

[Research Paper]

자유수면의 출렁임이 이동형 소방용수 저장탱크의 수직 벽면에 미치는 동수력에 대한 수치해석

박진수 · 소수현* · 장택수†

부산대학교 조선해양공학과, *경일대학교 소방방재학과

A Numerical Study on Hydrodynamic Force Affecting the Vertical Wall of a Portable Water Storage Tank

Jinsoo Park · Soohyun So* · Taek Soo Jang†

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan Nat. Univ., *Dept. of Fire Safety, Kyungil Univ.

(Received February 20, 2017; Revised May 15, 2017; Accepted May 17, 2017)

요 약

본 연구에서는 이동형 소방용수 저장탱크 내의 소방용수의 낙하를 단순화하고 이 낙하에 따른 자유수면의 출렁임을 수치 해석하여 수직 벽면에 미치는 동수력을 계산하였다. 소방용수의 낙하에 따른 자유 수면의 출렁임을 수치 해석하기 위해 Jang⁽¹⁾에 의해 개발된 분산관계 보존 방법을 이용하였다. 또한, 다양한 자유 수면의 출렁임을 수치 해석하고자 소방용수의 낙하 높이, 낙하 위치 및 물기동 폭 조건에 대해 계수 영향 해석을 수행하였다. 따라서 본 연구를 통해 분산관계 보존 방법을 통한 소방용수 저장탱크 내의 자유 수면의 출렁임을 효과적으로 수치 해석할 수 있었고 소방용수 저장탱크의 동수력 영향을 예측하는 데에 적용 가능성을 엿볼 수 있었다.

ABSTRACT

In the present study, the hydrodynamic force acting on the vertical wall of a portable water storage tank is examined. A Dispersion Relation Preserving (DRP) method, proposed by Jang⁽¹⁾, is applied for simulating lapping waves and their impact on the wall. A meaningful investigation has been observed, which may be applied to the strength design for the portable water storage tank.

Keywords : Portable Water Storage Tank, Lapping Wave, Dispersion Relation Preserving Method, Hydrodynamic Force

1. 서 론

대형 산불화재 등의 특수재난현장에서는 소방용수의 원활한 공급은 화재진압에 매우 중요한 역할을 할 때가 있다. 이런 이유로 유럽, 미국 등에서는 소방 활동현장에 소방용수를 일시적으로 저장할 수 있는 이동형 소방용수 저장탱크가 제품화되어 있다. 국내에서도 국가 R&D를 통하여 현장에 활용될 수 있는 제품의 개발이 진행되고 있다. 이와 같은 이동형 소방용수 저장탱크는 안전성 확인을 위하여 정역학적 강도해석과 더불어 소방용수 저장탱크에 소방펌프차로부터 소방용수를 공급할 경우에 용수의 낙하에 따라 생기는 자유 수면의 출렁임으로 인한 동수력(hydrodynamic force)이 소방용수 저장탱크의 수직 벽면에 미치는 영향에 대한 해석도 필요하다.

현재까지 소방용수 저장탱크에 소방용수를 낙하시키는 경우에 대한 해석을 직접 수행한 사례는 거의 없으며, 소방용수를 어떤 운동량을 가지고 소방용수 저장탱크 내의 자유 수면에 낙하하느냐에 대한 해석은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 현상을 단순화 하여 일정한 소방용수를 일정한 높이에서 소방용수 저장탱크의 정지 수면(still water level, SWL)에 자유 낙하시켜 발생하는 자유 수면의 출렁임을 수치 해석하는 접근방법을 사용하였다. 이러한 해석 결과를 바탕으로 소방용수 저장탱크 내 수직 벽면에 미치는 동수력을 수치 해석하였다.

소방용수 저장탱크 내의 자유 수면의 출렁임을 수치 해석하기 위해 천수파(shallow water waves)의 대표적인 지배방정식의 한가지인 Boussinesq 방정식 모델을 도입하였다. 또한 이 비선형 편미분방정식의 수치 해석을 수행하기 위

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

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

해 최근 Jang⁽¹⁾에 의해 개발된 Boussinesq 방정식의 분산관계 보존 방법(Dispersion Relation Preserving (DRP) method)을 이용하였다. 그 결과, 소방용수 저장탱크 내 유체의 자유수면의 출렁임을 수치 해석하여 그 유동이 수직 벽면에 작용하는 동수력을 계산하여 의미 있는 수치 해석 결과를 얻고자 하였다.

2. 수치 해석

2.1 분산관계 보존 방법

소방용수 저장탱크 내의 유동 지배방정식을 아래 식 (1)과 같이 Boussinesq 방정식으로 표현할 수 있다(El-Zoheiry⁽²⁾, Lin, Zhang and Lu⁽³⁾, Wu, Loxton and Lai⁽⁴⁾).

$$\eta_{tt} - c_0^2 \eta_{xx} - \frac{1}{3} h_0^2 \eta_{xxx} = \frac{3}{2} c_0^2 (\eta^2/h_0)_{xx} \quad (1)$$

이때, $\eta(x,t)$ 는 소방용수 저장탱크 내 자유 수면의 고저(elevation), $c_0(=\sqrt{gh_0})$, $g=9.80665\text{m/s}^2$: 중력가속도, h_0 : 수심)는 자유수면 출렁임의 특성속도(characteristic velocity), 아래 첨자 x, t 는 각각 공간과 시간에 대한 편미분을 나타낸다. 또한 식 (1)의 수치 해석에 필요한 소방용수 낙하현상을 단순화한 자유 수면의 초기 변위 및 초기 속도 조건은 아래와 같다.

$$\eta(x,0) = \eta_1(x), \quad \partial\eta/\partial t|_{t=0} = \eta_2(x) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)의 초기치 문제(initial value problem)를 이용하여 Jang⁽¹⁾에 의해 제기된 분산관계 보존 방법을 이용하여 수치 반복해 과정을 도출하였다.

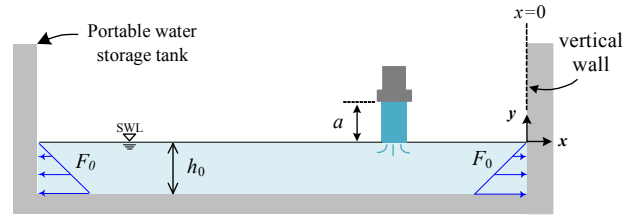
$$\boldsymbol{\eta}^{n+1} = \mathbf{B}(\boldsymbol{\eta}_0, \boldsymbol{\eta}^n), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (n: \text{반복횟수}) \quad (3)$$

이때, $\boldsymbol{\eta}^n = (\eta^n, \zeta^n, \psi^n)$, 초기 반복식 $\boldsymbol{\eta}^0 = (0, 0, 0)$, \mathbf{B} 는 Boussinesq 연산자이다. 또한 $\eta(x,t)$, η 의 x 편미분 식 $\zeta(=\partial\eta/\partial x)$, ζ 의 x 편미분 식 $\psi(=\partial\zeta/\partial x)$ 각각은 아래와 같다⁽¹⁾.

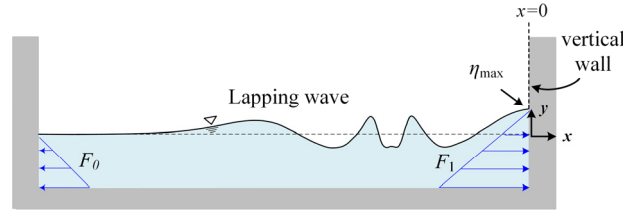
$$\eta(x,t) = \sum_{j=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} (1+h_0^2 k^2/3) g_x^{(j)}(x,t,\xi,k) \eta_j(\xi) dk d\xi + \int_0^t \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_x^{(3)}(x,t,\xi,k,\tau) [3g(\zeta^2 + \eta \cdot \psi) + \beta \cdot \eta(\xi,\tau)] d\xi dk d\tau, \quad (4a)$$

$$\zeta(x,t) = \sum_{j=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} (1+h_0^2 k^2/3) g_x^{(j)}(x,t,\xi,k) \eta_j(\xi) dk d\xi + \int_0^t \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_x^{(3)}(x,t,\xi,k,\tau) [3g(\zeta^2 + \eta \cdot \psi) + \beta \cdot \eta(\xi,\tau)] d\xi dk d\tau, \quad (4b)$$

$$\psi(x,t) = \sum_{j=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} (1+h_0^2 k^2/3) g_{xx}^{(j)}(x,t,\xi,k) \eta_j(\xi) dk d\xi + \int_0^t \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{xx}^{(3)}(x,t,\xi,k,\tau) [3g(\zeta^2 + \eta \cdot \psi) + \beta \cdot \eta(\xi,\tau)] d\xi dk d\tau \quad (4c)$$



(a) Simple description of a portable water storage tank



(b) Collision of lapping waves at the vertical wall

Figure 1. Schematic diagram of the numerical basin system.

식 (4)의 $g^{(1)}$, $g^{(2)}$ 와 $g^{(3)}$ 은 각각 아래와 같다.

$$g^{(1)}(x,t,\xi,k) = \frac{\tilde{\omega}_B^2(k)}{\pi(c_0^2 k^2 + \beta)} \cos[\tilde{\omega}_B(k)t] \cdot \cos[k(x-\xi)] \quad (5a)$$

$$g^{(2)}(x,t,\xi,k) = \frac{\tilde{\omega}_B(k)}{\pi(c_0^2 k^2 + \beta)} \sin[\tilde{\omega}_B(k)t] \cdot \cos[k(x-\xi)] \quad (5b)$$

$$g^{(3)}(x,t,\xi,k,\tau) = \frac{\tilde{\omega}_B(k)}{\pi(c_0^2 k^2 + \beta)} \sin[\tilde{\omega}_B(k)(t-\tau)] \cdot \cos[k(\xi-x)] \quad (5c)$$

또한, $\tilde{\omega}_B(k) = \sqrt{\frac{c_0^2 k^2 + \beta}{1+h_0^2 k^2/3}} > 0$, β 는 식 (1)을 수치 해석하

기 위해 도입한 의사 변수(pseudo parameter), 식 (4b)의 $g_x^{(i)}$ ($i=1,2,3$)은 식 (5)를 x 에 대해 1회 편미분한 형태, 식 (4c)의 $g_{xx}^{(i)}$ ($i=1,2,3$)는 식 (5)를 x 에 대해 2회 편미분한 형태이다⁽¹⁾.

2.2 수치 수조 구성

Figure 1은 이동형 소방용수 저장탱크에 일정량의 소방용수가 일정 높이에서 낙하하여 자유 수면과의 충돌로 인해 발생하는 자유수면의 출렁임(Lapping wave)과 그 출렁임이 수직 벽면 충돌하는 현상을 도식화 한 것이다. 양쪽 수직 벽면에는 정지 자유 수면에서 작용하는 정수력 ($F_0 = (\rho g h_0^2)/2$)을 나타낸다. Figure 1(b)는 소방용수가 낙하하여 발생한 자유 수면의 출렁임이 오른쪽 수직 벽면에 충돌하여 발생한 최대 파고(η_{max})와 그에 따라 수직 벽면에 작용한 최대 동수력($F_1 = (\rho g (\eta_{max} + h_0)^2)/2$)을 나타낸다.

실제 이동형 소방용수 저장탱크의 수조는 Figure 1과 같지만 수치 해석을 위해 본 연구에서는 Figure 2(a)와 같이 가상의 수직 벽면(imaginary vertical wall, $x=0$)을 산정하

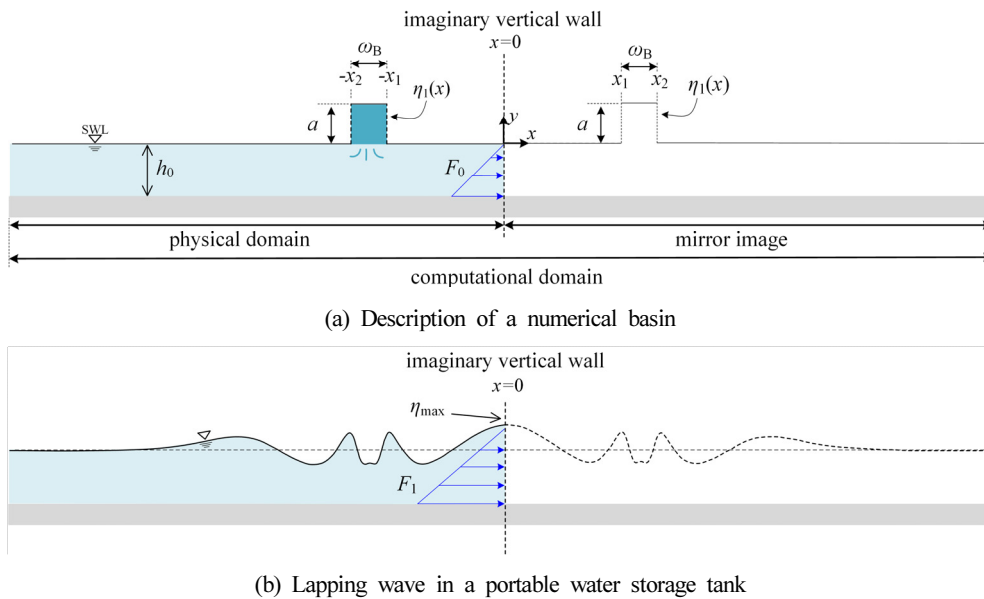


Figure 2. The computational and the physical domain for the numerical simulation.

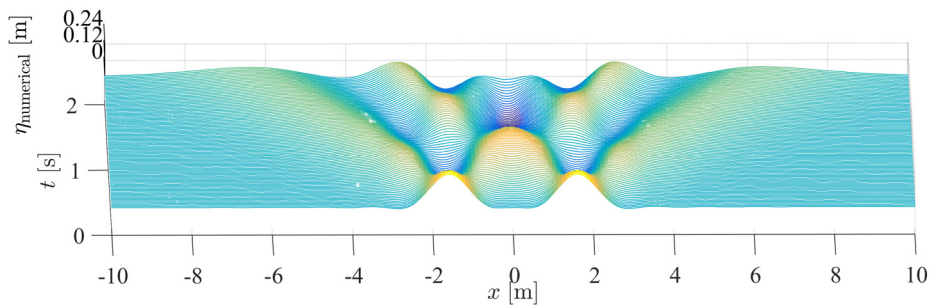


Figure 3. Numerical solution in computational domain.

고 이를 중심으로 왼쪽에는 실제 소방용수의 출렁임이 일어나는 물리영역($-L < x < 0$)과 가상의 수직 벽면의 반대쪽에 경상(鏡像, mirror image)영역($0 < x < L$)을 배치한다. Figure 2(b)와 같이 경상영역에서는 물리영역과 동일한 조건으로 물리영역과 동일한 대칭의 자유수면의 출렁임이 발생하여 가상의 수직 벽면에서 충돌한다. 수치 해석을 위한 시간영역은 $t = [0, T]$, 소방용수 저장탱크의 수심은 h_0 로 구성하였다. 이러한 물리영역과 경상영역을 합하여 수치 해석을 위한 수치 계산영역(computational domain) 혹은 수치 수조(numerical basin)로 정의한다. 이로부터 소방용수 공급 장치로부터 낙하하는 소방용수를 아래 식 (6)과 같이 수식으로 표현한다.

$$\eta_1 = \begin{cases} a & x_1 \leq |x| \leq x_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \eta_2 = 0 \quad (6)$$

2.3 수치 해석 결과 및 분석

수치 해석을 위해 $L = 20 \text{ m}$ ($\Delta x = 0.05 \text{ m}$), $T = 4\text{s}$ ($\Delta t = 0.05 \text{ s}$), $h_0 = 1.0 \text{ m}$ 으로 수치 계산영역을 설정하였다. 본

연구에서는 소방용수의 낙하 높이(a), 낙하 위치 및 물기동 폭 조건 (ω_b)에 대해 변화를 주어 계수 영향 해석을 수행하였다. 즉, 낙하 높이의 경우 2가지(0.1 m, 0.2 m), 수직 벽면에서의 낙하 위치는 3가지(1 m, 2 m, 3 m), 소방용수 물기동의 폭(0.8 m, 1.0 m, 1.2 m)은 3가지로 변화를 주었다. Table 1은 이러한 계수 영향 해석에 따른 수치 해석 결과에 대해 아래 식 (7)의 동수압과 정수압의 비(F_1/F_0)로 표현하였다.

$$F_1/F_0 = \frac{\rho g (h_0 + \eta_{\max})^2 / 2}{\rho g h_0^2 / 2} = (1 + \eta_{\max} / h_0)^2 \quad (7)$$

Figure 3은 Table 1 (c.2)의 $a = 0.2 \text{ m}$, $x_1 = 1.0 \text{ m}$, $x_2 = 2.2 \text{ m}$ ($\omega_b = 1.2 \text{ m}$)의 조건에서 수치 해석 결과 얻은 자유수면의 형상을 나타낸다. 이러한 결과는 앞서 밝혔듯이 가상의 수직 벽면 $x = 0 \text{ m}$ 을 중심으로 양쪽으로 파랑이 대칭임을 확인할 수 있다. Figure 4(a)는 Figure 3의 결과 중 수직 벽면 $x = 0 \text{ m}$ 에서의 파의 오름 높이를 시간영역에서 나타낸 것으로 $t = 0.79\text{s}$ 에서 최대 오름 높이 $\eta_{\max} = 0.1687 \text{ m}$ 이다. Figure 4(b)는 Figure 4(a)를 토대로 시간에 따른 동수력/정

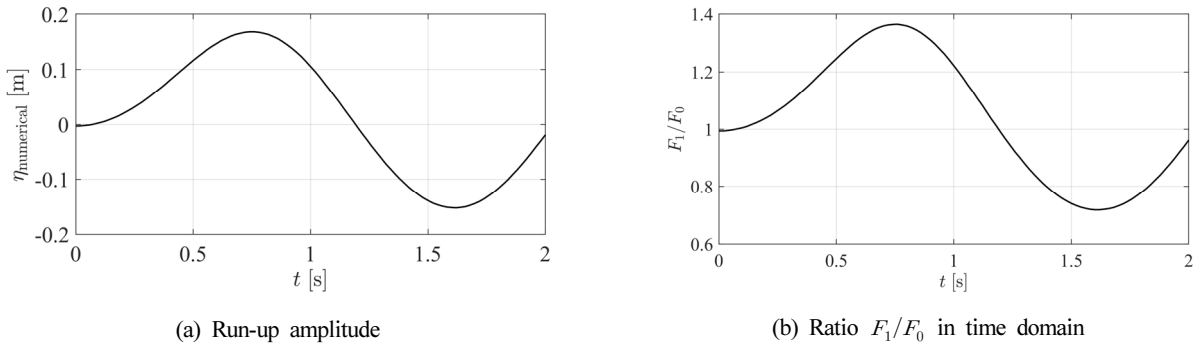


Figure 4. Numerical solution in physical domain at vertical wall ($x=0$ m): (c.2).

Table 1. Case Studies

Case	Water width (w_B) [m]	x_1 [m]	x_2 [m]	Initial water height(a) [m]	Maximum run-up height(η_{max}) [m]	Maximum Ratio of F_1/F_0
(a.1)	0.8	1.0	1.8	0.1	0.0570	1.1172
(a.2)				0.2	1.2426	
(a.3)		2.0	2.8	0.1	0.0532	1.1092
(a.4)				0.2	1.2821	
(a.5)		3.0	3.8	0.1	0.0421	1.0860
(a.6)				0.2	1.1794	
(b.1)	1.0	1.0	2.0	0.1	0.0723	1.1498
(b.2)				0.2	1.3117	
(b.3)		2.0	3.0	0.1	0.0600	1.1236
(b.4)				0.2	1.2618	
(b.5)		3.0	4.0	0.1	0.0537	1.1103
(b.6)				0.2	1.2321	
(c.1)	1.2	1.0	2.2	0.1	0.0840	1.1751
(c.2)				0.2	1.3659	
(c.3)		2.0	3.2	0.1	0.0682	1.1411
(c.4)				0.2	1.2996	
(c.5)		3.0	4.2	0.1	0.0614	1.1266
(c.6)				0.2	1.2677	

수력의 비를 나타내며 $t=0.79$ s에서 최대 동수력/정수력의 비가 1.3659로 측정된다.

Table 1에서는 앞서 밝혔듯이 소방용수의 낙하 높이, 위치 및 물기둥의 폭의 조건에 따라 발생한 다양한 자유 수면의 출렁임이 수직 벽면에 작용하는 동수력을 계산하여 동수력과 정수력의 비를 비교하여 기술한 것이다. 물기둥의 폭이 0.8 m의 경우 중, (a.2, 4, 6)을 비교하면, 수직 벽면에 가장 가까운 지점에 낙하한 용수(a.2)에 의한 비(1.2426)가 가장 클 것으로 예상하였으나 수치 해석 결과 이보다는 (a.4)의 결과(1.2821)가 더 큼을 확인할 수 있다. 종합적으로 살펴보면 수직 벽면에 작용하는 최대 동수력/정수력의 비는 대체적으로 수직 벽면에 가깝고, 낙하 용수의 물기둥의

폭이 넓을수록, 물기둥의 높이가 높을 경우 동수력/정수력의 비가 크다. 예를 들어, (c.2)의 경우, 즉, 수직 벽면에서 1.0 m 떨어진 지점, 낙하 용수 물기둥의 폭 1.2 m, 물기둥의 높이 0.2 m의 경우에서 약 36.59%로 Table 1의 모든 실험 중 가장 큼을 확인할 수 있다. 따라서 이동형 소방용수 저장탱크의 설계에 이를 고려하여 소방용수의 최적 낙하 위치 및 수직 벽면에서의 충격량 등을 예측하는 데에 활용 가능할 것으로 사료된다.

3. 결 론

이 연구에서는 이동형 소방용수 저장탱크 내에 소방용수

공급을 위해 소방용수를 낙하시키는 경우 발생하는 자유 수면의 출렁임이 수직 벽면에 미치는 동수력을 분석하였다.

(1) 소방용수 저장탱크를 근사한 1차원 수치 수조를 구성하여 소방용수 낙하를 단순화하여 수치 해석에 이용하였다. 자유 수면의 출렁임을 수치 계산하기 위해 최근 Jang⁽¹⁾에 의해 개발된 분산관계 보존 방법을 이용하였다.

(2) 다양한 소방 용수 낙하 조건에 대해 수치 수조를 구성하여 수치 해석을 수행하였다. 자유수면의 출렁임을 수치 해석하기 위해 Jang⁽¹⁾에 의해 제시된 분산관계 보존 방법을 도입하였다. 이때, 소방용수의 낙하 높이, 위치 및 물 기둥의 폭의 조건을 달리하여 자유 수면의 출렁임을 수치 해석하였다. 자유 수면의 출렁임이 탱크내의 수직 벽면에 충돌하여 발생한 최대 오름 높이를 측정하여 수직 벽면에 작용하는 동수력/정수력의 비를 계산하였다.

이상과 같이 이동형 소방용수 저장탱크의 동수력 변화를 예측하는데 분산관계 보존 방법의 적용 가능성을 엿볼 수 있었다. 향후 다양한 이동형 소방용수 저장탱크와 다양한 소방용수의 낙하의 조건에 대해 추가적인 수치 해석을 수행하여 그 결과에 따라 실제 소방용수 저장탱크 프레임 강도의 결정에 대해 의미 있는 수치 해석을 할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문의 제 1, 교신 저자는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 기초연구사업 (NRF-2015R1D1A1A01058542) 이며, 제 2저자는 2016년 국민안전처의 소방안전 및 119구조구급기술 연구개발사업 (MPSS-소방안전-2015-81)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

1. T. S. Jang, "A New Dispersion-Relation Preserving Method for Integrating the Classical Boussinesq Equation", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 43, pp. 118-138 (2017).
2. H. El-Zoheiry, "Numerical Study of the Improved Boussinesq Equation", *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 14, No. 3, pp. 377-384 (2002).
3. Z. Zhang and F. Lu, "Quadratic Finite Volume Element Method for the Improved Boussinesq Equation", *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 53, No. 1, article 13505 (2012).
4. Q. Lin, Y. H. Wu, R. Loxton, and S. Lai, "Linear B-spline Finite Element Method for the Improved Boussinesq Equation", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 224, No. 2, pp. 658-667 (2009).