

군말뚝 주변의 세굴 3차원 수치모의 Three-Dimensional Computational Modeling of Scour around Pile Groups

김형석* / 박문형**

Kim, Hyung Suk / Park, Moonhyeong

Abstract

This study presents scour processes and its characteristics around the pile groups using the large eddy simulation (LES) coupled with sediment transport and morphodynamic models. The scour and deposition around pile groups were significantly influenced by the pile interval. In case the non-dimensional pile interval was less than 3.75, the local scours as well as the contraction scour were observed around the pile group. On the other hand, in case the non-dimensional pile interval was more than 3.75, the contraction scour disappeared and only local scours were developed at individual piles. Change in the scour depth at piles located in the upstream was similar with the case of single pile, but the scour depth around piles located in the downstream was lower and showed a significantly different tendency due to the presence of piles in the upstream. The non-dimensional maximum scour depth around the pile group decreased as the pile interval increased.

keywords : LES, pile group, scour depth, local scour, contraction scour

요 지

본 연구는 LES와 유사이동 모형을 이용하여 군말뚝 주변 세굴과정 및 특성의 수치모의에 관한 내용이다. 군말뚝 주변에서 세굴 및 퇴적은 말뚝간격에 크게 영향을 받았다. 무차원 말뚝간격이 3.75보다 작은 경우에는 군말뚝 주변 국부세굴 뿐만 아니라 단면축소세굴이 발생하였다. 반면 무차원 말뚝간격이 3.75 이상이면 단면축소세굴은 사라지고 각각의 말뚝에서 국부세굴만 발생하였다. 상류에 위치한 말뚝에서 세굴심 변화는 단일말뚝의 경우와 유사한 경향을 보였지만 하류에 위치한 말뚝근처에서 세굴심은 상류말뚝 존재 때문에 세굴심이 낮게 나타났고 경향성도 상당히 다름을 보였다. 군말뚝 주변의 무차원 최대 세굴심은 말뚝간격이 증가할수록 감소하였다.

핵심용어 : LES, 군말뚝, 세굴심, 국부세굴, 단면축소세굴

1. 서 론

하천에서 흔히 볼 수 있는 교량의 교각과 같은 수공구

조물 주위에서 발생하는 세굴은 안정성과 수명에 큰 영향을 미친다(Yang and Choi, 2002; Yoon et al., 2001). 특히 1950년대 이후로 교각 주위에서 발생하는 국부세굴에 의

* 교신저자, 한국건설기술연구원 하천해안연구실 박사후연구원 (e-mail: hskim0824@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0271)

Corresponding Author, River and coastal Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do 411-712, Korea

** 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원

River and coastal Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do 411-712, Korea

해 교량 붕괴에 관한 문제는 지속적으로 제기되어 왔다(Lee et al., 2007). 교량 설계시 국부세굴에 의한 세굴심 또는 구조물주위의 세굴 경향을 분석하는 것은 안정성 확보를 위해 수행되어야 할 필수적인 사안이다. 많은 연구자들이 수리실험을 통하여 세굴현상에 관련된 인자들의 영향에 관해 연구하였고 교각주위에서 발생하는 최대 세굴심을 예측할 수 있는 경험식들을 제안하였다(Melville and Coleman, 2000). 그러나 이 경험식들은 난류의 영향을 고려할 수 없기 때문에 최대 세굴심을 정확히 추정할 수 없다(Ettema et al., 2006; Kirkil et al., 2009).

최근 교량 설계시 확대기초보다 군말뚝 기초 공사비가 적게 소요되므로 경제적 측면에서 군말뚝 기초를 이용한 교량설계가 점점 선호되고 있다. 국내에서는 Yoon et al. (2001)과 Choi et al. (2001)이 원형 군말뚝 주변 세굴특성을 수리실험을 통하여 파악하였고 유속비와 말뚝간격에 따라 세굴심이 변화한다고 보고하였다. Hannah (1978)은 두 개의 원형교각을 흐름 방향 및 흐름의 횡방향으로 배열하고 교각의 간격을 변화시키면서 세굴심의 변화를 관찰하였다. Ataie-Ashtiani and Beheshti (2006)는 정지상 세굴조건(clear-water scour)에서 군말뚝 주변 국부 세굴심을 관찰하였고 말뚝의 간격변화가 세굴심에 미치는 영향에 관하여 조사하였다. Sumer and Fredsøe (1998)는 파가 존재하는 지역에서 군말뚝 주변의 국부 세굴심 변화를 관찰하였고 세굴심은 말뚝간격과 KC (Keulegan-Carpenter number)에 크게 영향을 받는다고 하였다. 위에 보는 바와 같이 군말뚝 주변 세굴에 관한 연구는 주로 수리실험을 이용하여 수행되어 왔다.

3차원 수치모형을 이용한 교각주위의 국부세굴 현상 수치모의는 1990년대 초부터 활발히 진행되고 있다. 주로 Navier-Stokes 방정식을 시간 평균한 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equation)모형과 하상변동 모형을 결합하여 수치해석하였다. Olsen and Melaaen (1993)은 3차원 RANS모형과 난류완결 문제를 해결하기 위해 $k-\epsilon$ 모형을 이용하여 원형교각 주변 세굴현상을 수치모의하였다. Roulaund et al. (2005)은 unsteady RANS (URANS)모형과 난류완결 문제를 해결하기 위해 $k-\omega$ 모형을 이용하여 이동상 세굴조건(live-bed scour)에서 원형교각 주변 세굴현상을 수치모의하였다. 그 결과 교각주변의 세굴형상은 수리실험 결과와 잘 일치하였으나 최대 세굴심은 약 15% 과소 예측 되었다. 그들은 URANS모형이 교각 주변에서 발생하는 말굽형 와류(horseshoe vortex)의 변동성(fluctuation)을 고려하지 못하기 때문이라고 설명하였다. Zhao et al. (2010)은 3차원 FEM (Finite Element Method)모형을

개발하였고 URANS모형과 난류완결 문제를 해결하기 위해 $k-\omega$ 모형을 이용하여 침수된 원형 교각주변의 세굴현상을 수치모의하였다. 수치해석으로부터 예측된 최대 세굴심은 약 10~20% 과소 예측됨을 보였다. Khosronejad et al. (2012)은 URANS모형의 적용성을 검토하기 위해 원형, 정사각형, 마름모꼴 형상을 가진 교각 주변에서의 세굴현상을 수치모의하여 수리실험 결과와 비교하였다. 난류완결 문제를 해결하기 위해 $k-\omega$ 모형을 이용하였고 교각주변의 세굴에 의해 변형된 하상을 다루기 위해 curvilinear immersed boundary method를 사용하였다. 수치모의 결과 마름모꼴 교각 주변의 세굴현상은 수리실험결과와 잘 일치하였으나 원형 및 정사각형 교각 주변에서 세굴심은 다소 과소 예측되었을 뿐만 아니라 교각전면부의 세굴현상을 재현하지 못하였다. 마름모꼴 교각의 경우 주로 양쪽 모서리에서 발생하는 흐름가속에 의해 세굴이 발생하여 수치모형이 잘 예측하였지만 그 외 경우에는 전면부에서 발생하는 말굽형 와류의 변동성을 수치모형이 정확히 고려하지 못하여 수리실험결과와 상이함을 보였다고 설명하였다. 교각주변의 와 구조를 정확히 재현하고 난류영향을 하상변동모형에 직접 고려하기 위해 Escauriaza and Sotiropoulos (2011)는 DES (Detached eddy simulation)와 하상변동 모형을 결합한 모형을 개발하였다. 원형교각 주변의 세굴과 하상형태의 변화를 수치모의하여 말굽형 와류의 변동과 하상의 상호작용에 의해 사린의 발달을 재현하였고 Dagarhi (1990)의 실험결과와 잘 일치함을 보였다. 그들의 수치모의 목적은 원형교각 주변에서 자세한 하상변화 현상을 조사하기 위한 것으로 초기 세굴현상만 수치모의 되었다. 위의 연구들을 포함한 지금까지 국내외 세굴 수치모의는 주로 URANS모형을 이용하여 수행되어왔다. 하지만 URANS모형을 사용하여 수치모의한 결과들은 세굴심이 과소 예측되고 교각 주변의 세굴현상을 정확히 재현하지 못하였다. 이는 URANS모형이 교각주변에서 발생하는 말굽형 와류의 변동성과 난류영향을 정확히 예측하지 못하기 때문이다(Roulaund et al. 2005; Khosronejad et al., 2012; Zhao et al., 2010). 이에 군말뚝 주변에서 세굴 및 퇴적과정을 정확히 예측하고 이해하기 위해 난류성분의 영향을 하상변동 모형에 직접 고려할 수 있는 LES (Large eddy simulation) 또는 DES를 기반으로 한 3차원 수치모형에 관한 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 LES을 이용하여 원형 군말뚝 주변에서 발생된 흐름을 계산하고 이를 바탕으로 하상변동 모형과 결합하여 말뚝주변의 세굴현상을 수치모의 하는 것이다. 먼저 모형검증을 위하여 Khosronejad et al. (2012)의

단일 교각 주변 세굴 실험결과와 비교하여 본 연구에서 사용한 모형의 능력을 검토하였다. 군말뚝과 단일 교각의 세굴현상 및 거동의 차이를 분석하기 위해 먼저 단일 원형교각에서의 세굴과정을 수치모의하여 검토하였다. 군말뚝 주변에서 세굴현상 및 과정의 특성을 이해하고 조사하기 위해 네 개의 원형 말뚝(2×2)을 균일하게 배열하여 여러 가지 말뚝간격을 수치모의 하였고 간격변화가 세굴과정, 형태 그리고 세굴심에 미치는 영향을 분석하였다. 수치모의로부터 예측된 군말뚝 주변의 최대 세굴심 결과를 Ataie-Ashtiani and Beheshti (2006)의 수리 실험결과와 비교 검토하였다.

2. 지배방정식

2.1 흐름모형

본 연구에서는 원형교각 주변의 비정상 3차원 난류흐름을 수치모의하기 위해 LES를 사용하였다. LES의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식을 공간에 대한 여과를 실시하여 얻을 수 있고 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다(Nabi, 2012).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2\nu \bar{S}_{ij} - \tau_{ij}^{SG}) \quad (2)$$

여기서 t 는 시간, \bar{P} 는 수정 압력항, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 물의 점성계수, \bar{u}_i 와 \bar{u}_j 는 여과 속도(filtered velocity) 그리고 \bar{S}_{ij} 는 여과 속도에 대한 변형률이다. \bar{S}_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Eq. (2)에서 τ_{ij}^{SG} 항은 사용된 계산격자로 직접 풀지 못한 와성분에 의해 나타난 비등방성 잔여 응력항(= $\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$)이다. 이 비등방성 잔여 응력항 τ_{ij}^{SG} 은 Smagorinsky (1963)가 제안한 방법을 사용하여 모형화 되고 다음 식과 같다.

$$\tau_{ij}^{SG} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\nu_t = (C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \quad (5)$$

여기서, ν_t 는 난류점성계수, δ_{ij} 는 Kronecker delta, τ_{kk} 는 잔여 운동에너지, C_s 는 Smagorinsky 상수로서 본 연구에서는 0.16을 사용하였고, $|\bar{S}|$ 는 $\sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$ 그리고 $\bar{\Delta}$ 는

필터의 크기를 나타낸다.

구성된 흐름 지배방정식은 유한체적법을 이용하여 모의하였고, Eqs. (1) and (2)는 2차 정확도를 가진 two-step fractional step method를 이용하였다. 해석시간의 가속화를 위하여 시간에 대하여 2차 정확도를 가진 Adams-Bashforth-Crank-Nicolson method를 사용하였다. Eq. (2)에서 확산항은 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 이산화하였고, 이류항은 2차 정확도를 가진 Adams-Bashforth 방법을 이용하여 이산화하였다. 자세한 사항은 Nabi (2012)로 대신한다.

2.2 하상변동 모형

하상변동 모형은 Nabi (2012)가 개발한 모형을 사용하였다. 이 모형에서 유사의 움직임은 세 가지 단계로 구성되었다: (1)유사 움직임의 개시, (2)유사의 이동, (3)퇴적. 이 모든 단계는 중력 및 이론과 경험식으로부터 계산된 흐름에 의해 유사에 가해지는 힘에 지배된다. 유사는 작은 구로 가정하였고, 이 가정은 유사의 물리적 이동현상을 더욱 자세히 재현할 수 있도록 하였다. 여기서 하상변동 모형에 관한 내용은 간략히 설명하고 자세한 내용은 Nabi (2012)로 대신한다.

바닥에 있는 유사가 어떤 한계치를 넘으면 유사는 움직이기 시작한다. 이때 이동하는 유사량은 De Ruiter (1983)의 식으로 계산되었다.

$$E = \theta \rho_s \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} g d (\tau_* - \tau_{*c})} \quad (6)$$

여기서, θ 는 경험상수(= 3.67×10^{-4}), ρ_s 는 유사의 밀도, g 는 중력가속도, d 는 유사의 크기, τ_* 는 무차원 소류력, τ_{*c} 는 무차원 한계 소류력이다. 계산시간 간격 마다 바닥에서 이동한 유사의 체적은 다음에 의해 결정된다.

$$V_E = E \frac{S}{\rho_s} \Delta t \quad (7)$$

여기서, S 는 바닥 격자의 크기, Δt 는 계산시간 간격이다. 그리고 바닥에서 움직인 유사의 개수는 다음과 같이 계산된다.

$$n_{pickup} = \frac{V_E}{V_p} \quad (8)$$

여기서, V_p 는 단일 유사의 체적이다.

바닥에서 움직인 유사들은 유체의 흐름으로부터 가해지는 힘에 의해 이동한다. 각각의 유사의 유속을 계산하

기 위해 Maxey and Riley (1983)가 제안한 식을 사용하였다. 이 식은 중력과 유사에 작용하는 유체의 힘이 고려되었고 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_s V_P \frac{d\vec{v}_p}{dt} &= (\rho_s - \rho) V_P \vec{g} + \rho V_P \frac{D\vec{u}_f}{Dt} + \frac{1}{2} \rho V_P \left(\frac{D\vec{u}_f}{Dt} - \frac{d\vec{v}_p}{dt} \right) \\ &+ \frac{3}{4} \frac{C_D}{d} \rho V_P |\vec{u}_f - \vec{v}_p| (\vec{u}_f - \vec{v}_p) \\ &+ \frac{3}{4} \frac{C_L}{d} \rho V_P \left(|\vec{u}_f - \vec{v}_p|_{top}^2 - |\vec{u}_f - \vec{v}_p|_{bottom}^2 \right) \vec{n} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, v_p 는 유체내 유사의 속도, u_f 는 유사가 이동한 위치에서 유체의 속도, C_D 는 항력계수이고 이 계수는 Morsi and Alexander (1972)가 제안한 관계식을 이용하여 결정한다. \vec{n} 은 단위법선 벡터, D/Dt 는 전미분(= $\partial/\partial t + \vec{u} \cdot \nabla$), C_L 은 양력계수이다. 양력계수를 계산하기는 매우 어렵고 또한 Eq. (9)에서 보는바와 같이 유사의 위와 아래 부분의 유속이 필요하다. 그러나 일반적으로 격자의 크기가 유사의 크기보다 크므로 이들을 결정하기에는 어려움이 있다. 그래서 Eq. (9)의 우측 항의 다섯 번째 항은 McLaughlin (1991)과 Mei (1992)가 제안한 관계식을 사용하여 결정하였고 다음과 같다.

$$\frac{C_L}{C_{L,Si}} = 0.443J \quad (10)$$

$$J \approx 0.6765 \{ 1 + \tanh [2.5 \log_{10} (\epsilon + 0.191)] \} \{ 0.667 + \tanh [6(\epsilon - 0.32)] \} \quad (11)$$

$$\text{with } \epsilon = \frac{Re_\alpha^{0.5}}{Re_p}, \quad Re_\alpha = \frac{\beta d^2}{\nu}, \quad Re_p = \frac{|\vec{u}_f - \vec{v}_p| d}{\nu}$$

여기서, β 는 전단속도 그리고 Eq. (10)에 $C_{L,Si}$ 는 Saffman (1965)이 제안한 식을 사용하였다. 그러므로 양력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_L = \frac{\pi}{8} C_{Lp} \rho |\vec{u}_f - \vec{v}_p|^2 d^2 \quad (12)$$

각각의 유사가 바닥에 다다르기 전까지 위치는 $d\vec{x}_p/dt = \vec{v}_p$ 에 따라 계산된다. 유체 내에서 이동하던 유사가 바닥에 닿으면 점성감쇠(viscous damping)가 발생하여 퇴적되거나 다시 튀어 오른다(elastic rebound). Schmeckle et al. (2001)은 이 현상이 collision Stoke number에 의해 지배된다고 하였다. 유사의 크기가 2mm 이하인 경우에는 점성감쇠 때문에 법선 탄성 계수, α_n 이 0이 되고 접선 탄성 계수, α_t 는 약 0.9를 사용한다(Schmeckle et al., 2001). 유사의 크기가 2mm보다 큰 경우에 한계 Stoke number는

39에서 105사이이다. Stoke number가 105보다 크면 부분 탄성이 발생하여 유사의 새로운 속도가 아래와 같이 계산된다.

$$v_{n,new} = -\alpha_n v_{n,old} \quad (13)$$

$$v_{t,new} = \alpha_t v_{t,old} \quad (14)$$

여기서, v_n 과 v_t 는 유사가 바닥에 퇴적될 때의 유사의 법선과 접선 속도이다. Schmeckle et al. (2001)은 실험을 통하여 법선 탄성 계수, α_n 과 접선 탄성 계수, α_t 는 0.65와 0으로 결정하였다.

각 계산시간에서 하상변화를 계산하기 위해 Nabi (2012)가 제안한 식을 사용하였다. 각 계산시간에서 하상의 변화는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta z = \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{A_2}{A_3} \frac{V_f (n_{depos} - n_{pickup})}{C_f S} \right] \quad (15)$$

여기서, λ 는 유사의 공극률이다(=0.4). A_2 와 A_3 는 구 형태의 형상계수로서 $\pi/4$ 와 $\pi/6$ 이 각각 사용되었다(Nagata et al., 2005). C_f 는 Clustering factor로 1.0을 사용하였다.

3. 수치모형의 적용

3.1 모형검증

수치모형의 검증을 위해 Khosronejad et al. (2012)이 수행한 수리실험결과와 비교하였다. Khosronejad et al. (2012)은 길이 10m, 폭 1.2m, 깊이 0.45m의 수로에 0.1651 m 지름을 가지는 원형 교각을 설치하여 세굴현상을 관찰하였다. 사용된 유사의 크기는 0.85 mm, 평균접근유속은 0.25 m/s 그리고 수심은 0.186 m이다. 실험은 최대 세굴심이 평형상태에 이를 때까지 수행되었다. 수치모의는 수리 실험 조건과 동일하게 하여 수행하였다. 상류에서는 난류 성분이 포함된 유속을 부과하였고 하류에서는 대류 경계 조건(convective boundary condition)을 적용하였다. 실험과 마찬가지로 최대 세굴심이 평형상태에 이를 때 까지 수치모의가 수행되었으며 약 60분 후에 최대 세굴심이 평형상태에 이르렀다. Fig. 1은 원형교각 주변에서 평형상태의 하상변화로 위쪽이 수치모의에 의한 결과이고 아래쪽이 수리실험 결과이다. 세굴은 대칭축의 약 45°부근에서 시작되어 교각 주변 및 상류 측으로 확대되고 세굴에 의해 이동한 유사들은 교각 하류에 퇴적되었다. 수치모의에 의한 원형 교각 주변 세굴현상은 수리실험 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 특히, 수치모형은 최대 세굴 영역과 교각

주변 세굴공의 경사를 잘 예측하였다. 이는 교각근처에서 발생하는 말굽형 와류가 잘 계산되었고 이에 의한 영향이 하상변동 모형에 잘 반영되었음을 의미한다. 수치모의로부터 예측된 최대 세굴심은 0.084m로 수리실험으로부터 얻은 0.077m보다 약간 크지만 믿을만한 결과로 사료된다. 그러므로 LES에 하상변동 모형의 결합은 URANS모형으로 정확히 재현할 수 없었던 원형교각 주변의 말굽형 와류에 의해 발생하는 세굴현상 및 특성을 잘 재현할 뿐만 아니라 세굴 깊이도 잘 예측함을 보였다.

3.2 균말뚝 수치모의

Fig. 2는 본 연구에서 수치모의를 위한 영역을 나타낸

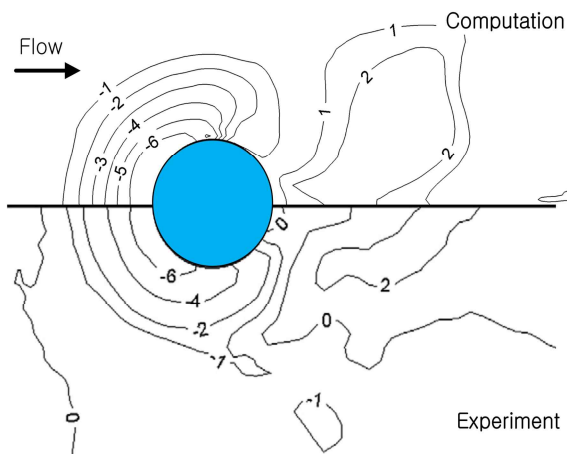


Fig. 1. Comparison of Bed Topography at the Equilibrium State (in cm); Computation (top) and Experiment (bottom)

다. 모의영역은 Khosronejad et al. (2012)가 수행한 수리 실험 조건을 참고하여 설정하였다. 모의영역의 폭은 2.4 m(=15D)로 하였고, 길이는 10 m(=62.5D)를 사용하였다. 여기서 D(m)는 원형말뚝의 지름(=0.16 m)을 나타낸다. 상류로부터 25D 떨어진 곳을 중심으로 균말뚝이 배치되었고 바닥은 0.85 mm의 균일한 크기를 가지는 모래로 하였다. 균말뚝 간격(s) 변화에 따른 주변의 하상변화를 조사하기 위해 다양한 간격($s/D=1.25, 1.875, 2.5, 3.75, 5.0$)을 적용하였다. 상류 경계에서 평균유속은 0.25 m/s이고 난류성분이 포함된 조건을 부과하기 위해 균말뚝이 없는 경우 주기 경계조건(periodic boundary condition)을 이용하여 완전히 발달된 흐름을 얻은 후 난류성분이 포함된 유속을 상류경계조건에 적용하였다. 하류경계조건은 대류 경계조건을 사용하였다. 모의영역의 양쪽 측면과 균말뚝에는 수리학적으로 매끄러운 벽면으로 무활 경계조건(no-slip condition)을 적용하였다. 이전의 실험들에서 프루드수가 약 0.2보다 작으면 수면변화에 의한 영향을 무시할 수 있다고 하였다(Paik et al., 2010). 본 연구에서의 프루드수는 0.23으로 수면변화의 영향이 매우 작으므로 수면에서의 경계조건은 마찰이 없는 벽(shear-free rigid lid)을 적용하였다.

본 연구에서는 직교 격자계를 기본으로 균말뚝 또는 바닥근처에서 가상경계기법(immersed boundary method)을 이용하였다. 또한 직교 격자계의 문제점중 하나인 계산시간을 해결하기 위해 Fig. 3에 보는 바와 같이 중요 부분에서만 조밀한 격자를 사용할 수 있는 적응적 다중 격자(adaptive multilevel grid)를 사용하였다. 여기서는 균

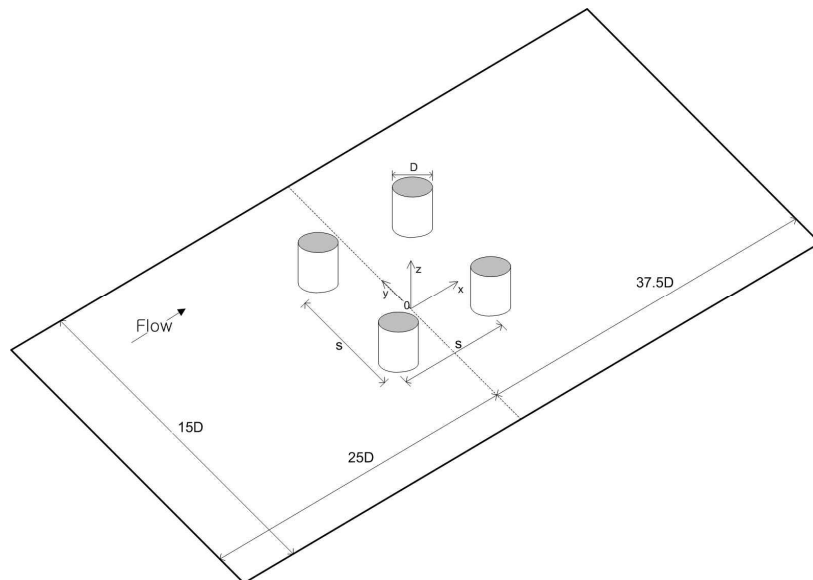


Fig. 2. Computational Domain with the Pile Group

말뚝 주변, 바닥, 벽면 및 수면 근처(i.e. 유속 기울기가 급격히 변화하는 영역)에 적용되었다. 기본 격자는 $256 \times 64 \times 32(x \times y \times z)$ 를 사용하였고 3단계 다중격자를 적용하였다. 다시 말해 Fig. 3에서 보는바와 같이 가장 조밀한 부분이 기본격자의 크기로부터 4배 작아진다. LES와 결합된 유사이동 수치모의는 긴 계산시간이 소요되기 때문에 계산 가속화를 위해 OpenMP를 이용한 병렬계산을 수행하였다. 수치모의 시간은 군말뚝 주변의 최대세굴심이 평형상태에 이를 때 까지 수행되었다.

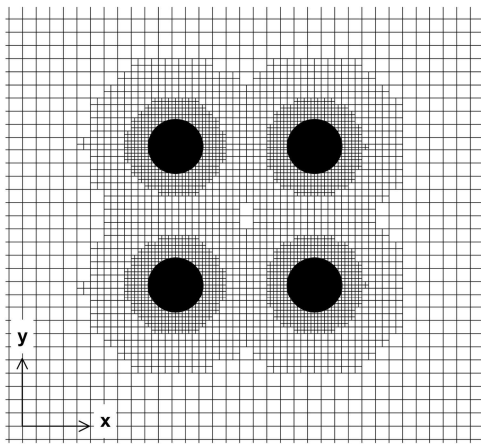


Fig. 3. Computational Grid near the Pile Group in a Horizontal Plane

3.2.1 군말뚝 주변의 세굴과정

Figs. 4~6은 군말뚝 주변에서 세굴과정과 물리적 이동 현상을 이해하기 위해 시간 변화에 따른 군말뚝 주변의 하상변동 과정을 나타내었다. 무차원 말뚝간격(s/D)이 1.25, 2.5, 5.0의 결과를 도시하였다. Figs. 4~6에서 회색 원통은 군말뚝을 나타내며 군말뚝 주변과 안쪽의 하상변화를 시각화하기 위해 군말뚝의 높이를 낮추어 초기 하상높이와 같게 하였다.

첫 번째로 Fig. 4에 무차원 말뚝 간격이 1.25인 경우에 따른($t=1, 5, 20$ min and equilibrium state) 군말뚝 주변 하상변화를 도시하였다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 군말뚝 주변 국부세굴은 상류에 위치한 말뚝의 약 $20^\circ \sim 45^\circ$ 근처와 두 개의 말뚝 사이에서 시작되었다. 5분경과 후에는 흐름가속에 의해 상류에 위치한 두 개의 말뚝의 측면근처에서 국부세굴이 지속되었으나 하류에 위치한 말뚝 근처에서는 상류의 말뚝에 의해 약화된 흐름 때문에 하상이 변화하지 않음을 볼 수 있다. 상류의 두 개의 말뚝 사이에서 세굴된 유사가 군말뚝 내에 퇴적되었다. 20분이 지난 후에는 상류의 두 개의 말뚝 측면근처에서 흐름가속에 의해 발생한 세굴과 말뚝형 외류에 의해 발생한 국부세굴이 중첩됨을 보였고 이로 인해 군말뚝 상류에서 국부세굴이 점점 뚜렷해졌다. 하상변화 초기에 보였던 군말뚝 내의 퇴

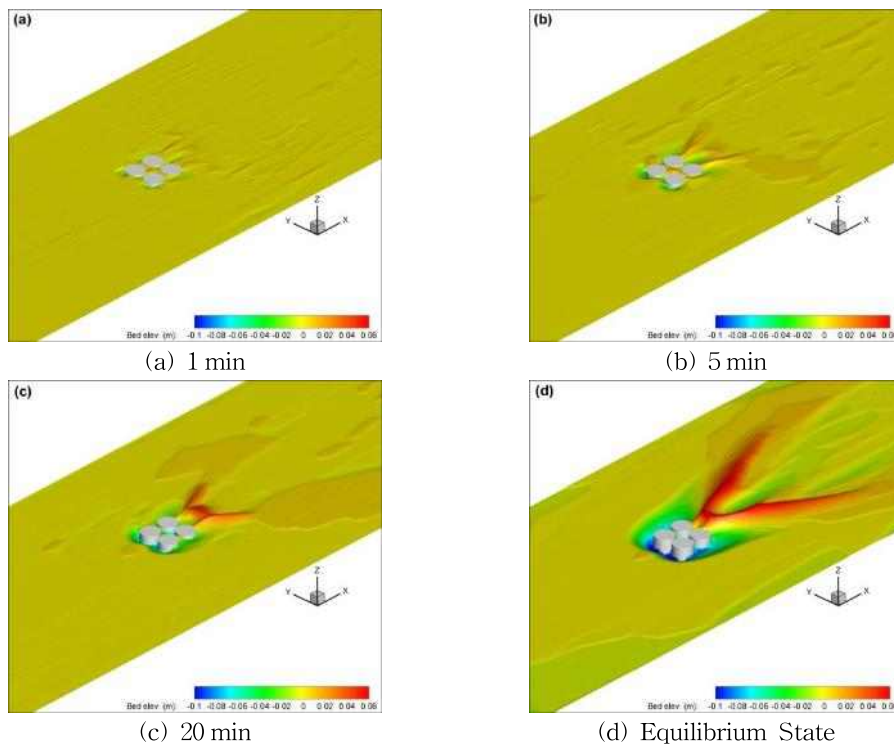


Fig. 4. Three-dimensional Process of Scour Development around the Pile Group of $s/D=1.25$

적은 하류로 이동하였고 제트류와 유사한 말뚝 사이의 흐름에 의한 지속적인 강한 흐름의 유발 때문에 군말뚝 내의

세굴은 증가되었고 그 결과 하류에 퇴적이 증가하였다. 평형상태에서는 군말뚝 안쪽과 주변에 상당한 세굴이 발생

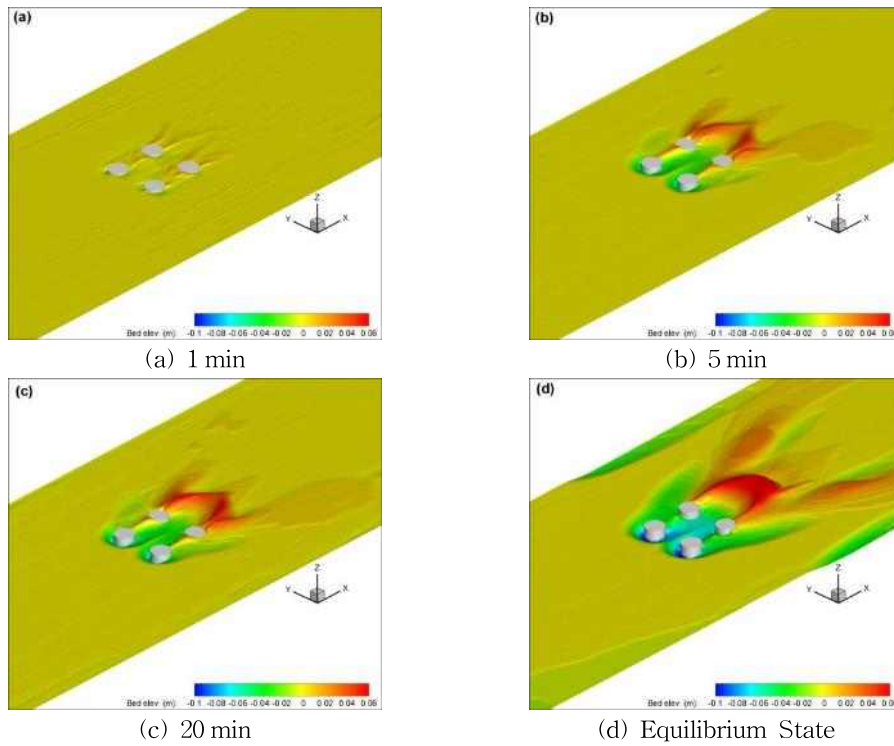


Fig. 5. Three-dimensional Process of Scour Development around the Pile Group of $s/D=2.5$

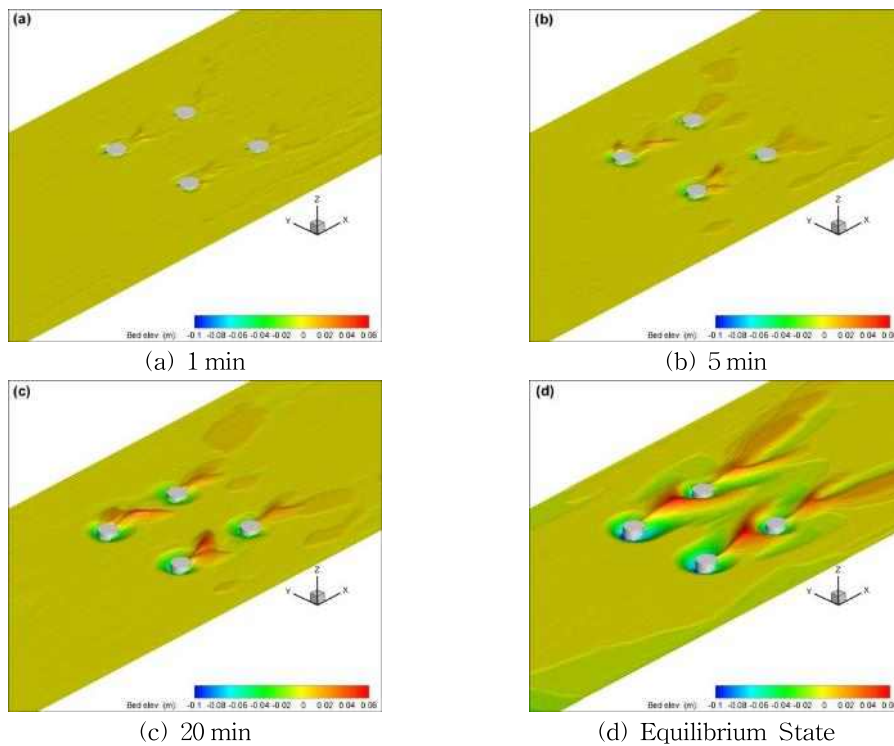


Fig. 6. Three-dimensional Process of Scour Development around the Pile Group of $s/D=5.0$

함을 볼 수 있고 군말뚝 하류에 퇴적이 점점 증가함을 보였다. 초기에는 하류에 위치한 말뚝 주변의 세굴이 관찰되지 않았지만 시간이 지나면서 말뚝들에 의한 흐름의 상호작용에 의해 난류강도가 증가하고 이것은 군말뚝 내의 세굴에 영향을 미쳐 세굴의 깊이가 점점 깊어졌다(Sumer and Fredsøe, 2002). 군말뚝 바로 뒤에 퇴적된 유사는 주로 단면 축소에 의한 흐름과 말뚝들 사이의 상호작용에 의해 증가된 난류에 의해 발생한 것으로 여겨진다. 군말뚝 하류의 퇴적은 시간에 따라 증가할 뿐만 아니라 흐름방향으로 길어지는 것을 볼 수 있다. 군말뚝 주변 세굴공의 범위는 국부세굴의 주원인인 흐름가속과 말굽형 와류에 의해 시간에 따라 점점 확대되었고 결국 군말뚝 주변에 하나의 세굴공과 퇴적영역이 발생됨을 보였다.

Fig. 5는 무차원 말뚝간격이 2.5인 경우 시간변화에 따른 군말뚝 주변 하상변동 양상이다. 1분경과 후에는 상류측에 위치한 말뚝의 양 측면에서 침식이 발생하였고 하류에 위치한 말뚝 뒤에 유사가 퇴적되었다. 한편 상류의 말뚝 때문에 하류에 위치한 말뚝주변에는 거의 아무런 변화가 발생하지 않았다. 5분경과 후에는 상류 말뚝측면에서 발생한 세굴이 말굽형 와류에 의해 말뚝 주변으로 확대되었고 세굴에 의해 이동한 유사들은 말뚝들 뒤에 퇴적되었다. 20분경과 후에는 상류측에 위치한 말뚝주변의 세굴심이 점점 깊어지고 세굴공의 범위가 확대되었다. 반면 하류에 위치한 말뚝 앞과 뒤에 유사퇴적이 증가하였다. 특히 말뚝들 앞의 유사퇴적은 접근유속에 영향을 주고 이로 인해 하류에 위치한 말뚝 주변의 흐름뿐만 아니라 세굴의 주 메커니즘인 말굽형 와류의 강도를 상당히 약화시킬 수 있음을 의미한다. 평형상태에서는 말뚝간격(s/D)이 1.25인 경우와 달리 상류에 위치한 말뚝에서 발생한 세굴이 완전히 중첩되지 않았다. 상류말뚝 사이에서 가속된 흐름에 의해 군말뚝 내에 세굴이 발생하였고 세굴된 유사들은 하류로 이동하여 퇴적되었다. 퇴적은 말뚝간격이 1.25인 경우와 비교하여 더욱 하류에 이동하였고 이는 말뚝간격 2.5인 경우가 흐름이 발달할 수 있는 공간이 넓어졌기 때문이다. 초기에 하류측에 위치한 말뚝 상류부근에 퇴적되었던 유사들이 이동되어 하상의 높이가 낮아졌다. 이것은 말뚝 간격이 넓어짐에 따라 상류측에 위치한 말뚝 뒤에서 발생한 후류와 말뚝들의 상호작용에 의해 야기된 난류 때문이다(Sumer and Fredsøe, 2002). 이 결과는 군말뚝내 난류영향이 세굴에 의해 하상이 낮아짐에 따라 점점 강해지고 있음을 나타낸다.

Fig. 6은 말뚝 간격이 5.0인 경우 시간에 따른 군말뚝 주변의 하상변화를 3차원으로 도시하였다. 상류측에 위치한

말뚝주변의 세굴은 말뚝의 대칭축을 기준으로 약 $\pm 40^\circ$ 에서 시작되었다. 이것은 Khosronejad et al. (2012)의 실험에서 관찰된 위치와 일치한다. 시간이 흐를수록($t=5$ and 20 min) 국부세굴 발달과 함께 증가하는 말굽형 와류의 강도 때문에 말뚝주변의 하상변화는 꾸준히 진화하였다. 한편 말뚝간격이 더 넓어졌음에도 불구하고 여전히 상류에 위치한 말뚝에 영향을 받았고 이로 인해 하류에 위치한 말뚝 근처에 세굴이 발달하였으나 상류에 비하여 그 정도가 다소 낮은 것으로 보인다. 평형상태에서는 국부세굴과 퇴적이 명확히 관찰되었고 그 형상은 단일 말뚝주변(Dargahi, 1990; Khosronejad et al., 2012)에서 발생한 국부세굴 현상과 유사하게 나타났다. 말뚝간격이 넓어져서 $s/D=1.25$ 와 2.5 에서 발생되었던 상류 말뚝사이에서의 세굴은 나타나지 않았고 이것은 측면말뚝에 의한 영향이 사라졌음을 나타낸다. 다시 말해 말뚝주변의 세굴은 측면으로 독립적으로 발달한다. 상류에 위치한 말뚝 하류에 퇴적된 유사는 시간에 따라 증가하고 말뚝 하류에서 발생하는 와류에 의해 점점 하류로 이동한다. 한편 말뚝 간격이 넓어지면서 하류에 위치한 말뚝 주변에 국부세굴이 발달하였으나 상류 말뚝에 의해 발생한 퇴적과 이것의 하류로의 이동 때문에 하류 말뚝 근처의 국부세굴 발달에 영향을 미쳤다.

LES와 하상변동 모형의 결합은 군말뚝 주변의 세굴 발달과정 및 이동과정을 정교하게 재현하였다. 특히 군말뚝 전면부 주변에서 발생하는 세굴을 잘 예측하였다. 이는 군말뚝 전면부에서 발생하는 말굽형 와류의 변동성을 잘 계산하여 URANS모형으로 재현할 수 없었던 교각 전면부의 세굴을 재현한 것으로 여겨진다.

3.2.2 군말뚝 주변의 세굴형상

Fig. 7은 다양한 말뚝간격($s/D=1.25, 1.875, 2.5, 3.75$ and 5.0)에 따른 평형상태에서 하상변화를 나타낸다. 여기에 단일 말뚝주변 하상변화와 비교하기 위해 이를 수치모의하고 결과를 함께 도시하였다. 단일말뚝의 경우 최대 세굴심은 $\pm 40^\circ$ 근처에서 발생하였고 세굴영역은 말뚝주변으로 확대되었다. 세굴로 인해 이동한 유사들은 말뚝 하류에 퇴적되었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 군말뚝 주변의 하상변화는 말뚝간격에 상당한 영향을 받고 있음을 보인다. 무차원 말뚝간격이 1.25인 경우 세굴공 중첩에 의해 군말뚝 주변에 하나의 세굴공이 발달하였다. 상류에 위치한 말뚝들 사이로 흐름 가속과 말굽형 와류의 압축 때문에 세굴의 깊이가 증가하였고 최대세굴심의 위치도 변화하였다(Ataie-Ashtiani and Beheshti, 2006). 말뚝간격이 3.75보다 작은 경우 국부세굴(local scour)과 통수단면 축

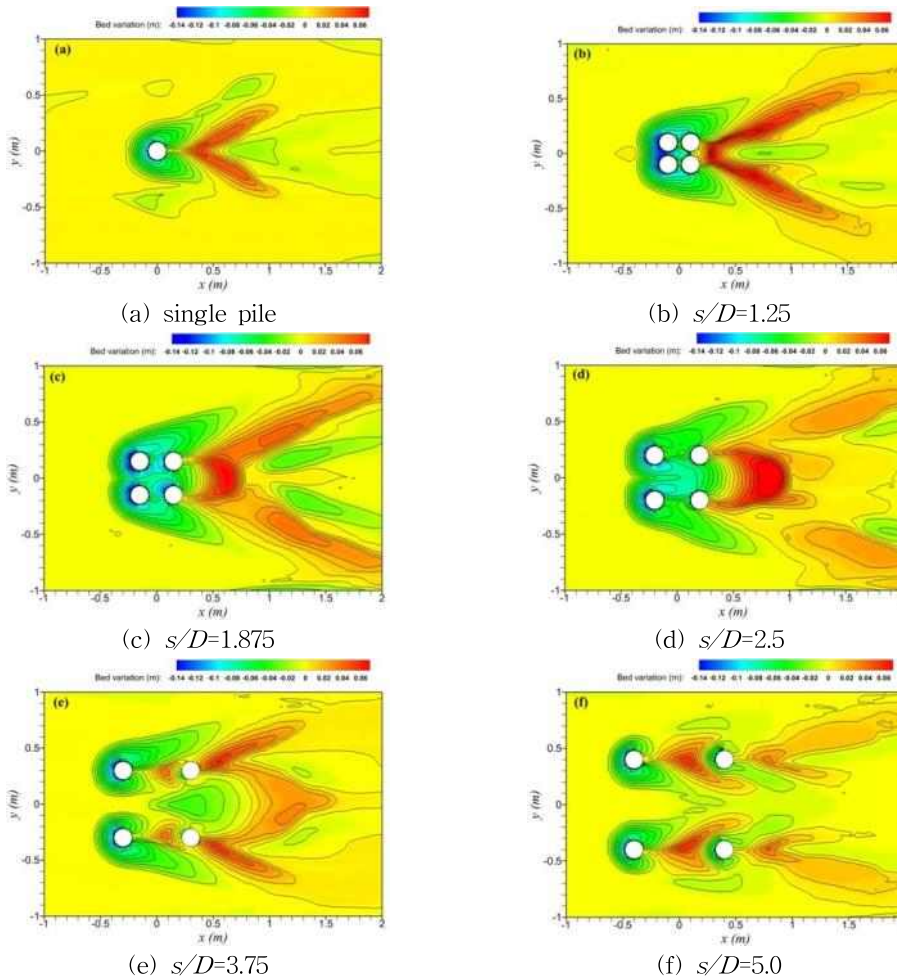


Fig. 7. Contour of Bed Variation at the Equilibrium State around the Pile Group

소에 의한 단면축소세굴(contraction scour)이 발생하였다. 이 경우에는 하나의 퇴적언덕이 발생하였고 말뚝간격이 증가함에 따라 점점 하류로 이동하였다. 단일말뚝의 국부세굴과는 달리 군말뚝 주변에는 국부세굴 뿐만 아니라 단면축소세굴이 발생한다는 점이 가장 큰 차이점이다. 말뚝간격이 2.5 이하인 경우에는 말뚝들에 의해 유속이 증가하고 바다 근처에서 난류강도가 강해지면서 단면축소세굴이 발생한 것으로 판단된다. Sumer and Fredsøe (2002)는 군말뚝 내의 난류강도 증가의 영향은 유사의 개시 및 이동성을 증가시키고 이로 인해 군말뚝 내와 주변의 하상고가 하강한다고 하였다. 이것은 논문에서 사용된 LES모형이 말뚝들에 의한 난류성분을 정확히 계산하고 이 성분들이 하상변동 모형에 잘 반영되고 있음을 나타낸다.

말뚝 간격이 2.5보다 커지면서 세굴공이 각각의 말뚝주변에서 독립적으로 발달하였고 단면축소세굴은 거의 사라졌음을 보인다. 이 경우에는 측면 말뚝에 의한 영향이 거의 사라졌고 상류에 위치한 말뚝 주변의 국부세굴 특징

은 단일 말뚝의 결과와 유사하게 나타났다. 말뚝 하류에 퇴적이 발생하기 시작했고 퇴적량은 말뚝간격이 넓어질수록 증가하고 있음을 보였다. 또한 하류에 위치한 말뚝 주변에 국부세굴이 발생하였고 세굴깊이와 범위가 말뚝의 간격이 넓어질수록 증가하였다. 이는 말뚝간격이 2.5보다 커지면서 상류 말뚝에 의한 하류 말뚝에서의 세굴보호 효과(sheltering effect)가 점점 줄어들었기 때문이다. 상류말뚝 하류에 퇴적된 유사들은 후류에 의해 시간에 따라 하류로 이동하고 이는 하류에 위치한 말뚝주변의 세굴정도에 영향을 주는 것으로 보인다. 이 영향은 말뚝의 간격이 넓어질수록 감소하는 것으로 나타났다.

3.2.3 군말뚝 주변의 세굴심 변화

Fig. 8은 시간에 따른 군말뚝 주변의 최대 세굴심과 퇴적고 뿐만 아니라 말뚝형 와류가 지배적인 말뚝 직상류(P1, P2)와 군말뚝의 중심부(P3)에서의 세굴깊이를 나타내었다. 단일 말뚝 주변의 세굴심과 퇴적고를 비교하기 위해

그 결과를 Fig. 8(a)에 도시하였다. 단일 말뚝의 경우 최대 세굴심은 시작부터 약 15분까지 급격히 증가하였고 그 이후 서서히 증가하였다. 약 100분 후 최대 세굴심은 평형상태가 되었다. 말뚝 직상류에서의 세굴심은 최대세굴심보다 조금 낮았지만 유사한 경향성을 보였다. 직상류에서 세굴심은 0.094m로 최대세굴심의 약 94%였고 이것은 Khosronejad et al. (2012)의 수리실험과 일치한다.

군말뚝 주변에서 최대 세굴심은 상류에 위치한 말뚝의

측면 부근에서 발생하였고 이것은 시작과 함께 약 10분까지 급격히 증가함을 보였다. 군말뚝 주변의 경우 최대 세굴심은 약 120분이 지나면서 거의 평형상태에 도달하였고 말뚝간격에 관계없이 유사한 경향을 보였다. 최대 퇴적고의 경향성 또한 최대 세굴심의 경향과 거의 유사함을 보였다.

상류에 위치한 말뚝 직상류(P1)에서 세굴심은 최대 세굴심보다 작았지만 그 경향성은 유사하게 나타났다. 수치모의에 의한 직상류에서의 세굴심은 말뚝간격(s/D)이 1.25,

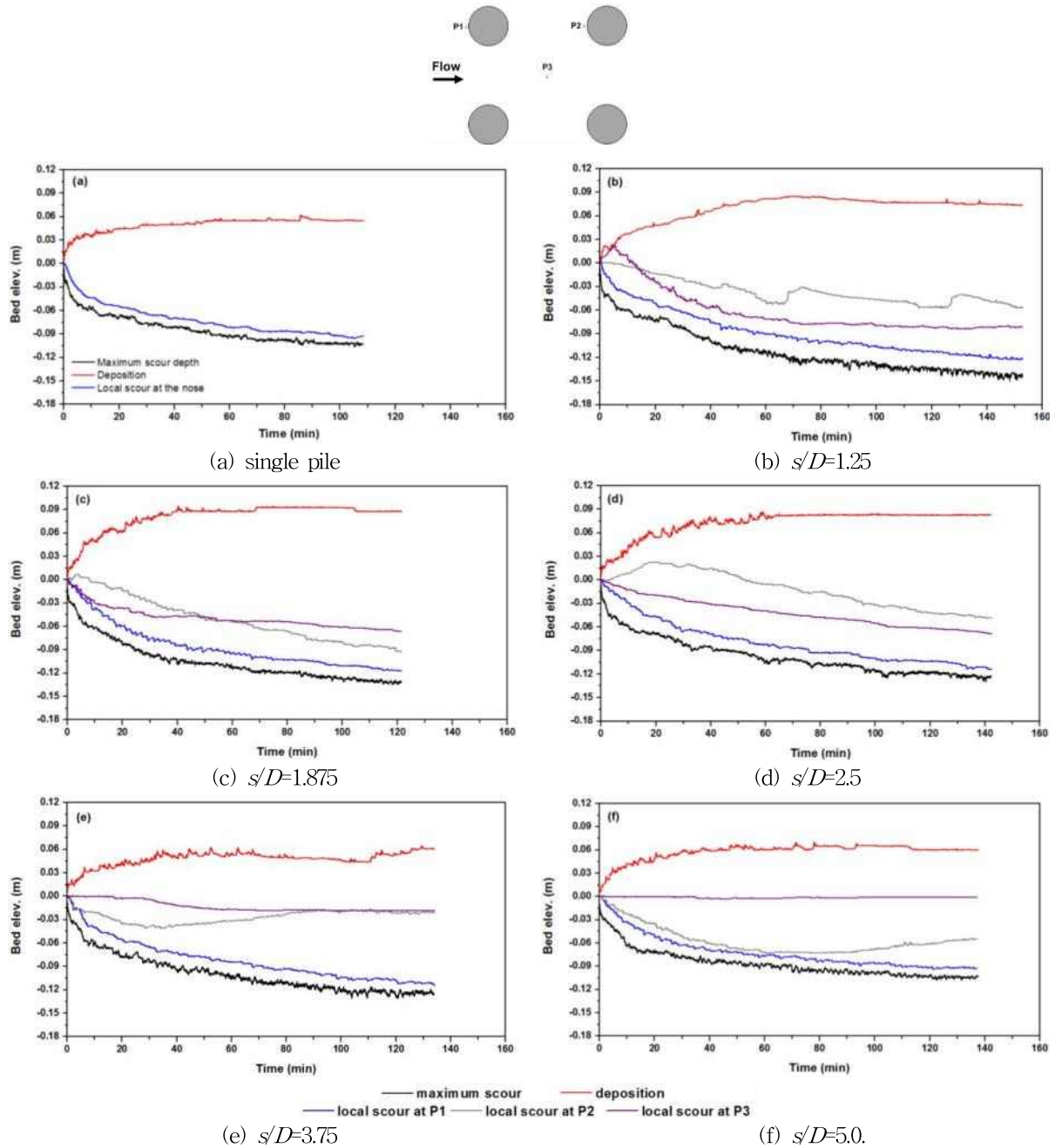


Fig. 8. Time Evolution of Scour and Deposition

1.875, 2.5, 3.75 그리고 5.0인 경우 각각 0.124, 0.116, 0.109, 0.108 그리고 0.092m로 예측되었다. 이는 최대 세굴심의 약 86~90%이다. 단일 말뚝의 경우보다 군말뚝의 경우가 말뚝간의 상호작용 때문에 말뚝 측면에서 발생하는 세굴심이 조금 더 깊게 나타났다. 수치모의에 의해 계산된 하류에 위치한 말뚝 직상류(P2)에서 세굴심의 경향은 최대 세굴심과 P1에서 나타난 경향과 전혀 다르게 나타났다. 무차원 말뚝간격이 1.25인 경우 세굴심은 약 70분까지 서서히 증가하였고 이후 갑자기 세굴심이 감소하였다. 그 이후 이러한 현상이 반복 되었다. 말뚝간격이 1.875인 경우에는 하류 말뚝의 직상류(P2)에서 세굴이 발생하였고 P1에서의 세굴심 보다는 낮았지만 꾸준히 증가하는 경향을 보였다. 말뚝간격이 2.5인 경우 시작과 함께 약 17분 까지 하상고는 상승하였고 그 이후 말뚝들에 의한 흐름 상호작용에 의해 증가된 난류성분들 때문에 세굴심이 서서히 증가하였다(Sumer and Fredsøe, 2002). 말뚝간격이 3.75인 경우 하류에 위치한 말뚝에서 국부 세굴심은 시작과 함께 약 30분까지 증가하였고 이때의 세굴심은 약 0.038m이다. 그러나 그 이후 약 90분 지점까지 하상고가 상승하였고 이것은 상류에 위치한 말뚝 뒤에 퇴적된 유사가 하류로 이동하고 이로 인해 흐름장이 바뀌었기 때문이다. 한편 약 90분을 지나 세굴심이 시간에 따라 더 이상 거의 변화하지 않아 동적 평형상태에 이르렀고 이때의 세굴심은 0.02 m였다. 말뚝간격이 5.0인 경우에는 세굴심이 시간에 따라 증가하였고 약 65분까지 상류 말뚝에서의 세굴심과 유사함을 보였다. 이는 상류 말뚝영향이 상당히 줄어들어 하류 말뚝근처에서 말뚝형 와류가 충분히 발달하고 있음을 의미한다. 그러나 65분이 지나면서 세굴심의 깊이는 시간에 따라 감소하였다. 그러므로 하류 말뚝에서의 국부세굴은 상류 말뚝 뒤의 유사의 퇴적과 이것의 이동에 상당히

영향을 받고 있음을 확인하였다.

군말뚝 주변의 단면축소세굴에 의한 평균 세굴심은 군말뚝 중심부의 세굴심과 상응한다고 가정하였다. 단면축소세굴은 말뚝간격이 3.75보다 작은 경우에 발생하였으며 세굴심은 시간에 따라 꾸준히 증가하였다. 평균 세굴심은 최대세굴심의 약 50~62%로 나타났다.

3.2.4 말뚝간격과 세굴심 변화

Fig. 9(a)는 말뚝간격 차이($G=(s-D)/D$)에 따른 군말뚝 주변의 최대 세굴심이다. 여기서 군말뚝 주변의 최대 세굴심은 단일 말뚝에서의 최대 세굴심으로 무차원화 하였고 Ataie-Ashtiani and Beheshti (2006)의 수치실험 결과와 비교하였다. 최대 세굴심은 말뚝 간격의 차이가 증가할수록 감소하였고 말뚝 간격 차이가 4.0 이상이 되면 단일 말뚝 최대 세굴심과 거의 같아졌다. 말뚝 간격의 차이가 2보다 작은 경우에는 최대 세굴심이 급격히 줄어들었지만 2보다 커지면서 세굴심이 천천히 줄어들었다. 이러한 경향성은 두 개의 말뚝이 나란히 배치된 경우와 유사하다 (Ataie-Ashtiani and Beheshti, 2006). 수치모의로부터 얻은 최대 세굴심이 수치실험 결과와 잘 일치함을 보였고 이것은 본 연구에서 사용한 LES를 기반으로 한 하상변동 모형이 군말뚝 주변의 최대 세굴심을 정확히 예측하고 있음을 나타낸다.

단일 말뚝에서 국부세굴과는 달리, 군말뚝 주변에서는 국부세굴 뿐만 아니라 단면축소세굴이 발생한다. 단면축소세굴에 의한 세굴심은 그 위치에 따라 다르기 때문에 본 연구에서는 앞서 언급한바와 같이 평균 세굴심은 군말뚝 중심에서 발생한 세굴심과 상응한다고 하였다. Fig. 9(b)는 말뚝간격 차이($G=(s-D)/D$)에 따른 군말뚝 주변의 단면축소세굴에 의한 평균 세굴심이다. 여기서 세굴심은 단

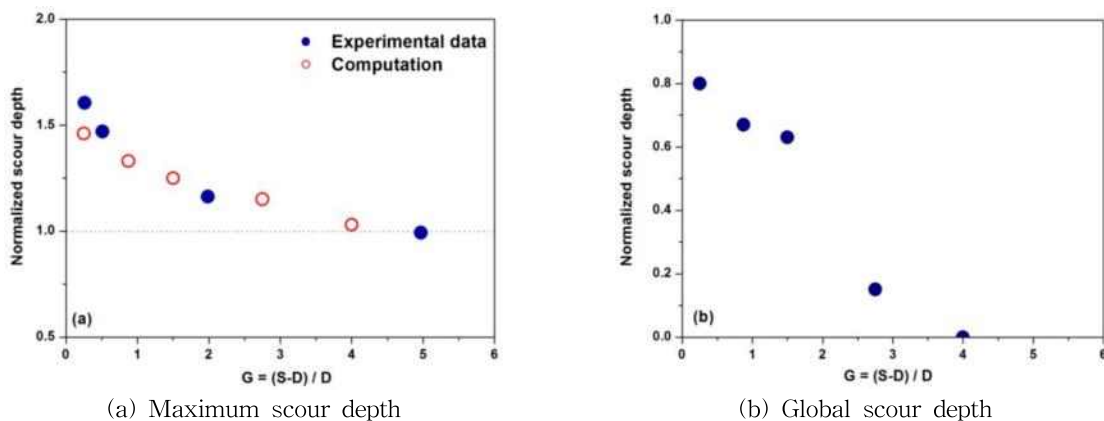


Fig. 9. Scour Depth as a Function of the Distance of Piles

일교각에서 최대 세굴심으로 무차원화 하였다. 평균 세굴 심은 말뚝간격의 차이가 증가하면서 감소하였고 말뚝간 격 차이가 3보다 크면 단면수축세굴이 거의 사라졌다. 이 것은 말뚝들에 의한 흐름 상호작용의 영향이 말뚝간격이 줄어들면서 증가하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 LES와 하상변동 모형을 이용하여 군말 뚝 주변의 세굴특성 및 변화를 수치모의하였다. 동일한 크기를 가지는 4개의 원형말뚝을 사각형 형태(2×2)로 배 열하여 말뚝간격을 변화시키면서 군말뚝 주변의 세굴과 정 및 특성을 조사하였고, 결과는 다음과 같다.

- 1) 군말뚝 주변의 세굴양상은 단일말뚝 주변의 세굴과 상 당히 다르게 나타났다. 이것은 말뚝들 간의 상호작용 에 의해 난류의 영향이 증가하고 말뚝사이에서의 흐름 강도 증가 때문이다. 이러한 흐름 특성은 군말뚝 주변 의 국부세굴 뿐만 아니라 단면수축세굴을 야기하였다.
- 2) 무차원 군말뚝 간격이 3.75보다 작으면 말뚝간의 상 호작용에 의해 국부세굴 뿐만 아니라 단면수축세굴 이 발생하고 세굴공이 중첩되어 군말뚝 주변에 하나 의 세굴공과 퇴적영역이 발생하였다. 이로 인해 단 일 말뚝의 경우에 비하여 세굴심은 더욱 깊어졌다. 한편 말뚝간격이 넓어지면 말뚝들에 의한 상호작용 이 줄어들며 무차원 말뚝간격이 3.75 이상이 되면 단 면수축세굴은 사라지고 각각의 말뚝에 국부세굴이 독립적으로 발생하였다.
- 3) 최대 세굴심과 상류말뚝에서 발생한 국부세굴심은 단일말뚝에서 나타난 세굴의 경향과 유사함을 보였 다. 그러나 하류에 위치한 말뚝주변의 세굴은 상류 말뚝의 영향을 받았고 특히 무차원 말뚝간격이 3.75 보다 작은 경우에는 말뚝들 간의 상호영향 때문에 증가한 난류성분 때문에 세굴이 발생하였다. 상류에 위치한 말뚝 세굴심보다 낮았지만 시간에 따라 점점 증가하였다. 반대로 무차원 말뚝간격이 3.75 이상인 경우에는 세굴심이 증가하다가 상류 말뚝 뒤에 퇴적 된 유사의 이동 때문에 세굴심이 감소하였다.
- 4) 무차원 최대세굴심은 말뚝간격이 2보다 작은 경우 에는 말뚝간격이 증가할수록 급격히 줄어들다가 그 이 후에는 서서히 감소함을 보였다. 본 연구에서 사용한 모형이 예측한 최대 세굴심 경향은 Ataie-Ashtiani and Beheshti (2006)의 수리실험의 결과와 잘 일치 하였다. 또한 단면수축세굴에 의한 평균 세굴심은

말뚝간격이 증가할수록 감소하였고, 무차원 말뚝간 격의 차가 3.0을 지나면서 단면수축세굴 영향은 거 의 사라짐을 보였다.

- 5) URANS모형의 한계로 예측하기 어려운 말굽형 와 류 및 난류성분에 의한 말뚝 전면부의 국부세굴과 주변의 세굴현상 및 특성을 LES와 하상변동 모형의 결합으로 보다 정확하게 재현할 수 있음을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(14-주요-시드) 입자영상유속계(PIV)를 이용한 하천구조물 주변 유동해석 기법 개발의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 연구내용의 일부는 제 1 저자의 Hokkaido University Graduate School of Engineering 2013년 박사논문이 포함된 내용입니다.

References

Ataie-Ashtiani, B., and Beheshti, A.A. (2006). "Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 10, pp. 1100-1104.

Choi, H.K., Baek, K.W., Koo, B.S., and Choi, Y.M. (2001). "An Experimental study on the scour characteristics based on shape and arrangement of the piers." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 21, No. 4, pp. 409-415 (in Korean).

Dargahi, B. (1990). "Controlling mechanism of local scouring." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 10, pp. 1197-1214.

De Ruiter J.C. (1993). *Incipient motion and pick-up of sediment as function of local variables*. Technical Report R 657-XI, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Netherlands.

Escauriaza, C., and Sotiropoulos, F. (2011). "Initial stages of erosion and bed form development in a turbulent flow around a cylindrical pier." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, F03007.

Ettem, R., Kirkil, G., and Muste, M. (2006). "Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 1, pp. 33-39.

Hannah, C.R. (1978). *Scour at pile groups*. Research

- Report. No 28-3, Civil Engineering Dept. Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Khosronejad, A., Kang, S., and Sotiropoulos, F. (2012). "Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers." *Advance in Water Resources*, Vol. 37, pp. 73-85.
- Kirkil, G., Constantinescu, G., and Ettema, R. (2009). "Detached eddy simulation investigation of turbulence at a circular pier with scour hole." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 11, pp. 888-901.
- Lee, S.O., Lee, J.W., and Cho, Y.S. (2006). "Temporal variation of local scour depth around a bridge pier." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 1, pp. 29-35 (in Korean).
- Maxey, M.R., and Riley, J.J. (1983). "Equation of motion for a small ridge sphere in a nonuniform flow." *Physics of Fluids*, Vol. 26, No. 4, pp. 883-889.
- McLaughlin, J.B. (1991). "Inertial migration of a small sphere in linear shear flows." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 224, pp. 261-274.
- Mei, R. (1992). "An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite Reynolds number." *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 18, No. 1, pp. 145-147.
- Melville, B. W., and Coleman, S. (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publication, Colo.
- Morsi, S.A., and Alexander, A.J. (1972). "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 55, No. 2, pp. 193-208.
- Nabi, M. (2012). *Computational modelling of small-scale river morphodynamics*. Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Netherlands.
- Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T., and Muramoto, Y. (2005). "Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures." *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 131, No. 12, pp. 1074-1087.
- Olsen, N., and Melaaen, C. (1993). "Three dimensional calculation of scour around cylinders." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 9, pp. 1048-1054.
- Paik, J., Escauriaza, C., and Sotiropoulos, F. (2010). "Coherent structure dynamics in turbulent flows past in-stream structures: some insights gained via numerical simulation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 12, pp. 981-993.
- Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., and Michelsen, J. (2005). "Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 534, pp. 351-401.
- Saffman, P.G. (1965). "The lift on a small sphere in a slow shear flow." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 22, No. 2, pp. 385-400.
- Schmeeckle, M.W., Nelson, J.M., Pitlick, J., and Bennett, J.P. (2001). "Interparticle collision of natural sediment grains in water." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 9, WR000531.
- Smagorinsky, J.S. (1963). "General circulation experiments with the primitive equations." *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.
- Sumer, B.M., and Fredsøe, J. (1998). "Wave scour around group of vertical piles." *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 124, No. 5, pp. 248-256.
- Sumer, B. M., and Fredsøe, J. (2002). *The mechanics of scour in the marine environment*. Water Resources Publications, LLC.
- Yang, W., and Choi, S-U. (2002). "Three-dimensional numerical simulation of local scour around the bridge pier using large eddy simulation." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 4, pp. 437-446 (in Korean).
- Yoon, B., Seo, J., and Roh, Y. (2001). "An experimental study on local scour around group pile foundation." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 6, pp. 641-649 (in Korean).
- Zhao, M., Cheng, L., and Zang, Z. (2010). "Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular in steady currents." *Coastal Engineering*, Vol. 27, pp. 709-721.

논문번호: 14-047	접수: 2014.06.17
수정일자: 2014.09.18/09.22	심사완료: 2014.09.22