

하천 만곡부에서의 세굴심 산정식에 관한 연구

A Study on the Scour Depth Equation in Bight River

최 한 규* 박 제 완** 박 수 진***
Choi, Han-Kuy Park, Je-Wan Park, Soo-Jin

Abstract

Currently, we only estimate the average flood water level by the cross-sections of the river using one-dimensional numerical analysis when establishing the basic plans. However, the reliability decreases when it comes to the river bend. In river bend, the difference of water-level between the inside and the outside of the river arises by centrifugal force. And it is estimated less than what it could be estimated when establishing the plan with average estimate of flood level. It is apprehended that the exterior of the river will be under-constructed when establishing the scour depth only with the mean depth. In the case of local scour of the abutment, it is difficult to estimate its depth precisely, and it tends to be over-estimated in the case of the empirical formulas. Therefore, the modification considering the deviation of the water depth of the exterior of the river bend is needed. In observing the deviation of each formula in river bend, it is found: Andru's formula for 58%, followed by the Laursen's for 26%, and the C.S.U's for 17% in pier, while it is 44% for Froehlich's formula in abutment. Under the 500CMS of the flood discharge, the deviation of the scour depth between pier and abutment was about 10 %. However, in further flood discharge, it shows 24~58% the biggest in deviation of piers. It is concluded that the scour depth estimate should be done with 2-dimensional numerical analysis.

키워드 : 만곡부 하천, 교각 국부세굴심, 교대 국부세굴심

Keywords : *bight river, pier scour depth, abutment scour depth*

1. 서론

수치해석을 이용한 세굴심 산정은 하천의 지형적 특성, 하천을 가로지른 위치, 홍수의 특성, 하상과 제방의 구성재료의 특성 등이 서로 복잡하게 연계되어 발생되기 때문에 해석하기가 쉽지 않다. 그리고 홍수위 산정을 위하여 이용되는 기법은 평균적인 홍수위 산정이 가능한 1차원 모형과 하천

좌우의 수심편차까지 산정이 가능한 2차원 모형 및 수심에 대한 변동까지 해석이 가능한 3차원 모형으로 구분된다. 이 중에서 기본계획 수립 시 사용되는 모형은 1차원 수치해석 모형으로 하천 단면별로 평균홍수위만을 산정하고 있다. 그러나 1차원 수치해석만을 사용하여 계획을 수립하고 있는 실정에서 만곡(彎曲)된 하천에서는 수립된 계획의 신뢰성이 감소하게 된다. 만곡부 하천에서는 원심력에 의하여 하천 내·외측의 수위차가 발생하게 되나 평균적인 홍수위 산정을 실시하여 계획을 수립하는 경우에는 실제 발생 가능한 홍수위보다 작게 산정되는 오류가 발생하게 된다. 평균 수심만으로 세굴심을 산정하게 될 경우 만곡 하천의 외측은 과소설계가 될 우려가 있다. 교대 국부세굴의 경우

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신저자

** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

*** 강원대학교 토목공학과 공학박사

매우 다양한 형태로 진행되므로 교대 국부세굴심을 정확히 산정하기 어려울 뿐만 아니라 기존 경험공식의 경우 과다하게 산정되는 경향이 있다. 따라서 1차원 수치해석의 결과는 만곡 하천의 외측의 수심편차를 고려한 수정이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 만곡부 하천을 대상으로 홍수량 및 유·출입 각도 변화에 따른 세굴심을 산정하고 이를 비교·검토하여 세굴심 산정식의 적용성을 평가하였다. 끝으로 직선부와 만곡부의 편차를 산정하여 이를 정량적으로 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 연구 방법

2.1 지형자료 계획

교량의 국부세굴심은 하천의 수리특성에 따라 변하기 때문에 먼저 하천의 지형자료를 계획하였다. 본 연구에서는 하천을 대표할 수 있는 5가지의 하천 만곡부를 설정하여 계획을 수립하였고 하천 지형은 본 연구의 목적에 적합하도록 계획하여 수립하였다.

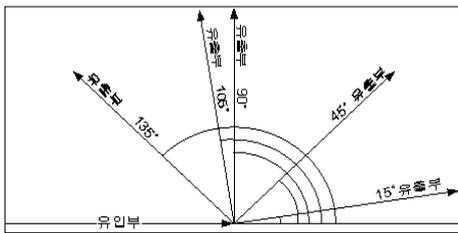


그림 1. 하천의 유·출입각

계획 단면은 만곡부 하천의 지리적인 특성과 이에 따른 하천의 규모 등을 고려하여 하폭은 40.0m로 계획하였다. 최근 교량 기술 발달로 경간장이 길어지는 추세이나, 경제성 등을 고려할 때 일반적으로 20m내외로 계획하므로 교각에 필요로 하는 하천은 40.0m내외로 판단됨에 따라 본 연구에서는 하천의 폭을 40.0m로 계획하였다. 제방의 구배는 호안공을 옹벽으로 형성되어진 경우 1:0.02이며, 자연형 호안공의 경우 1:1.5~1:2.0의 구배를 형성하므로 일반적인 값으로 1:1 구배로 계획하였다.

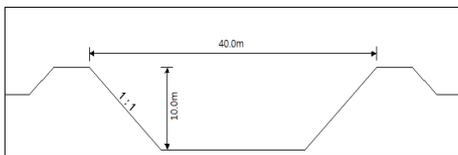


그림 2. 연구 계획 횡단면

2.2 홍수량 계획

홍수량 계획은 실제 하천의 자료를 인용하여 계획 단면에 맞게 적용하였다. 인용된 하천의 계획홍수량은 60~601CMS의 분포를 보이고 있으나 홍수량 범위를 크게 적용할 경우 앞에서 적용한 계획 단면의 통수능을 초과하는 경우가 발생할 수 있어 본 연구에서는 홍수량을 100CMS간격으로 100~1000CMS까지로 결정하였다.

2.3 교량의 단면 결정

교량의 단면은 교각의 폭 1.5m, 교각의 길이 12m, 교각의 형상은 원형으로 결정하였다. 그리고 하천 흐름을 방해하는 교대의 길이는 1m로 결정하였으며 흐름 방향과 교대의 각도는 90°로 설정하여 본 연구에 적용하였다.

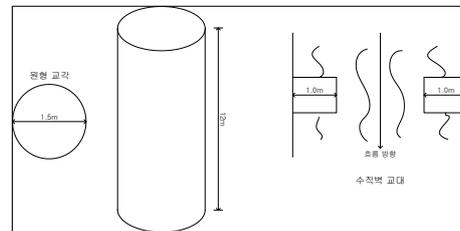


그림 3. 교각 및 교대의 단면과 제원

2.4 교각의 국부세굴심 산정식 선정

본 연구에서 적용한 국부세굴심 산정공식은 국내에서 많이 사용하는 C.S.U 공식, Froehlich 공식, Laursen 공식, Neill 공식, Andru 공식 등으로 교각의 국부세굴심을 산정하였다.

1) C.S.U 공식

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (1)$$

y_s : 세굴심도(m)

y_1 : 구조물의 직상류부 수심(m)

K_1 : 교각형상에 대한 보정계수

K_2 : 흐름 입사각에 대한 보정계수

K_3 : 하상조건에 대한 보정계수

K_4 : 하상재료 크기에 대한 보정계수

Fr : 구조물 설치 직상류부의 Froude

a = 교각폭(m)

2) Froehlich 공식

$$\frac{y_s}{a} = 0.32\phi \left(\frac{a'}{a} \right)^{0.62} \left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.46} Fr^{0.2} \left(\frac{a}{D_{50}} \right)^{0.08} + 1 \quad (2)$$

a' : 투영교각 폭(m)

ϕ : 교각 형상계수

D_{50} : 하상입자의 평균입경(m)

3) Neill 공식

$$\frac{y_s}{a} = 1.5 \cdot \left(\frac{y_1}{a}\right)^{0.3} \quad (3)$$

4) Laursen 공식

$$a = 5.5 \cdot y_s \left[\left(\frac{y_s}{11.5 \cdot y_1} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right] \quad (4)$$

5) Andru 공식

$$y_s = 0.8 \cdot y_1 \quad (5)$$

2.5 교대의 국부세굴심 산정식 선정

교대 세굴은 매우 다양한 형태로 진행되므로 정확히 산정하기 어려울 뿐만 아니라 기존 경험공식은 과다 산정되는 경향이 있다. 현재 HEC-18 및 HEC-RAS 모형에서는 흐름방향에 직각으로 투영된 교대 길이가 직상류부 단면 평균수심의 25배를 초과할 경우에는 HIRE 공식을, 25배 이하일 경우에는 Froehlich 공식을 사용하고 있다.

1) Froehlich 공식

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{L}{y_1} \right)^{0.43} Fr^{0.61} + 1 \quad (6)$$

K_1 : 교대 모양계수

K_2 : 흐름 방향과의 각도 보정계수

L : 흐름방향에 직각으로 투영된 교대 길이

2) HIRE 공식

$$\frac{y_s}{y_1} = 4Fr^{0.33} \frac{K_1}{0.55} K_2 \quad (7)$$

3. 세굴심 산정 및 고찰

3.1 유·출입 각도에 따른 수심편차 산정

본 연구에서는 만족 각도에 따른 하천의 외측 수심차를 산정하기 위하여 5가지 만족에 대해 회귀분석하였다. 회귀분석을 하여 도출된 회귀식을 다음 표에 정리하였다.

표 1. 유·출입 각도에 따른 수면경사도 회귀식

유·출입 각도	회귀식
15°	$Y = 0.1548 \times X^2 - 0.1586 \times X + 0.2267$
45°	$Y = 0.2 \times X^2 + 0.0667$

유·출입 각도	회귀식
90°	$Y = 0.1952 \times X^2 + 0.0286 \times X + 0.0733$
105°	$Y = 0.1786 \times X^2 + 0.2319 \times X + 0.8667$
135°	$Y = 0.1381 \times X^2 + 0.2181 \times X - 0.06$

다음으로 위 회귀식에 적용 될 수리특성들을 1차원 수치해석 프로그램인 HEC-RAS모형을 이용하여 유입량에 따른 수리특성을 도출하였고, 도출된 수리특성을 다음 표에 정리하였다.

표 2. HEC-RAS모형에서 도출된 수리특성

유입량 (CMS)	유속 (m/s)	수위 (m)	수심 (m)	수면폭 (m)	Fr 수
100	3.52	1.93	1.33	22.66	0.97
200	4.33	2.69	2.09	24.18	0.96
300	4.88	3.31	2.71	25.42	0.95
400	5.30	3.85	3.25	26.50	0.94
500	5.64	4.33	3.73	27.46	0.93
600	5.94	4.78	4.18	28.36	0.93
700	6.19	5.19	4.59	29.18	0.92
800	6.41	5.59	4.99	29.98	0.92
900	6.61	5.97	5.37	30.74	0.91
1000	6.80	6.32	5.72	31.44	0.91

위 표와 같은 수리특성을 이용하여 수면 경사도 회귀식에 적용하였다. 다음 표는 유입량에 따른 유·입 각도별 수심편차를 표로 정리한 것이다.

표 3. 유입 각도에 따른 하천 외측의 수심편차(m)

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
100	0.03	0.03	0.03	0.14	0.03
200	0.06	0.10	0.11	0.25	0.11
300	0.15	0.24	0.24	0.40	0.23
400	0.27	0.43	0.44	0.62	0.40
500	0.45	0.70	0.70	0.89	0.62
600	0.69	1.03	1.03	1.23	0.88
700	0.98	1.44	1.44	1.64	1.20
800	1.33	1.93	1.92	2.12	1.58
900	1.74	2.50	2.48	2.68	2.01
1000	2.22	3.15	3.13	3.31	2.50

산정결과 45°와 90°는 수심편차에서 큰 차이를 보이지 않았고, 105°에서는 수심편차가 큰 폭으로 상승하였으며 135°에서는 90°와 별 차이가 없어지는 결과가 도출되었다. 수심편차는 유입량이 1000CMS일 때 105°에서 가장 크게 산정되었으며, 유입량이 100CMS일 때는 105°를 제외한 나머지 유·출입 각도에서 거의 같은 값을 보였다.

위 표와 같이 회귀식으로 산정된 평균 수심과의 편차를 유·출입 각도별로 만족 하천의 외측에 적용하여 세굴심을 산정하였다. 아래 표는 산정된 수심 편차를 HEC-RAS모형에서 도출된 수리특성에 적용하여 정리한 것이다.

표 4. 만족을 고려한 하천의 외측 수심(m)

유입량	각도				
	15°	45°	90°	105°	135°
100	1.36	1.36	1.36	1.47	1.36
200	2.15	2.19	2.20	2.34	2.20
300	2.86	2.95	2.95	3.11	2.94
400	3.52	3.68	3.69	3.87	3.65
500	4.18	4.43	4.43	4.62	4.35
600	4.87	5.21	5.21	5.41	5.06
700	5.57	6.03	6.03	6.23	5.79
800	6.32	6.92	6.91	7.11	6.57
900	7.11	7.87	7.85	8.05	7.38
1000	7.94	8.87	8.85	9.03	8.22

세굴심 산정에 있어서 수심은 매우 중요하다. Andru 식에서와 같이 수심만을 가지고 세굴심을 산정하는 식도 있기 때문에 세굴심 산정에 있어서 수심 결정은 매우 신중하고 정확하게 해야만 한다.

수면경사도 회귀식을 이용하여 산정된 만족 하천의 외측 수심을 이용하여 만족부 하천에서의 세굴심 산정하였고 이에 대하여 비교·분석을 실시하였다.

3.2 만족부 하천의 교각 국부세굴심

현재 우리나라의 세굴심 산정은 하천 만족의 유무에 관계없이 1차원 수치해석에서 산정된 수심을 이용하여 세굴심을 산정하고 있다. 이번 절에서는 기존 세굴심 산정 방법과 만족부의 수위편차를 고려한 세굴심 산정값의 편차를 확인하기 위하여 만족을 고려하지 않은 세굴심과 만족을 고려한 세굴심을 산정하여 비교하였다.

다음은 기존 세굴심 산정방법에 의한 교각 국부세굴심을 공식별로 산정하여 표로 정리한 것이다.

표 5. 공식별 직선부 하천의 국부세굴심(m)

유입량	각도				
	15°	45°	90°	105°	135°
100	1.06	2.66	2.02	1.54	2.17
200	1.67	3.09	2.14	1.94	2.49
300	2.17	3.37	2.22	2.21	2.69
400	2.60	3.58	2.28	2.42	2.84
500	2.98	3.74	2.33	2.60	2.96
600	3.34	3.89	2.37	2.75	3.06
700	3.67	4.01	2.41	2.88	3.15
800	3.99	4.11	2.45	3.01	3.23

유입량	Andru	C.S.U	Froehlich	Laursen	Neill
900	4.30	4.21	2.48	3.12	3.30
1000	4.58	4.30	2.51	3.22	3.36
변동폭	3.52	1.64	0.49	1.68	1.19

5가지 교각의 국부세굴심 산정식을 이용하여 세굴심을 산정한 결과 유입량이 100CMS일 때, C.S.U 공식에서 2.66m의 가장 큰 세굴심이 발생하는 것으로 산정되었으며, 1000CMS일 때, Andru 공식에서 4.58m의 가장 큰 세굴심이 발생하는 것으로 산정되었다. 유입량이 변함에 따라 Andru 공식이 세굴심의 가장 큰 폭의 편차를 보였고 Froehlich 공식이 가장 작은 폭의 편차를 보였다.

다음 그림은 공식별 세굴심의 경향을 보기 위하여 산정된 값을 그림으로 표현한 것이다.

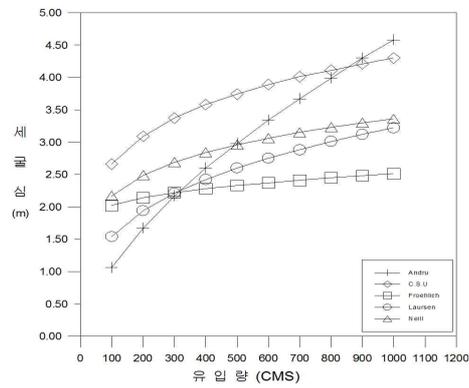


그림 4. 공식별 직선부 하천의 교각 국부세굴심

다음은 같은 산정식에 수면경사도 회귀식으로 산정된 수심을 적용하여 교각의 국부세굴심을 산정한 후 표로 정리한 것이다.

표 6. 만족을 고려한 교각의 국부세굴심 (Andru 공식, m)

유입량	각도				
	15°	45°	90°	105°	135°
100	1.08	1.09	1.09	1.18	1.09
200	1.72	1.76	1.76	1.87	1.76
300	2.28	2.36	2.36	2.49	2.35
400	2.82	2.95	2.95	3.09	2.92
500	3.35	3.54	3.54	3.70	3.48
600	3.89	4.17	4.17	4.33	4.05
700	4.45	4.82	4.82	4.98	4.63
800	5.06	5.53	5.53	5.69	5.25
900	5.69	6.30	6.28	6.44	5.91
1000	6.35	7.10	7.08	7.22	6.58

변동폭이 다른 식들에 비해 가장 크게 나타난 Andru 공식은 다른 세굴심 산정식과 다르게 수심의 영향으로만 결과값이 결정되는 식으로써 수심의 결정이 무엇보다 중요한 식이라고 할 수 있다.

Andru 공식에 의해 산정된 결과 값을 위 표에 정리하였으며, 정리된 결과 값을 보았을 때 유입량이 1000CMS이고 유·출입 각도가 105°일 때 세굴심이 7.22m로 가장 큰 세굴심을 보였다.

표 7. 만곡을 고려한 교각의 국부세굴심 (C.S.U 공식, m)

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
100	2.68	2.68	2.68	2.76	2.68
200	3.12	3.14	3.15	3.21	3.15
300	3.43	3.47	3.47	3.54	3.47
400	3.68	3.74	3.74	3.80	3.73
500	3.90	3.97	3.98	4.04	3.95
600	4.10	4.20	4.20	4.26	4.16
700	4.29	4.41	4.41	4.46	4.35
800	4.47	4.61	4.61	4.66	4.53
900	4.65	4.81	4.81	4.85	4.71
1000	4.82	5.01	5.01	5.04	4.88

C.S.U 공식은 현재 우리나라에서 교각의 국부세굴심 산정에 가장 많이 사용되고 있는 식으로 교각 세굴심 산정의 기준이라 할 수 있는 식이며, 하천설계기준에 제시되어 있는 식 중 하나이다. C.S.U 공식은 수심 이외에도 $K_1 \sim K_4$ 까지 계수의 두어 하천 상황에 근접하게 만들어진 식이다.

C.S.U 공식으로 산정된 결과값을 위 표에 정리하였으며, 산정된 값을 확인하여 보면 유입량이 1000CMS 일 때 105°에서 가장 큰 세굴심을 보였다. 그리고 다른 산정식들과 비교하여 보았을 때, Andru 공식을 제외한 다른 식보다 큰 세굴심의 값을 보였다.

표 8. 만곡을 고려한 교각의 국부세굴심 (Froehlich 공식, m)

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
100	2.03	2.03	2.03	2.05	2.03
200	2.15	2.15	2.15	2.17	2.16
300	2.24	2.25	2.25	2.27	2.25
400	2.31	2.33	2.33	2.35	2.32
500	2.38	2.40	2.40	2.42	2.39
600	2.44	2.47	2.47	2.48	2.45
700	2.50	2.53	2.53	2.55	2.51
800	2.55	2.60	2.60	2.61	2.57
900	2.61	2.67	2.66	2.68	2.63
1000	2.67	2.73	2.73	2.74	2.69

Froehlich 공식도 C.S.U 공식과 비슷하게 4가지의 하천 상황에 맞는 계수값을 가지고 세굴심을 산정할 수 있는 식이며 C.S.U 공식과 함께 우리나라에서 가장 많이 사용되고 있는 식이다.

Froehlich 공식은 변동폭이 가장 작은 차이를 보였으며, 다른 식들과 비교하여 보았을 때 최대 세굴심이 가장 작은 것으로 산정되었다.

표 9. 만곡을 고려한 교각의 국부세굴심 (Laursen 공식, m)

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
100	1.55	1.55	1.55	1.62	1.55
200	1.97	1.99	1.99	2.05	1.99
300	2.27	2.31	2.31	2.37	2.30
400	2.52	2.58	2.58	2.64	2.57
500	2.75	2.83	2.83	2.89	2.80
600	2.97	3.07	3.07	3.13	3.03
700	3.18	3.31	3.31	3.36	3.24
800	3.39	3.55	3.55	3.59	3.45
900	3.60	3.78	3.78	3.83	3.66
1000	3.80	4.02	4.01	4.05	3.87

Laursen 공식은 시행착오법에 의해 세굴심을 산정할 수 있으며, 다른 식들과 비교하였을 때 변동폭이 크게 나타났다. 그러나 최대 세굴심의 크기는 4.05m로 5가지 산정식들 중 중간 정도의 최대 세굴심을 보였다.

표 10. 만곡을 고려한 교각의 국부세굴심 (Neil 공식, m)

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
100	2.18	2.18	2.19	2.24	2.19
200	2.51	2.52	2.52	2.57	2.52
300	2.73	2.76	2.76	2.80	2.75
400	2.91	2.95	2.95	2.99	2.94
500	3.06	3.11	3.11	3.15	3.10
600	3.20	3.27	3.27	3.31	3.24
700	3.33	3.42	3.41	3.45	3.37
800	3.46	3.56	3.56	3.59	3.50
900	3.59	3.70	3.70	3.72	3.63
1000	3.71	3.84	3.83	3.86	3.75

Neill 공식으로 세굴심을 산정한 결과, 다른 세굴심 산정식들에 비해 변동폭이 비교적 작게 나타났으며, 산정된 세굴심의 최대값은 유입량이 1000CMS이고 유·출입 각도 105°일 때 3.86m로 가장 큰 값을 보였다.

3.3 만곡부 하천의 교대 국부세굴심

교대의 국부세굴심 산정에 앞서 산정식을 선정하기 위하여 흐름방향에 직각으로 투영된 교대 길이가 직상류부 단면 평균수심을 비교하였다. 본 연구에서의 L/y_1 값은 25배 이하이기 때문에 Froehlich 공식을 적용하였다.

표 11. 직선부 하천의 수리특성과 교대의 국부세굴심(Froehlich 공식)

유입량 (CMS)	유속 (m/s)	수위 (m)	수심 (m)	수면폭 (m)	Fr수	세굴심 (m)
100	3.52	1.93	1.33	22.66	0.97	3.96
200	4.33	2.69	2.09	24.18	0.96	5.45
300	4.88	3.31	2.71	25.42	0.95	6.58
400	5.30	3.85	3.25	26.50	0.94	7.53
500	5.64	4.33	3.73	27.46	0.93	8.34
600	5.94	4.78	4.18	28.36	0.93	9.08
700	6.19	5.19	4.59	29.18	0.92	9.74
800	6.41	5.59	4.99	29.98	0.92	10.37
900	6.61	5.97	5.37	30.74	0.91	10.96
1000	6.80	6.32	5.72	31.44	0.91	11.50

표 12. 만곡을 고려한 교대의 국부세굴심 (Froehlich 공식, m)

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
100	4.01	4.02	4.03	4.26	4.03
200	5.57	5.65	5.66	5.92	5.67
300	6.85	7.01	7.02	7.31	7.01
400	8.00	8.27	8.28	8.59	8.22
500	9.10	9.50	9.51	9.83	9.37
600	10.21	10.77	10.77	11.09	10.53
700	11.32	12.05	12.04	12.36	11.67
800	12.47	13.40	13.38	13.69	12.86
900	13.67	14.82	14.79	15.09	14.08
1000	14.91	16.30	16.26	16.53	15.34

Froehlich 공식으로 교대의 국부세굴심을 산정한 결과 최대 세굴심이 16.53m로 산정되었으며, 수심이나 교각의 크기 및 흐름을 방해하는 교각의 길이 등으로 보았을 때 교대의 세굴심은 과도하게 산정된다고 판단된다.

3.4 교각의 국부세굴심 검토

앞서 산정된 기존 방법에 의한 세굴심과 만곡을 고려한 세굴심의 편차를 각 공식별로 비교·검토하여 표와 그림으로 정리하였다.

표 13. 직선부와 만곡부 교각의 세굴심 편차 (Andru 공식, m)

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
100	0.02	0.02	0.03	0.12	0.03
200	0.05	0.08	0.09	0.20	0.09
300	0.12	0.19	0.19	0.32	0.19
400	0.22	0.35	0.35	0.49	0.32
500	0.36	0.56	0.56	0.71	0.49
600	0.55	0.82	0.82	0.99	0.71
700	0.78	1.15	1.15	1.31	0.96
800	1.06	1.54	1.53	1.70	1.26
900	1.39	2.00	1.98	2.14	1.61
1000	1.78	2.52	2.50	2.65	2.00

Andru 공식에서 세굴심의 편차는 유입량이 변함에 따라 작게는 0.02m(1.9%)에서 크게는 2.65m(57.84%)까지 차이가 나는 것을 알 수 있다. 만곡 하천에서 Andru 공식을 사용하여 교각부의 세굴심을 검토한다면 하천 만곡에 대한 고려를 해주어야 할 것으로 판단된다.

표 14. 직선부와 만곡부 교각의 세굴심 편차 (C.S.U 공식, m)

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
100	0.02	0.02	0.02	0.10	0.02
200	0.03	0.05	0.06	0.12	0.06
300	0.06	0.10	0.10	0.17	0.10
400	0.10	0.16	0.16	0.22	0.15
500	0.15	0.23	0.23	0.29	0.21
600	0.21	0.31	0.31	0.37	0.27
700	0.28	0.40	0.40	0.45	0.34
800	0.35	0.50	0.50	0.54	0.42
900	0.44	0.60	0.60	0.64	0.50
1000	0.52	0.71	0.71	0.74	0.58

C.S.U 공식은 보정계수와 교각 폭 등의 값들이 변하지 않고 수심만이 변한다면 수심이 작을수록 $(a/y_1)^{0.65}$ 항은 커지게 된다.

하천의 세굴심 산정의 대표적인 식이라 할 수 있는 C.S.U 공식에서는 세굴심의 편차가 작게는 0.02m(0.67%)에서 크게는 0.74m(17.32%)로 산정되었다.

표 15. 직선부와 만곡부 교각의 세굴심 편차 (Froehlich 공식, m)

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
100	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01
200	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02
300	0.02	0.03	0.03	0.05	0.03

각도 \ 유입량	15°	45°	90°	105°	135°
400	0.03	0.05	0.05	0.06	0.04
500	0.05	0.07	0.07	0.09	0.06
600	0.06	0.09	0.09	0.11	0.08
700	0.08	0.12	0.12	0.14	0.10
800	0.11	0.15	0.15	0.17	0.13
900	0.13	0.19	0.19	0.20	0.15
1000	0.16	0.23	0.22	0.23	0.18

Froehlich 공식에서는 유입량이 1000CMS 일 때 직선부와 만곡을 고려한 세굴심의 편차를 비교하여 보았을 때, 편차가 0.23m(9.38%)로 그리 크지 않은 것으로 산정되었다. Froehlich 공식은 교각 폭의 많은 영향을 받는 식이며 수심이 커짐에 따라 $(y_1/a)^{0.46}$ 정도의 영향을 준다. 다른 식들과 비교하였을 때 Froehlich 공식은 유입량이 변함에 따라 가장 작은 세굴심 편차를 보이는 것으로 나타났다.

표 16. 직선부와 만곡부 교각의 세굴심 편차 (Laursen 공식, m)

각도 \ 유입량	15°	45°	90°	105°	135°
100	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01
200	0.03	0.05	0.05	0.11	0.05
300	0.06	0.10	0.10	0.16	0.09
400	0.10	0.16	0.16	0.22	0.15
500	0.15	0.23	0.23	0.29	0.20
600	0.22	0.32	0.32	0.38	0.28
700	0.30	0.43	0.43	0.48	0.36
800	0.38	0.54	0.54	0.58	0.44
900	0.48	0.66	0.66	0.71	0.54
1000	0.58	0.80	0.79	0.83	0.65

Laursen 공식으로 산정된 만곡부와 직선부의 최대 세굴심을 비교하여 보면 0.83m(25.78%)의 세굴심 편차가 발생하는 것으로 산정되었다. 직선부와와의 차이가 26%정도의 차이를 보이고 있어 Laursen 공식으로 만곡 하천의 세굴심을 검토할 경우에는 만곡에 대한 고려를 해줘야 할 것으로 판단된다.

표 17. 직선부와 만곡부 교각의 세굴심 편차 (Neill 공식, m)

각도 \ 유입량	15°	45°	90°	105°	135°
100	0.01	0.01	0.02	0.07	0.02
200	0.02	0.04	0.04	0.08	0.04
300	0.04	0.07	0.07	0.11	0.07
400	0.07	0.11	0.11	0.15	0.10
500	0.10	0.16	0.16	0.20	0.14

600	0.14	0.21	0.21	0.25	0.18
700	0.19	0.27	0.27	0.30	0.23
800	0.24	0.33	0.33	0.36	0.28
900	0.29	0.40	0.40	0.43	0.33
1000	0.35	0.47	0.47	0.49	0.39

Neill 공식은 교각 폭의 영향을 많이 받는 식이라 할 수 있는데 교각 폭이 고정되어 있다고 한다면 수심만의 영향을 받는 식이 된다. 교각의 세굴심 검토에 Neill 공식을 사용한다면 수심의 고려도 중요하지만 교각 폭에 중점을 두어야 한다고 판단된다. 교각의 폭이 1.5m이고 유입량이 1000CMS일 때 Neill 공식에서 산정된 교각의 국부 세굴심은 유·출입 각도 105°에서 0.49m(14.67%)로 가장 크게 나타났다.

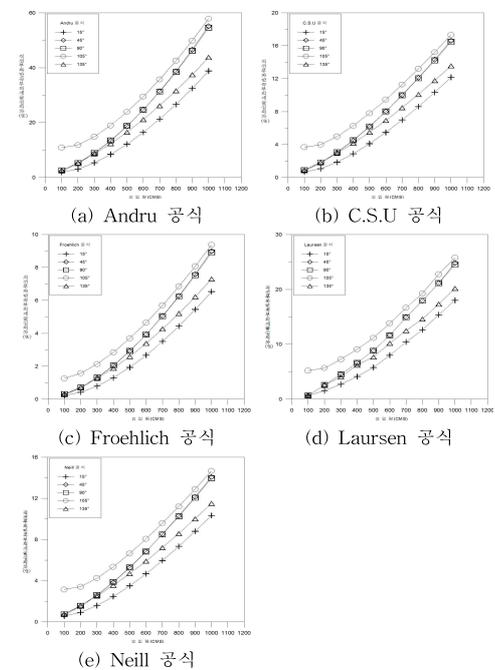


그림 5. 직선부와 만곡부의 세굴심 편차(%)

3.5 교대의 국부세굴심 검토

표 18. 직선부와 만곡부 교대의 세굴심 편차 (Froehlich 공식, m)

각도 \ 유입량	15°	45°	90°	105°	135°
100	0.05	0.06	0.07	0.30	0.07
200	0.12	0.20	0.21	0.47	0.21
300	0.26	0.43	0.44	0.72	0.42
400	0.48	0.75	0.76	1.06	0.69

유입량 \ 각도	15°	45°	90°	105°	135°
500	0.76	1.17	1.17	1.49	1.03
600	1.13	1.69	1.69	2.01	1.45
700	1.58	2.31	2.30	2.62	1.93
800	2.10	3.03	3.01	3.33	2.49
900	2.71	3.86	3.83	4.13	3.12
1000	3.41	4.80	4.76	5.03	3.83

교대의 국부세굴심 산정에서 (L'/y_1) 값이 25배 이하일 경우 HIRE 공식을 사용하게 되는데 보정계수나 F_r 수를 고정값으로 놓으면 수심의 영향을 받는 식이 된다. 그렇게 되면 수심의 7.27배에 달하는 교대의 국부세굴심이 산정되어 교대 설계시 과대설계가 될 수 있다. 그러므로 교대 설계시 HIRE 공식이나 Froehlich 공식을 사용하여 교대의 국부세굴심을 검토한다면 수심에 대한 고려를 신중히 하여 결정해야 할 것으로 판단된다.

만곡을 고려한 교대의 세굴심을 직선부 교대 세굴심과 비교하였을 때 유입량이 1000CMS이고 유·출입 각도 105°에서 5.03m(43.70%)로 40%가 넘는 세굴심 차이를 보였다. 교대의 세굴심은 교각의 세굴심에 비하여 보아도 세굴심이 크게 산정되고 있다고 판단할 수 있다. 교대의 세굴심 산정시 Froehlich 공식으로 산정하였을 경우에는 만곡 고려를 반드시 해주어야 할 것이라고 판단된다.

3.6 홍수량과 세굴심 편차율 관계식

본 연구에서의 홍수량과 세굴심 편차율의 관계식 작성방법은 아래 식과 같다

$$\text{Log} Y = a_1 \times Q + b_1' \quad (8.a)$$

$$Y = e^{b_1'} \times Q^{a_1} \quad (8.b)$$

여기서 $e^{b_1'}$ 를 b_1 라고 표현하면, 홍수량과 세굴심 편차율의 관계식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$Y = b_1 \times Q^{a_1} \quad (9)$$

여기서 Y 는 세굴심 편차율(%), Q 는 홍수량(m^3/sec)이며, a_1 과 b_1 은 세굴심 편차율의 회귀계수이다.

교각에서 홍수량에 따른 세굴심의 편차율을 각도와 공식별로 회귀분석하여 표에 정리하였다.

표 19. 홍수량에 따른 세굴심 편차율의 회귀분석(교각, 45~135°)

구분 \ 각도		45°	90°	105°	135°
		결정계수	0.998	0.996	0.913
C.S.U	회귀 a_1	1.347	1.300	0.724	1.197
	계수 b_1	0.001	0.002	0.098	0.003
Froehlich	결정계수	0.998	0.997	0.946	0.999
	회귀 a_1	1.546	1.500	0.922	1.394
	계수 b_1	0.0002	0.0002	0.014	0.0005
	Neill	결정계수	0.998	0.997	0.913
회귀 a_1		1.341	1.298	0.719	1.195
	계수 b_1	0.0013	0.0018	0.0855	0.0029
	Laursen	결정계수	0.994	0.994	0.915
회귀 a_1		1.528	1.526	0.747	1.425
	계수 b_1	0.0007	0.0007	0.1234	0.0011
	Andru	결정계수	0.996	0.994	0.907
회귀 a_1		1.409	1.361	0.776	1.248
	계수 b_1	0.0031	0.0042	0.2203	0.007

15°를 제외한 4가지의 유·출입 각도로 회귀분석을 실시한 결과, 전체적으로 결정계수가 0.84이상으로 회귀식이 유의한 것을 확인하였다. 여기서 a 는 곡선의 기울기를 나타낸 것으로 홍수량에 따른 세굴심의 편차가 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

회귀분석한 값을 비교하여 보았을 때, 4가지의 유·출입 각도를 비교한 결과, 유·출입 각도가 45°일 때는 다른 각들과 보다 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

특히, 유·출입 각도 45°일 때 Froehlich 공식에서 기울기가 1.546으로 매우 민감하게 반응하였다.

표 20. 홍수량에 따른 세굴심 편차율의 회귀분석(교대, 45~135°)

구분 \ 각도		45°	90°	105°	135°
		결정계수	0.997	0.995	0.916
Froehlich	회귀 a_1	1.434	1.388	0.806	1.276
	계수 b_1	0.0020	0.0026	0.1367	0.0047

회귀분석 결과 모든 각도에서 결정계수가 0.84 이상으로 회귀식이 유의한 것을 확인하였다. 또한, 교대에서도 교각에서와 같이 홍수량에 따른 세굴

심의 편차가 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

특히, 유·출입 각도가 45°일 때 기울기가 1.434으로 매우 민감하게 반응하였다. 다음으로 유·출입 각도가 90°일 때 1.388의 값이 나타났고 다른 각보다 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 만곡부의 유·출입 각도 및 홍수량 변화에 따른 교각과 교대의 세굴심을 산정 이 를 비교·검토하여 산정식의 적용성을 평가하였으며, 이를 토대로 하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 각 공식 별로 홍수량에 따른 세굴심 편차에 대한 회귀분석 결과, 결정계수가 교각에서 0.907~0.998을 보였고 교대에서 0.916~0.997의 값을 보여 회귀식이 유의한 것을 알 수 있었다.

2) 홍수량과 유·출입각도에 따른 교각과 교대의 세굴심 편차를 산정한 결과, 유입량이 증가할수록 세굴심도 증가하였으며 105°에서 세굴심 편차가 가장 크게 산정되었다. 또한, 홍수량 500CMS이하에서 교각과 교대의 세굴심이 10% 내외의 편차를 보였으나, 그 이상에서는 교각의 경우 크기는 24~58%값의 편차를 보이고 있어 2차원 수치해석을 적용한 세굴심 산정이 이루어져야 할 것이다.

3) 만곡부 하천에서의 세굴심 산정식별 편차를 관찰한 결과 교각에서는 Andrus식이 58%를 보였으며, 다음으로 Laursen식이 26%를 C.S.U식이 17%로 나타났다. 교대의 경우 Froehlich 공식이 44%의 값을 보이고 있어 위 식의 세굴심 산정식 적용시 세부적인 검토 후 이를 적용하여야 할 것이다.

4) 교대의 세굴심은 작은 수심의 변화에서도 세굴심의 편차가 크게 산정되었으며, 특히 홍수량 500CMS이상의 조건 시 18~44%의 큰 편차를 보이고 있어 이에 대한 세부적인 검토 후 산정이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 문재화, “교각의 단면형상과 흐름특성에 의한 세굴 특성”, 강원대학교, 토목공학과 석사학위 논문, 2008.
- [2] 박병철, “홍수로 인한 교량하부구조의 손상평가에 관한 기초연구”, 행정자치부, 국립방재연구소 연구보고서, pp.7~60, 2004.
- [3] 박태현, “1,2차원 수치해석에 따른 기존 세굴

심 산정식 편차 산정”, 강원대학교, 토목공학과 석사학위 논문, 2006.

- [4] 신충훈, “3차원 수치해석을 이용한 국부교각 세굴 저감에 관한 연구”, 한양대학교, 토목공학과 석사학위 논문, 2011.
- [5] 심우배, 송재우, “교각 주위에서 하상재료의 입도분포에 따라 변화되는 세굴심 예측”, 대한토목학회, 대한토목학회 논문집, 제22권, 4-B호, pp.459~468.
- [6] 심재현 외 5명, “2002 태풍 루사 피해현장조사 보고서”, 행정자치부, 국립방재연구소 현장보고서, pp.1~34, 2002.
- [7] 윤태훈, 윤성범, “국내외의 세굴에 의한 교량붕괴 사례 및 감시대책”, 한국수자원학회, 한국수자원학회지, 제28권, 6호, pp.28~34.
- [8] 이문희, “하천 만곡부와 홍수량에 따른 수면경사도 산정”, 강원대학교, 토목공학과 석사학위 논문, 2006.
- [9] 이영섭, “기존 세굴심 산정식의 적정성 검토 및 세굴심 산정식 개발에 대한 실험적 연구”, 강원대학교, 토목공학과 석사학위 논문, 2009.
- [10] 정길호 외 4명, “99.8 홍수에 의한 경기 북부 및 강원지역 교량 피해 현장 조사”, 행정자치부, 국립방재연구소 현장보고서, pp.3~16, 1999.
- [11] 채홍기, “하천설계기준의 만곡부 수면형 결정방법에 대한 적합성 검증”, 강원대학교, 토목공학과 석사학위 논문, 2006.
- [12] 최종석, “흐름특성과 하상특성을 동시에 고려한 교량 세굴심 산정에 관한 연구”, 명지대학교, 토목공학과 석사학위 논문, pp.8~16, 2002.
- [13] 황규원, “HEC-RAS를 이용한 세굴에 관한 연구”, 군산대학교, 토목공학과 석사학위 논문, pp.4~34, 2003.
- [14] Shirole, A.M., “Planing for a comprehensive bridge safety assurance program”, Transportation Research Board, Vol.1290, pp.137~142, 1991.
- [15] U.S. Federal Highway Administration Technical Report, “Evaluating Scour at Bridges”, Hydraulic Engineering Circular, No.18, (HEC-18) Fourth Edition, pp 6.1~7.13, 2001.