

하상보호공 직하류부 세굴공의 난류양상에 관한 수치해석적 연구

이재룡, 박성원*, 염성일, 안정규
인천대학교 건설환경공학부

Numerical Analysis on the Turbulence Patterns in The Scour Hole at The Downstream of Bed Protection

Jaelyong Lee, Sung Won Park*, Seongil Yeom, Jungkyu Ahn
Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University

요약 강이나 하천 폭 전체에 걸쳐 수리구조물을 설치하는 경우에는 대개 하상보호공을 설치한다. 하지만 하상보호공 직하류부에 있는 하천하상이 상류부의 흐름영향으로 인해서 유실되는 국부세굴현상이 발생한다. 이와 같은 국부세굴은 흐름방향 경계지점의 흐름 및 난류특성과 하상토의 재질 등에 지배적이며, 시간의 경과에 따라서 점차적으로 위험할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이동상 모형실험을 통해 분석된 시간변화에 따른 하상보호공 하류부 국부세굴공 내부의 난류성분을 3차원 수치해석모형인 OpenFOAM의 적용결과와 비교하고 국부세굴공발달의 주요인자라고 알려져 있는 수심 적분된 상대난류강도 값의 흐름방향별 분포를 분석하였다. 또한 이 결과와 함께 하상전단응력 및 Shields parameter와 비교하여 세굴공의 안정화에 대하여 분석하였으며 추가적으로 초기 난류유입조건을 변화시켜 그 결과를 비교하였다. 그 결과 세굴공의 최대발생깊이는 유속의 크기보다는 오히려 수심 적분된 상대난류강도의 크기에 따라 지배적으로 발달하는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과를 통해서 향후 하상보호공 하류부에서 발생 가능한 국부세굴공을 저감하거나 방지하기 위해서는 수심 적분된 상대난류강도를 조절할 수 있는 설계나 시공 혹은 수문조절이 필요할 것으로 사료된다.

Abstract Where hydraulic structures are to be installed over the entire width of a river or stream, usually a bed protection structure is to be installed. However, a local scour occurs in which the river bed downstream of the river protection system is eroded due to the influence of the upstream flow characteristics. This local scour is dominant in the flow and turbulence characteristics at the boundary of the flow direction and in the material of the bed materials, and may gradually become dangerous over time. Therefore, in this study, we compared the turbulence patterns in the local scour hole at the downstream of the river bed protection with the results of the analysis of the mobile bed experiment, and compared with the application of OpenFoam, a three dimensional numerical analysis model. The distribution of depth-averaged relative turbulence intensities along the flow direction was analyzed. In addition to this result, the stabilization of scour hole was compared with the bed shear stress and Shields parameter, and the results were compared by changing the initial turbulent flow conditions. From the results, it was confirmed that the maximum depth of generation of the three-stage was dominantly developed by the magnitude of depth-averaged relative turbulence intensity rather than the mean flow velocity. This result also suggests that design, construction or gate control are needed to control the depth-averaged relative turbulence intensities in order to reduce or prevent the local scour faults that may occur in the downstream part of the bed protection.

Keywords : Bed Protection, Local Scour Hole, OpenFoam, Depth-averaged Relative Turbulence Intensity, Bed Shear Stress, Shields Parameter

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by Korean government Ministry of Science, ICT & Future Planning 2016R1C1B1014280.

*Corresponding Author : Sung Won Park(Incheon National Univ.)

Tel: +82-32-835-8084 email: billy970921@naver.com

Received January 19, 2019

Revised February 10, 2019

Accepted May 3, 2019

Published May 31, 2019

1. 서론

과거부터 댐이나 교각 같은 수리구조물 부근에 생기는 세굴 현상으로 인한 광범위한 피해로 인하여 세굴(scour)은 수리구조물의 건설에 중요한 설계요소 중 하나이다. 세굴은 여러 범주로 나눌 수 있으며, 주로 수류나 파랑에 의하여 해안이나 하상의 바닥이 침식되는 것을 의미하며, 수리구조물 주위의 토사가 물의 흐름에 의해 침식되어 구조물의 안정성에 위협을 초래한다[1]. 이러한 세굴 현상의 영향으로부터 구조물의 안정성을 확보하기 위해 댐이나 보 같은 구조물을 보호하기 위하여 물받이 공과 하상보호공을 설치한다. 하상보호공은 집중호우나 하천의 흐름변화에 등으로 인해 대규모 세굴이 발생하면서 하상보호공의 안정에 대한 문제가 일부 보고되어 안정성 확보에 대한 연구가 이루어 졌다[2]. 그러나 세굴현상의 근본적인 원인에 대한 연구는 미흡한 실정이며 이러한 문제는 4대강 복원사업에서도 나타났다. 2011년 한국시설안전공단에서 실시한 9개의 보에 대한 긴급 점검 결과 6개의 보에서 세굴 현상이 나타났으며, 특히 낙동강의 달성보와 창녕함안보에서는 최대 세굴깊이가 각각 16m, 21m에 이르는 것으로 발표되어 많은 보강 작업이 이루어졌다. 이러한 문제는 하상보호공 하류부에서 일어난 현상이며, 따라서 보호공이 아닌 세굴현상에 근본적인 원인을 밝히기 위해 본 연구를 수행하였다.

국내 대부분의 자연하천은 유수력에 의해 세굴이 발생하므로 구조물의 파괴, 하상물질의 유실 등이 발생하고 있다[2]. 본 연구에서는 세굴 현상을 일으키는 원인으로 알려진 바 있는 흐름의 난류특성 중에서 흐름의 하상전단응력(bed shear stress)과 수심 적분된 상대난류강도(depth-averaged relative turbulence intensity)에 대해 다루었다. 흐름의 난류현상의 연구를 위해 학계는 물론 기업에서도 가장 활발히 활용되고 있는 수치해석 기법을 사용하였다. 국내외에서는 유동해석을 위해 주로 ANSYS의 Fluent, CFX 등과 같은 상용코드가 주로 이용되고 있으나 소스코드를 알 수 없고, OpenFOAM은 오픈 소스 프로그램으로 원하는 해석을 위해 자유롭게 코드를 확인하고 구성할 수 있다는 장점이 있다[3]. 또한 국내에서 OpenFOAM의 난류모형 해석의 정밀도에 대한 연구가 이루어 졌으며[4], 해외에서는 OpenFOAM과 Fluent, FLOW-3D 사이의 성능평가에 대한 연구가 있다[5,6]. 따라서 본 연구에서는 기본적인 유동해석을 위한 모형을 제공함과 동시에 추후 필요한 모형의 개발이 가능한 OpenFOAM을 사용하여 세굴심에서의 난류특성

을 해석하였다. 난류 해석 모형으로는 가장 널리 사용되는 모형 중 하나인 $k-\omega$ SST(shear stress transport) 모형을 적용하였다. 또한 이동상 수리실험결과에 수치해석 기법을 적용하였다[7].

2. 방법론

2.1 지배방정식

OpenFOAM은 OpenCFD사에서 비교적 간단한 프로그래밍 언어인 C++를 기반으로 개발한 무료 전산유체역학 프로그램으로서, 다양한 유체의 흐름을 모의 할 수 있는 솔버의 모음집이며, 코드가 공개된 소프트웨어이다. OpenFOAM은 기본적으로 3차원 형상을 다루며, 유한체적법을 기반으로 편미분방정식을 해석하며, 유체 운동의 지배 방정식을 수치로 나타낸다. 비압축성 유동의 지배 방정식은 Reynolds 평균정리를 적용한 레이놀즈-평균 나비에-스톡스(RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes, 이하 RANS) 방정식이다. 벡터형태로의 연속방정식 및 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot [(\nu + \nu_T)(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] \quad (2)$$

Where, \vec{u} is the velocity vector of fluid, ρ is the density, p is pressure, ν is the kinematic viscosity coefficient of fluid, ν_T is the kinematic eddy viscosity coefficient.

2.2 난류 모형

본 연구에서는 공학적 문제에서 널리 학계와 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 사용 되고 있는 $k-\omega$ SST 모형을 적용하였다[8]. 난류운동에너지 k (turbulent kinetic energy)와 단위부피당 난류 소산을 ω (specific dissipation rate)를 이용하여 유동해석을 하는 $k-\omega$ SST 모형은 2개의 편미분 방정식으로 이루어져있으며, 표준 $k-\varepsilon$ 모형과 $k-\omega$ 모형을 결합한 모형이다[9,10]. 난류운동에너지 k 와 난류 에너지 소산 ε (turbulent dissipation rate)에 대한 2개의 편미분 방정식을 사용하여 난류에 대한 해석을 수행하는 표준 $k-\varepsilon$ 모형은 난류 흐름의 평균적인 특성을 예측하는데 가장 널리 사

용되는 모형 중 하나이지만, 레이놀즈 수(Reynolds number)가 작은 벽면 근처에서의 흐름 해석의 신뢰성은 낮다. 때문에 $k-\varepsilon$ 모형의 경우 적절한 해석결과를 얻기 위하여 경계층에 특정한 벽함수(wall function)를 적용해야 한다. 벽면 근처에서 보다 적절한 신뢰성 있는 예측을 하는 $k-\omega$ 모형은 유입 난류특성에 매우 민감하며, 난류특성이 큰 흐름(free stream region)에서는 적절한 예측을 하지 못하는 특성이 있다[8].

$k-\omega$ SST 모형은 두 모형의 장점을 효과적으로 결합하여 벽과 가까운 영역과 자유 흐름 영역에서의 난류특성을 적절하게 예측할 수 있으며, 특히 전면부의 흐름의 박리영역을 적절하게 예측할 수 있다고 알려져 있으며 [8], 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}k) - \nabla \cdot (\nu + \sigma_k \nu_T) \nabla k = \overline{P_k} - \beta^* k\omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}\omega) - \nabla \cdot (\nu + \sigma_\omega \nu_T) \nabla \omega = \alpha S^2 - \beta \omega^2 - (F_1 - 1) CD_{k\omega} \quad (4)$$

Where, ν_T is the kinematic eddy viscosity coefficient and is defined as follows:

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (5)$$

a_1 is the constant ($a_1 = 0.31$), S is the absolute value of the vorticity, F_2 is the second blending function.

3. 모형의 적용

3.1 실험조건

Park은 길이 17.5 m, 폭 0.6 m, 깊이 0.8 m의 사각 수평 직선수로에서 세굴현상의 수리실험을 실시하였으며, 수로 양 벽면과 바닥면은 각 8 mm와 12 mm 두께의 유리로 제작되었다[7]. 이 실험에서는 아크릴 박스를 통해 수리학적으로 매끄러운 바닥면 길이 4.5 m

의 상류부와, 이동상 바닥 재료인 거친 모래로 이루어

진 8 m의 하류부를 통과하는 흐름에 의해 일어나는 세굴현상을 대상으로 한다. 본 연구에서는 2가지 케이스(Q35h144d12, Q35h120d12)의 마지막 시간대의 실험 결과를 적용하였다. 유량은 $0.035 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 하류부의 모래의 평균입경 d_{50} 은 0.0012 m로 두 개의 실험 모두 같다. 상류부 유입유속 u_0 및 유입수심 h_0 의 실험 조건은 케이스 별로 다르며, Table 1과 같다. 보다 자세한 실험방법, 조건 및 장비에 대해서는 Park의 논문에 서술되어 있다[7].

3.2 경계조건 및 격자

본 연구에서의 수치해석에서는 위에서 언급한 고정상 및 이동상 수로의 마지막 시간대를 수치적으로 재현하였으며, 격자 및 형상은 Fig. 1에 나타냈으며, 초기 값은 Table 2와 같다.

Table 2. The boundary conditions of the model

Case	Model	u_0 (m/s)	k ($10^{-2} \text{m}^2/\text{s}^2$)	ω (1/s)
Q35h144d12	$k-\omega$	0.405	1.22	4.792
Q35h120d12	SST	0.486	1.70	5.670

유입부의 경계조건은 각 실험별 수심을 일정하게 설정하였고, 유입유속과 하류부의 압력조건을 통해 흐름을 설정하였다. 실제실험에서는 대기압 상태에서 이루어진 상단경계는 몇 번의 모의해석 후 대기조건을 부여하였다 [11]. 실험에서 적용한 것과 일치시키기 위해 수로 바닥면은 마찰을 고려하기 위한 벽면조건을 설정하였으며, 바닥면 모래입자의 거칠기를 부여하기 위하여 벽함수 기능을 적용했다.

계산영역은 수로 폭이 중심으로 한 2차원 흐름이며, 흐름방향과 수심방향을 계산한다. 기존 세굴연구를 통하여 2차원 흐름해석은 적절한 격자설정과 경계조건을 부여함으로써 비교적 정확하고 신뢰할만한 계산결과를 얻을 수 있다[12-14]. 격자조건은 세굴공에서의 일어나는 복잡한 난류특성을 보다 더 잘 예측하기 위해 바닥면과 가

Table 1. Physical experiment conditions of scour test

Case	Q (m^3/s)	d_{50} (m)	u_0 (m/s)	h_0 (m)	Re
Q35h144d12	0.035	0.0012	0.405	0.144	39,000
Q35h120d12			0.486	0.120	42,000

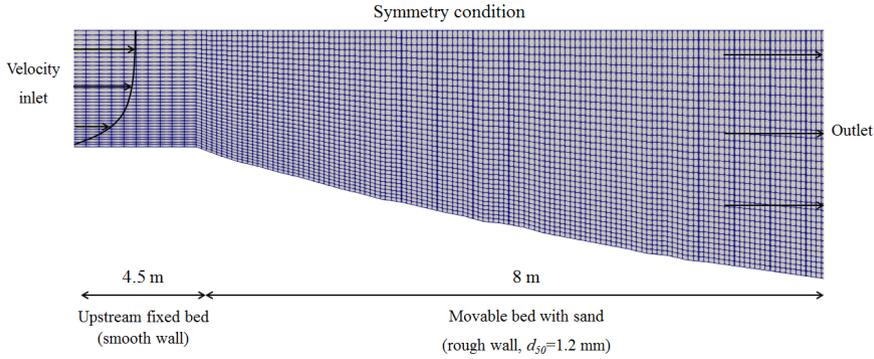


Fig. 1. Geometrical model setup and mesh grid (not to scale, case_Q35h144d12 and case_Q35h120d12 $d_{50}=1.2$ mm)

까울수록 격자를 더 조밀하게 설정하였다[15]. 이는 이전 연구에서 수리실험의 데이터와 2차원 모델링의 유속과 난류운동에너지 값의 비교를 통하여 벽면 근처에서 비교적 정확한 해석결과를 도출하였다[11,15].

4. 모형의 적용

수치해석 결과 중 하상전단응력(τ_0)과 수심 적분된 상대난류강도 r_0 를 각 케이스별로 Fig. 2, 3에 나타냈으며, 하상전단응력 τ_0 는 세굴공에서의 전단응력, 사립자의 한계전단응력, 단순 직선하도의 하상전단응력을 표시하였다. 또한 각 그림의 상단에는 흐름방향에 따른 세굴의 하상을 표시했다.

4.1 하상전단응력

일반적으로 개수로 흐름에서 하상전단응력은 하나의 중요한 공학적 인자 중 하나이다. 특히 본 연구에서는 세굴현상을 일으키는 난류특성 중 하상전단응력을 하나의 중요 인자로 다루었으며, Fig. 2, 3에 흐름방향에 따른 하상전단응력을 나타내었다. 또한 각 그림 상단부에는 세굴의 바닥좌표를 표시하였으며, 세굴공의 안정화를 분석하기 위하여 단순 직선하도에서의 하상전단응력과 사립자의 한계전단응력 τ_c (critical shear stress)을 나타냈다. 한계전단응력은 물에서의 사립자의 한계전단응력을 shields 곡선을 이용하여 나타낸 자료[16]를 사용했다. 단순한 직선하도에서의 하상전단응력은 같은 경계조건에서 해석이 이루어진 모델링 결과 값을 사용하였다.

Fig. 2, 3에서 세굴공에서의 하상전단응력은 매우 작

은 값을 가지며, 하상이 점차 증가함에 따라 전단응력도 증가함을 보인다. 또한 세굴 시작지점에서는 전단응력이 (-)값을 가지나 최대 세굴심 이후 (+)값을 띄는 특성을 보인다. 두 개의 결과로부터 평형상태의 세굴공 내에서는 하상전단응력의 값이 매우 작으며, 최대 세굴심 부근에서는 하상전단응력이 작용하는 방향이 바뀌는 것으로 판단된다. 흥미로운 것은 Fig. 3에서 단순 직선하도에서의 전단응력은 사립자의 한계전단응력보다 높은 값을 나타내지만, Fig. 2의 경우 단순 직선하도에서의 전단응력은 사립자의 한계전단응력보다 작은 값을 가짐에도 세굴현상이 진행됨을 나타냈다. 이는 세굴이 초기에 발달하는 원인이 물의 흐름에 의하여 하상의 사립자에 작용하는 전단응력뿐만 아니라 또 다른 난류특성에 의해 세굴 현상이 일어나는 것으로 판단된다. 따라서 세굴현상의 예측을 위해 하상전단응력 뿐만 아니라 상대난류강도를 비교가 필요하다고 판단된다.

4.2 상대난류강도

세굴의 평형상태(equilibrium state)에서 최대세굴심 예측은 연속방정식을 적용하였으며, 상류의 지형특성에 의해 결정되는 난류계수를 적용하여 최대 세굴심을 예측식이 제안되었으며, r_0 에 의해 결정된다[17].

$$r_0 = \frac{\sqrt{k_0}}{U_0} \tag{6}$$

Where, U_0 is the depth-averaged velocity, k_0 is depth-averaged turbulent kinetic energy.

$$k_0 = \frac{1}{h_s} \int_0^{h_s} k(z) dz \tag{7}$$

Where, h_s is the water depth, k is the turbulent

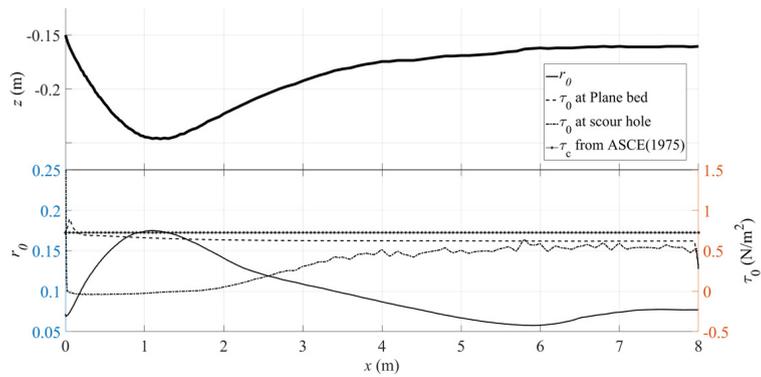


Fig. 2. The distribution of wall shear stress τ_0 and depth-averaged relative turbulence intensities r_0 along the flow direction (case_Q35h144d12)

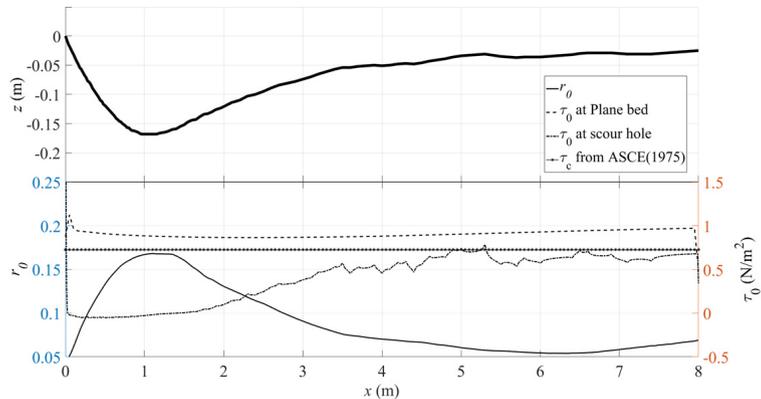


Fig. 3. The distribution of wall shear stress τ_0 and depth-averaged relative turbulence intensities r_0 along the flow direction (case_Q35h120d12)

kinetic energy per unit mass.

Fig. 2, 3에서 흐름방향에 따른 상대난류강도의 값을 나타냈다. 두 개의 케이스 모두 r_0 는 세굴심이 깊어질수록 증가하는 양상을 보였으며 최대 세굴심에서 최대로 각 1.75, 1.68로 계산되었다. 또한 하상이 증가하는 구역에서는 점차 감소되며, 하상이 일정함에 따라 일정한 값을 가지는 것으로 보인다. 위에서 언급한 것처럼, Fig. 2의 Q35h144d12의 경우 한계전단응력이 하상전단응력보다 높았지만 r_0 의 값은 보다 크게 나타났다. Fig. 3의 Q35h120d12경우 실험의 조건에서 유속이 보다 더 빠르게 설정되었으나, 세굴공의 깊이는 오히려 첫 번째 실험에서 더 깊게 진행되었다. 이와 같은 결과에 따라, 세굴의 진행은 세굴공에서의 r_0 에 값에 더 큰 영향을 받을 수 있음을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 하상보호공 하류부 국부세굴에 큰 영향을 미치는 난류양상을 분석하기 위해 이동상 모형실험을 통해 분석된 시간변화에 따른 난류성분과 OpenFOAM을 통해 수치해석 결과값을 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

세굴심에서의 하상전단응력 τ_0 은 세굴공에서 작은 값을 가지며, 최대 세굴심에서 작용하는 방향이 바뀐다. 또한, 직선하도에서의 전단응력이 사립자의 한계전단응력보다 작게 계산되어도 세굴현상은 진행되었으며, 세굴심 또한 더 깊게 진행되었다. 이러한 결과를 보다 더 비교하기 위해 같은 흐름조건에서의 하상의 사립자의 입경 및 하상의 경계조건을 변화시킨 후속연구가 필요하다고 판

단된다. 수심 적분된 상대난류강도는 두 케이스 모두 유사한 값이지만 세굴공의 크기 차이에 따라 세굴심이 다르게 나타났다. 또한 더 느린 흐름조건에서 세굴심 및 r_0 가 더 큰 값으로 계산되었다. 따라서 수심 적분된 상대난류강도가 세굴에 미치는 영향을 보다 더 분석하기 위한 추가연구가 필요하다.

References

- [1] G. J. C. M. Hoffmans, and K. W. Pilarczyk, "Local scour downstream of hydraulic structures", *Journal of hydraulic Engineering*, Vol.121, No. 4, pp.326-340, Apr. 1995.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:4\(326\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:4(326))
- [2] C. Kim, J. Kim and J. Kang, "Hydraulic Model Test on Scour Protection with Scale Effect", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.13, No.6, pp.375-379, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.6.375>
- [3] OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox User Guide Introductions 2018, Available From: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>
- [4] H. M. Kim, D. H. Yoon, and K. W. Seul, "EVALUATION OF OPENFOAM IN TERMS OF THE NUMERICAL PRECISION OF INCOMPRESSIBLE FLOW ANALYSIS", *Journal of computational fluids engineering*, Vol.18, No.2, pp.49-55, Jun. 2013.
DOI: <http://doi.org/10.6112/ksce.2018.23.3.079>
- [5] E. Robertson, V. Choundhury, S. Bhushan, D.K. Walters, "Validation of OpenFOAM numerical methods and turbulence models for incompressible bluff body flows", *Computers & Fluids*, Vol.123, pp.122-145, Dec. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2015.09.010>
- [6] A. Bayon, D. Valero, R. García-Bartual, F. Jos, F.J. Valles-Moran and P.A. Lopez-Jim, "Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump body flows", *Environmental Modelling & Software*, Vol.80, pp.322-335, Jun. 2016.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>
- [7] S. W. Park, "Experimental Study of Local Scouring at the Downstream of River Bed Protection". Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, pp. 44-55, pp.62-66, 2016.
- [8] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", *AIAA journal*, Vol.32, No.8, pp.1598-1605, Aug. 1994.
DOI: <http://doi.org/10.2514/3.12149>
- [9] B.E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.3, No.2, pp.269-289, Mar. 1974.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- [10] D. C. Wilcox, "Re-assessment of the scale determining equation for advanced turbulence models", *AIAA journal*, Vol.24, No.11, pp.1299-1310, Nov. 1988.
DOI: <https://doi.org/10.2514/3.10041>
- [11] T. H. H. Nguyen, J. Lee, S. W. Park and J. Ahn "Two-dimensional Numerical Analysis on the Flow and Turbulence Structures in Artificial Dunes", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.22, No.12, pp.4922-4929, Oct. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0103-x>
- [12] X. Yu, and X. Yu, "1D and 2D hydraulic simulations for bridge scour prediction: A comparative study", *4th International Conference on Scour and Erosion*, Tokyo, Japan, pp.226-232, Nov. 2008.
DOI: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100121>
- [13] K. Neven, B. Damir, G. Gordon and M. Eamon, "Monitoring of river channel morphodynamical changes in the zone of bridge piers", *1st International Conference on Road and Rail Infrastructure*, Croatia, May, 2010.
- [14] W. Guo, J. Hong, C. Chen, C. Su and J. Lai, "A simplified simulation method for flood-induced bend scour a case study near the Shuideliu embankment on the Cho-Shui river", *water*, Vol.9, pp. 324-343, Mar. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3390/w9050324>
- [15] T. H. H. Nguyen, J. Ahn and S. W. Park, "Numerical and Physical Investigation of the Performance of Turbulence Modeling Schemes around a Scour Hole Downstream of a Fixed Bed Protection", *water*, Vol.10, No.2, pp.103-115, Jan. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.3390/w10020103>
- [16] V. A. Vanoni, "Sedimentation Engineering (Manuals No. 54)", American Society of Civil Engineering, pp.56-60, 1975.
DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784408230>
- [17] G. J. C. M. Hoffmans and H. J. Verheji, "Scour manual", Taylor and Francis Group, pp.42-46, Jan. 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203740132>

이 재 룡(Jaelyong Lee)

[정회원]



- 2018년 2월 : 인천대학교 건설환경공학부 공학사
- 2018년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 건설환경공학부 석사과정 중

<관심분야>

하천수리학, 3차원 유동해석

안 정 규(Jungkyu Ahn)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 공학석사
- 2004년 4월 ~ 2005년 7월 : 한국수자원공사 운하건설부 근무
- 2007년 8월 ~ 2011년 12월 : Colorado State University 공학박사
- 2012년 3월 ~ 2015년 8월 : 서울대학교 공학연구소 책임연구원
- 2015년 8월 ~ 현재 : 인천대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>

우수배제시스템, 유사이송론, 하천수리학, 수치해석

박 성 원(Sung Won Park)

[정회원]



- 2016년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 공학박사
- 2016년 2월 ~ 2017년 4월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2017년 5월 ~ 현재 : 인천대학교 인천방재연구센터 책임연구원
- 2018년 3월 ~ 현재 : 환경대학교 건설환경공학부 강의전담교원

<관심분야>

하천수리학, 오염확산이론

염 성 일(Seongil Yeom)

[준회원]



- 2018년 8월 : 인천대학교 건설환경공학부 공학사
- 2018년 9월 ~ 현재 : 인천대학교 건설환경공학부 석사과정 중

<관심분야>

우수배제시스템, 3차원 유동해석