

[Research Paper]

바닥면이 오목한 이동형 소방용수 저장탱크의 수직 벽면에서의 동수력 연구: 비선형 Peregrine 모델

박진수 · 소수현* · 장택수**†

부산대학교 조선해양공학과 대학원생, *경일대학교 소방방재학과 교수, **부산대학교 조선해양공학과 교수

Investigation of Hydrodynamic Force in a Portable Water Storage Tank of Reentrant Bottom Shape using Nonlinear Peregrine Model

Jinsoo Park · Soohyun So* · Taek Soo Jang**†

Graduate Student, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan Nat. Univ.,

*Professor, Dept. of Fire Safety, Kyungil Univ.,

**Professor, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan Nat. Univ.

(Received July 30, 2019; Revised August 27, 2019; Accepted August 28, 2019)

요 약

본 연구에서는 비선형 Peregrine 모델을 이용하여 바닥면이 오목한 이동형 소방용수 저장탱크 내에 용수 공급 노즐로부터 낙하한 용수로 인해 발생한 수면의 출렁임을 수치 모의하고 저장탱크의 수직 벽면에 작용하는 유체 동수력에 미치는 영향을 밝혔다. 또한 기존의 선형 Peregrine 모델을 이용한 수치 모의 연구 결과와 본 연구의 비선형 Peregrine 모델로 동일한 조건에서 수치 모의 계산하여 출렁임의 최대 파고 오름 높기와 출렁임에 의한 동수력 변화를 서로 비교하였다. 그 결과, 저장탱크 내부에 발생하는 출렁임의 움직임과 수직 벽면에 미치는 동수력의 영향을 고려할 수 있기 위해서는 비선형 Peregrine 모델을 사용하는 것이 더 적합하게 모의되는 것을 밝혔다. 이러한 결과는 이동형 소방용수 저장탱크의 안정적인 구조 설계에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

ABSTRACT

In the present study, the hydrodynamic force affected by a lapping wave induced by supplied falling water acting on the vertical wall of a portable water storage tank was analyzed using a nonlinear Peregrine model. The lapping wave's maximum run-up amplitudes and the hydrodynamic forces in the wall of the tank measured by linear and nonlinear Peregrine's models were compared numerically. As a result, it was concluded that the linear model may underestimate the effects on the vertical wall; therefore, it is more appropriate to use a nonlinear Peregrine model. Furthermore, this result can contribute to the stable structural designs of portable water storage tanks.

Keywords : Portable water storage tank, Reentrant bottom, Nonlinear peregrine's model, Lapping wave, Hydrodynamic force

1. 서 론

대형 산불과 같은 화재현장에서 소방용수의 원활한 공급을 위해 유럽, 미국 등에서는 소방용수를 저장할 수 있는 이동형 소방용수 저장탱크가 사용되고 있으며, 국내에서도 국가연구과제를 통하여 이동형 소방용수 저장탱크가 개발되었다. 개발된 이동형 소방용수 저장탱크에 소방용수를 공

급할 때 용수 낙하에 의해 발생하는 수면의 출렁임으로 인한 동수력(Hydrodynamic force)의 변화가 저장탱크의 수직 벽면에 미치는 영향에 대한 해석을 통하여 안전성을 확인하였다⁽¹⁻³⁾.

먼저 Park 등⁽¹⁾은 평평한 바닥면의 이동형 소방용수 저장탱크를 처음으로 모델링하고 소방용수의 낙하로 인하여 발생한 자유 수면의 출렁임으로 변화된 동수력(Hydrodynamic

† Corresponding Author, E-Mail: taek@pusan.ac.kr. TEL: +82-51-510-2789, FAX: +82-51-581-3718

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

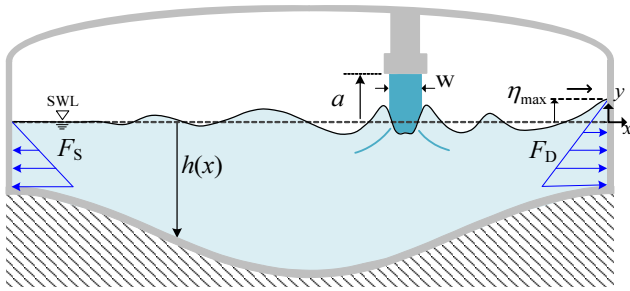


Figure 1. Schematic diagram of the present system problem.

force)이 탱크의 수직벽면에 미치는 영향을 분석하였다. 이 연구는 자유수면의 출렁임을 Boussinesq 방정식을 이용하여 모델링하고 수치 모의를 통해 수직 벽면에서의 동수력을 계산하였다. 또한 Park 등⁽²⁾은 선형 Peregrine 방정식을 이용하여 오목한 바닥면을 가진 이동형 소방용수 저장탱크의 수직 벽면에서 동수력을 계산하였다. 이 연구를 통해 저장 탱크의 바닥이 오목할 경우 용수 공급에 따른 자유 수면의 출렁임에 의한 탱크 수직벽면에 미치는 동수력 증폭이 구조적 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 So 등⁽³⁾은 저장 탱크의 바닥면을 볼록하게 설계하여 수직 벽면으로 전파되는 출렁임을 분산시킴으로써 수직 벽면에서 동수력의 감소될 수 있는 것을 선형 Peregrine 모델을 사용한 수치 모의로 밝혔다.

본 연구에서는 기존 Park 등⁽²⁾에서 사용한 선형 Peregrine 모델을 확장하여 비선형 Peregrine 방정식을 도입하여 용수 낙하로 발생하는 자유 수면의 출렁임 움직임을 보다 현실적으로 모의하고 탱크 수직 벽면에 미치는 동수력 변화를 수치 모의 하였다. 연구 결과는 선형 Peregrine 모델을 이용하여 동일한 수치 모의 조건으로 수행한 결과와 비교 분석하여 탱크 벽면에 미치는 출렁임의 최대 오름 높이와 동수력 변화가 어떠한 차이를 가지는지 확인하고자 하였다. 따라서 본 연구는 비선형 Peregrine 모델을 이용하여 자유 수면의 출렁임을 좀 더 실제 출렁임의 움직임에 맞게 수치 모의할 수 있고 이는 곧 수직 벽면에서의 과소평가 되지 않은 보다 정밀한 동수력을 계산할 수 있음을 보이고자 하였다. 그 결과 이동형 소방용수 저장탱크의 동수력으로 인한 수직 벽면에서의 구조적 안정성을 고려할 수 있는 근거를 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 수치 모의 개요

2.1 함수 반복 해법

본 연구에서는 가운데 바닥면이 오목하여 수직 벽면으로 오름 경사를 가진 이동형 소방용수 저장탱크 내에서 자유 수면의 출렁임을 수치 모의하기 위해 장주기 파랑(출렁임)

의 해석에 사용되는 비선형 Peregrine 모델^(4,5)을 도입한다.

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

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

식(1)과 식(2)의 파고함수(η)와 수심 평균(depth-averaged)의 유속함수(u)가 연성된 형태로 h(x)는 탱크 바닥과 정지 수면까지의 수심 함수, g는 중력가속도(= 9.81 m/s²), 아래 첨자는 각각 공간 및 시간 편미분을 나타낸다. 비선형 Peregrine 방정식은 선형 Peregrine 방정식에 비해 식(2)의 모멘텀 항에서 비선형 항 uu_x이 더 추가된 형태이며, 식(1)과 식(2)의 초기 조건은 다음과 같다.

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

Figure 1은 낙하 용수의 형상을 사각형의 형태로 가정하고 바닥면의 오목한 저장 탱크의 형상과 용수 공급 노즐로부터 낙하하는 용수에 의해 발생한 자유 수면의 출렁임을 간략히 나타낸다. a는 용수 공급 노즐의 높이, h(x)는 정지 수면에서 바닥까지의 수심, η_{max}는 수직 벽면에서의 최대 파고 오름 높이, F_S는 정지 수면에서의 유체 정수력, F_D는 η_{max}에서의 유체 동수력을 나타낸다. 이러한 시스템을 수치 계산하기 위해 Jang⁽⁵⁾의 함수 반복 해법을 다음과 같이 도입한다.

$$\mathbf{X}^{n+1} = \mathbf{T}_{h_0}(\mathbf{X}^n) \tag{4}$$

이때, 식(4)에서 \mathbf{X} 는 벡터 변수이며,

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

비선형 연산자 \mathbf{T}_{h_0} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{T}_{h_0}(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} Y_x^{(1)} \\ Y_x^{(1)} \\ U_x^{(1)} \\ U_t^{(1)} \\ U_{xt}^{(1)} \\ U_{xxt}^{(1)} \end{pmatrix} [\eta_1] + \begin{pmatrix} Y_x^{(2)} \\ Y_x^{(2)} \\ U_x^{(2)} \\ U_t^{(2)} \\ U_{xt}^{(2)} \\ U_{xxt}^{(2)} \end{pmatrix} [u_1] + \begin{pmatrix} Y_x^{(3)} \\ Y_x^{(3)} \\ U_x^{(3)} \\ U_t^{(3)} \\ U_{xt}^{(3)} \\ U_{xxt}^{(3)} \end{pmatrix} [\phi(\mathbf{X})] + \begin{pmatrix} Y_x^{(4)} \\ Y_x^{(4)} \\ U_x^{(4)} \\ U_t^{(4)} \\ U_{xt}^{(4)} \\ U_{xxt}^{(4)} \end{pmatrix} [\psi(\mathbf{X})], \tag{6}$$

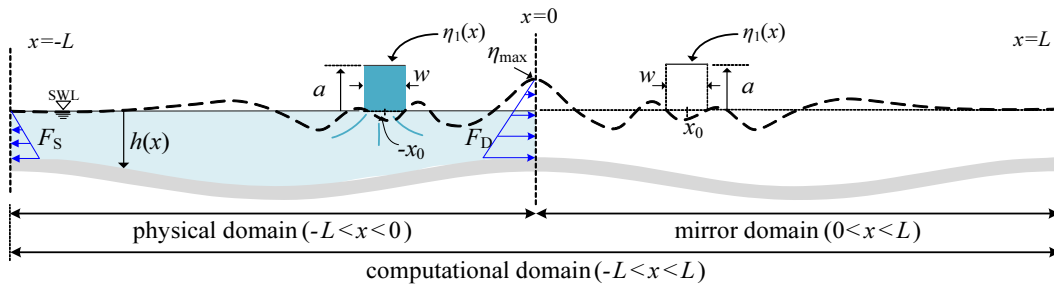


Figure 2. Computational domain for the numerical solution procedure.

식(5)과 식(6)에서 $X_1(=\eta)$ 과 $X_3(=u)$ 는 각각 다음과 같다⁽⁵⁾.

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

$$X_3 = u(x, t) = U^{(1)}(\eta_1) + U^{(2)}(u_1) + U^{(3)}(\phi) + U^{(4)}(\psi) \quad (8)$$

여기서 식(7)의 $Y^{(j)}$, $j = 1, 2, 3, 4$ 는 각각 아래와 같이 연성 적분방정식의 형태로 표현된다.

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

$$Y^{(2)}(u_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{h_0(1+h_0^2 k^2/3)}{g}} \sin \omega_B t \cdot \sin [k(x-\xi)] \cdot u_1(\xi) d\xi dk \quad (9b)$$

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

$$Y^{(4)}(\psi) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{h_0}{g(1+h_0^2 k^2/3)}} \sin [\omega_B(t-\tau)] \cdot \sin [k(x-\xi)] \cdot \psi(\xi, \tau) d\xi dk d\tau \quad (9d)$$

또한 식(8)의 $U^{(j)}$, $j = 1, 2, 3, 4$ 는 각각 다음과 같다.

$$U^{(1)}(\eta_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{g}{h_0(1+h_0^2 k^2/3)}} \cdot \sin \omega_B t \cdot \sin [k(x-\xi)] \cdot \eta_1(\xi) d\xi dk \quad (10a)$$

$$U^{(2)}(u_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \cos \omega_B t \cdot \cos [k(x-\xi)] \cdot u_1(\xi) d\xi dk \quad (10b)$$

$$U^{(3)}(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{g}{h_0(1+h_0^2 k^2/3)}} \cdot \sin [\omega_B(t-\tau)] \cdot \sin [k(x-\xi)] \cdot \phi(\xi, \tau) d\xi dk d\tau \quad (10c)$$

$$U^{(4)}(\psi) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1+h_0^2 k^2/3} \cdot \cos [\omega_B(t-\tau)] \cdot \cos [k(x-\xi)] \cdot \psi(\xi, \tau) d\xi dk d\tau \quad (10d)$$

여기서 h_0 는 반복 해법에서 도입된 모조 상수(Pseudo-parameter)이며, $X_2 = (X_1)_x$, $X_4 = (X_3)_x$, $X_5 = (X_3)_t$, $X_6 = (X_4)_t$, $X_7 = (X_6)_x$ 의 관계로 식(7)과 식(8)을 편미분함으로써 구한다⁽⁵⁾.

2.2 수치 모의 방법

본 연구에서는 수직 벽면에서의 자유 수면의 출렁임이 전파되어 수직 벽면에서 충돌하는 것과 동일한 작용을 위해 경사 이미지 모델^(1-3,5)을 도입하였고, 이 모델의 수치 계산 영역은 Figure 2와 같다. 이때, 정지 수면에서 노즐의 위

치 $x = \pm x_0$ 에서 폭이 w 이고 높이 a 에서 낙하하는 용수 $\eta_1(x)$ (식(11))에 의해 자유수면의 출렁임이 발생한다. 반면 초기 자유 수면은 정지 상태(u_1)이다.

$$\eta_1(x) = \begin{cases} a |x \pm x_0| < 0.4 m \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases}, u_1(x) = 0. \quad (11)$$

이때 오목한 바닥면을 가져 중앙으로부터 수직 벽면으로 경사진 바닥면의 경우를 다음과 같이 모델링 하였다.

$$h_R(x) = 0.8 - 0.2 \cos(\pi x/10) \quad (12)$$

본 수치 모의에서 계산영역은 $-20 \text{ m} < x < 20 \text{ m}$ (공간 간격 0.1 m), 시간영역을 $[0, 2 \text{ s}]$ (시간 간격 0.5 s)으로 설계하였고, 노즐의 폭을 0.8 m로 고정하고 노즐의 위치 x_0 와 노즐의 높이 a 를 변화시키면서 수치 계산을 수행하였다. 그리고 모조 상수 h_0 는 평균 수심인 0.8 m로 하였다.

2.3 수치 모의 결과

Figure 3(a)은 $x_0 = -2 \text{ m}$ 의 위치에서 높이 $a = 0.5 \text{ m}$ 의 크기로 낙하한 용수로 인해 발생한 자유 수면의 출렁임을 비선형 Peregrine 모델을 이용하여 수치 모의하여 탱크 내 출렁임을 모의한 결과이다. 또한 Figure 3(b)는 Figure 3(a)의 수직 벽면($x = 0$)에서의 시계열 오름 높이($\eta(x = 0, t)$)와 선형 Peregrine 모델을 적용하여 얻은 수치 모의한 탱크 수직 벽면에서의 최대 파고 오름 높이를 서로 비교한 것이다. Table 1에서 과소 정도 평가식(13)에 따라 계산한 결과를 보면, 선형 Peregrine 모델의 모의는 비선형 선형 Peregrine 모델을 사용하여 수치 모의한 자유 수면의 출렁임이 탱크 수직 벽면에서의 최대 오름 높이의 결과에 비해 6.8%~18.3% 정도 과소평가되었음을 알 수 있다. 또한 Figure 3(b)와 같이 파고의 위상에 대해서도 오차가 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

$$\text{underestimation}(\%) = \frac{|\eta_{\max, \text{linear}} - \eta_{\max, \text{nonlinear}}|}{\eta_{\max, \text{nonlinear}}} \times 100 \quad (13)$$

선형 Peregrine 모델과 비선형 Peregrine 모델을 각각 사

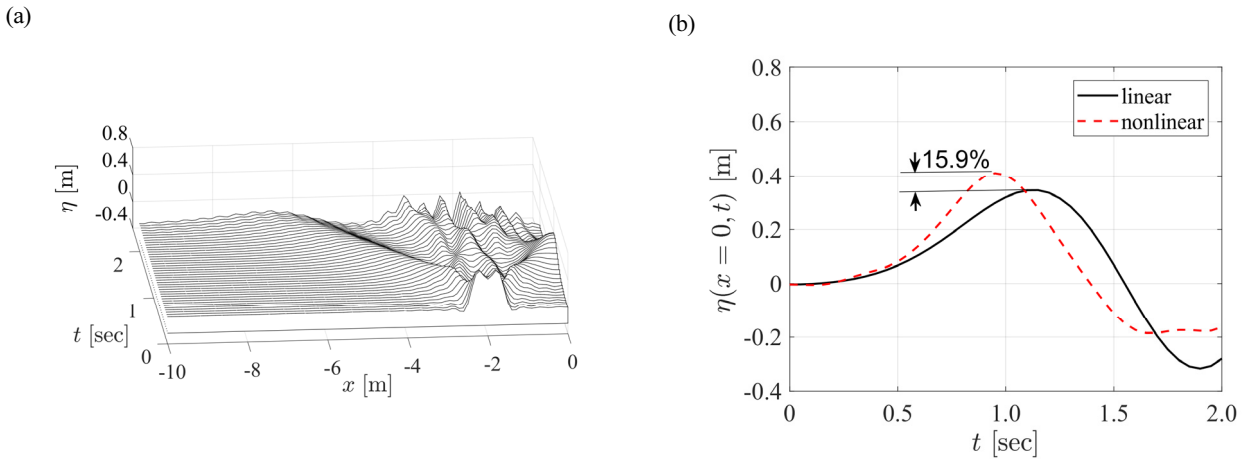


Figure 3. Numerical result of case 4 in Table 1: (a) nonlinear model, (b) underestimation in case of linear Peregrine’s model compared to nonlinear one.

Table 1. Effects of the Position and the Height of Water Supplying Nozzle: Linear and Nonlinear Peregrine’s Model

Case	Nozzle		Linear Peregrine’s Model		Nonlinear Peregrine’s Model		Underestimation [%]
	x_0 [m]	a [m]	η_{max} [m]	R_L	η_{max} [m]	R_{NL}	
1	-2	0.2	0.138	1.51	0.148	1.55	6.8
2		0.3	0.207	1.81	0.229	1.91	9.6
3		0.4	0.276	2.13	0.318	2.34	13.2
4		0.5	0.345	2.48	0.410	2.83	15.9
5	-3	0.2	0.116	1.42	0.125	1.46	7.2
6		0.3	0.174	1.66	0.197	1.76	11.7
7		0.4	0.232	1.92	0.287	2.17	19.2
8		0.5	0.290	2.20	0.355	2.53	18.3

용하여 용수 공급 노즐의 위치 $x_0(= -2 \text{ m}, -3 \text{ m})$ 와 노즐로부터의 용수 낙하 높이 $a(=0.2 \text{ m} \sim 0.5 \text{ m})$ 에 따른 수직 벽면($h(x=0)$)에서의 최대 파고 오름 높이 η_{max} 를 각각 나타냈었고, 식(14)에 의한 정수력(F_S)과 동수력(F_D)의 비, R 를 Table 1에 나타내었다⁽¹⁻³⁾.

$$R = F_D / F_S = \frac{\rho g (h(x=0) + \eta_{max})^2 / 2}{\rho g (h(x=0))^2 / 2} = \left(1 + \frac{\eta_{max}}{h(x=0)} \right)^2 \quad (14)$$

Table 1의 결과로부터 선형 Peregrine 모델의 R_L 이 비선형 모델의 R_{NL} 와 비교하여 2.6%~13.0% 정도 ($= |R_L - R_{NL}| / R_{NL} \times 100\%$)의 동수력을 과소평가하고 있는 것으로 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 가운데 바닥면이 오목한 이동형 소방용수 저장탱크 내에 용수 공급을 위하여 용수를 낙하시킬 경우 발생하는 자유 수면의 출렁임을 비선형 Peregrine 모델

을 이용하여 수치 모의를 수행하였다. 이를 바탕으로 저장탱크 수직 벽면에서의 출렁임에 의한 파고의 최대 오름 높이를 측정하고 수직 벽면에 미치는 동수력의 변화량을 계산하여 그 영향을 확인하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이동형 소방용수 저장탱크를 경상 이미지 모델을 이용하여 수치 계산영역을 설정하였으며, 용수 공급 노즐의 위치와 노즐의 높이(용수 낙하 높이)를 변화 시키면서 다양한 자유 수면의 출렁임을 수치 모의하였다.

2) 자유 수면의 출렁임을 모의하기 위해 비선형 Peregrine 모델의 수치적 해법을 도입하여 수치 모의하고, 용수 낙하에 의해 발생한 출렁임의 탱크 수직 벽면에서의 최대 오름 높이와 동수력을 계산하였으며, 그 결과를 선형 Peregrine 모델을 이용하여 얻은 수치 모의 결과를 통해 얻은 출렁임의 최대 오름 높이 및 동수력의 결과와 서로 비교하였다.

3) 그 결과, 선형 Peregrine 모델을 사용한 경우가 비선형 Peregrine 모델을 사용하여 수치 모의하였을 경우에 비해 최대 파고 오름 높이와 그에 따른 동수력을 과소평가될 수 있음을 확인하였다.

따라서 이동형 소방용수 저장탱크 내의 용수 낙하에 의한 출렁임을 수치 모의하는데 있어서는 비선형 Peregrine 모델을 이용하는 것이 실제 출렁임에 의한 동수력과의 오차를 줄일 수 있다. 또한 동수력 산정에서 오차를 줄일 수 있는 것은 저장탱크의 벽면을 지탱하는 프레임의 강도를 적절하게 설계할 수 있도록 기초 자료로 활용될 수 있어 이동형 소방용수 저장탱크의 안정적 구조 설계에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. J. Park, S. So and T. S. Jang, "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 (2017).
2. J. Park, S. So and T. S. Jang, "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 (2018).
3. S. So, J. Park, H. G. Sung and T. S. Jang, "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 (2018).
4. D. H. Peregrine, "Long Waves on a Beach", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 27, No. 4, pp. 815-827 (1967).
5. T. S. Jang, "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 (2018).