

파랑과 조류에 의한 부유식 수직 실린더 구조물에 작용하는 평균 점성 표류력

신동민¹, 문병영^{2*}

¹군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터, ²군산대학교 조선해양공학과

Viscous Mean Drift Forces on a Floating Vertical Cylinder in Waves and Currents

Dong Min Shin¹, Byung Young Moon^{2*}

¹Shipbuilding and Ocean Equipment Industry Empowerment Center, Kunsan National University
²Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Kunsan National University

요약 Semi-submersible, Tension-leg Platform 등과 같은 부유식 해양구조물에서 점성효과를 고려하여 항력에 기인한 점성 표류력을 구하는 것은 최근까지 잘 고려되지 않았던 설계 요소이다. 본 논문에서는 파랑과 조류를 고려한 부유식 수직 실린더 구조물에 작용하는 평균 점성 표류력에 대한 해석적 수식 해를 구하였다. 기존의 고정된 실린더에서 구한 방식과 같이 실린더의 수면 위로 나온 부분을 Splash Zone, 수면 아래의 잠긴 부분을 Submerged Zone 으로 구분하였다. 파랑이 존재하는 경우는 Splash zone 에서만 고려되고, 파랑과 조류를 포함한 경우는 Splash Zone 과 Submerged Zone 모두에서 각각 식을 구하였다. 기존 연구의 RAO 결과값을 활용하여 고정된 실린더에 작용하는 평균 점성 표류력의 계산 결과와 비교하였다. Splash Zone에서 파랑만 존재하는 경우를 제외하고 대부분의 주파수 영역 대에서 부유식 실린더에 작용하는 평균 점성 표류력의 크기가 상대적으로 고정된 실린더에 작용하는 표류력의 크기보다 크게 나오는 것을 볼 수 있으며, 특히 조류가 상대적으로 더 중요하게 고려되는 경우 더 크게 증가함을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구 결과를 통해 부유식 해양 구조물 설계시 항력으로 인한 점성 표류력의 추론을 제시할 수 있다.

Abstract In offshore floating structures, the viscous mean drift force due to drag is considered a design part that has not been considered until recently. In this paper, an analytical solution for the viscous mean drift forces on a floating vertical cylinder considering the waves and currents was obtained. The area was considered by dividing it into a splash zone above the free surface and a submerged zone below the free surface. In the case of waves, only the splash zone was considered; in the case of waves and currents, equations were obtained in both the splash zone and the submerged zone. The RAO results of previous studies were used to compare the calculated results with the drift forces acting on the fixed cylinder. Except for the case in only waves in the splash zone, the viscous mean drift force acting on the floating cylinder was larger than the drift force acting on the relatively fixed cylinder in most frequencies. In particular, the increase was greater when the currents were considered to be more important. Therefore, these results provide the inference for the viscous drift force due to drag in the design of floating offshore structures.

Keywords : Viscous Mean Drift Force, Waves, Currents, Splash Zone, Submerged Zone

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국제협력선도대학 육성·지원사업의 연구결과와 (NRF-2016R1D1A3B03935545) 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선박 안정성 향상을 위한 IMO 2세대 복원성 검증기술 개발 20180318).

*Corresponding Author : Byung Young Moon(Kunsan National Univ.)
email: moonby20@hanmail.net

Received November 5, 2019

Revised December 6, 2019

Accepted March 6, 2020

Published March 31, 2020

1. 서론

규칙적인 파랑의 조건에서 해양의 고정된 또는 부유식 구조물은 큰 선형파에 의한 파력 이외에, 상대적으로 작은 저주파 대역의 2차 평균 파랑 표류력의 힘을 받는다. 이는 지속적으로 변하는 파고 및 파랑의 주파수로 인해 서서히 변하는 추가적인 파력에 해당한다. 선형파의 1차 오더에 해당하는 파력에 비해 평균 표류력은 파고의 2차 오더에 해당하는 힘이다. 표류력의 느리게 변화하는 구성 요소는 수평모드에서 낮은 복원력을 갖는 Semi-submersible, Tension-leg Platform 과 같은 해양 구조물에 특히 중요하다.

선박에 대한 파랑 표류력의 계산은 운동량 보존 법칙과 2차 베르누이 방정식에 의해 수행되었다[1,2]. 또한 3차원 포텐셜 방법을 이용하여 대형 해양구조물에 대한 2차 파랑 표류력을 구한 연구도 있었다[3].

지금까지 파랑에 의한 파력만을 고려했다면 조류를 함께 고려하는 조건에서는 점성 효과를 고려해야 한다. 선박에 대한 실험연구로 점성 효과를 무시할 수 없다는 결과도 있었다[4]. 따라서 점성 효과가 어느 조건에서 지배적이며 전체 분석에 포함되어야 하는지 파악하는 것이 중요해졌다. 최근에는 수직 실린더에 적용하는 평균 점성 표류력에 대해 점성효과를 포함한 근사식을 이용하여 수행되어왔다[5-7]. 또한, 평균 점성 표류력에 대한 수치해석 연구로 Semi-submersible과 Tension-leg Platform 에 작용하는 힘을 계산하는 연구가 있었다[8-10].

본 논문에서는 파도와 조류가 함께 있는 조건에서 부유식 수직 실린더에 작용하는 평균 점성 표류력에 대한 수식으로 구한 해석적 해를 유도하고자 한다. 우선 실린더의 수면 위로 나온 부분을 Splash Zone, 수면 아래의 잠긴 부분을 Submerged Zone 으로 구분하였다. 파랑이 존재하는 경우는 Splash Zone 에서만 고려되고, 파랑과 조류를 포함한 경우는 Splash Zone 과 Submerged Zone 모두에서 각각 식을 구하였다. 모리슨 식의 항력 부분을 시간 평균하여 구한 식으로부터 계산된 결과를 고찰하고 본 연구에 앞서 수행된 고정된 실린더의 경우에 계산된 결과[11]와 비교하였다.

2. 부유식 수직 실린더에 작용하는 점성

표류력

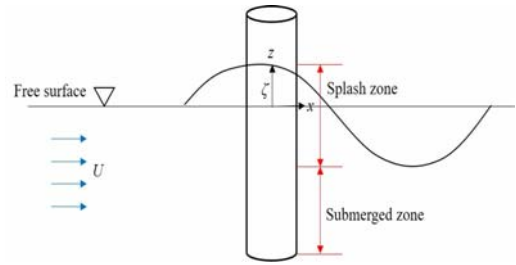


Fig. 1. A floating vertical cylinder in waves and currents

Fig. 1의 부유식 수직 실린더가 있는 상태에서, 수평 방향의 x축과 수직방향의 z축의 2차원으로 문제로 고려한다. 따라서 실린더는 상대적인 파의 수평속도 및 진폭에 영향을 받는다. 부유식 실린더의 경우, 파의 상대 진폭 ζ_r 은 식(1)과 (2)의 $\zeta_{rm}\cos(\omega t + \epsilon_z)$ 에 의해 대체된다.

$$\zeta_{r_m} = \zeta_a \sqrt{1 + (RAO)_z^2 - 2(RAO)_z \cos \epsilon_z} \quad (1)$$

$$\epsilon_z = \arctan \{ z_a \sin \epsilon_z / (\zeta_a - z_a \cos \epsilon_z) \} \quad (2)$$

여기서, ζ_a 는 파의 진폭, z_a 는 구조물의 z방향 운동진폭, RAO는 실린더 구조물의 파에 대한 응답함수, ϵ 는 위상이다. 같은 방식으로 수평방향의 파의 상대 속도 u_r 은 식 (3)과 (4)의 $u_{rm}\cos(\omega t + \epsilon_u)$ 에 의해 대체된다.

$$u_{r_m} = \zeta_a \omega \sqrt{1 + (RAO)_x^2 - 2(RAO)_x \sin \epsilon_x} \quad (3)$$

$$\epsilon_u = \arctan \{ -\dot{x}_m \cos \epsilon_x / (u_m - \dot{x}_m \sin \epsilon_x) \} \quad (4)$$

여기서, $u_m (= \zeta_a \omega e^{kz})$ 은 파 입자의 수평방향 속도 진폭, $k (= 2\pi/\lambda : \text{파장}(\lambda))$ 는 파수, $\omega (= 2\pi/T : \text{주기}(T))$ 는 파의 주파수이다.

2.1 In only waves

단위 길이당 원형 실린더 단면에 대한 모리슨 방정식의 점성 항력 항은 다음과 같다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D (u \cos \omega t) |u \cos \omega t| \quad (5)$$

식 (5)에서, ρ 는 유체의 밀도, C_D 는 항력계수, D 는 실린더의 지름이다. 식 (6)의 Fourier 전개에 의해 식 (5)에 있는 코사인 항이 정리된다.

$$\begin{aligned} \cos \theta | \cos \theta | &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\int_0^{2\pi} |\cos \theta| \cos \theta \cos n \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} \cos^2 n \theta d\theta} \quad (6) \\ &= a_0 + a_1 \cos \theta + a_2 \cos 2\theta + a_3 \cos 3\theta + \dots \end{aligned}$$

식 (6)에서,

$$a_n = 0, \quad n \text{이 짝수 인 경우}$$

$$a_n = (-1)^{\frac{n+1}{2}} \frac{8}{n(n^2-4)\pi}, \quad n \text{이 홀수 인 경우}$$

고정된 실린더의 경우에서의 식 유도과 비슷하게 u 는 u_{rm} 에 의해 대체되어 Splash Zone에서 평균 점성 표류력은 실린더 단위 길이당 힘을 적분하여 구한다. 정리하여 구한 식은 식 (7)과 같다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho C_D D \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^{\zeta} u_{r_m}^2 |\cos(\omega t + \epsilon_u)| \{ \cos(\omega t + \epsilon_u) \} dz dt \quad (7)$$

$$= \frac{2}{3\pi} \rho C_D D u_{r_m}^2 \zeta_{r_m} \cos(\epsilon_u - \epsilon_\zeta)$$

$g(=9.81 \text{ m/s}^2)$ 는 중력가속도이다. Splash Zone에서의 평균 표류력은 파의 진폭(ζ_s)의 세제곱에 따라 변하지만 고정된 실린더와 다르게 실린더 구조물 RAO, 즉 파의 주파수의 응답함수가 들어간 복잡한 수식의 함수로 구성되어 있다. 그리고 고정된 실린더의 경우와 마찬가지로 파랑만 존재할 때 Submerged Zone에서의 평균 점성 표류력은 0이다.

2.2 Waves and Currents (I)

유속이 U 인 조류와 파랑을 함께 고려하는 경우, 단위 길이당 부유식 수직 실린더에 작용하는 모리슨 방정식의 항력 부분은 식 (8)과 같다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D (u_r + U) |u_r + U| \quad (8)$$

마찬가지로 실린더 단위 길이당 힘을 적분하여 평균 표류력을 구하면 식 (9)가 되고 $|U| \geq u_{r_m}$ 의 조건에서 식 (10)로 정리된다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho C_D D \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^{\zeta} (U + u_{r_m} \cos(\omega t + \epsilon_u))^2 \cos(\omega t + \epsilon_u) dz dt \quad (9)$$

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho C_D D U u_{r_m} \zeta_{r_m} \cos(\epsilon_u - \epsilon_\zeta) \quad (10)$$

반대로 $|U| < u_{r_m}$ 의 조건에서는 식 (9)가 아래 변수들로 치환되어 계산된 수식을 정리할 수 있다.

$$\gamma = U/u_{r_m}$$

$$\cos \theta = -\gamma \quad U > 0 : \pi/2 \leq \theta \leq \pi$$

$$U < 0 : 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

따라서, $|U| < u_{r_m}$ 의 조건에서 복잡한 수식전개를 통해 정리된 평균 점성 표류력에 대한 표현식은 다음과 같은 식 (11)이 된다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{\pi} \rho C_D D \zeta_{r_m} u_{r_m}^2 \times \left[\begin{aligned} & \gamma^2 \sin \theta \cos \epsilon_\zeta + \frac{\gamma}{2} \left\{ (2\theta - \pi) \cos(\epsilon_u - \epsilon_\zeta) \right. \\ & \left. + \sin 2\theta \cos(\epsilon_u + \epsilon_\zeta) \right\} \\ & + \left(\frac{1}{3} \sin \theta \right) \left\{ \cos \epsilon_\zeta \left(\frac{1}{2} \cos 2\theta (\cos 2\epsilon_u + 1) \right. \right. \\ & \left. \left. + \cos \epsilon_u (2 \cos(\epsilon_u - \epsilon_\zeta) \right. \right. \\ & \left. \left. + (\cos 2\theta + 1) \right) \right\} \left(\times \sin \epsilon_u \sin \epsilon_\zeta \right) \end{aligned} \right] \quad (11)$$

2.3 Waves and Currents (II)

Submerged Zone에서 또한 u_{rm} 은 $\zeta_{rm} \omega e^{kz}$ 로 대체되며 이러한 계산이 실린더의 수면 아래 잠긴 깊이까지 반복된다. 정리된 식은 식 (12)와 같다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho C_D D \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ U^2 + 2U u_{r_m} \cos(\omega t + \epsilon_u) + u_{r_m}^2 \cos^2(\omega t + \epsilon_u) \right\} dt \quad (12)$$

따라서 본 논문의 2.2절의 계산절차와 마찬가지로 수식을 전개하면 $|U| \geq u_{r_m}$ 의 조건에서 식 (13)과 같다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho C_D D u_{r_m}^2 \left(\gamma^2 + \frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

$|U| < u_{r_m}$ 의 조건에서는 모리슨 방정식의 항력 부분은 식 (9)과 같고 마찬가지로 치환된 변수들을 이용한 평균 점성 표류력은 식 (14)로 표현된다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2\pi} \rho C_D D u_{r_m}^2 \left\{ \gamma^2 (2\theta - \pi) + \frac{1}{2} (2\theta - \pi + \sin 2\theta \cos 2\epsilon_u) + 4\gamma \sin \theta \cos \epsilon_u \right\} \quad (14)$$

3장에서의 계산수행을 위해 본 연구에서 도출된 식들에 있는 변수 값들의 범위와 가정된 상수들에 대해 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Variables and constants values in the equations

Variables & Constants	Value
ρ	1025 (kg/m ³)
g	9.81 (m/s ²)
D	0.075 (m)
C_D	1
$\lambda(k=2\pi/\lambda)$	$0 < D/\lambda < 0.1$
ω	$\omega^2 = gk$
ζ_s	0.05 (m)

3. 수식 계산 결과

본 논문의 2장에서 Splash Zone과 Submerged Zone에서 구한 평균 점성 표류력 해의 결과 식에 대해 Table 2에는 파랑만 존재하는 경우, Table 3에는 조류가 파랑보다 우세($|U| \geq u_m$)한 경우, Table 4에는 파랑이 조류보다 우세한 경우($|U| < u_m$)에 대해 기존의 고정된 실린더의 경우에서 구한 해[11]와 비교하기 쉽도록 구분하여 나타내었다.

Table 2. Analytic solution of viscous mean drift forces on floating and fixed vertical cylinders in waves

Case 1		Waves
Splash Zone	Floating Cylinder	$\frac{2}{3\pi} \rho C_D D u_{r_m}^2 \zeta_m \cos(\epsilon_u - \epsilon_c)$
	Fixed Cylinder	$\frac{2}{3\pi} \rho g k C_D D \zeta_a^3$
Submerged Zone	Floating cylinder	0
	Fixed Cylinder	

Table 2~4에 있는 평균 점성 표류력의 수식을 바탕으로 점성 효과가 주도적인 실린더 지름 대비 파장의 비인 $D/\lambda < 0.1$ 조건 하에서 다음과 같은 4가지 경우에서 ((i) 파랑만 존재, (ii) Splash Zone에서 파랑+조류 존재, (iii) Submerged Zone에서 파랑+조류 존재, (iv) Splash Zone + Submerged Zone) 입사파의 진폭을 고정하여 수행한 부유식 실린더에 작용하는 평균 점성 표류력에 대한 계산결과를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 계산과 분석의 편의성을 위해 점성 표류력 계산식에서 항력계수 $C_D=1$, 파 변위와 속도의 위상차($\epsilon_u - \epsilon_c$)는 0으로 가정하였다. 또한, 부유식 실린더에 작용하는 표류력을 계산하기 위해 식 (1)과 (3)에서 필요한 x방향(Surge)과 z방향(Heave)의 RAO 값은 기존 연구[12]의 실험데이터를 참고하여 계산을 수행하였다. Fig. 2는 $|U| \geq u_m$, Fig. 3은 $|U| < u_m$ 의 경우로 W(Splash)는 Splash Zone에서 파랑만 존재할 때, W+C(Splash)는 Splash Zone에서 파랑과 조류가 함께 존재할 때, W+C(Submerged)는 Submerged Zone에서 파랑과 조류가 함께 존재할 때, W+C(Total)은 앞의 세 가지 경우를 모두 합산한 계산의 결과이다. Fig. 2의 파랑만 존재하는 경우, Splash Zone에서 평균 점성 표류력의 크기가 상대적으로 매우 작아

점성 효과가 덜 중요하게 고려해도 된다는 사실을 유추해 낼 수 있으며 물리적으로도 타당함을 알 수 있다.

그러나 파랑과 조류가 동시에 존재하는 경우, 조류로 인한 점성 효과가 상대적으로 중요해지며 수면 근처의 Splash Zone에서도 크기가 커지면서 특히 실린더가 잠긴 부분의 Submerged Zone에서는 가장 주도적인 크기로 작용하는 힘의 요소라는 점을 알 수 있다.

Table 3. Analytic solution of viscous mean drift forces on floating and fixed vertical cylinders in waves and currents ($|U| \geq u_m$)

Case 2		Waves-currents ($ U \geq u_m$)
Splash zone	Floating Cylinder	$\frac{1}{2} \rho C_D D U u_{r_m} \zeta_m \cos(\epsilon_u - \epsilon_c)$
	Fixed Cylinder	$\frac{1}{2} \rho C_D D \zeta_a U u_m$
Submerged zone	Floating cylinder	$\frac{1}{2} \rho C_D D u_{r_m}^2 \left(\gamma^2 + \frac{1}{2} \right)$
	Fixed Cylinder	$\frac{1}{2} \rho C_D D u_m^2 \left(\gamma^2 + \frac{1}{2} \right)$

Table 4. Analytic solution of viscous mean drift forces on floating and fixed vertical cylinders in waves and currents ($|U| < u_m$)

Case 3		Waves-currents ($ U < u_m$)
Splash zone	Floating Cylinder	$\frac{1}{\pi} \rho C_D D \zeta_a u_m^2 \times \left[\begin{aligned} & \gamma^2 \sin \theta \cos \epsilon_c + \frac{\gamma}{2} \left\{ (2\theta - \pi) \cos(\epsilon_u - \epsilon_c) \right. \\ & \left. + \sin 2\theta \cos(\epsilon_u + \epsilon_c) \right\} \\ & + \left(\frac{1}{3} \sin \theta \right) \left\{ \cos \epsilon_c \left(\frac{1}{2} \cos 2\theta (\cos 2\epsilon_u + 1) \right. \right. \\ & \left. \left. + \cos \epsilon_u 2 \cos(\epsilon_u - \epsilon_c) \right) \right. \\ & \left. \left. + (\cos 2\theta + 1) \right\} \right. \\ & \left. \left. \times \sin \epsilon_u \sin \epsilon_c \right\} \right]$
	Fixed Cylinder	$\frac{1}{\pi} \rho C_D D \zeta_a u_m^2 \left\{ \begin{aligned} & \gamma^2 \sin \theta \\ & + \frac{1}{12} (\sin 3\theta + 9 \sin \theta) \\ & + \frac{\gamma}{2} (2\theta - \pi + \sin 2\theta) \end{aligned} \right\}$
Submerged zone	Floating cylinder	$\frac{1}{2\pi} \rho C_D D u_{r_m}^2 \left\{ \begin{aligned} & \gamma^2 (2\theta - \pi) \\ & + \frac{1}{2} (2\theta - \pi) \\ & \left. + \sin 2\theta \cos 2\epsilon_u \right\} + 4\gamma \sin \theta \cos \epsilon_u$
	Fixed Cylinder	$\frac{1}{2\pi} \rho C_D D u_m^2 \left\{ \begin{aligned} & \gamma^2 (2\theta - \pi) \\ & + \frac{1}{2} (2\theta - \pi + \sin 2\theta) \\ & + 4\gamma \sin \theta \end{aligned} \right\}$

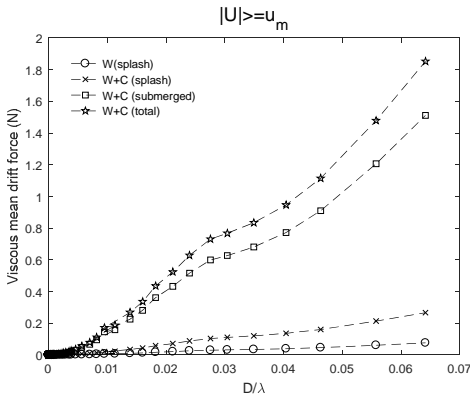


Fig. 2. Viscous Mean Drift Forces on a Floating Vertical Cylinder ($|U| \geq u_m$, $U = 1.5u_{r_m}$) : (i) In Waves(-○-), (ii) Waves and Currents in the Splash Zone(-x-), (iii) Waves and currents in the Submerged Zone(-□-), (iv) Splash Zone + Submerged Zone(-☆-)

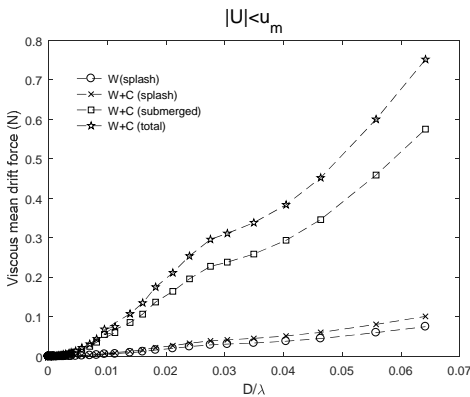


Fig. 3. Viscous Mean Drift Forces on a Floating Vertical Cylinder ($|U| < u_m$, $U = 0.75u_{r_m}$) : (i) In Waves(-○-), (ii) Waves and Currents in the Splash Zone(-x-), (iii) Waves and Currents in the Submerged Zone(-□-), (iv) Splash Zone + Submerged Zone(-☆-)

$|U| < u_m$ 조건에서 계산한 Fig. 3의 결과에서도 마찬가지로 파랑과 조류가 함께 고려되는 경우는 점성 효과로 기인한 상당한 크기의 표류력이 발생함을 알 수 있다. 그러나 Splash Zone에서 파랑만 존재할 때, $|U| \geq u_m$ 의 Fig. 2의 결과에 비해 상대적으로 조류의 영향이 줄어들기 때문에 평균 점성 표류력의 크기가 조류를 함께 고려할 때와 거의 비슷한 크기의 힘을 보여준다.

Fig. 4와 Fig. 5는 Fig. 2와 Fig. 3의 부유식 실린더에 대한 결과에 더해 Splash Zone과 Submerged Zone 및 파랑과 조류를 고려하는 각각의 경우에 대해 고정된 실린더에서 계산한 결과와 비교하여 나타는 결과이다. Splash Zone에서 파랑만 존재하는 경우를 제외하고 대부분의 주파수 영역 내에서 부유식 실린더에 작용하는 평균 점성 표류력의 크기가 상대적으로 고정된 실린더에 작용하는 표류력의 크기보다 크게 나오는 것을 볼 수 있으며, 특히 조류가 상대적으로 더 중요하게 고려되는 경우 더 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 조류에 해당하는 유속이 흐르게 되는 경우 점성 효과로 인한 와류 발산 등 RAO 값으로 나타나는 실린더의 운동을 함께 동반하는 유체력이 더 크게 작용하기 때문이다.

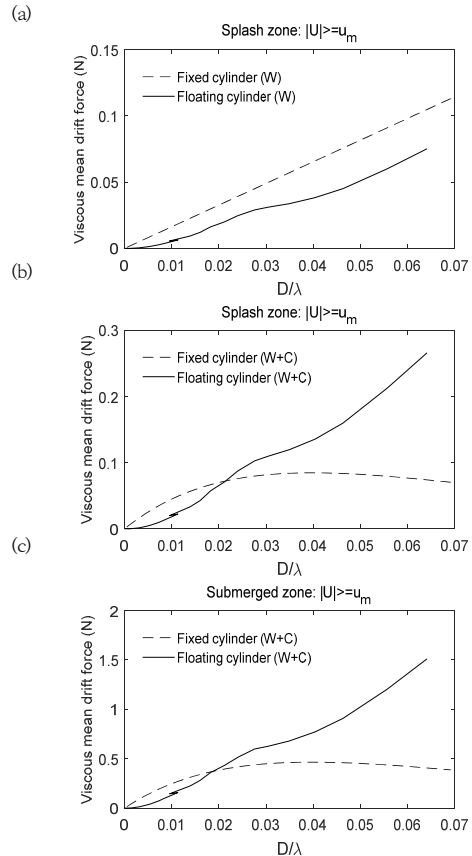


Fig. 4. Viscous Mean Drift Forces on Fixed and Floating Vertical Cylinders ($|U| \geq u_m$, $U = 1.5u_{r_m}$): (a) In only Waves in the Splash Zone, (b) Waves and Currents in the Splash Zone, (c) Waves and Currents in the Submerged Zone.

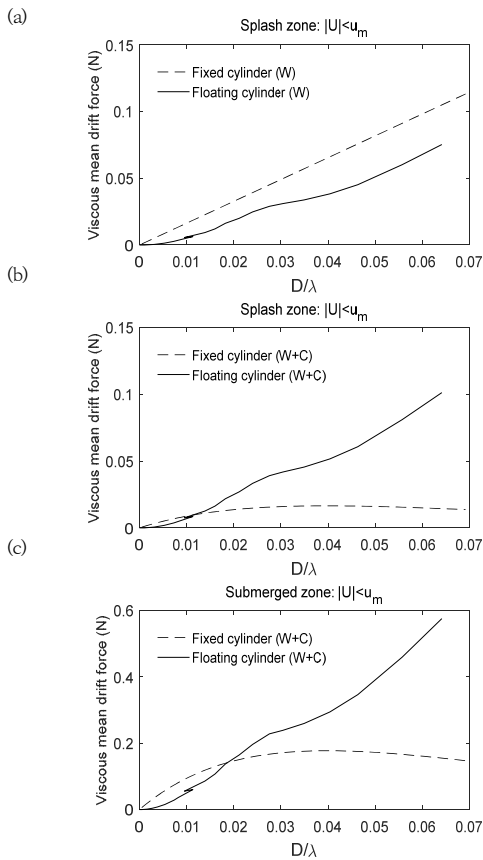


Fig. 5. Viscous Mean Drift Forces on Fixed and Floating Vertical Cylinders ($|U| < u_m$, $U = 0.75u_m$): (a) In only Waves in the Splash Zone, (b) Waves and Currents in the Splash Zone, (c) Waves and Currents in the Submerged Zone.

4. 결론

파랑과 조류를 고려한 부유식 수직 실린더에 작용하는 점성 표류력에 대한 수식으로 구한 해석적 해를 유도하였다. 실린더의 수면 위로 나온 부분을 Splash Zone, 수면 아래의 잠긴 부분을 Submerged Zone 으로 구분하였다. 파랑이 존재하는 경우는 Splash Zone 에서만 고려되고, 파랑과 조류를 포함한 경우는 Splash Zone 과 Submerged Zone 모두에서 각각 식을 구하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 파랑만 존재하는 경우, Splash Zone에서 평균 점성 표류력의 크기가 상대적으로 매우 작아 점성 효과가 덜 중요하게 고려된다.

- (2) 파랑과 조류가 동시에 존재하는 경우, 조류로 인한 점성 효과가 상대적으로 중요해지며 수면 근처의 Splash Zone에서도 크기가 커지면서 특히 실린더가 잠긴 부분의 Submerged Zone에서는 가장 주도적인 크기로 작용하는 힘의 요소이다.
- (3) 부유식 실린더에 작용하는 평균 점성 표류력은 고정된 실린더보다 점성 효과로 인한 와류 발산 등 실린더의 운동을 함께 동반하는 유체력이 더 크게 작용한다.

따라서 파랑과 조류가 동시에 존재하는 경우, 점성 효과로 인한 상당한 크기의 평균 점성 표류력이 발생하기 때문에 Semi-submersible, Tension-leg Platform 등과 같은 해양구조물 설계에 있어서 항력에 기인한 점성 표류력 계산을 염두에 두어야 함을 보여준다.

지금까지 본 연구에서 도출한 수식들을 통해 주어진 설계 변수들에 의한 평균 점성 표류력을 계산할 수 있으며, 각각의 경우에 해당하는 표류력의 크기가 구체적인 물리적인 범위 내에서 주도적인 영향을 끼치는지 판단할 수 있는 이론적 근거를 제시한다. 추후 실험연구를 통해 이론적 검증을 실시하고 전산유체시뮬레이션 결과와의 비교 및 차이점 또한 설명할 예정이다.

References

- [1] J. N. Newman, "The drift force and moment on ships in waves," *Journal of Ship Research*, vol. 11, no. 1, pp. 51-60, 1967.
- [2] J. A. Pinkster, "Mean and low-frequency wave drift forces on floating structures," *Ocean Engineering*, vol. 6, no. 6, pp. 593-615, 1979. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(79\)90010-6](https://doi.org/10.1016/0029-8018(79)90010-6)
- [3] S. K. Chakrabarti, D. C. Cotter, "First and second order interaction of waves with large offshore structures," Chicago Bridge & Iron Inc., pp. 171-187, 1983.
- [4] C. Ferretti, M. Berta, "Viscous effect contribution to the drift forces on floating structures," *International Symposium on Ocean Engineering and Shiphandling*, 1980.
- [5] R. G. Standing, N. M. C. Dacunha, R. B. Marten, "Mean wave drift forces: theory and experiment," *NASA STI/Recon Technical Report*, no. 83, 1981.
- [6] H. Lundgren, S. E. Sand, J. Kirkegaard, "Drift forces and damping in natural sea states - a critical review of the hydrodynamics of floating structures," Cambridge Massachusetts, vol. 2, pp. 592-607, 1982.

- [7] J. P. F. Denise, N. J. A. Heaf, "Comparison between linear and nonlinear response of a proposed tension leg production platform," *Offshore Technology Conference*, 1979.
- [8] J. G. L. Pijfers, A. W. Brink, "Calculated drift forces of two semisubmersible platform types in regular and irregular waves," *Offshore Technology Conference*, 1977.
- [9] G. Sebastiani, A. D. Greca, G. Bucaneve, "Characteristics and dynamic behavior of Technomare's tension leg platform," *Hydrodynamics in Ocean Engineering*, Trondheim, Norway, vol. 198, pp. 947-961, 1981.
- [10] A. K. Dev, J. A. Pinkster, "Viscous drift forces on semi-submersibles," TU Delft, Faculty of Marine Technology, Ship Hydromechanics Laboratory, Report No. 1221-P, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, RINA, Part B*, vol. 143, 2001.
- [11] D. M. Shin, Y. Kim, and B. Y. Moon, "Mean viscous drift forces on a fixed vertical cylinder in waves and currents," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Accepted, 2019.
- [12] M. Collu, M. Borg, A. Shires, F. N. Rizzo, E. Lupi, "FloVAWT: Further progresses on the development of a coupled model of dynamics for floating offshore VAWTs," *In ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, 2014.

문 병 영(Byung Young Moon)

[정회원]



- 1998년 9월 : 고베대학교 기계공학전공 (공학석사)
- 2002년 3월 : 고베대학교 기계공학전공 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2007년 2월 : 부산대학교 연구교수

• 2007년 3월 ~ 2010년 2월 : 기업은행 연구위원

• 2010년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 조선해양공학과 교수

〈관심분야〉

해양에너지, 해양구조물 운동, 선박 복원성 계산

신 동 민(Dong Min Shin)

[정회원]



- 2015년 2월 : 한국과학기술원 해양시스템공학전공 (공학석사)
- 2019년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터 연구교수

〈관심분야〉

유체역학, 해양파, 부유체 동역학, 선박 복원성 계산