

점성 유동장에서 운동하는 구조체의 유탄성 해석

노인식^{†*}, 신상묵^{**}

충남대학교^{**}, 부경대학교^{**}

Fluid-Structure Interaction Analysis for Structure in Viscous Flow

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

Chungnam National University^{*}, Pukyong National University^{**}

Abstract

To calculate the fluid-structure interaction(FSI) problem rationally, it should be the basic technology to analyse each domain of fluid and structure accurately. In this paper, a new FSI analysis algorithm was introduced using the 3D solid finite element for structural analysis and CFD code based on the HCIB method for viscous flow analysis. The fluid and structural domain were analysed successively and alternatively in time domain. The structural domain was analysed by the Newmark- β direct time integration scheme using the pressure field calculated by the CFD code. The results for example calculation were compared with other research and it was shown that those coincided each other. So we can conclude that the developed algorithm can be applied to the general FSI problems.

※Keywords: FSI(F Fluid-Structure Interaction), 3D FEM, CFD, HCIB method(Hybrid Cartesian/Immersed Boundary 법), Newmark- β method

1. 서언

수중 혹은 공기 중에서 운동하는 구조체 또는 슬로싱, 슬래밍과 같은 유체 충격에 의한 선체의 동적 거동을 정확히 평가하여 설계에 반영하기 위한 노력은 오래 전부터 지속되어 왔다. 이러한 구조와 유체의 상호작용에 관한 문제는 초기에는 구

조의 변형을 무시하고 유체 압력을 추정된 다음 구해진 압력을 구조물에 적용시켜 해를 구하는 방법이 일반적으로 사용되었으나 구조물의 변형이 유체 압력장에 주는 영향을 무시하고 있기 때문에 정확한 해석 결과를 기대하기는 어렵다. 따라서 최근에는 유체 하중과 구조물의 상호작용을 고려한 소위 유탄성 해석법이 많은 연구자들에 의해 연구되고 있고 실제 많은 문제에 대해서 합리적인 해석결과를 제공하고 있다.

그 동안 선박에 적용된 유탄성해석 기술의 대표

접수일: 2008년 1월 7일, 승인일: 2008년 3월 15일

† 교신저자, isnho@cnu.ac.kr, 042-821-6622

적인 예로는 선체의 접수진동해석법을 들 수 있다. 초기에는 선체 운동해석에서와 마찬가지로 2차원 단면의 부가질량 계수를 이론적으로 계산하고 3차원 효과를 고려한 수정 계수를 도입한 다음, 이를 선체 단면에 집중질량으로 분포하는 방법이 많이 사용되었다. 그러나 최근에는 접수부에서 유체력에 의한 압력분포를 경계 요소법(BEM)으로 이산화하여 부가질량 행렬로 유도하고 이를 유한요소법(FEM)과 결합하여 선체의 고유진동수와 강제진동을 계산하는 방법이 일반화되어 있다.

이 방법은 경계 적분 방정식을 구조물의 유한요소 해석 모델의 접수부 요소(경계요소)에 대하여 이산화 할 때, 주위 유체는 일반적으로 비점성, 비압축성, 비회전성의 이상 유체로 가정하여 포텐셜 이론을 적용한다. Laplace 방정식과 경계조건들을 만족하는 Green 함수를 도입하며 이 때, 일반적인 진동 문제는 상대적으로 고 주파수 영역의 문제이므로 주파수 의존적인 항들을 소거하여 간단한 형태로 단순화할 수 있다. 경계적분 방정식을 접수부의 평면 요소(경계 요소)에 대하여 이산화한 다음, 가상일의 원리를 적용하면 동 유체력의 효과는 부가질량 행렬과 부가감쇠 행렬로 유도된다. 이들을 구조 요소의 운동 방정식과 연성하여 풀면 접수 구조물의 동적 응답을 계산할 수 있다. 국내에서도 이미 여러 연구자들이 이와 관련된 연구를 수행한 바 있고, MSC/NASTRAN 등 범용 FEM code에 이미 이 내용들이 포함되어 있다. 그러나, 경계요소법을 유체 영역에 적용하는 이러한 접근 방법은 기본적으로 선형 이론을 기반으로 하기 때문에 구조체의 변형과 작용 압력 간 상관관계의 비선형성을 고려할 수 없다는 단점이 있다.

한편 MSC/DYTRAN, LS/DYNA-3D 등의 hydrocode들은 유체영역과 구조영역을 각기 달리 유한요소법으로 정식화하는 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 방법을 이용하여 수중폭발이나 sloshing 등의 유체 충격력을 받는 구조물의 유탄성 해석에 적용하고 있다. 이러한 알고리즘들 역시 아직까지는 대부분 포텐셜 이론에 바탕을 두고 있어 점성유동과 구조물의 상호작용 문제를 실용적으로 다룰 수 있는 수준에는 미치지 못하고 있는 것이 현실이다.

그러나 최근에는 CFD 해석 프로그램으로 세계적으로 잘 알려진 FLUENT가 새로이 3차원 구조 해석 모듈의 장착을 시도함으로써 본격적으로 점성유동을 고려한 FSI(Fluid Structure Interaction) 문제에 도전하고 있으며 상용 유한요소 구조해석 프로그램인 ADINA 및 ANSYS는 이미 ALE 기법과 함께 유체 영역을 유한요소법이나 유한체적법을 적용함으로써 점성유동을 고려한 진일보된 FSI 해석기능이 포함된 버전을 발표하고 있다. 그러나 유체 영역에서도 고체와의 경계 이동에 따라 격자를 변형시키기 때문에 풀고자 하는 문제의 경계형상 특성에 따른 어려움이 발생할 가능성과 함께 Reynolds 수에 따른 수치기법의 안정성에 대한 제약이 있는 것으로 알려져 있어 아직 안정성 혹은 정확성에 대한 검증이 완전히 완료된 것은 아닌 것으로 판단된다.

이와 같은 현 단계의 유탄성 해석기술들을 종합적으로 검토해 볼 때, 아직은 주로 선박의 접수진동이나 유체충격해석에 부분적으로 이용되고 있을 뿐이며 고속으로, 회전하는 물체 또는 점성의 영향을 무시할 수 없는 문제에는 성공적으로 적용될 수 있다고 보기에는 어려움이 많은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유체의 점성효과까지 고려할 수 있는 가장 정확한 유탄성 해석을 위하여 HCIB법에 기반한 CFD법과 3차원 유한요소 구조해석법을 결합한 새로운 알고리즘을 제시하고 계산 결과를 검증하였다.

구조체가 유체 중에서 운동할 때 작용하는 압력은 구조체의 변형에 따라 시시각각 유체 경계면이 변화하는 비선형적 특성을 지니고 있다. 이와 같은 유체의 점성 거동과 구조체의 비선형 동적 구조 거동을 해석하기 위한 운동방정식의 해법은 유체와 구조체 양 영역을 반복적으로 풀어 수렴된 해를 구하는 새로운 해석 알고리즘을 제안하였다. 즉, 한번 구조체의 변형량이 계산되면 이를 고려하여 구조체의 기하학적 형상을 수정하고, 다시 CFD법에 의해 압력분포를 보정한 다음 구조체의 운동방정식을 반복적으로 푸는 과정이 적용된다.

2. HCIB 법을 이용한 변형물체 주위의 점성유동 해석

유동 해석 관점에서 본 연구의 가장 중요한 특징은 구조체의 탄성 변형으로 인하여 유동의 경계면 형상이 시간에 따라 변화한다는 점이다. 물체들 간의 상대운동만으로 유동 영역이 변화하는 경우 각각의 물체에 고정된 격자계를 사용하는 중첩 격자법이 사용될 수 있다. 그러나 물체의 형상 자체가 변화하는 유탄성 문제에서는 그러한 상대운동을 하는 중첩 격자계를 적용하기 어렵다. 유동 영역 경계가 시간에 따라 변화하는 경우에 대한 점성 유동 해석 기법들은 최근 들어 활발히 연구가 진행되고 있으며, 이러한 기법들은 유동의 경계와 항상 일치하는 경계를 가진 격자계를 사용하는지 여부에 따라 boundary conforming 기법과 non-boundary conforming 기법으로 분류된다.

Boundary conforming 기법의 경우 항상 격자계가 물체의 경계에 맞추어지도록 변화한다. 이러한 boundary conforming 방법들은 경계면에 수직인 방향으로의 격자 조밀도 제어가 용이하기 때문에 높은 Reynolds 수의 경계층 내에서 속도 및 난류와 관련된 종속 변수들의 급격한 변화를 해석하는데 유리하다.

그러나 물체의 형상 변화가 구조 해석 결과로 주어지는 경우 유체-구조 연성 해석의 수치오차가 포함된 형상이 주어지기 때문에 재생성된 격자계가 유동해석에 부적합해질 가능성이 높다. 이러한 어려움은 높은 Reynolds 수 유동 해석을 위해 큰 종횡비의 요소를 사용하는 경우 더욱 심각해진다. 그리고 변형의 크기가 큰 경우 격자의 재생성 기법 및 재생성된 격자계의 질의 보장 모두 어려움이 따른다.

따라서 최근 들어 non-boundary conforming 방법들이 갖는 물체 경계면 처리의 유연성을 이용하여 복잡한 형상 변화를 갖는 물체 주위의 유동을 해석하려는 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 non-boundary conforming 기법에서는 물체의 형상과 일치하지 않는 고정된 배후격자(background grid)에서 유동해석을 수행한다(Shin et al. 2006).

일반적인 boundary conforming 방법에서는 구조물과 유체 경계면의 형상이 변화함에 따라 매 시간 단계마다 유체영역을 다시 grid 분할해야 하

므로 이에 따라 막대한 처리 시간이 요구된다는 문제점이 있으나, 이 방법은 공간상에 고정된 grid를 사용하며, 다만 각 시간 단계마다 경계면의 위치 data만을 재구성하면 된다는 이점이 있다.

Non-boundary conforming 기법의 대표적인 예들로서는 Cartesian method(Cut-cell method)와 가상경계법(immersed boundary method, IBM)를 생각할 수 있다(Kirkpatrick et al. 2003, Udaykumar et al. 2001, Kim and Choi 2006).

최근에 Gilmanov and Sotiropoulos(2005, 2003)는 복잡하게 변형되는 3차원 물체 주위의 점성유동을 해석하기 위하여 새로운 방법인 hybrid Cartesian/immersed boundary method (HCIB)를 제안하였다. 이 방법의 핵심은 물체 경계면에 인접한 절점들로 단혀진 유동영역의 경계를 정의하고 그러한 절점에서의 속도를 물체 경계면에 연직인 방향으로 보간하여 결정한다는 점이다.

Shin et al.(2007)은 HCIB 법을 이용하여 유체속에서 거동하는 유연한 외팔보의 2차원 거동을 성공적으로 모사한 바 있다. 이 논문에서는 편미분 방정식으로 표현된 외팔보의 운동 방정식을 유동방정식에 포함시켜 유체와 구조 전 영역을 유한차분법으로 동시에 해석하였다. 본 논문에서도 Shin et al.(2007)이 사용했던 HCIB 법을 적용하였다.

3. 유체-구조 상호작용 해석 프로그램 개발

3.1 3차원 입체요소를 이용한 유한요소 구조 해석

본 연구에서는 요소 경계면의 형상 및 변위함수를 2차함수로 가정한 20절점 Isoparametric 육면체요소를 유한요소법으로 정식화하여 사용하였다. 이 요소는 3차원적인 곡면으로 표현되는 구조물의 복잡한 기하학적 형상을 정확하게 구현할 수 있기 때문에 정도 높은 구조해석이 가능하다(Nho et al. 2004).

3.2 유탄성 해석 알고리즘

유체 중에서 운동하는 구조체에 작용하는 동적

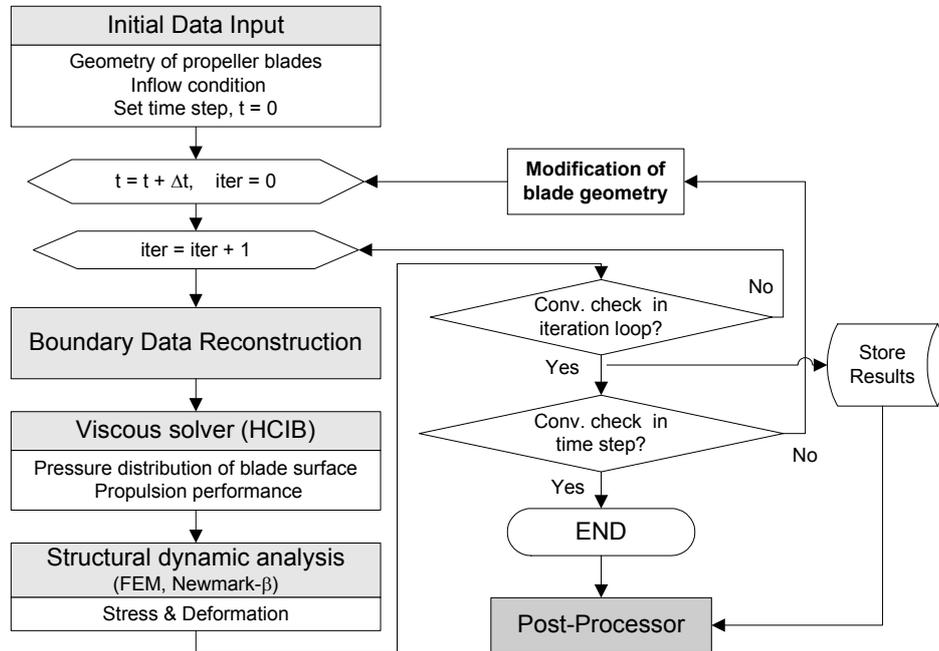


Fig.1 Flow diagram of Fluid-Structure interaction analysis

유체력을 점성 효과를 고려하여 좀 더 정확히 계산하기 위하여 CFD법을 적용하는 경우에는 시간 영역에서 비선형 해석을 수행해야 하므로 구조해석 역시 시간영역 직접 적분법을 적용할 수밖에 없다. 이 경우에는 유체력 계산 과정이 고도의 비선형성을 갖게 되고 자연히 반복 해석 과정이 실행되므로 구조응답 해석은 전체 해석과정의 일부로서 유체력 계산 모듈과 상호 필요한 data를 주고 받게 구성할 수 있다. 구조물의 동적응답을 해석하기 위한 시간영역 직접적분법은 여러 가지 알고리즘이 소개되어 있고 각각의 장단점도 잘 알려져 있다. 본 연구에서는 unconditionally stable한 해를 주는 Newmark-β 방법을 적용한다.

본 연구에서 구상하고 있는 해석 알고리즘은 기본적으로 유체 영역과 구조 영역의 거동을 교대로 풀어 해가 수렴할 때까지 반복적으로 계산하는 방법이다. 이 때 유체 영역은 구조체 주위의 비선형 점성 유동을 CFD로 계산함으로써 구조체 표면에 작용하는 압력 분포를 구조 해석 모듈로 넘겨주고, 구조 해석 모듈에서는 이 해석 결과를 작용 하중으로 하여 구조체의 변형과 응력을 계산한다.

구조체의 변형은 유체 경계면의 형상 변화를 유발하므로 유체 영역을 교란하게 되며 이에 따라 압력장 역시 변화될 수 있을 것으로 쉽게 예상된다. 따라서 구해진 변형 형상을 유체 해석 모듈로 넘겨 변화된 경계조건 하에서 유동장을 재계산한다. 이러한 상호 데이터 교환 및 반복 계산은 각 time step 별로 해가 수렴될 때까지 계속한다. 이와 같은 기본 개념을 Fig. 1에 도식화 하였다.

CFD에 의한 점성유동해석 기법 자체가 고도의 비선형성을 갖고 있고 방대한 grid 분할이 요구되므로 위와 같은 정상적인 방법으로 접근한다면 계산 시간 또한 현재의 전산 능력으로는 감당하기 어려운 수준일 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 우선 다음과 같은 몇 단계의 절차를 거쳐 위와 같은 유체-구조 상호 작용 해석을 위한 기본적인 알고리즘을 구현하고 그 타당성을 확인하고자 한다.

(가) 20절점 6면체 요소를 이용하여 3차원 구조해석이 가능한 유한요소 구조해석 code를 적용한다.

(나) 구조 영역의 해석에 적용하기 위하여 Newmark- β 법에 의한 시간영역 직접적분법 알고리즘을 기반으로 구조체의 동적해석을 수행한다.

(다) 3차원 유체-구조 상호작용해석 프로그램 구성 자체는 큰 어려움이 없으나, 현 단계에서는 엄청난 계산시간으로 인하여 실제 의미 있는 해석이 현실적으로 불가능한 상태이므로 하중을 계산하기 위한 CFD 모듈은 2차원 해석용 HCIB법 기반 코드를 사용한다. 즉, 계산 능력상의 현실적인 문제점을 고려하여 2차원 해석을 수행하되, 구조 영역은 3차원 해석법을, 유체 영역은 2차원 해석법을 적용한다.

(라) 예제계산을 통하여 전체적인 해석 알고리즘의 타당성을 검증한다.

4. 유체-구조 연성 해석 계산 예

해석 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 Shin et al (2007)이 2차원 HCIB 코드와 단순 보 이론을 결합하여 해석한 바 있는 Fig. 2와 같은 2차원 유동과 탄성 외팔보의 연성 거동해석 결과와 비교 검토하였다.

가로 30L 세로 10L의 2차원 채널 바닥 10L 위치에 길이 L, 두께 c의 외팔보가 서 있고 전방으로부터 균일한 유속 U의 유동이 입사하고 있다.

Table 1 Condition of analysis

	Structure	Fluid
Element Group	3-D 20 Node Solid	2-D Fluid
Grid	25 × 1	382 × 204
	50 × 1	596 × 287
	100 × 1	962 × 422
Material Properties	E=200GPa, $\rho=7,000\text{kg/m}^3$, thick c.=1.5mm	$\mu=1.785 \times 10^{-5}$ Pas $\rho=1\text{kg/m}^3$, Re=500
Analysis Type	Structural Dynamics - Implicit FSI - Newmark- β	CFD - Transient FSI - HCIB

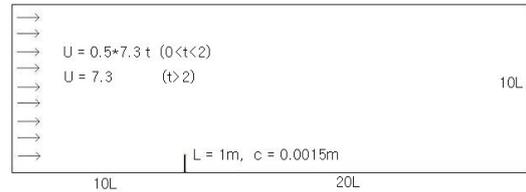


Fig. 2 2-D cantilever in uniform viscous flow

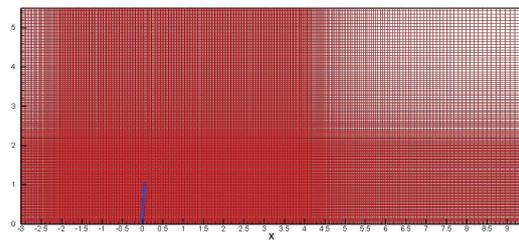


Fig. 3 Shape of grid around cantilever beam

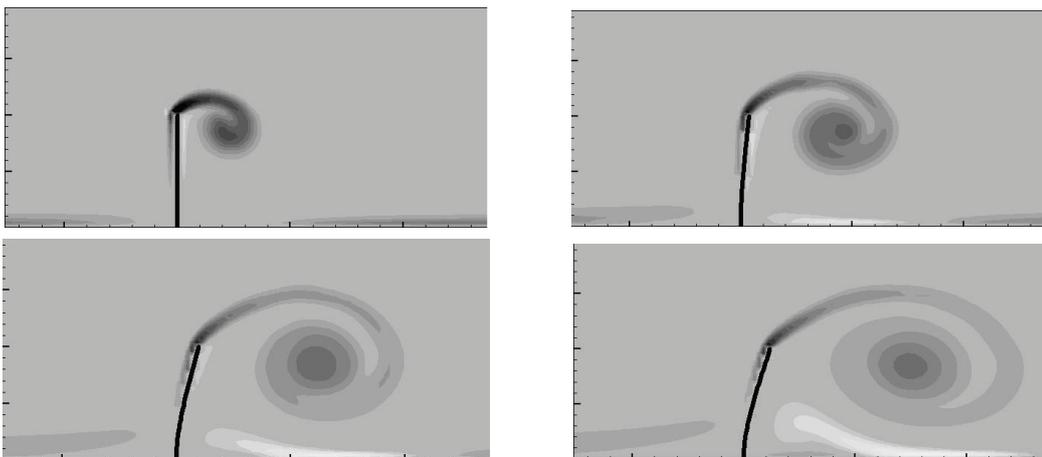


Fig. 4 Motion of beam in 2-D viscous flow (t = 2.0, 3.2, 4.4, 5.6)

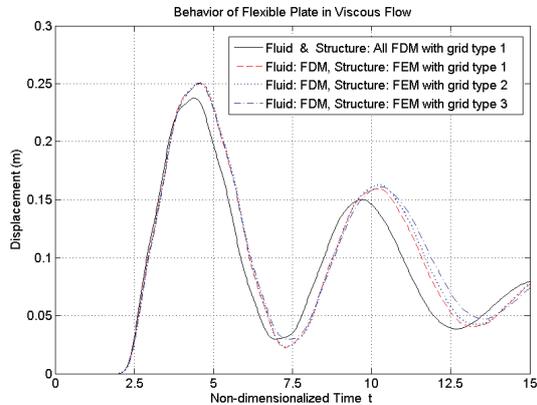


Fig. 5 Time history of tip displacements of cantilever beam

실제 시간 T 를 유속 U 와 길이 L 로 무차원한 시간 $t(=UT/L)$ 가 0에서 2 동안은 유동을 안정화시키기 위하여 유속을 0에서 7.3m/sec까지 선형적으로 증가시켰으며 이때까지는 보의 변형을 고정하였다가, $t=2$ 가 되는 순간 보의 구속을 풀어 그때부터 $t=6$ 이 될 때까지 보의 거동을 유체 유동과 연성하여 계산하였다. 보 및 유동의 특성은 공기 중에서 거동하는 강철판을 가정하였으며 구체적 수치를 Table 1에 정리하였다.

962 x 422 grid 인 경우 $\Delta t=0.02$ 로 총 3,000 time step 동안 계산하였다 Fig. 3에 보 근처의 962 x 422 grid 형상을 보였다. Fig. 4에는 각 time step 별 보의 변형 형상과 vorticity 의 형상을 보였으며 Fig. 5에는 보의 끝단에서 처짐의 시간이력을 grid 별로 Shin et al.(2007)의 해석 결과와 비교하여 나타내었다.

해석 결과를 Shin et al.(2007)의 전 영역 유한 차분법(FDM) 결과와 비교해보면 본 해석의 최대 처짐이 약 5%정도 크고 진동주기도 약간 길게 나타나는 현상을 확인할 수 있다. Grid 크기에 따른 해의 오차는 그다지 심각하게 나타나지는 않고 있으며 이로 미루어 보아 이 정도의 grid 분할이면 해의 수렴성에는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. 일반적으로 고전 보 이론을 적용하게 되면 전 단변형의 영향이 무시되므로 보의 강성이 실제보다 크게 추정되기 때문에 정밀 3D 해석법을 적용

하는 본 해석 결과가 변형이 조금 더 크게 나오는 현상은 자연스럽게 고유진동수가 $(\text{질량}/\text{강성})^{1/2}$ 에 비례하는 사실을 감안한다면, 본 해석의 진동 주기가 조금 더 길게 나오는 현상 역시 쉽게 이해될 수 있다.

5. 결 언

본 연구에서 제안한 유체-구조 영역의 반복적인 교차해석 알고리즘을 적용한 결과, 전 영역 FDM 해석결과와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었고 이로써 본 방법의 타당성을 보였다. 이는 본 연구에서 제안된 유탄성 해석 알고리즘이 임의의 기하학적 형상을 갖는 구조체에 적용가능하다는 사실을 입증하고 있다.

그러나 앞서 밝힌 바와 같이 메모리 크기, 계산 시간 등 computing power 문제 때문에 완전한 3차원 문제에서는 현재까지는 의미 있는 해석 결과를 얻을 수 없다는 현실적인 제약이 있다. 구조영역은 3차원 20절점 입체요소를 사용하였으나 작용압력 계산을 위한 유동해석은 2차원 HCIB 코드를 연결하였고, 아직까지는 비교적 coarse mesh를 사용하여 낮은 Reynolds수 영역에서만 한정적으로 적용할 수 있는 단계이다. 차후 유체영역까지 3차원 해석법을 확대 적용하고 이와 병행하여 해석 시간의 단축을 위한 후속 연구가 계속 이루어져야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 해양대학교 수중운동체특화센터의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 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 Genral Reconstruction Algorithm for Simulating Flows with Complex 3D Immersed Boundaries on Cartesian Grids," Journal of Computational Physics, Vol. 191, pp. 660–669.
- Kim D. and Choi H., 2006, "Immersed Boundary Method for Flow around an Arbitrarily Moving Body," Journal of Computational Physics, Vol. 212, pp. 662–680.
 - 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.
 - Nho, I.S., Lee, J.Y., Lee, H.Y. and Lee, C.S. 2004, "A Dynamic Structural Analysis System for Propeller Blades," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 114–120.
 - Shin, S.M. 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.
 - 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, No. 3, pp. 263–282.
 - Udaykumar H.S., Mittal R. and Khanna A., 2001, "A Sharp Interface Cartesian Grid Method for Simulating Flows with Complex Moving Boundaries," Journal of Computational Physics, Vol. 174, pp. 345–380.



< 노 인 식 >



< 신 상 목 >