

파 · 구조물 · 지반의 비선형 동적응답해석을 위한 수치해석기법의 개발

Direct Numerical Simulation on the Nonlinear Dynamic Responses among Nonlinear Waves, Structure and Seabed

허동수¹, 김창훈², 김도삼³

Dong Soo Hur¹, Chang Hoon Kim² and Do Sam Kim³

1. 서 론

지금까지 해안구조물의 안정성 평가 및 내파설계에는 주로 파와 구조물의 상호관계만을 연구·검토하여 왔다. 하지만 정도 높은 해석을 위해서는 파랑특성에 따른 해저지반의 동적응답변화도 고려될 필요가 있을 뿐만 아니라, 최근 파랑과 구조물과 지반과의 상호관계가 중요한 문제로 대두 되고 있다.

일반적으로 파랑은 해저지반내에 동적압력을 발생시킨다. 이러한 해저지반내의 동적압력변동은 해저지반의 불안정을 유발시키며, 이 결과로 해저파이프라인, 방파제, 석유저장고 등 지반과 접한 해안구조물에 있어서 액상화, 세굴 및 해저지반의 활동파괴 등에 의해 안정성이 중대한 영향을 받는다. 특히 지반의 액상화나 세굴·토사유출이 구조물의 침하나 파괴의 원인으로 판단되는 경우도 적지 않으며, 이의 메카니즘 규명과 대책법의 확립이 중요하다(Zen et al., 1987; Maeno and Nago, 1988).

Mynett and Mei(1982)은 Mei and Foda(1981)에 의해 발전된 Biot형 방정식에 대한 경계층근사와 선형파이론을 적용하여 케이슨 방파제하의 포화 탄성지반내에서 파랑에 의한 응력을 검토하고 있지만 선형파동장과 지반이 분리되었으며 해안방향으로의 투과파가 무시되었다.

Mcdougal et al. (1986)은 혼성방파제하의 해저지반내에서 파랑에 의한 응력을 논의하였다. 그러나 파동장에서 사석기초의 영향과 사석기초안의 파랑에 의한

응력을 고려하지 않았다.

Mase et al. (1994)은 Biot형 방정식과 선형파 조건을 적용하여 혼성방파제의 동적응답에 대한 유한요소모델(FEM)을 개발하였다. 사석기초의 적은 투수성에 의해 케이슨하의 압력분포는 선형에서 비선형으로 변화될 수 있음을 지적하였으나 해저지반과 파동장이 역시 분리되었으며 해안방향으로의 투과파가 무시되었다. 이러한 연구들은 선형파 이론에 기초한 연구로서 그 한계점이 있다.

Mostafa and Mizutani(1998)는 경계요소법(BEM)과 유한요소법(FEM)이 결합된 BEM-FEM모형을 개발하여 비선형성의 파랑과 모래질 지반위에 설치된 잠제와의 동적응답관계에 대한 연구를 수행하였다. 그들은 실험치와의 비교·검토를 통해 그들이 제안한 모델의 타당성을 검증하였다. 하지만 실제 현지에서 많은 문제가 되고 있는 액상화나 세굴·토사유출에 큰 영향을 미치는 쇄파에 대한 모델의 적용성에 문제점을 안고 있다.

최근 쇄파 이후의 파랑변형 및 지반의 동적응답에 대해서도 심도 있는 연구가 수행되고 있는 바, 유체부에 대해서는 Navier-Stokes 방정식을 직접 이용하는 NASA-VOF(Volume of fluid)을 채용하고 지반부에는 Biot의 압밀이론에 기초한 2상점탄성체(2相粘彈性體)로 가정하여 유한요소법(FEM)을 적용하는 VOF-FEM이 개발되었으나 역시 유체부와 지반부에 대해 의사연성형(擬似連成型)의 방법을 채택하고 있다(蔣勤 등, 2000).

1 경상대학교 토목환경공학부 교수

2 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 석사과정

3 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 교수

본 연구에서는 유한차분법(FDM)을 적용하여 유체부와 지반부의 의사연성형(擬似連成型)의 고려없이, 파랑·구조물·지반간의 상호간섭의 해석을 위한 새로운 수치해석기법을 제안하여 그 타당성을 검증함과 동시에 적용성을 검토한다.

2. 수치해석이론의 개요

2.1 지배방정식

비압축성·점성유체의 파동장과 동일한 유체로 채워진 해저지반에 대한 평균침투속도는 Dupuit 근사로부터 다음의 관계식으로 주어진다 (Shijie and Jacob, 1999).

$$V_{seepage} = \varepsilon V_{pore} \quad (1)$$

여기서, $V_{seepage}$ 는 평균침투속도, ε 은 공극율, V_{pore} 는 공극체내의 유체의 속도이다.

식(1)의 관계로부터 공극율을 고려한 연속방정식(2)와 Darcy-Brinkman-Forchheimer 방정식으로부터 새롭게 수정된 Navier-Stokes 운동방정식(3), (4)를 얻는다. 식(5)는 자유표면의 형상을 모의하기 위한 VOF 함수 F 의 이류방정식이다.

$$\frac{\partial(\varepsilon_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon_y v)}{\partial z} = q^* \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_v \frac{\partial u}{\partial t} + \varepsilon_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \varepsilon_z w \frac{\partial u}{\partial z} \\ &= -\varepsilon_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \varepsilon_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\ & \quad - M_x - D_x - F_x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_v \frac{\partial w}{\partial t} + \varepsilon_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \varepsilon_z w \frac{\partial w}{\partial z} \\ &= -\varepsilon_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \varepsilon_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) \\ & \quad - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \varepsilon_v g - \beta w \\ & \quad - M_z - D_z - F_z \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (5)$$

$$q^* = \begin{cases} q(z, t) / \Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (6)$$

여기서 u, w 는 x, z 방향의 속도성분, q^* 는 조파소스의 유량밀도로, 조파 Source가 위치하는 $x = x_s$ 이외의 영역에서는 0으로 주어진다. Δx_s 는 $x = x_s$ 를 포함하는 x 방향의 격자폭이다. t 는 시간, g 는 중력 가속도, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, β 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 파랑감쇠계수, ε_v 는 체적공극율, $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ 는 x, z 방향에 대한 면적공극율, τ 는 검사체적의 표면에 작용하는 점성응력, ν 는 동점성계수이다.

식(3)과 (4)에서 M_x, M_z 는 관성저항을 나타내며 (Sakakiyama and Kajima, 1992), D_x, D_z 는 Darcy의 층류저항, F_x, F_z 는 Forchheimer의 난류저항으로 다음 식으로 결정된다 (Shijie and Jacob, 1999; Ergun, 1952).

$$M_x = (1 - \varepsilon_v) C_M \frac{Du}{Dt} \quad (7)$$

$$M_z = (1 - \varepsilon_z) C_M \frac{Dw}{Dt} \quad (8)$$

$$D_x = C_D \frac{\nu}{D_p^2} \frac{(1 - \varepsilon_x)^2}{\varepsilon_x^2} u \quad (9)$$

$$D_z = C_D \frac{\nu}{D_p^2} \frac{(1 - \varepsilon_z)^2}{\varepsilon_z^2} w \quad (10)$$

$$F_x = F_D \frac{(1 - \varepsilon_x)}{D_p \varepsilon_x^2} w \sqrt{(\varepsilon_x u)^2 + (\varepsilon_z w)^2} \quad (11)$$

$$F_z = F_D \frac{(1 - \varepsilon_z)}{D_p \varepsilon_z^2} w \sqrt{(\varepsilon_x u)^2 + (\varepsilon_z w)^2} \quad (12)$$

여기서, C_M 은 관성력계수, C_D 는 층류저항계수, F_D 는 난류저항계수, D_p 는 흙의 평균입경이다.

식(6)에서 조파소스 강도 q 는 자유수면의 거동이 불안정해지는 것을 방지하기 위해 조파개시로부터 3주기까지는 서서히 조파시키는 식(13)의 방법을 적용한다 (Borsen and Larsen, 1987).

$$q(z, t)$$

$$= \begin{cases} (1 - \exp(-2t/T_i))2U_0(\eta_0 + h)/(\eta_s + h) & : t/T_i \leq 3 \\ 2U_0(\eta_0 + h)/(\eta_s + h) & : t/T_i > 3 \end{cases} \quad (13)$$

여기서 T_i 는 입사파의 주기, h 는 수심, η_s 는 조파 위치에서의 수위변동, U_0 와 η_0 는 각각 x 방향에서의 속도의 시간변화 및 Stokes 3차파에 기초한 조파 소스에 의해 기대되는 수위변동이다. U_0 의 계수 2는 소스에 의한 파의 발생시 해석영역의 양쪽(오른쪽, 왼쪽)으로 파의 진행을 나타낸다. 입사파와 반사파가 동시에 존재하는 경우에 대해 조파 Source 강도의 분포형상을 조파소스 지점의 연직 적분치가 반사파가 없는 경우와 분포형상이 상사되도록 $(\eta_0 + h)/(\eta_s + h)$ 를 도입한다 (Ohyama and Nadaoka, 1991).

2.2 수치해석방법

본 연구에서는 엇갈린 격자(staggered mesh)를 채용하여 지배방정식을 유한차분법(FDM)으로 차분 근사하여 수치계산을 수행하였다. 또한 다음 시간스텝에서의 속도 u, w , 압력 p 는 SOLA기법(numerical Solution Algorithm for transient fluid flow)을 이용하여 계산된다.

이류방정식에 대해서는 VOF함수의 수치확산을 방지하기 위한 donor - acceptor를 사용하였다 (Hirt and Nichols, 19881 ; Kawasaki, 1999, Hur and Mizutani, 2003).

또한 시간항에 대해서는 전진차분을 적용하고 압력항과 응력항에 대해서는 중앙차분을 적용한다. 이류항에 대해서는 상류차분과 중앙차분이 결합된 식(14)의 차분식을 적용한다 (Hur and Mizutani, 2003).

$$\begin{aligned} (\epsilon_x u \frac{\partial u}{\partial x})_{i,k} &= \frac{(\epsilon_x u)_{i,k}}{\Delta x_a} \left\{ \Delta x_i \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i+1/2,k} \right. \\ &+ \Delta x_{i+1} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i-1/2,k} + \alpha \text{sign}(u_{i,k}) \\ &\times \left[\Delta x_{i+1} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i-1/2,k} \right. \\ &\left. \left. - \Delta x_i \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i+1/2,k} \right] \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

여기서,

$$\Delta x_a = \Delta x_i + \Delta x_{i+1} + \alpha \text{sign}(u_{i,k})(\Delta x_{i+1} - \Delta x_i) \quad (15)$$

식(14), (15)에서 α 는 중앙차분과 상류차분 사이의 매개변수로서 $\alpha = 1$ 일 경우는 안정성을 확보할 수

있는 1차정도의 상류차분이 되고 $\alpha = 0$ 일 경우는 정도는 높지만 불안정성이 증가하는 2차정도의 중앙차분이 된다. 본 연구에서는 $\alpha = 0.5$ 를 적용하였다.

계산의 안정조건에는 이류항으로부터 생기는 CFL 조건과 확산항으로부터 생기는 확산불안정조건을 이용하였다. 본 연구의 수치계산에 이용된 경계조건 및 세부사항에 대하여는 Hur and Mizutani (2003)을 참조하기 바란다.

3. 수치해석기법의 검증

본 연구에서 제안된 수치해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 크게 세 부분으로 나누어서 검토를 수행하였다. 즉, 1) 파 · 구조물, 2) 파 · 해저지반, 3) 파 · 구조물 · 해저지반의 경우에 기존의 실험치와 본 연구의 수치계산결과를 비교 · 검토하였다.

3.1 파 · 구조물의 상호작용

먼저 규칙파동장에 투과성잠제가 설치되어 있는 경우에 계산치와 실험치를 비교한다. Fig. 1은 비교에 사용된 투과성잠제의 제원과 수위변동의 비교 위치를 나타내고 있다. Fig. 2은 Fig. 1에 있어서의 지점 No.1, No.2 및 No.3에서 수면변동의 비교를 나타내고 있으며, 공극율 $\epsilon = 0.4$, 평균입경 $D_p = 2.5\text{cm}$ 의 잠제에 대한 입사파고 $H = 3\text{cm}$, 주기 $T_i = 1.4\text{sec}$ 의 경우이다. 또한, 실험치는 유체부에 대하여 비선형장파방정식을 이용하여 투과성 사다리꼴잠제의 파랑변형을 해석한 Kiola(喜岡) et al.(1994)의 결과를 이용하였다.

Fig. 2으로부터, 비록 잠제첨당상(No.2 지점)에서 계산결과의 피크값이 실험치를 약간 과대평가하는 경향이 있으나, 본 수치계산결과는 수심변동에 따른 비선형파의 형성, 발달 및 잠제 배후에서의 파봉분열을 포함하여 잠제전후의 전체적인 수면변동을 잘 재현하고 있으며, Kiola(喜岡) et al.(1994)의 실험치와도 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

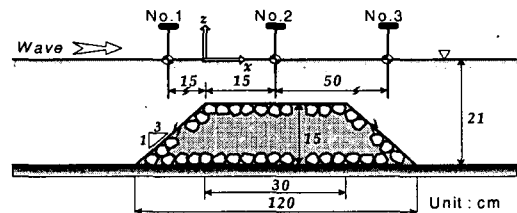


Fig. 1 Definition sketch of wave flume (Wave-Structure)

3.2 파 · 해저지반 상호작용

지반의 깊이에 따른 간극수압변화에 대하여 Yamamoto et al.(1978)의 실험치와 본 수치해석결과와 비교 · 검토 하였다. Fig. 3은 비교에 사용된 파동장의 제원 및 설치된 간극수압계의 위치를 나타낸다.

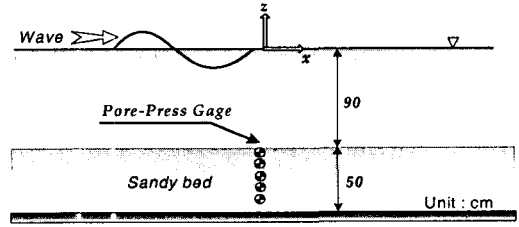
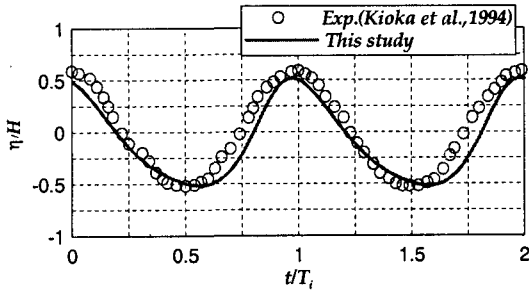
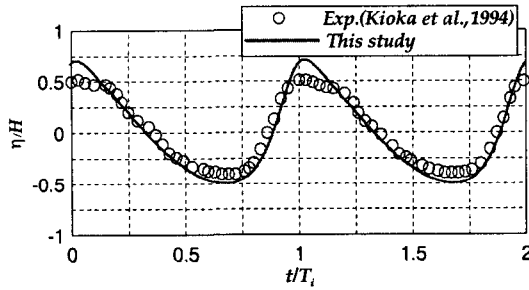


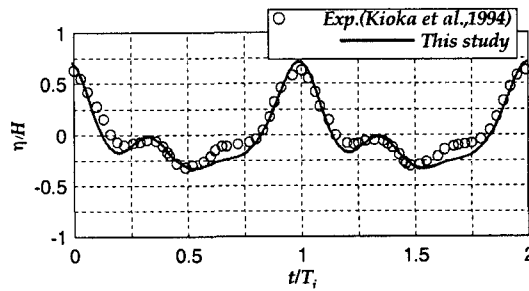
Fig. 3 Definition sketch of wave flume (Wave-Coarse sandy bed)



(a) Time variation of water surface profiles at No.1 (offshore slope of the submerged breakwater)



(b) Time variation of water surface profiles at No.2 (on the crown of the breakwater)

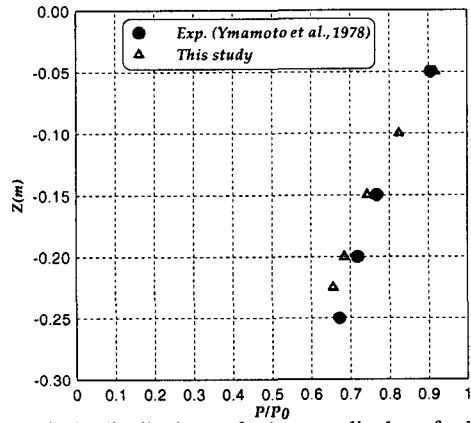


(a) Time variation of water surface profiles at No.3 (onshore slope of the submerged breakwater)

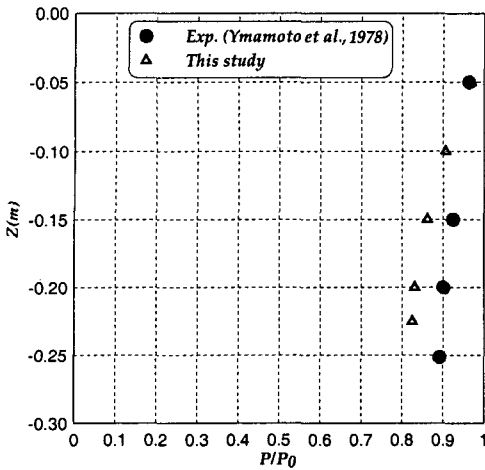
Fig. 2 Comparison of Kioka et al(1994) experiment and this study

Fig. 4는 모래질 지반의 깊이에 따른 간극수압 변동에 대하여 Yamamoto et al.(1978)의 실험치와 본 연구의 수치해석결과와의 비교를 나타내고 있으며, 수심 90cm, 모래층의 두께 50cm, 모래의 입경 $D_p=0.12cm$, 파고 $H=20cm$ 의 경우이다. 또한 Fig. 4(a), (b)는 각각 $T_i=1.0, 1.5sec$ 의 경우이다. Fig. 4에서 P_0, P 는 각각 모래질 지반상의 유체압력 및 지반내의 간극수압을 각각 나타낸다.

계산결과는 Yamamoto et al.(1978)의 실험치와 비교하여 모래질 지반의 깊이에 따른 간극수압변동을 잘 재현하고 있지만, 지반이 깊어짐에 따라 약간의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 입사파의 주기가 길어질수록 그 정도가 커지는 경향을 나타내고 있다.



(a) Vertical distribution of the amplitude of the pore-water pressure in coarse sandy bed ($T_i=1 sec$)



(a) Vertical distribution of the amplitude of the pore-water pressure in coarse sandy bed ($T_i = 1.5$ sec)
 Fig. 4 Comparison of Yamamoto's experiment and this study for wave-induced pore pressure (P/P_0) in coarse sandy bed

3.3 파 · 구조물 · 해저지반의 상호작용

파랑과 구조물과 지반과의 비선형 상호작용에 대해서는 Mizutani et al.,(1998)의 실험치와 본 수치해석결과와 비교 · 검토 하였다.

Fig. 5는 Mizutani et al.,(1998)의 실험제원을 나타낸다. 그들의 실험에서 잠재의 공극율과 평균입경은 각각 0.24, 2.7cm이며, 모래질 지반에 대해서는 평균입경 0.08cm, 공극율은 0.30으로 측정되었다.

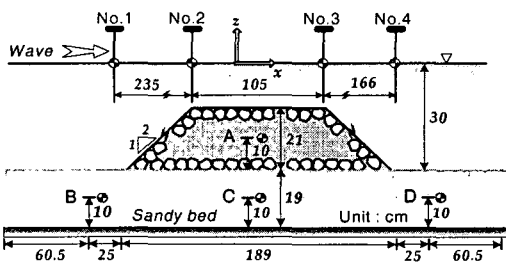
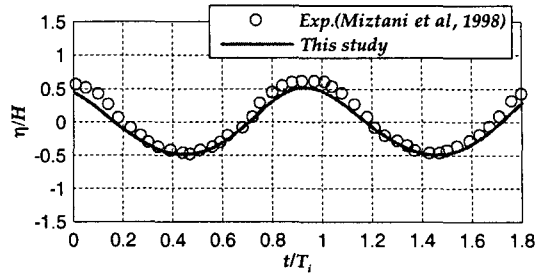


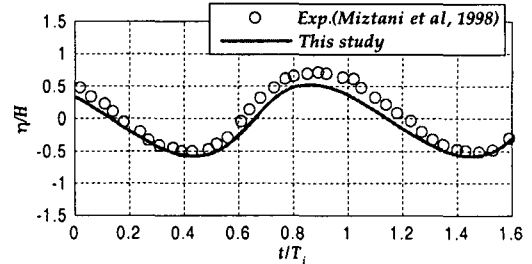
Fig. 5 Definition sketch of wave flume (Wave-structure-Coarse sandy bed)

Fig. 6은 Mizutani et al.,(1998)의 실험조건을 바탕으로 파고 $H = 3$ cm, 주기 $T_i = 1.4$ sec에 대해 각 위치에서 측정된 수면파형의 실험치와 본 수치해석을 비교한 것이다. 투과성 잠재 배후의 수면파형의 절대치에 있어서 다소의 차이를 보이기는 하지만, 전체적으로 파봉분열 등 구조물에 의한 파 변형의 특성은 잘 재현

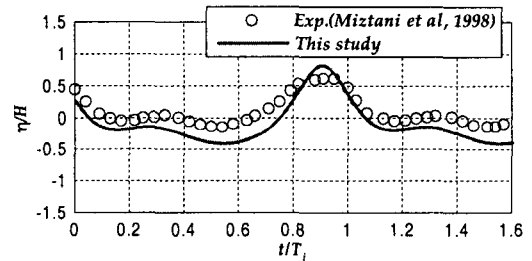
되고 있는 것을 알 수 있다.



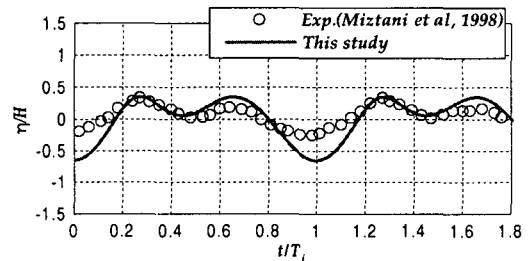
(a) Time variation of water surface profiles at No.1 (offshore slope of the submerged breakwater)



(b) Time variation of water surface profiles at No.2 (over offshore crown corner of the submerged breakwater)



(c) Time variation of water surface profiles at No.3 (over onshore crown corner of the submerged breakwater)



(d) Time variation of water surface profiles at No.4 (onshore of the submerged breakwater)

Fig. 6 Comparison of Mizutani et al experiment and this study for time variation of water surface profiles

Fig. 7은 Fig. 5의 각 위치(A, B, C, D점)에서 계산한 간극수압의 시간변동을 Mizutani et al.,(1998)의 실험치와 비교한 것이다. 잠재내부 및 모래질 지반내의 간극수압의 시간변동은 실험치와 좋은 일치성을 보이고 있다.

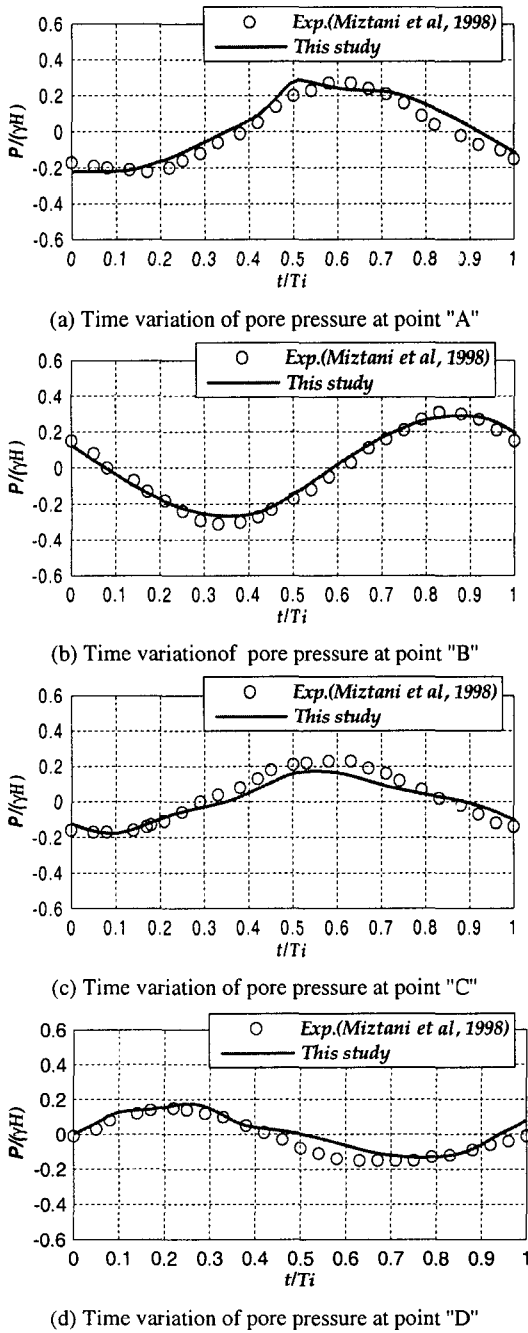


Fig. 7 Comparison of Mizutani et al(1998) experiment and this study for time variation of pore pressure

4. 수치해석

본 수치해석에서는 수심 $h = 40\text{cm}$, 공극율 0.3, 평균 입경 $D_p = 0.08\text{cm}$, 두께 70cm 인 모래질 지반위에 설치된 관경 20cm 의 해저파이프라인(half buried pipeline)을 대상으로 Table.1의 경우에 대해 해저파이프라인과 지반과의 상호관계 및 해저파이프라인 표면에서의 압력변동을 고찰하기 위해 수치모의 하였다.

Fig. 8은 본 수치해석에서 적용한 파동장과 모래질 지반을 나타낸다.

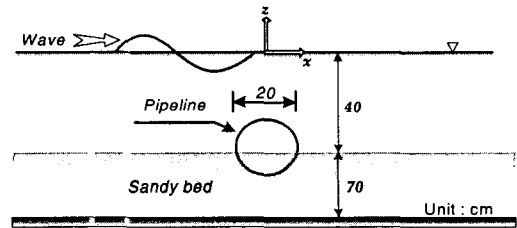


Fig. 8 Definition Sketch for numerical analysis

Fig. 9는 모래질 지반위에 설치된 해저파이프라인에 대해 45° 간격으로 설치된 압력계의 각 위치를 나타낸다.

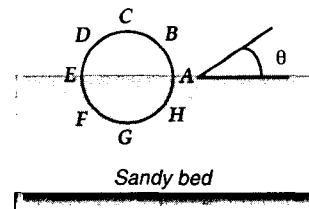


Fig. 9 Positions of pore-pressure gage around pipeline

Table.1 Wave conditions for numerical simulation

Wave period T_i (sec)	Wave heigh H (cm)
1	3
	4
	5
1.2	3
	4
	5
1.4	3
	4
	5

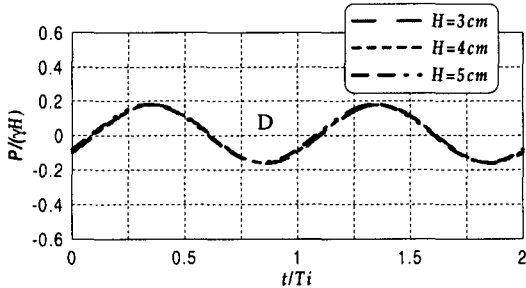
Fig. 10 및 Fig. 11, Fig. 12는 Table.1의 파랑조건변화에

대해 제시된 Fig. 9의 해저파이프라인 표면의 각 위치에서 측정된 압력의 시간변동을 나타낸 것이다.

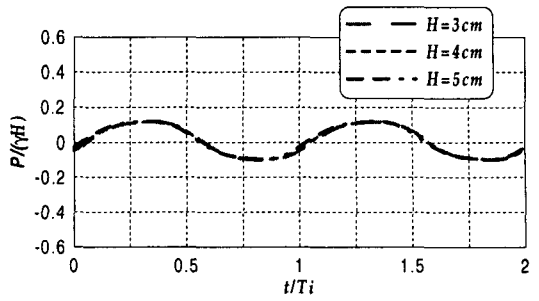
Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12로부터 해저파이프라인에 설치된 각 지점에 작용하는 무차원압력변동은 동일주기에 대해 파고의 변화에는 큰 영향을 받지 않으나(실제로 압력변동은 파고변화에 선형적인 관계) 해저파이프라인의 표면에 작용하는 압력변동은 주기의 변화에 의해 제어되는 것을 알 수 있다. 즉, 장주기측으로 갈수록 해저파이프라인에 작용하는 압력변동은 크게 된다 (Ch. Madhu Sudhan et al., 2002).

유체부와 모래지반부 사이에는 압력경사가 발생하고 유체부에 비해 모래지반부에서의 압력은 작은 값을 나타낸다. 각각의 주기에 대해 유체부에서의 압력값은 거의 동일한 값을 가지나 모래지반부에서는 유체부와의 접촉면에서 멀어질수록 작아지고, 해저파이프라인 하단("G" 점)에서 최소값을 보인다. 또한 유체부에서의 압력변동은 선형성을 가지나 지반부에서는 투수성에 의해 비선형의 압력변동을 나타내고 있다.

파이프라인에 작용하는 지반내의 간극수압은 유체부의 압력값에 비해 무시할 만큼 작은 값이 아니므로 해저파이프라인에 작용하는 양압력은 고려되어야 할 것으로 판단된다.

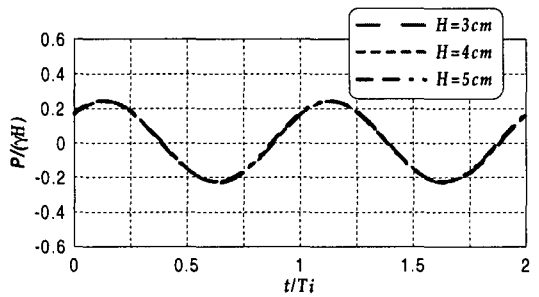


(a) Dynamic pressure at point "D" ($\theta = 90^\circ$)

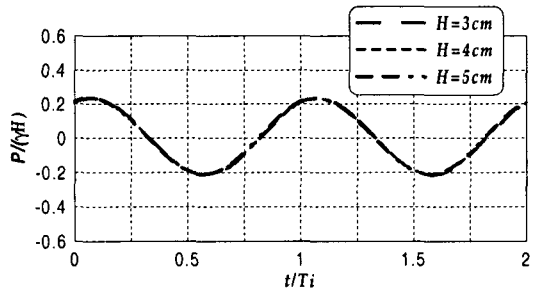


(c) Dynamic pressure at point "G" ($\theta = 270^\circ$)

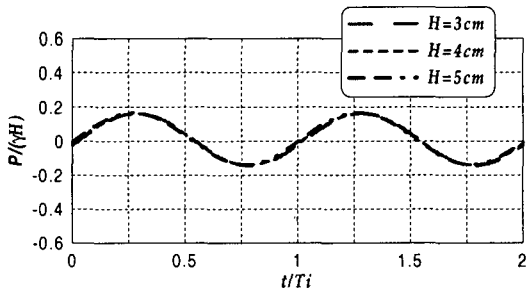
Fig. 10 Time variation of dynamic press for T=1.0 sec



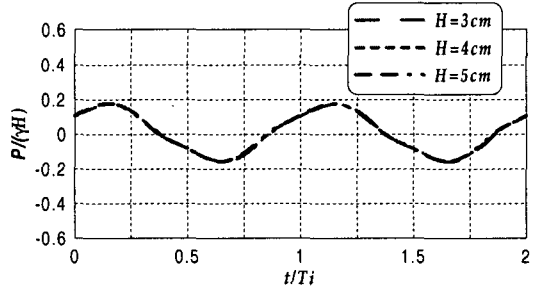
(a) Dynamic pressure at point "C" ($\theta = 90^\circ$)



(b) Dynamic pressure at point "E" ($\theta = 180^\circ$)

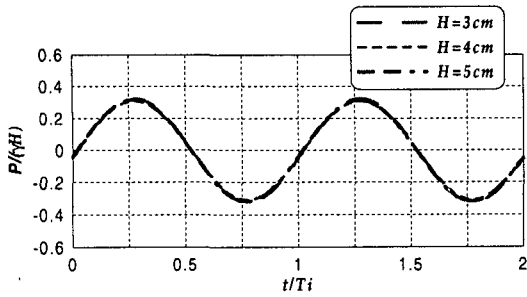


(b) Dynamic pressure at point "E" ($\theta = 180^\circ$)

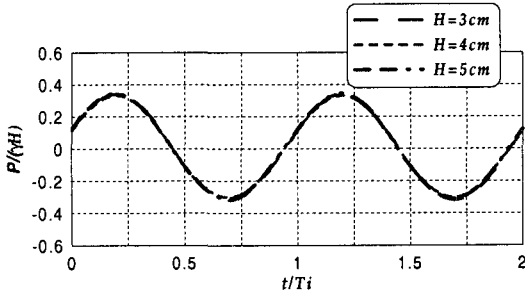


(c) Dynamic pressure at point "G" ($\theta = 270^\circ$)

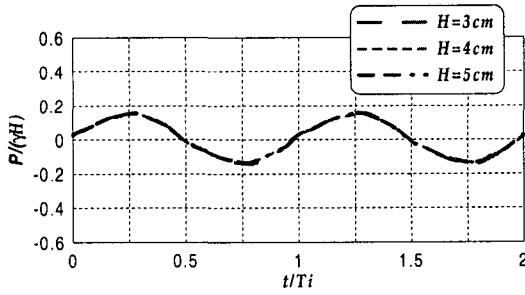
Fig. 11 Time variation of dynamic pressure for T=1.2sec



(a) Dynamic pressure at point "C" ($\theta = 90^\circ$)



(b) Dynamic pressure at point "E" ($\theta = 180^\circ$)

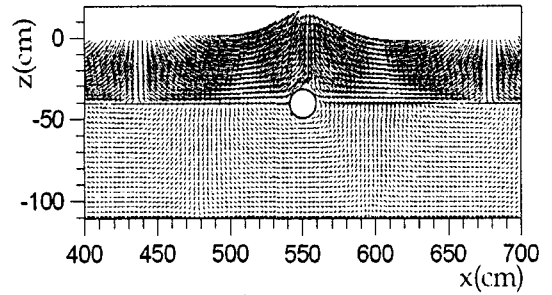


(c) Dynamic pressure at point "G" ($\theta = 275^\circ$)

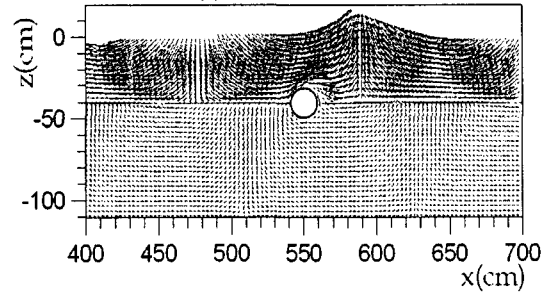
Fig. 12 Time variation of dynamic pressure for $T=1.5$ sec

Fig. 13 은 주기 $T_i=1.4$ sec, 파고 $H=5$ cm 의 경우에 대한 해저파이프라인 주변 유체입자속도의 시간적 변화과정을 보여주고 있다. Fig. 13 로부터 모래 지반내의 침투유속은 무시될 수 없으며 모래지반부와 유체부에서의 흐름장은 위상차를 가지고 서로 다른 흐름양상을 보여주고 있다. 해저파이프라인 주변의 유속장은 파봉과 파곡의 반주기마다 방향이 바뀌고 반복되는 유속장의 변화는 관 양 측면에서 지반내 강한 침투속도를 발생시킨다. 해저파이프라인 양 측면에서의 강한 유속장은 세굴의 문제 및 지반내 역상화와 같은 불안정한 요인의 제공으로 해저파이프라인의 안정성에 중대한 영향을 미칠것으로 판단된다. 유체부와 모래지반부의 접측면에서는 파 진행방향에 대한 강한 전단유속으로 세굴심의 증대 및 해저파

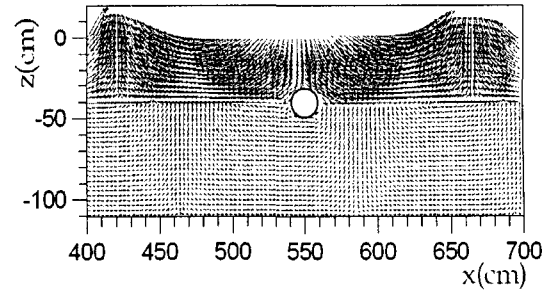
이프라인의 동적거동에 대한 대책이 필요할 것이다.



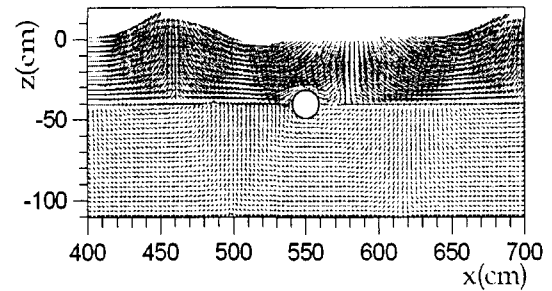
(a) $t/T_i = 1/6$



(b) $t/T_i = 2/6$



(c) $t/T_i = 4/6$



(d) $t/T_i = 5/6$

Fig. 13 Spatial distribution of velocity due to pipeline

5. 결 론

본 연구에서는 유한차분법(FDM)을 적용하여 유체부와 기반부의 의사연성형(擬似連成型)의 고려없이, 파랑·구조물·지반간의 상호간섭의 해석을 위한 새로운 수치해석기법을 제안하여 그 타당성을 검증함과 동시에 적용성을 검토하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 아래에 기술한다.

(1) 본 연구에서는 지반내 동적거동을 해석할 수 있는 비선형수치해석기법을 개발하였다.

(2) 본 수치기법에 의한 결과와 기존 해석결과와의 비교·검토로부터 본 해석법의 타당성을 검증할 수 있었다.

(3) 본 수치기법을 해저파이프라인에 적용하여 주변 동수압을 검토하였으며, 이로부터 동수압은 무시할 수 없다는 것을 알 수 있었고, 지반내의 동수압변동은 비선형의 압력변동을 나타내며 흐름형태는 유체부의 수면변동과 위상차가 존재하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수 (2001). VOF법에 기초한 볼투과잡재 주변 파동장의 해석, 대한토목학회논문집 21(5-B)호 :551-560.
- 喜岡 涉, 甲斐宏典, 平岡慎司 (1994). 透水層上の長波方程式と透過 潛への適用性について, 日本海岸工學論文集, 第 41卷, 711-715.
- 蔣 勤, 高橋重雄, 村西佳美, 磯部雅彦 (2000). 波地盤構造物の相互作用に関する VOF-FEM豫測モデルの開発, 日本海岸工學 論文集, 第 47卷, pp. 51-55.
- Brorsen, M., Larsen, J. (1987). Source generation of nonlinear gravity waves with boundary integral equation method, *Coast. Eng.*, vol. 11. Elsevier, Amsterdam, pp. 93-113
- Brinkman, H.C. (1947a). A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles, *Appl. Sci. Res. A1*, pp. 27-34.
- Ch. Madhu Sudhan, V. Sundar, S. Narasimha Rao (2002). Wave induced forces around buried pipelines, *Ocean Engineering* 29, pp. 533-544.
- Darcy, H.P.G. (1856). *Les Fontaines Publiques de la ville de Dijon*, Dalmont, Paris
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed colume. *Chem. Eng. Prog*, 48(2), pp.89-94
- Forchheimer, P., *Wasserbewegung durch Boden.*, (1901). (Part 2) *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 45, 1781-1788.
- Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Physiol.* 39, 201-225.
- Hinatsu, M. (1992). Numerical simulation of unsteady viscous nonlinear waves using moving grid system fitted on a free surface, *J. kansai Soc. Nav. Archit. Jpn.* 217, 1-11.
- Hur, D.S., Mizutani, N. (2003). Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater. *Coast. Eng.* 47, 329-345
- Mase, H., Sakai, T., and Sakamoto, M. (1994). Wave-induced porewater pressures and effective stresses around breakwater, *Ocean Engrg.*, 21, pp. 361-379.
- McDougal, W. G., Tsai, Y. T., and Sollitt, C. K. (1986). Verification of the analytical model for ocean wave-soil-caisson interaction, *Proc.*, 20th Int. Conf. on Coastal Engrg., ASCE, Taipei, Taiwan, pp. 2089-2103.
- Mei, C., and Foda, M. (1981). Wave-induced response in a fluid-filled poro-elastic solid with a free surface-a boundary later theory, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 66, pp. 597-631.
- Mizutani, N., Mostafa, A., Iwata, K. (1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, *Coast. Eng.* 43, 177-202
- Mostafa, A., Mizutani, N. (1997). Numerical analysis of dynamic interaction between nonlinear waves and permeable toe over sand seabed in front of a seawall, *ISOPE'97*, 3,3 pp. 823-830.
- Mqeno, S., Nage, H. (1988). Settlement of a concrete block into a sand bed under wave pressure variation. In: Kolkman et al.(Eds.), *Modeling Soil-Water-Structure Interactions*, pp. 67-76.
- Mynett, A. M., and Mei, C. C. (1982). Wave-induced stresses in a saturated poro-elastic sea bed beneath a rectangular caisson, *Geotechnique*, 32 (3), pp. 235-247.
- 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, pp. 231-251.
- Sakakiyama, T., Kajima, R., Abe, N. (1991). Numerical simulation of wave motion in and near breakwaters, *Proc. Coastal Eng., JSCE* 38 (2), pp. 626-663, (in Japanese).

Shijie Liu, Jacob H. Masliyah. (1999). Non-linear flows in porous media, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 86, pp. 229-252

Yamamoto, T., Koning, H.L., Sellmeier, H., van Hijum, E.V. (1978). On the response of a poro-elastic bed to water waves, *Journal of Fluid Mechanics* 87, pp. 193-206.

Zen, K., Yamaguchi, H., Watanabe, A. (1987). *Wave-induced liquefaction and densification in seabed.* Rep. Port Harbour Res. Inst. 26, 125-180