

비대칭 장력 모델을 이용한 예인 물체의 유체-구조 상호작용 모사

신 상 목¹

SIMULATION OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION OF A TOWED BODY USING AN ASYMMETRIC TENSION MODEL

Sangmook Shin¹

The fluid-structure interaction of a towed body is simulated using a developed code, which is based on the flux-difference splitting scheme on the hybrid Cartesian/immersed boundary method. To improve the stability in the coupling between the fluid and structure domains, a scheme is used, in which the effects of structure deformation are treated implicitly. The developed code is validated for the fluid-structure interaction problem through comparisons with other results on the vortex-induced vibration of elastically mounted cylinders. To simulate behavior of a towed body, an asymmetric tension modelling for a towing cable is suggested. In the suggested model, the tension is proportional to the elongation of the cable, but the cable has no effect on the body motion whenever the distance between the endpoints of the cable is smaller than the original length of the cable. The fluid-structure interactions of a towed body are simulated on the basis of different parameters of the towing cables. It is observed that the suggested tension model predicts the snapping for a shorter towing cable, which is in accordance with the reported results.

Key Words : 유체-구조 상호작용(Fluid-structure interaction), FDS 기법(Flux-difference splitting scheme), HCIB법(Hybrid Cartesian/immersed boundary method), 와류-유기 진동(Vortex-induced vibration), 예인삭(Towing cable), 비대칭 장력(Asymmetric tension)

1. 서 론

해상에서 예인되는 부선은 예인선과 연결된 예인삭에 작용하는 장력에 의해 거동한다. 예인삭을 이용한 예인 과정 동안 예인선 및 부선의 동요나 파랑 등의 교란으로 인해 예인삭의 장력이 단속적으로 전달되는 스냅핑(snapping) 현상이 발생할 수 있다. 스냅핑이 발생하면 예인삭에 순간적으로 허용치를 초과하는 장력이 전달되어 예인삭 절단 등의 사고를 초래한다. 이러한 스냅핑을 방지하기 위해서는 부선의 조종성능 악화에도 불구하고 예인삭의 길이가 충분히 길어야 한다고 알

려져 있으며, 현재 예인삭 최소 길이에 대한 규정은 예인선 및 부선의 길이에 따른 경험적 결과에 의존하고 있다. 예인삭의 스냅핑을 포함한 비정상 거동을 해석하기 위해서는 유체력과 예인 장력의 효과가 고려된 예인 물체의 운동을 예측하고 예측된 예인 물체의 운동에 따른 유체력 및 예인 장력의 변화를 재산정하는 유체-구조 연성 해석이 요구된다.

유체-구조 연성 해석을 위해서는 유동 영역 경계의 시간에 따른 변화를 효과적으로 처리할 수 있는 기법이 요구된다. 물체 경계와 독립적인 배후 격자계에서 지배방정식을 이산화하는 경계 비정합(non-boundary conforming) 기법들은 이러한 문제를 효과적으로 다룰 수 있다. 경계 비정합 기법의 일종인 HCIB(hybrid Cartesian/immersed boundary)법[1-3]은 가상경계법[4]과 달리 물체 경계 주위의 유동영역 내부 절점에서 국소 법선(local normal line)을 따른 중속변수 재구성에 의해 경계

접수일: 2010년 12월 12일, 수정일: 2011년 2월 7일,

게재확정일 : 2011년 2월 11일.

1 정회원, 부경대학교 조선해양시스템공학과

E-mail: smshin@pknu.ac.kr

조건을 생성함으로써 두께가 영인 물체를 쉽게 처리할 수 있다는 점 등의 장점을 갖고 있다. Shin et al.[5]은 HCIB 법과 동적 탄성변형을 하는 보에 대한 해석을 결합하여 종동요하는 날개의 추진효율이 날개의 유연성에 의해 개선됨을 보고하였다.

Shin et al.[6,7]은 HCIB 법을 이용한 유동해석 과정에서 사용되었던 엇갈림-비엇갈림 혼합격자(hybrid staggered/non-staggered grid)기법 대신 밀도가 다른 비압축성 유체들에 대한 FDS(flux-difference splitting) 기법을 이용한 3차원 유한체적법을 적용하였다. FDS 기법 및 유한체적법의 적용으로 정확성과 강건성이 향상되고 자유표면 유동 및 Euler 방정식 해석에도 적용할 수 있게 되었다. 개발된 코드는 Rayleigh-Taylor 불안정성 및 댐 붕괴 문제에 적용되어 다른 결과와의 비교를 통해 검증되었다. 움직이는 물체 주위 유동 해석에 대한 검증을 위해 피스톤 형태의 조파기와 수면 하에서 움직이는 원주에 의한 조파 현상을 모사하고 다른 계산 결과들과 비교되어 좋은 일치율을 보임을 확인하였다. 수중익 끝단과 같은 날카로운 형상을 쉽게 처리할 수 있음을 확인하기 위해 Duncan[8]에 의한 수중익 주위 조파현상 실험을 모사하고 그 결과를 실험 결과와 비교하여 좋은 일치율을 보임을 확인하였다. 개발된 코드는 해저면이 상승하면서 발생하는 고립파 생성이나 구형 탱크 내 슬로싱(sloshing) 과정 동안의 복잡한 3차원 자유표면 유동해석에 적용되었다.

본 논문에서는 HCIB법과 FDS 기법을 이용한 유동해석 코드에 비대칭 장력 모델링을 결합하여 예인삭에 의해 예인되는 물체의 유체-구조 상호작용을 모사하였다. 유체-구조 연성 과정에서 발생하는 불안정성을 제거하기 위해 구조물의 변형 및 속도에 의한 힘 예측에 다음 시간 단계에서의 값들이 고려되도록 하였다[9]. 예인삭의 장력에 대해서는 인장 시에만 변형에 비례하는 장력이 고려되도록 하는 모델링이 새로이 제안되었다. 유체-구조 연성 문제에 대한 코드의 검증을 위해 탄성 지지된 원주의 와류-유기 진동을 모사하고 그 결과를 다른 계산 결과들과 비교하였다. 개발된 코드를 이용하여 예인삭의 길이 변화에 따른 스냅핑 발생이 모사되었다.

2. HCIB 법과 FDS 기법을 이용한 유동해석

본 연구에서 사용된 HCIB 법과 FDS 기법을 이용한 유동해석 코드는 Shin et al.[6,7]에 자세히 설명되어 있으며 여기서는 그 특징을 간단히 소개한다. 유체-구조 상호작용 해석을 위해 자유표면 효과를 무시하고 밀도가 균일한 비압축성 유체의 비정상 유동을 해석한다. 지배방정식은 다음과 같이 적분 형태로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Omega} Q d\Omega + \oint_S F_{inv} dS - \oint_S F_{vis} dS = 0 \quad (1)$$

여기서 Q 는 보존변수 벡터이고 F_{inv} 및 F_{vis} 는 각각 점성 및 비점성 flux이고 Ω 는 검사체적, S 는 검사표면이다.

매 순간 물체 경계는 물체 표면에 위치한 Lagrangian 절점들의 좌표 및 절점들의 연결 정보에 의해 정의된다. 3차원의 경우 물체 표면 위의 삼각형마다 세 개의 Lagrangian 절점 번호가 저장되며 2차원의 경우 물체 표면 위의 선분을 구성하는 2개의 절점 번호들이 저장된다. 매 순간 유동 영역의 경계에서의 속도 경계조건은 Lagrangian 제어점들에서 주어진 속도 벡터들로 제공된다.

유동 영역 내부 절점들 중 물체 경계 가까이 위치한 절점들을 찾아 가상경계(immersed boundary, IB) 절점으로 정의한다. Shin et al.[2]은 경계를 가로지르는 배후격자의 변 요소들을 찾아 그 변의 두 절점들에 대해 유동 영역 내부이면 IB 절점으로 정의하도록 제안하였다. 이 방법은 IB 절점들의 집합으로 정의되는 배후 격자계에서의 유동 경계가 닫히도록 보장한다는 장점과 배후 격자계 간격보다 얇은 물체 주위에도 IB 절점들이 적절히 분포 된다는 장점을 갖고 있다. 매 순간 IB 절점들이 찾아지면 각각의 IB 절점들에 대해 물체 표면과 수직으로 만나는 국소 법선들이 부여된다. 이러한 국소 법선은 유동영역으로 연장되어 배후 격자계의 면 요소(3차원) 혹은 변 요소(2차원)와 만나는 점을 결정한다. 물체 표면과 교점에서의 종속 변수는 주위의 Lagrangian 절점에 저장된 종속 변수들로부터 내삽 되며 배후 격자계와의 교점에서의 종속 변수는 주위 내부 절점에서 계산되는 종속 변수들로부터 내삽 된다. 물리적 시간 단계 내에서 비압축성 조건 만족을 위한 가상시간에 대한 반복이 진행될 때마다 배후 격자계와 국소 법선의 교점에서 내삽 되는 종속 변수는 주위 절점에서 종속 변수 변화를 반영하도록 변경된다.

검사표면에서 압력을 포함한 비점성 flux 계산에는 임의의 밀도 분포를 갖는 비압축성 유체들에 대한 FDS 기법이 적용되었다[6]. 고차의 정도를 얻기 위해 각 요소에서의 종속 변수들의 gradient를 이용하여 검사표면 양쪽에서의 종속 변수들이 재구성되었다. 점성 항은 중앙차분 형태의 계산이 이용되었다.

기존의 HCIB 법에서 사용되었던 엇갈림-비엇갈림 혼합 격자 기법[2] 대신 절점 중심의 유한체적법과 FDS 기법을 이용하는 경우 IB 절점들에서의 압력과 종속 변수들의 gradient 계산이 요구된다. IB 절점에서의 압력은 유동 영역으로부터 외삽 되었으며 gradient 계산을 위해서는 IB 절점 주위 유동영역 외부 절점의 정보를 사용하지 않도록 가중치를 조절하였다.

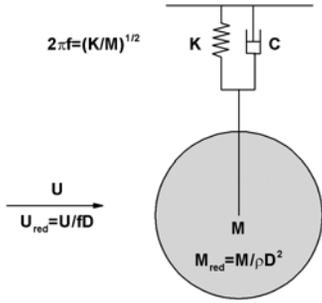


Fig.1 Schematic diagram for the vortex-induced vibration

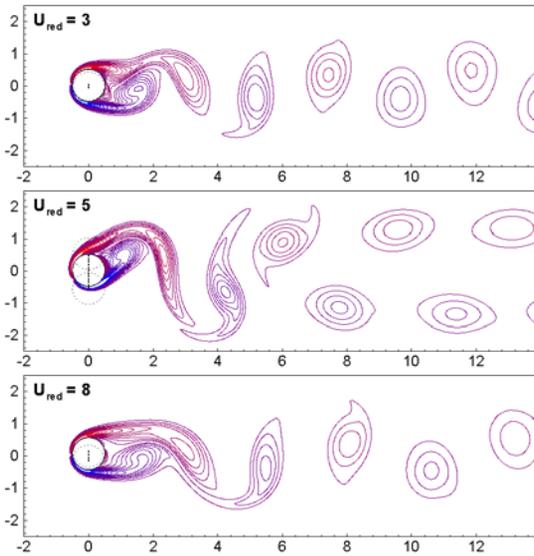


Fig. 2 Instantaneous vorticity contours around an elastically mounted cylinder

IB 절점에서의 범선 속도는 국소 범선 양단의 범선 속도와 IB 절점에서 양단까지의 거리에 따라 보간 되었다. 점선 속도의 경우 점성 계산에서는 범선 속도와 동일한 방법이 적용되었으나 비점성 계산의 경우 유동영역에서 외삽 되었다.

3. 유체-구조 연성 기법

유체 속에서 운동하는 구조물의 동적 거동에 대한 운동방정식은 다음과 같이 일반화 될 수 있다.

$$M \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + C \frac{\partial X}{\partial t} + KX = F \quad (2)$$

여기서 X 는 구조물의 변위, M 은 질량, C 는 감쇠계수, K 는 강성계수, F 는 구조물의 속도 및 가속도 효과에 의해 작용하는 유체력이다. 식 (2)는 물체의 길이 L , 유체의 밀도 ρ , 유입속도 U_∞ 등으로 다음과 같이 무차원화 된다.

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{4\pi\xi}{U_{red}} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{4\pi^2}{U_{red}^2} x = \frac{1}{2M_{red}} C_x \quad (3)$$

$$U_{red} = \frac{U_\infty}{f_n L}, \quad \xi = \frac{C}{C_{cr}}, \quad M_{red} = \frac{M}{\rho L^2} \quad (4)$$

여기서 C_x 는 무차원화 된 유체력 계수, f_n 은 $\frac{1}{2\pi} \sqrt{K/M}$, C_{cr} 은 $2\sqrt{MK}$ 이다. 유체-구조 연성 문제에서 중요한 요소는 계산 시간의 급격한 증가를 초래하지 않으면서 유체-구조 연성기법의 안정성을 확보하는 문제이다. Borazjani et al.[9]은 다음과 같이 구조물 운동에 의한 복원력 및 감쇠력 계산에 다음 시간 단계에서의 구조물의 변위 및 속도들이 고려되면서 물리적 시간 단계 안에서 유체력의 반복 계산이 요구되지 않는 연성 기법을 제안하였다.

$$\frac{x^{n+1} - x^n}{\Delta t} = \frac{1}{2}(u^{n+1} + u^n) \quad (5)$$

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} + \frac{4\pi\xi}{U_{red}} u^{n+1} + \frac{4\pi^2}{U_{red}^2} x^{n+1} = C'_X \quad (6)$$

여기서 x^n 과 u^n 은 n 번째 시간 단계에서의 변위 및 속도이다. 이 방법에서는 식 (5)에서 x^{n+1} 에 대한 표현식을 구해 식 (6)에 대입하여 u^{n+1} 을 결정할 수 있다.

4. 와류-유기 진동 모사를 통한 검증

HCIB 법과 FDS 기법을 이용한 유동해석 코드에 앞 장에서 설명된 유체-구조 연성 기법을 적용한 코드의 검증을 위해 탄성 지지된 원주에 유입되는 유동에 의한 와류-유기 진동을 모사하고 그 결과를 다른 결과들과 비교하였다. 이 문제에서는 유체의 유입 방향에 대해 수직 방향의 운동 자유도만 고려되었다. 그림 1은 이 문제에 대한 개략도이다.

다른 계산결과와의 비교를 위해 Ahn et al.[10]에 의해 보고된 경우와 동일한 변수들이 적용되었다. M_{red} 는 2로 고정되었고 U_{red} 는 3~8 사이에서 변화 되었으며 스프링에 의한 감쇠는 무시 되었으며 Reynolds 수는 150으로 주어졌다. 배후

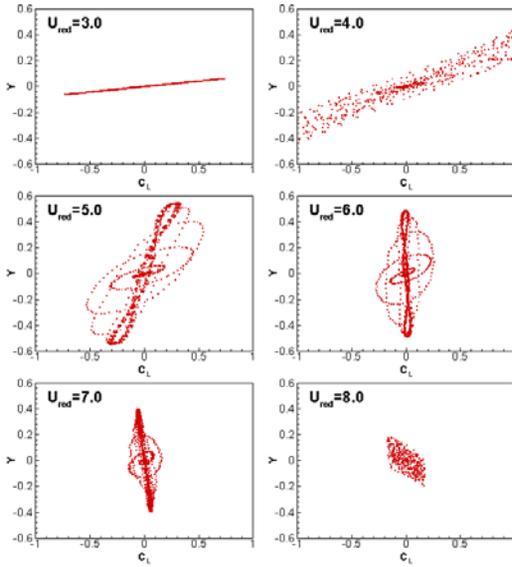


Fig.3 Variation of the phase between the lift and the displacement according to the structural stiffness

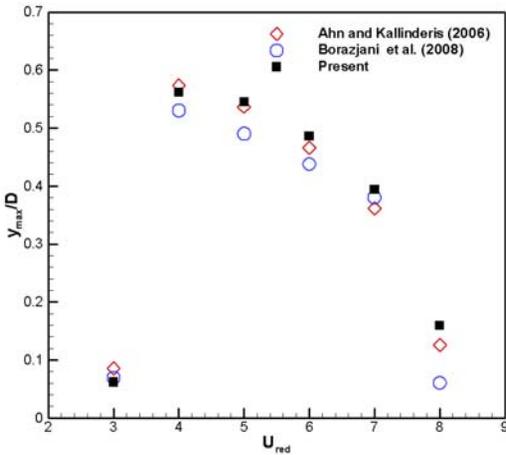


Fig. 4 Comparisons of variation of the amplitude of vibration according to the structural stiffness

격자계의 원주 주위, $-2 < x < 4$, $-2 < y < 2$ 에서는 직경의 0.01배의 최소 격자 간격이 유지 되었으며 이후 1.02의 비율로 점차 확대 되었다.

그림 2는 U_{red} 가 3, 5, 및 8일 때의 순간 와류 분포를 보여준다. 원주 중심 주위에 표시된 점선은 원주의 운동 궤적을 보여준다. U_{red} 가 3이나 8일 경우에는 고정된 원주 주위의 박리와 유사한 와류 분포를 보이나 U_{red} 가 5인 경우에는 구

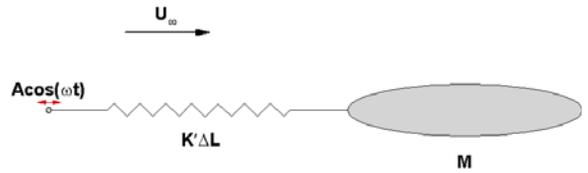


Fig. 5 Schematic diagram for the fluid-structure interaction of a towed body

조물의 진동과 와류의 박리가 동기화 되는 lock-in 현상이 발생하는 경우의 특징적인 와류 분포를 보이고 있다. 진동 이론 으로부터 외력과 변위의 위상차는 공진 점에서의 값인 90° 를 기준으로 강성이 증가하면 감소하고 강성이 감소하면 증가한다는 사실이 알려져 있다. 그림 3은 U_{red} 의 변화에 따라 작용 유체력과 원주의 변위 사이에 발생하는 위상차의 변화를 보여준다. 다른 조건이 동일하고 U_{red} 만 변화하는 경우는 다른 물리적 변수들이 고정된 상태에서 스프링의 강성계수 K 의 변화를 의미하며 U_{red} 가 작은 경우가 강성이 큰 경우에 해당한다. 그림으로부터 공진의 경우보다 강성이 큰 $U_{red}=3$ 에서는 90° 보다 작은 위상차를 가지고 있으나 $U_{red}=8$ 에서는 90° 보다 큰 위상차를 보임을 관찰할 수 있다. U_{red} 에 따른 위상차 변화 및 양력·변위 관계는 Ahn et al.[10]에 의해 보고된 결과와 좋은 일치를 보인다. 그림 4에서는 U_{red} 변화에 따른 원주 진동의 진폭 변화를 Borazjani et al.[9]와 Ahn et al.[10]의 결과와 비교하였다. 본 계산 결과에서는 $U_{red}=3$ 에서 작은 진폭의 진동이 발생하다 $U_{red}=4$ 에서 급격히 진폭이 증가하며 이 후 완만한 감소를 보인다 $U_{red}=8$ 에서는 급격히 감소하는 변화를 보인다. 그림으로부터 세 가지 계산 결과들이 모두 lock-in 영역은 U_{red} 가 4에서 7사이의 영역이며 최대 진폭은 직경의 약 0.55배가 되는 유사한 lock-in 현상을 예측함을 관찰 할 수 있다.

5. 예인삭에 의해 예인되는 물체의 거동 모사

개발된 코드는 예인삭에 의해 예인되는 물체의 비정상 거동 예측에 적용되었다. 그림 5는 이 문제에 대한 개략도를 보여준다. 모든 길이는 예인되는 물체의 길이로 무차원화 되었으며 물체의 형상은 길이와 폭의 비가 0.2인 타원 형태로 주어졌다. 물체가 연결된 예인삭의 다른 쪽 끝단은 평균속도 U_∞ 로 전진한다.

실제 예인 과정에서는 파랑 혹은 예인선 및 부선의 중동요 및 상하동요 등에 의해 예선과 부선에서 예인삭이 연결되는

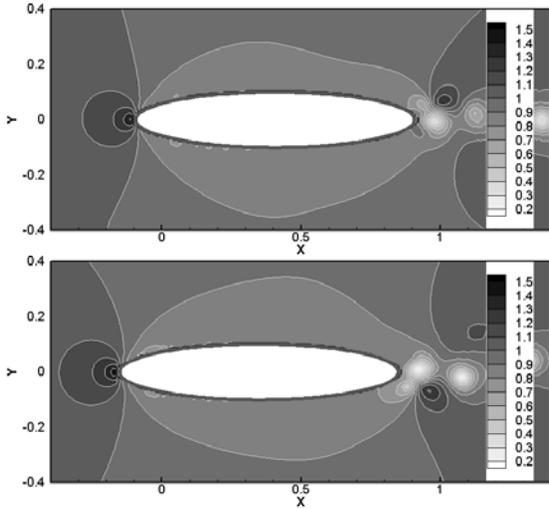


Fig. 6 Instantaneous pressure fields around the towed body at $t = 17.5$ (above) and 23 (below), $U_{red} = 5$

점들 사이 거리에 교란이 발생한다. 문제의 단순화를 위해 물체의 운동 자유도는 전진방향의 병진운동만 고려하고 예인삭의 끝단에서 주기적인 교란이 변위의 형태로 발생한다고 가정하였다.

예인삭은 유연성이 있는 케이블로서 일정 범위 내의 인장력은 지탱할 수 있으나 압축력은 전달하지 못한다. 인장력 P 가 작용하고 길이 L 인 예인삭의 단면적과 등가 탄성 계수 (Young's modulus)가 A 와 E 인 경우 예인삭의 변형량 ΔL 는 선형의 범위에서 $PL/(AE)$ 로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 예인삭에 작용하는 힘은 예인삭의 두 끝점 사이의 거리가 원래의 길이 L 보다 ΔL 증가하는 경우에는 비례상수 K 로 변형량에 비례하는 장력이 발생하고 두 끝점 사이의 거리가 원래의 예인삭 길이 L 보다 작아지는 경우에는 장력이 영이라고 가정하였다. 이 경우 장력 \vec{F} 는 다음 식으로 표현된다.

$$\vec{F} = K \frac{(\Delta L + |\Delta L|)}{2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (7)$$

여기서 \vec{r} 은 물체에 예인삭이 연결되는 점으로부터 예인삭의 다른 끝점을 행하는 벡터이다. 식 (7)의 비례상수 K 는 예인삭의 단면적과 탄성 계수가 같다면 예인삭의 길이 L 이 증가할수록 작아지게 된다. 예인삭 내부의 구조적인 감쇠는 물체의 운동에 의해 발생하는 주위 유체에 의한 감쇠에 비해 무시할 수 있다고 가정하였으며 앞 장에 서술된 바와 동일한 과정으로 무차원화 및 유체-구조 연성 기법을 적용하였다. 무차원화 된 질량계수 M_{red} 는 2로 주어졌고 예인삭의 강성과

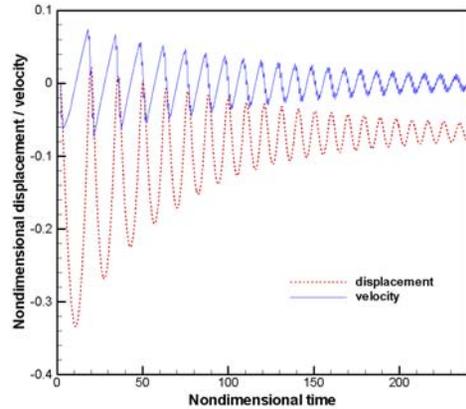


Fig. 7 Time histories of the displacement and velocity of the towed body, $U_{red} = 5$

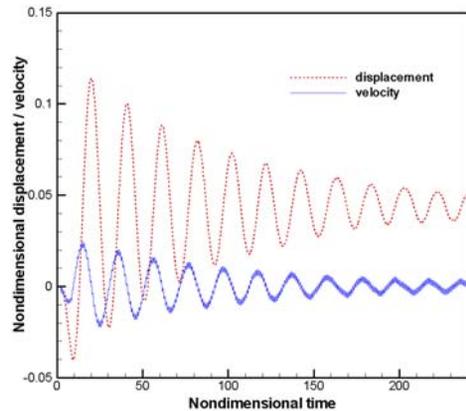


Fig. 8 Time histories of the displacement and velocity of the towed body, $U_{red} = 20$

관련된 계수 U_{red} 는 다양한 값이 적용되었다. 물체의 길이와 평균속도를 기저로 한 Reynolds 수는 10^5 로 주어졌다. HCIB 법도 다른 경계 비정합 기법들과 유사하게 경계층 내 속도의 급격한 변화를 정확히 추적하기 위해서는 격자 조밀도 요구가 증가하며 이러한 어려움은 Reynolds 수의 증가에 따라 커진다. 그러나 본 문제의 경우 유체의 가속에 의한 부가질량 효과 및 예인삭의 탄성력이 커서 계산 결과의 배후격자 조밀도에 대한 의존도를 비교적 쉽게 감소시킬 수 있다. 예인삭 끝단의 변위 교란의 진폭은 0.1, 교란의 무차원화 된 주기는 1로 주어졌다. 초기에 무차원화 된 시간 0.5동안 유입유동이 선형적으로 증가하고 무차원화 된 시간이 2가 되면 예인삭 끝단의 변위 교란이 시작된다.

그림 6은 물체의 운동 과정 중 무차원화 된 시간이 17.5와 23에서의 압력분포를 보여준다. 시간이 17.5 인 경우는 물

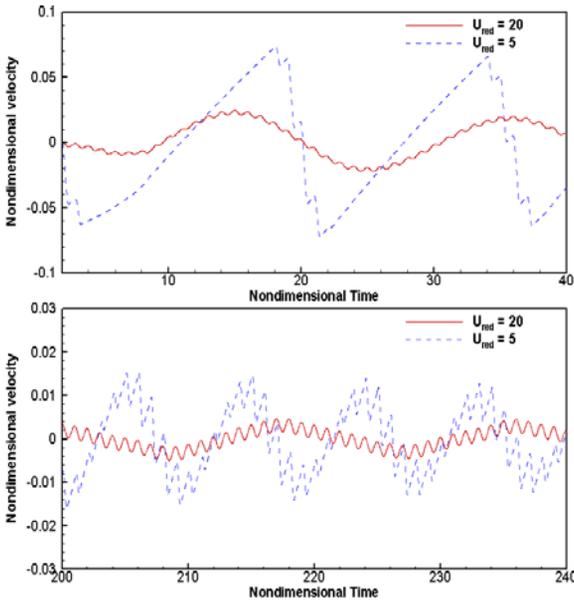


Fig. 9 Comparison of the time histories of nondimensional velocity for $U_{red} = 5$ and 20

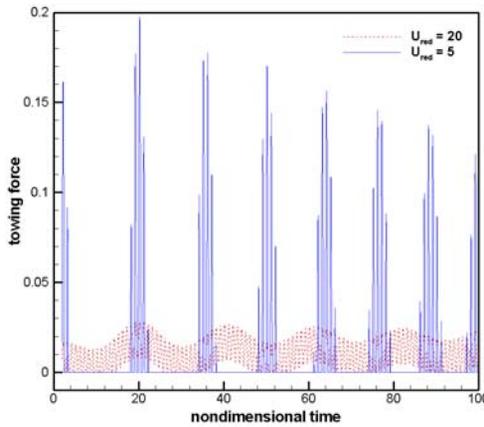


Fig. 10 Comparison of time histories of the tension acting on towing cables of different stiffness

체가 유체력에 의해 뒤로 밀려나고 있는 중이며 시간이 23인 경우에는 예인삭에 의해 당겨져서 다시 앞으로 전진하고 있는 중이다. 물체의 속도 및 가속도의 영향으로 물체 선단에서의 압력의 크기가 변화하고 있으며 와류가 박리되어 후류로 진행함을 관찰할 수 있다.

그림 7과 8은 U_{red} 가 각각 5와 20인 경우에 예인되는 물체의 변위와 속도의 시간이력을 보여준다. 앞서 언급된 바와 같이 다른 조건들이 동일한 경우 큰 U_{red} 는 강성이 작은 즉

긴 예인삭에 해당한다. 초기 교란이 사라지고 수렴되어 가는 동안에는 변위는 긴 예인삭(그림 8)의 경우가 크며 속도는 두 경우 모두 영으로 수렴해 나간다.

그림 9에서는 초기와 수렴되어 가는 과정에서 길이가 다른 예인삭들의 경우에 대한 속도의 시간이력이 비교되었다. 물체의 진동이 감쇠된 후에는 두 경우 모두 예인삭 끝단의 교란이 물체의 운동 속도에 영향을 주고 있다. 예인삭이 긴 경우에는 초기에도 물체의 속도에 예인삭 끝단 교란의 영향이 나타나고 있으나 짧은 예인삭의 경우에는 당겨지는 시간의 일부 동안에만 교란 효과가 발생한다. 이러한 사실은 강성이 큰 짧은 예인삭의 경우 물체 저항에 의한 변형량 자체가 작아서 큰 장력에 의해 물체가 당겨지면 예인삭의 원래 길이 보다 가까이 물체가 당겨지면서 장력이 발생하지 않는 시간이 발생함을 의미한다. 이에 따라 속도나 변위의 시간변화가 조화 함수 형태와 달리 천천히 밀려나다 어느 순간부터 급격히 당겨지는 형태로 나타난다.

그림 10에서는 유체-구조 상호작용 해석 과정에서 예측된 예인삭에 작용하는 장력의 시간이력이 비교되었다. 그림 9에서 예측되었듯이 짧은 예인삭의 경우 장력이 상당 시간 작용하지 않다가 큰 장력이 단속적으로 작용하는 스프링이 발생함을 관찰할 수 있다. 이러한 계산 결과는 예인되는 부선의 조종성 악화에도 예인삭의 길이가 일정 수준 이상이어야 하고 특히 파랑 등에 의한 교란이 심한 외해에서 더 긴 예인삭이 사용되어야 한다는 관측 사실들을 뒷받침한다.

6. 결론

본 연구를 통하여 HCIB 법과 FDS 기법을 이용한 유동해석 코드가 유체-구조 상호 작용을 고려할 수 있도록 확장되었다. 다음 시간 단계에서의 구조물의 속도 및 변위가 고려되어 감쇠력 및 탄성력이 예측되도록 하는 연성 기법은 효율적인 유체-구조 연성 계산을 가능하게 함을 확인하였다. 탄성 지지된 원주의 lock-in 현상에 대한 다른 계산 결과들과의 비교에서 본 계산 결과는 스프링 강성에 따른 위상차 변화 및 최대 진폭의 변화에서 좋은 일치율을 보임을 확인하였다.

예인삭에 의해 예인되는 물체의 거동을 모사하기 위해 인장 시에만 장력이 전달되도록 하는 예인삭의 장력 모델링이 제안되었다. 제안된 장력 모델링을 이용하여 예인삭에 의해 예인되는 물체의 유체-구조 연성 해석을 수행하고 예인삭의 길이 변화에 따라 예인삭에 발생하는 장력의 시간이력을 비교하였다. 그 결과 동일한 조건하에서 예인삭의 길이가 짧아질수록 예인삭의 장력이 단속적으로 크게 발생하는 스프링이 초래됨을 관찰하였다.

후 기

본 연구는 예부선의 사고분석 및 예방기술 개발 (KORDI/MOERI) 과제의 지원으로 수행되었습니다. 귀 기관의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2005, Gilmanov, A. and Sotiropoulos, F.A., "A hybrid Cartesian/immersed boundary method for simulating flows with 3D, geometrically complex, moving bodies," *J. Comput. Phys.*, Vol.207, pp.285-294.
- [2] 2007, Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C., Kim, Y.J. and Goo, J.S., "Computations of flow over a flexible plate using the hybrid Cartesian/immersed boundary method," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol.55, pp.263-282.
- [3] 2007, 신상목, "HCIB법을 이용한 변형하는 평판 주위의 3차원 유동해석," *한국전산유체공학회지*, 제12권, 제1호, pp.1-8.
- [4] 2001, Kim, J., Kim, D. and Choi, H., "An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometry," *J. Comput. Phys.*, Vol.171, pp.132-150.
- [5] 2009, Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C. and Kim, Y.J., "Effects of flexibility on the propulsive force acting on a heaving foil," *Ocean Engineering*, Vol.36, pp.285-294.
- [6] 2011, Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C., Kim, Y.J. and Yoon, H.K., "Simulation of free surface flows using the flux-splitting scheme on the hybrid Cartesian/immersed boundary method," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, accepted, DOI: 10.1002/flid.2519.
- [7] 2010, 신상목, 김인철, 김용직, "Roe의 flux-difference splitting 기법을 이용한 자유표면 유동 모사," *대한조선학회논문집*, 제47권, 제1호, pp.11-19.
- [8] 1983, Duncan, J.H., "The breaking and non-breaking wave resistance of a two-dimensional hydrofoil," *J. Fluid Mech.*, Vol.126, pp.507-520.
- [9] 2008, Borazjani, I., Ge, L., Sotiropoulos, F., "Curvilinear immersed boundary method for simulating fluid-structure interaction with complex 3D rigid bodies," *J. Comput. Phys.*, Vol.227, pp.7587-7620.
- [10] 2006, Ahn, H.T., Kallinderis, Y., "Strongly coupled flow/structure interactions with a geometrically conservative ALE scheme on general hybrid meshes," *J. Comput. Phys.*, Vol.219, pp.671-696.