

인접한 두 수중운동체 주위의 유동 해석을 위한 가상경계법의 적용

이 경 준, 양 경 수*

인하대학교 기계공학과

APPLICATION OF AN IMMERSED BOUNDARY METHOD TO SIMULATING FLOW AROUND TWO NEIGHBORING UNDERWATER VEHICLES IN PROXIMITY

K. Lee and K.S. Yang*

Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

Analysis of fluid-structure interaction for two nearby underwater vehicles immersed in the sea is quite challenging because simulation of flow around them is very difficult due to the complexity of underwater vehicle shapes. The conventional approach using body-fitted or unstructured grids demands much time in dynamic grid generation, and yields slow convergence of solution. Since an analysis of fluid-structure interaction must be based on accurate simulation results, a more efficient way of simulating flow around underwater vehicles, without sacrificing accuracy, is desirable. An immersed boundary method facilitates implementation of complicated underwater-vehicle shapes on a Cartesian grid system. An LES modeling is also incorporated to resolve turbulent eddies. In this paper, we will demonstrate the effectiveness of the immersed boundary method we adopted, by presenting the simulation results on the flow around a modeled high-speed underwater vehicle interacting with a modeled low-speed one.

Key Words : 유체-구조연성해석(Fluid-Structure Interaction), 가상경계법(Immersed Boundary Method), 대외류모사(Large Eddy Simulation), 수중운동체(Underwater Vehicle)

1. 서 론

발사관을 탈출한 수중운동체의 경로는 모함 및 수중운동체 주위의 유동과 상호작용으로 인하여 영향을 받게 된다. 모함을 떠난 수중운동체의 운동은 유동장을 변화시키며, 이는 다시 수중운동체에 작용하는 유체력을 변화시킨다. 즉, 수중운동체의 운동과 유동장은 서로 영향을 주기 때문에 수중운동체의 정확한 이동경로를 예측하려면, 동역학적인 관점에서 수중운동체의 운동과 유체역학적인 관점에서 유동장을 동시에 해석해야 한다. 이를 유체-구조 연성(Fluid-Structure Interaction, FSI) 해석이라 부른다.

기존의 해석 코드에서는 수중운동체 표면의 점착조건을

만족시키기 위하여 Body-fitted 좌표계가 주로 사용된다. 그러나 형상이 복잡하거나, 수중운동체의 동적 거동도 해석할 경우, 격자생성이 매우 복잡할 뿐만 아니라, 해석 결과의 정밀도와 전산 효율이 저하되는 문제점이 있다. 이를 완화시키기 위하여 비정렬 격자계(Unstructured Grid System)가 사용되고 있으나, 격자점 배치의 효율성은 증가된 반면 구현의 복잡성, 다른 코드와의 호환성 저하, 계산의 수렴성 저하 등의 문제점은 여전히 남아 있다. 사용된 격자계의 질이 전산해석 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 격자계 생성에 많은 노력을 기울여야 하는데, 특히 매 스텝마다 격자계를 새로 생성해야 하는 FSI 문제의 경우에는 Body-fitted 혹은 비정렬 격자계를 사용하는 것은 매우 비효율적이다. 또한 최근에 많이 사용되고 있는 가상경계법(Immersed Boundary Method)은 기본적으로 직교좌표계나 원통좌표계 같은 정렬 격자계에서 구현된다. 비교적 단순한 모양의 수중운동체에 비해 복잡한 형상의 모함을 포함하게 되므로 많은 격자점을 필요로 하며, 운동체의 움직임에 따라서 조밀한 격자를 사용해야 하기 때문에 전체적인 컴퓨터 메모리량과 수치계산 시간의 급격한 상승을

Received: October 2, 2012, Revised: February 27, 2013, Accepted: February 28, 2013.

* Corresponding author, E-mail: ksyang@Inha.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.1.049>

© KSCFE 2013

초래한다. 이러한 문제점을 극복하고 모함의 영향까지 고려한 정확한 FSI 해석 기술의 개발을 위해서는 보다 효율적인 격자 구조 기반의 가상경계법 기술이 필요하다.

AMR 기법은 격자 구조에 단계(level)를 두어 물리량의 변화가 심하지 않은 구역에서는 성긴 격자를 사용함으로써 컴퓨터 메모리 및 계산시간을 절감할 수 있으며, 물리량이 급변하는 곳에서는 조밀한 격자를 사용함으로써 더욱 정확한 계산을 수행할 수 있다. 또한 AMR 기법을 사용하면 물체가 유동장 안에서 이동할 때, 움직이는 물체 주위에만 조밀한 격자를 두고, 물리량들의 변화에 따라서 격자 구조의 단계를 자동적으로 조절할 수 있다.

AMR 기법은 크게 구조화된(structured) AMR 기법과 구조화되지 않은(unstructured) AMR 기법으로 나눌 수 있다. 격자가 구조화되지 않을 경우엔 복잡한 형상을 구현하기는 쉽지만 수렴성이 떨어지고 격자가 재구성될 때 이웃하고 있는 격자정보에 대한 추가적인 메모리가 필요하다. Berger and Olinger[1]에 의해 고안된 S-AMR(Structured Adaptive Mesh Refinement)은 구조화된 AMR 기법으로, 전체 계산 영역을 단계(level)가 다른 블록(block)들로 구성한다. 조밀한 격자가 필요한 경우, 블록은 여러 개의 작은 블록들로 나누고, 그 반대의 경우 여러 개의 작은 블록들은 큰 블록으로 합쳐진다. 초창기 S-AMR 기법은 비압축성 유동에 적용할 경우 블록 단계가 다른 곳에서 연속방정식을 만족하지 못하는 어려움을 겪었다. 최근에는 블록 단계가 변하는 곳에서 연속방정식을 만족하기 위한 구속식을 통하여 문제를 해결하고 있다.

본 연구에서는 S-AMR[2] 격자 구조 기반의 가상경계법[3] 코드를 개발하여 FSI를 정확히 해석할 수 있는 기술을 확보하였다. 또한 높은 레이놀즈 수(Re)에 의한 난류를 해석하기 위해 난류모델[4]을 코드에 추가하였다. 완성된 코드를 이용하여 빠른 속도로 탈출하는 수중운동체와 모함을 포함하는 FSI 해석을 수행하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 지배방정식

FSI 해석을 위한 가상경계법이 적용된 3차원 비압축성 LES의 지배 방정식은 연속 방정식, 운동량 방정식으로 구성되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\rho \partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \bar{F}_i \quad (2)$$

여기서 \bar{u}_i 는 box filter를 사용하여 여과된 속도 성분이고, \bar{p} 는 압력, $\bar{\tau}_{ij}$ 는 레이놀즈 응력이다. 운동량 방정식에서 \bar{F}_i 는 가상경계법에 의해 추가된 운동량 부가를 의미한다. 각 지배 방정식은 AMR 기반의 직교좌표계에서 유한체적법(Finite Volume Method)으로 차분되었다. 시간 차분은 운동량 방정식의 경우 대류항과 점성항에 대하여 3차 정확도의 Runge-Kutta 방법으로 양해적(explicit)으로 적분하였다. 연속 방정식과 운동량 방정식을 분리하기 위해서 Fractional Step Method[5]를 사용하였다.

수중운동체의 운동 방정식은 1차 상미분방정식의 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & M(q_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_2 \\ F(q_1, q_2, t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

운동 방정식에서 $q_1 = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ 은 동역학 시스템에서의 n 개의 일반화된 좌표계 집합을 의미하며, $q_2 (= \dot{q}_1)$ 는 일반화된 속도 집합을 의미한다. I 는 $n \times n$ 단위행렬(identity matrix), 0 은 $n \times n$ 영행렬이다. $M(q_1)$ 은 질량행렬, $F(q_1, q_2, t)$ 는 운동체에 가해지는 힘을 의미하며, 본 연구에서는 중력과 부력, 유체력만 고려하였다.

2.2 AMR(Adaptive Mesh Refinement)

본 연구에 사용된 AMR 기법[2]에서 계산 영역은 블록으로 구성되어 있으며 각 블록은 $n_x \times n_y \times n_z$ 개의 균일한(uniform) 격자 구조를 가진다. 블록의 단계(level) Ω^l 은 격자 구조의 크기를 결정한다. 즉 가장 성긴 격자 구조를 가지는 블록의 단계는 Ω^1 이며, 가장 조밀한 격자 구조를 가지는 블록의 단계는 $\Omega^{l_{max}}$ 이다. 임의의 Ω^l 블록이 Ω^{l+1} 블록으로 분리될 때 Ω^l 블록을 parent 블록, Ω^{l+1} 블록을 children 블록이라 한다. Children 블록들의 합과 parent 블록은 정확히 같은 영역을 차지한다. 각각의 블록에서, 각 방향으로의 셀(cell)의 크기는 $\Delta x_i^l = 2\Delta x_i^{l+1}$ 이다. 이때 아래첨자 i 는 방향을 나타내며, 위첨자 l 은 블록의 단계를 나타낸다. AMR 기법에서 가장 중요한 요소는 단계가 다른 블록들이 인접해 있을 때 속도와 압력 같은 변수들이 경계에서 잘 전달되는지의 여부이다. 본 연구에서는 Restriction과 Prolongation 알고리즘[2]을 사용하여 단계가 다른 블록에서 경계값을 정확히 계산하여 물리량들이 정확히 전달될 수 있게 하였다.

2.2.1 Restriction

Restriction은 성긴 블록의 경계값을 인접한 조밀한 블록의

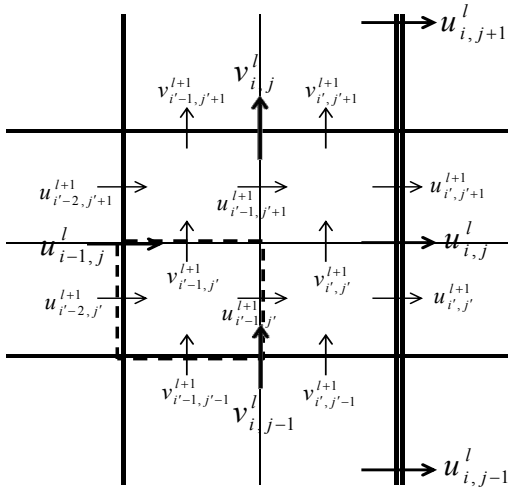


Fig. 1 Velocity arrangement for the construction of prolongation operators in two-dimensions

경계값을 이용해 구하는 방법이다. 엇갈린 격자 구조에서는 각 방향으로의 속도와 압력이 정의되는 곳이 다르다. 그러므로 셀 중앙에서 정의되는 압력과 셀의 면에서 정의되는 속도의 Restriction 방법이 다르다. 압력의 경우 dimension-by-dimension 보간법이 사용된다. 이 방법은 2차 다항식을 이용하여 각 축 방향으로 보간하는 것이다. 세 방향 중 한 방향(예를 들면, x 방향으로의 압력 분포를 2차 다항식 $p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$)을 이용하여 보간한 후 같은 방법으로 다른 방향으로 압력 분포를 계산할 수 있다. 셀의 면에서 정의되는 속도의 경우는 압력과 같은 방법으로 Restriction 하게 되면, 2차 정확도는 만족하지만, 연속방정식을 만족하지 않는다. 속도에 사용된 Restriction 연산자는 각 면(2차원인 경우 선)에서 사용된 4(2차원인 경우 2)개의 조밀한 격자에서의 속도를 평균하여 사용한다.

2.2.2 Prolongation

Prolongation은 조밀한 블록의 경계값을 인접한 성긴 블록의 경계값을 이용해 구하는 방법이다. 압력은 Restriction과 같은 방법으로 dimension-by-dimension 보간법이 사용된다. Fig. 1은 속도의 Prolongation을 설명하기 위한 그림이다(편의상 2차원). 속도의 Prolongation에 사용된 방법은 Restriction에 사용된 방법보다 복잡하다. 성긴 격자 구조에서 divergence 연산자 D 를 다음과 같이 정의한다.

$$Du = \frac{u_{i,j}^l - u_{i-1,j}^l}{\Delta x^l} + \frac{v_{i,j}^l - v_{i-1,j}^l}{\Delta y^l} \tag{4}$$

여기서 Δ_x^l, Δ_y^l 는 각각 parent 블록의 x, y 방향으로의 격자 간격이다. Du 는 대응하는 children 블록에서 만족해야 하는 목표가 된다. 우선 8개의 속도 성분 $u_{i-2,j}^{l+1}, u_{i-2,j+1}^{l+1}, u_{i,j}^{l+1}, u_{i,j+1}^{l+1}, v_{i-1,j-1}^{l+1}, v_{i,j-1}^{l+1}, v_{i-1,j+1}^{l+1}, v_{i,j+1}^{l+1}$ 을 결정해야 한다. 이 8개 속도 성분은 parent 블록의 속도 성분과 같은 면에 존재하며, 한 방향으로 2차 다항식을 이용하여 구할 수 있다. 예를 들어 성긴 격자의 오른쪽 면(Fig. 1의 \parallel)에서 속도를 2차 다항식을 이용하여 $u(y) = a_0 + a_1y + a_2y^2$ 로 두면 성긴 블록에서 주어진 $u_{i,j-1}^l, u_{i,j}^l, u_{i,j+1}^l$ 을 이용하여 다음과 같은 대수 방정식 형태로 구성하여 미지수 a_0, a_1, a_2 를 구한다.

$$\begin{aligned} u_{i,j-1}^l &= a_0 + a_1\left(\frac{\Delta_y^l}{2}\right) + a_2\left(\frac{\Delta_y^l}{2}\right)^2 \\ u_{i,j}^l &= \frac{1}{2}(u_{i,j}^{l+1} + u_{i,j+1}^{l+1}) = a_0 + a_1\left(\frac{3\Delta_y^l}{2}\right) + a_2\left(\frac{3\Delta_y^l}{2}\right)^2 \\ u_{i,j+1}^l &= a_0 + a_1\left(\frac{5\Delta_y^l}{2}\right) + a_2\left(\frac{5\Delta_y^l}{2}\right)^2 \end{aligned} \tag{5}$$

성긴 블록의 오른쪽 면에서 속도 분포를 $u(y) = a_0 + a_1y + a_2y^2$ 으로 가정하였기 때문에 $u_{i,j}^{l+1}, u_{i,j+1}^{l+1}$ 을 구할 수 있다. 같은 방법으로 6개의 속도 성분을 구한다. 다음 단계는 미지수로 남아있는 내부에 있는 속도 성분($u_{i-1,j}^{l+1}, u_{i-1,j+1}^{l+1}, v_{i-1,j}^{l+1}, v_{i,j}^{l+1}$)을 결정해야 한다. Children 블록의 각 셀에서 divergence 방정식을 구성할 수 있다. 예를 들어 Fig. 1의 왼쪽 아래에 있는 셀(점선으로 표시된 셀)에서의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{u_{i-1,j}^{l+1} - u_{i-2,j}^{l+1}}{\Delta_x^{l+1}} + \frac{v_{i-1,j}^{l+1} - v_{i-1,j-1}^{l+1}}{\Delta_y^{l+1}} = Du \tag{6}$$

여기서 $\Delta_x^{l+1}, \Delta_y^{l+1}$ 는 각각 children 블록의 x, y 방향으로의 격자 간격이다. children 블록의 4개의 셀에서 식 (6) 형태의 4개의 방정식을 구성할 수 있다. 이를 행렬 형태로 표시하면 $A\mathbf{u}_m = \mathbf{b}$ 로 나타낼 수 있다. 그러나 A 행렬의 rank가 3이기 때문에 A 행렬의 역행렬을 구할 수 없어 추가적인 방정식이 필요하다. 4개의 내부 속도 중에서 임의의 한 속도를 다음과 같이 구한다.

$$u_{i-1,j}^{l+1} = -\frac{1}{8}u_{i-4,j}^{l+1} + \frac{3}{4}u_{i-2,j}^{l+1} + \frac{3}{8}u_{i,j}^{l+1} \tag{7}$$

식 (7)까지 포함하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta & 0 \\ -1 & 0 & 0 & \delta \\ 0 & -1 & 0 & -\delta \\ 0 & 1 & -\delta & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{i'-1,j}^{l+1} \\ u_{i'-1,j+1}^{l+1} \\ v_{i'-1,j}^{l+1} \\ v_{i',j}^{l+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta + u_{i'-2,j}^{l+1} + \delta v_{i'-1,j-1}^{l+1} \\ \beta + \delta v_{i',j-1}^{l+1} - u_{i',j}^{l+1} \\ \beta - u_{i',j+1}^{l+1} + \delta v_{i',j+1}^{l+1} \\ \beta + u_{i'-2,j+1}^{l+1} + \delta v_{i'-1,j+1}^{l+1} \\ (-u_{i'-4,j}^{l+1} + 6u_{i'-2,j}^{l+1} + 3u_{i',j}^{l+1})/8 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $\delta = \Delta_x^{l+1}/\Delta_y^{l+1}$, $\beta = \Delta_x^{l+1}Du$ 이다. 5개의 방정식과 4개의 미지수가 있는 선형 시스템의 최소자승해(least squares solution)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{u}_m = (A_e^T A_e)^{-1} A_e^T \mathbf{b}_e \quad (9)$$

2.2.3 블럭 단계 결정

격자 구조의 단계를 결정하는 요소는 현 단계의 격자 구조에서 물리량들의 변화정도이다. 여러 가지 판단 기준이 있으며, 본 연구에서는 Simple Velocity-Curl-Base 판단 기준[6]을 사용하였다.

$$\zeta_{cell} = |\nabla \times V| \quad (10)$$

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{N_{cell}} \sum_{i=1, N_{cell}} \zeta^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \zeta_{cell} > S_d &\Rightarrow \text{Refine Cell}, \\ \zeta_{cell} < 0.1S_d &\Rightarrow \text{Coarsen Cell} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (10)을 통해 각 셀마다 $|\nabla \times V|$ 을 계산한 뒤, 식 (11)을 통해 전체 계산 영역에서의 curl V의 rms(root mean square)값을 계산하여 현 격자 단계에서의 curl V와 전체 계산 영역에서의 curl V의 rms값을 비교한다. 식 (12)를 기준으로 조밀한 격자 단계로 재구성할 것인지, 성긴 격자로 되돌아 갈 것인지를 판단하게 된다.

2.3 FSI(Fluid Structure Interaction)

수중운동체의 운동 방정식과 유체 지배 방정식이 서로 연동되어 있기 때문에 FSI 해석은 쉽지 않다. 가장 쉽게 연동된 방정식들의 해를 구하는 방법은 물체의 운동 방정식을 계산하기 위해서 필요한 힘을 시간에 대해 양해적(explicit)으로 분리하는 것이다[7-9]. 즉, 각 시간 스텝(step)에서 유체지배 방정식으로 부터 계산된 힘을 운동 방정식에 대입하여 물체의 위치와 속도를 결정해주는 방법이다. 그러나 이러한 방법

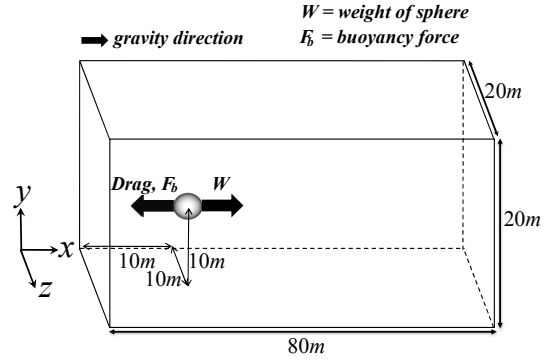


Fig. 2 Physical configuration and computational domain of the free-falling sphere problem

은 물체와 유체 사이에 발생하는 상호작용을 완벽히 구현해 내지 못한다. 정확한 FSI 해석을 위해서는 물체의 운동 방정식과 유체지배 방정식을 시간에 대해 음해적(implicit)으로 동시에 계산해야 한다. 이 과정에서 각 시간 전진마다 반복 해석하는 기술이 요구되며, 이로 인해 많은 계산 시간을 필요로 하나, 상호작용을 보다 완벽히 구현해낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 Hamming's 4th-order, predictor-corrector method[3]을 이용하여 음해적으로 계산을 수행하였다.

2.4 난류모델

모함에서 탈출하는 수중운동체 주위 유동해석은 높은 Re에서 해석해야 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 높은 Re에 의한 난류를 정확히 해석하기 위해 LDSM[4] 모델을 사용하였다.

3. 수식해석 기법의 검증

수치해석 코드의 검증을 위하여 자유 낙하하는 구를 대상으로 중단 속도와 중단 항력을 이론값과 비교해 보았다. 계산 영역은 Fig. 2와 같다. 낮은 속도($Re \ll 1$)에서 구에 작용하는 항력($=3\pi\mu DV$)은 Stokes Law를 통해 계산할 수 있으며, 이 힘은 구의 무게 $W(=\rho_s \times (\pi D^3/6) \times g)$ 와 부력 $F_b(=\rho_f \times (\pi D^3/6) \times g)$ 과 힘의 균형을 이룬다(식 (13)).

$$\text{Drag} + F_b = W \quad (13)$$

이때 D 는 구의 지름, V 는 자유 낙하 속도, g 는 중력가속도의 크기, ρ_s 와 ρ_f 는 각각 구와 유체의 밀도이다. 점성계수(μ)

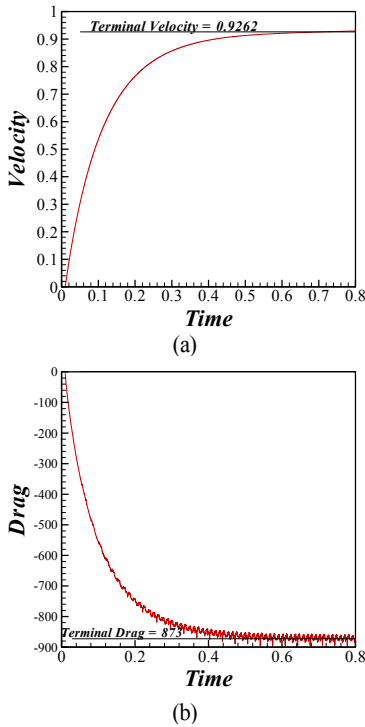


Fig. 3 Results of the free-falling sphere problem; (a) time history of the velocity, (b) time history of the drag coefficient

100.0 kg/(ms)인 가상의 유체 속에서 밀도(ρ_s) 171.0 kg/m³인 구를 자유 낙하하면서 구의 속도와 항력을 계산해 보았다.

계산 영역은 구의 지름(1m)을 기준으로 하여 x, y, z 방향으로 각각 80m, 20m, 20m이며 초기 구 중심의 위치는 각 방향으로 10m이다. 중력은 +x 방향으로 항력과 부력은 -x 방향으로 설정하였다. 모든 면에서는 Dirichlet조건($u=v=w=0$)을 사용하였다. 구 주위에는 조밀한 블럭을 배치하였고, 구와 멀리 떨어진 구역에는 성긴 블럭을 배치하여 총 480개의 블럭을 사용하였다. 각 블럭은 각 방향으로 8개의 격자들로 구성된다. 본 계산에 사용된 dt는 0.0001초이고, 중력가속도의 크기는 9.81m/s²이다.

식 (13)으로부터 계산된 종단속도는 0.9262 m/s이다. 종단속도를 기준으로 계산한 $Re(=\rho_f V_{terminal} D/\mu)$ 는 9.262×10^{-3} 로 Stokes law의 가정인 $Re \ll 1$ 에 잘 부합된다.

Fig 3은 자유 낙하하는 구의 속도와 항력을 나타낸 그림이다. 종단 속도의 99%에 도달하는 이론적인 시간은 0.44초이며, 그 때의 이론 속도는 0.917 m/s이다. 본 연구에서는 0.44초에서의 구의 속도가 0.905 m/s로 약 1.3%의 오차로 이론값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 항력의 크기

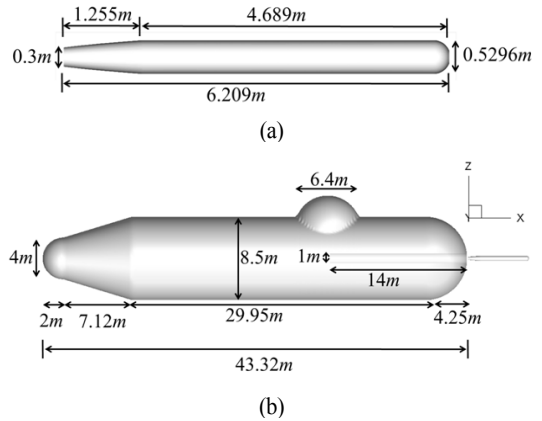


Fig. 4 AutoCAD modeling; (a) underwater vehicle, (b) submarine

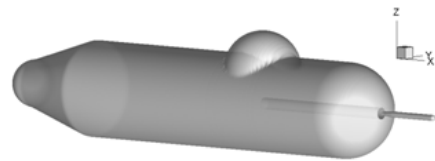


Fig. 5 Structure of marker particles plotted by Tecplot

도 이론값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3(b)). Fig. 3에서 drag가 미세한 섭동을 보이는 것은 가상경계법의 내재적인 문제이며[10] 수치적 해상도를 높이면 완화될 수 있다.

4. 결 과

4.1 수중운동체의 모델링

Fig. 4는 AutoCAD를 이용하여 모델링된 수중운동체와 모함의 모형이다. 모함의 앞쪽 면에 원기둥 형태로 발사관을 만들었다. 수중운동체는 x 축 대칭으로, 모함은 x-z 평면 대칭으로 모델링 하였다. AutoCAD 파일을 이용하여 모델 표면의 점(Marker particle)들을 자동적으로 추출할 수 있는 프로그램 [11]을 이용하여 표면 점들을 자동적으로 추출하였다. 추출된 점들의 3차원 위치 정보를 이용하여 3차원 형상을 구현할 수 있다[11]. Fig. 5는 Tecplot을 이용하여 추출된 점들을 형상화한 그림이다.

4.2 계산영역 및 경계조건

수중운동체는 발사관 안에서 x 축 방향으로 등가속도 운동을 하여 발사관을 완전히 탈출했을 때(수중운동체의 후미가 모함을 완전히 탈출했을 때) 10 m/s가 되도록 하였다. 발

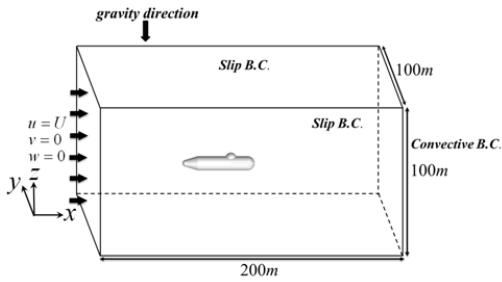


Fig. 6 Physical configuration and computational domain

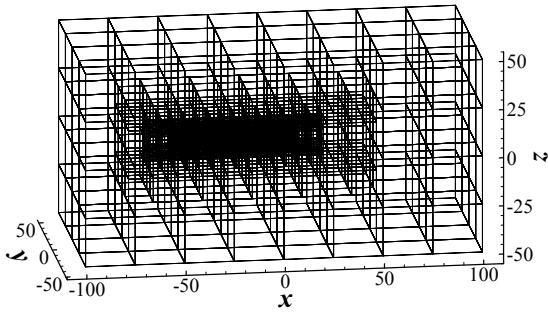
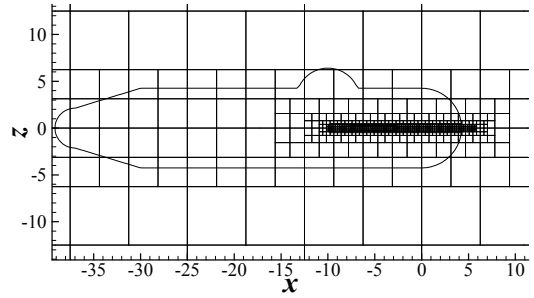
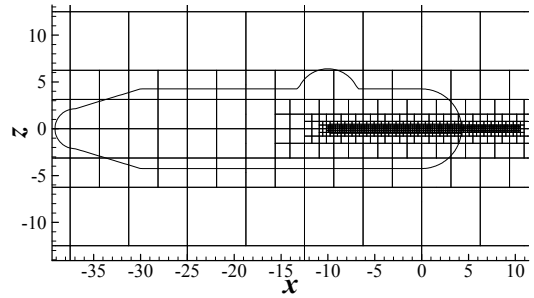


Fig. 7 Three-dimensional block distribution at initial time

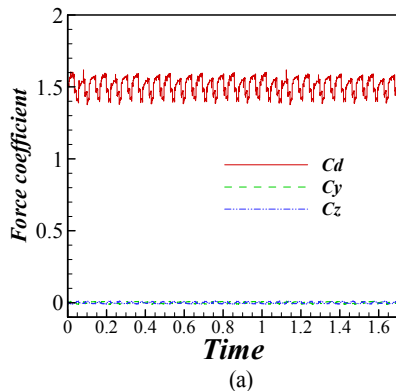


(a)

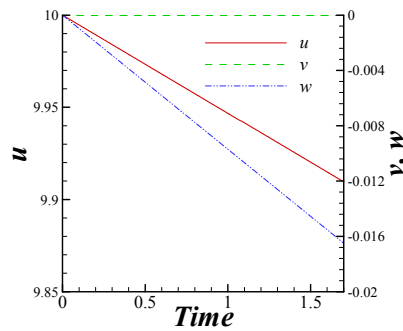


(b)

Fig. 8 Instantaneous block distribution in x - z plane; (a) initial time, (b) time when the underwater vehicle escaped from submarine ship



(a)



(b)

Fig. 9 Results of the FSI analysis; (a) time history of force coefficients, (b) time history of streamwise velocity of the underwater vehicle

사관을 완전히 탈출한 후부터 FSI 해석을 수행하였다. 본 연구에 사용된 수중운동체의 밀도(ρ_s)는 1100 kg/m^3 , 유체의 밀도(ρ_f)와 점성계수(μ)는 각각 1000 kg/m^3 , 0.001 kg/(ms) 이다. 입구에서는 Dirichlet($u=U$, $v=w=0$), 출구에서는 대류 경계조건을 사용하였고 나머지 네 면에서는 slip 조건을 사용하였다(Fig. 6). 수중운동체의 직경(D , 0.5296m)을 기준으로 길이로 사용하였다. 계산영역 입구에서의 속도를 기준으로 한 $Re=100$ 이며, 탈출속도를 기준으로 한 $Re \approx 5,300,000$ 이다. 중

력 방향을 $-z$ 방향으로 설정하였다.

Fig. 7은 초기 3차원 블럭 구조를 나타낸 그림이다. 각 블럭은 정육면체로 구성되어 있으며, $8 \times 8 \times 8$ 개의 격자로 구성된다. 가장 성긴 블럭의 단계는 1이며, 가장 조밀한 블럭의 단계는 8이다. 가장 조밀한 블럭에서의 격자 크기는 각 방향으로 0.0244 m 이다. 초기 블럭의 개수는 3124개이며 발사관과 수중운동체 주위에는 조밀한 블럭을 사용하였다. 총 격자 수는 약 160만개($3124 \times 8 \times 8 \times 8$)이다. 수중운동체가 발사관을

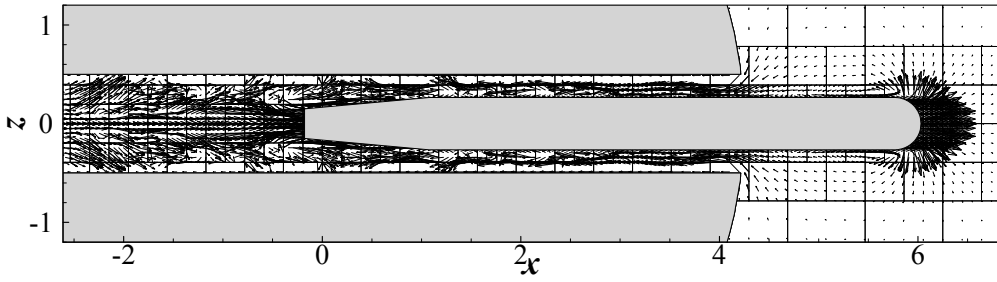


Fig. 10 Instantaneous velocity vectors in x - z plane when the underwater vehicle accelerates in the torpedo tube

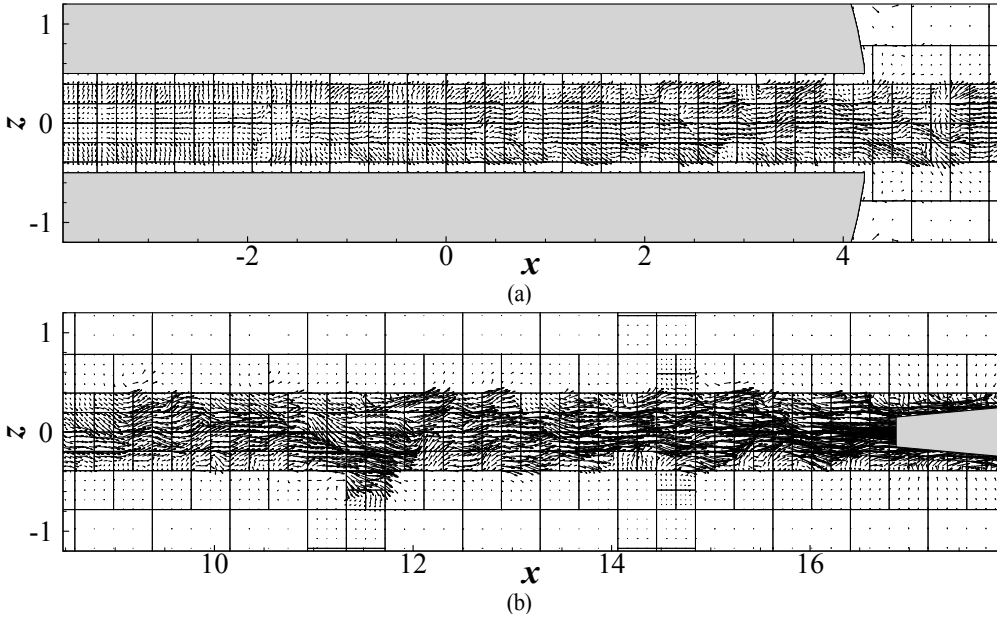


Fig. 11 Instantaneous velocity vectors in x - z plane at time=1.28sec;
(a) vectors in the torpedo tube, (b) vectors behind the underwater vehicle

통과하면서 블럭의 개수는 증가하게 되는데, 발사관을 완전히 탈출했을 때 블럭의 개수는 3768개가 된다. Fig. 8(a)는 초기 x - z 평면에서 블럭 구조를 나타내며, Fig. 8(b)는 수중운동체가 발사관을 완전히 탈출할 때 x - z 평면에서 블럭 구조를 나타낸 것이다. 수중운동체의 위치에 따라 블럭의 단계가 자동적으로 조절된 것을 확인할 수 있다.

4.3 FSI 해석 결과

Fig. 9(a)는 발사관에서 수중 운동체가 탈출한 직후부터 시간에 따른 수중운동체의 속도를 나타낸 그림이다. 초기 속도 10 m/s에서 탈출한 수중 운동체는 $-x$ 방향으로의 항력에 의해 속도가 줄어들게 되는데, 탈출 후 1.7초 동안 속도가 9.91 m/s로 거의 선형적으로 감소하였다. $-z$ 축 방향으로

중력을 받고 있기 때문에 $-z$ 축 방향으로 자유 낙하 운동을 하여 탈출 후 1.7초 뒤의 속도는 -0.0165 m/s가 된다. y 축 방향으로는 기하학적 대칭성으로 인해 속도가 거의 0 m/s로 유지된다. Fig. 9(b)는 시간에 따른 수중운동체가 받는 무차원된 유체력 계수를 나타낸 그림이다. 이때 유체력 계수는 다음과 같이 정의하였다.

$$C_d = -F_x / (0.5\rho_f U^2 A) \tag{14}$$

$$C_y = F_y / (0.5\rho_f U^2 A) \tag{15}$$

$$C_z = F_z / (0.5\rho_f U^2 A) \tag{16}$$

U 는 수중운동체의 탈출 속도인 10 m/s를 사용하였고, A

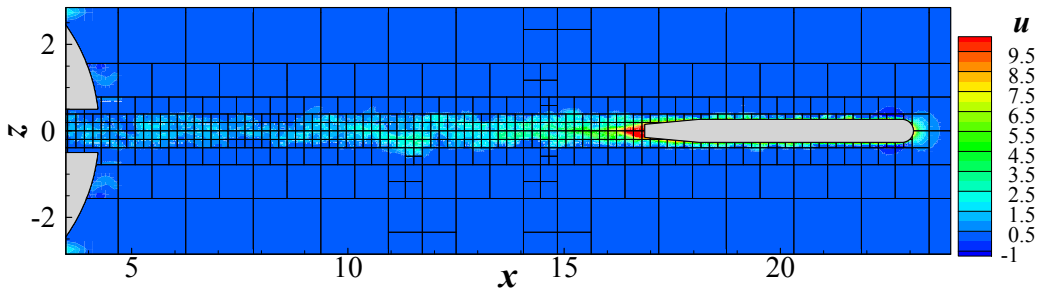
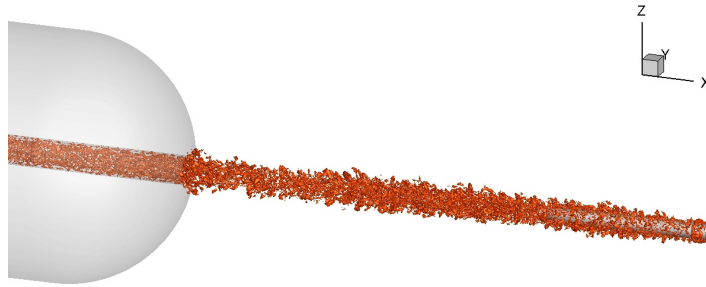
Fig. 12 Instantaneous u -velocity contours in x - z plane at time=1.28sec

Fig. 13 Instantaneous three-dimensional vortical structure

는 수중운동체의 단면적으로 $\pi D^2/4$ 이다. 항력계수는 약 1.5에서 시간에 따라 진동하는 것을 알 수 있다. 이로 인하여 수중운동체의 속도가 거의 선형적으로 줄어들게 된다. y 방향으로는 기하학적 대칭으로 인하여 거의 0에 가까운 힘을 받는 것을 알 수 있다. z 방향으로 중력과 부력의 합력에 의해 힘을 받지만, 1.7초 동안 속도의 변화가 작아 C_D 역시 0에 가까운 값을 가진다. 실제 계산에서는 축방향 회전도 고려하였으나, 회전 각도가 매우 작았다.

Fig. 10은 수중운동체가 탈출관내에서 등가속도 운동을 하여 속도가 8.12 m/s 가 되었을 때 x - z 평면($y=0$)에서의 순간적인 속도 벡터들을 나타낸 그림이다. 속도벡터들의 경향성을 가지적으로 확인하기 위해 각 방향으로 한 격자점씩 생략된 벡터만 도시하였다. 수중운동체의 등가속도 운동으로 인한 $+x$ 방향으로 빠져 나가는 유체와 탈출관 안으로 들어오는 유체($x=4.0$ 부근)가 섞여 복잡한 형태의 속도장이 형성된다. 전체적으로 $z=0$ 인 선을 기준으로 대칭성을 유지하였다.

수중운동체가 탈출관에서 탈출 후 약 1.28초가 지난 시간에서 x - z 평면 속도 벡터들을 Fig. 11에 나타내었다. 수중운동체가 탈출관내에서 등가속도 운동을 할 때에는 $z=0$ 인 선을 기준으로 속도 벡터들이 대칭적이었지만(Fig. 10) 시간이 지

나면서 비대칭 적으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 탈출관내 속도 벡터들의 크기는 줄어들게 되고(Fig. 11(a)) 수중운동체 후류에서는 복잡한 비대칭 형태의 유동장이 형성된다(Fig. 11(b)). 수중운동체의 강한 모멘텀으로 인하여 수중운동체의 후류(Fig. 12, $x=16.7$ 부근)의 x 방향 속도 벡터(u)들이 수중운동체의 이동 속도와 유사한 크기를 가지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 수중운동체가 발사관을 탈출하여 수중운동 길이의 2.5배만큼 진행했을 때 Q contour(second invariant of the velocity gradient tensor)[12]로 순간적인 3차원 와구조(vortical structure)를 나타낸 그림이다. 수중운동체와 발사관 내부에서 복잡한 형태의 와구조가 생성되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

복잡한 형상의 물체 주위의 유동장 해석이나 물체의 운동을 포함한 해석에 있어, 물체 주위에 조밀한 격자의 사용은 수치해석의 정확성을 좌우하는 중요한 요소이다. 그러나 조밀한 격자의 사용으로 인한 수치해석 비용의 급격한 증가는 움직이는 물체를 포함한 FSI 해석에 있어서 최대의 난제중

하나이다. 움직이는 물체 주위 유동 해석분야에서 기존에 주로 사용된 고정된 직교 좌표계, 비정렬 격자계, Body-fitted 좌표계 기반의 해석은 격자 문제로 인한 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 격자 문제를 해결하기 위해 AMR 격자구조를 사용하였다. AMR 격자구조를 사용함으로써 물리량의 변화가 심하지 않은 구역에서는 정교한 격자를 사용하고, 물리량이 급변하는 곳에서는 조밀한 격자를 사용함으로써 효율적이고 정확한 계산을 수행할 수 있었다. AMR 격자구조에서 출발하여 기존 FSI 해석에 사용되고 있는 기술 및 높은 수의 난류를 정확히 해석하기 위한 LES 해석 기술을 통합하여 코드를 완성하였다. 또한 AutoCAD로 모델링된 파일에서 표면점들을 추출하여 복잡한 형상을 쉽게 구현할 수 있는 기능을 추가하였다. 통합된 코드를 이용하여 자유낙하하는 구의 종단 속도와 종단 항력을 계산하였으며 이론적인 값과 비교하여 코드의 타당성을 확보하였다. 검증된 코드를 이용하여 모형을 포함한 수중운동체의 FSI 해석을 수행하여 빠른 속도로 모형을 탈출하는 수중운동체의 거동을 효율적으로 예측할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. 2012R1A2A2A01013019).

참고문헌

- [1] 1984, Berger, M.J. and Olinger, J., "Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations," *J. Comput. Phys.*, Vol.53, pp.484-512.
- [2] 2010, Vanella, M., Rabenold, P. and Balaras, E., "A direct-forcing embedded-boundary method with application with adaptive mesh refinement for fluid-structure interaction problems," *J. Comput. Phys.*, Vol.229, pp.6427-6449.
- [3] 2006, Yang, J. and Balaras, E., "An embedded-boundary formulation for large-eddy simulation of turbulent flows interaction with moving boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol.215, pp.12-40.
- [4] 1996, Meneveau, C., Lund, T. and Cabot, W., "A lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol.319, pp.353-385.
- [5] 1985, Kim, J. and Moin, P., "Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equation," *J. Comput. Phys.*, Vol.59, pp.308-323.
- [6] 2006, Losasso, F., Gibou, F. and Fedkiw, R.P., "Spatially adaptive techniques for level set methods and incompressible flow," *Comput. Fluids*, Vol.35, pp.994-1010.
- [7] 1994, Hall, K.C., "Eigenanalysis of unsteady flows about airfoils, cascades, and wings," *AIAA J.*, Vol.32, pp.2426-2432.
- [8] 2003, Robertson, I., Li, L., Sherwin, S.J. and Bearman, P.W., "A numerical study of rotational and transverse galloping rectangular bodies," *J. Fluids and Struct.*, Vol.17, pp.681-699.
- [9] 1998, Jadic, I., So, R.M.C. and Mignolet, M.P., "Analysis of fluid-structure interactions using a time marching technique," *J. Fluids and Struct.*, Vol.12, pp.631-654.
- [10] 2011, Lee, J., Kim, J., Choi, H. and Yang, K.S., "Sources of spurious force oscillations from an immersed boundary method for moving-body problems," *J. Comput. Phys.*, Vol.230, pp.2677-2695.
- [11] 2011, Choi, C.B., Jang, Y.J., Lee, K. and Yang, K.S., "Fire dynamic simulator with marker particles," *Korean society for computational fluids engineering*, Vol.16, pp.55-63.
- [12] 1995, Jeong, J. and Hussain, F., "On the identification of a vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol.285, pp.69-94.