

CADMAS-SURF에 의한 단파의 수위 및 유속변화에 대한 예측정도의 검토

이광호* · 김창훈* · 황용태** · 김도삼***
*일본나고야대학대학원 공학연구과 사회기반공학전공
**한국해양대학교 대학원 토목환경공학과
***한국해양대학교 토목환경공학부

Applicability of CADMAS-SURF Code for the Variation of Water Level and Velocity due to Bores

KWANG-HO LEE*, CHANG-HOON KIM*, YONG-TAE Hwang** AND DO-SAM KIM***

*Department of Civil Engineering, Nagoya University, Nagoya, Japan

**Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School, Korea Maritime University, Busan, Korea

***Division of Construction and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Bore 단파, CADMAS-SURF 코드메시프, Bore strength 단파강도, Laboratory experiments 수리모형실험, Propagation speed 전파속도, Water level 수위, Velocity 유속

ABSTRACT: This study investigates the applicability of CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of a MArtime Structure) code based on the Navier-Stokes solver to predict bore phenomena. The time variation of wave levels and velocities due to the bore propagation were computed for the different bore strength conditions. In order to verify the numerical results by CADMAS-SURF, laboratory experiments were also performed, using the DPIV and LDV measuring system. The numerical results were compared to the experimental data and the analytical predictions by the NSC method based on fully nonlinear shallow-water theory by the method of characteristics. It appears that the CADMAS-SURF slightly overestimated the water-surface level measured by the laboratory experiments and its discrepancy becomes prominent as the bore strength increases. The predicted propagation speed for a bore was also slower than that by the experiment and NSC method. However, the temporal variations in velocities were in relatively good agreement with the experimental data for all cases, except for overshooting and undershooting in the front face of a bore, which may be derived from the numerical instability. Further, CADMAS-SURF successfully simulated the decrease in the water level and velocity caused by the effects of negative waves reflected from the upstream end wall.

1. 서 론

1983년 5월 26일 북위 40°24', 동경 134°54'의 해상에서 발생한 지진해일로 인하여 동해의 남서연안, 특히 일본의 아키다현의 연안은 많은 인적·물적인 피해를 입은 것으로 보고되어 있다(예로, Tanimoto et al., 1984; Yamamoto et al., 1985). Tanimoto et al.(1984)의 보고에 의하면, 약 100명에 달하는 사망자와 행방불명자의 인명피해와 가옥의 유실 및 선박의 피해가 있었고, 호안 및 방파제 등의 항만구조물의 피해도 여러 곳에서 발생하였다. 특히, 건설 중에 있었던 일본의 노시로항 외항지구 매립지의 케이슨호안에서는 건설공사 관련자의 사망과 부상은 물론, 구조물의 부분적인 파괴와 제체의 활동으로 인하여 막대한 피해를 입었다. 여기서, 1983년의 지진해일에서 중요한 특징으로는 아키다현 북부해안에서 단주기변동을 동반한 주기 10~20분 정도의 단파성지진해일(Tsunami bore)이 관측되었다는 점이다. 그리고, 이 지진해일은 우리나라의 동해연안에도 전파

되어 임원 등지에서 사망자 2명을 비롯한 다수의 부상자가 발생하였고, 선박 등이 피해를 입었으며, 임원항의 일부 배후에서는 범람에 의한 가옥의 피해가 다수 발생하였다. 최근, 임원항 부근에서 이러한 지진해일에 의해 대략 5m에 가까운 최대치오름높이(중복지진해일고로 추정)가 발생하였다는 것이 사후조사(국립방재연구소, 1998) 및 수치모의의 결과로 보고되어 있다(김도삼 등, 2007(a), 2007(b); Choi et al., 2008; Lim et al., 2008).

여기서, 전술한 단파성의 지진해일은 지진해일의 선단부에서 그의 전면이 거의 연직면을 이루어 전파되는 특성을 지니고, 지진해일과 함께 전파되기 때문에 매우 빠른 전파속도를 갖는다. 특히, 쇄파성단파는 해안 및 항만구조물과 육상의 가옥 등에 충격파력을 포함한 강력한 파력을 발생시키며(Matsutomi, 1991; Ramsden, 1983, 1996; Ikeno et al., 1998; Mitsutani and Imamura, 2000; Abdolmaleki et al., 2004; Yeh, 2007) 바닥부근에서는 강한 전단력을 발생시켜 구조물 주위의 급격한 세굴(Noguchi et al., 1997; Tonkin et al., 2003)을 유발한다. 또한, 단파가 연안주변의 표류물을 동반하여 전파되는 경우에는 표류물에 의한 충돌력(Matsutomi and Ohmukai, 1999; Ikeno et al.,

교신저자 김도삼: 부산광역시 영도구 동삼동 1
051-410-4463 kimds@hhu.ac.kr

2001; Ikeno and Tanaka, 2003)을 부가적으로 발생시켜 구조물을 파괴시키는 주된 인자로 알려져 있다. 이와 같이, 단파와 구조물과의 상호작용에서 가장 중요한 요소는 단파의 전파속도와 흐름속도이며, 이로부터 작용파력(단파에 의한 충격력과 흐름에 의한 항력)의 크기와 표류물에 의한 충돌력이 거의 결정된다고 할 수 있다.

단파의 형성과 전파에 관한 연구는 댐파괴류의 해석에서 그 역사가 매우 길다. Ritter(1892)는 최초로 댐파괴류에 있어서 단파의 기본적인 동수역학적인 특성에 관한 연구를 수행하였다. 그 이후로 많은 연구자(Whitham, 1955)들에 의해 다양한 수리학적 조건과 수로형상에 대한 해석해가 제시되었고, 이들은 여러 수치해석법의 검증수단(Benchmark)으로 널리 활용되어 오고 있다. 현재까지 단파의 전파에 따른 수리학적 현상규명에 적용되는 일반적인 수치해석법은 천수방정식에 기초한 유한차분법이 주로 이용되고 있지만, 최근에는 단파의 형성과 전파 및 전파에 따른 충격파의 포착에 대한 정확성, 수치확산의 발생 정도 및 수치해의 민감도 등에 따라 다양한 수치해석기법이 개발·제안되어 있다(Madsen et al., 2005). 한편, 기존의 많은 이론적 및 실험적인 연구로부터 단파의 형성 및 전파에 있어서 비정상압, 비선형성, 점성 및 난류의 영향이 중요한 것으로 알려져 있고, 특히 보다 정확한 해석을 위해서는 이러한 요소들이 고려된 고정도의 수치해석법이 요구되고 있다(Hirt and Nichols, 1981; Strelkoff, 1986).

최근, 컴퓨터 성능의 발달과 고정도의 수치해석기법의 개발로 해안 및 항만공학 분야에 있어서도 다양한 물리현상을 해석하기 위해 Navier-Stokes 운동방정식에 기초한 다양한 직접수치해석기법이 적극적으로 활용되고 있는 실정이다. 특히, 그 중에서 일본의 연안개발기술센터(CDIT)에서 개발한 CADMAS-SURF(Super roller flume for computer aided design of maritime structure) 코드는 일본 및 국내에서 해안 및 항만구조물의 설계에 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 단파의 형성과 전파에 따른 수위 변동 및 유속변화 등과 같은 수리학적 제반특성의 규명에 CADMAS-SURF코드(CDIT, 2001)를 적용하여 단파특성의 해석에 대한 그의 적용성과 유용성을 검토한다. CADMAS-SURF코드는 Navier-Stokes 운동방정식에 기초하고 있으며, 쇄파를 포함한 파랑변형 및 쇄파후 파랑의 분열과 재생성과정까지도 고정도로 해석이 가능한 자유수면추적의 대표적인 기법인 VOF(Volume of fluid)법이 적용되어 있다(Hirt and Nichols, 1981; Iwata et al., 1995, 1996; Kawasaki and Iwata, 1996). 따라서, 이를 활용한 수치해석에는 전술한 비선형, 비정상압 및 점성의 영향이 동시에 고려될 수 있다. 본 연구에서는 CADMAS-SURF코드를 적용함에 있어서 단파의 발생과 전파라는 본 연구의 목적에 일치하도록 CADMAS-SURF의 소스코드를 일부 수정하였다.

이상의 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의하여 예측된 결과의 타당성 및 해석정도를 면밀히 조사하기 위하여 정밀한 수리모형 실험을 실시하였다. 실험에서는 사각형상을 갖는 수평상의 수로에서 연직격벽에 의해 분리된 고·저수위를 갖는 두 유체 사이의 격벽을 순간적으로 제거함으로써 형성되는 단파를 대상으로 하였다. 단파의 형성과 전파에 따른 수위변동 및 유속변화

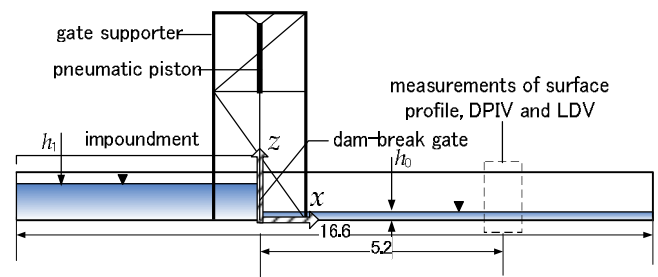


Fig. 1 Schematics of the experimental apparatus

를 정밀하게 계측하기 위하여, 실험수조의 외측에 설치하여 흐름장에 교란을 발생시키지 않을 뿐만 아니라 고정도로 측정이 가능한 DPIV(Digital particle image velocimeter) 및 LDV(Laser doppler velocimeter)를 사용하였다. 수리모형실험으로부터 얻어진 데이터와 수치해석결과를 비교하여 본 연구의 단파해석에 대한 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 적용성 및 유용성을 검증함과 동시에, 단파의 전파에 따른 수위 및 유속변화의 특성을 평가하였다.

2. 수리모형실험

2.1 수리모형실험의 개요

단파형성 및 전파에 관한 수리모형실험은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 길이 16.6m, 폭 0.6m 및 높이 0.45m의 조파수조에서 실시하였다. 수조의 바닥은 스테인레스로 구성되어 있고, 이 중에 게이트로부터 5m 떨어진 곳으로부터 1.5m 구간은 투명한 유리 바닥으로 이루어져 있다. 단파는 두께 6.4mm의 스테인레스로 만들어진 격벽(Dam-break gate)을 순간적으로 제거함으로써 발생시킨다. 격벽의 순간적인 제거를 위해서 0.5Mpa의 공기압에 의해 작동되는 압축공기피스톤(Pneumatic piston)을 사용하였다. 압축공기피스톤에 의해 격벽이 수조의 상부면까지 도달하는데 소요되는 시간은 0.2s이고, 저수조의 수위가 2.5cm일 경우에 저수조의 자유수면까지 게이트의 제거에 소요되는 시간은 0.13s이다. 이와 같은 단파발생시스템은 정밀한 실험을 반복적으로 수행할 수 있기 때문에 수리모형실험의 재현성을 확보하기 용이하며, 이와 유사한 단파발생시스템이 Yeh et al.(1989) 및 Ramsden(1993)에 의해 사용되었다.

2.2 수면형의 측정

수면변동의 측정에 레이저형광기법을 적용하였다. 레이저빔을 발생시키기 위하여 4W argon-ion 레이저(Spectra physics, stability 2017)를 사용하였으며, 빔은 Manipulator(Dantec 60X24)를 통하여 정렬되고, 광섬유케이블(Dantec 60X0302)로 보내진다. 빔은 광섬유케이블에 의해 레이저시트를 생산하는 진동 거울(General scanings 6214)로 전송되며, 레이저시트는 수조에서 흐름부분을 조명하는데 사용된다. 거울은 스캐닝진폭, 시트의 위치 및 진동주파수를 조절하는 스캐너드라이버(General scanings AX-200)에 의해 작동되며, 균등강도는 Function

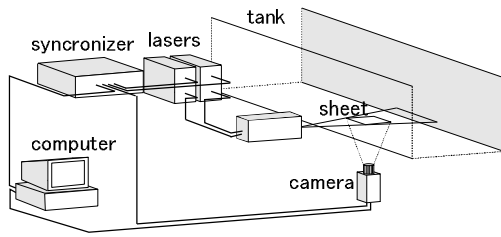


Fig. 2 Schematics of digital particle image velocimeter setup

Table 1 Measuring point by DPIV

h_1 (cm)	12.5	15.5	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	300
1.5	x	x	x	x	x	o	x	o
z (cm)	3.5	o	o	o	o	o	o	o
7.5	x	x	x	x	x	o	x	o

o: measuring, x: not-measuring

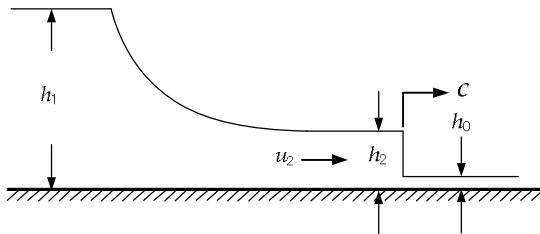


Fig. 3 Definition sketch of the generated bore

generator의 Skewed saw-toothed signal에 의해 얻어진다. 후술하는 DPIV와는 달리, 수조의 상부에서 레이저를 조사하여 2차원 연직평면을 조명한다. 수면과 조명된 레이저시트와의 교차부분이 수면형을 나타낸다. 조명된 수면을 포착하기 위하여 비디오 카메라를 사용하였으며, 비디오테이프로부터 화상을 디지털화하기 위하여 Optimas로 불리는 회상처리소프트웨어를 사용하였다. 또한, Optimas는 수면의 좌표를 추적하고, 추출하는데 사용된다. 이러한 기법은 수중에 장치를 설치하지 않으므로, 비교란상태에서 수면형에 대한 시·공간변동을 정밀하게 측정할 수 있다.

2.3 유속의 측정

2.3.1 DPIV에 의한 유속측정

단파의 전파에 따른 유체중의 흐름속도는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 2차원 평면에서 유속을 측정할 수 있는 DPIV(TSI Inc)로 측정되었다. Pulsating laser beam을 발생시키기 위하여 Dual-head continuum Nd(Yag laser)를 사용하였다. 시트를 형성하도록 빔을 원통렌즈로 통과시켜, 조명된 3차원수평면에서 흐름속도를 측정하였다. 이 때, 레이저로 조명된 수평면에서 흐름추적자로 투척된 반사입자의 운동을 포착하기 위하여 고해상도의 CCD PIV 카메라를 투명수로바닥 아래에 연직상방으로 촬영되도록 설치하였다. 촬영된 화상정보로부터 유속을 계산하기 위해 연속한 프레임 사이의 유체내의 반사입자 위치의 Cross-correlation으로부터 유속을 산정하는 상용 소프트웨어 패

Table 2 Measuring point by LDV

h_1 (cm)	z (cm)								
	0.8	1.4	1.9	3.0	3.6	4.6	5.6	8.2	8.9
1.25	o	o	o	o	o	o	x	x	x
1.50	o	o	o	o	o	o	x	x	x
1.75	o	o	o	o	o	o	x	x	x
2.00	o	o	o	o	o	o	o	x	x
2.25	x	o	o	x	o	o	o	o	x
2.50	o	o	o	o	o	o	o	o	o
2.75	o	o	x	x	o	o	o	o	o
3.00	o	o	o	o	o	o	o	o	o

o: measuring, x: not-measuring

Table 3 Bore characteristics by NSC method

h_1 (cm)	h_o (cm)	h_2 (cm)	c (m/s)	u_2 (m/s)	$Fr = \frac{u_2}{\sqrt{gh_2}}$
1.00	2	5.08	0.94	0.57	0.81
1.25	2	5.85	1.06	0.70	0.92
1.50	2	6.58	1.18	0.82	1.02
1.75	2	7.27	1.29	0.93	1.10
2.00	2	7.92	1.39	1.04	1.18
2.25	2	8.55	1.49	1.14	1.25
2.50	2	9.15	1.58	1.24	1.31
2.75	2	9.74	1.67	1.33	1.36
3.00	2	10.30	1.76	1.42	1.41

키지(Insight)를 이용하였다. 이 때, Cross-correlation 함수는 FFT(Fast fourier transform)에 의해 계산된다. DPIV의 샘플링시간은 14Hz이며, 흐름장의 공간적인 변화를 측정하기 위하여 동일한 조건하에 DPIV를 반복적으로 사용하였다. Table 1에 DPIV에 의한 유속측정의 위치를 나타내며, 표에서의 h_1 은 Fig. 3에 정의되어 있고, z 는 수로바닥에서 연직상방을 나타낸다.

2.3.2 LDV에 의한 유속측정

LDV(Dantec Electronics Inc.) 시스템은 유체 중에 포함된 미소입자(Particle, fiberflow system)로부터 산란광에 의한 도플러 효과를 이용하여 광학적으로 유체의 유속을 측정하는 장치이다. DPIV에 의한 계측은 흐름장의 공간적인 변화를 포착할 수 있는데 반해, LDV의 시스템은 한 지점에서 흐름의 시간변동만을 측정할 수 있지만 샘플링시간은 DPIV보다 훨씬 짧은 장점이 있다. 본 연구에서 이용한 LDV시스템의 해상도는 1.56mm/s이다. 본 실험에서 사용된 LDV시스템은 광학계(Optics), Fiberflow시스템, Signal processor 및 4W argon-ion Coherent Innova 70 laser로 구성된다. 광학계는 조사된 레이저를 분리하는 Transmitting lens와 유속측정을 위해 유체중에 혼입시킨 미소입자에 의해 산란된 산란광을 모으는 Receiving lens로 구성된다. Receiving lens를 통과한 산란광은 고속 Photodetector에 의

해 전기신호를 변환되고, 이러한 전기신호는 Signal processor에 의해 입력되어 유체속도를 계산할 수 있는 도플러주파수가 계산된다. 본 연구에서는 LDV를 사용하여 투명한 수조바닥의 아래에서 레이저빔을 조사하여 레이저빔에 수직인 2차원수평유속성분을 측정하였다. 따라서, DPIV 및 LDV의 두 종류의 유속계를 사용함으로써 흐름장의 유속을 서로 보완할 수 있고, 또한 흐름 구조를 보다 적절히 파악할 수 있다. Table 2에 LDV에 의한 유속측정의 위치를 나타낸다.

2.4 실험케이스

Fig. 3에 도시한 바와 같이 게이트의 전면에 있는 저수조의 수심 h_0 는 일정하게 $h_0=2\text{cm}$ 로 유지되지만, 배후에 있는 저수조의 수심 h_1 은 $h_1=10\sim 30\text{cm}$ 로 변화된다. 발생된 단파의 파속 c , 유속 u_2 및 수위변화 h_2 에 대한 해석하는 강비선형천수이론에 기초한 특성곡선법(이후로 NSC법으로 칭함)에 의해 얻어진 결과이다(Arnason, 2005). 그것을 Fig. 3에 나타낸 정의를 사용하여 Table 3에 나타내며, 표에서 Fr 은 Froude수를 나타낸다.

3. CADMAS-SURF코드의 개요

3.1 기초방정식

CDIT(2001)에 의해 개발된 CADMAS-SURF는 다양한 해안 및 항만구조물에 대한 수치모의가 가능하도록 해석영역내에 조파기능과 소파기능을 포함한 수치파동수로(Numerical wave channel)로 기초방정식에는 2차원비압축성 점성유체를 대상으로 한 연속방정식과 운동방정식을 Sakakiyama and Kajima(1992)의 Porous model에 기초하여 확장한 식 (1)-(3)의 기초방정식을 채용하고 있다.

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

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

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

여기서, t 는 시간, x, z 는 수평 및 수직좌표, u, v 는 수평 및 연직방향의 유속성분, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν 는 동점성계수, g 는 중력가속도, γ_v 는 체적공극율, γ_x, γ_z 는 수평 및 수직방향의 면적공극율, 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 투과층(Porous media)에서의 저항력이다. 또한, 위의 식에서 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 C_M 을 관성력계수로 하여 식 (4)와 같이 표현된다.

Table 4 Computational condition in CADMAS-SURF

Version	Grid resolution	Difference scheme	Time step	Matrix solver
V4.0	$\Delta x \times \Delta z = 1 \times 1 \text{ cm}$	donor-0.2	Auto	M-ILUBCCSTAB

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

자유수면해석을 위한 모델에는 범용성이 높고 복잡한 자유수면의 형상에 대해서도 해석이 가능한 VOF법을 채용하고 있으며, VOF함수 F 에 대한 이류방정식은 식 (5)로 주어진다.

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

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

3.2 계산조건

본 연구에서는 이상의 CADMAS-SURF를 사용하여 단파해석을 수행하였다. 하지만, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 단파해석에서는 투과층이 고려되고 있지 않고, 수치조파의 필요성이 없으므로 기초방정식에서 체적공극율, 면적공극율, 스폰지층에서의 감쇠계수, 해석영역내의 조파를 위한 소스항 및 투과층내의 저항력을 무시하였다. 또한, 수리모형실험과 같은 초기조건을 유지하기 위해, 격벽사이의 수위차에 의한 정수압이 고려될 수 있도록 CADMAS-SURF의 소스코드를 일부 수정하였다. 계산영역은 수리실험에서 사용된 수조와 동일한 크기를 고려하였으며, 계산영역의 양측면과 바닥에는 불투과경계조건을 적용하였다. 보다 자세한 계산조건을 Table 4에 나타낸다.

4. 수치 및 수리실험결과

4.1 수위변동

Fig. 4(a)~(h)는 게이트 전면인 하류측 저수위의 저수조에서 수심을 $h_0=2\text{cm}$ 로 고정시킨 상태에서 게이트 배후인 상류측 고수위의 저수조수심을 $h_1=12.5\sim 30.0\text{cm}$ 까지 2.5cm 간격으로 각각 변화시킨 경우에 게이트 전면으로부터 하류측으로 5.2m 떨어진 지점에서 게이트의 급개방에 따른 단파수위의 시간변동을 나타낸 결과이다. 그림에서 흰 원은 DPIV로 측정된 실험결과이고, 점선은 NSC법의 결과(Arnason, 2005)를, 실선은 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 결과를 각각 나타낸다. 그림에서의 실험 및 계산결과를 살펴보면, 검토된 모든 케이스에 대해 전체적으로 CADMAS-SURF에 의한 단파전면의 전파속도에 대한 계산치가 실험치나 NSC법에 의한 계산치보다 대략 0.

5~0.6s가 느리다는 것을 알 수 있다. 여기서, 전술한 바와 같이 게이트를 순간적으로 연직으로 개방하는데 소요되는 시간(0.2s 보다 짧음)을 고려하여도 CADMAS-SURF에 의한 단파전면의 전파속도가 실제현상(실험치)보다는 다소 느리게 나타나므로 판단된다.

다음으로, 단파전면의 형상을 보면, CADMAS-SURF(CDIT, 2001) 및 NSC법(Armason, 2005) 모두 거의 연직면을 형성하는

것을 볼 수 있고, 단파전면의 상층우각부에서 수면이 다소 곡면으로 완화되는 수리실험의 결과를 두 해석법은 충분히 재현하지 못하는 것을 알 수 있다. 여기서, 단파전면의 상층우각부 근방에는 단파강도(게이트의 전후면의 수위차)가 강해질수록 큰 교란이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이의 근본적인 이유로는 기체저항력으로 인한 기체와의 상호작용을 들 수 있겠지만, 우각부 근방에서의 기체밀도경사가 상대적으로 커지게 되고, 이에 따라

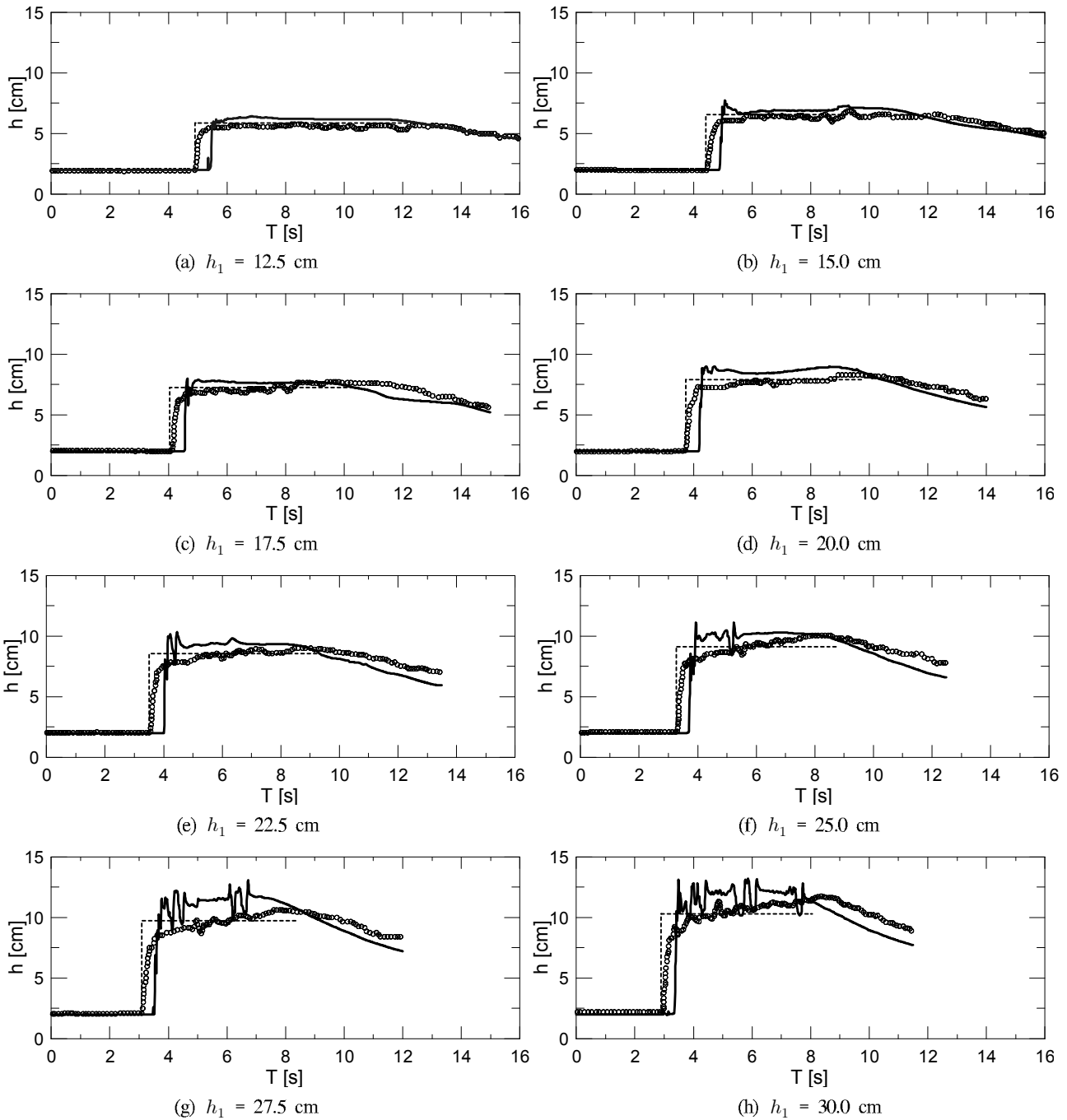


Fig. 4 Comparisons of the computed water surface level and the experimental data. Continuous line: results by CADMAS-SURF; dashed line: results by NSC; empty circle: measured data

Yeh(1991)가 지적하고 있는 경압토크 및 점성전단토크에 의하여 생성되는 와동 및 Surface-roller가 수면에 큰 영향을 미친 결과로 판단된다. 따라서, 실험결과에서는 단파전면의 상층우각부 근방에서는 기체와의 상호간섭현상이 크게 되고, 이에 따른 기체혼입 및 와동현상과 같은 복잡한 거동이 발생하는 것으로 판단되지만, NSC법 및 CADMAS-SURF에 의한 결과는 기본이론에서 기체와의 상호간섭을 고려할 수 있는 지배방정식을 적용하고 있지 않기 때문에 기체·액체의 상호간섭현상을 나타내지 못하는 것을 알 수 있다. CADMAS-SURF에 의한 결과를 보다 면밀히 고찰하면, 단파전면의 상층우각부에서는 비현실적으로 수위변동이 매우 급격하게 발달하고, 이로 인하여 실험치와는 매우 상이한 결과를 주며, 특히 단파강도가 강해질수록 이러한 경

향은 보다 두드러지는 것을 확인 할 수 있다. 여기서, NSC법의 계산이 종료되는 시점 이후는 Negative wave가 영향을 미치는 영역으로, Negative wave영역에서 수위가 하강되는 실험적인 현상은 CADMAS-SURF로 재현되지만, 그 값의 차이는 매우 크고, 단파강도가 강할수록 과소평가되는 결과로 나타난다. 반면에, 단파전면과 Negative wave가 도달하기 전의 영역에서 NSC법의 결과는 실험치를 평균적으로 재현되는 것으로 판단되지만, CADMAS-SURF의 결과는 전반적으로 실험결과보다 큰 값을 나타내고, 또한 단파강도가 클수록 이러한 경향은 현저하게 나타나는 것을 알 수 있다.

여기서, NSC법은 강비선형천수방정식에 기초하고 있으므로 연직방향으로 균등한 유속분포와 정수압분포를 가정하고 있는

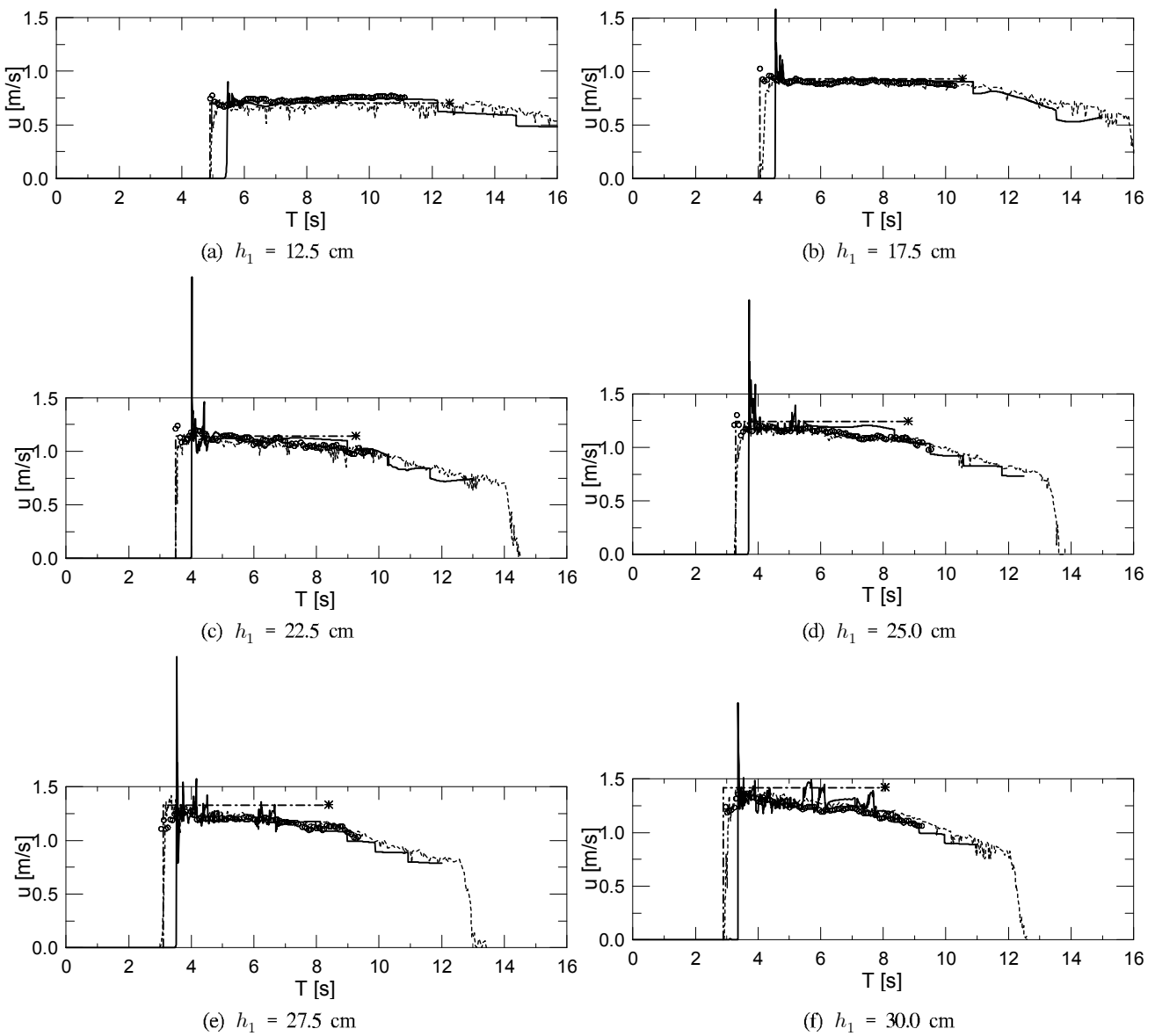


Fig. 5 Comparisons of the computed velocity with the experimental data. Chain line: results by NSC; continuous line: results by CADMAS-SURF; dashed line: measured data by LDV; empty circle: measured data by DPIV

반면에, CADMAS-SURF는 연직방향의 비균등유속, 비정수압분포 및 점성을 고려하고 있다는 측면을 고려하면, CADMAS-SURF의 결과가 NSC법의 경우보다는 실험치를 보다 합리적으로 구현하여야 함에도 불구하고 이에 명확한 판단을 내리기 어려운 것이 현상이다.

4.2 유속변동

NSC법(Arnason, 2005) 및 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의해 계산된 유속성분의 정량적인 비교를 위해 수리실험에 의해 측정된 실험결과와 비교를 수행하였다. Fig. 5는 게이트의 전면으로부터 하류측으로 5.2m의 지점에서 LDV와 DPIV에 의해 측정된 실험치와 NSC법 및 CADMAS-SURF에 의한 해석결과를 비교한 것으로, 각 그림에서 흰 원은 DPIV에 의한 측정결과를, 파선은 LDV에 의한 측정결과를 각각 나타내며, 쇄선은 NSC법에 의한 예측치를, 실선은 CADMAS-SURF에 의한 예측치를 각각 나타낸다. 그리고, 수위변동의 비교에서와 같이 상류측의 저수조 끝단의 벽체로부터 반사되는 Negative wave의 도달시간은 NSC법에 의한 직선의 종점으로 주어지고, (*)를 병기하였다.

여기서, DPIV에 의한 유속은 Table 1에 나타내는 바와 같이, $h_1=25$ 및 30cm의 경우는 $z=1.5, 3.5$ 및 7.5cm에서 측정되었고, 나머지는 바닥으로부터 $z=3.5$ cm인 위치에서 측정되었다. LDV에 의한 유속은 5.2m지점에서 수로폭방향의 중앙에서 측정되었으며, $h_1=25, 27.5, 30$ cm의 경우에 연직방향으로 최대인 9점에서부터 $h_1=12.5, 17.5, 22.5$ cm의 경우에 최소인 6점에 이르기까지 여러 지점에서 측정되었다. 그리고, 흐름속도는 연직방향의 각 지점에서 LDV의 측정데이터를 수심평균하여 계산되었다.

먼저, NSC법에 의한 예측결과와 실험치를 비교·검토하면, 실험치에서 단파강도가 증가함에 따라, 즉 $h_1 \geq 17.5$ cm에서 전반적으로 단파가 통과하는 동안에 속도는 점차적으로 감소하고, 따라서 균등유속을 가정하는 NSC법에 의한 예측치는 실험치를 과대평가한다. 여기서, 단파강도가 작은 $h_1=12.5$ cm의 경우에는 단파전면의 근방 및 배후에서 측정된 흐름속도와 NSC법에 의한 예측치가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 단파강도가 커지고($h_1 \geq 17.5$ cm의 조건은 Table 3에 제시된 바와 같이 $Fr > 1$ 인 사례를 나타낸다), 특히 시간이 경과할수록 두 결과치의 사이에 차이는 점점 더 커지는 것을 알 수 있다. 한편, 검토된 전 케이스에서 실험치는 단파전면의 순간적인 통과와 근방에서 예측된 NSC법에 의한 예측치를 초과하지 않는다는 사실에 기초하면, NSC법에 의한 예측치는 단파의 전파과정에서 상한계유속을 나타내는 것으로 판단된다. 여기서, 전술한 수위의 경우에는 실험치가 단파전면 근방에서 예측치보다 낮고, 이후에 점차적으로 증가하여, 결국에는 예측치를 초과한다. 이러한 수심과 수심평균된 유속과의 곱으로 주어지는 유량을 산정하면, 단파의 통과 동안 $h_1=25$ cm의 경우에 NSC법의 예측치가 실험치보다 최대 9%정도로 증가한다.

CADMAS-SURF에 의한 결과치와 실험치를 비교하면, 수위변동에서 지적인 바와 같이, 전반적으로 실험치보다 단파전면이 지체되어 나타나는 것을 알 수 있고, 전체적으로 대략 0.5s 정도

의 차이가 인정된다. 그리고, CADMAS-SURF는 단파전면 및 부근에서 급격한 유속의 상승, 즉 수치불안정에 의한 스파이크현상을 나타내며, 이러한 현상은 단파강도가 강해질수록 단파전면에서부터 보다 배후로까지 파급되고, 실험치를 매우 상회하는 결과를 준다. 이로 예상되는 바와 같이, CADMAS-SURF에 의한 예측파력은 구조물에 과도한 충격파력을 작용시킬 것으로 판단되고, 이는 단파파력에 대한 기존의 실험결과(Matsutomi, 1991; Ikeno et al., 2001)와는 매우 상이한 결과를 나타낼 것으로 예상된다. 여기서, 이러한 스파이크현상과 단파전면의 지체현상을 제외하면, CADMAS-SURF에 의한 결과는 NSC법의 경우보다는 실험치를 합리적으로 구현하고 있고, 특히 단파전면 이후 및 Negative wave의 도달 이후에서 나타나는 유속강하현상을 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 그러나, 실험치에서 Negative wave의 도달 이후에 표현되는 유속강하현상을 하강하는 스텝형태로 표현되는 부분은 비현실적인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에는 지진해일이 천해를 전파함에 따라 발생될 수 있는 단파의 형성과 전파에 따른 수위변동 및 유속변화 등의 평가에, 최근 해안 및 항만구조물의 설계에 널리 사용되고 있는 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 적용성과 유용성을 검토할 목적으로, 그의 소스코드를 일부 수정하여 계산을 수행하였다. 더불어, 이로부터 예측된 결과의 정도를 검토하기 위하여 정밀한 수리실험을 실시하였다. 실험에서는 연직격벽에 의해 분리된 고·저수위를 갖는 두 유체 사이의 격벽을 순간적으로 개방함으로써 형성되는 단파를 대상으로 실험데이터와 NSC법(Arnason, 2005) 및 CADMAS-SURF에 의한 해석결과를 상호 비교·검토하여 CADMAS-SURF의 적용성을 평가하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사실을 아래에 기술한다.

- (1) CADMAS-SURF에 의한 단파전면 전파속도의 계산치가 검토된 모든 케이스에 대해 전체적으로 실험치나 NSC법에 의한 계산치보다 다소 느리다.
- (2) CADMAS-SURF에 의해 예측된 수위는 단파전면의 상층 우각부에서 비현실적으로 매우 급격하게 발달되며, 단파강도가 강해질수록 이러한 경향은 크게 나타난다.
- (3) CADMAS-SURF에 의해 예측된 평균유속은 전반적으로 실험치보다 단파전면이 지체된다.
- (4) CADMAS-SURF에 의해 예측된 평균유속은 단파전면 및 부근에서 수치불안정에 의한 스파이크현상을 보이며, 이는 단파강도가 강해질수록 두드러진다.
- (5) CADMAS-SURF에 의해 예측된 평균유속은 스파이크현상과 단파전면의 지체현상을 제외하면, NSC법의 경우보다는 실험치를 합리적으로 재현하고 있고, 특히 단파전면 이후 및 Negative wave의 도달 이후에서 나타나는 유속강하현상을 잘 재현하고 있다.
- (6) CADMAS-SURF에 의해 예측된 단파의 수위와 유속을 적용하여 해안 및 항만구조물에 작용하는 단파의 파력 혹은 충격파력과 표류물에 의한 충돌력을 평가하는 경우에는 수위와 유속

변화에서 단파전면의 전파속도에서 지체현상, 단파전면의 유속에서 스파이크현상 및 그 이외의 실험치와 차이 등으로, 비현실적인 결과를 도출할 수 있는 우려가 있다. 따라서, 보다 정확한 예측치를 얻기 위해서는 난류현상과 기체와 유체와의 상호간섭 현상 및 단파전파의 이류계산을 합리적으로 평가할 수 있는 수법이 적용될 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문의 수리실험은 2005년에 Halldór Árnaon박사에 의해 University of Washington에서 수행된 것으로, 수리실험에 관한 모든 데이터의 사용을 허락해준 것에 감사드리고, 또한 본 논문에 대해 많은 조언과 지적을 해준 Oregon State University의 Harry Yeh교수에게 감사드립니다.

참고문헌

- 국립방재연구소 (1998). 동해안에서의 지진해일 위험도 평가, 국립방재연구소 연구보고서, NIDP-98-06.
- 김도삼, 김지민, 이광호, 손병규 (2007a). "일본 지진공백역에서의 지진해일이 우리나라의 남동연안에 미치는 영향분석", 한국해양공학회지, 제21권, 제6호, pp 64-71.
- 김도삼, 김지민, 이광호 (2007b). "동해연안에 영향을 미친 지진해일의 수치시뮬레이션", 한국해양공학회지, 제21권, 제6호, pp 72-80.
- Abdolmaleki, A., Thiagarajan, K.P. and Morris-Thomas, M.T. (2004). "Simulation of the Dam Break Problem and Impact Flows Using a Navier-Stokes Solver", 15th Australasian Fluid Mech. Conf., pp 13-17.
- Arnason, H. (2005). Interactions between an Incident Bore and a Free-standing Coastal Structure, Ph.D Dissertation, University of Washington, USA.
- CDIT. (2001). Research and Development of Numerical Wave Channel, Coastal Development of Institute of Technology, CDIT Library, No-12.
- Choi, B.H., Pelinovsky, E., Kim, D.C. and Kim, K.O. (2008). "Three-dimensional Simulation of the 1983 Central East(Japan) Sea Earthquake Tsunami at the Inwon Port(Korea)", Ocean Engineering(in press).
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", J. Comput. Phys., Vol 39, pp 201-225.
- Ikeno, M., Matsuyama, M. and Tanaka, H. (1998). Proposal of Tsunami Fission Criteria and Splitted Tsunami Pressure Formulae Based on Non-distorted Model Tests, Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan, Research Report U98006.
- Ikeno, M., Mori, N. and Tanaka, H. (2001). "Experimental Study on Tsunami Force and Impulsive Force by Drifter under Breaking Bore", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 48, pp 846-850.
- Ikeno, M. and Tanaka, H. (2003). "Experimental Study on Impulsive Force of Drift Body and Tsunami Running Up to Land", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 50, pp 721-725.
- Iwata, K., Kawasaki, K. and Kim, D.S. (1995). "Numerical Analysis of Wave Breaking due to a Submerged Structure", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 42, pp 781-785.
- Iwata, K., Kawasaki, K. and Kim, D.S. (1996). "Breaking Limit, Breaking and Post-breaking Wave Deformation due to Submerged Breakwater", Proc. of 25th ICCE, ASCE, pp 2338-2351.
- Kawasaki, K. and Iwata, K. (1996). "Numerical Analysis on Wave Deformation of Spilling Breaker due to Submerged Breakwater in Three-dimensional Wave Field", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 43, pp 96-100.
- Lim, C.H., Bae, J.S., Lee, J.I. and Yoon, S.B. (2008). Propagation Characteristics of Historical Tsunamis that Attacked the East Coast of Korea, Natural Hazard, DOI 10.1007/s11069-007-9199-x.
- Madsen, P.A., Simonsen, H.J. and Pan, C.H. (2005). "Numerical Simulation of Tidal Bores and Hydraulic Jumps", Coastal Engineering, Vol 52, pp 409-433.
- Matsutomi, H. (1991). "An Experimental Study on Pressure and Total Force due to Bore", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 38, pp 626-630.
- Matsutomi, H. and Ohmukai, T. (1999). "Laboratory Experiments on Fluid Force of Tsunami Flooded Flows", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 46, pp 336-340.
- Mizutani, S. and Imamura, F. (2000). "Hydraulic Experimental Study on Wave Force of a Bore Acting on a Structure", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 47, pp 946-950.
- Noguchi, K., Sato, S. and Tanaka, S. (1997). "Large-scale Experiments on Tsunami Overtopping and Bed Scour around Coastal Revetment", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 44, pp 296-300.
- Ramsden, J.D. (1993). Tsunami : Forces on a Vertical Wall Caused by Long Waves, Bores, and Surges on a Dry Bed, Ph.D Dissertation, California Institute of Technology, USA.
- Ramsden, J.D. (1996). "Forces on a Vertical Wall due to Long Waves, Bores, and Dry-bed Surges", J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol 122, No 3, pp 134-141.
- Ritter, A. (1892). "Die Fortpflanzung der Wasserwellen",

- Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieurer, Vol 24, pp 671-691.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). "Numerical Simulation of Nonlinear Wave Interacting with Permeable Breakwaters", Proc. of 23rd ICCE, ASCE, pp 1517-1530.
- Strelkoff, T. (1986). "Dam-break Flood Waves", Megatrends in Hydraulic Engineering, Albertson, M.L. and Papadakis, C.N. Editors, California State University, pp 257-266.
- Tonkin, S., Yeh, H., Kato, F. and Sato, S. (2003). "Tsunami Scour around a Cylinder", J. Fluid Mech., Vol 496, pp 165-192.
- Tanimoto, K., Tsuruya, H. and Nakano, S. (1984). "Field and Laboratory Investigation of the Tsunami Caused by 1983 Nihonkai Chubu Earthquake", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 31, pp 626-630.
- Whitham, G.B. (1955). "The Effect of Hydraulic Resistance in the Dam-break Problem", Proc. Series A, Royal Society of London, pp 226-227.
- Yamamoto, M., Nakayama, A., Sakai, S. and Mitsuhashi, K. (1985). "Damages on Boats in Fishing Ports by Middle Japan Sea Earthquake Tsunami", Proc. of the 32nd Japanese Conf. on Coastal Engineering, Vol 32, pp 460-464.
- Yeh, H. (1991). "Vorticity-generation Mechanism in Bores", Proc. Royal Society, London, Vol 432, pp 215-231.
- Yeh, H. (2007). "Design Tsunami Forces for Onshore Structures", J. of Disaster Research, Vol 2, No.6, pp 1-6.
- Yeh, H., Ghazali, A. and Marton, I. (1989). "Experimental Study of Bore Run-up", J. Fluid Mech., Vol 206, pp 563-578.

2008년 8월 20일 원고 접수

2008년 10월 3일 최종 수정본 채택