

2차원수조내에서 단파의 변형과 구조물에 작용하는 단파파력에 관한 수치해석

Numerical Analysis of Wave Transformation of Bore in 2-Dimensional Water Channel
and Resultant Wave Loads Acting on 2-Dimensional Vertical Structure

이광호* · 김창훈** · 김도삼*** · 황용태****

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

Abstract

This study numerically discusses wave forces acting on a vertical wall such as breakwaters or revetments, subjected to incident undular or turbulent bores. Due to the complex hydrodynamics of bore, its wave forces have been predicted, mainly through laboratory experiments. Numerical simulations in this paper were carried out by CADMAS-SURF(CDIT, 2001), which is based on Navier-Stokes momentum equations and VOF method (Hirt and Nichols, 1981) for tracking free water surface. Its original source code was also partly revised to generate bore in the numerical water channel. Numerical raw data computed by CADMAS-SURF included great strong spike phenomena that show the abrupt jumps of wave loads. To resolve this undesired noise of raw data, the band-pass filter with the frequency of 5Hz was utilized. The filtered results showed reasonable agreements with the experimental results performed by Matsutomi (1991) and Ramsden (1996). It was confirmed that CADMAS-SURF can be applied to the design of coastal structures against tsunami bores. In addition, the transformation process and propagation speed of bores in the same 2-d water channel were discussed by the variations of water level for time and space. The numerical results indicated that the propagation speed of bore was changed due to the nonlinear interactions between negative and reflected waves.

Keywords : wave force and transformation of bore, CADMAS-SURF, spike, numerical low pass filter, phase difference

요 지

본 연구에서는 대부분이 수조실험에 의한 추정되어 온 해중의 방파제나 호안 등의 연직벽체에 작용하는 undular 및 turbulent bore에 의한 단파파력을 수치적으로 추정하기 위하여 Navier-Stokes 운동방정식에 수면형상의 추적이 VOF법(Hirt and Nichols, 1981)을 채용하고 있는 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)를 적용한다. 적용에서는 소스코드를 본 연구의 목적에 부합하도록 일부 수정하였다. 얻어진 원수치데이터에는 급격한 파력의 증감을 나타내는 스파이크현상이 강하게 표현되었으며, 이에 수치필터를 적용하여 5Hz 이상의 고주파수성분을 필터링하였다. 수치해석결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 Matsutomi(1991) 및 Ramsden(1996)의 수조실험결과와 비교·검토하였으며, 이로부터 매우 좋은 일치성과 유용성을 확인할 수 있었고, 단파성진해일의 작용하에 있는 구조물의 설계에 도입될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, 본 2차원수조내에서 단파의 변형을 수위의 시·공간변화로부터 추정함과 동시에 전파속도의 변화특성을 나타내었다. 단파의 전파속도는 전파과정에서 변화되는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 단파의 변형과 단파파력, CADMAS-SURF, 스파이크, 수치필터, 위상차

1. 서 론

지진해일은 그 대부분이 지진에 의한 해저변동에 따른 해수면의 변위에 의해 발생되며, 그 규모는 지진의 규모와 비례하며, 진원이 얕을수록 커진다. 진원지 부근에서 발생한 지진해일은 장거리의 전파과정을 통해 단주기 성분의 에너지

가 감소하여 장주기 형태를 갖는다. 이러한 지진해일이 천해로 내습함에 따라 천수변형에 의하여 파고가 증가되고, 동시에 파장이 감소되어, 경우에 따라 강력한 turbulent breaking bore로서 연안에 도달할 수 있음을 많은 문헌에서 확인할 수 있다(예로, Ramsden, 1993). 이러한 단파(bore)는 해역과 육역의 공간이용을 위해 설치된 천해상의 해안·항만구조물

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

**정회원 · (일)나고야대학 대학원 공학연구과 사회기반공학전공 박사과정 (E-mail : abballive@gmail.com)

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

****한국해양대학교 건설환경공학부 박사과정

에 큰 파력(예로, Yeh, 2007)을 작용시켜 구조물의 파괴를 야기할 수 있고, 연안의 지형변동은 물론 구조물 주변에서의 세굴과 같은 국부지형변동을 발생시킬 수 있으며(예로, Takahashi *et al.*, 1999; Nakamura, 2008), 이어서 매우 큰 파고와 파속으로 육상을 소상하여 침수피해를 야기하거나 가옥 등의 파괴를 초래하는 경우도 있다(Matsutomi and Shuto, 1994).

최근까지 지진해일에 대한 연구는 주로 지진단층모델에 기초한 지진해일의 전파속도 및 수위변동의 재해석과 예측에 관한 연구가 대부분으로, 지진해일에 의한 파력 및 세굴을 포함한 지형변동에 대한 연구는 상대적으로 많지 않다고 할 수 있다. 하지만, 2004년의 인도네시아 수마트라 지진해일의 피해상황으로부터 알 수 있는 바와 같이 지진해일의 작용에 따른 최종적인 결과로 나타나는 파력에 의한 구조물의 피해와 지형변동은 인명피해는 물론 사회간접자본의 파괴라는 측면에서 엄청난 사회적·경제적인 손실로 이어질 수 있기 때문에 매우 중요한 설계요소로 인식되고 있다. 따라서, 지진해일의 피해가 빈번한 일본과 미국 등지에서는 폭풍해일과 지진해일을 대비한 연안건축매뉴얼(coastal construction manual)에 따른 설계지침(Dames and Moore, 1980; CCH, 2000; Asakura *et al.*, 2000; FEMA-CCM, 2005; ASCE, 2006)을 제공하고 있다. 여기서, 구조물에 작용하는 파력에 대한 대부분의 설계지침은 ①정수력(hydrostatic force), ②부력(buoyant force), ③동수력(hydrodynamic force), ④surge force, ⑤표류물에 의한 충격력(debris impact force) 및 ⑥쇄파력(wave-breaking force)의 고려를 권장하고 있다(Yeh, 2006, 2007).

이러한 힘 중에서 쇄파력은 권파형쇄파(plunging-type breaker)로 정의되고, 이는 상대적으로 깊은 해역에서 발생된다(즉, 육상에서는 발생되지 않는 힘이다). 쇄파시에 쇄파하는 면(overturning tip)이 전면의 수면에 강하게 접촉되면서 지진해일은 부서진 파로 되고, 이는 대단히 긴 파장을 갖기 때문에 지진해일에 대해 단파로 고려될 수 있다. 여기서는 육상으로 초오름을 흔히 surge로 칭하며, 그에 의한 초기충격이 surge force를 발생시킨다. 한편, 본 연구의 주제인 단파의 파력은 단파의 전파에 따라 전면(前面)에 유체가 있는 상태(wet-bed)에서는 ⑥쇄파력(쇄파단파에 의한 파력)에 상당하고, 전면에 유체가 없는 경우(dry-bed)는 ④surge force에 상당한다.

지진해일파력에 관한 연구는 1960년의 칠레지진해일과 우리나라에도 큰 영향을 미친 1983년의 동해중부지진해일을 계기로 Cumberbatch (1960)의 선도적인 파력연구를 시작으로 본격적인 연구가 수행되어 지진해일의 파력특성이 실험 및 이론을 통하여 규명되기 시작하였다(Fukui *et al.*, 1963; Cross, 1967; Dames and Moore, 1980; Tanimoto *et al.*, 1983, 1984; Ramsden and Raichlen, 1990; Matsutomi, 1991; Ramsden, 1993; Ikeno *et al.*, 1998, 2001; Matsutomi and Ohmukai, 1999; Asakura *et al.*, 2000; Mizutani and Imamura, 2000; Ikeno and Tanaka, 2003). 지금까지의 연구들은 해중구조물에 작용하는 지진해일의 파력(Fukui *et al.*, 1963; Cross, 1967; Matsutomi, 1991; Ramsden and Raichlen, 1990; Ramsden, 1993; Ikeno *et al.*, 1998, 2001; Mizutani and

Imamura, 2000), 해중구조물에 작용하는 지진해일에 의한 표류물의 충돌력(Ikeno *et al.*, 2001; Matsutomi, 1989), 육상구조물에 작용하는 지진해일의 파력(Cross, 1967; Dames and Moore, 1980; Hamzah *et al.*, 1998; Matsutomi and Ohmukai, 1999; Asakura *et al.*, 2000; Arikawa *et al.*, 2005) 및 육상구조물에 작용하는 지진해일에 의한 표류물의 충돌력(Ikeno and Tanaka, 2003; Yeom *et al.*, 2007)의 연구로 각각 분류할 수 있다.

한편, 전술한 파력에 관한 연구에서는 고립파를 대상으로 한 Hamzah *et al.*(1998), Arikawa *et al.*(2005) 및 Yeom *et al.*(2007) 등의 수치적인 연구를 제외하면, 거의 대부분이 수조실험에 의한 결과에 기초하고 있고, 특히 입사고립파의 파랑조건과 해저 및 육상에 대한 여러 조건의 변화하에 얻어진 데이터에 기초하여 설계파력(압)에 관한 실험식을 제안하고 있다. 그러나, 실험은 현장조건을 대단히 단순화시키고 있고, 실험식의 근거로 주어지는 기초실험데이터의 분산이 매우 크며, 어떤 경우에는 비현실적인 과대파력을 나타내는 것으로 지적되어 있기도 하다(Yeh, 2007). 여기서, 단파의 작용하에서 파력의 특성을 검토한 연구는 Ramsden (1993)과 fluid wedge이론(Cumberbatch, 1960)에 기초한 Cross(1967) 등의 몇몇의 이론적인 연구를 제외하면, 실험적인 연구가 대부분이라 할 수 있다.

본 연구에서는 해안·항만공학의 설계분야에서 구조물의 내파설계에 국내·외에서 활발히 활용되고 있는 일본연안개발기술센터(CDIT)에서 개발한 CADMAS-SURF(Super Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure)의 코드를 적용하여 구조물에 작용하는 단파파력을 수치적으로 접근한다. CADMAS-SURF코드(2001)는 Navier-Stokes운동방정식에 기초하고 있으며, 쇄파를 포함한 파랑변형 및 쇄파후 파랑의 분열과 재생성과정까지도 고정도로 해석이 가능한 자유수면추적의 대표적인 기법인 VOF법(Hirt and Nichols, 1981)을 적용하고 있다. 본 연구에서는 CADMAS-SURF를 적용함에 있어서 구조물에 작용하는 단파파력의 재현이라는 본 연구의 목적에 일치하도록 CADMAS-SURF의 소스코드를 일부 수정하였다.

이상의 CADMAS-SURF(2001)로부터 얻어지는 수치해석 결과와 Matsutomi(1991) 및 Ramsden(1996)에 의한 수조실험결과를 비교·분석하여, CADMAS-SURF(2001)에 의한 구조물에 작용하는 단파파력해석의 타당성 및 유용성을 검증한다. 더불어, 단파의 전파에 따른 수위의 시·공간변화로부터 전파속도의 변화특성을 검토한다.

2. CADMAS-SURF의 이론적 배경

2.1 기초방정식

CDIT(2001)에 의해 개발된 CADMAS-SURF는 해석영역 내에 조파기능과 소파기능을 포함한 수치파동수로(numerical wave channel)의 개념에 기초한 수치모델로, 기초방정식에는 2차원비압축성의 점성유체를 대상으로 한 연속방정식과 운동방정식을 Sakakiyama and Kajima(1992)의 투과층모델(porous model)에 기초하여 확장한 식(1)~(3)의 기초방정식을 채용하고 있다.

Table 1. Computational conditions in CADMAS-SURF

Version	Grid resolution	Difference scheme	Time step	Matrix solver
V4.0	$\Delta x \times \Delta z = 2.0 \times 1.0$ cm	donor-0.2	auto(approximately 0.005s)	M-ILUBCGSTAB

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

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

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

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 동점성 계수, 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 측면 경계에서 반사파의 제어를 위해 설치한 스폰지층에서의 감쇠 계수, S 는 해석영역내의 조파를 위한 소스항, R_x, R_z 는 투과 층에서의 저항력을 각각 나타낸다. 또한, 위의 식에서 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 C_M 을 관성력계수로 하여 식(4)와 같이 표현된다.

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

또한, 자유수면의 추적을 위해 0과 1 사이의 값을 갖는 컬러함수인 VOF함수 F 에 대한 다음의 이류방정식을 도입하고 있다(Hirt and Nichols, 1981).

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

계산알고리즘을 포함한 보다 상세한 내용에 대해서는 CDIT(2001)를 참조하기 바란다.

2.2 계산조건 및 단파파력의 산출

본 연구에서는 이상의 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)를 사용하여 단파파력을 해석한다. 그러나, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 단파파력의 해석에서는 투과층이 고려되지 않고, 수치조파의 필요성이 없기 때문에 기초방정식중의 투과층해석에 관련된 항들은 무시된다. 또한, 수리모형실험과 동일한 초기조건을 유지하기 위하여, 격벽(게이트) 전후의 수위 차에 의한 정수압이 고려될 수 있도록 CADMAS-SURF의 소스코드를 일부 수정하고, 단파선단부의 전후에서 수위차로 인한 정수압의 압력차로부터 단파발생을 유도한다. 계산영역은 수리실험에서 사용된 수조와 동일한 크기를 고려하며, 계산영역의 양측면과 바닥에는 불투과경계조건을 적용한다.

수치계산으로부터 구조물에 작용하는 전(全)파력의 산정은 일반적으로 구조물 전면에 설치된 각 파압계로부터 얻어지는 파압을 연직적분함으로써 산정될 수 있다. 수리실험과의 비교를 위하여 본 연구에서는 2차원연직구조물을 대상으로 하며, 또한 대상구조물은 단파와의 상호간섭에 따른 월파의 발생을 허용하지 않는 것으로 한정된다. 본 연구의 2차원연직구조물에 작용하는 전파력 F 는 각 계산스텝(Δt)에 대하여

이하의 관계식으로 주어진다.

$$F(t) = \int p(t) dz = \sum_{z=bottom}^{z=top} p(t) \Delta z \quad (6)$$

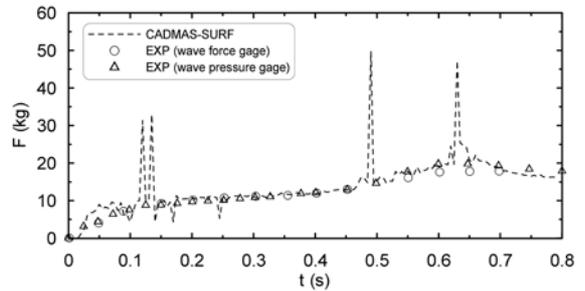
여기서, p 는 파압이 감지되는 각 셀에서의 파압, Δz 는 파압계가 설치된 셀의 연직방향으로 해상도(연직격자간격)를 각각 나타낸다. 본 계산에서는 구조물상에서 단파의 처오름에 따른 파압까지를 충분히 고려하기 위하여 파압계를 구조물 전면의 전영역($z=bottom \sim top$)에 설치하였다. 상세한 계산조건은 다음의 Table 1에 제시되어 있다.

3. 수치해석결과

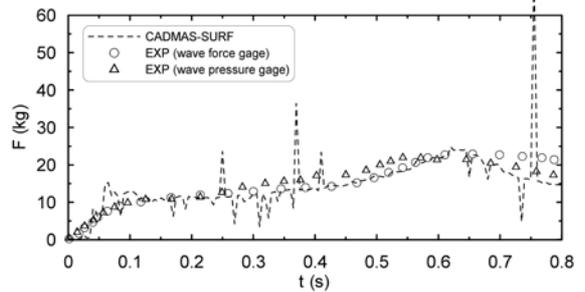
3.1 Matsutomi(1991)의 실험결과와 비교 · 검토

3.1.1 실험결과와 원수치해석결과와의 비교

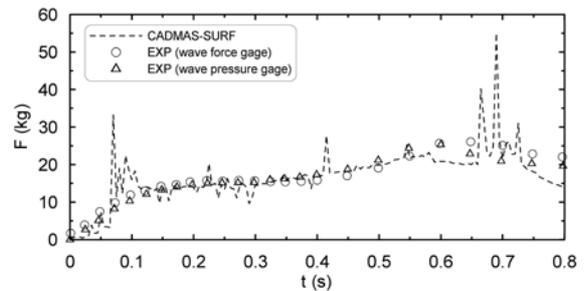
Matsutomi(1991)의 실험에서 단파의 형성은 상하류측에



(a) $h_1=40\text{cm}, h_0=2\text{cm}$



(b) $h_1=40\text{cm}, h_0=4\text{cm}$



(c) $h_1=40\text{cm}, h_0=8\text{cm}$

Fig. 1 Comparisons of experimental results of Matsutomi (1991) and numerical raw data of CADMAS-SURF (CDIT, 2001)

큰 수위차를 갖는 게이트의 급개방에 의해 발생되었다. 사용한 수조는 높이 0.5 m, 폭 0.3 m, 길이 11 m의 수평상의 직사각형수조이며, 수조하류단에서부터 상류측으로 6 m인 지점에 게이트가 설치되었다. 실험에 대한 보다 자세한 사항은 Matsutomi(1991)를 참조하기 바란다.

Fig. 1은 게이트의 상류측수심이 $h_1=40$ cm이고, 게이트의 하류측수심이 $h_0=4$ cm인 경우에 대한 Matsutomi(1991)의 실험결과와 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치해석 결과의 원데이터(raw data)를 각각 비교한 결과이다. 그림에서 실험 및 수치해석결과의 시간에 대한 원점은 연직벽이 파력을 감지하기 시작하는 시점으로 하였다. Fig. 1로부터, 두 실험치의 파력에서 시간의 경과에 따라 $t=0.1\sim 0.15$ s 및 $t=0.6\sim 0.65$ s에서 각각 피크치가 나타나며, 첫 번째의 피크는 단파전면이 연직벽에 충돌될 때 발생하는 결과이고, 두 번째의 피크는 중복파에 의한 결과이며, 최대파력은 두 번째의 피크에서 발생됨을 확인할 수 있다.

압력계에 의한 파력치와 전파력계에 의한 파력치의 사이에는 단파전면의 작용시간의 전후를 제외하면, 전반적으로 약간의 차이를 나타내는 것을 알 수 있고, 특히 $t=0.7$ s의 근방과 그 이후에서 다소간의 차이가 인정된다. 이러한 결과는 근본적으로 파압계에 의한 파력은 파압계 부착위치의 상하간격에 대해 등파압을 가정한 적분으로 산정되었기 때문이며, 또한 전

파력계에 의한 파력은 변위계에 의한 변위로부터 보정과정을 통하여 산정되기 때문에 시간적인 변동을 나타내는 전파압의 중심점이 보정과정에서 충분히 재현되지 않았기 때문이다 (Matsutomi, 1988). 그러나, 단파파력의 전체적인 변화과정 등은 두 실험결과치가 매우 잘 대응되므로 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치해석결과의 타당성을 검증 및 논의하는 비교자료로서 적절한 것으로 판단된다.

다음으로, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치해석결과를 살펴보면, 시간의 경과에 따라 급격한 파력변화를 나타내는 스파이크현상을 강하게 볼 수 있다. 파력에서 이러한 스파이크는 일종의 수치적인 에러에 의한 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 셀내에서 연속조건이 만족되어야 하므로 압력변화에서 스파이크가 발생하는 것으로 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 해

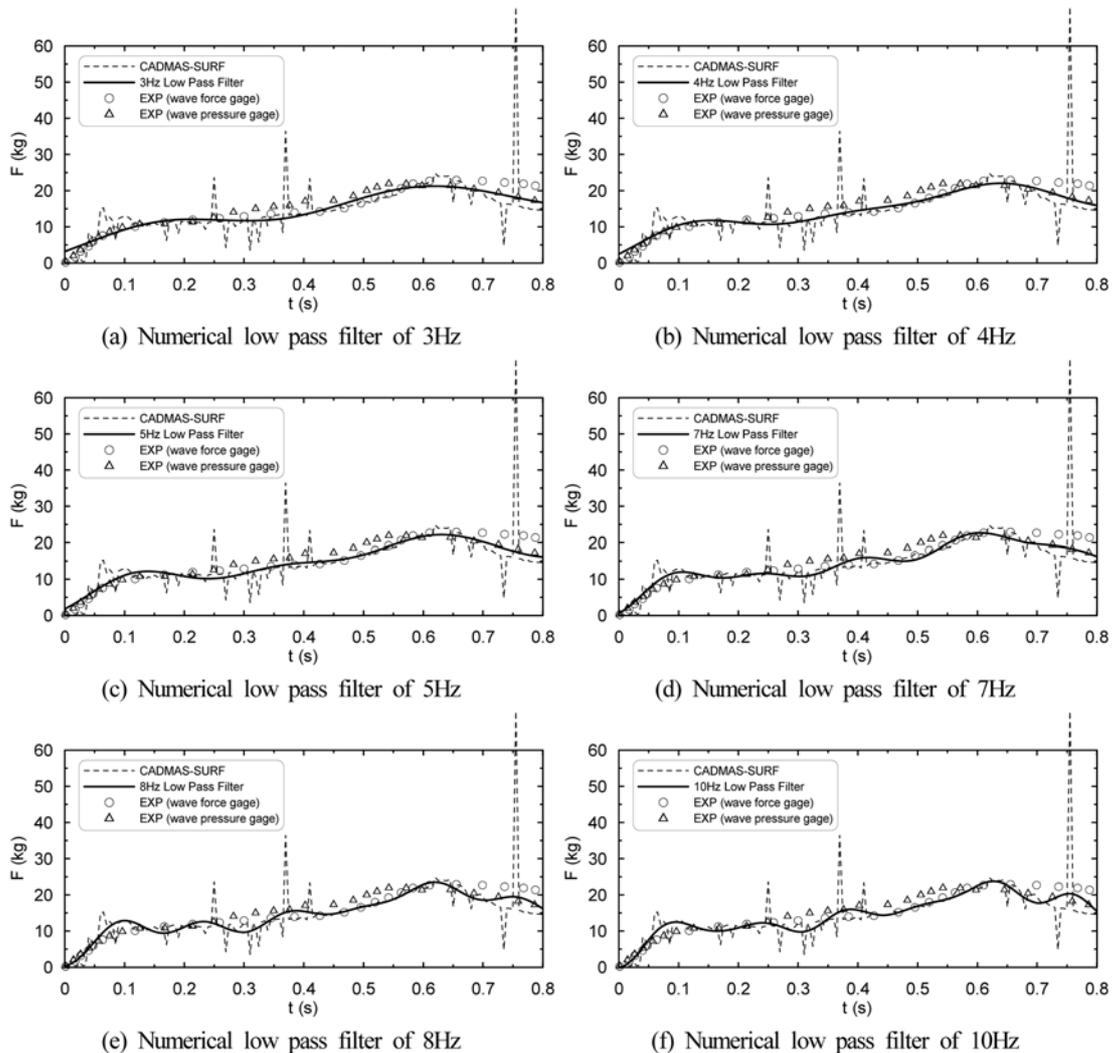


Fig. 2 Comparisons of experimental results of Matsutomi (1991) and numerically filtered ones of CADMAS-SURF(CDIT, 2001) for $h_1=40$ cm and $h_0=4$ cm

Table 2. Comparisons of correlation coefficient(R)

CASE	GAGE	3 Hz	4 Hz	5 Hz	7 Hz	8 Hz	10 Hz
Fig. 1(a) $h_1=40$ cm, $h_0=2$ cm	wave force	0.9630	0.9809	0.9832	0.9475	0.9367	0.9175
	wave pressure	0.9695	0.9816	0.9843	0.9590	0.9501	0.9317
Fig. 1(b) $h_1=40$ cm, $h_0=4$ cm	wave force	0.9653	0.9739	0.9752	0.9662	0.9590	0.9588
	wave pressure	0.9216	0.9343	0.9355	0.9186	0.8997	0.8993
Fig. 1(c) $h_1=40$ cm, $h_0=8$ cm	wave force	0.9358	0.9483	0.9487	0.8761	0.8714	0.8605
	wave pressure	0.9297	0.9305	0.9319	0.8620	0.8573	0.8487

석법으로, 실제적인 3차원적인 현상을 다루고 있지 않기 때문에 2차원해석에 가깝다)에서도 이러한 스파이크현상을 보이고 있다.

여기서, 얻어진 수치해석결과에 전술한 스파이크현상이 포함되지 않는 경우를 상정한 수치해석결과는 시간의 경과에 따른 변화과정과 값의 크기에서 두 실험치와 상당히 잘 일치할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 연직벽에 작용하는 단파파력의 해석에 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 유용성을 보다 명확히 규명하기 위하여 다음의 절에서 원수치해석결과로부터 파력의 스파이크현상을 수치필터(numerical low pass filter)로 제거한 수정수치해석결과와 실험치를 비교·검토하는 것으로 한다.

3.1.2 원수치해석결과로부터 스파이크현상의 제거

시계열 데이터의 잡음(noise)을 제거하는 대표적인 기법은 데이터윈도우(data window)를 이용하는 이동평균법과 스펙트럼윈도우(spectral window)에 기초하는 대역필터링법(band-pass filter)으로 대별될 수 있다. 이동평균법은 데이터윈도우 내에서 평균값을 취하여 평활화시키는 방법으로, 윈도우의 폭이 넓어짐에 따라 파형데이터에서 파워스펙트럼의 면적이 점점 감소하는 스펙트럼변형이 발생하기 때문에 데이터해석에 적합하지 않을 수 있다. 반면에, 대역필터링법은 다음의 식(7) 및 (8)과 같은 면적불변성과 대칭성을 갖는 스펙트럼윈도우를 적용하여 주파수폭의 범위내에서만 평균을 취하기 때문에 스펙트럼의 변형을 발생시키지 않고 일정한 진동성분만을 제거할 수 있다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(f)df = 1 \quad (7)$$

$$W(f) = W(-f) \quad (8)$$

여기서, $W(f)$ 는 주파수 f 의 함수이다.

Fig. 2(a)~(f)는 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치해석결과에 대역필터링기법에 의한 수치필터를 적용한 결과이며, Fig. 2(a)는 3 Hz, (b)는 4 Hz, (c)는 5 Hz, (d)는 7 Hz, (e)는 8 Hz, (f)는 10 Hz의 주파수보다 큰 주파수의 성분을 제거한 수정수치해석결과와 실험결과를 각각 비교한 것으로, 여기서는 제시하고 있지 않지만, 필터링주파수를 20 Hz까지 검토하였다. 그림으로부터 필터링주파수가 클수록 상대적으로 고주파수의 성분이 제거되어 원데이터(raw data)에 가까워지고, 반면에 필터링주파수가 작을수록 상대적으로 저주파수의 성분이 제거되어 원데이터에서 다소 멀어지는 경향을 나타낸다. 여기서, 수치해석결과로부터 정확한 필터링

주파수의 크기를 결정하는 것은 충격력과 같은 실험상의 고주파수성분이 제거되어 실제의 파력이 왜곡될 소지가 있기 때문에 상당한 유의가 필요한 경우도 있다. 그러나, Matsutomi(1991) 및 후술하는 Ramsden(1993, 1996)의 각각의 실험결과에서 시간의 변화에 따른 파력의 급격한 변화(충격력)가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있고, 일반적으로 표류물을 동반하지 않는 단파파력에서는 충격력이 발생하지 않는 것으로 알려져 있다(Matsutomi, 1991; Ramsden, 1993). 따라서, 본 연구에서는 다음의 식(9)로 주어지는 수정수치해석결과와 실험결과와의 상관관계수 R 을 산정하여 적절한 필터링주파수의 크기를 결정하는 것으로 하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타낸다.

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N (x_r - \bar{x})(y_r - \bar{y})}{S \cdot S'} \quad (9)$$

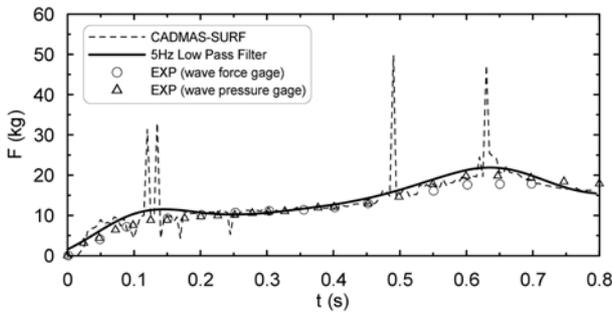
여기서, N 은 데이터의 수, \bar{x} 와 \bar{y} 는 각각 변량 x_r 와 y_r 의 평균값, S 와 S' 는 각각의 표준편차로 편차들을 제공하여 산술평균한 값의 제공근으로 정의된다.

Table 2에 근거하여 Fig. 2로부터 필터링주파수를 결정하면 5 Hz가 합리적인 것으로 판단된다. 따라서, 이하의 해석에서는 원수치해석결과에 5 Hz의 필터링주파수를 적용한 수정수치해석결과에 기초하여 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 적용성과 유용성을 검토한다.

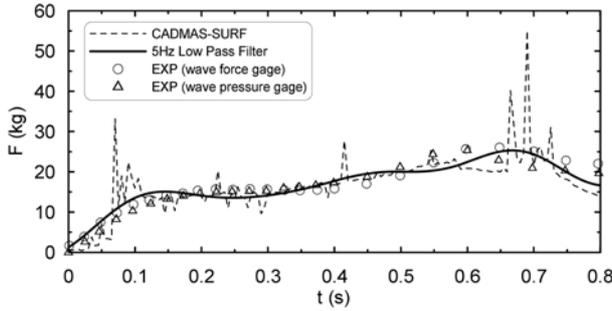
3.1.3 실험결과와 수정수치해석결과와의 비교

Fig. 3은 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 원수치해석결과에 필터링주파수 5Hz를 적용하여 얻어진 수정수치해석결과와 Matsutomi(1991)에 의한 실험결과를 비교한 것으로, Fig 3(a)가 $h_1=40$ cm, $h_0=2$ cm의 경우이고, Fig 3(b)가 $h_1=40$ cm, $h_0=8$ cm의 경우이다. Fig. 3 및 전술한 Fig. 2(c)의 결과에 의하면, 수정수치해석결과는 시간의 변화에 따라 수리실험에 의한 단파파력의 변화과정과 매우 잘 대응하는 것을 알 수 있고, 특히 단파전면의 작용에 의한 단파파력 및 중복파의 발생에 의한 최대파력을 고정도로 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

여기서, Fig 3(a)의 경우에는 명확하지 않지만, Fig. 2(c) 및 Fig 3(b)에서 단파전면의 작용에 의한 파력피크치와 중복파의 작용에 의한 파력피크치의 사이에 위상차이가 존재하는 것을 알 수 있으며, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 결과가 상대적으로 느린 파속을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)로 부



(a) $h_1=40\text{cm}$ and $h_0=2\text{cm}$



(b) $h_1=40\text{cm}$ and $h_0=8\text{cm}$

Fig. 3 Comparisons of experimental results of Matsumoto (1991) and numerically filtered ones of CADMAS-SURF(CDIT, 2001)

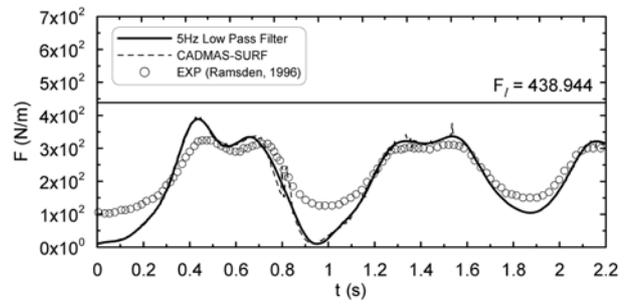
터 게이트의 급개방에 따른 쇄파성단파의 유속과 수위변동을 해석하고, Arnason(2005)의 실험결과와 비교하여 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 특성을 명확히 규명하고 있는 이광호 등(2008b)의 연구결과와 일치한다. 따라서, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)를 사용하여 긴 전파시간에 걸친 단파작용하에서의 수치해석결과는 실험결과 혹은 현장결과와 비교하여 단파파력의 시간변화에서 위상차를 나타낼 것으로 판단된다.

3.2 Ramsden(1996)의 실험결과와 비교 · 검토

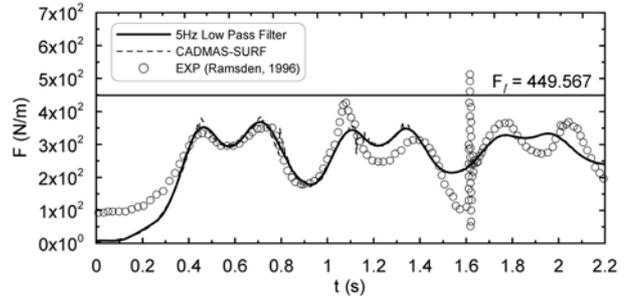
3.2.1 실험결과와 수치해석결과와의 비교

Ramsden and Raichlen(1990), Ramsden(1993, 1996)은 수평상 및 경사수조에서 고립파성단파에 의한 단파파력과 수평상에서 게이트의 급개방에 의한 단파파력의 특성을 정밀한 수리실험으로부터 면밀히 검토하였으며, 또한 단파 및 고립파에 관한 초기발생조건의 차이에 따라 발생할 수 있는 undular bore 및 turbulent bore의 작용하에서 얻어진 실험치와 매우 높은 상관을 갖는 최대작용파력 및 최대모멘트의 추정실험식을 제안하였다. 본 논문에서는 수평상 및 경사수조에서 수행된 고립파성단파에 의한 파력실험부분을 제외하고, 게이트의 급개방에 의한 단파파력의 실험부분만을 검토한다. 수리실험에 사용한 수조의 총길이는 24.049 m이고, 수조의 중앙부에 위치한 게이트로부터 상류측 고수조의 길이는 8.969 m, 게이트로부터 하류측 저수조의 길이는 15.08 m로 구성되어 있다. 보다 상세한 사항은 Ramsden(1993, 1996)을 참조바란다.

Fig. 4~6은 Ramsden(1996)의 실험결과 및 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 의한 원수치해석결과와 이에 필터링주파수로 5 Hz를 적용한 경우의 수정수치해석결과를 각각 도



(a) $h_1=22.96\text{cm}$ and $h_0=14.28\text{cm}$



(b) $h_1=24.64\text{cm}$ and $h_0=13.45\text{cm}$

Fig. 4 Comparison of experimental results of Ramsden(1996) and numerically filtered ones of CADMAS-SURF(CDIT, 2001) under the undular bore

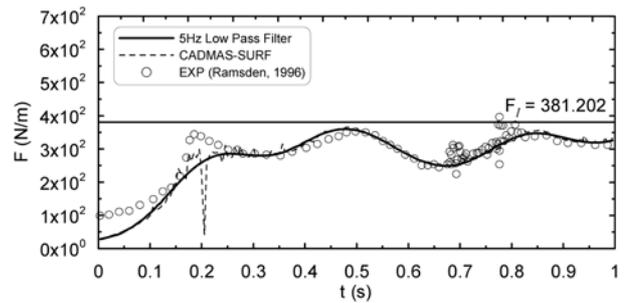


Fig. 5 Comparison of experimental results of Ramsden(1996) and numerically filtered ones of CADMAS-SURF(CDIT, 2001) under the transitional bore with $h_1=25.99\text{ cm}$ and $h_0=12.69\text{ cm}$

시 · 비교한 결과이다. Fig. 4의 경우는 undular bore에 대한 실험결과로 각각 $h_1=22.96\text{ cm}$, $h_0=14.28\text{ cm}$ 및 $h_1=24.64\text{ cm}$, $h_0=13.45\text{ cm}$ 의 경우이고, Fig. 5의 경우는 undular bore와 turbulent bore의 사이에 존재하는 transitional bore에 대한 결과로 $h_1=25.99\text{ cm}$, $h_0=12.69\text{ cm}$ 의 경우이다. 다음으로, Fig. 6은 turbulent bore에 대한 실험결과로 각각 $h_1=30.80\text{ cm}$, $h_0=10.26\text{ cm}$ 및 $h_1=45.40\text{ cm}$, $h_0=1.10\text{ cm}$ 의 경우이다. 또한, 그림 중에는 연직벽의 전면에서 최대치오름고의 발생시에 다음의 식(10)으로 주어지는 정수력(Ramsden, 1993, 1996)도 같이 나타내고 있다.

$$F_l = \frac{1}{2} \rho g (2H + h_0)^3 \quad (10)$$

여기서, F_l 은 연직벽상의 정수압분포를 적분한 단위폭당의 정수력이고, ρ 는 유체밀도, g 는 중력가속도, H 는 단파선단부의 배후측에 형성되는 일정수심부에서의 수심에 하류측의 수심 h_0 을 뺀 값, h_0 은 게이트의 하류측에서 수심을 각각 나타낸다.

식(10)이 갖는 물리적인 의미는, 높이 H 를 갖는 단파의 입사로부터 연직벽의 완전반사에 의해 $2H$ 의 중복단파가 형

성되고, 이에 연직벽의 전면에서 초기정수심 h_0 을 합한 수심에 상당하는 정수력이 발생한다는 것이다. Ramsden(1996)의 실험결과에 의하면, 수평상의 고립파성단파 및 단파의 각 실험과 경시수조에서 고립파성단파의 실험으로부터 얻어지는 대부분의 물리량은 H/h_0 에 의한 함수로 표현될 수 있고, 특히 단파의 파속, 최대처음고, 최대파력 및 최대모멘트를 파라미터 H/h_0 에 의한 실험식으로 제시하고 있다.

하지만, 수평상의 고립파성단파의 실험에서는 입사파고가 H 로 정의되고, 경시수조에서 고립파성단파의 실험에서는 고립파성단파의 선단부가 연직벽에 도달하는 순간에 선단부의 약간 배후에 형성되는 일정수심역에서의 파고가 H 로 정의되며, 게이트의 급개방에 의한 단파실험에서는 전술한 바와 같이 단파선단부의 배후측에 형성되는 일정수심부의 영역에서 수심에 하류측의 수심 h_0 을 뺀 값이 H 로 정의되기 때문에, 각각의 경우에서 H 의 정의가 상이하다. 따라서, 수평상에서의 고립파성단파실험의 경우를 제외하면, 초기조건으로부터 고립파 혹은 단파에 대한 H 의 값을 추정하기 어렵고, 결국에는 정확한 H 의 값을 추정하기 위해서는 사용자가 동일한 수리실험을 수행하여야 한다는 것으로 귀결된다. 더욱이, 수치해석으로부터는 H 를 추정하기보다는 직접 작용단파파력 등의 물리량을 추정하는 것이 보다 합리적인 것이다. 단, 특정의 파라미터에 따른 물리량의 변화를 제시하는 경우에는 파라미터로서 H/h_0 를 채용할 수도 있지만, Ramsden(1993)에서도 주어져 있는 바와 같이 일정치 H 의 값에는 단파의 전파에 따른 고주파성분이 많이 포함되고, 또한 주성분의 값도 전파과정에서 변동하므로 수치해석적으로도 정확한 H 를 추정하기에는 많은 어려움이 있을 수 있다. 그리고, Ramsden (1993)은 물리량의 시간변화에서, 단파선단부의 수위에서 하류측수심 h_0 를 뺀 수위가 $H/2$ 로 되는 파형이 연직벽이 존재하지 않는다고 가정하였을 때에 연직벽의 위치에 도달하는 시간으로 정의되는 특정의 시간치를 채용하고 있다. 이러한 특정시간치의 추정에도 전파과정에서의 차이(이광호 등, 2008b) 및 고주파성분의 포함 등을 고려하면, 역시 수치해석적으로 정확한 값을 추정하기에 많은 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치해석결과의 타당성과 유효성의 검증이라는 측면에서 H/h_0 의 변화에 따른 무차원물리량의 변화보다는 게이트의 개방을 시점으로 하여 실제의 차원을 갖는 물리량의 시간변화를 검토하는 것으로 하였다. 따라서, 차원을 가진 제한된 경우에 대해서만 검토되기 때문에 보다 일반적인 적용에는 유의를 요하며, 이의 경우에는 본 연구에서 수행되는 과정과 동일한 과정이 반복수행될 필요가 있을 것이다. 실험결과와의 비교는 전체적인 변화과정이 합리적으로 일치하는 것으로 판단되는 시점으로 전파시간축을 적절히 수평이동시킴으로서 수행되었기 때문에 제시되는 Fig. 4~6에서 시간의 원점은 특정한 시점을 나타내지 않는다.

Fig. 4(a)를 살펴보면, 고립파성단파의 경우와 유사하게 시간의 경과에 따라 파력의 완만한 변화를 나타내며, 파력의 파봉이 주기적으로 나타나는 것과 같이 보인다. 그러나, 파력의 크기는 첫 번째의 파봉에서 가장 큰 값을 나타내고 이어지는 파봉으로 갈수록 감소한다는 것을 알 수 있다. $t=0.43s$ 의 근방에서 피크파력은 입사단파에 의한 성분이고,

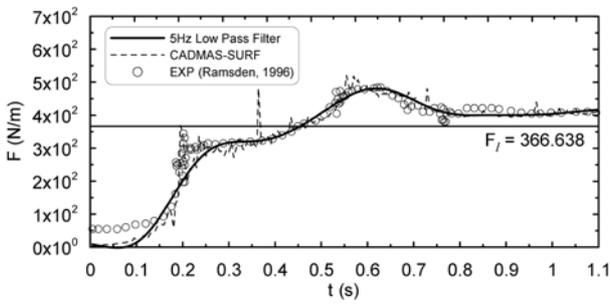
$t=0.7s$ 의 근방에서 피크파력은 반사파에 의한 성분으로, 전체적으로 최대파력은 정수력보다 매우 작다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 연직벽의 전면에서 연직상방으로 향하는 연직국부가속도성분이 크기 때문이며(Ramsden, 1993, 1996), 경사가 급한 고립파성단파의 작용하에서도 동일한 결과가 주어진다.

Fig. 4(b)를 살펴보면, 역시 전술한 Fig. 4(a)와 같이 최대파력이 정수력보다 작다는 것을 확인할 수 있고, 더불어 파력의 파봉이 주기성을 갖고 나타나는 것과 같이 보인다. Fig. 4에서 이러한 결과는 두 경우가 undular bore에 해당하기 때문이며, Fig. 4(b)가 transitional bore에 보다 가까운 경우이다. 그리고, 실험치의 경우에 $t=1.07s$ 의 근방에서 연직벽으로부터의 반사에 의해 파봉이 뽀족하게 솟아올라 쇄파되지만, 수치계산치에는 완만한 변화를 나타내고, 전체적으로 $t>1.04$ 의 영역에서 실험치와 수치계산치의 사이에 다소간의 차이가 나타난다. $t=1.63s$ 의 근방의 실험치에서 나타나는 파력의 급격한 변화는 단파에 의한 파력성분이 아니라, 연직판의 고유진동에 의한 결과로(Ramsden, 1993, 1996), 수치해석에서는 나타나지 않는다.

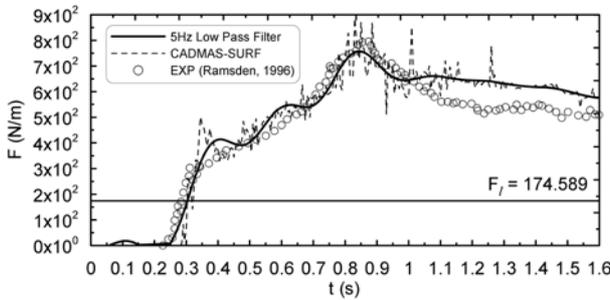
이상의 Fig. 4로부터 undular bore의 작용하에서 연직벽에 작용하는 파력은 정수력보다 파력이 작다는 것을 알 수 있고, 파력의 시간변동에는 실험치와 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치계산치의 사이에 다소의 차이가 존재한다는 것을 알 수 있다. 그러나, 최대파력의 경우는 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 결과가 실험치를 잘 재현을 하는 것으로 판단된다.

Fig. 5의 경우는 transitional bore에 관한 결과로, 단파강도(상류측수심과 하류측수심의 차이)가 전술한 Fig. 4보다 약간 강한 경우이다. $t=0.48s$ 의 근방에서 피크파력은 반사파에 의한 것으로, 입사단파의 경우의 크기와 거의 동등한 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 시간의 경과에 따른 파력의 변화과정은 전술한 undular bore의 경우와는 상이한 결과를 나타내며, 특히 단파전면에서 급격한 파력의 증가를 나타낸다. 이러한 결과는 단파강도의 차이와 이로 인한 단파전면의 급격한 수면경사에 의한 것으로 판단된다. 다음으로, 정수력과 최대파력의 크기를 비교하면, 정수력의 경우가 약간 크지만, 대략 최대파력과 거의 동등한 값을 나타내므로, 최대파력은 연직벽의 전면에서 승강하는 처오름고에 있어서 그의 최대치에 거의 대응한다는 것을 알 수 있다. 여기서, 실험결과와 수치해석결과를 비교하면, 단파선단부의 전후에서의 경우를 제외한 $t>0.25s$ 에서는 거의 완벽한 대응을 나타내는 것으로 판단된다. 단파선단부에서의 약간의 불일치는 전술한 급격한 수위변화에 따른 고주파성분의 파력이 수치필터링의 과정을 통하여 제거되었기 때문으로 판단된다. CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 수정코드를 사용하여 단파의 전파속도를 검토한 이광호 등(2008b)에 따르면, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 전파속도가 실험결과보다도 다소 느리게 나타나는 것으로 보고되어 있다.

Fig. 6은 turbulent bore에 관한 결과로, 단파강도가 전술한 undular 및 transitional bore의 경우보다 강한 경우이다. 파력의 크기는 전술한 undular bore 및 transitional bore의 경우와는 상이하게 반사파에 의한 경우가 입사단파의 경우



(a) $h_1=30.80\text{cm}$ and $h_0=10.26\text{cm}$



(b) $h_1=45.40\text{cm}$ and $h_0=1.10\text{cm}$

Fig. 6 Comparison of experimental results of Ramsden (1996) and numerically filtered ones of CADMAS-SURF(CDIT, 2001) under the turbulent bore

보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 시간의 경과에 따른 파력의 변화과정은 전술한 두 단파형태와는 상이한 결과를 나타내며, 특히 단파전면에서 보다 급격한 파력의 증가를 나타낸다. 이러한 결과는 단파강도의 보다 큰 차이와 이로 인한 단파전면의 보다 급격한 수면경사에 의한 것으로 판단된다. 정수력과 최대파력의 크기를 비교하면, 최대파력이 정수력보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

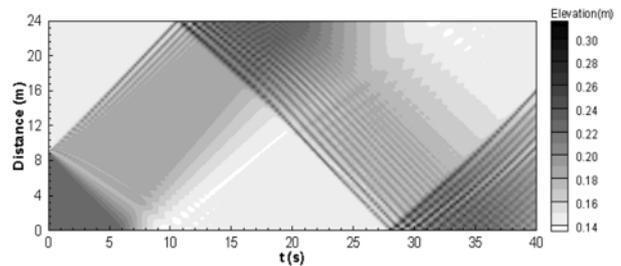
Fig. 6(a)의 경우에 실험결과와 수치해석결과를 비교하면, 전술한 transitional bore의 경우와 거의 동일한 경향을 나타내며, 역시 단파선단부의 전후에서의 경우를 제외한 $t > 0.25\text{s}$ 에서는 거의 완벽한 일치치를 나타낸다. 또한, 전술한 transitional bore의 경우와 같이 단파선단부에서의 약간의 불일치는 주로 급격한 수위변화에 따른 고주파성분의 파력이 수치필터링의 과정을 통하여 제거되었기 때문이다. 한편, $t < 0.15\text{s}$ 의 영역에서 실험결과와 수치해석결과와의 차이는 전술한 바로 주로 단파의 전파속도의 차이에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 경우와 동일하게 turbulent bore에 관한 결과로, 단파강도가 Fig. 6(a)보다 훨씬 강한 경우이다. 파력의 크기는 전술한 Fig. 6(a)의 경우와 동일하게 반사파에 의한 경우가 입사단파의 경우보다 크게 나타나지만, 그의 차이는 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 시간의 경과에 따른 파력의 변화과정은 전술한 Fig. 6(a)에서 turbulent bore의 경우와는 달리, 단파전면에서 보다 완만한 파력의 증가를 나타낸다. 이러한 결과는 undular bore의 경우와는 달리, turbulent bore의 경우에는 단파강도가 강해질수록 단파선단부의 수면경사가 작아지기 때문이다. 대신에, 전술한 Fig. 6(a)의 경우보다 반사파에 의해 발생하는 최대 파력은 정수력보다 보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 단파강도가 큰 turbulent bore의 경우에는 동수력이

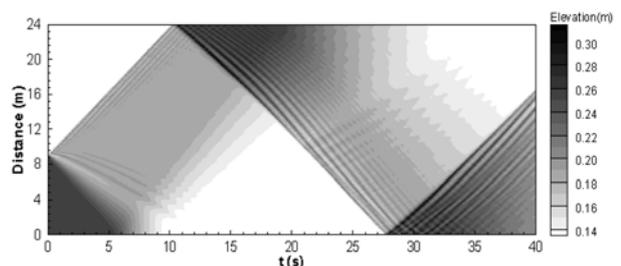
상대적으로 크게 되기 때문에 구조물에 미치는 영향이 크고, 결국에는 구조물의 파괴외도 연결될 수 있다. 여기서, 실험결과와 수치해석결과를 비교하면, $t > 1.0\text{s}$ 의 범위에서 수치해석결과가 실험치보다 다소 큰 값을 나타내는 것이 인정된다. 그러나, $t < 1.0\text{s}$ 의 영역에서는 단파강도가 매우 큰 turbulent bore라는 관점에서 보면, 두 결과치의 사이에 대응성이 매우 좋은 것으로 판단된다.

3.3. 수위변동의 시·공간분포

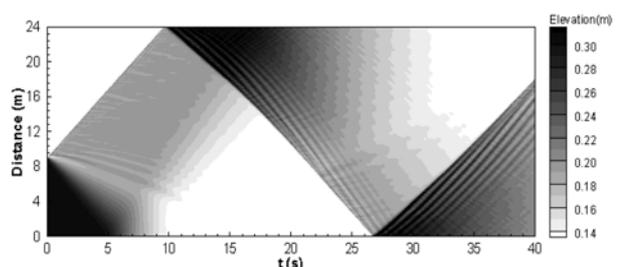
Fig. 7은 §3.2에서 검토된 Ramsden(1996)에 의한 단파의 실험과 동일한 조건하에 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)로부터 얻어진 수위의 시·공간변동에 관한 수치해석결과를 평면적으로 나타낸 것이다. 이러한 결과로부터 단파선단부의 전파속도와 전파과정, 고저수조(高貯水槽)(게이트의 상류측)에서 negative wave의 전파와 끝단에서 반사, 저저수조(低貯水槽)의 끝단에서 반사단파의 형성과 전파속도 및 전파과정, 그리고 단파와 negative wave와의 간섭현상 등에 대한 상세한 고찰이 가능하다. 여기서, Fig. 7(a)의 결과는 전술한 Fig. 4(a)의 조건에, Fig. 7(b)는 Fig. 5에, 그리고 Fig. 7(c)는 Fig. 6(a)의 조건에 각각 상당한다. 각 그림에서 수평축은 전파시간을, 연직축은 전파거리를, 두 축내의 평면에서 값은 수위를 각각 나타낸다. 또한, 평면내에서 단파선단부의 시간에 대한 경사는 전파속도를 나타내며, 시간축인 수평축의 원점은 게이트 급개방의 시점을, 전파거리축인 연직축의 원점은



(a) $h_1=22.96\text{cm}$, $h_0=14.28\text{cm}$



(b) $h_1=25.99\text{cm}$, $h_0=12.29\text{cm}$



(c) $h_1=30.80\text{cm}$, $h_0=10.26\text{cm}$

Fig. 7 Spatial and time variations of water level according to the propagation of bore

상류측 고저수조 끝단의 위치를, 연직축의 최종치는 저저수조 끝단의 위치를 각각 나타낸다.

먼저, undular bore 및 transitional bore의 발생조건을 갖는 Fig. 7(a)~(b)에서의 대표적인 경향을 기술하면, 다음과 같다. 게이트의 급개방으로부터 형성된 단파의 선단부는 일정파속으로 하류측으로 전파되고(Fig. 7(a)의 경우에 대략적인 범위 : $0 < t < 10s$, $9 < x < 24$ m), 이와 동시에 상류측에서는 negative wave가 일정파속으로 상류측으로 전파되는(Fig. 7(a)의 경우에 대략적인 범위 : $0 < t < 6s$, $0 < x < 9$ m) 양상을 볼 수 있다. 이어서, 단파선단부는 저저수조 끝단에서의 반사로 부터 상류측을 향하여 수위상승을 동반하면서 일정파속으로 전파되고(Fig. 7(a)의 경우에 대략적인 범위 : $10 < t < 17s$, $15 < x < 24$ m), 또한 반사로 인한 수위상승으로 undular bore의 특성이 보다 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. negative wave도 역시 고저수조의 끝단에서 반사되어 다시 하류측으로 전파되면서 수위는 낮아진다(Fig. 7(a)의 경우에 대략적인 범위 : $6 < t < 16s$, $0 < x < 14$ m). 특히, 파전면부에서는 지점별의 수위차이로 인하여 전파속도가 상이하게 되기 때문에 전파에 따른 파전면부의 확산이 발생되고, 반사의 초기에는(Fig. 7(a)의 경우에 대략적인 범위 : $8 < t < 12s$, $0 < x < 5$ m) undular bore의 경향이 강하게 나타나는 것을 알 수 있다.

그리고, 단파선단부와 negative wave가 교차하는 시·공간에서는(Fig. 7(a)의 경우에 대략적인 범위 : $16 < t < 18s$, $12 < x < 16$ m) 단파선단부의 전면수심이 작아지기 때문에 단파의 전파속도가 서서히 약간 빨라지는 경향을 나타낸다. 보다 시간이 경과됨에 따라 단파는 고저수조의 끝단에 반사되고(Fig. 7(a)의 경우에 대략적인 범위 : $28 < t < 40s$, $0 < x < 16$ m), negative wave와 간섭하는 시·공간에서는(Fig. 7(a)의 경우에 대략적인 범위 : $33 < t < 40s$, $6 < x < 24$ m) 전술한 바와 같이 단파의 전파속도가 서서히 약간 빨라지는 경향을 나타내며, 더불어 negative wave는 undular bore의 경향을 보다 강하게 나타내는 것을 알 수 있다.

다음으로, turbulent bore의 발생조건을 갖는 Fig. 7(c)에서 주어지는 대표적인 경향은 전술한 undular bore 및 transitional bore의 경우와 거의 유사하다. 그러나, 단파강도가 보다 강하기 때문에 단파선단부의 전파속도가 상대적으로 빨라지고, 단파선단부와 negative wave가 간섭하는 위치에서 전파속도가 빨라지는 현상이 보다 명확하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이상에서 단파선단부나 negative wave의 전파 및 반사과정에서 나타나는 undular bore의 발생과 전파속도의 변화 등은 비선형천수방정식에 특성곡선법을 적용하여 산정되는 해석해(예로, Arnason, 2005)로는 평가될 수 없는 요소들이다.

4. 결 론

본 연구에서는 지금까지 수조실험결과에 의한 연직벽에서의 단파파력을 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치실험으로 추정하였으며, 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 Matsutomi(1991) 및 Ramsden(1996)의 수조실험결과와 비교·검토하였다. 이 때, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 소스코드를 본 연구에 적합하도록 일부를 수정하였고, 이로부터

얻어진 단파파력의 원수치데이터에는 단파파력의 매우 급격한 시간적 변동을 나타내는 스파이크현상이 강하게 나타나므로, 실험치와의 정확한 비교를 위하여 그를 제거할 필요성이 있었다. 따라서, 본 연구에서는 대역필터링기법에 의한 수치필터를 채용하고, 동시에 수정수치해석결과와 실험결과에 식(9)로 정의되는 상관계수를 적용하여 상관계수가 가장 큰 5Hz 이상의 고주파성분을 필터링하였으며, 이로부터 얻어진 수치해석결과와 제시한 수조실험결과와 대비·검토하였다. 결과에 따르면, Matsutomi(1991)의 실험결과뿐만 아니라, transitional bore 및 turbulent bore에 대한 Ramsden(1993, 1996)의 수조실험결과와 전체적으로 단파파력의 시간 변화 및 그의 최대치 등에서 매우 잘 대응하며, 특히 그의 유용성이 확인된다. 한편, Ramsden(1996)의 undular bore의 경우에는 실험치와 CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치계산치에서 단파파력의 시간적 변화과정에 다소간의 차이가 나타나지만, 단파파력의 최대치는 어느 정도 잘 재현되는 것으로 판단된다. 따라서, 단파성진해일의 작용하에 있는 해안구조물의 설계에 도입될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, 단파 및 negative wave의 전파에 따른 수위의 시·공간적인 변동을 검토하는 과정에서 특성곡선법에 의한 비선형천수방정식의 해석해로는 구명되지 않는 전파속도의 변화와 반사시에 수위상승에 따른 undular bore의 재생성 등을 수치적으로 확인할 수 있다.

그러나, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)에 의한 수치결과가 전파속도에서 위상차이가 존재하며(이광호 등, 2008b), 특히 쇄파성단파의 경우에 단파선단부가 거의 연직면을 이루게 되고, 전파과정에서 다량의 기체가 혼입되어 매우 복잡한 수면거동을 나타내는 것으로 알려져 있다(Arnason, 2005; 이광호 등, 2008a). 따라서, 스파이크현상이 나타나지 않고, 더불어 기체혼입의 영향까지 정확히 평가할 수 있는 고정도의 수치해석기법을 개발·적용할 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문의 접근방법과 해석결과의 분석 및 검토 등에 있어서 Oregon State University의 Harry Yeh교수로부터 귀중한 조언을 받았다. 이에 감사드린다.

참고문헌

- 이광호, 김도삼, Yeh, H. (2008a) 단파의 전파에 따른 수위 및 유속변화의 특성에 관한 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제5B호, pp. 575-589.
- 이광호, 김창훈, 황용태, 김도삼 (2008b) CADMAS-SURF에 의한 단파의 수위 및 유속변화에 대한 예측정도의 검토. **한국해양공학회지**, 한국해양공학회, 제22권, 제5호, pp. 52-60.
- Arnason, H. (2005) *Interactions between an incident bore and a free-standing coastal structure*, Ph.D. Thesis, University of Washington, Washington, USA.
- 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. Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 52, pp. 46-50.
- ASCE (2006) *Minimum design loads for buildings and other struc-*

- tures, 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.
- CCH (2000) *Department of Planning and Permitting of Honolulu Hawaii*, Hawaii.
- CDIT (2001) *Research and Development of Numerical Wave Channel (CADMAS-SURF)*, CDIT library, No. 12, Japan.
- Cross, R.H. (1967) Tsunami surge forces, Journal 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 Mechanics*, 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.
- FEMA-CCM (2005) *Coastal Construction Manual*, FEMA 55 Report, Edition 3, FEMA.
- Fukui, Y., Nakamura, M., Shiraishi, H., and Sasaki, Y. (1963) Hydraulic study on tsunami, *Coastal Engrg in Japan*, Vol. 6, pp. 67-82.
- 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. 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. Comput. Phys.*, Vol. 206, pp. 363-393.
- Matsutomi, H. (1988) Impulsive force on walls due to the collision of a bore, *Proc. of the Japan society of civil Engineers, JSCE*, Vol. 399, No. II-10, pp. 147-155.
- 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.
- 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.
- Matsutomi, H. and Shuto, N. (1994) Tsunami inundation depth, current velocity and damage to houses, *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 41, pp. 246-250.
- 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.
- 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.
- Takahashi, T., Shuto, N., Imamura, F., and Asai, D. (1999) A movable bed model for tsunami with exchange rate between bed land and suspend layer, *Proc. of Coastal Engrg., JSCE*, Vol. 46, pp. 606-610.
- 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.
- 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: 2009.4.7/심사일: 2009.6.8/심사완료일: 2009.6.29)