

수리모형실험 자료를 활용한 교각세굴심 산정식의 개발

장형준, 이호진*, 이효상, 김성덕
충북대학교 토목공학부

Development of Scour Depth Calculation Equation Based on Hydraulic Model Test Data

Hyung-Joon Chang, Ho Jin Lee*, Hyo Sang Lee, Sung-Duk Kim
School of Civil Engineering, Chungbuk National University

요약 우리나라는 1960년대 산업화 이후 하천 및 해상에 교량을 건설 하는 등 교통 기반시설을 활발하게 확충하였다. 교량 건설로 인하여 안정성 검토에 대한 많은 연구가 진행되고, 안정성 확보 기술이 개발되었다. 그러나 교량 상부를 중점으로 하여 기술이 개발됨에 따라 교량 하부에 대한 안정성 확보 기술 및 검사는 제한적인 실정이다. 특히 교각에서 발생하는 세굴현상은 하상에 침식 및 교량의 붕괴를 초래하기에 이에 대한 대책 수립 및 예방이 필요하다. 본 연구에서는 세굴현상에 따른 교량 피해를 예방하기 위한 기초 연구로서 교각 세굴심 산정 경험식을 개발하였다. 기존의 연구에서 진행된 수리모형실험 자료를 바탕으로 다중 선형 회귀분석을 실시하였으며, 이를 통하여 경험식을 개발하였다. 그 결과, 개발된 경험식은 0.91의 R^2 을 보이고 있으며, 개발된 식을 검증하기 위하여 개발에 활용되지 않은 모형실험 자료에 적용하였다. 23개 경우에 대하여 진행된 기존 모형실험의 결과와 개발된 식을 활용하여 산정된 교각 세굴심을 비교하였을 때, 약 70%인 16개 경우에서 20% 이하의 오차율 확인하였다. 이를 통하여 본 연구에서 개발된 경험식은 교각 세굴심 산정에 있어 적합한 적용성을 보인다고 판단할 수 있다. 향후 추가적인 연구를 통하여 보다 정확한 교각 세굴심 산정 경험식을 개발 할 수 있을 것이며, 세굴에 의한 교량 피해를 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Since the industrialization in the 1960s, Korea has been expanding its transportation infrastructure, such as building bridges. Owing to bridge construction, studies on stability review have been carried out, and stability-securing technology has been developed. On the other hand, these were applied mainly to the upper part of the bridge, so applications to the lower part are limited. In particular, scour at the bridge pier causes erosion in the riverbed and bridge collapse. Hence, prevention studies and countermeasures are needed. In this study, an empirical formula was developed to evaluate the scour depth of a bridge, which was calculated through multiple linear regression analysis using the hydraulic model study data conducted in previous studies. The formula, which had a value of 0.91, was applied to the model test data that was not used for development to verify the developed formula. When the pier scour depths were compared in 23 cases, the error rate was less than 20% in 16 cases (70%). The empirical formula developed in this study is applicable to pier scour-depth calculations. Further research will be needed to develop a more accurate empirical formula for pier scour-depth calculations, and it is expected to reduce bridge damage caused by scour.

Keywords : Pier Scour Depth, Multiple Regression Analysis, Empirical Formula, Scour, Bridge

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-C141846-01)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Ho Jin Lee(Chungbuk National Univ.)

email: hojinlee@chungbuk.ac.kr

Received September 11, 2019

Revised October, 2019

Accepted January 3, 2020

Published January 31, 2020

1. 서론

우리나라는 1960년대 산업화 이후 산업기술 및 경제 성장의 발달로 인하여 교통 기반시설이 급격하게 확충되면서 하천 및 해상에서의 교량 건설이 증가하고 있다. 또한, 국가경쟁력 및 물류비용 등의 절감을 위하여 육상과 하천 및 해안을 잇는 교량건설이 활발히 이루어지고 있으며 교량의 규모도 대형화가 되고 있는 추세이다.

이러한 교량 건설이 증가되고 대형화되면서 안정성에 대한 관심이 증대되고 있으며 이에 따라 교량 상부 구조물에 대한 안정성 분석 및 검토는 비교적 적절하게 이루어지고 있으나 하천 및 해상에서 발생하는 수리학적 현상으로 기인하는 세굴의 안정성에 대한 검토는 충분히 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 특히, 우리나라는 이상기후로 인하여 최근 집중호우 및 태풍 등에 의한 강도 강수를 경험하고 있으며, 강우에 따른 유출량 발생으로 하천의 수위가 급격하게 높아짐에 따라 유속이 점점 빨라지고 있다. 이는 교량 하부에서 세굴로 인한 피해발생의 직접적인 원인 중 하나이다.

이와 같은 세굴로 인하여 교량에 편심이 발생하게 되며, 교량이 기울거나 심각한 경우 교량이 무너지는 피해가 우리나라에서도 발생하고 있다. 대표적으로 2002년 8월 31일 경북 김천의 감천철교 중 교각 2개가 붕괴되었으며, 2010년 9월 21일 경기도 연주의 연양천에 위치한 신진교의 교각이 무너져 교량 전체가 붕괴되는 사건이 발생하였고 2011년 6월 25일 경북 칠곡의 낙동강 본류에 위치한 구 왜관철교가 무너져 내리는 피해가 발생하였다.

교각 세굴현상에 의해 발생하는 교량의 붕괴를 방지하고 인명 및 재산 피해를 예방하기 위하여 국내·외에서 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우 경기, 충청 및 강원 지역에서 실제로 측정된 교량 및 하천의 구조적 및 수리학적 자료를 바탕으로 실제 측정된 교각 세굴심과 교각 세굴심 공식을 활용하여 산정된 비교 및 분석하여 교각 세굴심 산정에 미치는 영향인자에 분석을 수행하였다. 강준구(2001)는 교각세굴 현상 연구에 있어서 가장 중요한 자료인 시제 관측 자료를 수집하기 위하여 실시간 교량 세굴 관측 시스템을 구축하기 위한 연구를 수행하였다[1, 2]. 그러나 현재까지 교량에서의 실시간 세굴 관측 자료를 수집하는 것에 대하여 많은 어려움을 겪고 있으며, 연구를 위한 기반 자료도 부족한 실정이다. 이에 교각 세굴심 예측 연구를 위하여 여러 가지 프로그램이 활용되고 있으며, 이를 검증하기 위하여 하천 및 토양의 특성과 유사한 조건을 바탕으로 한 수리모형실험이 이루어지고 있다. 심우배(2002)는 교각에서 발생하는 세

굴현상에 영향을 미치는 영향인자를 교각폭, 접근수심, 접근유속 및 하상재료의 입도분포 등이라고 분석하였으며, 영향인자들의 수치를 변화시키며 수리모형실험을 실시한 결과 세굴심을 분석하고 예측하는 성과를 내었다[3].

박제완(2012)은 하천의 만곡부에서 유출입 각도와 하천의 유량 변화에 대한 세굴심을 7개의 공식을 활용하여 산정하고 분석하였으며, 이를 통하여 하천 만곡부에서 비교적 부정확한 세굴심 산정 결과를 확인하였다[4]. 또한 산지 및 급경사지가 많은 우리나라의 특성을 반영한 세굴심 산정공식 개발이 필요하다고 판단하였다. 국외의 대표적인 세굴에 관한 연구로는 Shen et al.(1966), Nakagawa et al.(1975) 및 Raudkivi and Ettema(1983)이 있다.

Shen et al.(1966)은 단일 원형 교각에서 수심평균유속과 상류 수심에 따른 세굴심을 분석하기 위하여 유사 입경, 수심 및 수심평균유속을 변수로 하여 실내 모형 실험을 실시하여 원형 교각에서 발생하는 세굴심 산정 경험공식을 개발하였다[5]. Nakagawa et al.(1975)은 연직의 원형 교각에서 발생하는 세굴에 관한 실내 모형 실험을 통하여 정채대에서 최대 세굴심이 발생한다는 것을 확인하였으며, 말굽형 와류가 최대 세굴심 도달에 많은 영향을 미치고 있다는 것을 확인하였다[6]. 또한, Raudkivi and Ettema(1983)은 원형의 교각을 활용한 수리모형실험에서 최대 세굴심은 하상을 구성하고 있는 재료의 입경과 상관성이 있다고 확인하였다[7].

현재 우리나라는 「시설물안전관리에 관한 특별법」을 기준으로 교량에 대하여 정기점검, 정밀점검 및 정밀안전진단을 실시하여 교량 준공 후 지속적인 안전 진단 및 후속 조치가 이루어지고 있다. 교량이 붕괴되는 피해를 막기 위한 최선의 방법은 교량의 최초 설계 단계에서 교각에서 발생할 수 있는 정확한 세굴심을 예측하여 이를 설계에 충분히 반영하는 것이다. 그러나 현재 우리나라에서는 교각 세굴심 산정에 있어서 외국에서 개발된 산정공식을 그대로 사용하고 있으며, 정확한 설계기준이 미비한 것이 실정이다. 따라서 본 연구에서는 교각 세굴심을 산정할 수 있는 경험식을 개발하기 위하여 기존에 이루어진 다양한 교각 세굴 실험 자료를 바탕으로 IBM Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) 프로그램을 활용하였으며, 교각 세굴심을 종속변수로 설정하고 교각 세굴심과 연관성이 있는 인자들을 독립변수로 설정하여 다중 선형 회귀분석을 적용하였다. 이를 활용하여 개발된 경험식을 기존 실험 자료에 적용하고, 산정된 교각 세굴심과 실험을 통하여 도출된 세굴심을 분석하여 경험식의 적용성을 평가하였다.

2. 기본 이론 및 교각 세굴 실험자료

일반적으로 세굴현상은 하상 또는 제방을 구성하고 있는 재료들이 물의 흐름에 의하여 침식되거나 이동하여 하상 단면이 확대 또는 축소되는 현상을 의미한다. 세굴 현상의 크기는 하상을 이루고 있는 재료들의 종류와 구조물의 존재 여부에 따라 상이하며, 최대 세굴심까지 도달하는 시간 또한 달라진다. 세굴은 크게 장기하상저하(long term degradation), 단면축소세굴(contractive scour), 그리고 국부세굴(local scour) 3가지로 분류할 수 있다. 그 중 국부세굴은 하천의 통수단면 중 구조물에 의하여 흐름이 차단된 단면 주위에서 일어나는 현상으로, 교대 및 교각 주위의 와류에 의하여 발생하며, 최근 국부세굴에 의한 교량 파손 및 붕괴로 인하여 많은 피해가 발생 하고 있다. 이와 같은 피해를 방지하기 위하여 기존 연구자들이 수리 모형실험을 통하여 세굴에 대한 다양한 연구를 수행하였으며, 이 중 6개를 선정하여 본 연구에 활용하였다.

2.1 수리실험 자료 및 자료 특성

교각 세굴심 산정을 위한 경험식 개발을 위하여 본 연구에서 활용한 6개 실험 자료 및 현황은 Table 1.과 같다.

Table 1. General information of six selected researches

No.	Author	Year	No. of tests
1	Dey et al.	1995	18
2	Melville and Chiew	1999	84
3	Mia and Nago	2003	23
4	Sheppard et al.	2004	14
5	Sheppard and Miller	2006	24
6	Lai et al.	2009	58

Dey et al.(1995)은 길이가 10m, 폭이 0.81m, 깊이가 0.25m인 수로에서 설치된 정지상태의 원형 교각 3개에서 발생하는 와류의 거동을 연구하였으며, 조건별 실험을 통하여 세굴심을 산정하였다[8].

Melville and Chiew(1999)는 정지 상태의 원형 교각에서 발생하는 세굴깊이를 측정하였으며, 특히 시간에 따른 세굴깊이의 변화에 초점을 맞춘 실험을 수행하였다[9].

Mia and Nago(2003)는 직경 0.56m인 수직의 원형 교각에 대하여 수리모형실험을 실시하기 위하여 길이 16m, 폭 0.6m, 깊이 0.4m수로를 활용하였으며, 교각의 주위를 채운 퇴적물의 평균입경(d_{50})은 51mm와 28mm를 활용하였다[10].

Sheppard et al.(2004)은 정지상 조건에서 3개의 서

로 다른 직경의 원형 교각(0.114, 0.305, 0.914 m), 3개의 서로 다른 균일 응집이 없는 퇴적물 지름(0.22, 0.80, 2.90 mm) 및 수심과 유속의 범위로 6.1m 너비, 6.4m 깊이 및 38.4m 길이의 수로에서 실험 하였다[11].

Sheppard and Miller(2006)는 길이 45m, 폭 1.5m, 깊이 1.2m인 수로에 직경이 0.15m인 원형의 교각을 설치하여 실험을 실시하였다[12].

Lai et al.(2009)은 정지상태의 교각을 활용하여 세굴심 측정 실험을 수행한 6개 연구결과를 바탕으로 최대 세굴심에 대한 연구를 실시하였다[13].

Table 2.는 기존 연구별 세굴심 실험에 적용된 실험 변수들이다. 여기서, d_{50} 은 실험에 활용된 퇴적물의 평균입경, b 는 교각의 폭, y 는 수심, V 는 물의 평균 유속, V^* 는 전단속도, V_c 는 임계속도, Q 는 교각이 놓인 단면에서 흐르는 유량, K_1 및 K_2 는 비례상수, n 및 m 은 지수이다.

기존 연구들에서는 다양한 실험 변수들을 활용하였으며, 이 중 d_{50} , b , y 및 V 가 모든 연구들에서 적용되었다. 기존 연구들에서 실험 변수로 적용된 4개의 변수들이 교각 세굴심 산정에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 판단되어 본 연구에서는 실험 진행에 있어 가장 많이 적용된 4가지 변수들을 활용하여 교각 세굴심 산정 경험식 개발에 활용하였다.

Table 2. Variables of researches

No.	Variables											
	d_{50}	b	y	V	V^*	V_c	Q	K_1	K_2	n	m	
1	○	○	○	○	○			○	○	○	○	
2	○	○	○	○								
3	○	○	○	○			○					
4	○	○	○	○		○						
5	○	○	○	○		○						
6	○	○	○	○								

3. 경험식 개발 및 분석

우리나라에서는 교각 설계에 있어 적용되는 교각 세굴심 산정을 위하여 외국에서 개발된 공식을 활용하고 있다. 그러나 보다 정확한 설계 기준 제시를 위하여 본 연구에서는 통계적 방법과 기존 연구에서 진행된 수리 모형 실험 자료를 바탕으로 교각 세굴심 산정을 위한 경험식을 개발하였다. 교각 세굴심 산정 경험식을 개발하기 위하여 통계 분석 프로그램인 IBM Statistical Package for the Social Science(SPSS) Statistics 20 프로그램

을 활용하였으며, 다중 선형 회귀분석을 적용하였다. 다중 선형 회귀분석은 종속변수가 2개 이상의 독립변수와 연관성이 있는 경우 적용하는 회귀분석 방법으로, 경험식을 만들거나 하는 교각 세굴심을 종속변수로 설정하고 교각 세굴심과 연관성이 있는 인자들을 독립변수로 설정하여 분석을 실시하였다. 이를 통하여 다음 Eq. (1)과 같은 경험식을 개발하였으며, 개발된 식의 R^2 는 0.91이다. R^2 는 실험대상마다 그 특성을 달리하므로 일반적으로 R^2 가 0.7이상이면 강한 상관관계가 있다고 할 수 있다 [14]. 따라서 본 경험식은 비교적 높은 R^2 수치를 보이고 있으며, 경험식 개발에 있어 교각 세굴심과 실험 변수들이 상관성을 가지고 있다고 판단할 수 있다.

$$-0.030 + 0.887 \times b + 0.102 \times y + 0.091 \times V - 0.002 \times d_{50} \quad (1)$$

Where, b denotes width, y denotes water level, V denotes mean velocity, d_{50} denotes average diameter of deposit

교각 세굴심 산정에 있어 개발된 경험식의 적용성을 분석하기 위하여 경험식 개발에 활용되지 않은 Mia and Nago(2003)의 실험 자료에 적용하였으며, 산정된 세굴심 결과는 Table 3.과 같다. 또한, 실험 변수별 세굴심 결과와 경험식을 활용하여 산정된 결과 사이의 오차율을 산정하였다. Table 1.에서 Mia and Nago(2003)가 실험한 23개 실험 중 약 70%에 해당하는 16개 경우에서 기존 실험 결과와 경험식을 활용하여 산정한 세굴심이 20% 이내의 오차율을 나타내고 있다. 오차율 결과를 분석하였을 때, 가장 큰 오차율을 나타낸 실험은 12번으로, 38%의 오차율을 보이고 있다. 가장 작은 오차를 보이는 경우는 18번 실험으로써, 소수점 셋째자리까지는 오차가 없이 거의 동일한 세굴심 산정 결과를 나타내고 있다. 다음으로는 11번, 19번 및 20번 실험이 2%의 작은 오차율을 나타내고 있다.

또한, 기존의 실험 결과 및 산정된 세굴심 결과를 보다 쉽게 확인하기 위하여 결과를 Fig. 1.과 같이 도시하였다. Fig. 1.의 점들이 45° 선에 가깝게 위치할수록, 경험식을 활용하여 산정된 세굴심 결과가 실험 결과와 비교하여 작은 오차를 나타낸다. 본 연구에서는 회귀식을 통하여 산정된 세굴심 결과가 45° 선과 가깝게 분포하는 것을 확인하여 기존 실험결과와 비슷한 경향을 보이고 있는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 다소 실험결과와 상이한 결과도 확인 되었다. 이는 경험식에 이용된 자료 198개에 대하여 약 70% 정도의 결과가 실내 실험 자료와 20% 이내오차율 값을 나타내고 있다. 국내에서 가장

Table 3. Comparison the experimental datas by Mia and Nago(2003) and the developed equation for scour depth

No.	Scour from experimental datas	Scour by equations	
		Eq. 1	error(%)
1	0.071	0.066	8*
2	0.078	0.071	8*
3	0.089	0.077	13*
4	0.096	0.082	15*
5	0.106	0.087	18*
6	0.102	0.077	24
7	0.059	0.046	22
8	0.083	0.055	33
9	0.07	0.076	9*
10	0.113	0.121	7*
11	0.161	0.165	2*
12	0.093	0.058	38
13	0.15	0.102	32
14	0.175	0.147	16*
15	0.076	0.072	5*
16	0.109	0.094	14*
17	0.137	0.116	15*
18	0.07	0.070	1*
19	0.09	0.092	2*
20	0.112	0.114	2*
21	0.211	0.134	36
22	0.314	0.215	32
23	0.15	0.128	15*

많이 사용되고 있는 CSU 세굴심 산정공식 같은 경우 실측치의 200% 이하의 오차율을 가지고 있으며, 현재 까지도 세굴심 산정에 있어서 가장 합리적인 식으로 사용되고 있다[15]. 따라서 실내 모형 실험을 통하여 개발된 경험식은 교각 세굴심 산정에 있어 활용 가능성이 있는 기초연구라고 판단되며, 향후 실측 세굴 자료들을 이용하여 적용한다면 우수한 연구 결과를 도출 할 수 있을 것으로 기대된다.

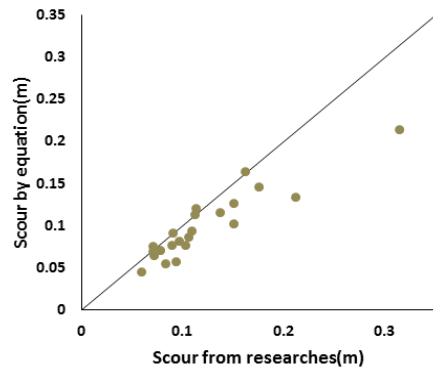


Fig. 1. Scatter plot with scour from researches and estimated by developed equations

4. 결론

본 연구에서는 교량에서 발생하는 교각 세굴에 의한 피해를 예방하기 위하여 보다 효율적으로 교각 세굴심을 산정할 수 있는 경험식을 개발하고 제시하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

① 교각 세굴심에 비교적 큰 영향을 가지는 실험 변수들과 IBM SPSS Statistics 20 프로그램을 활용하여 교각 세굴심 산정을 위한 경험식을 개발하였다. 경험식은 다중 선형 회귀분석을 통하여 개발되었으며, 개발된 경험식의 R^2 는 0.91로 나타났다. 이를 통하여 개발된 경험식이 교각 세굴심과 4개의 실험 변수 사이의 상관성을 충분히 반영하고 있다고 판단할 수 있다.

② 개발된 경험식의 적용성 검토를 위하여, 경험식 개발에 활용되지 않은 기존의 실험 결과를 활용하였으며, 실험 결과와 경험식을 활용하여 산정된 세굴심을 비교 및 분석하였다. 그 결과, 활용된 23개 실험 중 약 70%에 해당하는 16개의 실험에서 기존의 연구 내용과 개발된 경험식을 통하여 산정된 세굴심이 20% 내의 오차를 보였으며, 특히 5개 실험에서는 오차율 5% 이내의 비교적 우수한 교각 세굴심 산정 결과가 나타났다. 이를 통하여 개발된 경험식이 교각 세굴심 산정에 있어 비교적 우수한 적용성을 보인다고 판단할 수 있다.

향후 보다 확대된 실험 결과와 국내의 하천 하상재료의 특성을 반영하여 실시된 실험을 바탕으로 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 추가적인 연구를 통하여 국내 하천 특성을 반영한 교각 세굴심 산정 경험식이 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Kang, J. G., "Bridge scour depth investigation of small and medium streams in Korea", Master's thesis, Myongji University, Korea, Feb. 1999.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00163-010-0086-1>
- [2] Kang, J. G., "Development and application of real-time bridge scour monitoring system", Ph.D thesis, Myongji University, Korea, Dec, 2001.
- [3] Sim, O. B., "An experimental study on prediction of local scour depth around a cylindrical bridge pier with circular collar", Ph.D thesis, Hongik University, Korea, Jun, 2002.
- [4] Park, J. W., "Application evaluation of equation by the scour depth estimation in bight river", Master's thesis, Kangwon National University, Korea, Feb, 2012.
- [5] Shen, H. W., Schneider, V. R. and Karaki, S. S., Mechanics of local scour, U.S., Department of Commerce, National Bureau of Standards, Institute for Applied Technology, Gaithersburg, Maryland, 1966.
- [6] Nakagawa, H., Nezu, I. and Ueda, H., "Turbulence of open channel flow over smooth and rough beds", *Proceeding of Japan Society of Civil Engineers*, No. 241, pp. 155~168, Dec, 1964.
- [7] Raudkivi, A. J. and Ettema, R., "Clear-water scour at cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 338~350, Jan, 1983.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))
- [8] Dey, S., Bose, S. K., and Sastry, G. N., "Clearwater scour at circular piers: a model", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 12, pp. 869~876, Dec, 1995.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:12\(869\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:12(869))
- [9] Melville, B. and Chiew, Y., "Time Scale for Local Scour at Bridge Piers" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 1, pp. 59-65, Jan, 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:1\(59\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:1(59))
- [10] Mia, M. and Nago, H., "Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 6, pp. 420~427, May, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:6\(420\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:6(420))
- [11] Sheppard, D. M., Odeh, M., and Glasser, T. Large Scale Clear-water Local Pier Scour Experiment. *Journal of Hydraulics Engineering*, Vol. 130, No. 10, pp. 957-963, Oct, 2004.
- [12] Sheppard, D. M and Miller, W., "Live-bed local pier scour experiments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 7, pp. 635~642, Jul, 2006.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:7\(635\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:7(635))
- [13] Lai, J., Chang, W., and Yen, C., "Maximum local scour depth at bridge piers under unsteady flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 7, pp. 609~614, Feb, 2009.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000044](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000044)
- [14] Seong, T. J., Understanding and applying modern basic statistics, p. 598, hakjisa, 2019.
- [15] The Countermeasures against the Scouring in Highway Bridges Report, Korea Expressway Corporation, Korea.

장 형 준(Hyung Joon Chang)

[정회원]



- 2015년 2월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2018년 2월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 토목공학부 강사 및 박사 후 연구원

<관심분야>

강우유출, 방재안전

김 성 덕 (Sung-Duk Kim)

[정회원]



- 2001년 8월 : 중앙대학교 대학원 지구환경 시스템공학과 (공학석사)
- 2007년 8월 : 중앙대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 토목공학부 강사

<관심분야>

재난관리, 방재해석

이 호 진(Ho Jin Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2009년 10월 ~ 2010년 11월 : Colorado State University 토목환경공학과 박사 후 연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 공과대학 토목공학부 교수

<관심분야>

유사현상, 해안세굴

이 효 상(Hyo Sang Lee)

[정회원]



- 2001년 11월 : Imperial College London, UK 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2006년 5월 : Imperial College London, UK 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2006년 6월 ~ 2007년 6월 : Helmholtz Centre 연구원
- 2007년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 토목공학부 교수

<관심분야>

강우유출, 방재안전