

주기 회전하는 원형주상체 주위 층류 유동장의 수치 시뮬레이션

문 진국*, 박 종천*, 전 호환*

*부산대학교 조선해양공학과

Numerical simulation on laminar flow past an oscillating circular cylinder

JIN-KOOK MOON*, JONG-CHUN PARK*, HO-HWAN CHUN*

*Dept. of NAOE, Pusan National University

30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan, Korea

KEY WORDS: oscillating Circular Cylinder, CFD, Vortex Shedding, Laminar Flow, Statistics on a Cylinder Surface

ABSTRACT: The effect of oscillating on the unsteady laminar flow past a circular cylinder is numerically investigated in the present study. Our study is to analyze the vortex formation behind a circular cylinder for different rotary oscillation conditions. And then we are study to portray the unsteady dynamics of wake flows. We decide lock-on region by observing the phase switching phenomena We classify the vortex formation patterns in the primary lock-on region. The present study is to identify the quasi-periodic state around lock-on region. At the boundary between lock-on and non-lock-on. the shedding frequency is bifurcated. After the bifurcation, one frequency follow the forcing frequency (S_f) and the other returns to the natural shedding frequency (S_0). In the quasi-periodic state, the variation of magnitudes and relevant phase changes of C_L with forcing phase are examined.

1. 서론

실린더 후류(wake flow) 영역에서의 보오텍스(vortex)와 shedding에 관한 연구는 형상의 단순함 뿐만 아니라 공학적 응용의 중요성 때문에 유체역학에서 가장 중요한 문제들 중 하나로 다루어져 왔다 (Braza et al., 1986; Mittal & Balalchandar, 1994; Williamson, 1996; 신, 2000; 김&서, 1998).

원형 실린더 주위에서 발생하는 카르만 보오텍스의 발달에 의한 항력 및 양력의 주기적인 변화는 구조물의 진동이나 소음을 야기하며 구조물 설계시 강도상의 문제에 큰 요인으로 작용하기도 한다. 또한, 이로 인해 구조물의 수명에 영향을 주게 된다. 따라서, 보오텍스의 주기적인 발달에 대한 유동제어는 실용 공학적 측면에서 매우 중요하다. 이로 인해, 다양한 제어방법들을 다룬 연구들이 진행 되어져 왔다(Sung, et al 1994a; Sung, et al 1994b; Kwon & Choi, 1996; Beak & Sung, 1998; Kang et al., 1999; 김광수 등 2003). 그 중 원형주상체의 주기 회전을 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 원형주상체를 먼저 반 시계 방향으로 회전시키고 그때 원형주상체의 위쪽이 감속 되면서 박리가 잘 일어 나게 된다. 그 반대로 실린더의 아래쪽은 가속되어 박리가 잘 일어 나지 않게 된다. 다시 말하면 원형주상체의 주기 회전은 보오텍스의 shedding과 그 형식에 큰 변화를 준다는 것을 의미한다.

원형주상체의 주기 회전에 대한 실험적인 연구는 다음과 같다. Taneda(1978)는 $30 \leq Re \leq 330$ 에서, 아주 높은 주기 회전일 경우 보오텍스 shedding 과정이 거의 사라지는 것을 관찰하였다. Tokumaru & Dimotakis(1991)는 $Re = 1.4 \times 10^4$ 의 아주 큰 레이

놀즈수에 대한 실험결과 항력이 줄어든다는 사실을 발견 하였다. Filler et al.(1991)의 경우 작은 진폭과 주기 회전을 하는 경우에서 실험하여 카르만 보오텍스 진동수와 비슷한 진동수로 주기회전 할 경우 전단면에서의 큰 속도 변화로 인해 아주 큰 응답이 나타나는 사실을 관찰하였다. 최근 이런 주기 회전에 대한 연구 중 보오텍스 진동수와 원형주상체 주기회전의 진동수에 따른 원형주상체 주변의 반류변화와 그 제어에 관한 연구가 많다. Van Atta & Gharib(1987)는 아주 작은 원형주상체의 진동이 한 쌍의 원형주상체 후류의 응답을 만든다는 사실을 알아내었다. 이때 속도 스펙트럼은 고유 shedding 진동수(S_0)와 주기 회전 진동수(S_f)의 합이나 차의 복잡한 형태로 상호 관련되어 중요한 최고값(peak)을 갖게 된다. 단 Chaos의 경우에는 서로 다른 쌍의 응답들이 합쳐지고 바뀌어 지면서 그 속도 스펙트럼 영역이 넓혀진 경우다. Karniadakis & Triantafyllou (1989)는 수치적인 시뮬레이션을 통해 후류 응답의 준주기(quasi-periodic) 상태와 Chaos의 경우에 대해서 여러 최고값들의 스펙트럼과 그 주기적 위상이 다르다는 것을 이용하여 각각의 영역을 정의 하였다. Baek & Sung(1997)은 기본적인 lock-on영역에서 보오텍스의 형상을 분류고 shedding 주기의 위상이 바뀌는 현상을 수치적으로 연구하였다. 또한 Baek & sung(1999)은 기본적인 lock-on 영역 외부에서 주기 회전 진동수가 lock-on 영역에 가까워질수록 강제 진동수와 고유 shedding 진동수의 위상차는 아주 작아지게 되고 그 크기도 거의 같게 된다는 것을 보고하였다.

기본 lock-on 현상에 연구는 많은 연구자들에 의해 연구되어져

왔다(Koopman 1967; Stansby 1976; Ongoren & Rockwell 1988; Karniakakis & Triantafyllou 1989; Griffin & Hall; Filler, Marston & Mih 1991; Gu, Chyu & Rockwell 1994; Baek & Sung 1998, 2002, 2001). Lock-on의 외부경계는 준주기로 그 성격을 규정 지을 수 있다. 단순히 한 주기로 원형주상체를 주기회전 시켰다고 할지라도 주기의 어떤 분기점을 후에는 원형주상체의 반류는 여러 진동 성분이 복합적으로 나타나는 것을 뜻한다. 이것을 '준주기성'이라 하고 그 상태는 스스로 사라지거나 그렇지 않고 계속 어떤 주기를 가진다는 것을 뜻한다. 이 주기적 상태의 푸리에 급수는 중요 진동수의 정수배가 되는 곳에서 δ -function으로 나타낼 수 있다. 다시 말해서 준주기적 상태를 여러 다른 진동수로 주기 운동을 하는 결합에 대한 것으로 생각할 수 있다. 하지만 연속적으로 넓은 범위의 성분을 갖는 Chaos와는 달리 준주기 상태는 일정한 성분만을 포함하고 있다는 것이 Chaos와는 다른 점이다 (Ott 1993).

이런 선행 되어진 연구를 토대로 하여, 이번 연구에서는 먼저 주기 회전하는 원형주상체에서의 보오텍스 형상에 관한 분석을 하였다. 그렇게 하여 비정상유동에서의 원형주상체의 후류에 대해 해석하였다. 그리고 주기 회전 진동수와 고유 shedding 진동수의 관계를 통하여 lock-on 영역에 대한 정의를 하였다. 이때 고유 shedding 진동수를 양력계수의 주기를 통해서 구하였다. 그런 후에 lock-on 영역 근처의 준주기 상태에 대해서도 정의 하였다. lock-on 영역을 벗어나면 shedding 진동수(St_h)가 맥놀이 현상을 보이게 되고 이 현상은 lock-on 영역을 중심으로 하여 거의 대칭적 형상을 띄는 특징을 보인다. lock-on 영역 주변에서의 이런 shedding 진동수의 변화는 후류의 변화에 의해서 새로운 형태의 진동수가 나타나기 때문이다. 여기서 lock-on과 non-lock-on 영역과의 경계는 진동수의 분리이다. 분기점 이후로 한 진동수는 주기 회전 진동수와 비슷해져가고 다른 진동수는 오히려 고유 shedding 진동수와 비슷해 진다는 것이다.

본 연구에서는 주기 회전하는 원형주상체 후류에서의 비정상유동 흐름에 대해 $Re=110$ 으로 고정하여 수치 연구를 하였다. 레이놀즈수가 비교적 작은 영역($Re \leq 47$)에서는 정상상태 유동으로 카르만 보오텍스와 같은 현상이 일어나지 않고, 큰 레이놀즈수의 영역($Re > 200$)에서는 3차원 효과가 나타나기 때문이다 (Williamson 1996). 이때 고유 shedding 진동수는 $St_h = 0.171$ 이고 강제 진동수 $S_f = f^0 D / U_\infty$ 로 정의하여 수치계산을 하였다. 그리고 $Re=110$ 으로 Baek & Sung (1997, 1999, 2000)의 선행 되어진 연구에서와 같은 레이놀즈수를 사용하여 수치해석을 함으로써 본 연구에서 사용된 유한체적 해석법이 주기 회전하는 원형주상체 주변의 유동을 정확하게 해석한다는 근거를 마련하고자 한다.

2. 수치해석법

2.1 유한체적법

비압축성 유동장을 풀기 위한 지배방정식은 다음과 같은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u}\mathbf{u} = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla \cdot [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

여기서, \mathbf{u} 는 속도벡터, t 는 시간, ∇ 은 구배 연산자, P 는 압력을 밀도로 나눈 값으로 정의되며, Re 는 레이놀즈 수를 각각 나타낸다.

검사체적을 V , 이 체적을 구성하는 면요소의 면적벡터를 S_m 으로 하여 식(1)의 양변을 검사체적 내에서 체적 적분한다. Gauss의 정리를 이용하여 체적적분의 일부를 검사체적의 표면적분으로 변환하여 다음 식을 얻는다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \mathbf{u} dV = \int_S \bar{\mathbf{T}} \cdot d\mathbf{S} \quad (3)$$

$$\int_S \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (4)$$

여기서, $d\mathbf{S}$ 는 면적벡터이며 미소면적요소 dS 에 폐곡면 S 의 바깥쪽을 향하는 법선 벡터 \mathbf{n} 을 곱한 $\mathbf{n}dS$ 이다. $\bar{\mathbf{T}}$ 는 응력 텐서이고 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{T}} &= -\mathbf{u}\mathbf{u} - P\bar{\mathbf{I}} + \frac{1}{Re} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] + \overline{u'u'} \\ &= \bar{\mathbf{C}} + \bar{\mathbf{P}} + \bar{\mathbf{D}} \end{aligned} \quad (5)$$

각 항의 의미는, $\bar{\mathbf{C}}$ 는 이류항, $\bar{\mathbf{P}}$ 는 압력항, $\bar{\mathbf{D}}$ 는 확산항이다.

지배변수의 정의 위치는 격자중심에 배치하고, 속도와 압력점 모두를 검사체적의 중심에 정의한다. 따라서, 속도와 압력의 커플링은 Rhie & Chow(1983)의 방법을 따른다. 수치해석법의 내용은 박 등(2003a; 2000b)을 참조할 수 있다.

격자계로, 본 방법에서는 Fig. 1과 같이 중첩격자계를 사용한다.

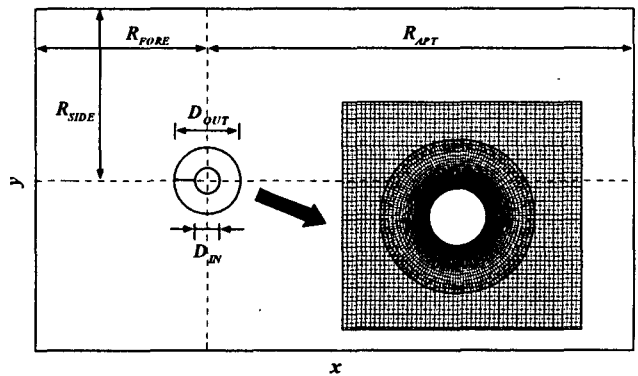


Fig. 1. Using F-grid and C-grid for solving the laminar flow past a rotating circular cylinder