

해안안벽과 육상구조물에서 지진해일파의 처오름 및 작용파력에 관한 수치해석

Numerical Analysis of Runup and Wave Force Acting on Coastal Revetment and Onshore Structure due to Tsunami

이광호* · 김창훈** · 김도삼*** · Harry Yeh**** · 황용태*****

Lee, Kwang Ho · Kim, Chang Hoon · Kim, Do Sam · Yeh, Harry · Hwang, Young Tae

Abstract

In this work, wave run-up heights and resultant wave forces on a vertical revetment due to tsunami (solitary wave) are investigated numerically using a numerical wave tank model called CADMAS-SURF (CDIT, 2001. Research and Development of Numerical Wave Channel (CADMAS-SURF). CDIT library, No. 12, Japan.), which is based on a 2-D Navier-Stokes solver, coupled to a volume of fluid (VOF) method. The third order approximate solution (Fenton, 1972. A ninth-order solution for the solitary wave. J. of Fluid Mech., Vol. 53, No.2, pp.257-271) is used to generate solitary waves and implemented in original CADMAS-SURF code. Numerical results of the wave profiles and forces are in good agreements with available experimental data. Using the numerical results, the regression curves determined from the least-square analysis are proposed, which can be used to determine the maximum wave run-up height and force on a vertical revetment due to tsunami. In addition, the capability of CADMAS-SURF is demonstrated for tsunami wave forces acting on an onshore structure using various configuration computations including the variations of the crown heights of the vertical wall and the position of the onshore structure. Based on the numerical results such as water level, velocity field and wave force, the direct effects of tsunami on an onshore structure are discussed.

Keywords : CADMAS-SURF, tsunami, solitary waves, runup, wave force, revetment, onshore structure

요 지

본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식과 자유수면추적을 위해 도입한 VOF함수의 이류방정식에 기초하고 있는 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 Fenton(1972)의 3차근사고립파이론에 의한 조파이론을 새롭게 도입한 수치파동수로부터 직접호안상에서 지진해일(고립파)의 처오름 및 작용파력을 해석한다. 기존의 연구결과와 대비하여 본 수치해석결과의 적용성을 논의하며, 최소사승법에 기초하여 직접호안상에서 최대처오름과 최대파력을 합리적으로 추정할 수 있는 회귀식을 제안한다. 또한, 육상구조물에 작용하는 지진해일(tsunami wave)의 파력산정에 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 적용을 시도한다. 육상에서 지진해일의 수위변동, 유속 및 파력변동의 특성으로부터 육상구조물에 미치는 지진해일의 직접적인 영향을 추론할 수 있을 것이다.

핵심용어 : CADMAS-SURF, 지진해일, 고립파, 처오름, 파력, 호안, 육상구조물

1. 서 론

대부분의 지진해일은 해양지진에 의한 해저면의 연직변위 운동으로 해수면의 국부적인 상승 혹은 강하로부터 발생되며, 해양에서는 수심에 비해 진폭(1 m보다 작음)이 매우 작지만, 파장이 매우 길기 때문에(수백 킬로미터의 차수) 상당한 에너지를 갖는다. 지진해일에 대한 많은 연구는 단층모델

에 기초한 기발생의 지진해일 및 향후 해상단층활동으로 야기될 수 있는 예상지진해일의 전파속도와 수위변동의 재해석 및 예측에 관한 연구가 주안점으로 되어 왔고, 지진해일에 의한 파력 및 세굴을 포함한 지형변동 등에 대한 연구는 상대적으로 적은 편이다. 한편, 2004년에 발생한 인도양지진해일의 피해상황에서도 볼 수 있는 바와 같이, 가옥을 포함한 연안시설물과 주변의 지반에 미치는 지진해일에 의한 파

*정희원 · (일)나고야대학 대학원 공학연구과 사회기반공학전공 수공학강좌 조교수 (E-mail : leekh@civil.nagoya-u.ac.jp)

**정희원 · (일)나고야대학 대학원 공학연구과 사회기반공학전공 박사과정 (E-mail : abbalive@gamil.com)

***정희원 · 교신저자 · 한국해양대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : kimds@hhu.ac.kr)

****(미)오레곤주립대학교 토목공학과 교수 (E-mail : harry@enr.orst.edu)

*****한국해양대학교 대학원 건설환경공학부 박사과정

력과 지형변동은 인명피해 이외에도 사회간접자본의 파괴에 직접적인 원인이라는 측면에서 그의 규명과 대책이 매우 중요한 문제로 인식되고 있다. 따라서, 지진해일피해가 빈번한 일본과 미국 등지에서는 폭풍해일과 지진해일을 대비하여 CCM(Coastal Construction Manual)에 따른 설계지침(Dames and Moore, 1980; CCH(City and Country of Honolulu Building Code), 2000; Asakura *et al.*, 2000; FEMA-CCM (Federal Emergency Management Agency-Coastal Construction Manual), 2005; ASCE(American Society of Civil Engineers), 2006)을 제공하고 있으며, 이 중에서 구조물에 작용하는 파력에 대한 대부분의 설계지침은 ①정수력(hydrostatic force), ②부력(buoyant force), ③동수력(hydrodynamic force), ④지진해일파력(tsunami wave force), ⑤표류물에 의한 충격력(debris impact force) 및 ⑥쇄파력(wave-breaking force)의 적용을 권고하고 있다(Yeh, 2006, 2007).

한편, 주로 미국과 일본을 중심으로 수행되어 온 지진해일에 따른 파력에 관한 연구는 1960년의 칠레지진해일과 우리나라에도 큰 영향을 미친 1983년의 동해중부지진해일의 내습에 의한 심각한 해상육상구조물의 피해가 큰 동기가 된 것으로 보이며, 따라서 본격적인 파력연구는 피해원인의 규명 및 합리적인 복구대책의 수립을 위해 1960년부터 시작된 것으로 판단된다. 특히, 우리나라 동해상의 지진해일에 대해 우리와 직접적인 연관을 갖는 일본의 경우는 칠레지진해일에 의한 피해복구차원에서 수행된 Fukui *et al.*(1963)의 연구를 위시하여, 동해중부지진해일 발생 이후로 Tanimoto *et al.*(1983, 1984), Matsutomi(1991), Matsutomi and Ohmukai(1999), Ikeno *et al.*(1998, 2001), Ikeno and Tanaka(2003), Asakura *et al.*(2000), Mizutani and Imamura(2000, 2002), Arikawa *et al.*(2005) 등에 의해 다수의 연구가 수행되었으며, 미국의 경우는 Cumberbatch(1960), Cross(1967), Dames and Moore(1980), Ramsden and Raichlen(1990), Ramsden(1993) 등에 의해 지진해일의 파력특성이 실험 및 이론 등을 통하여 규명되기 시작하였다. 이러한 연구결과들은 크게 다음의 4분야로 대별될 수 있다. 즉, ①해중구조물에 작용하는 파력(Fukui *et al.*, 1963; Cross, 1967; Tanimoto *et al.*, 1984; Matsutomi, 1991; Ramsden and Raichlen, 1990; Ramsden, 1993; Ikeno *et al.*, 1998, 2001; Mizutani and Imamura, 2000), ②해중구조물에 작용하는 표류물에 의한 충돌력(Ikeno *et al.*, 2001; Matsutomi, 1989), ③육상구조물에 작용하는 파력(Cross, 1967; Dames and Moore, 1980; Hamzah *et al.*, 1998; Matsutomi and Ohmukai, 1999; Asakura *et al.*, 2000; Mizutani and Imamura, 2002; Ikeno *et al.*, 2003; Arikawa *et al.*, 2005; Xiao and Huang, 2008) 및 ④육상구조물에 작용하는 표류물에 의한 충돌력(Ikeno and Tanaka, 2003; Yeom *et al.*, 2007)으로 각각 분류될 수 있다.

해중구조물에 작용하는 지진해일의 파력에 대해서, Fukui *et al.*(1963)은 차원해석과 수리실험에 기초하여 제방에 작용하는 파압을 지속파압(중복파압)과 충격파압으로 분류하여 충격파압이 파속의 4승에 비례한다는 것을, 그리고 Mizutani and Imamura(2000)는 유사한 실험을 통해 제방에 작용하는 파압을 동파압, 지속파압 및 중복충돌파압으로 분류하여 동

압과 지속파압이 각각 파속의 4승과 2승에 비례한다는 것을 증명하였다. Ramsden(1993, 1996)은 고립파에서부터 댐 파괴류에 의한 undular bore 및 turbulent bore에 이르기까지 상세한 수리실험으로부터 연직벽체에 작용하는 파력 특성을 해석하여 고립파의 경우에 정수면에서 고립파의 파봉까지의 높이로 정의된 파고 H 와 정수심 h 와의 비인 H/h 의 3차함수로서 작용파력을 정식화하고 있다. Ikeno *et al.*(1998)은 soliton분열된 지진해일의 선단부가 방파제에 작용할 때에 충격파압이 $3.5\rho gH$ (여기서, ρ 는 유체밀도, g 는 중력가속도, H 는 정수면에서 입사지진해일고의 높이), 중복파압이 $2.2\rho gH$ 로 주어지고, Tanimoto *et al.*(1984)은 충격파압이 $2.4\rho gH$, 중복파압이 $2.2\rho gH$ 로 된다는 것을 나타내고 있다.

다음으로, 육상구조물에 작용하는 지진해일의 파력(tsunami wave force)에 대해서 Asakura *et al.*(2000)와 CCH(2000)는 $4.5\rho g\eta_{\max}^2$ 으로 나타내고 있다. 여기서, 구조물이 존재하지 않는 경우에 구조물의 위치에서 지진해일의 최대수심으로 정의되는 η_{\max} 는 수리실험이나 수치실험에 의해 결정되는 물리량으로, 만일 η_{\max} 의 추정치에 최대침수고를 적용하는 경우에는 과대평가로 되어 경우에 따라서는 정수압의 9배에 달하는 것으로 알려져 있다(Yeh, 2007). Asakura *et al.* (2000)은 비분열파와 soliton분열파로 분류하여 지진해일파력을 검토하였으며, 비분열파의 경우에는 Dames and Moore (1980)의 결과에 기초한 CCH(2000)와 동일한 식을 제안하고 있지만, soliton분열파의 경우에는 비분열파의 경우보다 대략 20%가 커지는 파력분포식을 제안하고 있다. 또한, Mizutani and Imamura(2002)는 사다리꼴호안을 월류하는 경우에 대해서, Ikeno *et al.*(2003)은 댐파괴류로부터 평탄한 육상으로 소상하는 경우에 대해서, Arikawa *et al.*(2005)는 육상에 설치된 호안의 경우에 대해서, 그리고 Matsutomi and Ohmukai(1999)는 댐파괴류의 소상파에 의한 경우에 대해서 각각 지진해일파력을 검토하고 있다.

이상의 육상구조물에 작용하는 지진해일파력의 검토에 있어서 Hamzah *et al.*(1998), Arikawa *et al.*(2005) 및 Xiao and Huang(2008) 등의 수치적인 연구를 제외하면, 거의 대부분이 수리실험에 의존하고 있다. 제시된 육상구조물에 작용하는 파력의 수치해석에 관한 연구는 공통적으로 Navier-Stokes 운동방정식류와 자유수면의 추적에 VOF(Volume Of Fluid)법을 병용하여 유한차분법으로 해석하고 있으며, 이는 수심분별된 천수방정식이나 Boussinesq 방정식류에 의한 평면파랑의 추정식에 의해서는 연직방향으로 압력의 변화과정을 합리적으로 나타낼 수 없기 때문이다. 구체적인 연구예로 Hamzah *et al.*(1998)은 경사해빈상의 평탄한 육상부에 설치된 제방에 작용하는 고립파의 파압을 논의하고 있고, 해석법의 검증으로는 경사면상의 고립파의 처오름현상을 검토하고 있다. Arikawa *et al.*(2005)는 육상부에 설치된 제방에 작용하는 단파의 파압과 수면변동을 수치적으로 해석하고, 수리실험결과와 비교하고 있다. 또한, Xiao and Huang(2008)은 경사해빈의 연장선상에 놓인 육상부의 가옥에 작용하는 파력을 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)모델, $k-\varepsilon$ 난류모델 및 VOF법을 결합한 수치해석법으로부터 처오름 및



Photo 1. Inundation by Indian ocean tsunami (2004)
(www.greendiary.com/.../); (http://www.nature.com/nature/journal/v442/n7098/images/442015a-i1.0.jpg)



Photo 2. Houses damaged by Indian ocean tsunami (2004)

파력을 논의하고 있고, 검증으로서는 Hamzah *et al.*(1998)의 경우와 동일하게 경사면상의 고립파의 처오름 현상을 검토하고 있다.

본 연구에서는 파랑과 구조물과의 2차원적인 상호간섭현상의 규명에 국·내외에서 널리 활용되고 있는 일본의 CDIT(Coastal Development Institute of Technology)에서 개발된 CADMAS-SURF(Super Roller Flume for Computer Aided Design of MARitime Structure)의 코드를 적용하여 지진해일 내습시에 호안에 작용하는 파력 및 심각한 피해를 입어 온 연안 인근의 육상가옥(예로, Photo 1, 2를 참조)으로 대표되는 육상구조물에 작용하는 지진해일파력을 추정한다. CADMAS-SURF(CDIT, 2001) 코드는 Navier-Stokes 운동방정식을 기초방정식으로 하고 있으며, 쇄파를 포함한 파랑변형, 쇄파후 파랑의 분열과 재생성 및 월파까지도 고정도로 해석이 가능한 자유수면추적의 대표적인 기법인 VOF법(Hirt and Nichols, 1981)을 적용하고 있다. 여기서, 본 연구에서는 CADMAS-SURF를 적용함에 있어서 해상 및 육상구조물에 작용하는 지진해일(고립파)에 의한 파력의 추정이라는 본 연구의 목적에 부합하도록 CADMAS-SURF의 소스코드에 Fenton(1972)에 의한 3차근사고립파이론을 적용하여 고립파를 수치적으로 조파한다. 고립파의 파력, 수위변동 및 처오름에 관한 Boussinesq(1872), Su and Mirie(1980), Grill and Svendsen(1991), Fenton and Reinecker(1982), Byatt-Smith(1971), Maiti and Sen(1999), Maxworthy(1976) 및 Ramsden(1993)에 의한 실험결과, 해석결과 혹은 수치해석결과와 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치해석결과와의 비교·분석을 통하여 본 해석법의 적용성을 검증한다. 아울러, 이상의 수리실험, 해석 및 수치해석의 각 데이터에 기초하여 최소자승법에 의한 회귀분석으로부터 호안상에서의 최대처오름높이와 최대작용파력을 합리적으로 나타낼 수 있는 추정식을 제안한다. 또한, 지금까지 대부분이 실험으로부터 추정되어온 육상구조물에 미치는 지진해일파력의 추정에 CADMAS-SURF(2001)의 적용을 시도한다. 이를 위하여 호안천단상에서부터 평탄한 지반상에 놓인 육상구조물의 경우를 상정하고, 호안에서 육상구조물까지의 이격거리의 변화에 따른 지진해일파력의 변화를 검토함으로써 육상건물에 미치는 지진해일의 기초적인 영향을 규명한다.

2. CADMAS-SURF의 이론적 배경

CADMAS-SURF(CDIT, 2001)는 다양한 해안·항만구조물에 대한 수치모의가 가능하도록 해석영역내에 조파기능과 소파기능이 포함된 수치파동수로(numerical wave channel)로, 기초방정식에는 2차원비압축성의 점성유체를 대상으로 한 연속방정식과 Navier-Stokes 운동방정식을 Sakakiyama and Kajima(1992)의 porous model에 기초하여 확장한 식(1)~(3)의 기초방정식을 적용하고 있다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} = -\frac{\gamma_v \partial p}{\rho \partial x} + 2\nu \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{xz}}{\partial z} \right) - D_x u + S - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} = -\frac{\gamma_v \partial p}{\rho \partial z} + 2\nu \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) - D_z w + S - R_z - \gamma_v g \quad (3)$$

여기서, t 는 시간, x, z 는 수평 및 수직좌표, u, v 는 수평 및 수직방향의 유속성분, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν 는 동점성계수, g 는 중력가속도, γ_x 는 체적공극율, γ_x, γ_z 는 수평 및 수직방향의 면적투과율, τ_{ij} 는 변형속도텐서, D_x, D_z 는 측면경계에서 반사파의 제어를 위해 설치한 스폰지층에서의 감쇠계수, S 는 해석영역내의 조파를 위한 소스항, R_x, R_z 는 투과층에서의 저항력을 각각 나타낸다. 그리고, $\lambda_u, \lambda_x, \lambda_z$ 는 C_M 을 관성력계수로 하여 식(4)와 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v)C_M \\ \lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x)C_M \\ \lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z)C_M \end{cases} \quad (4)$$

자유수면해석을 위한 모델에는 범용성이 높고 복잡한 자유수면의 형상에 대해서도 해석이 가능한 VOF법(Hirt and Nichols, 1981)을 적용하고 있으며, VOF함수 F 에 대한 이류방정식은 식(5)로 주어진다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S \quad (5)$$

수치알고리즘을 포함한 보다 자세한 사항은 CDIT(2001)를 참조하기 바란다.

본 연구의 해석에서는 투과층이 고려되지 않기 때문에 기초방정식 중의 체적공극율, 면적투과율 및 투과층내의 저항

Table 1. Computational conditions in CADMAS-SURF

version	grid resolution	difference scheme	time step	matrix solver
V4.0	$\Delta x \times \Delta z = 1.0 \times 1.0$ cm	donor-0.2	auto (approximately 0.005s)	M-ILUBCGSTAB

력 등은 무시된다. 또한, 고립파의 수치조파를 위하여 Fenton(1972)에 의해 제시된 3차고립파이론을 적용하였으며, 이에 따라 CADMAS-SURF의 소스코드를 일부 수정하였다. 계산조건을 Table 1에 나타낸다.

3. 수치해석결과

3.1 직립호안상에서 지진해일(고립파)의 처오름과 작용파력

직립호안상에서 지진해일(고립파)의 처오름 및 작용파력의 추정치에 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 적용성을 규명하기 위하여 고립파에 대해 상세한 실험을 수행한 Ramsden(1993)의 수리실험결과와 기존의 수리실험결과, 해석결과 및 수치해석결과와도 비교검토한다. 이로부터 직립호안상에서 최대처오름과 최대파력을 나타내는 합리적인 추정식을 제안한다.

3.1.1 Ramsden(1993)의 실험

Ramsden(1993)의 수리실험에서 수조의 총길이는 24.48 m 이고, 대상의 고립파는 피스톤형의 조파기에 의해 조파된다. 전파과정에 따른 고립파의 정확한 2차원수면형상을 측정하기 위하여 LIF(Laser-Induced Fluorescence)를 개발·적용하였으며, 원통렌즈를 사용하여 200 mW argon-ion laser로부터 수조의 중앙선을 따라 측정용 벽체에 수직한 연직평면으로 빔을 확산시켜, 정수면에 길이 0.9 m, 두께 2 mm의 light sheet를 형성시키고 있다. 레이저의 조명시 자유수면에 명료한 영상을 형성시켜주는 rhodamine 6-G dye를 수조에 도입하였다. 또한, 영상은 30 Hz의 프레임비율과 0.001s의 셔터속도로 작동하는 비디오카메라로 기록되었고, 비디오영상은 frame grabber로부터 디지털데이터화 되었으며, calibration의 과정을 통하여 distortion-free physical data로 변환되었다. 이러한 기법들에 의한 파형과 연직벽에서의 처오름에 관한 데이터는 ± 2 mm 내의 정확성을 갖는다. 또한, LIF에 의한 측정과 더불어 연직호안으로부터 2.2 m 및 19.0 m 떨어진 위치에 저항식파고계를 설치하여 수위변동도 동시기록하고 있다.

파압은 수조바닥 위로 1.79 cm, 17.00 cm 및 29.86 cm에 위치한 3개의 압력변환기로부터 측정되었고, 또한 파력은 수조바닥 위로 7.7 cm, 21.4 cm, 34.9 cm, 52.3 cm의 높이에서 설치된 4개의 힘변환기에 의해 calibration의 과정을 통하여 얻어졌으며, 각각 12 μ s 및 120 μ s의 샘플링타임으로 기록되었다. 보다 상세한 사항은 Ramsden(1993)을 참조바란다.

3.1.2 해석결과

Fig. 1은 고립파의 조파파형을 검증하기 위하여 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 수치조파에 Fenton(1972)의 3차고립파이론에 의한 매트릭스데이터를 적용한 본 수치해석결과를 Ramsden(1993)에 의한 실험결과 및 Boussinesq(1872)에 의

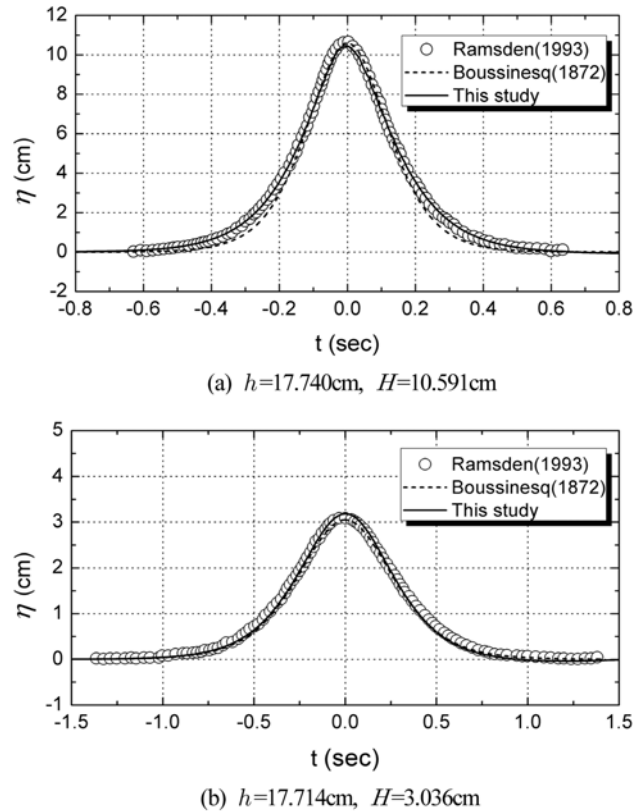


Fig. 1 Comparisons of numerical, theoretical and experimental results of incident solitary wave profiles

한 해석결과와 동시에 도식한 것으로, 각각 직립호안으로부터 해측으로 19 m인 지점에서 직립호안에 의한 반사파가 도달하기 전의 입사파성분에 의한 수위변동 η 를 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 1(a)가 $h=17.740$ cm, $H=10.591$ cm($H/h=0.597$)인 경우이고, Fig. 1(b)가 $h=17.714$ cm, $H=3.036$ cm($H/h=0.172$)인 경우로, 그림에서 수평인 시간축의 원점은 수위측정지점에 고립파의 파봉이 도달하는 시간 t 를 원점으로 환산하여 나타낸 것이다. 결과에 의하면, 파봉부근에서 실험결과와의 미소한 차이를 볼 수 있고, 파고수심비 H/h 의 값에 따라 각 수위변동에서 약간의 변화와 차이를 나타내는 것을 알 수 있지만, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치결과는 전체적으로 Ramsden(1993)의 실험결과 및 Boussinesq(1872)의 해석결과와 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 2는 직립호안의 전면에서 해측으로 23.92 cm 떨어진 지점에서 수위변동 η 에 대한 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 수치해석결과와 Ramsden(1993)의 수리실험결과를 비교한 것으로, Fig. 2(a)는 $h=17.460$ cm, $H=7.403$ cm($H/h=0.424$)의 경우이고, Fig. 2(b)는 $h=17.460$ cm, $H=7.281$ cm($H/h=0.417$)의 경우이다. 수평축인 시간축은 고립파의 전파속도에 대한 비교가 가능하도록 조파개시를 시점으로 한 실시간을 나타내었다. 결과를 살펴보면, Ramsden(1993)의 수위측정결과에서 Fig. 2(a)의 경우는 레이저형광기법(LIF)에 의한 측정결과가 저항식파고계에 의한 결과보다 두 파봉 근방에서 약간

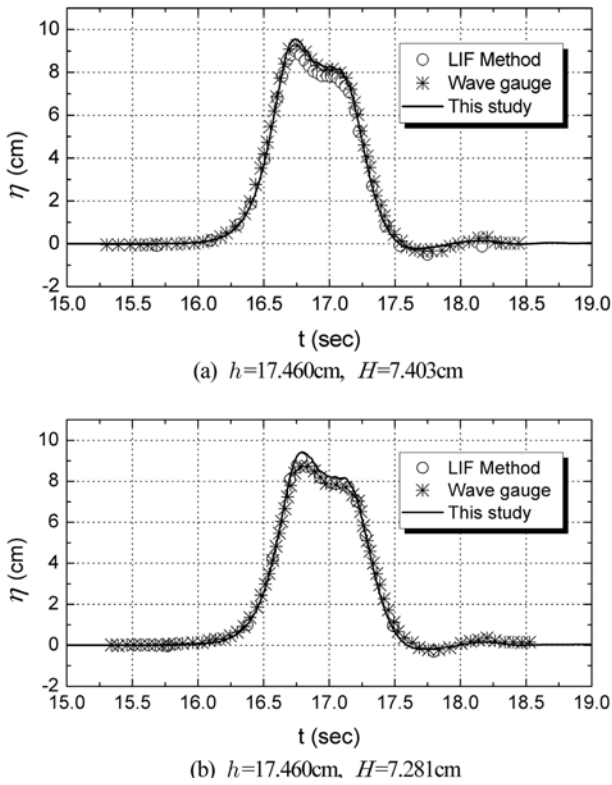


Fig. 2 Comparisons of numerical and experimental results of standing solitary wave profiles

큰 값을 나타내지만, Fig. 2(b)에서는 두 결과에서 거의 동등한 값을 나타낸다. 두 파봉 근방에서 수치계산결과가 실험치를 약간 과대평가하고 있는 시간의 범위를 제외하면, 전체적으로 실험결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 여기서, 두 개의 파봉이 나타나는 것은 직립호안에 의한 반사파의 영향이 포함되어 있기 때문이다. 그리고, 시간의 변화에

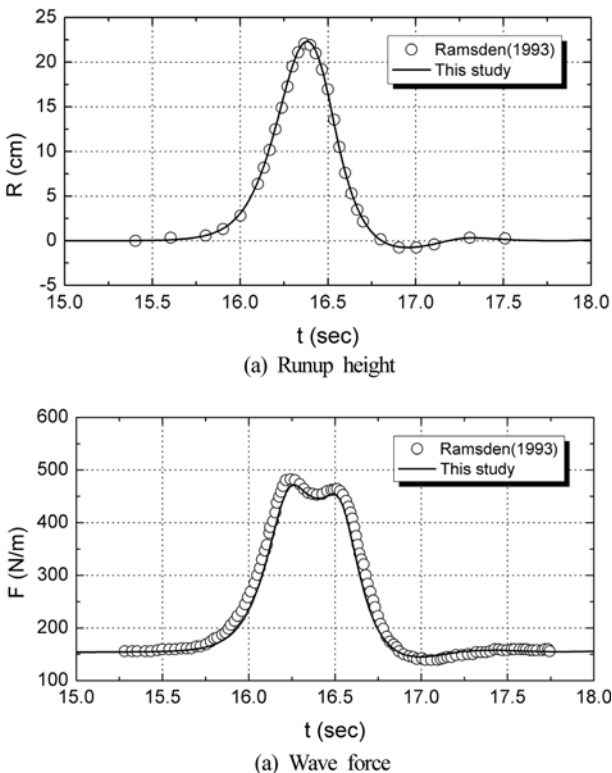


Fig. 3 Runup height and wave force on the vertical revetment ($h=17.740$ cm, $H=8.941$ cm)

따른 파형의 변화과정(전달속도)을 살펴보면, 두 결과치가 거의 일치하는 것을 볼 수 있으므로 고립파의 전파속도도 실험치와 거의 일치하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 직립호안상에서 처오름높이 R 과 고립파의 작용파력 F 에 대한 Ramsden(1993)의 실험결과와 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 수치해석결과를 비교한 것으로, Fig. 3(a)와 (b) 모두 $h=17.740$ cm, $H=8.941$ cm($H/h=0.504$)의 경우이며, 수평축인 시간축은 조파개시를 시점으로 한 시간이다. 결과에서 처오름의 경우는 두 결과가 거의 완전히 일치하는 것을 볼 수 있고, 파력의 경우는 수치해석결과가 전반적으로 약간 작은 값을 나타낸다. 여기서, 처오름의 경우는 입사 및 반사고립파가 중첩된 경우로, 입사파의 $2H=17.882$ cm보다 최대처오름높이가 더 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있으며, 또한 파력에서는 두 개의 피크치가 나타나고, 첫 번째의 피크치가 최대치를 나타내는 것을 알 수 있다. 여기서, 시간적으로 최대처오름이 발생하기 이전에 최대파력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 호안의 연직벽면을 따른 (-)가속도의 영향 때문으로, (+)최대처오름높이의 발생시간의 근방에서 (-)가속도가 최대로 되기 때문이다. 이러한 (-)가속도로 인하여, 후술하는 Fig. 5에서 알 수 있는 비와 같이, 호안벽체상에서의 처오름높이에 의한 정수압보다 전파력이 오히려 작아지는 결과를 나타낸다. 이와 같은 쌍봉형의 파력분포는 H/h 가 증가함에 따라 보다 확대되지만, 파고 H 가 작아질수록 그러한 경향은 감소되는 것으로 알려져 있다(Ramsden, 1993).

Fig. 4는 직립호안상에서 입사고립파의 무차원파고 H/h 에 대한 무차원최대처오름 R_{max}/h 의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서는 Ramsden(1993) 및 Maxworthy(1976)에 의한 실험결과, 강비선형 포텐셜이론에 기초한 Maiti and Sen (1999)의 수치해석결과, Fourier법에 기초한 Fenton and Rienecker(1982)의 해석해결과, 섭동법에 기초한 Byatt-Smith(1971)의 근사해석결과 및 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치해석결과를 각각 대비하고 있다. Fig. 4로부터 입사고립파의 무차원파고가 증가함에 따라 무차원최대 처오름높이는 대부분 선형적으로 동일하게 증가하며, 각각의 해석결과와 사이에는 큰 차이가 존재하지 않는다는 것을 알

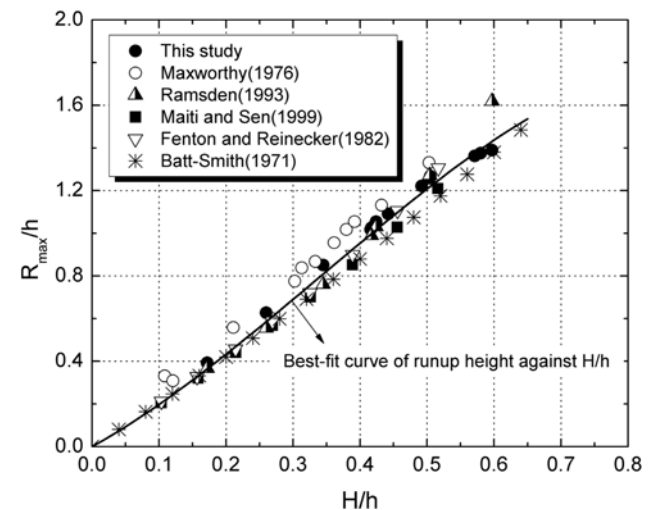


Fig. 4 Nondimensional maximum runup heights and the best fitting curve by polynomial regression analysis

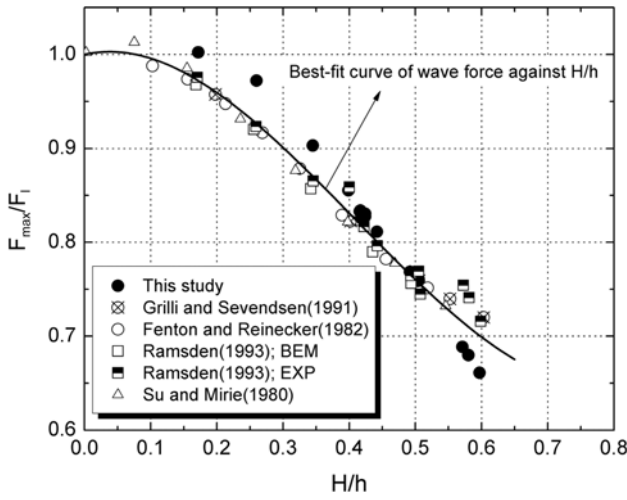


Fig. 5 Nondimensional maximum wave forces and the best fitting curve by polynomial regression analysis

수 있다. 이와 같은 최대치오름높이에 대한 실험 및 이론 데이터를 적용하여 최소사승법으로부터 회귀곡선을 산정하면, 다음과 같은 입사고립파의 무차원파고 H/h 의 3차다항식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{R_{\max}}{h} = 1.736\left(\frac{H}{h}\right) + 2.667\left(\frac{H}{h}\right)^2 - 2.615\left(\frac{H}{h}\right)^3 \quad (6)$$

여기서, 무차원파고의 함수로 제시되는 무차원최대치오름높이에 대한 본 추정식은 상관계수 0.99를 갖는 정확성이 매우 높은 상관관계식으로 판단된다.

Fig. 5는 직립호안상에 작용하는 무차원파고 H/h 에 대한 무차원최대파력 F_{\max}/F_l 의 변화를 나타낸 것으로, 그림에는 Ramsden(1993)의 실험결과, Fourier법에 기초한 Fenton and Reinecker(1982)의 해석해결과, 강비선형 포텐셜이론에

기초한 Grilli and Svendsen(1991) 및 Ramsden(1993)의 수치해석결과, 3차근사이론해인 Su and Mirie(1980)의 해석결과 및 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 본 수치해석결과를 동시에 나타내고 있다. 최대파력의 무차원파라미터인 단위폭당의 정수력 F_l 은 다음과 같이 정의된다.

$$F_l = \frac{1}{2}\rho g(2H+h)^2 \quad (7)$$

결과를 살펴보면, 무차원파고가 0인 경우에는 무차원파력은 거의 1의 값을 나타내고, 무차원파고가 증가할수록 무차원파력이 감소하는 결과를 나타낸다. 특히, $H/h > 0.1$ 의 영역에서는 무차원파력이 1보다 작은 값으로 나타나고, 전파력이 식(6)에서 정의되는 정수압보다 작아지는 결과로 주어진다. 이러한 원인은, 전술한 바와 같이, (-)가속도의 영향 때문이다. 무차원파고 H/h 의 변화에 따른 각 결과치의 변화경향은 매우 잘 상응하는 것을 알 수 있고, 각 결과치의 사이에 주어지는 차이도 매우 작다는 것을 알 수 있다. 이상의 무차원최대파력에 대한 실험 및 이론데이터를 적용하여 최소사승법으로부터 회귀곡선을 산정하면, 다음과 같은 입사고립파의 무차원파고 H/h 의 3차다항식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{F_{\max}}{F_l} = 1 + 0.156\left(\frac{H}{h}\right) - 2.144\left(\frac{H}{h}\right)^2 + 1.747\left(\frac{H}{h}\right)^3 \quad (8)$$

식(8)은 무차원파고가 $H/h \rightarrow 0$ 로 되는 경우에는 치오름높이가 존재하지 않기 때문에 동압이 0으로 되어 $F_{\max} \rightarrow F_l$, $F_{\max}/F_l \rightarrow 1$ 로 주어지는 물리적인 현상을 포함하고 있으며, 본 추정식은 상관계수 0.99를 갖는 정확성이 매우 높은 상관관계식으로 판단된다.

Fig. 6은 이상에서 언급한 고립파의 변형과정에 대한 이해를 돕기 위하여 $h=17.860$ cm, $H=10.198$ cm의 경우에 $x=0$ cm에 위치하는 직립호안상에서 시간변화에 따른 고립파의 처

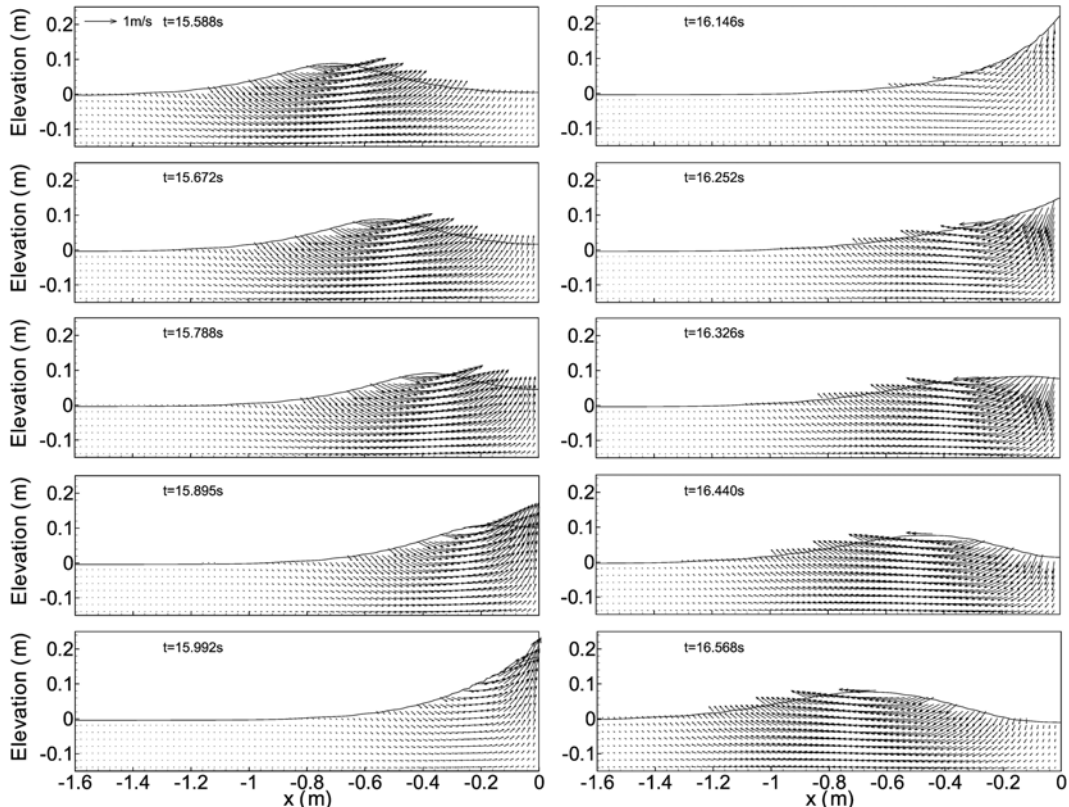


Fig. 6 Solitary wave runup and rundown on the vertical revetment ($h=17.860$ cm, $H=10.198$ cm)

오름·치내림과정을 나타낸 수치결과의 일레이다. 그림 중에는 유속벡터도 동시에 나타나고 있다. 고립파가 직립호안에 접근함에 따라 호안상에서 수면이 점점 상승하고, 동시에 연직방향의 유속도 상방으로 발달하는 것을 알 수 있다. 최대치오름높이를 나타낸 후의 치내림과정에는 치오름과정과는 반대로 수면이 하강함에 따라 연직방향의 유속도 하방으로 발달하면서 고립파는 반사파로 해측으로 전달되는 것을 잘 알 수 있다.

3.2 육상에서 지진해일의 거동과 작용파력

3.2.1 계산조건

본 연구에서 대상으로 하는 육상구조물은, 다음의 Fig. 7에 나타내는 바와 같이, 직립호안상에서부터 구성되는 평탄한 육상부상에 존재하고, 호안천단에서 거리 d 만큼 떨어져 있으며, 지반고는 수평해저면에서 높이 h_d 로 주어진다. 호안의 전면에는 해상부는 일정수심 h 의 수평상으로 이루어져 있고, 파고 H 의 지진해일(고립파)가 수치적으로 조파되어 해안으로 입사하는 경우를 상정한다. 이 때, 수치계산에서 육상부의 구조물(예로, 가옥)은 율파가 발생되지 않는 불투과성의 직립벽체로 가정된다. 실제의 수치계산에서는 $l_h=5$ m, $l_d=2$ m, $h=20$ cm로 일정하게 유지하고, 이에 대해 $H=10, 12$ cm로, 그리고 각 H 에 대해 $d=0.5, 1.0, 1.5$ m로 각각 변화시킨다. 한편, 본 연구의 CADMAS-SURF는 바닥마찰의 영향까지 고려하고 있지 않으므로, 바닥경계면에서는 slip조건을 적용한다.

3.2.2 해석결과

1) 육상구조물이 없는 경우

Fig. 8, 9 및 10은 Fig. 7에 제시된 수치파동수로내에서 육상구조물이 거치되는 지점에서 구조물이 없는 경우에 조

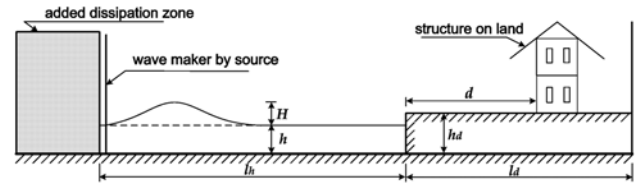


Fig. 7 Layout of an onshore structure, and definition sketch of a numerical wave tank for the generation of solitary wave

파개시를 기점으로 시간의 경과에 따른 수위 η 및 평균유속 u 의 변동을 나타낸 결과로, 여기서 평균유속에서 (-)의 성분(해측방향)은 생략되어 있다. Fig. 8이 $h=20$ cm, $h_d=20$ cm; Fig. 9가 $h=20$ cm, $h_d=25$ cm; Fig. 10이 $h=20$ cm, $h_d=30$ cm의 경우이고, 각 그림에서 (a)는 $H=10$ cm; (b)는 $H=12$ cm의 경우이며, 위에서 아래의 순으로 각각 $d=0.5, 1.0, 1.5$ m의 경우에 해당한다. 각 그림의 수위변동에서 시간이 경과된 후에 평균유속의 값은 0을 나타내지만, 일정한 값의 수위가 유지되는 현상은 육상으로 유입된 유체에서 공간적인 압력변화가 소실되어 유체가 흐르지 않고 정체되어 있는 경우를 나타낸다.

전체적인 경향으로서 해수면보다 육상의 지반고가 높을수록 육상으로 유입되는 범람수의 수위가 낮아지고, 평균유속도 작아지는 것을 알 수 있으며, 동일한 지반고의 경우에 입사하는 고립파의 파고가 커질수록 수위와 평균유속이 약간 커지는 것을 알 수 있다. 여기서, 파고의 차이에 따른 수위 및 평균유속의 형상에서 차이는 육상에서 전파거리가 짧은 경우는 거의 유사한 시간과형을 나타내지만, 전파거리가 긴 경우에는 지진해일에서 분열과 지반과의 상호간섭 등으로 유체분리가 발생하여 다소간의 차이를 나타낸다. 다음

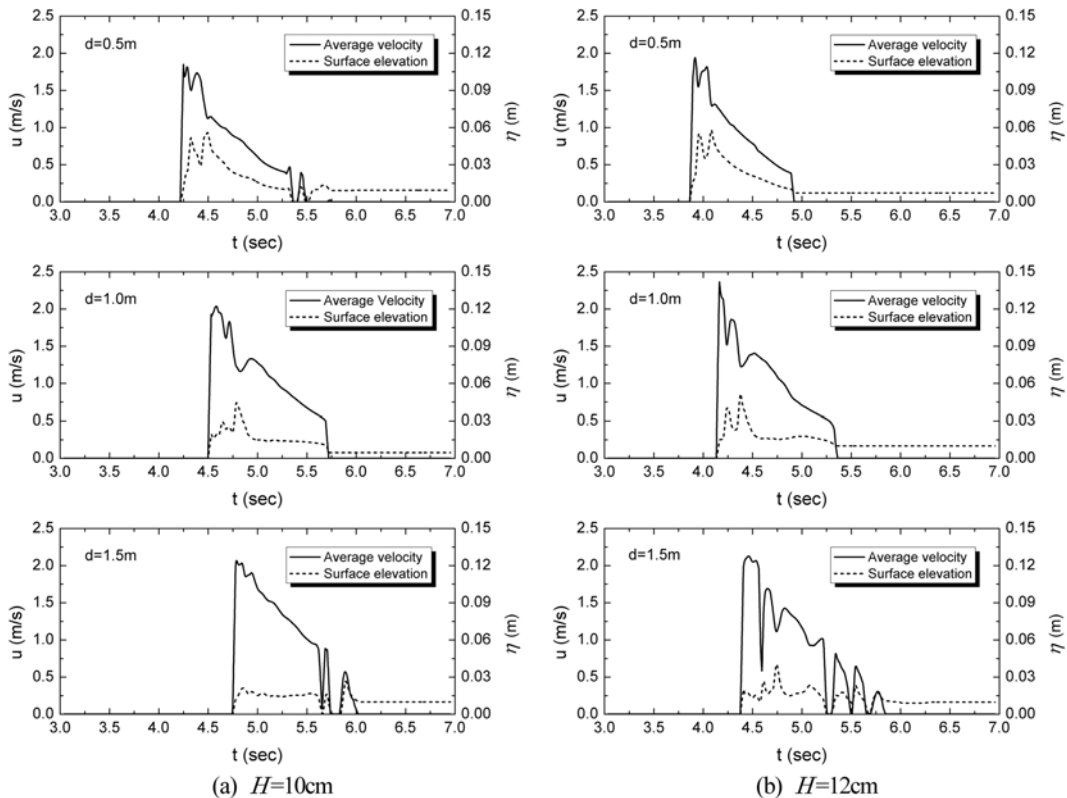


Fig. 8 Time histories of mean velocity and water level at the locations of interest when onshore structure is absent ($h=20$ cm, $h_d=20$ cm)

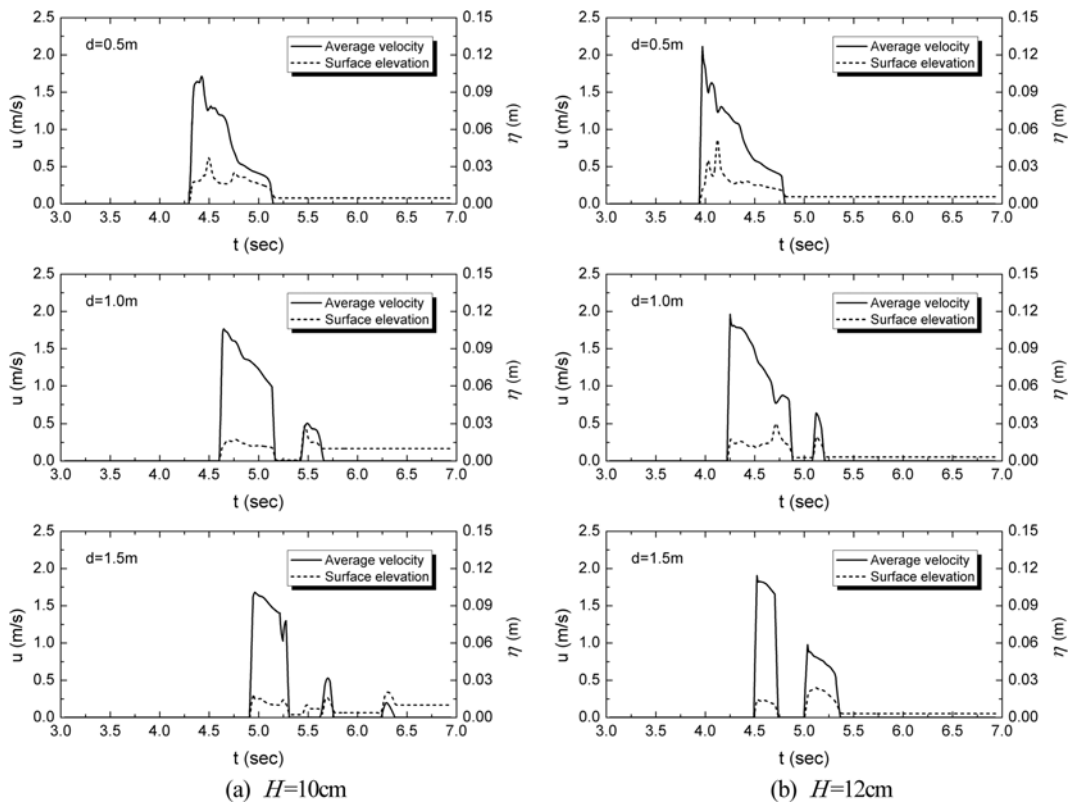


Fig. 9 Time histories of mean velocity and water level at the locations of interest when onshore structure is absent ($h=20$ cm, $h_d=25$ cm)

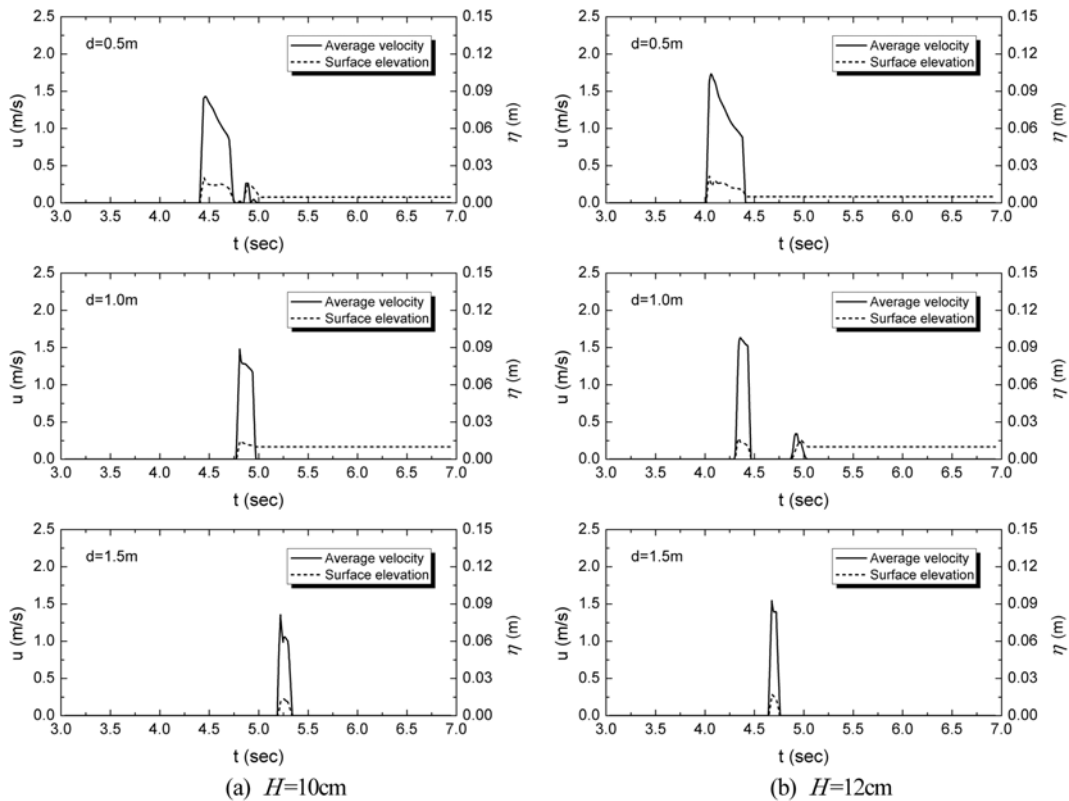


Fig. 10 Time histories of mean velocity and water level at the locations of interest when onshore structure is absent ($h=20$ cm, $h_d=30$ cm)

으로, 육상부에서의 평균유속은 대상지역에 유체가 유입되는 순간에 순간적으로 급상승하면서 최대치를 나타내고, 시간의 경과에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 반면에, 수위의 경우에는 시간이 약간 경과한 후에 최대수위를 나타내고, soliton분열현상을 볼 수 있으며, 특히 평균유속이 극

소치 및 극대치를 나타내는 시간에 수위의 극대치 및 극소치가 나타나는 상반현상을 나타낸다. 그리고, 지반고가 높고 육상부에서 전파거리가 길어지는 경우에는 soliton분열, 유체분리로 인하여 불연속적인 수위 및 유속변동을 나타낸다.

다음의 Fig. 11은 이상의 Fig. 8, 9 및 10에 나타낸 본

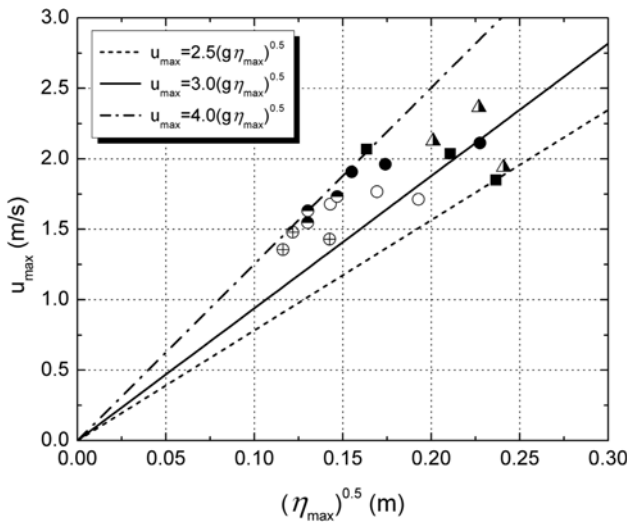


Fig. 11 Relations between u_{max} and $(\eta_{max})^{0.5}$ based on present numerical analysis

수치해석의 데이터를 적용하여 Asakura *et al.*(2000)가 육상 구조물에 작용하는 지진해일의 파력의 실험해석에서 적용하고 있는 $u_{max} = \alpha \sqrt{\eta_{max}}$ (여기서, u_{max} 는 평균유속 u 의 최대치를, η_{max} 는 η 의 최대치를 각각 나타낸다)의 관계를 나타낸 것이다. 본 결과에 의하면, $\alpha=2.5\sim 4.0$ 의 값을 나타내는 것을 알 수 있고, 데이터가 $\alpha=4.0$ 에 상대적으로 치우쳐 있으므로 이에 따른 가중치를 고려한다면, Asakura *et al.*(2000)에 의해 제시된 $\alpha=3.0$ 보다는 약간 큰 값을 나타낼 것으로 판단된다. 한편, Asakura *et al.*(2000)의 실험결과에서는 $\alpha=0.8\sim 3.5$ 로 값의 분산이 매우 크고, 또한 u_{max} 와 η_{max} 는 동일한 시간위상에서 나타나는 물리량이 아니기 때문에 두 물리량을 관계시키는 것은 논리적인 근거가 부족한 것으로 지적

되어 있다(Yeh 2007).

2) 육상구조물이 있는 경우

Fig. 12, 13 및 14는 전술한 Fig. 8, 9 및 10과 동일한 계산조건하에 육상에 구조물이 거치된 경우에 구조물의 전 면에서 시간의 경과에 따른 수위변동, 즉 처오름과 지진해일 파력의 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서 지진해일파력의 원데이터 및 원데이터에 포함된 스파이크현상(Kleefsman, 2005)을 수치주파수필터(numerical low pass filter)로 필터링(7 Hz의 이상)한 결과를 같이 나타내고 있다.

여기서, 스파이크현상은 실험이나 현장의 결과에서는 나타나지 않는 불연속변화의 현상으로, VOF법에 의한 자유수면의 추적과정에서 주변이 유체셀로 완전히 둘러싸인 기체셀에 약간의 유체가 유입하는 경우에 기체셀은 다음의 시간스텝에서 표면셀로 되지 않고 유체셀로 급격하게 변화되고, 그리고 셀 내에서 연속조건이 만족되어야 하므로 스파이크가 발생하게 된다(Kleefsman *et al.*, 2005). 이러한 스파이크현상은 CADMAS-SURF의 사용자설명서에도 이에 대한 문제가 지적되어 있고(CDIT, 2001), 2차원의 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)코드를 3차원으로 확장하여 지진해일에 의한 파력을 계산하고 있는 Arikawa *et al.*(2005)의 결과(단면2차원적인 구조물에 대해 구조물의 길이방향으로 격자구성을 도입한 해석법으로, 실제적인 3차원적인 현상을 다루고 있지 않기 때문에 2차원해석에 가깝다)에서도 이러한 스파이크현상을 보이고 있으며, 본 결과에서는 구조물의 지반고 h_d 가 낮을수록 스파이크현상이 보다 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 결과에 따르면, 수위변동은 육상구조물이 설치되지 않은 경우보다는 구조물에 의한 반사파와 입사파의 중첩에 의하여 보다 큰 수위변동을 나타내며, 또한 고립파의 입사파고 H 가 크고, 구

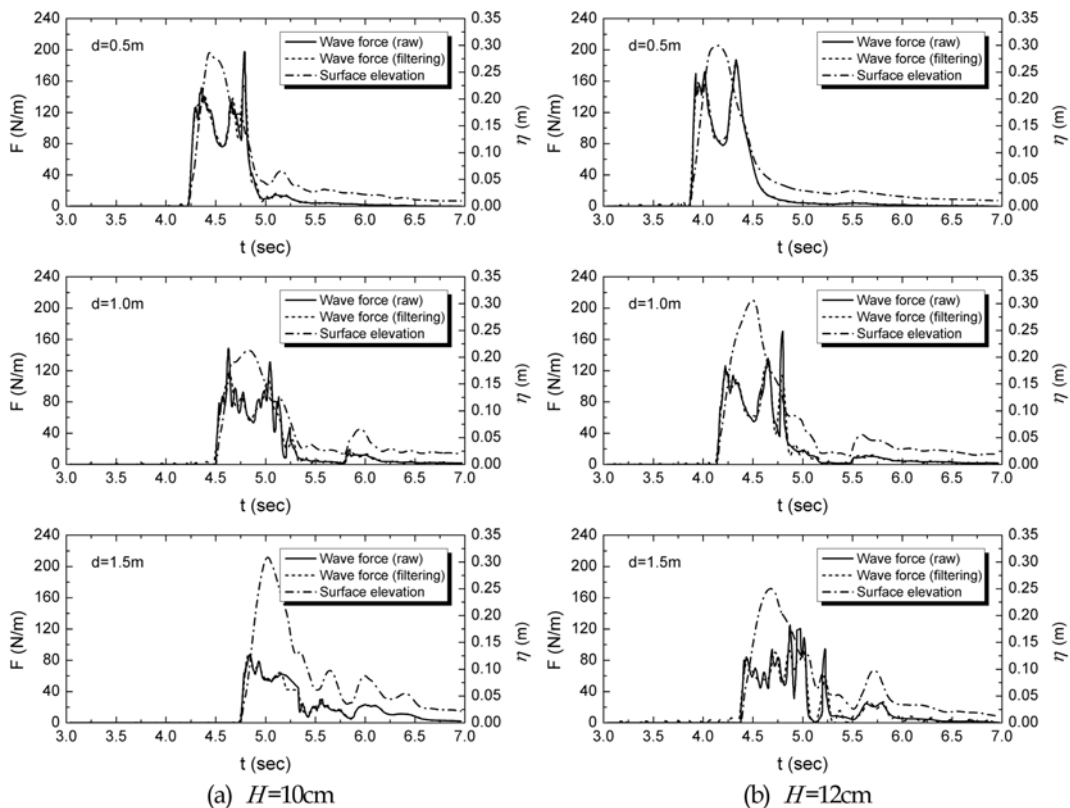


Fig. 12 Time histories of runup and tsunami wave force on onshore structure ($h=20$ cm, $h_d=20$ cm)

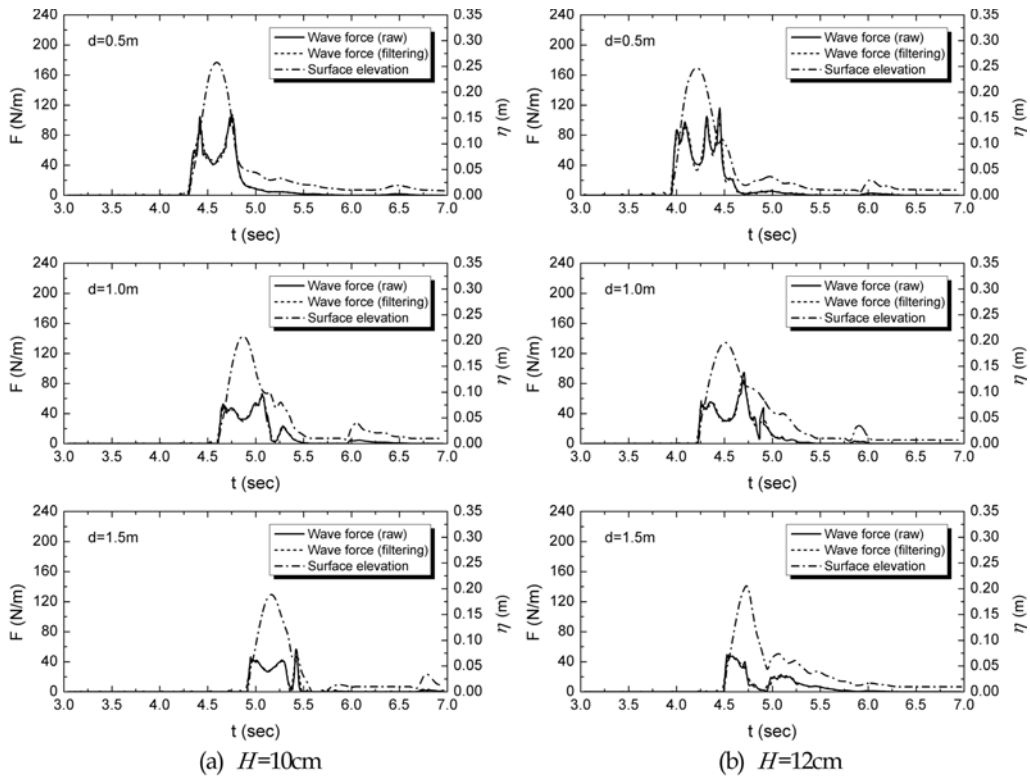


Fig. 13 Time histories of runup and tsunami wave force on onshore structure ($h=20$ cm, $h_d=25$ cm)

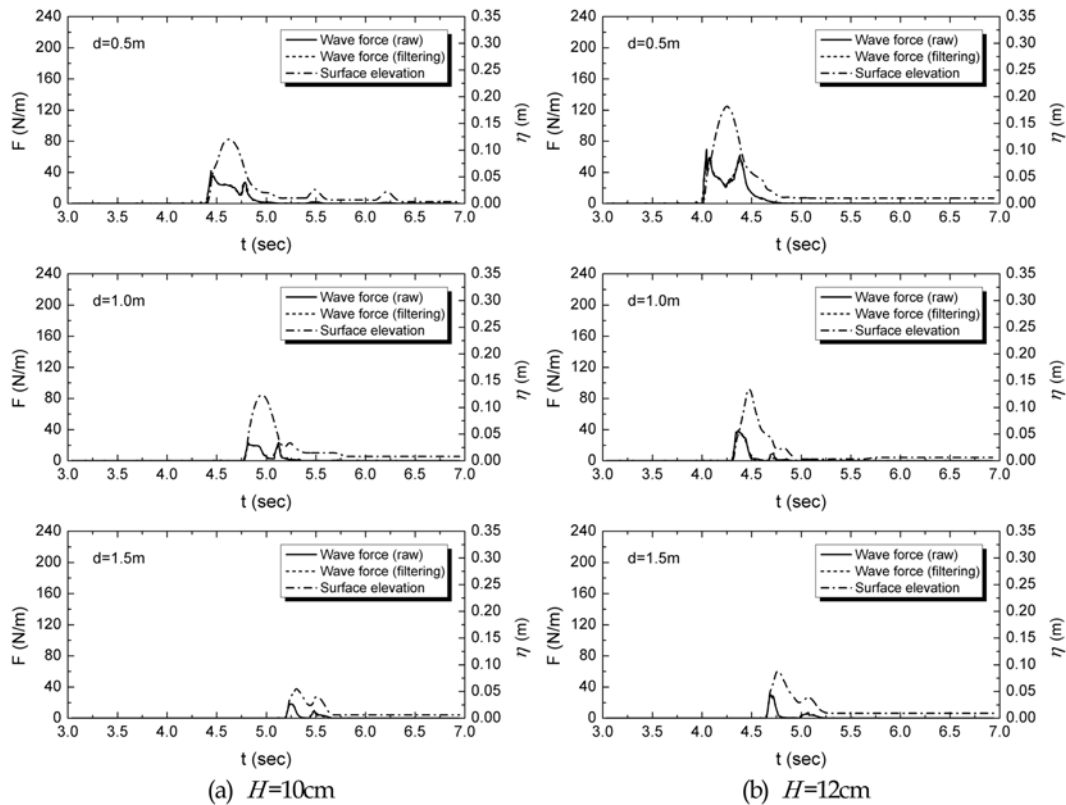


Fig. 14 Time histories of runup and tsunami wave force on onshore structure ($h=20$ cm, $h_d=30$ cm)

조물의 지반고 h_d 가 낮은 경우가 큰 처오름을 나타내는 것이 일반적인 현상이라는 것을 알 수 있다.

지진해일파력의 시간분포는, 전술한 §3.1에서 나타난 바와 같이, 기본적으로 쌍봉형(雙峰形)을 나타내며, 경우에 따라서 수위변동의 변곡점에서 연직가속도의 변화가 급격하게 발생하므로 이에 따른 압력의 변화로 지진해일파력에 분열이 부가된 형태로 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 최대처오름

높이에서 최대지진해일파력이 나타나지 않고 최대처오름높이가 발생하는 시간의 전후에서 최대지진해일파력이 발생하는 것은, §3.1에서도 언급한 바와 같이, 최대처오름높이에서 연직방향으로 (-)최대가속도가 발생하고, 이의 영향으로 압력이 감소되기 때문이다(Ramsden, 1993). 주어진 지진해일파력의 전반적인 경향으로, 고립과의 입사파고 H 가 보다 크고, 호안에서 구조물까지의 수평거리 d 가 보다 짧은 경우

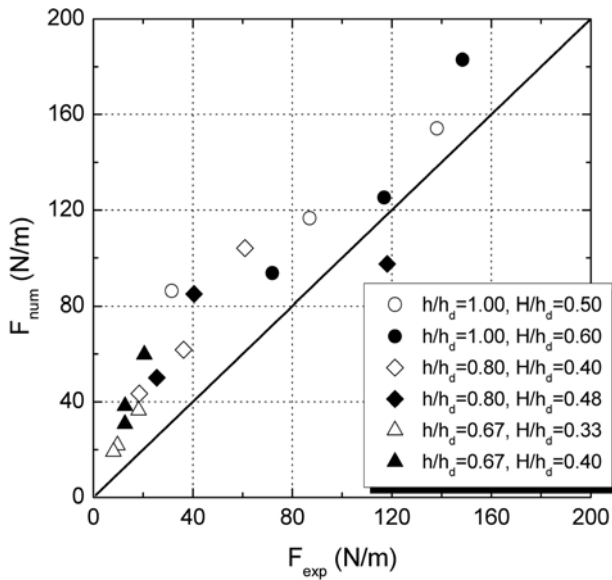


Fig. 15 Comparison of tsunami wave force among Asakura *et al.* (2000), CCH(2000) and present numerical study

에 보다 큰 최대지진해일파력을 나타내지만, d 가 길어지는 경우에는 전술한 수면변동에서 나타나는 빈번한 변곡점으로 연직가속도의 변화에 따른 압력변동으로 분열이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 육상구조물이 설치되지 않은 경우 육상구조물의 설치지점에서 추정된 본 해석결과의 η_{\max} 를 설계제한식인 구조물에 작용하는 지진해일파력의 최대치 $F_{\text{exp}}=4.5\rho g\eta_{\max}^2$ (CCH, 2000; Asakura *et al.*, 2000)에 적용하여 얻어진 결과를 육상구조물에 작용하는 파압의 적분치로부터 산정된 본 수치해석의 최대파력 F_{num} 와 비교한 것이다. 각 경우에 대한 산정치를 Table 2에 제시한다.

Table 2. Comparison of tsunami wave force between F_{exp} and F_{num}

h/h_d	H/h_d	$\eta_{\max}(\text{m})$	$F_{\text{exp}}=4.5\rho g\eta_{\max}^2$ (N/m)	F_{num} (N/m)
1.0	0.50	0.0560	138.1203	154.1893
		0.0444	86.9501	116.6589
		0.0267	31.4677	86.1929
	0.60	0.0580	148.4248	182.9263
		0.0515	116.8951	125.2434
		0.0404	71.9695	93.6130
0.80	0.40	0.0372	60.9359	104.0782
		0.0287	36.2199	61.7691
		0.0204	18.4345	43.4755
	0.48	0.0518	118.1304	97.4617
		0.0303	40.4314	84.8580
		0.0241	25.5147	50.0872
0.67	0.33	0.0203	18.1715	36.3881
		0.0148	9.6629	21.8698
		0.0135	8.0447	19.0896
	0.40	0.0216	20.4811	59.8120
		0.0170	12.7154	38.2631
		0.0169	12.6500	30.7628

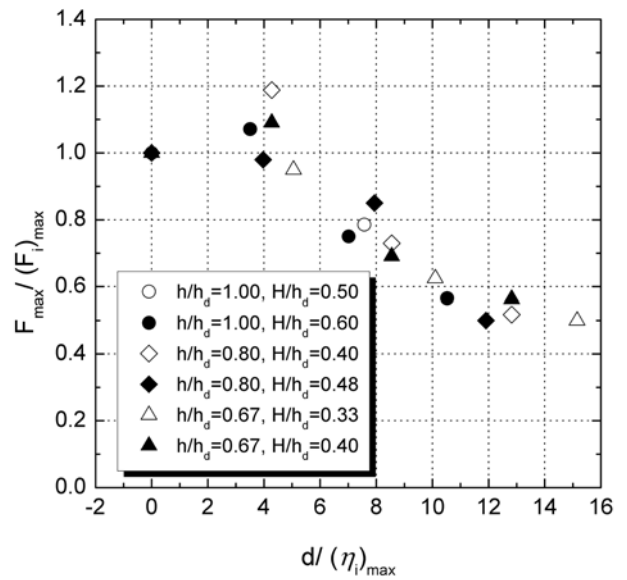


Fig. 16 Variation of maximum tsunami wave force with change of distance between revetment and onshore structure

그림을 살펴보면, 전반적으로 수치해석결과가 제안식의 결과를 다소 과대평가 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 다음의 원인으로 설명될 수 있다. 즉, 일반적으로 지진해일파는, Fig. 8, 9 및 10에서도 알 수 있는 바와 같이, 대단히 비정상흐름이나 CCH(2000)의 경우는 제안식에서 기본적으로 $u=2\sqrt{g\eta}$ 의 관계식을 적용한 정상상태의 흐름에 기초하고 있고, 그리고 Asakura *et al.*(2000)은 Fig. 11에서 나타낸 바와 같이 $u_{\max}=3.0\sqrt{g\eta_{\max}}$ 의 관계에 기초하여 CCH(2000)와 동일한 형태의 식을 제안하고 있다. 그러나, Asakura *et al.*(2000)의 관계인 $u_{\max}=3.0\sqrt{g\eta_{\max}}$ 는, Fig. 8, 9 및 10에서도 살펴본 바와 같이, u_{\max} 와 η_{\max} 가 동일한 시간위상에서 나타나는 물리량이 아니기 때문에 두 물리량을 관계시키는 것은 논리적으로 근거가 부족한 것을 원인으로 들 수 있다 (Yeh 2007). 다음으로, Asakura *et al.*(2000)의 실험결과에 의하면, soliton분열이 발생하는 경우에는 전술한 제안식에 의한 결과보다는 대략 20% 정도 파력이 증가하는 것으로 제시되어 있다. 따라서, soliton분열에 의한 파력성분이 제안식에는 충분히 고려되어 있지 않은 것도 하나의 원인으로 판단된다. 하여튼, 지진해일의 작용하에 있는 육상구조물에 작용하는 지진해일파력에 대해서는 보다 넓은 범위의 수리실험과 수치해석(바닥마찰과 난류의 영향이 고려될 필요가 있음) 및 현장결과에 기초한 면밀한 비교·검토가 요구된다.

Fig. 16은 육상구조물에 작용하는 무차원최대지진해일파력을, h/h_d , H/h_d 를 매개변수로 하여, 호안천단상에서 구조물의 전면까지의 무차원거리 $d/\eta_{i\max}$ 의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 $F_{i\max}$ 는 육상구조물이 직립호안의 천단상에 놓였을 때, 즉 Fig. 7에서 $d=0$ 의 경우에 육상구조물에 작용하는 최대지진해일파력을 나타내고, F_{\max} 는 d 의 지점에 육상구조물이 놓였을 때에 구조물에 작용하는 최대지진해일파력을 나타낸다. 그리고, $\eta_{i\max}$ 는 육상구조물이 설치되지 않은 경우에 있어 $d=0$ cm에서 측정된 육상측의 최대수심을 나타낸다. 그림에 주어진 데이터로부터 $d/\eta_{i\max} \approx 4.0$ 에서 무차원파력이 증가하는 경향을, $d/\eta_{i\max} > 4.0$ 의 구간에서는 무차원파력이

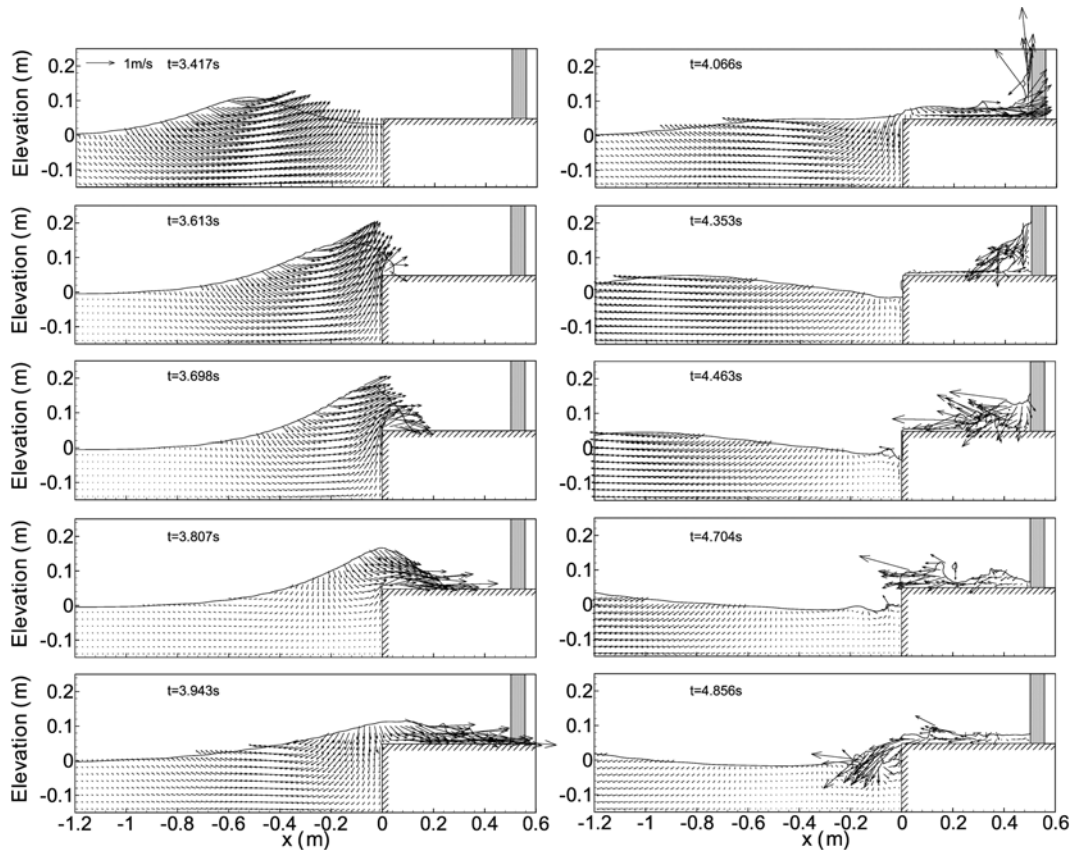


Fig. 17 Solitary wave runup and interaction with onshore structure ($h=20$ cm, $h_d=25$ cm, $H=12$ cm, $d=0.5$ m)

감소하는 경향을 각각 나타내지만, 파라미터 h/h_d 및 H/h_d 의 변화가 무치원최대지진해일파력에 미치는 영향은 명확하게 주어지지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 지진해일의 내습이 예상되는 연안역에 있어서 해안가에 근접하여 가옥과 같은 육상구조물을 건축하는 경우는 호안상에 비해 오히려 더 큰 지진해일파력이 구조물에 작용할 수 있기 때문에 보다 위험하다는 것을 알 수 있고, 또한 호안의 특정거리에서 발생하는 최대지진해일파력은 이격거리의 증가에 따라 급격히 감소하는 결과를 보인다. 따라서, 연안 부근의 건축물은 해안으로부터의 적절한 이격거리를 고려하여 축조되어야 하며, 이는 구조물의 내파성 및 주변지형 등을 포함하여 판단되어야 할 것이다.

Fig. 17은 이상에서 검토된 여러 케이스의 수치해석 중에 $h=20$ cm, $h_d=25$ cm, $H=12$ cm, $d=0.5$ m의 경우에 육상부로의 고립파의 처오름과 구조물의 전면에서 처오름 및 처내림 과정을 시·공간적으로 나타낸 일례로, 그림 중에는 유속벡터의 변화과정도 동시에 주어져 있다. 이러한 그림으로부터 고립파의 호안으로 처오름과 육상부로의 소상 및 구조물과의 간섭현상을 시각적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 그림으로부터, 고립파가 호안에 접근함에 따라 반사파와의 중첩으로 수위상승이 나타나고, 육상부를 소상하여 구조물전면에서 큰 처오름을 발생시키며, 이어 처내림과정에서 분류와 같은 형태로 해상부로 복귀하는 강한 흐름을 볼 수 있다.

4. 결 론

직립호안의 전면에서 지진해일(고립파)의 처오름과 작용파력 및 지진해일의 범람시에 가옥과 같은 육상구조물의 전면

에서 처오름 및 작용파력을 수치적인 방법으로 추정하기 위하여 Navier-Stokes 방정식을 기초방정식으로 하여 자유수면 추적에 VOF함수의 이류방정식을 적용하는 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)를 채용하였다. 본 연구에서는 주기파랑과 구조물과의 상호간섭현상의 규명을 주목적으로 개발된 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 Fenton(1972)의 3차근사고립파이론에 의한 수치조파를 포함하는 수치파동수로를 구성하였다. 이로부터 다음과 같은 중요한 사항을 알 수 있었다.

1. 수치조파된 고립파의 전파, 직립호안의 전면에서 처오름 및 작용파력에 대한 기존의 실험해석결과, 해석해결과 및 수치해석결과와의 비교·검토로부터 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 기초한 본 수치파동수로의 구성에 대한 타당성을 검증할 수 있었다.
2. 지진해일로 잘 근사되는 고립파가 내습한 경우에 직립호안의 전면에서 최대처오름높이와 최대파력을 고정도로 추정할 수 있는 식 (6)과 식 (8)을 제안하였다.
3. 지진해일파력의 성분에는 실현상이 아닌 스파이크현상이 많이 포함되어 나타나고, 따라서 7 Hz 이상의 고주파성분을 수치필터링한 지진해일파력의 데이터에 기초하면, 최대 지진해일파력은 CCH(2000) 및 Asakura *et al.*(2000)에 의한 제안식보다 다소 큰 값을 나타내었다.
4. 호안에서부터 특정거리내에서는 호안 바로 위에 설치된 육상구조물의 경우보다 보다 큰 파력이 작용되고, 특정거리보다 이격되는 경우에는 작용파력이 현저히 감소되는 것을 알 수 있었다.
5. 지진해일로 인해 범람이 발생할 때 육상에서 바닥마찰의 영향은 최대처오름높이와 최대범람구역을 예상하는데 있어 가장 중요한 부분 중의 하나이다. 따라서, 향후 보다

정도 높은 검토를 위하여 바닥마찰의 영향까지 고려할 수 있는 수치과동수로의 개발이 요구된다.

참고문헌

- Arikawa, T., Yamada, F., and Akiyama, M. (2005) Study of the applicability of tsunami wave force in a three-dimensional numerical wave flume. *Ann. J. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 52, pp. 46-50.
- ASCE (2006) *Minimum design loads for buildings and other structures*. ASCE/SEI Standard 7-05, ASCE.
- Asakura, R., Iwase, K., Ikeya, T., Takao, M., Kaneto, T., Fujii, N., and Omori, M. (2000) An experimental study on wave force acting on on-shore structures due to overflowing tsunamis. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 47, pp. 911-915.
- Boussinesq, M.J. (1872) Theorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond. *J. of Math. Pure Appl.*, Vol. 17, No. 2, pp. 55-108.
- Byatt-Smith, J.C.B. (1971) An integral equation for unsteady surface waves and a comment on the Boussinesq equation. *J. of Fluid Mech.*, Vol. 49, pp. 625-633.
- CCH (2000) *Department of Planning and Permitting of Honolulu Hawaii*. Chapter 16, Article 11, Hawaii, USA.
- CDIT (2001) *Research and Development of Numerical Wave Channel (CADMAS-SURF)*. CDIT library, No. 12, Japan.
- Cross, R.H. (1967) Tsunami surge forces. *J. of the Waterways and Harbours Division, ASCE*, Vol. 93, No. WW4, pp. 201-231.
- Cumberbatch, E. (1960) The impact of a water wedge on a wall. *J. of Fluid Mech.*, Vol. 7, No. 3, pp. 353-373.
- Dames and Moore (1980) *Design and Construction Standards for Residential Construction in Tsunami-prone Areas in Hawaii*. FEMA, USA.
- FEMA-CCM (2005) *Coastal Construction Manual*. FEMA 55 Report, Edition 3, FEMA, USA.
- Fenton, J. (1972) A ninth-order solution for the solitary wave. *J. of Fluid Mech.*, Vol. 53, No. 2, pp. 257-271.
- Fenton, J.D. and Reinecker, M.M. (1982) A Fourier method for solving nonlinear water-wave problems : Application to solitary-wave interactions. *J. of Fluid Mech.*, Vol. 118, pp. 441-443.
- Fukui, Y., Nakamura, M., Shiraishi, H., and Sasaki, Y. (1963) Hydraulic study on tsunami. *Coastal Engrg. in Japan*, Vol. 6, pp. 67-82.
- Grilli, S. and Svendsen, A. (1991) *The runup and reflection of solitary waves on steep slopes*. Report No. CACR091-03, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, USA.
- Hamzah, M.A., Mase, H., and Takayama, T. (1998) Direct simulation of solitary wave runup and pressure on coastal barrier. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 45, pp. 176-180.
- Hirt, C.W and Nichols, B.D. (1981) Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. of Comput. Phys.*, Vol. 39, pp. 201-225.
- Ikeno, M. and Tanaka, H. (2003) Experimental study on impulse force of drift body and tsunami runing up to land. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 50, pp. 721-725.
- Ikeno, M., Matsuyama, M., and Tanaka, H. (1998) Shoaling soliton fission of tsunami on a shelf and wave pressure for tsunami-resistant design of breakwater by large wave flume-experiments. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 45, pp. 366-370.
- Ikeno, M., Mori, N., and Tanaka, H. (2001) Experimental study on tsunami force and impulsive force by a drifter under breaking bore like tsunamis. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 48, pp. 846-850.
- Kleefsman, K.M.T., Fekken, G., Veldman, A.E.P., Iwanowski, B., and Buchner, B. (2005) A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems. *J. of Comput. Phys.*, Vol. 206, pp. 363-393.
- Matsutomi, H. (1989) Impulsive force due to the collision of a bore with a floating body. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 36, pp. 574-578.
- Matsutomi, H. (1991) An experimental study on pressure and total force due to bore. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 38, pp. 626-630.
- Maiti, S. and Sen, D. (1999) Computation of solitary waves during propagation and runup on a slope. *Ocean Engrg.*, Vol. 26, pp. 1063-1083.
- Matsutomi, H. and Ohmukai, T. (1999) Laboratory experiments on fluid force of tsunami flooded flows. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 46, pp. 336-340.
- Mizutani, S. and Imamura, F. (2000) Hydraulic eperimental study on wave force of a bore acting on a structure. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 47, pp. 946-950.
- Mizutani, S. and Imamura, F. (2002) Design of coastal structure including the impact and overflow on tsunamis. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 49, pp. 731-735.
- Maxworthy, T. (1976) Experiments on the collisions between solitary waves. *J. of Fluid Mech.*, Vol. 76, pp. 177-185.
- Nakamura, T. (2008) *Sand foundation instability due to wave-sea-bed-structure dynamics interaction*. Ph.D. Thesis, Nagoya University, Nagoya, Japan
- Ramsden, J.D. (1993) *Tsunami : Forces on a vertical wall caused by long waves, bores, and surges on a dry bed*. Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, California, USA.
- Ramsden, J.D. (1996) Forces on a vertical wall due to long waves, bores, and dry-bed surges. *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg, ASCE*, Vol. 122, No. 3, pp. 134-141.
- Ramsden, J.D. and Raichlen, F. (1990) Forces on vertical wall caused by incident bores, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg, ASCE*, Vol. 116, No. 5, pp. 592-613.
- Sakakiyama and Kajima (1992) Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwaters. *Proc. of 23th Int. Conf. on Coastal Engrg., ASCE*, pp. 1517-1530.
- Su, C.H. and Mirie, R.M. (1980) On head-on collisions between two solitary waves, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 98, No. 3, pp. 509-525.
- Tanimoto, K., Takayama, T., Murakami, K., Murata, S., tsuruya, H., takahashi, S., Morikawa, M., Yoshimoto, Y., Nakano, S., and Hiraishi, T. (1983) *Field and laboratory investigations of the tsunami caused by 1983 Nihonkai chubu earthquake*. Technical note, PARI, Japan, No. 470, pp. 299.
- Tanimoto, K., Tsuruya, H., and Nakano, S. (1984) Experimental study of tsunami force and investigation of the cause of sea wall damages during 1983 Nihonkai chubu earthquake. *Proc. of 31th Japanese Conf. on Coastal Engrg., JSCE*, pp. 257-261.
- Xiao, H. and Huang, W. (2008) Numerical modeling of wave runup and forces on an idealized beachfront house. *Ocean Engrg.*, Vol. 35, pp. 106-116.
- Yeh, H. (2006) Maximum fluid forces in the tsunami runup zone. *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg, ASCE*, Vol. 132, No. 6, pp. 496-500.
- Yeh, H. (2007) Design tsunami forces for onshore structures. *J. of Disaster Research*, Vol. 2, No. 6, pp. 1-6.
- Yeom, G.S., Mizutani, N., shiraishi, K., Usami, A., Miyajima, S., and Tomita, T. (2007) Study on behavior of drifting containers due to tsunami and collision forces. *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 54, pp. 851-855.

(접수일: 2008.12.1/심사일: 2009.1.19/심사완료일: 2009.2.17)