

가상 경계 방법을 이용한 유동 해석 기법에 관한 기초 연구

양승호* · 하만영† · 박일룡**
(2003년 8월 9일 접수, 2004년 4월 7일 심사완료)

The Basic Study on the Technique of Fluid Flow Analysis Using the Immersed Boundary Method

Seung Ho Yang, Man Yeong Ha and Il Ryong Park

Key Words : Immersed Boundary Method(가상경계법), Momentum Forcing(운동량 강제 외력), Finite Volume Method(유한체적법), Second Order Lagrangian Shape Function(2차 정도의 라그랑지안 형상 함수), Moving Boundary(이동경계), Rotation(회전), Oscillation(진동)

Abstract

In most industrial applications, the geometrical complexity is combined with the moving boundaries. These problems considerably increase the computational difficulties since they require, respectively, regeneration and deformation of the grid. As a result, engineering flow simulation is restricted. In order to solve this kind of problems the immersed boundary method was developed. In this study, the immersed boundary method is applied to the numerical simulation of stationary, rotating and oscillating cylinders in the 2-dimensional square cavity. No-slip velocity boundary conditions are given by imposing feedback forcing term to the momentum equation. Besides, this technique is used with a second-order accurate interpolation scheme in order to improve the accuracy of flow near the immersed boundaries. The governing equations for the mass and momentum using the immersed boundary method are discretized on the non-staggered grid by using the finite volume method. The results agree well with previous numerical and experimental results. This study presents the possibility of the immersed boundary method to apply to the complex flow experienced in the industrial applications. The usefulness of this method will be confirmed when we solve the complex geometries and moving bodies.

1. 서론

컴퓨터의 급속한 발달과 더불어 전산해석 기법이 실험 기법과 함께 열유체 기기의 해석 및 설계의 중요한 도구로서 자리를 잡고 있다. 이러한 전산 해석 기법을 이용한 계산의 장점은 실험에 의한 방법보다 시간과 비용을 상당히 줄일 수 있

다는 것이다. 물론 계산 결과의 정확도에 대하여는 실험에 의한 검증 절차를 거쳐야 한다. 그러나, 열유체 기기 주위의 열유동 현상을 해석하는 기존의 전산 해석 기법은 해결하여야 하는 여러 문제점을 가지고 있다. 이들 중 대표적인 것이 난류, 연소 현상 등의 복잡한 물리적 현상을 잘 나타내는 모델의 개발이다. 이를 위하여 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 아울러 전산유체역학이 해결하여야 하는 문제점 중의 하나는 복잡한 형상을 가진 물체의 운동을 어떻게 잘 모사하느냐 하는 것이다. 대부분의 산업 현장에서 경험하는 공학 문제들의 형상은 아주 복잡하며, 많은 경우 이들은 일정한 형태의 운동을 하고 있다. 이 경우 열유동 현상은 이동 경계 문제 (moving

† 책임저자, 회원, 부산대학교 공과대학 기계공학부
E-mail : myha@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2440 FAX : (051)512-9835
* 부산대학교 공과대학 기계공학부
** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

boundary problem)와 연계되어 있고, 이에 따른 전산 해석은 상당히 복잡하고 어렵다. 그러므로 이러한 복잡한 형상에서 경계의 이동을 포함하는 열유동 현상을 정확하게 예측하는 것은 대단히 중요하다. 이러한 문제를 해석하는 방법 중의 하나는 이동격자법 (sliding or dynamic mesh technique) 이다. 그러나 이 방법은 격자의 재생성 및 변형으로 인하여 많은 메모리와 계산 시간을 요구한다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위하여 제안된 방법 중의 하나가 가상경계방법 (immersed boundary method)이다.⁽¹⁾ 이러한 가상경계방법에는 오일러인⁽²⁻⁴⁾ (Eulerian) 및 혼합형인 오일러인-라그랑지안⁽⁵⁻⁹⁾ (Eulerian-Lagrangian) 개념에 기초한 방법이 있다. 본 연구에서는 오일러인-라그랑지안 개념에 기초한 가상경계방법을 사용하였다. 이 방법은 심장의 2차원 모델에서 혈류의 흐름을 계산하기 위해 운동량 강제 외력 (momentum forcing)을 이용하는 방법으로써 Peskin⁽¹⁰⁾에 의해 개발되어졌다. 그 후 Goldstein *et al.*⁽⁹⁾과 Saiki & Biringen⁽⁶⁾는 물체의 움직임이나 내기 위해 피드백 강제 외력 (feedback forcing)의 개념을 이용하여 실린더 주위의 정상 유동과 회전 유동에 대한 계산을 수행하였다. 그러나, 이 방법을 사용하여 피드백 강제 외력을 계산할 때 수치 적분에 사용하는 시간 스텝을 크게 잡으면 수치 진동 (numerical oscillation) 및 수치 안정성 (numerical stability)의 문제가 발생한다. 그러므로 시간 적분에 사용하는 시간 스텝에 엄격한 제약 조건이 따르게 된다.

본 연구에서는 가상경계방법의 타당성을 조사하는 기초 연구를 수행하기 위하여 사각 공동 내부에 실린더가 존재하고, 이 실린더가 정지, 회전 및 진동하는 경우의 유동 현상을 해석하였다. 아울러 실린더 주위의 외부 유동에 대하여도 가상경계방법을 사용한 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 운동량 보존 방정식에 피드백 강제 외력 항을 추가하여 가상 경계 면에서의 점착 (no-slip) 경계 조건을 만족하도록 하였다. 경계에서의 정확도를 향상시키기 위하여 2차 정도의 보간 기법을 사용하였다. 비 엇갈림 격자계에서 유한 체적법을 사용하여 지배 방정식을 이산화 하였다. 오일러인 직교 좌표계의 격자점과 물체 경계 표면에서의 라그랑지안 격자점 사이에서 관련 물리량들의 보간을 위하여 2차 정도의 라그랑지안 형상 함수 (Lagrangian polynomial shape function)를 사용하였다. 본 연구의 계산 결과들은 기존의 연구 및 상용 코드를 사용한 계산 결과와 비교되었다. 현재

의 계산 결과는 이들 결과를 잘 재현하였다.

2. 이론적 연구

본 연구에서 사용한 비압축성 유체의 비정상 및 2차원 질량 및 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

- 연속 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

- x-운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x \quad (2)$$

- y-운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y \quad (3)$$

운동량 보존 방정식 (2) 및 (3)의 F_x 및 F_y 는 가상경계면에 작용하는 운동량 강제 (momentum forcing)에 의한 외력을 나타낸다. 이러한 운동량 강제 외력 \mathbf{F} 를 계산하기 위하여 먼저 운동량 강제 외력 밀도 (momentum forcing density) \mathbf{f} 를 다음과 같이 계산한다. (Goldstein *et al.*⁽⁹⁾, Saiki & Biringen⁽⁶⁾)

$$\mathbf{f}(X_s, t) = \alpha_f \int_V [\mathbf{u}(X_s, t) - \mathbf{V}(X_s, t)] dV + \beta_f [\mathbf{u}(X_s, t) - \mathbf{V}(X_s, t)] \quad (4)$$

여기서 α_f 와 β_f 는 각각 $\frac{M}{L^3 T^2}$ 과 $\frac{M}{L^3 T}$ 의 차원을 가지는 상수이다. \mathbf{V} 는 시간과 공간에 의존하는 물체의 경계에서의 속도이다. 이 값의 변화를 통하여 변형, 회전 및 움직이는 물체 등의 운동을 다양하게 구현할 수 있다. 속도 차 $\mathbf{u} - \mathbf{V}$ 를 사용하여 식 (4)로부터 운동량 강제 외력 밀도 값을 계산한다. 상수 α_f 와 β_f 의 값은 우리가 해석하고자 하는 유동의 형태에 따라 변하며, α_f 와 β_f 값을 결정하는 일반적인 규칙은 없다. 이로 인하여 경험하는 이 방법의 주요 결점 중의 하나는 아주 큰 α_f 와 β_f 값을 취하여 시간에 대하여 적분을 수행하면 적분 시간 스텝 (Δt)의 크기에 제약을 받는다는 것이다. Goldstein *et al.*⁽⁹⁾은 수치 안정성 해석을 통하여 모든 운동량 강제 외력 항을 양해법 (explicit method) 및 Adams-Bashforth scheme에 의하여 계산하면, 시간 스텝의 크기의 안정성 한계는 다음과 같이 주어진다고

보고 하였다.

$$\Delta t < \frac{-\beta_f - \sqrt{(\beta_f^2 - 2\alpha_f k)}}{\alpha_f} \quad (5)$$

여기서 k 는 유동에 따라 변하는 상수로서 대략적으로 ~ 1 의 크기를 가진다. 본 연구에서는 이러한 제약조건을 만족하는 Δt 을 사용하여 계산을 수행하였다. 물체가 움직이지 않는 경우 즉 회전요소와 병진요소가 없는 경우 $\mathbf{V} = 0$ 이므로 식 (4)는 다음과 같이 정의되어진다.

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}_s, t) = \alpha_f \int_0^t [\mathbf{u}(\mathbf{X}_s, t')] dt' + \beta_f [\mathbf{u}(\mathbf{X}_s, t)] \quad (6)$$

$$\int_0^t \mathbf{u}(\mathbf{X}_s, t') dt' \cong \sum_{j=1}^N \mathbf{u}(\mathbf{X}_s, j) \Delta t \quad (7)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}_s, t) = \alpha_f \sum_{i=0}^{i=t} \mathbf{u}(\mathbf{X}_s, t') + \beta_f [\mathbf{u}(\mathbf{X}_s, t)] \quad (8)$$

운동량 강제 외력 밀도 $\mathbf{f}(\mathbf{X}_s, t)$ 를 계산하기 위하여 물체 표면 \mathbf{X}_s 에서 속도 $\mathbf{u}(\mathbf{X}_s, t)$ 를 매 시간 계산하여야 한다. 그러나 물체의 표면에서 정의되는 라그랑지안 좌표인 \mathbf{X}_s 는 일반적으로 오일러리안 직교좌표계와 일치하지 않는다. 그러므로 이 두 좌표계 사이에 적절한 보간이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 2차 정도의 라그랑지안 형상 함수를 사용하였고, 이때 사용한 형상 함수의 정의는 다음과 같다.

$$\phi(\xi, \eta) = \sum_j^9 N_j(\xi, \eta) \phi_j \quad (9)$$

여기서

$$N_j = \frac{1}{4}(1 + \xi_j \xi)(1 + \eta_j \eta) \xi_j \eta_j \quad j = 1, 3, 5, 7$$

$$N_j = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \eta_j \eta) \eta_j \quad j = 2, 6$$

$$N_j = \frac{1}{2}(1 + \xi_j \xi)(1 - \eta^2) \xi_j \xi \quad j = 4, 8$$

$$N_j = (1 - \xi^2)(1 - \eta^2) \quad j = 9$$

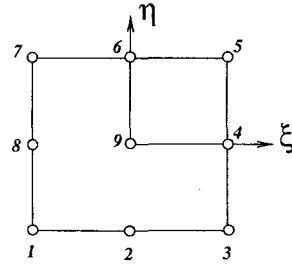


Fig. 1 General 9-node Lagrangian element

여기서, ξ_j, η_j 는 Fig. 1에서 보듯이 좌표 변환된 정규 요소 ($-1 \leq \xi \leq 1, -1 \leq \eta \leq 1$)에서 정의되는 각 절점의 좌표를 나타낸다. 물체 표면에서 구한 유속은 물체 표면에서 접촉 경계 조건을 만족하기 위해서 식 (6)에 의하여 유동장에 작용하는 체적력 (body force)으로 변환되어 유동장에 피드백 되어진다. 이상의 과정을 통하여 운동량 강제력 밀도 \mathbf{f} 를 구한 후, 델타 함수 (δ)를 사용하여 물체 표면에서의 운동량 강제력 \mathbf{F} 를 다음과 같이 계산한다.

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, t) = \int_{\Gamma} \mathbf{f}(s, t) \delta(x - \mathbf{X}(s, t)) ds \quad (10)$$

이러한 델타 함수의 형태는 다양하나, 경계에서 보다 정확한 계산 결과를 줄 수 있는 델타 함수를 정의하여 사용하는 것이 가상경계방법에서 대단히 중요하다. 본 논문에서는 물체 경계면에 분포된 외력을 주위 유동장에 외삽하기 위하여 아래의 코사인 형태의 델타 함수를 사용하였다.

$$\delta_{2h}(x_i, y_j) = d_{2h}(x_i) d_{2h}(y_j) \quad (11)$$

여기서

$$d_{2h} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{4h} (1 + \cos(\frac{\pi r}{2h})) & \text{if } |r| < 2h \\ 0 & \text{if } |r| > 2h \end{array} \right\} \quad (12)$$

이상의 운동량 강제력을 가지는 지배 방정식 (1)~(3)에 대한 수치해석은 비 엇갈림 격자계에서 정의되는 유한체적법을 사용하여 수행되었다. 앞에서 언급한 것처럼 현재의 연구에서 사용한 가상경계방법은 혼합 오일러리안-라그랑지안 방법

이다. 즉 유체의 유동과 관련된 변수들은 고정된 좌표 점인 오일러안 요소인 아래의 $N_x \times N_y$ 의 격자점에서 정의되어진다.

$$\mathbf{x}_{ij} = (x_i, y_j) = (ih, jh) \quad i=1 \sim N_x, \quad j=1 \sim N_y \quad (13)$$

반면에 라그랑지안 요소인 물체의 경계를 구성하는 N_b 개의 점들은 물체의 경계면을 따라 변수 s 를 사용하여 다음과 같이 정의되어진다.

$$s_l = l \cdot h_b \quad (14)$$

여기서 $h_b = \frac{L_f}{N_b}$ 이며, L_f 는 물체 표면 궤적을 구성하는 미소 길이 요소이다.

3. 계산 결과 및 고찰

본 연구에서 개발한 프로그램의 정확도에 대한 검증은 위하여 사각 공동 (rectangular cavity) 내부에 형성되는 유동장을 계산하였다. 이때 사각 공동의 상부는 일정 속도 U 를 가지고 좌에서 우로 움직인다. 계산에 사용된 레이놀즈 수는 $Re=400$

이다. 여기서 레이놀즈 수는 $Re = \frac{UL}{\nu}$ 로 정의되어

지며, U , L 및 ν 는 각각 공동 상부가 움직이는 속도, 사각 공동의 길이 및 동점성계수를 나타낸다. 향 후 설명하는 모든 경우에 대한 레이놀즈 수는 동일한 방법으로 정의되었다. Fig. 2는 사각 공동 내부에서의 유선을 보여주고 있으며, Fig. 3은 공동 내부의 중앙 단면 ($x=0.5$)에서의 x -방향의 속도 성분 u 의 분포를 나타내고 있다. Fig. 3에 보여준 것처럼 x -방향 속도 성분 u 에 대한 현재의 계산 결과는 Ghia et al.⁽¹²⁾의 계산 결과 및 상용 코드를 사용한 계산 결과를 아주 잘 나타내고 있다.

본 연구에서 개발된 가상경계방법을 적용하기 위하여 먼저 Fig. 4에 보여준 것처럼 사각 공동 내부에 원형 관이 존재하는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 여기서 원형 관은 정지해 있고, 사각 공동의 상부 벽은 일정 속도 U 로 좌에서 우로 움직이고 있다. 이 형상에 대하여 계산에 사용한

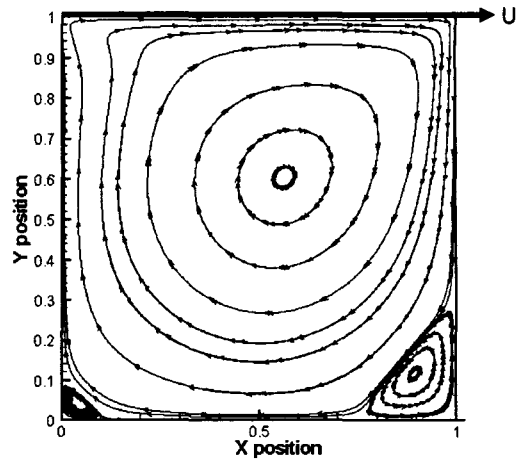


Fig. 2 Streamlines of the cavity flow at $Re=400$

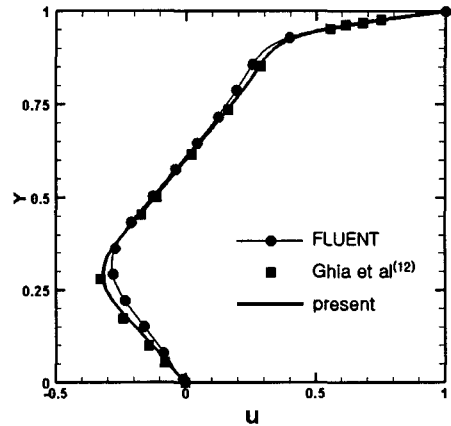


Fig. 3 Comparison of u at $x=0.5$ obtained from the present calculation with those from Ghia et al.⁽¹²⁾ and commercial code calculation when $Re=400$

레이놀즈수는 100이다.

Fig. 5는 사각 공동 내부에 존재하는 원형 실린더의 경계와 실린더의 표면 주위에 위치하는 직교 격자 계를 보여주고 있다. 여기서 사용한 오일러안 격자수는 x 및 y 방향으로 각각 100×100 이며, 실린더의 표면을 따라 사용한 라그랑지안 격자수(N_b)는 360개이다. 이러한 실린더 경계표면의 점은 일반적으로 오일러안 직교좌표 계의 격자점과 일치하지 않는다. 그러므로 앞에서 설명한 방법에 의하여 적절하게 보간하여 계산을 수행한다.

Fig. 6은 Fig. 4에 보여준 형상에 대하여 공동

내부에 형성되는 속도 벡터와 유선의 분포를 보여주고 있다. 상부 벽의 움직임으로 인하여 공동 내부에 시계 방향으로 회전하는 주 와류(main vortex)가 형성된다. 내부에 원형 관이 존재하지 않을 때 공동의 하부 구석에서 형성되어지는 이차 코너 와(secondary corner vortex)가 원형 관이 존재하면 거의 사라진다. 아울러 원형 관의 상부에 시계 방향으로 회전하는 2 개의 작은 와가 주 와류의 내부에 형성된다. 상부 벽이 좌에서 우로 움직이기 때문에 우측에 형성되는 이차 와의 크기가 좌측에 형성되는 것보다 크다.

Fig. 7은 중앙 단면 ($x=0.5$) 에서의 x -방향의 속도 성분 u 의 분포를 보여주고 있다. 가상경계 방법을 사용하여 구한 본 계산 결과를 상용 코드를 사용하여 계산한 결과와 비교하였다. 그림에서 보듯이 본 계산 결과는 상용 코드를 사용한 계산 결과를 잘 나타내고 있다. 이 결과로부터 현재의 가상경계방법은 정지해 있는 임의의 물체 주위의 유동 현상을 잘 나타내는 것을 알 수 있다.

가상경계방법을 사용하여 움직이는 물체 주위의 유동의 해석 가능성을 조사하기 위하여, 먼저 사각 공동 내부에 존재하는 원형 관이 일정 속도로 회전하는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 이때 사용한 오일러안 및 라그랑지안 격자 수는 원형 관이 정지하고 있는 경우와 동일하다. 식 (4)의 운동량 강제 외력을 계산하는 방법에서 설명한 것처럼, 회전이나 병진 운동이 존재하면 V 는 이에 대응하는 값을 가지게 된다. 이때 주의 할 점은 물체의 운동에 따라 운동량 강제 외력의 값의 변화뿐만 아니라 가상 경계 면을 구성하는 점들도 회전과 병진 운동에 따라 같이 움직여야 한다. 이렇게 함으로써 매 계산 스텝에서 물체의

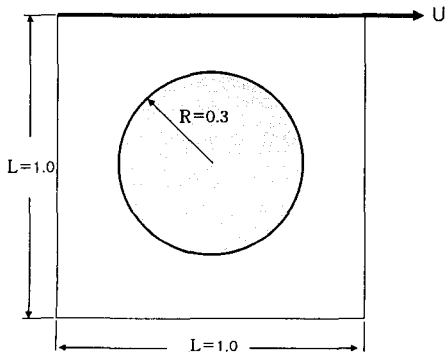


Fig. 4 The geometry for the cavity flow in the presence of the cylinder in the cavity

표면에 강제 외력을 정확하게 분포시킬 수 있다. Fig. 8 은 $Re=100$ 의 조건에서 사각 공동 내부에 존재하는 원형 관이 일정속도로 회전할 때, 공동

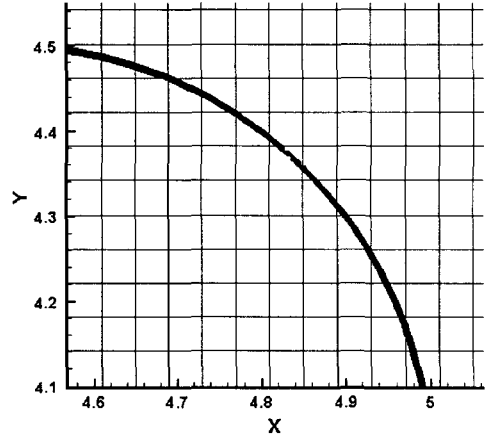


Fig. 5 Eulerian Cartesian grid systems with Lagrangian grid points along the cylinder surface

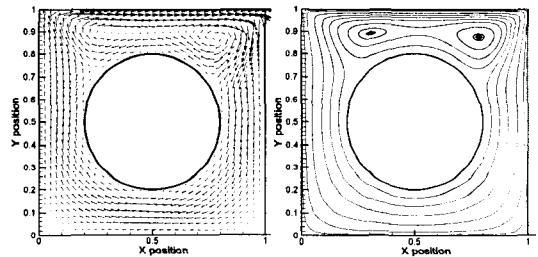


Fig. 6 Velocity vectors and streamline for the cavity flow in the presence of the stationary cylinder in the cavity at $Re=100$

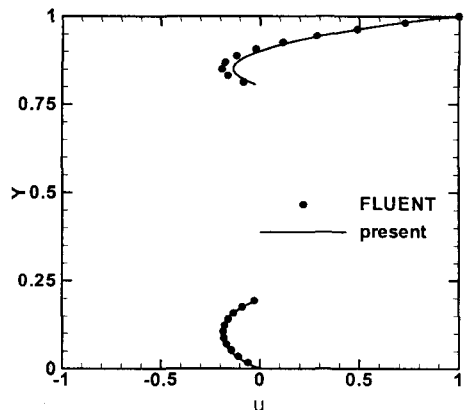


Fig. 7 Comparison of u at $x=0.5$ obtained from the present calculation with those from commercial code calculation at $Re=100$

내부에 형성되는 속도 벡터와 유선의 분포를 보여주고 있다. 회전하는 원형 관 표면에서 유체의 속도는 최대가 되고 관 표면에서 멀어져 사각 공동 벽면으로 가면서 속도는 거의 선형적으로 감소한다. 공동 내부 유동은 회전하는 관에 의하여 전체적으로 반 시계 방향으로 순환한다. 아울러 사각 공동의 네 모서리에서 작은 코너 와가 형성되는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 9는 중앙 단면 ($x=0.5$)에서 x -방향의 속도 성분 u 의 분포 계산 결과를 보여주고 있다. 현재의 계산 결과는 전체적으로 상용 코드의 계산 결과를 잘 나타내고 있다.

가상경계방법의 또 다른 적용의 예로서 사각 공동 내부에 존재하는 원형 관이 진동하는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 이 경우 미끄럼 격자 기법(sliding mesh technique)과 같은 기존의 방법에서는 매 적분 시간 스텝마다 물체의 이동에 따라 격자를 재 생성하여 계산을 수행하여야 한다.

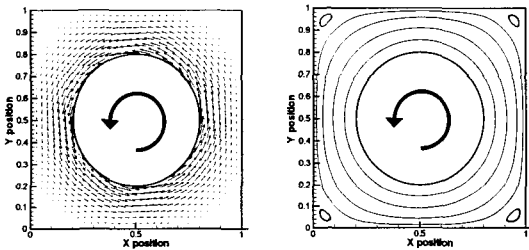


Fig. 8 Velocity vectors and streamline for the cavity flow in the presence of the rotating cylinder in the cavity at $Re=100$

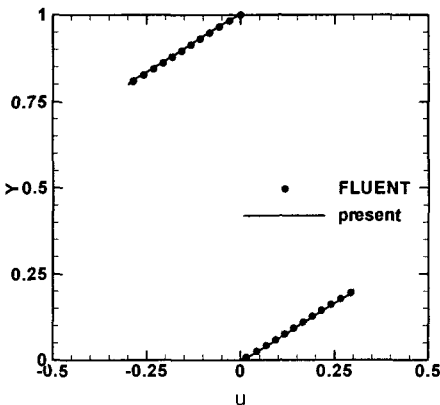


Fig. 9 Comparison of u at $x=0.5$ obtained from the present calculation with those from commercial code calculation at $Re=100$

이 경우 메모리, 계산 시간, 계산의 정확도 등에 많은 어려움이 따르게 된다. 그러나 가상 경계 방법을 사용하여 계산을 수행하면 상대적으로 쉽게 물체의 운동에 따른 유동을 모사할 수 있다. 이때 추가되는 복잡성은 그리 크지 않다. Fig. 10은 $Re=100$ 의 조건에서 사각 공동 내부에 존재하는 원형 관이 진동할 때, 공동 내부에 형성되는 속도 벡터와 압력의 분포를 보여주고 있다. 이 그림은 일정 시간이 지난 후에, 원형 관이 우측에서 좌측으로 이동하면서 사각 공동 내부의 중심을 막 통과하는 순간의 속도 벡터 및 압력 분포를 보여주고 있다. 우측에서 좌측으로 움직이는 원형 관의 이동으로 인하여, 원형 관의 좌측 및 우측에 위치한 유체는 전체적으로 우측에서 좌측을 향하여 흘러간다. 그러나 사각 공동 상하부에 위치한 유체는 반대로 좌측에서 우측을 향하여 흘러간다. 사각 공동의 좌측 벽에 부딪힌 유체는 상하로 나누어져 중앙에서 사각 공동 상하부 벽을 향하여 흐르고, 우측 벽쪽에 위치한 유체는 반대로 상하부 벽면에서 중앙을 향하여 흐른다. 이러한 유동의 분포로 인하여 좌측은 높은 압력을 가지고 좌에서 우측으로 갈수록 압력은 낮아지게 된다.

Fig. 11은 원형 관 상부와 사각 공동 상부 벽 사이의 가운데 점 ($x=0.5, y=0.9$)에서 x -방향 속도 (u/U_0) 및 y -방향 속도 (v/U_0)의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 아울러 원형 관의 이동 속도 (U/U_0)의 시간에 따른 변화를 동시에 나타내었다. u 는 물체의 이동 속도 U 보다 조금 큰 값을 가지고 진동하고 있으며, v 는 아주 작은 값을 가지고 진동하고 있다. 여기서 u, v 및 U 사이에 존재하는 위상차를 관찰할 수 있다. 아울러 상용 코드에서 미끄럼 격자 기법을 사용하여 계산을 수행하였다. 상용 코드에서 미끄럼 격자 기법을 사용하여 구한 x -방향 속도 (u/U_0) 계산 결과는 현재의 계산 결과와 비교 되어졌다. Fig. 11에서 보여준 것처럼 두 방법을 사용한 계산 결과는 거의 일치하고 있다. 그러므로 현재의 가상 경계 기법은 움직이는 물체 주위의 유동을 잘 예측할 수 있다. 아울러 본 연구에서는 원형 관이 상하 및 대각선으로 진동하는 경우, 회전과 진동이 동시에 존재하는 경우 등에 대한 계산을 수행하였다. 이러한 계산으로부터 아주 흥미로운 많은 결과를 얻었으며, 주요 결과들은 참고문헌⁽¹³⁾에 정리되어 있다.

가상경계방법이 원형이 아닌 임의의 형상을 가지는 물체 주위의 유동을 적절하게 모사할 수 있다는 것을 보여주기 위하여, 사각 공동 내부에 타원이 존재하는 경우에 대한 계산을 수행하였다. Fig. 12는 사각 공동 내부에 정지한 수직 타원

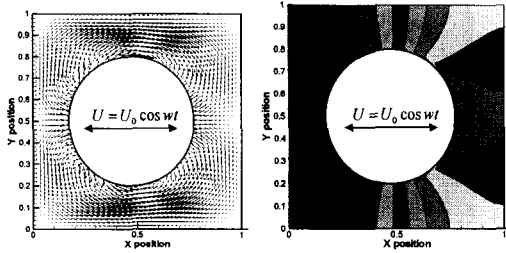


Fig. 10 Velocity vectors and pressure contours for the cavity flow in the presence of the oscillating cylinder in the cavity at $Re=100$

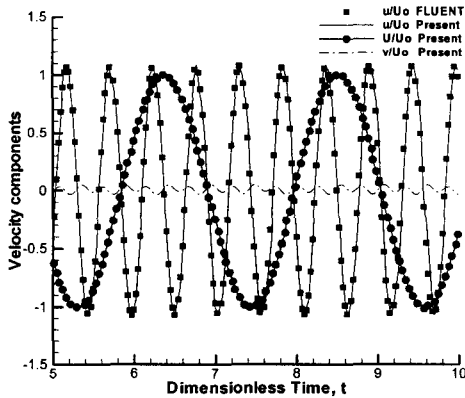


Fig. 11 Normalized velocity components as a function of dimensionless time

관이 존재하고, $Re=100$ 의 조건에서 사각 공동의 상부 벽이 일정 속도로 좌에서 우로 움직일 때 내부에 형성되는 속도 벡터의 분포를 보여주고 있다. 사각 공동 내부에 정지한 수직 타원 관이 존재하는 경우에 사각 공동 내부에 형성되는 유동은 전체적으로 원형 관이 존재하는 경우와 유사한 패턴을 보여주고 있다. 수직 타원 상부에 형성된 시계 방향으로 회전하는 와의 크기는 원형 관이 존재하는 경우에 비하여 크다. Fig. 13은 본 계산 및 상용 코드를 사용한 계산 결과와의 비교를 보여주고 있다. 앞의 경우들과 마찬가지로 본 계산 결과는 상용 코드의 결과를 잘 나타내고 있다.

가상경계방법에 대한 지금까지의 설명은 사각 공동 내부에 존재하는 원형 및 타원 관이 임의의 운동을 하는 경우 공동 내부에 형성되는 내부 유동 (internal flow)에 대한 계산 결과를 보여주고 있다. 외부 유동에서의 가상경계방법의 적용 가능성을 조사하기 위하여 원형 관 주위의 외부 유동에 대한 계산을 수행하였다.

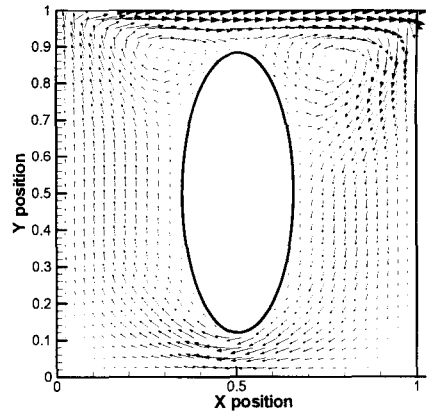


Fig. 12 Velocity vectors for the cavity flow in the presence of the vertical Ellipse in the cavity at $Re=100$

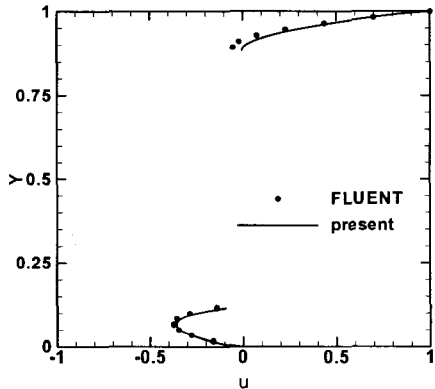


Fig. 13 Comparison of u at $x=0.5$ obtained from the present calculation with those from commercial code calculation at $Re=100$

Fig. 14는 계산에 사용된 형상과 경계조건을 보여주고 있다. 계산에 사용한 레이놀즈 수는 25이다. 오일러 격자수는 x 및 y 방향으로 각각 400×200 이며, 실린더의 표면을 따라 사용한 라그랑지안 격자수는 내부유동의 경우와 동일하게 360개이다. Fig. 15는 원형 관 주위의 유선을 보여주고 있다. 본 계산 결과는 원형 관 표면에서의 박리, 관 후류에 형성되는 상하 대칭의 박리 기포 (separation bubble) 등과 같은 관 주위의 외부 유동에서 관찰되는 현상들을 잘 재현하고 있다. Table 1은 현재의 계산과 타 연구자의 수치 계산 및 실험에 의하여 구한 박리 기포 길이 등의 결과를 비교하여 보여주고 있다. 이 표에서 보여준 것처럼 현재의 가상경계기법을 사용하여 구한

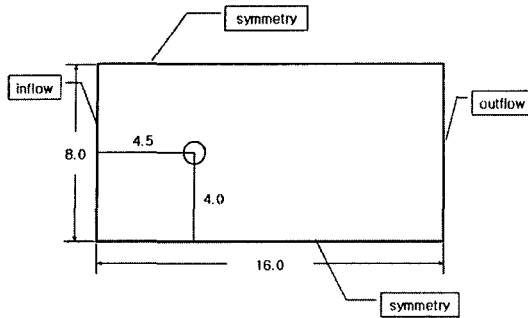


Fig. 14 The computational geometry and boundary conditions for the flow past a circular cylinder

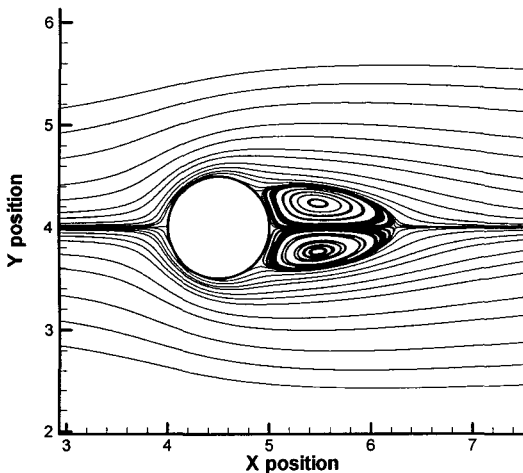


Fig. 15 Streamlines for the flow past a circular cylinder for $Re=25$

계산 결과들은 타 연구자들의 계산 및 수치 계산 및 실험 결과를 잘 재현하고 있다. 그러므로 본 연구에서 개발된 가상경계기법은 내부 및 외부 유동에 동일하게 적용할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 가상경계기법을 사용한 2차원, 비정상 해석 컴퓨터 코드를 개발하였다. 이렇게 개발된 코드를 사용하여 내부 및 외부 유동에 대한 계산을 수행하였다.

사각 공동 내부에 존재하는 원형 혹은 타원 형상을 하고 있는 판이 정지, 회전, 진동 혹은 이들의 조합인 임의의 운동을 하는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 현재의 가상경계방법은 직교

Table 1 Comparison with the experiment for $Re=25$

| Properties of the wake behind a stationary cylinder | $Re=25$ | | | |
|---|----------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| | Present result | Saiki & Biringen ⁽¹³⁾ | Gresho et al ⁽¹⁴⁾ | Coutanceau & Bouard ⁽¹⁵⁾ |
| Length of separation bubble | 1.22 | 1.44 | 1.15 | 1.22 |
| X-coordinate of the center of the vortex cores | 0.4723 | 0.53 | 0.38 | 0.44 |
| y-distance between the vortex cores | 0.4748 | 0.5 | 0.47 | 0.51 |
| Minimum streamwise velocity on the axis of symmetry | -0.058 | -0.064 | -0.057 | -0.057 |
| X-coordinate Of minimum streamwise velocity on the axis of symmetry | 0.53 | 0.59 | 0.49 | 0.5 |

좌표계 하에서 이러한 유동을 잘 재현하였으며, 상용 전산 코드를 사용하여 구한 결과를 전체적으로 잘 재현하였다. 원형 판 주위의 외부 유동에 대한 계산을 수행하였으며 본 계산 결과는 다른 연구자의 계산 및 실험 결과를 잘 재현하였다.

본 연구에서 가상경계방법을 사용하여 개발한 현재의 컴퓨터 코드는 임의 형상의 물체가 임의의 운동을 하는 경우의 2차원 비정상 내부 및 외부 유동을 해석하는데 유용하게 사용 되어질 수 있다.

후 기

본 연구는 NRL 의 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) Park, I.R. and Chun, H.H., 2001, "A Study of Accuracy Improvement of an Analysis of Flow Around Arbitrary Bodies by Using an Eulerian-Lagrangian Method," *J. of Computational Fluids Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 19~26.
- (2) Ye, T., Mittal, R., Udaykumar, H. S. and Shyy, W.,

- 1999, "An Accurate Cartesian Grid Method for Viscous Incompressible Flows with Complex Immersed Boundaries," *J. of Computational Physics*, Vol. 156, pp. 209~240.
- (3) Calhoun, D. and LeVeque, R. J., 2000, "A Cartesian Grid Finite-Volume Method for the Advection-Diffusion Equation in Irregular Geometries," *J. of Computational Physics*, Vol. 157, pp. 143~180.
- (4) Udaykuma, H. S., Kan, H. C., Shyy W. and Tran-Son-Tay R., 1997, "Multiphase Dynamics in Arbitrary Geometries on Fixed Cartesian Grids," *J. of Computational Physics*, Vol. 137, pp. 366~405.
- (5) Goldstein, D., Handler, R. and Sirovich, L., 1993, "Modeling a No-Slip Boundary with an External Force Field," *J. of Computational Physics*, Vol. 105, pp. 354~366.
- (6) Saiki, E. M. and Biringen, S., 1996, "Numerical Simulation of a Cylinder in Uniform Flow; Application of a Virtual Boundary Method," *J. of Computational Physics*, Vol. 123, pp. 450~465.
- (7) Fadlun, E. A., Verzicco, R., Orlandi, P. and Mohd-Yusof, J., 2000, "Combined Immersed Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulations," *J. of Computational Physics*, Vol. 161, pp. 35~60.
- (8) Stokie, J. M. and Wetton, B. R., 1999, "Analysis of Stiffness in the Immersed Boundary Method and Implications for Time-Stepping Schemes," *J. of Computational Physics*, Vol. 154, pp. 41~64.
- (9) Cortez, R., 1996, "An Impulse-Based Approximation of Fluid Motion due to Boundary Forces," *J. of Computational Physics*, Vol. 123, pp. 341~353.
- (10) Peskin, C.S., 1982, "The Fluid Dynamics of Heart Valves: Experimental, Theoretical, and Computational Methods," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 14, pp. 235~259.
- (11) Lai, M. C. and Peskin, C. S., 2000, "An Immersed Boundary Method with Formal Second-Order Accuracy and Reduced Numerical Viscosity," *J. of Computational Physics*, Vol. 160, pp.705~719.
- (12) Ghia, U., Ghia, K.N. and Shin, C.T., 1982, "High-Resolution Solution for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equation and Multigrid Method," *J. of Computational Physics*, Vol. 48, pp.387~410.
- (13) Yang, S. Y., 2003, "The Study of the Characteristics of the Stationary, Rotating and Oscillating Cylinders Using the Immersed Boundary Method," *M.S. Thesis, Pusan National University*.
- (14) Gresho, P. M., Chan, S. T., Lee, R. L. and Upson, C. D., 1984, "A Modified Finite Element Method for Solving the Time-Dependent, Incompressible Navier-Stokes Equations. Part 2: Applications," *Int. J. Numer. Methods in Fluids*, 4(7), 619~640.
- (15) Coutanceau, M. and Bouard, R., 1977, "Experimental Determination of the Viscous Flow in the Wake of a Circular Cylinder in Uniform Translation. Part 1: Steady Flow, Part 2: Unsteady Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, No. 2, pp. 231~272.