

3차원 HCIB법을 이용한 회전하면서 변형하는 날개 주위 유동해석

신상묵^{†*}, 노인식^{**}

부경대학교 조선해양시스템공학과^{*}, 충남대학교 선박해양공학과^{**}

Numerical Simulation of Flow Field Around a Rotating Flexible Foil
Using the 3D HCIB Method

Sangmook Shin^{†*} and In Sik Nho^{**}

Dept. of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University^{*}

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University^{**}

Abstract

A hybrid Cartesian/immersed boundary code is expanded to simulate flow field around a three-dimensional body which undergoes large dynamic deformation. Immersed boundary nodes are automatically distributed based on the edges crossing triangles on body boundary. Velocity vectors are reconstructed at those immersed boundary nodes along local normal lines to the boundary. The reconstruction of pressure is avoided using the hybrid staggered/non-staggered grid method. The developed code is validated through comparisons with other results on laminar flow over a sphere. The code is applied to simulate flow around a foil which is attached to a body of revolution and rotates under periodic deformation. The periodic variation of the tip vortex is observed and the effects of the deformation on hydrodynamic force acting on the body are investigated.

※Keywords: Hybrid Cartesian/immersed boundary method(Cartesian-가상경계 혼합법), Laminar flow over a sphere(구 주위 층류), 3D foil(3차원 날개), Periodic deformation(주기적 변형)

1. 서론

최근 들어 유체 속에서 변형을 하는 유연한 물체의 유체-구조 상호작용 해석을 위한 연구들이

활발히 진행되고 있다(Ha et al. 2007, Liu et al. 2007). 유동영역의 변화가 물체들의 강제 운동에 기인하는 경우와는 달리 물체 자체의 형상이 변화하는 경우에는 유동해석을 위한 격자계의 변형 혹은 경계조건 만족과 관련하여 여러 가지 문제들이 발생한다.

접수일: 2008년 1월 31일, 승인일: 2008년 7월 14일

† 교신저자: smshin@pknu.ac.kr, 051-629-6617

Gilmanov and Sotiropoulos(2003, 2005)에 의

해 제안된 hybrid Cartesian/immersed boundary (HCIB)법은 유동해석을 물체 형상과 독립적인 Cartesian 배후격자에서 수행하는 non-boundary conforming 기법의 일종으로서 복잡한 형상 변화를 쉽게 처리할 수 있다. 이 방법에서는 가상경계법(Lee et al. 2007)과는 달리 경계조건 만족을 위해 물체 내부에 분포시키는 운동량 부가 등을 사용하지 않는다. 이 때문에 HCIB법은 물체 형상의 곡률반경에 의한 적용의 제약이 없으며 유동해석을 위한 격자 간격에 비해 두께가 거의 영인 물체에도 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다.

Yang and Balaras(2006)는 이 방법을 대외류 모사기법과 연결하여 움직이는 벽면 주위의 난류 유동을 해석하였다. Ge and Sotiropoulos(2007)는 이 방법을 임의의 배후격자계에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. Gilmanov and Acharya(2007)은 이 방법을 MPM(material point method)과 연성하여 유체-구조 상호작용 해석에 적용하였다.

HCIB법에서는 경계면 근처에 가상경계절점(immersed boundary node)들을 분포시키고 그 절점들에서 속도를 재구성하여 이산화 된 문제의 경계조건을 제공한다. Shin and Kim(2006)는 이산화 된 유동해석 문제가 항상 well-posed 되도록 보장하는 새로운 가상경계절점 분포 기준을 제안하고 이를 이용하여 전진하면서 뒷날이 상하로 변형하는 2차원 날개 단면 주위의 점성유동을 해석하였다. Shin et al.(2007)은 2차원 HCIB 코드에 동적 거동을 하는 박판방정식을 연성하여 유입 유동에 의해 동적 탄성변형을 하는 구조물의 유체-구조 상호작용을 해석하였다. Shin(2007)은 HCIB 코드를 3차원으로 확장하여 직진하면서 뒷부분이 펄럭거리는 평판 주위의 유동을 해석하였다.

본 연구에서는 개발된 HCIB 코드를 임의 형상의 3차원 물체가 임의의 운동 및 대변형을 하는 경우에도 용이하게 적용할 수 있도록 확장하였다. 확장된 코드의 검증은 위하여 구 주위의 층류 유동을 계산하고 저항계수 및 표면 압력분포를 다른 결과와 비교하였다. 개발된 3차원 HCIB 코드는 회전하면서 변형하는 3차원 날개 주위의 점성유

동 해석에 적용되었다.

2. 수치해석 기법

2.1 지배방정식 및 경계조건

지배방정식은 비압축성 매질의 3차원 비정상 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식이다. 비압축성 조건을 만족시키기 위해 각각의 물리적 시간단계에서 가상시간(pseudotime) τ 에 대한 의사압축성(artificial compressibility)을 도입한다.

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \beta \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

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

여기서 β 는 의사압축성 계수이다.

유동영역의 경계는 물체 표면 위에 분포된 Lagrangian 제어점들을 연결하여 구성된 삼각형 요소들의 집합으로 정의된다. 매 순간 변형하는 물체 표면은 각각의 물리적 시간단계마다 주어지는 Lagrangian 제어점들의 위치와 속도 벡터들에 의해서 정의된다. 물체 표면에서의 점착조건이 유동해석 문제의 경계조건이 된다.

2.2 가상경계절점의 분포

HCIB법에서는 유동영역 내부에 분포된 가상경계절점들의 집합으로 이산화 된 유동해석 문제의 경계를 다시 정의한다. 이 경우 이산화 된 유동해석 영역은 원래 유동영역의 부분집합이다. 따라서 HCIB법은 가상경계법과는 달리 지배방정식에 어떤 변화도 허용하지 않으며 대신 가상경계절점들에서 점착조건이 아닌 새로운 속도 경계조건이 구성되어야 한다. 이러한 HCIB법의 특성은 가상경계절점 분포에 대해 다음의 두 가지 조건을 만족하도록 요구한다.

우선 가상경계절점에서 재구성된 속도에 의해 결정되는 유동장이 배후격자의 간격을 줄이면 원래 유동해석 문제의 해에 빠르게 수렴하여야 한다. 즉 가상경계절점들의 집합이 물체 표면의 모든 부분을 제대로 표현할 수 있어야 한다. 유동영

역 내부와 외부를 연결하는 배후격자 edge의 두 절점들 중에서 유동영역 내부 절점을 가상경계절점으로 분류하는 경우(Gilmanov et al. 2003)에는 물체 두께가 얇은 부분을 제대로 고려하지 못한다는 문제를 발생시킨다.

다음으로는 분포된 가상경계절점들에서 속도가 재구성되면 그 속도들의 집합이 이산화 된 유동해석 문제를 well-posed 시켜야 한다. 즉 가상경계절점들의 집합은 배후격자계에서 이산화 된 유동영역이 닫히도록 분포되어야 한다. 물체 표면으로부터의 거리를 기준으로 가상경계절점을 분포하는 경우(Gilmanov and Sotiropoulos 2005)에는 거리 기준과 물체 형상 특성에 따라 이산화 된 유동영역 내부 절점이 가상경계절점을 거치지 않고 직접 유동영역 외부 절점과 연결될 수 있다. 이 경우 뒤에서 설명되는 엇갈림-비엇갈림 혼합 격자계(hybrid staggered/non-staggered grid)에서의 유동해석 과정 중 정의되지 않은 종속변수의 사용 가능성이 발생한다.

본 연구에서는 Shin 등(Shin and Kim 2006, Shin et al. 2007)이 제안한 물체 표면을 가로지르는 edge를 기준으로 가상경계절점을 분포시키는 방법을 3차원으로 확장하였다. 이 방법에서는 배후격자의 모든 edge들에 대해 물체 표면 위의 삼각형 요소와 만나는지를 확인하고 만나는 경우 그 edge의 두 개 절점들에 대해 유동영역 내부인지를 판별하여 가상경계절점을 찾게 된다. 이 방법에서는 물체의 두께가 영인 경우에도 edge와 물체 표면이 만나는지는 명확하기 때문에 물체 형상에 관계없이 경계면 주위에서는 항상 가상경계절점들이 분포된다. 또한 정의로부터 가상경계절점이 아닌 유동영역 내부 절점 즉 유체절점에 대해서는 그 절점에 연결된 edge의 다른 절점은 다른 유체절점 혹은 가상경계절점이라는 점이 명확히 보장된다. 이러한 성질은 뒤에서 설명되는 엇갈림-비엇갈림 혼합 격자계에서 이산화 된 유동해석 과정 동안 항상 제대로 정의된 종속변수들만을 사용함을 보장한다.

3차원 코드에서는 다음의 방법으로 가상경계절점이 분포되었다. 초기에 배후격자의 모든 절점들을 유체절점으로 가정하고 표면 삼각형 요소에 대

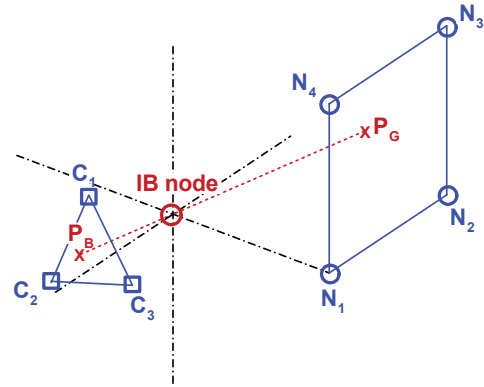


Fig. 1 Reconstruction of velocity at an immersed boundary node based on the interpolation along a local normal line to the boundary

해 그 요소를 에워싸는 직육면체를 저장한다. 각각의 삼각형 요소에 대해 배후격자의 edge들과의 간섭을 조사한다. 배후격자 edge가 삼각형 요소에 부여된 직육면체와 겹치는 경우에는 edge의 삼각형 접촉 여부를 자세히 조사한다. 삼각형 요소와 만나는 경우 삼각형의 법선 방향을 기준으로 유체영역 내부와 외부 판별하여 그 edge의 두 절점을 각각 가상경계절점과 영역 외부의 절점, 즉 고체절점으로 분류한다. 그러나 고체절점으로 분류될 가능성이 있는 경우에는 추가적인 검토가 우선되어야 한다. 만일 물체 두께가 배후격자 요소 크기보다 작은 경우, 그 edge가 물체를 완전히 통과하기 때문이다. 이러한 문제는 다른 삼각형 요소에 의해 이미 가상경계절점으로 분류되지 않은 경우에만, 즉 유체절점으로 남아있는 절점만 고체절점으로 변경되도록 허용하고 고체절점에서 가상경계절점으로서의 재변경은 항상 허용함으로써 쉽게 해결된다. 마지막으로 한 개의 edge에 의해 고체절점에 연결된 유체절점들을 고체절점으로 계속 변경해 나가면 경계에서 떨어진 내부 고체절점들까지 완전히 분류된다.

2.3 가상경계절점에서의 속도 재구성

HCIB법의 가장 중요한 특징은 가상경계절점에

서의 속도를 물체 표면에 수직인 방향으로의 속도 재구성을 통해 추정한다는 점이다. Fig. 1은 속도 재구성 방법을 보여준다. 각각의 가상경계절점 (IB)에 대해 그 점을 통과하면서 물체 표면과 수직으로 만나는 직선의 물체 표면 위의 점 P_B 를 찾는다. 점 P_B 에서의 속도 V_{P_B} 는 그 점을 포함하는 물체 표면 위 삼각형 요소의 Lagrangian 절점들(C_1, C_2, C_3)에서 주어진 속도 V_{C_k} 를 이용하여 결정한다. 본 연구에서는 점 P_B 로부터 Lagrangian 절점까지 거리 d_k 의 역수를 가중치로 한 평균이 사용되었다.

$$V_{P_B} = \frac{1}{\sum_{k=1}^3 \frac{1}{d_k}} \left(\sum_{k=1}^3 \frac{1}{d_k} V_{C_k} \right) \quad (3)$$

점 P_B 와 IB 를 연결하는 선분을 유동영역으로 연장하여 배후격자의 사각형 면요소와 만나는 점 P_G 를 찾는다. 점 P_G 에서의 속도는 그 점을 포함하는 면요소의 네 유체절점들(N_1, N_2, N_3, N_4)에서 비압축성 만족을 위한 가상시간에 대한 반복 단계에서 추정된 속도를 이용하여 계산한다. 점 P_G 에서의 l -번째 가상시간에 대한 반복단계에서의 속도 $V_{P_G}^l$ 도 식(3)과 유사하게 절점까지 거리의 역수를 가중치로 한 평균으로 추정되었다.

가상경계절점 IB 를 통과하면서 물체 표면과 수직으로 만나는 선분의 양단에서 속도가 추정되면 점 IB 에서의 l -번째 반복단계에서의 속도 V_{IB}^l 는 그 선분을 따른 속도 분포에 대한 가정으로부터 추정된다. 본 연구에서는 수직 선분을 따라 속도가 선형적으로 변화한다고 가정하였다. 이 경우 점 IB 에서 점 P_B 와 P_G 까지의 거리가 각각 d_{P_B} 와 d_{P_G} 라면 가상경계절점에서의 속도는 다음 식으로 계산된다.

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

식 (4)에서 보듯이 한 개의 물리적 시간단계 동안 물체 표면에서 주어진 속도 V_{P_B} 는 일정하지만 유동영역 내부의 속도는 가상시간에 대한 반복단계

에서 계속 변화하기 때문에 가상경계절점에서의 속도 V_{IB}^l 도 변화된다.

2.4 엇갈림-비엇갈림 혼합 격자계에서의 유동해석

앞 절의 속도 재구성 단계에서는 모든 종속변수들이 격자의 절점에 저장되는 비엇갈림(non-staggered) 격자의 사용이 유리하다. 그러나 비엇갈림 격자에서 유동해석이 수행되면 격자계의 경계 즉 가상경계절점들에서 압력이 요구된다. 가상경계절점에서 속도의 재구성과는 달리 압력의 재구성은 심각한 오차를 초래할 수 있다. 즉 속도의 경우 물체 표면에서 Dirichlet 형태의 명확한 경계 조건이 제공되지만 압력의 경우 법선 방향 미분치의 근사값만 존재하며 비압축성 유체 내에서 경계가 이동하면서 압력장은 속도장에 비해 급격한 변화가 발생할 수 있다. 이러한 어려움을 피하고자 Gilmanov and Sotiropoulos(2005)는 엇갈림-비엇갈림 혼합 격자계를 제안하였다.

Fig. 2는 엇갈림-비엇갈림 혼합 격자계에서 종속변수들의 배치를 보여준다. 물체 표면(점선) 주위의 가상경계절점(빈 원)에서는 비엇갈림 격자의 속도성분들이 재구성된다. 유체절점(채워진 원)에서는 비엇갈림 격자의 압력 및 속도성분들이 저장

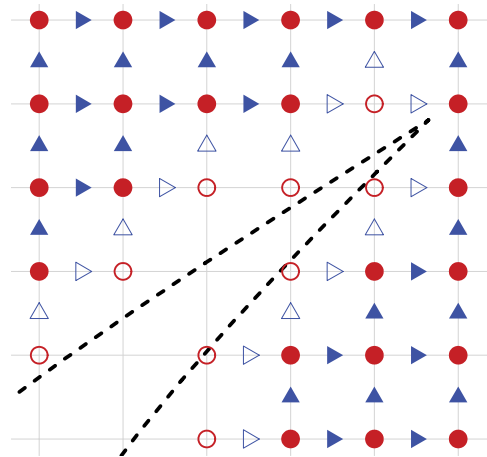


Fig. 2 Stored dependent variables for the hybrid staggered/non-staggered grid near the body boundary

된다. 두 개의 유체절점을 연결하는 edge의 중앙(채워진 삼각형)에서는 그 edge 방향의 엇갈림(staggered) 격자 속도성분이 저장된다. 유체절점과 가상경계절점을 연결하는 edge의 중앙(빈 삼각형)에서는 그 edge 방향의 엇갈림 격자 속도성분이 보관된다.

유체절점에 정의된 압력은 주위 edge의 중앙에 정의된 엇갈림 속도성분들을 이용하여 연속방정식(1)에 의해 수정된다.

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

여기서 상첨자 n 과 l 은 각각 물리적 시간 및 가상시간에 대한 반복단계를 의미한다.

유체절점에서는 인접한 절점들에 저장된 비엇갈림 격자의 속도성분들을 사용하여 운동량 보존식(2)의 대류항과 점성항을 계산한다. 대류항 계산에는 2차의 upwind-biased 차분식이 적용되었다. 물체 근처에서 가상경계절점과 edge로 연결된 유체절점의 경우 고체절점 속도성분이 요구될 수 있으며 이 경우에는 1차의 풍상(upwind) 차분식으로 대체되었다. Gilmanov 등은 이러한 경계 근처에서의 1차 근사가 전체 기법의 공간에 대한 2차의 정확도를 떨어뜨리지 않음을 오차의 격자 크기에 따른 log-log 선도 상의 거동으로부터 확인하고 그 이유로서 1차 풍상 차분식의 절단 오차가 공간에 대한 속도의 2차 미분치에 비례하고 가상경계절점 근처에서는 속도의 선형적 변화가 가정되는 구간이라는 사실을 지적하였다(Gilmanov et al. 2003, Gilmanov and Sotiropoulos 2005). 앞 절에서 언급된 바와 같이 유체절점에 edge로 연결된 절점이 다른 유체절점 혹은 가상경계절점인 경우 이 과정이 항상 잘 정의된 종속변수들에 의해 계산됨을 확인할 수 있다.

모든 유체절점들에서 대류 및 점성항이 계산되면 운동량 보존식으로부터 엇갈림 격자의 속도성분을 계산한다. 이를 위해서는 edge 양단의 유체절점에 저장된 대류 및 점성항의 합을 edge의 중앙점에서 보관한다. 그리고 양쪽의 유체절점에 저

장된 압력이 압력구배 계산에 이용된다. 물리적 시간 전진에는 3점의 2차 후방 차분법이 가상시간에 대해서는 외재적 방법이 각각 사용되었다. 이 경우 x -방향 운동량 보존식은 다음과 같이 차분화 된다.

$$\frac{u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l+1} - u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l}}{\Delta \tau} + \frac{3u_{i+1/2,j,k}^{n+1,l+1} - 4u_{i+1/2,j,k}^n + u_{i+1/2,j,k}^{n-1}}{2\Delta t} + XCD_{i+1/2,j,k}^{n+1,l} + \delta_x p_{i+1/2,j,k}^{n+1,l} = 0 \quad (6)$$

여기서 XCD 는 x -방향 운동량 보존식의 대류 및 확산항의 합이다. 가상시간에 대한 반복이 수렴하면 edge의 중앙에서 계산된 엇갈림 격자 속도성분들을 이용하여 유체절점에서의 비엇갈림 격자 속도를 보관하고 물리적 시간을 전진시킨다.

새로운 물리적 시간단계에서의 Lagrangian 절점들의 위치와 속도를 이용하여 절점 분류 및 가상경계절점에서의 속도 재구성을 다시 수행한다. 이 때 물체 경계의 이동에 의해서 고체절점이 한 개의 물리적 시간단계 동안 가상경계절점 단계를 거치지 않고 직접 유체절점이 되지 않도록 하여야 한다. 이 조건은 물리적 시간 간격이 경계면이 배후격자 요소를 한 단계에서 완전히 통과하지 않도록 제한되어야 함을 의미한다.

3. 계산결과 및 토론

3.1 구 주위 총류 유동

개발된 코드의 검증은 위하여 구 주위의 총류 유동을 계산하고 그 결과를 다른 결과들과 비교하였다. 구의 직경과 유입 유동의 속도를 기저로 한 Reynolds 수는 100이다. 계산 결과의 격자 의존도를 검토하기 위하여 두 가지 격자계가 사용되었으며 최소 격자 크기는 각각 0.01과 0.02이다. 유입 유동은 정지 상태에서부터 무차원화 된 시간이 2가 될 때까지 선형적으로 가속된 후 일정하게 유지되었다. Fig. 3은 두 가지 격자계에서 계산된 저항계수의 시간에 따른 변화를 보여준다. 정상상태에 도달한 후의 저항계수는 거친 격자와 조밀한

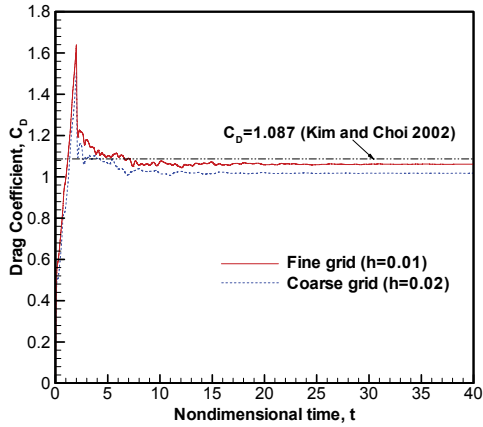
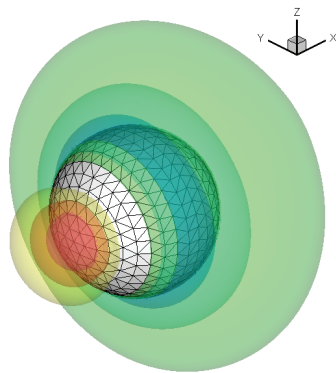
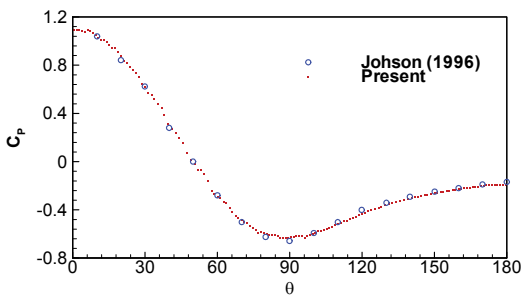


Fig. 3 Time histories of drag coefficient for flow over a sphere at $R_e=100$



(a) Unstructured surface grid and iso-pressure surfaces



(b) Pressure coefficients on a sphere

Fig. 4 Pressure field around a sphere in laminar flow at $R_e=100$

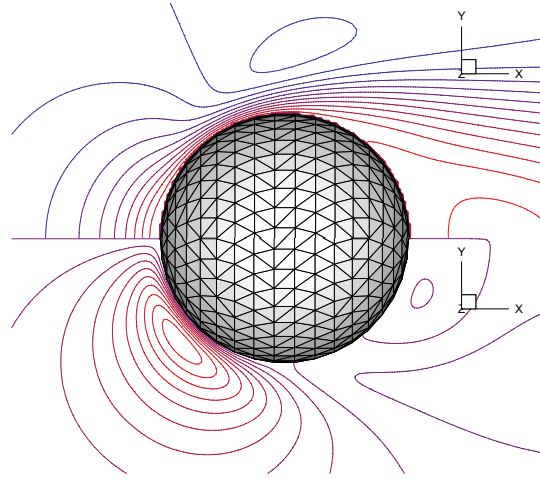


Fig. 5 Contours of u and v on a plane at $z=0$

격자계에서 각각 1.017과 1.061로 나타났으며 그림에서 Kim and Choi(2002)의 계산 결과인 1.087과 비교되었다.

Fig. 4의 (a)는 구 표면에 생성된 비정렬 삼각형 표면 격자와 등압력면을 보여준다. Fig. 4의(b)에서는 계산된 표면 압력계수 분포가 Johnson (1996)의 결과와 비교되었다.

Fig. 5는 $z=0$ 평면에서의 u 및 v 의 분포를 보여준다. 그림으로부터 물체 표면으로부터 선형적으로 증가하는 층류 경계층 내의 속도 변화가 부드럽게 물체 표면까지 포착되고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 회전하면서 변형하는 날개 주위 유동

개발된 코드는 회전하면서 변형하는 3차원 날개 주위의 점성유동 해석에 적용되었다. Fig. 6은 물체의 형상과 표면에 생성된 비정렬 표면 격자를 보여준다. 위 그림은 변형이 발생하지 않은 기준 상태이고 아래 그림은 기준 상태를 중심으로 동적인 변형을 하는 과정 중의 한 순간에 해당한다.

날개는 일정한 각속도로 회전하는 반경 0.2의 원기둥에 부착되어 같이 회전하면서 주기적인 변형을 한다. 원기둥의 앞뒤는 반구 형태이며 총 길이는 1이다. 원기둥의 중앙에 부착된 날개는 반경

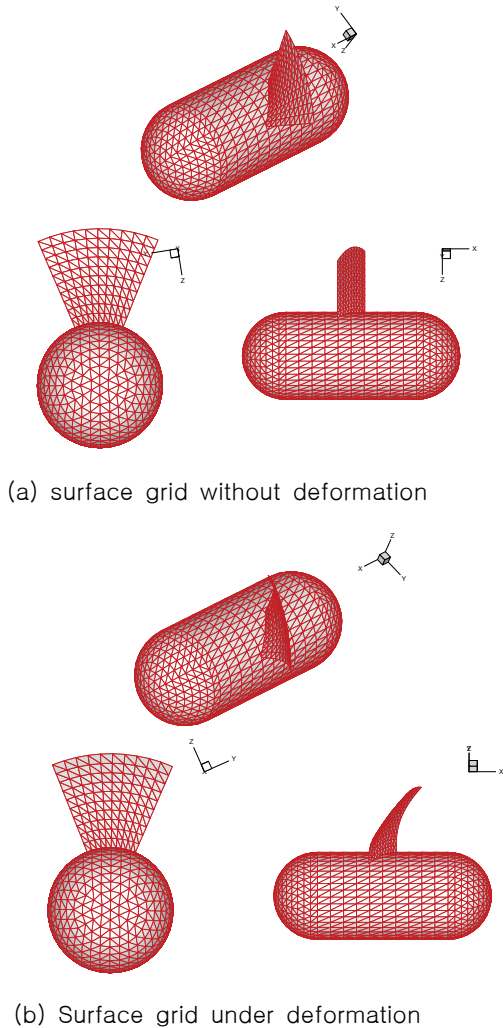


Fig. 6 Surface unstructured grids for a rotating foil under deformation

0.2부터 0.5까지 사이각 45°의 원호들로 구성되며 각 반경에서 원호들은 피치가 1인 나선이 되도록 휘어져 있다. 날개의 두께는 무시되었다.

날개 끝단에서의 접선 속도가 1이 되도록 물체의 회전 각속도가 주어졌으며 원기둥의 길이 방향 즉 양의 x -방향으로 0.1의 속도로 유체가 유입된다. 물체의 길이와 끝단의 회전 속도를 기저로 한 Reynolds 수는 1000이다. 정지 상태에서부터 무차원화 된 시간이 1이 될 때까지 유입 속도와 물체의 회전 속도는 선형적으로 증가한다. 무차원화

된 시간 2 이후부터 날개는 변형의 시작점에서 1차 미분치가 영인 외팔보의 진동과 유사하게 다음과 같은 주기적인 변형을 한다.

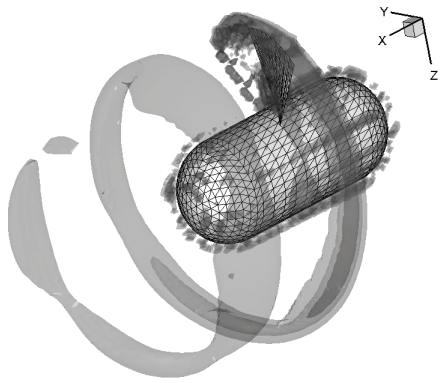
$$\delta x = A_\delta (r - r_0)^2 \sin(\omega_\delta t) \quad (7)$$

$$r_0 \leq r \leq r_{tip}$$

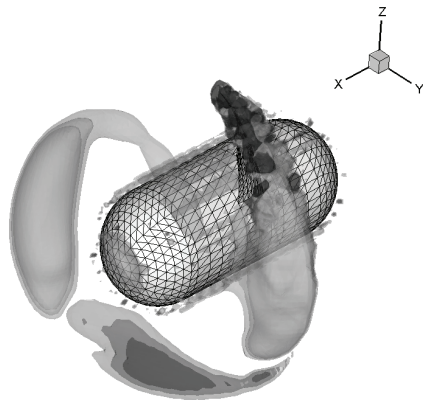
여기서 δx 는 반경 r 에서의 x -방향 변형의 크기이다. A_δ 는 2이며 변형이 시작되는 반경 r_0 는 0.25로 주어졌다. 이 경우 끝단 $r=0.5$ 에서 최대 변형은 1/80이다. 물체가 1회전하는 동안 2주기의 변형을 하도록 ω_δ 가 주어졌다. 날개 표면에 분포된 Lagrangian 절점들에서는 물체의 회전에 의한 속도에 날개의 주기적인 변형에 의한 속도가 더해졌다.

HCIB법에서는 물체의 형상 및 변형 특성에 관계없이 입력 정보로 물체 표면 위에 분포된 Lagrangian 절점들의 위치 및 속도 그리고 세 개의 인접 Lagrangian 절점들을 연결하여 구성되는 삼각형 표면 요소에 관한 정보만을 요구한다. 삼각형 요소 생성에 대해서는 삼각형 요소들의 집합이 닫힌 물체 표면을 정의해야 한다는 점 외에는 어떠한 제약도 없다. 즉 Fig. 6에서 보듯이 날개의 경계가 몸체에 분포된 삼각형 요소 내부를 지나가도 무방하다. 이러한 특징은 사면체 비정렬 격자 생성을 위한 표면 삼각형 격자 생성의 경우보다 HCIB법의 경우 훨씬 용이하게 표면 격자를 생성할 수 있도록 한다. 그리고 두께가 무시할 만큼 얇은 경우에는 한쪽 면에 생성된 삼각형 요소의 세 Lagrangian 절점들의 연결 순서만 반대로 하여 법선 방향을 변경함으로써 반대쪽 면의 분할도 쉽게 추가된다.

Fig. 7은 일정하게 회전하는 날개와 회전하면서 주기적인 변형을 하는 날개 주위의 흐름방향 와도 (streamwise vorticity) 분포를 보여준다. 흐름방향 와도는 국부속도벡터와 국부와도벡터의 내적으로서 끝단 와류(tip vortex)와 같이 공간에 고립된 와류 포착에 유용하다. HCIB 기법의 경우 물체 적응 격자계와 달리 물체 표면에서 떨어져도 격자 조밀도가 급격히 감소하지 않는다. 이러한 HCIB 기법의 특성은 공간상에 나선 형태로 분포하는 끝



(a) rotation without deformation



(b) rotation with periodic deformation

Fig. 7 Streamwise vorticity distribution around rotating foils w/wo periodic deformation

단 와류의 격자에 의한 수치확산을 줄이는데 있어서 물체표면에만 적용된 격자계보다 유리하다. 그림으로부터 변형이 없이 회전만 하는 경우 날개 끝단에서 연속적으로 박리되던 끝단 와류가 날개의 동적인 변형으로 인해 주기적으로 변화함을 관찰할 수 있다. 변형이 없는 경우 압력면에서 흡입면으로 일정하게 발생하던 유동이 날개의 주기적

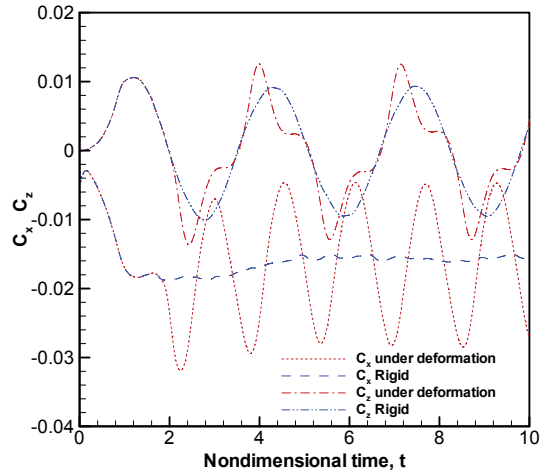


Fig. 8 Comparison of force acting on rotating bodies w/wo deformation

인 동적 변형에 의해 초래되는 유동으로 인해 강화되거나 약화되며 이에 따라 흐름방향 와류의 강도가 증가하거나 반대 방향의 약한 흐름방향 와류가 박리된다.

Fig. 8은 날개를 포함한 몸체 전체에 작용하는 힘의 시간 변화에 대해 일정하게 회전만 하는 경우와 회전하면서 주기적인 변형을 하는 경우를 비교하였다. 변형이 없는 경우 유입 유동에 의한 몸체의 저항으로 인해 그 크기는 작지만 일정한 추력 즉 음의 x -방향 힘이 발생한다. 그러나 주기적인 변형을 하는 경우에는 추력도 변형의 주기로 진동한다. z -방향 힘의 경우 변형이 없을 때는 몸체의 회전 주기로 변화하지만 변형이 있는 경우에는 그 변화에 날개 변형의 주기에 따른 진동이 중첩되고 있음을 관찰할 수 있다.

4. 결론

임의의 운동 및 대변형을 하는 물체 주위의 점성유동 해석을 위한 3차원 HCIB 코드가 개발되었다. 배후격자의 edge와 물체 표면 위의 삼각형 요소의 간섭을 검사하여 가상경계절점을 자동 분포 시킴으로써 복잡한 형상 및 변형을 쉽게 처리할 수 있었다. 이 방법은 두께가 영인 물체도 쉽게 처리할 수 있으며 표면 격자계들의 연결 부위에도

아무런 제약이 없어 복잡한 형상에 적용이 용이함을 확인하였다.

개발된 코드를 이용하여 구 주위 층류 유동을 계산한 결과 저항계수 및 표면 압력계수 분포가 다른 결과들과 좋은 일치를 보임을 확인하였다. 개발된 코드를 이용하여 원기둥에 부착되어 회전하면서 변형하는 날개의 끝단에서 주기적으로 박리되는 끝단 와류 및 주기적인 힘의 변화가 모사되었다.

HCIIB법은 임의 형상의 대변형 물체 주위 유동 모사에 쉽게 적용할 수 있다. 그러나 높은 Reynolds 수의 유동해석을 위해서는 경계층 내 종속변수 변화를 포착하기 위해 배후 Cartesian 격자 절점수가 급격히 증가한다. 유동해석이 Cartesian 배후격자에서 이루어지기 때문에 격자 간격 감소에 따른 수치적 경직성은 초래되지 않지만 계산량의 증가에 따른 어려움이 발생한다. HCIIB법의 실용적인 활용을 위해서는 이러한 계산량의 급격한 증가를 해결하기 위한 향후 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 수중운동체 특화연구센터(UVRC)의 '탄성변형을 고려한 복합재 추진기 설계기법 연구(SM-42)' 과제의 2단계 지원으로 수행된 연구 결과의 일부이다.

참 고 문 헌

- Ge, L. and Sotiropoulos, F., 2007, "A Numerical Method for Solving the 3D Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equations in Curvilinear Domains with Complex Immersed Boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 225, pp. 1782-1809.
- Gilmanov, A. and Acharya, S., 2007, "A Hybrid Immersed Boundary and Material Point Method for Simulating 3D Fluid-Structure Interaction Problems," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 56, pp. 2151-2177.
- 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.
- Gilmanov, A., Sotiropoulos, F. and Balaras, E., 2003, "A General Reconstruction Algorithm for Simulating Flows with Complex 3D Immersed Boundaries on Cartesian Grid," *Journal of Computational Physics*, Vol. 191, pp. 660-669.
- Ha, Y., Kim, M.G., Cho, H.G. and Cho, S., 2007, "Shape Design Optimization of Fluid-Structure Interaction Problems," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 44, No. 2, pp. 130-138.
- 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.
- Kim, D. and Choi, H., 2002, "Laminar Flow past a Sphere Rotating in the Streamwise Direction," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 461, pp. 365-386.
- Lee, J.B., Yoon, H.S. and Chun, H.H., 2007, "A Numerical Study on the Fluid Flow around a Circular Cylinder near a Moving Wall," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 44, No. 2, pp. 119-129.
- Liu, Z., Hyun, B.S. and Nho, I.S., 2007, "Experimental Study on the Fluid-Structure Interaction of Flexible Plate," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 44, No. 6, pp. 619-626.
- Shin, S., 2007, "Computations on Flow Fields around a 3D Flapping Plate Using the Hybrid Cartesian/Immersed Boundary Method," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-8.
- 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, Vol. 55, pp. 263-282.

- Shin, S. and Kim, H.T., 2006, "Numerical Simulation of a Viscous Flow Field Around a Deforming Foil Using the Hybrid Cartesian/Immersed Boundary Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 5, pp. 538-549.
- 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.



< 신 상 목 >



< 노 인 식 >