

HCIB법을 이용한 변형하는 평판 주위의 3차원 유동해석

신 상 목^{*1}

COMPUTATIONS ON FLOW FIELDS AROUND A 3D FLAPPING PLATE USING THE HYBRID CARTESIAN/IMMERSED BOUNDARY METHOD

Sangmook Shin^{*1}

A code is developed using the hybrid Cartesian/immersed boundary method and it is applied to simulate flows around a three-dimensional deforming body. A new criterion is suggested to distribute the immersed boundary nodes based on edges crossing a body boundary. Velocities are reconstructed at the immersed boundary nodes using the interpolation along a local normal line to the boundary. Reconstruction of the pressure at the immersed boundary node is avoided using the hybrid staggered/non-staggered grid method. The developed code is validated through comparisons with other experimental and numerical results for the velocity profiles around a circular cylinder under the forced in-line oscillation and the pressure coefficient distribution on a sphere. The code is applied to simulate the flow fields around a plate whose tail is periodically flapping under a translation. The effects of the velocity and acceleration due to the deformation on the periodic shedding of pairs of tip vortices are investigated.

Key Words : 변형 물체(Deforming Body), 가상경계절점(Immersed Boundary Nodes), 속도 재구성(Velocity Reconstruction), 엇갈림-비엇갈림 혼합 격자(Hybrid Staggered/Non-staggered Grid), 끝단 와류(Tip Vortex)

1. 서 론

많은 실질적인 문제들에서 유체 속에서 변형하는 물체에 대한 해석이 요구된다. 최근 들어 시간에 따라 물체의 경계면이 변형되는 경우, 이에 따른 유동영역의 변화를 고려하기 위한 다양한 방법들이 활발히 연구되고 있다. 이러한 방법들은 격자계의 경계를 항상 물체 경계면과 일치시키는지의 여부에 따라 boundary conforming 기법과 non-boundary conforming 기법으로 분류할 수 있다.

Boundary conforming 기법들의 경우 물체 주위 경계층에서 절점들의 조밀도 조절이 용이하기 때문에 높은 Reynolds 수의 유동해석에 장점을 갖고 있다. 그러나 물체 형상 변화에 따라 변형되는 격자계의 질을 보장하기 어려우며 이에 따라 임의의 형상 변화에 적용하기 곤란한 단점을 갖고 있다. 반면 Non-boundary conforming 기법들의 경우 경계면과 독립적인

배후격자계에서 유동해석이 이루어지기 때문에 복잡한 경계면 형상이나 임의의 대변형을 쉽게 처리할 수 있다.

Peskin에 의해 제안된 가상경계법(immersed boundary method)은 많은 연구자들에 의해 발전되어 왔다[1,2]. 가상경계법에서는 경계조건을 만족시키기 위해 경계면 근처에서 추가적인 운동량 부가(momentum forcing)를 사용한다. 이 과정에서 수치해석 상의 경직성(stiffness)을 제거하기 위해 운동량 부가는 몇 개의 절점에 걸쳐서 분포시키게 되며 이에 따라 경계면 형상이 예리한 경우 이를 해석하기 위해서는 격자 조밀도에 대한 요구가 과도해진다든 단점을 갖고 있다. Cut-cell (Cartesian) 기법의 경우 경계면 주위의 요소를 변형시킴으로써 배후격자의 크기에 관계없이 임의의 형상의 경계면을 처리할 수 있다[3]. 그러나 이 방법은 경계면 근처에서 변형되는 요소들이 수치기법의 정확성이나 안정성을 해치는 경우가 발생한다는 단점을 갖고 있다.

최근 Gilmanov 등은 복잡하고 변형되는 경계면을 효과적으로 처리할 수 있는 새로운 기법인 hybrid Cartesian/ immersed boundary(HCIB) 법을 제안하였다[4,5]. 이 방법에서는 유동영역 내부의 경계면 주위 절점들을 가상경계절점(immersed

접수일: 2006년 10월 23일, 심사완료일: 2007년 1월 26일.

1 정회원, 부경대학교 조선해양시스템공학과

* E-mail: smshin@pknu.ac.kr

boundary node)으로 정의한 다음 가상경계절점에서의 속도를 경계면에 수직한 방향으로의 보간을 통해 재구성한다. 가상경계절점들에서 재구성된 속도는 이산화된 유동해석 문제의 경계조건을 제공한다. 이 방법은 배후격자의 요소 크기에 관계없이 두께가 영인 물체에도 적용이 가능하며 복잡하고 임의로 크게 변형되는 경계를 쉽게 처리할 수 있다는 장점이 있다.

Shin 등[6,7]은 가상경계절점을 분포시키기 위한 새로운 방법을 제안하고 개발된 2차원 HCIB 코드를 사용하여 유동에 의한 하중 때문에 변형하는 유연한 구조물의 거동을 해석하였다. 본 논문에서는 2차원 HCIB 코드를 3차원으로 확장하고 개발된 3차원 HCIB 코드를 이용하여 직진하면서 변형하는 평판 주위의 점성유동을 해석하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 지배방정식과 hybrid staggered/non-staggered 격자

지배방정식은 비압축성 유동에 대한 3차원 비정상 Navier-Stokes 방정식이다. 유체의 속도 성분 u_i 와 압력 p 는 각각 유체의 밀도 ρ , 특성속도 U , 특성길이 L 로 무차원화되었다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

시간에 따라 변형되는 물체의 경계면은 물체 표면에 분포된 Lagrangian 점들을 연결하여 구성되는 삼각형들의 집합에 의하여 정의된다. 매 순간 Lagrangian 점들의 위치와 속도가 주어지며 경계면에서의 no-slip 조건이 유동에 대한 속도 경계조건이 된다.

HCIB법에서는 유동해석을 Cartesian 격자에서 수행하며 유동영역 내부에 위치한 절점들 중에서 경계에 가까운 절점을 가상경계절점으로 분류하고 이 절점들에서 속도를 경계에 수직한 방향으로의 보간을 통해 재구성한다. Gilmanov 등[4]은 초기에는 모든 종속변수들을 격자의 절점에 정의한 non-staggered 격자계에서 경계조건 재구성 및 유동해석을 수행하였다. 이러한 경우 가상경계절점에서 압력도 재구성되어야 한다. 그러나 압력 경계조건 형태와 비압축성 유동에서 변형되는 경계면 주위의 압력 거동 특성 등으로 인해 가상경계절점에서의 압력 재구성은 속도 보간보다 많은 부정확성이

포함된다. 이에 따라 속도 경계조건 재구성은 non-staggered 격자를 이용하여 단순화되되 유동해석은 staggered 격자에서 수행함으로써 가상경계절점에서의 압력 재구성 필요성을 없앤 hybrid staggered/non-staggered 기법이 제안되었다[5]. 비록 두 격자계 종속변수들 사이의 추가적인 보간이 요구되는 단점은 있으나 가상경계절점에서의 압력 재구성을 피하기 위하여 본 연구에서도 hybrid staggered/non-staggered 격자를 사용하였다.

2.2 가상경계절점에서 속도 재구성

HCIB법의 가장 중요한 특징은 유동영역 내부에 분포된 가상경계절점에서의 속도를 경계면으로부터 국부적인 수직방향으로의 보간을 통해 재구성한다는 점이다. 이때 가상경계절점에서 재구성된 속도들의 집합은 유동해석 문제가 well-posed 되도록 해야 한다. 이러한 요구조건은 이산화된 문제에서 가상경계절점들의 집합이 닫힌 유동영역의 경계를 명확히 정의하도록 해야 함을 의미한다.

초기에 Gilmanov 등[4]은 유동영역 내부의 절점들 중에서 유동영역 외부의 절점과 edge로 연결되는 절점들을 가상경계절점으로 정의하도록 제안하였다. 이 기준은 가상경계절점의 집합에 의해 닫힌 유동영역의 경계가 보장된다는 장점은 있지만 물체의 두께가 격자 요소 한 개보다 작은 형상을 표현하기 어렵다는 문제를 갖고 있다. 이에 따라 Gilmanov 등은 유동영역 내부 절점에서 경계면까지의 거리를 기준으로 가상경계절점을 정의하도록 수정하였다[5]. 이 방법은 두께가 영인 물체도 정확히 표현한다는 장점이 있지만 격자 간격이 경계면을 따라 일정하지 않은 경우 닫힌 유동영역의 경계가 형성되도록 보장하는 거리 기준이 모호하다는 단점을 갖고 있다.

Shin 등[6,7]은 닫힌 유동영역의 경계가 항상 보장되면서 두께가 영인 물체도 제대로 표현할 수 있는 새로운 기준을 제안하였다. 이 기준에서는 유동영역 내부의 임의의 절점에 연결된 6개의 edge들 중에서 경계면을 가로지르는 edge가 있는지 여부에 따라 가상경계절점이 결정된다. Fig. 1은 제안된 기준에 의해 정의된 가상경계절점 분포의 2차원 예를 보여준다. 그림에서 원으로 표시된 절점들이 경계면을 가로지르는 edge와 연결되어 가상경계절점으로 분류된 절점들이다. 유동영역 내부의 절점이면서 가상경계절점이 아닌 절점들은 유체 절점으로 분류되어 실질적인 유동해석이 이루어진다. 3차원의 경우도 경계면을 가로지르는 edge들을 찾음으로써 가상경계절점들이 쉽게 분류된다. 임의의 edge가 경계면을 가로지르는지 여부는 물체 두께가 영이더라도 명확하게 판별되기 때문에 제안된 기준은 물체 두께에 상관없이 물체를 제대로 표현할 수 있다. 또한 이 기준에 의하면 모든 유체절점들은 그 주위

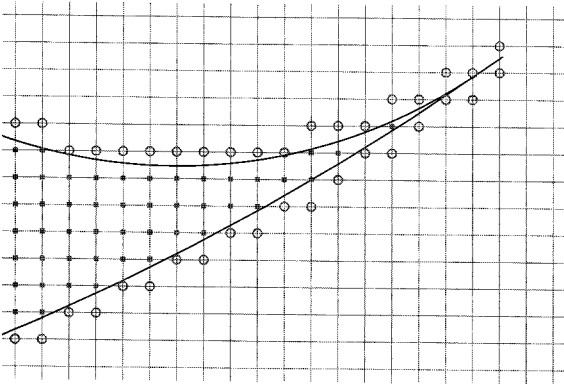


Fig. 1 Cartesian background grid, body boundary and immersed boundary nodes

상의 삼각형 요소를 구성하는 세 개의 Lagrangian 점들(C_1, C_2, C_3)에서 주어진 속도 경계조건으로부터 추정한다. 그리고 유동영역 내부의 사각형 위의 점 P_G 에서의 속도는 그 사각형의 네 개의 절점들(N_1, N_2, N_3, N_4)에서 유동해석의 가상시간에 대한 내부 반복단계의 직전 단계에서 추정된 속도들로부터 계산된다. 수직 선분 양단 P_B 와 P_G 에서의 속도는 그 점으로부터 속도가 정의된 절점까지의 거리의 역수를 가중치로 한 보간이 사용되었다. 예를 들어 점 P_G 에서의 속도는 다음과 같다.

$$\phi_{P_G}^l = \frac{1}{\sum_{k=1}^4 \frac{1}{d_k}} \left(\sum_{k=1}^4 \frac{1}{d_k} \phi_k^l \right) \quad (3)$$

여기서 $\phi_{P_G}^l$ 는 점 P_G 에서 l -번째 내부 반복단계에서 추정된 속도 성분이고 d_k 와 ϕ_k^l 는 각각 사각형의 네 개의 절점들로부터 점 P_G 까지의 거리와 그 절점에서 l -번째 내부 반복 단계에서 추정된 속도 성분이다. 마지막으로 가상경계절점에서의 속도는 그 선분 양단 P_B 와 P_G 에서 추정된 속도들과 그 선분의 양단으로부터 가상경계절점까지의 거리들을 사용하여 추정된다. 본 연구에서는 수직 선분 양단 사이에서는 속도가 선형적으로 변화 한다고 가정되었다.

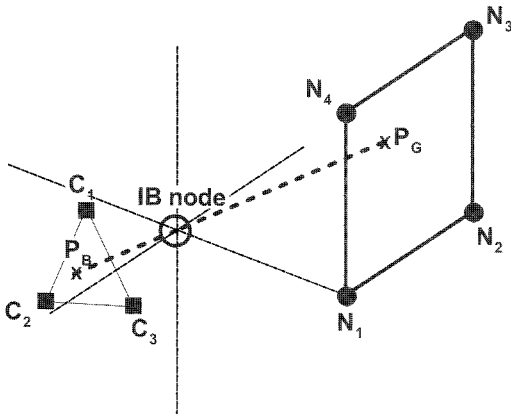


Fig. 2 Reconstruction of velocity at an immersed boundary node by the interpolation along a local normal line

$$\phi_{IB}^l = \frac{1}{d_{P_G} + d_{P_B}} (d_{P_G} \phi_{P_B} + d_{P_B} \phi_{P_G}^l) \quad (4)$$

의 절점들이 다른 유체절점 혹은 가상경계절점이라는 점이 항상 보장된다. 이러한 성질은 뒤에서 설명될 hybrid staggered/non-staggered 법에 의한 유동해석이 잘 정의된 종속변수로만 수행되도록 보장하는 아주 중요한 특성으로서, 이산화된 문제에서 닫힌 유동영역의 경계 형성을 보장한다.

Fig. 2는 가상경계절점에서 속도를 재구성하는 과정을 보여주고 있다. 각각의 가상경계절점에 대해 우선 그 절점을 통과하면서 물체 경계면과 수직으로 만나는 경계면 상의 점 P_B 를 찾는다. 만약 물체가 예리한 끝단을 포함하여 경계면과 수직으로 만나는 선분이 정의되지 않는 가상경계절점에 대해서는 그 절점에서 경계면 상의 가장 가까운 점으로 대체된다. 이후 경계면 위의 점 P_B 와 주어진 가상경계절점을 통과하는 선분을 유동영역으로 연장하여 배후격자의 인접한 네 개의 절점들로 정의되는 사각형과 만나는 점 P_G 를 찾는다. 경계면 상의 점 P_B 에서의 속도는 점 P_B 를 포함하는 경계면

여기서 ϕ_{IB}^l 은 l -번째 내부 반복단계에서 재구성된 가상경계절점에서의 속도 성분이고 ϕ_{P_B} 는 경계면 위의 점 P_B 에서 해당하는 물리적 시간 단계에서 주어진 경계면의 속도 성분이다. 그리고 d_{P_B} 와 d_{P_G} 는 가상경계절점으로부터 수직 선분 양단까지의 거리이다.

2.3 Hybrid staggered/non-staggered 격자에서의 유동해석

Fig. 3은 hybrid staggered/non-staggered 격자에서의 종속변수들의 배치를 보여준다. 압력과 non-staggered 격자의 속도 성분들은 배후격자의 절점들에 정의되고, 두 절점들을 연결하는 edge의 중앙에 staggered 격자의 그 edge 방향 속도 성분이 정의된다. 가상경계절점(빈 원)에서 재구성된 속도와 내부 반복 단계에서의 유체절점에서의 속도를 이용하여 가상경계절점과 유체절점을 연결하는 edge에 정의된 staggered 격자의 속도 성분(빈 삼각형)을 보간한다.

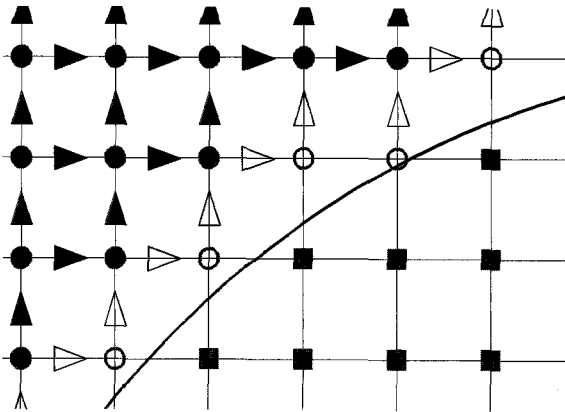


Fig. 3 An arrangement of the dependent variables for the hybrid staggered/non-staggered grid

모든 유체절점(채워진 원)에서 대류항과 확산항에 의한 잉여항을 계산한다. 대류항 계산을 위해서는 2차의 upwind-biased 차분식이 사용되었다. 이러한 대류항 계산의 경우 경계면 근처의 유체절점에서 속도방향에 따라 가상경계절점 외부의 속도가 요구되는 경우가 발생할 수 있다. 그러한 경우에는 1차의 upwind 차분식을 이용하여 stencil을 축소하였다. Gilmanov 등[4,5]은 경계 근처에서의 이러한 근사가 전체 수치기법의 공간에 대한 2차 정도를 떨어뜨리지 않는다는 점을 오차의 격자 크기에 대한 변화로부터 확인하였다. 이러한 거동에 대한 설명으로 Gilmanov등은 1차의 upwind 차분식의 절단오차는 종속변수의 2차 미분치에 비례하고, 경계면 근처에서 종속변수가 선형적으로 변하는 경우 2차 미분치가 영이 된다는 사실을 지적하였다[4,5]. 확산항은 2차의 중앙차분법을 이용하여 계산되었다.

앞 절에서 지적한 바와 같이 모든 유체절점은 다른 유체절점 혹은 가상경계절점과 연결된다는 점이 보장되기 때문에 모든 유체절점에서 대류항과 확산항이 잘 정의된 종속변수들만으로 계산됨을 쉽게 확인할 수 있다. 유체절점에서 계산된 대류항과 확산항의 합은 두 유체절점들을 연결하는 edge의 중앙(채워진 삼각형)에서 보간된다. 본 연구에서는 edge 양쪽의 절점에서 계산된 잉여항의 산술 평균이 사용되었다. 압력의 기울기는 edge의 양쪽 절점들에서 정의된 압력들을 이용하여 계산된다.

비압축성 조건을 만족시키기 위해 가상시간에 대해 의사압축성을 도입하고 가상시간에 대한 내부 반복단계가 수렴하면 물리적 시간을 전진시킨다. 유체절점에 정의된 압력은 그 절점과 연결된 edge들의 중점에 정의된 staggered 격자의 속도 성분을 이용한 divergence 계산에 의해 수정되어간다. 물리적 시간에 대해서는 3점의 2차 후방 차분법이 사용되었고 가상시간에 대한 내부 반복을 위해서는 외재적 방법이 이용되었

다. 연속 방정식과 x -방향 운동량 보존식의 차분화된 형태는 아래와 같다.

$$\frac{p_{i,j,k}^{n+1,l+1} - p_{i,j,k}^{n+1,l}}{\Delta \tau} + \beta(\delta_x u_{i,j,k}^{n+1,l} + \delta_y v_{i,j,k}^{n+1,l} + \delta_z w_{i,j,k}^{n+1,l}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l+1} - u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l}}{\Delta \tau} + \delta_t u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l+1} + XM_{i+1/2,j,k}^{n+1,l} + \delta_x p_{i+1/2,j,k}^{n+1,l} = 0 \quad (6)$$

여기서 상 첨자 $(n+1,l)$ 은 $(n+1)$ -번째 물리적 시간 단계에서 l -번째 가상시간에 대한 내부 반복단계를 의미한다. β 는 의 사압축성 계수이고, $XM_{i+1/2,j,k}^{n+1,l}$ 은 두 유체절점 (i,j,k) 와 $(i+1,j,k)$ 에서 계산된 x -방향 운동량 보존식의 대류항과 확산항의 합을 그 edge의 중앙에서 보간한 값이며 δ_x 와 δ_t 는 다음과 같다.

$$\delta_x u_{i,j,k}^{n+1,l} = \frac{u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l} - u_{i-1/2,j,k}^{n+1,l}}{\Delta x} \quad (7)$$

$$\delta_t u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l+1} = \frac{3u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l+1} - 4u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l} + u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l-1}}{2\Delta t} \quad (8)$$

가상시간에 대한 내부 반복단계가 수렴하면 $(n+1,l)$ 및 $(n+1,l+1)$ 의 종속변수가 $(n+1)$ 의 종속변수로 되며 물리적 시간을 전진시킨다. 계산된 staggered 격자에서의 속도 성분들을 이용하여 유체절점들에서의 non-staggered 속도 성분들을 보간한다. 본 계산에서는 절점에 연결된 edge들의 중점에서의 속도 성분들을 산술 평균하였다.

$$u_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1}{2}(u_{i+1/2,j,k}^{n+1} + u_{i-1/2,j,k}^{n+1}) \quad (9)$$

새로운 물리적 시간 단계에서는 새로운 Lagrangian 점들의 위치와 속도를 이용하여 절점의 분류와 가상경계절점에서 속도 재구성을 위한 가중치 계산을 다시 수행한다. 이 때 물리적 시간에 대한 미분치 계산에 정의되지 않은 종속변수의 사용을 피하기 위해서는 유동영역 바깥의 절점이 가상경계절점 단계를 거치지 않고 유체절점이 되지 않도록 물리적 시간 간격이 제한되어야 한다. 이 조건은 경계면이 물리적 시간 간격 동안 한 개의 요소를 완전히 통과해 지나가지 않을 것을 요구한다.

3. 결과 및 토론

개발된 코드에 대한 검증을 위해 원주가 정지된 유체 속에서 직선 조화 운동을 하는 경우와 구 주위의 층류 유동을 계산하고 다른 실험 및 계산 결과와 비교하였다. 그리고 개발된 코드를 이용하여 직진하면서 변형하는 판 주위의 점성유동이 해석되었다.

3.1 정지된 유체 속에서 진동하는 원주 주위 유동해석

정지된 유체 속에서 원주가 직선 조화 운동을 하는 경우에 대한 유동장은 Dutsch 등[8]에 의한 실험 결과와 Yang 등[9]에 의한 계산 결과가 보고되었다. 원주는 정지된 유체 속에서 $x(t) = -A \cos(2\pi ft)$ 의 강제 조화 운동을 하며 Reynolds 수 $Re = U_{max} D / \nu$ 와 Keulegan-Carpenter 수 $KC = U_{max} / fD$ 는 각각 100과 5로 주어졌다. 계산 영역은 $50D \times 30D$ 이며 계산 영역 경계의 종속 변수들은 유동영역으로부터 외삽되었다. $-3D < x < 3D$ 및 $-2D < y < 2D$ 에서는 격자 간격이 $0.02D$ 로 고정되었고 이후 1.05의 비율로 확대되었다. 물리적 시간 간격은 0.01로서 한 주기 당 500 단계의 물리적 시간단계가 포함되었다.

Fig. 4는 $\theta = 198^\circ$ 인 순간 원주 주위의 압력 및 와류 분포를 보여준다. 등압선의 범위는 $0 < p < 2.2$ 이고 각 등압선의 간격은 0.1이다. 표시된 와류의 전체 범위는 $-20 < \omega < 20$ 이고 $-5 < \omega < 5$ 에서의 간격은 0.5이다. $\theta = 198^\circ$ 인 순간은 오른쪽으로 움직이던 원주에 의해 박리된 와류 쌍이 다시 왼쪽으로 움직이기 시작한 원주에 의해 밀려나면서 위 아래로 벌어지는 순간이다. 이 순간에 대한 압력 및 와류 분포는 Yang 등[9]에 의해서도 보고되었으며 원주 앞에 보이는 압력 분포의 굴곡이나 와류 분포 형태가 아주 좋은 일치성을 보인다.

Fig. 5는 θ 가 각각 90° 와 240° 인 순간 여러 위치들에서의 속도 분포를 Dutsch 등[8]의 실험 및 Yang 등[9]의 계산 결과와 비교한 그림이다. 그림에서 채워진 기호는 본 계산 결과이고 빈 기호들은 Dutsch 등의 실험 결과이며 Yang 등의 계산 결과는 선으로 표시되었다. θ 가 90° 의 경우에는 x 가 $-0.6D$, 0 그리고 $0.6D$ 에서 결과를 각각 사각형, 원, 마름모로 표시하였다. 그리고 θ 가 240° 의 경우에는 x 가 0 , $0.6D$ 그리고 $1.2D$ 에서 결과를 각각 사각형, 원, 마름모로 표시하였다. 실험 결과와 다소 차이가 있는 부분들에서도 본 계산과 Yang 등의 계산 (채워진 기호와 선)은 아주 좋은 일치를 보이고 있다. 두 가지 계산이 약간의 차이를 보이는 경우는 θ 가 90° 에서의 원주 주위의 u -분포이며 이 영역은 이전에 박리되어 원주에 의해 위 아래로 밀려나면서 약해지는 와류의 영향이 나타나 는 영역이다.

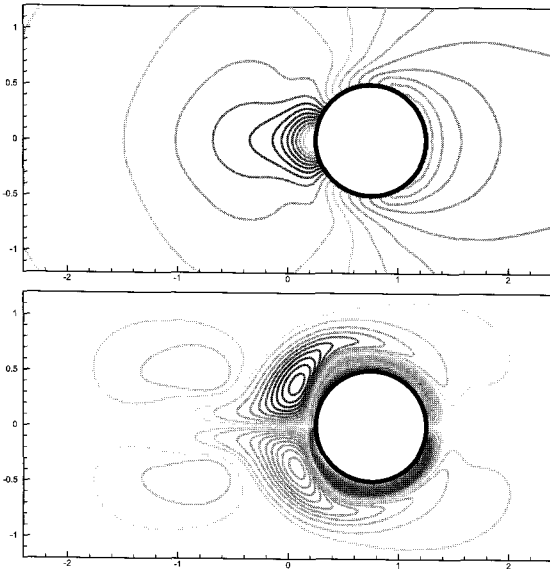


Fig. 4 Pressure and vorticity contours around a circular cylinder under the forced in-line oscillation, $\theta=198^\circ$

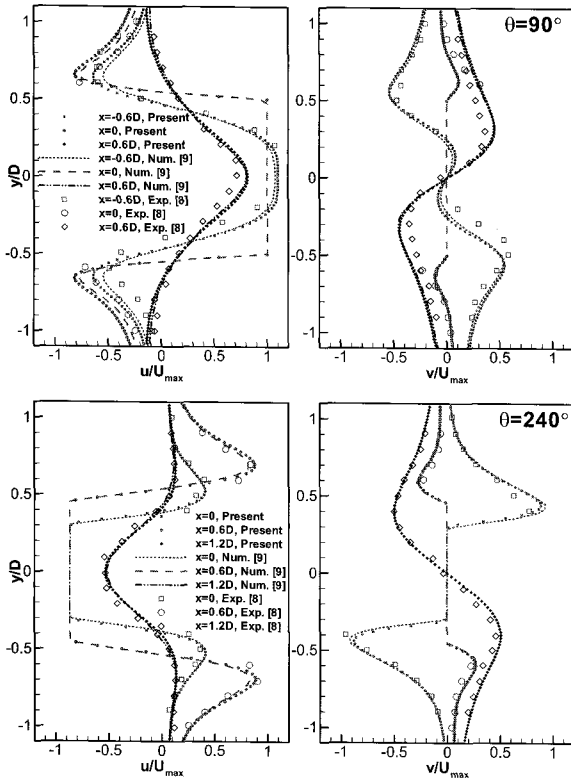


Fig. 5 Velocity profiles around a circular cylinder under the forced in-line oscillation, $\theta=90^\circ, 240^\circ$

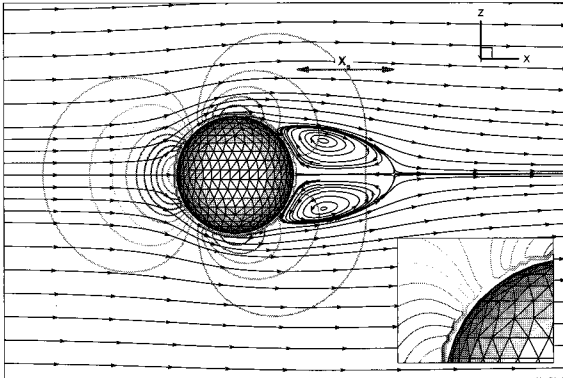


Fig. 6 Streamlines and pressure contours around a sphere, $Re=100$

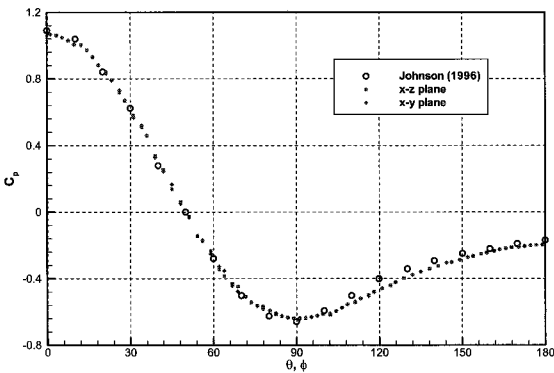


Fig. 7 Comparisons of the pressure coefficient distributions on a sphere, $Re=100$

3.2 구 주위의 층류 유동 해석

개발된 3차원 코드의 검증을 위해 구 주위의 층류 유동을 계산하고 그 결과를 다른 계산 결과와 비교하였다. 구의 직경으로 무차원화 된 Reynolds 수는 100이다. 계산영역은 $-5 < x < 10$, $-5 < y < 5$, $z < 5$ 이고 $-0.6 < x < 1.2$, $-0.6 < y < 0.6$ 에서는 0.02의 최소 간격이 일정하게 유지되었고 그 외의 영역에서는 1.06의 비율로 확대되었다. 물리적 시간 간격은 0.01로 주어졌고 정지된 상태에서 무차원화 된 시간이 2가 되는 동안 유입속도가 선형적으로 증가되었다. 구 표면 위에는 460개의 Lagrangian 절점들과 916개의 삼각형 요소가 분포되었다.

Fig. 6은 구 표면 위의 삼각형 요소들과 계산된 압력 및 유선의 분포를 보여준다. 오른쪽 하단의 확대된 그림에서 보듯이 가상경계절점들은 계단 형태로 불규칙한 분포를 갖지만

Table 1 Comparisons of calculated separation bubble length behind a sphere, $Re=100$

	Present	Gilmanov[4]	Johnson[10]
X_s	0.867	0.894	0.882

계산된 압력은 부드럽게 분포함을 볼 수 있다. 유선 및 속도 분포로부터 separation bubble의 길이 X_s 는 0.867로 추정되었고 Table 1에서 Gilmanov 등[4]과 Johnson[10]의 계산 결과들과 비교되었다. Fig. 7에서는 $x-y$ 및 $x-z$ 평면에서의 구 표면 위의 압력계수 분포가 Johnson[10]의 계산 결과와 비교되었다.

3.3 직진하면서 변형하는 3차원 평판 주위 점성유동 해석

개발된 3차원 HCIB 코드를 이용하여 일정한 속도로 직진하면서 뒷부분이 주기적으로 flapping 하는 평판 주위의 점성 유동이 해석되었다. 종속변수들은 평판의 길이와 직진 속도로 무차원화 되었으며 Reynolds 수는 1000이다. 평판의 폭은 0.5이고 좌표축의 원점은 평판의 앞쪽 모서리 중앙에 위치한다. 평판 뒷부분의 변형은 다음과 같이 주어진다.

$$z = A(x - X_{df})^2 \cos[\omega(t - T_{df})] \quad (10)$$

for $x > X_{df}$, $t > T_{df}$

여기서 X_{df} 와 T_{df} 는 각각 0.5와 2로 주어졌으며 평판 뒤쪽 끝단에서 변형의 최대값이 0.2가 되도록 A 는 0.8로 주어졌다. 진동수 ω 는 π 와 0.5π 의 두 가지 경우에 대한 계산이 수행되었다. 평판 표면은 길이 방향과 폭 방향으로 각각 20 및 10 등분하여 생성된 사각형을 두 개의 삼각형 요소로 분할하였다.

Fig. 8은 진동수가 π 인 경우에 대해 끝단이 최고점에서 최저점까지 내려가는 반주기 동안의 흐름방향 와류의 시간변화를 보여준다. 여기서 흐름방향 와류는 와류 벡터와 국부 속도 방향의 단위 벡터의 내적으로 계산된다. 평판 뒷부분이 주기적으로 펄럭거림에 따라 발생하는 끝단 와류(tip vortex) 쌍의 박리는 순간적인 형상 외에도 변형의 속도와 가속도의 영향을 받는다. Fig. 8의 왼쪽 첫 번째 그림처럼 끝단이 최고점 근처에 있는 동안 변형속도에 의한 영향은 무시할 만하며 동일한 형태로 직진하는 물체 주위의 끝단 와류와 동일한 방향으로 박리된다. 그러나 변형의 가속도의 압력에 대한 효과는 형상에 의한 압력 분포와 반대되는 방향으로 나타나므로 동일한 형태로 직진하는 경우보다 약화된 끝단 와류 쌍이 박리된다.

Fig. 8의 왼쪽 세 번째 그림은 평판의 뒷부분이 내려오면서 중앙을 지나기 이전에 이미 이전과 반대 방향의 끝단 와류 쌍이 박리되고 있음을 보여준다. 그 이유는 끝단이 중앙에 가까워진 동안에는 변형의 속도가 커져 압력 분포에 미치는 변형 속도의 영향이 중요해지기 때문이다. 즉 평판 뒷부분의 하강 속도는 평판 아래면에 있던 유체를 끝단을 통과하여 윗면으로 올리려는 와류를 형성함으로써 형상에 따른 끝단 와

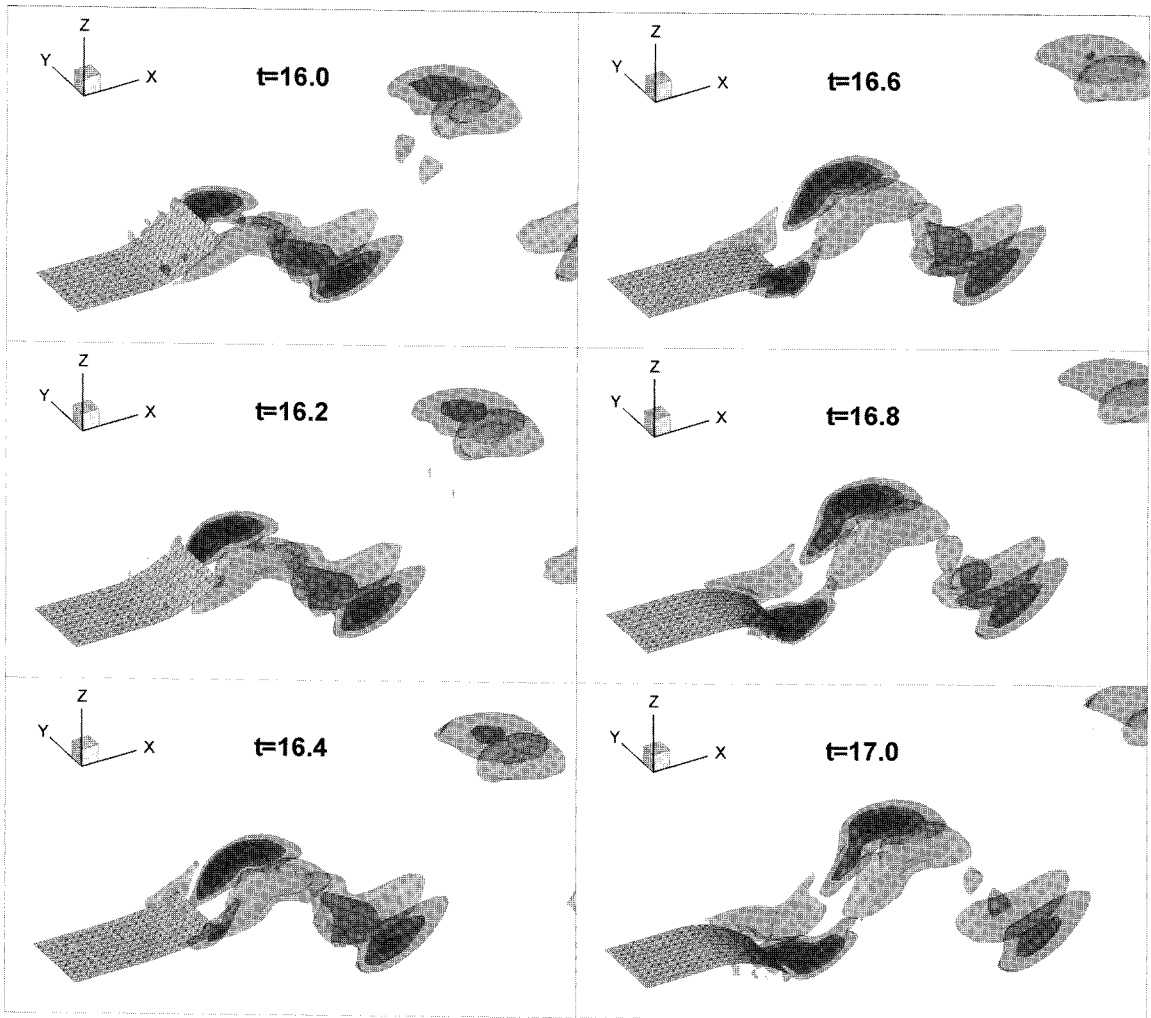


Fig. 8 Time evolution of the streamwise vorticity around the flapping plate, $Re=1000$, $\omega=\pi$

류 쌍과 반대되는 방향의 와류 쌍을 박리시킨다. 이러한 변형 속도의 영향은 진동수 ω 의 지배를 받는다.

Fig. 9와 Fig. 10에서는 평판의 뒷부분이 하강하면서 중앙을 통과하기 직전의 동일한 위상에서 진동수에 따른 흐름방향 와류 분포의 변화를 보여준다. 진동수가 감소하면서 변형 속도의 영향이 줄어들어 형상에 의해 박리되는 끝단 와류 쌍의 방향과 반대되는 방향의 끝단 와류 쌍의 박리가 지연됨을 확인할 수 있다. 또한 진동수의 감소는 동일한 변형의 진폭에도 변형 속도와 가속도의 크기를 감소시킴으로써 와류 쌍의 수직방향 분포에 큰 영향을 미침을 관찰할 수 있다.

4. 결론

3차원 변형물체 주위의 점성유동 해석을 위한 HCI B 코드

가 개발되었다. 경계면을 가로지르는 edge들을 기준으로 가상 경계절점들을 분포시키는 방법은 격자 요소 크기에 비해 두께를 무시할 수 있는 평판에도 적용이 가능하며 hybrid staggered/non-staggered 격자를 이용한 유동해석이 제대로 정의된 종속변수만이 사용하도록 보장함을 확인하였다.

개발된 코드를 이용하여 계산된 진동하는 원주 주위의 속도 분포나 구 주위 층류 유동에 대한 separation bubble 길이 및 구 표면 위의 압력 분포 등은 다른 계산 결과들과의 정량적인 비교에서 좋은 일치를 보였다.

개발된 HCI B 코드는 직진하면서 뒷부분이 주기적인 변형을 하는 평판 주위의 3차원 점성유동 해석에 적용되었다. 변형의 속도와 가속도의 영향이 평판 양쪽 끝단에서 주기적으로 박리되는 와류 쌍에 미치는 영향이 검토되었으며 변형의 진동수 변화에 따른 와류 쌍 박리 및 후류 분포의 변화가 검

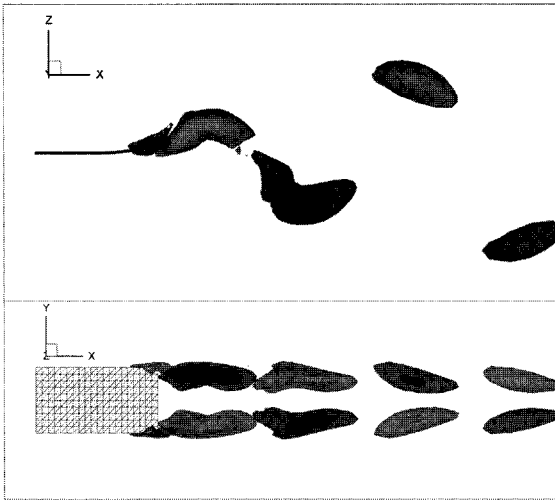


Fig. 9 Instantaneous streamwise vorticity contours around the flapping plate, $Re=1000$, $\omega=\pi$

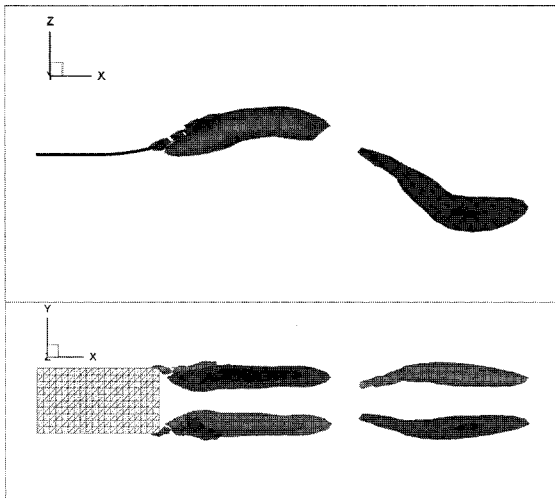


Fig. 10 Instantaneous streamwise vorticity contours around the flapping plate, $Re=1000$, $\omega=0.5\pi$

토되었다. HCIB 기법의 경우 Reynolds 수가 커지면 절점 수에 대한 요구가 급격히 증가한다는 단점은 있으나 대변형을 하는 복잡한 물체 경계를 처리하기에 적절한 방법임을 확인하였다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소 수중운동체 특화연구센터(UVRC)의 '탄성변형을 고려한 복합체 추진기 설계기법 연구(SM-42)' 과제의 지원에 의한 결과의 일부 임.

참고문헌

- [1] Peskin, C.S., 1972, "Flow Patterns around Heart Valves: a Numerical Method," *Journal of Computational Physics*, Vol.10, pp.252-271.
- [2] Kim, D. and Choi, H., 2006, "Immersed Boundary Method for Flow around an Arbitrary Moving Body," *Journal of Computational Physics*, Vol.212, pp.662-680.
- [3] Kirkpatrick, M.P., Armfield, S.W. and Kent, J.H., 2003, "A Representation of Curved Boundaries for the Solution of the Navier-Stokes Equations on a Staggered Three-Dimensional Cartesian Grid," *Journal of Computational Physics*, Vol.184, pp.1-36.
- [4] Gilmanov, A., Sotiropoulos, F. and Balaras, E., 2003, "A General Reconstruction Algorithm for Simulating Flows with Complex 3D Immersed Boundaries on Cartesian Grids," *Journal of Computational Physics*, Vol.191, pp.660-669.
- [5] Gilmanov, A. and Sotiropoulos, F., 2005, "A Hybrid Cartesian/Immersed Boundary Method for Simulating Flows with 3D, Geometrically Complex, Moving Bodies," *Journal of Computational Physics*, Vol.207, pp.457-492.
- [6] Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C., Kim, Y.J. and Goo, J.S., 2007, "Computations of Flow over a Flexible Plate using the Hybrid Cartesian/Immersed Boundary Method," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, in press, DOI 10.1002/fld.1459.
- [7] 신상목, 김형태, 2006, "Hybrid Cartesian/Immersed Boundary법을 이용한 2차원 변형날개 주위 점성유동 해석," *대한조선학회논문집*, Vol.43-5, pp.538-549.
- [8] Dutsch, D., Durst, F., Becker, S. and Lienhart H., 1998, "Low-Reynolds-Number Flow around an Oscillating Circular Cylinder at Low Keulegan-Carpenter Numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.360, pp.249-271.
- [9] Yang, J. and Balaras, E., 2006, "An Embedded-Boundary Formulation for Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows Interacting with Moving Boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol.215, pp.12-40.
- [10] Johnson, T.A., 1996, "Numerical and Experimental Investigation of Flow past a Sphere up to a Reynolds Number of 300," *Ph.D. Dissertation*, University of Iowa, Iowa.