

흐름과 임의반사율을 갖는 부분중복파와의 공존장하에서 해저지반내 동적응답의 해석해

An Analytical Solution of Dynamic Responses for Seabed under Coexisting Fields of Flow and Partial Standing Wave with Arbitrary Reflection Ratio

이 광 호¹ Lee, Kwang-Ho 김 동 옥² Kim, Dong-Wook
강 기 천³ Kang, Gi-Chun 김 도 삼⁴ Kim, Do-Sam
김 태 형⁵ Kim, Tae-Hyung 나 승 민⁶ Na, Seung-Min

Abstract

An analytical solution of dynamic responses for seabed in finite and infinite thicknesses including shallow has been developed under flow and partial standing wave with arbitrary reflection ration coexisting field at a constant water depth condition. In the analytical solution, a field was simply transited to a coexisting field of progressive wave and flow when reflection ratio was 0 and to a coexisting field of fully standing wave and flow when reflection ratio was 1. Based on the Biot's consolidation theory, the seabed was assumed as a porous elastic media with the assumptions that pore fluid is compressible and Darcy law governs the flow. The developed analytical solution was compared with the existing results and was verified. Using the analytical solution the deformation, pore pressure, effective and shear stresses were examined under various given values of reflection ratio, flow velocity, incident wave's period and seabed thickness. From this study, it was confirmed that the dynamic response of seabed was quite different depending on consideration of flow, which causes changing period and length of incident and reflection waves. It was also confirmed that dynamic response significantly depends on the magnitude of reflection ratio.

요 지

일정수심상에서 임의반사율을 갖는 부분중복파와 흐름이 공존하는 경우 얇은 두께를 포함한 유한두께 및 무한두께의 해저지반내에서 동적응답을 나타내는 해석해를 유도한다. 해석해에서 반사율이 0인 경우는 진행파와 흐름과의 공존장으로, 반사율이 1인 경우는 완전중복파와 흐름과의 공존장으로 간단히 변환된다. Biot의 압밀이론에 기초하여 해저지반은 투과탄성매체로, 간극유체는 압축성으로, 그리고 지반내 간극수의 흐름은 Darcy법칙으로 각각 가정된다. 도출된 해석해는 기존의 해석결과와의 비교·검토로부터 검증되며, 실제 계산에서는 반사율, 흐름속도, 입사파의 주기

1 비회원, 가톨릭관동대학교 에너지자원플랜트공학과 조교수 (Assistant Prof., Dept. of Energy Resources and Plant Eng., Catholic Kwandong Univ.)
2 비회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정 (Doctor Course Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Korea Maritime and Ocean Univ.)
3 정회원, 한국수자원공사 댐 유역관리처 선임위원 (Member, Senior Researcher, Dam & Watershed Maintenance Dept., K-water)
4 정회원, 한국해양대학교 건설공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., Tel: +82-51-410-4463, Fax: +82-51-403-0656, kimds@kmou.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
5 정회원, 한국해양대학교 건설공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ.)
6 비회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정 (Master Course Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Korea Maritime and Ocean Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 12월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

및 지반두께 등의 변화에 따른 지반변위, 간극수압, 유효응력 및 전단응력의 변동특성을 면밀히 검토한다. 이로부터 흐름이 존재하는 경우 흐름으로 인한 입사파와 반사파의 주기 및 파장의 변화로 인하여 흐름이 없는 경우의 지반내 동적응답과는 큰 차이를 나타내며, 또한 반사율의 크기에 따라 동적응답에서 큰 차이가 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

Keywords : Partial standing wave, Flow, Shallow thickness, Finite and infinite seabed, Dynamic response

1. 서론

Biot(1941)는 투과매체에 탄성거동과 간극유체에 압축성 및 간극수의 흐름에 Darcy법칙을 고려한 3차원압밀이론을 제안하였다. 이후에 Yamamoto et al.(1978)와 Madsen(1978)은 파동으로 인한 해저지반내 파랑응답에 Biot(1941)의 3차원압밀이론을 적용하여 미소진폭파, 진행파 및 무한깊이의 균질지반이라는 제한된 조건하 해석해를 유도하였다. 또한, Tsui and Helfrich(1983), Maeno and Hasegawa(1987), Okusa(1985) 및 Zen and Yamazaki(1990) 등은 진행파동으로 인한 해저지반내 간극수압변동을 원형조건하에서 실험적으로 조사하였으며, 이러한 연구결과들은 이후 수치해석결과의 검증자료로 활용되었다.

근래, 무한두께의 해저지반상에서 2차원완전중복파동장에 관한 해석해(Tsai and Lee, 1994), 무한두께 혹은 유한두께의 지반을 대상으로 3차원파동장에서 단파정파(short-crested waves)에 관한 해석해(Hsu et al., 1993; Tsai, 1995; Jeng and Hsu, 1996), 진행파 혹은 완전중복파의 2차원파동장 및 유한 혹은 무한의 지반두께를 갖는 해저지반 모두에 적용가능한 임의반사율의 부분중복파동장에서 유한두께의 해저지반에 관한 해석해(Lee et al., 2014), 불포화지반에서 정현파, 크노이드파 및 고립파가 내습한 경우 지반내 동적응답을 鏡像法(method of images)으로 도출한 해석해(Liu et al., 2007), 고립파동장하에서 점토지반(muddy seabed)내 동적응답을 경상법으로 유도한 해석해(Park et al., 2008) 등이 제시되어 있다. 여기서, 상부의 파동장에서는 다양한 파동이론에 의한 해석결과가 경계조건으로 부과되지만, 모든 해석해에 있어서 지반거동에는 Biot(1941)의 3차원압밀이론이 기초방정식으로 적용되고 있다.

한편, 파와 흐름과의 공존장에서 해저지반내 동적응답에 관한 해석해로는 진행파의 경우에 흐름이 지반응답에 미치는 영향을 평가한 Jeng et al.(2010)의 해석해

및 Stokes파에 기초한 비선형진행파의 경우를 대상으로 유사한 연구를 수행한 Zhang et al.(2013)의 해석해를 들 수 있다. 여기서, 파동과 흐름과의 공존장에 관한 전술한 두 연구사례에서는 흐름과 진행파의 진행방향이 동일한 경우에 파 주기가 길어지고, 반대인 경우에 짧아지는 단지 주기변화에 따른 지반응답의 변화특성만이 나타난다.

본 연구에서는 기존의 해석법(Yamamoto et al., 1978; Madsen, 1978; Tsai and Lee, 1994; Lee et al., 2014; Jeng et al., 2010; Zhang et al., 2013)과 유사한 해석기법을 적용하여 지금까지 논의된 적이 없는 흐름과 완전중복파의 경우에 유한 및 무한두께의 해저지반에서 지반응답특성을 규명한 Lee et al.(2015)의 해석해를 임의반사율의 부분중복파동장하 유한 및 무한의 두께를 갖는 해저지반으로 확장하여 지반내 간극수압, 유효응력 및 전단응력 등의 동적응답에 관한 해석해를 유도한다. 제시되는 해석해에 반사율을 0으로 두면(무반사) 진행파와 흐름이 공존하는 Jeng et al.(2010)의 해석해로, 또한 반사율을 1로 두면(전반사) 완전중복파와 흐름이 공존하는 Lee et al.(2015)의 해석해로 각각 귀결된다. 따라서, 본 연구의 경우가 전술한 Yamamoto et al.(1978), Tsai and Lee(1994), Lee et al.(2014), Jeng et al.(2010), Zhang et al.(2013) 및 Lee et al.(2015)의 각 해석해를 포함하면서 임의반사율과 흐름까지를 대상으로하고 있기 때문에 다양한 반사율을 갖는 항만·해안구조물과 흐름과의 상호작용에 의한 영향까지를 고려할 수 있는 보다 적용성이 넓은 해석해이다. 본 연구에서 제시되는 해석해의 타당성을 검증하기 위하여 흐름이 없는 경우에 완전중복파에 대한 해석해(Tsai and Lee, 1994) 및 진행파에 대한 실험결과(Chang et al., 2007), 그리고 흐름이 존재할 때 진행파에 대한 실험결과(Qi et al., 2012)와 비교·검토한다. 본문 중에서는 각 유한, 무한 및 얇은 지반두께의 해저지반에 대해 반사율, 흐름속도, 입사파의 주기 및 지반두께 등의 변화에 따른 지반변위, 간극

수압, 수평 및 연직유효응력, 그리고 전단응력의 변동특성을 면밀히 논의·검토한다.

2. 해석해

2.1 부분중복파동장의 해석

불투수층상에 유한두께 h 의 토층을 갖는 해저지반과 그 위로 흐름과 임의반사율의 부분중복파가 공존하는 유체장에서 좌표계를 Fig. 1과 같이 정의한다. 그림에서 (-) x 방향으로 진행하는 파고 $H_1 = H$ 의 입사파와 (+) x 방향으로 진행하는 파고 $H_R = K_R H$ (K_R 은 복소반사율)의 반사파가 중첩된 부분중복파동장에서 흐름 U_0 는 입사파와 동일한 방향으로 진행하는 것으로 정의된다. 이와 같은 유체장에 포텐셜이론을 적용하면 해저표면상에서 불투과경계조건, 자유수면에서 주어지는 운동학적 및 동역학적 경계조건, 그리고 Sommerfeld의 방사조건을 모두 만족하는 Laplace방정식의 해인 속도포텐셜 $\Phi(x, z, t)$ 는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi(x, z, t) = & U_0 x + \frac{gH}{2i\omega_i \left(1 - \frac{k_i U_0}{\omega_i}\right)} \frac{\cosh k_i z}{\cosh k_i d} e^{i(k_i x + \omega_i t)} \\ & + \frac{gK_R H}{2i\omega_r \left(1 + \frac{k_r U_0}{\omega_r}\right)} \frac{\cosh k_r z}{\cosh k_r d} e^{-i(k_r x - \omega_r t)} \quad (1) \end{aligned}$$

여기서, $i = \sqrt{-1}$, t 는 시간, x 는 수평좌표, z 는 해저지표면상에서 연직상방으로 취해지는 연직좌표, g 는 중력가속도, d 는 파동장의 수심, k_i 와 ω_i 및 k_r 와 ω_r 은 흐

름에 의해 변화되는 입사파와 반사파의 파수와 각주파수를 각각 나타내며, 다음의 분산관계식 (2)와 (3), 그리고 (4)와 (5)에 의해 산정될 수 있다.

$$\frac{\omega_i^2}{g} \left(1 - \frac{k_i U_0}{\omega_i}\right)^2 = k_i \tanh k_i d \quad (2)$$

$$\frac{\omega_r^2}{g} \left(1 + \frac{k_r U_0}{\omega_r}\right)^2 = k_r \tanh k_r d \quad (3)$$

$$\omega_0 = \omega_i + k_i U_0 \quad (4)$$

$$\omega_0 = \omega_r - k_r U_0 \quad (5)$$

여기서, ω_0 는 흐름이 존재하지 않는 경우에 입사파 및 반사파의 각주파수를 나타내며, 이는 식 (2) 혹은 (3)에서 $U_0 = 0$ 으로 고려한 경우에 얻어진다. ω_i 와 k_i 는 식 (2)와 (4)로부터, ω_r 과 k_r 은 식 (3)과 (5)로부터 각각 산정될 수 있다.

이상과 같은 흐름과 부분중복파의 공존장에서 수면변동 $\eta(x, t)$ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \text{Re} \left[e^{i(k_i x + \omega_i t)} + K_R e^{-i(k_r x - \omega_r t)} \right] \quad (6)$$

여기서, Re 는 실수부를 나타내며, 흐름에 의해 입사파와 반사파에서 파수와 각주파수가 다소 증감하므로 수면형은 파군과 유사한 형태로 나타나게 된다.

다음으로, 해저지반내의 동적응답해석에 경계조건으로 적용되는 해저지반상 $z=0$ 에서 유체동압 $p_d(x, t)$ 는

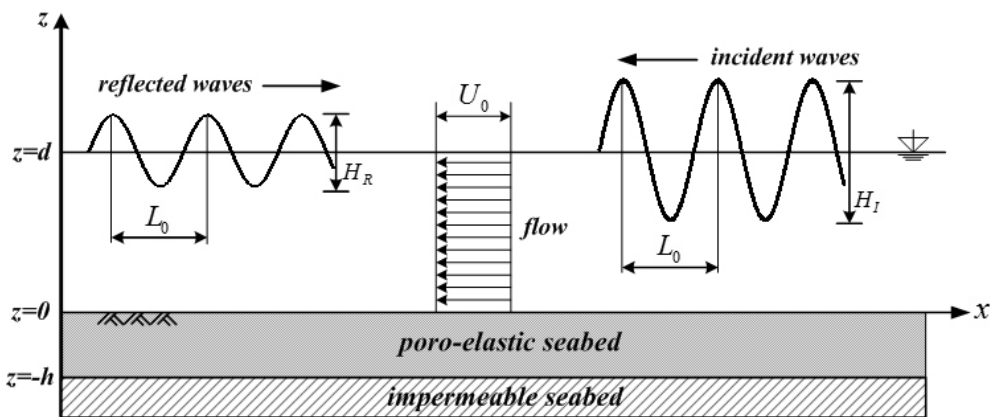


Fig. 1. Definition sketch of the combination of flow and partial standing wave in a Cartesian coordinate system

Bernoulli 식으로부터 다음과 같이 산정된다.

$$p_d(x,t) = \frac{\rho g H}{2 \cosh k_i d} e^{i(k_i x + \omega_i t)} + \frac{\rho g K_R H}{2 \cosh k_r d} e^{-i(k_r x - \omega_r t)} \quad (7)$$

식 (7)로부터 흐름이 해저지반내의 동적응답에 미치는 영향은 해저면상의 동압에서 주파수와 파수의 변화로 주어진다는 것을 알 수 있다.

2.2 지반응답해석

2.2.1 유한두께의 해저지반

유한두께 h 를 갖는 해저지반이 수리학적으로 등방균질불포화토로 구성되고, 또한 간극수의 운동은 Darcy법칙을 따르는 것으로 가정된다. Biot의 압밀이론에 기초하면(Verruijt, 1969) 압축성의 다공질매체에서 압축성 간극유체의 간극수압에 대한 2차원저류방정식은 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{\rho g n' \beta}{K} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\rho g}{K} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) \quad (8)$$

여기서, P 는 파동으로 인한 지반내 간극수압, K 는 흙의 투수계수, n' 는 흙의 간극률, ξ 와 χ 는 각각 x 와 z 방향의 지반변위, β 는 공기를 포함하는 간극유체의 압축률로 간극유체의 유효체적탄성계수 V' 의 역수로 주어지며, 유체 중에 공기가 전혀 포함되지 않은 순수체에 대한 체적탄성계수 V 와의 관계는 다음의 식으로 주어진다.

$$\beta = \frac{1}{V'} = \frac{1}{V} + \frac{1 - S_r}{P_{abs}} \quad (9)$$

여기서, S_r 은 포화도, P_{abs} 는 절대간극수압($100kN/m^2$)을 각각 나타낸다.

한편, Biot(1941)의 다공질탄성이론으로부터 유효응력과 전단응력은 지반변위의 함수로 다음과 같이 나타난다.

$$\sigma'_x = 2G \left[\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\mu}{1-2\mu} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) \right] \quad (10)$$

$$\sigma'_z = 2G \left[\frac{\partial \chi}{\partial z} + \frac{\mu}{1-2\mu} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) \right] \quad (11)$$

$$\tau = G \left[\frac{\partial \chi}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial z} \right] \quad (12)$$

여기서, σ'_x 와 σ'_z 는 각각 x 와 z 방향의 유효응력, G 는 흙의 전단탄성계수, μ 는 흙의 Poisson비이며, 흙의 탄성계수 E 와의 사이에 다음의 관계식이 성립된다.

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (13)$$

식 (10)~(12)를 지반내 힘의 평형방정식에 적용하면 다음의 관계식이 산정된다.

$$G \nabla^2 \xi + \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial x} \quad (14)$$

$$G \nabla^2 \chi + \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial z} \quad (15)$$

부분중복파와 흐름과의 공존장으로 인한 지반내에서 동적응답을 표현하는 기초방정식은 전술한 저류방정식 (8)과 힘에 관한 평형방정식 (14) 및 (15)로 구성되며, 이로부터 해를 도출하기 위하여 해저지반표면 $z=0$ 와 불투과층 $z=-h$ 에 다음과 같은 경계조건을 부과한다.

$$\sigma'_z, \tau = 0 \text{ on } z = 0 \quad (16)$$

$$\xi, \chi, \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \text{ on } z = -h \quad (17)$$

다음으로, 지반내에서 간극수압 P 와 지반변위 ξ, χ 에 관한 일반해가 다음의 식으로 표현될 수 있다고 가정한다.

$$\begin{bmatrix} \cdot P(x,z,t) \\ \cdot \xi(x,z,t) \\ \cdot \chi(x,z,t) \end{bmatrix} = \sum_{j=i,r} \begin{bmatrix} \cdot P_j(z) \Lambda_j(x,t) \\ \cdot \xi_j(z) \Lambda_j(x,t) \\ \cdot \chi_j(z) \Lambda_j(x,t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서, $\Lambda_i(x,t) \equiv e^{i(k_i x + \omega_i t)}$, $\Lambda_r(x,t) \equiv K_R e^{-i(k_r x - \omega_r t)}$ 이다.

또한, 식 (10)~(12)에 (18)의 관계를 고려하면 다음의 관계식도 성립된다.

$$\begin{bmatrix} \cdot\sigma'_x(x,z,t) \\ \cdot\sigma'_z(x,z,t) \\ \cdot\tau(x,z,t) \end{bmatrix} = \sum_{j=i,r} \begin{bmatrix} \cdot\sigma'_{jx}(z)\Lambda_j(x,t) \\ \cdot\sigma'_{jz}(z)\Lambda_j(x,t) \\ \cdot\tau_j(z)\Lambda_j(x,t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서, 첨자 j 가 i 일 때는 입사파성분, 첨자 j 가 r 일 때는 반사파성분에 각각 대응한다.

식 (18)과 (19)에서 미지변수가 입사파성분과 반사파성분의 중첩으로 주어지고, 기초방정식 (8), (14) 및 (15)가 선형편미방정식이며, 또한 경계조건식 (16)과 (17)이 선형으로 주어지고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서, 모든 관계식에서 입사파성분과 반사파성분을 각각 별개로 분리하여 해석하고 얻어진 결과를 선형중첩함으로써 요구되는 해석해를 산정할 수 있게 된다. 이러한 해석해의 유도과정은 무한두께의 해저지반까지도 포함하여 Lee et al.(2014, 2015)에 제시되어 있으므로 여기서는 기술을 생략하는 것으로 한다.

3. 해석결과

3.1 기존의 해석결과와의 비교

기존의 연구에서 흐름이 존재하지 않을 때를 대상으로 완전중복파에 대한 해석해(Tsai and Lee, 1994) 및 진행파에 대한 실험결과(Chang et al., 2007), 그리고 흐름이 존재할 때 진행파에 대한 실험결과(Qi et al., 2012)와 본 연구의 해석해를 비교·검토하여 본 연구의 타당성을 이하와 같이 검증한다.

3.1.1 완전중복파에 대한 해석해(무한두께, 흐름 없는 경우)

입사파와 동일한 파고와 주기를 갖는 반사파가 존재하지만, 흐름이 존재하지 않으므로 $K_R=1$, $k_j=k_i=k_r \equiv k$, $\omega_j=\omega_i=\omega_r \equiv \omega$, $\Omega_j=\Omega_i=\Omega_r \equiv \Omega$ 및 $\delta_j=\delta_i=\delta_r \equiv \delta$ 로 나타낼 수 있고, 그리고 $p_0 \equiv \frac{\rho g H}{2 \cosh kd}$ 로 나타낸다. 이러한 조건으로부터 균질등방지반내의 동적응답을 산정한 본 연구의 해석결과와 동일한 조건하에 얻어진 Tsai and Lee(1994)의 결과를 비교한 것이 Fig. 2이다. 그림에서 파동조건은 수심 $d=45\text{cm}$, 파고 $H=5.0\text{cm}$, 주기 $T=1.0\text{s}$ 이고, 완전포화도에 대한 해저지반의 물성치는 투수계수 $K=1.2 \times 10^{-4}\text{cm/s}$, Poisson비 $\mu=0.3$, 간극률 $n'=0.38$ 이며, 특히 간극수의 압축률 β 와 흙의 전단탄성계수 G 와의 곱이 $G\beta=0$ 인 흙이 강성을 갖지 않는 경우를 적용한 결과이다. 여기서, $G\beta=0$ 의 경우는 촘촘한 모래지반을 제외한 대부분의 흙에서 실질적으로 적용될 수 있다 (Yamamoto et al., 1978). Fig. 2(a)가 간극수압을, (b)가 수평 및 연직유효응력과 전단응력을 각각 나타낸다. 완전중복파동장이므로 간극수압은 위치 x/L (여기서, L 은 입사파의 파장)에 따라 상이하고, $x/L=0$ 인 완전중복파의 배(antinode)에서 $x/L=1/4$ 인 마디(node)로 전이될수록, 그리고 연직깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 나타낸다. 수평 및 연직유효응력도 완전중복파의 배에서 마디로 전이될수록 감소하는 경향을 나타내지만, 연직깊이 $z/L > -0.159$ 의 범위에서는 증가하고, $z/L = -0.159$ 에서 최대치를 나타낸 이후에 감소한다. 여기서, 전단응

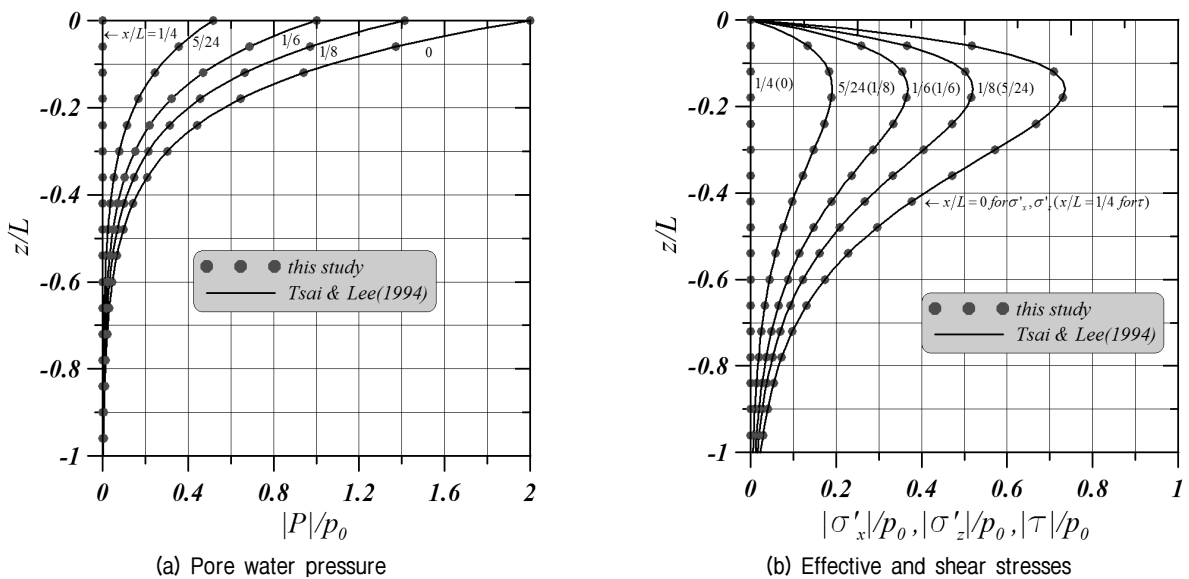


Fig. 2. Standing wave-induced dynamic responses of seabed in finite thickness under a given condition of $t/T=0$

력의 경우는 수평 및 연직유효응력과 동일한 값의 변화를 나타내지만, 마디에서 최대치를, 배에서 최소치를 각각 나타내므로 유효응력과는 위상차가 존재하며, 이러한 변화과정에서 본 해석결과는 Tsai & Lee(1994)의 결과와 완전히 일치하는 것을 알 수 있다.

3.1.2 진행파에 대한 실험치(유한두께, 흐름 없는 경우)

다음의 Fig. 3에 나타내는 결과는 Chang et al.(2007)의 실험결과와 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 그림에서(L_0 는 흐름이 없는 경우 입사파의 파장으로 이하 동일) 본 해석해의 경우는 반사파가 존재하지 않는 진행파이므로 $K_R=0$ 이고, k_r, ω_r, Ω_r 및 δ_r 의 성분은 고려될 필요가 없으며, 흐름이 존재하지 않으므로 $K_R=0, k_j=k_i \equiv k, \omega_j=\omega_i \equiv \omega, \Omega_j=\Omega_i \equiv \Omega, \delta_j=\delta_i \equiv \delta$ 및 $p_0 \equiv \frac{\rho g H}{2 \cosh kd}$ 이다. 파동 및 지반조건은 $H=25\text{cm}, d=0.526\text{m}, T=2.0\text{s}, h=0.6\text{m}, G=10^7\text{N/m}^2, \mu=0.12, K=2.11 \times 10^3\text{m/s}, n'=0.48$, 모래의 평균입경 $d_{50}=0.22\text{mm}, S_r=1.0$ 이다. 그림의 두 해석결과는 해저지반표면상에서 무차원간극수압 $|P|/p_0=1$ 근방의 값을 나타내고, 무차원연직깊이 z/L_0 가 깊어질수록 감소하는 경향을 나타내며, 변화과정에서 두 해석결과는 합리적인 일치성을 나타내는 것으로 판단된다.

3.1.3 진행파에 대한 실험치(유한두께, 흐름 있는 경우)

흐름이 존재하는 경우 Qi et al.(2012)의 실험결과와 본 연구의 결과를 비교한 것이 다음의 Fig. 4이다. 그림에서 Qi et al.(2012)의 실험결과는 mono-pile 주변에서

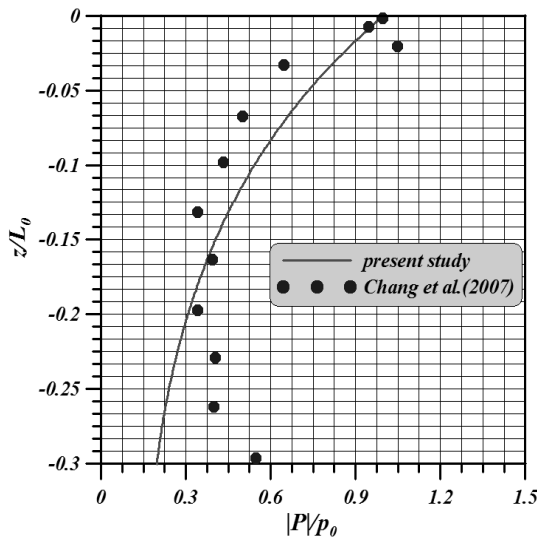


Fig. 3. Comparison between this study and Chang et al.'s (2007) experimental results

세굴심을 평가하기 위하여 수행된 실험데이터 중에 구조물로 멀리 떨어져 구조물의 영향을 받지 않는 위치에서 얻어진 데이터를 사용하여 도시한 것이다. 본 연구의 해석해는 3.1.2절에 나타난 진행파 조건 $K_R=0$ 을 적용하였으며, 또한 흐름이 존재하므로 $k_j=k_i, \omega_j=\omega_i, \Omega_j=\Omega_i$ 및 $\delta_j=\delta_i$ 로 나타낼 수 있다. 흐름, 파동 및 지반조건은 $U_0=0.1\text{m/s}, H=0.12\text{m}, d=0.5\text{m}, T=1.4\text{s}, h=0.5\text{m}, G=10^7\text{N/m}^2, \mu=0.3, K=1.88 \times 10^4\text{m/s}$, 간극비 $e=0.771(n' = \frac{e}{1+e})$ 의 관계로부터 간극률 n' 로 환산하면 $n'=0.435$ 가 얻어진다, $d_{50}=0.25\text{mm}, d_{10}=0.21\text{mm}, S_r=1.0$ 이다. 그림으로부터 실험데이터의 수가 충분하지 않지만, 무차원간극수압 $|P|/p_0$ 에 대한 두 해석결과는 연직깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 나타내며, 두 해석결과의 대응성은 타당한 것으로 판단된다.

3.2 해석결과

3.2.1 흐름과 진행파동장 및 완전중복파동장과의 공존장하 유한두께의 해저지반

Fig. 5는 진행파 조건 $K_R=0$ 와 흐름에 대한 $k_j=k_i, \omega_j=\omega_i, \Omega_j=\Omega_i$ 및 $\delta_j=\delta_i$ 의 관계를 각각 고려하여 산정된 결과이다. 그리고, 진행파동장에서 수심 $d=20\text{m}$, 입사파고 $H=1.0\text{m}$, 흐름이 없을 경우의 입사주기 $T_0=15.0\text{s}$ 이고, 유한두께 $h=50\text{m}$ 를 갖는 균질등방지반의 물성치는 완전포화토에 대해 투수계수 $K=1.0\text{cm/s}$, Poisson비 $\mu=0.3$, 간극률 $n'=0.4$, 간극수의 압축률 β 와 흙의 전단

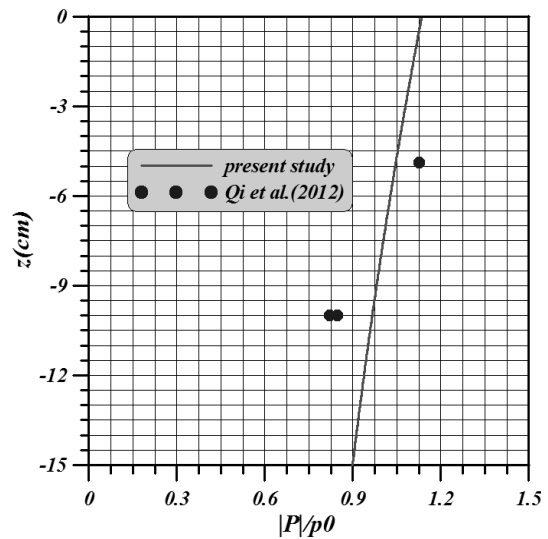
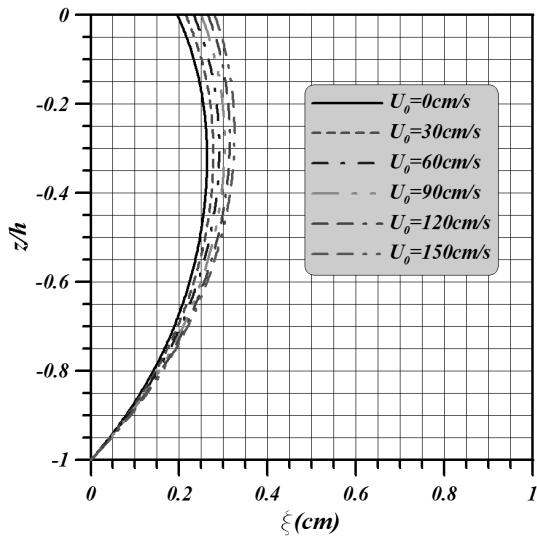
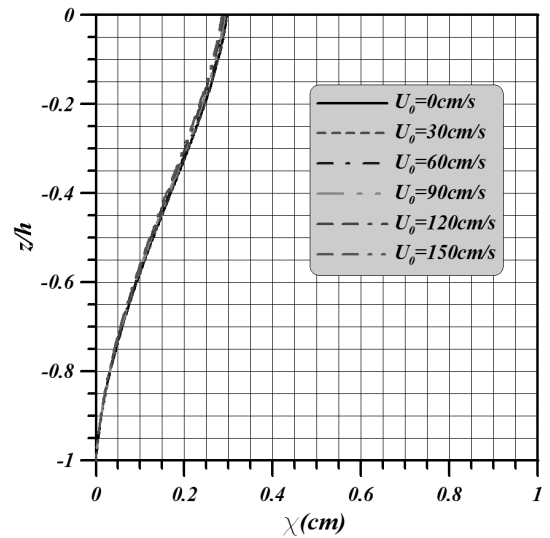


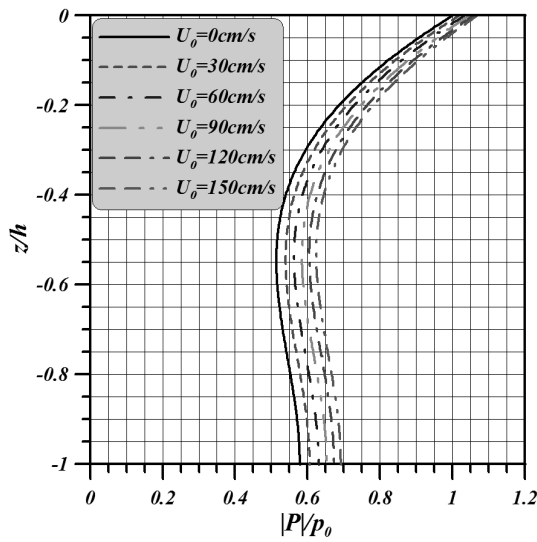
Fig. 4. Comparison between this study and Qi et al.'s (2012) experimental results



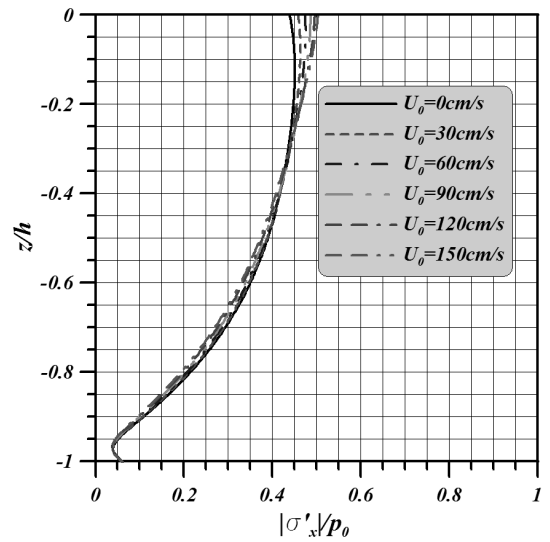
(a) Horizontal displacement



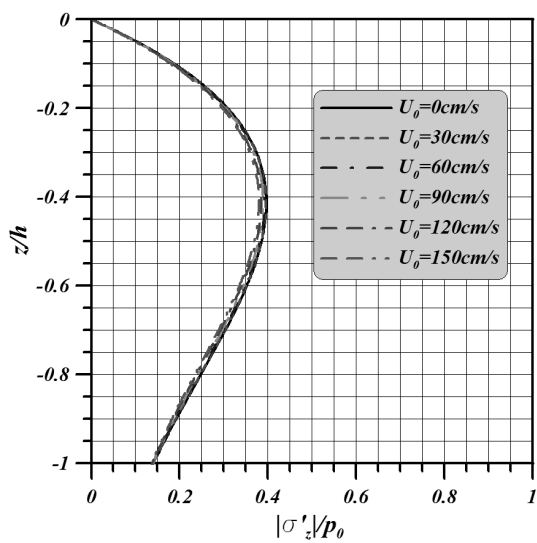
(b) Vertical displacement



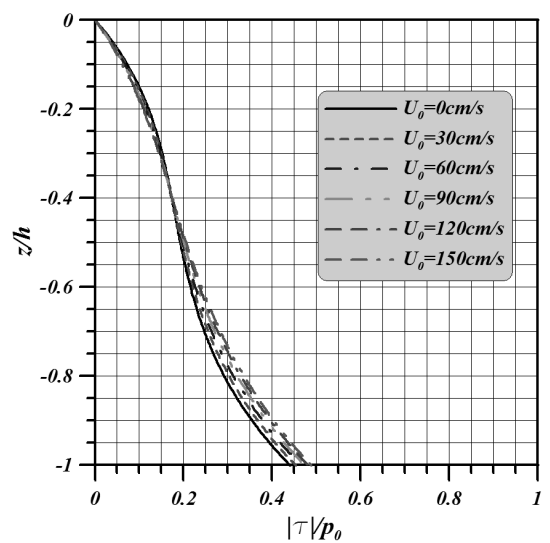
(c) Non-dimensional pore water pressure



(d) Non-dimensional horizontal effective stress



(e) Non-dimensional vertical effective stress



(f) Non-dimensional shear stress

Fig. 5. Flow and progressive wave-induced dynamic responses of seabed according to flow velocities under given conditions of $x/L_0=0$ and $t/T_0=0$

탄성계수 G 와의 곱이 $G\beta=0$ 인 경우이며, 이 때 $1/20 < h/L_0 = 0.253 < 1/2$ 이므로 유한두께를 갖는 지반이론을 적용가능한 것으로 판정된다. 그림을 살펴보면 지반의 수평변위와 간극수압이 흐름의 영향을 상대적으로 크게 받는다는 것을 볼 수 있다. 흐름속도가 증가할수록 지반의 수평변위는 커지지만, 해저지반표면에서 지반저면으로 갈수록 증가폭이 줄어들고, 간극수압은 전 연직깊이에 걸쳐 커지는 결과를 나타내지만, 상대적으로 지반저면에서 약간 큰 증가폭을 나타낸다. 지반의 연직변위는 거의 변동이 없지만, 흐름속도의 증가로 인하여 미미한 감소가 나타나며, 수평유효응력의 경우 흐름속도의 증가로 인하여 $z/h \approx -0.33$ 을 기준으로 상부는 증가를, 하부는 감소를 각각 나타낸다. 연직유효응력의 경우 거의 변동이 없지만, 흐름속도의 증가에 따라 전 연직깊이에 걸쳐 미미한 감소를 나타낸다. 전단응력은 $z/h \approx -0.4$ 를 기준으로 상부는 감소를, 하부는 증가를 나타내지만, 하부영역이 흐름에 상대적으로 더 민감하다는 것을 알 수 있다.

여기서, 흐름이라는 것은 수평으로 발생하는 것이기 때문에 기본적으로 지반의 수평변위와 수평유효응력에 상대적으로 큰 영향을 미치게 되고, 간극수압에서 변동은 입사파에서 흐름으로 인한 주기와 파장의 증가에 의한 효과가 반영된 것이다. 따라서, 지반의 연직변위, 연직유효응력 및 전단응력은 상대적으로 영향이 작은 것으로 판단된다.

한편, 본 연구의 해석해에서 $K_R=1$ 을 적용하여 완전중복파동과 흐름이 공존하는 유체장으로 변환한 해석결과와 완전중복파와 흐름이 결합된 유체장하 지반내 동적응답을 논의한 Lee et al.(2015)의 결과를 비교·검토하여 두 결과가 완전히 동일하다는 것을 확인할 수 있었다. 여기서, 전술한 진행파의 Fig. 5와 완전중복파의 Lee et al.(2015)의 두 결과에서 얻어지는 지반내 동적응답을 상호 비교한다. 두 결과에서 지반변위의 경우 진행파가 보다 큰 지반변위를 나타내며, 간극수압의 경우 흐름속도의 증가에 따라 완전중복파에서는 감소를, 진행파에서는 증가를 각각 나타낸다. 간극수압, 수평 및 연직유효응력은 완전중복파의 경우가 큰 값을 가지고, 전단응력은 완전중복파의 경우 배에서 산정되었기 때문에 진행파의 경우가 큰 값을 가진다. 두 결과에서 근본적인 차이는 파동의 차이로 발생하며, 완전중복파의 경우 수면변동이 진행파의 두 배로 되는 배와 수면변동

이 없는 마디가 발생하므로 두 결과에서 연직깊이에 따른 동적응답의 변동이 많이 다르다는 것을 확인할 수 있다.

3.2.2 흐름과 부분중복파동장의 공존장하 유한두께의 해저지반

이하의 그림에서 나타내는 결과들은 Fig. 5와 동일한 파동 및 지반조건과 반사율 $K_R=0.7$ 이 적용된 결과들이다. 먼저, 흐름속도 U_0 를 0cm/s에서 150cm/s까지 변화시킨 경우 $t/T_0=0$ 때 수면변동의 공간분포를 나타낸 것이 Fig. 6이다. 그림으로부터 흐름속도가 없는 $U_0=0$ cm/s의 경우는 상·하수면변동의 최대치가 $1.7H$ 인 부분중복파가 형성되고, 수평축에 따라 그의 값은 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. $U_0=30$ cm/s의 경우 분산관계식에 의해 각각 입사파와 반사파의 주기와 파장이 변화되고, 흐름이 없는 경우를 기준으로 입사파는 큰 값을 가지는 반면에 반사파는 작은 값을 가지기 때문에 파군이 형성될 것으로 추정되며, 그림으로부터 이를 확인할 수 있다. 이러한 파군은 $U_0=60$ cm/s, 90cm/s, 120cm/s 및 150cm/s의 경우도 형성되지만, 흐름속도가 커질수록 입사파와 반사파의 주기와 파장에서 차이가 크게 되므로 파군의 파장은 짧아지고, 보다 불규칙적인 수면변동을 나타내는 것을 알 수 있다. 완전중복파동장과 흐름이 결합된 유체장하 지반의 동적응답에 관한 해석해를 유도한 Lee et al.(2015)에서도 지적하고 있는 바와 같이 흐름속도가 빨라지는 경우에는 흐름이 없을 때를 기준으로 입사파의 파장은 더 길어지고 반사파의 파장은 더 짧아지게 되므로 입사파의 파수는 더 작아지고 반사파의 파수는 더 커진다. 따라서, 두 파에서 파수의 차이가 더 커지게 되므로 파군의 파장이 더 짧아지게 되는 현상을 Fig. 6으로부터 확인할 수 있다.

다음의 Fig. 7은 전술한 경우와 동일한 파동조건과 지반정수를 고려하였을 때 $U_0=90$ cm/s, $x/L_0=0$ 및 $t/T_0=0$ 에서 반사율 K_R 을 파라미터로 연직깊이에 따른 간극수압, 수평 및 연직유효응력, 그리고 전단응력의 연직분포를 나타낸 결과이다. 간극수압, 수평 및 연직유효응력은 공통적으로 반사율이 줄어들면 감소하고, 반면에 전단응력은 증가하는 경향을 나타낸다. 간극수압의 경우 전 연직깊이에 걸쳐 반사율의 영향이 나타나며, $K_R=1$ 및 $z/h=0$ 에서 무차원간극수압 $|p/p_0|$ 이 2보다 작은 것은 흐름의 영향이다(Lee et al., 2015). 수평유효응력의 경

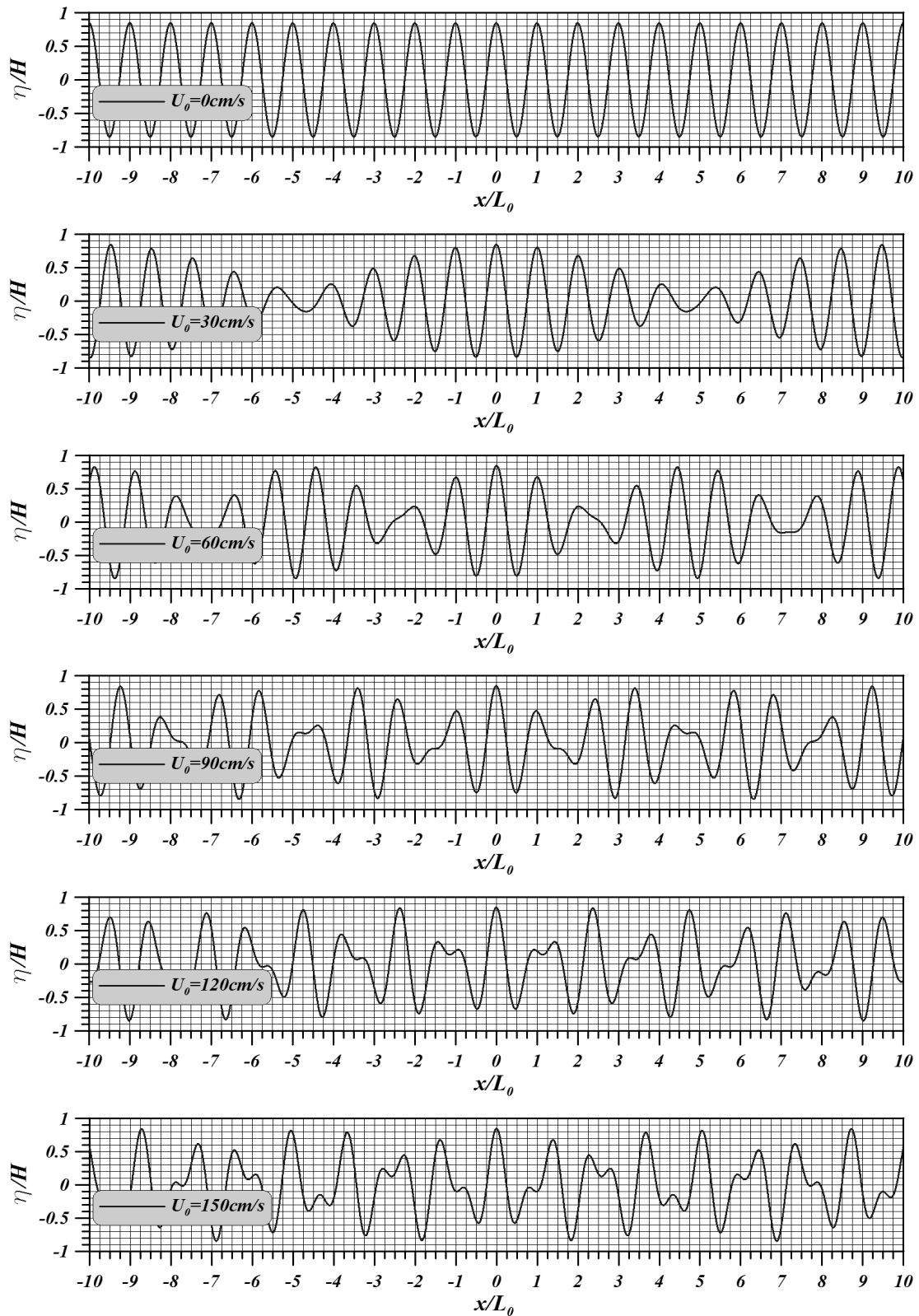
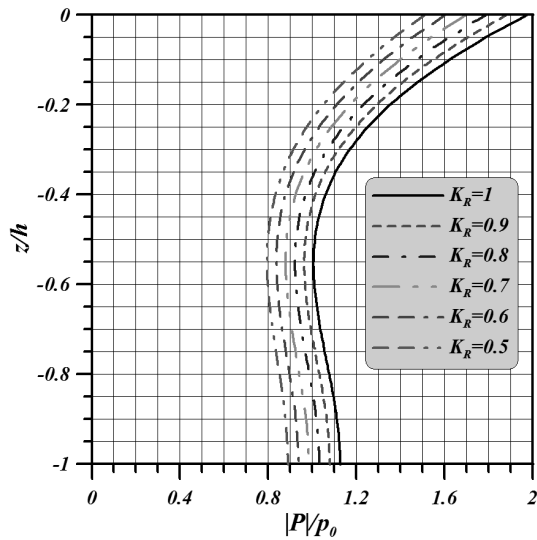


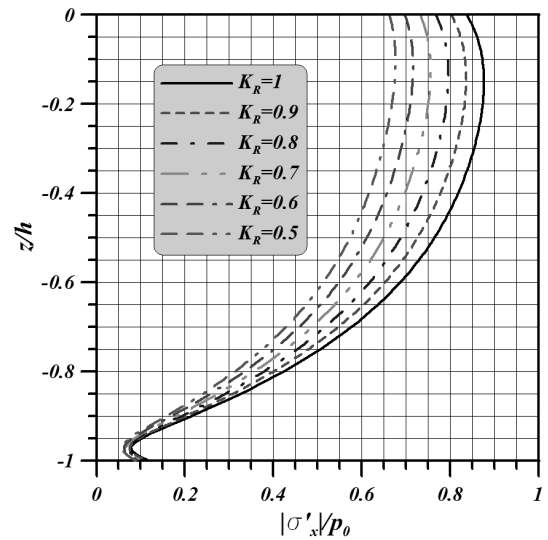
Fig. 6. Partial standing wave profiles according to flow velocities under a given condition of $t/T_0=0$

우 연직깊이에 따라 반사율의 영향이 줄어들고, 연직유
효율력의 경우 지반표면에서는 영향이 없으며, 최대치
가 나타나는 연직깊이에서 가장 크고 지반저면으로 갈

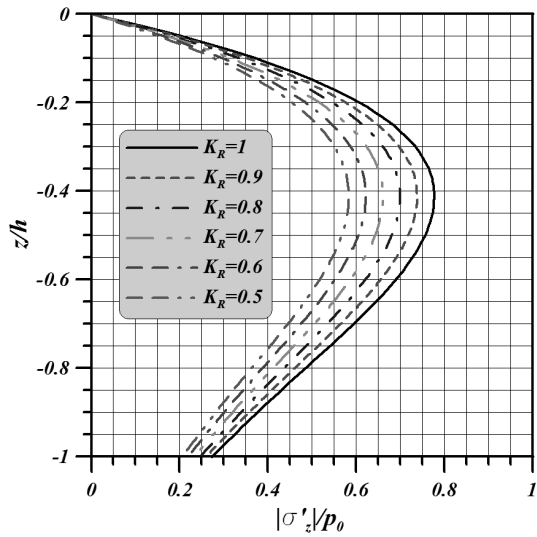
수록 줄어드는 경향을 나타낸다. 전단응력의 경우 지반
표면에서 영향이 없고, 연직깊이가 깊어짐에 따라 반사
율의 영향이 커지는 경향을 나타낸다. 이러한 특성은 식



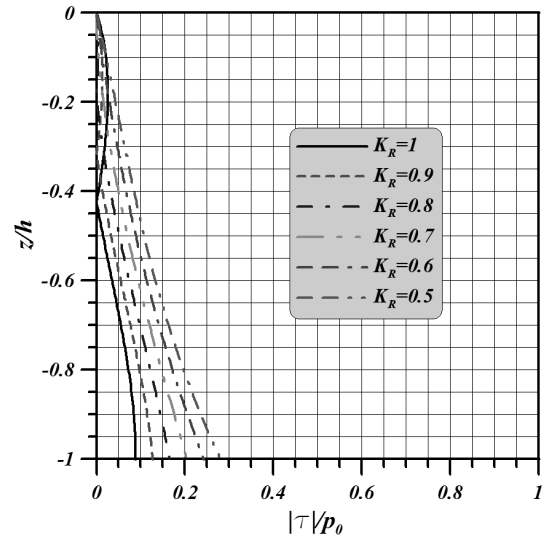
(a) Non-dimensional pore water pressure



(b) Non-dimensional horizontal effective stress



(c) Non-dimensional vertical effective stress



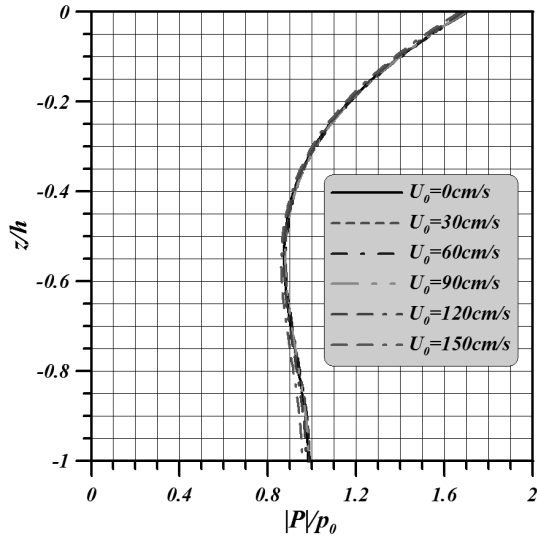
(d) Non-dimensional shear stress

Fig. 7. Flow and partial standing wave-induced dynamic responses of seabed according to reflection ratios under given conditions of $U_0=90$ cm/s, $x/L_0=0$ and $t/T_0=0$

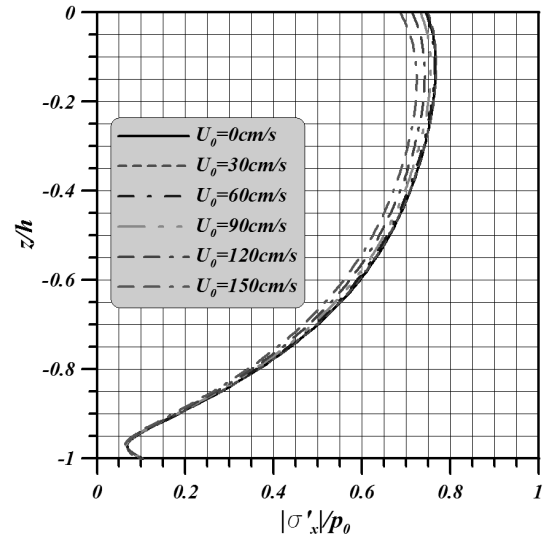
(16)과 (17)에서 주어지는 경계조건의 영향과 더불어 반사율의 증가에 의한 파고의 증가가 해저지반표면상에 작용하는 간극수압의 증가로 인한 결과이다. 여기서, 전단응력은 부분중복파의 배에 해당하는 수평위치 $x/L_0=0$ 에서 산정되었기 때문에 전체적으로 작은 값을 나타내는 것으로 판단되며, 일반적으로 흐름이 없는 완전중복파의 경우 배 위치에서는 전단응력이 발생하지 않는다는 점을 고려하면 흐름과 반사율의 영향으로 인하여 부분중복파의 배에 전단응력이 나타난다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 전술한 경우와 동일한 파동조건 및 지반물성치를 적용하였을 때 $K_R=0.7$, $x/L_0=0$ 및 $t/T_0=0$ 에서 흐

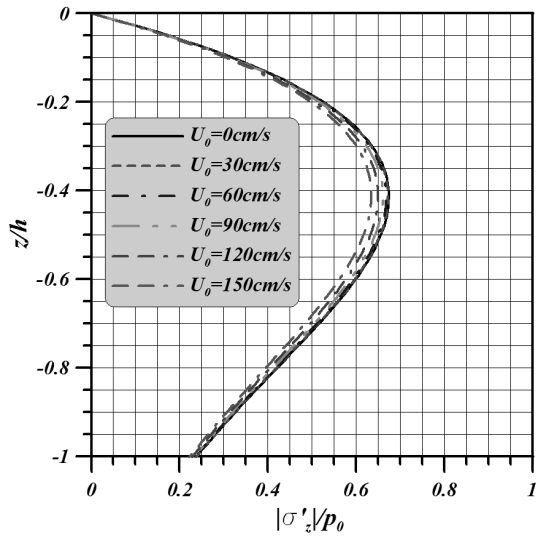
름속도 U_0 를 파라미터로 연직깊이에 따른 간극수압, 수평 및 연직유효응력, 그리고 전단응력의 연직분포를 나타낸 결과이다. 그림으로부터 흐름속도가 증가하면 간극수압과 수평 및 연직전단응력은 감소를 나타내지만, 전단응력은 $z/h=-0.42$ 를 기준으로 상부는 감소되고, 동시에 하부는 증가된다. 여기서, 전술한 Fig. 5의 진행파와 Lee et al.(2015)에 의한 완전중복파의 경우를 각각 비교·검토하면 간극수압에서 흐름속도의 증가로 진행파의 경우는 커지고, 완전중복파의 경우는 작아지지만, 부분중복파에서는 미미한 증가를 나타낸다. 부분중복파의 파고가 진행파와 완전중복파의 중간에 놓이게 되므로 발생하는 동적응답도 대략 진행파와 완전중복파의



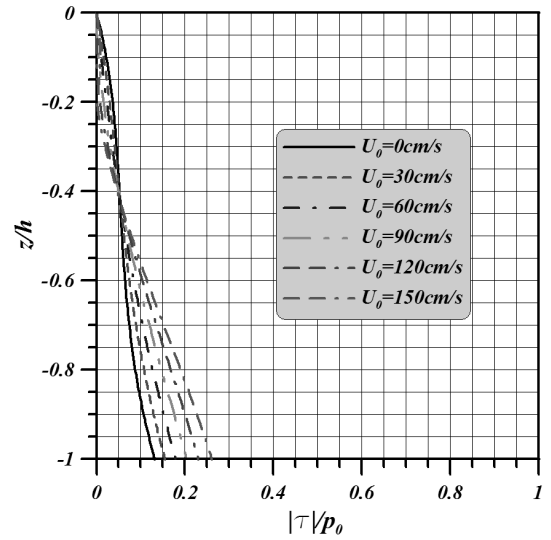
(a) Non-dimensional pore water pressure



(b) Non-dimensional horizontal effective stress



(c) Non-dimensional vertical effective stress



(d) Non-dimensional shear stress

Fig. 8. Flow and partial standing wave-induced dynamic responses of seabed according to flow velocities under given conditions of $K_R = 0.7$, $x/L_0 = 0$ and $t/T_0 = 0$

중간 정도의 크기로 나타나는 것을 알 수 있다. 각 동적 응답에서 반사율의 크기가 작을수록 흐름속도의 증가는 간극수압을 증가시키는 방향으로, 또한 연직유효응력을 감소시키는 방향으로 각각 작용한다. 또한, 수평유효응력은 반사율이 클수록 흐름속도의 증가에 따라 크게 감소되며, 특히 이러한 경향은 해저지반표면상에서 현저하게 나타난다. 전단응력은 반사율이 클수록 흐름속도의 증가에 따라 크게 된다는 등의 특성을 각 파동장의 상호비교로부터 알 수 있다.

Fig. 9는 $t/T_0 = 0$ 와 $x/L_0 = 0.25$ 의 조건과 Fig. 8과 동일한 파동 및 지반조건으로부터 산정된 전단응력의 연직 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 흐름이 있기 때문에 주

기와 파장이 변하고, 흐름이 없을 때 산정되는 완전중복파의 마디위치 $x/L_0 = 0.25$ 와는 약간 다른 위치에서 부분중복파의 마디가 형성될 것으로 추정되지만, 본 계산에서는 $x/L_0 = 0.25$ 에서 산정되었다. 그림으로부터 $z/h \approx -0.5$ 를 중심으로 흐름속도가 증가할수록 상부에서는 미소하게 증가하는 경향을, 하부에서는 감소하는 경향을 나타내며, 상부보다 하부가 약간 더 민감하다는 것을 알 수 있다. 또한, 전술한 Fig. 5의 진행파의 경우와 Lee et al.(2015)의 완전중복파의 경우와를 상호비교하면 모두 유사한 거동을 나타내며, 크기에서는 부분중복파의 경우가 진행파와 완전중복파의 사이에 놓이는 것으로 판단된다. 여기서, 지면관계상 결과를 제시하지 않지만, 흐

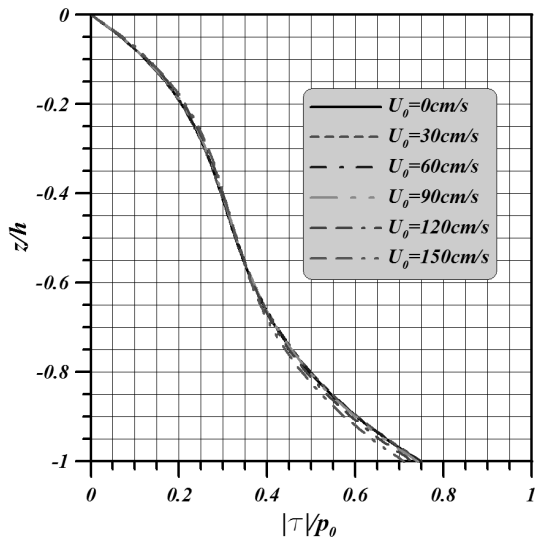


Fig. 9. Flow and partial standing wave-induced shear stress of seabed according to flow velocities under given conditions of $K_R=0.7$, $x/L_0=0.25$ and $t/T_0=0$

름이 존재하는 경우 부분중복파의 마디에서도 간극수압과 수평 및 연직유효응력이 0으로 되지 않는다는 것을 부기하여 둔다.

Fig. 10은 지반내 동적응답 변동을 2차원공간적으로 나타낸 것으로, $U_0=0\text{cm/s}$ 인 Fig. 10(a)와 $U_0=150\text{cm/s}$ 인 (b)의 비교로부터 흐름속도의 유무에 따른 차이를 알 수 있을 것이다. 먼저, 흐름이 없는 $U_0=0\text{cm/s}$ 의 Fig. 10(a)를 살펴보면 $x/L_0=0$ 축을 중심으로 좌우가 완전히 대칭을 이루고 있으며, 간극수압과 수평 및 연직유효응력의 최대치는 $x/L_0=-0.5, 0, 0.5$ 에서, 0값은 $x/L_0=-0.25, 0.25$ 에서 각각 발생하며, 이는 부분중복파동장에서 배와 마디에 각각 해당한다. 그리고, 각 최대치의 연직깊이는 간극수압의 경우 $z/h=0$ 에서, 수평유효응력은 $z/h=-0.13$ 에서, 연직유효응력은 $z/h=-0.43$ 에서 각각 발생하며, 수평 및 연직유효응력은 완전중복파의 경우(Lee et al., 2015)보다 해저지반표면에 보다 근접하여 발생된다는 것을 알 수 있다. 전단응력의 경우는 간극수압과 수평 및 연직유효응력의 경우와는 역으로 0값은 $x/L_0=-0.5, 0, 0.5$ 에서, 최대값은 $x/L_0=-0.25, 0.25$ 에서 각각 발생하며, 최대치의 연직깊이는 해저지반하의 불투수층상인 $z/h=-1$ 에서 발생하는 것을 알 수 있다. 다음으로, 흐름이 있는 $U_0=150\text{cm/s}$ 의 Fig. 10(b)를 살펴보면 모든 응답에서 $x/L_0=0$ 축을 중심으로 좌우가 완전한 대칭을 이루고 있지 않다는 것을 알 수 있다. Fig. 10(a)와 대비하면 간극수압의 경우 최대치 사이의 수평거리가 좁고, 0값이 명

확히 나타나지 않는다. 수평 및 연직유효응력의 분포는 다소 왜곡된 형상을 나타내고, 최대치 사이의 수평거리가 좁으며, 최대치의 크기가 상대적으로 약간 작은 값을 나타낸다. 전단응력의 경우 $x/L_0=0$ 축을 중심으로 좌우가 완전한 대칭은 아니지만, 다른 응답에 비교하면 거의 대칭적인 값의 변화를 나타내고, 최대치 사이의 수평간격이 좁으며, 최대치의 크기가 상대적으로 약간 작다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 흐름이 존재함으로써 지반내 동적응답의 최대치는 전체적으로 작아지고, 최대치 사이의 수평간격이 좁아지며, 전 연직깊이에서 동시에 0값을 나타내는 x/L_0 가 존재하지 않고, 더불어 $x/L_0=0$ 축을 중심으로 좌우가 완전한 대칭을 이루지 않는다는 것이 공통적인 특징이다. 또한, 완전중복파의 경우(Lee et al., 2015)와 비교하면 흐름이 없는 경우에도 수면변동이 0인 완전한 마디 및 입사파고의 2배로 되는 완전한 배가 발생되지 않는 부분중복파이기 때문에 전 연직깊이에서 동시에 0값을 나타내는 x/L_0 가 존재하지 않고, 최대치는 완전중복파의 경우보다 다소 작은 값을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다.

다음의 Fig. 11은 $K_R=0.7$, $x/L_0=0$, $t/T_0=0$ 및 Fig. 8과 동일한 파동 및 지반조건하에 일정한 흐름속도 $U_0=100\text{cm/s}$ 에 대해 흐름의 없는 경우 입사파 주기 T_0 를 변화시켰을 때 지반내에서 동적응답의 변동특성을 제시하고 있다. 입사파 주기 T_0 의 감소는 파장의 감소로 나타나고, 토층두께와의 비가 커지는 결과를 나타내므로 전체적으로 무한두께의 지반에서 얻어지는 동적응답에 근접하게 된다. 주기의 감소에 따른 영향을 살펴보면 간극수압은 줄어들고, 수평유효응력은 해저지반표면 근방에서 줄어들면서 최대치의 연직위치는 깊어지며, 연직유효응력은 최대치의 연직상부는 증가하면서 최대치의 연직위치는 얕아지는 결과를 볼 수 있다. 여기서, 주기가 보다 짧아지는 경우는 수평 및 연직유효응력은 거의 동일한 값을 갖고 거동할 것으로 추정되며(Lee et al., 2014), 자세한 사항은 후술하는 무한두께의 지반에서 논의된다.

Fig. 12는 8과 동일한 조건하에 지반두께 h 를 변화시킨 경우에 간극수압과 수평 및 연직유효응력을 나타낸 것이다. 간극수압은 흐름이 존재하기 때문에 $x/L_0=0$ 및 $t/T_0=0$ 의 경우에도 $z/h=0$ 에서 $|p|/p_0 < 2$ 의 결과를 나타내며, 지반두께가 증가할수록 감소하여 무한두께의 지반에서 발생하는 특성에 가까워진다(Lee et al., 2014). 수평

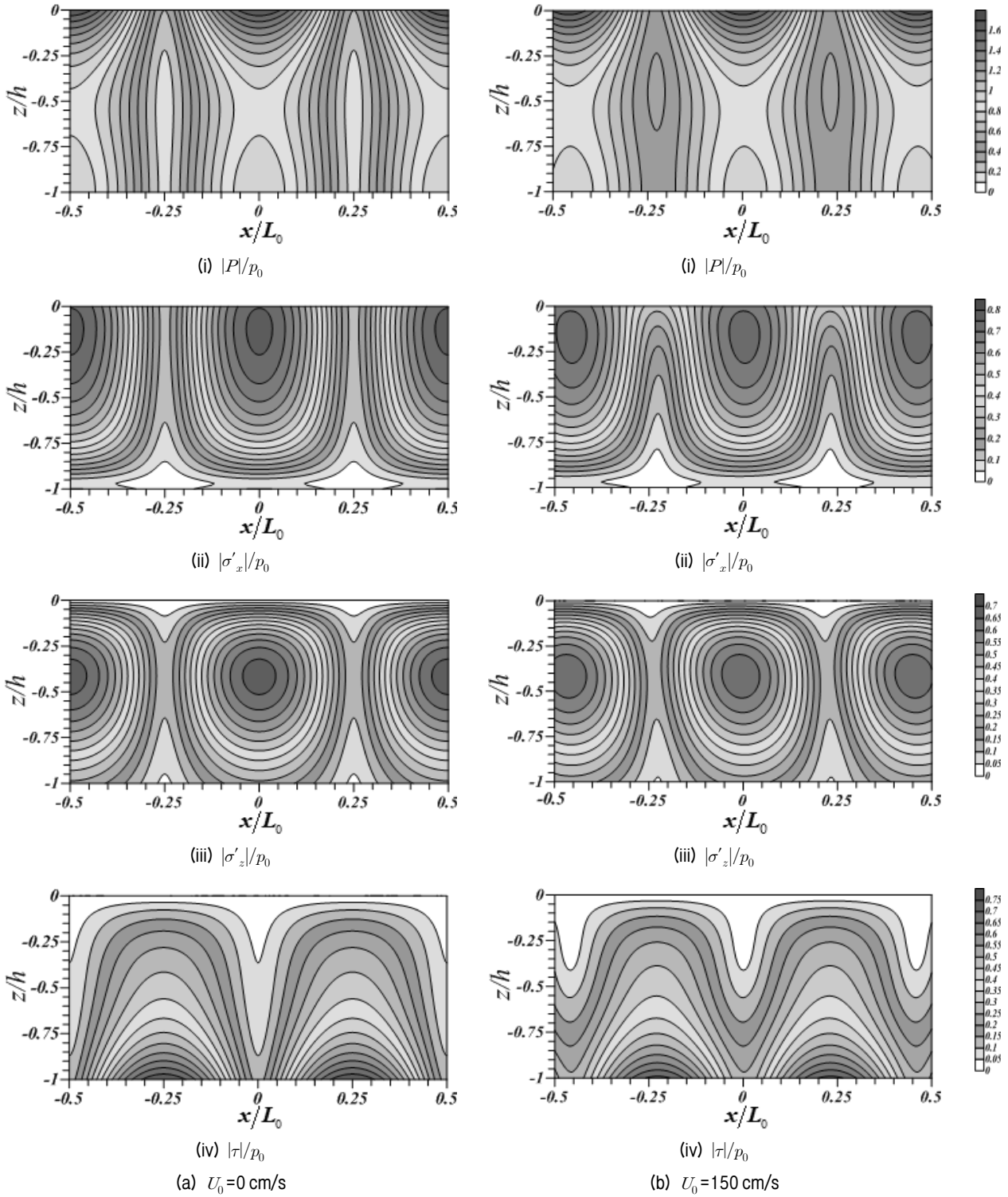
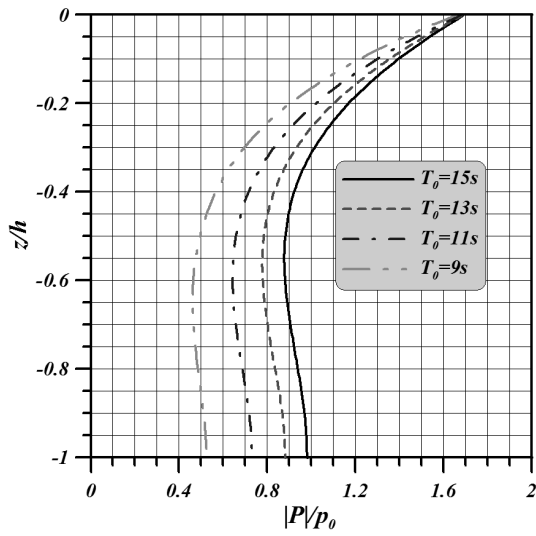


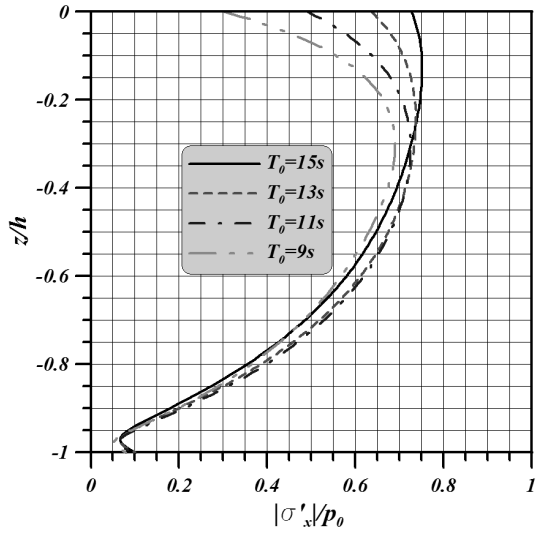
Fig. 10. Comparison of dynamic responses of seabed for the flow velocities of $U_0=0$ cm/s and $U_0=150$ cm/s under given conditions of $K_R=0.7$ and $t/T_0=0$

유효응력은 지반두께가 증가할수록 $z/h=0$ 에서 $|\sigma'_x|/p_0$ 의 값이 0에 접근하며, 최대치가 감소하고, 또한 그의 발생위치는 연직위치의 한 지점으로 수렴할 것으로 추정된다. 연직유효응력은 수평유효응력과 같이 지반두께

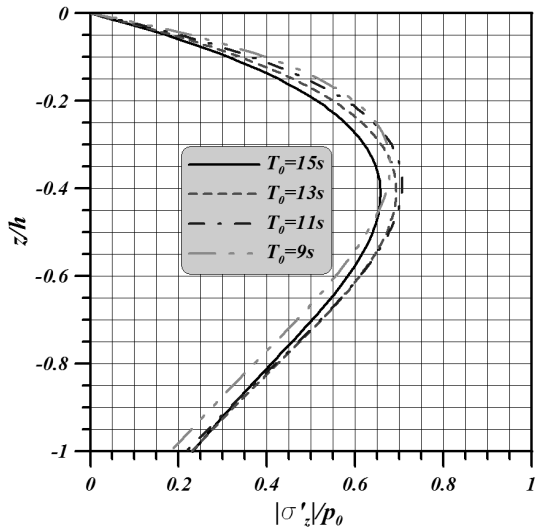
가 증가할수록 최대치의 발생위치가 연직위치의 한 지점으로 수렴되며, 후술하는 바와 같이 궁극적으로 무한 두께의 해저지반에 가까워지는 경우 수평 및 연직유효응력은 동일한 값을 나타낸다(Tsai and Lee, 1994; Lee



(a) Non-dimensional pore water pressure

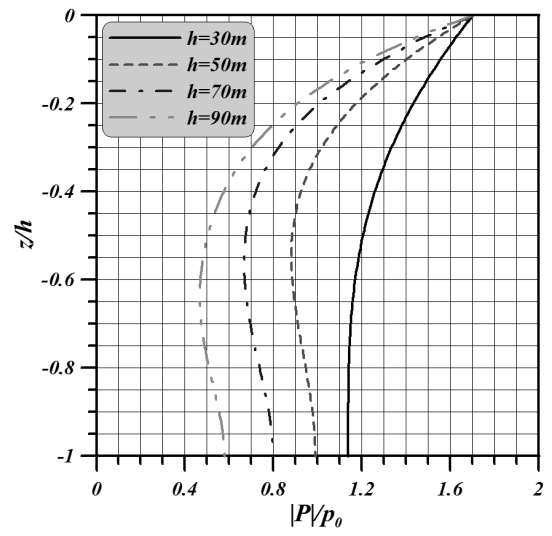


(b) Non-dimensional horizontal effective stress

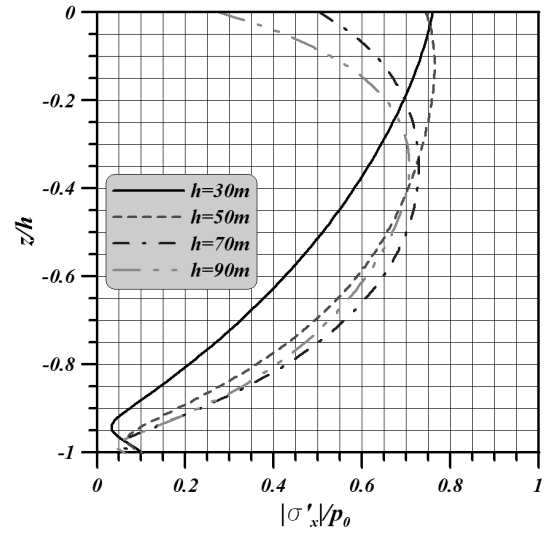


(c) Non-dimensional vertical effective stress

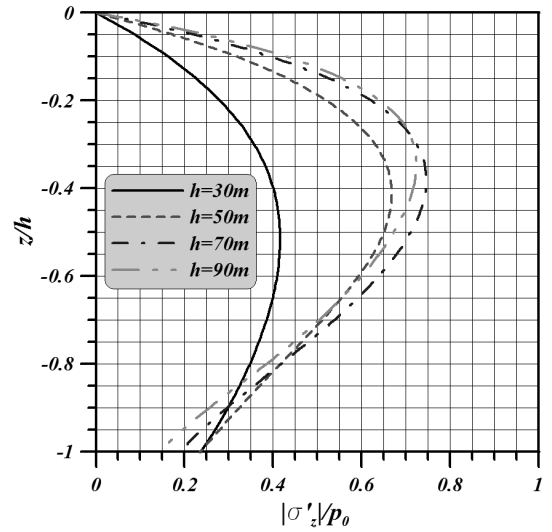
Fig. 11. Flow and partial standing wave-induced dynamic responses of seabed according to wave periods under given conditions of $K_R=0.7$, $x/L_0=0$, $t/T_0=0$ and $U_0=100$ cm/s



(a) Non-dimensional pore water pressure



(b) Non-dimensional horizontal effective stress



(c) Non-dimensional vertical effective stress

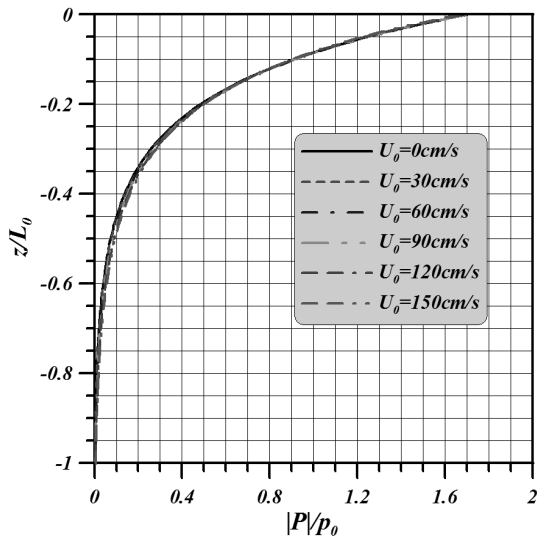
Fig. 12. Flow and partial standing wave-induced dynamic responses of seabed according to seabed thicknesses under given conditions of $K_R=0.7$, $x/L_0=0$, $t/T_0=0$ and $U_0=60$ cm/s

et al., 2014). 이상의 지반두께 h 의 증가는 입사파에서 주기 T_0 의 감소와 유사한 변동을 특성을 나타내는 것을 알 수 있고, 전술한 바와 같이 입사파 주기 T_0 의 감소는 파장의 감소로 나타나고, 더불어 지반두께에 대한 파장의 비가 커지므로 무한지반에 가까워지는 결과를 지반 두께의 변화에 따른 결과와 비교·검토로부터도 알 수 있다.

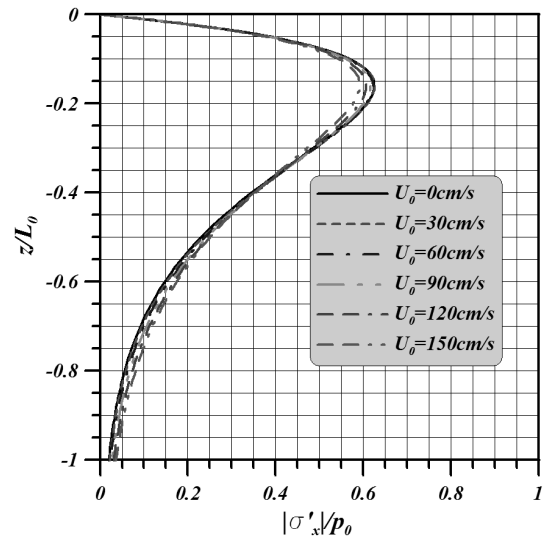
3.2.3 흐름과 부분중복파동장의 공존장하 무한두께의 해저지반

적용된 파동 및 지반조건은 3.2.2절의 경우와 동일하다. Fig. 13에서 무차원연직축을 3.2.2절의 z/h 과는 달

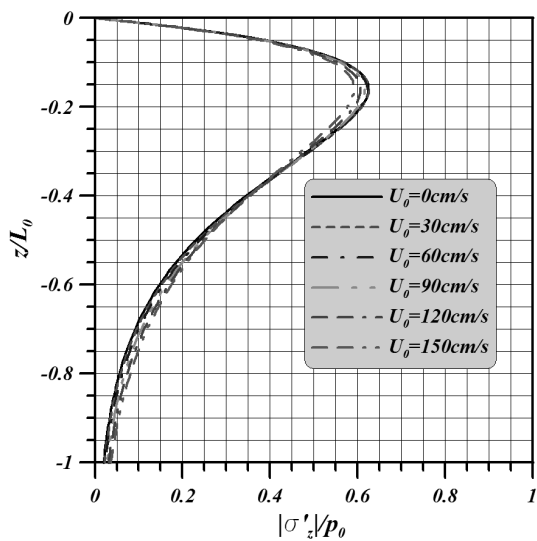
리 z/L_0 로 나타낸 것은 무한두께의 지반에서는 해석해가 지반두께의 함수로 주어지지 않기 때문이다. 동일한 조건의 유한두께에 대한 Fig. 8의 경우와 비교하면 모든 동적응답들이 무한연직깊이에서는 0으로 수렴되는 특성을 가진다. 간극수압의 경우는 지반저면에서 유한두께와는 다른 거동을 보이며, 이는 지반저면에서 반사류가 형성되기 때문이다. 다음으로, 무한두께의 경우 수평 및 연직유효응력은 동일한 값과 거동을 나타내며, 유한두께의 결과와는 매우 다른 변화양상을 나타낸다. 또한, 부분중복파의 마디인 $x/L_0=0.25$ 에서 산정된 전단응력은 $x/L_0=0$ 에서의 수평 및 연직유효응력과 역시 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 이는 흐름이 없는 경우의 진



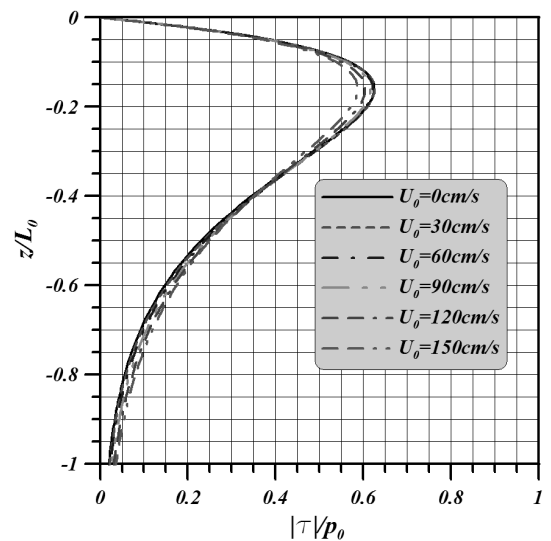
(a) Non-dimensional pore water pressure at $x/L_0=0$



(b) Non-dimensional horizontal effective stress at $x/L_0=0$



(c) Non-dimensional vertical effective stress at $x/L_0=0$



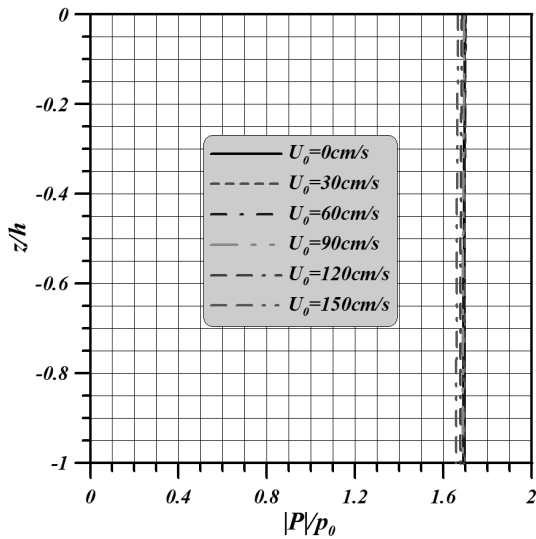
(d) Non-dimensional shear stress at $x/L_0=0.25$

Fig. 13. Flow and partial standing wave-induced dynamic responses of seabed in infinite thickness according to flow velocities under given conditions of $K'_R=0.7$ and $t/T_0=0$

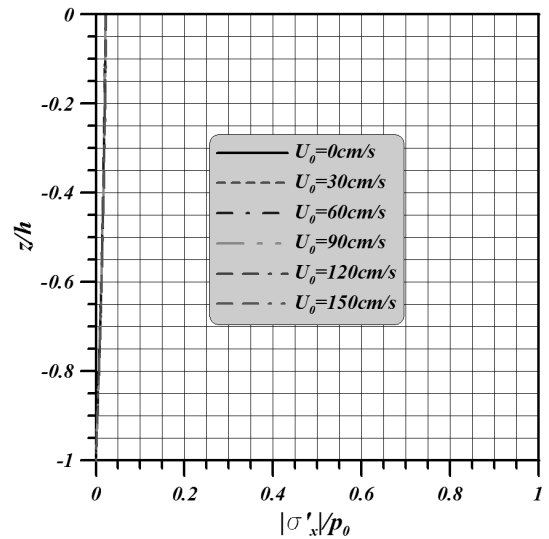
행파(Yamamoto et al., 1978)와 완전중복파(Tsai and Lee, 1994) 및 부분중복파(Lee et al., 2014)에서도 동일한 결과가 얻어진다. 본 해석결과에서는 $z/L_0 = -0.16$ 에서 최대치가 산정되며, 이 역시 진행파(Yamamoto et al., 1978)와 완전중복파(Tsai and Lee, 1994) 및 부분중복파(Lee et al., 2014)의 경우와 동일하다. 부분중복파에서 간극수압, 전단응력과 수평 및 연직유효응력의 최대치는 완전중복파의 경우보다는 작고, 흐름속도가 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 전단응력과 수평 및 연직유효응력의 동적응답이 각각 동일하다는 것을 확인할 수 있다.

3.2.4 흐름과 부분중복파동장의 공존장하 얇은 두께의 해저지반

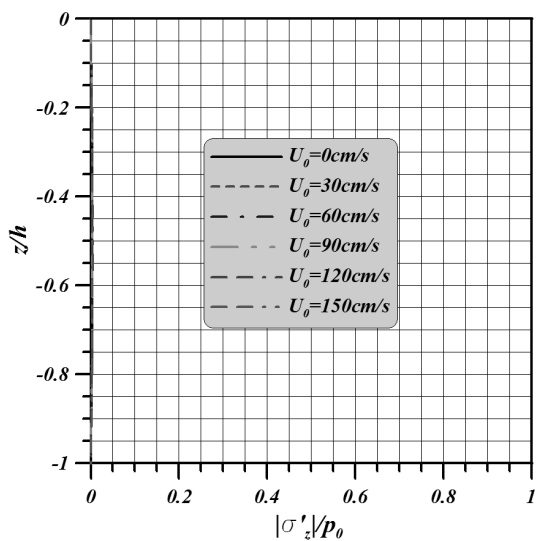
Fig. 14의 결과는 전술한 3.2.1절의 파동 및 지반조건과 동일한 값을 적용하여 산정된 것이며, 단 지반두께는 $h=3\text{m}$ 가 적용되었다. 이 경우 $h/L_0 = 0.0152 < 0.05$ 이므로 매우 얇은 지반두께를 갖는 것으로 판정된다. Lee et al. (2015)에 의한 완전중복파의 결과와 비교하면 간극수압, 전단응력, 수평 및 연직유효응력 모두 약간 작은 값을 가진다. 그리고, 수평 및 연직유효응력과 전단응력은 흐름속도의 변화에 차이를 거의 나타내지 않고, 연직깊이에 따라 거의 직선적인 변화를 보이며, 유한두께의 경우에 비해 작은 값을 나타낸다. 얇은 두께의 해저지반에



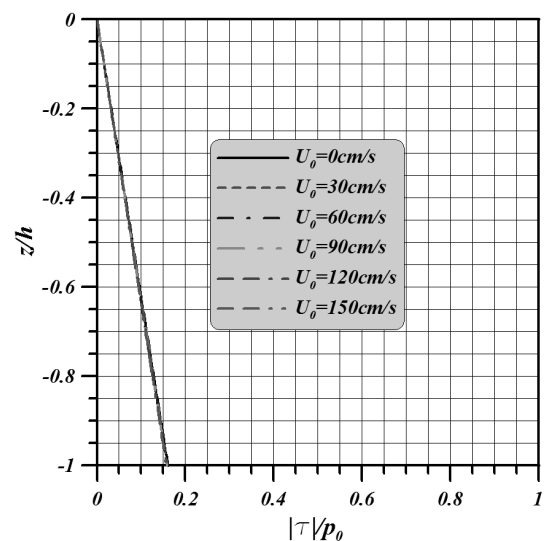
(a) Non-dimensional pore water pressure at $x/L_0=0$



(b) Non-dimensional horizontal effective stress at $x/L_0=0$



(c) Non-dimensional vertical effective stress at $x/L_0=0$



(d) Non-dimensional shear stress at $x/L_0=0.25$

Fig. 14. Flow and partial standing wave-induced dynamic responses of seabed in shallow thickness according to flow velocities under given conditions of $h=3\text{ m}$, $K'_d=0.7$ and $t/T_0=0$

서 가장 큰 동적응답을 나타내는 것은 간극수압이며, 연직깊이 방향으로 거의 일정분포가 얻어지고, 최대치는 부분중복파이므로 완전중복파의 $|P|/p_0=2$ 보다 작은 값을 나타내며, 이는 흐름속도가 증가할수록 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

임의반사율을 갖는 부분중복파와 흐름과의 공존장하에서 해저지반내 동적응답을 나타내는 해석해를 도출하여, 반사율이 0인 기존의 진행파에 대한 해석해와 실험결과 및 흐름장하의 실험결과와 각각 비교하여 본 연구에서 제시하는 해석해의 타당성을 검증하였다. 이로부터 반사율에 각각 0과 1을 부과한 경우 얻어지는 진행파와 완전중복파에 대해 기존의 해석결과와 비교·검토하였고, 임의반사율의 부분중복파에 대해 유한두께, 무한두께 및 얇은 두께를 갖는 해저지반에 적용하여 흐름속도, 지반두께 및 주기의 변화에 따른 간극수압, 수평 및 연직유효응력, 그리고 전단응력의 변동특성을 논의하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 이하에 요약·기술한다.

- (1) 흐름이 존재하는 경우의 진행파동장에서 지반의 수평변위와 간극수압은 상대적으로 흐름속도의 영향을 크게 받는다.
- (2) 흐름이 존재하는 경우 부분중복파동장과 완전중복파동장에서 지반내 동적응답의 차이는 근본적으로 파동의 차이로 발생된다. 즉, 완전중복파동장에서는 수면변동이 진행파의 두 배인 배와 수면변동이 없는 마디가 발생하고, 부분중복파동장에서는 진행파의 두 배보다 작은 배와 수면변동이 있는 마디가 발생하는 차이로 인하여 두 결과에서 서로 다른 동적응답이 발생된다.
- (3) 간극수압, 수평 및 연직유효응력은 반사율이 줄어들면 감소하고, 반면에 전단응력은 증가한다.
- (4) 반사율이 작을수록 흐름속도의 증가는 간극수압을 증가시키는 방향으로, 그리고 연직유효응력을 감소시키는 방향으로 각각 작용한다. 수평유효응력은 반사율이 클수록 흐름속도의 증가에 의해 감소되며, 전단응력은 반사율이 클수록 흐름속도의 증가에 의해 크게 된다.
- (5) 입사파 주기의 감소는 파장의 감소로 나타나고, 토

층두께와의 비가 커지므로 무한두께의 지반에서 얻어지는 동적응답에 근접한다. 따라서, 지반두께의 증가와 입사파 주기의 감소는 지반의 동적응답에 유사한 영향을 나타낸다.

- (6) 무한두께의 해저지반에서 부분중복파에 의한 간극수압, 전단응력과 수평 및 연직유효응력의 최대치는 완전중복파의 경우보다는 작고, 흐름속도가 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 전단응력과 수평 및 연직유효응력의 동적응답은 동일하다.
- (7) 얇은 두께의 해저지반에서 간극수압, 전단응력, 수평 및 연직유효응력은 부분중복파의 경우가 완전중복파의 경우보다 작은 값을 가진다. 수평 및 연직유효응력과 전단응력은 흐름속도의 변화에 차이를 거의 나타내지 않고, 연직깊이에 따라 거의 직선적인 변화를 나타낸다. 해저지반에서 가장 큰 동적응답을 나타내는 것은 간극수압이며, 연직깊이 방향으로 거의 일정분포가 얻어지고, 흐름속도가 증가할수록 감소한다.

감사의 글

이 연구는 해양수산부/한국해양과학기술진흥원의 연구과제(PJT200538)로 수행된 연구임.

참고문헌 (References)

1. Biot, M.A. (1941), "General Theory of Three-dimensional Consolidation", *J. Applied Physics*, Vol.12, pp.155-164.
2. Chang, S.C., Lin, J.G., Chien, L.K., and Chiu, Y.F. (2007), "An Experimental Study on Non-linear Progressive Wave-induced Dynamic Stresses in Seabed", *Ocean Eng.*, Vol.34, pp.2311-2329.
3. Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1984), "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", World Scientific.
4. Hsu, J.R.C., Jeng, D.S., and Tsai, C.P. (1993), "Short-crested Wave Induced Soil Response in a Porous Seabed of Infinite Thickness", *Int. J. Numer. Analytical Methods Geomech.*, Vol.17, pp.553-576.
5. Jeng, D.S. and Hsu, J.R.C. (1996), "Wave-induced Soil Response in a Nearly Saturated Sea-bed of Finite Thickness", *Geotechnique*, Vol.46, No.3, pp.427-440.
6. Jeng, D.S., Zhou, X.L., Luo, X.D., Wang, J.H., Zhang, J., and Gao, F.P. (2010), "Response of Porous Seabed to Dynamic Loadings", *Geotech. Eng. J. SEAGS & AGSSEA*, Vol.41, No.4.
7. Lee, K.H., Kim, D.S., Kim, K.H., Kim, D.W., and Shin, B.S. (2014), "Analytical Method of Partial Standing Wave-induced Seabed Response in Finite Soil Thickness under Arbitrary Reflection", *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.26, No.5, pp. 300-313.
8. Lee, K.H., Kim, D.W., Kim, D.S., Kim, T.H., Kim, K.H., and

- Jeon, J.H. (2015), "An Analytical Solution of Dynamic Responses for in Finite and Infinite Thickness under Flow and Standing Wave Coexisting Field", *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.27, No.2, pp.118-134.
9. Liu, P. L.-F., Park, Y.S., and Lara, J.L. (2007), "Long-wave Induced Flows in an Unsaturated Permeable Seabed", *J. Fluid Mech.*, Vol.586, pp.323-345.
10. Madsen, O.S. (1978), "Wave-induced Pore Pressure and Effective Stresses in a Porous Bed", *Geotechnique*, Vol.28, No.4, pp.377-393.
11. Maeno, Y.H. and Hasegawa, T. (1987), "In-situ Measurements of Wave-induced Pore Pressure for Predicting Properties of Seabed Deposits", *Coastal Eng. in Japan*, Vol.30, No.1, pp.99-115.
12. Okusa, S. (1985), "Measurements of Wave-induced Pore Pressure in Submarine Sediments under Various Marine Conditions", *Mar. Geotechnol.*, Vol.6, No.2, pp.119-144.
13. Park, Y.S., Liu, P.L.-P., and Clark, S.J. (2008), "Viscous Flows in a Muddy Seabed Induced by a Solitary wave", *J. Fluid Mech.*, Vol.598, pp.383-392.
14. Qi, W., Gao, F., Han, X., and Gong, Q. (2012), "Local Scour and Pore-water Pressure Around a Monopile Foundation under Combined Waves and Currents", *Proceedings of 22nd Intl. Offshore and Polar Eng. Conference*, ISOPE, pp.159-165.
15. Tsai, C.P. (1995), "Wave Induced Liquefaction Potential in a Porous Seabed in Front of a Breakwater", *Ocean Eng.*, Vol.22, pp.1-18.
16. Tsai, C.P. and Lee, T.L. (1994), "Standing Wave Induced Pore Pressures in a Porous Seabed", *Ocean Eng.*, Vol.22, No.6, pp.505-517.
17. Tsui, Y.T. and Helfrich, S.C. (1983), "Wave Induced Pore Pressures in Submerged Sand Layer", *J. Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol.109, No.4, pp.603-618.
18. Verruit, A. (1969), "Elastic Storage of Aquifers, Flow Through Porous Media", Academic Press, New York.
19. Yamamoto, T., Koning, H.L., Sellmeijer, H., and Hijum, E.V. (1978), "On the Response of a Poro-elastic Bed to Water Waves", *J. Fluid Mech.*, Vol.87, Part 1, pp.193-206.
20. Zen, K. and Yamazaki, H. (1990), "Mechanism of Wave-induced Liquefaction and Densification in Seabed", *Soil and Foundation*, Vol.31, No.4, pp.161-179.
21. Zhang, Y. Jeng, D.S., and Zhang, J.S. (2013), "An Analytical Solution for Response of a Porous Seabed to Combined Wave and Current Loading", *Ocean Eng.*, Vol.57, pp.240-247.

Received : April 17th, 2015

Revised : June 10th, 2015

Accepted : June 10th, 2015