

파랑작용에 의한 해저파이프라인 주변지반의 응답특성

허동수* · 김창훈** · 김도삼***
*경상대학교 토목환경공학부 해양산업연구소
**한국해양대학교 대학원 토목환경공학과
***한국해양대학교 건설환경공학부

Wave-Induced Soil Response around Submarine Pipeline

DONG-SOO HUR*, CHANG-HOON KIM** AND DO-SAM KIM***

*Institute of Marine Industry, Division of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea
**Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate school, Korea Maritime University, Busan, Korea
***Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Wave · submarine pipeline · seabed, 파 · 해저파이프라인 · 지반, Soil response 지반응답, Wave loading 파랑하중, $u_e - p_e$ approximation $u_e - p_e$ 근사, Relative separate distance 상대이격거리

ABSTRACT: Recently, the nonlinear dynamic responses among waves, submarine pipeline and seabed have become a target of analyses for marine geotechnical and coastal engineers. Specifically, the velocity field around the submarine pipeline and the wave-induced responses of soil, such as stress and strain inside seabed, have been recognized as dominant factors in discussing the stability of submarine pipeline. The aim of this paper is to investigate nonlinear dynamic responses of soil in seabed, around submarine pipeline, under wave loading. In order to examine wave-induced soil responses, first, the calculation is conducted in the whole domain, including wave field and the seabed, using the VOF-FDM method. Then, velocities and pressures, which are obtained on the boundary between the wave field and the seabed, are used as the boundary condition to compute the wave-induced stress and strain inside seabed, using the poro-elastic FEM model, which is based on the approximation of the Biot's equations. Based on the numerical results, the characteristics of wave-induced soil responses around submarine pipeline are investigated, in detail, in relation to relative separate distance of the submarine pipeline from seabed. Also, the velocity field around the submarine pipeline is discussed.

1. 서 론

해저파이프라인은 석유, 천연가스, 상하수 등의 유체를 수송하는 역할을 포함하여, 해저 광케이블을 통한 정보의 전달수단으로서도 그 중요성이 증대되는 구조물이다. 해저파이프라인은 기본적으로 육상의 파이프라인과 같은 방법으로 설계·시공되지만 육상의 파이프라인에 비해 파력·조류력과 같은 열악한 해양환경에 노출되므로 부설 및 가동시 손상을 입을 가능성이 있고, 해저파이프라인 주변지반의 세굴 및 액상화와 같은 2차적인 요인으로 인하여 부상, 좌굴 및 파단에 이르는 위험성이 있다. 특히, 석유이송 파이프라인의 경우에는 사고로 인한 직접적인 피해 이외에도 해양환경에 미치는 악영향은 매우 크다. 따라서, 해저파이프라인의 안정성을 유지하기 위하여 이러한 불안정한 요소들에 대한 충분한 검토가 수행되어야 한다.

해저파이프라인에 대한 연구는 해저파이프라인에 작용하는 파압분포특성(Magada, 2000) 및 해저파이프라인 주변의 유체 흐름특성(Jo et al., 2002)을 규명하려는 연구가 있고, 대부분이 해저파이프라인 주변지반의 세굴, 해저파이프라인의 자가매몰

특성(Cevik and Yüksel, 1999; Sümmer et al., 2001; 오현식 등, 2004)을 중심으로 수행되어 왔다. 또한, 정상류에 대해 포텐셜 이론에 근거한 수치해석이 다소 수행되어 왔으나, 대부분의 경우 수리모형실험을 통한 검토가 주류를 이루고 있는 실정이다. 특히, 이러한 연구들은 Ursell수, Shields수 및 KC수에 따른 해저파이프라인 주변의 와동현상(Vortex shedding)이 해저파이프라인의 관경 및 매설깊이와 더불어 세굴심 및 세굴특성에 영향을 미치는 주요 인자라는 결과를 제시하고 있다. 그러나, 이들 연구는 세굴심에 영향을 미치는 인자들에 대한 상관관계를 명확히 규명하려는 연구로 지반을 포함한 해저파이프라인 주변의 유속분포특성 및 지반내의 동적응답특성(간극수압, 흙의 변형 및 유효응력특성)과 관련된 해저파이프라인의 안정성에 대해서는 아직 충분한 검토가 수행되어 왔다고 할 수는 없다.

이로 인해, 최근 파랑과 해저파이프라인 및 지반과의 상호작용에 대한 관심이 높아지고 있고, 해저파이프라인의 안정성과 관련하여 파랑작용에 의한 해저파이프라인의 주변지반 내 동적응답특성에 대한 검토도 다소 수행되고 있으나, 이러한 연구는 파동장에 대한 포텐셜 이론에 근거한 해석이 대부분이며(Jeng and Cha, 2003), Navier-Stokes 방정식에 기초하여 지반의 동적응답특성을 해석하는 경우에는 해저 불투과 조건으로 파동장과 지반의 경계면에서 주어지는 경계값을 지반응답해석

교신저자 허동수: 경남 통영시 인평동 445번지
055-640-3152 dshur@nongae.gsnu.ac.kr

에 이용하고 있다(Takahashi et al., 2002).

따라서, 본 연구에서는 파랑작용에 의한 해저파이프라인의 주변지반 내 동적응답특성을 해석하기 위하여, 먼저 지반을 포함한 해석영역 전체를 VOF법(Volume of fluid)과 유한차분법(Finite difference method; 이하 FDM)을 적용하여 파·구조물·지반의 동적응답특성에 대해 Full-nonlinear 해석을 수행할 수 있는 허동수 등(2005)이 제안한 수치해석수법 VOF-FDM을 적용하고, 이로부터 파동장과 지반의 경계면에서 얻어지는 압력과 유속을 경계조건으로 설정하고 Biot(1941)이론을 이용하여 지반의 응답특성을 유한요소법(Fine element method; 이하 FEM)으로 해석한다. 이상으로 얻어진 수치계산결과를 통해서 해저파이프라인 아래 지반 내 흙의 변형특성 및 응력변화특성을 해저파이프라인의 상대이격거리와 연관하여 검토한다. 또한, 지반의 응답특성을 해저파이프라인 아래 지반 내의 유속분포특성과 관련하여 논의한다.

2. 수치해석의 개요

파·해저파이프라인·지반의 동적응답특성을 해석하기 위해 해석영역의 양쪽에 부가감쇠영역을 설치하여 파의 재반사를 방지하고, 해석영역내에 조파를 위한 조파소스와 해저파이프라인 및 지반이 고려된 Fig. 1(그림에서 h 는 수심, d 는 지반의 두께, L_i 는 입사파의 파장을 각각 나타낸다)과 같은 2차원수치파동수로를 고려한다.

2.1 파·해저파이프라인·지반의 동적응답특성 해석을 위한 기본방정식

파·해저파이프라인·지반의 동적응답특성을 해석하기 위한 기본방정식은 조파소스를 포함하는 연속방정식 (1)과 Navier-Stokes 방정식을 확장한 운동방정식 (2), (3), 그리고 자유표면을 모의하기 위한 VOF함수 $F(x, z, t)$ 의 이류방정식 (4)로 구성된다.

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

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) - M_x - D_x - F_x \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (4)$$

여기서, $q^* = q(z, t)\delta(x - x_s)$ 로 조파위치 $x = x_s$ 에서의 조파소스의 밀도, δ 는 Dirac Delta함수, u, w 는 x, z 방향의 속도성분, t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, ν 는 유체의 동점성계수 ($\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$), g 는 중력가속도, β 는 부가감쇠영역의 파랑감쇠계수, γ_x, γ_z 는 x, z 방향에 대한 면적공극률, F 는 $0 \leq F \leq 1$ 의 값을 갖는 VOF함수, $\tau_{i,j}(i, j = x, z)$ 는 유체표면에 작용하는 점성응력으로 i 는 점성응력이 작용하는 평면을 가리키고, j 는 그 평면내에서의 방향을 나타낸다. 식 (2), (3)에서 M_x, M_z 는 관성저항, D_x, D_z 는 층류저항, F_x, F_z 는 난류저항을 각각 나타내며, 상세한 내용은 허동수 등(2005)을 참조하기 바란다.

2.2 지반응답 해석을 위한 기본방정식

지반은 고체, 액체, 기체로 구성되는 다상계의 재료로, 그 변형에는 흙입자 실질부분의 변형, 흙골격의 변형, 간극수의 변형이 관여한다. 본 연구에서는 간극이 물로 완전히 포화된 지반을 고려하고, 지반의 변형은 흙골격의 변형과 간극수의 변형에 지배된다고 가정한다. 이상의 가정하에 지반응답의 기본방정식은 흙입자 골격의 변위 u_e 와 흙골격에 대한 물의 상대변위 w_e 및 간극수압 p_e 와의 관계로 주어지는 $u_e - w_e - p_e$ 형식의 Biot식으로 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_c \ddot{u}_e + \rho \ddot{w}_e = \nabla \cdot \sigma - \nabla p_e + b \quad (5)$$

$$\rho \ddot{u}_e + \rho \frac{\ddot{w}_e}{m} = -\nabla p_e - \frac{\rho g \ddot{w}_e}{k} + b \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{m}{K_w} \dot{p}_e + \nabla \cdot \dot{w}_e = 0 \quad (7)$$

여기서, $\rho_c = (1 - m)\rho_s + m\rho$ 는 간극수를 포함한 흙의 밀도, ρ_s 는 흙입자의 밀도, m 는 공극률, σ '는 유효응력, k 는 투수계수, b 는 물체력, ε_v 는 체적변형, K_w 는 물의 체적탄성계수이다. 또한, 위첨자·는 시간에 관한 미분을 나타낸다.

한편, Takahashi et al.(2002)은 식 (5)~식 (7)로 정의되는 $u_e - w_e - p_e$ 형식의 Biot식에서 흙골격에 대한 물의 상대변위가

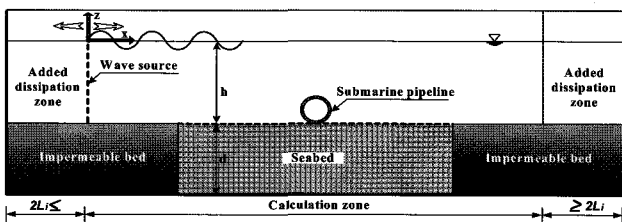


Fig. 1 Sketch of numerical wave tank

속도 \vec{w}_e 를 고려하는 경우 수치계산이 불안정해질 수 있음을 지적하고, 파·구조물·지반의 동적응답특성을 해석하기 위한 수치계산수법 CADMAS-GEO-SURF를 제안하였다.

본 연구에서는 Takahashi et al.(2002)의 연구를 바탕으로 흙골격에 대한 물의 상대변위기속도 \vec{w}_e 가 흙입자 실질 부분의 변위기속도 \vec{u}_e 에 비해 무시될 수 있는 것으로 가정하며, 압력변동이나 유속변동에 대한 지반응답만을 대상으로 하기 때문에 물체력 b 는 고려하지 않는다(Takahashi et al., 2002). 따라서, 본 연구에서 지반응답에 대한 기본방정식은 식 (8), (9)와 같이 $u_e - p_e$ 형식의 Biot식으로 주어진다.

$$\rho_c \ddot{u}_e = \nabla \cdot \sigma' - \nabla p_e \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{m}{K_w} \dot{p}_e + \nabla \cdot \left\{ \frac{k}{\rho g} (-\nabla p_e - \rho \ddot{u}_e) \right\} = 0 \quad (9)$$

그리고, 압력변동이나 유속변동에 대해 지반변형 및 비선형성이 작다고 가정하면 지반의 역학적 성질을 나타내는 응력-변형률의 관계식은 Hooke법칙으로부터 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma'_{i,j} = \lambda_L \varepsilon_{i,j} \delta_{i,j} + 2\mu_L \varepsilon_{i,j} \quad (10)$$

여기서, λ_L , μ_L 는 Lamé의 정수, $\varepsilon_{i,j}$ 는 변형률텐서, $\delta_{i,j}$ 는 Kronecker의 Delta함수이고, 탄성계수를 E , 전단탄성계수를 G , Poisson비를 ν_p 로 하면 λ_L , μ_L 는 각각 식 (11), (12)로 정의된다.

$$\lambda_L = \frac{E\nu_p}{(1+\nu_p)(1-2\nu_p)} \quad (11)$$

$$\mu_L = \frac{E}{2(1+\nu_p)} = G \quad (12)$$

2.3 수치해석의 알고리즘

본 연구의 VOF-FDM에서는 엇갈린 격자(Staggered mesh)를 적용하여 지배방정식을 유한차분법으로 차분근사하여 수치계산을 수행하였다. 또한, 다음 시간스텝에서의 속도 u, w 및 압력 p 는 SOLA기법(Numerical solution algorithm for transient fluid flow)을 이용하여 계산된다. 이류방정식에 대해서는 VOF함수의 수치확산을 방지하기 위한 Donor-Acceptor법을 사용하였다. 또한, 시간항에 대해서는 전진차분을 적용하고 압력항과 응력항에 대해서는 중앙차분을 적용한다. 이류항에 대해서는 1차정도의 상류차분과 2차정도의 중앙차분을 가중평균하여 혼합한 Donor차분근사를, 나머지항에 중앙차분근사시키는 양해법을 도입하였다. 그리고, 지반응답해석을 위한 본

수치해석수법의 개념도를 Fig. 2에 나타내며, 본 연구는 Takahashi et al.(2002)의 계산수법과는 다르게 지반을 포함한 해석영역 전체를 VOF-FDM으로 계산하고(Fig. 2(a)), 파동장과 지반의 경계면에서의 압력과 유속을 경계조건으로 설정하여(Fig. 2(b)) FEM으로 수치해석을 수행하였다(Fig. 2(c)). FEM해석시 VOF-FDM에서 설정한 격자와 동일한 크기의 요소로 분할하고, 사각형 Iso-parametric 요소에 근거한 형상함수와 Galerkin근사를 적용하였다. 또한, 연립일차방정식의 해석수법으로 Gauss소거법을 이용하였다.

3. 수치해석

본 수치해석에서는 수심 $h=70\text{cm}$, 두께 $d=60\text{cm}$ 인 해저지반위에 설치된 관경 $D=20\text{cm}$ 의 해저파이프라인(이하, 파이프라인)을 대상으로 지반과 파이프라인의 이격거리 e 에 따른 파이프라인 주변 유속장의 변화특성을 고찰하고, 더불어 파동장의 변화와 연관하여 파이프라인 주변지반의 응답특성(지반 내 흙의 변형률 및 응력분포특성)을 검토한다. 또한, 입사파조건은 입사파고 $H_i=5.0\text{cm}$ 에 대해 입사주기 $T_i=1.3\text{sec}$, $T_i=1.5\text{sec}$, $T_i=1.7\text{sec}$ 인 경우를 고려하였다. 해저지반의 제원은 공극률 $\gamma_x = \gamma_z = \gamma_v = 0.3$, 평균입경 $D_p = 0.045\text{cm}$, 흙입자 실질부분의 밀도 $\rho_s = 2650\text{kg/m}^3$, 전단탄성계수 $G = 1.0 \times 10^8 \text{N/m}^2$, Poisson 비 $\nu = 0.33$, 투수계수 k 는 Kozeny-Carman식(Bear,

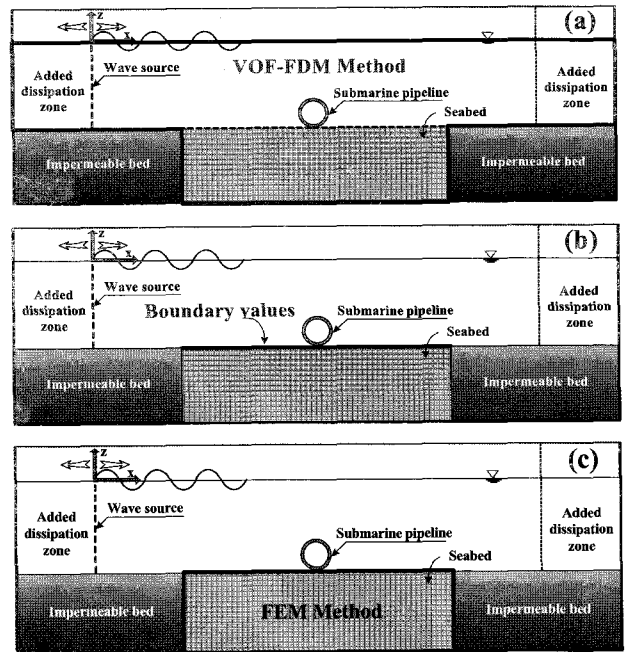


Fig. 2 Concept of computational flow; (a) calculation for whole domain including wave field and seabed regime with VOF-FDM, (b) estimation of boundary values between wave field and seabed regime, (c) calculation for wave induced variable responses of soil in seabed with FEM

1972)을 이용하여 $k = 2.20 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 하였다.

Fig. 3은 본 수치해석에서 적용한 해저지반위에 설치된 파이프라인의 상대이격거리 e/D 를 나타낸다.

3.1 해저파이프라인 주변의 유체흐름

Fig. 4는 파고 $H_i = 5.0 \text{ cm}$, 주기 $T_i = 1.3 \text{ sec}$ 의 제원을 갖는 입사파를 대상으로 파이프라인의 상대이격거리 e/D 에 따른 지반내 유체흐름의 특성을 비교한 일례이다. 그림으로부터 상대이격거리 e/D 가 작을수록 파이프라인 아래 지반으로의 침투 유속 및 파동장으로서의 간극수 용출유속이 커지는 것을 알 수 있으며, 그 분포는 파이프라인 주변에 집중된다. 따라서 파이프라인 아래에 집중되는 침투 및 용출유속은 파이프라인 아래 지반의 국부세굴 원인으로 작용될 가능성이 있는 것으로 판단된다. 또한, 전체적으로 지반내 유체흐름은 파봉근방에서 하향의 흐름을, 파곡근방에서는 상향의 흐름이 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

3.2 파동장의 변화에 따른 지반 내 체적변형을

Fig. 5는 파이프라인 주변의 지반 내 흙의 체적변형률(인장변형률을 정(+))에 대한 공간분포의 일례를 나타낸 그림으로, 적용한 입사파제원은 파고 $H_i = 5.0 \text{ cm}$, 주기 $T_i = 1.3 \text{ sec}$ 의 경우이다. 그림으로부터 상대이격거리가 e/D 가 작을수록 지반 내 흙의 등변형률은 파이프라인 아래에서 촘촘히 나타나며, 이러한 경향은 3.1절에서 검토된 파이프라인 아래 지반 내 유체흐름과 관련하여 국부세굴의 발생패턴에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 파이프라인 양측면에서 관찰되는 흙의 변형률은 상대이격거리 e/D 가 작을수록 보다 큰 값과 넓은 범위로 주어지는 것을 알 수 있다. 이와 같이 파이프라인의 상대이격거리 e/D 는 지반 내 흙의 변형특성범위 뿐만 아니라 국부세굴의 변화특성을 결정하는 주요인자로 작용될 수 있는 것으로 판단된다. 그리고, 파이프라인 아래 지반 내 흙의 변형률은 파봉근방서 압축변형률(흙이 단단해짐)을, 파곡근방에서는 인장변형률(흙이 느슨해짐)을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

이로부터 파곡근방에서의 지반응답특성은 지반의 전단강도를 저하시킬 수 있고, 파곡근방에서 파동장으로 용출되는 지반내 유체흐름은 파곡근방에서의 지반응답특성과 연관하여 액상화, 세굴 및 부유사를 발생시키는 원인으로 작용될 수 있는 것으로 판단된다.

3.3 평균유속장 및 지반 내 평균체적변형률

Fig. 6은 파고 $H_i = 5.0 \text{ cm}$, 주기 $T_i = 1.3 \text{ sec}$ 의 제원을 갖는 입사파를 대상으로 파이프라인 주변 및 지반내의 평균유속장과 파이프라인 아래 지반 내에서 흙의 평균체적변형률(인장변형률 정(+))의 공간분포를 나타낸 결과로 평균유속 \vec{V} 및 흙의 평균체적변형률 $\bar{\epsilon}_v$ 은 식 (13)과 식 (14)를 이용하여 각각 계산될 수 있다.

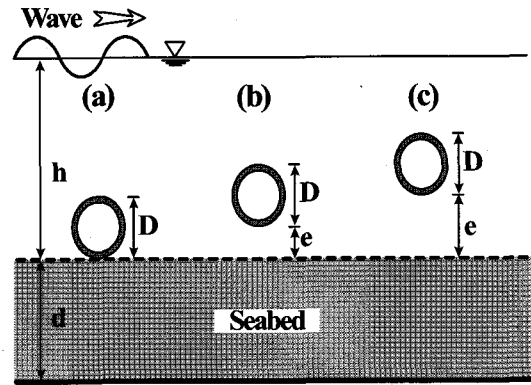


Fig. 3 Numerical setup for the present study; (a) $e/D = 0.0$, (b) $e/D = 0.5$, (c) $e/D = 1.0$

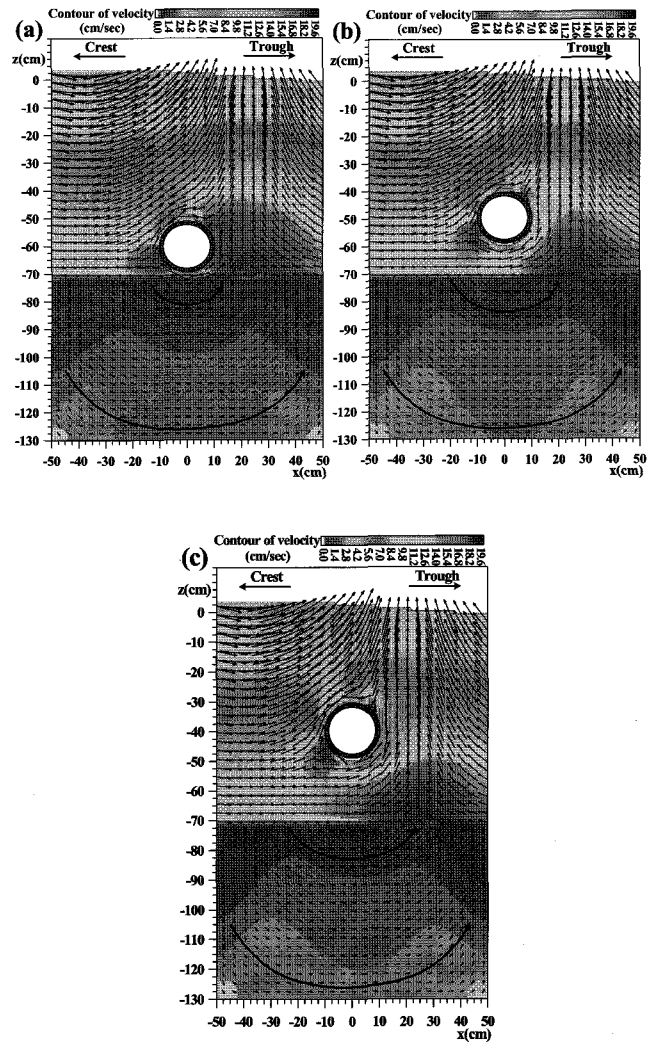


Fig. 4 Velocity field around submarine pipeline; (a) $e/D = 0.0$, (b) $e/D = 0.5$, (c) $e/D = 1.0$

$$\vec{V} = \frac{1}{3T_i} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} v dt \tag{13}$$

$$\bar{\epsilon}_v = \frac{1}{3T_i} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \epsilon_v dt \quad (14)$$

여기서, t_i 는 데이터의 취득시점이고 T_i 는 입사파의 주기, \vec{v} 는 x, z 방향의 속도성분의 합으로 주어지며, ϵ_v 는 흙의 체적변형률로 x 축에 대한 흙의 변형률(ϵ_x)과 z 축에 대한 흙의 변형률(ϵ_z)의 합으로 정의된다.

Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 파이프라인 근방에는 방향이 반대되는 규칙적인 와가 형성되는 것을 알 수 있고, 파이프라인 아래 지반 내에서는 파이프라인하단을 향하는 평균유속을 관찰할 수 있다. 또한, 파이프라인 주변지반 내에서의 평균체적변형률은 인장변형률을 나타내며, 이러한 경향은 파이프라인의 상대이격거리 $e/D=0.5$, $e/D=1.0$ 인 경우에 비해 상대이격거리 e/D 가 가장 작은 $e/D=0.0$ 인 경우가 파이프라인 아래의 해저면에 보다 큰 값으로 집중되는 것을 알 수 있다.

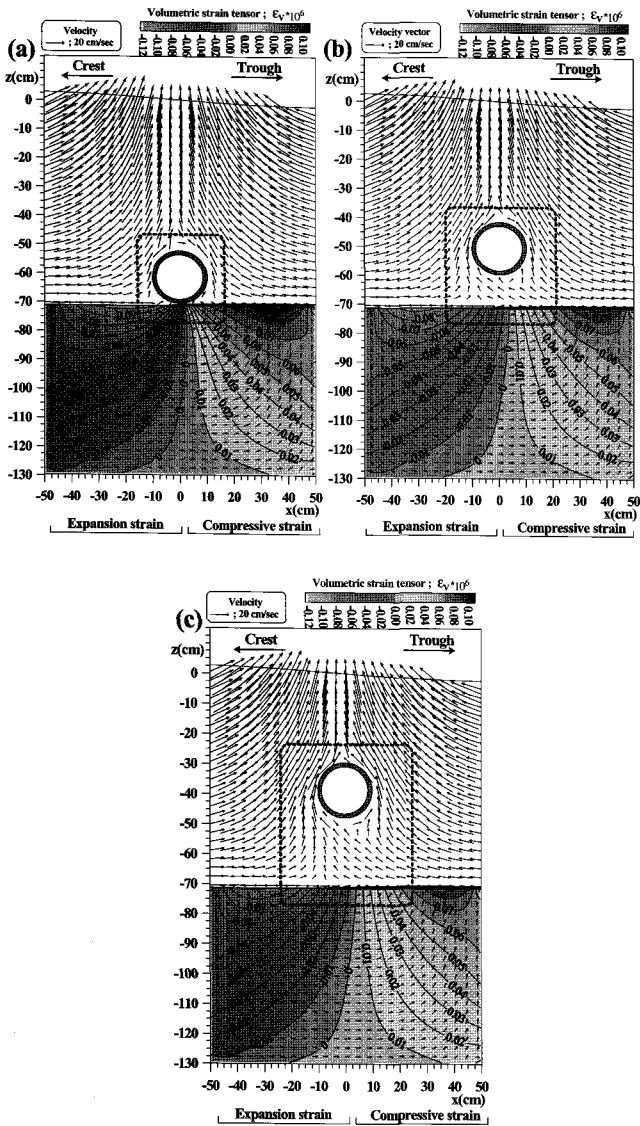


Fig. 5 Volumetric strain according to the variation of wave field; (a) $e/D=0.0$, (b) $e/D=0.5$, (c) $e/D=1.0$

이러한 원인은 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 전체적으로 파이프라인 하단을 향하는 지반 내 평균유속은 흙을 느슨하게 하는 경향이 있고, 지반내로 침투하는 평균유속은 흙을 압축시키는 경향이 있는 것으로 판단된다. 이로부터 파이프라인의 상대이격거리 e/D 가 작을수록 파이프라인 아래 지반의 토사유출 및 지형변동의 발생가능성은 클 것으로 예상된다. 결과적으로 상대이격거리 e/D 가 작을수록 파이프라인 주변지반의 최종 평형세굴심의 깊이는 더욱 증가될 가능성이 있을 뿐만 아니라 파이프라인의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Fig. 6에서 알 수 있는 것과 같이 지반에 가장 큰 영향을 미치고 있는 $e/D=0.0$ 의 경우를 대상으로 입사주기를 $T_i=1.3\text{sec}$, $T_i=1.5\text{sec}$, $T_i=1.7\text{sec}$ 로 각각 변화시킨 경우 파이프라인 주변 및 지반내의 평균유속장과 파이프라인 아래 지반 내에서 흙의 평균체적변형률의 공간분포를 살펴본 것이다. 그림으로부터 파이프라인 근방의 와동현상은 주기가 길어질수록 보다 명확히 나타나며, 와의 분포는 파이프라인 전면부에 비해 파이프라인 배후면에서 보다 넓은 범위로 주어지는 것을 알 수 있다. 그리고, 파이프라인 주변 지반 내에서의

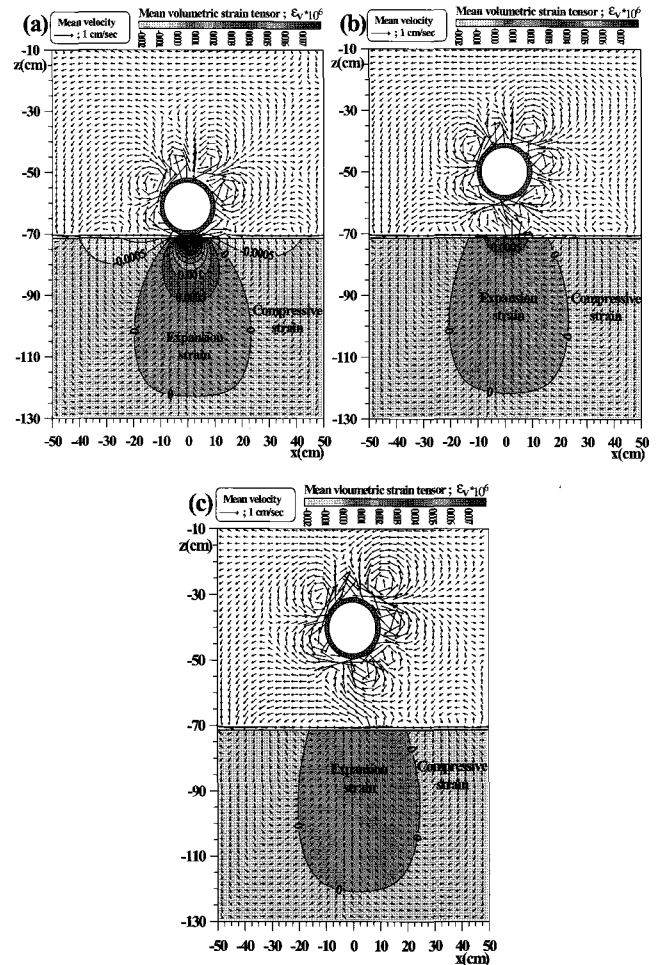


Fig. 6 Spatial distributions of mean flow and volumetric strain; (a) $e/D=0.0$, (b) $e/D=0.5$, (c) $e/D=1.0$

인장변형률은 주기가 길어질수록 보다 큰 값과 넓은 범위로 파이프라인 하단에 집중되는 것을 확인할 수 있다.

3.4 평균최대주응력분포

앞에서 살펴본 지반 내 흙의 평균체적변형률과 관련하여 지반 내 흙의 유효응력특성을 평균최대주응력의 관계로부터 검토하며, 이로부터 지반 내 응력-변형률 및 평균유속과의 관계를 논의한다.

Fig. 8은 입사파고 $H_i = 5.0\text{cm}$, 입사주기 $T_i = 1.3\text{sec}$ 인 경우에 파이프라인 아래 지반 내의 평균최대주응력 $\overline{\sigma}_m$ 의 공간분포를 나타낸 결과이다. 그리고, 평균최대주응력은 식 (15)를 이용하여 계산될 수 있다.

여기서, σ_p 는 식 (16)으로 표현되는 평면 내의 최대주응력성분이다.

$$\overline{\sigma}_m = \frac{1}{3T_i} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \sigma_p dt \quad (15)$$

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{zz}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{zz}}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \quad (16)$$

여기서, σ_{xx} 은 x 축방향의 유효수직응력, σ_{zz} 는 z 축방향의 유효수직응력, τ_{xz} 는 xz 요소에 작용하는 유효전단응력을 각각 나타낸다.

그림으로부터 평균최대주응력분포는 파이프라인의 상대이격거리 $e/D=0.0$ 인 경우가 상대이격거리 $e/D=0.5, e/D=1.0$ 인 경우에 비해 파이프라인 아래 지반 내에서 보다 넓은 범위와 큰 값으로 주어지는 것을 알 수 있다. 그리고, 파이프라인 주변지반 내의 평균최대주응력분포는 인장응력분포(인장응력을 정(+))로 파이프라인 아래에 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 파이프라인의 상대이격거리 e/D 가 작을수록 파이프라인 아래 지반의 강도는 저하될 것으로 판단된다. Fig. 6과 비교하여 전체적으로 지반 내 흙의 평균체적변형률이 인장변형률인 경우 지반 내 평균최대주응력은 인장응력을, 지반 내 흙의 평균체적변형률이 압축변형률인 경우에는 지반 내 평균최대주응력분포는 압축응력의 값을 나타내는 경향이 있다. 즉, 3.3절에서 검토된 지반 내 평균유속흐름이 상향

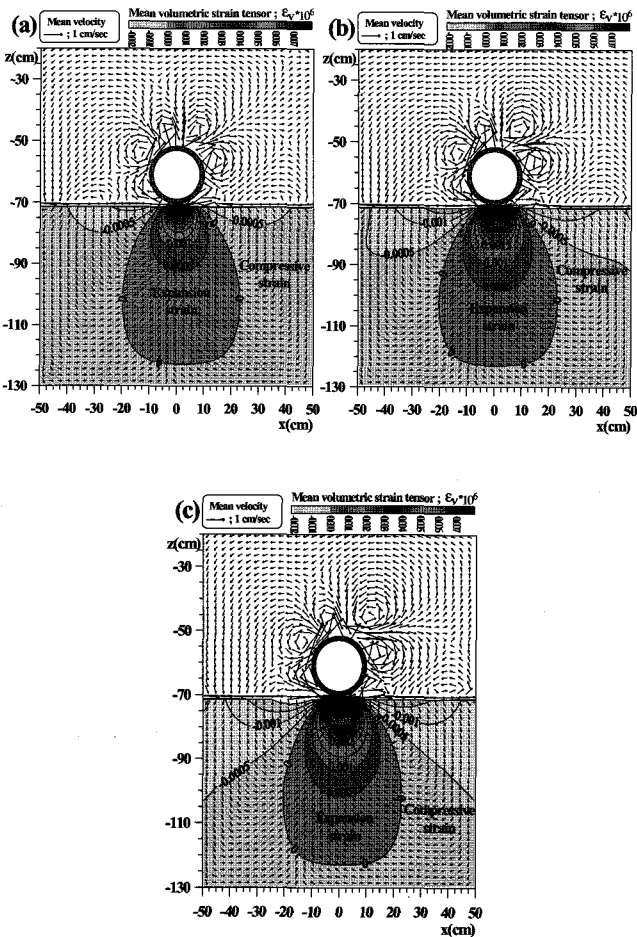


Fig. 7 Spatial distributions of mean flow and volumetric strain according to the wave period in case of $e/D=0.0$; (a) $T_i = 1.3\text{sec}$, (b) $T_i = 1.5\text{sec}$, (c) $T_i = 1.7\text{sec}$

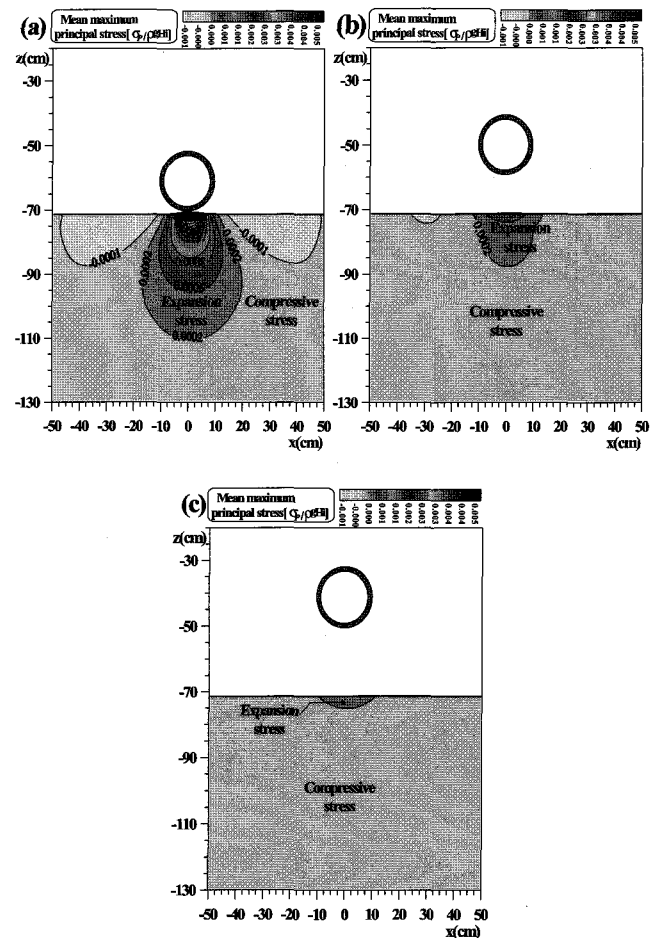


Fig. 8 Spatial distributions of mean maximum principal stress; (a) $e/D=0.0$, (b) $e/D=0.5$, (c) $e/D=1.0$

인 경우 지반은 인장변형률과 인장응력으로, 지반 내 평균유속 흐름이 하향인 경우에는 지반은 압축변형률과 압축응력을 각각 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 파이프라인 아래의 해저면 근방의 흐름이 상향인 경우 흙의 변형률 및 응력분포특성과 연관되어 흙은 느슨해질 수 있고 지반강도가 저하될 가능성이 있다. 또한, 파이프라인의 상대이격거리 e/D 가 작을수록 이러한 경향은 보다 분명하게 나타난다.

Fig. 9는 Fig. 8(a)의 $e/D=0.0$ 의 경우에 대해 주기의 변화를 파라미터로 파이프라인 아래 지반 내 흙의 평균최대주응력 분를 살펴본 결과이다. 그림으로부터 파이프라인 아래 지반에서의 인장응력은 주기가 가장 긴 Fig. 9(c)의 경우가 주기가 상대적으로 짧은 Fig. 9(a), Fig. 9(b)의 경우에 비해 큰 값과 넓은 범위로 파이프라인 아래 해저면에 집중되는 것을 알 수 있다. 따라서, 긴 주기의 파랑이 통과할 경우 파이프라인 아래 지반 내 흙의 인장변형 및 인장응력은 보다 큰 값과 넓은 범위로 파이프라인 아래 해저면에 집중될 것으로 예상되며, 결과적으로 지반의 불안정성은 더욱 크게 될 것으로 판단된다.

3.5 지반 내 최대연직유속의 분포특성

Fig. 10에 나타내는 바와 같이, 파이프라인의 상대이격거리 e/D 에 따른 파이프라인 아래 지반 내의 최대연직유속과 흙의 변형률 및 응력분포의 관계를 보다 면밀히 살펴보기 위하여 지반 내에 5cm 간격으로 연직유속을 검토하였다.

Fig. 11은 파이프라인의 상대이격거리 e/D 에 따른 파이프라인 아래 지반 내의 각 위치에서 계산된 최대연직유속을 비교한 결과이다. 여기서, 최대연직유속은 연직유속의 시계열데이터로부터 상향유속(정(+))의 최대값과 하향유속(부(-))의 최대값의 차이를 나타내며, 최대연직유속의 정(+)의 값은 상향유속이 탁월하다는 것을, 부(-)의 값은 하향유속이 탁월하다는 것을 각각 의미한다. 그림으로부터 파이프라인의 상대이격거리 e/D 에 따른 최대연직유속은 파이프라인 중앙의 지반 하(Fig. 11(c))에서 가장 큰 차이를 보이고 파이프라인으로부터 멀어질수록 그 차이는 급격히 감소하며, 일정깊이 이상에서는 그 차이가 경감되는 것을 알 수 있다. 즉, 파랑작용에 의한 파이프라인 아래 지반의 응답특성은 파이프라인과 인접한 지반 내에서 보다 명확하게 나타나는 것으로 판단된다. 또한, 상향의 최대연직유속은 $x=0\text{cm}$ 의 해저면 근방에서 최대값이 관찰되며, 파이프라인의 상대이격거리 e/D 가 작을수록 상향의 최대연직유속은 보다 큰 값으로 주어지는 것을 확인할 수 있다. 그리고, $x=-10\text{cm}$, $x=10\text{cm}$ 의 해저면 근방에서는 하향의 최대연직유속을 나타내며, 이와 같은 경향은 상대이격거리 $e/D=0.0$ 의 경우에서 보다 크게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 10의 파이프라인의 상대이격거리 $e/D=0.0$ 인 경우에 입사주기의 변화에 따른 파이프라인 아래 지반 내의 각 위치에서 계산된 최대연직유속을 비교한 것이다.

그림으로부터 $x=0\text{cm}$ 의 해저면 근방에서 관찰되는 상향의 최대연직유속은 주기가 짧은 경우에 비해 주기가 긴 경우가 보다 큰 값으로 주어지며, 특히 Fig. 12(c), Fig. 12(d)에서 관찰되는

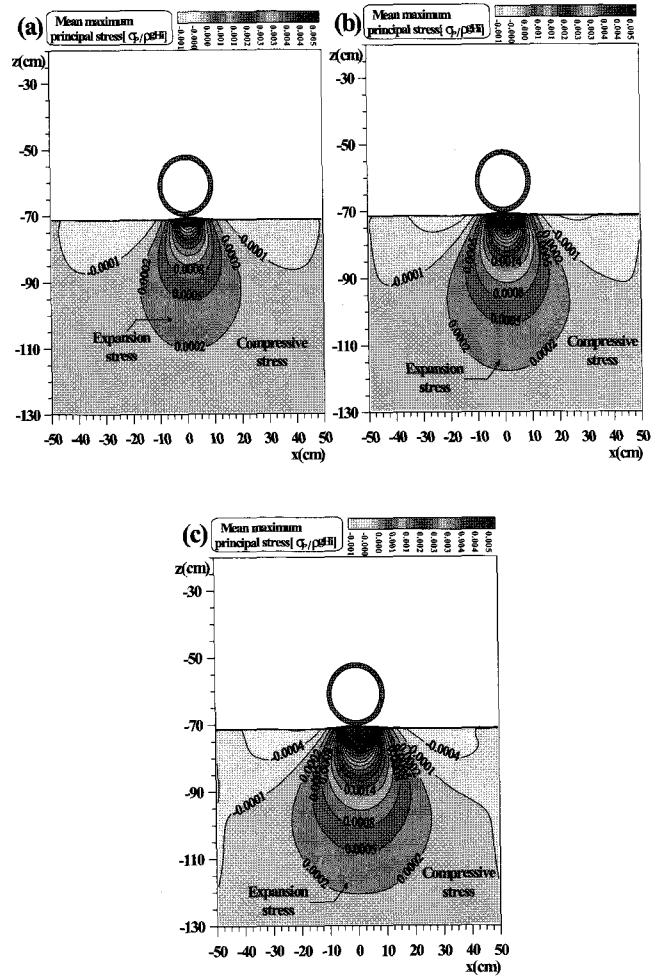


Fig. 9 Spatial distributions of mean maximum principal stress according to the wave period in case of $e/D=0.0$; (a) $T_i=1.3\text{sec}$, (b) $T_i=1.5\text{sec}$, (c) $T_i=1.7\text{sec}$

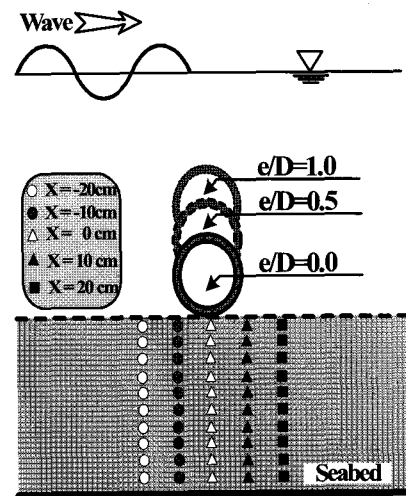


Fig. 10 Comparison points of calculated vertical velocities

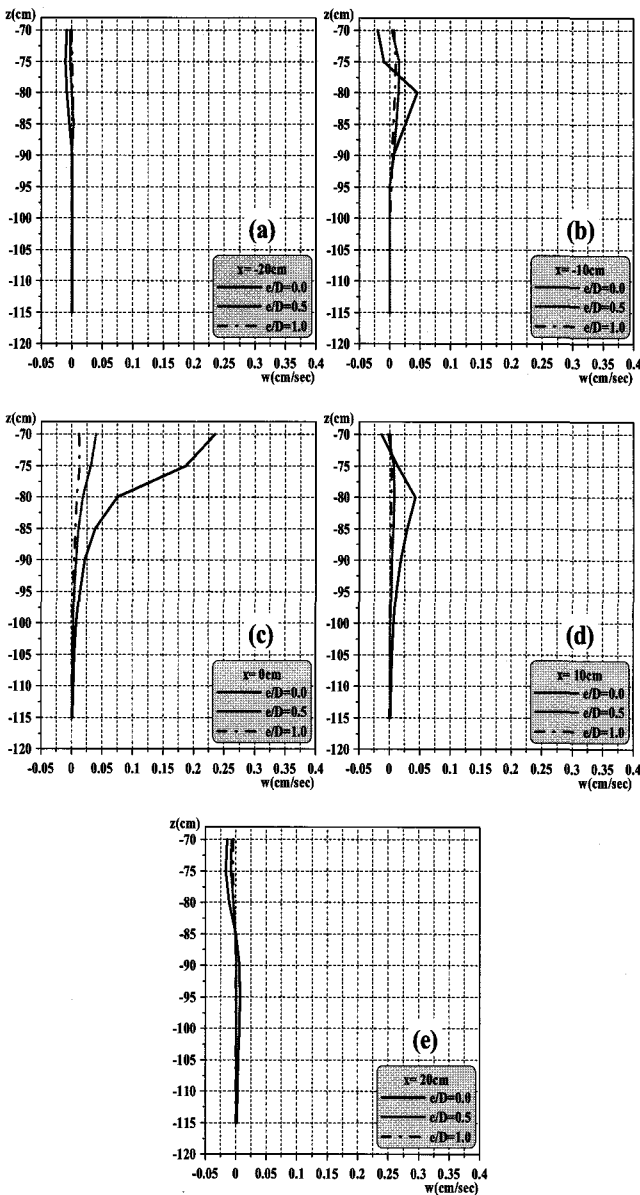


Fig. 11 Vertical variations of maximum vertical velocity at each point according to the e/D ; (a) at $x = -20\text{cm}$, (b) at $x = -10\text{cm}$, (c) at $x = 0\text{cm}$, (d) at $x = 10\text{cm}$, (e) at $x = 20\text{cm}$

지반 내 일정깊이에서의 상향 최대연직유속은 주기가 길어질수록 보다 명확히 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 주기가 길어질수록 명확히 나타나는 파이프라인 배후면에서의 와동현상(Fig. 7)이 지반에 미친 영향에 의한 결과로 판단된다.

따라서, 상대이격거리 e/D 및 주기의 변화에 따라 명확히 나타나는 파이프라인 아래 지반에서의 최대연직유속 특성, 전술한 지반 내 흙의 변형을 및 응력분포특성과 함께 파이프라인 아래 해저면 근방에서 발생할 수 있는 국부세굴에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며 해저파이프라인의 설계 시 이러한 영향들에 대한 세심한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

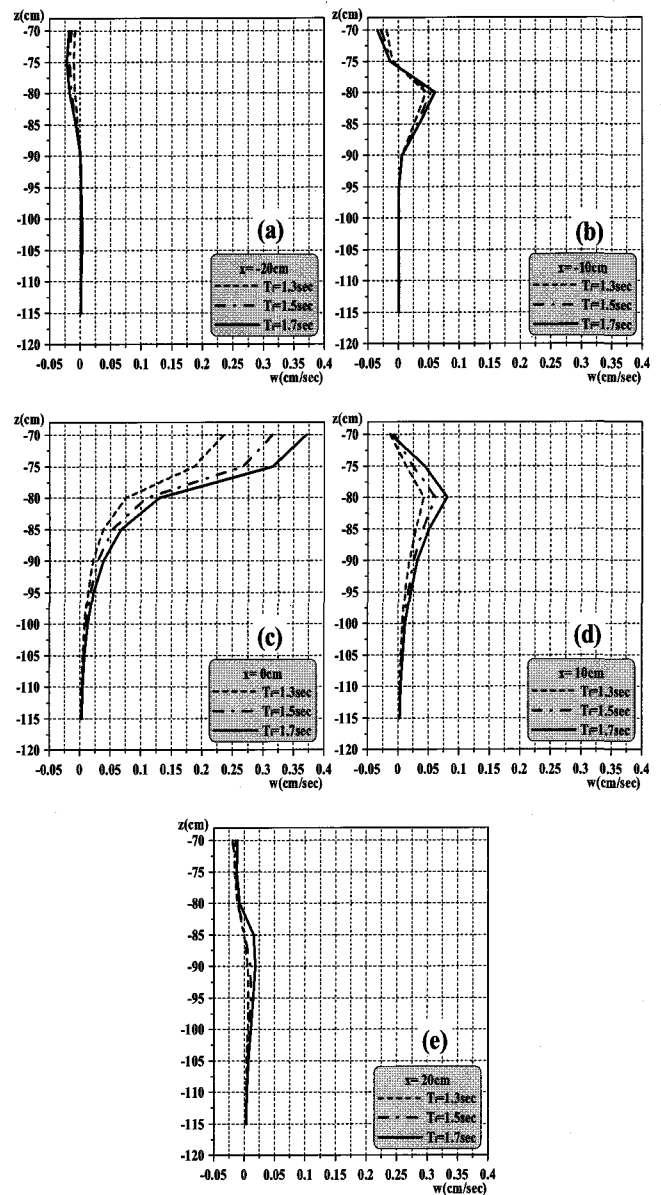


Fig. 12 Vertical variations of maximum vertical velocity at each point according to the wave period in case of $e/D = 0.0$; (a) at $x = -20\text{cm}$, (b) at $x = -10\text{cm}$, (c) at $x = 0\text{cm}$, (d) at $x = 10\text{cm}$, (e) at $x = 20\text{cm}$

4. 결 론

본 연구에서는 해저파이프라인 및 지반을 포함한 해석영역 전체에 수정 Navier-Stokes 방정식에 기초한 VOF-FDM을 적용한 후, 파동장과 지반의 경계면에서 주어지는 압력과 유속의 연속성을 고려하여 지반 내 흙의 응답특성을 FEM으로 해석하였다. 해석결과를 이용하여 지반에 대한 해저파이프라인의 상대이격거리 e/D 와 관련하여 지반 내 흙의 변형을 및 응력변화특성을 검토하였고, 지반 내 흙의 응답특성을 해저파이프라인 아래 지

반 내의 최대연직유속과 관련하여 논의하였다. 이로부터 얻어진 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

(1) 해저파이프라인의 상대이격거리 e/D 가 작을수록 해저파이프라인 주변지반 내로의 침투유속 및 파동장으로의 간극수의 용출유속은 해저파이프라인 주변지반 내에 집중된다.

(2) 파동장의 변화에 따른 지반 내 흙의 등변형률은 해저파이프라인의 상대이격거리 e/D 가 작을수록 해저파이프라인 아래 지반 내에 촘촘히 분포하며, 지반 내 흙의 변형은 파봉근방에서 압축변형(흙이 단단해짐)을, 파곡근방에서는 인장변형(흙이 느슨해짐)을 보인다.

(3) 해저파이프라인 아래 지반 내의 평균유속흐름이 상향인 경우 지반은 인장변형률과 인장응력으로, 평균유속흐름이 하향인 경우에는 지반은 압축변형률과 압축응력을 각각 나타낸다. 따라서 해저파이프라인 아래 지반에서의 평균유속흐름이 상향인 경우 흙의 변형률 및 응력분포특성과 연관되어 흙은 느슨해질 수 있고 지반강도가 저하될 가능성이 있다. 또한, 파이프라인의 상대이격거리 e/D 가 작을수록 이러한 경향은 보다 명확하다.

(4) 상대이격거리 $e/D=0.0$ 인 경우 주기가 길어질수록 해저파이프라인 근방의 와동현상은 보다 명확히 나타나며, 와의 분포는 해저파이프라인 전면부에 비해 파이프라인 배후면에서 보다 넓은 범위로 주어진다.

(5) 상대이격거리 $e/D=0.0$ 인 경우 해저파이프라인 아래 지반 내 흙의 인장변형 및 인장응력은 주기가 길어질수록 보다 큰 값과 넓은 범위로 해저파이프라인 아래 해저면에 집중된다.

(6) 해저파이프라인의 상대이격거리 e/D 가 작을수록, 주기가 길어질수록 해저면 근방의 상향 최대연직유속은 보다 큰 값으로 주어지며, 상대이격거리 e/D 및 주기의 변화에 따라 명확히 나타나는 파이프라인 아래 지반에서의 최대연직유속 특성은 지반 내 흙의 변형률 및 응력분포특성과 함께 파이프라인 아래 해저면 근방에서 발생될 수 있는 국부세굴에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 파랑과 해저파이프라인 및 지반과의 상호 작용으로 발생하는 흙의 응답특성을 살펴보았다. 실제 해양에서는 파랑뿐만 아니라 조류와 같은 흐름특성으로 해저파이프라인 주변지반 내의 응답특성은 달라질 수 있을 것으로 판단되며, 향후 파랑과 흐름이 공존하는 경우에 대한 지반응답특성을 연구·검토하고자 한다.

참고 문헌

- 오현식, 김경호, 박재성, 이호진 (2004). "해저 바닥에 놓인 관로 하의 파에 의한 국부세굴 특성", 대한토목학회지, 제24권, 제3B호, pp 247-257.
- 허동수, 김창훈, 염경선, 김도삼 (2005). "파·수중방파제·지반의 비선형 동적응답에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제19권, 제6호, pp 35-43.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*, 2th ed., American Elsevier, New York.
- Biot, M.A. (1941). "General Theory of Three Dimensional Consolidation", *J. appl. Phys.*, Vol 12, pp 155-164.
- Cevik, E. and Yüksel, Y. (1999). "Scour under submarine pipeline in waves in shoaling conditions", *J. Water. Port Coast. Ocean Eng.*, Vol 117, No. 2, pp 120-135.
- Jeng, D.S. and Cha, D.H. (2003). "Effects of dynamic soil behavior and wave non-linear on the wave-induced pore pressure and effective stresses in porous seabed", *Ocean Eng.*, Vol 30, pp 2065-2089.
- Jo, C.H., Lee, S.B., Shin, Y.S., Hong, S.G. and Min, K.H. (2002). "Numerical and experimental study of offshore pipeline stability in trench", *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, Vol 128, pp 258-270.
- Magada, W. (2000). "Wave-induced cyclic pore pressure perturbation effects in hydrodynamic uplift force acting on submarine pipeline buried in seabed sediments", *Coastal Eng.*, Vol 39, pp 243-272.
- Sümmer, B.M., Truelsen, C., Schmann, T. and Fredsøe, J. (2001). "Onset of scour below pipelines and self burial", *Coastal Eng.*, Vol 42, pp 313-335.
- Takahashi, S., Suzuki, K., Muranishi, Y. and Isobe, M. (2002). "U- π form VOF-FEM program simulatiug wave-soil interaction : CADMAS-GEO-SURF", *Proc. Coastal Eng., JSCE*, Vol. 49, pp 881-885.

2006년 7월 20일 원고 접수

2007년 2월 2일 최종 수정본 채택