

생체모방 유동제어 기반 가변 피치 나선형 실린더 주위 유동 해석

문자훈·윤현식[†]
부산대학교 조선해양공학과

Numerical Simulation of Flow around Variable Pitch Helically Elliptic Twisted Cylinder based on the Biomimetic Flow Control

Jahoon Moon·Hyun Sik Yoon[†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The new geometric disturbance is proposed to control the flow around the bluff body. The new geometry is characterized by the variable pitch which is applied on the Helically Elliptic Twisted (HET) cylinder. The performance of the HTE geometry as a biomimetic passive flow control was confirmed by Jung and Yoon (2014). The Large Eddy Simulation (LES) is used for the evaluation of the flow control performance of the Variable Pitch HTE (VPHTE) cylinder at Reynolds number (Re) of 3000 corresponding to the subcritical regime. The circular and HTE cylinders are also considered to compare the performance of the VPHTE cylinder at the same Re . The VPHTE cylinder gives the smallest values of the force coefficients than the circular and HTE cylinders. The drag and lift coefficients of the VPHTE cylinder are about 15.2% and 94.0% lower than those of the circular cylinder, respectively. Especially, the VPHTE cylinder achieves about 2.3% and 30.0% reduction of the drag coefficient and the root mean square of the lift coefficient than the HTE cylinder, respectively. Furthermore, The VPHTE cylinder forms more elongated and stabilized separated shear layer than the circular cylinder, which supports the reduction of the force coefficients.

Keywords : Variable pitch(가변 피치), Helically Twisted elliptic cylinder(나선형 타원 실린더), Flow control(유동제어)

1. 서론

최근 심해 해양자원 개발의 필요성이 지속적으로 강조됨에 따라 더욱 극한의 환경에서 심해 해양자원 개발이 진행되고 있으며, 이로 인해 극한 환경에서 안정성을 보장받는 해저 자원 개발용 파이프라인(pipeline) 및 라이저(riser) 등의 개발 필요성이 대두되고 있다. 위와 같은 구조물은 뭉툭한 형상을 이루고 있음에 따라 주기적인 와류림(vortex shedding)이 발생하며, 이는 지속적인 양력의 섭동 및 항력과 같은 외부 유체력을 유발한다. 주기적인 양력의 섭동은 구조물에 와류기진동(vortex induced vibration, VIV)을 유발할 뿐 아니라 피로파괴의 위험성을 증가시킨다. 해양 구조물을 비롯한 다양한 산업에 운용되는 다수의 구조물은 뭉툭한 형상을 가지기에, 위와 같은 유체력을 제어하기

위한 연구가 다수의 연구자에 의해 오랜 기간 진행되어 왔다(Chen & Kim, 2010; Choi et al., 2008; Holmes & Owen, 2006; Owen et al., 2001; Yoon et al., 2006).

구조물 주위 유체력을 감소시키기 위한 방법으로 작동 중 지속적인 에너지를 요구하는 자동 제어 기법과 별도의 에너지를 요구하지 않는 수동 제어 기법이 존재한다. 다양한 수동제어기법 중 하나로 구조물의 형상을 변화시킴으로 인해 후류 유동의 안정성을 확보하는 방법이 있다. 대표적인 예로 축방향(spanwise) 형상 변화를 준 파형 실린더(wavy cylinder)가 있으며 이에 해당하는 선행 연구는 다음과 같은 것들이 있다(Ahmed & Bays-Muchmore, 1992; Lam et al., 2004(a); Lam et al., 2004(b); Zhang et al., 2005; Lee et al., 2009; Kim & Yoon, 2018). 위 연구들을 통해 파형 실린더가 우수한 항력 감소나 양력 섭동의 억제와 같은 유

동 제어 성능을 가짐이 밝혀졌다. 또한 파형에 비대칭성을 적용시킨 비대칭 파형 실린더(asymmetric wavy cylinder)가 Yoon et al. (2017)에 의해 처음으로 제시되었고 비대칭 정도에 따른 유동 제어 성능이 평가되었다.

양력 섭동을 제어하기 위한 또 다른 수동제어 기법 중 하나로 나선형 스트레이크(helical strake)를 길이 방향으로 형상의 변화가 없는 실린더에 부가물로 부착하는 방법이 있으며, 이는 와홀림에 의한 와류기진동을 상당히 억제시키는 것이 다음과 같은 연구들로 인해 입증되었다(Zdravovich, 1981; Chyu & Rockwell, 2002). 이러한 나선형 스트레이크의 메커니즘을 바탕으로 타원형 실린더가 길이방향으로 나선형을 이루며 형상화된 트위스트 실린더가 Jung & Yoon (2014)에 의해 고안된 바 있으며, 이러한 트위스트 실린더는 아임계(subcritical) 영역의 레이놀즈 수(Reynolds number, Re)범위에서 원형 실린더 대비 항력이 약 13% 감소함을 보고하였다. 특히, Jung & Yoon (2014)이 연구한 트위스트 실린더 형상은 수선화줄기의 형상을 모방하였으며, 이를 통해 수선화줄기의 항력 및 양력섭동성분 감소 관련 메커니즘을 처음으로 규명하였다. 또한, Kim et al. (2016)은 $Re = 100$ 및 $Re = 3900$ 에서 트위스트 실린더의 주기성이 주변 유동장에 미치는 영향을 수치적으로 조사하였다. 위와 같은 여러 형상 변화를 적용한 실린더들은 상당한 양력 섭동 및 항력을 낮추는 결과를 보였고, 이로 부터 다양한 수동 유동제어 파라미터들이 정립되었다.

다양한 형상 변화를 통한 수동제어 파라미터들의 유동제어 성능이 검증되어 왔지만, 이들의 조합이 유도할 수 있는 유동제어 성능에 대한 연구는 활발히 진행되지 않고 있다.

본 연구에서는 여럿 밝혀진 수동제어 파라미터 중 서로 다른 것들을 조합하여 그 성능을 확인해보고자 하였고, 이를 형상의 비대칭성과 나선형 구조의 조합을 통해 검증하고자 하였다. 따라서 트위스트 실린더의 단면이 $0\sim 360^\circ$ 까지 회전하는 도중 피치를 변화시킨 가변 피치 트위스트 실린더를 고안하였다. 이 실린더를 대형와모사법(Large eddy simulation, LES)을 이용해 $Re = 3000$ 에서 해석을 수행하였다. 위 영역은 아임계 영역에 해당하여 실린더 표면 경계층은 층류의 특성을 갖지만 후류영역에서는 완전히 발달된 난류 특성을 갖는다. 가변 피치 트위스트 실린더의 성능 검증을 위해 원형 실린더와 기존의 트위스트를 같은 조건에서 해석하여 각 유동들의 정성적 정량적으로 비교하였다.

2. 수치해석 상세

2.1 수치해석방법

본 연구에서 난류모델로 고려한 대형와모사법이 적용되어진 비압축성 뉴턴 유체에 대한 연속 방정식 및 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

여기서, t 는 시간을 나타내며, u_i 는 x_i 의 직교좌표계를 따르는 방향의 속도 성분이고, p 는 압력, 변수 위의 바(bar)는 격자 필터링을 통해 얻어진 대형 스케일의 값을 나타낸다. τ_{ij} 는 subgrid 스케일의 응력 텐서를 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \tag{3}$$

이때, τ_{ij} 는 Germano et al. (1991)이 제시한 dynamic Smagorinsky 모델을 이용해 구하였다. 지배방정식은 유한 체적법 기반으로 이산화 되었으며, 이산화 방법으로는 시간 및 공간에 대해 각각 2차 implicit 방법과 중앙 차분법을 각각 이용하였고 속도와 압력의 연성을 위해 SIMPLE(Semi-implicit method for pressure linked equation) 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 수치해석 기법들은 저자들이 속한 실린더 주위 유동 해석 관련 연구들에 성공적으로 도입된 바 있다. 따라서 수치해석과 관련된 상세한 내용은 다음 선행 연구를 참고하여 확인할 수 있다 (Jung & Yoon, 2014; Wei et al., 2016; Yoon et al., 2017; Kim & Yoon, 2018).

2.2 해석모델

본 연구에서는 원형 실린더와 트위스트 실린더, 가변 피치 트위스트 실린더를 고려한다. Fig. 1은 위 실린더들의 형상을 나타내며 Fig. 2는 트위스트 실린더의 축방향 단면을 나타낸다.

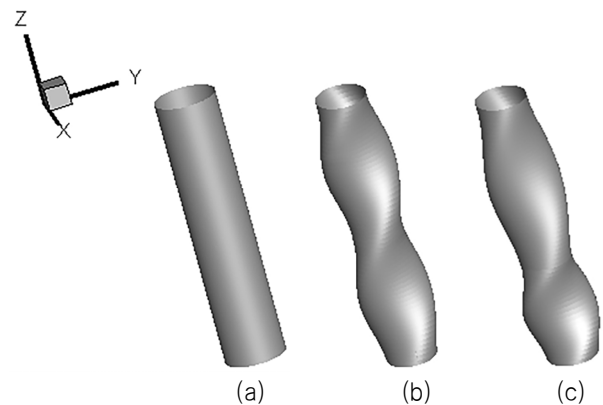


Fig. 1 Geometries of different cylinders; (a) circular, (b) twisted, and (c) variable pitch twisted.

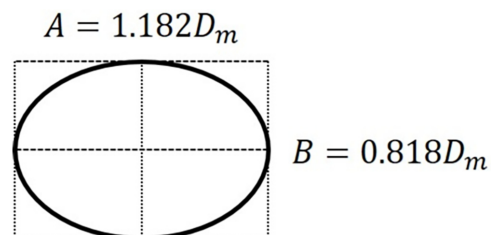


Fig. 2 Axial(z) section of twisted cylinders.

원형 실린더는 직경 D 를 가지며 축방향의 단면 형상 변화는 없다. 트위스트 실린더는 타원 형상의 단면을 가지며 축을 따라 $0\sim 360^\circ$ 까지 회전하며 나아간다. 단면이 회전하며 나아가는 거리인 피치(pitch)는 Jung & Yoon (2014)과 동일한 값인 $L = 4.55D_m$ 을 사용하였다. 이때 D_m 은 트위스트 실린더의 장축(A)과 단축(B)에 대한 평균 길이로 식 (3)과 같이 정의된다. 이는 원형 실린더의 직경(D)과 동일하다. 이때 장단축의 길이는 Jung & Yoon (2014)에서 사용된 조건과 동일하게 설정하였다.

식 (4)는 단면의 회전 각도에 따른 트위스트 실린더의 형상을 정의하고 있다. 또한, 트위스트 실린더의 축방향 중심까지의 거리를 λ 라 한다면 $L = 2\lambda$ 이고, 실린더의 형상과 축방향 거리에 따른 단면 회전 각도는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$D_m = \frac{A+B}{2} \tag{3}$$

$$\frac{(x \cos \phi + y \sin \phi)^2}{A^2} + \frac{(x \sin \phi + y \cos \phi)^2}{B^2} = \frac{1}{4} \tag{4}$$

$$\phi = \frac{\pi z}{\lambda} \tag{5}$$

가변 피치 트위스트 실린더도 단면의 형상과 축방향 길이는 트위스트 실린더와 동일하다. 하지만, 단면이 $0\sim 180^\circ$ 회전하며 나아가는 구간과 $180\sim 360^\circ$ 회전하며 나아가는 구간의 피치가 서로 다르다. 즉, 단면이 180° 회전하였을 때 피치가 변하게 되며 짧아진 피치와 길어진 피치의 양은 동일하게 하였다. 기존 피치와 피치의 변화량의 비를 가변피치비(Variable pitch ratio, VP)라 정의하였고, 기존 피치를 P 변화된 피치를 P_V 라 하였을 때 VP 는 식(6)과 같이 계산된다.

$$VP = \frac{|P - P_V|}{P} \tag{6}$$

가변 피치 트위스트 실린더의 단면이 짧은 피치를 갖는 상태로 나아간 거리를 λ_S , 피치가 긴 상태 영역에서 단면이 나아간 거리를 λ_L 라고 할 때, 실린더 단면 형상은 식 (4)과 동일하고 축방향 거리에 따른 단면 회전 각도는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\phi = \begin{cases} \phi_1 = \frac{\pi z}{\lambda_S} & (z \leq \lambda_S) \\ \phi_2 = \pi \left(1 + \frac{z - \lambda_S}{\lambda_L} \right) & (\lambda_S < z \leq \lambda_L) \end{cases} \tag{7}$$

2.3 해석영역 및 경계조건

Fig. 3은 해석영역을 나타내고 있다. 유체의 유입 방향은 x 방향이며 실린더 상류 방향으로 $10D_m$, 하류 방향으로 $20D_m$ 의 거리를 이루고 있으며, 상부와 하부방향으로는 각각 $10D_m$ 으로 동일하다. 실린더 축방향 거리는 가변 피치 실린더의 축방향 길이

와 동일한 $4.55D_m$ 으로 설정하였다.

경계조건으로 입구 조건은 무차원화 된 x 방향 속도만 존재하며 크기는 1로 $U_\infty = 1$ 인 균일유동을 고려하였고, 출구 조건은 Jung & Yoon (2014)과 동일한 대류 경계조건을 사용하였다. 축방향 면은 주기조건을 적용하였고 측면은 대칭조건이 적용되었다. 또한, 실린더 벽면에는 점착조건을 부여하였다.

실린더에 대해 첫 번째 격자의 위치는 $y^+ = 1$ 을 기준으로 계산되는 값을 이용하였다. 계산에 사용된 격자수는 약 380만개 (58000×66)이며, 이때 실린더 주위 O 타입의 영역은 반경방향

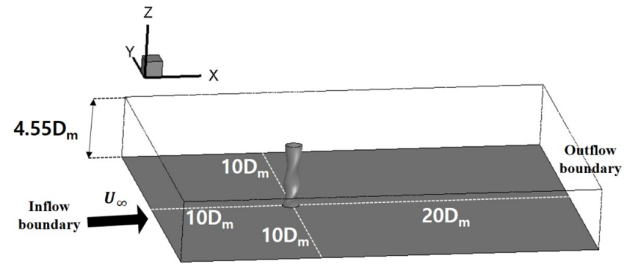
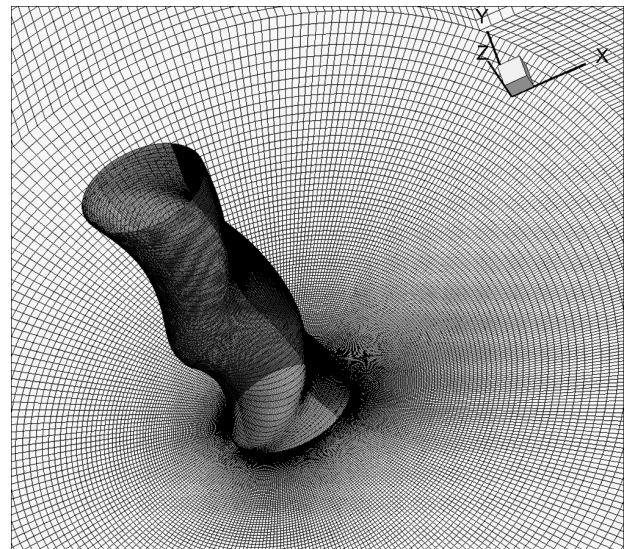
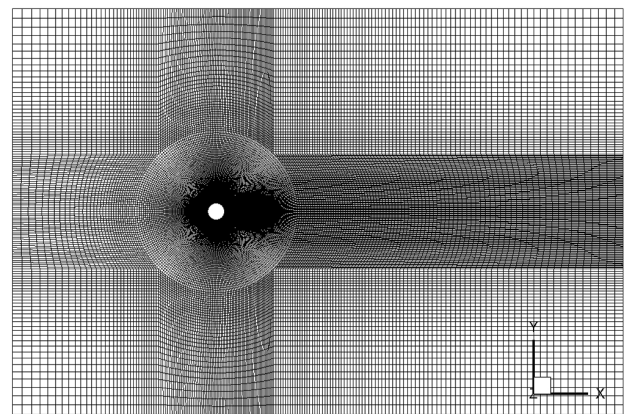


Fig. 3 Schematic of the computational domain.



(a)



(b)

Fig. 4 Grid distribution of (a) around variable pitch twisted cylinder and (b) entire domain.

으로 115, 원주방향으로 336개의 격자계로 구성되어 있다. 또한 박리에 의해 발생하는 실린더 후류 영역의 복잡한 유동을 정확히 묘사하기 위해 전방 정체점에서 후방 정체점으로 갈수록 더욱 격자의 밀도가 높아지도록 구성하였고 이에 해당하는 격자 분포를 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 이때 전방 정체점은 실린더 횡단면의 원주각(circumferential angle) θ 을 기준으로 $\theta = 0^\circ$ 인 지점을 전방 정체점, $\theta = 180^\circ$ 인 지점을 후방 정체점으로 정의하였다.

2.4 수치해석 검증

본 연구의 결과에 대한 신뢰성 확보를 위해 동일한 Re 에서 원형 실린더와 트위스트 실린더에 대한 선행연구들의 실험 및 수치해석 결과들을 정량적인 값으로 비교하고자 하였다. 원형 실린더에 대한 계산 결과의 비교를 Table 1에 나타내었다. 비교 변수로는 시간 평균된 총 항력 계수($\overline{C_D}$)와 총 양력 계수의 섭동에 대한 정도를 비교하기 위해 제곱 평균에 제곱근을 취한 값(root mean square, RMS)($C_{L,rms}$)을 비교하였다. 또한 양력 섭동의 주기성 파악을 위한 스트로울 수(Strouhal number, St)도 함께 비교하였다.

Table 1에 대해 $C_{L,rms}$ 의 경우 선행연구 결과들이 서로 다른 범위의 데이터를 가지지만 본 연구의 결과는 선행연구들의 결과 내에 있음을 알 수 있다. 또한, $\overline{C_D}$ 의 경우 선행연구들의 일관된 결과가 있으며 본 연구 또한 매우 잘 일치하는 결과가 도출되었음을 확인할 수 있다. 본 연구 결과에 대한 St 또한 선행연구 결과들과 잘 일치한다. 트위스트 실린더에 해당하는 결과 또한 유효성 검증 차원에서 원형 실린더와 마찬가지로 선행연구와 비교하였고 이를 Table 2에 정리하였다.

트위스트 실린더의 결과 또한 $\overline{C_D}$ 는 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. $C_{L,rms}$ 와 St 는 선행연구 간에 차이가 약간 있지만, 본 연구의 결과와 선행연구의 결과가 매우 잘 일치하는 것을

Table 1 Validation for a circular cylinder compared with previous data.

Circular cylinder ($Re = 3000$)	$\overline{C_D}$	$C_{L,rms}$	St
Noberg(experimental, 1987)	0.98–1.03	–	0.210–0.213
Noberg(summarized, 1987)	–	0.05, 0.07	0.210
Lu, et al.(experimental, 1997)	1.02	–	–
Lam & Lin(numerical, 2008)	1.09	0.177	0.210
Jung & Yoon(numerical, 2014)	0.99	0.11	0.211
Present(numerical)	0.99	0.09	0.210

Table 2 Validation for a twisted cylinder compared with previous data.

Twisted cylinder ($Re = 3000$)	$\overline{C_D}$	$C_{L,rms}$	St
Jung & Yoon(numerical, 2014)	0.86	0.0050	0.190
Present(numerical)	0.86	0.0054	0.190

확인할 수 있다. 따라서, 원형 실린더와 트위스트 실린더를 통해 계산 결과를 검증해본 바 본 연구에 대한 결과의 신뢰성이 확보되었다고 판단되어 있다.

더불어, 본 연구의 계산 결과에 대한 격자 의존성을 확인하기 위해 가변 피치 트위스트 실린더에 대해 서로 다른 격자 수준에서의 $\overline{C_D}$, $C_{L,rms}$ 및 St 에 대한 계산 결과를 정량적으로 비교하였다. 격자 의존성 검증에 고려되어진 격자수와 해당하는 결과들을 Table 3에 나타내었고, 각각의 격자계는 x, y, z 모든 방향으로 변화를 주어 구성하였다. $\overline{C_D}$, $C_{L,rms}$, St 에 대해 성긴 격자계와 중간 격자계의 계산 결과들의 상대적 변동률은 각각 1.40%, 54.29%, 6.38%이다. 반면, 중간 격자계와 조밀한 격자계에 대해서는 각각 0.27%, 14.29%, 1.06%의 더욱 작은 차이를 보이고 있다. 따라서 본 연구의 계산에 대한 효율성을 고려하여 앞선 언급한 약 380만개($58,000 \times 66$)로 구성된 중간 격자계를 사용하였다.

Table 3 Comparison of the force coefficients for different cylinders at $Re = 3000$.

Case	Number of grid ($\times 10^6$)	$\overline{C_D}$	$C_{L,rms}$	St
Coarse	2.68	0.8529	0.0054	0.200
Medium	3.80	0.8411	0.0035	0.188
Fine	5.33	0.8434	0.0030	0.190

3. 해석결과 및 분석

3.1 형상 변화에 따른 유체력 특성

기하학적 형상의 차이가 유도하는 성능을 비교하기 위해 원형 실린더와 트위스트 실린더, 가변 피치 트위스트 실린더의 $\overline{C_D}$, $C_{L,rms}$, 그리고 St 를 Table 4에 나열하였다. 3차원 형상 교란이 적용된 실린더는 기존의 원형 실린더보다 외력에 대한 계수가 상당히 줄어들었음을 확인할 수 있다. St 의 감소는 유동의 안정화와 와류림의 주기가 길어진 것을 의미하며 이는 와류 형성 길이(vortex formation length, L_f)의 연장과 관련된다(Bearman, 1965; Lam, et al., 2004(b); Jung & Yoon, 2014). 본 연구 결과의 L_f 에 대한 자세한 분석은 3.2장에 더욱 상세하게 다루었다. 더불어, 가변 피치가 적용된 트위스트 실린더가 기존의 트위스트 실린더보다 더욱 우수한 유동제어 성능을 가짐을 확인할 수 있다. 즉, 나선형 3차원 형상 교란과 가변 피치에 의한 형상 비대칭성의 조합이 추가적인 유동제어 성능을 도출하였음을 알 수 있다.

Table 4 Comparison of the force coefficients for different cylinders at $Re = 3000$.

Type	$\overline{C_D}$	$C_{L,rms}$	St
Circular cylinder	0.99	0.092	0.210
Twisted cylinder	0.86	0.0050	0.190
Variable pitch twisted cylinder	0.84	0.0035	0.188

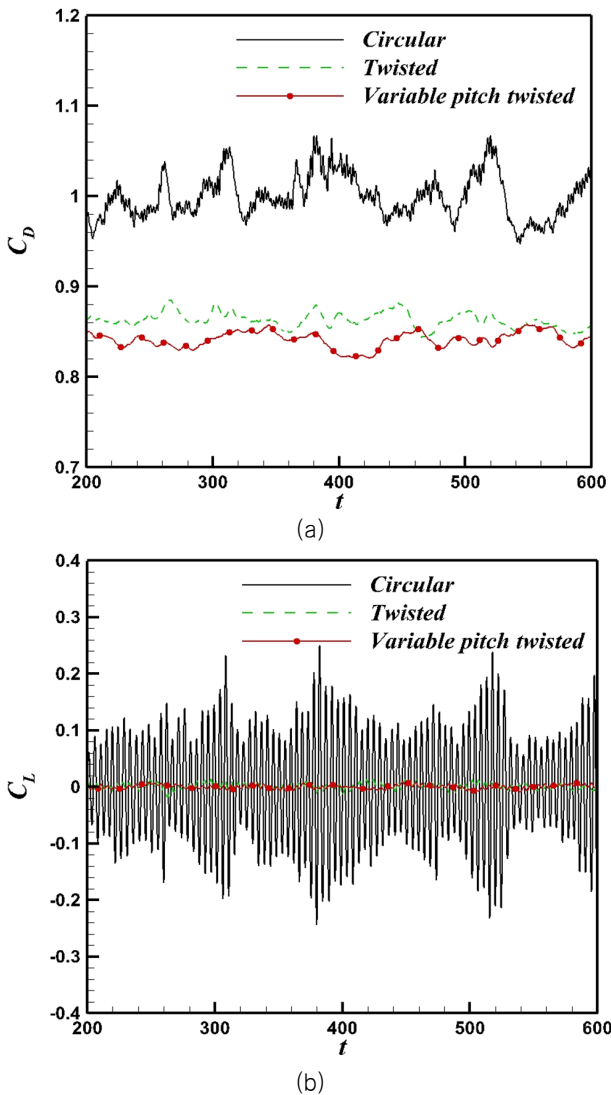


Fig. 5 The time-history of (a) drag and (b) lift coefficients for the circular, twisted, and variable pitch twisted cylinder at $Re = 3,000$.

Fig. 5는 항력계수(C_D)와 양력계수(C_L)의 시계열 그래프를 도시한 것이다. Fig. 5(a)로부터 트위스트 실린더와 가변 피치 트위스트 실린더는 시간에 대한 의존성 없이 항상 원형 실린더보다 낮은 C_D 를 가짐을 알 수 있다. 또한, 원형 실린더의 C_D 는 매우 잦은 섭동을 갖는 시간 의존성을 강하게 보인다. 하지만 3차원 형상 실린더는 위와 같은 항력의 섭동이 매우 억제되었음을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 5(b)에서 나타났듯 3차원 형상 교란 실린더들의 C_L 섭동이 상당히 억제된 것과 강한 연관성이 있다. 주기적으로 반복되는 와홀림이 양력의 섭동을 유발하며 이는 항력의 진동도 유발하는데, 이러한 와홀림 억제로부터 유체력의 시간 의존성이 상당히 약화된다.

3.2 구조물 주변 유동장 분석

이러한 유체력 제어의 메커니즘 규명을 위한 정성적 평가의 방법으로 각 실린더들의 주위 유동장을 분석하였다. Fig. 6는 각

실린더 주위의 와구조를 시각화하기 위해 Jeong & Hussain (1995)이 제시한 λ_2 방법을 이용하였다. 모든 실린더는 같은 문턱 값에 대한 와구조를 나타내도록 하였다. Fig. 6(a)에 나타났듯 원형 실린더의 경우 매우 구조적인 카르만 와열이 명확히 나타나며 수많은 소규모 와들과 길이 방향의 관 형상의 와구조가 존재한다. 반면, 트위스트 및 가변 피치 트위스트 실린더는 와열의 roll-up을 상당히 지연시키고 후류 영역에서 뚜렷하던 카르만 와열도 후류방향으로 지연되어 발생함을 Fig. 6(b)-(c)를 통해 확인할 수 있다. 또한, 3차원 형상 교란 실린더들은 원형 실린더 대비 후류의 폭이 좁아졌음을 확인할 수 있다. 더불어, Fig. 6(b)-(c)에 나타났듯 배면 근처의 와들의 거의 존재하지 않고 원형실린더에서 관찰되던 관 형상의 와구조도 명확히 나타나지 않는다. 이는 3차원 형상 교란이 박리 전단층의 안정화를 유도하고 이로부터 L_f 의 신장으로 인한 유동 안정화가 이루어졌기 때문이라 할 수 있다.

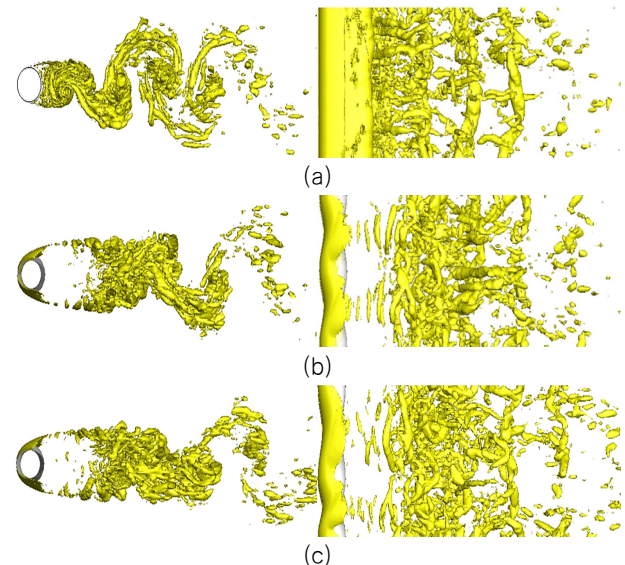


Fig. 6 Side view(left column) and top view(right column) of isosurface of swirl strength for (a) circular, (b) twisted, (c) variable pitch twisted.

Fig. 7은 $x-y$ 평면에서 z 방향 와도인 ω_z 의 시간 평균된 컨투어를 각 실린더에 대해 나타낸 것이며 트위스트 실린더의 경우엔 타원 단면의 장축이 유동 방향과 수평한 위치와 수직인 위치에 대해 나타냈고, 가변 피치 트위스트 실린더에 대해서는 λ_s 와 λ_L 각각의 구간에서 타원 단면이 유동과 수평 및 수직을 이루는 위치에 대한 컨투어를 나타냈다. 원형 실린더 대비 3차원 형상 교란이 적용된 실린더는 상당히 신장된 와도 영역을 보이며 이 경향은 축 방향 위치에 독립적이다. 특히 가변 피치 트위스트 실린더는 단면의 동일한 위상에 대해 피치 값에 관계없이 기존의 트위스트 실린더보다 신장된 와도 영역을 보인다. 이는 전 영역에서 L_f 의 신장을 의미하며 Fig. 6에서 관찰 가능한 현상인 roll-up의 지연과 관련된다. 이와 같은 현상에 의해 3차원 형상 교란 실린더 후류 영역의 압력 회복이 원형 실린더 보다 우수해지고 이는 항력 등의 유체력 감소와 직결된다.

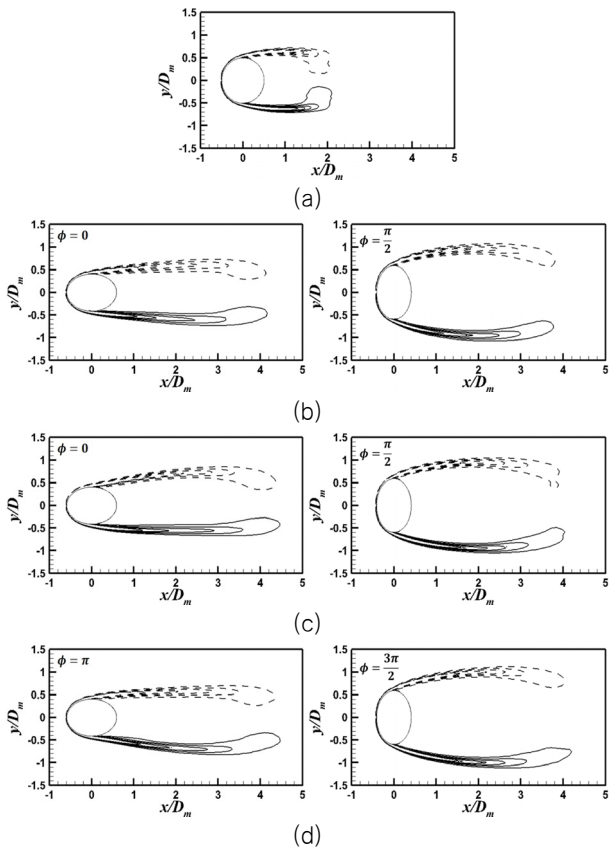


Fig. 7 Time averaged spanwise vorticity contours at the same topological section for different cylinders; (a) circular, (b) twisted, (c) variable pitch twisted(λ_S region), and (d) variable pitch twisted(λ_L region).

이를 직접적으로 비교하기 위해 각 실린더에 대한 전방 정체점의 시간 평균된 압력계수($\overline{C_{Ps}}$)와 후방 정체점의 압력계수($\overline{C_{Pb}}$) 및 두 계수의 차이를 Fig. 8에 도시하였다. 이때 $\overline{C_{Ps}}$ 는 실린더 횡단면의 원주각 $\theta = 0^\circ$ 인 지점의 $\overline{C_P}$ 이며 $\overline{C_{Pb}}$ 는 $\theta = 180^\circ$ 인 지점의 $\overline{C_P}$ 이다. Fig. 8(a)를 통해 트위스트 실린더들의 $\overline{C_{Pb}}$ 가 더욱 커졌음을 확인할 수 있고 그 중에도 가변 피치 트위스트 실린더가 기존의 트위스트 실린더보다 더 큰 $\overline{C_{Pb}}$ 를 가짐을 알 수 있다. 이는 박리 이후의 압력 회복이 잘 일어나는 것을 의미한다. 또한 $\overline{C_{Ps}}$ 를 나타내는 그래프에서 트위스트 실린더는 대칭형의 주기성을 나타내고 있으며, 가변 피치 실린더는 비대칭적인 형태를 띄고 있다. 또한, 가변 피치 트위스트 실린더의 $\overline{C_{Ps}}$ 에 대한 최솟값이 트위스트 실린더보다 작은 경향을 보인다. Fig. 7(b)-(d)에서 확인할 수 있는 유동 안정화에 의한 축방향 전체에 걸친 L_f 의 신장이 와도의 중심을 실린더 배면에서 후류 방향으로 멀어지도록 하고, 이로 인해 축방향 형상의 차이에 의한 압력 변동이 실린더에 미치는 영향을 약화시켜 음압의 축방향 변화 의존성이 약화된다. 따라서 Fig. 8(a)에 도시된 트위스트 및 가변피치 트위스트 실린더의 $\overline{C_{Pb}}$ 의 경우 축방향 의존성이 $\overline{C_{Ps}}$ 대비 매우 약하게 축방향 형상 변화가 존재함에도 불구하고 $\overline{C_{Pb}}$ 의 축방향 값들이

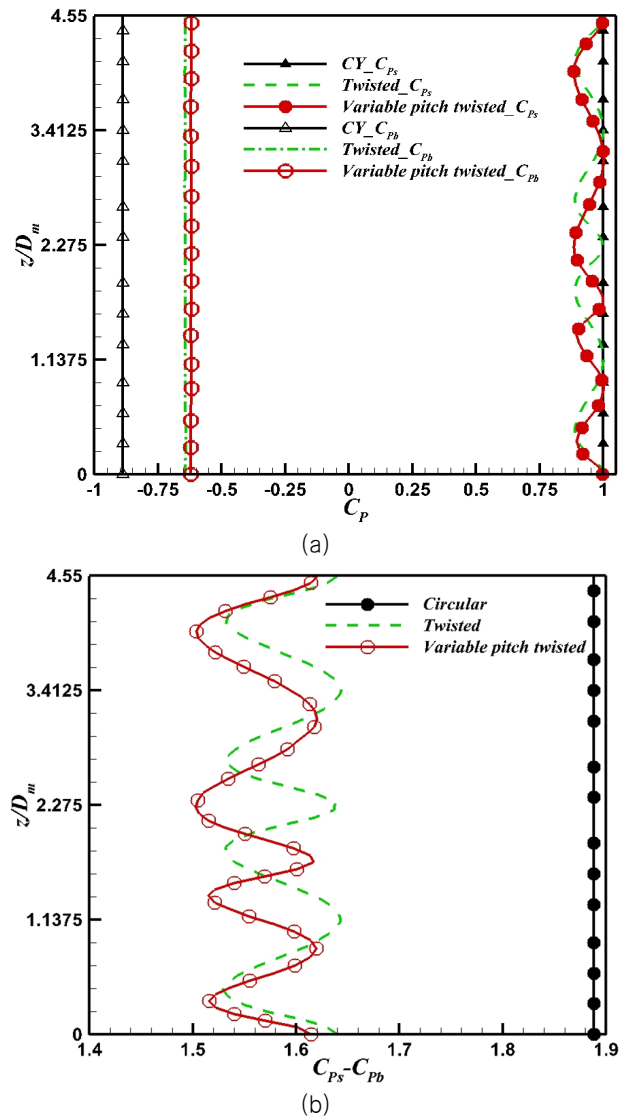


Fig. 8 (a) Time averaged pressure coefficient at front and rear stagnation point and (b) difference of these values for each cylinder.

거의 일정하게 보여진다. 이는 Lam & Lin (2008)의 파형 실린더에 대한 연구 및 Yoon et al. (2017)의 비대칭 파형 실린더에 대한 연구 결과와 일관성 있는 결과를 보여준다.

실린더 전방과 후방의 압력 차이는 구조물에 작용하는 항력으로 귀결된다는 점에서 Fig. 8(b)에 나타나는 실린더 전후방 압력 분포의 차이가 가변 피치 트위스트 실린더의 항력 저감의 이유를 잘 나타낸다. 이는 비대칭성에 의한 운동량의 분산이 후류 유동을 안정화하는 것으로부터 기인되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 해양 구조물과 같이 뭉뚱한 형상을 갖는 구조물에서 외부 유동에 의해 유발되는 와유기 진동 및 유체력을 저감하고자 서로 다른 수동 제어 파라미터의 조합에 의한 가변 피

치 트위스트 실린더 형상을 제시하고, 유동 제어 성능을 수치적으로 평가하였다. 아임계 영역에 속하는 $Re = 3000$ 에서 대형와 모사법을 이용해 수치해석을 진행했으며, 성능의 상대적 비교를 위해 원형 실린더와 기존의 트위스트 실린더에 대해 같은 조건에서 해석을 수행하였다. 본 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 가변 피치 트위스트 실린더는 원형 실린더와 비교했을 때 항력은 약 15.2%, 양력의 RMS은 약 94.4% 감소하였으며, 기존의 트위스트 실린더와 비교하였을 때도 항력은 약 2.5%, 양력의 RMS은 약 35.3% 감소하였다. 즉, 외부 유동에 의한 유체력 저감을 위한 형상으로 본 연구에서 제시된 실린더가 적합하다고 판단된다.
- (2) 유체력의 시계열 그래프를 통해 3차원 형상 교란 실린더들에 작용하는 유체력이 상당히 억제된 시간 의존성을 가짐을 확인했고, 이로부터 본래 주기적으로 반복되는 와류 기진동이 매우 억제된 것으로 판단된다.
- (3) 와류기 진동 억제의 원인으로 와구조로부터 관찰되는 카르만 와열의 약화를 제시할 수 있으며, 이는 나선형 구조 전개와 비대칭성의 조합이 유도하는 L_f 의 신장이 잘 이루어졌기 때문이라고 판단된다.
- (4) 항력을 유발하는 대표적인 성분 중 하나인 실린더 전방의 압력분포와 후방의 압력분포의 차이에 대해 3차원 형상 교란 실린더가 현저히 그 값이 작아짐을 확인하였고, 더욱이 가변 피치 트위스트 실린더가 가장 작은 값을 가짐을 확인했다. 이로부터 형상에 의한 수동 제어 파라미터의 조합이 유동 제어 성능을 향상시키는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 유체력 저감 성능 향상을 위해 형상에 대한 수동 제어 파라미터의 조합이 갖는 성능을 제한적인 케이스로 평가하였다. 이로부터 유체력 저감 성능의 향상이 이루어짐을 확인했으며, 추후 비대칭성의 범위를 넓혀 다수의 케이스에 대한 조합 성능을 탐구하고자 한다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

Ahmed, A. & Bays-Muchmore, B., 1992. Transverse flow over a wavy cylinder. *Physics of Fluids A*, 4(9), pp.1959–1967.

Bearman, P.W., 1965. Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates. *Journal of Fluid Mechanics*, 21(2), pp.241–255.

Chen, Z.S. & Kim, W.J., 2010. Numerical investigation of vortex shedding and vortex-induced vibration for flexible riser models.

International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2(2), pp.112–118.

Choi, H., Jeon, W. & Kim, J., 2008. Control of flow over a bluff body. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40(1), pp.113–139.

Chyu, C.K. & Rockwell, D., 2002. Near-wake flow structure of a cylinder with a helical surface perturbation. *Journal of Fluids and Structures*, 16(2), pp.263–269.

Germano, H., Piomelli, U., Moin, P. & Cabot, W.H., 1991. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids A*, 3(7), pp.1760–1765.

Holmes, S. & Owen, H., 2006. Simulation of Riser VIV Using Fully Three Dimensional CFD Simulations. *25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Hamburg, Germany, 4–9 June 2006.

Jeong, J. & Hussain, F., 1999. On the identification of a vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 285, pp.69–94.

Jung, J.H. & Yoon, H.S. 2014. Large eddy simulation of flow over a twisted cylinder at a subcritical Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 759, pp.579–611.

Kim, M.I. & Yoon, H.S. 2018. Large eddy simulation of forced convection heat transfer from wavy cylinders with different wavelength. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, pp.683–700.

Kim, W., Lee, J. & Choi, H., 2016. Flow around a helically twisted elliptic cylinder. *Physics of Fluids*, 28(5), 053602.

Lam, K. & Lin, Y.F., 2008. Large eddy simulation of flow around wavy cylinders at a subcritical Reynolds number. *Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(4), pp.1071–1088.

Lam, K. Wang, F.H. Li, J.Y. & So, R.M.C., 2004a. Experimental investigation of the mean and fluctuating forces of wavy (varicose) cylinders in a cross-flow. *Journal of Fluids and Structures*, 19(3), pp.321–334.

Lam, K. Wang, F.H. & So, R.M.C., 2004b. Three dimensional nature of vortices in the near wake of a wavy cylinder. *Journal of Fluid and Structures*, 19(6), pp.815–833.

Lee, C.Y. et al., 2009. Characteristics of the Flow and Heat Transfer around a Wavy Cylinder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(1), pp.1–9.

Lu, X., Dalton, C. & Zhang, J., 1997. Application of large eddy simulation to flow past a circular cylinder. *ASME Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 119, pp.219–225.

Noberg, C., 1987. *Effects of Reynolds number and a low-intensity freestream turbulence on the flow around a circular cylinder*. Publication 87/2, Department of Applied Thermodynamics and Fluid Mechanics, Chalmers University of Technology.

Owen, J.C., Bearman, P.W. & Szewczyk, A.A., 2001. Passive control of VIV with drag reduction. *Journal of Fluids and Structures*, 15(3–4), pp.597–605.

Wei, D.J., Yoon, H.S. & Jung, J.H., 2016. Characteristics of aerodynamic forces exerted on a twisted cylinder at a low Reynolds number of 100. *Computers and Fluids*, 136, pp.456–466.

Yoon, H.S., Chun, H.H. & Lee, D.H., 2006. Numerical study on the fluid flow and heat transfer past a cylinder with a periodic array of circular fins. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(6), pp.285–293.

Yoon, H.S., Shin, H. & Kim, H., 2017. Asymmetric disturbance effect on the flow over a wavy cylinder at a subcritical Reynolds number. *Physics of Fluids*, 29(9), 095102.

Zdravkovich, M.M., 1981. Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(2), pp.145–189.



문자훈



윤현식