

V자형 낙차공 모형 직하류 국부세굴공 발생특성에 관한 실험적 연구

엄중현^{1,2}, 한형준², 박성원^{3*}, 안정규⁴

¹인하대학교 사회인프라공학과, ²한국건설기술연구원 건설인증본부,
³한국과학기술정보연구원 데이터기반문제해결연구단, ⁴인천대학교 건설환경공학부

Experimental Study on the Characteristics of Local Scour Hole Downstream of V-shaped Drop Structure Model

Junghyun Eom^{1,2}, Hyeongjun Han², Sung Won Park^{3*}, Jungkyu Ahn⁴

¹Dept. of Civil Engineering, Inha University

²Construction Test Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Dept. of Data-centric Problem Solving Research, Korea Institute of Science and Technology Information

⁴Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University

요약 대표적인 하천횡단구조물 중 하나인 낙차공은 하천하상의 안정을 목적으로 설치되지만 이는 하천환경의 연속성을 차단하고, 수생태환경의 파괴를 야기하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 생태통로로서의 기능을 갖는 저낙차 자연형 낙차공을 모형으로 제작하여 실험실 실험을 수행하고, 적절한 지배인자 사이의 관계를 도출하여 국부세굴공 규모의 예측식을 제안하였다. 직선형과 6가지 상향 V 자형의 낙차공 모형에 대하여 각각 실험유량은 4가지로 총 28개의 조건에 대해서 실험을 수행하였다. 각각의 실험조건별 세굴실험 결과를 바탕으로 기존에 제안된 세굴심 추정식을 적용한 결과보다 최대세굴심이 다소 크게 발생함을 확인하였다. 따라서 낙차공 직하류부에서 발생하는 세굴공 발생 주요인자들 사이의 상관관계를 분석한 결과, 낙차공으로의 유입흐름 특성과 낙차공의 높이, 낙차공의 총횡단길이와의 상관관계가 높게 나타남을 확인하였다. 또한 이를 토대로 각 실험조건별 세굴심과 세굴길이에 상관관계가 높다고 판단되는 변수들을 무차원화하여 최대세굴공의 깊이와 길이 산정식을 각각 제안하였다. 향후 추가적으로 다양한 하상토 재료와 수심변화를 고려한 실험적 연구 및 수치해석 연구를 병행하여 보다 정확한 세굴심 산정식을 도출할 수 있다.

Abstract A drop structure, one of the representative river-crossing structures, is constructed to stabilize a riverbed. On the other hand, the structure interrupts the continuity of the river and causes the destruction of the hydro-ecological environment. Therefore, laboratory experiments of a natural type of drop structure with low differences were performed, and the empirical formula of a local scour hole is proposed. Four experimental flow rates were tested for various types of the drop structure models with 28 test cases. Based on the scour test, it was confirmed that the maximum scour depth occurs rather than the result of applying the previously proposed scour depth formulae. Correlation analysis of the major factors of scour hole at the downstream of the drop structure revealed a strong correlation between the upstream flow characteristics, drop structure height, and total crossing length of the drop model. In addition, the depth and length estimation formula of the maximum scour hole were proposed using the dimensionless variables and validated. In the future, it is also expected that more accurate scour prediction and calculation can be derived by conducting experimental studies and numerical analysis considering the various bed materials and flow conditions.

Keywords : Drop Structure, River-Crossing Structure, Laboratory Experiments, Local Scour, V-Shaped Drop Structure Models, Dimensionless Variables

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2019R1F1A1062727).

*Corresponding Author : Sung Won Park(KISTI)

email: billy1006@gmail.com

Received August 8, 2019

Revised September 11, 2019

Accepted December 6, 2019

Published December 31, 2019

1. 서론

1.1 연구 배경과 목적

하천 횡단구조물은 하천의 연속성을 차단하여 수생태 환경의 교란을 심화시키며 생태계의 파괴까지도 가져온다. 따라서 생태환경의 파괴를 최소화하기 위해서는 하천 횡단구조물 건설 시 어도를 설치하는 것을 통해 해결하려는 노력이 일반적이다[1]. 이러한 하천횡단구조물 중에서도 낙차공은 대표적인 횡단구조물로서 하천의 급경사 부분에 하상세굴 및 침식방지를 목적으로 설치되는 하상 유지시설이며 보통 0.5 m 이상의 낙차를 둔 유지시설로 낙차가 없거나 매우 작은 경우(0.5 m이하) 띠공 (riverbed girdle)으로 정의된다[1]. 현재까지 설치된 횡단구조물은 하천설계기준 및 해설[1]을 근거로 설치하여 하상안정에는 효과적이었으나 앞서 보와 같은 횡단구조물과 같이 하천의 연속성 차단으로 인해 생태환경의 파괴를 초래한다고 알려져 있다.

따라서 저낙차를 갖는 자연형 낙차공에 대한 수리실험을 수행하여 하류부 수리현상을 면밀히 분석하고 기존에 제안된 낙차공 하류부 세굴심 제안식들과 비교하고자 하였다. 하지만 기존에 제안된 낙차공 하류부 세굴심 산정 제안식들은 직선형 혹은 변형(경사형, 계단형) 형태만을 고려하고 있고, 평면 형태나 횡단형태의 변화에 따른 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 평면형태의 변화에 대해 수리실험을 수행하여 세굴심과 세굴길이에 발생지배인자를 선정한 뒤 관계가 가장높은 인자들로 최대깊이와 세굴길이 산정식을 제안하고자 하였다.

1.1 연구 배경과 목적

일반적으로 자연하천에서 발생하는 세굴은 와류를 동반한 흐름의 국부적인 집중으로 인하여 경계면이 깎이는 현상을 의미하며 흐름이 경계면 구성재료의 한계조건을 넘어 경계면을 깎는 현상을 침식이라 한다[2]. 국부세굴은 발생 형태에 따라서 유향 및 유수량 변화 시 발생하는 장기적인 하상 변동이나 하천의 폭, 수심, 수로 등의 지형 변화에 의한 전체세굴과, 하상구조물에 의한 통수 단면의 축소나 자연 하천의 단면 축소로 인한 단면축소세굴, 그리고 하상구조물(교각, 교대 등)에 의해 국부적으로 발생된 소용돌이에 의해서 부분 유속이 증가하여 하상 구조물 주위로 세굴이 발생하는 구조물 국부세굴로 구분할 수 있다. 이밖에도 중심 하천에 유입되는 지류에 의한 세

굴도 있으며, 이와 같은 양상은 다른 세굴양상에 비해 영향은 적지만 홍수 시 하상구조물 주변의 세굴 증가 및 파괴, 주변 흐름의 접근 각도를 변화시킴으로써 세굴심을 변화시킨다[7]. 따라서 이를 극복하거나 개선하기 위한 연구가 지속적으로 수행된 바 본 연구에서는 세굴양상을 실험적으로 분석하고자 하였다. 낙차공 하류부 세굴발생 개념도 및 세굴심 산정과 관련된 대표적인 연구 및 제안식을 Fig. 1과 Table 1에 각각 정리하였고 이 중 본 연구에서는 Schokiltsh 식[3]과 Hoffmans 식[4]을 적용하였다.

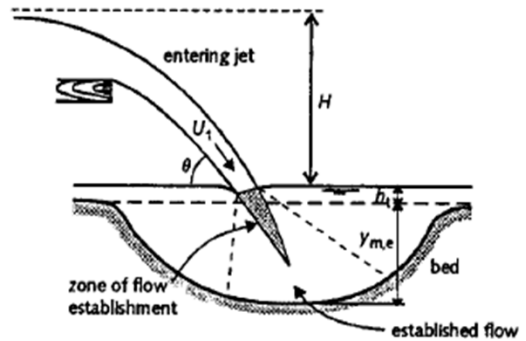


Fig. 1. Schematic diagram of drop scour [7]

Table 1. Previous studies and empirical equations

Previous studies	Equations
Schokiltsh [3]	$y_{m,e} + h_t = c_s q^{0.57} H^{0.2} / d_{90}^{0.32}$
Veronese [5]	$y_{m,e} = KH^{0.225} q^{0.54} - h_t$
Zimmerman & Maniak [6]	$y_{m,e} = K \left(\frac{q^{0.82}}{D_{85}^{0.23}} \right) \left(\frac{h_t}{q^{2/3}} \right)^{0.93} - h_t$
Bormann & Julien [7]	$y_{m,e} + D_p = \frac{K_b q^{0.6} U_1 \sin \theta}{(2 \Delta g)^{0.8} d_{90}^{0.4}}$
Fahlbusch [8]	$y_{m,e} + h_t = c_{2v} \sqrt{q U_1 \sin \theta / g}$
Hoffmans [4]	modified equation by Fahlbusch (1994)
definitions	$y_{m,e}$ = maximum scour depth (m); c_s = constant (4.75); q = discharge per unit width (m^2/s); h_t = water depth at downstream (m); H = difference of water depth between upstream & downstream (m); d_{90} & d_{85} = sediment size (m) at which 90 and 85 percent of the sieve analysis mass smaller; U_1 = approaching velocity of jet ($\sqrt{2gH}$); θ = angle of jet flow (degree); g = gravitational acceleration ($9.81 m/s^2$); K_b = a constant related to jet flow and angle of repose; Δ = relative density; D_p = height of the drop

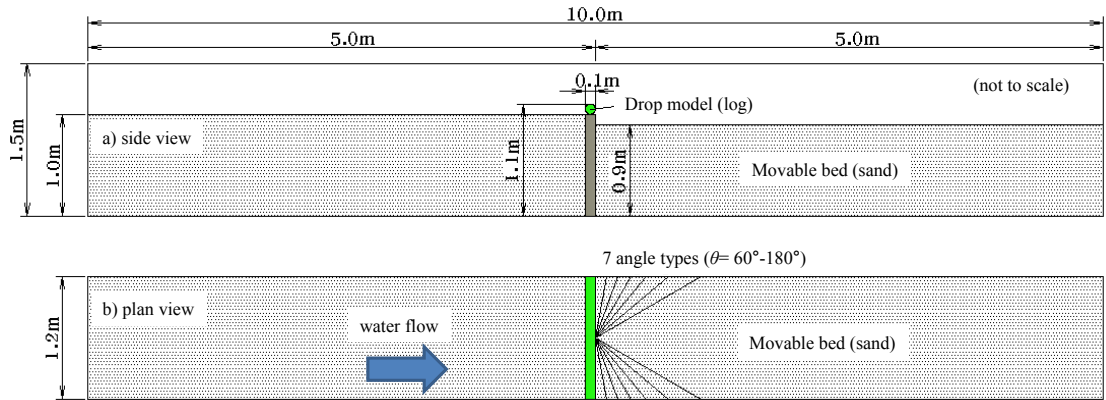


Fig. 2. Schematic diagram of experimental channel and drop model [9]

Table 2. experimental conditions and results [9]

Case	Angle of Apex (°)	q (m ² /s)	H (m)	h_t (m)	$y_{m,c}$ (m)	L_s (m)
180-1	180	0.010	0.135	0.045	0.235	0.460
180-2		0.020	0.148	0.046	0.453	0.870
180-3		0.030	0.162	0.064	0.650	1.270
180-4		0.040	0.173	0.082	0.765	1.420
160-1	160	0.010	0.137	0.047	0.283	0.530
160-2		0.020	0.153	0.057	0.555	0.990
160-3		0.030	0.164	0.066	0.719	1.400
160-4		0.040	0.177	0.087	0.808	1.500
140-1	140	0.010	0.104	0.037	0.326	0.610
140-2		0.020	0.152	0.056	0.586	1.070
140-3		0.030	0.163	0.072	0.777	1.500
140-4		0.040	0.174	0.082	0.884	1.710
120-1	120	0.010	0.131	0.047	0.333	0.580
120-2		0.020	0.143	0.057	0.619	1.120
120-3		0.030	0.157	0.070	0.798	1.300
120-4		0.040	0.167	0.086	0.852	1.630
100-1	100	0.010	0.129	0.048	0.352	0.670
100-2		0.020	0.141	0.057	0.600	1.220
100-3		0.030	0.153	0.072	0.733	1.480
100-4		0.040	0.165	0.087	0.772	1.611
80-1	80	0.010	0.123	0.048	0.346	0.750
80-2		0.020	0.137	0.057	0.575	1.212
80-3		0.030	0.147	0.068	0.698	1.466
80-4		0.040	0.158	0.084	0.738	1.650
60-1	60	0.010	0.124	0.046	0.344	1.055
60-2		0.020	0.135	0.056	0.530	1.543
60-3		0.030	0.147	0.073	0.619	1.719
60-4		0.040	0.154	0.087	0.619	1.740

2. 실험적 연구 및 경험식 개발

2.1 실험수로 및 낙차공 모형

본 실험에 사용된 수로는 50.0 m(길이) × 1.2 m(폭) × 1.5 m(높이)의 철재직선수로를 사용하였고, 실험구간은 수로의 중앙부 10.0 m(길이) × 1.2 m(폭) × 1.5 m(높이)에서 수행하였다(Fig. 2). 수로의 우측면은 세굴현상을 관측하기 위해 강화유리벽을 설치하였으며, 실험수로 끝단에는 수위조절을 용이하게 할 수 있도록 전도식 Tailgate를 설치하였다. 전체 낙차공의 높이는 0.2 m로 결정하였으며 그 이유는, 기존 연구를 검토한 결과 회유성 어류의 소상 가능한 높이를 약 0.2 m로 제한하고 있기 때문이다[10]. 따라서 본 연구에서도 낙차고 0.2 m를 적용하여 어류의 소상이 가능한 하천의 연속성을 유지하고자 하였다. 낙차공의 재료는 최근 제안되고 있는 자연형 재료인 통나무(직경 0.1 m)를 사용하였으며 통나무를 이용한 낙차공의 형태는 Fig. 3에 나타내었다.



a) 180° model in the channel



b) V shape models

Fig. 3. Photos of drop structure model

2.2 실험조건과 하상변화 계측

낙차공 모형의 내측각은 180° ~ 60°로 20° 간격으로 총 7개의 형태이고, 실험유량은 단위폭 당 유량 4가지 (0.010 m³/s, ~ 0.040 m³/s)로 총 28가지의 실험을 수행하였다(Table 2). 세굴심 부근에서 유속측정은 폭방향 0.2 m 간격으로 1차원 유속계(KENEK VO1000)를 이용하여 1점법으로 6회 측정 후 평균값을 사용하였다(Fig. 4-a). 세굴실험에서 가장 중요한 단계는 낙차공 모형 하류부의 하상변화를 정확하게 측정하는 것이며, 따라서 최소단위 0.001 m까지 계속할 수 있는 레이저 거리 측정기(Leica DISTO D5)를 이용하여 종단 및 폭방향으로 0.1 m 간격으로 측정하였고 세굴형상이 복잡한 부분에서는 더욱 조밀하게 측정하였다(Fig. 4-b). 낙차공 모형의 직하류부에 기포설된 모래의 기준 바닥고를 0 m로 설정하였으며 종단방향으로 3 m까지 계측하였으며 28개의 실험조건은 실제 최대세굴길이가 3 m 이내에서 발생하였다.



a) Flowmeter (VO 1000, KENEK)



b) Laser distance meter (DISTO D5, Leica)

Fig. 4. Photos of measuring apparatus

2.3 최대세굴심과 세굴길이의 비교

28가지 실험조건을 수행하여 조건별 최대세굴심과 최대세굴길이를 비교하였다(Fig. 5). 그 결과 직선형 낙차공을 제외한 V자형 낙차공에서는 최대세굴심이 수로의 폭방향 중앙에서 발생하였다. 각 실험조건별 최대세굴심의 경우, 최소유량 조건인 010 m²/s 일 때는 낙차공의 각도가 감소할수록 증가하지만 크기의 편차는 최대 약 10 cm 로 발생하였으나 다른 3가지 유량조건은 공통적으로 120 ~ 140° 인 실험조건에서 최대로 발생한 뒤에 각도가 작아질수록 감소하는 경향이 나타났다.

최대세굴길이의 경우에는 0.010 m²/s 와 0.020 m²/s 조건일 때 낙차공모형의 각도가 감소할수록 최대세굴길이 증가하는 것으로 나타났으나 0.030 m²/s 조건과 0.040 m²/s 유량조건인 상대적으로 큰 유량인 경우에는 140°일 때 최대값이 발생하다가 낙차공모형의 각도가 작아짐에 따른 경향이 분명하지 않은 상태로 증감하는 것을 확인하였다. 결론적으로 저유량의 조건에서는 낙차공모형의 평면각도가 작아질수록 최대세굴심과 최대세굴길이 증가하여 민감하게 영향을 미치는 것으로 판단되나 고유량 조건인 경우에는 낙차공모형의 평면각도가 약 120 ~ 140 °일 때 가장 큰 값이 발생하였다.

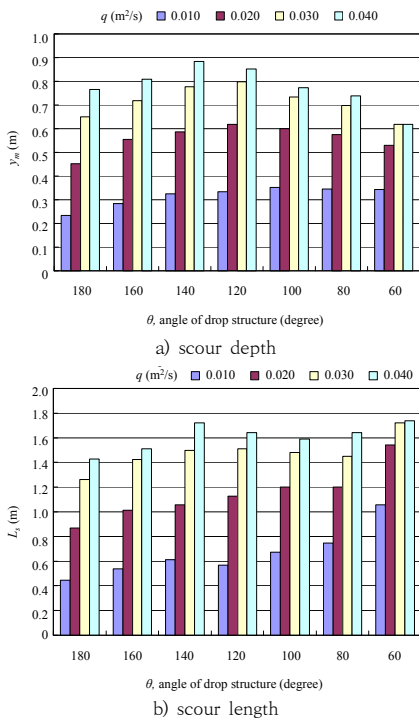


Fig. 5. Comparison of local scour hole

2.4 기존 경험식 적용

본 연구에서는 앞 절에서 제시한 기존 경험식 중에서 Schokiltsh 식[3]과 Hoffmans 식[4]을 적용하여 비교하였다 (Fig. 6).

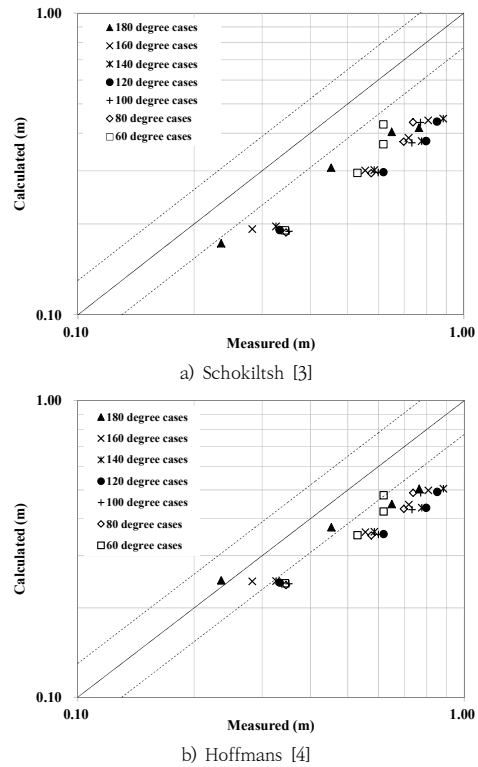


Fig. 6. Application of previous formulas

그 결과 Schokiltsh 식[3]은 17 ~ 52 % 차이를, Hoffmans 식[4]은 5 ~ 43 %의 차이가 각각 발생하였다. 즉 기존에 제안된 최대세굴심 산정식보다 세굴심이 더 깊게 발생하였다. 이러한 차이가 발생한 원인은, 기존 제안식은 균일입경의 모래를 이용한 실험결과를 바탕으로 개발되었고, 직선형 낙차공 실험결과를 토대로 제안된 경험식인데 반해, 본 연구에서는 두 가지 혼합모래를 사용하였으며, V자형 낙차공 모형실험을 수행하여 얻은 세굴심이기 때문이다. 또한 기존연구[9]를 통해 다양한 변수들(낙차공 상류 프루드수와 평균유속 및 수심, 하상중앙입경 등)과 세굴공 규모와의 상관관계를 분석한 바 있으며, 이 중에서 낙차공의 총횡단길이, 낙차공 상류부 프루드 수 및 평균유속이 가장 높은 상관관계가 있는 것으로 밝혀진 바 있다[9].

2.5 세굴규모 산정식 개발

본 연구에서 측정된 최대세굴공의 규모는 수심(H), 낙차공의 총횡단길이(W_l), 그리고 상류접근 프루드수(Fr_u)와 가장 큰 상관관계가 있음이 밝혀진 바 있기 때문에 무차원화변수($\frac{H}{W_l Fr_u}$)로 구성하여 최대세굴길이와 깊이에 대하여 분석하였다(Fig. 7). 또한 이러한 관계에 따라 최대세굴공의 길이(L_s)와 깊이($y_{m,e}$)를 무차원화된 경험식으로 정리하였다.

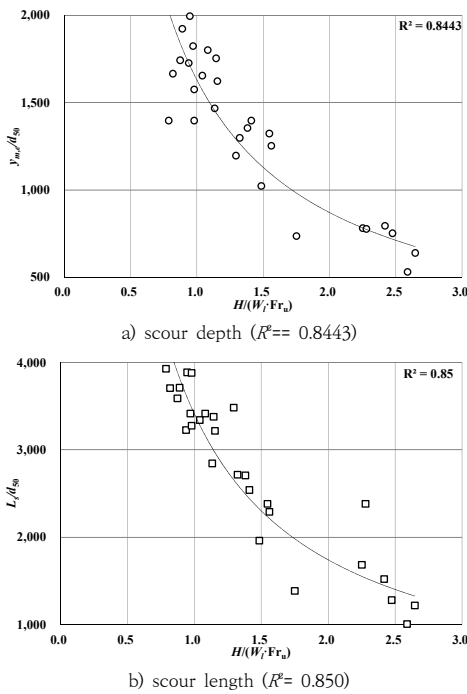


Fig. 7. Correlation analysis of scour scales

$$\frac{L_s}{d_{50}} = 3.414 \times 10^3 \left(\frac{H}{W_l \cdot Fr_u} \right)^{-a} \quad (1)$$

$$\frac{y_{m,e}}{d_{50}} = 1.631 \times 10^3 \left(\frac{H}{W_l \cdot Fr_u} \right)^{-b} \quad (2)$$

여기서 a 와 b 는 무차원화된 세굴길이와 세굴깊이에 대한 지수(exponent)로 각각 약 0.9725와 0.9048이다. 위 식을 이용하면, 기존에 제안되어 널리 활용되고 있는 세굴규모 산정식의 한계점을 극복하여 V자형 낙차공 하류부에서 발생가능한 세굴규모를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 결론

본 연구는 저낙차를 갖는 자연형(V자형) 낙차공의 다양한 평면형태의 변화에 따라 하류부에서 발생하는 세굴 현상에 대해 분석하였으며 기존에 제안된 세굴심 산정식들과도 비교하였다. 또한 흐름특성 및 평면형상, 그리고 하상특성이 고려된 무차원변수를 선정하여 다음과 같은 결론을 제시하였다.

- 기존에 제안된 Schokiltsh [3]과 Hoffmans [4]가 제안한 경험식이 본 실험과 연관성이 가장 높은 제안식으로 평가되어 실험결과를 이 두 식에 적용하여 분석한 결과 약 5 ~ 50 % 정도까지 오차가 발생하였으며, 본 실험에서 사용한 혼합사에 대한 세굴규모 예측이 부족하다고 분석하였다.
- 낙차공의 평면형태가 세굴심에 미치는 영향을 검토한 결과 낙차공으로의 유입 프루드수 및 평면각도에 따라 변하는 낙차공의 횡단길이가 낙차공 하류부의 세굴심에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀진 바 있으며 이를 반영한 새로운 무차원변수를 수립하여 새로운 산정식을 제시하였다.

본 연구는 자연형 재료인 통나무를 이용하여 저낙차를 갖는 다양한 형태의 낙차공 하류부의 세굴실험을 수행하여 세굴심 및 세굴길이를 산정하는 추정식을 제안하였다. 하지만 본 연구에서 제안한 추정식은 하상재료의 한계성으로 인해 실제 하천에 적용할 경우 하상재료의 특성을 고려한 후 본 연구에서 도출된 산정식을 사용하는 것이 타당하리라 생각된다. 향후 다양한 하상재료에 대한 실험이 추가적으로 수행된다면 보다 정확한 낙차공 하류부에서의 세굴심 추정과 산정식의 보완이 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] KWRA, *Design Criteria of the Hydraulic Structures and River Managements in Rivers*, Korea Water Resources Association, 2015 (in Korean).
- [2] H. S. Woo, W. Kim, U. Ji, *Fluvial Hydraulics*, Cheong Moon Gak publisher, 2015 (in Korean).
- [3] Schokiltsh, "Kolkbildung unter Überfallstrahlen", *Die Wasswirtschaft*, Vol.24, pp. 341-343 (in German).
- [4] G. J. M. Hoffmans, "Jet Scour in Equilibrium Phase", *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE,

Vol.124, No.4, pp. 430-437, 1998.

DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:4\(430\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:4(430))

- [5] A. Veronese, "Erosionidi Fondo a Valle di uno Scarico," *Annali dei Lavori Pubblici*, Vol.75, pp.717-726, 1987 (in Italian).
- [6] F. Zimmerman and U. Maniak, "Scour Behind Stilling Basin with End Sills of Baffle Piers," *Proceedings of 12th Congress IAHR, Fort. Collins*, September, 1967, pp. 117-124.
- [7] N. E. Bormann and P. Y. Julien "Scour Downstream of Grade-Control Structures", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.117, No.5, 1991, pp.579-594. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:5\(579\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:5(579))
- [8] F. E. Fahhlbusch "Scour in Rock Riverbeds Downstream of Large Dams", *International Journal on Hydropower & Dams, IAHR*, Vol.1, No.4, pp. 30-32.
- [9] J. H. Eom, *Experimental Study on Scour Characteristics at Downstream of Drop Structures According to Plan Types*, Ph.D dissertation, Inha University, Incheon, South Korea, pp. 24-32, 2011. URL: <https://dspace.inha.ac.kr/handle/10505/23014>
- [10] S. D. Park, "Assessment of Ascending Capacity of Migratory Fish in Fishways by Eco-hydraulic Experiments (II)", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 4, pp. 381-390, 2001. URL: [kwra.or.kr/wonmun/KWRA2_2001_34_4_381\(C\).pdf](http://kwra.or.kr/wonmun/KWRA2_2001_34_4_381(C).pdf)

엄 중 현(Junghyun Eom)

[정회원]



- 2011년 8월 : 인하대학교 토목공학과 공학석사
- 1996년 6월 ~ 1999년 2월 : 현대건설 근무
- 1999년 6월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 근무

〈관심분야〉

수리모형실험, RS (Remote Control), 계측표준화

한 형 준(Hyeongjun Han)

[정회원]



- 2012년 2월 : 인천대학교 건설환경공학과 공학석사
- 2012년 10월 ~ 2015년 9월 : 한국건설기술연구원 석사후연구원
- 2017년 3월 ~ 2018년 8월 : 주식회사 네이처앤휴먼 선임연구원
- 2018년 9월 ~ 2019년 6월 : 주식회사 자연과기술 선임연구원
- 2019년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임기술원

〈관심분야〉

수리모형실험, RS (Remote Control)

박 성 원(Sung Won Park)

[정회원]



- 2016년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 공학박사
- 2016년 2월 ~ 2017년 4월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2017년 5월 ~ 현재 : 인천대학교 인천방재연구센터 책임연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국과학기술정보연구원 데이터문제해결연구단 연구원

〈관심분야〉

하천수리학, 인공지능해석, 유사이송론, 오염확산이론

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