비선형 페리그린 모델을 이용한 이동형 소방용수 저장탱크 수직 벽면에서의 동유체력 수치 계산 연구

Hydrodynamic Force on the Vertical Wall of a Portable Water Storage Tank: Nonlinear Peregrine Model

박진수* · 소수현** · 장택수***

Park, Jinsoo*, So, Soohyun**, and Jang, Taek Soo***

Abstract

In this study, the motion of free-surface generated by vertically dropping water through a nozzle into a portable water storage tank with a convex bottom in calm conditions was numerically simulated using the nonlinear Peregrine model. The hydrodynamic force at the vertical wall was calculated after measuring the maximum run-up amplitude of the free-surface. The degree of improvement of the results using a nonlinear model was identified by its comparison with numerical results using the linear Peregrine model. Finally, it is expected that the hydrodynamic forces on the vertical wall of the storage tank with a convex bottom can be reduced to a certain extent compared to the concave bottom and can therefore be utilized as basic data for the structural design of an ideal storage tank.

Key words : Portable Water Storage Tank, Nonlinear Peregrine Model, Hydrodynamic Force

요 지

본 연구에서는 노즐을 통해 잔잔한 상태의 이동형 소방용수 저장탱크 내로 소방용수를 수직 낙하시킬 때 발생하는 자유수면 출렁임을 비선형 페리그린 모델로 수치 모의하고 수직 벽면에서 수면의 최대 오름 높이를 측정하여 최대 동유체력을 계산하였다. 이를 선형 페리그린 모델을 이용한 수치 모의 결과와 비교하여 비선형 모델과의 수직 벽면에서의 파고 높이 및 동유체력 차이를 확인하였다. 마지막으로 오목한 바닥면에 비해 볼록한 바닥면을 가진 저장탱크의 수직 벽면에서의 동유체력이 어느 정도 감소될 수 있는지 확인하였다. 이러한 연구를 통해 소방용수 저장탱크의 자유수면의 출렁임에 의한 동유체력 영향을 구조 설계에 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 이동형 소방용수 저장탱크, 비선형 페리그린 모델, 동유체력

1. 서 론

소방용수가 부족할 수 있는 대형 산불현장, 장대터널 내 화재현장 등에서는 화재 진압용수를 미리 저장할 수 있는 이동형 소방용수 저장탱크의 필요성이 대두되어 국외에서는

소방차에 수납할 수 있고 현장에서 소방관이 간단하게 설치할 수 있는 이동형 용수 저장탱크가 제품화되어 화재현장에서 활용되고 있는 사례가 많다. 최근 국내에서도 국가 연구과제를 통하여 이동형 소방용수 저장탱크가 개발되었으며 제품을 통하여 화재현장에 활용될 수 있도록 시도하고 있는

*정회원, 부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터 연수연구원(E-mail: jinsu@pusan.ac.kr)

Member, Post Doc. Researcher, Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants(GCRC-SOP), Pusan National University

**정회원, 경일대학교 소방방재학과 교수(E-mail: soohyunso@hanmail.net)

Member, Professor, Department of Fire Safety, Kyungil University

***교신저자, 정회원, 부산대학교 조선해양공학과 교수(Tel: +82-51-510-2789, Fax: +82-51-581-3718, E-mail: taek@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

실정이다. 최근 개발된 이동형 소방용수 저장탱크에 대하여 호스를 이용하여 소방용수를 공급할 때 용수 낙하에 의해 발생하는 수면의 출렁임으로 인한 동유체력(Hydrodynamic Force)이 탱크의 수직 벽면에 영향을 미칠 수 있는 가능성에 대한 수치적 해석이 수행되어 동유체력에 의한 저장탱크의 안전성을 확인한 연구 사례가 발표되고 있다.

먼저 Park et al. (2017)은 해양유체역학 분야에서의 천수 영역의 대표적 자유수면의 운동 지배방정식인 부시네스크 방정식을 도입하여 소방용수 수직 낙하에 따른 자유수면의 출렁임을 수치 모의하고 수직 벽면에서의 파고 높이를 측정하여 동유체력을 계산하여 국내에서 처음으로 저장탱크의 자유수면의 출렁임에 대해 수직벽면에서의 동유체력 영향과 구조 안정성을 논하였다. 또한 Park et al. (2018)과 So et al. (2018)에서는 바닥면이 오목할 경우와 볼록할 경우에 대해 선형 페리그린 방정식을 수치 모델로 사용하여 용수 공급 노즐로부터 낙하하는 소방용수가 발생시킨 자유수면의 운동을 수치 모의하고, 수직 벽면에서의 동유체력을 비교하여 볼록한 바닥면의 경우 동유체력의 감소 효과가 있음을 보였다. Park et al. (2019)은 비선형 페리그린 모델을 이용하여 오목한 바닥면의 탱크 수직 벽면에서의 동유체력이 크게 증폭됨을 확인한 바가 있다.

본 연구에서는 So et al. (2018)과 Park et al. (2018)의 연구와는 달리 비선형 페리그린 방정식을 이용하여 볼록한 바닥면을 가진 소방용수 저장탱크의 벽면에서의 자유수면의 출렁임을 수치 모의하고 수직 벽면에서의 동유체력을 계산한다. 그리고 그 결과를 바탕으로 선형 페리그린 모델을 이용하여 구한 동유체력 계산 결과가 과소평가될 수 있음을 확인하고 비선형 페리그린 모델을 이용하여 오목한 바닥면의 저장탱크에서 증폭된 동유체력이 볼록한 바닥면으로 설계함에 따라 어느 정도 감소될 수 있는지 확인하고자 한다. 본 연구결과를 통해, 이동형 소방용수 저장탱크의 구조적으로 안정적인 설계와 저장탱크 사용 환경에 대한 보다 정확한 기초 자료를 제공할 것으로 기대한다.

2. 수치 모의 개요

2.1 비선형 페리그린 모델

탱크내 자유수면의 출렁임을 수치 모의하기 위해 천수(Shallow Water) 영역의 대표적 지배방정식인 비선형 페리그린 방정식을 도입한다. 페리그린 방정식은 1967년 가변 수심에서의 자유수면파를 수치 모의할 수 있는 약 분산성/약 비선형 지배 방정식으로 적용 가능한 영역이 $kh < 0.75$ ($k(=2\pi/L)$: 파수(Wavenumber), L : 파장, h : 수심)이다(Madsen et al., 2002). 예를 들어, 수심이 1 m일 경우, 파장은 8 m 이상, 수심이 0.6 m일 때는 3 m 이상의 파장을 가지는 파랑의 수치 모의에 활용 가능하다. 비선형 페리그린 방정식은 다음과 같다(Peregrine, 1967; Jang, 2018).

$$\eta_t + [u(h+\eta)]_x = 0, \quad (1)$$

$$u_t + uu_x + g\eta_x - \frac{1}{2} \left[h(hu)_{xx} - \frac{1}{3} h^2 u_{xx} \right]_t = 0 \quad (2)$$

여기서, $\eta(x,t)$ 는 자유수면 파고함수, $u(x,t)$ 는 수심 평균 유속함수(Depth-averaged Velocity), $h(x)$ 는 정지 수면에서 바닥면까지의 수심 함수, g 는 중력가속도(9.81 m/s^2)이다.

Eqs. (1)과 (2)는 이 관계식은 비선형성 매개변수($\epsilon = a/h$, a : 파의 진폭)가 매우 작다는 가정 하에서 기존 $(u\eta)_x$ 와 uu_x 항을 생략하면, So et al. (2018)과 Park et al. (2018)에서 소개한 선형 페리그린 방정식과 동일하다. 따라서 Eqs. (1)과 (2)는 기존 선형 페리그린 방정식에 비해 좀 더 큰 진폭의 파랑 수치 모사에 적합하다(Osborne, 2010). Eqs. (1)과 (2)의 초기 조건은 Eq. (3)과 같다.

$$\eta_1(x) = \eta(x,0), \quad u_1(x) = u(x,0) \quad (3)$$

Eqs. (1)과 (3)의 초기치 문제(Initial Value Problem)의 수치 해법은 최근 Jang (2018)이 개발한 함수 반복 해법을 이용한다.

$$\mathbf{X}^{n+1} = \mathbf{T}_{h_p}(\mathbf{X}^n) \quad (4)$$

여기서, n 은 해를 얻기 위한 반복 횟수, $\mathbf{X}$ 는 X_i , $i = 1, 2, \dots, 7$ 로 구성된 벡터 변수로서

$$\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7)^T \\ = (\eta, \eta_x, u, u_x, u_t, u_{xt}, u_{xxt})^T, \quad (5)$$

$\mathbf{X}^n$ 는 반복 과정 (4)의 n 회 반복해, $\mathbf{T}_{h_p}$ 는 비선형 결합 연산자로서 다음과 같다.

$$\mathbf{T}_{h_p}(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} H^{(1)} \\ H_x^{(1)} \\ V^{(1)} \\ V_x^{(1)} \\ V_t^{(1)} \\ V_{xt}^{(1)} \\ V_{xxt}^{(1)} \end{pmatrix} [\eta_1] + \begin{pmatrix} H^{(2)} \\ H_x^{(2)} \\ V^{(2)} \\ V_x^{(2)} \\ V_t^{(2)} \\ V_{xt}^{(2)} \\ V_{xxt}^{(2)} \end{pmatrix} [u_1] + \begin{pmatrix} H^{(3)} \\ H_x^{(3)} \\ V^{(3)} \\ V_x^{(3)} \\ V_t^{(3)} \\ V_{xt}^{(3)} \\ V_{xxt}^{(3)} \end{pmatrix} [\phi(\mathbf{X})] + \begin{pmatrix} H^{(4)} \\ H_x^{(4)} \\ V^{(4)} \\ V_x^{(4)} \\ V_t^{(4)} \\ V_{xt}^{(4)} \\ V_{xxt}^{(4)} \end{pmatrix} [\psi(\mathbf{X})] \quad (6)$$

이때, Eqs. (5)와 (6)에서 파고함수 $X_1(=\eta)$ 와 수심 평균 유속함수 $X_3(=u)$ 는 다음과 같다.

$$X_1 = H^{(1)}(\eta_1) + H^{(2)}(u_1) + H^{(3)}(\phi) + H^{(4)}(\psi), \quad (7)$$

$$X_3 = V^{(1)}(\eta_1) + V^{(2)}(u_1) + V^{(3)}(\phi) + V^{(4)}(\psi). \quad (8)$$

그리고 Eqs. (7)과 (8)을 구성하는 적분연산자 $H^{(j)}$, $V^{(j)}$, $j=1,2,3,4$ 는 각각 아래와 같다(Jang, 2018).

$$H^{(1)}(\eta_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \cos \omega_B t \cos [k(x-\xi)] \eta_1(\xi) d\xi dk, \quad (9a)$$

$$H^{(2)}(u_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \sqrt{\frac{h_p(1+h_p^2 k^2/3)}{g}} \sin \omega_B t \cdot \sin [k(x-\xi)] \cdot u_1(\xi) d\xi dk, \quad (9b)$$

$$H^{(3)}(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \cos [\omega_B(t-\tau)] \cdot \cos [k(x-\xi)] \cdot \phi(\xi, \tau) d\xi dk d\tau, \quad (9c)$$

$$H^{(4)}(\psi) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \sqrt{\frac{h_p}{g(1+h_p^2 k^2/3)}} \sin [\omega_B(t-\tau)] \cdot \sin [k(x-\xi)] \cdot \psi(\xi, \tau) d\xi dk d\tau, \quad (9d)$$

$$V^{(1)}(\eta_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \sqrt{\frac{g}{h_p(1+h_p^2 k^2/3)}} \cdot \sin \omega_B t \cdot \sin [k(x-\xi)] \cdot \eta_1(\xi) d\xi dk, \quad (9e)$$

$$V^{(2)}(u_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \cos \omega_B t \cdot \cos [k(x-\xi)] \cdot u_1(\xi) d\xi dk, \quad (9f)$$

$$V^{(3)}(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \sqrt{\frac{g}{h_p(1+h_p^2 k^2/3)}} \sin [\omega_B(t-\tau)] \cdot \sin [k(x-\xi)] \cdot \phi(\xi, \tau) d\xi dk d\tau, \quad (9g)$$

$$V^{(4)}(\psi) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{1+h_p^2 k^2/3} \cos [\omega_B(t-\tau)] \cdot \cos [k(x-\xi)] \cdot \psi(\xi, \tau) d\xi dk d\tau \quad (9h)$$

$$\omega_B = \sqrt{\frac{gh_p k^2}{1+h_p^2 k^2/3}} \quad (9i)$$

이때, h_p 는 모조 상수(Pseudo-parameter)로서 Eqs. (1)과 (2)와 비선형 적분방정식 (9)를 연결할 수 있게 하며 함수 반복해의 수렴성에 관여한다. 그리고 Eqs. (5)와 (6)의 나머지 X_i , $i=2,4,\dots,7$ 은 편미분 관계, 즉, $X_2=(X_1)_x$, $X_4=(X_3)_x$, $X_5=(X_3)_t$, $X_6=(X_4)_t$, $X_7=(X_6)_x$ 와 같이 Eqs. (7)과 (8)을 각각 시간 및 공간에 대한 편미분을 통해 계산할 수 있다 (Jang, 2018).

2.2 수치 계산영역

탱크내로 용수를 공급하는 노즐의 위치와 높이를 조절하면서 자유수면 운동과 수직 벽면 충돌 현상을 수치 모의하기 위해 Fig. 1과 같이 경상 이미지(Mirror Image) 모델을 도입하였다(Park et al., 2017, 2018, 2019; So et al., 2018). 노즐의 폭을 w , 위치를 $\pm x_0$, 낙하 높이를 a 로 하여 Eq. (3)의 낙하 용수의 초기 조건을 설정한다.

$$\eta_1(x) = \begin{cases} a & |x \pm x_0| < w/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad u_1(x) = 0. \quad (10)$$

Eq. (10)은 노즐에서 낙하하는 용수를 자유 수면과 충돌 직전의 사각형의 형태로 가정한 $\eta_1(x)$ 으로, 초기 수심평균 유속함수는 충돌 전 정지 수면($u_1(x)$)으로 가정하였다. Fig. 1의 불투한 바닥면을 대략적으로 Eq. (11a)의 함수를 사용하였다.

$$h(x) = 0.8 + 0.2 \cos(\pi x/10) \quad (11a)$$

반면, 오목한 바닥면의 경우,

$$h(x) = 0.8 - 0.2 \cos(\pi x/10) \quad (11b)$$

와 같다. 수치 계산 영역은 $-20 \text{ m} \leq x \leq 20 \text{ m}$ ($L = 20 \text{ m}$), 격자 간격은 $\Delta x = 0.1 \text{ m}$ 이다. 이때, 탱크 내의 실제 물리적 영역은 $-20 \text{ m} \leq x \leq 0 \text{ m}$, 가상의 수직 벽면 위치를 0 m , 경상 이미지 영역을 $0 \text{ m} \leq x \leq 20 \text{ m}$ 로 설정한다.

Fig. 1. Computational Domain of the Present Study

3. 수치 모의 결과

노즐의 위치($x_0 = 2$ m, 3 m)와 높이($a = 0.2$ m, 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m)를 변화하여 수치 모의를 수행하였다. 그리고 수직 벽면에서 측정된 자유수면의 최대 오름 높이 ($\eta_{\max}$)에 따른 정수력 대비 동유체력의 비(R)를 Eq. (12)를 통해 구할 수 있다.

$$R = F_D / F_S = \frac{\rho g (h_{\text{wall}} + \eta_{\max})^2 / 2}{\rho g h_{\text{wall}}^2 / 2} = \left(1 + \frac{\eta_{\max}}{h_{\text{wall}}} \right)^2 \quad (12)$$

이때, F_S 는 잔잔한 상태에서 수직 벽면에 작용하는 정수력 크기, F_D 는 수직 벽면에서 작용하는 동유체력 크기이다. h_{wall} 은 수직 벽면에서의 수심으로 Eq. (11)에 따라 오목한 바닥면에서는 1.0 m, 볼록한 바닥면일 경우 0.6 m이다.

먼저 Table 1의 첫 번째 결과는 선형 페리그린 모델을 사용하여 Eq. (11a)의 볼록한 바닥면에서의 용수 낙하에 따른 수면 출렁임을 수치 모의하여 출렁임에 의한 수직 벽면에서의 자유수면 최대 오름 높이($\eta_{\max, L, C}$) (So et al., 2018)를 나타내었다. 두 번째 결과는 비선형 페리그린 모델을 사용하여 오목한 바닥면에 대해 자유수면 운동을 수치 모의하여 얻은 수직 벽면에서의 최대 오름 높이($\eta_{\max, N, R}$) 및 정수력 대비 동유체력의 비($R_{N, R}$)를 나타내었다(Park et al., 2019). 그리고 동일한 변수 조건에서 비선형 페리그린 모델을 사용하여 볼록한 바닥면에 대한 수치 모의 결과($\eta_{\max, N, C}$, $R_{N, C}$)도 함께 나타내었다.

또한, Table 1에서 파고 수정(Amplitude Correction, %)은 볼록한 바닥면을 가진 동일한 저장탱크에 대하여 선형 페리그린 모델을 이용하여 얻은 최대 오름 높이($\eta_{\max, L, C}$)와 비선형 페리그린 모델을 사용하여 얻은 최대 오름 높이($\eta_{\max, N, C}$)의 차이를 Eq. (13)을 통해 구하였다.

Amplitude Correction(%)

$$= (\eta_{\max, N, C} - \eta_{\max, L, C}) / \eta_{\max, L, C} \times 100\% \quad (13)$$

이 결과를 통해, 선형 페리그린 모델에 비해 비선형 페리그린 모델을 사용하여 얻은 최대 오름 높이는 0.92% ~ 10.13% 정도 높게 측정되는 것을 알 수 있다.

또한 파고 감소(Amplitude Reduction, %)는 오목한 바닥면과 볼록한 바닥면을 가진 각각의 탱크에 대해 동일한 비선형 페리그린 모델을 사용하여 계산한 결과로서, 수직 벽면에서의 최대 오름 높이($\eta_{\max, N, R}$, $\eta_{\max, N, C}$)의 감소량을 나타낸다.

Amplitude Reduction(%)

$$= (\eta_{\max, N, C} - \eta_{\max, N, R}) / \eta_{\max, N, R} \times 100\% \quad (14)$$

Fig. 2는 Table 1의 No. 4($x_0 = 2$ m, $a = 0.5$ m)에 대해 수직 벽면에서의 시계열 파고 높이($\eta(0, t)$)를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 볼록한 바닥면을 가진 탱크 내에서 자유수면의 운동을 선형 페리그린 모델을 통해 수치 모의하여 수직 벽면에서 얻은 시계열 파고($\eta_{L, C}$)와 비선형 페리그린 모델을 사용하여 각각 오목한 바닥면과 볼록한 바닥면을 가진 탱크내의 수직 벽면에서의 시계열 파고($\eta_{N, R}$, $\eta_{N, C}$)를 나타낸다. Fig. 2(b)는 $\eta_{N, R}$ 와 $\eta_{L, C}$ 로부터 파고 증가(혹은 수정) (+7.72%), Fig. 2(c)는 $\eta_{N, R}$ 과 $\eta_{N, C}$ 로부터 최대 오름 높이의 파고 감소(−28.54%)를 나타낸다.

마지막으로 동유체력 저감율(Hydrodynamic Force Reduction Ratio, %)은 비선형 페리그린 모델을 이용하여 해석할 경우 오목한 바닥면을 가진 탱크의 수직 벽면에서의 정수력 대비 동유체력의 비($R_{N, R}$)가 볼록한 바닥면일 경우($R_{N, C}$)와 비교하여 어느 정도 감소되는 Eq. (15)에 의해 계산되었다.

Table 1. Assumption of Discrete Phase Model

No.	Model		Linear Peregrine (So et al., 2018)	Nonlinear Peregrine				Amplitude Correction	Amplitude Reduction	Hydrodynamic Force Reduction Ratio
	Nozzle		Convex Bottom	Concave Bottom (Park et al., 2019)		Convex Bottom				
	x_0	a	$\eta_{\max, \text{L,C}}$	$\eta_{\max, \text{N,R}}$	$R_{\text{N,R}}$	$\eta_{\max, \text{N,C}}$	$R_{\text{N,C}}$			
1	2 m	0.2 m	0.109 m	0.148 m	1.55	0.110 m	1.23	0.92%	- 25.68%	- 20.65%
2		0.3 m	0.163 m	0.229 m	1.91	0.168 m	1.36	3.07%	- 26.64%	- 28.80%
3		0.4 m	0.218 m	0.318 m	2.34	0.230 m	1.51	5.50%	- 27.67%	- 35.47%
4		0.5 m	0.272 m	0.410 m	2.83	0.293 m	1.67	7.72%	- 28.54%	- 40.99%
5	3 m	0.2 m	0.095 m	0.125 m	1.46	0.097 m	1.20	2.11%	- 22.40%	- 17.81%
6		0.3 m	0.142 m	0.197 m	1.76	0.150 m	1.32	5.63%	- 23.86%	- 25.00%
7		0.4 m	0.189 m	0.287 m	2.17	0.204 m	1.45	7.94%	- 28.92%	- 33.18%
8		0.5 m	0.237 m	0.355 m	2.53	0.261 m	1.59	10.13%	- 26.48%	- 37.15%

Fig. 2. Numerical Results in Table 1, No. 4: (a) wave elevation at the vertical wall and its expanded figures: (b) the amplitude correction (13) and (c) the amplitude reduction (14)

Hydrodynamic Force Reduction Ratio(%)

$$= (R_{N,C} - R_{N,R}) / R_{N,R} \times 100\% \quad (15)$$

Table 1은 탱크의 바닥면을 블록하게 할 경우, 수직 벽면에서의 자유수면의 최대 오름 높이를 22.40% ~ 28.92% 정도 줄일 수 있으며 그에 따라 수직 벽면에서의 동유체력의 감소 효과는 17.81% ~ 40.99%임을 알 수 있다. 또한 용수의 낙하 높이(a)가 높을수록 동유체력의 감소율은 커지고, 낙하 위치(x_0)가 탱크 중앙에 가까운 경우가 동유체력 감소율이 크다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 동일한 체적의 저장탱크에서 바닥면을 블록하게 설계를 하는 것이 용수 공급을 위해 용수를 낙하시킬 때 발생하는 자유수면의 출렁임으로 인한 수직 벽면에서의 동유체력을 감소시켜 저장 탱크가 붕괴 또는 전도의 위험성이 감소되어 구조적 안정성이 증가될 수 있음을 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 비선형 페리그린 모델을 도입하여 블록한 바닥면을 가진 이동형 소방용수 저장탱크 내에서 낙하 용수에 따른 자유수면 운동이 탱크의 수직 벽면에 충돌했을 때 최대 오름 높이 및 벽면에 미치는 동유체력을 수치 모의하였다. 또한 비선형 페리그린 모델과 선형 페리그린 모델의 결과를 서로 비교하여 그 해석 성능과 개선점을 확인하였다.

- (1) 이동형 소방용수 저장탱크에 노즐을 통해 용수가 낙하함으로써 발생한 탱크 내 자유수면의 출렁임을 비선형

페리그린 모델을 이용하여 수치 모의하여 수직 벽면에서 자유수면의 최대 오름 높이를 측정하고 그에 따른 동유체력을 계산하였다.

- (2) 선형 페리그린 모델을 이용할 경우 최대 오름 높이 및 동유체력의 계산 결과가 작게 계산될 수 있음을 확인하였다.
- (3) 저장탱크의 바닥면이 오목한 경우에 비해 바닥면이 블록할 경우, 수직 벽면에서의 동유체력이 감소됨을 확인하였다. 이를 미루어볼 때, 이동형 소방용수 저장탱크는 바닥면을 블록하게 설계하거나 설치 환경이 블록한 바닥면을 가질 수 있을 때, 저장탱크의 붕괴 또는 전도의 위험성이 감소되어 구조적 안정성이 증가될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

다만, 본 연구는 수치적 연구로써 실제 물리적 실험 결과와의 비교에 한계성을 가지고 있으므로 추후에 실제 실험 결과와 비교 검증하는 과정이 필요함을 밝힌다.

감사의 글

본 연구에서 교신저자(장택수)는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1A5A1015722)과 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1D1A1B06049813)의 지원을 받아 연구를 수행하였으며 이에 감사드립니다.

References

- Jang, T.S. (2018). A regular integral equation formalism for solving the standard Boussinesq's equations for variable water depth. *Journal of Scientific Computing*, Vol. 75, No. 3, pp. 1721-1756.
- Madsen, P.A., Bingham, H.B., and Liu, H. (2002). A new Boussinesq method for fully nonlinear waves from shallow to deep water. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 462, pp. 1-30.
- Osborne, A.R. (2010). *Nonlinear ocean waves and the inverse scattering transform*. Academic press, pp. 33-36.
- Park, J., So, S., and Jang, T.S. (2017). A numerical study on hydrodynamic force affecting the vertical wall of a portable water storage tank. *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 49-53.
- Park, J., So, S., and Jang, T.S. (2018). A numerical investigation of hydrodynamic force acting on the vertical wall of a portable water storage tank using a linearized Peregrine's model. *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 76-80.
- Park, J., So, S., and Jang, T.S. (2019). Investigation of hydrodynamic force in a portable water storage tank of reentrant bottom shape using nonlinear Peregrine model. *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 5, pp. 61-65.
- Peregrine, D.H. (1967). Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 27, No. 4, pp. 815-827.
- So, S., Park, J., Sung, H.G., and Jang, T.S. (2018). Reduction of hydrodynamic force acting on the vertical wall of a portable water storage tank by convex bottom design. *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 6, pp. 69-73.

Received	December 31, 2019
Revised	January 6, 2020
Accepted	June 23, 2020