

MIT 요동 익형의 수치해석
: 비정상 유동 특성

Numerical Simulation of MIT Flapping Foil Experiment
: Unsteady Flow Characteristics

배 상 수*(영남대 대학원)·강 동 진(영남대 기계공학부)·김 재 원(선문대 기계공학과)
Sang Su Bae(Graduate School, Yeungnam Univ.), Dong Jin Kang(Yeungnam Univ.),
and Jae Won Kim (Sunmoon Univ.)

Key Words : Unstructured FVM(비정렬 유한체적법), Hydrofoil(수중익), Flapping foil(요동익)

Abstract

A Navier-Stokes code based on a unstructured finite volume method is used to simulate the MIT flapping foil experiment. A low Reynolds number $k-\epsilon$ turbulence model is used to close the Reynolds averaged Navier-Stokes equations. Computations are carried out for a domain involving two flapping foils and a downstream hydrofoil. The computational domain is meshed with unstructured quadrilateral elements, partly structured. Numerical solutions show good agreement with experiment. Unsteadiness inside boundary layer is entrained when a unsteady vortex impinge on the blade surface. It shows that local peak value inside the boundary layer and also local minimum near the edge of boundary layer as it develops along the blade surface. The unsteadiness inside the boundary layer is almost isolated from the free stream unsteadiness and being convected at local boundary layer speed, less than the free stream value.

1. 서 론

산업현장에서 부닥히게 되는 많은 유동문제가 비정상 점성유동임에도 이에 대한 연구는 초보적인 수준을 벗어나지 못하고 있다. 이와 같은 미진한 연구는 대체로 실험이나 수치해석의 복잡성 및 비효율성과 관련이 있는 것으로 이해된다. 특히, 터보기계의 익형에 형성되는 비정상 경계층의 발달과정은 터보기계의 성능에 큰 영향을 미치는 대표적인 유동 문제로 인식되어, 익형 표면에 형성되는 경계층을 예측하는 연구는 가장 고전적인 유체역학적 연구과제의 하나가 되어 왔다. 그러나 일반적으로 경계층의 두께가 지나치게 얇아 이의 예측이 용이하지 않아 신뢰할만한 경계층 데이터가 드문 실정이다.⁽¹⁾ 양질의 실험 데이터는 유동 현상 자체에 대한 이해 증진 뿐만 아니라 수치해석 방법의 발전에도 없어서는 안될 주요한 비교 데이터이다.

이러한 현실적 측면에서 살펴보면 MIT (Massachusetts Institute of Technology)가 보유

하고 있는 수터널(water tunnel)을 이용하여 최근에 정밀 계측한 비정상 경계층 데이터는 다양한 관점에서 살펴볼 가치를 지니고 있다고 하겠다.⁽²⁾ MIT의 실험 데이터는 비정상 경계층에 대한 자료의 방대함 뿐만 아니라 정밀도에서도 널리 인정받아 여러 연구가에 의해 인용되고 있다. MIT가 보유하고 있는 수터널의 실험단면(test section)은 53x20(in²)의 크기를 가지고 있다. 실험은 2개의 요동(flapping)하는 익형의 하류에 수중익(hydrofoil)을 장착하여, 수중익의 표면 뿐만 아니라 수중익 주위의 폐곡선 상에서 광범위한 비정상 데이터를 계측하였다(Fig. 1에서 측정상자). 상류 요동익형은 3(inch) 크기의 NACA0025 익형이고, 하류의 수중익은 18(inch)크기의 수정 NACA 66 시리즈로 제작되어 1.18-1.34°의 입사각에 대하여 실험을 수행하였다. 실험단면에 유입되는 유동의 난류강도는 약 1%이고 요동익형은 6(°)의 진폭으로 16(Hz) 주파수로 요동한다. 수중익의 선단으로부터 0.105(inch)하류에 직경 0.05(inch)의 예폭시 디스크를 장착하여 천이(transition)를 유발하였다. Fig. 1은 MIT가 실험

한 익형 주위의 기하학적 형상을 개략적으로 보여주고 있다.

MIT 실험 데이터는 이미 몇몇 연구가에 의해

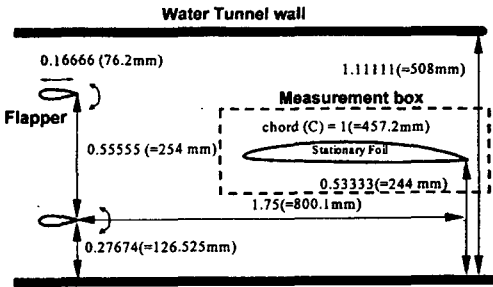


Fig. 1 Schematic diagram of MIT flapping foil experiment

자신들이 개발한 수치해석 Navier-Stokes 코드를 검증하는데 사용된 바 있다. 예를 들면 1993년에 개최된 Office of Naval Research (ONR)/MIT Unsteady Flow 워크샵에서는 실험 데이터와 암명 실험(blind test)으로 얻은 수치해를 심도있게 비교 분석한 바 있다. Paterson 등⁽³⁾은 3가지 서로 다른 크기의 계산영역의 수치해를 서로 비교 분석한 결과 적절한 경계조건을 사용하면 같은 정도의 수치해를 얻을 수 있다고 주장하였지만, 모든 수치해는 실험치와 상당한 차이를 보였다. Taylor 등⁽⁴⁾은 가압축성 Navier-Stokes 코드와 다중블록 기법을 사용하여 정밀한 수치해석을 시도하였지만 실험치와는 상당한 차이를 보였다. 수치해석 연구로서 가장 두드러지는 결과는 최근에 펜실바니아 주립대학의 Lakshminarayana 교수 연구팀이 얻은 Navier-Stokes 수치해이다.⁽¹⁾ 이들은 하류에 장착된 수중익만을 계산영역에 포함시키고 실험치를 내삽(interpolation)하여 입구 경계조건으로 사용하였고, 수치해는 정상 뿐만 아니라 비정상 수치해의 비교에서도 좋은 일치를 보였다.

한편, 비정상 유동은 발생 요인에 따라 크게 자연적인(natural), 인위적인(forced), 그리고 상호작용에 의한(interacting) 비정상 유동 등 세가지로 분류한다. 이 중에서 본 연구에서 다루고자 하는 MIT 요동 익형 문제는 상류 익형의 후류가 하류 익형의 공기역학적 특성에 미치는 영향에 관한 것이다. 본 연구는 터보기계에서의 정익과 동익의 상호작용에 의한(interacting) 비정상 유동

특성에 대한 수치적 연구의 초기 연구 결과로, 본 연구자가 개발한 비정상 Navier-Stokes 코드의 신뢰성을 실증적으로 검증함과 동시에 상호작용에 의한 비정상 유동 특성을 자세히 살펴보는 데 그 목적을 두고 있다.

본 연구에서는 저자가 선행연구⁽⁵⁾에서 개발한 비정렬 비압축성 Navier-Stokes 코드 비정상 유동해석에 적합하도록 수정하여 MIT 실험데이터에 응용해 보고자 한다. 이 Navier-Stokes 코드는 비정렬 격자계를 사용하여 비압축성 유동장을 해석한다. 특히, 운동량방정식을 QUICK법⁽⁶⁾으로 근사하여 수치해의 정밀도를 향상시킨 것이 특징이며, 시간 도함수는 모두 Euler 이차 후방 차분법(2nd order Euler backward differencing)을 사용한다. 또한, 요동하는 익형을 모사하기 위해 익형 주위의 일부 격자는 시간의 경과에 따라 익형과 함께 요동하는 수치적 기법을 사용한다.

2. 지배방정식

본 연구에 사용된 지배방정식은 x-y 직교 좌표계에서의 2차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로 다음의 식 (1), (2) 그리고 (3)으로 표현할 수 있다.

운동량방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{eff} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{eff} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

여기서 u 와 v 는 각각 x 와 y 방향 속도성분이고, p 는 압력을 그리고 ν_{eff} 는 등가점성계수로 $\nu_{eff} = \nu + \nu_t$ 이다. ν 와 ν_t 는 각각 유체의 동점성계수(kinematic viscosity)와 와점성계수(eddy viscosity)이고, 와점성계수는 Chien의 저 레이놀즈수 난류모델⁽⁷⁾로 구한다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

3. 난류모델

대표적인 저 레이놀즈수 난류모델의 하나인 Chien의 난류모델⁽⁷⁾은 다음의 식 (4)와 (5)에 정리한 난류운동에너지방정식과 난류운동에너지 소산율방정식으로부터 와점성계수(eddy viscosity)를 구한다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial x_j k}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_j \epsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial x_j \epsilon}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + f_1 C_{\epsilon 1} \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

여기서 u_j 는 $x_j(j=1,2)$ 방향의 평균유속을 k 는 난류운동에너지를 ϵ 은 소산율을 가리킨다. 와점성계수는 $\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 로 구하며, 기타 여러 가지 모델상수와 함수는 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.35, C_{\epsilon 2} = 1.8, \sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\epsilon = 1.3, f_1 = 1.0, f_\mu = 1.0 - e^{-0.015y^+}$$

$$f_2 = 1.0 - 0.22e^{-(Re_t/6)^2} \quad (6)$$

4. 수치해석 방법

4.1 수치해석과정

본 논문에서 사용한 수치해석 방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [5]에 잘 정리되어 있으며, 여기서는 수치해를 구하는 과정을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

- (a) 속도성분, 압력성분 그리고 난류 와점성계수 등을 가정한다.
- (b) 대수방정식으로부터 속도성분을 수정한다.

(c) 연속방정식을 주작하여 얻은 압력방정식으로부터 압력을 수정한다.

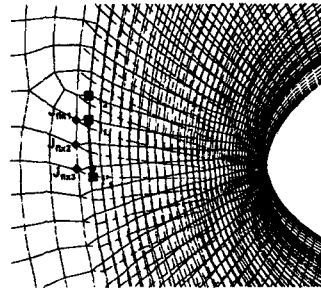
(e) 과정 (b)와 (c)에서 구한 속도성분과 압력의 변화가 충분히 작지 않으면 난류 와점성계수를 수정하고 과정 (b)로 되돌아간다.

위의 과정 (a)-(e)는 임의의 시간 증분에 대하여 적용하며, 과정 (e)에서 수렴판정은 반복계산간 속도성분과 압력의 최대변화가 10^{-4} 보다 작을 때를 기준으로 하였다.

4.2 이동격자 기법

상류 요동 익형의 운동을 정확히 모사하기 위해 익형 주위를 O-형 격자로 구성한 후 익형과 함께 운동하도록 하였다. Fig. 2-(a)는 임의의 시간 t_1 과 다소 시간이 경과한 후의 시간 t_2 에서의 격자를 동시에 그린 그림이다. 그림에서 실선은 시간 t_1 에서의 격자를 점선은 시간 t_2 에서의 격자를 가리킨다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이, 이동 격자와 고정 격자의 경계에서는 최단 거리의 격자를 이어서 격자선을 만든다. 따라서 시간 t_2 에서는 Fig. 2-(b)에 보인 바와 같이 이동 격자점

(a) grid movement



(b) grid at time t=t2

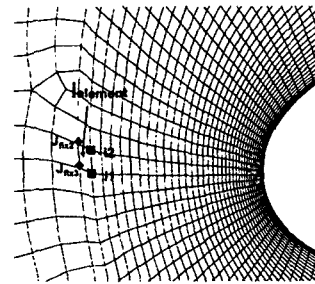


Fig. 2 Moving grid

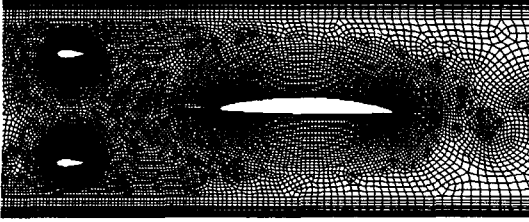


Fig. 3 Computational domain and grid

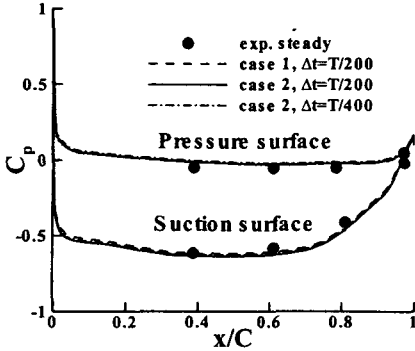


Fig. 4 Accuracy of numerical solution

i_1 , i_2 와 고정 격자점 j_{fix2} , j_{fix3} 를 이어서 사각형 요소 $i_{element}$ 를 만든다.

5. 결과 및 토의

본 수치해석에 충분한 수의 격자점이 사용되고 있는지를 살펴보기 위해 두가지 격자분포 즉 35,988개의 격자점과 43,588개의 격자점을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 이 때 사용된 격자분포는 Fig. 3에 보인 바와 같이 정렬 격자와 비정렬 격자가 혼재된 상태이며, 익형 주위와 벽면 부근에 각각 O-형과 H-형 정렬격자로 구성하고 나머지 계산영역을 비정렬 사각형 격자로 구성하였다. 35,988개의 격자점을 사용한 case 1은 201X35의 정렬 격자를 수중익 표면 주위에 분포시켰고, 43,588개의 격자점을 사용하는 case 2는 201X73의 O-형 정렬 격자를 수중익 표면 주위에 분포시켰다. 비정상 계산에 사용한 시간증분은 요동 익형의 주기를 200개와 400개로 나누어 얻은 두 수치해를 비교한 후 400개로 결정하였다. Fig. 4는 수중익 표면을 따른 시간 평균 압력분포를 도시한 그림으로, 공간격자의 크기의 영향

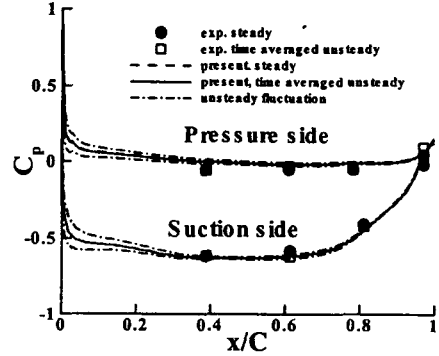


Fig. 5 Comparison of C_p distributions

은 case 1과 2의 수치해를 비교하고 살펴볼 수 있고, 시간증분 크기의 영향은 두가지 시간증분 크기($\Delta t = T/200$, $T/400$)로 얻은 수치해를 비교하여 살펴볼 수 있다. 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 case 1과 2의 두 수치해는 거의 일치하고 있어 수치해의 공간격자 의존성은 대단히 작다고 말할 수 있겠다. 또한, 시간증분의 영향도 충분히 작음을 살펴볼 수 있다. 따라서 이후의 계산은 모두 case 2 격자와 시간증분을 $\Delta t = T/400$ 로 하여 얻은 것이다.

Fig. 5는 흡입면과 압력면을 따른 수치해와 실험치를 비교하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 시간 평균 수치해는 시간 평균 실험치와 대체로 잘 일치하고 있지만, 수치해는 실험치에 비해 익형의 부하(loading)를 다소 크게 예측하고 있다. 후단 부근의 흡입면($x/C \geq 0.7$)을 따라서 압력이 급격히 증가하고 있어 경계층의 박리 가능성이 있지만, 수치해에서는 박리가 예측되지 않았다. 익형의 비정상 압력 분포는 수중익의 선단에서 후단으로 접근함에 따라 감소하는 전형적인 유동특성을 살펴볼 수 있다.⁽¹⁾

Fig. 6은 수중익 주위의 측정상자의 입구와 상하면을 따른 속도분포의 일차조화를 실험치와 비교한 그림이다. (a)는 측정상자 입구에서, (b)는 측정상자의 윗면을 따라서 그리고 (c)는 측정상자의 아랫면을 따라서 x-방향 속도성분의 일차조화의 크기와 위상을 도시한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 본 수치해는 일차조화의 크기와 위상을 잘 예측하고 있다. 또한, 지면 관계상 시간 평균치는 도시하지 않았지만 실험치와 거의 완벽

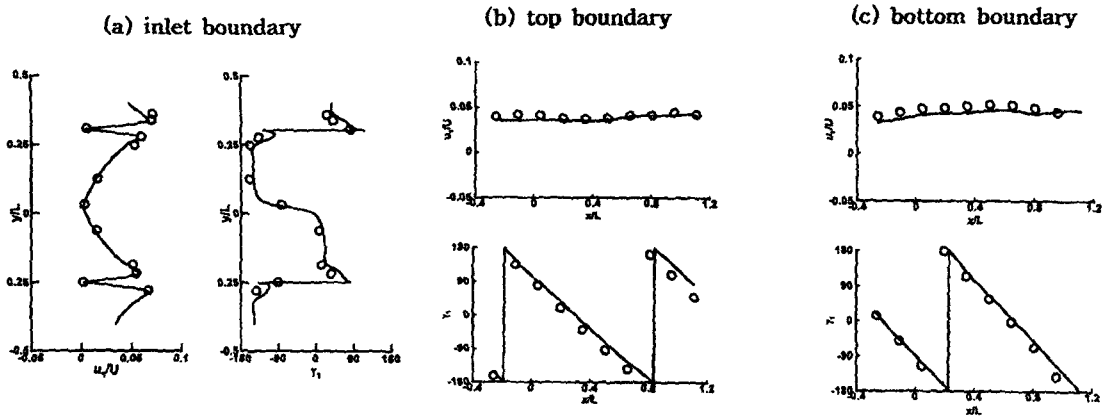


Fig. 6 Comparison of the first harmonics of the axial velocity components on the measurement box boundaries (o : experiment, --- : present)

하게 일치하고 있다. 따라서, 상류 익형으로부터 유기된 비정상 유동은 본 수치해석 방법으로 충분히 정확하게 예측할 수 있다고 판단된다.

Fig. 7은 비정상 경계층 유동특성을 살펴보기 위해 수중익의 흡입면을 따라서 4개 지점에서 벽면에 수직한 방향으로의 일차조화 분포를 실험치와 비교하여 보았다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험치와 수치해 모두는 익형의 후단으로 접근함에 따라 경계층의 가장자리(boundary layer edge) 부근에서 비정상성(unsteadiness)이 국부적으로 감소하는 경향을 보이고 있다(지면 관계상 시간 평균치는 도시하지 않았지만 $x/C=0.4$ 에서 경계층 두께가 약 $0.1h/C$ 이고 후단에서는 약 $0.4h/C$ 로 증가한다). 이와 같은 특이한 현상은

여러 연구가 몇몇 관찰한 바 있으며, Fig. 8에 도시한 일차조화의 위상(phase angle)분포와 Fig. 9에 도시한 비정상 속도장을 살펴보면 보다 쉽게 이해할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에 도시한 일차조화에 대한 위상분포를 도시하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 경계층 가장자리 부근에서 갑자기 큰 위상차를 살펴볼 수 있고, 그 차이는 후단 부근($x/C \geq 0.9$)에서 급격히 증가한다. 경계층 가장자리 부근에서 큰 위상차가 난다는 것은 자유 유동과 경계층 내부의 비정상성이 제대로 혼합(mixing)되지 못하고 있다는 증거이다. 이를 보다 자세히 살펴보기 위해 경계층 주위의 비정상 속도장을 Fig. 9에 도시하였다. (a)는 무차원 시간 $t/T=0.095$

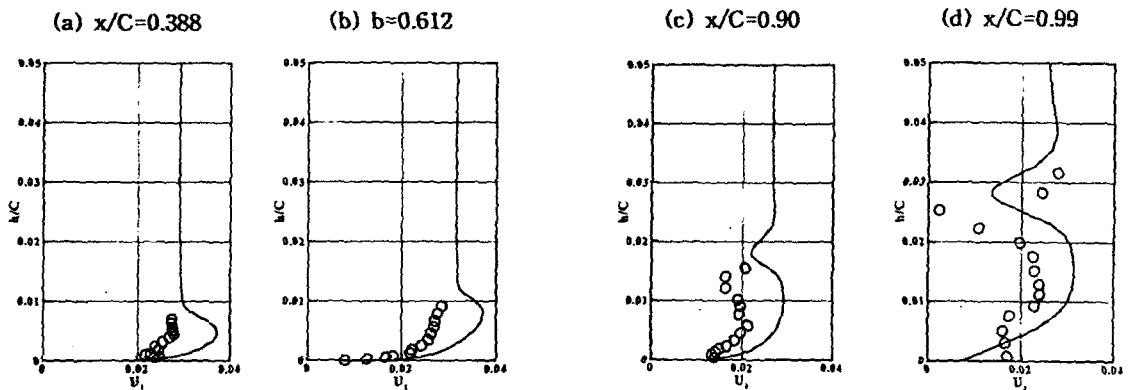


Fig. 7 Magnitude of the first harmonics of the velocity profiles at several axial locations along the suction surface of the hydrofoil (o: experiment, — : present)

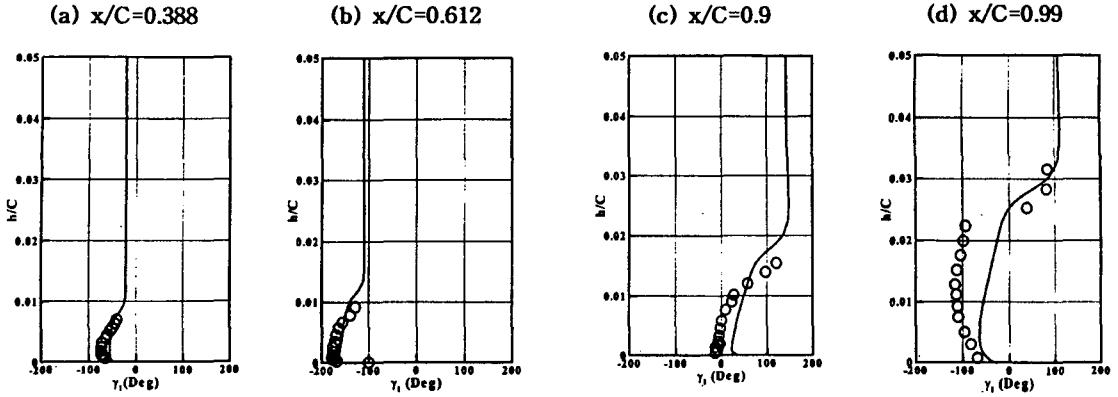


Fig. 8 Phase angle distributions of the first harmonics of the velocity profiles at several axial locations along the suction surface of the hydrofoil (o : experiment, — : present)

일 때, (b)는 무차원 시간 $t/T=0.295$ 일 때, (c)는 무차원 시간 $t/T=0.695$ 일 때, 그리고 (d)는 무차원 시간 $t/T=0.895$ 일 때의 속도장을 보여주고 있다. (a)를 살펴보면 비정상 와류는 수중의 위에 약 2개(하나는 시계방향으로 나머지 하나는 반시계방향으로 회전)가 형성됨을 보여주며, 그 수가 변함이 없다. (b)는 경계층 내부의 비정상성이 어떻게 형성되는지를 보여주는 그림으로, 반시계방향으로 회전하는 비정상 와류가 수중의 표면에 충돌하면 주유동방향으로 강한 비정상 유동이 경계층 내부에 유기되고 반대방향으로는 상류에서 유기된 비정상성과 충돌면 부근에서 서로

상쇄되는 현상을 살펴볼 수 있다. 시계방향으로 회전하는 비정상 와류는 주유동의 상류방향으로 비슷한 효과를 유발하지만 경계층 내부에서의 비정상성 발달속도는 반시계방향 경우에 비해 훨씬 느리다. 이러한 현상은 나머지 그림에서도 동일하게 살펴볼 수 있어 상류 익형의 후류와 하류 익형의 상호작용에 의한 대표적인 비정상 유동 특성으로 이해된다. 이상과 같은 자유 유동과 경계층 내부에서의 비정상 유동 특성을 확인하기 위해 Fig. 10에 $x/C=0.612$ 와 $x/C=1.0$ 에서의 속도변동을 실험치와 비교하여 도시하였다. 그림을 살펴보면 경계층 내부와 자유 유동 간의 위상

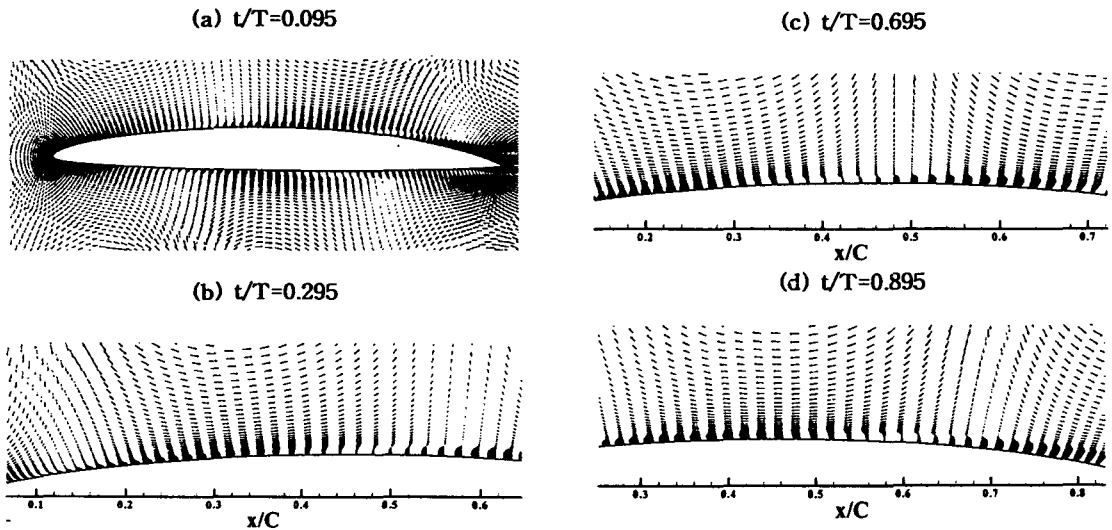


Fig. 9 Unsteady velocity vector field

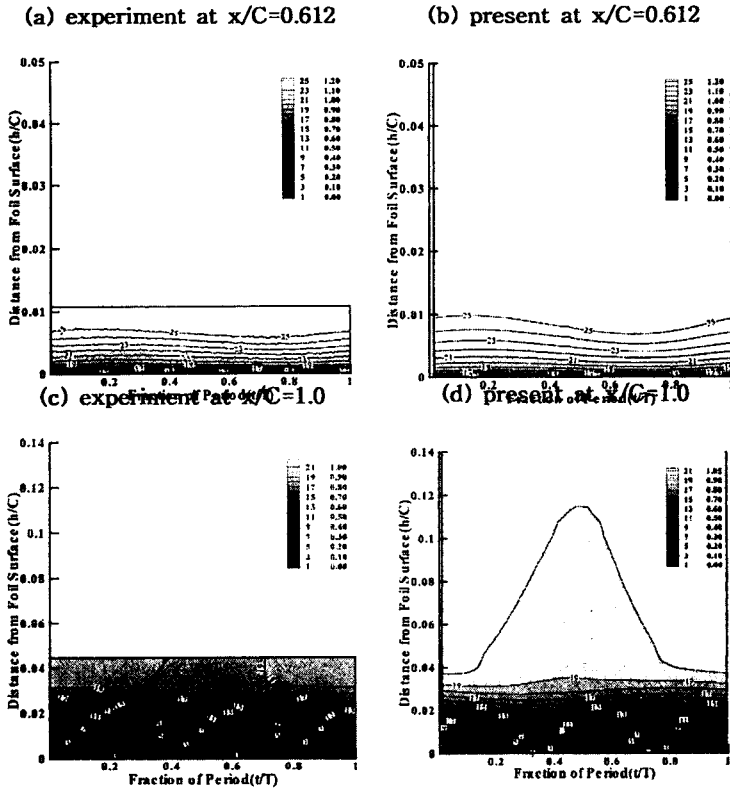


Fig. 10 Comparison of time history of the velocity on the hydrofoil suction surface at $x/C=1.0$

차가 크지 않은 $x/C=0.612$ 에서는 경계층 내부의 비정상성 거동에서 자유 유동의 정현파 거동으로 완만하게 천이하지만, $x/C=1.0$ 에서는 경계층 가장자리 부근에서부터 자유 유동의 정현파 거동이 뚜렷이 관찰된다.

Fig. 11은 수중익의 흡입면과 압력면을 따른 압력분포의 일차조화의 크기와 위상을 도시한 그림이다. 일차조화의 크기를 도시한 (a)를 살펴보면 본 수치해는 실험치와 잘 일치하고 있으며, 흡입면에서의 이차파크도 예측하고 있음을 알 수 있다. (b)는 일차조화의 위상을 비교한 그림으로 흡입면과 압력면 사이의 위상 차이는 잘 예측하고 있지만, 전체적으로 약 100° 앞선 위상을 보여주고 있다.

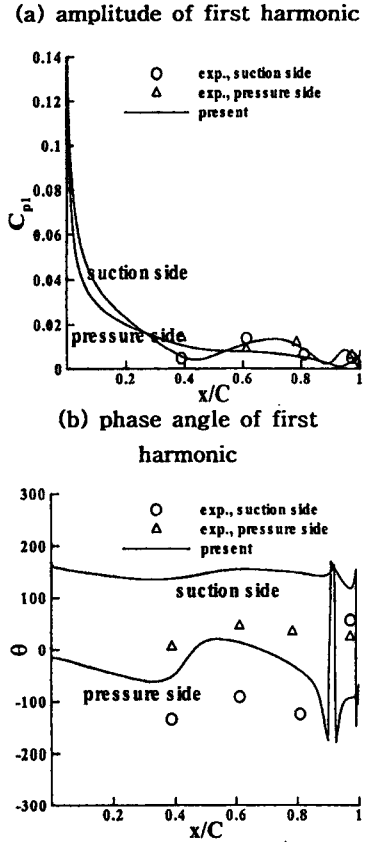


Fig. 11 Comparison of first harmonic

6. 결론

본 논문에서는 비정렬 Navier-Stokes 코드를 MIT flapping foil experiment에 적용하여 비정상 수치해석을 수행하였다. 본 수치해석에서 얻은 시간 평균 및 비정상 비정상 수치해는 실험치와 만적스러운 일치를 보여, 본 수치해석 방법은 비정상 유동 특성에 유용하게 사용할 수 있음을 확인하였다. 또한, 비정상 경계층 유동 특성을 자세히 살펴본 결과, 상류 익형의 후류는 하류 수중익의 주위에 2개의 비정상 와류를 유발하고, 비정상 와류는 수중익 표면에 충돌하면서 강한 비정상 속도를 경계층 내부에 발생시킨다. 경계층 내부의 비정상 속도는 자유 유동과 다른 속도로 대류되면서 수중익의 후단 부근에 이르르면 큰 위상차를 보인다. 또한 자유 유동에서의 비정상성

은 경계층 내부의 비정상성과 거의 혼합되지 않으며 수중익 표면을 따라 대류된다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 선문대학교 공조 기술 지역협력연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

1. Ho, Y., Lakshminarayana, B., Thompson, D. E., and Morris, P. J., 1995, "Numerical Simulation of Steady and Unsteady Viscous Flows in Turbomachinery Blade Rows," PennState University Turbomachinery Lab Report, PSU TURBO 9503.
2. Rice, J. Q., "Investigation of A Two Dimensional Hydrofoil in Steady and Unsteady Flows," M. S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, June, 1991.
3. Paterson, E., and Stern, F., 1993, "Computation of Unsteady Viscous Flow with Application to the MIT Flapping-Foil Experiment," Sixth Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics.
4. Taylor, L. K., Busby, J. A., Jiang, M. Y., Arabashi, A., Sreenivas, K., and Whitfield, D. L., 1993, "Time Accurate Incompressible Navier-Stokes Simulation of the Flapping Foil Experiment," Sixth Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics.
5. 강 동진, 배 상수, 주 상우, 1998, "비압축성 점서유동 해석을 위한 비정렬 유한체적법", 대한 기계학회 논문집 제 22권 제10호, 출판중.
6. Leonard, B. P., 1979, "A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation," Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 19, pp. 59-98.
7. Chien, K. Y., 1982, "Prediction of Channel and Boundary Layer Flows with a Low Reynolds Number Turbulence Model," AIAA J., Vol. 20, pp. 33-38.