



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

공진장치를 이용한 단주기파랑과
지진해일파(고립파)의 제어

Control of Short-period Waves and Tsunami (Solitary Waves)
due to Resonator

指導教授 金 度 三



2010年 2月

韓國海洋大學校 海事產業大學院

土木環境工學科

沈 榮 宰

Control of Short-period Waves and Tsunami (Solitary Waves)
due to Resonator

by
Yeong Jae Sim

Department of Civil and Environment System Engineering
Graduate School of Maritime Industrial Studies
Korea Maritime University



The performance evaluation of a conventional Wave Resonator at the entrance of harbors against solitary wave has been performed using 3D numerical wave flume. A wave resonator has been designed for the attenuation of the transmitted wave energy by trapping the short periodic incident waves only. In this study, however, the controlled performance of the wave resonator by its various width has been numerically investigated for solitary waves. Source distribution method based on the Green function and the 3D one-field Model for immiscible TWO-Phase flows (TWOPM-3D) using 3D numerical wave flume were used for the short-periodic waves and the solitary waves, respectively, and these models were verified through the comparisons with the previous experimental and numerical results by other researchers. It was confirmed that the wave resonator is effective enough to control the solitary waves as well as the periodic waves when it compares with the case of no resonance system. Further, it was found that there is the optimal width of a wave resonator to attenuate the target solitary waves.

공진장치를 이용한 단주기파랑과 지진해일파(고립파)의 제어

심 영 재

韓國海洋大學校 海事産業大學院

土木環境工學科



본 연구에서는 고파랑의 단주기파랑과 고립파를 동시에 저감시키기 위한 저감공으로 단주기파랑에 대해 기연구개발된 공진장치를 시설의 방파제 항구부에 부착하는 공법을 검토하였다. 이와 같은 저감공은 공진현상으로부터 단주기파랑의 입사에너지를 포획하여 시설의 방파제 배후로 전달되는 파랑에너지를 저감시키는 특성을 갖는다. 수치해석에 있어서 단주기파랑에 대해서는 연직선Green함수에 기초한 특이점분포법을, 고립파에 대해서는 3차원수치파동수로를 이용하는 3차원혼상류해석법을 각각 적용하였고, 기존의 수치해석결과 및 실험결과와 비교·분석하여 본 수치해석법의 타당성을 검증하였다. 이로부터 공진장치가 없는 경우와 대비·검토하여 단주기파랑 및 고립파의 제어에 대한 공진장치의 제어능을 다각도로 검토한 결과, 그의 유효성을 충분히 확인할 수 있었다. 그리고, 제어대상의 고립파에 대해 공진장치의 최적치수가 존재한다는 사실을 확인할 수 있었다.

目 次

ABSTRACT	i
요약	ii
目次	iii
LIST OF FIGURES	v
LIST OF PHOTOS	v
1. 서론	1
1.1 본 연구의 배경과 목적	1
1.2 본 연구의 구성	4
2. 수치해석	5
2.1 공진장치에 의한 평면파랑의 해석법	5
2.2 3차원고립파에 대한 3차원혼상류해석법의 개요	7
2.2.1 고립파의 수치조파	7
2.2.2 3차원혼상류해석법의 개요	10
3. 수치해석결과의 검증	14
3.1 단주기평면파랑에 대한 특이점분포해석법의 검증	14
3.2 고립파에 대한 3차원혼상류해석법 및 3차원수치파동수로의 검증	14
3.2.1 고립파의 조파	14
3.2.2 고립파의 파랑변형	16
4. 수치해석결과	18
4.1 공진장치에 의한 단주기파랑의 제어	18
4.2 공진장치에 의한 고립파의 제어	19
5. 결론	28



LIST OF FIGURES

Fig. 1 Shape of wave resonator proposed by Nakamura et al.(1995)	3
Fig. 2 Definition sketch of a vertical surface-piercing structure in the 3-dimensional wave field	7
Fig. 3 Definition sketch of 3-dimensional numerical wave tank	10
Fig. 4 Non-dimensional wave force for isolated circular cylinder	14
Fig. 5 Time variation of solitary wave profile	15
Fig. 6 Effective length and volume of solitary wave	16
Fig. 7 Comparison of diffraction coefficient between experimental data and numerical result for straight vertical wall($H_i/h = 0.27$)	17
Fig. 8 Spatial distribution of non-dimensional wave height H/H_i ($T=1.4$ sec)	18
Fig. 9 Spatial distribution of non-dimensional wave height H/H_i ($T=1.7$ sec)	19
Fig. 10 Measuring points of water level fluctuation	21
Fig. 11 Time variation of water level at point X_2 ($H_i/h=0.13$, $B/h = 7$)	21
Fig. 12 Time variation of water level at point X_3 ($H_i/h=0.13$, $B/h = 7$)	23
Fig. 13 Time variation of water level at point X_7 ($H_i/h=0.13$)	24
Fig. 14 Time variation of water level at point X_8 ($H_i/h=0.13$)	25
Fig. 15 Time variation of water level at point X_8 according to the change of the width of resonator B ($H_i/h=0.13$, $L/L_e = 0.31$)	25
Fig. 16 Time variation of water level around and inside the resonator ($B/h = 7$, $L/h = 3.75$, $H_i/h = 0.13$)	26
Fig. 17 Transmission coefficient according to the change of effective distance ($B/h = 7$, $L/h = 3.75$)	27

LIST OF PHOTOS

Photo 1 Wave resonator constructed at Pier J of Long Beach port to attenuate excessive ship motions (http://earth.google.com)	3
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

1. 서론

1.1 본 연구의 배경과 목적

지진해일에 의한 재해는 태풍이나 폭풍해일과 같은 기상재해에 비해 발생빈도는 낮지만 일단 지진해일이 발생하는 경우에는 막대한 피해를 초래할 수 있고, 이는 발생하는 계절, 시간, 지진의 성질 및 해안지형 등에 크게 좌우되는 것으로도 잘 알려져 있다. 2004년 12월 26일에 발생한 M9.0의 인도네시아 수마트라 지진은 1960년 M9.5의 칠레지진 이후에 급세기에 발생한 두 번째의 M9.0 이상의 대지진으로 지진해일에 의한 사망자가 총 28만3천여명, 실종자가 1만4천여명으로 추정되고 있다. 특히, 최대피해지로 알려진 수마트라섬의 북단에 위치한 반다아체주의 경우는 12만6천명의 사망자와 3만7천명의 실종자가 발생한 것으로 보고되어 있다. 우리나라의 경우도 일본의 근해에서 발생한 1983년 동해 중부 지진해일과 1993년 북해도 남서 외해 지진해일로 인하여 동해안에 위치한 임원항에서 3~5m의 처오름(국립방재연구소, 1998; 김도삼 등, 2007a; Cho and Lee, 2002; Sohn et al., 2009)이 발생하였으며, 김도삼 등(2007b)의 연구에 따르면 향후 일본의 지진공백역에서 발생가능한 지진해일에 의한 큰 피해가 예상된다. 하지만, 빈번한 지진해일의 피해를 경험하는 일본과 같은 지진해일 상습 재해국가에 비하면 우리나라는 상대적으로 그 피해가 미미한 수준으로 판단된다. 따라서, 지진해일방파제와 같은 초대형방재구조물의 새로운 구축과 같은 하드웨어적인 대책보다는 오히려 기존의 파랑제어구조물의 활용 및 개량을 통하여 고파랑의 단주기파랑과 지진해일을 동시에 제어하고, 지진해일의 교육, 피난지도 및 침수예상도의 제작과 같은 소프트웨어적인 대책에 의한 연안방재계획을 수립하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단된다. 이의 일환으로 정성호 등(2009) 및 이광호 등(2009)은 단주기파랑과 고립파로 근사될 수 있는 조건하의 지진해일을 동시에 제어할 수 있는 저감공으로 이열잠제를 제안하였고, 이열잠제의 이격거리를 적절히 조절함으로써 단주기파랑과 대상의 고립파를 약 50% 정도까지 제어할 수 있음을 확인하였다.

여기서, Silva, et al.(2000) 혹은 Goring(1978) 등의 연구결과에 따르면 Fourier해석으로부터 지진해일에는 고립파의 조화성분이 얻어지고, 지진해일은 고립파 혹은 솔리톤으로 근사적으로 잘 표현될 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 지진해일은 분산효과와 비선형

현상의 균형에 의해 1m 전후의 크기를 갖지만 크기의 큰 변화없이 전파되며, 천해역에 도달하는 경우에는 파속은 느려지고 파장은 짧아지며 파고는 높아지게 된다. 이러한 지진해일에 의한 연안에서 처오름, 세굴 및 침수 등을 실험적으로 혹은 수치적으로 검토하기 위하여 고립파가 일반적으로 적용된다(예로, Synolakis, 1986, 1987; Zelt, 1991a, 1991b; Li, Y., 2000; Tonkin et al., 2003). 더불어, 연안으로 근접에 따라 발생하는 지진해일에서 단주기파랑으로의 분열현상은 1983년 동해 중부 지진해일과 인도네시아 수마트라 지진해일에서 관측된 것으로, 이러한 현상은 지진해일을 고립파 혹은 undular bore의 모델로 근사될 수 있다는 근거로 제시된다(Li and Raichlen, 2003).

이상의 지진해일과 고립파의 관계로부터 본 연구에서는 고립파로 근사될 수 있는 조건 하의 지진해일에 대해 기존의 직립방파제나 혼성방파제 등에 Fig. 1과 같은 공진장치를 부착하여 단주기파랑뿐만 아니라 고립파도 동시에 저감시키는 공법을 강구한다. Nakamura et al.(1996, 1998)는 단주기파랑의 파랑제어를 목적으로 기존의 중력식구조물에 Fig. 2의 공진장치를 부착하여 그의 파랑제어성능을 확인하였고, Poon et al.(1998)은 미국 Long Beach항내에 1992년에 건설된 J부두에서 1분 오더의 선박의 장주기운동(surge motion)을 제어하기 위하여 Nakamura et al.(1996, 1998)과 동일한 공진장치를 평면수리실험을 통하여 검토하였고, 실제로 Photo 1과 같은 공진장치가 항입구부에 설치된 예가 있다. Fig. 1의 공진장치를 단주기 및 장주기파랑 저감공으로 적용한 Nakamura et al.(1996, 1998) 및 Poon et al.(1998)의 연구결과에 따르면 공진장치의 내부에 많은 파랑에너지가 포획되어 항내로 유입하는 파랑에너지가 현저히 감소되는 것을 나타내고 있다. 여기서, 공진장치에 의한 고립파의 파랑변형에 대한 3차원적인 접근 및 공진장치를 통한 단주기파랑 및 고립파의 동시제어라는 측면에서 수행된 연구 예는 없는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 공진장치가 갖는 기본적인 단주기파랑제어특성을 검토하기 위하여 특이점분포법(연직선Green함수법, Isaacson, 1978; Nakamura & Oku, 1985)으로부터 공진장치에 의한 평면파랑제어기능을 수치적으로 검토한다. 이로부터 단주기파랑작용하에 있는 구조물에 의한 공진현상이 파랑제어에 미치는 기본적인 특성을 파악한다. 다음으로, 공진장치가 갖는 공진현상을 이용하여 고립파를 저감시키는 현상을 수치적으로 규명하기 위하여 기체와 액체의 혼상동적현상을 동일한 지배방정식으로 해석하는 3차원혼상류의 해석법을 적용한다. 더불어, 수면형의 추적에는 VOF법(Volume Of Fluid; Hirt & Nichols, 1981)을, 이산방정식에는 SMAC법(Simplified Marker And Cell; Amsden & Harlow, 1970)을, 난류해석에는 LES모델(Large Eddy Simulation; Smagorinsky, 1963)을 각각 적용하며, 동시에 대상의 고립파(Fenton, 1972)를 조파소스에 의해 조파하고, 고립파의 무반사를 위하여 감쇠역(스폰지층)을 사용하는 3차원수치파동수로를 적용한다. 이로부터 얻어진 고립파의 파랑특성과 방

파제에 의한 파랑변형특성을 분석하고, 기존의 결과(Dean & Dalrymple, 1991; Perroud, 1957; Shi et al., 2001)와 비교하여 본 해석법의 타당성을 검증한다. 더불어, 공진장치의 배치 및 형상에 따른 고립파의 제어특성을 고찰하고, 고립파를 효과적으로 제어할 수 있는 방안을 모색한다. 이로부터 고립파의 제어특성에 관련된 공진장치의 특성들은 전술한 바와 같은 지진해일의 제어특성과도 연계될 수 있을 것이다.

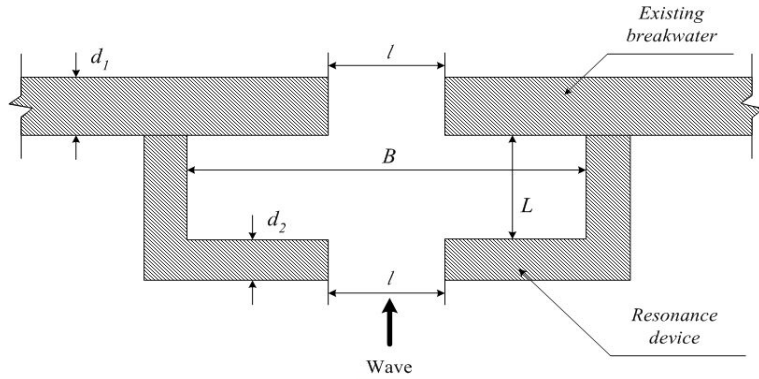


Fig. 1 Shape of wave resonator proposed by Nakamura et al.(1995)



Photo 1 Wave resonator constructed at Pier J of Long Beach port to attenuate excessive ship motions (<http://earth.google.com>)

1.2 본 연구의 구성

본 연구는 총 5장으로 구성되며, 제1장에서는 본 연구의 배경과 목적에 대해서 서술하고, 다음으로 본 연구의 구성에 대해서 간단히 기술한다. 제2장에서는 공진장치에 의한 평면파랑해석법 및 3차원고립파에 대한 3차원혼상류해석법에 대한 이론적인 내용을 서술한다. 제3장에서는 수치해석결과의 검증으로, 먼저 단주기평면파랑에 대한 특이점분포해석법의 검증을 수행하고, 다음으로 고립파에 대한 3차원혼상류해석법 및 3차원수치파동수로의 검증을 실시한다. 제4장에서는 제3장의 검증을 기초로 하여 공진장치에 의한 단주기 파랑의 제어 및 공진장치에 의한 고립파의 제어능을 입사파랑 및 공진장치의 크기 등을 변화시켜 검토한다. 제5장에서는 이상의 검토로부터 중요한 사항을 요약하여 본 연구의 결론으로 한다. 마지막으로 본 연구의 수행에서 참고한 중요한 논문의 리스트를 제시한다.



2. 수치해석

2.1 공진장치에 의한 평면파랑의 해석법

Fig. 2에 나타내는 일정수심의 3차원파동장 중에 임의형상의 수면돌출구조물이 설치된 경우를 고려한다. 유체를 비점성, 비압축 및 비회전의 이상유체를 가정하면 본 3차원파동장의 지배방정식은 속도포텐셜함수 $\Phi(=\hat{\phi}(x,y,z)e^{-i\sigma t})$ 에 관한 다음의 Laplace방정식(1)로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \hat{\phi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{\phi}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{\phi}}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, (x,y,z) 는 Fig. 2에서와 같이 정의되는 공간좌표, $\hat{\phi}$ 는 공간속도포텐셜, σ 는 각주파수, $i = \sqrt{-1}$, t 는 시간을 나타낸다.

이 때, 속도포텐셜 Φ 는 식(2)와 같이 주어지는 입사파성분 $\Phi_i(=\hat{\phi}_i(x,y,z)e^{-i\sigma t})$ 와 회절파성분 $\Phi_s(=\hat{\phi}_s(x,y,z)e^{-i\sigma t})$ 의 합으로 표현되고, 포텐셜이론에 따르면 자유수면경계조건, 해저면경계조건 및 Sommerfeld방사경계조건을 만족하는 회절성분 $\hat{\phi}_s$ 는 다음의 경계적분방정식(3)으로 표현될 수 있다.

$$\hat{\phi}_i = -\frac{i}{2} \frac{gH_i}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (2)$$

$$\hat{\phi}_s = \frac{1}{4\pi} \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \int_s f(X,Y) G(x,y;X,Y) ds \quad (3)$$

여기서, g 는 중력가속도, h 는 수심, H_i 는 입사파고, k 는 파수, β 는 입사파향각, f 는 평면파원강도분포함수, G 는 식(4)로 주어지는 연직선Green함수(Isaacson, 1978), (x,y) 와 (X,Y) 는 고정점과 유동점의 좌표, s 는 구조물표면의 곡선을 나타낸다.

$$G(r) = i\pi H_0^{(1)}(kr) \quad (4)$$

여기서, $r = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2}$, $H_0^{(1)}$ 은 0차제1종Hankel함수이다.
따라서, 식(3)을 이산화하여 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\hat{\phi}_{s,i} = \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sum_{j=1}^N f(X_j, Y_j) A_j(x_i, y_i) \quad (5)$$

여기서, (x_i, y_i) , (X_j, Y_j) 는 미소선요소의 중앙점에서 좌표이고, $A_j(x_i, y_i)$ 는 다음과 같이 주어진다(Nakamura & Oku, 1985).

$$A_j(x_i, y_i) = \begin{cases} \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr_{ij}) \Delta s_j, & r_{ij} \neq 0 \\ \frac{\Delta s_j}{2\pi} \left(1 - \log \frac{k\Delta s_j}{2} \right) + \frac{i}{4} \Delta s_j, & r_{ij} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

여기서, Δs 는 s 상에서 선요소이다.

위의 식(5)에서 평면파원장도분포함수 f 는 구조물표면에서 불투과조건을 적용함으로써 얻어지는 다음의 이산방정식(7)로부터 산정될 수 있다.

$$\frac{i}{2} H_i \left(\sin\beta \frac{\Delta x_i}{\Delta s_i} - \cos\beta \frac{\Delta y_i}{\Delta s_i} \right) e^{ik(x_i \cos\beta + y_i \sin\beta)} = \sum_{j=1}^N f(X_j, Y_j) B_j(x_i, y_i) \quad (7)$$

여기서, Δx , Δy 는 절점간격의 x , y 축방향의 성분을 나타내며, Nakamura & Oku(1985)에 의하면 $B_j(x_i, y_i)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$B_j(x_i, y_i) = \begin{cases} kH_1^{(1)}(kr_{ij}) \frac{(x_i - X_j) \frac{\Delta y_i}{\Delta s_i} - (y_i - Y_j) \frac{\Delta x_i}{\Delta s_i}}{4r_{ij}} \Delta s_j, & r_{ij} \neq 0 \\ -\frac{i}{2}, & r_{ij} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

여기서, $H_1^{(1)}$ 은 1차제1종Hankel함수이다.

이상의 식(7)로부터 평면파원강도분포함수 f 를 산정하여 식(5)에 대입하면 회절성분의 속도포텐셜을 구할 수 있고, 이로부터 입사파성분의 속도포텐셜을 합하여 전파동장에서 속도포텐셜성분을 얻을 수 있다. 따라서, 수면경계조건으로부터 파형을, 그리고 Bernoulli 식으로부터 파압과 이를 적분한 파력을 간단히 산정할 수 있다.

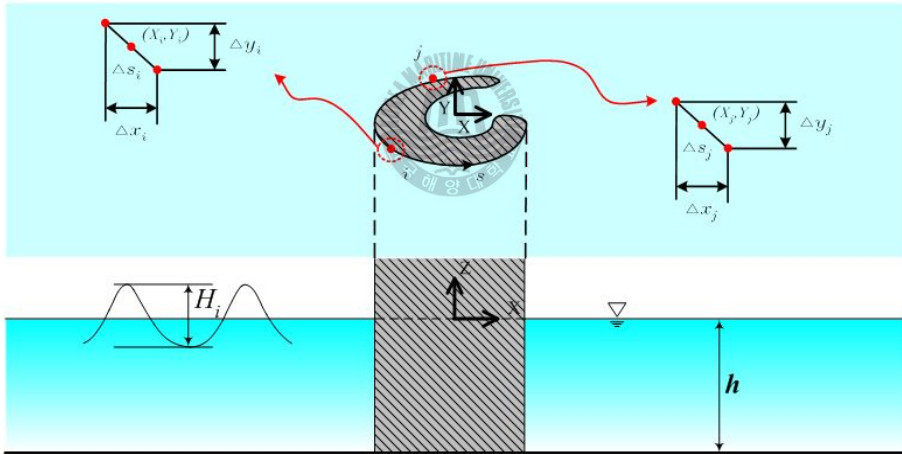


Fig. 2 Definition sketch of a vertical surface-piercing structure in the 3-dimensional wave field

2.2 3차원고립파에 대한 3차원혼상류해석법의 개요

2.2.1 고립파의 수치조파

고립파(지진해일)와 구조물과의 연성해석을 위해 2차원수치파동수조(Hinatsu, 1992; 김도

삼 등, 2001)를 3차원으로 확장한 Fig. 3과 같은 3차원수치파동수조(이광호 등, 2008)를 고려한다. 해석영역내에서는 수치적으로 고립파를 발생시키기 위한 조파소스(Brosen & Lasen, 1987; 김도삼 등, 2001) 및 무반사조파시스템을 위한 감쇠역이 고려되며, 3차원파동장내에 고립파를 제어하기 위하여 구조물이 설치되어 있다. 수치조파는 파랑의 전달방향을 고려하여 다음의 식(9)와 같은 조파소스강도를 적용한다(Brosen & Lasen, 1987).

$$\begin{cases} q = 2U_0(y, z, t) \\ \dot{z} = (\eta_0 + h)(z + h)/(\eta_s + h) - h \end{cases} \quad (9)$$

여기서, U_0 는 발생파의 수평유속성분, η_s 와 η_0 는 각각 조파소스의 위치에서 수위변동과 조파소스에 의해 기대되는 수위변동을 나타낸다.

본 연구에서는 고립파의 수치조파를 위해 Grimshaw(1971)에 의해 유도된 고립파의 3차 근사인 식(10)의 수평방향유속을 적용한다(Fenton, 1972).

$$U_0 = \sqrt{gh} [E_s S^2 - E_s^2 C_a - E_s^3 \{C_b + C_c\}] \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{cases} C_a = -\frac{1}{4}S^2 + S^4 + \left(1 + \frac{\bar{z}}{h}\right)^2 \left(\frac{3}{2}S^2 - \frac{9}{4}S^4\right) \\ C_b = \frac{19}{40}S^2 + \frac{1}{5}S^4 - \frac{6}{5}S^6 + \left(1 + \frac{\bar{z}}{h}\right)^2 \left(-\frac{3}{2}S^2 - \frac{15}{4}S^4 + \frac{15}{2}S^6\right) \\ C_c = \left(1 + \frac{\bar{z}}{h}\right)^4 \left(-\frac{3}{8}S^2 + \frac{45}{16}S^4 - \frac{45}{16}S^6\right) \end{cases} \quad (11)$$

그리고, \bar{z} 는 물입자의 연직방향 평균위치를 나타내며, E_s 와 S 는 다음의 식과 같이 정의된다.

$$E_s = \frac{H_i}{h} \quad (12)$$

$$S = \operatorname{sech} \left\{ \left(\frac{3}{4} \right)^{1/2} \left(E_s - \frac{5}{8} E_s^2 + \frac{71}{128} E_s^3 \right) \left(\frac{x_s - Ct}{h} \right) \right\} \quad (13)$$

여기서, H_i 는 입사고립파의 파고이고, C 는 고립파의 파속이다

$$\alpha = \sqrt{\frac{3}{4}} E_s \left\{ 1 - \frac{5}{8} E_s + \frac{71}{128} E_s^2 \right\} \quad (14)$$

$$\hat{x} = \frac{x_s - Ct}{h} \quad (15)$$

여기서, C 는 고립파의 파속으로 고립파의 3차근사에 의하면 다음의 식과 같이 표현된다.

$$C = \sqrt{gh} \left[1 + \frac{1}{2} E_s - \frac{3}{20} E_s^2 + \frac{3}{56} E_s^3 \right] \quad (16)$$

Ohyama & Nadaoka(1991)는 수치파동수로내에서 구조물이 설치될 경우 조파소스의 위치에서 반사파의 영향을 고려하여 조파소스지점에서 연직적분치가 반사파가 없는 경우와 분포형상이 상사되도록 다음의 식을 고려하고 있다.

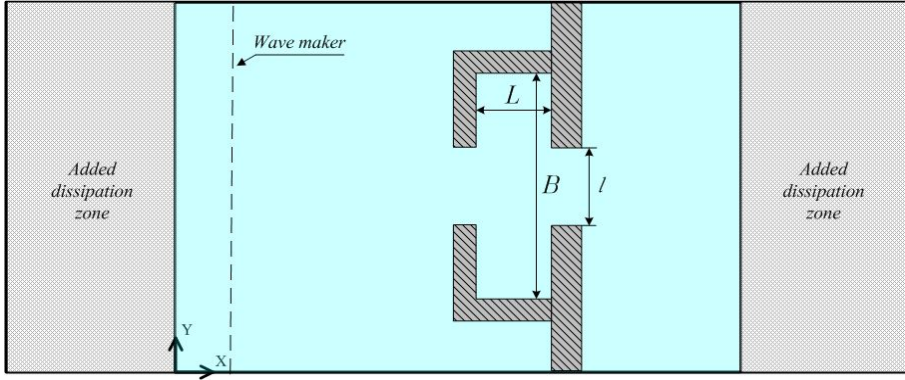
$$q = 2U_0 \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} \quad (17)$$

여기서, η_s 와 η_0 는 각각 조파소스의 위치에서 수위변동과 조파소스에 의해 기대되는 수위변동이다. 본 연구에서 η_0 는 다음의 식과 같은 고립파의 3차근사식이론을 적용하여 산정된다(Fenton, 1972).

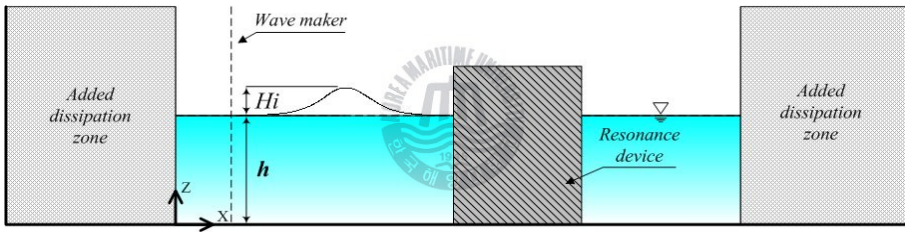
$$\eta_0 = h \left[1 + E_s S^2 \hat{t} + E_s^3 \left(\frac{5}{8} S^2 \hat{t}^2 - \frac{101}{80} S^4 \hat{t}^2 \right) \right] \quad (18)$$

여기서, \hat{t} 는 다음의 식(16)과 같이 주어진다.

$$\hat{t} = \tanh \alpha \frac{x_s - Ct}{h} \quad (19)$$



(a) plane view



(b) cross sectional view

Fig. 3 Definition sketch of 3-dimensional numerical wave tank

2.2.2 3차원 혼상류 해석법의 개요

서로 혼합되지 않는 점성·비압축성의 혼상의 Newton 유체를 고려하여 단일유체모델을 적용하면 혼상의 유체는 다음의 식(20)의 연속방정식 및 식(21)의 운동량방정식으로 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = q^* \quad (20)$$

$$\frac{DV_i}{Dt} = -\frac{1}{\tilde{\rho}} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\tau_{ij} + 2\tilde{\nu}D_{ij}) + g_i - \frac{2\tilde{\nu}}{3} q^* - \gamma V_i \delta_{j3} \quad (21)$$

여기서, $V_i = (u(x_i, t), v(x_i, t), w(x_i, t))$ 는 필터된 3차원속도장(filtered velocity field), p 는 압력, $q^* = q(\eta_0 + h)/(\eta_s + h)$ 로 정의되는 조파소스항, γ 는 부가감쇠영역에서의 감쇠 계수, δ 는 Dirac delta 함수, g_i 는 중력가속도, τ_{ij} 는 SGS(Sub-Grid Scale)응력텐서, D_{ij} 는 변위-응력텐서를 각각 나타낸다. 또한, 위의 식에서 $\tilde{\rho}$ 는 밀도 및 $\tilde{\nu}$ 는 동점성계수로 기체 혹은 액체를 결정하는 공간과 시간의 함수이다. 또한, 본 연구에서 표면장력은 무시되며, SGS응력텐서 τ_{ij} 는 다음의 식으로 정의된다.

$$\tau_{ij} = -2\nu_e \bar{D}_{ij} \quad (22)$$

여기서, ν_e 는 와동점성계수로, 본 연구에서는 이를 평가하기 위하여 최근의 수치모델에서 널리 사용되고 있는 식(23)과 같은 Smagorinsky(1963)에 의한 LES모델을 적용한다. LES에서 와동점성계수는 SGS의 특성길이(필터폭) Δ 와 변위-응력텐서의 강도에 비례한다 (Lesieur et al, 2005).

$$\nu_e = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2\bar{D}_{ij}\bar{D}_{ij}} \quad (23)$$

여기서, C_s 는 Smagorinsky의 상수로 다음의 식으로 근사될 수 있다.

$$C_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{3\alpha}{2}\right)^{-3/4} = 0.235\alpha^{-3/4} \quad (24)$$

여기서, Kolmogorov상수(Lesieur et al, 2005)로 불리는 α 에 대해 $\alpha = 1.5$ 를 식(22)에 적용하면 Smagorinsky상수는 $C_s \approx 0.173$ 로 주어진다. 그리고, SGS 특성길이 Δ 및 변위-응력텐서의 강도 $2\bar{D}_{ij}\bar{D}_{ij}$ 는 각각 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (25)$$

$$2\bar{D}_{ij}\bar{D}_{ij} = 2(\bar{D}_{11}^2 + \bar{D}_{22}^2 + \bar{D}_{33}^2) + 4(\bar{D}_{12}^2 + \bar{D}_{23}^2 + \bar{D}_{31}^2) \quad (26)$$

또한, 기체와 액체가 구성하는 접면의 추적법으로 VOF(Hirt & Nichols, 1981)법을 적용한다. VOF법은 0(기체의 경우)에서 1(액체의 경우)까지의 범위를 갖는 컬러함수(color function) F 에 기초를 두고 있다. VOF함수를 사용하면 $0 < F < 1$ 을 갖는 각 계산셀에서 접면이 결정된다. 게다가, 접면셀에서 각 유체의 밀도 $\tilde{\rho}$ 와 동점성계수 $\tilde{\nu}$ 는 다음과 같이 주어지는 VOF함수에 의해 평가된다.

$$\tilde{\rho}_{i,j,k} = F_{i,j,k}\langle\rho_w\rangle_{i,j,k} + (1 - F_{i,j,k})\langle\rho_a\rangle_{i,j,k} \quad (27)$$

$$\tilde{\nu}_{i,j,k} = F_{i,j,k}\langle\nu_w\rangle_{i,j,k} + (1 - F_{i,j,k})\langle\nu_a\rangle_{i,j,k} \quad (28)$$

여기서, 첨자 w 및 a 는 액체상과 기체상의 물리량을 각각 나타낸다. VOF함수의 이류는 다음과 같이 각 셀에서 액체의 보존을 고려함으로써 얻어진다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i F)}{\partial x_i} = 0 \quad (29)$$

이상의 기초방정식을 교호격자(staggered mesh)를 이용한 유한차분법에 의해 해석하며, 이산화방정식은 Amsden and Harlow(1970)에 의해 개발된 SMAC법에 기초하여 계산된다. SMAC법에서 운동량방정식의 모든 항은 $n+1$ 의 시간스텝에서 임시유속 \tilde{u}_i 에 대해 첫 번째 스텝에서 다음의 식과 같이 양적으로 계산된다.

$$\frac{\tilde{u}_i - \bar{u}_i^n}{\Delta t} = \left[-\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\tau_{ij} + 2\tilde{\nu}\bar{D}_{ij}) + g_i \right] \quad (30)$$

두 번째 스텝에서 연속식을 만족하도록 임시유속장에 대한 Poisson방정식이 음적으로 해석된다. 즉, 임시유속장은 다음의 시간스텝에서 압력을 사용하여 다음과 같이 개선된다.

$$\bar{u}_i^{n+1} = \tilde{u}_i - \Delta t \frac{1}{\tilde{\rho}^n} \frac{\partial(\delta p)^{n+1}}{\partial x_i} \quad (31)$$

여기서, $\delta p^{n+1} = \bar{p}^{n+1} - \bar{p}^n$ 이다.

계산된 임시유속장 \tilde{u}_i 가 연속방정식을 만족하도록 함으로서 다음의 식과 같은 압력보정에 대한 Poisson방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial^2(\delta p)^{n+1}}{\partial x_i^2} = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \quad (32)$$

경계조건으로는 서로 혼합되지 않는 2상류의 유체운동을 고려하고 있으므로 액체만을 고려하는 단상류의 경우와 달리 자유수면의 경계조건이 불필요하게 되며, 계산영역의 최상단에서는 압력의 일정조건을, 수로의 바닥 및 측면경계를 처리하기 위하여 불투과조건과 slip조건을 각각 적용한다.



3. 수치해석결과의 검증

3.1 단주기평면파랑에 대한 특이점분포해석법의 검증

Fig. 4은 단일연직원주구조물에 작용하는 파력에 있어서 MacCamy & Fuches(1954)의 결과와 본 연구의 평면파랑제어해석법(특이점분포법)에 의한 수치해석결과를 비교한 것으로, ka (a 는 원주의 반경)의 변화에 따른 무차원 최대수평파력을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 두 결과에서 ka 가 증가함에 따라 무차원 최대수평파력은 증가하며, $ka \approx 1.0$ 에서 최대의 무차원 파력을 나타내고, 이후에 감소하는 경향이 보인다. 여기서, ka 의 변화에 따른 두 해석결과에서 무차원 최대수평파력은 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

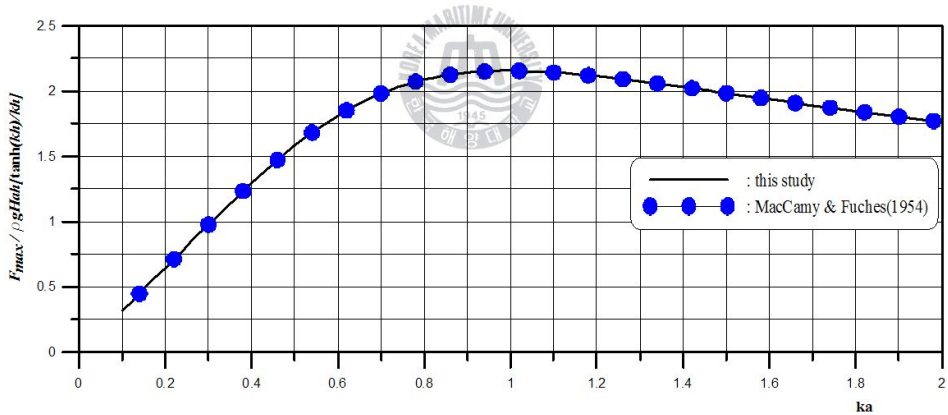


Fig. 4 Non-dimensional wave force for isolated circular cylinder

3.2 고립파에 대한 3차원혼상류해석법 및 3차원수치파동수로의 검증

3.2.1 고립파의 조파

3차원수치과동수조에서의 TWOPM-3D 모델을 이용한 고립파의 조파 및 해석영역으로의 전달과정에 대한 타당성을 확보하기 위하여 수심 $h=40\text{cm}$ 에서 입사파고 $H_i=5\text{cm}$ 를 갖는 고립파(Fenton, 1972)를 식(9)의 조파소스강도를 이용하여 수치조파하였다. Fig. 5는 조파된 고립파의 수치과동수로내에서 전달과정을 고찰하기 위하여 무차원 수위변동 η/H_i 를 나타낸 것으로, 목표입사파고 H_i 가 동일하게 유지되면서 해석영역내으로 전달되는 과정을 확인할 수 있다. 비주기파인 고립파의 경우 무한대의 파장을 가지므로 파장을 대신하여 공학적인 의미를 갖는 고립파의 유효거리 L_e 를 산정하는 경우가 일반적이다. 본 연구에서는 식(33)에 기초하여 고립파의 유효거리를 산정하였으며, Fig. 6은 수치과동수로내에서 고립파의 최대파고가 $x/h=20$ 에 도달한 경우에 수위변동 η/H_i 의 공간분포를 $x=20\cdot h$ 을 원점으로 재설정하여 나타낸 것이다. 여기서, 정수면상의 단위폭당 고립파의 용적은 파형을 적분함으로서 산정될 수 있고, 유효거리 L_e 내에 존재하는 수량의 유효체적은 전체적의 95%를 차지하는 것으로 알려져 있다(Dean & Dalrymple, 1991). Fig. 6으로부터 유효거리와 유효체적을 산정하면 고립파의 유효거리가 479cm, 유효체적이 94.24342%로 산정되므로 본 연구의 조파방법으로부터 발생된 고립파는 유효체적의 비율이 95%인 이론치와 매우 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.



$$L_e = \frac{4.24h}{\sqrt{H/h}} \quad (33)$$

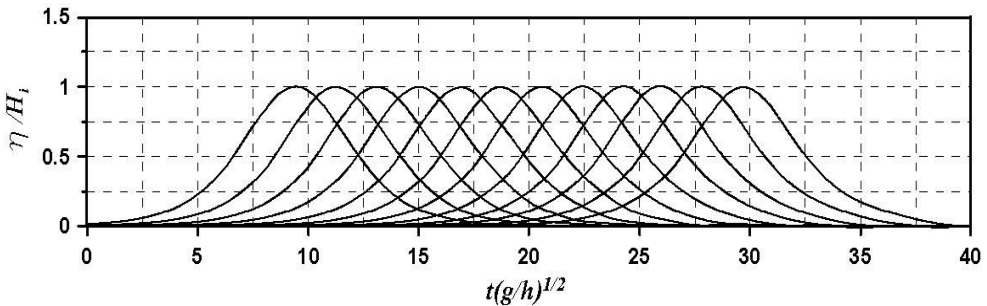


Fig. 5 Time variation of solitary wave profile

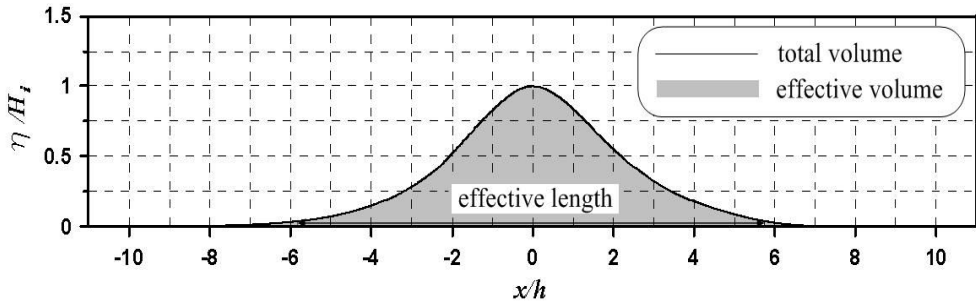
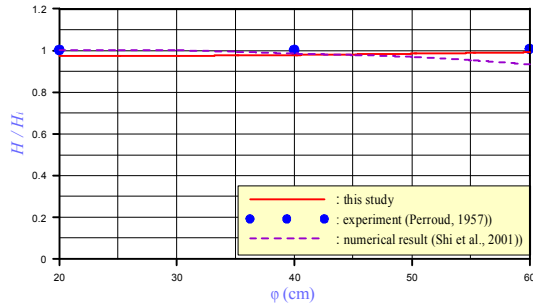


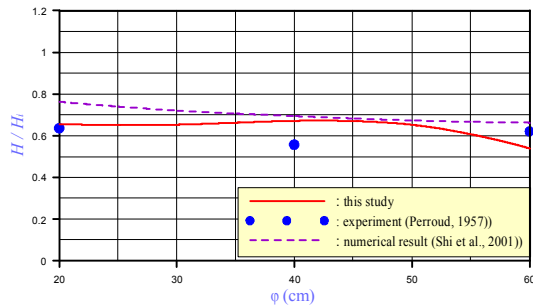
Fig. 6 Effective length and volume of solitary wave

3.2.2 고립파의 파랑변형

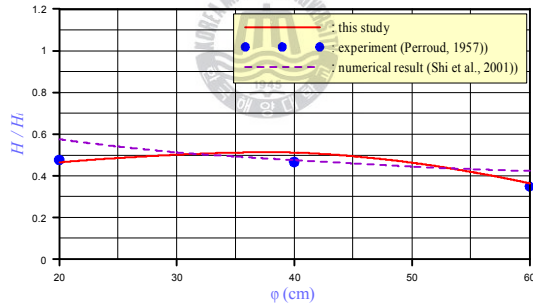
고립파의 3차원파랑변형을 검증하기 위하여 수조의 한 측벽으로부터 돌출된 직선의 연직벽체에 의한 고립파의 회절계수를 검토한 실험결과(Perroud, 1957)와 강비선형 Boussinesq 모델에 기초한 수치해석결과(Shi et al., 2001)와 본 해석결과를 비교한 것이 다음의 Fig. 7에 주어져 있다. 그림에서 φ 는 벽체의 선단에서 거리를, θ 는 벽체의 배후에 대한 φ 의 각도를 나타낸다. 따라서, $\theta=0(\text{deg.})$ 는 벽체의 배후면을, $\theta=90(\text{deg.})$ 는 벽체의 선단에서 입사고립파의 진행방향을 나타낸다. 그리고, Fig. 7(a)는 구조물이 존재하지 않는 경우에 벽체의 선단위치에서 입사고립파의 진행방향으로 무차원 파고분포 H/H_s 를 나타낸 것으로, Shi et al.(2001)의 결과는 파의 진행에 따라 고립파의 파고감쇠가 다소 발생하는 것을 알 수 있다. 다음으로, 실제로 구조물이 설치된 Fig. 7(b)-(d)의 경우에는 벽체의 선단으로부터 거리가 증가함에 따라, 그리고 각도 θ 가 감소함에 따라 고립파의 회절계수가 작아지는 경향은 실험적으로나 수치적으로나 확인되는 사실이다. 그러나, 본 수치해석결과가 강비선형 Boussinesq 모델에 기초한 Shi et al.(2001)의 결과보다 전반적으로 실험결과에 더 근접하다는 사실로부터 본 3차원해석수법의 타당성을 검증할 수 있을 뿐만 아니라, 보다 고정도의 해석수법이라는 것이 확인된다.



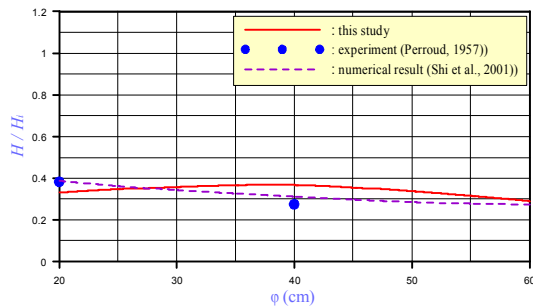
(a) along axis



(b) $\theta=90(\text{deg.})$



(c) $\theta=60(\text{deg.})$



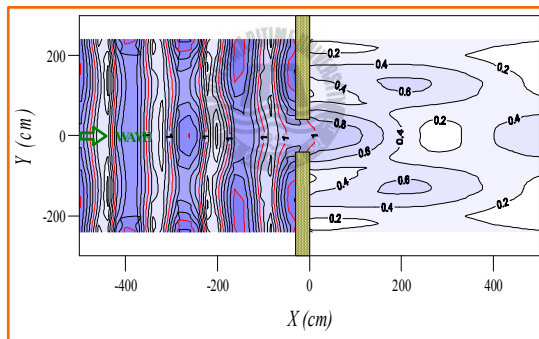
(d) $\theta=0(\text{deg.})$

Fig. 7 Comparison of diffraction coefficient between experimental data and numerical result for straight vertical wall ($H_i/h = 0.27$)

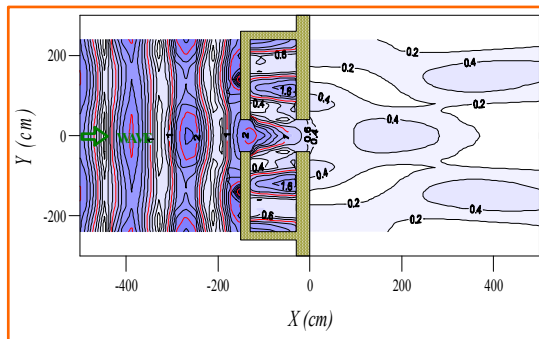
4. 수치해석결과

4.1 공진장치에 의한 단주기파랑의 제어

Fig. 8은 $L=100\text{cm}$, $B=480\text{cm}$, $\ell=80\text{cm}$, $d_1=30\text{cm}$, $d_2=20\text{cm}$ 를 갖는 Fig. 1의 공진장치에 대해 수심 $h=40\text{cm}$, 주기 $T=1.4\text{sec}$ 의 단주기파랑을 입사시킨 경우에 공진장치의 전면, 내부 및 배후역에서 무차원 파고분포 H/H_i (H 는 임의지점에서 파고)를, 그리고 Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 조건하에 주기 T 만을 더 길게 한 $T=1.7\text{sec}$ 의 경우에 각각 상당한다. 동일한 조건하에서 공진장치를 부착하지 않은 경우에는 배후역에서 무차원 파고가 큰 경우

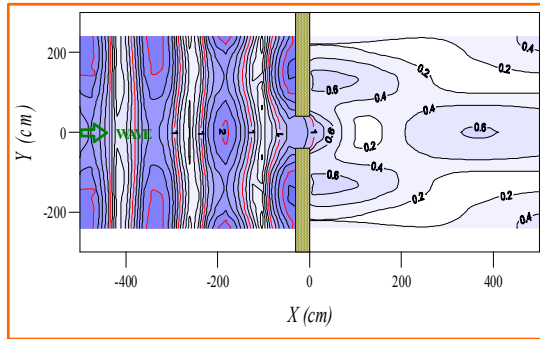


(a) no resonator

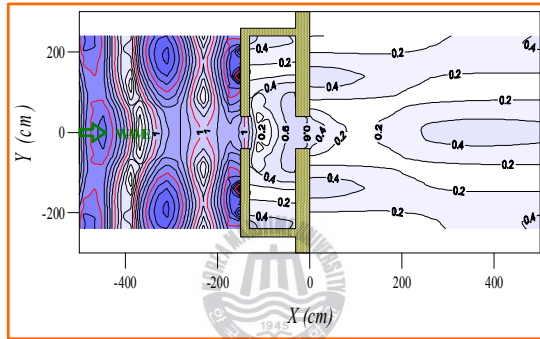


(b) resonator

Fig. 8 Spatial distribution of non-dimensional wave height H/H_i ($T=1.4\text{sec}$)



(a) no resonator



(b) resonator

Fig. 9 Spatial distribution of non-dimensional wave height H/H_i ($T=1.7\text{sec}$)

에 0.8 정도의 값을 나타내지만, 공진장치를 부착함으로써 무차원 파고를 0.4 정도로 감소시킬 수 있고, 더불어 배후역에서 공진장치를 부착한 경우가 무차원 파고의 공간변화가 상대적으로 작게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이로부터 방파제 배후역으로 전달되는 단주기파랑에 대한 공진장치의 제어능을 확인할 수 있다.

4.2 공진장치에 의한 고립파의 제어

본 연구에서 사용된 3차원수치파동수로는 길이가 320~400cm, 폭이 480~680cm, 높이가 60cm의 크기를 가지며, 격자의 크기는 x 방향으로 가변격자 2~8cm로, y 방향으로 단일격자 4cm로, 그리고 z 방향으로 단일격자 2cm로 각각 구성된다. 여기서, 양측면에서 무반사를

위한 감쇠영역까지를 고려하면 수조 전체의 최대크기는 1040×680×60cm를 갖는다. 수심 h 는 40cm, 고립파의 입사파고 H_i 는 기본적으로 5cm, 기존방파제에서 구조물의 폭 d_1 과 높이는 각각 30cm, 56cm, 공진장치에서 구조물의 폭 d_2 와 높이는 각각 20cm, 56cm로 가정되며, 기존방파제 및 공진장치에서 개구부의 간격 ℓ 은 80cm로 가정된다. 그리고, Fig. 1에 나타내는 공진장치의 크기에서 폭 B 를 280, 320 및 480cm로, 길이 L 을 50, 100 및 150cm로 각각 변화시켰으며, $X_1 \sim X_{10}$ (X_2 는 공진장치의 전면부, X_3 는 공진장치의 입구부 또는 근방의 전면부, X_7 은 기존방파제의 중앙부, X_8 은 기존방파제의 후면부에 각각 위치함)은 수위변동의 측정지점을 나타낸다. 본 연구에서는 기존방파제에 부착되는 공진장치의 길이 L 의 변화에 따른 X_2 , X_3 , X_7 및 X_8 지점에서 고립파의 수위변동과 공진장치의 폭 B 의 변화에 따른 X_7 및 X_8 지점에서 고립파의 수위변동 및 유효거리 L_e 의 변화에 따른 방파제 후면부의 항내에서 전달율 등을 검토한다.

Fig. 11~15는 이하에서 제시하는 각 지점에서 공진장치의 무차원 길이가 $L/L_e = 0.1, 0.21, 0.31$ 혹은 무차원 폭이 $B/h = 7, 8$ 및 12로 변화될 때 무차원 시간 $t(g/h)^{1/2}$ 에 따른 고립파의 무차원 수위변동 η/H_i 를 나타낸 결과이다.

먼저, X_2 지점에서 수위변동을 나타내는 Fig. 11을 살펴보면 측정위치가 공진장치의 전면부이기 때문에 구조물로부터의 반사파가 영향을 미치지 않는 $t(g/h)^{1/2} \approx 24$ 까지는 공진장치의 길이에 거의 관계없이 동일한 수위변동을 나타내지만, 반사파가 영향을 미치기 시작하는 이후의 시간대에서는 공진장치의 길이의 변화에 따라 수위변동에 큰 변화와 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. 최대의 수위변동을 나타내는 $t(g/h)^{1/2} \approx 25$ 에서 $L/L_e = 0.31$ 의 경우가 가장 큰 값을 나타내는 것은 측정위치 X_2 에 반사파가 가장 빨리 도달하기 때문이다. 그리고, $t(g/h)^{1/2} > 26$ 에서 나타나는 큰 수위변동은 반사원이 각각 다른 위치인 공진장치의 전면부, 내부 및 기존방파제의 전면부에 위치하므로 각각으로부터 반사회절되어 X_2 지점에 도달하는 상이한 반사파의 도달시간에 따른 위상간섭으로 인한 결과이고, L/L_e 의 차이에 따라 변동형태가 상이한 것은 L/L_e 의 차이에 따라 X_2 지점에 도달하는 반사회절파의 시간이 각각 다르기 때문이다. 하여튼, X_2 지점에서 수위변동은 공진장치가 부착된 경우가 공진장치가 없는 경우보다 복잡한 수위의 시간변동을 나타내고, 더불어 보다 큰 최대수위를 나타낸 것을 알 수 있다.

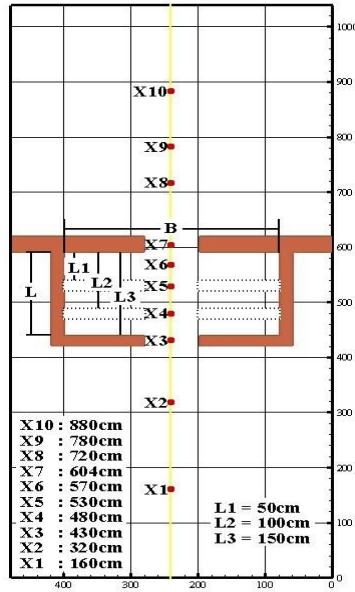


Fig. 10 Measuring points of water level fluctuation

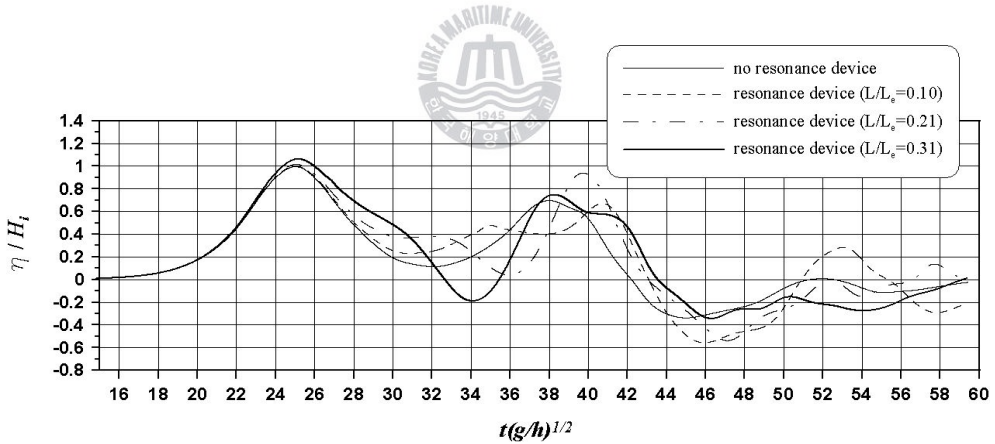


Fig. 11 Time variation of water level at point X_2 ($H_i/h=0.13$, $B/h=7$)

다음으로, X_3 지점에서 수위변동을 나타내는 Fig. 12를 살펴보면 측정위치가 공진장치의 입구부 근방의 전면부($L/L_e=0.31$ 의 경우는 공진장치의 입구부에 상당함)이기 때문에 Fig. 11의 경우와 같이 구조물로부터의 반사고립과가 영향을 미치지 않는 $t(g/h)^{1/2} \approx 26$ 까지는 공진장치의 길이에 관계없이 거의 동일한 수위변동을 나타내지만, 반사고립과가 영향을 미치기 시작하는 이후의 시간에서는 공진장치의 길이의 변화에 따라 수위변동에 많은

변화와 차이를 나타내는 것을 역시 볼 수 있다. 전술한 Fig. 11과는 상이하게 $L/L_e = 0.31$ 의 경우가 측정위치 X_3 에 반사파가 가장 빨리 도달하지만, 최대수위변동은 $L/L_e = 0.21$ 의 경우에 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 $L/L_e = 0.21$ 의 경우에 X_3 지점은 공진장치의 입구부에 위치하므로 대부분의 파랑에너지가 공진장치의 내부로 유입되기 때문으로 판단된다. 그리고, $t(g/h)^{1/2} > 30$ 에서 큰 수위변동은 전술한 Fig. 11의 경우와 동일하게 반사원이 각각 다른 위치인 공진장치의 전면부, 내부 및 기존방파제의 전면부에 위치하므로 각각으로부터 반사 및 회절되어 X_3 지점에 도달하는 반사파의 상이한 도달시간에 따른 위상간섭에 기인한 결과이고, L/L_e 의 차이에 따라 변동형태가 상이한 것도 L/L_e 의 차이에 따라 X_3 지점에 도달하는 반사회절파의 시간이 각각 다르기 때문이다. 전반적인 시간과형의 변화양상은 Fig. 11의 경우와 유사한 경향을 나타내며, X_3 지점에서 수위변동은 공진장치가 부착된 $L/L_e = 0.21$ 의 경우가 다른 경우 및 공진장치가 없는 경우보다 보다 작은 최대수위를 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 X_7 지점에서 수위변동을 나타낸 것으로, 측정위치가 공진장치의 내부를 지난 기존방파제의 입구부이기 때문에 Fig. 11, 12와는 전체적으로 상이한 시간과형을 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한, X_7 지점은 Fig. 11, 12의 경우와 달리 구조물로부터의 반사고립파가 영향을 미치지 않는 곳에서의 시간과형이므로 방파제 배후역에서 파고의 크기를 결정짓는 요소이다. 따라서, X_7 지점에서 큰 파고를 나타낼수록 방파제 배후역에서도 큰 파고 분포를 나타내게 된다. $B/h = 7$ 의 Fig. 13(a)를 보면 $t(g/h)^{1/2} \approx 24$ 까지는 공진장치의 유무 및 길이에 관계없이 거의 동일한 수위변동을 나타내지만, 이후의 시간에서는 공진장치의 유무 및 길이의 변화에 따라 수위변동에 다소의 변화와 차이를 나타내는 것을 역시 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 기본적으로 공진장치의 내부에서 형성된 고립파가 X_7 지점으로 입사하기 때문이다. 결과적으로, 최대수면고를 나타내는 $t(g/h)^{1/2} \approx 32$ 지점에서 공진장치가 부착된 모든 경우가 공진장치가 없는 경우보다 낮은 최대수면고를 나타내며, 또한 공진장치가 부착된 경우라도 $L/L_e = 0.21, 0.31$ 의 경우가 최소값을 나타내고, 공진장치가 없는 경우에 비해 최대수위의 크기에서 대략 40%의 저감을 나타낸다. 이의 결과로부터 지진해일(고립파)의 저감공으로 공진장치의 유용성을 확인할 수 있다. 공진장치의 내부폭이 Fig. 13(a)보다 넓어진 $B/h = 12$ 의 Fig. 13(b)를 보면 전반적인 시간과형은 Fig. 13(a)와 유사한 경향을 나타내지만, 공진장치의 폭이 넓은 경우가 고립파제어능이 보다 향상되는 것을 알 수 있고, 공진장치가 없는 경우에 비해 최대수위의 크기에서 대략

50%의 저감을 나타내는 것을 알 수 있다.

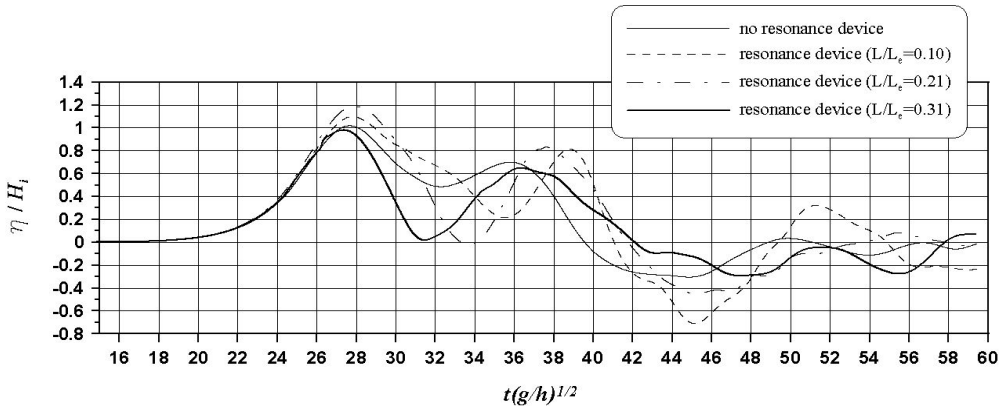


Fig. 12 Time variation of water level at point X_3 ($H_i/h=0.13$, $B/h=7$)

X_8 지점에서 수위변동을 나타내는 Fig. 14의 경우는 측정위치가 구조물 배후역인 항내에 위치하기 때문에 Fig. 13에 주어진 수면변동이 파랑에너지의 수평확산에 따른 회절과정으로 작아진 결과이다. 따라서, 그림을 살펴보면 전체적으로 수면변동량이 Fig. 13의 경우보다 작은 것을 확인할 수 있으며, 최대수위의 상대적인 크기는 Fig. 13의 경우와 동일하게 공진장치가 부착된 모든 경우가 공진장치가 없는 경우보다 낮은 최대수면고를 나타낸다. 그리고, Fig. 14(a), (b) 모두 공진장치가 부착된 경우라도 $L/L_e=0.31$ 의 경우가 최소값을 나타내며, 공진장치가 없는 경우에 비해 Fig. 14(a)의 경우는 최대파고의 크기에서 35% 정도의 저감을, 공진장치내의 폭이 더 넓은 Fig. 14(b)의 경우는 60% 정도의 저감을 각각 나타낸다. 이상의 이러한 결과로부터도 단주기성파랑에 대해 개발된 공진장치(Nakamura et al., 1995)가 지진해일(고립파)의 저감공으로서도 충분한 유용성을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 공진장치의 폭 B 의 변화가 고립파의 제어에 미치는 영향을 보다 면밀히 검토하기 위하여 수치실험에서 $L/L_e=0.31$ 로 고정하고, 공진장치의 무차원 폭을 $B/h=7$, 8 및 12로 각각 변화시킨 경우에 X_8 에서 측정된 수위변동을 나타내고 있다. 그림을 살펴보면 전체적으로 모두 유사한 수위변동을 나타내는 것을 볼 수 있고, 무차원 시간 $t(g/h)^{1/2} \approx 35$ 에서 주어지는 최대수위의 크기는 전술한 바와 같이 공진장치의 폭이 넓은 $B/h=12$ 의 경우가 상대적으로 작은 최대수면고를 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 기본적으로 공진장치내의 폭이 넓어질수록 공진장치의 내부 유수역이 크게

되므로 공진현상으로 포획되는 파랑에너지가 많기 때문에 판단된다. 그러나, 공진장치의 폭 B 의 변화가 전술한 길이 L 의 변화에 따른 경우보다는 수위변동에 미치는 영향이 작고, 서론에서 언급된 바와 같이 Long Beach항의 J부두에서 과도한 장주기성의 선박동요를 제어하기 위해 수행된 Poon et al.(1998)의 실험연구에서도 공진장치의 길이 L 이 폭 B 보다 장주기파의 제어에 더 중요한 파라미터라고 기술하고 있는 점에 비추면 본 연구의 결과와 경향이 타당한 것으로 판단된다.

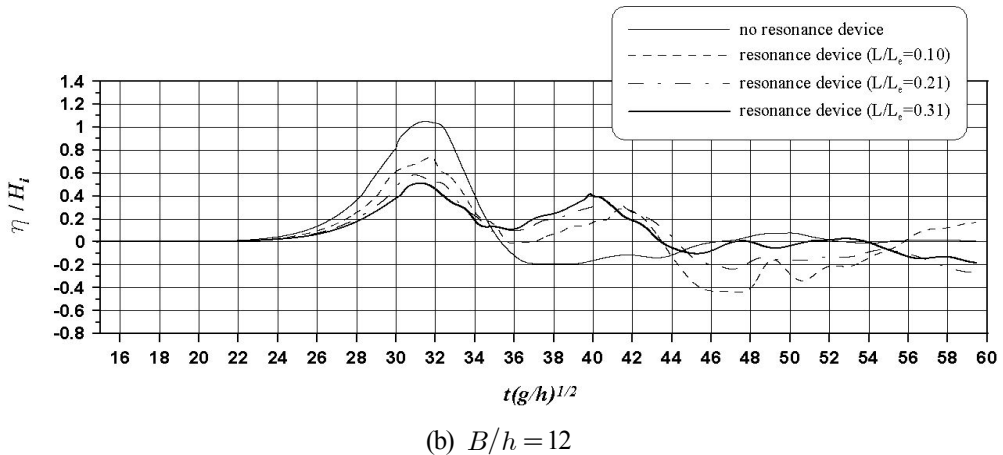
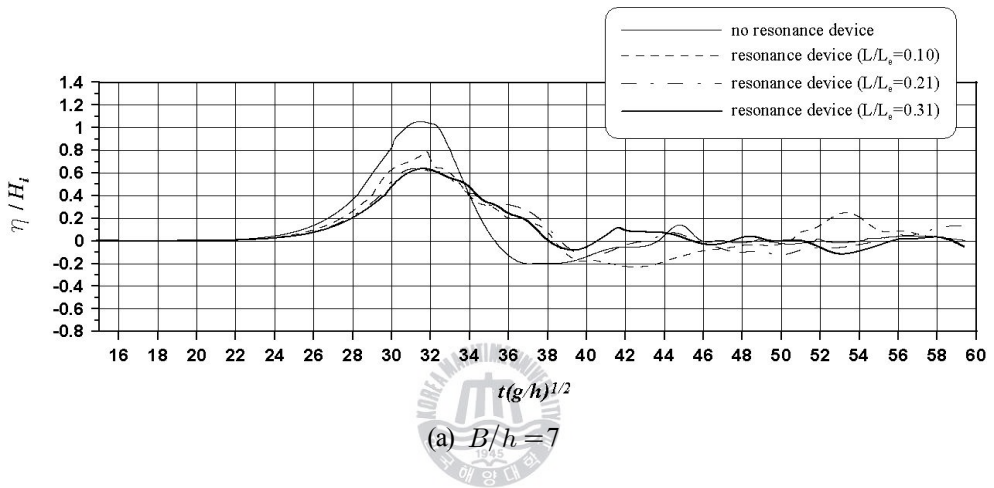
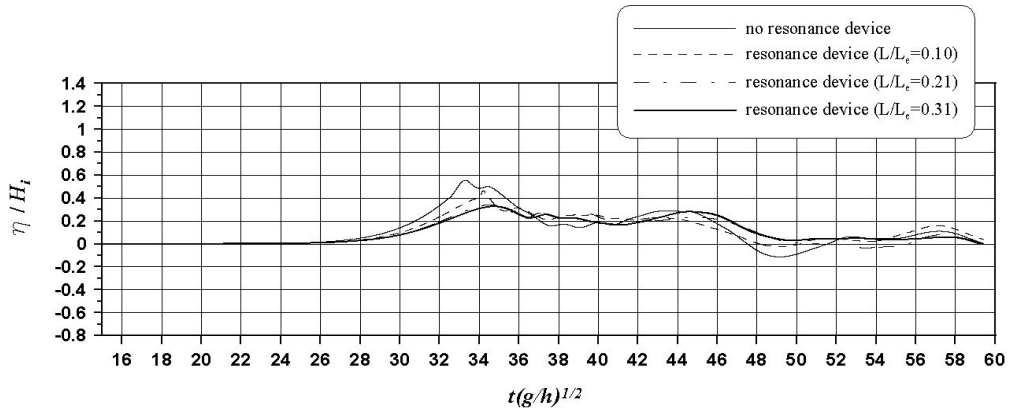
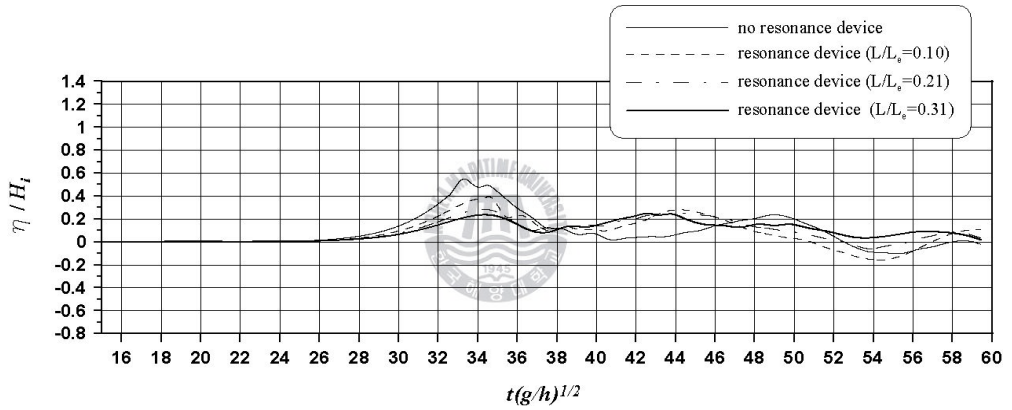


Fig. 13 Time variation of water level at point $X_7(H_i/h=0.13)$



(a) $B/h = 7$



(b) $B/h = 12$

Fig. 14 Time variation of water level at point $X_8 (H_i/h=0.13)$

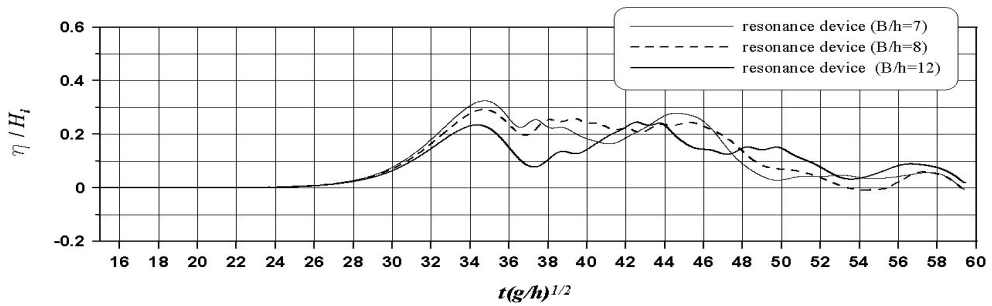


Fig. 15 Time variation of water level at point X_8 according to the change of the width of resonator $B (H_i/h=0.13, L/L_e = 0.31)$

$B/h=7$, $L/h=3.75$, $H_i/h=0.13$ 인 경우에 공진장치의 부근 및 내부에서 수면변동을 시·공간적으로 나타낸 Fig. 16은 고립파의 도달, 공진장치의 전면부에서 반사, 공진장치의 내부로 유입하면서 발생하는 회절 및 구조물의 배후역인 항내로 유입하면서 발생하는 회절에 대한 고립파의 변형상황 등을 보다 상세히 이해하기 위한 것이다.

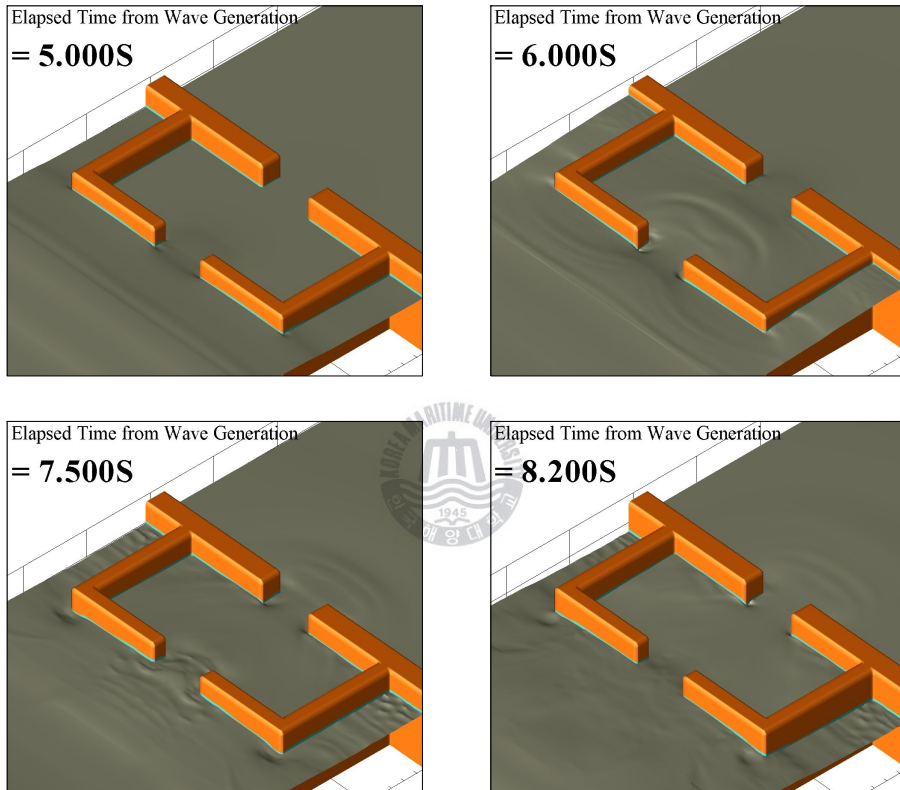


Fig. 16 Time variation of water level around and inside the resonator
 $(B/h=7, L/h=3.75, H_i/h=0.13)$

Fig. 17은 유효거리 L_e 와 공진장치의 길이 L 과의 비율의 변화가 구조물 배후역인 항내에서의 파고변화에 미치는 영향을 검토한 결과이다. 유효거리 L_e 의 변화는 수심 h 를 일정하게 고정시키고($h=40\text{cm}$) 입사파고 H_i 를 변화시켜 얻었다(식(33)을 참조바람). 그리고,

그림에서 전달율 $|K_T|$ 는 X_8 지점을 중심으로 좌우로 각각 3지점(y 축방향으로 지점간의 거리는 40cm), 즉 X_8 지점을 포함하여 총 7지점에서 최대파고를 평균한 파고값 $\bar{H}_{\max} = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 H_{\max,j}$ 을 입사파고 H_i 를 나눈 값 $|K_T| = \bar{H}_{\max}/H_i$ 로 정의된다. 결과를 살펴보면 $L/L_e \approx 0.14$ 까지는 전달율이 증가하지만 $L/L_e > 0.14$ 의 영역에서는 L/L_e 의 증가(L_e 의 감소로 되고, 이는 식(33)에서 입사파고 H_i 의 증가로 이어짐)와 더불어 전달율은 감소하고, $L/L_e \approx 0.341$ 에서 최소의 전달율을 나타낸다. 따라서, 제한된 본 연구의 케이스에 있어서 최적의 공진장치길이 L 은 지진해일(고립파)의 유효거리 L_e 에 대해 $L = 0.341L_e$ 의 관계를 갖도록 설계할 필요가 있다. 여기서, 그림의 $L/L_e > 0.385$ 에서는 고립파의 입사파고가 수심에 비해 너무 커지기 때문에 본 연구의 조파소스강도에 의한 조파가 불가능함을 부기하여 둔다. 이를 해결하기 위해서는 조파경계조건의 도입 및 수치확산을 최소화할 수 있는 계산수법 등이 고려되어야 할 것으로 판단되며 이는 향후 연구 과제로 남겨둔다.

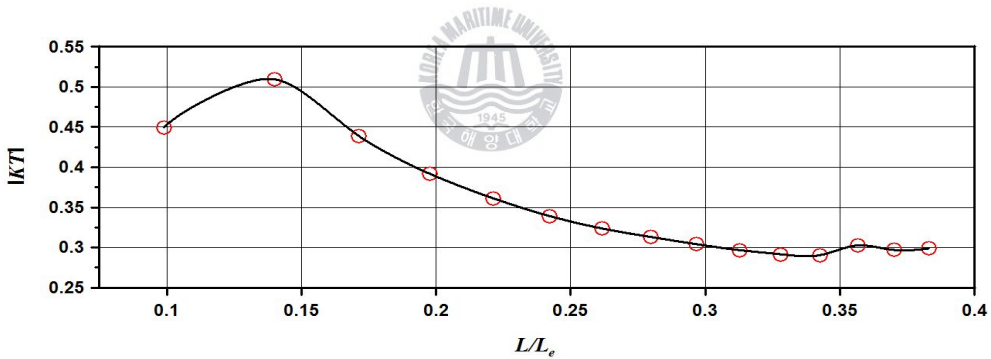


Fig. 17 Transmission coefficient according to the change of effective distance($B/h = 7$, $L/h = 3.75$)

5. 결론

본 연구에서는 고티파의 단주기파랑과 지진해일(고립파)을 동시에 저감시키기 위한 저감공으로 시설의 방파제에 공진현상으로부터 단주기의 입사파랑에너지를 포획하여 배후로 전달되는 파랑에너지를 저감시키는 특성을 갖는 것으로 알려진 기존의 공진장치를 부착한 공법을 검토하였다. 수치해석에 있어서 단주기파랑에 대해서는 연직선Green함수에 기초한 특이점분포법을, 고립파에 대해서는 3차원수치파동수로를 이용하는 3차원혼상류해석법(TWOPM-3D모델)을 각각 적용하였고, 기존의 수치해석결과 및 실험결과와 비교·분석하여 본 수치해석법의 타당성을 검증하였다. 고립파에 대해서는 유효길이의 변화에 따라 공진장치의 전면부, 공진장치의 개구부 근방, 기존방파제의 개구부 근방 및 배후해역에서 공진장치가 없는 경우와 대비하면서 공진장치의 제어능을 검토함과 동시에 공진장치의 내부폭의 변화에 따른 제어능도 동시에 검토하였다. 이상과 같은 검토로부터 단주기파랑과 고립파에 대한 제어능과 그의 유효성이 탁월하다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 고립파에 대한 공진장치의 최적제어능을 검토하기 위하여 유효길이를 변화시켜 검토한 결과에 의하면 제어대상의 고립파에 대한 공진장치의 최적치수가 존재한다는 사실을 확인할 수 있었지만, 향후 수리실험과 같은 보다 다각도의 심층적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립방재연구소 (1998) 동해안에서의 쓰나미 위험도 평가. 국립방재연구소, 연구보고서, NIDP-98-06.
- 김도삼, 김지민, 이광호, 손병규 (2007) 일본 지진공백역에서의 지진해일이 우리나라의 남동연안에 미치는 영향분석. 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 제 21권, 제 6호, pp. 64-71.
- 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수 (2001) VOF법에 기초한 불투과 잠재 주변파동장의 수치해석. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 21권, 제 5-B호, pp. 551-560.
- 이광호, 김창훈, 정성호, 김도삼 (2008) 고립파(지진해일) 작용하의 수중방파제에 의한 파랑제어. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 28권 제 3B호, pp. 323-334.
- 이광호, 정성호, 하선욱, 김도삼 (2009) 이열잠재를 이용한 단주기파랑 및 지진해일(고립파)의 제어. 대한토목학회논문집(투고중).
- 정성호, 하선욱, 정진우, 김도삼 (2009) 2열잠제에 의한 지진해일파(고립파)의 제어. 한국해양과학기술협의회 공공학술대회 발표논문집, pp. 2267-2270.
- 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 Engrg., Vol. 11, pp. 93-113.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1991) Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific.
- Fenton, J. (1972) A ninth-order solution for the solitary wave: Part2. J. Fluid Mech., Vol. 53, pp. 257-271.
- Grimshaw, R. (1971) The solitary wave in water of variable depth: Part 2. J. Fluid Mech., Vol. 46, pp. 611-622.
- Hinatsu, M. (1992) Numerical simulation of unsteady viscous nonlinear waves using moving grid system fitted on a free surface. J. Kansai Soc. Nav. Archit. Japan, No. 217, pp. 1-11.

- Hirt, C.W and Nichols, B.D. (1981) Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, Vol. 287, pp. 299-316.
- Issacson, M.Q. (1978) Vertical cylinders of arbitrary section in wave, *J. of Waterway, Coastal and Ocean Eng. Division, ASCE*, Vol. 104, No. WW4, pp. 309-322.
- Lesieur, M., Metais, O., and Comte, P. (2005) Large-eddy simulations of turbulence. Cambridge Univ. Press, New York, N.Y..
- MacCamy, R. and Fuches, R.A. (1954) Wave forces on piles : A diffraction theory, Technical Memorandum No. 69, U. S. Army Corps of Engineers, Beach erosion board, Washinton, D. C..
- Nakamura, T. and Oku, Y. (1985) Wave scattering around a vertical breakwater of arbitrary plane geometry. *Proceedings of the 32nd Japanese Conference on Coastal Engineering, JSCE*, Vol. 32, pp. 594-598.
- 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 international conference on coastal engineering, ASCE*, pp. 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*, Vol. 45, pp. 721-725.
- Ohyama, T. and Nadaoka, K. (1991) Development of a numerical wave tank for analysis of non-linear and irregular wave field. *Fluid Dyna. Res.*, Vol. 8, pp. 231-251.
- Perroud, P.H.(1957) The solitary wave reflection along a straight vertical wall at oblique incidence, Technical Report Series 99, Issue 3, Institute of Engineering Research, University of California, Berkeley, CA.
- Poon, Y.K., Raichlen, F. and Walker, J. (1998) Application of physical model in long wave studies for the port of Long Beach, *Proceedings of the 26th international conference on coastal engineering, ASCE*, pp. 1222-1235.
- Shi, F., Dalrymple, R.A., Kirby, J.T., Chen, Q. and Kennedy, A. (2001) A fully nonlinear Boussinesq model in generalized curvilinear coordinates. *Coastal Engineering*, Vol. 42, pp. 337-358.
- Smagorinsky, J. (1963) General circulation experiments with the primitive equations. *Mon, Weath. Rev.*, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.