대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 49, No. 5, pp. 440-446, October 2012
http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2012.49.5.440

와류감쇠 및 저항저감형 나선형 해양 구조물 주위 유동 LES 해석

정재환[1] · 윤현식[2,†] · 최창영[3] · 전호환[1] · 박동우[4]
부산대학교 조선해양공학과[1]
부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터[2]
부산대학교 기계공학부[3]
현대중공업 선박해양연구소[4]

Large Eddy Simulation of Flow around Twisted Offshore Structure with Drag Reduction and Vortex Suppression

Jae Hwan Jung[1] · Hyun Sik Yoon[2,†] · Chang Young Choi[3] · Ho-Hwan Chun[1] · Dong-Woo Park[4]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University[1]
Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University[2]
School of Mechanical Engineering, Pusan National University[3]
Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co. Ltd.[4]

Abstract

A twisted cylinder has been newly designed by rotating the elliptic cross section along the spanwise direction in order to reduce the drag and vorticies in wake region. The flow around the twisted cylinder at a subcritical Reynolds number (Re) of 3000 is investigated to analyze the effect of twisted spiral pattern on the drag reduction and vortex suppression using large eddy simulation (LES). The instantaneous wake structures of the twisted cylinder are compared with those of a circular and a wavy cylinder at the same Re. The shear layer of the twisted cylinder covering the recirculation region is more elongated than that of the circular and the wavy cylinder. Successively, vortex shedding of the twisted cylinder is considerably suppressed, compared with those of the circular and the wavy cylinder. Consequently, the mean drag coefficient and the fluctuating lift of the twisted cylinder are less than those of the circular and the wavy cylinder.

Keywords : Twisted cylinder(트위스트 실린더), Large eddy simulation(대형와모사법), Vortex suppression(와류 감쇠), Drag reduction(저항 저감)

1. 서 론

최근 심해 해양자원개발의 확대로 인해 석유와 가스 시추를 위한 해저석유 생산용 라이저(riser)와 파이프라인 등의 수요가 급증하고 있다. 이러한 구조물들은 후류의 주기적인 와흘림(vortex shedding)으로 인해 주기적인 항력과 양력을 받는다. 또한 이러한 주기적인 와흘림은 구조물들에 와유기진동(vortex induced vibration, VIV)을 유발한다. 특히 와유기진동이 심각할 경우 구조물에 피로손상을 주게 되므로 와유기진동은 해양구조물의 수명을 결정하는 중요한 역할을 한다. 따라서 라이저, 파이프 라인과 같은 뭉툭한 해양구조물 주위에 발생되는 와유기진동 및 감쇠에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다 (Chen & Kim, 2008; Chen & Kim, 2010; Cunff, et al., 2002; Holmes & Owen, 2006; Huang, et al., 2009; Yamamoto, et al., 2004).

와유기진동을 감소시키기 위한 수동제어 방법 중 하나로써 나선형 스트레이크(helical strake)가 있다. 이는 다수의 스트레이크 세그먼트(strake segment)들을 원형실린더에 나선형이 되도록 설치한 것으로 와유기진동의 발생을 억제시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 나선형 스트레이크에 의한 와 구조, 항력과 양력 그리고 스트롤 수(strouhal number) 특성 등에 대해 다양한 연구가 이루어져 왔다 (Chyu & Rockwell, 2002; Nebres & Batill, 1993; Sirisup, et al., 2004).

또 다른 수동제어 방법으로 축방향에 실린더 단면이 주기적으로 변하는 파형(wavy) 실린더가 있다. 이와 관련된 선행 연구들로는 Ahmed and Bays-muchmore (1992), Lam, et al. (2004a), Lam, et al. (2004b)와 Lee and Nguyen (2007) 등이 있으며 이

접수일 : 2012년 7월 16일 | 1차 수정일 : 2012년 10월 10일 | 게재확정일 : 2012년 10월 16일
† 교신저자 : lesmodel@pusan.ac.kr, 051-510-3685

들은 넓은 범위의 레이놀즈 수 (Reynolds number, Re) 영역에서 파형 실린더의 항력 및 양력계수가 원형실린더 보다 줄어듦을 확인하였다. 특히 Lam, et al. (2004a)은 항력이 원형 실린더 대비 최대 20%까지 감소됨을 보고하였다.

위에서 언급한 바와 같이, 물체의 형상변화를 통한 유동제어 방법들의 일환인 물체형상 변화와 관련된 나선형 스트레이크와 파형 실린더들은 많은 선행 연구들에 의해 와유기진동 감쇠 및 항력과 양력의 감소효과가 입증되었다.

본 연구에서는 해양구조물의 형상변형을 통한 유동제어의 일환으로 나선형 표면 처리된 트위스트 실린더를 고려하였다. 여기서 트위스트 실린더란 타원 단면을 축방향으로 0°~360°로 회전시켜 형상화 되어진 실린더를 의미한다. 저자들의 선행연구 분석에 따르면 트위스트 실린더를 구조물의 저항저감 및 와류감쇠를 위해 적용한 연구사례는 확인된 바 없었다.

본 연구에서는 대형와모사법(LES)을 이용하여 아임계(subcritical) 영역($300 < Re < 3\times10^5$)에 해당되는 Re=3000 에서 트위스트 실린더 주위 3차원 유동 특성에 대하여 연구하였다. 아임계 영역에서의 실린더 주위 유동특징으로, 실린더 표면에서의 경계층은 층류의 특성을 가지만 후류영역은 완전 발달된 난류의 특성을 지닌다. 이러한 특성을 지닌 아임계 영역은 많은 산업현장에서 직면하는 유동 환경과 유사하기 때문에 해양구조물 주위 유동의 항력저감과 와유기진동의 억제를 목적으로 하는 본 연구에 고려되었다. 트위스트 실린더가 후류 및 저항에 미치는 영향을 검증하기 위해서 원형 실린더와 파형 실린더 주위의 유동을 추가적으로 해석하여 각 유동들의 특성을 비교, 분석 하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

실린더 주위 유동을 해석하기 위하여 고려되어진 지배방정식은 일정 물성치의 비압축성 유동해석에 대한 것으로, 격자 필터링이 되어진 운동량 보존 방정식 및 연속 방정식으로 아래와 같다.

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

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{u_i}\overline{u_j}) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_\tau}\frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

여기서 $\overline{u_i}$는 격자 필터링으로 얻어진 대형 스케일의 유동을 나타낸다, 식 (2)에서 τ_{ij}는 subgrid 스케일 유동이 대형 스케일(resolved scale) 유동에 미치는 영향을 나타내며, 다음과 같이 표현되어진다.

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

여기서 subgrid stress scale tensor τ_{ij}는 Germano, et al. (1991)이 제안한 dynamic model을 사용하여 구한다. Dynamic Smagorinsky coefficient (Cs)을 얻기 위한 상세한 수식적 유도과정은 Yoon, et al. (2009) 및 Germano, et al. (1991) 등의 문헌을 참고할 수 가 있다. Dynamic Smagorinsky coefficient Cs가 음의 값을 가질 경우는 작은 스케일에서 큰 스케일로 에너지가 전달되는 backscatter 현상으로 이해된다. 하지만 이 음의 값은 심각한 수치적 어려움을 가져온다. 즉, 식 (2)의 우변항에 에너지 증가, 다시 말해 entropy 증가로 인해 수치적으로 무한대로 발산하게 된다. 따라서 이 문제를 피하기 위하여 균질한(homogenous) 공간적인 방향에 대해 짧은 시간동안 평균 조작등의 방법을 사용한다. 본 연구에서는 간단한 방법으로 계산 영역 전체(volume)에 대해 평균화 방법을 거쳐 Cs 값을 얻었다. 따라서 본 연구에서 Cs값은 단지 시간의 함수이다.

본 연구에서는 지배방정식은 보존형 유한체적법(conservative finite volume formulation)으로 이산화 된다. 시간차분에 대해서 time-splitting, 공간 차분은 중앙 차분법을 적용하였다. 점성항에 대해서 2차 Crank-Nicolson 방법, 비선형항에 대해서 2차 Adams-Bathforth 방법을 사용하였다.

2.2 해석영역 및 경계조건

해석영역은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 유체가 유입되는 실린더의 상류로부터 유출되는 후류 부분까지의 거리는 $-8D \le x \le 16D$ 이며, 실린더 하부에서 상부까지의 거리는 $-8D \le y \le 8D$ 그리고 실린더 축방향으로의 거리는 4.55D 이다. 여기서 D는 실린더의 직경을 의미한다. 유입부의 무차원화된 속도는 x방향 속도인 $U_\infty = 1$이며, 측면은 대칭조건을, 축방향의 면은 주기조건을 부여하였다. 유출부의 경계조건으로 대류경계조건을 사용하였다. 여기서 대류속도는 출구평균속도를 적용하였다.

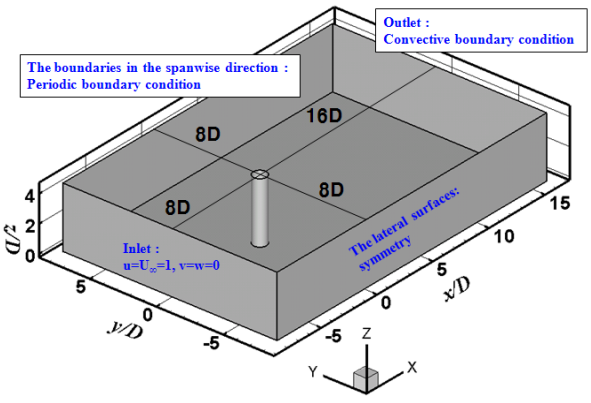


Fig. 1 Schematic of the computational domain and boundary conditions

격자 생성에 있어서 첫 번째 격자 위치는 $y^+ = 1$에 해당하는

값을 사용하였고 사용된 격자수는 약 128만개(16,000×80)이다. 본 해석을 위해 생성되어진 격자분포는 Fig. 2를 통해 확인할 수 있다.

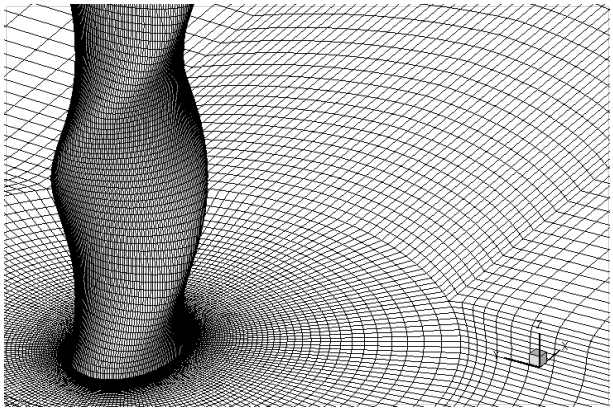


Fig. 2 Grid distributions around twisted cylinder

2.3 해석대상

Fig. 3은 본 연구에서 고려되어진 세가지 타입의 실린더를 나타낸다. 파형 실린더의 경우 아래 식(4)과 같이 정의되어 진다.

$$D_z = D_m + 2a\cos(2\pi z/\lambda) \tag{4}$$

여기서 D_z는 파형 실린더의 국부 직경을 나타내며 D_m은 평균직경으로 $D_m = (D_{\max} + D_{\min})/2$ 를 의미한다. $D_{\max}$는 실린더의 최대직경, $D_{\min}$은 최소직경을, a는 파형 실린더의 진폭 그리고 λ는 주기를 나타낸다. 본 연구에서 고려된 a, λ값은 Lam and Lin (2008)의 LES 수치해석에서 사용된 WY-A4 모델 조건과 동일한 값을 사용하였다.

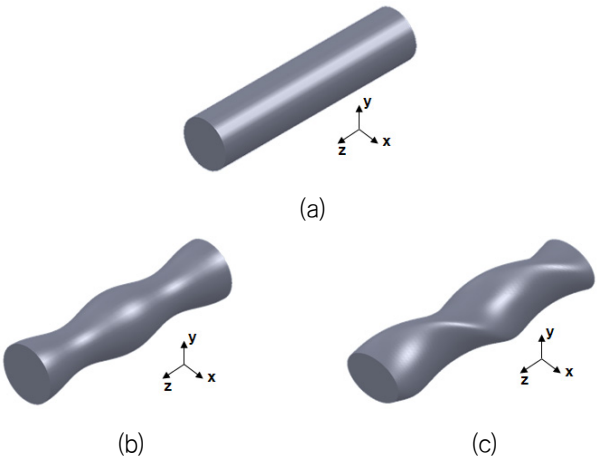


Fig. 3 Geometries of cylinders; (a) circular, (b) wavy and (c) twisted

트위스트 실린더의 경우 장축과 단축에 의해서 타원 단면이 결정되는데, 파형 실린더와의 비교를 위하여 장축의 길이와 단축의 길이는 파형 실린더의 최대, 최소직경과 동일한 값을 사용하였다.

타원 단면이 0°~360° 회전하는데 나아가는 길이인 트위스트 실린더의 피치(pitch)값은 파형 실린더의 주기 2λ와 동일하게 설정하여 타원단면을 축방향(spanwise)에 따라 회전시켜 형상을 결정하였다.

2.4 수치해석방법의 검증

수치해석방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 기존 선행연구들의 실험 및 수치해석결과들과 비교하였으며 Table 1에 나타내었다. Re=3000에서 실험을 통해 측정된 원형실린더의 평균 항력계수는 대략 0.98-1.03 사이에 있음을 확인할 수 있고 선행연구들의 수치해석 결과와 본 연구의 수치해석 결과는 이에 타당한 결과를

Table 1 Comparison of the present calculation with the previous results

Circular cylinder ($Re = 3000$)	$\overline{C_D}$	C_L'	St
Noberg (1987), experimental	0.98 -1.03	-	0.210 -0.21 3
Noberg (2003), summarized	-	0.05, 0.07	0.210
Lu, et al. (1997), experimental	1.02	-	-
Lu, et al.(1997), LES	1.07	0.480	-
Lam and Lin (2008), LES	1.09	0.177	0.210
Present, LES	1.08	0.211	0.208

Table 2 Grid dependency test for twisted cylinder

Grid	$\overline{C_D}$	C_L'	St
Coarse (13,620×64)	0.906	0.0065	0.178
Medium (16,000×80)	0.910	0.0082	0.179
Fine (21,200×80)	0.918	0.0080	0.179

내고 있는 것으로 판단되어진다. 반면에 RMS(root mean square)를 통해 얻은 양력계수 값은 실험값과 차이를 보이고 있지만 Lu, et al. (1997)와 Lam and Lin (2008)의 수치해석결과 값들의 사이에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. St는 본 연구의 수치결과 값을 포함한 선행연구의 수치결과 값들이 전반적으로 실험값과 일치함을 확인할 수 있다. 참고로, Table 1에 나타낸 Lam and Lin (2008)의 결과는 Lam and Lin (2008)의 격자의존성 테스트 수행결과로 얻어진 격자수, 128만개의 결과를 나타낸 것이며 본

연구에서도 동일한 격자수에 해당하는 결과를 나타내었다. 본 연구의 수치결과 값과 Lam and Lin (2008)의 수치결과 값이 차이나는 것은 동일 격자수를 사용할지라도 격자 분포, 이산화를 위해 사용된 스킴들의 차이 등에 기인한 것으로 판단된다.

트위스트 실린더에 대해 세가지 격자타입을 고려하여 격자 의존성 테스트를 수행하였으며 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 해석결과를 통해서 격자의존성이 낮은 것으로 판단되며, 결과의 신뢰성과 해석시간을 고려하였을 때, medium 격자를 채택하여 해석을 수행하였다.

3. 해석결과

실린더 형상변화에 따른 항력계수($\overline{C_D}$) 및 양력섭동계수($C_L^{'}$) 그리고 스트롤 수(St)를 Table 3에 정리하였다. 원형실린더에서 파형실린더, 트위스트 실린더 순으로 갈수록 항력과 양력섭동 계수 그리고 스트롤 수가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 특히, 트위스트 실린더에서 양력섭동은 두드러지게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 트위스트 실린더가 와유기진동(VIV)의 억제에 효과적인 것으로 판단된다.

트위스트 실린더가 가지는 항력 및 양력섭동의 저감 원인을 살펴보기 위하여 본 연구에서는 각 실린더 형상들 주위 순간 유동장과 평균 유동장으로 나누어 분석하였다.

Table 3 Comparison of the present results of three different type of cylinder

Cylinder type	$\overline{C_D}$	$C_L^{'}$	St
Circular cylinder	1.08	0.211	0.207
Wavy cylinder	1.01	0.081	0.201
Twisted cylinder	0.91	0.0082	0.179

3.1 순간 유동장

Fig. 4는 $Re = 3000$에서 원형, 파형 그리고 트위스트 실린더 주위의 순간 와 구조들을 각각 나타낸 것이다. 여기서 순간 와 구조는 Zhou, et al. (1999)가 제안한 identification method를 이용하여 나타내었다. 아임계 영역에 속하는 $Re = 3000$에서 실린더 주위 유동의 특징으로는 전단층의 일부와 실린더 후류에서 난류유동을 가진다. 원형 실린더의 경우, 낮은 격자수로 인해 후류 영역에서의 작은 에디(eddy)들을 관찰하기 어려우나 난류임을 알 수 있으며, 와의 형태는 카르만 와열 구조를 띄는 것을 Fig. 4(a)를 통해 확인할 수 있다. 반면 트위스트 실린더의 경우, 박리 전단층이 하류쪽으로 길게 늘어지면서 카르만 와열의 발생을 억제하여, 다른 실린더들의 후류형태와 비교하였을 때 후류의 폭이

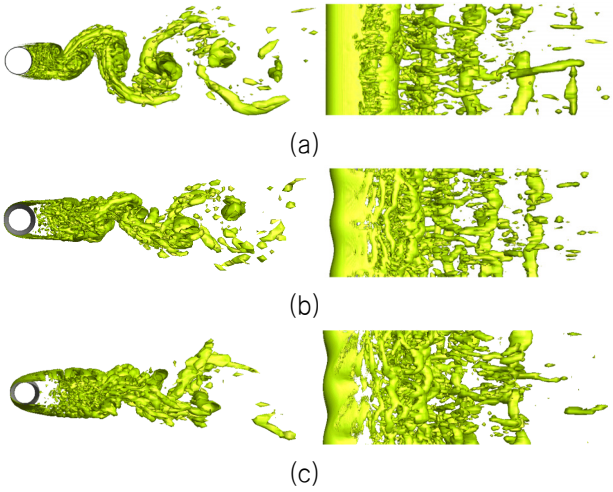
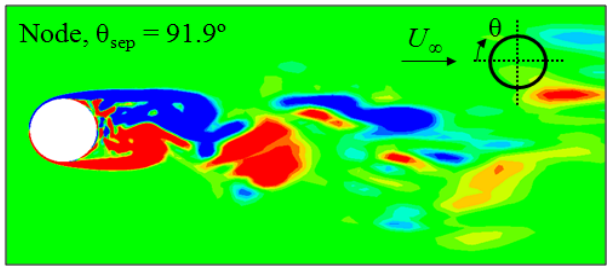


Fig. 4 Iso-surface of instantaneous vortical structures; (a) circular, (b) wavy and (c) twisted

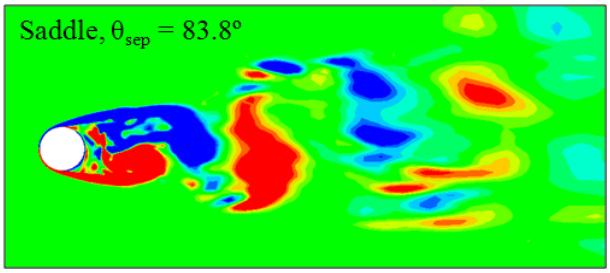
상대적으로 좁아지는 것을 Fig. 4(c)를 통해 관찰할 수 있다. 원형 실린더 배면 근방에서 작은 스케일의 에디들이 관찰 되지만 원형 실린더에서 파형, 트위스트 실린더로 갈수록 이러한 작은 스케일의 에디들은 실린더 배면으부터 떨어지는 것을 Figs. 4(a)-(c)들의 비교를 통해 확인할 수 있다. Fig. 4의 오른쪽 열은 각 실린더들의 와 구조들을 상부방향에서 나타낸 것이다. 원형 실린더의 경우 축방향 와동이 일정 간격을 가지며 후류로 떨어져 나가는 반면, 원형실린더에서 파형, 트위스트로 갈수록 이러한 축방향 와동은 관찰하기 어려우며 점성에 의한 유동들의 소산이 활발히 일어나는 것을 Figs. 4(a)-(c)의 비교를 통해 볼 수 있다.

Fig. 5는 파형 실린더의 node와 saddle에 위치한 횡단면에 대하여 무차원 축방향 와도를 나타낸 것이다. 여기서 파형 실린더의 최대 지름과 최소 지름을 갖는 축방향의 위치를 각각 'node'와 'saddle'이라고 한다. node보다 saddle에서 유동의 박리가 먼저 일어나게 됨으로서 재순환 영역의 증가와 함께 축방향 와도의 영역이 하류 쪽으로 갈수록 유동방향과 수직방향으로 넓게 발달하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 node의 경우 saddle과 달리 박리점이 지연되면서 재순환 영역의 발달을 억제하여 후류 영역의 폭이 상대적으로 좁아짐을 알 수 있다. node와 saddle에서 생기는 복잡한 유동들의 상호작용으로부터 생기는 3차원 유동이 항력과 양력의 섭동을 억제하여 파형실린더는 원형 실린더 보다 더 낮은 항력과 양력 값을 가지는 것으로 Lam and Lin (2008)은 보고하고 있다.

트위스트 실린더에 대하여 장축이 유동방향과 수평을 이루는 위상인 $\Phi = 0$와, 장축이 유동방향과 수직을 이루는 위상인 $\Phi = \pi/2$에 대해서도 Fig. 5와 유사한 유동특성이 Fig. 6에서 관찰되어 진다. $\Phi = 0$과 $\Phi = \pi/2$에서의 박리점은 파형 실린더의 node와 saddle 에서의 박리점 보다 상대적으로 더 지연되어 나타난다. $\Phi = \pi/2$ 대비 $\Phi = 0$에서 박리점이 지연됨에 따라 축방향 와도는 유동방향으로 길게 늘어나고 수직방향으로는 억제된다. 그리고 소용돌이치는 와류는 실린더 후면로부터 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

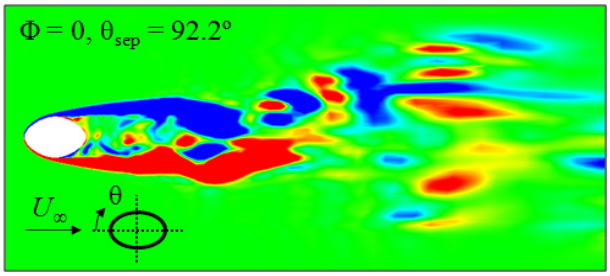


(a)

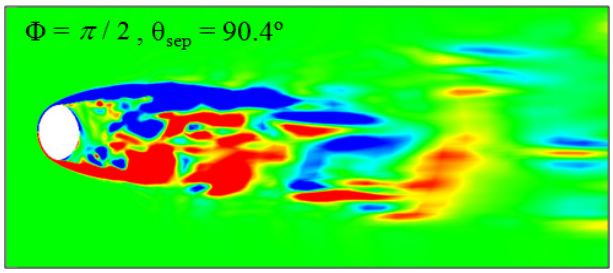


(b)

Fig. 5 Instantaneous vorticity contours for the wavy cylinder



(a)



(b)

Fig. 6 Instantaneous vorticity contours cf for the twisted cylinder

$\Phi = \pi/2$에서는 $\Phi = 0$보다 박리가 더 빨리 일어나고 형상에 의해 후류 영역의 폭이 상대적으로 커지는 것을 알 수 있다. 실린더 배면 근방에 위치한 와류는 $\Phi = 0$ 보다 실린더에 더 가까이 형성되어 있으나 파형 실린더 보다는 더 멀리 떨어져 있는 것을 확인할 수 있다. $\Phi = 0$와 $\Phi = \pi/2$에서 관찰되어지는 박리점의 지연, 박리 전단층의 변화 그리고 후류영역의 유동들의 상호작용으로 인해 트위스트 실린더가 파형 실린더 보다 더 낮은 항력과 양력섭동 값을 가지는 것으로 판단된다.

3.2 평균 유동장

Fig. 7은 시간 평균된 압력계수 ($\overline{C_p}$)를 실린더의 원주방향, θ에 따라 나타낸 것이다. 실린더 전방 정체점으로부터 θ가 증가함에 따라, 원형 실린더의 평균 압력계수는 파형 실린더의 node와

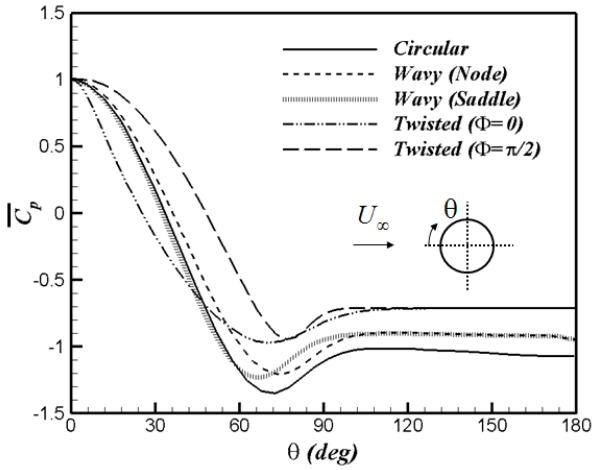


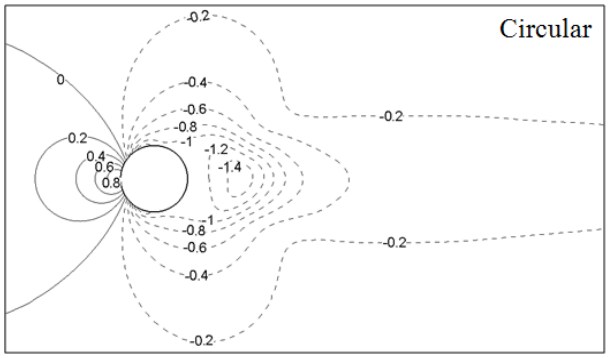
Fig. 7 Distributions of time-averaged pressure coefficient on the cylinder surfaces

saddle의 압력계수 분포 사이에 위치하지만 약 $\theta = 60^\circ$ 이후부터 더 큰 음압을 가지며 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 트위스트 실린더의 경우 θ가 약 44°까지 증가할 때, $\Phi = \pi/2$에서 압력계수가 가장 완만하게 낮아지는 반면, $\Phi = 0$에서의 압력계수 분포는 음압으로 급격하게 떨어지면서 가장 큰 음압을 가진다. 그러나 약 $\theta = 70^\circ$ 이후 압력은 회복되어 다른 실린더 표면의 음압보다 감소하는 것을 관찰할 수 있으며 $\theta = 120^\circ$ 이후$\Phi = 0$와 $\Phi = \pi/2$는 동일한 압력계수 값을 가지며 수렴하는 것을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다. 트위스트 실린더를 제외한 다른 실린더들 또한 후방 정체점에서의 압력계수 값은 위상에 상관없이 하나의 값으로 수렴되며 트위스트 실린더가 가장 낮은 음압을 가지는 것을 관찰할 수 있다.

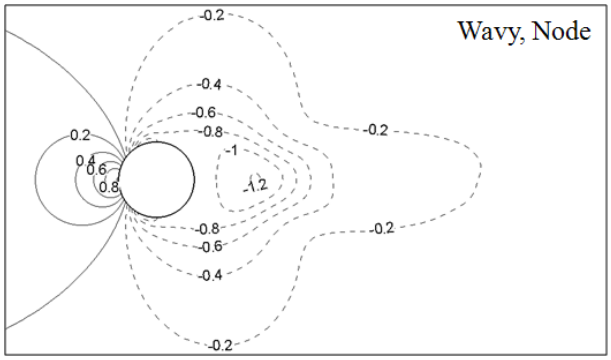
실린더 표면에서의 압력분포 비교를 통해, 트위스트 실린더가 다른 실린더들 보다 낮은 압력항력을 가지는 것을 확인할 수 있으며 이러한 특성은 시간 평균화된 압력장인 Fig. 8에서도 확인할 수 있다.

Fig. 8은 시간 평균화된 압력장을 실린더 형상에 따라 나타내었다. Fig. 8(a)에서 원형 실린더가 다른 형상을 가진 실린더들에 비해 실린더 배면 근방의 국부영역에서 가장 높은 음압을 가지는 것을 볼 수 있으며 음압의 영역이 하류 방향으로 길게 늘어져 있는 것을 관찰할 수 있다. 원형 실린더에서 파형, 트위스트 실린더로 갈수록 음압의 영역은 하류로부터 짧아지며, 각각의 실린더 후방 국부영역에서 작용하는 최대 음압들 중 트위스트 실린더가 가장 낮은 값을 가지는 것을 Figs. 8(a-e)의 비교를 통해 관찰할 수 있다. 실린더 배면 근방에서 최대 음압이 작용하는 원형 및 파형 실린더와 달리 트위스트 실린더의 경우, 실린더 배면으로부터

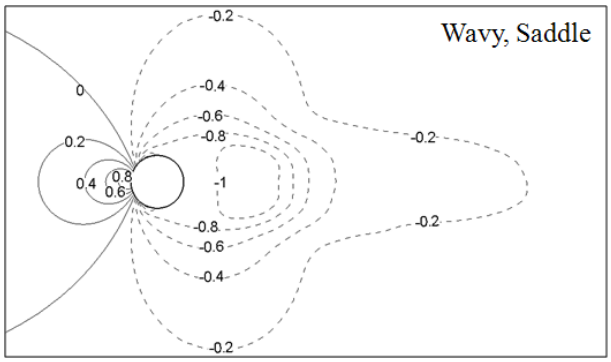
상대적으로 떨어진 영역에서 최대 음압이 작용하는 것을 Fig. 8(e)를 통해 확인할 수 있다. 이러한 평균 유동장의 비교를 통해서 트위스트 실린더가 가장 낮은 압력항력이 작용하는 것으로 판단된다.



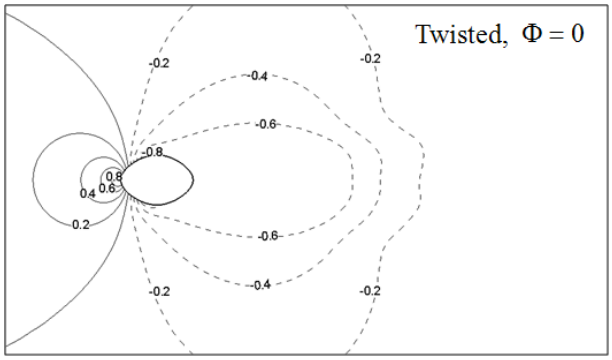
(a)



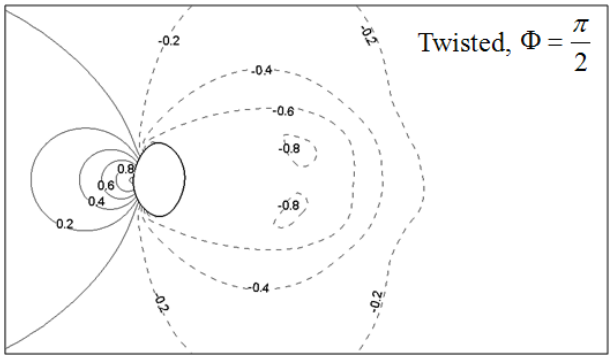
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 8 Time-averaged pressure fields at $Re = 3000$; (a) circular, (b-c) wavy and (d-e) twisted cylinder

4. 결 론

본 연구에서는 뭉툭한 형상을 지닌 해양 칼럼 구조물에서 문제가 되는 와유기진동을 억제하기 위한 방안으로 트위스트 실린더를 제안하였다.

제안된 트위스트 실린더의 항력 및 양력저감의 효과를 확인하기 위해 대형와모사법을 이용하여 아임계(subcritical) 영역에 해당되는 Re=3000 에서 트위스트 실린더 주위 3차원 유동 특성에 대하여 연구하였다. 또 동일한 레이놀즈 수 에서 원형 및 파형 실린더의 유동해석을 추가적으로 수행하였으며 그 유동특성을 트위스트 실린더와 비교하였다.

(1)동일 유동조건에서 원형, 파형 그리고 트위스트 실린더 중 트위스트 실린더에서 가장 낮은 항력과 양력섭동 값을 가지는 것을 확인하였다. 즉, 본 연구에서 제안한 트위스트 실린더가 와유기진동 억제에 효과적인 것으로 판단된다.

(2)순간 유동장들의 비교를 통해 트위스트 실린더는 카르만 와열이 발생되는 다른 실린더와 달리 박리 전단층이 늘어짐에 따라 주기적인 와열의 발생을 억제한다.

(3)트위스트 실린더의 경우, $\Phi = 0$와 $\Phi = \pi/2$에서 관찰되어지는 유동들의 상호작용에 의해서 발생되는 3차원 유동이 트위스트 실린더의 항력과 양력섭동을 저감시키는 것으로 판단된다.

(4)시간 평균된 실린더 표면의 압력분포와 압력장의 비교를 통해서 트위스트 실린더가 다른 실린더들에 비해 가장 낮은 압력항력을 가지는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 비교적 낮은 격자수에서 수치해석을 수행하였으며 제한된 case들에 대하여 트위스트 실린더의 유동특성을 분석하였다. 그러나 추후 연구에서는 트위스트 실린더 주위 유동특성을 심층적으로 이해하기 위해서 복잡한 실린더의 후류 유동특성을 보다 상세히 관찰할 계획이며, 타원 단면의 장축과 단축을 설계변수로 설정하여 타원단면의 장단축비에 따른 유동특성을 분석할 계획이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

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

Chen, Z.S. & Kim, W.J., 2008. Numerical simulation of a large-scale riser with vortex-induced vibration. *Proceedings of the Eighth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, Bangkok, Thailand, pp.121-128.

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.

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.

Cunff, C.L. et al., 2002. Vortex-Induced Vibrations of Risers: Theoretical, Numerical and Experimental Investigation. *Oil & Gas Science and Technology*, 1(57), pp.56-69.

Germano, M. 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 InternationalConference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,* Hamburg, Germany, 4-9 June 2006.

Huang, K. Chen, H.C. & Chen, C.R., 2009. Vertical Riser VIV Simulation in Sheared Current. *The Proceedings of The Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, 21-26 June 2009, pp.1369-1376.

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 Fluids and Structures*, 19(6), pp.815-833.

Lee, S. & Nguyen, A.T., 2007. Experimental investigation on wake behind a wavy cylinder having sinusoidal cross-sectional area variation. *Fluid Dynamics Research*, 39(4), pp.292-304.

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.

Nebres, J. & Batill, S., 1993. Flow about a circular cylinder with a single large-scale surface perturbation. *Experiments in Fluids*, 15(6), pp.369-379.

Norberg, 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.

Norberg, C., 2003. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. *Journal of Fluids and Structures*, 17(1), pp.57-96.

Sirisup, S. Karniadakis, G.E. Saelim, N. & Rockwell, D., 2004. DNS and experiments of flow past a wired cylinder at low Reynolds number. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 23(1), pp.181-188.

Yamamoto, C.T. et al., 2004. Numerical simulations of vortex-induced vibration on flexible cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 19(4), pp.467-489.

Yoon, H.S. Balachandar, S. & Ha, M.Y., 2009. Large eddy simulation of flow in an unbaffled stirred tank for different Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 21(8), pp.085102-085102-16.

Zhou, J. Adrian, R.J. Balachandar, S. & Kendall, T.M., 1999. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vorticies in channel flow. *Journal of fluid mechanics*, 387, pp.353-396.

정 재 환

윤 현 식

최 창 영

전 호 환

박 동 우