



CIP 방법을 사용한 해석법

이 정 희,¹ 허 남 건^{*2}

A NUMERICAL ANALYSIS USING CIP METHOD

J.H. Lee¹ and N. Hur²

The numerical program has been developed for the purpose of the complicate geometries application using CIP method. The non-staggered, non-orthogonal, and unstructured grid system can be also used for the various geometries in the program. For validating CIP solver, the lid-driven cavity flow and solitary wave propagation flow are carried out. Test results show a good agreement with the verified results. The dynamic solver was used for the behavior of moving body. Interface process between the two solvers is introduced. The research was performed on the flow problem around torpedo and log and the flow problem in a tank in order to analyze the three phase flow problem Although the comparison to the verified results was not quantitatively performed, the trend of the results was reasonable.

Key Words : 전산유체역학(CFD), CIP법(Cubic interpolated propagation method), 다상유동(Multi-phase flow), 유한체적법(Finite volume method), 비정렬격자계(Unstructured grid system), 다물체동역학(Multi-body dynamics)

1. 서 론

다상유동 현상은 우리 주변에서 쉽게 접할 수 있는 자동차, 항공기 및 배 주위유동, 혈류유동, 기포 및 액체 물방울의 거동, 풍력이나 원자력 발전에 사용되는 기기 등 다양한 분야에서 관찰될 수 있다. 과거에는 이런 현상은 컴퓨터의 성능이 많이 떨어지고 수치해석 기법의 미발달로 인해 주로 실험에 의존하거나 유체 영역을 간단한 실험식이나 이론식을 이용해 고체영역만 해석하는 경우가 대부분이었다. 최근에 컴퓨터의 기억용량과 성능의 급속한 발전과 CFD의 수치해석 기법의 괄목할 만한 성장과 더불어 수치해석법이 점점 더 해석 범위를 넓혀가고 있다. 따라서 수치해석법은 실험의 어려움이나 연구경비의 절감, 분석시간의 단축시키기 위한 대체 방안으로 널리 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

일반적으로 다상유동 해석은 라그랑지안 방법(Lagrangian method), 경계추적법(interface tracking method) 및 경계포착법(interface capturing method)으로 주로 연구되고 있다. 라그랑주

방법의 대표적인 방법으로는 particle tracking method가 있다. 이 방법은 계산 영역의 격자계가 필요 없는 연구방법으로 질량보존을 항상 만족시킬 수 있는 장점이 있으나 각 Particle의 모든 궤적을 계산하는데 상당한 기억용량이나 시간이 소요되는 단점이 있다. 또한 각 particle사이의 정확한 contact model을 구현하는 것이 매우 어렵다. 경계추적법은 각 상의 경계면이 이동함에 따라 직접 격자계를 이동시키는 해석 방법으로 상이한 상경계면을 정확하게 포착할 수 있는 장점이 있으나 격자의 재생성이나 보간하는 과정이 매우 복잡하고 다상의 유체 영역의 상경계가 분리되는 현상이 발생할 때 격자 생성이 매우 어렵다. 경계포착법은 이동격자를 사용하지 않고 고정 격자계를 사용함으로 인해 격자생성이 쉽고 다상의 유동을 해석할 때 불연속적인 유동 현상을 해석할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 격자 경계와 상경계면이 정확히 일치하지 않아 생기는 오차와 이동하는 상경계면을 정확히 포착하기가 어려운 단점이 있다. 따라서 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 상경계면의 처리가 매우 중요하다.

경계포착법을 이용한 상경계 유동해석에 널리 사용되는 대표적인 수치해석 기법으로는 VOF법[1], Level Set법[2] 있다. 유한체적법과 연계되어 사용되는 VOF(Volume of Fraction)법은 인접 검사체적 사이의 유동을 고려하여 경계면을 찾는 방

1 서강대학교, 다중현상 CFD 연구센터(ERC)

2 종신회원, 서강대학교 공과대학 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

법으로 경계면의 처리과정이 복잡하여 3차원에서의 확장이 어렵고 기하학적으로 복잡한 경우 부정확한 결과를 나타낼 수 있는 단점이 있다. Level Set 법의 경우에는 거리에 대한 함수값을 사용하여 경계면을 찾는 방법으로 VOF법보다는 경계면을 정확하게 찾을 수 있는 장점은 있으나 이 경우에도 명확한 경계면을 찾기 위해서 경계면의 추가적인 처리가 복잡한 단점이 있다. 따라서 앞에서의 이러한 단점을 보완하기 위해서는 보다 정확한 경계 처리와 기하학적 처리가 간단한 유동해석법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 다상유동 해석을 하기 위해 경계표착법을 이용한 CIP(Cubic Interpolate Propagation)법을 도입하고자 한다. CIP법은 Takewaki등[3]이 쌍곡선 방정식의 해법을 도입하여 개발하였다. CIP법은 열유동 방정식을 풀 때 가장 큰 오류를 발생하는 대류항을 3차원적 스플라인 보간방식을 도입하여 보간하여 밀도 차이가 큰 물질 사이의 거동이나 큰 밀도변화가 있는 상경계의 유동해석에서도 수치확산을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 특히 날카로운 경계면에서 수치확산을 수반하는 다상 열유동 및 상변화 현상 해석에 적합하다. 또한 일반 유동해석법과는 달리 압축성과 비압축성 유동이 동시에 존재하는 유동에서도 해석 가능한 통합해법이라 할 수 있다. Yoon 등[4]은 엇갈림 격자계에서 Predictor-Corrector법을 사용한 CCUP방법을 이용하여 비압축성, 압축성 및 자유표면유동문제를 해석하였다. 그러나 엇갈림격자계를 사용하는 경우에는 복잡한 경계조건의 적용이 어렵고 비정렬, 비직교격자계에서의 적용이 매우 힘들고 특히 이 경우에 3차원에서의 확장이 매우 어려운 단점이 있다. 따라서 엇갈림 격자계의 단점을 보완하기 위해 이정희 등[5]은 비엇갈림 격자계에서 적용할 수 있는 CIP법을 개발하였으며 캐비티 유동에 적용하여 해석하고 검증한 바있다.

최근에는 고체 영역을 포함하여 연성해석을 하려는 움직임이 활발히 진행되고 있으며 특히 설계관점에서 동역학적 개념을 도입하여 CFD와 구조역학을 연동하여 해석하려는 노력이 시도되고 있다. 실제 움직임이 있는 상태에서 유체의 거동은 정적 상태의 물체 주위의 유동과는 확연히 차이가 있다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해서는 움직이는 몸체에 대해 유체-고체 상호간의 영향을 동시에 고려되어야 할 것으로 사료된다. 그러나 컴퓨터의 급속한 발달과 수치해석 기법의 향상에도 불구하고 아직도 이동하는 물체 주위의 유체-고체 상호간의 영향을 해석하는 것은 아직도 많은 어려움이 존재하고 있다. 특히 유체 매질이 다상인 상경계 문제를 동시에 적용하는 것은 아직도 해석에 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 복잡한 격자계에서 해석할 수 있고 비정렬, 비직교, 비엇갈림 격자계에서 적용할 수 있는 CIP 해석프로그램을 이용한 유동해석법을 소개하고자 한다. 또한 해

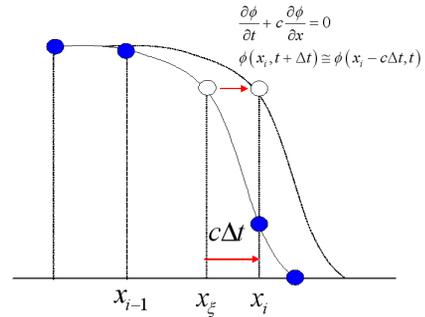


Fig. 1 Principle of spline interpolation

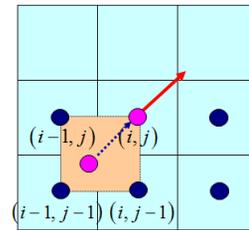


Fig. 2 Non-staggered grid

석프로그램을 검증하기 위해 lid-driven cavity flow, 자유표면 유동에 대해 적용하고 다물체 동역학 프로그램과 결합한 유체-고체 상호작용에 관한 해석, 공기방울의 거동해석 사례를 소개하고자 한다.

2. 수치 이론

2.1 유체영역에 대한 해석

유체영역에서는 밀도차이가 큰 기체, 액체 및 고체 사이의 상경계 문제를 해석하기 위해 CIP법을 이용하였다. 본 해석에 사용된 CIP법은 비정렬, 비직교 및 비엇갈림 격자계[6]에서 유한체적법(FVM)을 이용하여 이산화하였다.

2.1.1 CIP법의 기본개념

CIP법은 파동 방정식을 풀기 위한 해석 기법으로 수치확산의 오류가 적고 다차원에서의 확장이 용이한 장점이 있다. 먼저 CIP법의 간단한 원리를 설명하기 위해 1차원 파동방정식을 고려하면

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

CIP법은 Fig. 1과 같이 x_i 와 x_{i+1} 사이를 하나의 다항식으



로 보간하는 스플라인 보간법을 사용하고 있다. 식(1)의 파동 방정식에 대한 수치해는 c 가 거의 변하지 않도록 시간간격 Δt 를 충분히 짧게 잡으면, 격자점 x_i 에서 다음 시각 $t + \Delta t$ 에서의 함수값 ϕ_i^{n+1} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_i^{n+1} \equiv \phi(x_i, t + \Delta t) \cong \phi(x_i - c\Delta t, t) = \phi_\xi^n \quad (2)$$

식 (1)을 x 에 관해 공간미분을 취하면

$$\frac{\partial \phi'}{\partial t} + c \frac{\partial \phi'}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

여기서 $\phi' = \frac{\partial \phi}{\partial x}$

식 (1)의 파동방정식과 마찬가지로 방법으로 격자점 x_i 에서 다음 시각 $t + \Delta t$ 에서의 함수값 ϕ_i^{n+1} 은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\phi_i^{n+1} \equiv \phi'(x_i, t + \Delta t) \cong \phi'(x_\xi, t) \quad (4)$$

따라서 1차원 파동방정식의 3차 스플라인 보간식은 다음과 같다.

$$F_i = a_i X^3 + b_i X^2 + \phi_i' X + \phi_i \quad (5)$$

여기서 $X = x - x_i$

식 (5)에서 ϕ_i' 값은 식(4)와 같이 얻을 수 있으므로 각 계산점에서 2개의 미지수(a_i, b_i)만 알면 보간식을 얻을 수 있다. 따라서 3차보간식이지만 계산량을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다.

Fig. 2는 2차원 비엇갈림 격자계에서 $\phi_{i,j}^{n+1}$ 의 값을 보간하는 방법을 소개하고 있다. $\phi_{i,j}^{n+1}$ 는 이전 시간단계에서 (i, j) , $(i, j - 1)$, $(i - 1, j - 1)$, $(i - 1, j)$ 의 계산점으로부터 보간하여 계산한다. 또한 3차원의 경우에는 8개의 계산점으로부터 보간식을 얻을 수 있다.

2.1.2 Tangent-CIP법

tangent-CIP법은 Fig. 3(a)에서와 같이 CIP법에 의해 계산된 오버슛(overshoot)이나 언더슛(undershoot)된 결과를 개선하여 정확한 상경계면을 찾고자 할 때 사용한다. 식(1)의 ϕ 대신 $h = \tan [(1 - \epsilon)\pi(\phi - 0.5)]$ 를 사용하여 $\partial h / \partial t + c \partial h / \partial x = 0$ 식을 CIP법을 이용하여 풀고 계산이 끝난 후 다시 역변

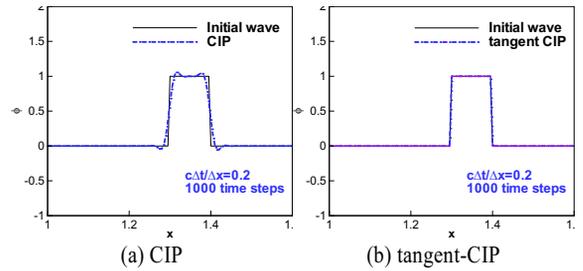


Fig. 3 Comparison between CIP result and tangent-CIP result after 1000 time steps

환($\phi = \tan^{-1}(h) / [(1 - \epsilon)\pi] + 0.5$)하여 ϕ 를 구한다. ϵ 은 발산 방지를 위해 사용되며 0.00001로 주었다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 ϕ 가 0에서 1사이의 범위에 있을 때 tangent-CIP법을 취하면 각 영역이 1과 0으로 명확히 정의된다.

2.1.3 CCUP법

CCUP(CIP-Combined Unified Procedure)법은 CIP법을 일반적인 열유체방정식에 적용하기 위한 범용해법이다. 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식을 일반적인 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho + \rho \cdot \nabla \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{Q}_u \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p = \rho c_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (8)$$

여기서 \mathbf{Q}_u 항은 점성력이나 중력, 부력과 같은 부가항이다.

CCUP법에서는 지배방정식을 대류단계와 비대류단계로 분리하여 계산한다. 대류단계는 3차 스플라인함수를 사용한 CIP법을 이용하여 계산하며, 비대류단계는 일반적인 차분법을 통해 수행된다. 본 연구에서는 대류항을 먼저 수행한 다음 비대류항을 계산한다.

대류항

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t} + \mathbf{u}^n \cdot \nabla \rho^n = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n}{\Delta t} + \mathbf{u}^n \cdot \nabla \mathbf{u}^n = 0 \quad (10)$$



$$\frac{p^* - p^n}{\Delta t} + \mathbf{u}^n \cdot \nabla p^n = 0 \quad (11)$$

CIP법을 이용하여 식 (9-11)의 $\rho^*, \mathbf{u}^*, p^*$ 를 구한다.

비대류항

$$\frac{\rho^{n+1} - \rho^*}{\Delta t} = -\rho^* \nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} \quad (12)$$

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{\nabla p^{n+1}}{\rho^*} + \mathbf{Q}_u^* \quad (13)$$

$$\frac{p^{n+1} - p^*}{\Delta t} = -\rho^* c_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} \quad (14)$$

위 식에서 비대류 단계에서의 방정식을 보면 압력과 속도 항이 $n+1$ 시간단계의 값이기 때문에 직접계산이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 Predictor-Corrector법을 도입하였다. 예측 단계에서는 양함수법을 도입하여 계산을 수행하며, 수정단계에서는 예측 단계에서의 값을 이용해 계산을 수행한다. 예측 단계에서의 운동량방정식은 대류 단계 후의 값을 이용하여 계산하게 된다.

예측단계

$$\frac{\tilde{\mathbf{u}} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{\nabla p^*}{\rho^*} + \mathbf{Q}_u^* \quad (15)$$

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \tilde{\mathbf{u}}}{\Delta t} = -\frac{\nabla \delta p}{\rho^*} \quad (16)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho^*} \nabla \delta p \right) = \frac{\delta p}{\rho^* c_s^2 \Delta t^2} + \frac{\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}}{\Delta t} \quad (17)$$

여기서 $\delta p = p^{n+1} - p^*$

수정단계

$$\mathbf{u}^{n+1} = \tilde{\mathbf{u}} - \frac{\Delta t}{\rho^*} \nabla \delta p \quad (18)$$

$$\rho^{n+1} = \rho^* - \rho^* \nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} \Delta t \quad (19)$$

$$p^{n+1} = p^* + \delta p \quad (20)$$

2.1.4 압축성 유동과 비압축성 유동의 통합해석

CIP법은 비압축성 유동과 압축성 유동을 동시에 풀 수 있는 통합해법이다. 식(17)에서 비압축성의 경우는 음속의 전파 시간 $\tau_s \ll \Delta t$ 이므로 즉 음파속도가 매우 크므로 $\delta p / (\rho^* c_s^2 \Delta t^2) \rightarrow 0$ 이다. 따라서 식(17)은 일반적인 비압축성의 프와송 방정식과 동일한 형태가 된다. 압축성 유동인 경우에는 음속의 전파시간 $\tau_s \gg \Delta t$ 이므로 $\delta p / (\rho^* c_s^2 \Delta t^2)$ 항이 $\nabla \cdot (\nabla \delta p / \rho^*)$ 보다 매우 큰 값이므로 $\nabla \cdot (\nabla \delta p / \rho^*)$ 항은 0으로 취급할 수 있다. 따라서 압축성유동인 경우에도 발산하지 않고 수렴한다. 또한 충격파 유동이 발생하는 경우에는 수치적 발산을 막기 위해 인공점성항이 필요하다. 인공점성항은 다음과 같다.

$$q_i = \begin{cases} \alpha \left(-\rho_i c_s \Delta u + \frac{\gamma+1}{2} \rho_i \Delta u^2 \right) & \text{if } \Delta u < 0 \\ 0 & \text{if } \Delta u > 0 \end{cases} \quad (21)$$

여기서 c_s 는 음속, γ 는 비열비이다.

2.1.5 유체영역 내의 고체영역 처리

유체영역에서 고체영역을 처리하기 위하여 식(22)와 같이 두 영역으로 나누어 해석한다. 식(17)에서 유체영역에서는 $\delta p / (\rho^* c_s^2 \Delta t^2)$ 항이 사용되고 고체영역에서는 이 항을 무시할 수 있다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \delta p}{\rho^*} \right) = \begin{cases} \frac{\delta p}{\rho^* c_s^2 \Delta t^2} + \frac{\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}}{\Delta t} & \text{in the fluid region} \\ \frac{\delta p \rho^*}{\gamma p^* \Delta t^2} & \text{in the solid region} \end{cases} \quad (22)$$

2.1.6 유체영역의 체적력과 외부 경계조건

중력에 관한 체적력은 -z방향으로 주었고 비대류항의 생성 항으로 처리하였다. 유체 영역의 y방향의 외부 경계면은 모두 대칭경계조건으로 주었고 그 외 모든 면은 점착성 벽 경계조건으로 처리하였다.

2.2 고체영역 해석

동역학 해석 영역은 Recursive Formula를 이용한 RecurDyn 프로그램을 이용하였으며 Cosimulation을 이용하여 유체영역에서 얻은 정보를 교환하여 해석하였다. 동역학 영역의 해석은 Implicit Newton-Raphson법을 이용하여 해석하였으며 CFD solver와의 정보교환은 정해진 시간에 이루어진다. 어뢰와 통

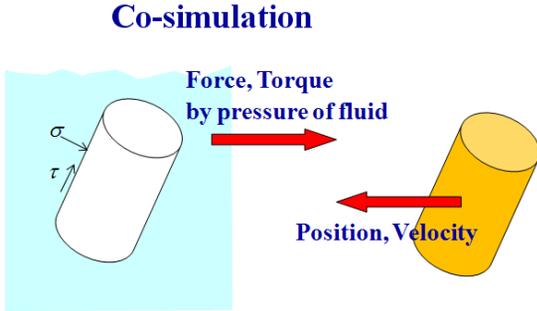


Fig. 4 Fluid-structure interaction between fluid and rigid body

나무의 거동을 Dynamics 해석하였고 오일탱크의 거동을 Kinetics 해석을 각각 적용하여 해석하였다.

2.3 유체와 고체 사이의 경계 처리 및 자료교환

Fig. 4는 유체와 고체 영역을 결합하는 과정을 나타내며 유체 영역에서 계산된 압력에 의한 질량 중심에서의 총 힘과 총 토크는 동역학 영역으로 전달된다. 이 때 힘과 토크는 고체의 각 쉘면에 압력에 의한 수직응력과 전단응력에 의해 계산된다. 힘과 토크를 전달받은 강체는 동역학 거동에 의해 질량중심에서 위치와 속도를 계산한다. 계산된 위치와 속도는 다시 유체영역으로 전달되고 유체영역에서는 강체의 거동에 의해 다시 새로운 압력을 계산된다.

2.4 유체 영역에서 고체영역의 searching

고체 영역과 유체영역을 해석할 때 2상의 유체영역과 고체영역은 동시에 풀리게 되고 고체영역은 동역학 거동에 따라 움직이면 유체영역에서의 위치를 항상 searching하게 된다. searching의 효율성을 높이기 위해서 body 주변의 cell을 먼저 찾고 이 cell을 저장한 다음 그 cell중에서 body와 연관된 cell을 최종적으로 찾는다.

3. 수치해석 결과

3.1 유체영역에서 해석프로그램 검증

본 해석프로그램의 검증을 위해서 lid-driven cavity flow와 solitary wave propagation flow에 대해 적용해 보았다.

3.1.1 Lid-driven cavity flow에 대한 검증

비압축성 유동해석에 대해 검증하기 위해 Re=400~10000에서 해석하였다. Fig. 5에서와 같이 해석결과는 모든 레이놀즈수에 대해 전 영역에서 Ghia 등[7]의 결과와 일치함을 알 수 있다.

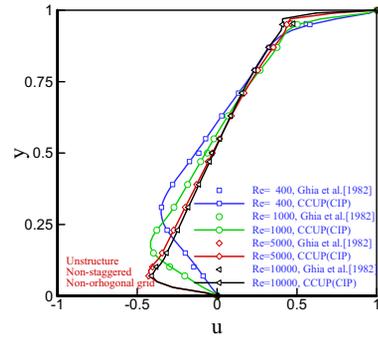


Fig. 5 Comparisons of u velocity profiles with Reynolds number at x=0.5

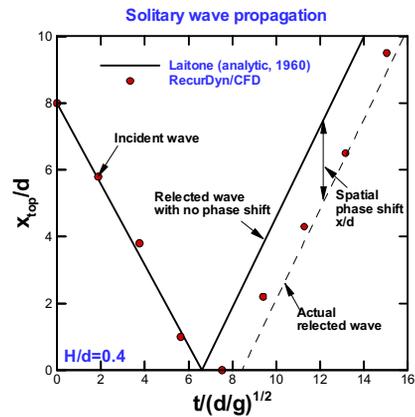


Fig. 6 Comparison of related wave profiles for H/d=0.4

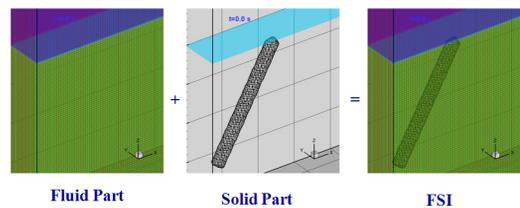


Fig. 7 Mesh generation for fluid part and solid part

3.1.2 solitary wave propagation flow에 대한 검증

자유표면 유동을 검증하기 위해 Laiton[8]의 이론 결과와 비교하였다. Fig. 6에서 보는바와 같이 입사파 영역에서 최고 파의 위치가 잘 일치함을 볼 수 있고 반사파 영역에서도 상이 이동되는 위치를 정확히 잘 예측함을 볼 수 있다.

3.2 유체-고체 상호작용에 관한 유동해석

본 연구에서는 비정렬, 비엇갈림 격자계에서 다상유동을

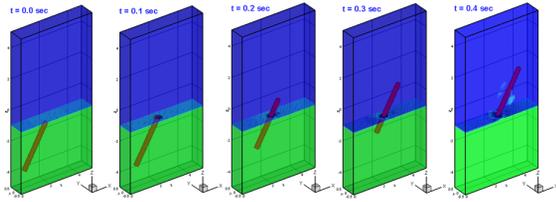


Fig. 8 Fluid-structure interaction between fluid and torpedo with time

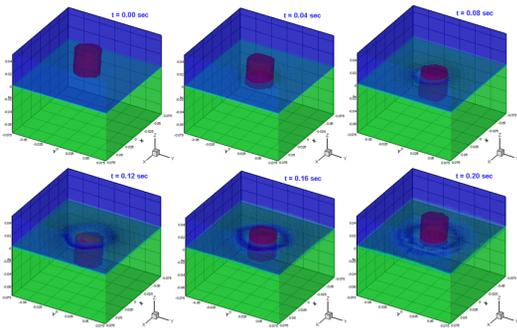


Fig. 9 Fluid-structure interaction between fluid and log with time

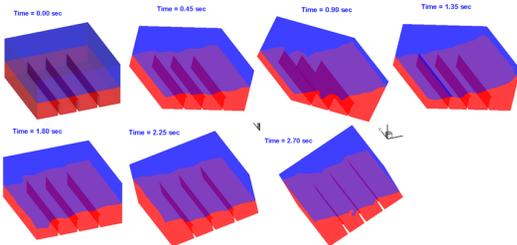


Fig. 10 Fluid-structure interaction between fluid and oil tank with time

해석하기 위해서 Fig. 7과 같이 유체영역과 고체영역에 대해 각각 격자계를 형성시켰다. 유체영역을 hexa 격자계를 사용하였고 고체영역은 복잡한 형상에 대해 적절히 잘 표현하기 위해 tetra 격자계를 사용하였다. 공기와 물의 밀도와 점성은 Table 1과 같이 주었다.

3.2.1 어뢰주위의 유동해석

Fig.8은 어뢰 주위 유동을 해석하기 위해 Table 1과 같이 유체의 물성을 주었고 438.2518 kg의 질량을 가진 어뢰는 x, y 방향으로 각각 $4000\cos(\pi/3)N$ 과 $4000\sin(\pi/3)$ 의 힘을 초기 조건을 주어 3상(고체, 액체, 기체)을 고려한 유체-고체 상호작용에 관한 해석을 하였다. 어뢰는 초기상태의 힘에 의해 이동하면

서 유체와의 상호작용에 의해 어뢰 주위의 수면을 약간 상승시키고 일부는 고체면을 따라 올라감을 확인할 수 있다.

3.2.2 통나무 주위의 유동해석

Fig.9는 통나무 주위 유동을 해석하기 위하여 초기에 정지 상태에서 해석하였고 통나무의 질량은 0.04012386 kg으로 주었다. 공기 중에서 중력에 의해 자유낙하한 통나무는 물과 접촉하면서 부력에 의한 힘의 영향을 받게 되고 힘의 균형을 유지하는 순간 정지되며 그 이후 부력에 의해 다시 떠오르는 현상을 확인할 수 있다.

3.2.3 탱크 주위의 유동해석

Fig.10은 물이 저장된 탱크 속의 자유표면 유동을 해석한 결과이다. $\pm\pi/1.8$ rad/s로 일정하게 회전하는 운동조건을 주어 Kinematic 해석한 결과이다. 물 탱크가 회전함에 따라 유체는 고체와의 상호 작용에 의해 출렁이게 된다. 유체는 중력방향으로 쓸림 현상이 일어남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비정렬, 비엇갈림 격자배열에서 Predictor-Corrector법을 적용하여 다상 상경계유동 현상을 해석하였다. 개발된 해석프로그램을 검증하기 위해서 lid-driven cavity flow, 댐붕괴, solitary wave propagation 유동 해석에 적용해 보았다. 계산 결과는 검증된 자료와 잘 일치함을 보여 주었다. 또한 유체-고체 상호작용에 의한 유동해석 문제에도 적용해 보았다. 물 속에서 어뢰가 공기중으로 발사되는 문제, 통나무가 공기 중에서 물속으로 들어가서 부력에 의해 다시 물에서 뜨는 문제 및 물탱크 내에서의 유동거동에 관한 문제를 수행해 보았다. 계산 결과는 현재는 정량적으로 비교는 할 수 없었지만 정성적으로 잘 수행되었음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 유체-고체 상호작용에 관한 해석 메카니즘을 구현해 보는데 초점을 두었다. 향후 본 해석 프로그램을 검증하고 정확성을 높이고자 한다. 앞으로 좀 더 해석범위를 확장하여 여러 실제 응용문제에 적용해 보고자 한다.

Table 1 Fluid properties for air and water

Property	Value
ρ_{air}	1.205 kg/m ³
μ_{air}	1.81×10^{-5} Pa·s
ρ_{water}	1000. kg/m ³
μ_{water}	1.002×10^{-3} Pa·s



후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20090093128).

참고문헌

- [1] 1968, Harlow, H. and Amsden, A.A., "Numerical Calculation of Almost Incompressible Flow," *J. Comput. Phys.*, Vol.3, pp.80-93.
- [2] 1994, Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S., "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow," *J. Comput. Phys.*, Vol.114, pp.146-159.
- [3] 1985, Takewaki, H., Nishiguchi, A. and Yabe, T., "Cubic Interpolated Pseudo-particle Method (CIP), for Solving Hyperbolic-type Equations," *J. Comp. Phys.*, Vol.61, pp.261-268.
- [4] 1999, Yoon, S.Y. and Yabe, T., "The Unified Simulation for Incompressible and Compressible Flow by the Predictor-corrector Scheme based on the CIP method," *J. Comput. Phys. Communications*, Vol.119, pp.149-158.
- [5] 2003, Lee, J.H., Kang, J., Im, D. and Kim, C.J., "Analysis of the Flow in Square Cavity Using CIP method in Non-staggered Grid Arrangement," *KSME(B) spring conference*, pp.1821-1826.
- [6] 1983, Rhie, C.M. and Chow, W.L., "A Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Isolated Airfoil with Trailing Edge Separation," *AIAA*, Vol.21, pp.1525-1532.
- [7] 1982, Ghia, U., Ghia, K.N. and Shin, C.T., "High-resolution for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method," *J. Comput. Phys.*, Vol.48, pp.387-411.
- [8] 1960, Laiton, E.V., "The Second Approximation to Cnoidal and Solitary Waves," *J. Fluid Mech.*, Vol.21, pp.1525-1532.