

# 수리모형실험 자료를 이용한 교각 세굴심 산정공식의 통계적 특성 분석

김종섭<sup>1</sup>, 장형준<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한밭대학교 도시공학과, <sup>2</sup>충북대학교 토목공학부

## Analysis of Statistical Characteristics of Pier-Scour Depth Formula Using Hydraulic Experiment Data

Jong-Sub Kim<sup>1</sup>, Hyung-Joon Chang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Urban Engineering, Hanbat National University

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Chungbuk National University

**요약** 우리나라는 1960년대 이후, 공산품의 수출 증가로 인하여 경제성장을 거듭하며, 도시화 및 산업화가 급격하게 진행됨에 따라 교량 등과 같은 교통 기반시설이 급격하게 증가하였다. 교통기반시설 중 교량의 규모가 대형화되면서 교량의 상부 구조물에 대한 안정성 검토가 활발하게 이루어지고 있으나 교량 하부 구조물을 대상으로 한 세굴 안정성 검토는 충분히 이루어지지 못하고 있다. 본 연구에서는 교량의 하부 구조물인 교각에서 발생하는 세굴 현상에 따른 대규모 재해를 예방하기 위한 기초 연구로서 17개의 교각 세굴심 산정식을 바탕으로 계산된 교각 세굴심 깊이와 수리 모형실험을 바탕으로 측정된 세굴심에 대하여 단순선형회귀모형을 활용하여 분석하였다. 그 결과, 교각 세굴심 산정공식 중 가장 우수한 방법은 Coleman(1971)방법이 선정되었으며, 교각 세굴심 산정에 가장 유효한 방법은 Froehlich(1987) 방법으로 확인되었다. 또한, 단순회귀모형을 활용하여 검토한 결과 CSU(1993), Coleman(1971) 및 Froehlich(1987) 교각세굴심 산정식이 국내 하천특성을 반영하여 가장 유사한 세굴심을 예측 할 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과는 향후 하천설계에 있어 우리나라 환경에 적합한 세굴심을 산정하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** Since the 1960s, traffic infrastructure, such as bridges, has increased rapidly in Korea as urbanization and industrialization progressed due to economic growth. As the scale of the bridge becomes larger, stability analysis of the superstructure of the bridge is being conducted actively, but scour stability analysis for the substructure of the bridge has not been conducted sufficiently. This study is a basic investigation to prevent large-scale disasters caused by scouring in bridge piers. A simple linear regression model was used to analyze the scour depth calculated through seventeen scour depth calculation formulae, and the scour depth measured through hydraulic model experiments. As a result, the Coleman (1971) formula was the best method among the scour depth calculation formulae, and the Froehlich (1987) formula was the most effective method for calculating the scour depth. In addition, a review using a simple regression model confirmed that the scour depth calculation formulae of CSU (1993), Coleman (1971), and Froehlich (1987) can predict a similar scour depth by reflecting domestic stream characteristics. This study can calculate the scour depth reflecting the environmental conditions of Korea in future stream design.

**Keywords** : Characteristics, Scour Depth, Pier, Bridge, River

\*Corresponding Author : Hyung-Joon Chang(Chungbuk National Univ.)

email: param79@cbnu.ac.kr

Received April 19, 2021

Accepted June 4, 2021

Revised May 12, 2021

Published June 30, 2021

## 1. 서론

우리나라는 1960년대 이후, 공산품의 수출 증가로 인하여 경제성장을 거듭하였으며, 이로 인하여 도시화 및 산업화가 급격히 진행되었기에 교통 기반시설이 급격하게 확충되었다. 또한, 물류비용 절감을 위해서는 육상과 해안 및 하천의 연결할 수 있는 교량 건설이 필수적이며, 교량의 규모도 대형화가 되어가고 있다. 이러한 교량 건설이 대형화되면서 안정성에 관한 관심이 증가하고 있다. 이에 교량 슬래브와 같은 교량 상부 구조물에 대한 안정성 검토는 적절하게 이루어지고 있으나 해상이나 하천에서 발생하는 수리학적 현상인 세굴에 대한 안정성 평가는 충분히 이루어지지 못하고 있다. 특히, 우리나라는 기상이변으로 인하여 태풍 및 강우강도가 증가하고 있으며, 이로 인하여 이상 홍수의 발생이 증가함에 따라 세굴에 대한 위험성이 증대되고 있다.

국내 주요 대형 교량의 기초는 충적층의 두께가 얇은 곳에 있어 암반층 위에 설치된 경우가 많아 상대적으로 세굴에 의한 피해 발생이 적다. 그러나 국내의 대다수 교량은 소형 교량으로 이루어져 있으며, 수십 년 전에 건설되었으며, 교량의 기초가 충적층에 건설된 경우가 많아 대형 교량과 비교하였을 경우 세굴에 대한 안정성이 취약하다. 또한, 현재 하천설계기준에서는 국부세굴공식을 이용하여 교각 주위 내 세굴량을 산정하는 경우 CSU 공식을 주로 이용하나 불확실성을 고려하여 CSU 공식 이외에도 제안된 공식을 활용한 최소 2개 이상을 택하여 세굴량을 산출하고 세굴 깊이와 세굴 폭에 대한 평가를 한 후, 세굴량을 결정하고 있지만 크게는 수배에 이르는 결과 차이를 보여 교각 세굴심 예측에 어려움을 겪고 있다[1].

세굴에 영향으로 인하여 교량에 대한 위험성이 증대됨에 국내 및 국외에서 교각 세굴심에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 그러나 세굴현상에 대한 연구를 수행하기 위해서는 교량이 설치된 위치에서의 유속, 유량, 세굴량 등을 직접 측정하는데 한계점이 있어 대부분 실험을 통하여 교각 세굴 현상에 대해 관측을 하고 있으며, 교각 세굴심을 추정하고 있다[2]. 그러나 국내에서 사용되고 있는 교각 세굴심 산정공식은 국외의 유역특성을 바탕으로 개발되었기에 국내 적용 시 많은 어려움이 있는 현실이다. 따라서 국내 유역특성을 반영한 교각 세굴심을 산정하기 위하여 경기도 양평군에 위치한 3개 교량에 대하여 실제 하천 세굴심 실측 자료와 산정공식으로 계산된 세굴심의 비교 검토가 수행되었다[3]. 세굴의 현

황 분석과 세굴 산정공식에 대한 영향인자 분석을 위하여 경기, 강원, 충청 지역에 위치한 290개소 교량이 분석되었으며[4], 세굴현상을 파악하기 위하여 실시간 교량세굴 관측 시스템 개발을 위한 연구 및 수치모형실험의 검토 등의 연구가 진행되었다[5-7]. 또한, 국내에서 적용되고 있는 CSU, Laursen, Jain-Fischer 등의 교각 세굴심 산정식을 활용하여 국내에 비교 검토한 사례로는 만족부하천을 대상으로 한 세굴심 및 각도 변화에 대한 홍수량 비교 검토 등의 연구가 수행되었다[8-10].

미국에서는 지난 30년간 발생한 약 1,000건의 교량 붕괴를 발생시킨 요인은 교량 구조적인 문제이기보다는 교각에서 발생하는 수리학적 및 세굴 현상에 의해 발생하는 경우가 많으면 약 60% 정도라고 발표하였다. 이에 미국은 1950년대 이후 세굴에 관한 연구를 꾸준히 진행하고 있으며, 특히 1987년 발생한 대규모 홍수에 의해 17개 교량이 손해를 입거나 파괴된 원인이 세굴에 의한 것이라고 분석 후, HEC-18 등의 매뉴얼을 작성하였다 [11].

본 연구에서는 교량의 하부 구조물인 교각에서 발생하는 세굴 현상에 따른 대규모 재해를 예방하기 위한 기초 연구로서 불확실성을 고려하기 위하여 설계에 반영되고 있는 CSU, Froehlich, Laursen, Neill공식을 공식을 포함한 17개의 교각 세굴심 산정식으로 계산된 교각 세굴심 깊이와 수리 모형실험을 바탕으로 측정된 세굴심에 대하여 통계적 특성 분석을 수행하였다. 또한, 통계적 특성 분석 결과를 바탕으로 우리나라 하천에 적합한 세굴심 산정공식을 검토하였다.

## 2. 기본이론

### 2.1 세굴의 분류

세굴이란 하천 등에서 흐름을 구성하는 유체 등에 의하여 하상 및 제방을 구성하고 있는 재료의 분리현상으로 하천 단면이 확대되는 현상을 의미하며, 유수에 의한 침식작용 등을 포함한다. 이에 하상의 구성물질이 다르면 세굴형태에서도 차이를 나타내게 된다. 결합구조가 느슨한 형태의 흙은 침식이 급격하게 진행되나 응집성이 강한 흙은 세굴에 잘 견디는 특징을 가지고 있다. 그러나 응집성이 강한 흙의 최대 세굴심은 하상재료가 모래일 경우 크게 나타날 수 있으며, 자갈일 경우 세굴 때문에 짧은 시간 동안 최대 세굴심에 도달하게 된다. 또한, 하천 구조물 건설로 인한 수리학적 특성 변화로 인하여 교각

및 교대의 세굴현상으로 세굴이 오랜 시간동안 진행되면 재산 및 인명피해가 크게 발생하게 된다.

세굴은 하천의 흐름이 긴 시간 동안 지속하여 발생하는 장기하상저하, 하천의 통수 단면 중 교각과 교대 주위에서 와류로 인하여 발생하는 국부 세굴 및 구조물 건설로 인하여 흐름단면이 축소되어 발생하는 단면축소세굴로 분류되고 있다[12].

## 2.2 세굴 주요 영향 인자

일반적인 정상 흐름에서 세굴의 주요 영향인자는 말굽형 와류다[13]. 말굽형 와류는 교각 파일 외곽 부분 유선이 좁아지면서 다량의 유사를 침식시킬 수 있으며, 최종적으로 원추형 세굴공을 생성하게 된다. 또한, 세굴에 영향을 미치는 인자로 Shields 수, 파일 크기 및 유사등급에 대한 경계층의 형상비, 깊이비 등의 정렬인자가 있다.

Table 1. Prediction formulas of scour depth around pier

No.	Proposer	Year	Prediction Formulas of Scour Depth around Pier
1	Inglis - Poona	1962	$\frac{d_s}{b} = 1.70 \left( \frac{q}{b} \right)^{0.78}$
2	Inglis - Lacey	1966	$d_s = 0.946 \left( \frac{q}{f} \right)^{\frac{1}{3}} - y$
3	Laursen	1969	$d_s = 1.5Kb^{0.7}y^{0.3}$
4	Chitale	1971	$\frac{d_s}{y} = 6.65F_r - 0.51 - 5.49F_r^2$
5	Ahmad	1973	$\frac{d_s}{b} = \frac{y}{b} \left( 4.77F_r^{\frac{2}{3}} - 1 \right)$
6	Breusers	1975	$d_s = 1.4b$
7	Hancu	1987	$\frac{d_s}{b} = 3.3 \left( \frac{d_{50}}{b} \right)^{0.2} \left( \frac{y}{b} \right)^{0.3}$
8	Shen I	1993	$d_s = 0.00023(Re)^{0.619}$
9	Blench	1969	$\frac{d_s + y}{y_r} = 1.8 \left( \frac{b}{y_r} \right)^{0.25}$
10	Shen-Karaki II	1969	$\frac{d_s}{b} = 11F_r^2$
11	Shen-Karaki III	1969	$\frac{d_s}{b} = 3.4F_r^{0.67}$
12	Coleman	1971	$\frac{d_s}{y} = 1.39F_r^{0.2} \left( \frac{b}{y} \right)^{0.9}$
13	Neill	1973	$\frac{d_s}{b} = 1.5 \left( \frac{y}{b} \right)^{0.3}$
14	UGSG	1975	$d_s = 1.2b^{0.8}$
15	Basik-Basamily-Ergun	1975	$d_s = 0.558b^{0.586}$
16	Froehlich	1987	$\frac{d_s}{b} = 0.32k_1 \left( \frac{b'}{b} \right)^{0.62} \left( \frac{y}{b} \right)^{0.46} F_r^{0.2} \left( \frac{b}{d_{50}} \right)^{0.08} + 1$
17	CSU	1993	$\frac{d_s}{y} = 2.0k_1k_2k_3 \left( \frac{b}{y} \right)^{0.65} F_r^{0.43}$

$b$  : Pier width,  $d_s$  : Scour depth,  $b'$  : Projected width of pier,  $F_r$  : Froude number,  $K_1$  : Correction factor for pier nose shape,  $K_2$  : Correction factor for attack angle of flow,  $K_3$  : Correction factor for bed condition,  $Re$  : Reynolds number,  $y$  : Water depth,  $Q$  : Flow(m<sup>3</sup>/sec)

세굴심이 크게 감소하는 경우는 정지상 조건에서 유사 등급을 나타내는 기하학적 표준편차와  $\sigma_g = d_{84}/d_{50}$ 가 증가하였을 때 이다[14].

### 2.3 세굴 분석을 위한 매개변수

세굴현상은 유수에 의한 침식 능력과 하상 구성 재료의 침식 저항 능력의 상호 작용으로 발생하는 현상이라 할 수 있다. 침식 능력에 영향을 미치는 주요 물리적인 인자는 구조물인 파일의 크기와 형상, 하천의 유속 및 하상의 조도 등이 있다. 또한, 침식 저항 능력에 영향을 미치는 주요 물리적인 인자는 하천바닥인 하상 구성 재료의 입경, 액성 한계 비중, 공극률, 비배수 전단강도, 하상의 조도, 건조 단위 중량등과 같은 하상 재료의 기본 토성치이다. 위와 같은 물리적 영향인자 외에도 세굴에 영향을 미치는 인자는 종류가 다양하고 상호 작용을 통하여 세굴 발생에 있어 복잡하게 연계되어 있다. 따라서 세굴을 해석하는 주요 방법은 이론에 의한 수치적인 해석 방법을 이용하는 것보다 유역 특성을 반영한 주요 세굴 영향인자들의 차원해석을 통하여 수행하는 것이 효율적이다[12].

## 3. 본론

### 3.1 교각세굴심 산정식

본 연구에서는 교각주변에서 세굴현상에 의해 발생하는 세굴심을 산정하기 위하여 기존 연구에서 제안된 17개의 세굴심을 활용하였으며, 해당 세굴심 공식은

Ttable. 1에 나타내었다. 세굴심 산정식들은 주로 유속, 수심, 교각의 폭, 평균 입경 등의 인자로 구성되어 있다.

### 3.2 수리 모형실험을 통해 측정된 세굴심 자료

본 연구에서는 교각세굴심 산정식의 적용성을 검토하고 Table. 2와 같이 기존 연구된 수리모형실험을 통해 측정된 실험자료 중 7개를 선별하여 공식에 적용하였으며, 개별 실험자료의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

### 3.3 통계량에 의한 평가 기준

본 연구에서는 기존 세굴심 공식을 평가하기 위하여 평균절대백분위오차(MAPE : Mean Absolute Percentage Error), 부등계수(U), 부분편의(FB), 기하평균편의(MG), 기하분산(GV), 정규화된 평균제곱오차(NMSE), 동의지표(IOA)를 활용하였으며, 각각 식은 아래 Eq. (1)~Eq. (7)과 같다. 여기서  $y_i$ 는 모형실험을 통한 측정 세굴심,  $x_i$ 는 세굴 경험식을 이용한 계산 값,  $n$ 은 비교 자료의 개수를 의미한다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{y_i} \times 100 \quad (1)$$

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - x_t)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t)^2 + \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t)^2}} \quad (2)$$

$$FB = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{0.5(\bar{y} + \bar{x})} \quad (3)$$

Table 2. Hydraulic experiment data

Source	Year	Number of data	Parameter
Johnson	1992	130	$d_{50}, y, b, F_r, d_s$
Dey et al.	1995	18	$d_{50}, b, y, V, V^*, d_s, K_1, K_2, n, m$
Melville and Chiew	1999	84	$d_{50}, b, y, V, d_s$
Miaand Nago	2003	23	$d_{50}, b, y, V, Q, d_s$
Sheppard et al.	2004	14	$d_{50}, b, y, V, V_c, d_s$
Sheppard and Miller	2006	24	$d_{50}, b, y, V, V_c, d_s$
Lai et al.	2009	58	$d_{50}, b, y, V, d_s$
summation		351	

$b$  : Pier width,  $y$  : Water depth,  $d_{50}$  : Median diameter,  $d_s$  : Scour depth,  $F_r$  : Froude number,  $V$  : Average velocity,  $V_c$  : Critical velocity,  $Q$  :Flow

$$MG = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(y_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)\right) \quad (4)$$

$$GV = \exp\left[\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(y_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)\right)^2\right] \quad (5)$$

$$NMSE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\bar{y} \cdot \bar{x}} \quad (6)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|x_i - \bar{x}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \quad (7)$$

#### 4. 분석결과

실제 측정된 세굴심 값과 다양한 분석방법을 통해 계산된 세굴심 예측 값을 통계량과 모형에 의한 평가 기준을 통해 분석방법에 대한 평가를 다음과 같이 수행하였다. 분석에 사용된 교각 세굴심 산정공식은 Inglis - Poona, Inglis - Lacey, Laursen, Chitale, Ahmad, Breusers, Hancu, Shen I, Blench, Shen-Karaki II,

Shen-Karaki III, Coleman, Neill, UGSG, Basik-Basamily-Ergun, Froehlich, CSU를 활용하였다. 각 교각 세굴심 산정공식의 유효성을 판단할 기준이 될 통계량의 평가기준은 평균절대백분위오차(MAPE), 부등계수(U), 부분편의(FB), 기하평균평의(MG), 기하분산(GV), 정규화된 평균제곱오차(NMSE), 동의지표(IOA)의 7항목이며 단순선형회귀모형을 통해 분석방법의 유효성을 확인하였다.

Table 3.은 통계량의 평가 기준에 의한 결과이며, 각 수치 옆 괄호 값은 순위를 나타내고 있다. 통계 분석 결과, 교각 세굴심 산정공식 중 가장 유효한 방법은 Coleman 방법이 선택되었으며, MAPE, U, FB, MG, GV, NMSE, IOA의 값이 각각 58.3798, 0.0213, -0.0038, 1.0213, 1.0004, 0.1663, 0.9994, 0.9458로 가장 작거나 두 번째로 작은 결과를 보였다. 또한, 상관계수 값이 0.9458로 모든 방법 중 두 번째로 크게 나타난 것을 확인하여 Coleman 방법이 교각 세굴심 산정에 있어서 가장 우수한 방법으로 나타난 것을 확인하였다. 다음으로 교각 세굴심 산정에 유효한 방법은 Froehlich 방법으로 MAPE, U, FB, MG, VG, NMSE, IOA의 값이 각각 64.2487, 0.0131, 0.0027, 1.1003, 1.0092, 0.1971, 0.9995으로 모든 값이 다른 방법에 비해 상대적으로 매우 작았으며 상관계수 값은 0.9383으로 모든

Table 3. Results based on statistical evaluation criteria

Method	Rank								
	MAPE	U	FB	MG	VG	NMSE	IOA	CORRE	
Inglis.P	293.5259 (15)	0.3241 (14)	0.1676 (15)	2.8821 (14)	3.0662 (14)	1.5349 (12)	0.9998 (14)	0.7818 (12)	
Laursen	113.2091 (8)	0.1243 (8)	0.0356 (10)	1.6154 (9)	1.2586 (9)	0.4604 (8)	0.9997 (10)	0.9368 (4)	
Chitale	189.7618 (13)	0.1704 (12)	0.0506 (13)	1.865 (12)	1.4747 (12)	1.4423 (11)	0.9997 (10)	0.3929 (15)	
Breusers	73.9618 (3)	0.0383 (4)	0.0087 (4)	1.1668 (4)	1.0241 (4)	0.3382 (5)	0.9996 (5)	0.9242 (8)	
Shen	110.5401 (7)	0.1081 (7)	0.0254 (7)	1.5925 (8)	1.2417 (8)	0.3389 (6)	0.9995 (3)	0.8717 (10)	
Blench	1377.805 (17)	0.6945 (17)	1.5189 (17)	9.6161 (16)	167.8628 (16)	5.8578 (16)	0.9997 (10)	-0.436 (13)	
Coleman	58.3798 (1)	0.0213 (2)	-0.0038 (2)	1.0213 (1)	1.0004 (1)	0.1663 (1)	0.9994 (2)	0.9458 (2)	
Hancu	742.3084 (16)	0.5117 (15)	0.7742 (16)	6.1756 (15)	27.5112 (15)	4.9576 (15)	0.9999 (17)	0.9253 (6)	
Neill	113.2091 (8)	0.1243 (8)	0.0356 (10)	1.6154 (9)	1.2586 (9)	0.4604 (8)	0.9997 (10)	0.9368 (4)	
Ahmad	281.6612 (14)	0.284 (13)	0.1368 (14)	2.4932 (13)	2.3039 (13)	2.5533 (13)	0.9998 (14)	0.3189 (16)	
English.L	177.5593 (12)	0.5136 (16)	-0.0227 (5)	17.0861 (17)	3151.817 (17)	13.0371 (17)	0.9996 (5)	-0.4302 (14)	
Shen.K	158.0952 (11)	0.1301 (11)	0.048 (12)	1.1116 (3)	1.0113 (3)	4.1063 (14)	0.9998 (14)	0.309 (17)	
Shen.J	100.7978 (5)	0.0933 (5)	0.0235 (6)	1.3973 (6)	1.1184 (6)	0.5648 (10)	0.9996 (5)	0.8272 (11)	
UGSG	125.6859 (10)	0.1269 (10)	0.0334 (9)	1.6842 (11)	1.3123 (11)	0.3027 (4)	0.9996 (5)	0.9246 (7)	
Basik.B.E	94.3295 (4)	0.0243 (3)	0.0043 (3)	1.3684 (5)	1.1034 (5)	0.4486 (7)	0.9992 (1)	0.9102 (9)	
Froehlich	64.2487 (2)	0.0131 (1)	0.0027 (1)	1.1003 (2)	1.0092 (2)	0.1971 (2)	0.9995 (3)	0.9383 (3)	
CSU	103.5854 (6)	0.1074 (6)	0.0262 (8)	1.5698 (7)	1.2255 (7)	0.2014 (3)	0.9996 (5)	0.9476 (1)	

방법 중 3번째로 크게 나타났다.

아래의 Table 4.는 모형 평가기준에 의한 결과이며, 평가를 위하여 단순회귀(Simple Regression)모형을 활용하였으며, 단순회귀 식은 Eq. (8)과 같다.

$$y_i = \alpha + \beta x_i \tag{8}$$

Eq. (8)은 실제값과 분석방법의 불확실성을 고려하게 나타내주며,  $\alpha$ 는 절편,  $\beta$ 는 기울기,  $x_i$ ,  $y_i$ 는 각각 실제값과 분석방법에 의해 추정된 값을 뜻한다. 또한, 실제값과 추정값이 통계적으로 대응되는지 확인하기 위하여 Eq. (9)와 같이 귀무가설을 활용하였다.

$$H_o : \alpha = 0, \beta = 1 \tag{9}$$

검정을 통해 Eq. 9와 같은 귀무가설이 기각되는지를 확인하였으며, 귀무가설이 기각된다면 절편에 의한 기각인지 기울기에 의한 기각인지를 확인하기 위하여 Eq. (10)과 같이 귀무가설을 추가로 검정하였다.

$$H_o : \alpha = 0, H_o : \beta = 1 \tag{10}$$

또한, 회귀분석결과 추정값이 실제값을 정밀하게 설명하는지 확인하기 위한 측정지표로 결정계수를 활용하였다.

Table. 4에서 검정결과 통계적으로 완벽히 실제값과 대응되는 방법은 없었으며, 기울기에 의해 기각된 분석방

법은 Laursen 방법과 Coleman, Neil, Shen.J 로 확인되었다. 또한, 절편에 의해 기각된 분석방법은 Shen 방법이 있었으며 다른 분석방법은 두 값 모두에 의해 기각됨을 확인하였다. 측정지표인 결정계수 값으로 확인한 가장 유효한 방법은 CSU 방법으로 확인되었으며, Coleman, Froehlich, Neil, Laursen, Hancu, UGSG, Breusers, Basik.B.E. Shen, Shen.J, Inglis.P, Blench, English. L, Chitale, Ahmad, Shen.K 방법 순으로 유효함을 확인하였다. 각각의 결정계수는 0.9405, 0.9386, 0.9304, 0.9288, 0.9288, 0.9163, 0.9155, 0.9151, 0.9001, 0.8602, 0.8161, 1.7737, 0.5284, 0.5255, 0.5077, 0.4770, 0.4734로 확인되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 교량의 하부 구조물인 교각에서 발생하는 세굴 현상에 따른 대규모 재해를 예방하기 위한 기초 연구로서 17개의 교각 세굴심 산정식을 바탕으로 계산된 교각 세굴심 깊이와 수리 모형실험을 바탕으로 측정된 세굴심에 대하여 단순선형회귀모형을 활용하여 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

Table 4. Results based on model evaluation criteria

Method	Interceptions	slope	$H_o : \alpha = 0, \beta = 1$	$H_o : \alpha = 0$	$H_o : \beta = 1$	$R^2$ (Rank)
Inglis.P	-0.0269	0.04802	dismissal	dismissal	dismissal	0.7737(12)
Laursen	0.0015	0.6735	dismissal	citation	dismissal	0.9288(4)
Chitale	0.0548	0.3452	dismissal	dismissal	dismissal	0.5077(15)
Breusers	0.0216	0.7304	dismissal	dismissal	dismissal	0.9151(8)
Shen	-0.0470	1.0212	dismissal	dismissal	citation	0.8602(10)
Blench	0.4641	-0.3858	dismissal	dismissal	dismissal	0.5284(13)
Coleman	0.0001	1.0666	dismissal	citation	dismissal	0.9386(2)
Hancu	-0.0502	0.2752	dismissal	dismissal	dismissal	0.9163(6)
Neill	0.0016	0.6735	dismissal	citation	dismissal	0.9288(4)
Ahmad	0.0722	0.1803	dismissal	dismissal	dismissal	0.4770(16)
English.L	0.0995	-0.3890	dismissal	dismissal	dismissal	0.5255(14)
Shen.K	0.0964	0.1410	dismissal	dismissal	dismissal	0.4734(17)
Shen.J	0.0115	0.6845	dismissal	citation	dismissal	0.8161(11)
UGSG	-0.0274	0.8465	dismissal	dismissal	dismissal	0.9155(7)
Basik.B.E	-0.1176	1.8222	dismissal	dismissal	dismissal	0.9001(9)
Froehlich	0.0140	0.8520	dismissal	dismissal	dismissal	0.9304(3)
CSU	-0.0371	0.9556	dismissal	dismissal	dismissal	0.9405(1)

1. 기존 사용되고 있는 17개의 교각세굴심 산정식으로 산정된 교각 세굴심 깊이와 수리 모형실험을 바탕으로 측정된 세굴심과 단순선형회귀모형을 통해 분석 결과 Coleman(1971)방법이 MAPE, U, FB, MG, GV, NMSE, IOA 방법에서 가장 우수한 결과를 나타내었다.
2. 교각 세굴심 산정공식 중 가장 우수한 방법은 Coleman(1971)방법이 선정되었으며, 교각 세굴심 산정에 가장 유효한 방법은 Froehlich(1987) 방법으로 확인되었다.
3. 단순회귀모형을 활용하여 검토한 결과 CSU(1993), Coleman(1971) 및 Froehlich(1987) 교각세굴심 산정식이 국내 하천특성을 반영하여 가장 유사한 세굴심을 예측할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 방법은 교량의 설치 위치, 형태, 하천 및 유역 특성 등 세굴심에 영향을 주는 인자들이 다양하고 서로 상호작용으로 인하여 정확한 세굴심을 예측하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구의 성과인 하천 세굴심 산정공식 선정 결과는 향후 하천설계에 있어 정도 높은 세굴심을 산정함에 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 추가적인 연구를 통하여 안전한 하천관리의 기초자료로서 제시하고자 한다.

## References

- [1] Explanation of River Design Standards, p.764, Korea Water Resources Association Korea River Association(2019), pp.746-761
- [2] B. Y. Min, Assessment of Applicability for Prediction Formulas of Scour Depth around Pier, Master's thesis, Chungbuk National University, 2017.
- [3] J. S. Yoo, In-Situ Measurement and Applicability of Bridge Scouring Depths, Master's thesis, Myongji University, Gyeonggi, Korea, 1976.
- [4] J. G. Kang, Bridge Scour Depth Investigation of Small and Medium Streams in Korea, Master's thesis, Myongji University, Gyeonggi, Korea, 1997.
- [5] Y. N. Yoon, J. Y. Yoon, J. S. Lee, "Estimation of Maximum Scour Depth at Bridge Due to Flood by Using 2-Dimensional Hydrodynamic Model", KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol.15, No.6, pp. 1689-1696, Nov. 1995.
- [6] J. G. Kang, Development and Application of Real-time Bridge scour monitoring system, Ph.D Dissertation, Myongji University, Gyeonggi, Korea,

- 2001.
- [7] S. S. Lee. Effect of local scour depth reduction around multiple bridge pier using circular collar, Master's thesis, Donga University, Busan, Korea, 2001.
- [8] J. H. Lim, The Experimental Study of Scour Depths due to Piers at Small Streams in Mountainous Areas, Master's thesis, Dankuk University, Gyeonggi, Korea, 2002.
- [9] O. B. Sim, "Variation of Hydraulic Characteristics around a Cylindrical Bridge Pier with Circular Collar", Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.3, No.2, pp.147-154, Jun. 2003.
- [10] J. W. Park, Application Evaluation of Equation by the Scour Depth Estimation in Bight River, Master's thesis, Kangwon National University, 2012.
- [11] B. M. Yoon, Guide for evaluating bridge excavation and establishing measures, Construction & transportation R&D report, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea, 2008.
- [12] B. Y. Min H. J. Chang, H. J. Lee, S. D. Kim, Review on Applicability of Local Scour Depth Calculation Formula in River, Journal of Korean Society of Disaster & Security, Vol.12, No.1, pp. 1-9, Mar. 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.21729/ksds.2019.12.1.1>
- [13] Baker, C.J. Vortex Flow around the Bases of Obstacles. Ph.D. Dissertation, University of Cambridge, Cambridge, UK, 1978.
- [14] Ettema, R. Scour at bridge piers, p.527, 1980, Dept. of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.

김 종 섭(Jong-Sub Kim)

[정회원]



- 1984년 8월 : 인하대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 도시공학과 교수

<관심분야>

수공학, 도시수문, 도시방재

장 형 준(Hyung-Joon Chang)

[종신회원]



- 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, 토석류