의 느린 유동에 기인한 높은 압력의 반발력으로 인해 실린더가 낙하 후 좌측(채널 중심)으로 급속히 밀려나는 것을 Fig. 3(d)에서 확인할 수 있다. 실린더가 채널 벽면에서 밀려나면서 채널의 중심 방향으로 수평방향 운동을 함에 따라 실린더 우측면에서 생성된 와는 좌측으로 급격히 기울어지면서 좌측면에서 발달된 와를 분계시킨다. 이후, 실린더 우측면의 양의 와는 좌측면에서 다시 발달된 음의 와에 의해서 분계되어지는 주기적인 양상을 보여 준다. 특히, 실린더의 우측면에서 분계되어져 나간 양의 와는 채널 벽면의 전단층에서 발달된 음의 와와 강하게 상호작용하여, 와의 말림(roll-up)이 지연되고 와의 길이는 다소 늘어나는 반면 크기는 좌측면의 와보다 작아진다.

3.2 수평 방향 힘의 변화

자유 낙하하는 실린더에 의해 유발되는 실린더 주위의 유동으로부터 실린더가 받는 수평방향 힘 (transverse force,  $F_x$ )의 시간에 따른 변화를 관찰함으로써 실린더의 수평방향 운동 특성을 분석하고자 한다. 일반적으로 실린더와 주위 유동의 연성을 고려할 때 실린더의 종속(terminal velocity)에 의해 무차원화된 항력 계수(drag coefficient)와 양력 계수(lift coefficient)가 사용된다. 그러나 실린더의 종속은  $\rho_r$ 에 의존하기 때문에 본 연구에서 고려한 서로 다른  $\rho_r$ 들에 대해 기준이 되는 종속을

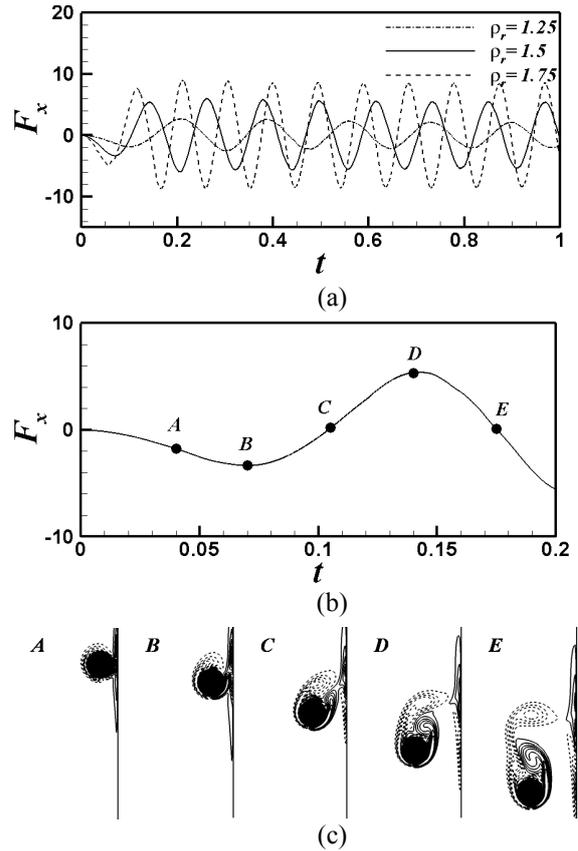
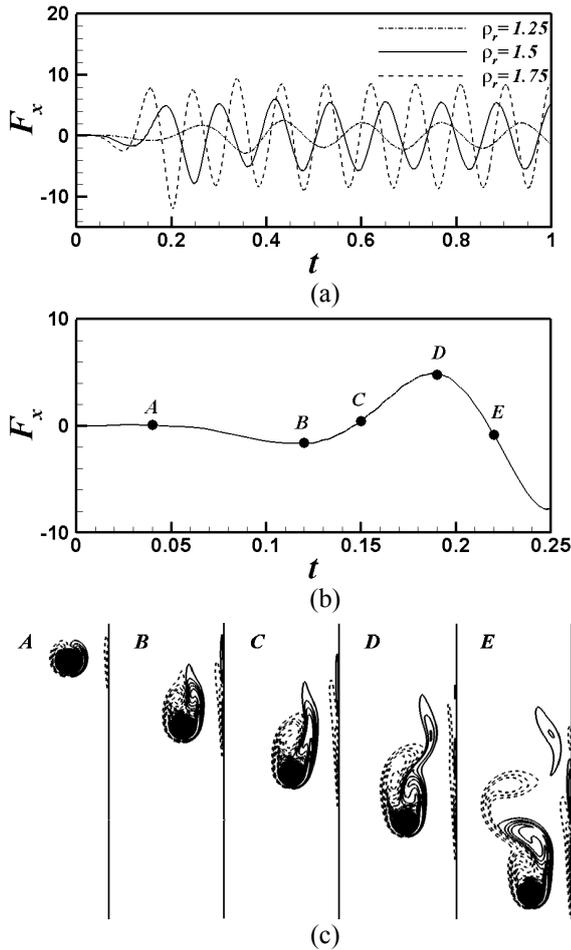


Fig. 4 (a) Time histories of transverse force for various density ratios at  $G_r=0.1$ , (b) Time history of transverse force for  $\rho_r=1.5$  at  $G_r=0.1$  at initial stage of freely falling and (c) instantaneous vorticity contours (Contour values range from -300 to 300 with 14 levels; Positive solid, Negative dashed))

결정하기 쉽지 않다. 따라서, 실린더가 받는 힘을 무차원화된 값으로 나타내기 어려우므로, 본 연구에서는 차원을 가지는 힘의 시간에 따른 거동과 이에 대응하는 유동장을 고려하여 실린더의 자유 낙하 시 수평방향 운동특성을 기술하고자 한다.

실린더와 채널 벽면간의 거리 차이 및 밀도비가 실린더가 받는 수평방향 힘과 유동에 미치는 영향을 고찰하기 위해서  $G_r=0.1$ , 1.0과 2.5의 각각의 경우에 대한  $F_x$ 의 시간 변동량과 순간 유동장을 Figs. 4, 5와 6에 각각 모사하였다.

Fig. 4(a)는  $G_r=0.1$ 에서  $\rho_r=1.25$ , 1.5와 1.75일 때 실린더가 받는 수평방향 힘의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 실린더가 자유 낙하를 시작하면 낙하 초기에  $\rho_r$ 에 관계없이 실린더가 음의 방향(채널 중심을 향하는 방향)의 힘을 받기 시작

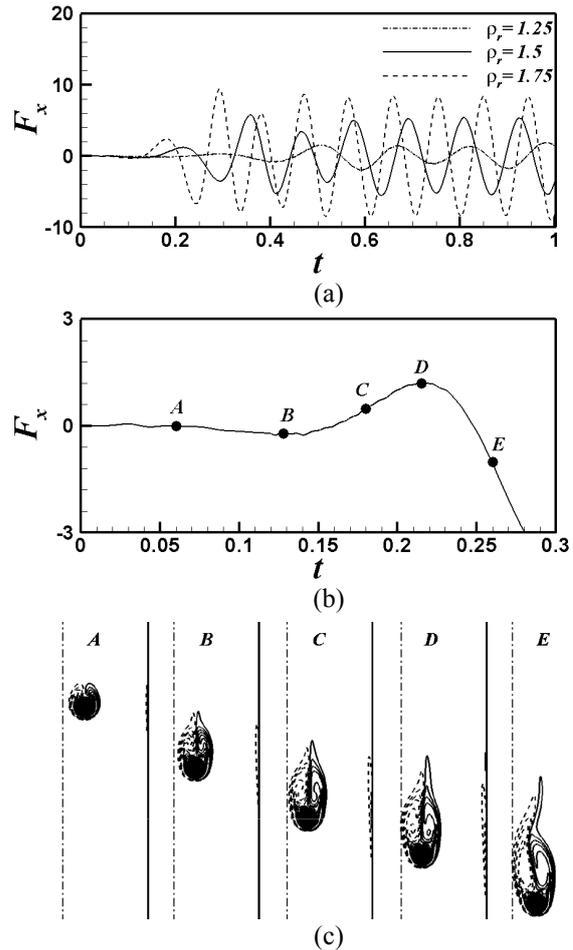


**Fig. 5** (a) Time histories of transverse force for various density ratios at  $G_r=1.0$ , (b) Time history of transverse force for  $\rho_r=1.5$  at  $G_r=1.0$  at initial stage of freely falling and (c) instantaneous vorticity contours (Contour values range from -300 to 300 with 14 levels; Positive solid, Negative dashed)

하고 시간에 따라 증가하다가 다시 감소 후 양의 방향(채널 벽면방향)을 힘 받는 시간에 따른 주기성을 보여준다.

서로 다른 밀도비들 중 대표적으로  $\rho_r=1.5$ 의 경우에 대해 낙하초기에 수평방향 힘의 변화와 이에 대응하는 유동장을 Figs. 4(b)와 4(c)에 각각 나타내었다. 즉, Fig. 4(c)는 Fig. 4(b)의 A, B, C, D 와 E의 시간에 해당하는 순간 와도 등고선을 보여주고 있다. 여기서, 실선과 점선은 양과 음의 와도를 각각 나타낸다.

낙하 직후인 시간 A에서 실린더와 벽간의 반발력에 의해 실린더가 음의 수평방향 힘을 받기 시작하면서 실린더가 채널의 중심방향으로 조금 밀



**Fig. 6** (a) Time histories of transverse force for various density ratios at  $G_r=2.5$ , (b) Time history of transverse force for  $\rho_r=1.5$  at  $G_r=2.5$  at initial stage of freely falling and (c) instantaneous vorticity contours (Contour values range from -300 to 300 with 14 levels; Positive solid, Negative dashed; Dashed dot: horizontal centre line of channel)

러난다. 실린더와 벽간의 초기 반발력이 최대가 되는 B시간에서는 실린더가 좌측으로 더욱 밀려가면서 확보된 채널 벽면과 실린더 사이에 공간으로 인해 실린더 우측에 양의 와가 발달되기 시작하는 한다. 이후 실린더는 관성력으로 인해 더욱 채널 중심으로 이동하며 수평방향으로 받는 힘은 점점 줄어든다. 수평방향의 힘이 거의 '0'에 가까워지는 C시간에서는 실린더의 좌측면에서 일찍 발달된 음의 와가 실린더의 우측면에서 늦게 발달되고 좌측으로 기울어진 양의 와와 거의 접하게 된다. 이때 채널 벽면에서 생성된 음의 와는 실린더 좌측의 양의 와와 상호작용하여 늘어난다.

D시간에서 실린더는 유체로부터 양의 수평방향 최대 힘을 받는다. 이때, 실린더 좌측의 음의 와는 우측의 양의 와에 의해서 분계되기 시작한다.  $G_r=1.0$ 의 경우와 같이, 실린더가 채널 벽면으로부터 다소 멀리 떨어진 위치에서 자유 낙하를 시작하게 되면 실린더의 운동에 영향을 주는 수평방향 힘 및 후류에서의 유동 분포는  $G_r=0.1$ 의 경우와는 확연한 차이를 보인다. 음의 크기를 가지는 수평방향 힘이 생성되는 시점은  $\rho_r$ 에 관계없이 거의 동일한 것을 Fig. 5(a)에서 확인할 수 있다.

수평방향 힘의 크기가 거의 '0'을 유지하는 시간 A에서 실린더 후류에는 한 쌍의 거의 대칭인 와가 발달하고 벽면에서는 음의 와가 생성된다. 실린더 후류에서 대칭을 이루던 와들 중 우측의 양의 와는 벽면의 음의 와와 상호작용을 하여 늘어나기 시작한다. 시간 C에서 보이는 것과 같이, 실린더 좌측에서 성장한 와가 우측에서 늘어지는 양의 와를 분계하기 시작함과 동시에 실린더는 양의 수평방향 힘을 받기 시작한다. 실린더 우측의 양의 와가 분계되기 직전인 시간 D에서 실린더에 영향을 주는 양의 수평방향 힘은 최대된다.

실린더 우측의 와가 좌측의 음의 와를 분계하기 직전인 시간 E에서 수평방향 힘은 거의 '0'이 되고 실린더는 벽면에 가장 인접하게 된다. 이와 같은 실린더의 운동과 주변 유동 특성의 변화에 의해 실린더 우측의 양의 와는 좌측의 음의 와를 시간 B~D에 비해 빠르게 분계시키게 되며,  $\rho_r=1.25$ , 1.5와 1.75의 경우 각각  $t \approx 0.35$ , 0.25와 0.2에서 가장 큰 음의 진폭이 형성되는 것을 Fig. 5(a)에서 확인할 수 있다.

실린더가 채널 벽면으로부터 멀리 떨어진  $G_r=2.5$ 의 경우, 와홀림이 발생하기 전까지 수평방향 힘은 거의 '0'의 값을 가지며, 시간에 따른 수평방향 힘의 변화는  $G_r=1.0$ 과 유사한 경향을 가진다. 실린더 후류에서 생성되는 대칭인 와는  $G_r=1.0$ 에 비해 오래 지속되며, 벽면에서는  $G_r=0.1$ , 1.0의 경우에 비해 작지만 음의 와가 형성되며, 실린더 후류에서 좌우 대칭인 상태로 발달하는 와들 중 우측의 양의 와는 채널 벽면의 음의 와와 상호작용을 통해 늘어짐을 Fig. 6(c)의 시간 C~E에서 확인할 수 있다.

3.3 수평 방향 궤적의 변화 및 안정 시간

Fig. 7(a)는  $G_r=0.1, 1.0, 2.5, 3.5$ ,  $\rho_r=1.25, 1.5, 1.75$

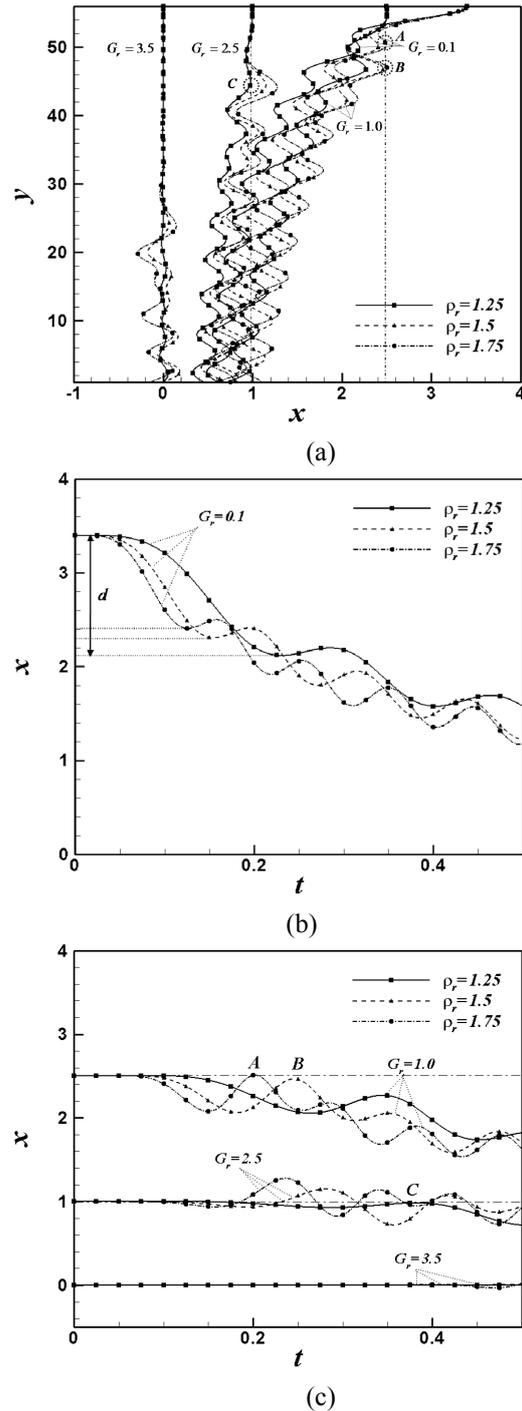


Fig. 7 (a) Trajectories of a circular cylinder at various gap ratio and density ratio on x-y plane, (b) time evolution of transverse trajectories of a circular cylinder at various density ratios for  $G_r=0.1$  at initial stage of freely falling and (c) time evolution of transverse trajectories of a circular cylinder at various density ratios for  $G_r=1.0, 2.5$  and  $3.5$  at initial stage of freely falling

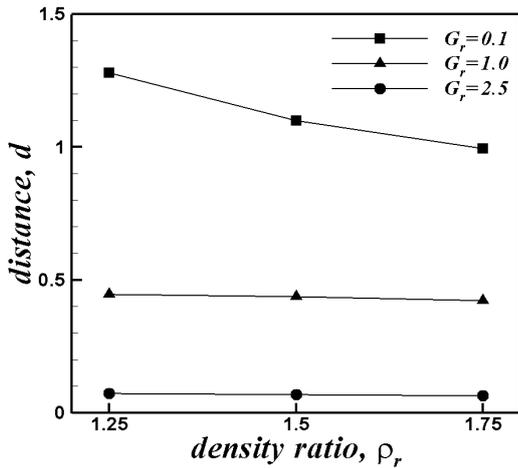


Fig. 8 Lateral distance of centre of cylinder due to the starting of vortex shedding at initial stage of free fall of cylinder

의 경우들에 대하여 xy 평면에서 실린더 중심의 낙하 궤적을 보여주고 있다. 수평방향 운동을 동반하기 이전까지 실린더는 각각의  $G_r$ 에 대하여  $\rho_r$ 에 관계없이 동일한 궤적을 형성하고, 동일한  $G_r$ 에서  $\rho_r$ 에 따른 실린더의 운동 패턴은 모두 유사한 경향을 보이고 있다. 본 연구에서 고려한 모든 경우에 대해 실린더의 중심의 궤적은 채널의 수평방향 중앙( $x=0$ )을 향하거나  $x=0$ 을 중심으로 진동한다. 실린더의 중심이 채널 벽으로 치우쳐 위치하게 되면 ( $G_r < 3.5$ ), 수평방향 진동 운동이  $G_r = 3.5$ 일 때에 비해 조기에 발생한다. 수평방향으로 진동하는 운동은  $\rho_r$ 에 따라 차이를 보이고 있지만 동일한 높이에서 시작된다. Fig. 7(b)와 (c)는  $\rho_r = 1.25, 1.5, 1.75$ 의 경우들에 대하여 (b)  $G_r=0.1$  그리고 (c)  $G_r=1.0, 2.5, 3.5$ 에서 실린더 중심의 시간에 따른 x방향 궤적의 변화를  $0 \leq t \leq 0.5$ 의 범위 내에서 보여주고 있다. Fig. 7(a)와 (c)에서 나타내어진 A, B 그리고 C는 자유 낙하 초기에  $\rho_r = 1.75, 1.5$  그리고 1.25의 밀도비를 가지는 실린더가 최초 위치로( $x_{c,t=0}$ ) 수평 이동한 경우를 나타내고 있다.  $G_r = 1.0$ 에서  $\rho_r = 1.5, 1.75$ 의 밀도비를 가지는 실린더의 궤적은 채널 중심 방향을 향하다가 최초 위치인  $x_{c,t=0} \approx 2.5, G_r \approx 1.0$ 의 위치로 복귀한 후 채널 중심을 향하여 다시 이동하며, 또한  $G_r = 2.5$ 에서  $\rho_r = 1.25$ 의 밀도비를 가지는 실린더는  $x_{c,t=0} \approx 1.0, G_r \approx 2.5$ 로 복귀한 후 채널 중심 방향으로 이동하게 된다. Fig. 7(b)에서 와홀림이 시작

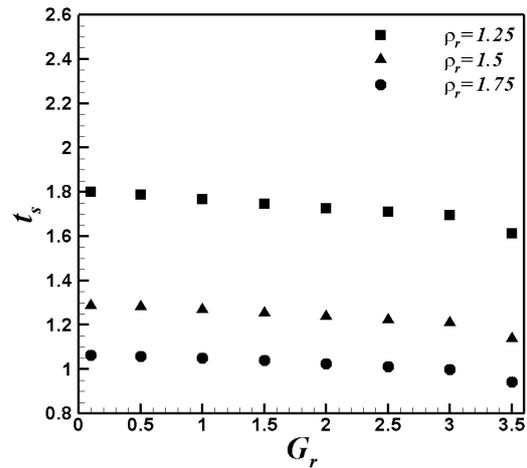


Fig. 9 Settling time of a circular cylinder at various gap ratios and density ratios

되면서 실린더의 중심이 채널의 중심 방향으로 이동한 거리를  $d$ 라고 하였을 때, 각 경우에 대한  $d$ 의 값을 Fig. 8에 나타내었다.  $G_r=0.1$ 의 경우 자유 낙하 초기에  $\rho_r$ 이 작은 실린더가 큰  $\rho_r$ 을 가지는 실린더에 비해 채널 중심 방향으로 많이 이동하지만,  $G_r=1.0$  및 2.5의 경우 밀도비에 따른 수평 이동 거리는 큰 차이가 없다. 그러나 와홀림이 실린더의 궤적에 지배적인 영향을 미치기 시작하면 큰  $\rho_r$ 를 가지는 실린더가 작은  $\rho_r$ 를 가지는 경우에 비하여 큰 수평방향 궤적을 형성하는 것을 Fig. 3과 Fig. 7로부터 확인할 수 있다.

Fig. 9는  $\rho_r$ 와  $G_r$ 에 따른 실린더의 안정 시간 (settling time,  $t_s$ )를 보여준다. 여기서 안정 시간은 실린더가 바닥에 도착하기까지 걸리는 시간을 의미한다.  $\rho_r$ 이 동일할 때 실린더가 채널의 중앙에 가까울수록  $t_s$ 가 작아진다. 또한  $G_r$ 이 고정되어 있을 경우  $\rho_r$ 이 클수록 빨리 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 고려된 모든  $\rho_r$ 에 대하여,  $G_r < 3.5$ 의 경우  $t_s$ 는  $G_r$ 과 선형 관계를 가진다. 그러나  $G_r = 3.5$ 에 위치한 실린더는  $G_r < 3.5$ 의 경우에 비해  $t_s$ 가 급격히 작아진다.

#### 4. 결론

밀폐된 수직 채널 내부에서 채널 벽으로부터 다양한 거리 차를 가지고 자유 낙하하는 원형 실린더의 2차원 운동을 가상 경계 격자 볼츠만 방법을 이용하여 수치 해석하였다. 본 연구에서 고려한

실린더와 벽과의 사이 간격( $G_r$ )은  $0.1 \leq G_r \leq 3.5$ 이고 실린더와 주변 유체의 밀도비( $\rho_r$ )는 1.25, 1.5와 1.75의 세 가지이다.

본 연구에서 고려된 모든  $G_r$ 에서  $\rho_r$ 이 클수록 큰 수평방향 힘의 영향을 받게 된다.  $G_r$ 이 작을수록, 즉 실린더의 초기 위치가 벽면에 가까울수록, 실린더와 벽면 사이에서 생성되는 전단유동으로 인해 유동의 불안정성이 조기에 발생하여 실린더 후류에 와홀림이 빨리 시작된다. 자유 낙하 초기에 비해 안정된 주기와 진폭을 가지는 와홀림에 의해 생성되는 수평방향 힘의 주기와 진폭은  $\rho_r$ 이 클수록 각각 주기는 짧아지고 진폭은 커지며, 본 연구에서 고려된 모든  $G_r$ 에서 유사한 경향을 보이고 있다. 자유 낙하하는 실린더 중심의 궤적의 변화는 실린더의 운동 특성을 보다 명확히 보여주었다. 본 연구에서 고려된 모든  $G_r$ 에 대해 실린더는 수평방향 주기 운동을 동반하고 채널의 수평방향 중심에 접근하면서 자유 낙하한다. 자유 낙하 초기에  $G_r$ 에 따른 실린더의 운동 궤적 특성은 다음과 같이 세가지로 요약된다.

(1)  $0.1 \leq G_r < G_{r,crit}$ 에서  $\rho_r$ 이 작은 실린더가 큰  $\rho_r$ 을 가지는 실린더에 비해 채널 중심 방향으로 큰 궤적을 형성한다.

(2)  $G_r = G_{r,crit}$ 에서 낙하 초기에 채널 중심 방향으로 이동한 실린더가 와홀림에 의해 최초 위치( $G_{r,crit}$ )로 복귀하는 궤적을 형성한다.

(3)  $G_{r,crit} < G_r \leq 3.5$ 에서는 와홀림에 의해 발생된 수평방향 힘의 영향이 지배적이며 큰 밀도를 가지는 실린더가 큰 수평방향 궤적을 형성한다.

본 연구로부터 얻어진  $G_{r,crit}$ 는  $\rho_r=1.25$ 의 경우,  $G_{r,crit} \approx 2.5$ ,  $\rho_r=1.5, 1.75$ 에 대해서는  $G_{r,crit} \approx 1.0$ 이다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. K20702000013-07E0200-01310).

## 참고문헌

(1) Cate, A. ten, Nieuwstad, C. H., Derksen, J.J. and Van den Akker, H. E. A., 2002, "Particle Imaging Velocimetry Experiments and Lattice-Boltzmann Simulations on a Single Sphere Settling Under

Gravity," *Phys. Fluids*, Vol.14, No.11, pp. 4012~4025.  
 (2) Horowitz, M. and Williamson, C. H. K., 2006, "Dynamics of a Rising and Falling Cylinder," *J. Fluids Struct.*, Vol.22, pp.837~843.  
 (3) Jenny, M., Dusek, D. and Bouchet, G., 2004, "Instabilities and Transition of a Sphere Falling or Ascending Freely in a Newtonian Fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol.508, pp.201~239.  
 (4) Veldhuis, C. H. J. and Biesheuvel, A., 2007, "An Experimental Study of the Regimes of Motion of Spheres Falling or Ascending Freely in a Newtonian Fluid," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.33, pp.1074~1087.  
 (5) Namkoong, K., Choi and H. Yoo, J. Y., 2004, "Numerical Analysis of Two-Dimensional Motion of a Freely Falling Circular Cylinder in an Infinite Fluid," *Tran. of the KSME B*, Vol. 28, No.6, pp.713~725.  
 (6) Namkoong, K., Yoo, J. Y. and Choi, H., 2008, "Numerical Analysis of Two-Dimensional Motion of a Freely Falling Circular Cylinder in an Infinite Fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol.604, pp.33~53.  
 (7) Ladd A. J. C., 1994, "Numerical Simulation of Particulate Suspensions via a Discretized Boltzmann Equation. Part 1. Theoretical Foundation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 271, pp. 285~309.  
 (8) Ladd A. J. C., 1994, "Numerical Simulation of Particulate Suspensions via a Discretized Boltzmann Equation. Part 2. Numerical Results," *J. Fluid Mech.*, Vol. 271, pp. 311~339.  
 (9) Ladd A. J. C. and Verberg R., 2001, "Lattice Boltzmann Simulations of Particle-Fluid Suspensions," *J. Stat. Phys.*, Vol. 14, pp. 1191~1251.  
 (10) Jones, R. B. and Kutteh, R., 1999, "Sedimentation of Colloidal Particles Near a Wall: Stokesian Dynamics Simulations," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol.1, pp.2131~2139.  
 (11) Feng J., Hu H.H. and Joseph D.D., 1994, "Direct Simulation of Initial Value Problems for the Motion of Solid Bodies in a Newtonian Fluid Part 1. Sedimentation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 261, pp. 95~134.  
 (12) Aidun C. K., Lu Y. and Ding E.J., 1998, "Direct Analysis of Particulate Suspensions with Inertia Using the Discrete Boltzmann Equation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 373, pp. 287~311.  
 (13) Aidun C. K., Lu Y. and Ding E.J., 2003, "Dynamics

- of Particle Sedimentation in a Vertical Channel: Periodic-Doubling Bifurcation and Chaotic Stat,” *Phys. Fluids*, Vol.15, No.6, pp.1612~1621.
- (14) Glowinski R., Pan T. W., Hesla T. I. and Joseph D. D., 1999, “A Distributed Lagrange Multiplier/Fictitious Domain Method for Particulate Flows,” *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 25, pp.755-794.
- (15) Patankar, N. A., Singh, P., Joseph, D. D., Glowinski, R. and Pan, T. W., 2000, “A New Formulation of the Distributed Lagrange Multiplier/Fictitious Domain Method for Particulate Flows,” *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 26, pp.1509~1524.
- (16) Glowinski R., Pan T. W., Hesla T. I., Joseph D. D. and Periaux J., 2001, “A Fictitious Domain Approach to the Direct Numerical Simulation of Incompressible Viscous Flow Past Moving Rigid Bodies: Application to Particulate Flow,” *J. Comp. Phys.*, Vol. 169, pp. 363~426.
- (17) Feng Z.G and Michaelides E. E., 2004, “The Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method for Solving Fluid-Particles Interaction Problems,” *J. Comp. Phys.*, Vol. 195, pp. 602~628.
- (18) Uhlmann M., 2005, “An Immersed Boundary Method with Direct Forcing for the Simulation of Particulate Flows,” *J. Comp. Phys.*, Vol. 209, pp. 448~476.
- (19) Yu, Z., Wachs, A. and Peysson, Y., 2006, “Numerical Simulation of Particle Sedimentation in Shear-Thinning Fluids with a Fictitious Domain Method,” *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 136, pp. 126~139.
- (20) Yu, Z. and Shao, X., 2007, “A Direct-Forcing Fictitious Domain Method for Particulate Flows,” *J. Comp. Phys.*, Vol.227, pp.292~314.
- (21) Wan, D. and Turek, S., 2007, “An Efficient Multigrid-FEM Method for the Simulation of Solid-Liquid Two Phase Flows,” *J. Comp. Appl. Math.*, Vol.203, pp.561~580.
- (22) Wang, Z., Fan, J. and Luo, K., 2008, “Combined Multi-Direct Forcing and Immersed Boundary Method for Simulating Flows with Moving Particles,” *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 34, pp.283~302.
- (23) Chen, S. and Doolen. G. D., 1998, “Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 30, pp. 329~364.
- (24) Buick J.M. and Greated C.A., 2000, “Gravity in a Lattice Boltzmann Model,” *Phys. Rev. E*, Vol. 61, No. 5, pp. 5307~5320.
- (25) Guo, Z., Zheng, C. and Shi, B., 2002, “Discrete Lattice Effects on the Forcing Term in the Lattice Boltzmann Method,” *Phys. Rev. E*, Vol.65, pp.046308-1~6.
- (26) Ding, E. and Aidun, C. K., 2000, “The Dynamics and Scaling Law for Particles Suspended in Shear Flow with Inertia,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 423, pp. 317~344.
- (27) Zettner, C. M. and Yoda, M., 2001, “Moderate-Aspect-Ratio Elliptical Cylinders in Simple Shear with Inertia,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 442, pp. 241~266.