

[Research Paper]

## 볼록한 바닥면 설계를 통한 소방용수 저장탱크의 수직 벽면에서의 동수력 저감 연구

소수현 · 박진수\* · 성홍근\*\* · 장택수\*\*\*†

경일대학교 소방방재학과 교수, \*부산대학교 조선해양공학과 대학원생, \*\*선박해양플랜트연구소 책임연구원,  
\*\*\*부산대학교 조선해양공학과 교수

## Reduction of Hydrodynamic Force Acting on the Vertical Wall of a Portable Water Storage Tank by Convex bottom Design

Soohyun So · Jinsoo Park\* · Hong Gun Sung\*\* · Taek Soo Jang\*\*\*†

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

\*Graduate student, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan Nat. Univ.,

\*\*Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO),

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

(Received October 19, 2018; Revised October 30, 2018; Accepted October 31, 2018)

### 요 약

본 연구에서는 볼록한 바닥면을 가진 이동형 소방용수 저장탱크의 수직 벽면에 작용하는 동수력을 계산하고 그 결과를 바탕으로 볼록한 바닥면 설계를 통한 동수력의 감소 효과를 확인하고자 하였다. 수치 모의 실험하기 위해 바닥의 형태를 볼록하게 한 수치 해석 영역을 구성하였으며, 특정 위치와 높이에 용수 공급 노즐을 위치시켜 용수를 낙하시켰다. 용수 낙하에 의한 자유 수면의 출렁임과 수직 벽면에서의 유체 벽 오름을 선형 Peregrine 방정식을 이용하여 수치 모사하고 동수력을 계산하였으며, 그 결과를 오목한 바닥면 및 동일한 해석 조건에서 얻은 동수력과 서로 비교 분석하였다. 결과적으로 오목한 바닥면 설계에 비해 볼록한 바닥면 설계를 통해 수직 벽면에서의 동수력이 더 작아짐을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 이동형 소방용수 저장탱크의 안정적인 구조 설계 및 운용에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

### ABSTRACT

This study examined the reduction effect of a hydrodynamic force acting on the vertical wall of a portable water storage tank with a convex bottom floor. For the numerical simulation, the linearized Peregrine's equation was used to analyze the lapping waves in the tank caused by water falling from a supplying nozzle. The hydrodynamic force could be calculated by measuring the maximum run-up wave height at the vertical wall. The initial conditions of the numerical experiments were set up by controlling the positions and heights of the water supplying nozzle. Finally, the hydrodynamic force acting on the vertical wall can be reduced by the convex bottom design of the portable water storage tank so it can be applied to improve the structural stability.

**Keywords :** Portable water storage tank, Linearized Peregrine's model, Lapping waves, Hydrodynamic force

### 1. 서 론

본 연구에서는 이동형 소방용수 저장탱크에 대해 소방

용수 공급 노즐로부터의 용수 낙하에 의한 수직 벽면에서의 동수력을 저감하기 위한 방안으로 탱크의 바닥을 볼록하게 설계하는 방법을 제시하고자 한다. 최근 Park 등<sup>(1)</sup>은

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

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

바닥면이 평평한 이동형 소방용수 저장탱크 내의 자유 수면의 출렁임을 Jang<sup>(2)</sup>에 의해 제안된 분산관계 보존 방법을 이용하여 수치 모의실험을 수행하여 수직 벽면에 미치는 동수력의 영향을 분석하였다. 또한 Park 등<sup>(3)</sup>은 탱크 바닥면이 가운데가 오목하고 수직 벽면으로 갈수록 완만한 오름 경사가 있는 저장 탱크에 대해 수직 벽면에서의 동수력을 해석하였다. 이 연구에서는 수치적 용수저장수조를 구성하여 Jang<sup>(4)</sup>이 제시한 일반 Peregrine 방정식의 함수적 반복해법을 도입하여 선형 Peregrine 방정식으로 자유 수면의 출렁임을 수치 모사하였다. 평평한 바닥면 형상을 연구한 Park 등<sup>(1)</sup>의 연구 결과와는 달리 Park 등<sup>(3)</sup>의 탱크 바닥면이 오목한 형상일 경우, 용수 낙하에 의한 자유수면의 파고 증폭 문제가 탱크의 구조적 안정성에 문제를 야기할 수 있는 가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 Park 등<sup>(3)</sup>의 연구에서 제기된 자유수면의 파고 증폭 문제를 저감할 수 있는 방법으로 탱크 바닥 가운데가 볼록한 형상으로 소방용수 저장탱크를 설계하는 방안을 제시하고자 하였다. 이에 따라 Park 등<sup>(3)</sup>과 동일한 선형 Peregrine 방정식으로 Jang<sup>(4)</sup>의 함수적 반복 해법을 이용하여 수치 모의실험을 수행하였다. 그 결과를 Park 등<sup>(3)</sup>의 오목한 탱크 바닥의 경우와 비교하여 수직 벽면에서의 동수력이 저감되어 구조적으로 볼록한 바닥면을 가진 소방용수 저장탱크가 더 안정적인임을 확인함과 동시에 소방용수 저장탱크의 설계 및 운용 시 저장 탱크의 바닥면이 볼록한 경우가 수직 벽면에서의 동수력이 저감된다는 것을 확인하고자 하였다.

## 2. 선형 Peregrine 시스템 구성 및 수치 모의실험

### 2.1 선형 Peregrine 시스템 및 함수 반복 해법

본 연구에서는 바닥면이 볼록한 소방용수 저장탱크를 수치 모사하기 위하여 Park 등<sup>(3)</sup>과 같이 완만한 바닥 경사를 가진 수치 수조(numerical basin)의 지배방정식으로 사용되는 선형 Peregrine 방정식을 이용하였다<sup>(3)</sup>.

$$\begin{aligned} \eta_t + (uh)_x &= 0, \\ u_t + g\eta_x - \frac{1}{2} \left[ h(hu)_{xx} - \frac{1}{3} h^2 u_{xx} \right]_t &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

이때,  $\eta$ 는 파고함수,  $u$ 는 수심 평균(depth-averaged) 유속함수,  $h(=h(x))$ 는 수심 함수,  $g$ 는 중력가속도( $=9.80665 \text{ m/s}^2$ )를 나타낸다. 또한 (1)의 초기조건은 다음과 같다.

$$\eta_1(x) = \eta(x, 0), \quad u_1(x) = u(x, 0) \quad (2)$$

또한 본 연구에서 도입한 함수적 반복 해법은 Jang<sup>(4)</sup>에 의해 제시되었으며 Park 등<sup>(3)</sup>에 의해서 소방용수 저장탱크 내의 유동을 해석하는 데에 수치 모의실험 도구로서 사용

되었다. 그 수치 모의실험의 내용을 간략히 소개하면 다음과 같다<sup>(3,4)</sup>.

$$X^{n+1} = T_{h_0}(X^n) \quad (3)$$

이때,  $n$ 은 반복횟수이며, 식 (3)에서 벡터 변수  $X^n$ 는 다음과 같다.

$$X^n = (X_1^n, X_2^n, X_3^n, X_4^n, X_5^n, X_6^n)^T = (\eta^n, u^n, u_x^n, u_t^n, u_{xt}^n, u_{xxt}^n)^T \quad (4)$$

이때, 선형 연산자  $T_{h_0}$ 는 다음과 같다.

$$T_{h_0}(X) = \begin{pmatrix} Y^{(1)} \\ U^{(1)} \\ U_x^{(1)} \\ U_t^{(1)} \\ U_{xt}^{(1)} \\ U_{xxt}^{(1)} \end{pmatrix} [\eta_1] + \begin{pmatrix} Y^{(2)} \\ U^{(2)} \\ U_x^{(2)} \\ U_t^{(2)} \\ U_{xt}^{(2)} \\ U_{xxt}^{(2)} \end{pmatrix} [u_1] + \begin{pmatrix} Y^{(3)} \\ U^{(3)} \\ U_x^{(3)} \\ U_t^{(3)} \\ U_{xt}^{(3)} \\ U_{xxt}^{(3)} \end{pmatrix} [\phi(X)] + \begin{pmatrix} Y^{(4)} \\ U^{(4)} \\ U_x^{(4)} \\ U_t^{(4)} \\ U_{xt}^{(4)} \\ U_{xxt}^{(4)} \end{pmatrix} [\psi(X)], \quad (5)$$

여기서 변수  $X_1, X_2$ 는 각각 다음과 같다.

$$X_1 = \eta = Y^{(1)}(\eta_1) + Y^{(2)}(u_1) + Y^{(3)}(\phi) + Y^{(4)}(\psi), \quad (6)$$

$$X_2 = u = U^{(1)}(\eta_1) + U^{(2)}(u_1) + U^{(3)}(\phi) + U^{(4)}(\psi) \quad (7)$$

이때,  $\phi$ 와  $\psi$ 는

$$\phi = (h_0 - h)X_3^n - h_x X_2^n, \quad (8)$$

$$\psi = \frac{1}{2} h h_{xx} X_4^n + h h_x X_5^n + \frac{1}{3} (h^2 - h_0^2) X_6^n \quad (9)$$

이며,  $h_0$ 는 모조변수(pseudo-parameter)이다. 또한 연산자  $Y^{(j)} (j=1,2,3,4)$  와  $U^{(j)} (j=1,2,3,4)$ 는 각각 아래와 같이 적분방정식의 형태로 표현된다<sup>(3,4)</sup>.

$$Y^{(1)}(\eta_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \cos \omega_B t \cdot \cos [k(\xi - x)] \cdot \eta_1(\xi) d\xi dk \quad (10a)$$

$$Y^{(2)}(u_1) = -\frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \sqrt{\frac{h_0(1+h_0^2 k^2/3)}{\sin \omega_B t}} \cdot \sin [k(\xi - x)] \cdot u_1(\xi) d\xi dk \quad (10b)$$

$$Y^{(3)}(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \cos [\omega_B(t-\tau)] \cdot \cos [k(\xi - x)] \cdot \phi(\xi, \tau) d\xi dk d\tau \quad (10c)$$

$$Y^{(4)}(\psi) = -\frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{g} \sqrt{\frac{gh_0}{1+h_0^2 k^2/3}} \cdot \sin [\omega_B(t-\tau)] \cdot \sin [k(\xi - x)] \cdot \psi(\xi, \tau) d\xi dk d\tau \quad (10d)$$

$$U^{(1)}(\eta_1) = -\frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{h_0} \sqrt{\frac{gh_0}{1+h_0^2 k^2/3}} \cdot \sin \omega_B t \cdot \sin [k(\xi - x)] \cdot \eta_1(\xi) d\xi dk \quad (11a)$$

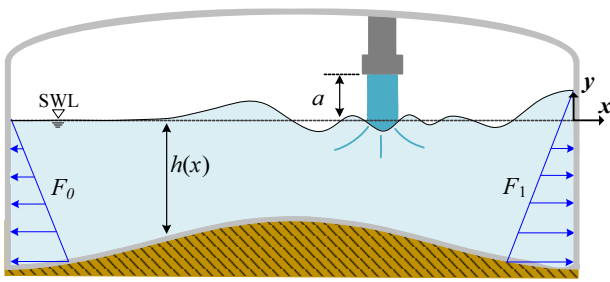


Figure 1. Schematic diagram of the present study.

$$U^{(2)}(u_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \cos \omega_B t \cdot \cos [k(\xi - x)] \cdot u_1(\xi) d\xi dk, \quad (11b)$$

$$U^{(3)}(\phi) = -\frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{h_0} \sqrt{\frac{gh_0}{1+h_0^2 k^2/3}} \cdot \sin[\omega_B(t-\tau)] \cdot \sin[k(\xi-x)] \cdot \phi(\xi,\tau) d\xi dk d\tau \quad (11c)$$

$$U^{(4)}(\psi) = \frac{1}{\pi} \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{1+h_0^2 k^2/3} \cdot \cos[\omega_B(t-\tau)] \cdot \cos[k(\xi-x)] \cdot \psi(\xi,\tau) d\xi dk d\tau \quad (11d)$$

이제 식 (8), 식 (9)을 구성하는  $X_3^n = (X_2^n)_x$ ,  $X_4^n = (X_2^n)_t$ ,  $X_5^n = (X_4^n)_x$ ,  $X_6^n = (X_5^n)_x$ 는 식 (6), 식 (7)의  $X_1^n$ 와  $X_2^n$ 로부터 각각  $x, t$  편미분하여 구할 수 있다<sup>(3,4)</sup>. 이를 통해 선형 Peregrine 방정식에 대응하는 6개의 연성 적분방정식을 구성하였으며, 이것을 함수적 반복법을 통해<sup>(3)</sup> 본 연구의 대상이 되는 블록한 바닥면을 가진 소방용수 저장탱크 내의 자유 수면의 출렁임 유동을 수치 모의 실험하는데 사용하였다.

### 2.2 소방용수 저장탱크 수치 모델링

본 연구의 수치 모의 실험을 위한 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 바닥면이 블록한 소방용수 저장탱크의 수심은  $h(x)$ 이며, 소방용수를 공급하는 노즐의 높이는 자유 수면으로부터  $a$ 에 위치한다. 수면이 잔잔한 상태일 때 수직 벽면에서의 정수력은  $F_0$ , 노즐로부터 소방용수 낙하에 의해 발생한 수면 출렁임으로 수직 벽면에서 파고가 최대로 증폭될 때 파고의 최대 벽 오름 높이( $\eta_{max}$ )에 의해 발생하는 동수력을  $F_1$ 으로 표현하였다. 이와 같은 저장 탱크의 수면 출렁임에 대한 수치 모의실험을 수행하고자 Figure 2와 같이 수치 수조를 구성하였다<sup>(3,4)</sup>. Park 등<sup>(1,3)</sup>과 마찬가지로 본 연구에서도 탱크 내의 유동을 표현할 실제 물리영역( $-L < x < 0$ )과 저장 탱크의 수직 벽 충돌 효과를 표현하기 위한 경상(鏡像, mirror image,  $0 < x < L$ ) 영역을 배치하였다. 또한 저장 탱크 중심으로부터 소방용수의 공급노즐까지의 위치는  $x = |x_0|$ 이며, 낙하하는 용수의 폭은  $w$ 이다.

한편, Figure 2(a)의  $\eta_1(x)$ 는 노즐에서 용수가 낙하하여 자유 수면에 충돌하기 직전의 초기 변위 조건이며, 이때의 자유 수면은 유동이 없이 잔잔함을( $u_1(x) = 0$ ) 의미하며, 이것은 다음과 같이 수식적으로 표현할 수 있다.

$$\eta_1(x) = \begin{cases} a & |x \pm x_0| \leq \frac{w}{2}, u_1(x) = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

그리고 탱크의 블록한 바닥면을 표현하는 수심함수는 다음과 같이 가정하였다.

$$h(x) = 0.4 + 0.2\cos\frac{\pi x}{10} \quad (13)$$

### 2.3 수치 모의실험 결과 분석

초기 조건 식 (12)에 따라 공급노즐에서 낙하한 소방용수에 의해 발생한 자유 수면에서의 출렁임은 일정 시간이 지나고 Figure 2(b)와 같이 수직 벽면에 충돌하여 최대 오름 높이  $\eta_{max}$ 까지 상승하게 된다. 본 연구에서는 앞서 Park 등<sup>(3)</sup>이 수행한 오목한 바닥면(수심함수:  $h(x) = 0.4 - 0.2\cos(\pi x/10)$ )을 가진 탱크에 대한 수직 벽면에서의 동수력과 비교하기 위해 Figure 2와 같이 수직 벽면에서의 파고 최대 오름 높이  $\eta_{max}$ 에서의 동수력의 비와 평균 수심  $h_{mean}$ 에 대한 정수력의 비( $R$ )를 다음과 같이 나타내었다.

$$R = \frac{\rho g(h_{mean} + \eta_{max})^2/2}{\rho g(h_{mean})^2/2} = (1 + \eta_{max}/h_{mean})^2 \quad (14)$$

앞서 Park 등<sup>(3)</sup>이 수행한 연구 결과와 비교하기 위하여 동일하게 물리 영역  $-20 \text{ m} < x < 0 \text{ m}$ 으로 설정하였으며, 식 (13)와 같이 평균 수심  $h_{mean} = 0.4 \text{ m}$ 로 설정하고 시간영역  $[0, 2 \text{ s}]$ 에 대해 수치 모의실험을 수행하였다. 또한 용수 공급 노즐의 폭은 고정( $w = 1.0 \text{ m}$ )하고 위치와 높이를 Table 1과 같이 변화시키면서, 그에 따른 수직 벽면에서의 파고 최대 오름 높이  $\eta_{max}$ 와 식 (14)에 나타난 동수력과 정수력의 비  $R$  변화를 분석하였다.

Table 1에 따르면 저장 탱크 바닥면을 블록하게 설계를 할 경우, 오목하게 바닥면을 설계를 할 경우에 비해 수직 벽면에서의 최대 파고 오름 높이가 모든 수치실험 조건에 대해 24%정도 감소함을 확인할 수 있다. 또한 오목한 바닥면일 경우와 비교하여 블록한 바닥면일 때의 수직 벽면에서 발생하는 동수력의 저감율(식(15))이 약 10~31.5%이며, 공급되는 소방용수의 낙하 높이가 높을수록, 낙하되는 용수의 폭이 넓을수록 저감율이 증가함을 확인할 수 있다.

$$\text{Reduction ratio (\%)} = \frac{|R_R - R_C|}{R_R} \times 100 \quad (15)$$

파고의 최대 오름 높이가 바닥면의 형태에 따라 감소하는 것은 저장탱크의 바닥면이 오목할 경우 용수 낙하에 의한 자유 수면의 출렁임이 탱크 바닥 중심에서 수직 벽면으로 전파해 가면서 수심이 얕아지게 되며, 그런 상황에서는 자유 수면의 출렁임이 전파할 때 발생한 일정한 유동 에너지는 수심이 얕아지면서 파고의 증폭으로 보존되는 반면, 블록한 바닥

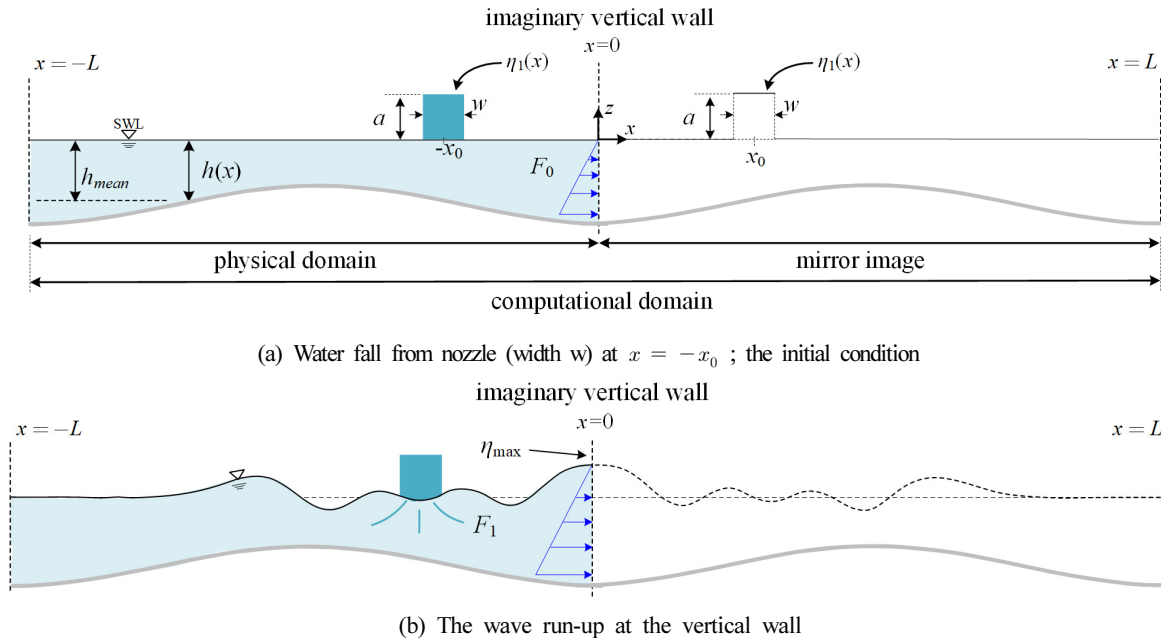


Figure 2. The schematic diagram of the numerical basin system.

Table 1. Maximum Run-up Amplitude and Reduction Ratio

Case	Nozzle		Reentrant bottom <sup>(3)</sup>		Convex bottom		Reduction ratio (%)
	$x_0$ [m]	$a$ [m]	$\eta_{max}$ [m]	$R_R$	$\eta_{max}$ [m]	$R_C$	
1	-2	0.1	0.1187	1.6716	0.0905	1.5037	10.0
2		0.2	0.2375	2.5400	0.1809	2.1090	17.0
3		0.3	0.3562	3.5740	0.2713	2.8165	21.2
4	-3	0.1	0.1193	1.6855	0.0758	1.4149	16.1
5		0.2	0.2386	2.5488	0.1515	1.9010	25.4
6		0.3	0.3579	3.5901	0.2273	2.4594	31.5

면을 가진 경우, 오히려 수심이 깊어지면서 파고의 감소로 그 유동에너지를 보존하기 때문이다. 따라서 불록한 바닥면을 가진 탱크 내에서 소방용수 낙하에 의해 발생한 출렁임이 전파되어 탱크의 수직 벽면에서의 최대 파고 오름 높이는 오목한 바닥면의 탱크에 비해 감소함을 확인할 수 있었고, 수직 벽면에서의 동수력도 저감됨을 확인할 수 있었다.

### 3. 결론

본 논문은 소방용수 저장탱크에 공급되는 용수의 낙하로 발생하는 출렁임 파가 탱크의 수직 벽면에서 가지는 동수력을 불록한 바닥면 형태를 적용하여 계산하고, 수직 벽면에서 증폭되는 최대 동수력을 저감할 수 있는 방안을 알아보기 위해 수행되었다. 기존의 Park 등<sup>(3)</sup>에서 오목한 바닥면에 대한 수치 실험을 통해 저장 탱크 내 공급 노즐로부터 낙하하는 소방 용수에 의해 발생한 출렁임이 수직 벽면에서의 최대 파고 오름 높이 및 동수력이 증폭되어 구조적 안정성에 악영향을 미칠 수 있음을 밝혔다. 이에 대응하

여 불록한 바닥면 설계를 통해 수직 벽면에서의 최대 파고 오름 높이를 낮출 수 있다면 증폭된 출렁임에 의한 수직 벽면에서의 동수력 저감으로 저장탱크의 구조적 안정성이 개선될 수 있음을 수치 실험을 통해 밝히고자 하였다. 본 논문을 통하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 용수 공급 노즐의 위치와 높이를 변화시키면서 자유수면의 출렁임을 수치 모의 실험하여 바닥면이 불록한 이 동형 소방용수 저장탱크 내 수직 벽면에서의 동수력을 해석하였다.

2) 그 결과, 소방용수 저장탱크가 오목한 바닥면의 경우에 비해 불록한 바닥면의 경우가 탱크 내 수직 벽면에서의 자유수면의 최대 파고 오름 높이가 24%정도 감소됨을 확인할 수 있었다.

3) 또한 불록한 바닥면으로 설계를 할 경우 오목한 바닥면 일 때와 비교하여 벽면에서의 동수력이 약 10~31.5%정도 저감되며, 공급되는 소방용수의 낙하 높이가 높을수록, 낙하되는 용수의 폭이 넓을수록 저감율이 증가함을 확인하였다.

이런 결과를 종합할 때, 향후 대형 이동형 소방용수 저

장탱크, 대형 수영장 및 소방차의 물탱크의 구조 설계에 불록한 바닥면 설계를 할 경우, 내부 유동에 따른 출렁임에 의한 구조 안정성을 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 논문은 제1저자(소수현)은 경일대학교 교원연구년제에 의해 지원되었으며, 제3저자(성홍근)은 해양수산부와 한국해양과학기술진흥원(KIMST)이 지원하는 “심해공학수조 운용을 위한 연구인프라 구축 및 심해플랜트 Pre-FEED 원천핵심기술개발” 사업의 연구로 수행하였으며, 교신저자(장택수)는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2015R1D1A1A01058542)과 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1D1A1B06049813)과 20017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1A5A1015722)이며 이에 감사드립니다.

## 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. 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).
3. 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).
4. 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).