

세굴된 해저 파이프 주위 중력류의 유동 해석

정재환* · 윤현식**†

* 부산대학교 조선해양공학과, ** 부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터

Numerical Analysis of Gravity Current Flow past Subsea Pipe above a Scour

Jae Hwan Jung* · Hyun Sik Yoon**†

* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

** Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요 약 : 본 연구에서는 세굴된 해저 파이프 주위 중력류의 유동 해석을 수행하였다. 결과 비교를 위해 세굴이 아닌 평평한 해저면 위에 틈새 거리를 두고 설치된 해저 파이프 문제를 함께 고려하였다. 여기서 세굴의 깊이와 틈새 거리는 동일하며, 평평한 해저면 위에 설치된 파이프 문제는 일반적으로 실제 세굴효과를 이상적으로 구현하기 위해 주로 고려된다. 중력류와 해저 파이프 상호작용에 대한 유동특성의 이해를 위해 농도 및 와도장, 압력장 그리고 양항력 계수 등, 다양한 물리량들을 비교 및 분석 하였다. 결과적으로 세굴과 평평한 해저면 위에 설치된 해저 파이프 주위 유동특성이 달라짐을 관찰하였다. 특히 세굴의 위 파이프의 경우 구조물 상부에서 발달된 음의 와만 하류로 나아가게 되지만 평탄면 위 파이프는 이열 와구조 형태를 가지는 것을 확인하였다. 따라서 중력류에 놓인 해저 파이프의 안전 설계를 위해서는 무엇보다 실제 세굴조건을 고려하는 것이 중요 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 세굴, 중력류, 해저 파이프, 와홀림, 양항력

Abstract : Gravity current flow past a subsea pipe above a scour based on computational fluid dynamics. For comparison, gravity current flow over pipe above a smooth bed also calculated, this configuration conventionally employed to consider the scour effect from an ideal approach. Interestingly, there different flow features and hydrodynamic forces between the scour and smooth bed cases. These results indicate that realistic condition very important investigate the scour effect on gravity current flow around subsea pipe.

Key Words : Scour, Gravity current, Subsea pipe, Vortex shedding, Lift & Drag

1. 서 론

육상 자원이 고갈되어 가고 유용한 광물 자원들과 유전이 심해에 지속적으로 발견됨에 따라 해양자원 및 에너지원 개발을 위한 글로벌 경쟁이 가속화 되고 있다. 이와 맞물려 심해자원 탐사와 해양유전 및 해저자원 개발을 위해 심해구조물들의 설치 수요가 증가하고 있으나 해저면의 퇴적과 주위 유동 환경의 이해를 바탕으로 구조물들을 안전하게 보호할 수 있는 설계기준의 수립에 관련된 연구는 미비한 실정이다. 이러한 관점에서 해저 환경의 이해와 심해구조물들의 안정성 확보를 위해 중력류(Gravity current) 또는 저탁류(Turbidity current)에 관한 연구는 중요하다(Simpson, 1997). 저탁류는 대

륙붕 또는 해저계곡 근처의 경사가 급한 지역 위에 있는 퇴적물이 폭풍이나 지진 그리고 해일의 충격을 받아 대륙사면 하부로 빠르게 이동하는 퇴적물의 흐름을 뜻한다. 특히 저탁류는 경사면을 따라 이동시 토사 혼합물로 인해 주변 유체보다 더 높은 밀도를 가지게 되어 밀도차에 의해 상대적으로 낮은 밀도를 지닌 유체가 있는 곳으로 사면 또는 해저면을 따라 이동하기 때문에 퇴적물 중력류라고도 한다. 이러한 중력류의 최대 높이와 속도는 대략적으로 100 m 그리고 1-10 m/s 까지 도달할 수 있기 때문에 중력류 발생 시 주변 퇴적환경과 심해구조물에 심각한 악영향을 끼칠 수 있다(Kneller et al., 1999; Gonzalez-Juez et al., 2009a; 2009b; 2010). 따라서 중력류에 관한 연구는 유체와 토사의 혼합물의 이동과정에 기인하는 변화 과정을 이해하고 중력류 발생으로부터 구조물의 안전을 확보하는데 도움이 된다.

최근 심해 파이프 구조물과 중력류의 상호작용으로부터

* First Author : vof@pusan.ac.kr, 051-510-3176

† Corresponding Author : lesmodel@pusan.ac.kr, 051-510-3685

유발되는 구조물의 유체동력학적 하중과 관련된 실험 및 수치적 연구가 진행되고 있으며, 일반적으로 중력류로 인해 심해 구조물이 받는 하중 특성은 충돌(Impact), 과도(Transient) 그리고 준정상(Quasi-steady) 단계 나누어져, 일반 균일유동 흐름에 놓인 심해구조물들이 받는 하중 특성과 차별되는 것으로 알려져 있다(Ermanuyk and Gavrilov, 2005a; 2005b; Gonzalez-Juez et al., 2009a; 2009b; 2010). 여기서 충돌단계는 중력류가 심해 구조물에 충돌할 때 갑작스럽게 하중이 상승하는 상황을 말하며, 이후 중력류와 구조물의 상호작용으로 인해 시간에 따라 매우 불규칙한 하중이 발생하는 과도단계로 접어든다. 그리고 균일류에 놓인 구조물에 발생하는 주기적인 하중 특성과 유사한 특성을 갖는 준정상 단계로 이어진다. 특히 선행 연구들에서 심해 파이프와 해저면 사이의 거리 변화가 구조물에 미치는 영향을 증점적으로 살펴보았는데, 이러한 이유는 세굴 현상으로 인해 파이프와 해저면 사이에 빈 공간이 발생하기 때문이다(Fig. 1).

세굴의 일반적인 발생 원인으로는 조류 발생 시 해저면 바닥에 설치된 파이프의 전후면에서 압력차가 발생하게 되는데 이러한 압력차가 일정 값 이상을 넘어서게 되면, 모래층 표면이 부유하게 되고 이후 모래와 물의 혼합물이 파이프 하부로 쓸려나가게 된다. 결과적으로 파이프의 전후면의 압력 차이는 침투류의 관공현상(Piping)을 유발시켜 세굴을 일으키게 된다. 지속적인 관공작용으로 인해 야기된 급격한 침식 작용 이후, 모래층 표면의 허용전단응력이 한계 전단응력에 이를 때까지 세굴은 지속적으로 발달하게 된다(Kim and Oh, 2011; Sumer and Fredsøe, 2002).

Gonzalez-Juez et al.(2009b)와 Gonzalez-Juez et al.(2010)은 직접적인 세굴의 형상을 고려하여 연구를 수행하기보다 문제를 단순화 시켜 평평한 해저면과 구조물 사이의 틈새 거리 변화가 구조물 하중과 주위 유동에 어떠한 영향을 미치는지 상세히 분석하였으며 거리 범위는 일반적으로 알려진 세굴의 깊이 변화를 고려하였다. 세굴은 일반적으로 파이프(Piping), 터널침식(Tunnel erosion) 그리고 평형단계(Equilibrium stage)를 거치면서 발달하게 되고 이 과정동안 구조물 주위에 복잡한 유동변화를 수반하게 된다(Whitehouse 1998; Sumer and Fredsøe, 2002). 따라서 세굴이 존재할 경우 중력류에 놓인 심해 구조물 주위 유동 및 하중특성은 평평한 해저면에 일정 거리로 떨어진 구조물 문제와 차별되는 결과가 존재할 것으로 예상된다.

저자들의 조사에 의하면, 균일유동 또는 다양한 해양파에 놓인 심해구조물에 세굴이 미치는 효과에 대한 연구는 상당히 많이 진행되었음에도 불구하고 중력류에 놓인 심해구조물에 세굴이 미치는 효과에 관한 연구는 국내외적으로 Jung and Yoon(2016)의 연구를 제외하고 찾기 어려운 실정이다. 따

라서 본 연구에서는 세굴의 깊이와 틈새거리를 동일하게 하였을 때 구조물 주위 유동특성에 어떤 차이가 발생하는지 관찰하고자 하며, 여기서 평평한 해저면 위에 설치된 파이프 문제는 일반적으로 실제 세굴효과를 이상적으로 구현하기 위해 주로 고려된다.



Fig. 1. Schematic of scour process in currents.

2. 수치해석 방법

2.1 문제정의 및 유동해석을 위한 매개변수 범위선정

중력류와 심해 구조물의 상호작용에 대한 유동해석을 위해서 고려된 해석영역은 Fig. 2와 같으며 Gonzalez-Juez et al. (2009b)과 Jung and Yoon(2016)의 해석영역과 동일하다. 길이 L 과 높이 H 를 가지는 채널은 농도차를 가지는 두 개의 영역으로 나누어진다. 즉 높은 농도(c_1)와 밀도(ρ_1)의 유체가 갇혀진 잠금 영역(Lock region)과 상대적으로 낮은 농도(c_0)와 밀도(ρ_0)의 유체가 존재하는 외부 영역이다. 여기서 잠금 및 외부 영역의 유체의 밀도 차는 농도 차에 기인하는 것으로 가정하며 선형적인 관계를 가진다.

잠금 영역의 길이와 높이는 l 과 h 로 정의되며 해석 영역의 길이와 높이는 잠금 영역의 높이, 즉 중력류의 초기 높이를 이용하여 무차원화 하였다. L/h 와 H/h 는 각각 24와 5로 고려하였으며 잠금 영역의 길이와 해저 파이프 직경의 l/h 와 D/h 는 각각 9와 0.15의 값을 가진다. 이러한 설정은 중력류의 일반적인 높이와 해저 파이프의 직경을 고려한 것이다(Gonzalez-Juez et al., 2009b; 2010). 잠금 영역과 실린더 사이의 거리는 $l/h = 3$ 이며 이 거리에서 중력류의 전방 속도(Front speed)가 일정 값에 도달한다(Simpson, 1997). 세굴이 해저 파이프 주위 유동에 미치는 영향을 분석하기 위해서 고려한 세굴의 형상 정의는 Sumer et al.(1989)의 연구를 참고하였으며 세굴 발달과정에 따른 일반적인 세굴의 깊이(S)는 $0.067 \leq S/D \leq 1.33$ 의 범위를 가진다(Sumer and Fredsøe, 1990; Liang and Cheng, 2005). Gonzalez-Juez et al.(2009b)와 Gonzalez-Juez et al.(2010)는 세굴의 기하학적 형상을 고려하지 않고 세굴의 깊이를 파이프와 평평한 해저면 사이 틈새 거리(G)로 대신하여 관련 연구를 수행하였으며 대표 틈새 거리로 $G/D = 1.0$ 을 사용하였다. 따라서 연구결과 비교를 위해 본 연구에서는 $S/D = 1.0$ 을 고려하였으며 이 깊이는 세굴의 발달 단

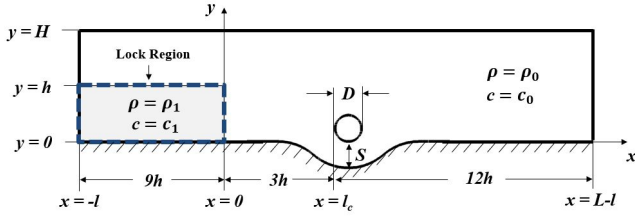


Fig. 2. Schematic of the flow configuration.

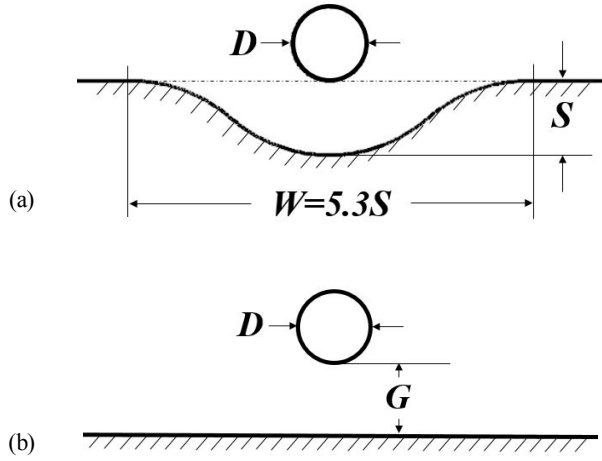


Fig. 3. Definition of (a) the scour depth and width, (b) gap distance.

계 중 파이프와 터널 침식 단계 이후에 발생하는 깊이이므로 유동 흐름에 따른 세굴 형상 변화가 더디다. 따라서 본 연구에서는 중력류와 파이프의 상호작용에 따른 세굴 형상의 실시간 변화를 고려하지 않았으며 고정된 세굴 형상을 사용하였다. 본 연구에서 고려한 $G/D = 1.0$ 과 $S/D = 1.0$ 에 대한 형상정보를 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 지배방정식

중력류에 놓인 실린더 주위 유동을 모사하기 위해 고려한 지배방정식은 비정상, 비압축성 유동해석에 대한 것으로 유한체적법을 기반으로 한 연속, 운동량 그리고 농도장 방정식은 아래 식(1)-(3)과 같으며 부력속도, $u_b = (g'h)^{1/2}$ 와 잠금 영역의 높이(h)를 이용하여 방정식을 무차원화 하였다. 여기서 g' 은 감쇄중력(Reduced gravity)을 의미하며 $g' = g(\rho_1 - \rho_0)/\rho_0$ 로 정의된다. 중력류의 흐름은 외부 유동흐름에 기인한 것이 아니라 유체의 농도차에 기인한 밀도차에 의해 발생하는 것이므로 감쇄중력이 고려된 부력속도를 통해 무차원 시키는 것이 타당하다고 판단되며, 중력류에 관한 많은 선행 연구들에서 부력 속도를 도입하여 지배방정식의 무차원을 성공적으로 수행하였다(Cantero et al., 2007; Gonzalez-Juez et al., 2009a; 2009b; 2010; Jung and Yoon, 2016).

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial u_i^* u_j^*}{\partial x_j^*} \\ = -\frac{\partial p^*}{\partial x_j^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left(\frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial u_j^*}{\partial x_i^*} \right) + c^* e_i^j + f_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial c^*}{\partial t^*} + \frac{\partial c^* u_j^*}{\partial x_j^*} = \frac{1}{Re Sc} \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left(\frac{\partial c^*}{\partial x_j^*} \right) + S \quad (3)$$

여기서 u_i^* , x_i^* , p^* , c^* 그리고 t^* 는 무차원 속도, 좌표계, 압력, 농도 그리고 시간을 나타내며 각 변수들은 $u_i^* = u_i/u_b$, $c^* = (c - c_0)/(c_1 - c_0)$, $p^* = (p - p_{ref})$ 그리고 $t^* = t/(h/u_b)$ 로 정의된다. 본 연구에 고려된 지배 방정식에서 두 개의 무차원수가 사용되는데 Re 는 레이놀즈 수(Reynolds number) 그리고 Sc 는 슈미트 수(Schmidt number)를 각각 의미한다. Re 는 $u_b h/\nu$ 그리고 Sc 는 ν/κ 로 정의되며 여기서 ν 와 κ 는 동점성계수와 분자확산계수를 각각 나타낸다. 유동 해석에 있어 농도 차에 기인한 밀도 차를 1% 내로 고려하였기 때문에 지배 방정식에 부시네스크 근사(Boussinesq approximation)를 적용하였다(Cantero et al., 2007; Gonzalez-Juez et al., 2009a; 2009b; 2010). 즉, 밀도 변화는 부력 항만 관련 있다. e_i^j 는 중력방향에 대한 단위벡터를, f_i 와 S 는 체적력과 농도의 소스(source)를 나타낸다.

파이프를 실린더 바닥면에 가까이 위치시킬 때 일반화 좌표계를 고려하면 격자 생성에 있어 많은 제약이 따른다. 따라서 이러한 문제를 극복하기 위한 방안으로 Höfler and Schwarzer (2000)과 Yu and Shao(2007)가 제안한 direct forcing/fictitious domain(DF/FD) 방법을 도입하였다. DF/FD법은 고정된 직각 좌표계에서 유체 속에 정지 또는 운동하는 임의의 형상을 가진 물체 주위 유동특성 연구를 위해 가상 경계법에 기반을 두고 개발되어진 기법이다. Jung and Yoon(2016)은 본 연구와 동일한 해석기법을 사용하여 중력류와 실린더의 상호작용에 관한 유동 시뮬레이션을 성공적으로 수행하였으며, Navier-Stokes 방정식과 DF/FD 연계방법에 대한 상세한 내용은 Yoon et al.(2013)을 통해 참고할 수 있다.

본 연구에서는 레이놀즈 수를 6,000 그리고 슈미트 수는 1을 고려하였으며 이 값들은 Gonzalez-Juez et al.(2009b)의 연구를 참고하였다. Gonzalez-Juez et al.(2009a)는 차수가 4자리 이상 되는 높은 레이놀즈 수($Re \geq O(10,000)$)에서는 2차원 유동해석이 파이프의 비물리적인 양력 섭동 값을 가진다고 지

적하였다. 따라서 본 연구에서는 $Re \leq O(10,000)$ 에 해당하는 $G/D = 6,000$ 에서 유동의 3차원 효과가 지배적이지 않다고 판단하여 Gonzalez-Juez et al.(2009b)의 연구와 동일한 방법인 2차원 유동해석을 수행하였다. 그리고 난류에 기인한 유동 특성들은 난류모형의 적용 대신 조밀 격자를 이용하여 직접 해상할 수 있도록 하였다(Gonzalez-Juez et al., 2009a; 2009b; 2010).

2.3 경계조건 및 수치해석기법

채널 바닥면($y = 0$)과 좌측면($x = -l$) 그리고 파이프 표면에 점착 조건(No-slip condition)을, 채널의 우측면에 대류경계조건을 적용하였으며 나머지 면은 대칭조건을 부여하였다. 그리고 농도 경계조건에 대해서는 zero normal-gradient 조건을 적용하였다. 초기조건으로 잠금 및 외부 영역에 관계없이 정지된 유체를 고려하였으며 무차원 농도 c^* 는 잠금 및 외부 영역에 1과 0의 값이 각각 사용되었다.

본 연구의 지배방정식은 보존형 유한체적법(Conservative finite volume formulation)으로 이산화 되어졌다. 시간 차분에 대해서 two-step time-splitting법을 이용하였으며, 운동량 방정식의 대류항과 외력항은 2차 정확도의 Adams-Bashforth법을, 확산항은 2차 정확도의 Crank-Nicolson법이 각각 사용되었다(Crank and Nicolson, 1947; Hairer et al., 1993).

2.4 수치코드의 검증

수치코드의 검증을 위해서 격자 의존성 테스트 수행과 더불어 본 연구와 선행연구 결과들 간의 비교 및 검토를 하였다. 먼저 격자 의존성 테스트를 위해서 세 개의 격자 시스템을 고려하였고 이에 대응하는 격자수($N_x \times N_y$)는 $2,000 \times 300$, $3,000 \times 400$ 그리고 $4,000 \times 500$ 이다. 여기서 코드검증에 사용된 격자시스템은 Jung and Yoon(2016)의 격자시스템과 동일하다. 결과 비교를 위해 $Re = 6,000$ 과 $G/D = 1.0$ 에서 계산된 Gonzalez-Juez(2009b)의 양력 시계열 값을 사용하였다. Fig. 4는 세 개의 격자 시스템에서 얻은 양력 시계열값과 Gonzalez-Juez (2009b)의 수치해석 결과를 보여주고 있으며 성긴(Coarse) 격자계의 결과를 제외하고 해석결과의 격자 의존성이 크지 않은 것으로 판단된다. 따라서 계산시간, 해석결과의 신뢰성 등을 고려하여 중간(Medium)계를 연구 진행을 위해 사용하였다. 중력류에 놓인 실린더 주위 유동문제에 추가로 일정 밀도를 가지는 균일류를 고려하여 실린더 주위 유동해석을 수행하였으며, 이에 따른 양항력 결과를 선행연구 결과들과 비교하였다. 그 결과, 본 연구와 선행 연구들의 실린더의 평균 항력과 양력의 제곱평균제곱근(CL,rms) 값 그리고 스트롤수(Strouhal number)의 차이가 약 4% 이내인 것을 확인하였다(Jung and Yoon, 2016).

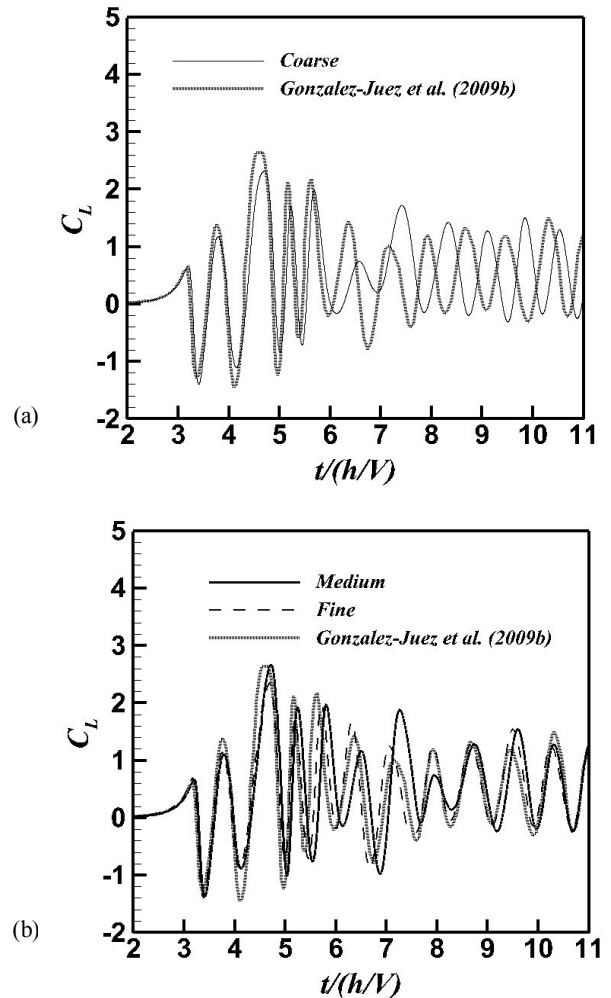


Fig. 4. Comparison of time histories of lift coefficients with that of Gonzalez-Juez et al. (2009b) according to grid systems: (a) coarse grid system and (b) medium and fine grid systems.

3. 해석결과 및 토의

본 연구에서는 $S/D = 1.0$ 과 $G/D = 1.0$ 에서 중력류에 놓인 파이프 주위 유동특성의 비교를 통해 세굴이 파이프에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 먼저 세굴이 존재할 때 중력류에 놓인 파이프 주위 농도 및 와도장을 관찰하여 기본적인 중력류와 파이프의 상호작용에 관한 유동 특성을 이해하고 $S/D = 1.0$ 과 $G/D = 1.0$ 의 양항력, 압력 분포를 비교하고자 한다. 참고로, $G/D = 1.0$ 의 농도장과 와도장의 결과는 Gonzalez-Juez et al.(2009b)와 Gonzalez-Juez et al.(2010)를 통해 참고가 가능하므로 본 논문에서는 $S/D = 1.0$ 의 농도장 및 와도장 결과만 나타내었다.

3.1 $S/D = 1.0$ 에서 중력류의 농도장 및 와도장 변화

Fig. 5는 시간변화에 따른 중력류의 농도장 변화를 나타내며 무차원 농도 c^* 는 0에서 1까지의 범위를 가진다. 잠금 영역이 풀리면 농도 차에 기인한 밀도 차에 의해 중력류가 해저면을 따라 파이프가 있는 방향으로 이동하게 된다. 밀도가 다른 두 유체의 상호작용으로 인해 경계면에서 Kelvin-Helmholtz billow가 발생하는 것을 Fig. 5(a)를 통해 확인할 수 있다. 중력류의 전방 속도(Front speed), V 는 농도장의 등치선(Iso-line)의 0.5를 기준으로 중력류가 이동할 때 가장 앞선 등치선의 추적을 통해 얻어진다. 중력류가 구조물과 충돌하기 직전, $Re = 6,000$ 에서 무차원화 된 전방 속도(V/u_b)는 0.62이며 이 속도를 이용하여 항력 및 양력계수를 계산하였다. 또한 무차원 전방 속도는 Gonzalez-Juez et al.(2009b; 2010)의 결과와도 잘 일치하는 것을 확인하였다. 중력류가 해저 파이프와 만나게 되면 중력류의 머리(head)는 파이프의 상하부로 나누어져 이동하게 되면서 초기 중력류의 형태를 잃게 되고 파이프 주위 농도장의 급격한 변화가 생기는 것을 Figs. 5(b)와 (c)를 통해 확인할 수 있다. 그러나 중력류가 새로운 형태를 가지며 다시 하류로 이동하게 됨에 따라 파이프 주위의 농도장의 변화는 일정하게 유지되는 것을 Fig. 5(d)를 통해 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 시간변화에 따른 중력류의 와도장 변화를 보여준다. Kelvin-Helmholtz billow로 인해 복수개의 양의 와도가 유체의 경계면에서 형성된 것을 확인할 수 있으며 바닥면에서 형성된 음의 와는 경계층 발달로 인해 생성된 것을 Fig. 6(a)를 통해 확인할 수 있다. 중력류와 파이프가 충돌한 이후 중력류가 파이프 상하부를 따라 분리되면서 파이프 상하부에 음과 양의 와가 형성되고 중력류의 형태가 변하게 되면서 복잡한 양과 음의 와들이 하류에 형성된 것을 Figs. 6(b)와 (c)의 관찰을 통해 확인할 수 있다. 복잡한 형태의 중력류가 하류로 이동하게 되면 파이프에서 와홀림(Vortex shedding)이 관찰된다. 그러나 세굴의 코너에서 발생하는 음의 와와 파이프 하부에 발생하는 양의 와의 강한 상호작용으로 인해 오직 실린더 상부의 음의 와만 하류로 나아가는 것을 Fig. 6(d)를 통해 확인할 수 있다. 이러한 유동현상은 Jung and Yoon(2016)의 수치결과에서도 관찰된 바 있다.

3.2 S/D 및 $G/D = 1.0$ 의 항력 및 양력 시계열 비교

Fig. 7은 $S/D = 1.0$ 과 $G/D = 1.0$ 에서 시간 변화에 따른 양항력을 비교하였다. 먼저 $S/D = 1.0$ 의 항력 및 양력 시계열을 앞선 결과인 농도 및 와도장과 비교해서 보면, 잠금 영역이 풀린 뒤 중력류가 파이프가 있는 쪽으로 이동하게 됨에 따라 항력과 양력은 점점 증가하는 것을 확인할 수 있다. $t^* = 3.3$ 에서 중력류가 파이프와 충돌하게 되면서 첫 번째 항력

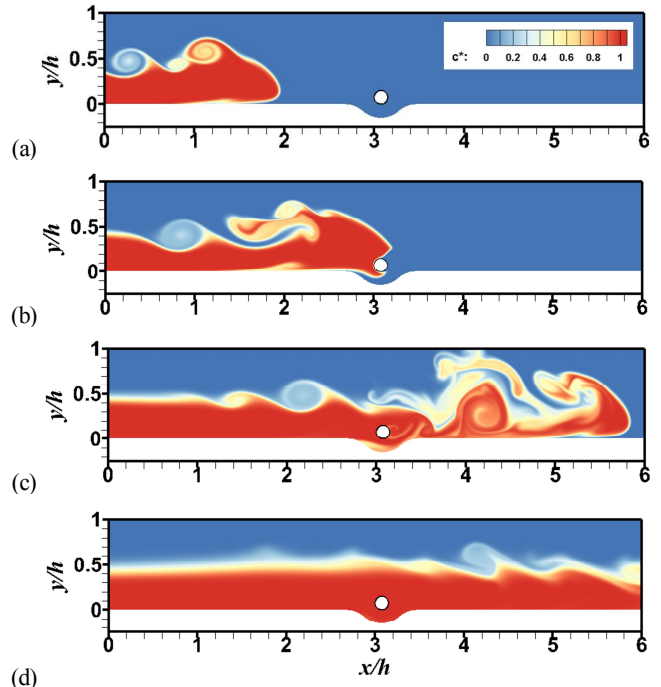


Fig. 5. Evolutions of the concentration fields for $S/D = 1.0$ at $Re = 6,000$: (a) $t^* = 1.86$, (b) $t^* = 3.53$, (c) $t^* = 6.51$, and (d) $t^* = 12.71$.

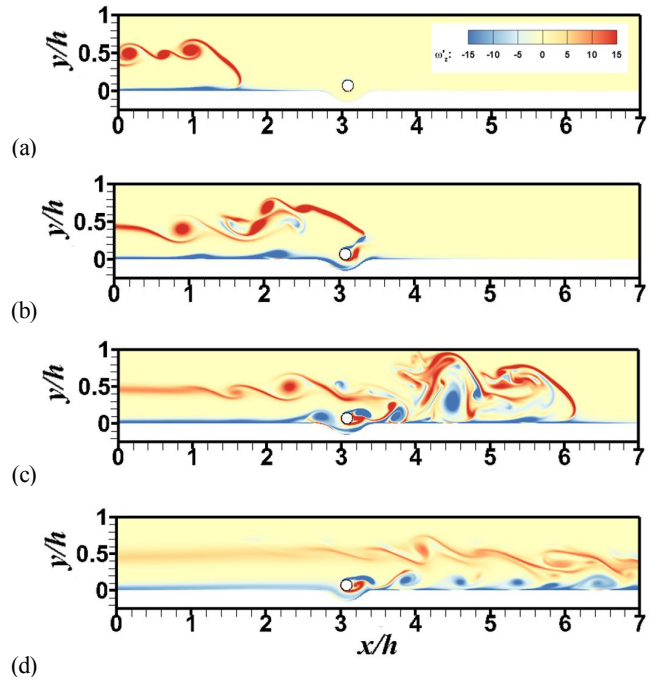


Fig. 6. Evolutions of the vorticity fields for $S/D = 1.0$ at $Re = 6,000$: (a) $t^* = 1.86$, (b) $t^* = 3.53$, (c) $t^* = 6.51$, and (d) $t^* = 12.71$.

과 양력의 최대값이 발생하게 되고 이후 $t^* = 9.5$ 까지 t^* 양항력의 변화가 비정상적인 거동을 하게 되는 것을 확인할 수 있다. $t^* = 9.5$ 이후 항력은 섭동 없이 지속적으로 감소하며 양력은 주기적인 변화를 가지면서 점차 감소하는 것을 Figs. 7(a)와 (b)의 관찰을 통해 확인할 수 있다. 이러한 양항력 시계열 변화 패턴은 Gonzalez-Juez(2009a; 2009b)와 Gonzalez-Juez(2010)의 연구결과에서도 관찰된 바 있으며 Ermanyuk and Gavrilov(2005a; 2005b)는 이러한 양항력 시계열 변화 패턴을 통해 중력류와 구조물의 상호작용에 대해 충돌(Impact), 과도(Transient) 그리고 준정상(Quasi-steady) 단계로 나누어 중력류와 구조물의 상호작용 특성에 대해 분석하였다. 이제 $S/D = 1.0$ 과 $G/D = 1.0$ 의 결과를 비교해보면, 시간 변화에 관계없이 $S/D = 1.0$ 보다 $G/D = 1.0$ 의 양항력의 크기와 섭동이 크게 예측되는 것을 확인할 수 있다. $G/D = 1.0$ 에서 충돌단계의 첫 번째 최대 항력은 준정상 단계에서 평균 항력보다 3배 크지만 $S/D = 1.0$ 에서는 2.5배 정도 크게 나오는 것을 확인하였다. $S/D = 1.0$ 과 $G/D = 1.0$ 에 관계없이 준정상 단계에서

두 양력 모두 주기적으로 진동하는 것이 관찰되며 $S/D = 1.0$ 보다 $G/D = 1.0$ 의 CL_{rms} 이 3배 더 큰 것을 확인할 수 있다. 주기적인 양력 변화는 구조물의 진동을 유발 시킬 수 있기 때문에 파이프 하부 세굴의 폭과 깊이 변화에 따른 양력특성을 예측하는 것은 중요하다고 판단된다. Gonzalez-Juez(2009b)와 Gonzalez-Juez(2010)는 세굴을 고려하지 않고 세굴의 깊이를 구조물과 평평한 해저 바닥면 사이의 거리로 대체하여 관련 연구를 수치해석을 통해 수행하였다. 그러나 본 연구 결과를 통해 실제로 세굴의 존재가 파이프의 양항력 특성에 많은 영향을 끼치므로 세굴의 폭과 깊이 변화가 파이프 주위 유동 특성에 미치는 효과에 대한 연구는 중요할 것으로 판단된다.

3.3 S/D 및 $G/D = 1.0$ 의 파이프의 표면 압력계수 분포 및 와도장 비교

$S/D = 1.0$ 과 $G/D = 1.0$ 의 양항력 차이를 이해하기 위해 파이프 표면의 압력계수 분포를 서로 비교하였다. Fig. 8은 $S/D = 1.0$ 과 $G/D = 1.0$ 에서 충돌단계($t^* = 3.3$)와 준정상 단계($t^* \geq 9.5$)의 파이프 표면의 순간 및 평균압력계수 분포를 각각 보여준다. 여기서 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 는 파이프의 중심선을 기준으로 상부면을, $0^\circ \leq \theta \leq -180^\circ$ 는 하부면을 의미한다. 충돌 단계에서 첫 번째 최대 항력값이 나타나는 $t^* = 3.3$ 에서의 파이프 표면의 순간 압력분포를 살펴보면 $G/D = 1.0$ 에서 파이프의 전면부($0^\circ \leq \theta \leq \pm 90^\circ$)의 압력이 $S/D = 1.0$ 의 압력 분포보다 더 크게 형성되는 것을 확인할 수 있고, 특히 $60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 에서 더 크다(Fig. 8(a)). 이 결과로부터 $S/D = 1.0$ 보다 $G/D = 1.0$ 의 양항력이 더 크게 나타나는 원인을 이해할 수 있으며, 이는 유체가 세굴 또는 평평한 해저면과 파이프 사이 공간을 지나는 유동특성의 차이에 기인한다. 즉, 파이프와 하부면 사이 공간 변화가 유체의 유동 변화에 영향을 주어 파이프의 상하부에 작용하는 압력변화를 이끌어내는 것으로 판단된다.

세굴 형상을 따라 변하는 준정상 단계에서 평균압력분포를 살펴보면 $G/D = 1.0$ 에서는 상하부가 대칭적인 압력분포를 가지지만, $S/D = 1.0$ 의 압력분포는 비대칭적인 것을 알 수 있다(Fig. 8(b)). 이러한 이유는 $S/D = 1.0$ 의 경우 세굴의 코너에서 발생하는 음의 와와 파이프 하부에 발생하는 양의 와의 강한 상호작용 때문에 파이프 상부에서 발달된 음의 와만 하류로 나아가게 되지만 $G/D = 1.0$ 에서는 이러한 반대 부호를 가지는 와들의 상호작용이 약하기 때문에 파이프 하부에 발달되는 양의 와가 빠르게 소산되지 않고 상부의 양의 와와 함께 하류로 나아가는 이열 와구조 형태를 띠기 때문이다. 이것은 Fig. 9에서 $S/D = 1.0$ 와 $G/D = 1.0$ 의 순간 와도장 비교를 통해 확인할 수 있으며, 여기서 사용된 컨투

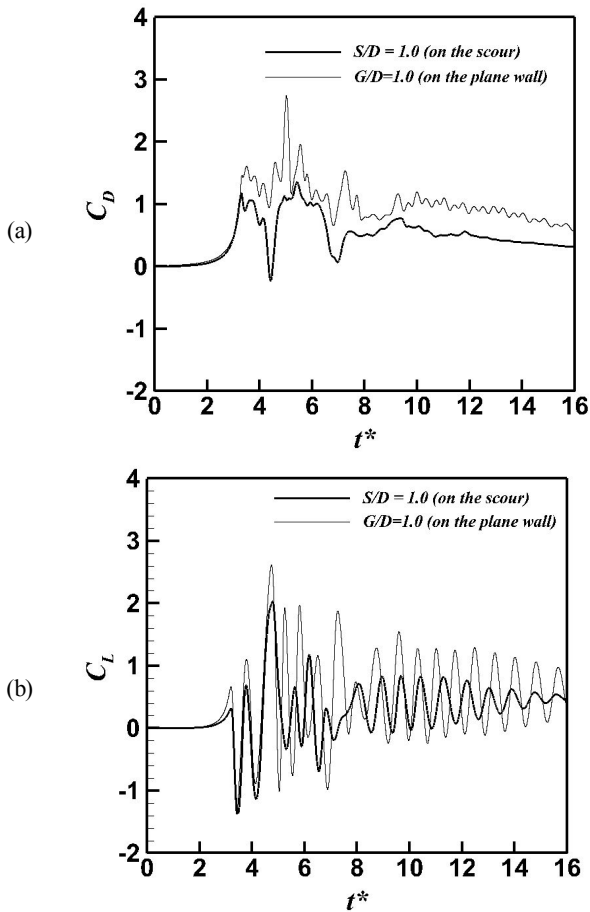


Fig. 7. Time histories of (a) drag and (b) lift coefficients for the scour and smooth bed cases.

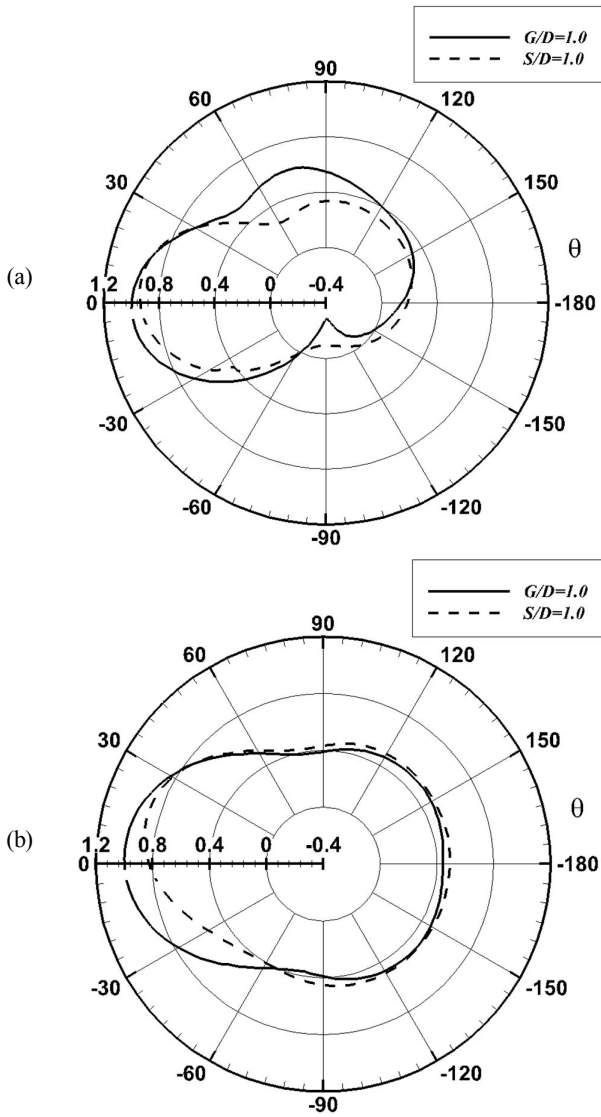


Fig. 8. Pressure distributions on the pipe surface (a) at the impact stage, and (b) during the quasi-steady state stage.

어 레이블은 Fig. 6과 동일하다. 앞선 결과들을 통해, 실제 세굴을 고려한 경우와 이상적으로 평탄면을 고려한 경우에서 얻어지는 결과 차이가 명확히 존재하므로 실제 세굴이 증력류와 구조물의 상호작용에 미치는 효과에 대한 연구가 체계적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 세굴된 해저 파이프 주위 증력류의 유동 해석을 수행하였다. 기존 연구들은 세굴을 파이프와 평평한 바닥면 사이 틈새 거리로 대체하여 유동장 특성을 평가하였

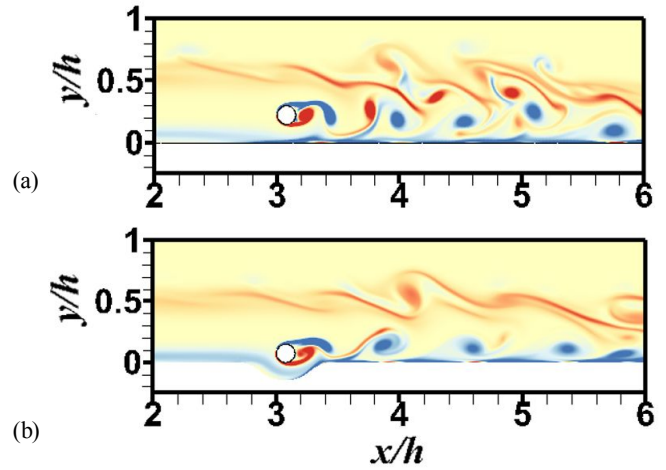


Fig. 9. Instantaneous vorticity fields of (a) $G/D = 1.0$, and of (b) $S/D = 1.0$ at the quasi steady state stage.

다. 그러나 본 연구 결과를 통해 세굴과 평탄면, 즉 두 조건에서 다른 물리적 특성을 지님을 확인하였다. 따라서 세굴의 영향성 평가를 위해서는 실제 세굴의 형상변화를 고려하는 것이 중요하다고 판단되며, 본 연구에 대해 요약된 내용은 아래와 같다.

(1) $S/D = 1.0$ 보다 $G/D = 1.0$ 의 양항력의 크기와 섭동이 더 크게 나타나며, $G/D = 1.0$ 에서 충돌단계의 첫 번째 최대 항력은 준정상 단계에서 평균 항력보다 3배 크지만 $S/D = 1.0$ 에서는 2.5배 정도 크게 나오는 것을 확인하였다.

(2) $S/D = 1.0$ 과 $G/D = 1.0$ 에 관계없이 준정상 단계에서 양력이 주기적으로 진동하는 것이 관찰되며 $S/D = 1.0$ 보다 $G/D = 1.0$ 의 CL_{rms} 가 3배 더 큰 것을 확인하였다.

(3) $S/D = 1.0$ 과 $G/D = 1.0$ 의 양항력 차이를 이해하기 위해 파이프 압력분포를 비교하였으며, 그 결과 파이프와 세굴 및 평평한 바닥면 사이 공간을 흐르는 유체 유동의 특성 차이가 파이프 양항력 특성에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(4) 준정상 단계에서 평균압력분포를 살펴보면 $G/D = 1.0$ 에서는 상하부가 대칭적인 압력분포를 가지지만, $S/D = 1.0$ 의 압력분포는 비대칭적인 것을 확인하였다. 이러한 이유는 $S/D = 1.0$ 의 경우 세굴의 코너에서 발생하는 음의 와와 파이프 하부에 발생하는 양의 와의 강한 상호작용 때문에 파이프 상부에서 발달된 음의 와만 하류로 나아가게 되지만 $G/D = 1.0$ 에서는 이러한 상호작용이 약하기 때문에 파이프 하부에 발달되는 양의 와가 빠르게 소산되지 않고 상부의 양의 와와 함께 하류로 나아가는 이열 와구조 형태를 띠기 때문이다.

사 사

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

[1] Cantero, M. I., J. R. Lee, S. Balachandar and M. H. Garcia (2007), On the front velocity of gravity currents, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 586, pp. 1-39.

[2] Crank, J. and P. Nicolson(1947), A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat conduction type, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 43, No. 1, pp. 50-67.

[3] Ermanyuk, E. V. and N. V. Gavrilov(2005a), Interaction of an internal gravity current with an obstacle on the channel bottom, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 46, No. 4, pp. 489-495.

[4] Ermanyuk, E. V. and N. V. Gavrilov(2005b), Interaction of an internal gravity current with a submerged circular cylinder, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 46, No. 2, pp. 216-223.

[5] Gonzalez-Juez, E. D., E. Meiburg and G. Constantinescu (2009a), Gravity currents impinging on submerged cylinders: flow fields and associated forces, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 631, pp. 65-102.

[6] Gonzalez-Juez, E. D., E. Meiburg and G. Constantinescu (2009a), The interaction of a gravity current with a circular cylinder mounted above a wall: effect of the gap size, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 25, pp. 629-640.

[7] Gonzalez-Juez, E. D., E. Meiburg, T. Tokyay and G. Constantinescu(2010), Gravity current flow past a circular cylinder forces, wall shear stresses and implications for scour, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 649, pp. 69-102.

[8] Hairer, E., S. P. Nørsett and G. Wanner(1993), *Solving ordinary differential equations I: Nonstiff problems* (2nd ed.), Berlin, Springer Verlag.

[9] Höfler, K. and S. Schwarzer(2000), Navier-Stokes simulation with constraint forces: finite-difference method for particle-laden flows and complex geometries, *Physical Review E*, Vol. 61, pp. 7146-7160.

[10] Jung, J. H. and H. S. Yoon(2016), Effect of scour depth on flow around circular cylinder in gravity current, *Ocean Engineering*, Vol. 117, pp. 78-87.

[11] Kim, K. H. and H. S. Oh(2011), Comparison of local scour around pipeline caused by waves and steady currents, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 21-28.

[12] Kneller, B., S. J. Bennett and W. D. McCaffrey(1999), Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 104, pp. 5381-5391.

[13] Liang, D. F. and L. Cheng(2005), Numerical model for wave-induced scour below a submarine pipeline, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 131, pp. 193-202.

[14] Mittal, R. and S. Balachandar(1995), Effect of three-dimensionality on the lift and drag of nominally two-dimensional cylinders. *Physics of Fluids*, Vol. 7, No. 8, pp. 1841-1865.

[15] Sumer, B. M. and J. Fredsøe(2002), *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. World Scientific, Singapore.

[16] Sumer, B. M., J. Fredsøe, H. Gravesen and R. Bruschi(1989), Response of marine pipelines in scour trenches. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 115, No. 4, pp. 477-496.

[17] Sumer, B. M., and J. Fredsøe(1990), Scour below pipelines in waves, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 116, pp. 307-323.

[18] Whitehouse, R.(1998), *Scour at marine structures*, Thomas Telford, London, pp. 1-198.

[19] Yu, Z. and X. Shao(2007), A direct-forcing fictitious domain method for particulate flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, pp. 292-314.

[20] Yoon, H. S., C. H. Jeon, J. H. Jung, B. Koo, C. Choi and S. C. Shin(2013), Simulation of two-phase flow - body interaction problems using direct forcing/fictitious domain - level set method, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 73, pp. 250-265.

Received : 2016. 11. 01.

Revised : 2016. 12. 05. (1st)

: 2016. 12. 23. (2nd)

Accepted : 2016. 12. 28.