

# 복수 연직 주상구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑변형의 3차원해석

## 3-Dimensional Analysis for Nonlinear Wave Forces Acting on Dual Vertical Columns and Their Nonlinear Wave Transformations

이광호\* · 이상기\*\* · 신동훈\*\* · 김도삼\*\*

Kwang Ho Lee\*, Sang Ki Lee\*\*, Dong Hoon Shin\*\* and Do Sam Kim\*\*

**요 지** : 본 연구에서는 복수의 대형 연직 주상구조물을 중심으로 구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑변형을 검토하며, 수치해석의 이론으로 쇄파나 강비선형 파랑을 고정도로 해석할 수 있는 Navier-Stokes 방정식에 근거한 3차원 VOF(Volume Of Fluid)법을 적용하였다. 본 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 파랑변형과 파력에 대한 기존의 수치실험결과와 본 수치해석결과를 비교·검토하였으며, 이로부터 2기로 구성된 임의 형상의 연직 주상구조물에 대해 구조물 형상, 구조물 배치간격, 파의 입사각도 변화에 따른 파력과 파랑변형의 특성을 논하였다.

**핵심어** : 3차원 VOF법, 연직 주상구조물, 비선형파력, 비선형파랑변형

**Abstract** : In the present work, wave transformation by vertical columns and its wave forces acting on them are discussed using a direct 3-D numerical model based on the VOF (Volume Of Fluid) method. The numerical results for wave transformations and wave forces are critically compared to an advanced experimental data, and provide the verification of the numerical model used in the present study. Overall model-data comparisons are good. After verification of the numerical model, it is used to simulate wave fields around dual vertical columns with arbitrary cross section, and the characteristics of nonlinear wave forces and wave transformations according to the variations of different cross section types of vertical columns, an interval of vertical columns and incident wave angle are discussed.

**Keywords** : 3-D VOF method, vertical columns, nonlinear wave forces, nonlinear wave transformations

### 1. 서 론

연안역의 개발 및 이용과 관련하여 다양한 형태를 갖는 해안·항만구조물이 연안역에 건설되어 왔으며, 특히 최근에는 해상교량의 교각, 원유저장탱크, 원자력발전소의 취수탑 등과 같은 대형 주상구조물의 설치사례가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 해안·항만구조물의 설계에 있어서 대형 주상구조물에 의한 파동장의 변화에 따른 주변해역을 항해하는 선박으로의 영향 및 주상구조물 주변의 세굴문

제 등을 검토하는데 있어서 매우 중요하다. 또한, 대형 주상구조물에 의해 발생하는 회절파를 고려한 작용파압 및 파력은 내파설계상 정확히 예측할 필요가 있다.

파랑과 대형 주상구조물과의 상호작용에 대한 기존의 연구는 대부분이 회절파의 선형해석 및 2차오더의 비선형해석(Second order wave)으로 주로 연구·검토되어 왔으며, 주파수영역의 해석에서는 파랑특성에 따른 파력의 변화특성을, 시간발전형의 계산에서는 선형해석과 비선형해석의 차이에 따른 파력과 수면형의 시간변동특성을 주

\*나고야대학 대학원 공학연구과(Department of Civil Engineering, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan. leekh@civil.nagoya-u.ac.jp)

\*\*한국해양대학교 건설환경공학부(Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University)

로 논의하고 있다.

회절파의 선형해석은 MacCamy and Fuchs(1954)에 의해 유도된 해석해를 비롯하여, 특이점분포법(John, 1950; Isaacson, 1978), 고유함수 전개법(김 등, 2001) 및 유한요소법(Zienkiewicz et al., 1977) 등의 다양한 수치해석기법이 제안되어 연구되어 왔다. 그리고, 비선형회절파이론의 경우에 Molin(1979), Kioka and Ishida(1984), Eatock(1989) 등은 2차의 속도포텐셜을 직접 유도하지 않고, 1차오더의 속도포텐셜과 2배주파수를 갖는 동차의 수면경계조건으로부터 산정된 방사포텐셜을 사용하여 Huskind의 상반성원리로 2차오더의 파력을 산정하는 약비선형의 포텐셜모델을 제안하였으며, Ghalayini and Williams(1991)는 임의형상을 갖는 복수의 구조물에까지 이를 확장·적용하였다. 그러나, 이러한 연구는 기본적으로 2차오더의 포텐셜을 산정하고 있지 않기 때문에 작용파력을 산정할 수 있지만 구조물 주변에서의 비선형파랑변형이나 파랑의 치오름높이를 검토할 수 없는 단점이 있다. Kim and Yue(1989), Kriebel(1990), Chau and Eatock(1992), Sanada(1998) 등은 2차오더의 회절산란포텐셜을 유도하여 파랑과 대형 주상 구조물과의 비선형상호작용을 연구하였으나 임의형상의 복수 연직 주상구조물로의 적용에는 한계가 있다. 김·신(1999)은 Hankel함수를 Green함수로 사용하는 경계적분법과 섭동전개법을 병용하는 수법을 확장·적용하여 임의형상의 복수 연직 주상구조물에 작용하는 비선형의 파력특성과 구조물에 의한 비선형파랑변형특성을 검토하였다. 한편, 구조물에 작용하는 파력 및 구조물에 의한 주변 파동장의 변화를 시간발전형으로 검토한 연구(Isaacson and Cheung, 1991)가 다소 수행되었으나 반잠수형태의 구조물(Submerged semi-circular cylinder)을 대상으로 비쇄파의 약비선형파랑을 적용하고 있으며, 임의형상을 갖는 구조물 및 복수 연직 주상구조물이 설치된 경우에 대해서는 이론해석의 확장성에 무리가 있다.

최근, 해안·항만공학분야에서 강비선형의 파랑 및 쇄파로 인한 복잡한 자유수면의 거동특성까지도 고정도로 해석할 수 있는 Navier-Stokes방정식에 근거한 VOF법(Volume Of Fluid; 이하 VOF법)을 활용한 연구가 활발히 수행되고 있으며(김 등, 2004), 3차원파동장에 설치된 구조물에 작용하는 파력해석에까지도 적용되고 있다(허 등, 2006).

본 연구에서는 VOF법을 3차원파동장에 적용하여 구조물에 의한 주변파동장과 그에 따른 파력특성을 실험치와 비교·검토한다. 그리고, 검증된 결과를 바탕으로 원형단면 및 정사각형단면을 갖는 복수 연직 주상구조물을 대

상으로 구조물에 작용하는 비선형파력 및 구조물에 의한 주변파동장의 변화특성을 구조물의 배치간격 및 입사파의 파향각과 관련하여 논의한다.

## 2. 수치해석이론

### 2.1 기초방정식

유체를 비압축성의 점성유체로 가정하면 본 연구의 기초방정식은 내부조파를 위한 용출항을 포함한 연속방정식 (1)과 Navier-Stokes운동방정식 (2), (3), (4)로 구성된다. 그리고, 식 (5)는 자유수면을 모의하기 위한 VOF함수의 이류방정식을 나타낸다.

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

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (vD_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (vD_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (vD_{xz}) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2v\partial q^*}{3 \partial y} + 2 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (vD_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (vD_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (vD_{xz}) \right\} \quad (3)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2v\partial q^*}{3 \partial z} - g - \beta w + 2 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (vD_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (vD_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z} (vD_{zz}) \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(Fv)}{\partial y} + \frac{\partial(Fw)}{\partial z} = Fq^* \quad (5)$$

여기서,  $q^*=q(y, z, t)/\delta(x-x_s)$ 로 조파위치  $x=x_s$ 에서의 유량밀도로,  $x=x_s$ 이외의 영역에서는 0으로 주어지며,  $\delta$ 는 Dirac delta함수이다. 그리고,  $u, v, w$ 는  $x, y, z$ 방향의 유속성분,  $t$ 는 시간,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\nu$ 는 유체의 동점성계수,  $g$ 는 중력가속도,  $\beta$ 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 파랑감쇠계수,  $D_{ij}(i, j=x, y, z)$ 는 유체의 변형속도 Tensor,  $F$ 는  $0 \leq F \leq 1$ 의 값을 갖는 VOF함수를 각각 나타낸다.

일반적으로 지배방정식으로 주어지는 Navier-Stokes방정식의 계산수법으로 SOLA(numerical SOLUTION Algorithm for transient fluid flow; Hirt and Nichols, 1981; Hur and Mizutani, 2003; Kawasaki, 1999)기법으로 알려져 있는 HSMAC(Highly Simplified MARKer and Cell scheme) 기법을 3차원파동장에 적용하는 경우 방대한 컴퓨터 메모리 및 많은 계산시간이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 HSMAC기법에 비해 보다 효율적인 방법으로 알려져

있는 Two-step projection기법(Chorin, 1968)을 이용하여 수치해석을 수행하며, 보다 상세한 내용 및 알고리즘에 대해서는 Lee(2006)를 참조하기 바란다.

## 2.2 선 조파기법

최근, 계산영역에서 반사된 파가 조파 띠(Source band)를 통과하여 스폰지층에서 소멸되고 계산영역 내부에는 에너지가 축적되지 않으면서 조파가 가능한 내부조파기법(Internal generation of waves)이 선 조파기법(Line source method : Brorsen and Larsen, 1987; 김 등, 2001)과 원천함수기법(Source function method: 이, 1997; 김 등, 2004)의 형태로 개발되었다. 본 연구에서는 내부조파기법으로 선 조파기법을 통한 조파방법을 적용한다. 그리고, 수치계산은 엇갈린격자를 채용하고 있으므로 셀 경계면내에서 각 방향의 유속  $u$ ,  $v$ ,  $w$ 는 일정한 값을 가진다. 따라서, 식 (1)의 연속방정식을 조파지점  $x=x_s$ 에 있는 하나의 셀( $x$ 방향의 격자간격:  $\delta x$ )에 대해 체적적분을 수행하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\int_x^{x+\delta x_s} \int_y^{y+\delta y_j} \int_z^{z+\delta z_k} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dx dy dz = \int_x^{x+\delta x_s} \int_y^{y+\delta y_j} \int_z^{z+\delta z_k} q(y, z, t) \delta(x-x_s) dx dy dz \quad (6)$$

조파지점에서의 Dirac delta함수의 적분은  $\int_x^{x+\delta x_s} \delta(x-x_s) dx = 1$  이므로 식 (6)은 식 (7)로 되고, 최종적으로 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] \delta x_s \delta y_j \delta z_k = q(y, z, t) / \delta y_j \delta z_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q(y, z, t) / \delta x_s \quad (8)$$

따라서, 엇갈린격자를 이용하여 이산화할 경우 조파를 위한 내부용출량은 조파지점  $x=x_s$ 에서 조파강도  $q^*=q(y, z, t)/\delta x_s$ 를 고려하는 것으로 된다.

선 조파방법에 의한 조파방법을 제안한 Brorsen and Larsen(1987)은 조파지점에서 조파시킬 때 해석영역의 양쪽방향( $x$ 의 (+)방향과  $x$ 의 (-)방향)으로 파랑이 전달되기 때문에 식 (9)와 같은 조파강도  $q$ 를 제안하고 있다.

$$q = 2U_0 \quad (9)$$

여기서,  $U_0$ 는 조파유속을,  $U_0$ 의 계수 2는 선 조파기법에 의한 파의 발생시 해석영역의 양쪽방향으로 파의 진

행을 각각 나타낸다.

본 연구에서는 Stokes파의 3차오더에 기초하여 조파하며, 단 급작스러운 조파에 의해 자유수면의 거동이 불안정해지는 것을 방지하기 위해 조파강도를 서서히 증가시키는  $\{1-\exp(-2t/T)\}$ 의 항을 도입하여 무차원( $t/T$ ) 3주기까지는 점증적인 강도를, 이후부터 일정강도를 주는 다음 식과 같은 조파강도식을 고려한다.

$$q = \begin{cases} \{1-\exp(-2t/T) \cdot 2U_0\} & : t/T \leq 3 \\ 2U_0 & : t/T > 3 \end{cases} \quad (10)$$

여기서,  $t$ 는 계산시간,  $T$ 는 입사파의 주기를 나타낸다.

그러나, 수치과동수로 내에 구조물이 설치되는 경우에 대해 조파위치로 구조물에 의한 반사파가 접근하는 경우는 조파위치에서의 수위변동  $\eta_s$ 와 내부조파에 의해 기대되는 수위변동  $\eta_0$ 가 서로 상이하게 된다. 따라서, 식 (10)과 같이 조파강도가  $q=2U_0$ 로 될 수 없으므로 Ohyama and Nadaoka(1991)는 입사파와 반사파가 동시에 존재하는 경우에 대해 조파강도의 분포형상을 조파지점의 연직적분치가 반사파가 없는 경우와 분포형상이 상사되도록 ( $\eta_0+h$ )/( $\eta_s+h$ )을 도입하여 다음의 식 (11)을 고려하고 있다.

$$q = 2U_0 \frac{\eta_0+h}{\eta_s+h} \quad (11)$$

여기서,  $h$ 는 수심이며, 본 연구에서는 식 (11)을 고려하여 식 (10)의 조파강도식을 다음과 같이 적용한다.

$$q = \begin{cases} \{1-\exp(-2t/T) \cdot 2U_0(\eta_0+h)/(\eta_s+h)\} & : t/T \leq 3 \\ 2U_0(\eta_0+h)/(\eta_s+h) & : t/T > 3 \end{cases} \quad (12)$$

## 3. 수치해석의 검증

### 3.1 수위의 공간분포

본 연구에서 적용한 선 조파기법의 조파성능을 검토하기 위하여 수심  $h=35$ cm를 갖는 3차원파동장내 파고  $H=6$ cm,

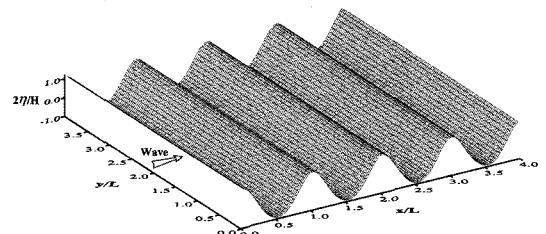


Fig. 1. Spatial distribution of water level.

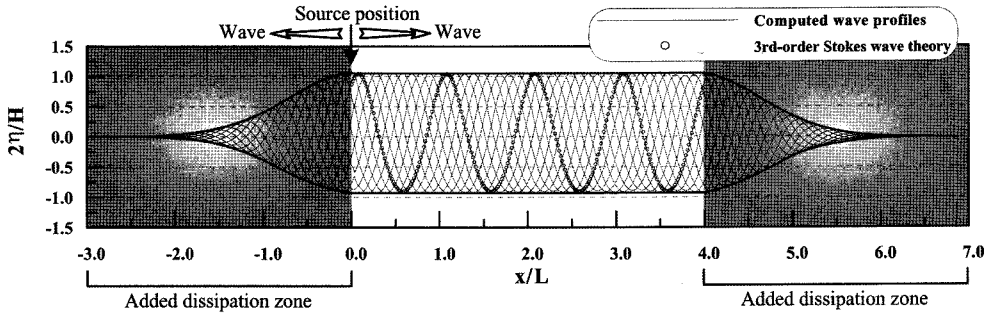


Fig. 2. Spatial distribution of computed and target wave profiles at each time.

주기  $T=1.0$  s를 입사파조건으로 하여 계산된 수위의 공간 분포에 대한 일례를 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 1을 살펴보면 계산영역내( $0.0 \leq x/L \leq 4.0$ ,  $0.0 \leq y/L \leq 4.0$ )에는 안정적인 파가 형성되는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 2는 개경계에서 발생할 수 있는 파랑의 재반사가 해석영역의 파동장에 미치는 영향을 방지하기 위하여 수치파동수로의 양 끝단에 설치된 부가감쇠영역(Hinatsu, 1992)에서 파랑의 소파성능을 살펴본 것으로, Fig. 1과 동일한 수치파동수로 및 입사파를 조건으로 하여  $y/L=2.0$ 에서 계산된 수위의 공간분포를 부가감쇠영역을 포함한 전 계산영역에 대하여 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 개경계에서 발생하는 반사파는 부가감쇠영역( $-3.0 \leq x/L \leq 0.0$ ,  $4.0 \leq x/L \leq 7.0$ )에서 기대한 파랑의 감쇠로 충분한 소파효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 계산영역내( $0.0 \leq x/L \leq 4.0$ ) 수위의 공간분포를 목표로 하는 Stokes 3차파의 공간분포와 비교하면 본 연구의 계산파형에 약간의 수치적인 동요가 관찰되나 이의 값은 미미하며, 전체적으로 본 연구의 계산파형은 목표로하는 파형과 매우 잘 일치할 뿐만 아니라 원하는 파를 만족스럽게 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 구조물 주변 파동장에서의 수위변동

다음으로, 3차원 파동장에 설치된 연직 주상구조물 주변에서의 파랑변형특성에 대하여 Sanada(1998)의 실험치 및 수치해석결과를 이용하여 본 연구의 타당성을 검토한다.

Fig. 3은 비교에 사용된 3차원 수치파동수로 및 연직 주상구조물의 채원을 각각 나타내며, 적용한 수치파동수로는 수심  $h=45$  cm, 입사파고  $H=3$  cm, 입사주기  $T=1.0$  s의 경우이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 축을 따른  $y=0$  cm,  $y=25$  cm의 위치 및 연직 주상구조물 주위(구조물의 배후에서 반시계방향을 기준)에서 측정된 무차원최대수면상승고  $2\eta_{max}/$

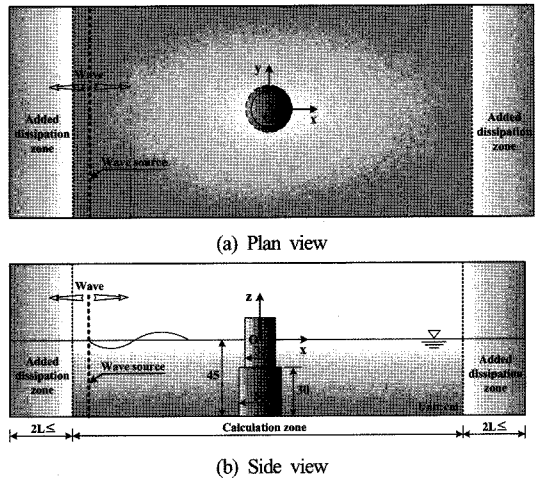


Fig. 3. Schematic sketch of 3-D numerical wave tank.

$H(\eta_{max}$ 는 최대수위값)의 공간분포를 Sanada(1998)의 실험치 및 수치해석결과와 비교한 본 연구의 계산결과이다. Fig. 4와 Fig. 5로부터 본 연구의 계산결과는 Sanada(1998)의 수치해석결과보다 실험치를 보다 정도 높게 재현하는 것을 알 수 있다.

3.3 구조물에 작용하는 파력

Fig. 6의 채원을 갖는 연직 주상구조물에 작용하는 파력의 변화를 Chakrabarti and Tam(1975)의 실험치와 본 연구의 계산결과를 비교하여 그 결과를 Fig. 7에 제시한다. 여기서, 구조물에 작용하는 파력은 구조물표면에서의 파압을 적분하여 산정하였다. 결과를 살펴보면 본 연구의 계산결과는 파랑특성에 따른 파력의 변화특성에 대하여 실험치를 잘 재현하고 있는 것으로 판단되며, 실험치가 거의 제시되지 않는  $ka < 0.8$  이하의 범위에서 주기가 증가함에 따라 파력이 감소하는 주지의 결과(Kioka and Ishida,

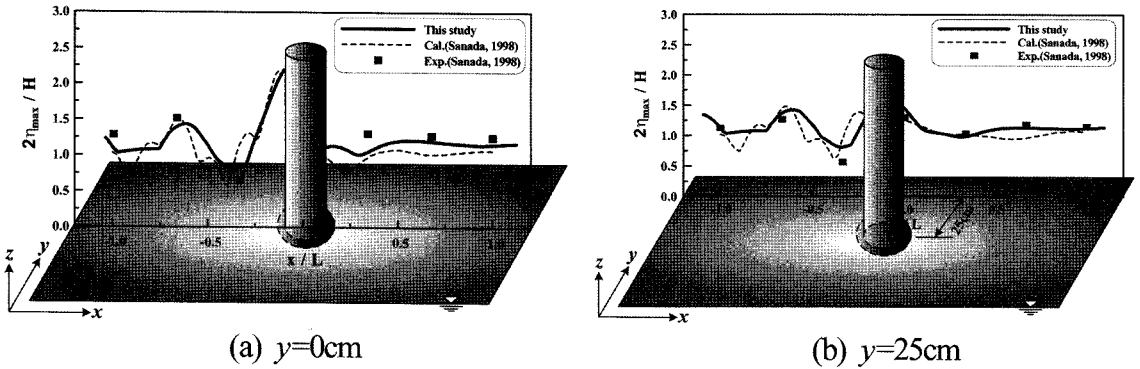


Fig. 4. Comparison of non-dimensional maximum water level along x-axis( $H/L=0.02$ ).

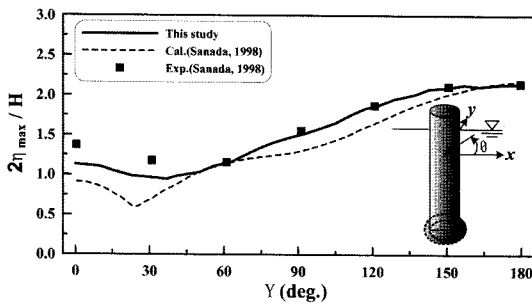


Fig. 5. Comparison of non-dimensional maximum water level around vertical column( $H/L=0.02$ ).

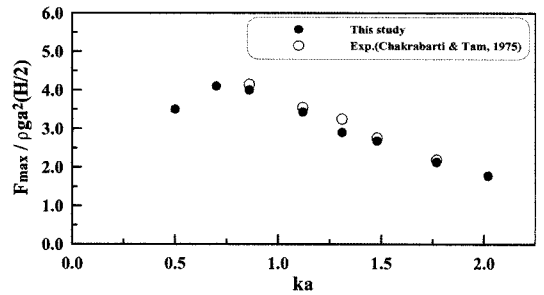


Fig. 7. Comparison of non-dimensional maximum wave forces ( $k$  is wave number,  $k=2\pi/L$ ).

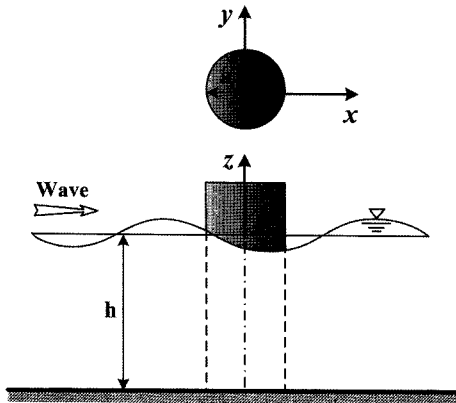


Fig. 6. Definition sketch( $h/a=1.16$ ,  $H/a=0.232$ ).

## 4. 수치해석 결과

3차원파동장에 설치된 원형 및 정사각형의 단면형상을 갖는 Fig. 8의 복수 연직 주상구조물을 대상으로 구조물의 배치간격  $e/D$ ,  $e/B$  및 입사파향각  $\alpha$ 의 변화에 따른 구조물에 작용하는 파력 및 구조물에 의한 주변파동장의 변화특성을 고찰한다. 수치해석에 적용한 입사파조건 및 연직 주상구조물의 제원은 다음의 Table 1에 제시하며,  $D$ 는 원형단면의 직경,  $B$ 는 정사각형단면의 폭,  $e$ 는 구조물 간의 거리를 각각 나타낸다.

### 4.1 입사파향각 $\alpha=0^\circ$

Fig. 9와 Fig. 10은 입사파향각  $\alpha=0^\circ$  경우 파 진행방향 우측에 설치된 구조물 1을 대상으로 구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향 성분  $F_x$  및  $y$ 방향 성분  $F_y$ 의 최대값의 변화를 구조물의 배치간격  $e/D$  및  $e/B$ 를 파라미터로 나타낸 것이다. 전체적으로  $F_x$ 의 변화에 미치는 구조물의 단면형상 및 배치간격의 영향은 크게 없는 것으로 판단되며, 구조물의 배치간격에 따른  $F_x$ 의 변화는 단수 연직 주

1984)와 본 수치해석의 결과가 잘 일치한다.

이상으로부터 3차원 파동장에 설치된 연직 주상구조물 주변파동장의 변화 및 구조물에 작용하는 파력특성에 대한 계산결과는 실험치를 잘 재현하고 있고, 그 정도는 높은 것으로 판단되므로 본 연구의 타당성이 검증된다.

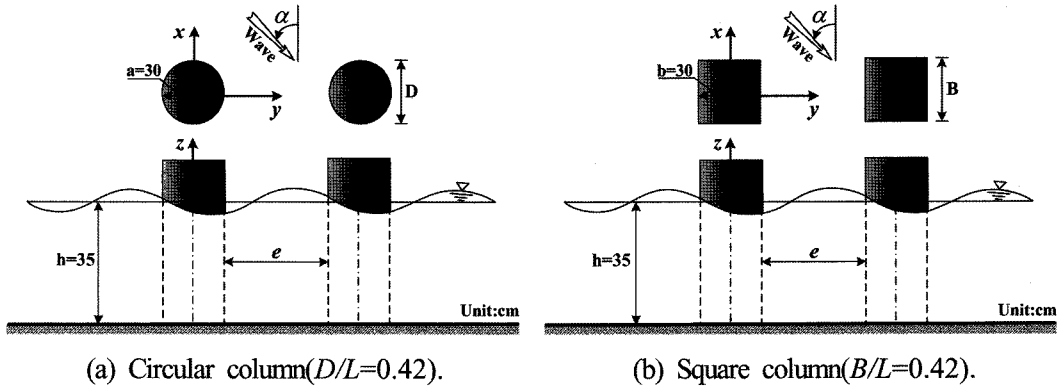


Fig. 8. Dual vertical columns used in numerical analysis.

Table 1. Conditions of numerical analysis

Shape of structure	$T$ (s)	$H$ (cm)	$h$ (cm)	$D, B$ (cm)	$H/L$	$e/D, e/B$	( $^\circ$ )
Circular column	1.0	6	35	60	0.04	0.25-4.0	0
							45
							90
Square column	1.0	6	35	60	0.04	0.25-4.0	0
							45
							90

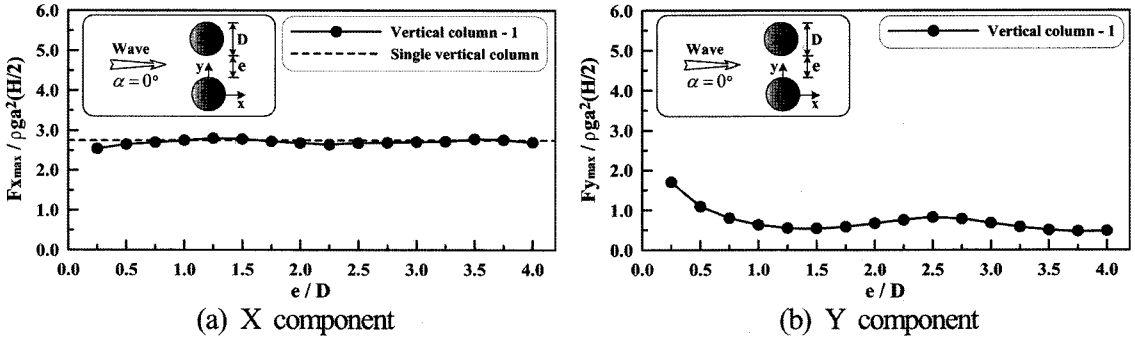


Fig. 9. Maximum wave forces acting on vertical column 1.

상구조물의 경우에 대한  $F_x$ 와 비슷한 값으로 변동하고 일정거리 이상이 되는 곳에서는 단수 연직 주상구조물의  $F_x$ 와 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 그리고, 구조물에 작용하는 파력의  $y$ 방향 성분  $F_y$ 는  $F_x$ 와 비교하여 구조물의 단면형상 및 배치간격에 상대적으로 큰 영향을 받을 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 정사각형단면을 갖는 연직 주상구조물에서 보다 명확히 나타난다. 그리고, 본 연구의 범위내에서는  $F_y$ 의 최대값은 각 단면에 대한 배치간격이 가장 좁은  $e/D=0.25, e/B=0.25$ 에서 나타나고, 이후 감소하다가 구조물간의 거리  $e$ 가 입사파장  $L$ (약 150 cm)에 대해 약  $e \approx 1.0L$ 이 되는  $e/D=2.5, e/B=2.5$ 부근에서  $F_y$ 의

최대값이 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 원인은 구조물에 의한 회절파의 영향과 구조물간의 간섭현상으로 구조물간 내부파동장에 형성되는 부분중복파의 영향이 공진현상으로 발생한 결과로 판단된다.

이와 같이 구조물의 배치간격에 따른 파력의 변화특성을 보다 상세히 살펴보기 위하여 정사각형단면을 갖는 연직 주상구조물을 대상으로 배치간격이  $e/B=0.25, e/B=1.0, e/B=2.0, e/B=2.5$ 인 경우에 대한 무차원최대수면상승고  $2\eta_{max}/H$ 의 공간분포를 Fig. 11에 제시한다. 전체적으로 구조물 전면의 부분중복파는 구조물의 배치간격에 따라 상이하게 나타나며, 수면상승고는 구조물 전면이 구조물 배

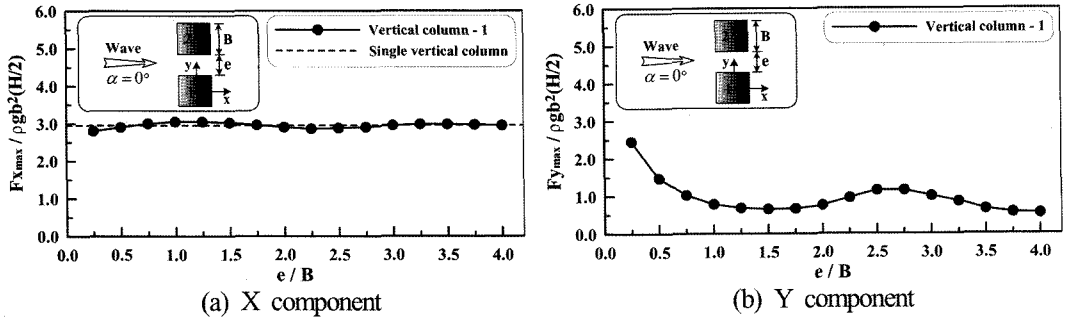


Fig. 10. Maximum wave forces acting on vertical column 1.

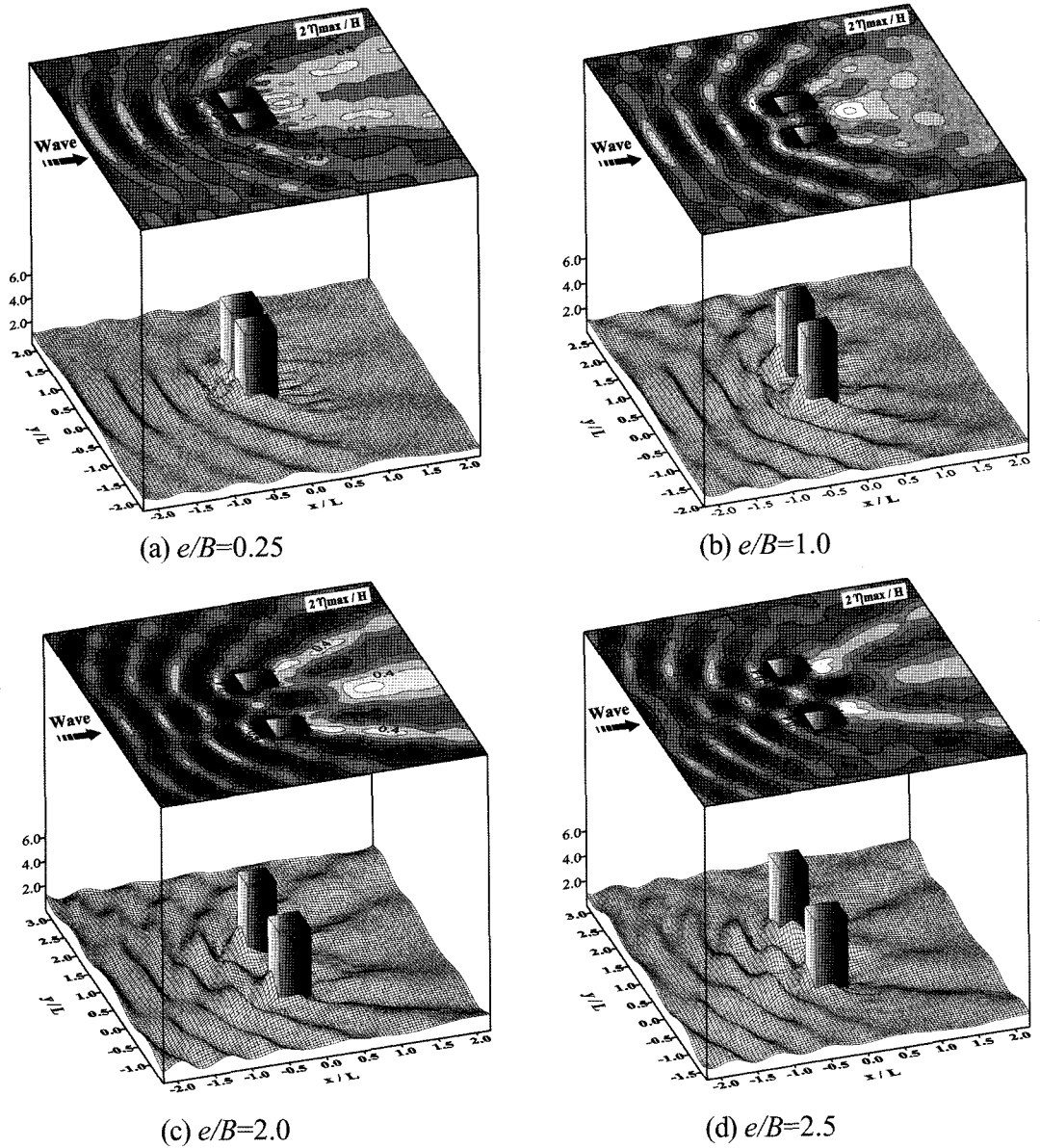


Fig. 11. Spatial distributions of non-dimensional maximum water level.

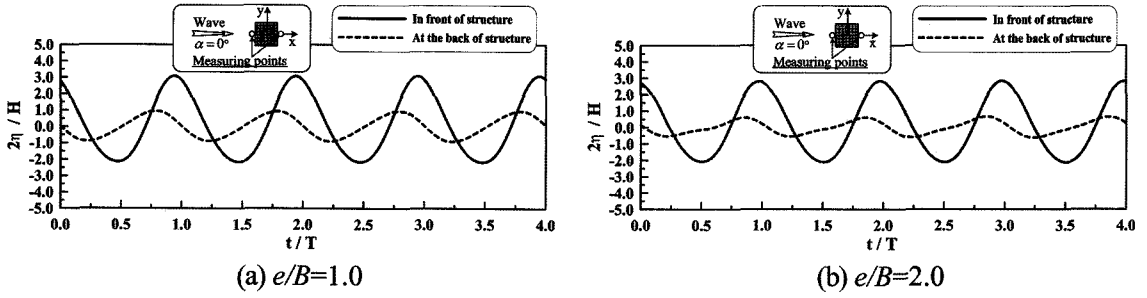


Fig. 12. Time variations of non-dimensional water level.

후면에 비해 보다 높은 값을 나타내고 있다. 그리고, 구조물 내측에서는 구조물의 배치간격에 따라 수면상승고의 공간변화가 복잡하게 나타나고, 특히 구조물의 배치간격이 가장 좁은 Fig. 11(a)의 경우 구조물간의 내부파동장에서 가장 복잡한 수면상승고가 관찰된다. 또한, Fig. 11(d)의 경우에는 내측의 전 단면에 걸쳐 높은 수면상승고가 형성되며, 구조물 내·외측과의 수면상승고 차이도 크게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 여기서 제시되어 있지는 않지만 원형단면을 갖는 연직 주상구조물의 경우에 대해서도 동일한 경향을 나타내었다. 이와 같은 결과로부터 연직 주상구조물에 작용하는 파력의  $y$ 방향 성분  $F_y$ 는 구조물의 배치간격에 따른 파랑에너지 전달과 구조물에 의한 회절파의 영향으로 형성되는 내부 파동장의 변화에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 정사각형단면의 연직 주상구조물을 대상으로 파 진행방향 우측에 설치된 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화를 나타낸 것으로  $e/B=1.0$ ,  $e/B=2.0$ 의 경우이다. Fig. 12를 살펴보면 구조물 전면에서는 부분증폭파에 의한 수면상승고가 확인되며, 구조물 배후면에서는 구조물의 배치간격에 따른 파랑에너지

의 전달과 구조물에 의한 회절파의 영향으로 수면상승고의 시간변화에 비선형성이 관찰된다. 이러한 경향은 Fig. 12(a)에 비해 구조물의 배치간격이 넓은 Fig. 12(b)에서 보다 명확히 나타나고, 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 수면상승고에 위상차이가 관찰된다. 그리고, 구조물 1의 전면과 배후면에서의 수면상승고에 대한 차이의 최대값은 Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)가 비슷한 값으로 주어지므로, 수면상승고의 차이로 나타나는 파력의  $x$ 방향 성분  $F_x$ 는 구조물의 배치간격에 큰 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

#### 4.2 입사파향각 $\alpha=45^\circ$

Fig. 13과 Fig. 14는 입사파향각  $\alpha$ 가  $45^\circ$  입사하는 경우 구조물의 배치간격에 따른 원형단면과 정사각형단면을 갖는 연직 주상구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향 성분  $F_x$ 의 최대값 변화를 살펴본 것이다. Fig. 13(a)와 Fig. 14(a)는 파 진행방향 우측에 설치된 구조물 1의 경우이며, Fig. 13(b)와 Fig. 14(b)는 파 진행방향 좌측에 설치된 구조물 2에 대한 경우이다. Fig. 13과 Fig. 14를 살펴보면 구조물의 배치간격에 따른  $F_x$ 의 변화는 구조물 1의 경우가 구

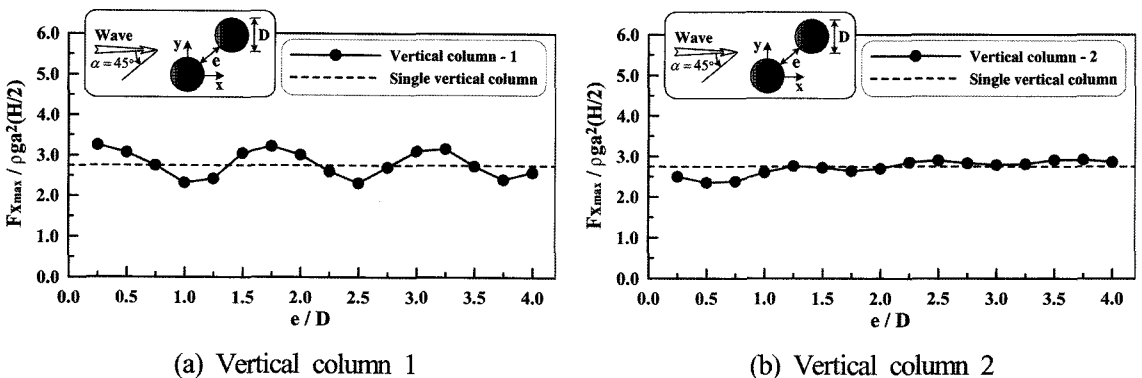


Fig. 13. X component of maximum wave forces.



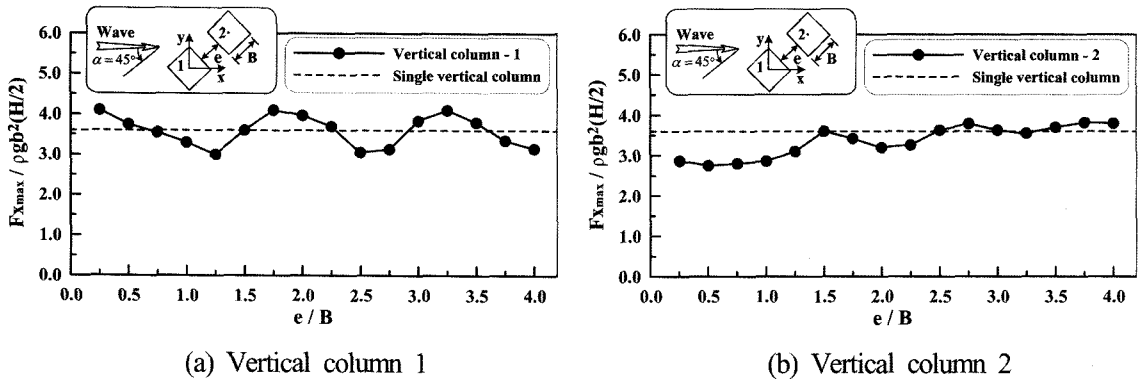


Fig. 14. X component of maximum wave forces.

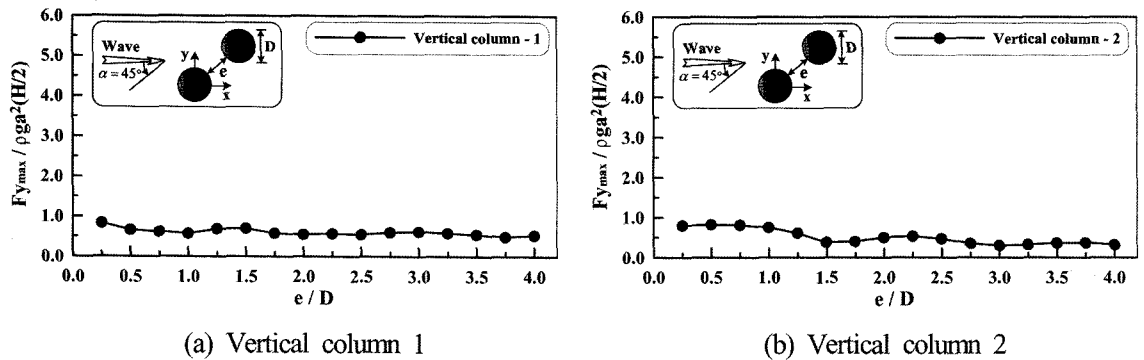


Fig. 15. Y component of maximum wave forces.

조물 2의 경우에 비해 크게 변동하는 것을 알 수 있다. 그리고,  $F_x$ 의 변화는 구조물의 배치간격이 일정거리 이상이 되는 곳에서는 단수 연직 주상구조물에 대한  $F_x$ 에 근접하는 것을 알 수 있고, 이러한 경향은 구조물 1의 경우에 비해 구조물 2에서 보다 명확히 나타난다. 구조물의 배치간격에 따른 구조물 1에서의  $F_x$ 에 대한 최대값은 구조물의 배치간격  $e/D$  및  $e/B$ 가 1.75의 정수배 되는 지점 부근으로 구조물간의 거리를 파 진행방향으로 투영한 거리가 입사파 파장  $L$ 의 약 1/2배가 되는 거리에 해당된다. 그리고, 구조물 2의 경우 구조물의 배치간격에 따른 파력의 변화특성이 원형단면에 비해 정사각형 단면을 갖는 주상구조물에서 보다 크게 되는 것을 알 수 있고, 이와 같은 원인은 구조물 1의 단면형상에 따라 구조물 2에 미치는 회절파의 영향이 상이하게 나타난 결과로 판단된다.

Fig. 15는 원형단면의 연직 주상구조물을 대상으로 구조물에 작용하는 파력의  $y$ 방향 성분  $F_y$ 의 변화를 구조물의 배치간격  $e/D$  및  $e/B$ 를 파라미터로 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면  $F_y$ 는  $F_x$ 에 비해 보다 작은 파력을 나타내고 있고,  $F_y$ 의 변화에 미치는 구조물 배치간격의 영향은

크게 없는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 여기서는 제시되어 있지 않지만 정사각형단면을 갖는 연직 주상구조물의 경우에도 동일한 결과를 확인할 수 있었다.

Fig. 16은 Fig. 13(a)의 경우에 대해  $F_x$ 가 작게 나타나는 지점( $e/D=1.0$ )과 크게 나타나는 지점( $e/D=1.75$ )에 대한 무차원최대수면상승고  $2\eta_{max}/H$ 의 공간분포를 나타낸 것이다. Fig. 16을 살펴보면 구조물 1의 전면에서 형성되는 부분중복파는 구조물의 배치간격에 따라 입사파 방향의 좌측(Fig. 16(a))과 우측(Fig. 16(b))에 집중되어 나타나며, 구조물 2의 경우는 전면에서 형성되는 부분중복파가 구조물의 배치간격에 큰 영향을 받지 않으며 입사파 방향의 좌측에 집중되는 것을 알 수 있다.

Fig. 17은 원형단면을 갖는 연직 주상구조물을 대상으로 파 진행방향 우측에 설치된 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화를 나타낸 결과이다. 전체적으로 구조물 1의 전면과 배후면의 수면상승고의 크기는 구조물의 배치간격이 넓은 Fig. 17(b)에서 더 높으며, 구조물 전면과 배후면에서의 수면상승고의 차이도 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 구조물

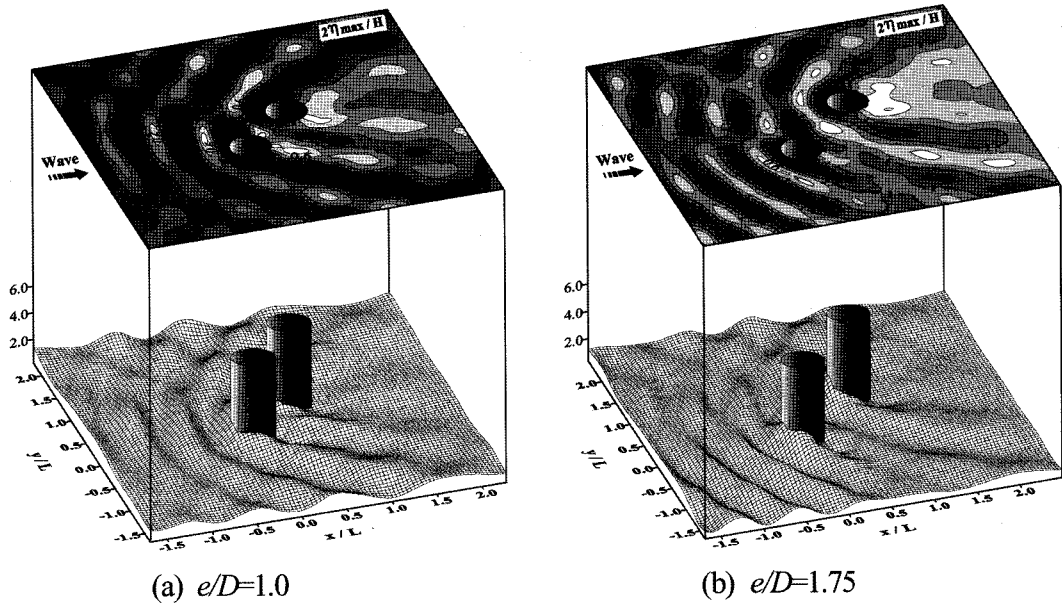


Fig. 16. Spatial distributions of non-dimensional maximum water level.

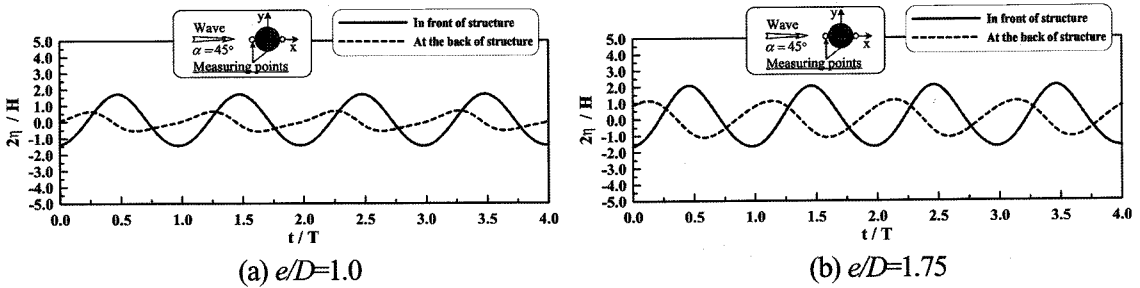


Fig. 17. Time variations of non-dimensional water level.

의 배후면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화를 살펴보면 구조물의 배치간격이 좁은 경우가 수면상승고의 시간변화에 큰 비선형성이 관찰되며, 이와 같은 결과는 구조물의 배치간격이 좁은 경우 구조물 1에 미치는 구조물 2의 간섭현상이 크게 된 결과로 판단된다. 결과적으로 입사파가 경사지게 입사하는 경우에는 구조물의 배치간격에 따라 상이하게 나타나는 부분중복파와 구조물간의 간섭현상에 따른 수위변동의 차이가 구조물에 작용하는 파력의 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4.3 입사파향각  $\alpha = 90^\circ$

Fig. 18과 Fig. 19는 원형단면과 정사각형단면을 갖는 연직 주상구조물을 대상으로 입사파가  $90^\circ$  입사하는 경우 구조물의 배치간격에 따른 파력의 x방향 성분  $F_x$ 의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 18(a)와 Fig. 19(a)는 파 진행

방향 전면에 설치된 구조물 1의 경우이며, Fig. 18(b)와 Fig. 19(b)는 파 진행방향의 후면에 설치된 구조물 2에 대한 경우이다. 구조물의 배치간격에 따른  $F_x$ 의 변화는 구조물 1의 경우 단수 연직 주상구조물의  $F_x$ 를 중심으로 크게 변동하며, 구조물 2의 경우는 대부분이 단수 연직 주상구조물의  $F_x$  이하 값의 범위에서 변동하는 것을 알 수 있다. 특히, 구조물 2의 경우에 대해  $F_x$ 가 단수 연직 주상구조물의  $F_x$  이하의 값에서 주어지는 것은 구조물 1에 의한 회절파의 영향이 구조물 2에 미친 결과로 판단되며, 이러한 경향은 원형단면에 비해 정사각형단면의 연직 주상구조물에서 보다 명확히 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고, 구조물 1의 경우 파력의 최대치가 관찰되는 구조물의 배치간격은 구조물의 배치간격이 1.25의 정수배 되는 지점 부근으로 구조물간의 거리가 입사파 파장  $L$ 의 약  $1/2$ 배가 되는 거리에 해당하는 것을 알 수 있었다. 이러한

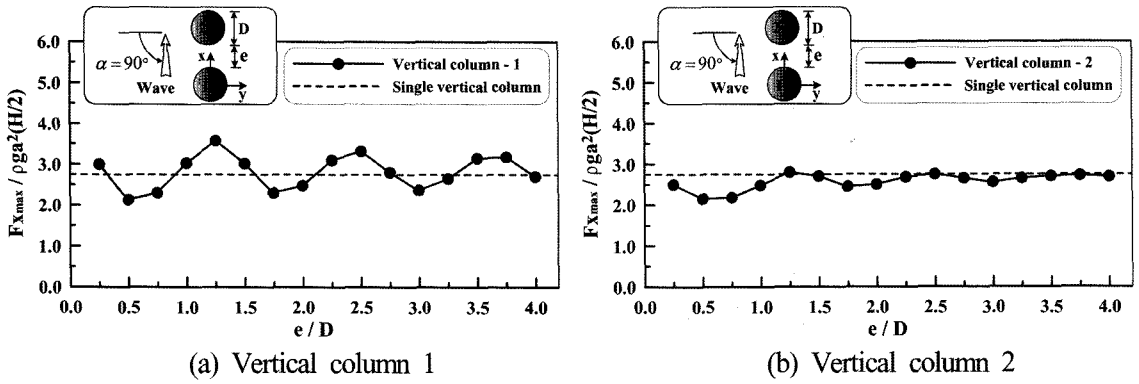


Fig. 18. X component of maximum wave forces.

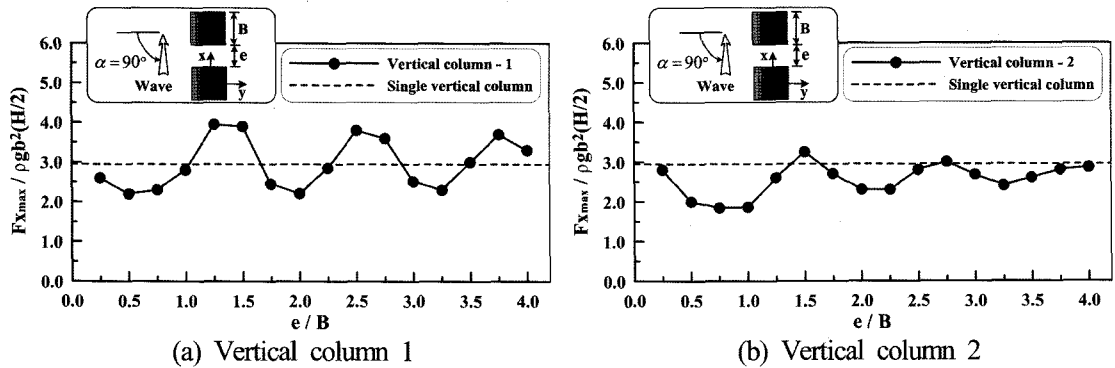


Fig. 19. X component of maximum wave forces.

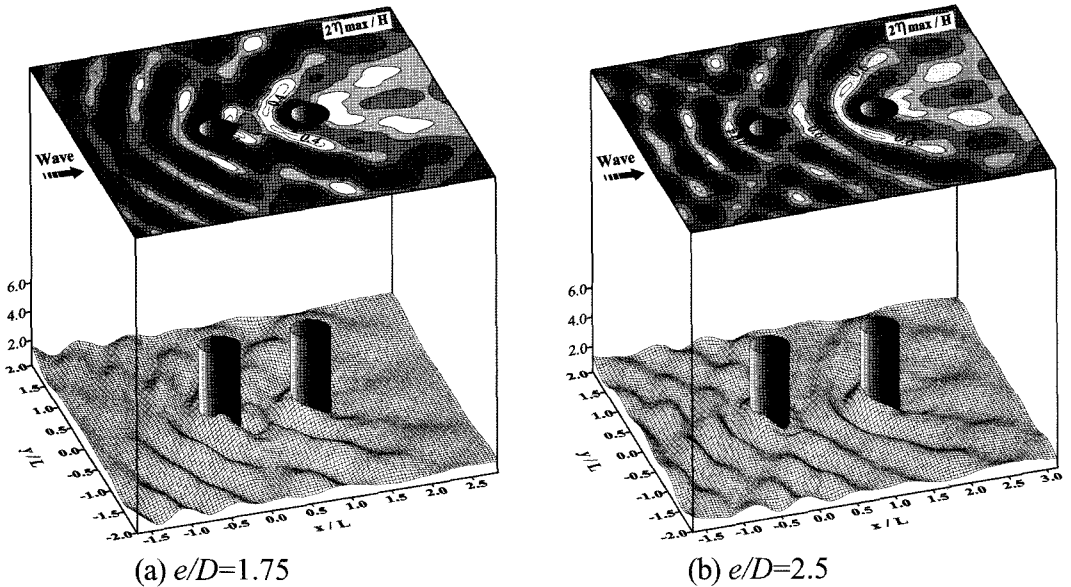


Fig. 20. Spatial distributions of non-dimensional maximum water level.

원인은 전술한 바와 같이 구조물에 의한 회절파의 영향과 구조물간의 간섭현상으로 구조물간 내부파동장에 형성

되는 부분중복파의 영향이 공진현상으로 발생한 결과로 판단된다.

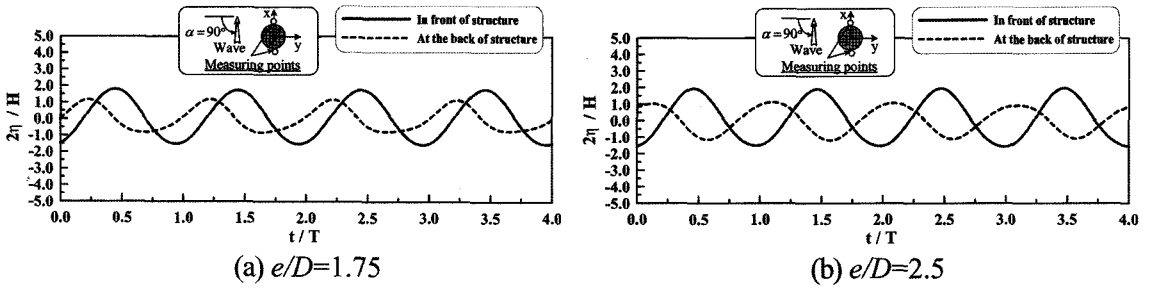


Fig. 21. Time variations of non-dimensional water level.

Fig. 20은 파 진행방향 전면에 설치된 구조물 1을 대상으로  $F_x$ 가 작게 나타나는 지점( $e/D=1.75$ )과 크게 나타나는 지점( $e/D=2.5$ )에 대한 무차원최대수면상승고  $2\eta_{\max}/H$ 의 공간분포를 나타낸 것이다. Fig. 20으로부터 구조물의 배치간격에 따라 구조물 주변에 형성되는 부분중복파는 상이하며, Fig. 20(b)의 경우 부분중복파는 구조물 1의 전면에 집중되어 형성되는 반면, Fig. 20(a)의 경우는 부분중복파가 구조물 1의 양측면에 분산되어 형성되고, 구조물 2와의 간섭으로 구조물 배후면에서는 수면상승고가 복잡하게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 21은 Fig. 20의 경우에 대해 구조물간의 간섭현상을 보다 상세히 살펴보기 위하여 구조물 1의 전면과 배후면에 설치된 파고계로부터 얻어진 수면상승고의 시간변화를 나타낸 것이다. Fig. 21을 살펴보면 구조물 배후면의 수면상승고의 비선형적인 시간변화는 구조물의 배치간격이 상대적으로 좁은 Fig. 21(a)에서 보다 명확히 나타나는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 VOF법을 3차원파동장에 적용하여 원형 단면 및 정사각형단면을 갖는 복수 연직 주상구조물을 대상으로 구조물의 배치간격과 입사파향각의 변화에 따른 구조물에 작용하는 파력 및 구조물에 의한 주변파동장의 변화특성을 해석하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 결론으로 하여 아래에 기술한다.

1. 3차원파동장에 설치된 연직 주상구조물과 파랑과의 상호작용에 따른 연직 주상구조물 주변파동장의 변화 및 구조물에 작용하는 파력특성을 실험치와 비교·검토한 결과 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.

2. 구조물의 배치간격에 따라 구조물 전면과 배후면에서의 수면상승고의 시간변화는 구조물간의 간섭현상과 회

절파의 영향으로 위상차이를 보이며, 구조물의 배치간격이 좁은 경우에는 구조물 배후면 수면상승고의 시간변화에 비선형성이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3. 입사파향각  $\alpha=0^\circ$  경우 복수 연직 주상구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향 성분  $F_x$ 는 구조물의 배치간격에 큰 영향은 받지 않았으며, 파력의  $y$ 방향 성분  $F_y$ 는 구조물의 배치간격이 가장 좁은 경우에 최대파력을 나타낸 후, 구조물의 배치간격이 넓어질수록 파력이 감소하며 구조물간 거리가 입사파 파장  $L$ 에 상당하는 배치간격에서는 파력이 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

4. 입사파향각  $\alpha=45^\circ$  경우 구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향 성분  $F_x$ 는 파 진행방향의 우측에 설치된 구조물이 파 진행방향 좌측에 설치된 구조물에 비해 구조물의 배치간격에 보다 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 파 진행방향의 우측에 설치된 구조물의 경우 파력의  $x$ 방향 성분  $F_x$ 가 최대로 나타나는 구조물의 배치간격은  $e/D$  및  $e/B$ 가 1.75의 정수배가 되는 지점 부근이고, 구조물간의 거리를 파 진행방향에 대해 투영한 거리가 입사파 파장  $L$ 의 약 1/2배 되는 거리에 해당하는 것을 알 수 있었다.

5. 입사파향각  $\alpha=90^\circ$  경우 파 진행방향 전면에 설치된 연직 주상구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향 성분  $F_x$ 의 최대치는 구조물의 배치간격이 1.25의 정수배가 되는 지점 부근에서 다시 증가하는 경향을 나타내었으며, 구조물간의 거리가 입사파 파장  $L$ 의 약 1/2배가 되는 거리에 해당하는 것을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국해양대학교 기성회계의 지원으로 미국 Oregon State University에서 수행된 결과의 일부이며, 연구비의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김건우, 이창훈, 서경덕 (2004). 시간의존 파랑변형식에서의 내부조파: 선 조파기법과 원천함수기법, 대한토목학회논문집, 24(6B), 585-594.
- 김도삼, 신동훈, 이봉재 (2001). 3차원 파동장에 있어서 대형연직케이스에 작용하는 선형 및 비선형의 파압분포특성에 관한 연구, 한국해양공학회지, 16(3), 114-119.
- 김도삼, 신동훈 (1999). 임의형상단면의 복수 연직 주상구조물에 작용하는 비선형파력과 비선형파랑변형에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 19(II-6), 717-727.
- 김도삼, 이광호, 유현상, 김창훈, 손병규 (2004). 불규칙파동장에 있어서 VOF법에 의한 투과성잠체의 파랑제어특성에 관한 연구, 한국해양·해양공학학회지, 16(3), 121-129.
- 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수 (2001). VOF법에 기초한 불투과성잠체 주변파동장의 수치해석, 대한토목학회논문집, 21(5-B), 551-560.
- 이창훈 (1997). 시간의존 환경사방정식에서의 내부조파기법, 대한토목학회논문집, 17(II-4), 359-366.
- 허동수, 염경선, 배기성 (2006). 혼성방파제에 작용하는 3차원 파압구조에 미치는 위상차의 영향, 대한토목학회논문집, 26(5B), 563-572.
- Brorsen, M. and Larsen, J. (1987). Source Generation of Non-linear Gravity Waves with Boundary Integral Equation Method, Coastal Eng., 11, 93-113.
- Chakrabarti, S.K. and Tam, W.A. (1975). Interaction of Waves with Large Vertical Cylinder, J. Ship Res., 19, 23-33.
- Chau, F.P. and Eatock, T.R. (1992). Second Order Wave Diffraction by a Vertical Cylinder, J. Fluid Mech., 240, 571-599.
- Chorin, A.J. (1968). Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations, Math. Comp., 22, 745-762.
- Eatock, T.R. (1989). On Distribution of Second Order Pressure on Vertical Circular Cylinder, Applied Ocean Res., 11(4), 183-193.
- Ghalayini, S.A. and Williams, A.N. (1991). Nonlinear Wave Force on Vertical Cylinders of Arbitrary Cross Section, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 115(6), 809-830.
- 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, 217, 1-11.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, J. Comp. Phys., 39, 201-225.
- Hur, D.S. and Mizutani, N. (2003). Numerical Estimation of the Wave Forces Acting on a Three-Dimensional Body on Submerged Breakwater, Coastal Eng., 47, 329-345.
- Isaacson, M. (1978). Vertical Cylinders of Arbitrary Section in Wave, J. Waterway, Coastal and Ocean Eng., 104(WW4), 309-322.
- Isaacson, M. and Cheung, K.F. (1991). Second Order Wave Diffraction Around Two-dimensional Bodies by Time-domain Method, Applied Ocean Res., 13, 175-186.
- John, F. (1950). On the Motions of Floating Bodies II, Conn. Pur Appl. Math., 3, 45-101.
- Kawasaki, K. (1999). Numerical Simulation of Breaking and Post Breaking Wave Deformation Process around a Submerged Breakwater, Coastal Eng. in Japan, 41(3), 201-223.
- Kim, M.H. and Yue, D.K.P. (1989). The Complete Second-Order Diffraction Solution for an Axisymmetric Body, Part 1. Monochromatic Incident Waves, J. Fluid Mech., 200, 235-264.
- Kioka, W. and Ishida, S. (1984). Diffraction Wave Force of Second-Approximation Acting on Vertical Cylinder, Japanese Conference on Coastal Eng., 620-624.
- Kriebel, D.L. (1990). Nonlinear Wave Interaction with Vertical Cylinder, part I: Diffraction Theory, Ocean Eng., 17(4), 345-377.
- Lee, K.H. (2006). A study on Time Domain Analysis of Non-linear Dynamic Interaction among Wave, Currents and Bed Materials, Doctoral thesis, Nagoya University, 169p.
- MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A. (1954). Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory, Beach Erosion Board, Tech. Memo., 69, 1-17.
- Molin, B. (1979). Second-Order Diffraction Loads upon Three-Dimensional Bodies, Applied Ocean Res., 1(4), 197-202.
- Ohyama, T. and Nadaoka, K. (1991). Development of a Numerical Wave Tank for Analysis of Non-linear and Irregular Wave Field, Fluid Dyn. Res., 8, 231-251.
- Sanada, M. (1998). A Study of Second-Approximation Analysis Results and Application for Nonlinear Diffraction Wave According to Large Coastal Structure, Doctoral thesis, Nagoya University, 223p.
- Zienkiewicz, O.C., Kelly, D.W. and Bettess, P. (1977). The Finite Element Method for Determining Fluid Loadings on Rigid Structures—Two and Three Dimensional Formulation, Ch.4 in Numerical Methods in Offshore Eng., Wiley, London.

---

Received April 11, 2007

Accepted September 5, 2007