

FDS 기법과 HCIB법을 이용한 3차원 내면파 수치 모사

신 상 목

부경대학교 조선해양시스템공학과

NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL INTERNAL WAVES USING THE FDS SCHEME ON THE HCIB METHOD

Sangmook Shin

Dept. of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

A code developed using the flux-difference splitting scheme on the hybrid Cartesian/immersed boundary method is applied to simulate three-dimensional internal waves. The material interface is regarded as a moving contact discontinuity and is captured on the basis of mass conservation without any additional treatment across the interface. Inviscid fluxes are estimated using the flux-difference splitting scheme for incompressible fluids of different density. The hybrid Cartesian/immersed boundary method is used to enforce the boundary condition for a moving three-dimensional body. Immersed boundary nodes are identified within an instantaneous fluid domain on the basis of edges crossing a boundary. The dependent variables are reconstructed at the immersed boundary nodes along local normal lines to provide the boundary condition for a discretized flow problem. The internal waves are simulated, which are generated by an pitching ellipsoid near an material interface. The effects of density ratio and location of the ellipsoid on internal waves are compared.

Key Words : 비압축성 유동(incompressible flow), 접촉 불연속면(contact discontinuity), Riemann 문제(Riemann problem), 경계 비정합 기법(non-boundary conforming method), 종동요(pitching), 회전 타원체(ellipsoid)

1. 서 론

밀도차에 의해 매질 경계면에서 발생하는 내면파는 여러 가지 공학적 문제들과 관련되어 있다. 해양에서 발생하는 내면파의 경우 상하층간 밀도차가 작으며 이에 따라 대단히 큰 파고와 파장을 갖는 내면파가 자주 관측된다. 1990년 남중국 해에서 발생한 해양 구조물 사고는 긴 주기의 내면파에 의한 수평 유동이 한 가지 원인으로 보고되었으며, 최근 Song et al.[1]은 해양 구조물에 작용하는 내면파와 수면파의 영향들에 대한 비교에서 내면파의 긴 주기는 spar 형태 구조물의 위치 제어에 중요한 인자가 될 수 있음을 보고하였다. 또한 내면파에 의해 해수면 근처에서 유지되는 수평 방향 속도의 주기적

변화는 해수면 거칠기 분포를 변화시켜 전자파 산란에 영향을 준다. 이러한 이유로 내면파는 SAR(synthetic aperture radar)에 의한 잠수함 감시와 관련되어 연구들이 진행되고 있으며 Chang et al.[2]은 매질 경계면 근처에서 기동하는 잠수함의 속도에 따른 내면파 특성을 보고하였다.

해양의 밀도 변화는 표층수와 심층수 사이의 밀도 약층(density cline)에 집중되며 밀도 약층의 두께는 비교적 얇다. 이에 따라 많은 연구들에서 내면파 해석은 밀도가 다른 비압축성 유체층들의 유동으로 모델링 된다. 밀도가 다른 비압축성 유체들의 유동을 해석하기 위해 VOF(volume of fluid)법 등을 비롯한 다양한 방법들이 개발되어 왔다. 기존의 많은 방법들에서는 매질 경계면에서 발생하는 종속 변수들의 불연속적 변화가 초래하는 수치 해석상의 어려움을 피하기 위해 경계면 주위 몇 개의 요소에 걸쳐 종속 변수들의 연속적인 변화를 가정한다. 이러한 가정은 수치 해석 기법의 안정성을 쉽게 확보해 주지만 경계면 주위에서의 수치적인 확산을 초래하고 매질 경계면의 복잡한 변화를 정확히 포착하기 어렵게 한다.

Received: September 1, 2011, Revised: February 7, 2012,

Accepted: February 9, 2012.

E-mail: smsin@pknu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.1.008>

© KSCFE 2012

이러한 단점을 개선하기 위해 여러 연구자들에 의해 매질 경계면에서의 불연속을 처리할 수 있는 기법들이 개발되어 왔다. Shin[3, 4]은 비정렬 격자계에서 ghost fluid 기법을 적용하여 매질 경계면에서의 불연속을 처리할 수 있는 기법을 제안하고 2차원 익형에 의한 내면파 해석에 적용하였다. 그러나 이러한 방법들에서도 매질 경계면에서 추가적인 처리가 필요하기 때문에 경계면 형상이 복잡해지면 적용에 어려움이 따른다. Kelecy and Pletcher[5]는 밀도장에 불연속을 허용하고 flux들을 근사화된 Riemann 문제 해석에 의해 추정함으로써 매질 경계면이 움직이는 접촉 불연속면(contact discontinuity)으로 자동 포착되도록 하는 기법을 제안하였다. 이 방법에서는 매질 경계면 주위에서 추가적인 처리가 전혀 필요하지 않아서 복잡한 3차원 자유표면 유동에 적용이 용이하다. 신상묵 등[6]은 밀도가 다른 비압축성 유체들에 대한 FDS(flux-difference splitting) 기법을 적용하여 Rayleigh-Taylor 불안정성 및 댐 붕괴 유동을 모사하고 그 결과를 다른 결과들과 비교하여 좋은 일치를 보임을 보고하였다.

경계 비정합(non-boundary conforming) 기법들은 복잡한 형상 및 물체의 운동이나 변형 등을 쉽게 고려할 수 있기 때문에 최근 활발한 연구들이 진행되고 있다. Gilmanov and Sotiropoulos[7]는 두께가 무한히 얇은 물체와 Euler 방정식 해석에 적용이 가능한 경계 비정합 기법의 일종인 HCIB(hybrid Cartesian/immersed boundary method)법을 제안하였다. Shin et al.[8]은 HCIB법에서 물체 경계와 접촉하는 배후 격자계의 선 요소(edge)를 근거로 가상 경계 절점들을 정의함으로써 배후 격자계의 급격한 간격 변화에도 이산화된 유동 해석 문제의 well-posedness가 보장되도록 하였다. 개발된 HCIB 코드는 3차원으로 확장되어 다른 실험 및 계산 결과들과의 비교를 통해 검증된 후 다양한 변형 물체 주위 3차원 유동에 적용되었다 [9-10].

최근 Shin et al.[11]은 HCIB법과 FDS 기법을 결합한 새로운 자유표면 유동 해석기법을 제안하였다. 이 기법에서는 물체 경계 위의 Lagrangian 절점 좌표와 속도만 입력되면 추가적인 처리 없이 자유표면 및 움직이거나 변형하는 물체 경계 조건이 다루어진다. 이 기법은 물체 두께가 대단히 얇은 경우 등 물체의 형상에 따른 적용에 제약이 없으며 점성 유동 및 Euler 방정식 해석도 가능하다. 개발된 HCIB-FDS 기법은 다양한 물체 운동에 의한 점성 및 비점성 자유표면 유동에 적용되어 다른 실험 및 계산 결과들과의 비교에서 좋은 일치를 보임이 확인되었으며 구형 탱크의 급격한 운동에 의한 복잡한 3차원 sloshing 유동 해석에 적용되었다.

Shin[12]은 HCIB-FDS 기법을 2차원 내면파 해석에 적용하였다. 수면파에 비해 밀도비가 1에 가까운 내면파에 대한 추가적인 검증은 위해 붕괴 기구(collapse mechanism)에 의한 고

립 내면파(solitary internal wave)의 발생 및 전파를 모사하고 시간에 따른 파형 변화를 Nakayama[13]의 계산 결과와 비교하여 좋은 일치를 보임을 확인하였다. 또한 하강형(depression type) 고립 내면파가 경사면으로 진행하면서 두 개의 봉우리를 갖는 상승형(elevation type) 고립 내면파로 파형 전환(waveform inversion)이 발생하는 과정을 모사하고 최근 보고된 Cheng and Hsu[14]의 실험 결과와 비교하여 좋은 일치를 보임을 확인하였다. 본 연구에서는 HCIB-FDS 기법을 이용하여 매질 경계면 근처에서 전진하면서 중동요하는 회전 타원체에 의해 발생하는 3차원 내면파를 해석하였다.

2. FDS 기법에 의한 자유 표면 유동 모사

지배 방정식은 임의의 밀도 분포를 갖는 비압축성 유체들의 비정상 유동에 대한 질량 및 운동량 보존식이다. 영역 내부에 불연속을 허용하기 위해 지배 방정식은 식 (1)과 같이 적분 형태로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_S (\mathbf{F}_{inv} - \mathbf{F}_{vis}) dS = \int_{\Omega} \mathbf{B} d\Omega \quad (1)$$

여기서 Ω 는 검사 체적, S 는 검사 표면, \mathbf{Q} 는 보존 변수 벡터, \mathbf{F}_{inv} 와 \mathbf{F}_{vis} 는 비점성 및 점성 flux들이며 \mathbf{B} 는 중력에 의한 체적력 벡터이다. 보존 변수 및 비점성 flux 벡터 \mathbf{Q} 와 \mathbf{F}_{inv} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{inv} = \begin{bmatrix} \rho \theta \\ \rho u \theta + p n_x \\ \rho v \theta + p n_y \\ \rho w \theta + p n_z \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, u, v, w 는 각 방향의 속도 성분, p 는 압력, (n_x, n_y, n_z) 는 검사 표면에서의 법선 단위 벡터이고 θ 는 검사 표면에서의 법선 속도이다. 식 (2)의 첫 번째 식은 질량 보존에 의해 요소 평균 밀도의 시간 변화를 결정하며 마지막 식은 각 유체들의 비압축성 조건을 요구한다. 밀도의 불연속에 관계없이 각 유체들의 비압축성 조건이 강제되면 매질 경계면에서의 법선 속도 연속은 자동 만족된다. 또한 경계면에서 법선 속도가 연속하면 운동량 보존식에 의해 압력의 연속도 만족된다. 따라서 밀도 등의 종속 변수 불연속에도 불구하고 물리적으로 타당한 flux들만 계산되면 경계면에서 추가적인 처리 없이도 법선 속도와 압력의 연속이 만족된 유동장을 얻게 된다.

FDS 기법은 초기 조건에 불연속이 주어진 hyperbolic 문제,

즉 Riemann 문제의 해를 이용한다. Hyperbolic 문제를 형성하기 위해 매 물리적 시간 단계마다 가상 시간(pseudo-time) τ 에 대한 의사 압축성(artificial compressibility)을 도입한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} Q d\Omega + \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{\Omega} \tilde{Q} d\Omega + \oint_S (F_{inv} - F_{vis}) dS = \int_{\Omega} B d\Omega \quad (3)$$

$$\tilde{Q} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, p/\beta]^T \quad (4)$$

여기서 β 는 의사 압축성 계수이다. 선형화된 Riemann 문제의 해로부터 초기에 검사 표면 양쪽의 종속 변수 벡터들이 각각 \tilde{Q}^R 과 \tilde{Q}^L 인 경우 검사 표면에서의 flux는 다음과 같이 계산된다.

$$F_{inv} = \frac{1}{2} [F_{inv}(\tilde{Q}^R) + F_{inv}(\tilde{Q}^L)] - \frac{1}{2} |\hat{A}| (\tilde{Q}^R - \tilde{Q}^L) \quad (5)$$

$$|\hat{A}| = R |A| R^{-1} \quad (6)$$

여기서 \hat{A} 는 비점성 flux의 Jacobian 행렬이고 R 은 Jacobian 행렬의 고유벡터들로 구성된 행렬이며 $|A|$ 는 고유치의 절대값들을 요소로 하는 대각행렬이다. Roe의 도약 조건 $F_{inv}^R - F_{inv}^L = \hat{A}(\tilde{Q}^R - \tilde{Q}^L)$ 을 만족시키기 위해서 Jacobian 행렬은 다음과 같은 Roe의 가중 평균값으로부터 계산된다.

$$\rho^{Roe} = \sqrt{\rho^R \rho^L}, u_i^{Roe} = \frac{\sqrt{\rho^R} u_i^R + \sqrt{\rho^L} u_i^L}{\sqrt{\rho^R} + \sqrt{\rho^L}}, \quad (7)$$

$$p^{Roe} = \frac{1}{2}(p^R + p^L)$$

본 연구에서 사용된 Jacobian 행렬과 고유치들은 다음과 같다.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & n_x & n_y & n_z & 0 \\ -u\theta & \theta + un_x & un_y & un_z & \beta n_x \\ -v\theta & vn_x & \theta + vn_y & vn_z & \beta n_y \\ -w\theta & wn_x & wn_y & \theta + wn_z & \beta n_z \\ -\theta/\rho & n_x/\rho & n_y/\rho & n_z/\rho & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\lambda_{1,2,3} = \theta, \lambda_{4,5} = \frac{1}{2}(\theta \pm c) \quad (9)$$

$$c = \sqrt{\theta^2 + \frac{4\beta}{\rho}} \quad (10)$$

Jacobian 행렬이 중복된 고유치들을 갖지만 가상 시간에 대한 의사 압축성이 도입된 밀도가 다른 비압축성 유동의 비점

성 flux는 hyperbolic 특성을 갖기 때문에 다음과 같이 선형 독립인 고유벡터들에 의해 대각화가 가능하다.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \lambda_4 & \lambda_5 \\ u & \xi_1 & \xi_2 & u\lambda_4 + \frac{\beta n_x}{\rho} & u\lambda_5 + \frac{\beta n_x}{\rho} \\ v & \eta_1 & \eta_2 & v\lambda_4 + \frac{\beta n_y}{\rho} & v\lambda_5 + \frac{\beta n_y}{\rho} \\ w & \zeta_1 & \zeta_2 & w\lambda_4 + \frac{\beta n_z}{\rho} & w\lambda_5 + \frac{\beta n_z}{\rho} \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_5/\rho & -\lambda_4/\rho \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} 1 + \rho\theta^2/\beta & -\rho\theta n_x/\beta \\ -(u\xi_1 + v\eta_1 + w\zeta_1) & \xi_1 \\ -(u\xi_2 + v\eta_2 + w\zeta_2) & \xi_2 \\ -\rho\theta\lambda_4/\beta c & \rho\lambda_4 n_x/\beta c \\ \rho\theta\lambda_5/\beta c & -\rho\lambda_5 n_x/\beta c \\ -\rho\theta n_y/\beta & -\rho\theta n_z/\beta & -\rho \\ \eta_1 & \zeta_1 & 0 \\ \eta_2 & \zeta_2 & 0 \\ \rho\lambda_4 n_y/\beta c & \rho\lambda_4 n_z/\beta c & \rho/c \\ -\rho\lambda_5 n_y/\beta c & -\rho\lambda_5 n_z/\beta c & -\rho/c \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 (ξ_1, η_1, ζ_1) 과 (ξ_2, η_2, ζ_2) 는 다음 조건을 만족시키는 단위 벡터들이다.

$$(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \times (\xi_2, \eta_2, \zeta_2) = (n_x, n_y, n_z) \quad (13)$$

고차의 정도를 유지하기 위해 검사 표면 양쪽에서의 종속 변수 벡터들은 gradient를 이용하여 재구성되었다. 밀도 등에 불연속이 허용되므로 매질 경계면에서의 비물리적인 진동을 억제하기 위하여 Gao et al.[15]이 제안한 바와 같이 superbee와 minmod 제한자들이 혼합된 형태의 제한자가 사용되었다.

계산 영역 내부의 밀도의 불연속은 정수력학적(hydrostatic) 압력 기울기의 불연속을 초래한다. 이러한 불연속으로 인해 검사 표면 양쪽에서 재구성되는 압력에 오차가 발생하며 요소에 작용하는 중력과 정수력학적 압력 분포가 정확히 상쇄되지 않는다. 이러한 문제를 제거하기 위해 Qian et al.[16]에 의해 제안된 바와 같이 압력 기울기에서 정수력학적 압력 변화를 분리하여 요소에서 계산된 밀도를 사용하여 추정함으로써 중력과 정수력학적 압력 분포가 정확히 상쇄되도록 하는 pressure-splitting 기법이 적용되었다.

3. HCIB 법에 의한 경계 조건 처리

본 연구에서 사용된 HCIB 법은 Shin et al.[8, 17]에 자세히

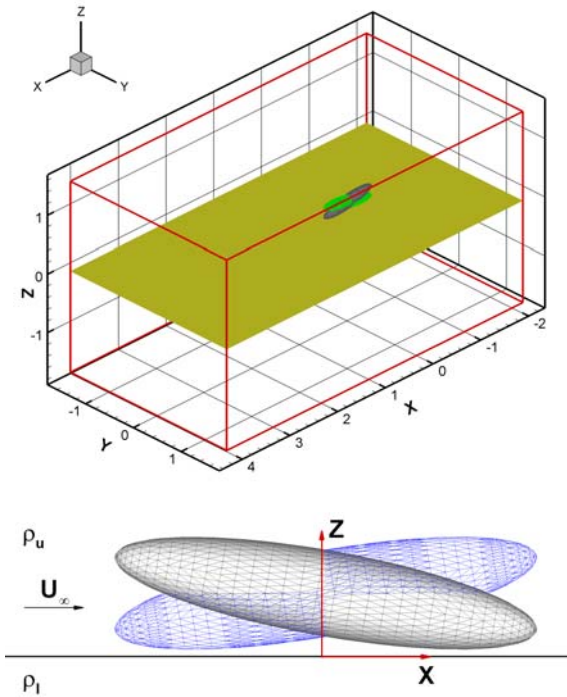


Fig. 1 Sketch of the generation of internal waves by a translating and pitching ellipsoid

소개되어 있으며 여기서는 특징만 간단히 설명한다. 물체 표면은 Lagrangian 절점들을 연결하여 구성되는 표면 비정렬 격자계로 이산화되며 매 물리적 시간 단계마다 Lagrangian 절점의 위치 및 속도 벡터들이 주어진다. Cartesian 배후 격자의 모든 선 요소들에 대해 표면 삼각 요소와의 접촉 여부를 확인하고 선 요소가 삼각 요소와 접촉하는 경우 그 선 요소의 두 절점들에 대해 유체 영역 내부인지를 삼각 요소의 법선 벡터를 기준으로 판별한다. 배후 격자 절점이 유체 영역 내부이고 물체 표면에 접촉하는 선 요소에 연결되어 있으면 그 절점은 가상 경계 절점으로 분류된다.

매 순간 가상 경계 절점들이 분류되면 각각의 가상 경계 절점들에 대해 그 절점을 통과하면서 물체 표면과 수직으로 만나는 국소 법선(local normal line)을 부여한다. 국소 법선이 물체 표면과 만나는 교점에서의 속도 성분들은 그 교점을 포함하는 표면 삼각 요소의 세 Lagrangian 절점에서 주어진 속도를 이용하여 보간한다. 본 연구에서는 교점에서 Lagrangian 절점까지의 거리의 역수를 가중치로 하는 가중 평균이 사용되었다.

국소 법선은 유체 영역 내부로 연장되어 배후 격자의 사각형 면 요소와의 교점을 찾는다. 그 교점에서의 종속 변수들은 교점을 포함하는 사각형의 네 절점들에서 계산되는 종속 변

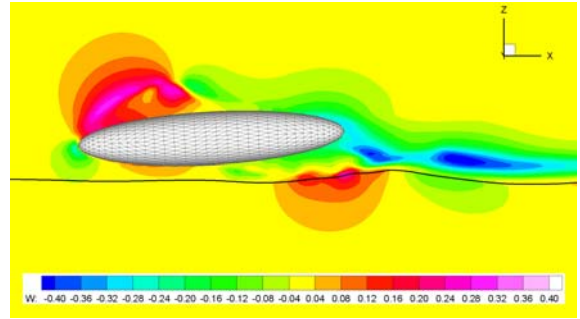


Fig. 2 Contours of vertical velocity around a translating and pitching ellipsoid near an interface at $y = 0, t = 0.3T$

수들을 이용하여 보간하며 거리의 역수를 가중치로 하는 가중 평균이 사용되었다. 물리적 시간 단계마다 비압축성 조건 만족을 위한 가상 시간에 대한 반복이 수행될 때마다 사각형 면 요소와의 교점에서의 종속 변수도 계속 갱신된다.

가상 경계 절점에서의 법선 속도 성분은 국소 법선을 따른 선형적인 변화를 가정하여 추정된다. 접선 속도의 경우 점성 해석에서는 가상 경계 절점 주위에서 국소 법선을 따른 선형적 변화가 가정되며 비점성 해석에서는 유체 영역 내부에서 외삽된다. 밀도의 경우 국소 법선을 따라 유체 영역 내부에서 외삽되며 압력은 동압 성분을 외삽한 뒤 정수력학적 압력을 보정한다.

4. 전진하면서 중동요하는 회전 타원체에 의한 내면파 모사

개발된 3차원 HCIB-FDS 코드를 이용하여 매질 경계면 주위에서 전진하면서 중동요하는 회전 타원체에 의한 내면파가 모사되었다. Fig. 1은 이 문제에 대한 개략도와 장축의 길이가 L 인 회전 타원체 위에 분포된 Lagrangian 절점들과 표면 삼각 요소를 보여준다. 회전 타원체 단축의 길이는 $0.2 L$ 이며 계산 영역은 $-2 < x/L < 4, -1.5 < y/L, z/L < 1.5$ 이다. 음의 z -방향으로 중력 가속도 g 가 작용하며 초기에 매질 경계면은 $z = 0$ 에 위치한다. 매질 경계면 상하 유체층의 밀도는 각각 ρ_u 및 ρ_l 이다. 양의 x -방향으로 균일 유동이 U_∞ 의 속도로 유입되며 회전 타원체의 중심은 $(0, 0, Z_{cen})$ 에 위치한다. 초기에 유체는 균일하게 유입되며 회전 타원체는 중동요각 A_{pitch} 로 정지한 상태이다. U_∞/L 가 1이 될 때까지 유입 유동에 의해 정지된 회전 타원체 주위 유동장이 형성된 뒤 $(0, 0, Z_{cen})$ 을 중심으로 $A_{pitch}\cos(\omega t)$ 의 중동요를 시작한다. 회전 타원체의 표면에는 964개의 Lagrangian 절점들과 1924개의 표면 삼각 요소가 분포되었으며 회전 타원체와 매질 경계면 주위에서 배후 Cartesian 격자 간격의 최소값은 각 방향으로 $0.005L$ 로

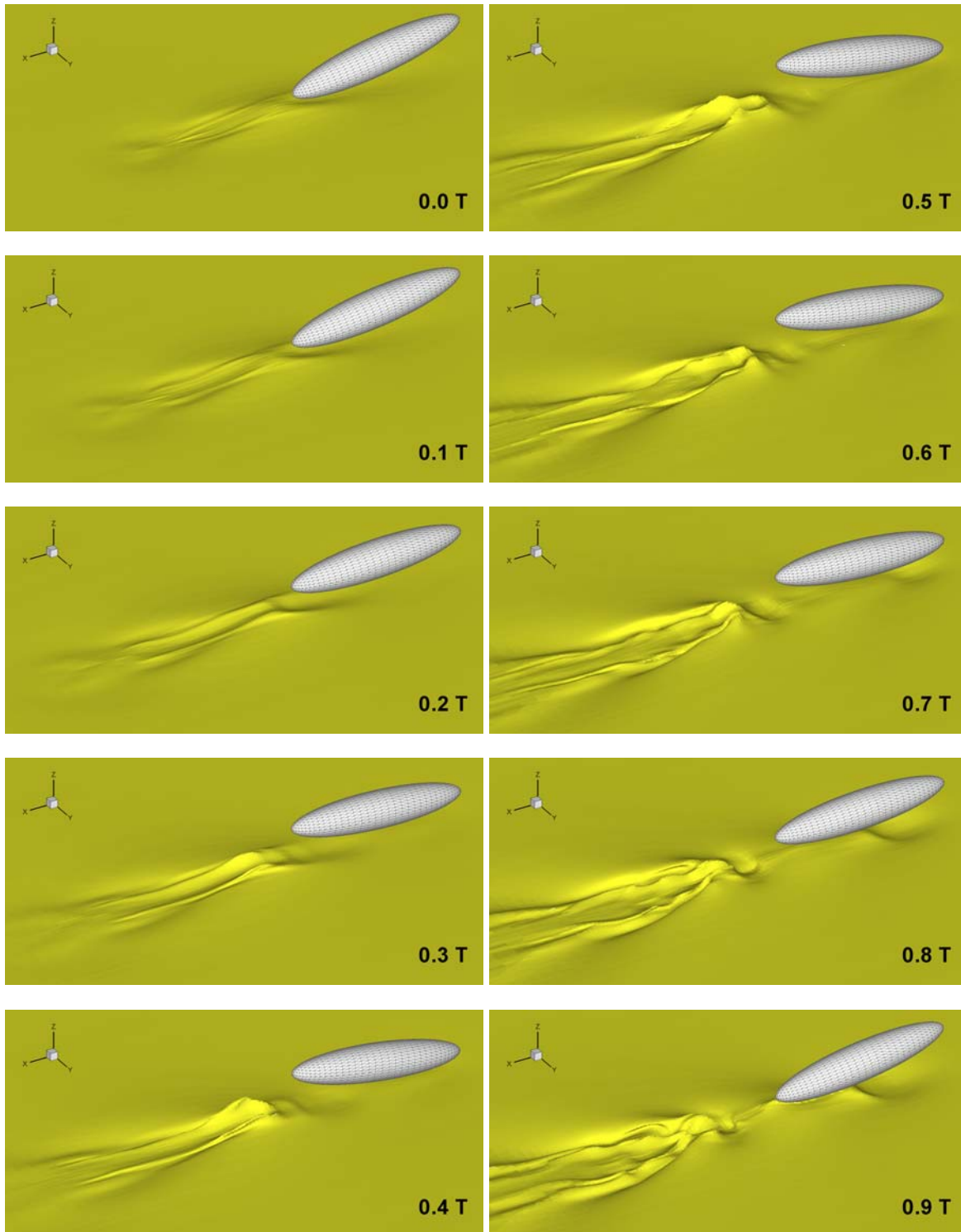


Fig. 3 Time evolution of internal waves generated by a translating and pitching ellipsoid

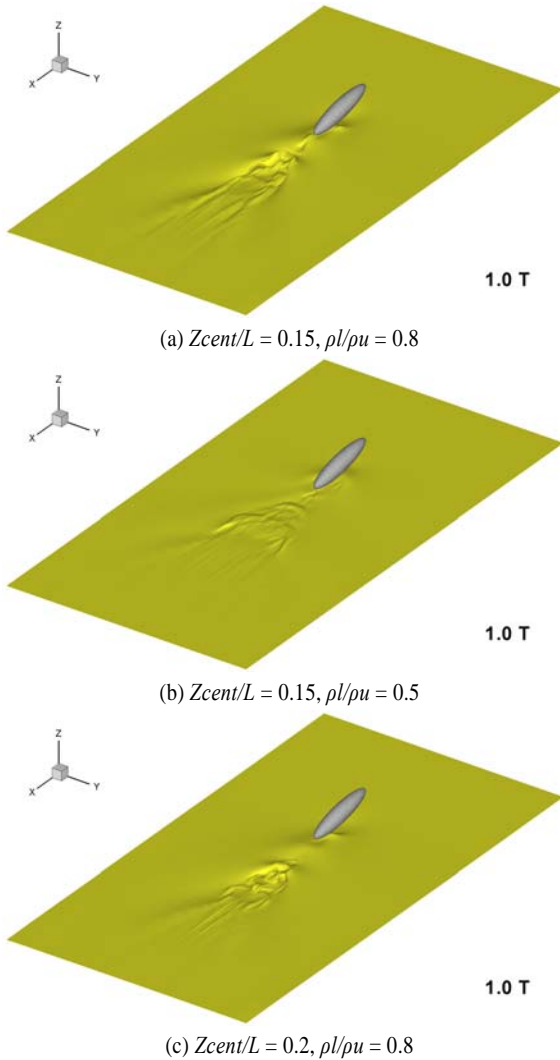


Fig. 4 Variation of internal waves according to density ratio and position of the ellipsoid

주어졌다.

Fig. 2는 $\rho/\rho_u = 0.8$, $Z_{cent}/L = 0.15$, $U_{\infty}/\sqrt{gL} = 0.224$, $U_{\infty}L/V = 10^5$, $A_{pitch} = 10^\circ$, $\alpha L/U_{\infty} = \pi$ 인 경우에 회전 타원체가 종동요를 시작한 후 0.3 주기 경과한 순간 $y = 0$ 의 평면에서 수직 방향 속도 분포와 매질 경계면 형상을 보여준다. 유입 유동과 회전 타원체의 종동요로 상층 유체장에는 복잡한 비정상 유동장이 이미 형성되어 있다. 그러나 하층 유동장의 경우 물체의 후방에서 경계면의 상하 방향 변위에 따른 특징적인 수직 속도 분포만 발생하고 있으며 회전 타원체와 가까운 영역에서도 물체의 운동에 의한 교란이 직접 전파되지 않고 있다. 또한 상층에서의 수직 속도는 매질 경계면에서 멀어지

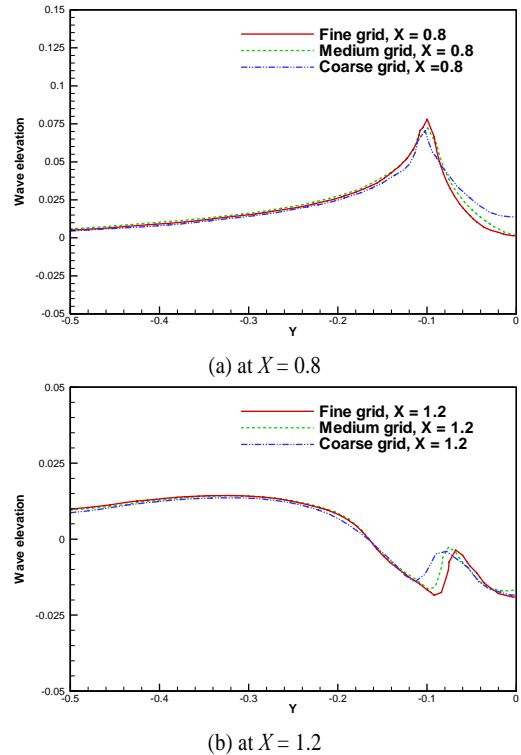


Fig. 5 Grid independency tests for computed internal wave elevations

면서 급격한 변화를 보이지만 경계면에서는 상하층의 수직 속도가 연속적인 변화를 보이고 있다.

Fig. 3은 회전 타원체가 Fig. 2의 경우와 동일한 조건에서 종동요 하는 한 주기 동안 내면파의 시간 변화를 보여준다. 두 층의 밀도차가 작아서 발생하는 내면파는 Chang et al.[2]와 유사하게 임계 Froude 수 보다 큰 경우의 파형 특성을 보인다. 회전 타원체의 후미에서 발달되기 시작하던 내면파는 물체의 종동요에 의한 교란이 중첩되면서 복잡한 변화가 발생하며 후방으로 밀려난다. 회전 타원체의 선단이 내려왔다 올라가기 시작하는 $0.5T$ 이후에는 물체 선단 주위에 발생한 교란이 뒤로 밀려오며 물체의 후미부와 접촉한다.

Fig. 4는 상하층 유체층의 밀도비와 회전 타원체의 경계면으로부터의 거리 변화에 따른 내면파 변화를 보여준다. 첫 번째 경우는 Fig. 2의 조건으로 종동요를 한 주기 종료한 시점의 내면파 형상이며 두 번째 경우는 밀도비만 0.5로 변경시킨 경우이다. 밀도차가 커지면서 동일한 Froude 수에서도 파형이 좌우로 벌어지고 있으며 상층 유체 밀도 감소로 인한 동압 변화의 감소는 발생하는 내면파를 약화시키고 있음을 관찰할 수 있다. 마지막 그림은 Fig. 2의 조건에서 회전 타원체의 중심 위치를 위로 이동시켜 $Z_{cent}/L = 0.2$ 로 한 경우에 발생하는

내면파를 보여준다. 파형은 첫 번째 경우와 유사하나 경계면에 전달되는 교란의 감소로 발생하는 내면파가 약화됨을 관찰할 수 있다.

계산된 결과들의 수치 인자들에 대한 의존도를 조사하기 위하여 격자계의 크기 및 물리적 시간 간격 등을 변경하여 계산을 수행하였다. Fig. 5에서는 배후 Cartesian 격자계의 최소 간격을 각각 0.005L, 0.0075L 및 0.01L로 변경한 경우 회전 타원체의 종동요가 0.5 주기 진행된 순간 $X = 0.8L$ 및 $1.2L$ 의 단면에서 계산된 내면파의 형상들이 비교되었다. HCIB법의 특성 때문에 경계층에 대한 격자 의존도를 제거하기 위해서 요구되는 격자 요소 간격은 상당히 작지만 계산된 매질 경계면의 격자 의존도는 훨씬 쉽게 제거된다. 물리적 시간 간격 변화의 경우 물체 내부 절점에서 유체 영역 내부 절점으로 변경되는 과정 동안 가상 경계 절점을 반드시 거쳐야한다는 제한으로 인해 정확한 비정상 유동 해석을 포착하기에 충분히 작은 물리적 시간 단계가 이미 적용되고 있어 계산된 내면파형에 변화는 거의 없었다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 HCIB법과 FDS 기법을 이용하여 개발된 코드가 3차원 내면파 해석에 적용되었다. HCIB 법에 의한 경계면 처리는 임의의 형상 물체의 임의의 운동을 쉽게 처리할 수 있게 하였다. FDS 기법은 매질 경계면에서의 불연속 처리에 추가적인 처리를 전혀 요구하지 않기 때문에 복잡한 3차원 경계면 형상 변화가 용이하게 포착되었다. 이러한 특성은 작은 밀도차로 인해 복잡한 경계면 변화가 발생하는 내면파 해석에 중요한 장점을 제공한다.

매질 경계면 주위에서 진진하면서 종동요하는 회전 타원체에 의한 내면파의 시간 변화가 모사되었다. 밀도비 및 회전 타원체의 위치 변화에 따른 내면파의 특성이 비교되었다. 본 연구를 통해 개발된 HCIB-FDS 코드는 향후 수중 운동체의 형상 및 기동 조건에 따른 내면파 해석에 적용될 수 있으리라 기대된다.

후 기

본 연구는 삼성 탈레스의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 2011, Song, Z.J., Teng, B., Gou, Y., Lu, L., Shi, Z.M.,

Xiao, Y., and Qu, Y., "Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses," *Applied Ocean Research*, Vol.33, pp.120-129.

- [2] 2006, Chang, Y., Zhao, F., Zhang, J., Hong, F.W., Li, P., and Yun, J., "Numerical simulation of internal waves excited by a submarine moving in the two-layer stratified fluid," *Journal of Hydrodynamics*, Vol.18, pp.330-336.
- [3] 2004, Shin, S., "Internal wave computations using the ghost fluid method on unstructured grid," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.47, pp.233-251.
- [4] 2005, 신상목, "비정렬 격자에서 Ghost Fluid 법을 이용한 밀도약층 주위 수중운동체에 의한 유동 해석," *한국전산유체공학회지*, Vol.10, pp.70-76.
- [5] 1997, Kelecy, F.J., and Pletcher, R.H., "The development of a free surface capturing approach for multidimensional free surface flows in closed containers," *Journal of Computational Physics*, Vol.138, pp.939-980.
- [6] 2010, 신상목, 김인철, 김용직, "Roe의 flux-difference splitting 기법을 이용한 자유표면 유동 모사," *대한조선학회 논문집*, Vol.47, pp.11-19.
- [7] 2005, Gilmanov, A., and Sotiropoulos, F., "A hybrid Cartesian/immersed boundary method for simulating flows with 3D, geometrically complex, moving bodies," *Journal of Computational Physics*, Vol.207, pp.457-492.
- [8] 2007, Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C., Kim, Y.J., and Goo, J.S., "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.
- [9] 2008, 신상목, 노인식, "3차원 HCIB법을 이용한 회전하면서 변형하는 날개 주위 유동해석," *대한조선학회논문집*, Vol.45, pp.379-388.
- [10] 2007, 신상목, "HCIB법을 이용한 변형하는 평판 주위의 3차원 유동해석," *한국전산유체공학회지*, Vol.12, pp.1-8.
- [11] 2012, Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C., Kim, Y.J., and Yoon, H.K., "Simulation of free surface flows using the flux-difference splitting scheme on the hybrid Cartesian/immersed boundary method," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.68, pp.360-376.
- [12] 2012, Shin, S., "Numerical simulation of internal waves generated by a translating and pitching foil," *Ocean Engineering*, submitted.
- [13] 2006, Nakayama, K., "Comparisons of CIP, compact and

- CIP-CSL2 schemes for reproducing internal solitary waves," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.33, pp.203-222.
- [14] 2010, Cheng, M.H., and Hsu, J.R.C., "Laboratory experiments on depression interfacial solitary waves over a trapezoidal obstacle with horizontal plateau," *Ocean Engineering*, Vol.37, pp.800-818.
- [15] 2007, Gao, F., Ingram, D.M., Causon, D.M., Mingham, C.G., "The development of a Cartesian cut cell method for incompressible viscous flow," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.54, pp.1033-1053.
- [16] 2006, Qian, L., Causon, D.M., Mingham, C.G., and Ingram, D.M., "A free-surface capturing method for two fluid flow with moving bodies," *Proceedings of the Royal Society A*, Vol.462, pp.21-42.
- [17] 2009, Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C., and Kim, Y.J., "Effects of flexibility on propulsive force acting on a heaving foil," *Ocean Engineering*, Vol.36, pp.285-294.