

# 무한 유체에서 자유 낙하하는 원형 실린더의 2 차원 운동에 관한 수치해석

남궁각\* · 최형권\*\* · 유정열†

(2004 년 2 월 9 일 접수, 2004 년 4 월 9 일 심사완료)

## Numerical Analysis of Two-Dimensional Motion of a Freely Falling Circular Cylinder in an Infinite Fluid

Kak Namkoong, Hyounggwon Choi and Jung Yul Yoo

**Key Words :** Freely Falling Circular Cylinder(자유 낙하하는 원형 실린더), Combined Formulation(결합 공식화), Vortex Shedding(와류 shedding), *St-Re* Relationship(스트롤수-레이놀즈수 관계), Thought Experiment(사고 실험), Transverse Motion(가로방향 운동)

### Abstract

The two-dimensional motion of a freely falling circular cylinder in an infinite fluid is investigated numerically using combined formulation. The effect of vortex shedding on the motion of a freely falling cylinder is clearly seen: as the streamwise velocity of the cylinder increases due to gravity, the periodic vortex shedding induces a periodic motion of the cylinder. This motion in turn affects the flow field, which is manifested by the generation of the angular velocity vector of the cylinder parallel to the cross product of the gravitational acceleration vector and the transverse velocity vector of the cylinder. A correlation of *St-Re* relationship for a freely falling circular cylinder is drawn from the present results. The Strouhal number for a freely falling circular cylinder is found to be smaller than that for a fixed circular cylinder when the two Reynolds numbers based on the streamwise terminal velocity of a freely falling circular cylinder and the free stream velocity of a fixed one are the same. From "thought experiments", it is shown that the transverse motion of the cylinder plays a crucial role in reducing the Strouhal number and has an effect of reducing the Reynolds number from the viewpoint of the pressure coefficient. The mechanism of this reduction in the Strouhal number is revealed by the fact that the freely falling cylinder experiences a smaller lift force than the fixed one due to the transverse motion resulting in the retardation of the vortex shedding.

### 1. 서 론

유체와 구조물 사이의 상호작용은 많은 실제 공학 문제에서 발생하며 이는 구조물의 응답과 안정성에 중대한 영향을 미친다. 예를 들면, 유체-구조물 상호작용(Fluid-Structure Interaction, FSI)에 관한

연구는 항공기 날개의 안정성과 응답특성, 바람에 대한 교각과 고층건물의 응답특성, 터빈과 압축기 블레이드의 진동, 열교환기의 진동, 근해 구조물, 액체나 기체를 저장하는 탱크, 배관시스템, 원자로, 동맥을 흐르는 혈류, 폐를 통하는 공기유동 등에서 매우 중요한 비중을 차지한다.<sup>(1,2)</sup>

최근에 이르러 컴퓨터 계산 능력의 발달로 인하여 전산유체역학과 전산구조역학이 크게 발전하였고, 이에 따라 유체의 유동에 대한 운동방정식과 구조물에 대한 운동방정식을 결합하여 해를 구하는 시도가 이루어져왔다. 그러나 복잡한 유체-구조물 상호작용을 단순화나 모델링 없이 해석하기

\* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부, 현재 소속 삼성종합기술원 MEMS Lab.

\*\* 회원, 서울산업대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail: jyoo@plaza.snu.ac.kr

TEL: (02)-880-7112 FAX: (02)-883-0179

에는 컴퓨터 계산능력이 아직까지는 부족한 상황이다. 이런 이유로 대부분의 연구들에서 유체-구조물 상호작용이 복잡한 경우에는 유체의 유동을 포텐셜 유동으로 간주하거나 Euler 방정식으로 해석하였고, 유체-구조물 상호작용이 단순한 경우에 한하여 유체의 유동을 Navier-Stokes 방정식으로 해석하였다. 최근에는 고유직교분해(Proper Orthogonal Decomposition, POD)와 같이 유동장을 유동의 고유 모드들의 합으로 나타내어 몇몇 중요한 고유 모드를 구하는 감소차수모델(Reduced-Order Models, ROMs)을 사용하는 연구들도 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup>

한편, Strouhal<sup>(3)</sup>이 원형 막대기를 회전시킬 때 발생하는 소리의 주파수를 측정 한 이후, 원형 실린더 주위의 후류 유동에 대한 연구는 수많은 연구자들에 의해서 진행되어왔고, 정지한 실린더 후류에서 와류 동역학에 대한 최근의 연구 성과들은 Williamson<sup>(4)</sup>에 의해 정리된 바 있다. 또한 실린더가 받는 항력이나 양력을 제어하는 관점에서 회전하는 원형 실린더 주위의 유동에 대해서도 많은 연구가 이루어져 왔다. 뿐만 아니라 Tacoma 해협 다리가 붕괴된 원인이 공기역학적으로 유도된 자기 여기(self-excitation)로 밝혀지면서<sup>(2)</sup> 진동하는 실린더 주위의 유동에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

또 다른 한편, 자유 낙하하는 구의 운동에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 실험적,<sup>(5,6)</sup> 수치적으로<sup>(7,8)</sup> 이루어졌지만, 자유 낙하하는 실린더에 대한 상세한 연구는 이루어지지 않았다. 비록 Hu 등,<sup>(9)</sup> Feng 등,<sup>(10)</sup> 그리고 Choi<sup>(11)</sup>가 채널에서 자유 낙하하는 원형 실린더 주위의 유동에 대해 성긴 격자를 사용하여 수치계산을 수행하였지만, 실험장치 제작의 어려움으로 인해 문헌에서 실험적 연구는 찾아볼 수 없다. Hu 등<sup>(9)</sup>과 Choi<sup>(11)</sup>는 레이놀즈수(Reynolds number,  $Re$ )가 같은 경우, 정지한 원형 실린더 주위 유동에서보다, 채널에서 자유 낙하하는 원형 실린더 주위 유동에서 조금 낮은 값의 스트롤수(Strouhal number,  $St$ )를 얻었는데, 그 원인에 대해서 설명하지 않았고 다만 정지한 원형 실린더 주위 유동에서의 스트롤수와 잘 일치한다고 하였다. 한편, Chen 등,<sup>(12)</sup> Lei 등,<sup>(13)</sup> 그리고 Zovatto와 Pedrizzetti<sup>(14)</sup>는 채널 벽이 있는 경우, 벽이 없는 경우에 비해 낮은 스트롤수를 보고한 바 있다. 저자들이 아는 바에 의하면, 무한 유체에서 자유 낙하하는 원형 실린더 유동에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았다. 실린더에서의 와류 shedding은 실린더의 운동에 영향을 줄 것이고 다시 이 실린더의 운동은 유동장에 영향을 줄 것이다. 이러한 유체-구조물 상호작용으로 인해 자유 낙하하는 원형 실

린더 주위 유동에서의 스트롤수는 실린더 운동의 영향을 받을 것이 분명하다. 본 연구에서는 유체-구조물 상호작용의 관점에서 무한 유체에서 자유 낙하하는 원형 실린더의 운동을 고찰하고자 한다. 이를 위해 P2P1 Galerkin 유한요소법<sup>(15)</sup>과 함께 ALE 알고리즘<sup>(16)</sup>을 사용하여 Navier-Stokes 해와 입자 운동방정식의 해를 결합 공식화를 통해 구한다. 또한 전단응력의 오차를 추정하여 오차가 큰 곳을 조밀화 시키는 적응격자 조밀화(adaptive mesh refinement)<sup>(17)</sup> 기법을 사용하여 임의적이지만 체계적으로 입자 표면과 후류 부분에 많은 절점을 둔다. 전체행렬의 AILU 예조건화(Adapted ILU preconditioning)<sup>(18)</sup>를 통해 계산 시간을 단축하며 예조건화의 성능을 향상시키기 위해 전체 행렬의 밴드폭을 최소화 시키는 방법으로 변수 재배열 방법<sup>(18)</sup>과 요소 재배열 방법<sup>(18)</sup>을 사용한다. 레이놀즈수를 변화시켜가며 얻은 결과를 통해  $St-Re$  관계식을 제시한다. 동일한  $Re$ 에 대해서, 정지된 실린더 주위 유동에서의 스트롤수와 비교하고 사고 실험(thought experiment)을 통해 스트롤수가 줄어드는 메커니즘을 제시한다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 유체에 대한 지배방정식과 유한요소 공식화

비압축성 유동에 대한 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식이다. 본 연구와 같은 유체/구조물 상호작용 문제에서는 구조물이 움직임에 따라 유체에 대한 격자도 같이 움직여야 하는데 이를 위해 ALE 알고리즘을 사용하고 격자의 속도( $\mathbf{u}_m$ )는 Laplace 방정식을 적당한 경계조건과 함께 푼다.<sup>(16)</sup> ALE 알고리즘을 사용한 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식에 P2P1 Galerkin 유한요소법과 발산정리를 적용하면 다음의 식을 얻는다.

허용되는 모든 함수  $\mathbf{W} \in V$ 와  $q \in P$ 에 대해서 다음의 식을 만족하는  $\mathbf{u} \in H^1(\Omega)$ 와  $p \in L^2(\Omega)$ 를 찾는다.

$$\int_{\Omega} \mathbf{W} \cdot \rho_f \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \{(\mathbf{u} - \mathbf{u}_m) \cdot \nabla\} \mathbf{u} \right) + \nabla \mathbf{W} : \tilde{\sigma} \, d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{W} \cdot (\tilde{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \, d\Gamma + \int_{\Omega} q(\nabla \cdot \mathbf{u}) \, d\Omega = 0. \quad (1)$$

위에서  $\mathbf{W}$ 는 속도에 대한 가중함수(weighting function) 벡터로서  $\mathbf{W} = \sum_i (\alpha_i N_i \mathbf{e}_x + \beta_i N_i \mathbf{e}_y + \gamma_i N_i \mathbf{e}_z)$

이고  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 는 임의의 상수,  $N_i$ 는  $i$ 번 절점에서 속도에 대한 형상함수,  $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ 는 각각  $x$ 방향,  $y$ 방

향,  $z$  방향의 단위 벡터),  $q$  는 압력에 대한 가중함 수로서  $q = \sum_i \lambda_i M_i$  인데( $\lambda_i$  는 임의의 상수,  $M_i$  는  $i$  번 절점에서 압력에 대한 형상함수), 본 연구에서는 P2P1 유한요소법을 적용하므로  $N_i$  와  $M_i$  는 각각 2 차와 1 차 다항식으로 표현된다. 또한  $V = \{ \mathbf{W} \mid \mathbf{W} \in H^1(\Omega), \mathbf{W} = \mathbf{0} \text{ on } \Gamma_g \}, P = \{ q \mid q \in L^2(\Omega) \}$ ,  $\Omega$  와  $\Gamma$  는 각각 유체 영역과 그 경계,  $\Gamma_g$  는 Dirichlet 경계 조건이 주어지는 유체 경계이다.  $\rho_f$  는 유체의 밀도,  $\mathbf{u}$  는 유체의 속도 벡터,  $\tilde{\sigma}$  는 응력 텐서로  $\tilde{\sigma} = -p\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\tau}$  인데,  $p$  는 압력,  $\tilde{\mathbf{I}}$  와  $\tilde{\tau}$  는 각각 항등 텐서(identity tensor)와 전단응력 텐서이다. Stokes 가정에 의해  $\tilde{\tau} = \mu[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T]$  로 표현되고,  $\mu$  는 유체의 점성계수이다.  $\mathbf{n}$  은 유체 경계  $\Gamma$  에 수직인 외향 단위법선 벡터이다. 시간 적분으로 2 차 정확도를 갖고 무조건적으로 안정적인 Crank-Nicolson 방법을 적용하여 얻어진 요소행렬을 조립하면 다음과 같은 전체행렬을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} A_{uu} & A_{uv} & B_u \\ A_{vu} & A_{vv} & B_v \\ (B_u)^T & (B_v)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_u \\ \mathbf{f}_v \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2.2 실린더에 대한 운동 방정식

실린더에 대한 운동 방정식은 병진운동에 대해서는 Newton 의 제 2 법칙이고 회전운동에 대해서는 Euler 의 방정식으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_p \frac{d\mathbf{V}_p}{dt} &= \mathbf{F}_p + \mathbf{G}_p, \\ \frac{d(\mathbf{I}_p \boldsymbol{\omega}_p)}{dt} &= \mathbf{T}_p. \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $m_p$  와  $\mathbf{I}_p$  는 각각 실린더의 질량과 질량 관성 모멘트 행렬,  $\mathbf{V}_p (= [U_p, V_p, W_p])$  와  $\boldsymbol{\omega}_p$  는 각각 실린더의 병진속도 벡터와 회전 각속도 벡터,  $\mathbf{G}_p$  는 체적력,  $\mathbf{F}_p$  와  $\mathbf{T}_p$  는 각각 유체가 실린더에 작용하는 힘과 모멘트 이다. 반지름이  $a$ , 길이가  $L$ , 밀도가  $\rho_s$  인 원형 실린더에 대해서,  $m_p = \rho_s \pi a^2 L$  이고  $\mathbf{I}_p = \text{Diag}[m_p a^2/4 + m_p L^2/12, m_p a^2/4 + m_p L^2/12, m_p a^2/2]$  이다.

$\Gamma_p$  를 실린더의 표면이라고 하면, 유체가 실린더에 작용하는 힘  $\mathbf{F}_p$  와 모멘트  $\mathbf{T}_p$  는 다음과 같이  $\Gamma_p$  에서 유체에 의한 응력을 적분함으로써 구해진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_p &= - \int_{\Gamma_p} \tilde{\sigma} \cdot \mathbf{n} d\Gamma, \\ \mathbf{T}_p &= - \int_{\Gamma_p} (\mathbf{x} - \mathbf{X}_p) \times (\tilde{\sigma} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 (-) 부호는 단위법선 벡터  $\mathbf{n}$  의 방향이 실린더 안쪽을 향하기 때문이다. 실린더의 도심  $\mathbf{X}_p$  와 각도  $\Theta_p$  는 다음과 같이 전진 유한 차분법을 사용하여 외재적으로 갱신된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_p(t_{n+1}) &= \mathbf{X}_p(t_n) + \Delta t \mathbf{V}_p(t_n), \\ \Theta_p(t_{n+1}) &= \Theta_p(t_n) + \Delta t \omega_p(t_n). \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 결합 공식화 (Combined formulation)

유한요소법에서 임의의 요소 내에서 정의된 모든 형상함수들의 합이 1 이 되는 특성을 이용하면 실린더에 작용하는 유체력은 다음과 같이 표시된다.

$$\mathbf{F}_p = - \int_{\Gamma_p} \tilde{\sigma} \cdot \mathbf{n} d\Gamma = - \sum_{i \in \Gamma_p} \int_{\Gamma_p} N_i (\tilde{\sigma} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma. \quad (6)$$

한편, 식 (1)을 사용하면 실린더에 작용하는 유체력은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_p &= - \sum_{i \in \Gamma_p} \int_{\Omega} [N_i \rho_f \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \{(\mathbf{u} - \mathbf{u}_m) \cdot \nabla\} \mathbf{u} \right) \\ &\quad + \nabla N_i \cdot \tilde{\sigma}] d\Omega. \end{aligned} \quad (7)$$

체적력을 무시하고 식 (7)을 식 (3)의 첫번째 식에 대입하면 실린더에 대한 운동 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_p \frac{d\mathbf{V}_p}{dt} &= - \sum_{i \in \Gamma_p} \int_{\Omega} [N_i \rho_f \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \{(\mathbf{u} - \mathbf{u}_m) \cdot \nabla\} \mathbf{u} \right) \\ &\quad + \nabla N_i \cdot \tilde{\sigma}] d\Omega. \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)의 우변은 Navier-Stokes 방정식에 P2P1 Galerkin 유한요소법을 적용하여 얻어진 것으로 이미 이산화된 양이다. 결국 식 (8)과 같이 실린더에 대한 운동 방정식을 풀 때, 유체가 실린더에 작용하는 힘을 외재적으로 따로 구하지 않고 내재적으로 처리하여 Navier-Stokes 방정식과 실린더의 운동 방정식을 결합시켜서 풀 수 있는데, 이러한 방법을 결합 공식화라고 하며, Hesla<sup>(19)</sup>에 의해 유체-입자계에서 처음으로 제안되었다. 유체와 입자를 하

나의 계로 본다면 유체가 입자에 작용하는 힘은 내부력이기 때문에 이것은 당연한 결과이다.<sup>(16)</sup> 식 (1)과 식 (8)을 결합하여 모든 요소행렬을 조립하면 유체-실린더 계에 대해서 다음의 전체행렬을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} A_{uu} & A_{uv} & B_u & C_{uU_p} & 0 & C_{u\omega_p} \\ A_{vu} & A_{vv} & B_v & 0 & C_{vV_p} & C_{v\omega_p} \\ (B_u)^T & (B_v)^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{U,\mu} & D_{U,\nu} & E_{U,p} & m_p & 0 & 0 \\ D_{V,\mu} & D_{V,\nu} & E_{V,p} & 0 & m_p & 0 \\ D_{\omega,\mu} & D_{\omega,\nu} & E_{\omega,p} & 0 & 0 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ p \\ U_p \\ V_p \\ \omega_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ 0 \\ g_{U_p} \\ g_{V_p} \\ g_{\omega_p} \end{bmatrix} \quad (9)$$

위에서 [C]는 실린더의 표면 위에서 만족되어야 하는 운동학적 구속조건으로 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times (\mathbf{x} - \mathbf{X}_p). \quad (10)$$

계산 시간을 단축하기 위해 식 (9)를 AILU 예조건화<sup>(18)</sup> 기법과 Bi-CGSTAB<sup>(20)</sup> 반복 해법을 사용하여 풀었다. 또한, AILU 예조건화의 성능을 향상시키기 위해 효율적인 변수 재배열 방법<sup>(18)</sup>과 Cuthill-McKee<sup>(20)</sup> 알고리즘을 사용하는 요소 재배열 방법<sup>(18)</sup>을 사용하여 전체 행렬의 밴드폭을 줄였다. 결합 공식화에 대해 좀 더 자세한 내용은 Choi,<sup>(11)</sup> Hu 등,<sup>(16)</sup> 남궁각<sup>(21)</sup>을 참조하기 바란다.

2.4 외재적-내재적 기법(explicit-implicit scheme)

실린더의 위치와 각도는 식 (5)와 같이 외재적으로 갱신되고, 유체 영역의 절점도 격자 속도를 사용하여 다음과 같이 외재적으로 갱신된다.

$$\mathbf{x}(t_{n+1}) = \mathbf{x}(t_n) + \Delta t \mathbf{u}_m(t_n). \quad (11)$$

한편, 유동장과 실린더의 속도는 식 (9)와 같이 내재적으로 결정되는데, 이렇게 유체-구조물 계를 푸는 방식을 외재적-내재적 기법<sup>(9,16,21)</sup>이라고 한다. 본 연구에서는 격자속도를 매 반복계산마다 Laplace 방정식을 풀어서 구하므로 격자속도도 내재적으로 구하게 된다.

2.5 적응격자 조밀화(adaptive mesh refinement)

적응격자 조밀화는 구한 해의 오차를 추정하여 오차가 큰 부분의 격자를 조밀화 시키는 방법이다. 본 연구에서 오차는 계산으로 얻어진 응력분포와 그것의 최소오차자승법(least square method)으로 얻어

진 응력분포와의 차이의  $L_2$  norm 으로 추정한다.<sup>(17)</sup> 조밀화 방법은 주변 요소의 분할 유무에 따라 기존의 요소를 2~4개로 나누는 단순 분할법을 사용하였다.<sup>(21)</sup> 격자를 조밀화 시킨 후에는 다시 한번 요소 재배열 방법을 적용하여 커진 밴드폭을 최소화 시켰다. 초기의 격자와 10번의 적응격자 조밀화를 한 후의 격자를 확대하여 Fig. 1에, 각각의 격자에서 정규화된 오차를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)와 (b)에서 오차의 크기가 다른데, Fig. 2(a)에서 가장 낮은 오차가 Fig. 2(b)에서 가장 큰 오차보다 더 큼을 볼 수 있다. 또한 Fig. 2(b)에서 등오차선의 모양이 와류 채딩의 모양과 매우 흡사함을 볼 수 있는데, 전단응력의 오차를 오차의 판단기준으로 삼은 것을 생각해 볼 때 당연한 결과이다.

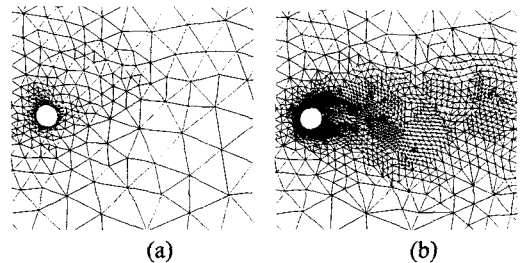


Fig. 1 (a) Initial mesh and (b) mesh after 10 refinements

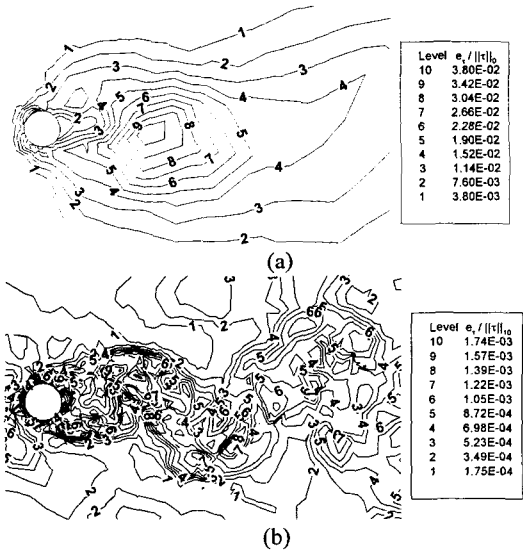


Fig. 2 Contour plots of error normalized by the norm of shear stress on the (a) initial mesh and (b) mesh after 10 refinements

### 3. 결과

#### 3.1 코드의 검증

본 연구에서 개발된 수치해석 코드의 검증을 위해 정지한 원형 실린더 주위의 층류 유동과 채널에서 자유 낙하하는 원형 실린더의 2차원 운동에 적용하였다.

##### 3.1.1 정지한 원형 실린더 주위의 층류 유동

서론에서 언급했듯이 정지한 원형 실린더 주위의 층류 유동은 이미 많은 연구자들에 의해 연구되어 그 자료가 문헌에 잘 정리되어 있다. 자유흐름 속도( $U_\infty$ ), 실린더의 직경( $D$ ), 그리고 유체의 동점성계수( $\nu$ )를 기준으로 한 레이놀즈수( $Re = U_\infty D / \nu$ )가 190 이하일 때, 정지한 원형 실린더의 후류는 2차원으로 남아있다고 알려져 있다.<sup>(22, 23)</sup>

레이놀즈수가 60, 80, 100, 120, 140, 160 인 6개의 경우에 대해서 2차원 유동에 대한 수치계산을 수행하였는데, 계산영역은 스트롤수  $St (= fD/U_\infty)$ ,  $f$ 는 와류가 떨어지는 주파수를 정확히 예측하기 위하여 권기영과 최해천<sup>(24)</sup>을 참조하여  $x$ 방향으로  $70D$ (실린더의 상류쪽으로  $20D$ , 하류쪽으로  $50D$ ),

$y$ 방향으로는  $100D$ (실린더 위아래로 각각  $50D$ ) 만큼 잡았고, 무차원화된 시간간격( $\Delta t U_\infty / D$ )은 모든 경우에 0.05를 사용했다. 29번의 적응격자 조밀화 후 전체 절점의 수는 25386개, 전체 요소의 수는 12584개였다. 입구에서는 균일속도 조건을 주었고, 위아래 경계와 하류 경계에서는 영응력(traction-free) 조건을 주었다.  $Re = 100$  일 때 사용된 격자와 경계조건, 등압력선, 등와도선을 각각 Fig. 3(a), (b), (c)에 나타내었는데, Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에서 Kármán 와류가 완전히 발달한 것을 확인할 수 있으며  $St$ 는 0.1653으로 다른 연구자들의 결과와 잘 일치한다.  $Re = 60, 160$ 에서, 와류가 떨어지는 한 주기 동안 시간평균한, 실린더의 표면을 따른 압력계수를 권기영과 최해천<sup>(24)</sup>의 결과와 비교하여 Fig. 4에 나타내었는데, 두 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다.

수치계산 결과로부터 Fey 등<sup>(25)</sup>과 Williamson과 Brown<sup>(22)</sup>이 제안한 다음의 식을 이용하여 최소오차자승법으로 계수  $A, B$ 를 구해서 Table 1에 비교하였는데, 1%이내로 잘 일치함을 볼 수 있다.

$$St = A + \frac{B}{\sqrt{Re}} \tag{12}$$

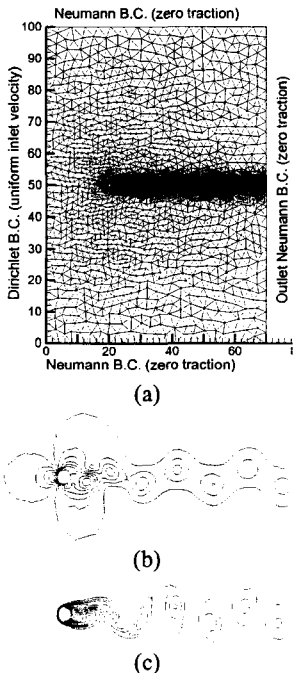


Fig. 3 (a) Computational mesh and boundary conditions, (b) instantaneous pressure contours, and (c) instantaneous vorticity contours at  $Re = 100$

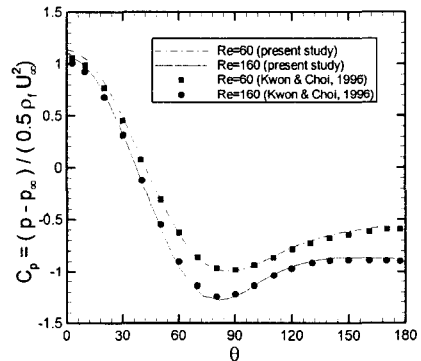


Fig. 4 Comparisons of time-averaged pressure coefficients along the cylinder surface at  $Re = 60$  and 160 with the results of Kwon and Choi<sup>(24)</sup>

Table 1 Comparison of the coefficients in eq. (12) for  $St-Re$  relation with experimental results

	A	B
Fey <i>et al.</i> <sup>(25)</sup>	0.2684	-1.0356
Williamson and Brown <sup>(22)</sup>	0.2665	-1.0180
Present result	0.2672	-1.0162

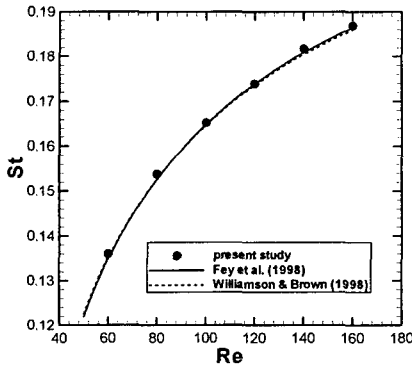


Fig. 5 Comparison of  $St-Re$  relation for two-dimensional laminar flow around a fixed circular cylinder with experimental results

Fig. 5에 식 (12)로 나타내어지는  $St-Re$  관계식을 Fey 등<sup>(25)</sup>과 Williamson 과 Brown<sup>(22)</sup>의 결과와 비교하였는데, 역시 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

3.1.2 채널에서 자유 낙하하는 원형 실린더의 2차원 운동

앞의 3.1.1항에서는 정지한 실린더 주위의 층류 유동에 대해 본 연구에서 사용된 수치해석 코드를 검증했다. 하지만 본 연구의 목적은 유체-구조물 상호작용의 관점에서, 무한 유체에서 자유 낙하하는 실린더의 운동에 대해 고찰하는 것이므로 실린더가 움직이는 경우에 대해서도 검증을 하여야 한다. 이를 위해 Feng 등<sup>(10)</sup>의 연구에서 사용한 조건과 동일한 조건을 사용하여 2차원 채널에서 자유 낙하하는 실린더에 대한 수치계산을 수행하였다. 즉,  $D=0.1\text{ cm}$ , 채널 폭  $W=4D$ , 채널 길이  $L=40D$ , 유체의 밀도  $\rho_f=1.0\text{ g/cm}^3$ , 유체의 동점성계수  $\nu=0.01\text{ cm}^2/\text{s}$ , 중력가속도  $g_x=-981\text{ cm/s}^2$ 이고, 실린더의 밀도  $\rho_s$ 가  $1.03\text{ g/cm}^3$ 과  $1.003\text{ g/cm}^3$ 인 두 경우에 대해서 수치계산을 수행하였다. 무차원화된 시간간격  $\nu \Delta t/D^2$ 은 두 경우에 대해 모두 0.01로 주었고, 실린더는 초기에 아래 벽으로부터  $0.19W$ 만큼, 입구에서는  $10D$ , 출구에서는  $30D$ 만큼 떨어져 있다. 채널의 입구와 채널 벽에서 속도를 0으로 주었고 출구에서는 무응력 조건을 주었다. 본 연구에서 사용한 채널과 실린더의 개략도를 Fig. 6에 나타내었다.

중속을 기준으로 한 레이놀즈수는  $\rho_s = 1.003\text{ g/cm}^3$ 일 때에는 1.04,  $\rho_s = 1.003\text{ g/cm}^3$ 일 때에는 8.45로 구해졌다. Fig. 7에 실린더의 궤적을 Feng 등<sup>(10)</sup>의 결과와 비교하였는데, 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 레이놀즈수가 매우 작기 때문에

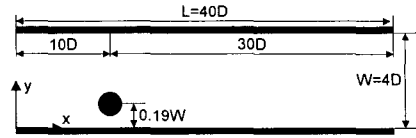


Fig. 6 Schematic diagram of a sedimenting cylinder in a channel

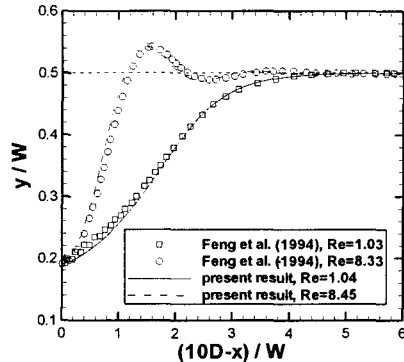


Fig. 7 Comparison of sedimenting trajectories for a cylinder released at  $y/W = 0.19$  in a channel. (a)  $Re = 1.04$  ( $\rho_s = 1.003\text{ g/cm}^3$ ) and (b)  $Re = 8.45$  ( $\rho_s = 1.03\text{ g/cm}^3$ )

와류 세딩은 발생하지 않고, 따라서 일정 시간이 지난 후에 실린더는 평행 위치인 채널의 중앙으로 움직이게 됨을 볼 수 있다.

3.2 무한 유체에서 자유 낙하하는 원형 실린더의 2차원 운동

3.2.1 문제의 서술

3.1.1항과 3.1.2항에서 코드의 검증을 마쳤으므로 이 절에서는 본 연구의 목적인 무한 유체에서 자유 낙하하는 원형 실린더의 2차원 운동에 대해 고찰한다. 실린더가 떨어짐에 따라 속도가 증가하여 실린더에서는 주기적으로 와류가 떨어져나가고 이로 인해 실린더는 주기적인 운동을 하게 된다. 한편, 실린더의 주기적인 운동은 다시 유동장에 영향을 주게 되어 유체와 실린더(구조물)는 상호작용을 하게 되는데, 이러한 유체-구조물 상호작용으로 인해 자유 낙하하는 실린더 후류에서의 스트롤수는 분명 정지한 실린더 주위를 흐르는 균일 유동에서의 스트롤수와 달라질 것이다.

자유 낙하하는 실린더의 후류가 2차원으로 남아 있는 레이놀즈수의 범위가 정지한 실린더의 그것과 비슷하다고 가정하고, 6개의 레이놀즈수(58.7, 80.9, 103.1, 124.1, 145.0, 167.2)에 대해서 2차원

수치계산을 수행하였다. 여기서 레이놀즈수( $Re = U_i D / \nu$ )는 실린더의 종속( $U_i$ )을 기준으로 한 것이고, 실린더의 직경  $D$ 는 0.5 cm, 각각의 경우에 대해 동점성계수( $\nu$ )는 0.0200 cm<sup>2</sup>/s, 0.0149 cm<sup>2</sup>/s, 0.0119 cm<sup>2</sup>/s, 0.0100 cm<sup>2</sup>/s, 0.0086 cm<sup>2</sup>/s, 0.0075 cm<sup>2</sup>/s 로 주었으며, 무한 유체에서 자유 낙하하기 때문에 계산 영역은 3.1.1 소절에서와 동일하게 주었다. 모든 경우에 시간 간격( $\Delta t$ )은 0.01 로 주었는데, 무차원화된 시간간격( $\Delta t U_i / D$ )은 레이놀즈수의 순서대로 각각 0.0470, 0.0483, 0.0491, 0.0496, 0.0500, 0.0503 이다. 유체의 밀도( $\rho_f$ )는 1.0 g/cm<sup>3</sup>, 실린더의 밀도( $\rho_s$ )는 1.01 g/cm<sup>3</sup> 로 주었다. 따라서, 밀도비  $\rho_s / \rho_f = 1.01$  이다. 실제로 실린더와 유체의 밀도비는 중요한 무차원수이지만,<sup>(26,27)</sup> 본 연구에서는 유체-구조물 상호작용의 관점에서, 실린더 후류 특성에 대한 실린더 운동의 영향에 관심이 있으므로 밀도비를 고려하지 않았다. 중력 가속도( $g_x$ )는 -981 cm/s<sup>2</sup> 로 주었다. 유체와 실린더는 초기에 정지해 있다가 실린더가 무한 유체 속에서 중력에 의해 갑자기 자유 낙하 운동을 하게 된다.

3.2.2 결과

무한 유체에서 자유 낙하하는 원형 실린더의 병진 속도와 회전 각속도의 시간에 따른 변화를 Fig. 8 에 나타내었다. 여기서 유체의 동점성계수  $\nu = 0.01$  cm<sup>2</sup>/s, 실린더의 주유동 방향 종속  $U_i = 2.482$  cm/s, 레이놀즈수  $Re = 124.1$  이다.  $t U_i / D > 50$  에 대해서 실린더가 주기적인 운동을 하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8 에서와 동일한 레이놀즈수에서 실린더 진동의 1 주기 동안 실린더의 속도 ( $U_p, V_p, \omega_p$ )와 도심의 위치 ( $Y_p, \Theta_p$ )를 Fig. 9(a)에 나타내었는데, 비교를 위해서 각각의 변수들을 확대 혹은 축소하거나

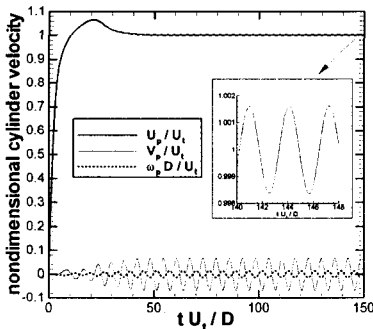


Fig. 8 Time histories of translational and angular velocity of a freely falling circular cylinder in an infinite domain of fluid ( $\nu = 0.01$  cm<sup>2</sup>/s,  $U_i = 2.482$  cm/s,  $Re = 124.1$ )

나 평행이동시켰다. 실린더의 가로방향 속도( $V_p$ )와 각속도( $\omega_p$ ) 사이의 위상차가 거의 180°인 것을 볼 수 있고, 실린더의 가로방향 위치( $Y_p$ )와 각위치( $\Theta_p$ ) 사이의 위상차도 또한 거의 180°인 것을 볼 수 있다. 중력 가속도가 음의 x-방향으로 작용함( $g_x = -981$  cm/s<sup>2</sup>)을 상기한다면, Fig. 9(b)에서 보듯이, 실린더가 양의 방향으로 회전할 때 음의 가로방향으로 움직이고, 음의 방향으로 회전할 때는 양의 가로방향으로 움직임을 쉽게 알 수 있다. 즉, 중력 가속도 방향의 단위 벡터를  $e_g$ , 실린더의 가로방향 속도벡터를  $V$  라고 하면 실린더의 각속도  $\omega$ 의 방향은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega // (e_g \times V). \tag{13}$$

이러한 실린더의 운동은 Fig. 9(b)에서 베르누이 정리에 의해 각각 압력이 낮은 쪽으로 움직이는 것을 고려하면 물리적으로 타당한 결과이다(Fig. 13 과 Fig. 14 에서 보다 구체적으로 설명됨). 또한 Fig. 9(a)에서 실린더의 주유동 방향 속도의 진동 주파수가 다른 변수들의 2 배임을 볼 수 있는데, 이것의 원인은 정지한 실린더에서 항력의 진동 주파수가 양력의 진동 주파수의 2 배가 되는 원인과 같다.

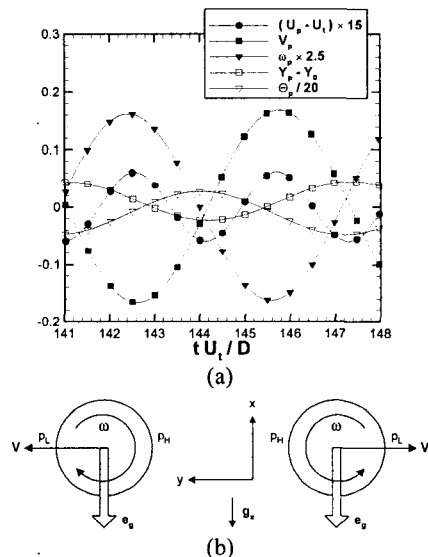


Fig. 9 (a) Time histories of velocity and position of the cylinder for one period of oscillation at  $Re = 124.1$  and (b) schematic diagram illustrating the motion of a freely falling cylinder in an infinite fluid. Note that the variables in (a) are rescaled and shifted for comparison

6 개의 레이놀즈수 (58.7, 80.9, 103.1, 124.1, 145.0, 167.2)에 대한 스트로울수와 식 (12)를 사용하여 곡선맞춤(curve-fitting)으로 스트로울수와 레이놀즈수의 관계식을 구하였는데, 이 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 비교를 위해서 정지한 실린더 주위를 흐르는 균일 유동에 대한 Williamson 과 Brown<sup>(22)</sup>의 결과도 같이 나타내었다. 각각 자유 낙하하는 실린더의 종속과 정지한 실린더 주위를 흐르는 균일 유동 속도를 기준으로 한, 두개의 레이놀즈수가 같을 때, 무한 유체에서 자유 낙하하는 실린더에 대한 스트로울수가 정지한 실린더 주위를 흐르는 균일 유동에서의 스트로울수보다 작음을 알 수 있다. 식 (12)에서의 계수  $A$ 와  $B$ 는 각각 0.2406과 -0.9136으로 구해졌는데,  $A$ 와  $B$ 의 절댓값이 모두 Williamson 과 Brown<sup>(22)</sup>의 결과( $A=0.2665, B=-1.0180$ )보다 작다.

자유 낙하하는 실린더에서 이렇게 스트로울수가 낮아진 일차적 원인은 단지 실린더가 자유롭게 움직일 수 있다는 것 뿐이다. 이 현상을 좀 더 물리적으로 고찰하기 위해  $\nu=0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ 인 경우에 대해서, 실린더 속도 세가지 성분 중 어느 하나나 두개의 성분을 고정시키는 ‘사고 실험’을 수행하였다. 자유롭게 움직일 수 있는 상태, 즉 고정시키지 않은 속도의 상태를 ‘1’로 표시하고, 속도가 0으로 고정된 상태를 ‘0’으로 표시하기로 하자. 이러한 규칙을 따르면 ( $U_p, V_p, \omega_p$ )에 대해 다음과 같이 7개의 조합을 만들 수 있다: 111, 110, 101, 100, 011, 010, 001(여기서 000은 모든 속도가 0으로 고정되었으므로 아무런 운동이 없는 경우이기 때문에 제외시켰다). 예를 들면, 101은 가로방향 속도

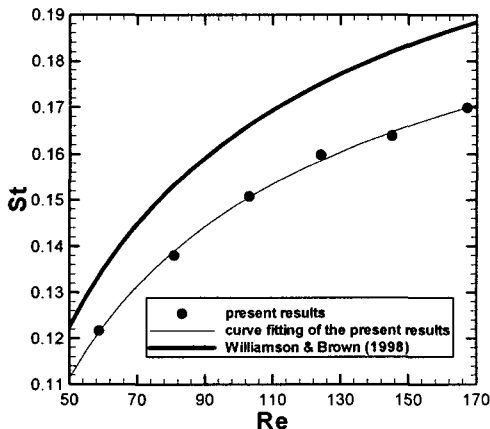


Fig. 10 Comparison of  $St$ - $Re$  relation in a laminar flow around a freely falling cylinder in an infinite fluid with that in a laminar uniform flow around a fixed cylinder

가 0으로 고정되어 실린더가 가로방향으로 움직일 수 없는 경우이고, 110은 회전 각속도가 0으로 고정되어 실린더가 회전할 수 없는 경우이다. 이러한 7개의 경우에 대한 사고 실험의 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 스트로울수는 실린더 후류의 한 점에서 속도를 측정하고 이로부터 그 속도가 진동하는 주기를 측정하여 얻은 것이다. 101, 100, 001에 대한 스트로울수는 정지한 실린더에 대한 스트로울수와 같은 반면, 111, 110, 011, 010에 대한 스트로울수는 정지한 실린더에 대한 스트로울수보다 낮은 것을 볼 수 있다. 이것은 실린더의 가로방향 운동이, 자유 낙하하는 실린더의 스트로울수가 낮아지는데 있어 결정적인 역할을 함을 의미한다.

자유 낙하하는 실린더에서 실린더의 가로방향 운동 또는 회전 운동의 주기는 와류 shedding의 주기와 같다. 결국 스트로울수는 와류 shedding의 주기를 나타내므로 스트로울수가 작아졌다는 것은 와류 shedding이 지연됐다는 것을 의미한다. 와류 shedding이 어떻게 지연되었는가를 보기 위해,  $\nu=0.0119 \text{ cm}^2/\text{s}$ 일 때, 와류 shedding의 한 주기를 8등분하여 좀 더 자세하게 고찰해보자. Fig. 12에서 보는 바와 같이 와류 shedding의 한 주기 동안 양력계수가 최대가 되는 시간(실린더의 가로방향 위치가 최소가 되는 시간)을  $0/8 T$ , 그 반대되는 시간을  $4/8 T$ 라고 하자. 실린더에 작용하는 양력과 실린더의 가로방향 위치는  $180^\circ$  위상차를 가지는데, 이것은 단순 조화운동에서 변위와 가속도가 서로  $180^\circ$  위상차를 갖는 것을 생각하면 당연한 결과이다. Fig. 13에 각각의 시간에서 등압력 선도를 나타내었는데,  $t=2/8 T$ 에서는 위쪽에서 와류 shedding이 일어나고  $t=6/8 T$ 에

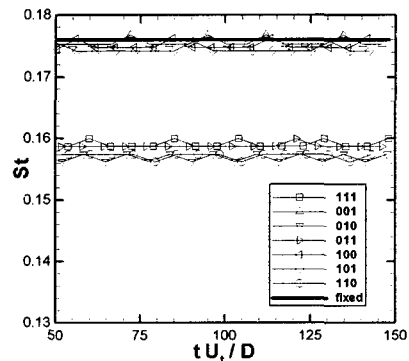


Fig. 11 Strouhal number from ‘thought experiments’ with various combinations of ( $U_p, V_p, \omega_p$ ) ( $\nu=0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ )



서는 아래쪽에서 와류 shedding이 일어남을 알 수 있다. 결국 한 주기 동안 시간에 따른 와류 shedding과 실린더 운동의 관계를 정리하면 다음과 같다.

(i)  $t = 2/8 T$  일 때 위쪽에서 와류 shedding이 일어난 후 아래쪽에 새로운 와류가 생성되기 시작하고 실린더 아래쪽의 압력이 실린더 위쪽의 압력보다 작아져서 양력이 음수가 되지만 위쪽으로 움직이던 실린더는 계속 위쪽으로 움직인다.

(ii) 계속 위쪽으로 움직이다가  $t = 4/8 T$  일 때 양력이 최소값을 가지면 위쪽으로 움직이던 실린더는 아래쪽으로 움직이기 시작한다.

(iii)  $t = 6/8 T$  일 때 아래쪽에서 와류 shedding이 일어난 후 위쪽에 새로운 와류가 생성되기 시작하고 실린더 위쪽의 압력이 실린더 아래쪽의 압력보다 작아져서 양력이 양수가 되지만 아래쪽으로 움직이던 실린더는 계속 아래쪽으로 움직인다.

(iv) 계속 아래쪽으로 움직이다가  $t = 8/8 T$  일 때 양력이 최대값을 가지면 아래쪽으로 움직이던 실린더는 위쪽으로 움직이기 시작한다.

또한 와류 shedding의 한 주기 동안 각각의 시간에

서의 압력계수를 정지한 실린더 주위를 흐르는 균일 유동에서의 압력계수와 비교하여 Fig. 14에 나타내었는데, 압력계수( $C_p$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{p - (p_s + 0.5\rho_f U^2)}{0.5\rho_f U^2} = \frac{p - p_s}{0.5\rho_f U^2} + 1. \quad (14)$$

위에서  $p_s$ 는 정체점에서의 압력이고  $U$ 는 자유흐름 속도로서 정지한 실린더에 대해서는  $U_\infty$ 이고 자유 낙하하는 실린더에 대해서는  $U_f$ 이다. Fig. 14에서 각도  $\theta$ 는 Fig. 12에서 나타내었듯이 정체점을 기준으로 시계 방향으로 돌 때 양수이고 반시계 방향으로 돌 때 음수가 되어, 실린더의 위쪽면에서는 양수이고 아래쪽면에서는 음수이다. Fig. 14를 보면 전반적으로 자유 낙하하는 실린더 주위 유동에서의 압력계수가 정지한 실린더 주위를 흐르는 균일 유동에서보다 높음을 알 수 있다.

또한 Fig. 15(a)에 와류 shedding의 한 주기 동안 시간 평균한 압력계수를 나타내었는데, 역시 자유 낙하하는 실린더 주위 유동에서의 압력계수가 정지한 실린더 주위를 흐르는 균일 유동에서보다 높음을

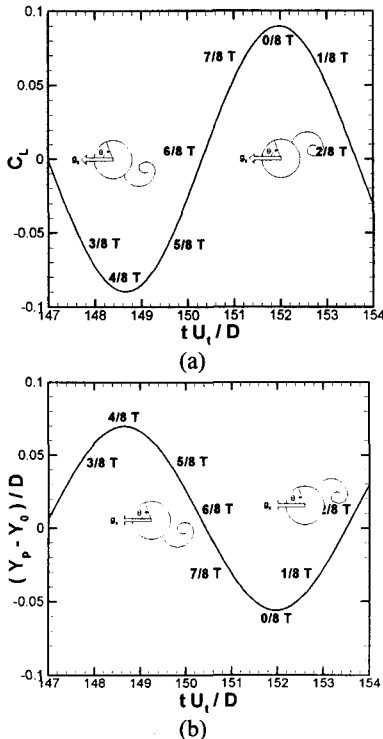


Fig. 12 The locations where the instantaneous pressure contours are taken in the locus of (a) the lift force and (b) the transverse position of the cylinder ( $\nu = 0.0119 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $U_f = 2.456 \text{ cm/s}$ ,  $Re = 103.1$ )

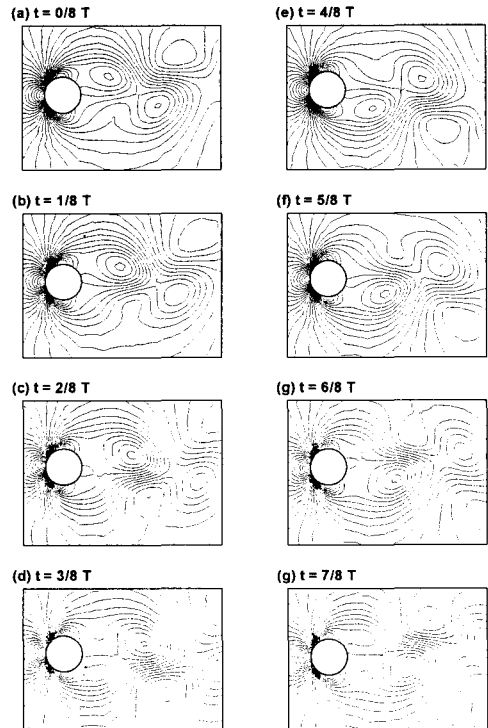
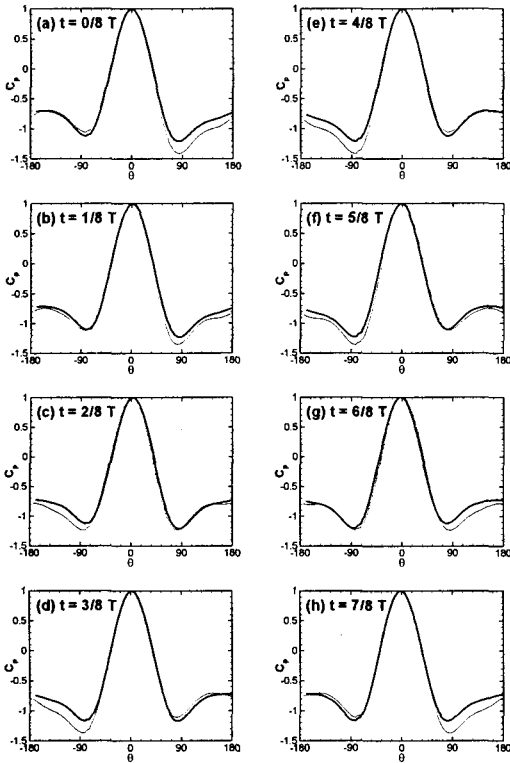


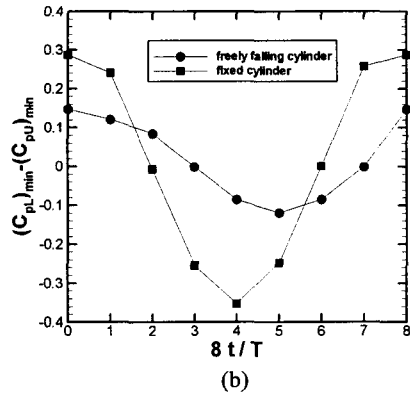
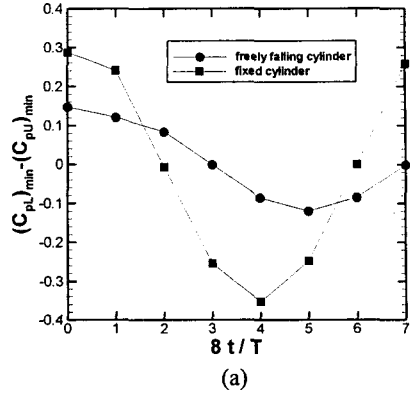
Fig. 13 Instantaneous pressure contours for one period of vortex shedding in a flow around a freely falling cylinder at  $Re = 103.1$



**Fig. 14** Comparisons of the instantaneous pressure coefficient curves for one period of vortex shedding in a flow around a freely falling cylinder with those for a fixed cylinder: —, freely falling cylinder at  $Re = 103.1$ ; - - -, fixed cylinder at  $Re = 100$

알 수 있다. 정지한 실린더 주위를 흐르는 균일 유동에서 레이놀즈수가 높아질수록 시간 평균된 압력계수는 낮아지는데, 본 연구에서 자유 낙하하는 실린더 주위 유동에서도 마찬가지로 현상이 나타났다. 결국 Fig. 15(a)에서 거의 동일한 레이놀즈수에서 자유 낙하하는 실린더 주위 유동에서 압력계수가 높다는 것은, 압력계수의 관점에서 볼 때, 레이놀즈수가 감소되었음을 의미하고 레이놀즈수가 감소되면 Fig. 10에서 보듯이 스트롤수도 감소하게 된다. 따라서 순전히 압력계수만 놓고 본다면, 자유 낙하하는 실린더 주위 유동에서 스트롤수가 낮아진 것은 레이놀즈수가 감소되는 효과에 의한 것이라고 생각할 수 있다.

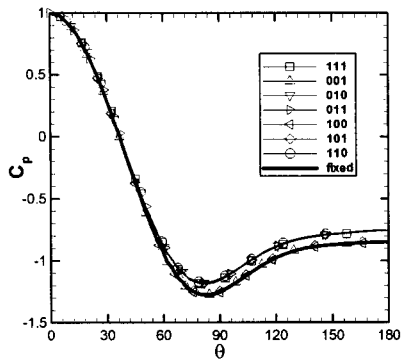
와류 shedding의 한 주기 동안 실린더 아래쪽과 위쪽에서 압력계수의 최소값의 차를 구하여 Fig. 15(b)에 나타내었는데,  $t = 2/8 T$ 와  $t = 6/8 T$ 를 제외 하면 자유 낙하하는 실린더에서 아래쪽과 위쪽의 압력계수의 차이가 정지한 실린더에서의 차이보다 그 절대값이 작은 것을 볼 수 있다. 이것으로부터



**Fig. 15** Comparisons of (a) the time-averaged pressure coefficients and (b) the differences between the pressure coefficient minima on the lower and the upper side of the cylinder for one period of vortex shedding:  $Re = 103.1$  for a freely falling cylinder and  $Re = 100$  for a fixed cylinder

유체가 자유 낙하하는 실린더에 작용하는 양력이 정지한 실린더에 작용하는 양력보다 더 작을 것으로 예측할 수 있는데, 실제로 본 연구에서 계산된 바에 의하면 정지한 실린더에 작용하는 최대 양력은 0.329 이지만 자유 낙하하는 실린더에 작용하는 최대 양력은 0.0896 이다. 실린더에 작용하는 양력이 작다면 실린더는 그만큼 덜 가속 받을 것이고 실린더의 가로방향 운동은 더 느려질 것이다. 이러한 기구(mechanism)를 통해 자유 낙하하는 실린더의 가로방향 운동의 주기(와류 shedding의 주기)가 길어지게 되고 따라서 스트롤수가 낮아지게 된다.

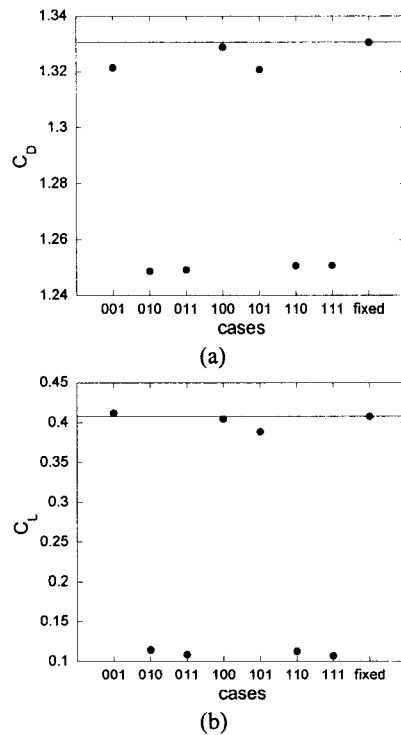
이제 실린더의 가로방향 운동과 압력계수의 관계를 고찰하기 위해 다시 사고 실험으로 돌아가 보자. Fig. 11에서와 같이  $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$  이고 총 7가지의 ( $U_p, V_p, a_p$ )의 조합에 대해서, 와류 shedding의 한 주기 동안 시간 평균한 압력계수를 Fig. 16에



**Fig. 16** Time-averaged pressure coefficients along the surface of a freely falling cylinder for various combinations of  $(U_p, V_p, a_p)$  with  $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ . The pressure coefficient for a fixed cylinder at  $Re = 120$  is also shown for comparison

나타내었는데, 비교를 위해 레이놀즈수가 비슷한 ( $Re = 120$ ) 정지한 실린더에 대한 결과도 같이 나타내었다(111의 경우에  $Re = 124.1$  이다). Fig. 11에서와 마찬가지로 실린더 가로방향 운동의 유무에 따라 크게 두 가지로 나뉘을 볼 수 있다: 실린더의 가로방향 운동이 없는 경우에는 정지한 실린더 주위를 흐르는 유동에서의 압력계수와 일치하지만 가로방향 운동이 있는 경우에는 더 커진다. 앞서 Fig. 15에서 자유 낙하하는 실린더의 압력계수가 정지한 실린더의 압력계수보다 더 큼을 보였는데, 이것은 결국 실린더의 가로방향 운동에 의한 것임을 알 수 있다. 여기서 다시 스트롤수에 대해 생각해보자. Fig. 10에서 보듯이 2 차원 층류 영역에서 레이놀즈수가 커질수록 스트롤수도 커진다. 실린더의 가로방향 운동이 압력계수를 높이는 효과를 나타내므로, 실린더의 가로방향 운동은 레이놀즈수를 감소시키는 효과를 가지고 결과적으로 스트롤수를 감소시킨다고 생각할 수 있다.

$\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$  일 때, 각각의  $(U_p, V_p, a_p)$  조합에 대하여 시간평균된 항력계수와 양력계수의 진폭을 Fig. 17에 나타내었는데, 역시 비교를 위해 정지한 실린더에 대한 결과도 같이 나타내었다. 앞서서와 마찬가지로 가로방향 운동의 유무에 따라서 크게 두 가지로 나뉘어지는 것을 볼 수 있다. 실린더의 가로방향 운동이 없는 경우에는 정지한 실린더 주위를 흐르는 유동에서의 값과 거의 비슷하지만 가로방향 운동이 있는 경우에는 항력계수와 양력계수 모두 작아진다. 특히 양력계수는 약 1/4만큼 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 가로방향으로 자유롭게 운동하는 실린더가 와류가 박리 되는 쪽(저압력쪽)으로 움직이려 하면서 저 압력쪽의 압력을 회복시키고 와류 박리를 지연시키려 하기 때문이



**Fig. 17** (a) Time-averaged drag coefficients and (b) the amplitude of lift coefficients of a freely falling cylinder for various combinations of  $(U_p, V_p, a_p)$  with  $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ . The pressure coefficient for a fixed cylinder at  $Re = 120$  is also shown for comparison

다. 저 압력쪽으로 실린더가 움직이는 것은 실린더에 부착된 상대 좌표계에서 보면 저 압력쪽에서 흡입 유동이 존재하는 것과 같은 효과를 낸다고 할 수 있다. 그러므로 저 압력쪽의 압력은 회복되고 따라서 자유롭게 낙하하는 실린더가 겪게 되는 양력의 크기는 고정된 실린더의 그것에 비해 매우 작게 된다. 또한, 같은 이유로 인해 와류의 박리가 지연되어 스트롤수는 낮아지게 된다.

권기영과 최해천<sup>(24)</sup>은 정지한 실린더 주위 유동에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 스트롤수가 증가하는 현상에 대한 기구를 다음과 같이 설명하였다. 레이놀즈수가 커질수록 실린더 벽에서 전단층이 얇아지고 박리점 부근의 압력구배도 증가함에 따라 더 큰 크기의 와도를 지니는 와류들이 생성되고, 그로 인해 위, 아래의 와류간의 상호작용도 활발하게 되기 때문에, 서로 영향을 주고 받는 시간이 짧아짐에 따라 와류 shedding의 주기가 작아져 스트롤수는 커지게 된다. 이러한 설명이 자유 낙하하는 실린더에서 스트롤수가 줄어드는 현상에도 적용될 수 있는지를 알아보기 위해서 무차원 벽와

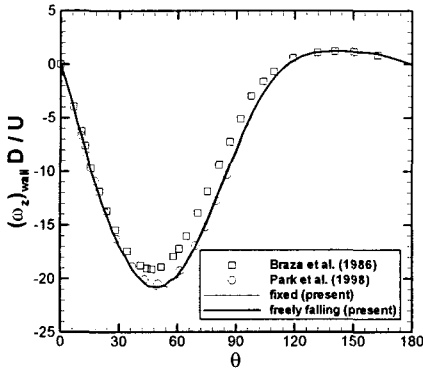


Fig. 18 Comparison of the non-dimensional wall vorticity on the surface of a freely falling cylinder at  $Re = 103.1$  with those for a fixed cylinder at  $Re = 100$

도( $= (\omega_z)_{wall} D/U_i$ )를 정지한 실린더의 경우와 같이 비교한 것을 Fig. 18에 나타내었다. Fig. 18에서 보는 바와 같이 정지한 실린더에 대한 Park 등<sup>(28)</sup>의 결과와 본 연구에서 정지한 실린더에 대해 계산한 결과와 매우 잘 일치함을 볼 수 있는데, 특이한 점은 자유 낙하하는 실린더에 대한 결과와 별로 차이가 나지 않는다는 것이다. 즉, 자유 낙하하는 실린더와 정지한 실린더에서 벽와도의 크기가 별로 차이가 나지 않기 때문에, 자유 낙하하는 실린더에서 스트로울수가 낮아진 현상을 권기영과 최해천<sup>(24)</sup>이 제안한 방식으로 설명할 수 없다. 한편, Park 등<sup>(28)</sup>도 언급한 바와 같이 Braza 등<sup>(29)</sup>의 결과에서 벽와도의 크기가 작은 이유는 사용한 격자가 충분히 조밀하지 못했기 때문인데, Braza 등<sup>(29)</sup>은 13,530 개의 격자를 사용하였고 Park 등<sup>(28)</sup>은 154,500 개의 격자를 사용하였다. 본 연구에서 24305 개의 절점과 12047 개의 요소를 사용한 것을 고려한다면, 본 연구에 사용된 수치해석 기법이 약 1/5의 절점을 가지고 정확한 결과를 예측한다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

무한 유체에서 자유 낙하하는 원형 실린더의 2차원 운동을 고찰하기 위해 P2P1 Galerkin 유한요소법, ALE 기법, 적응격자 조밀화 기법을 사용하여 Navier-Stokes 방정식과 실린더의 운동방정식의 해를 결합 공식화를 통해 구하였다.

실린더가 자유 낙하하면서 주유동 방향 속도가 증가함에 따라 실린더 후류에서 발생하는 주기적인 와류 shedding이 실린더의 주기적 운동을 유발하고 다시 이러한 실린더의 운동은 유동장에 영향을 미

친다. 실린더의 가로방향 속도( $V_p$ )와 각속도( $\omega_p$ )는  $180^\circ$ 의 위상차를 갖는데, 이것은 실린더의 가로방향 위치( $Y_p$ )와 각위치( $\theta_p$ )사이에서도 마찬가지이다. 이로부터 실린더가 양의 방향으로 회전할 때 음의 가로방향으로 움직이고, 음의 방향으로 회전할 때는 양의 가로방향으로 움직임을 보였다. 또한 와류 shedding의 한 주기에 대해서 자유 낙하하는 실린더의 운동을 자세하게 고찰하였다.

자유 낙하하는 실린더에 대해서 종속을 기준으로 한 레이놀즈수와 정지한 실린더 주위 유동에서 자유흐름속도를 기준으로 한 레이놀즈수가 같을 때, 자유 낙하하는 실린더에 대한 스트로울수는 정지한 실린더에 대한 스트로울수보다 작는데, 사고 실험으로부터 실린더의 가로방향 운동이 압력계수의 관점에서 레이놀즈수를 감소시키는 효과를 가지며 결국에 스트로울수를 감소시키는 효과를 가진다는 것을 보였다. 또한 실린더의 가로방향 운동으로 인해 실린더가 받는 양력이 작아지고 이로 인해 실린더는 그만큼 덜 가속 받게 되어 실린더의 가로방향 운동의 주기(와류 shedding의 주기)가 길어지게 되고 이에 따라 스트로울수가 낮아지게 되는 기구를 밝혔다.

#### 후 기

본 연구는 BK21 사업과 마이크로열시스템연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Dowell, E. H. and Hall, K. C., 2001, "Modelling of Fluid-Structure Interaction," *Ann. Rev. Fluid Mech.* Vol. 33, pp. 445~490.
- (2) Billah, K. Y. and Scanlan, R. H., 1991, "Resonance, Tacoma Narrows Bridge Failure, and Undergraduate Physics Textbooks," *Am. J. Phys.* Vol. 59, pp. 118~124.
- (3) Strouhal, V., 1878, "Über Eine Besondere Art Der Tonerregung," *Annalen der Physik und Chemie (Liepzig)*, Neue Folge **Bd.5**, Heft 10, pp. 216~251.
- (4) Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Ann. Rev. Fluid Mech.* Vol. 28, pp. 477~539.
- (5) Jayaweera, K. O. L. F., Mason, B. J. and Slack, G. W., 1964, "The Behaviour of Clusters of Spheres Falling in a Viscous Fluid: Part 1. Experiment," *J. Fluid Mech.* Vol. 20, pp. 121~128.
- (6) Fortes, A. F., Joseph, D. D. and Lundgren, T. S., 1987, "Nonlinear Mechanics of Fluidization of Beds of Spherical Particles," *J. Fluid Mech.* Vol. 177, pp. 467~483.
- (7) Johnson, A. A. and Tezduyar, T. E., 1996, "Simulation of Multiple Spheres Falling in a Liquid-Filled Tube," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*

- Vol. 134, pp. 351~373.
- (8) Glowinski, R., Pan T. W., Hesla T. I., Joseph, D. D. and Periaux, J., 2000, "A Distributed Lagrange Multiplier/ Fictitious Domain Method for the Simulation of Flow Around Moving Rigid Bodies: Application to Particulate Flow," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. 184, pp. 241~267.
- (9) Hu, H. H., Joseph, D. D. and Crochet, M. J., 1992, "Direct Simulation of Fluid Particle Motions," *Theoret. Comput. Fluid Dynam.* Vol. 3, pp. 285~306.
- (10) 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.
- (11) Choi, H. G., 2000, "Splitting Method for the Combined Formulation of the Fluid-Particle Problem," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. 190, pp. 1367~1378.
- (12) Chen, J. H., Pritchard, W. G. and Tavener, S. J., 1995, "Bifurcation for Flow Past a Cylinder Between Parallel Planes," *J. Fluid Mech.* Vol. 284, pp. 23~41.
- (13) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., 1999, "Re-examination of the Effect of a Plane Boundary on Force and Vortex Shedding of a Circular Cylinder," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* Vol. 80, pp. 263~286.
- (14) Zovatto, L. and Pedrizzetti, G., 2001, "Flow About a Circular Cylinder Between Parallel Walls," *J. Fluid Mech.* Vol. 440, 1~25.
- (15) Hughes, T. G. and Taylor, C., 1980, *Finite Element Programming of the Navier-Stokes Equations*, Swansea: Pineridge Press.
- (16) Hu, H. H., Patankar, N. A. and Zhu, M. Y., 2001, "Direct Numerical Simulations of Fluid-Solid Systems Using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Technique," *J. Comp. Phys.* Vol. 169, pp. 427~462.
- (17) Nithiarasu, P. and Zienkiewicz, O. C., 2000, "Adaptive Mesh Generation for Fluid Mechanics Problems," *Int. J. Numer. Meth. Engrg.* Vol. 47, pp. 629~662.
- (18) Nam, Y. S., Choi, H. G. and Yoo, J. Y., 2002, "AILU Preconditioning for the Finite Element Formulation of the Incompressible Navier-Stokes Equations," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. 191, pp. 4323~4339.
- (19) Hesla, T. I., 1991, "Combined Formulation of Fluid-Particle Problem" (unpublished note).
- (20) Saad, Y., 1996, *Iterative Methods for Sparse Linear Systems*, Boston: PWS Publishing Company.
- (21) Kak Namkoong, 2002, "Numerical Analyses of Dynamic Fluid-Structure Interaction About a Freely Falling Cylinder and a Bernoulli-Euler Beam," *Ph. D. Thesis, School of Mechanical and Aerospace Engineering*, Seoul National University.
- (22) Williamson, C. H. K. and Brown, G. L., 1998, "A Series in  $1/\sqrt{Re}$  to Represent the Strouhal-Reynolds Number Relationship of the Cylinder Wake," *J. Fluids Struct.* Vol. 12, pp. 1073~1085.
- (23) Henderson, R., 1997, "Nonlinear Dynamics and Pattern Formation in Turbulent Wake Transition," *J. Fluid Mech.* Vol. 352, pp. 65~112.
- (24) Kiyoungh Kwon and Haecheon Choi, 1996, "Active and Passive Controls of Laminar Vortex Shedding Behind a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers," *Report No. TFC-MS001, Department of Mechanical Engineering*, Seoul National University.
- (25) Fey, U., König, M. and Eckelmann, H., 1998, "A New Strouhal-Reynolds-Number Relationship for the Circular Cylinder in the Range  $47 < \sqrt{Re} < 2 \times 10^5$ ," *Phys. Fluids* Vol. 10, pp. 1547~1549.
- (26) Patankar, N. A., Huang, P. Y., Ko, T. and Joseph, D. D., 2001, "Lift-off of a Single Particle in Newtonian and Viscoelastic Fluids by Direct Numerical Simulation," *J. Fluid Mech.* Vol. 438, pp. 67~100.
- (27) Choi, H. G. and Joseph, D. D., 2001, "Fluidization by Lift of 300 Circular Particles in Plane Poiseuille Flow by Direct Numerical Simulation," *J. Fluid Mech.* Vol. 438, pp. 101~128.
- (28) Park, J., Kwon, K. and Choi, H., 1998, "Numerical Solution of Flow Past a Circular Cylinder at Reynolds Numbers up to 160," *KSME Int. J.* Vol. 12, pp. 1200~1205.
- (29) Braza, M., Chassaing, P. and Ha Minh, H., 1986, "Numerical Study and Physical Analysis of the Pressure and Velocity Fields in the Near Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.* Vol. 165, pp. 79~130.