

바람과 구조물의 상호작용 해석

An Analysis of Coupled Wind-Structure Interaction

이 재 석* 김 중 대**

1. 서 론

현대 산업사회의 발전에 따라 초고층 건물, 장경간 교량 등 장대구조물의 수요가 증가하고 있다. 이러한 구조물들은 설계와 시공기술의 발달로 구조적 안정성을 유지하면서도 점차 경량화하는 경향을 보이며 이에 따라 구조물의 유연성이 높아지고 있다. 즉, 장대구조물은 일반구조물보다 자중에 의한 고유감쇄능력이 저조하여 바람과 같은 동적인 하중에 민감한 반응을 보이게 된다. 이러한 현상은 심한 경우 구조물의 파괴를 초래하기도 하지만 평상시에도 진동을 야기하여 사용성이 저하되기도 한다[1, 2]. 따라서 최근에는 장대구조물 설계에서 풍하중에 대한 동적 영향을 반드시 고려해야 하는 것으로 인식되고 있다.

구조물에 내풍설계라는 개념이 도입된 계기는 1879년 스코트랜드의 Tay교의 사고이다. 당시에는 세계최장의 철도교였던 Tay교의 설계에 있어서 풍하중이란 개념은 도입되지 않았으며, 폭풍으로 인하여 교량 중앙부분의 약 1km 구간이 열차와 함께 붕괴되는 사고가 발생하였다. 이 사고로 인하여 풍하중의 중요성이 부각되었고, 그 이후에 건설된 Forth철도교, 에펠탑 등의 설계에

는 풍하중의 개념이 도입되었다. 이러한 초기의 내풍설계에서 도입한 풍하중이란 시간평균적인 바람의 힘, 즉 정적하중의 개념이었다. 그러나 정적하중으로 환산하여 상당히 큰 풍하중에 대해 안전하게 설계된 미국의 Old Tacoma교의 경우 설계풍속보다 훨씬 작은 속도의 바람에 의해서도 심한 비틀림 진동이 발생하여 붕괴되었다. 이 사고를 계기로 공기역학적 진동문제를 고려한 구조물의 동적 내풍안정성 평가가 본격적으로 수행되었으며 이후 장대구조물 설계시에는 풍하중의 정적인 효과와 더불어 동적인 효과를 고려한 내풍안정성 평가가 필수적인 것으로 여겨지고 있다.

2. 바람에 의한 구조물의 동적 거동 해석방법

바람에 의한 장대구조물의 동적안정성을 검토하기 위해서는 설계풍하중에 대한 구조물의 동적 거동을 파악해야 하는데 그를 수행하는 방법은 실험적 방법과 수치해석적 방법이 있다. 실험적 방법은 구조물의 모형을 제작하여 풍동에서 실험하는 것이고, 수치해석적 방법은 전산유체역학 및 전산구조해석 기법을 접목하여 바람과 구조물의 상호작용을 컴퓨터를 사용하여 수치적으로 계산하는 것이다.

2.1 풍동실험에 의한 방법

풍동실험에 의한 방법은 모형 구조물을 제작하

* 한국과학기술연구원 시스템공학연구소 선임연구원, 공학박사

** 한국과학기술연구원 시스템공학연구소 연구원

여 풍동에서 실험을 하는 방법으로서, 장대 구조물의 내풍설계에 널리 사용되고 있다.

풍동실험에 의한 방법은 구조물의 특성만 안다면 풍하중과 그로 인한 구조물의 거동에 관한 신빙성 있는 정보를 얻을 수 있다. 풍동실험에서는 장대구조물의 질량과 강도를 어느 정도 정확히 산출해 낼 수 있으며, 이 산출결과는 실측치와 유사한 값이 된다. 그러나 완공된 구조물, 특히 초고층 건물과 같은 경우 확실한 진동감쇄(댐핑)를 알 수 없으므로 구조물의 내풍설계는 상당히 힘들게 된다. 또한 내풍안정성이 우수한 설계형상을 얻기 위하여 여러 모형에 대하여 실험을 하려면 모형제작비가 많이 소요되고, 제작된 모형의 정밀도문제, 실험오차, 시공지역 및 자연풍 모사의 난이성 등의 단점이 존재하므로 이를 보완하면서 궁극적으로는 실험을 최소화할 수 있는 해석적 방법의 개발이 필요하다.

2.2 수치해석에 의한 방법

풍하중에 의한 구조물의 동적응답을 수치적으로 해석하는 연구는 항공공학 분야에서 활발히 진행되고 있으며 항공기 구조물의 풍하중에 대한 거동특성을 해석하는 상업용 S/W(MSC/NASTRAN)도 개발되어 있다. 그러나, 토목구조물의 단면은 비유선형인, 뭉뚱한 형상이 대부분이다. 특히 교량의 경우를 예를들면 보호대, 레일 등의 작은 구조물들이 단면의 기하학적 형상을 더욱 복잡하게 만들기 때문에 수치해석에 의한 내풍설계는 매우 접근하기 힘든 분야로 인식되었다. 즉, 유한차분법 또는 수치해석기법을 사용하여 구조물 주위에 발생하는 흐름의 박리와 와류발생 등을 정확히 추적하기 위해서는 많은 수의 절점이 필요하고 슈퍼컴퓨터와 같은 고성능의 전산기가 출현하기 전에는 해석이 거의 불가능한 분야였다. 그러나, 현재에는 컴퓨터 성능의 급격한 진보뿐만 아니라 유체-구조물 상호작용 수치해석 기법의 발전으로 구조물의 와류관련 진동등을 컴퓨터에서 모사할 수 있게 되었으며, 풍하중에 의한 발산진동인 flutter현상 등을 해석하기 위한 연구가 국제적으로 활발히 진행되고 있다.

3. 상용 S/W를 이용한 해석방법

비행기의 날개처럼 유선형 단면을 가진 구조물에 작용하는 비정상 공력하중(unsteady aerodynamic force)은 포텐셜 이론에 의해 구할 수 있다. MSC/NASTRAN은 범용구조해석 S/W로서 포텐셜 이론에 근거한 공탄성 해석 모듈을 갖고 있으므로 비행기의 flutter해석을 위한 유용한 도구로 사용할 수 있다[4]. 그러나 공기흐름의 박리와 와류발생 등으로 포텐셜 이론을 적용하기 힘든 뭉뚱한 단면에 대해서는 비정상 공력하중을 정확히 구할 수 없으므로, 직접적인 해석이 불가능하다. 따라서 Scanlan 등이 제안한 과정을 인용하여 실험과 상용 S/W가 접목된 해석기법을 개발하여 장대구조물의 풍하중에 대한 동적거동을 해석한다.

Scanlan 등은 풍동실험을 통해 결정된 공력 계수(aerodynamic coefficient)를 사용하여 비유선형 단면에 작용하는 비정상 공력하중을 수식화하였다[5]. 공력계수는 공기흐름의 박리와 와류발생 효과를 포함하고 있으며, 이 계수를 이용하면 단면의 형상이 뭉뚱한 구조물의 풍하중에 대한 동적거동을 적절히 계산할 수 있게 된다. 이러한 공력계수들을 사용하여 Nakamura 등은 비정상 공력하중을 계산하는 알고리즘을 개발하고 이를 MSC/NASTRAN에 접목하여 바람에 대한 구조물의 내풍안정성해석을 실시한다[6].

4. ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 유한요소법에 의한 수치해석방법

4.1 ALE 유한요소법 개요

물체의 운동을 기술하는 방법은 크게 Lagrangian 운동학적 모형과 Eulerian 운동학적 모형으로 분류할 수 있다.

Lagrangian 운동학적 모형은 물질입자들의 변위가 작은 경우에 적합한 해석기법으로서 주로 고체역학문제를 해석하는데 사용된다. Lagrangian 운동학적 모형에 의한 유한요소법을 유체의 유동해석에 응용하면 요소망의 찌그러짐이 과도하여 정확한 해석결과를 얻을 수 없게 된다. 그러므로

유체의 유동문제를 해석하는데에는 Eulerian 운동학적 모형이 주로 사용되는데, 이것이 고체역학 문제 해석에 사용될 경우 경계조건처리의 난해함 등의 문제로 인하여 어려움이 발생한다. 그러므로 바람과 구조물의 상호작용을 해석하기 위해서는 유체와 고체문제에 동시에 적용되는 새로운 해석 기법이 필요하다. 즉 Lagrangian 운동학적 모형과 Eulerian 운동학적 모형의 장점을 취합한 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 운동학적 모형을 도입한다. ALE개념을 유한요소법에 적용하면 요소망은 물질입자의 운동과 독립적으로 움직이게 되며 임의의 형태로 변형할 수 있게 된다. 그러므로 ALE는 요소망의 거동을 정의하는 방법에 따라 고체역학, 유체역학, 그리고 유체-구조물의 상호작용 등 여러분야에 응용될 수 있다.

초기의 ALE는 비정상 다차원 유체역학 문제를 해결하는 도구로 개발되었으며, 다양한 속도를 갖는 유체문제해석에 적용되었다[7]. Hughes 등은 유한요소해석에 처음으로 ALE개념을 사용하였으며, 자유표면(free surface)을 갖는 유체문제를 해석하였다[8]. 그리고 Belytschko와 Donea 등은 ALE기법을 사용하여 유체-구조물 상호작용 문제를 해석하였다[9,10]. Huerta 등은 비압축, 점성 유체의 자유표면의 유동이 큰 경우 ALE에 의한 해석방법을 제시하고 있다[11].

4.2 ALE 유한요소법의 소개

ALE개념에 의한 운동학적 이론은 Hughes 등에 의해 개발되었다[8]. 그는 3개의 영역(domain)과 영역간 매핑(mapping)을 정의함으로써

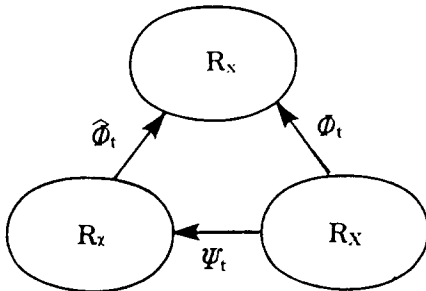


그림 4.1 3개 영역과 영역간 매핑

ALE운동학적 모형을 유도하였다. 이러한 3개 영역은 다음과 같이 공간영역(Spatial domain), 물질영역(Material domain), 기준영역(Referential domain)으로 분류되며, 상호간의 매핑관계는 그림 4.1과 같다.

1) 공간영역(Spatial domain) : (R_x)

주로 유체역학 문제를 다룰 때 사용하는 영역으로서, 유체속에서 구조물이 움직이거나 유체의 경계가 이동하기 때문에 일반적으로 공간영역은 시간에 따라 그 형상이 변한다.

2) 물질영역(Material domain) : (R_x)

시간 $t=0$ 에서 물질입자들이 차지하는 공간영역으로서 시간이 지남에 따라 물질입자들의 배열이 변하게 되므로 물질영역도 그 형상이 변한다.

3) 기준영역(Referential domain) : (R_x)

해석과정에서 필요로 하는 계산이 이루어지는 영역으로서, 임의의 속도로 움직일 수 있다.

이러한 3개 영역들은 시간에 따라 변하는 매핑 $\hat{\Phi}_t, \hat{\Phi}_t, \Psi_t$ 들으로써 상호간의 관계를 연계시킬 수 있으며, 기준영역의 변화에 따라 다음과 같은 운동학적 모형을 결정할 수 있다.

1) $R_x=R_x(\hat{\Phi}_t=1)$ 은 계산이 되는 요소망(computational mesh)이 차지하는 영역이 공간영역이라는 것을 의미하므로 이는 Eulerian운동학적 모형과 동일하다.

2) $R_x=R_x(\Phi_t=\hat{\Phi}_t)$ 는 계산이 되는 요소망과 물질입자들이 차지하는 영역이 동일하며 각각의 요소망의 경계에서 물질입자들의 대류(convection)가 일어나지 않는 것을 의미하므로 Lagrangian운동학적 모형과 동일하다.

3) R_x 가 물질입자의 운동에 상관없이 공간영역에서 임의로 운동하게 되면 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 운동학적 모형을 의미한다.

그리고 ALE운동학적 모형으로부터 물리량 f 에 대해 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\dot{f} = f' + c_i f_{,i}$$

$$\dot{f} = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{x \text{ fixed}} : \text{material time derivative}$$

$f' = \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{x \text{ fixed}}$: referential time derivative

$f_{ij} = \frac{\partial f}{\partial x_j}$

$c_i = u_i - \hat{u}_i$: 대류속도

u_i : 유체의 속도

\hat{u}_i : 요소망의 속도

4.3 ALE에 의한 유체-구조물의 운동방정식

4.3.1 개념적인 해석모형

바람-구조물의 상호작용해석을 위하여 그림 4.2와 같은 개념적인 해석모형을 고려한다. 이 모형에 의하면 유체의 유동장($R_F(t)$) 내부에 강체($R_G(t)$)가 위치하고 있으며, 유체의 유동에 따라 강체는 임의의 방향으로 진동한다. 그리고 강체의 진동은 유체의 유동에 영향을 주게 되어 유체의 유동특성이 변하게 된다.

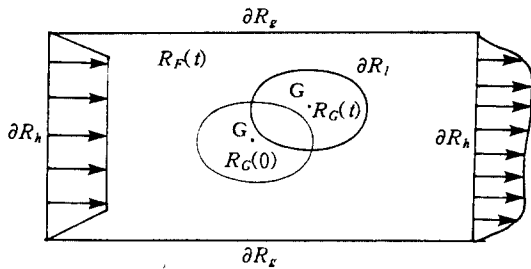


그림 4.2 개념적인 해석모형

그림 4.2의 해석모형을 유한요소법에 따라 해석하기 위해 유체의 운동이 정의되는 영역($R_F(t)$)을 요소망(mesh)으로 분할한다. ALE 운동학적 모형에 따르면, 이 요소망의 움직임은 강체의 운동에 종속적으로 정의할 수 있으므로 강체의 운동상태를 계산한다면 요소망의 변형된 상태는 쉽게 구할 수 있게 된다.

그림 4.2의 유체-구조물의 상호작용에 대한 해석은 유체의 흐름에 대한 구조물의 거동특성을 규명하여 구조물을 이루고 있는 물질입자들의 운동에 관한 정보들을 얻는 작업이다. 그러므로 유체

-구조물의 상호연계된 운동을 해석하기 위하여 ALE 운동학적 모형을 사용한다면, 각각의 물질입자의 운동상태에 관한 정보를 직접적으로 제공해주는 Lagrangian 운동학적 모형만을 사용할 때 발생하는 단점을 보완할 수 있게 된다. 그러나 ALE운동학적모형에서는 물질입자의 운동상태(속도, 가속도 등)를 기준영역과 공간영역에서 계산하므로 그림 4.2의 해석영역을 기준영역과 공간영역으로 분리하여 정의한다.

ALE운동학적 모형에 따르면, 이 요소망의 움직임은 강체의 운동에 종속적으로 움직일 수 있으며, 이러한 이동 요소망(moving mesh)을 공간영역으로 정의한다. 그리고 기준영역은 이동 요소망의 기준상태, 즉 공간영역을 처음으로 분할한, 이동 요소망의 초기상태로 정의한다.

4.3.2 비압축, 점성 유체의 운동방정식

(1) 지배방정식

ALE에 의한 유체의 운동을 지배하는 Navier-Stokes방정식은 식 (1)과 같다.

$$\rho u_i + \rho(u_j - \hat{u}_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad \text{in } R_F(t)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } R_F(t)$$

u_i : 유체의 속도

ρ : 유체의 밀도

τ_{ij} : 응력 텐서

f_i : 체적력

u_i : 물질입자의 속도 u_i 의 referential time derivative

\hat{u}_i : 요소망의 속도

식 (1)에서 요소망의 속도 \hat{u}_i 는 강체의 운동에 따라 임의로 정의할 수 있다.

(2) 경계조건

$R_F(t)$ 의 경계부분은 경계조건에 따라 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$u_i = g_i \quad \text{on } \partial R_g$$

$$t_i = \tau_{ij} n_j = h_i \quad \text{on } \partial R_h$$

t_i : traction

n_j : ∂R_h 면에 외부로 향한 수직 단위벡터

g_i, h_i : 시간에 따라 주어진 경계조건

$\partial R_1(t)$ 에서 유체의 속도를 u_i^1 로 정의한다. 그리고 $\partial R_1(t)$ 에서 유체와 물질입자간 미끄러짐이 없다면, 즉 Lagrangian 개념에 따르면

$$u_i^1 = \dot{u}_i \quad \text{on } \partial R_1$$

가 된다.

4.3.3 강체의 운동방정식

그림 4.2의 개념적인 해석모형에서, 강체의 운동을 자세히 표현하면 그림 4.3의 스프링-강체 시스템으로 나타낼 수 있다. 그리고 강체의 평면 운동(δ)은 무게중심 G의 운동성분들로서 표현한다.



그림 4.3 강체의 평면 운동

강체의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\alpha + cv + k\delta = X \quad (2)$$

m : 질량행렬

c : 감쇄행렬

k : 강도행렬

X : 무게중심 G에 작용하는 경계표면 traction t_i 의 합력

α : δ 의 시간에 대한 2차미분값으로서, 무게중심 G의 가속도

v : δ 의 시간에 대한 1차미분값으로서, 무게중심 G의 속도

4.4 유한요소 정식화

유체와 강체의 운동을 지배하는 각각의 방정식

(1), (2)에 유체와 강체의 경계면에서 상호 미끄러짐이 발생하지 않는다는 적합(compatibility)조건을 적용하면, 이 두 종류의 지배방정식을 유체-강체 상호작용해석을 위한 하나의 방정식으로 통합할 수 있다. 통합된 방정식을 유한요소들로서 공간에 대해 이산화[11]하고, 시간적분[12]을 실시하여 유체와 강체의 상호 연계된 운동을 해석한다.

4.5 적용예

Nomura[14,15] 등은 ALE유한요소법에 의한 유체-구조물의 상호작용해석을 위하여 그림 4.4와 같은 형태의 진동모형을 설정하였다. 이 모형에서는 임의의 단면을 가진 실린더가 정상적인 흐름을 갖는 유체의 유동에 직각방향으로만 움직이도록 제한한다.

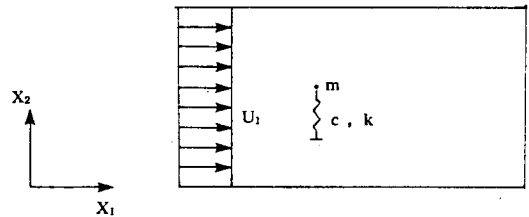


그림 4.4 정상유체 내부에 위치한 실린더의 진동모형

앞의 4.3, 4.4절에서 유도된 ALE에 의한 유체-구조물 상호작용 해석기법을 적용하면, 유체와 실린더의 상호작용으로 생기는 와류의 발생주기, 실린더의 진동주기, 진폭 등을 구할 수 있게 된다. 이 결과들의 정확성은 와류발생의 특성과 밀접한 관계가 있으며 와류발생주기는 Reynolds수, 구조물의 단면형태, 표면조도(Surface Roughness)와 자유류의 난류강도(Free Stream Turbulence)의 함수로 표시된다. 수치해석에서는 요소망의 크기를 작게 만들어서 실험결과[16]에 근접한 결과를 얻을 수 있게 된다.

바람-구조물의 상호작용을 해석하기 위하여 구조물 주위의 유동장을 매우 세밀하게 분할한 후 Navier-Stokes 방정식을 직접 적용하여 해석하는데에는, 현존하는 최고성능의 슈퍼컴퓨터로도 그

한계가 있다. 즉 낮은 Reynolds수를 갖는 공기의 흐름처럼 유동이 안정된 경우에는, 공기흐름과 상호 연계된 구조물의 거동을 어느 정도 정확히 예측할 수 있지만, Reynolds수가 높아지고 공기흐름의 난류성분(turbulence)이 커지는 경우에는 공기의 흐름을 지배하는 Navier-Stokes Equation을 직접 해석할 수 없다. 그러므로 실제상황을 수치해석 모형으로 상사시키기 위한 적절한 난류모델(turbulence model)을 도입하여 바람의 거동특성을 해석해야 한다.

5. 결 론

외국의 경우에는 그간에 축적되어온 전산유체역학분야의 기술을 장대구조물에 적용시키기 시작하여 구조물에 작용하는 풍력계산, 구조물 주위의 유동장애해석 등 상당한 연구성과를 얻고 있으며, 바람에 의한 구조물의 동적 안정성 검토를 위하여 오래전부터 주요한 구조물에 대하여 풍동실험을 해오고 있다. 반면에 국내의 경우는 최근에 장대교량의 건설이 시도되면서 몇 건의 풍동실험 있었고, 해석적인 방법으로 풍하중과 구조물의 상호작용을 해석하기 위한 연구는 일부 대학교 연구소를 중심으로 막 시작한 단계에 있다. 이는 토목구조물에 있어서 일반적인 하중에 대한 구조적인 안정성은 대부분 해석적인 방법을 통해 평가가 가능하였으나, 유체 특히 공기흐름의 본질적인 불안정성과 복잡성 때문에 토목구조물에 영향을 미치는 유동현상을 정확히 파악하기가 난해하고 효율적인 유체-구조물의 상호작용해석 기법이 확립되지 않았기 때문이었다. 그러나 컴퓨터 성능과 전산유체역학 분야는 지속적으로 발전하고 있으므로 이에 따라 유체의 유동장은 더욱 정확하고 상세히 묘사할 수 있게 될 것이며 더불어 ALE유한요소법 등과 같은 유체-구조 상호작용해석 기법이 발전해 나갈 것이다. 따라서, 현재 수행되고 있는 풍동실험은 다양한 모형제작으로 인한 비용문제와 완성된 모형의 정밀도 문제, 각 모형에 대한 반복적인 실험과정 등 적절한 설계형상을 선택하는 과정에서 효율성이 낮은 경우가 많으므로 수치해석에 의한 내풍안정성 평가과정을 병행함으

로써 실험의 효율성이 낮은 부분을 보완, 최소화할 수 있을 것이다. 특히 적은 비용 및 시간내에 개략적인 내풍안정성 파악이 요구되는 개념설계 및 초기설계단계에 근사적인 내풍안정성 검토 기술로서 결과적으로 활용될 수 있을 것이다. 또한 수치해석기법의 가장 큰 장애요인이었던 유체 유동장의 모사정도가 향상됨에 따라 수치해석에 의한 장대구조물의 내풍안정성해석은 앞으로 상당한 발전이 있을 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

1. "서해대교 풍동실험 결과분석 및 풍동실험 요령서", 한국강구조학회, 1992. 12.
2. 윤태양, "장대교 내풍설계를 위한 풍동실험", 전산구조공학, 제6권 제3호, 1993. 9., 12-23
3. "구조물의 내풍설계 및 풍동실험", 제9회 전산구조공학회 기술강습회 1994. 2
4. The MacNeal-Schwendler Corporation, HANDBOOK FOR AEROELASTIC ANALYSIS, MSC /NASTRAN VERSION 65
5. Scanlan, R. H., and Tomko, J. J., "Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 97, No. EM 6(Dec. 1971), 1717-1737
6. Nakamura, H., and Ogaki, I., "Flutter Simulation for Bridges," Paper No. 20, Proceedings of the 1990 MSC World Users Conference, Universal City, California, 28-30 March, 1990.
7. C. W. Hirt, A. A. Amsden and H. K. Cook, An arbitrary Lagrangian Eulerian computing method for all flow speeds, J. Comput. Phys. 14(1974) 227-253
8. T. J. R. Hughes, W. K. Liu and T. K. Zimmerman, Lagrangian-Eulerian finite element formulation for incompressible viscous flows, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 29(1981) 329-349
9. T. Belytschko, D. P. Flanagan and J. M. Kennedy, Finite element methods with user-controlled meshes for fluid-structure interaction, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 33(1982) 669-688

10. J. Donea, S. Giuliani and J. P. Halleux, An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 33(1982) 689-723
11. A. Huerta and W. K. Liu, Viscous flow with large free surface motion, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 69(1988) 277-324
12. A. N. Brooks and T. J. R. Hughes, Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominate flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 32(1982) 199-259
13. T. J. R. Hughes, *The Finite Element Method*(Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987)
14. Nomura T., and T. J. R. Hughes, An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 95(1992) 115-138
15. Nomura T., A numerical study on vortex-excited oscillations of bluff cylinders, *J. of Wind Enf. and Industrial Aerodynamics* 50 (1993) 75-83
16. G. H. Koopman, The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.* 28(1967) 501-512