

모노파일 기초 주변의 세굴방지 효과에 관한 연구

김선민¹ · 김종규^{1,†} · 김용관² · 서성호²¹전남대학교 조선해양공학과²한국수산자원관리공단

Scour Protection Effect around the Monopile Foundation

Seon Min Kim¹, Jong Kyu Kim^{1,†}, Yong Kwan Kim² and Seong Ho Seo²¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea²Korea Fisheries Resources Agency, Busan 46041, Korea

요 약

본 연구는 3차원 CFD(Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 모노파일 기초 주변의 환형 세굴방지공에 의한 세굴방지 효과를 파악하였다. Torsethaugen(1975)의 수리모형 실험결과를 바탕으로 FLOW-3D의 해석결과를 검증하였다. 검증결과를 바탕으로 유속변화에 따른 세굴을 연구한 결과, 유속이 증가할수록 최대 세굴심과 세굴폭 또한 증가하는 경향을 확인하였다. 모노파일 기초 주변에 세굴방지 효과 연구를 위해 바닥면에 환형 세굴방지공을 부착하여 수치실험을 수행하였으며, 약 68.5%의 세굴 감소 효과를 확인했다. 또한 하강 유속과 구조물 주변 저층 유속이 감소한 것을 확인하였고, 이는 세굴방지공이 세굴에 영향을 미치는 하강류의 저감 효과를 보이는 것으로 판단된다.

Abstract – In this research, a three-dimensional Computational Fluid Dynamics(CFD), scour characteristics around monopile was grasped and the effect of circular ring type scour protection on reducing protection was assessed. When Torsethaugen(1975) found that the scour area and its depth were coincided quantitatively On the ground of previous findings, after scour was assessed in terms of sea current velocity, we also found that the tendency of maximum scour depth and its width were increased as the sea current velocity was increased. The experiments were performed by attaching ring-circular typed scour protection under the bottom in order to reducing scour around the constructs of monopile type and showed reduced scour approximately by 68.5%. In addition, there were reduction of downward flow and bottom velocities, suggesting that scour protection reduce the effect of downward flow on scour.

Keywords: Scour Protection(세굴방지공), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Monopile Foundation (모노파일 기초)

1. 서 론

최근 해양산업발달과 해양 자원의 개발과 이용 및 육지와 섬의 연결 등으로 대형 해양구조물의 건설이 증가하고 있다(Cho *et al.* [2009]; Shin and Hong[2004]). 모노파일 기초와 같은 원형 수직 기둥이 해안 및 해양에 설치되면 구조물 주변의 흐름패턴이 변화되어 흐름의 축소, 구조물 전면부에서 말굽형 와류(Horseshoe Vortex)의 형성, 구조물 배후부에서 후류 와류(Wake Vortex)의 형성 등의 작용으로 국부적인 유시수송능력이 증가하게 되며, 이는 구조물의 안정성에 영향을 미치는 세굴을 유발하게 된다(Oh *et al.*[2012]).

이와 같은 이유로 최근 세굴현상에 대한 수치해석 및 실험연구들이 수행되었고, 세굴현상의 주요인자들의 민감도 분석이 수행되고 있다(Richardson and Davis[1995]; Sumer *et al.*[1993]; Shin[2011]).

Ko *et al.*[2015]은 서해안의 조석현상에 의해 발생하는 왕복성 흐름으로 인한 세굴 현상에 대해 연구를 수행하였으며, Son *et al.* [2015]은 바닥 보호공 설치에 따른 하상변동 특성에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 해상에 설치된 구조물 주변의 복잡한 흐름과 그에 따른 세굴을 적절히 모의하기 위해 3차원 CFD 모델인 FLOW-3D (Flow Science, USA)를 이용하여 해양구조물인 기초 주변 세굴과 구조물 주변에 설치한 환형 세굴방지공에 의한 세굴방지 효과를 연구하였다.

[†]Corresponding author: kimjk@jnu.ac.kr

2. 자료 및 방법

2.1 평형 세굴심

구조물 주변의 흐름패턴이 변화되어 발생하는 세굴은 유속에 따라 정적 세굴과 동적 세굴로 분류할 수 있다. 유속이 정적 평형에 도달하게 되면 구조물 전면부의 퇴적물 공급 없이 구조물 주변에서 세굴이 발생하는 정적 세굴이 발생한다. 유속이 더 증가하면 구조물 전면부로부터 퇴적물의 공급으로 인해 세굴과 퇴적이 동시에 발생하는 동적 세굴의 형태로 변화되며(Richardson and Davis[1995]), 시간이 지남에 따라 정적 및 동적 세굴은 모두 평형 세굴심으로 수렴한다(Fig. 1). Neill[1968]은 정적 세굴과 동적 세굴을 나누는 기준인 한계유속을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$V_c = 1.58[(S_s - 1)gd_{50}]^{1/2}(h/d_{50})^{1/6} \quad (1)$$

여기서, S_s 는 저질 재료의 비중, d_{50} 은 저질 재료의 중앙입경, g 는 중력가속도, h 는 수심이다.

2.2 수치모형

본 연구에서는 모노파일 기초 주변의 세굴특성을 파악하기 위하여 CFD(Computational Fluid Dynamics)인 FLOW-3D(Flow Science, 1993)를 사용하였으며, FLOW-3D는 1960년대 미국 Los Alamos National Laboratory에서 유체의 자유표면 연구의 시작으로 개발되었고 1985년 Version 1.0을 출시한 이래로 현재는 Version 11.1까지 상용화되고 있다. VOF(Volume of Fluid)와 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 기법을 기반으로 하는 범용 CFD 프로그램인 FLOW-3D는 자유표면 예측, 관수로 및 개수로의 유동, 퇴적물의 이동, 난류모델 계산 등 그 활용범위가 광범위하다.

기본 방정식을 간단히 소개하면 다음과 같다. 비압축성 유체로 가정했을 일반적인 연속방정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (2)$$

여기서, A_x, A_y, A_z 는 각 방향에 대한 유체가 차지하는 셀의 면적, ρ 는 유체의 밀도, u, v, w 는 각각 x, y, z 의 유속성분이다. 그리고 $RSOR$

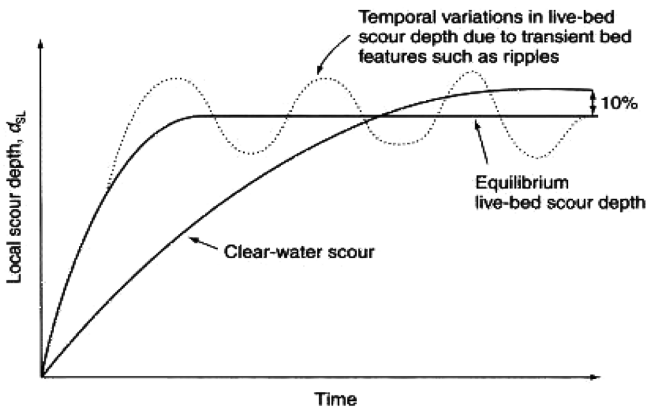


Fig. 1. Variations of scour(Richardson and Davis[1995]).

은 질량소스에 대한 항이다. 그리고 운동방정식은 Navier-Stokes 방정식에 다음과 같이 몇 개의 항이 추가된 식 (3), (4), (5)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_f} u \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_f} v \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_f} w \quad (5)$$

여기서, F_x 는 물체와 점성에 대한 가속도이고, $RSOR$ 항은 밀도소스 항이다. 본 모델에서 자유표면은 유체의 체적함수(VOF)에 대한 함수, $F(x,y,z,t)$ 의 항으로 정의되며, 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial u}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial u}{\partial z}(FA_z w) \right\} = FDIF + FSOR \quad (6)$$

여기서, $FSOR$ 항은 운동방정식에서 밀도소스항인 $RSOR$ 과 같으며, 식 (7)의 $FDIF$ 는 난류확산항이다.

$$FDIF = \frac{1}{V_f} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_f A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_f A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_f A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right\} \quad (7)$$

2.3 수치실험

모노파일 기초 주변에 설치된 환형 세굴방지공으로 인한 세굴감소효과를 분석하기 위해 세굴방지공의 설치유무에 따라 수치해석을 위한 격자를 구성하였다. 구조물 둘레에 평판을 부착하는 방법은 Kikkawa *et al.*[1971]에 의해 구조물 전면에서 발생하는 하강류를 감소시켜 세굴을 방지할 수 있다고 연구되었다.

Dargahi[1989]의 실험을 통해서 평판이나 원형 구조물의 변형이 말굽형 와의 형성을 억제할 수는 없으며, 평판이 교각의 분리된 경계층 내에 설치되었을 때 말굽형 와의 강도를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다(Son[2014]). 본 연구에서는 사석이나 테트라포드 등을 이용한 보호공법 대신에 시공 및 유지보수가 용이한 환형 세굴방지공을 구조물에 부착하는 방법을 택하였다. 또한 보호공을 해저면 가까이 설치해 구조물 주변의 하강류를 제어하여 세굴심의 발달을 제한하고, 보호공 측면에 두께를 주어 유입층의 두께를 작게 만들어 말굽형 와류의 발생을 제어하도록 하였다. 직경 0.75 m의 모노파일과 이 주변에 설치된 직경 0.9 m, 높이 0.5 m의 환형 세굴방지공을 Fig. 2에 나타내었다.

한편, 모노파일 기초 주변에 설치된 환형 세굴방지공으로 인한 세굴 감소 효과를 분석하기 위한 수치실험 조건을 Table 1에 나타내었다.

Case 1의 계산영역은 유속방향인 X방향으로 10.5 m(-3, 7.5), 수직방향인 Y방향으로 3.65 m(-1.825, 1.825), 직각방향인 Z방향으로 0.33 m(-0.33, 0)의 영역으로 설정하였다. 저층에 저질을 0.1 m 포설하였으며, 수심은 0.33 m를 입력했다. 여기서 계산된 총 격자수는 768,000개(200×120×32)이며, 구조물과 세굴의 정확한 재현을 위하

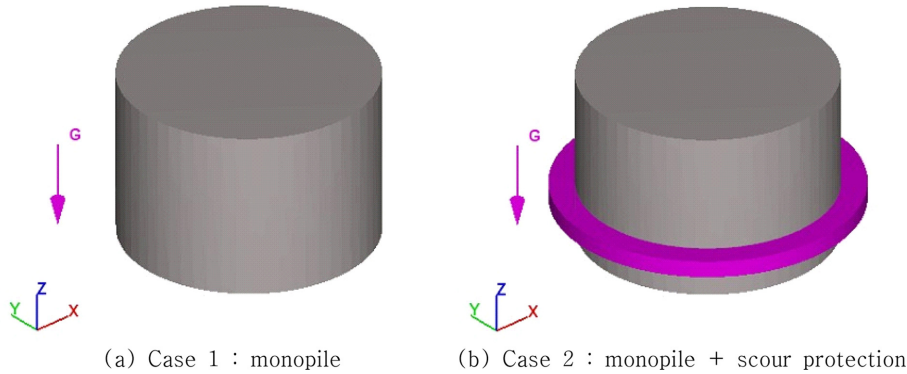


Fig. 2. Design of monopile and scour protection.

Table 1. Experimental conditions

Cause	Contents
Model	FLOW-3D v11.0.3(Flow Science, INC., USA)
Experimental conditions	· Calculate area(m) : $10.5 \times 3.65 \times 0.33$
	· Grid system : $200 \times 120 \times 32$ (768,000개)
	· Sediment - Diameter(d_{50}): 3 mm, Density: $1,040 \text{ kg/m}^3$ · Velocity Condition : 0.067 m/s
Case 1	· Structure : Monopile type
Case 2	· Structure : Monopile type + Scour protection

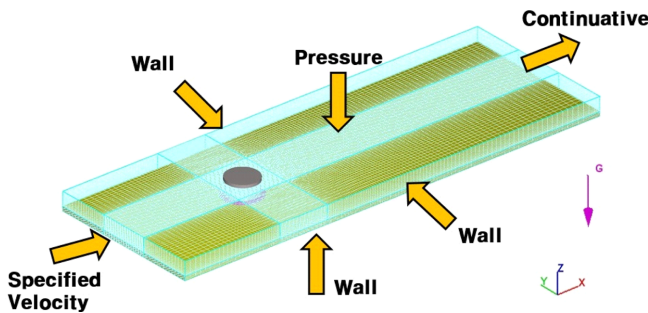


Fig. 3. Boundary conditions and Grid system.

여 구조물 주변의 격자 간격을 X, Y방향으로 0.015 m, Z 방향으로 0.01 m로 하는 직교 가변 격자를 설정하였다.

경계조건은 유체의 흐름방향인 X-min과 X-max경계에는 각각 유속의 유입과 유출조건으로, 직각방향인 Y-min과 Y-max 경계에는 불투과 조건으로 하였으며, 연직방향인 Z-min과 Z-max 경계에는 각각 불투과 조건과 자유표면 조건으로 하여 실험을 진행하였다 (Fig. 3).

Case 2의 계산영역과 경계조건은 Case 1과 동일하며, 구조물 주변에 환형 세굴방지공을 부착하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 세굴모형 검증

3.1.1 수리모형실험 자료

FLOW-3D 세굴모델을 검증하기 위해 Olsen and Melaen[1993]의 연구에서 Torsethaugen[1975]의 실험 결과를 수치실험 결과와 비

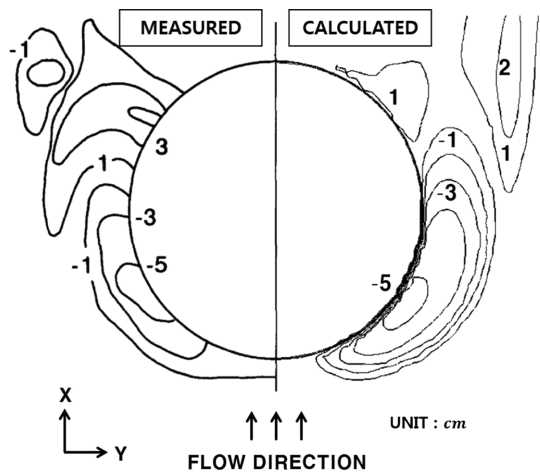


Fig. 4. Scour hole map(Olsen and Melaen[1993]), Contour line interval - Left : 2 cm, Right : 1 cm.

교검증하였다. Torsethaugen은 노르웨이 유입기술 연구소에 설치된 폭 3.65 m의 수로를 이용하여 실험을 수행하였으며, 유속 0.067 m/s, 수심 0.33m로 설정하고, 수로 중심에 직경 0.75 m의 원형 구조물을 설치하였다. 바닥에 밀도 $1,040 \text{ kg/m}^3$, 중앙입경 3 mm의 모형을 0.1 m 포설하였다. 세굴심이 평형상태를 이룬 뒤에 수리모형실험 결과와 수치실험 결과를 Fig. 4에 등고선으로 표현하였다. Fig. 4의 좌측에는 수리모형실험 결과를 우측에는 수치실험 결과를 표현하였다.

세굴심의 형태를 보면 세굴이 발생한 면적과 세굴심이 유사하게 나타났고, 최대 세굴심은 구조물 전면에서 측면으로 돌아가는 위치에 발생하였다. 퇴적의 경우 차이가 있음을 알 수 있지만, 해상에 설치된 구조물의 경우 퇴적보다 세굴에 의한 영향이 중요하므로 FLOW-3D가 세굴을 잘 재현할 수 있음을 확인하였다.

3.2 세굴특성

3.2.1 모노파일 기초

구조물 주변의 Z방향 유속을 알아보기 위한 X-Z평면의 위치를 Fig. 5에, 모노파일 기초 구조물 주변의 세굴 분포를 Fig. 6에 나타내었고, X-Z평면에 따른 Z방향 유속을 Fig. 7에 나타내었다. Z방

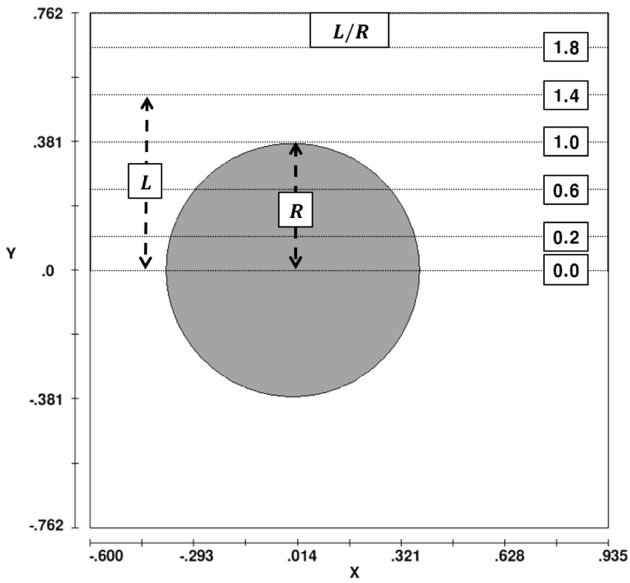


Fig. 5. Ratio of X-Z plane to structure radius.

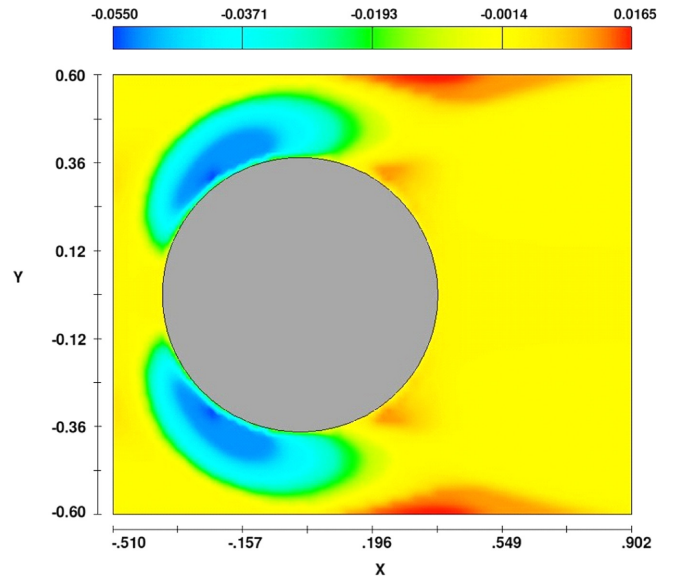


Fig. 6. Scour hole map(Case 1).

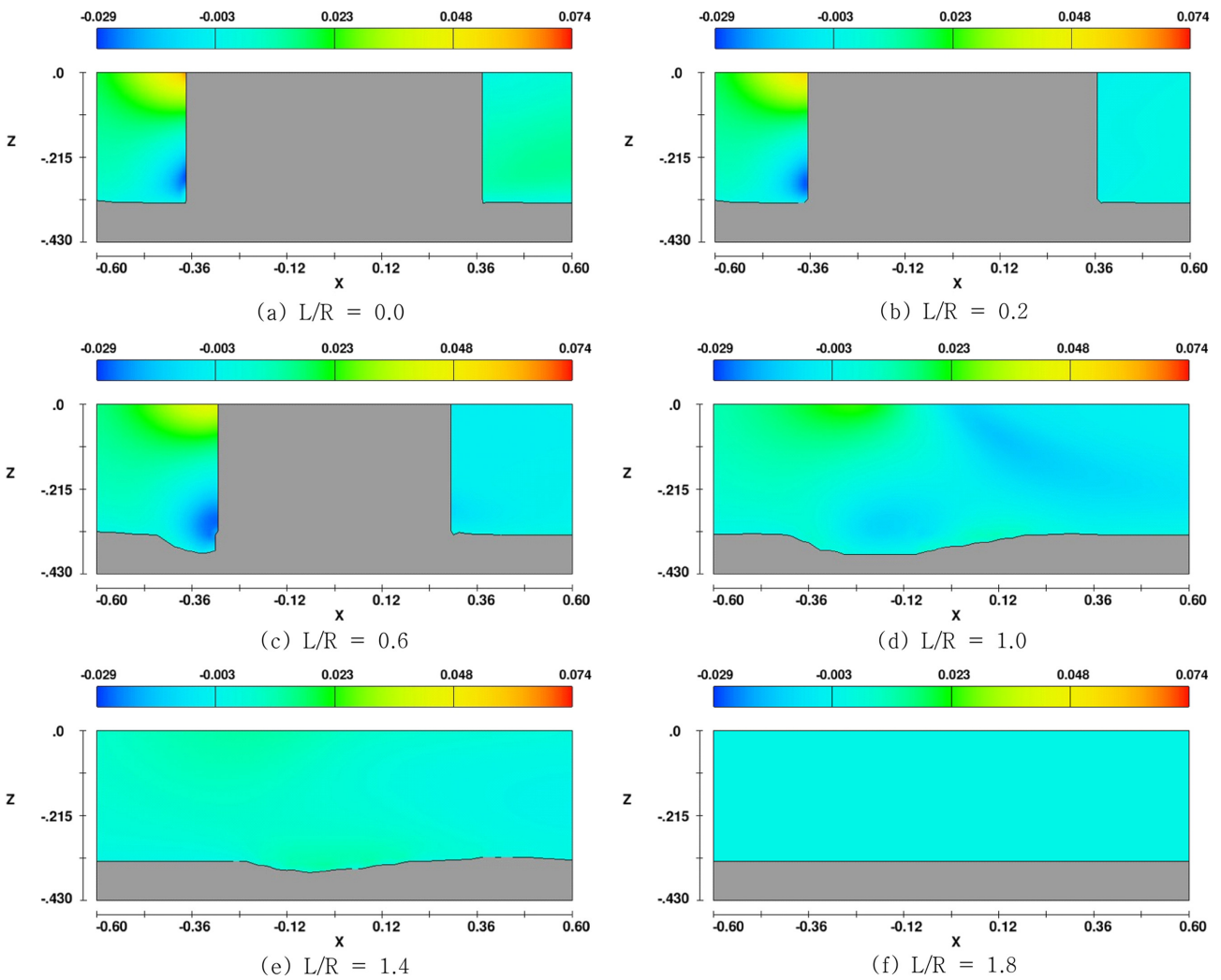


Fig. 7. Z-velocity(X-Z plane, Case 1).

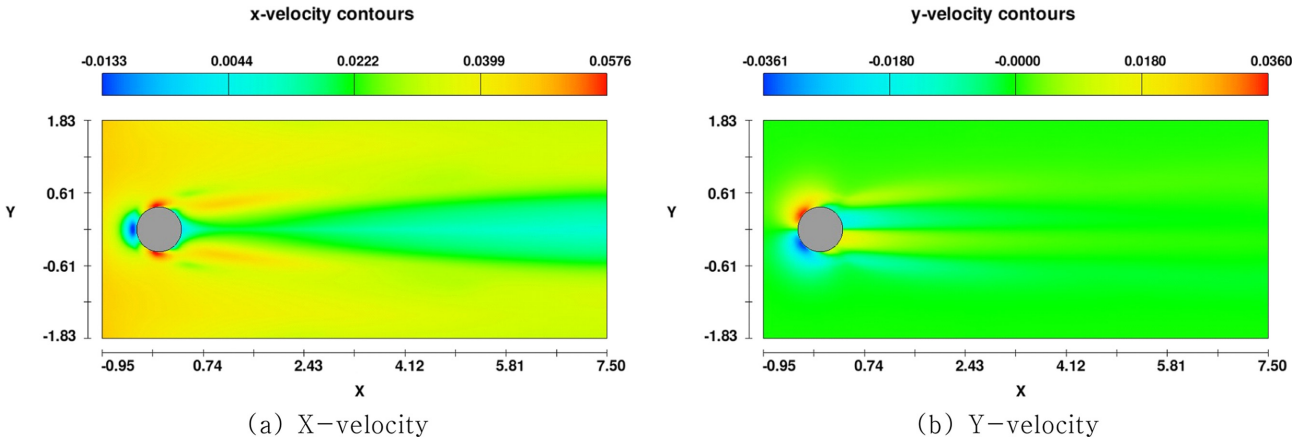


Fig. 8. Distribution of velocity at bottom layer(Case 1).

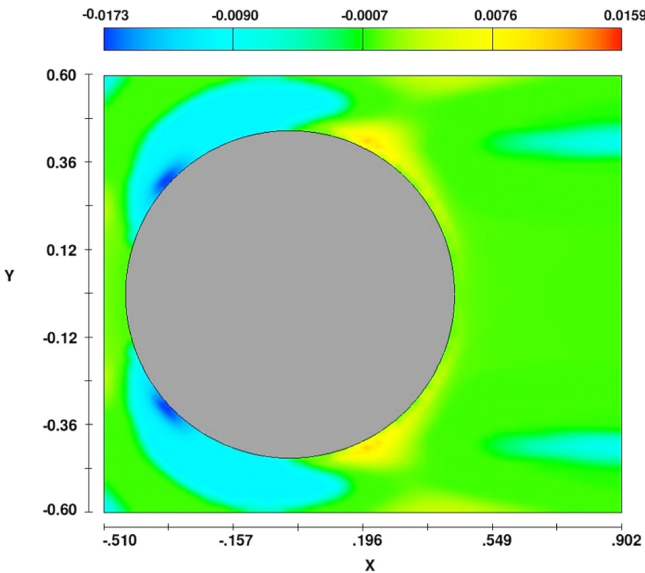


Fig. 9. Scour hole map(Case 2).

향의 유속은 세굴에 영향을 미치는 하강류 특성을 파악하기 위해 구조물 Y방향 대칭면을 기준으로 X-Z평면이 떨어져 있는 거리(L)와 구조물 반경의 비(R)로 대별하여 나타내었다. 또한, 구조물 주변의 흐름특성을 파악하기 위해 해저면에서 X, Y방향의 유속을 Fig. 8에 나타내었다.

세굴방지공이 설치되지 않은 모노파일 기초에서 발생한 최대 세굴심은 0.055 m로 나타났었고, L/R 0.0인 구조물 전면에서 0.0290 m/s로 하강하는 흐름과 0.0740 m/s로 상승하는 흐름이 나타났으며, 세굴심이 발달하는 L/R 0.6에서 0.0255 m/s로 하강하는 흐름이 나타났었다.

L/R 0.0인 구조물 전면과 0.2, 0.6인 경우에도 동일하게 유체가 구조물 전면에서 상승·하강하는 흐름을 보였었고, L/R 1.0인 구조물 측면에서 구조물 배후로 하강하는 흐름이 나타났었다. 이는 유입된 유체가 구조물 전면에 부딪힌 뒤 상승류는 표층에서 구조물을 따라 흐른 뒤 구조물 측면을 지나면서 하강하는 것으로 판단되고, 하강

류는 저층에서 구조물을 따라 0.0360 m/s로 흐르며 세굴에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.2.2 세굴방지공이 설치된 모노파일 기초

세굴방지공이 설치된 모노파일 기초 구조물 주변의 세굴 분포를 Fig. 9에 나타냈고, X-Z평면에 따른 Z방향 유속을 Fig. 10에 나타냈으며, 해저면에서 X, Y방향의 유속을 Fig. 11에 나타냈다.

세굴방지공이 설치된 모노파일 기초에서 발생한 최대 세굴심은 0.0173 m로 나타났고, L/R 0.0인 구조물 전면에서 0.0190 m/s로 하강하는 흐름과 0.0740 m/s로 상승하는 흐름이 나타났으며, 세굴심이 발달하는 L/R 0.6에서 0.0134 m/s로 하강하는 흐름이 나타났었다.

Case 1과 마찬가지로 Z방향 유속 분포는 L/R 0.0인 구조물 전면과 0.2, 0.6인 경우에도 동일하게 유체가 구조물 전면에서 상승·하강하는 흐름을 보였고, 하강류는 저층에서 구조물을 따라 0.0302 m/s로 흐르며 세굴에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

모노파일 기초 구조물 주변의 세굴방지공 유무에 따른 최대 세굴을 비교했을 때, 최대 세굴심은 세굴방지공 설치 전 0.0550 m, 설치 후 0.0173 m로 나타나 약 68.5%의 세굴 감소효과를 나타내었다. 구조물 주변 Z방향의 유속은 구조물 전면에서 세굴방지공 설치 전 0.0290 m/s로 흐르던 하강류가 설치 후 0.0190 m/s로 나타나 세굴방지공이 세굴에 영향을 미치는 하강류를 저감시키는 효과를 보이는 것으로 나타났고, 상승류는 설치 후 다소 감소했지만, 큰 변화는 없었다.

Y방향 저층 유속은 세굴방지공 설치 전 0.0360 m/s에서 설치 후 0.0302 m/s로 감소하는 것을 확인 하였으며, 세굴방지공이 하강류 저감 뿐만 아니라 구조물 주변 해저면의 유속을 감소시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 3차원 CFD(Computational Fluid Dynamics)모델인 FLOW-3D를 이용하여 모노파일 기초 주변의 세굴특성 및 환형 세굴방지공에 의한 세굴 감소효과를 파악하였다.

기존 실험 결과와 FLOW-3D를 비교검증하였고, 검증 결과를 바

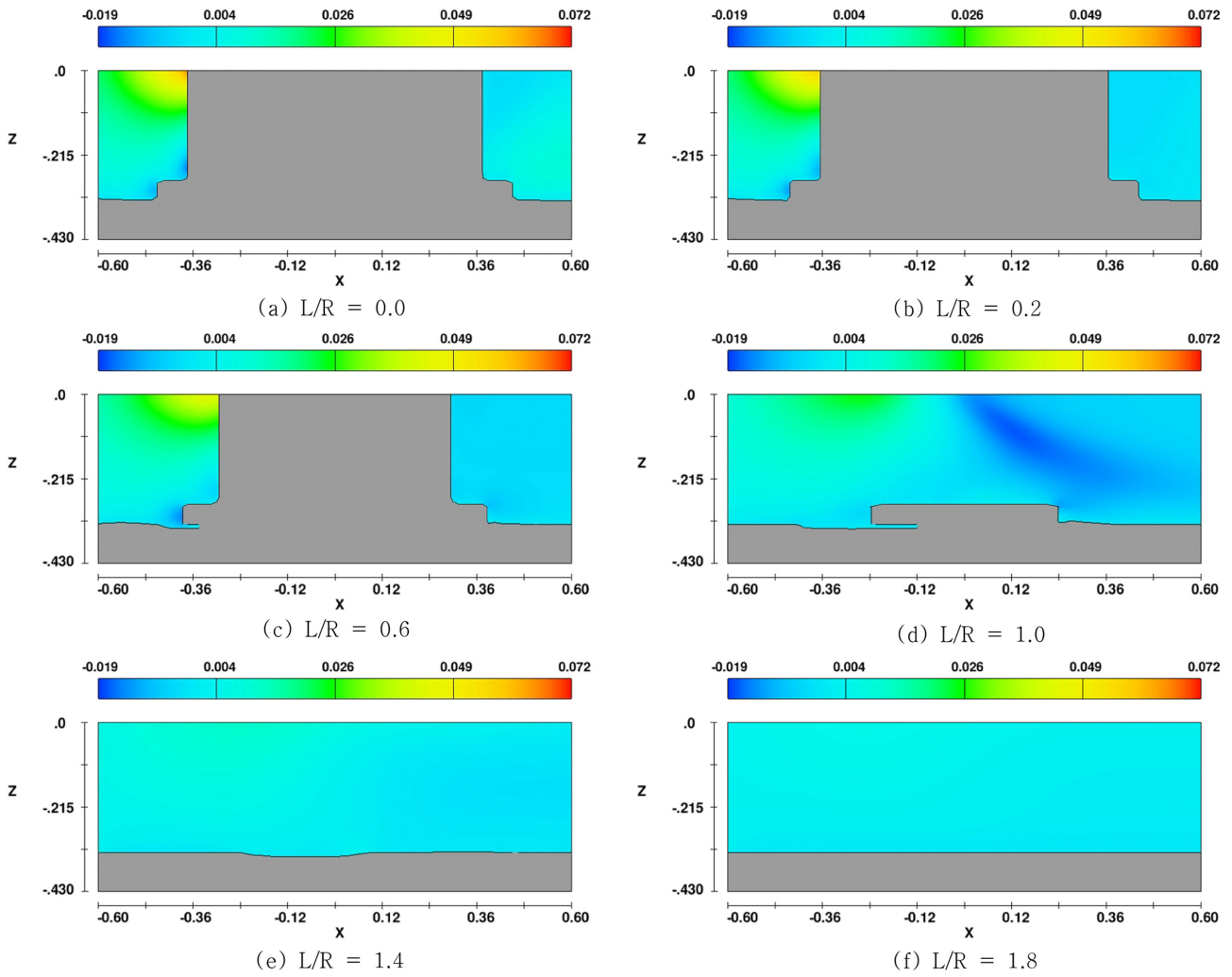


Fig. 10. Z-velocity(X-Z plane, Case 2).

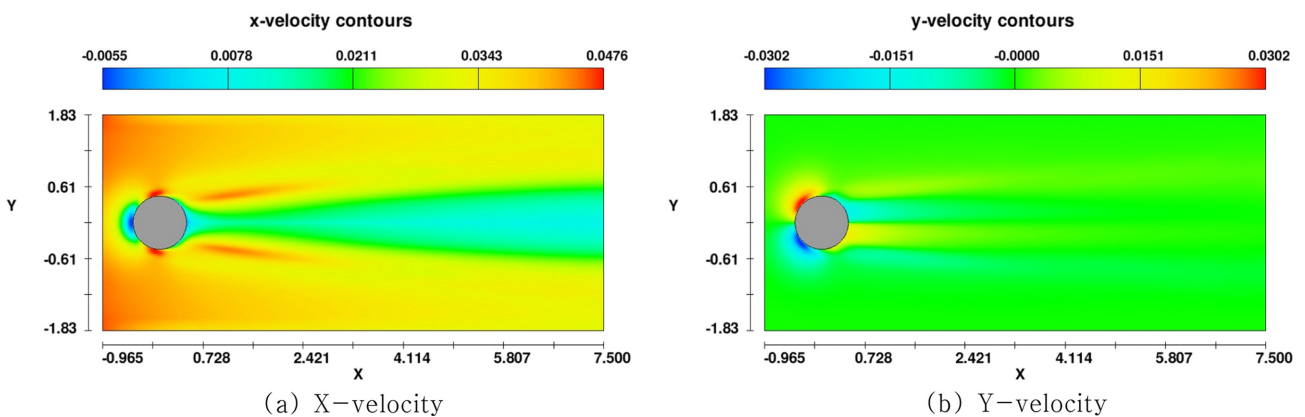


Fig. 11. Distribution of velocity at bottom layer(Case 2).

탕으로 유속을 변화시켜 무차원 매개변수와 상대 세굴심의 상관관계 분석하였다. 그 결과 FLOW-3D가 세굴을 잘 재현함을 알 수 있었다.

모노파일 기초 주변에 세굴방지 효과 연구를 위해 해저면에 환

형 세굴방지공을 부착하여 실험을 수행하였으며, 세굴방지공 설치 후 약 68.5%의 세굴 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 하강 유속과 구조물 주변 저층 유속이 감소한 것을 확인하였다. 이는 세굴방지공이 세굴에 영향을 미치는 하강류를 제어하는 효과를 보이는

것으로 판단된다.

본 연구에서는 정상류 상태의 일 방향 흐름 조건에서만 수치실험을 실시하였기 때문에, 추후 대상해역의 환경을 고려한 연구가 수행되어야 할 것이며, 세굴방지공 유무에 따른 세굴방지 효과만 연구하였기 때문에 추후에는 세굴방지공의 직경, 높이와 같은 제원 변경에 따른 연구 또한 수행되어야 할 것으로 판단된다.

또한 수리모형실험 결과와 수치실험 결과를 비교하여 검증하였으나, 향후 현장조사를 통한 정확한 검증이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원이 지원하는 “운용-해양(해양예보)시스템 연구(2단계)” 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Cho, H.Y., Kim, K.H. and Yang, S.R., 2009, “Local Scour around Submarine Piles due to Waves”, J. Inst. Const. Tec., Vol. 28, No. 2, 65-78.
- [2] Dargai, B., 1989, “The turbulent flow field around a circular cylinder”, Exp. Fluids, Vol. 8, No. 1, 1-12.
- [3] FLOW SCIENCE, 2014, “FLOW-3D User’s Manual, Version 11.0.3”.
- [4] Kikkawa, H., Fukuoka, S., Iwama, H. and Soogawa, H., 1971, “Study on Scouring around Bridge pier and its Prevention”, J. JSCE, Vol. 1971, No. 194, 83-90.
- [5] Ko, D.H., Jeong, S.T. and Oh, N.S., 2015, “Numerical Simulation Test of Scour around Offshore Jacket Structure using FLOW-3D”, J. Korean. Soc. Coast. Ocean. Eng. Vol. 27, No. 6, 373-381.
- [6] Neill, C.R., 1968, “Note on initial movement of coarse uniform bed material”, J. Hydraul. Res., Vol. 17, No. 2, 247-249.
- [7] Oh, M.H., Kwon, O.S., Jeong, W.M. and Lee, K.S., 2012, “FLOW-3D Analysis on Scouring around Offshore Wind Foundation”, J. Korea. Acad. Industr. Coop. Soc., Vol. 13, No. 3, 1346-1351.
- [8] Olsen, N.R.B. and Melaaen, M.C., 1993, “Three-Dimensional Calculation of Scour around Cylinders”, J. Hydraul. Eng., Vol. 119, No. 9, 1048-1054.
- [9] Richardson, E.V. and Davis, S.R., 1995, “Evaluating scour at bridge”, FHWA Rept. HEC-18, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- [10] Shin, C.H., 2011, “A Study on Local Pier Scour Reduction Using 3D Numerical Simulation”, Hanyang University Master’s thesis, 1-56.
- [11] Shin, S.H. and Hong, K.Y., 2004, “An Experimental Study of Sediment Transport Patterns behind Offshore Structure”, J. Korean Soc. Mar. Environ., Vol. 7, No. 4, 207-215.
- [12] Son, A.L., Kim, B.H., Moon, B.R. and Han, K.Y., 2015, “An Analysis of Bed Change Characteristics by Bed Protection Work”, J. Korean. Soc. Civ. Eng., Vol. 35, No. 4, 821-834.
- [13] Son, K.S., 2014, “Investigation of Reduction Methods for the Local Scour around the Cylindrical Pile in the Wave Fields”, Chungbuk National University Doctor’s thesis, 1-123.
- [14] Sumer, B.M., Christiansen, N. and Fredsoe, J., 1993, “Influence of Cross Section on Wave Scour Around Piles”, J. Waterw. Port. C., Vol. 119, No. 5, 477-495.
- [15] Torsethaugen, K., 1975, “Local crossjonved store konstuksjoner Model Iforsok (Norvcgian)”, Vassdragsog Havne-laboratoriet, Trondheim.

Received 9 February 2017

1st Revised 15 April 2017, 2nd Revised 1 May 2017

3rd Revised 16 May 2017

Accepted 19 May 2017