공진장치에 의한 고립파의 제어에 관한 연구 A Study on the Control of Solitary Waves by Resonator

이광호* · 범성심** · 김도삼** · 박종배*** · 안성욱***

Kwang Ho Lee*, Seong Sim Beom**, Do Sam Kim**, Jong Bae Park*** and Seong Wook An***

요 지 : 본 연구에서는 고립파를 저감시키기 위한 저감공으로 본문 중에서 제시하는 공진장치를 직선배치된 기존의 방파제와 직사각형항만의 입구부에 각각 부착하고, 이에 따른 고립파의 제어능을 검토하기 위해 3차원수리모형 실험 및 3차원수치해석을 수행하였다. 수치해석에서는 3차원수치파동수조를 이용하는 3차원혼상류해석법의 TWOPM-3D를 적용하였고, 얻어진 수치해석결과와 수리실험결과를 비교·분석하여 본 수치해석법의 타당성을 검증하였다. 또한, 공진장치가 부착되지 않은 경우와 대비·고찰하여 고립파의 제어에 대한 공진장치의 제어능을 다각도로 검토한 결과, 그의 유효성을 충분히 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 공진장치, 고립파, 3차원수리모형실험, TWOPM-3D

Abstract : In this study, 3-dimensional hydraulic model experiment and 3-dimensional numerical analysis were carried out to review the control performance on the solitary waves by attaching the resonator suggested in this study to the openings of the existing rectangular harbors and breakwaters placed in a straight line. In the numerical analysis, TWOPM-3D of 3-D one-field Model for immiscible TWO-Phase flows method using 3-dimensional numerical wave tank was applied, and the validity of the numerical analysis method was verified through comparative analysis between hydraulic experimental results and numerical analysis results. In addition, the effectiveness of the resonator was identified as a result of review on the control performance to control solitary waves of the resonance devices through comparison with cases where the resonators are attached or not.

Keywords : resonator, solitary waves, 3-dimensional hydraulic model experiment, TWOPM-3D

1. 서론

2011년 3월 11일 14시 46분에 일본 동북지방의 태평양연안에서 규모 M9.0의 대지진이 발생하였으며, 이로 인한 지진해일로 심각한 침수피해를 입은 지역에서는 침수와 및 저오름높이가 6.37~21.44 m 정도로 추정되고 있다(Lee et al., 2011). 또한, 세계최대지진해일방파제로 알려져 있는釜石방파제의 북방파제가 파괴되어 지진해일의 내습시에 지진해일고의 저감을 위한 방파제 건설의 필요성에 의문이 제기되고 있는 부분도 있다. 그러나, 다음의 Fig. 1에 제시하는 바와 같이高橋 등(2011)에 의하면 釜石방파제에 의해 지진해일고가 13.7m에서 8m로 약 40% 정도로 감소되었고, 도달시간이 약 6분 정도가 지체되어 보다 긴 대피시간을 확보할 수 있어서 최악의 상황을 방지할 수 있었던 것으로 알려지고 있다. 우리나라의 경우도 일본의 근해에서 발생한 1983년 동해중부 지진해일로 인하여 동해안에 위치한 임원항에서 3~5 m의 저

Fig. 1. Inundation water level by East Japan Tsunami at Suga area of Kamaishi port(Takahashi et al., 2011).

오름(국립방재연구소, 1998; 김 등, 2007a; Cho and Lee, 2002; Sohn et al., 2009)이 발생하였으며, 김 등(2007b)의 연구에 따르면 향후 일본의 지진공학역에서 발생가능한 지진해일에 의한 큰 피해가 예상된다. 하지만, 빈번한 지진해일의 피해를 입는 일본과 같은 지진해일 상습 재해국가에 비하면 우리나라는

* (일) 나고야대학교 공학연구과 사회기반공학전공 (Departments of Civil Engineering, School of Engineering, Nagoya University)

** 한국해양대학교 토목공학과 (Corresponding author : Do Sam Kim, Department of Civil Engineering, Korea Maritime University, Dongsam-dong, Busan 606-791, kimds@hhu.ac.kr)

*** (주) 포스코건설 토목환경사업본부 토목기술그룹 (POSCO E&C, Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-732, Korea)

Fig. 2. Shape of wave resonator developed by Nakamura et al. (1995).

상대적으로 그 피해가 매우 미미한 수준으로, 지진해일방파제와 같은 초대형방파제구조물을 신설 및 구축하는 하드웨어적인 대책보다는 오히려 기존의 파랑제어구조물의 활용 및 개량을 통하여 지진해일고를 제어하는 방안이 보다 합리적인 것으로 판단된다. 이러한 방안의 일환으로 이 등(2010)은 Nakamura et al.(1996, 1998)에 의해 제안된 단주기파랑의 제어를 목적으로 한 Fig. 2와 같은 공진장치를 기존 방파제의 개구부에 부착하여 고립파의 제어에 관한 3차원적인 접근법으로부터 단주기파랑과 고립파의 동시제어에 대한 그의 유용성을 수치적으로 규명하였다. 이로부터 전술한 釜石방파제에 Fig. 2의 공진장치를 부착한 경우를 상정하면 지진해일고를 보다 더 저감시킬 수 있었을 것으로 판단된다.

이상의 기존연구에서 지진해일파(고립파)의 제어에 관한 유용성이 수치적으로만 규명된 Fig. 2의 공진장치를 기존의 직선배치된 방파제의 개구부 및 항만의 입구부에 부착하여 고립파의 3차원수리모형실험으로부터 그의 유용성을 검증하고, 더불어 3차원수치해석으로부터 얻어진 수치해석결과와 실험결과를 비교·분석하여 본 수치해석법의 타당성과 고립파 제어능의 변화특성을 다각도로 검토·논의한다. 수치해석에는 기체와 액체의 혼상동적 현상을 동일한 지배방정식으로 해석하는 3차원혼상류해석법에 기초하여 개발된 TWOPM-3D(3-D one-field Model for immiscible TWO-Phase flows)를 적용한다. 수면형의 추적에는 VOF법(Volume Of Fluid; Hirt and Nichols, 1981)을, 이산화방정식에는 SMAC법(Simplified Marker And Cell; Amsden and Harlow, 1970)을, 난류응력해석에는 LES모델(Large Eddy Simulation; Smagorisky, 1963)을 각각 적용하며, 동시에 대상의 고립파(Fenton, 1972)를 조파소스에 의해 조파하고, 파랑의 무반사에 스폰지층을 사용하는 3차원수치파동수조를 적용한다.

2. 수치해석이론

2.1 기초방정식

서로 혼합되지 않는 혼상(multi-phase)의 점성 및 비압축성 유체를 고려하면 각각의 유체는 서로 다른 상의 유체와 명확한 경계면으로 식별될 수 있다. 즉, 혼상유체의 흐름운동에서

경계면의 추적이 가능할 경우 서로 혼합되지 않는 혼상유체의 운동에 대해서 단일유체모델을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 해석영역내에 액체와 기체를 고려하는 이상류를 대상으로 한다. 단일유체모델은 각 상의 유체가 국소질량중심과 함께 이동하는 것으로 가정하여 식(1)및 식(2)~(4)와 같이 단일의 연속방정식 (1)와 각 방향의 Navier-Stokes 운동방정식 (2)~(4)의 시스템에 의해 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (-\tau_{xx} + 2\hat{v}D_{xx}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (-\tau_{xy} + 2\hat{v}D_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\tau_{xz} + 2\hat{v}D_{xz}) + \frac{F_x}{\rho} - \frac{2\hat{v}}{3} \frac{\partial q^*}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (-\tau_{yx} + 2\hat{v}D_{yx}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (-\tau_{yy} + 2\hat{v}D_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\tau_{yz} + 2\hat{v}D_{yz}) + \frac{F_y}{\rho} - \frac{2\hat{v}}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (-\tau_{zx} + 2\hat{v}D_{zx}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (-\tau_{zy} + 2\hat{v}D_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\tau_{zz} + 2\hat{v}D_{zz}) + \frac{F_z}{\rho} - \frac{2\hat{v}}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - g - \lambda w \end{aligned} \quad (4)$$

$$q^* = \begin{cases} q(y, z, t) / \delta_x & x = x_s \\ 0 & x \neq x_s \end{cases} \quad (5)$$

여기서, t 는 시간, u, v, w 는 x, y, z 방향에 대한 각 유속성분, p 는 압력, g 는 중력가속도, τ_{ij} 는 SGS(Sub-Grid Scale)에서 난류응력, D_{ij} 는 변위-응력에 대한 GS(Grid Scale)성분, F_s 는 표면장력에 의한 체적력, λ 는 부가감쇠영역에서의 감쇠계수, $\hat{\rho}$ 는 밀도, $\hat{v}$ 는 동점성계수를 각각 나타낸다. q^* 는 조파소스의 유량밀도로, 조파소스가 위치하는 $x = x_s$ 이외의 영역에서는 0으로 주어진다. δ_x 는 $x = x_s$ 를 포함하는 x 방향의 격자폭이다. 또한, 위의 식에서 밀도 및 동점성계수는 기체 혹은 액체를 결정하는 공간과 시간의 함수이다. 즉, 서로 다른 유체(여기서는 액체와 기체)는 밀도와 점성을 고려함으로써 운동방정식 (2)~(4)에 의해 표현된다. 이와 같은 단일유체모델은 계산 격자내에 다상유체의 균질혼합을 가정한 혼합유체모델과 대조적인 것으로, 경계면을 통한 각 상 사이의 상호작용을 고려할 수 있는 장점이 있다(Akiyama and Aritomi, 2002). 또한, 경계면에서 혼상유체의 거동을 밀도와 점성에 대하여 가중평균을 이용한 단일의 운동방정식을 적용함으로써 혼상류 해석에서는 복잡한 자유수면경계조건이 필요하지 않게 되며, 구조물의 천단상으로의 월류 및 월파와 같은 복잡한 수면변동에 대한 물리현상을 용이하게 재현할 수 있고, 자유수면의 처리에 대한 수치프로그램을 보다 간략하게 구성할 수 있다는 큰 장점을 지닌다. 이상의 3차원혼상류에 대한 상세한 사항은 이 등(2010)을 참고하기 바란다.

3. 3차원수리모형실험

기존의 방파제에 Nakamura et al.(1996, 1998)이 제안한 공진장치를 부착하여 단주기파랑과 고립파의 제어능을 검증한 이 등(2010)의 연구를 근거로, 기존의 직선배치된 방파제와 직사각형항만의 입구부에 공진장치를 적용하고, 고립파의 제어능에 대한 공진장치의 유용성과 수치해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 3차원수리모형실험을 수행하였다. 수리모형 실험은 일본 나고야대학 3차원조파수조 (길이 16.5 m; 폭 5.1 m; 높이 1 m)에서 수행되었으며, 조파수조 한쪽 끝에는 불규칙파랑의 조파가 가능한 피스톤형조파기가 설치되어 있다. 수조를 폭방향으로 양분하여 한쪽에만 Fig. 3에 나타난 바

와 같이 방파제와 항만을 폭방향으로 대칭배치하였으며, 방파제와 항만을 조파판으로부터 13 m 이격된 지점에 배치하였다. 모형방파제와 항만의 제원과 배치는 Fig. 3과 5에 나타난 바와 같으며, 모형방파제의 경우 방파제 배후에서 반사파의 영향을 최소화시키기 위해 배후 끝단에 소파장치를 설치하였다. 또한, 모형방파제와 항만에 부착한 공진장치의 형상과 제원은 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 모든 모형구조물은 베니어 합판으로 제작되었으며, 방수를 위하여 페인트를 칠하였다.

수리실험에서 측정항목은 공진장치의 전면, 내부, 구조물 배후에서 수위변동이며, 이는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 수조 폭방향에 대해 중심에 설치된 용량식파고계(Kenek-CHT-6-30)를 기준으로 양방향으로 각각 25 cm, 75 cm, 110 cm, 190 cm 떨

Fig. 3. Definition sketch of 3-dimensional experimental wave tank and model.

Fig. 4. Sketch of wave resonator attached to breakwater and harbor.

Fig. 5. Layout of wave gauges.

어진 지점에 설치된 용량식파고계로 측정되었으며, 따라서 총 9개의 용량식파고계로부터 수위변동을 측정하였다. 수조의 길이 방향에 대해서는 방파제의 경우 Fig. 5(a)에 Location(1)~(8)로 나타난 위치에서 용량식파고계를 파의 진행방향으로 이동시켜 수위변동을 측정하였으며, 항만의 경우 Fig. 5(b)에 Location(1)~(11)로 나타난 위치에서 용량식파고계를 이동시켜 수위변동을 측정하였다.

고립파의 조파는 Sine파를 급격하게 조파하고, 이를 순간적으로 정지시켜 파를 형성하였고, 파고 $H_i = 6.29$ cm, 6.57 cm의 고립파를 적용하였으며, 모형방파제와 모형항만 두 경우 모두 동일한 고립파조건을 적용하여 수리실험을 수행하였다. Photo 1은 수리모형실험에서 방파제 및 항만에 부착된 공진장치와 용량식파고계의 배치상황 등을 나타낸다.

4. 수리모형실험결과와 수치해석결과의 비교

이상과 같이 공진장치에 의한 고립파의 제어능을 검토하기 위하여 수리모형실험과 수치해석을 수행하였다. 전술한 바와 같이 수치해석은 기체와 액체의 혼상동적현상을 동일한 지배방정식으로 해석하는 3차원혼상류이론에 기초한 TWOPM-3D를 적용하였고, 수리모형실험결과의 재현 및 공진장치의 유용성을 검토하기 위하여 방파제와 항만 두 경우 모두 조파지점으로부터 구조물까지의 이격거리, 구조물의 제원 및 배치는 수리모형실험에서와 동일한 조건을 적용하였다. 수리실험에 적용한 구조물의 제원 및 배치, 수위변동의 측정위치는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 수조폭의 중앙에 놓인 Wave gauge No. ⑤를 기준으로 양방향으로 대칭으로 배치되었으며, 따라서 구조물

(a) Breakwater : no resonator

(b) Breakwater : resonator

(c) Harbor : no resonator

(d) Harbor : resonator

Photo 1. Arrangement of breakwater, harbor, resonator and wave gauges.

정위치에서 수위변동도 대칭적으로 주어지므로 수치해석에서 계산시간의 관계상 수조폭의 반만을 대상으로 해석을 수행하였다. 입사파조건은 수리모형실험과 동일한 조건을 적용하였다.

4.1 방파제에서 고립파의 제어

이하의 Fig. 6~9는 입사파고 $H_i = 6.57$ cm인 경우에 기존의 방파제에 대한 공진장치의 제어능을 확인하기 위해 Fig. 5(a)에서 나타난 바와 같이 공진장치 개구부의 중심점인 Wave gauge No. ⑤를 공진장치의 전면위치(Location (1), (3)), 내부(Location (5)) 및 배후(Location (7))로 이동시킨 경우에 시간에 따른 수위변동을 나타낸 결과이다.

Fig. 6은 공진장치의 부착전·후의 경우에 공진장치의 전면위치(Location (1))에서 수위변동을 나타낸 결과로, 공진장치가 있는 경우와 공진장치가 없는 경우 모두 대략 7sec에 입사파가 도달한다. 공진장치가 없는 경우에 반사파는 10.5sec 정도에서 나타나며, 공진장치가 부착된 경우는 9sec 근방에서 공진장치 전면부에서의 반사파가 나타나고, 10.5sec 정도에서 공진장치내의 방파제 전면부에서 반사파가 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서, Location (1)에서는 공진장치 전면부에서 반사파보다 공진장치내의 방파제 전면부에서의 반사파가 더 큰 수위변동을 나타낸 것은 결국 방파제 배후로 전달되는 파랑 에너지가 작다는 것을 의미하므로 공진장치의 유용성을 확인할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 공진장치를 부착한 경우에는 상당한 시간이 경과되어도 작은 수면동요가 지속되는 것을 알 수 있다. 이는 방파제뿐만 아니라 방파제의 전면에 설치된 공진

장치의 전면과 내부로부터 발생하는 반사파 및 그들의 위상차에 의한 중첩파의 영향으로 판단된다. 그리고, 22sec 근방에서 두 결과치 사이에 나타나는 차이는 고립파의 조파 차이에 기인한다. 실험에서 고립파의 조파는 전술한 바와 같이 Sine 파를 급격하게 정지하여 고립파를 생성시켰기 때문에 실제의 파형에서는 정수면하의 수위변동이 약간 포함된 반면에, 수치해석에서는 정수면상으로 고립파가 생성되었다. 따라서, 정수면하의 수위가 시간의 경과에 따른 진행 및 반사과정에서 정수면상 혹은 정수면하로 나타나기 때문에 수치해석결과와 다소 차이를 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 공진장치의 부착전·후의 경우에 공진장치의 개구부에서 수위변동을 나타내고 있다. 공진장치의 부착후의 결과를 살펴보면 Location (3)은 공진장치의 바로 전면부의 개구부이기 때문에 전면부에서 반사회절파의 영향과 공진장치 내부의 방파제에 의한 반사파의 영향이 대략 9.3sec의 전후에서 중첩되어 나타나는 것을 알 수 있고, 반면에 공진장치가 없는 경우에는 대략 9.3sec 근방에서 방파제에 의한 하나의 반사파가 주어지는 것을 알 수 있다.

방파제의 개구부위치인 Location (5)에서 수위변동을 나타내는 Fig. 8을 살펴보면 공진장치가 부착된 경우는 방파제로 유입되는 입사파와 공진장치내의 방파제에 의한 반사회절파가 1.2sec 정도의 차이로 중첩되는 것을 알 수 있고, 이 지점은 방파제의 배후로 전달되는 파고의 크기를 결정짓는 요소로, 공진장치에 의한 고립파의 저감에 대한 유용성을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 5(a)의 Location (7)에서 공진장치의 부착전·

Fig. 6. Time variation of water level at location (1) in case of breakwater ($H_i = 6.57$ cm).

Fig. 7. Time variation of water level at location (3) in case of breakwater ($H_i = 6.57$ cm).

Fig. 8. Time variation of water level at location (5) in case of breakwater ($H_i = 6.57$ cm).

Fig. 9. Time variation of water level at location (7) in case of breakwater ($H_i = 6.57$ cm).

후에서 수위변동을 나타내며, 이 지점은 방파제 배후에 위치한다. 결과를 살펴보면 공진장치에 의한 파랑에너지의 포획 및 방파제 배후로 파랑에너지의 수평확산에 따른 회절영향으로 인하여 Fig. 8의 경우보다 수위변동이 감소한 것을 확인할 수

있고, 특히 공진장치에 의해 고립파의 파고가 저감되고, 시간의 경과에 따라 작은 수위변동도 상당히 줄어든 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 방파제에 공진장치 부착 전·후의 수리모형실험과 수치해석의 결과를 비교하면 고립파의 조파방법에 다른 차이로 인하여 반사파가 나타나는 시간 이후에 두 결과에서 약간 차이를 가지는 것을 확인할 수 있으나, 입사파 및 반사파의 최대수위상승고와 위상이 시간의 경과에 따라 대체적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있고, 이로부터 수치해석의 타당성을 검증할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 공진장치가 부착된 경우가 방파제의 배후에서 수위변동이 작기 때문에 공진장치의 유용성을 확인할 수 있다.

4.2 항만에서 고립파의 제어

Fig. 10~14는 입사파고 $H_i = 6.57$ cm인 경우 기존의 직사각형항만에 공진장치를 부착한 경우에 수치해석결과의 타당성과 공진장치의 유용성을 확인하기 위하여 Fig. 5(b)에서 나타낸 바와 같이 수조폭의 중심인 Wave gauge No. ⑤를 공진장치의 전면, 내부 및 배후로 이동시킨 경우에 시간에 따른 고립파의 수위변동을 나타낸 결과이다.

먼저, Fig. 10은 Fig. 5(b)의 Location (1)에서 시간에 따른 수위변동으로, 이는 공진장치의 전면에서 180 cm 떨어진 위치에서 수위변동을 나타낸다. 결과를 살펴보면 공진장치의 부착 전·후 모두 대략 7sec 정도에 입사파가 도달한다. 공진장치가 없는 경우는 11sec 근방에서 항만입구부의 양측 안벽으로부터 반사파가 나타나는 것을 확인할 수 있고, 공진장치가 부

Fig. 10. Time variation of water level at location (1) in case of harbor ($H_i = 6.57$ cm).

착된 경우는 10.9sec 근방에서 공진장치의 전면부에서 반사파가 크게 나타나고, 그와 거의 동시에 공진장치내의 항만입구부의 양측 안벽으로부터 반사파가 상대적으로 작게 중첩되는 것을 확인할 수 있다. 항내 끝단부에서 반사파는 대략 14sec 근방에서 주어지고, 공진장치가 부착된 경우가 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 이는 끝단부에서 반사된 파가 공진장치를 통과하면서 수평분산되고 포획되어 Location (1)로 재입사되는 파에너지가 많이 저장되었기 때문으로 판단된다. 그리고, 대략 20sec 이후에서 두 결과치 사이에 나타나는 차이는 전술한 바와 같이 고립파의 조파 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 Fig. 5(b)의 Location (3)에서 공진장치의 부착 전·후에서 수위변동을 나타내며, 이는 공진장치의 개구부에서 수위변동을 나타낸다. 결과를 살펴보면 약 7.5sec에 입사파가 도달한 후에 공진장치를 부착하지 않았을 경우에는 약 8.9sec에 항만입구부의 양측 안벽으로부터 발생하는 반사파에 의해 수위변동이 입사파고와 거의 동일한 크기로 나타나고, 대략 12.1sec 근방에서 항내의 끝단부에서 반사파가 나타나는 것을 볼 수 있다. 한편, 공진장치를 부착하였을 경우에는 대략 7.5sec에 입사파가 도달하고, 약 9.0sec 근방에서 공진장치의 전면부에서 반사회절파와 공진장치내 항만입구부의 양측 안벽으로부터 반사파가 거의 중첩되어 나타나는 것을 확인할 수 있고, 특히 12.1sec 근방에서 주어지는 항내 끝단부에서 반사파는 크게 감소한 것을 알 수 있다. 이는 항내 끝단부에서 반사파의 에너지가 공진장치내에서 수평분산되고 포획되기 때문으로 판단된다.

Fig. 11. Time variation of water level at location (3) in case of harbor ($H_i = 6.57$ cm).

Fig. 12. Time variation of water level at location (5) in case of harbor ($H_i = 6.57$ cm).

항만입구부에서 공진장치의 부착 전·후의 수위변동을 나타내는 Fig. 12를 살펴보면 대략 9.4sec에 입사파가 도달하고, 공진장치가 없는 경우에는 약 12.3sec 전후로 항내 끝단부로부터 반사파에 의한 큰 수위변동을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 공진장치를 부착한 경우에는 입사파와 공진장치내 항만입구부의 양측 안벽으로부터 반사회절파가 대략 1.5sec 차이로 거의 동시에 중첩되어 나타나며, 12.5sec 근방에서 항내 끝단부에서 반사파가 입사파보다 큰 수위변동을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 지진해일파에 의한 부진동의 가능성을 나타낸다. Location (5)에서 파고는 항내로 바로 입사하므로 Fig. 12의 결과로부터 공진장치가 부착된 경우가 항내에서 보다 작은 파고로 된다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 13, 14는 Fig. 5(b)의 Location (7)과 (9)에서 공진장치 부착 전·후의 수위변동을 나타내며, 이 지점은 항내에 위치한다. Fig. 13에서 공진장치를 부착한 경우에 9.5sec 근방에서 나타나는 반사파는 공진장치내 항만입구부의 양측 안벽으로부터 반사회절되는 성분이고, 11.5sec 근방에서 나타나는 반사파는 항내 끝단부에서 반사파이다. 반면에, Fig. 14의 경우에 10.7sec 근방의 반사파는 항내 끝단부에서 반사파이고, 12sec 근방에서 반사파는 공진장치내 항만입구부의 양측 안벽으로부터 반사회절되는 성분이다. 이와 같은 결과는 Fig. 14의 위치가 보다 항내측의 지점이기 때문이다. 그리고, 공진장치가 없는 경우에는 두 번째의 피크가 항내 끝단부에서 반사파를 각각 나타낸다. 여기서, Fig. 13, 14에서 공진장치의 유무에 따른 항내수위변동을 비교하면 공진장치가 있는 경우가 보다 작은 값

Fig. 13. Time variation of water level at location (7) in case of harbor ($H_i = 6.57$ cm).

Fig. 14. Time variation of water level at location (9) in case of harbor ($H_i = 6.57$ cm).

을 나타내므로 기존 항만에 대한 공진장치의 유용성을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 항만에 공진장치 부착전·후에 있어서 수리모형실험과 수치해석의 결과를 비교하면 수리실험시 Sine

파의 급격한 조파를 순간적으로 정지하여 고립파를 발생시켰기 때문에 전반적으로 수치해석결과와 실험결과에서 약간 차이가 나타나고, 특히 20sec 이후의 수위변동에 다소의 영향이 포함되는 것으로 여겨진다. 그러나, 입사파의 최대수위상승고와 위상이 전반적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 수치해석의 타당성을 검증할 수 있고, 더불어 공진장치의 제어능을 확인할 수 있다.

4.3 중앙선을 따른 공간파고분포

기존의 방파제와 항만에 공진장치를 적용하였을 경우 중앙선을 따른 공간파고분포로부터 공진장치에 의한 고립파의 제어능을 검토한다. Fig. 5(a), (b)에 나타난 바와 같은 수조폭의 중심점인 Wave gauge No. ⑤에서 얻어진 파고를 파의 진행 방향에 따라 공진장치의 전면, 내부 및 배후에 적용하였다.

4.3.1 방파제

Fig. 15, 16은 직선배치된 기존 방파제에 공진장치를 적용하였을 경우 입사파고 $H_i = 6.29$ cm, $H_i = 6.57$ cm일 때 각 측정지점에서 무차원파고를 나타낸 결과이다.

먼저, 입사파고 $H_i = 6.29$ cm일 때의 공간파고분포를 나타내는 Fig. 15를 살펴보면 Location (1)~(3)은 공진장치 전면에서의 무차원파고분포를 나타내며, 공진장치 개구부인 Location (3)

Fig. 15. Spatial distribution of non-dimensional solitary wave height along centerline for breakwater ($H_i = 6.29$ cm).

Fig. 16. Spatial distribution of non-dimensional solitary wave height along centerline for breakwater ($H_i = 6.57$ cm).

의 경우 수리모형실험과 수치해석의 무차원파고값은 공진장치 부착후에 약간 더 큰 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 공진장치의 전면부에 의한 반사회절파가 입사파성분에 바로 중첩된 결과이다. 공진장치의 내부인 Location (4), (5)와 구조물의 배후인 Location (6)~(8)에서의 무차원파고는 공진장치 부착후 감소하며, 구조물 배후인 Location (6)~(8)의 경우 공진장치 부착후 무차원파고값이 평균 40% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 공진장치에 의해 파랑에너지가 포획되어 무차원파고값이 감소한 것으로 판단된다. 또한, 수치해석과 수리모형실험 두 결과를 비교하면 항내에서 수리실험에 의한 무차원파고값이 약간 크게 나타난다. 이는 수치해석에서 바닥마찰이 고려되지 않은 것이 원인 중의 하나로 판단된다. 그러나, 수리모형실험과 수치해석의 무차원파고값에서 차이가 크지 않으므로 수치해석이 수리모형실험을 잘 재현하고 있다고 판단된다.

다음으로, 입사파고 $H_i = 6.57$ cm일 때의 공간파고분포를 나타내는 Fig. 16을 살펴보면 Location (1)~(3)은 공진장치 전면에서 무차원파고분포를 나타내며, Location (1), (3)에서 공진장치로 인한 반사회절파의 영향이 입사파에 중첩되어 무차원파고값이 크진 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Fig. 15의 경우와는 상이한 것으로, 고립파의 전파속도는 수위의 평방근에 비례하기 때문에 Fig. 16의 경우가 파고가 크므로 전파속도가 빠르고, 이에 따라 입사파에 중첩되는 반사파의 영향이 빨리 나타나기 때문으로 판단된다. 특히, 공진장치 개구부인 Location (3)의 경우에 이러한 현상이 현저하게 나타난다. 공진장치의 내부인 Location (4), (5)와 구조물의 배후인 Location (6)~(8)에서의 무차원파고는 공진장치 부착후에 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 구조물 배후인 Location (6)~(8)의 경우 공진장치 부착후에 무차원파고값이 평균 38% 정도 감소하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 전술한 바와 같이 공진장치에 의한 파랑에너지의 포획 및 수평확산에 따른 반사회절의 영향으로 보여진다. 그리고, 대체적으로 수치해석결과가 수리모형실험결과를 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

4.3.2 항만

입사파고 $H_i = 6.29$ cm, $H_i = 6.57$ cm 일 때 기존의 직사각형항만에 공진장치를 적용하였을 경우 무차원파고의 공간분포를 나타낸 결과가 Fig. 17, 18에 제시되어 있다.

먼저, 입사파고 $H_i = 6.29$ cm일 때의 공간파고분포를 나타내는 Fig. 17을 살펴보면 Location (1)~(3)은 공진장치 전면에서의 무차원파고분포를 나타내며, 공진장치의 부착후에 무차원파고값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 공진장치의 전면에서 반사회절파에 의한 중복파의 영향으로, 공진장치가 부착된 경우가 입사파에 반사회절파의 영향이 보다 빨리 전파되기 때문이다. 공진장치의 내부인 Location (4), (5)에서의 무차원파고는 공진장치 부착후 크게 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 전술한 바와 같이 공진장치의 전면부에서 보다 큰 반사로 공

Fig. 17. Spatial distribution of non-dimensional solitary wave height along centerline for harbor ($H_i = 6.29$ cm).

Fig. 18. Spatial distribution of non-dimensional solitary wave height along centerline for harbor ($H_i = 6.57$ cm).

진장치로 유입되는 파랑에너지가 작고, 더불어 공진장치내에서 파랑에너지의 수평분산에 의한 결과로 판단된다. 항의 내부인 Location (6)~(11)에서의 무차원파고, 특히 Location (9)~(11)에서 무차원파고는 급격히 증가하는 것을 볼 수 있고, 공진장치의 부착후에 평균 36% 정도 감소되는 결과를 나타낸다. Location (9)~(11)의 경우 항내측의 끝단부에서 반사파 영향으로 중복파의 배 위치에 근접하기 때문에 Location (6)~(8)보다 무차원파고값이 증가하는 것으로 판단된다.

다음으로, 입사파고 $H_i = 6.5$ cm일 때의 공간파고분포를 나타내는 Fig. 18을 살펴보면 Location (1)~(3)은 공진장치 전면에서의 무차원파고분포를 나타내며, 이는 전술한 바와 같이 공진장치에 의한 반사회절파에 영향으로 무차원파고값의 증가하는 것으로 판단된다. 공진장치의 내부인 Location (4), (5)에서의 무차원파고는 공진장치 부착후 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 Location (4), (5)의 경우 공진장치 전면부에서 큰 반사파로 인하여 공진장치내로 유입되는 파랑에너지가 상대적으로 작고, 공진장치내에서 수평분산효과로 나타나는 결과이다. 항의 내부인 Location (6)~(11)에서의 무차원파고는 공진장치의 부착후에 평균 35% 정도 감소되는 것을 나타내며, Location (9)~(11)의 경우 전술한 바와 같이 항내 안벽에서 형성되는 중복파의 배 위치에 근접되어 있기 때문에 무차원파고값이 Location (6)~(8)에 비해 증가하는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 공진장치를 기존의 직선배치의 방파제와

직사각형항만에 적용하였을 경우 고립파의 에너지저감공으로서 충분한 유용성을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 또한 수리모형실험과 수치해석의 결과를 비교하면 약간의 차이는 인정되지만 전체적으로 합리적인 일치를 나타내는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 이 등(2010)의 연구를 바탕으로 하여 직선으로 배치된 기존의 방파제와 직사각형항만에 고립파를 저감시키기 위한 저감공으로 Nakamura et al.(1996, 1998)에 의해 제안된 공진현상으로부터 단주기의 입사파랑에너지를 포획하여 배후로 전달되는 파랑에너지를 저감시키는 특성을 갖는 것으로 알려진 기존의 공진장치를 부착하는 공법을 검토하였다. 고립파의 제어에 관한 공진장치의 유용성을 확인하기 위하여 3차원 수리모형실험을 수행하였고, 동시에 3차원수치파동수조를 이용하는 TWOPM-3D모델의 타당성을 검증하기 위하여 수리실험결과와 비교·분석하였다. 특히, 고립파에 대해서 입사파고의 변화에 따라 공진장치의 전면, 내부 및 배후에서 공진장치가 없는 경우와 대비하면서 공진장치의 제어능을 검토하였다. 이로부터 직선배치의 기존 방파제와 직사각형항만에 고립파를 입사시킨 경우 공진장치의 부착후에 항내에서의 무차원파고값이 감소하는 결과를 확인할 수 있었으며, 이로부터 고립파로 근사되는 지진해일파의 에너지저감공으로서 충분한 유용성을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 그리고, 공진장치의 유·무에 따른 3차원수리모형실험결과와 3차원수치해석결과를 비교하면 수리실험에서 고립파의 조파방법에 따른 차이 및 수치해석에서 바닥마찰의 비고려로 두 결과에서 다소 차이는 존재하지만 두 결과가 합리적으로 일치하므로 본 수치해석법의 타당성이 검증되는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립방재연구소 (1998). 동해안에서의 쓰나미 위험도 평가. 국립방재연구소, 연구보고서, NIDP-98-06.
- 김도삼, 김지민, 이광호 (2007a). 동해연안에 영향을 미친 지진해일의 수치시뮬레이션. 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 21(6), 72-80.
- 김도삼, 김지민, 이광호, 손병규 (2007b). 일본 지진공백역에서의 지진해일이 우리나라의 남동연안에 미치는 영향분석. 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 21(6), 64-71.
- 이광호, 정성호, 정진우, 김도삼 (2010). 공진장치를 이용한 단주기파랑과 고립파의 제어. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 30(1B), 89-100.
- Lee, K.H., Tomita, T., Kawasaki, K., Nakamura, T. and Suzuki, S. (2011). 동일본 대지진에 따른 지진해일 피해 현장조사를 다녀와서. 대한토목학회지, 대한토목학회, 59(11), 12-20.
- Akiyama, M. and Aritomi, M. (2002). Advanced numerical analysis of two-phase flow dynamics -multi-dimensional flow analysis-. Corona Publishing Co., LTD. Tokyo, Japan.
- Amsden, A.A. and Harlow, F.H. (1970). The SMAC method : a numerical technique for calculating incompressible fluid flow. Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-4370, Los Alamos, N.M.
- Brorsen, M. and Larsen, J. (1987). Source generation of nonlinear gravity waves with boundary integral equation method. Coastal Engineering, 11, 93-113.
- Cho, Y.S. and Lee, H. J. (2002). Numerical simulations of 1983 central East Sea tsunami at Imwon: 1. Propagation across the east sea. J. of Korea Water Resources Association, 34(4), 427-436.
- Fenton, J. (1972). A ninth-order solution for the solitary wave. J. Fluid Mech., 53(2), 257-271.
- Hirt, C. W and Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comput. Phys., 39, 201-225.
- Nakamura, T., Mochizuki, H. and Morita S. (1996). Performance of a resonator designed by the wave filter theory-applicability to a harbor. Proceedings of the 25th ICCE, ASCE, 1280-1292.
- Nakamura, T., Morita S. and Kato, K. (1998). Wave protection performance of a resonator founded at harbor entrance. Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, 45, 721-725.
- Sohn, D. H., Ha, T. M. and Cho, Y. S. (2009). Distant tsunami simulation with corrected dispersion effects. Coastal Engrg. J., 51(2), 123-141.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations. Mon. Weath. Rev., 91(3), 99-164.
- 高橋重雄, 根本貴史, 富田孝史, 河合弘泰 (2011). 東日本大震災における津波と港湾施設等の被害. 土木学会誌, JSCE, 96(7), 2-8.

원고접수일: 2012년 2월 3일
수정본채택: 2012년 2월 11일
게재확정일: 2012년 2월 11일