

1, 2 차원 수치해석에 따른 기존 세굴심 산정식 편차 산정

Computations of Numerical Deviations of Equations for Scouring Depth Comparing with 1-D and 2-D Numerical Model

최 한 규*, 박 태 현**, 이 영섭***
Choi, Han-Kuy Park, Tae-Hyun Lee, Yeong-Seop

Abstract

This study tried the 1st, 2nd dimensional numerical analysis according to the pier's shape, size and installing method in order to compare the depth of scour calculation method using the variables calculated by using the 2nd dimensional numerical analysis with the calculated depth of scour value by using the calculated variables by using the 1st dimensional numerical analysis.

And then verified the problems occurring when the depth of scour is calculated by using the calculated values by using the 1st dimensional numerical analysis, as calculating the deviation depending on it.

키워드 : 세굴심, 교각, 편차, 수치해석

Keywords : depth of scour, pier, deviation, numerical analysis

1. 서론

지상교통량의 운행을 위하여 하천 주변에 교량, 터널, 암거 등을 설치하는 사례가 늘고 있다. 이들이 지상구조물인 경우 안전에 대한 각종 대책 및 위험성에 대한 즉각적인 대응이 가능하나 수중구조물의 경우 그 안정성 여부 파악 및 대책수립에 상당한 어려움이 있다. 특히, 국내 하천의 경우 구미 각 국가와는 달리 계절적 유량 변기 현상이 심하여 세굴에 의한 구조물 위험성이 상존하고 있는 실정이며 현재 사용되고 있는 교량의 경우에도 세

굴에 대하여 무방비한 상태로 남아있는 경우가 있어 붕괴에 의한 인적 및 물적 손실을 야기할 우려가 있다. 따라서 미연방 도로국에서는 세굴조사뿐만 아니라 세굴을 방지하기 위한 각종 노력 및 연구가 지속적으로 이루어지고 있으나 국내의 경우 외국과는 달리 세굴안전에 대한 평가나 세굴진행 상태 등을 평가할 만한 공식하나 개발되어 있지 못하고 최근 들어서야 활발한 연구가 진행되어지고 있다. 따라서 현재까지도 외국에서 개발된 공식들을 적용하여 세굴심을 예측하고 있는 실정이며 앞으로 국내 실정에 맞는 세굴심 산정공식이 개발되기 전에는 외국에서 개발된 공식을 지속적으로 사용해야 하는 실정이다.

따라서 기존 세굴심 산정을 위해서는 기본적으로 교각의 형태, 유속, 수심 및 하상입경이 주요변수

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사·교신저자

** 강원대학교 산업대학원 토목공학과 공학석사

*** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

이며 이종 교각의 형태, 하상입경의 경우 현장조사를 통해서 세부적인 실측이 가능한 변수이나 유속 및 수심의 경우 수치해석을 통해서 산정된 값을 적용하게 됨으로 수치해석방법에 따라 세굴심 예측에 편차가 발생하게 된다.

현재 세굴심 산정시 일반적으로 사용되는 수치해석은 1차원 수치해석으로 교각 영향에 의한 수리 특성변동을 정확히 예측하기는 힘든 실정이나 사용상의 편리성으로 인하여 1차원 수치해석을 실시하여 산정된 유속 및 수심을 예측하고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 2차원 수치해석을 이용하여 산정된 변수를 이용한 세굴심 산정방법과 1차원 수치해석을 이용하여 산정된 변수를 이용한 세굴심 산정값을 비교하기 위하여 교각의 형태, 크기 및 설치방법에 따라 1, 2차원 수치해석을 실시하였으며 이에 따른 세굴심의 편차를 산정함으로서 1차원 수치해석을 이용하여 산정된 값을 이용하여 세굴심 산정하는 경우에 문제점에 대하여 검증하였다.

본 연구방법은 크게 3가지로 구분하여 설명할 수 있다. 우선 첫 번째로 교각의 크기와 교각의 형상에 따라 9가지의 경우에 따라서 1차원과 2차원 수치해석을 통하여 국부 세굴심 산정시 필요한 매개변수인 수심과 유속을 산정하였다. 교각의 크기와 형상의 결정은 현재 가장 많이 사용되고 있는 원형과 타원형으로 결정하였고 교각의 직경은 1m, 1.5m, 2m로 결정하였다.

다음으로 1, 2차원수치해석으로 산정된 수심과 유속을 이용하여 국부 세굴심 산정식으로 세굴심을 산정하였다. 세굴심 산정식의 적용에서는 대표적으로 가장 많이 사용되고 있는 4개의 식을 이용하였다.

마지막으로 교각의 형태, 크기 및 설치방법에 따라 산정된 국부 세굴심의 편차를 산정함으로서 1차원 수치해석을 이용하여 산정된 값을 이용하여 세굴심을 산정하는 경우에 문제점이 없는가를 검증하였다.

2. 연구방법

2.1 모형에 적용한 교각의 형상

본 연구 수행을 위하여 적용한 교각은 하천에서 가장 많이 사용하는 원형 교각과 타원형 교각을 적용하였다. 교각의 형상을 정리하면 그림 1과 같다.

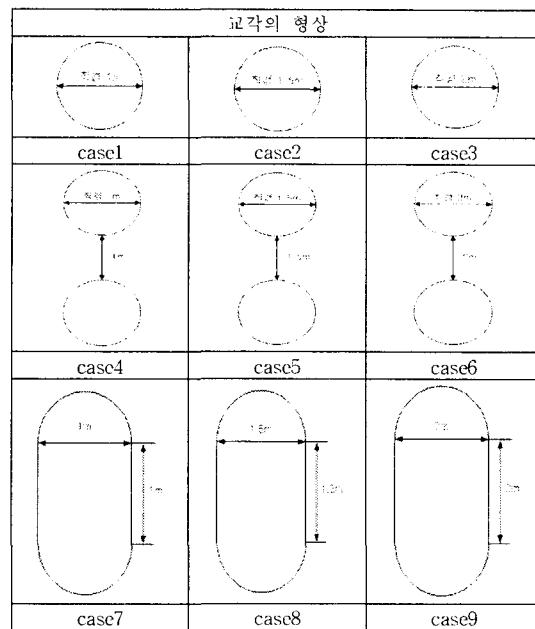


그림 1 교각의 형상

2.2 입력자료 계획

본 연구를 위하여 하천 지형에 대한 계획을 수립하였다. 하천 지형은 본 연구 목적에 적합하도록 계획하였다. 교각의 국부 세굴심을 산정하기 위한 매개변수인 수심과 유속을 산정하기 위한 수치해석으로 실제 하천의 규모등을 고려한 가상의 직선수로인 연장 100m, 하폭 30m로 계획하였다.

홍수량 계획은 500CMS로 계획을 하였다. 이는 하폭계획에서 인용한 하천에 적용된 계획홍수량을 바탕으로 하였다.

2.3 1차원 수치해석

1차원 수치해석 자료입력을 위하여 사용된 HEC-RAS 프로그램은 지형자료, 홍수량, 기점홍수위를 입력하도록 되어있다. 따라서 입력된 지형자료는 앞절에 설명한 바와 같은 단면과 홍수량을 입력하였다.

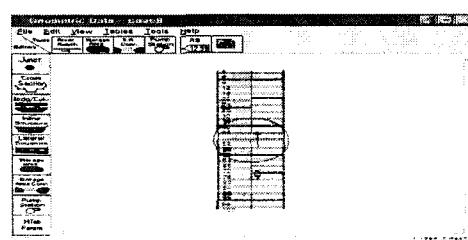


그림 2 HEC-RAS 평면 입력화면

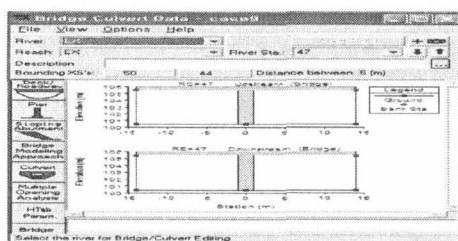


그림 3 HEC-RAS 교각 입력화면

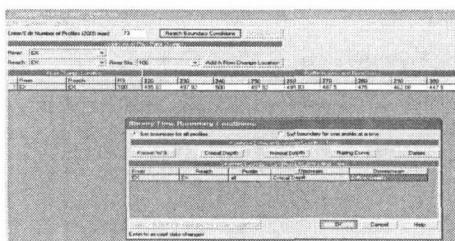


그림 4 HEC-RAS 경계조건 입력화면

그림 2~4에 의한 절차에 의하여 자료 입력 절차를 수행 한 후 그림 5와 같은 결과를 도출할 수 있었다.

Reach	River No.	Profile	G Total	Min Q (ft³/s)	Max Q (ft³/s)	E.G. Elev	E.G. Depth	Vel Cross	Flow Area	Top Width	Bottom Ch.
RX	1	1860	301.22	100.00	102.99	100.68	104.02	0.00056	5.12	74.91	28.00
RX	1	1861	410.92	100.00	102.99	100.68	104.02	0.00056	5.12	74.91	1.00
RX	1	1862	427.50	100.00	102.93	100.62	104.09	0.000402	5.25	81.70	28.00
RX	1	1863	460.42	100.00	102.92	100.62	104.04	0.000495	5.44	94.60	28.00
RX	1	1864	477.34	100.00	102.92	100.62	104.04	0.000495	5.44	94.60	1.00
RX	1	276	487.00	100.00	102.15	100.14	104.72	0.000421	5.55	87.87	28.00
RX	1	277	497.00	100.00	102.15	100.14	104.72	0.000421	5.55	87.87	1.00
RX	1	278	497.92	100.00	102.19	100.16	104.76	0.000421	5.59	89.16	28.00
RX	1	260	497.92	100.00	102.20	100.15	104.66	0.000421	5.60	89.35	28.00
RX	1	261	497.92	100.00	102.20	100.15	104.66	0.000421	5.60	89.35	1.00
RX	1	262	495.83	100.00	102.18	100.17	104.77	0.000426	5.58	88.86	28.00
RX	1	263	495.83	100.00	102.18	100.17	104.77	0.000426	5.58	88.86	1.00
RX	1	286	476.00	100.00	103.09	101.06	104.64	0.000442	5.90	86.37	28.00
RX	1	287	484.00	100.00	103.09	101.06	104.64	0.000442	5.90	86.37	1.00
RX	1	288	487.00	100.00	103.04	101.01	104.65	0.000442	5.45	84.80	28.00
RX	1	289	487.00	100.00	103.04	101.01	104.65	0.000442	5.45	84.80	1.00
RX	1	316	432.52	100.00	102.91	101.9C	104.36	0.000488	5.33	81.21	28.00
RX	1	317	432.52	100.00	102.91	101.9C	104.36	0.000488	5.33	81.21	1.00
RX	1	350	400.00	100.00	102.76	102.76	104.13	0.000532	5.19	77.95	28.00
											1.00

그림 5 HEC-RAS 결과값

2.4 2차원 수치해석

그림 6과 같이 좌표를 추출한다.

좌표	번호	세로(X)	보기(Y)	도ром(Z)
10000.000000, 10000.000000	101.980000			
10000.000000, 10001.000000	101.980000			
10000.000000, 10002.000000	101.940000			
10000.000000, 10003.000000	101.940000			
10000.000000, 10004.000000	101.920000			
10000.000000, 10005.000000	101.920000			
10000.000000, 10006.000000	101.880000			
10000.000000, 10007.000000	101.880000			
10000.000000, 10008.000000	101.840000			
10000.000000, 10009.000000	101.840000			
10000.000000, 10010.000000	101.800000			
10000.000000, 10011.000000	101.800000			
10000.000000, 10012.000000	101.660000			
10000.000000, 10013.000000	101.660000			
10000.000000, 10014.000000	101.520000			
10000.000000, 10015.000000	101.520000			
10000.000000, 10016.000000	101.480000			
10000.000000, 10017.000000	101.480000			
10000.000000, 10018.000000	101.440000			
10000.000000, 10019.000000	101.440000			
10000.000000, 10020.000000	101.400000			
10000.000000, 10021.000000	101.400000			
10000.000000, 10022.000000	101.360000			
10000.000000, 10023.000000	101.360000			
10000.000000, 10024.000000	101.740000			
10000.000000, 10025.000000	101.740000			
10000.000000, 10026.000000	101.700000			
10000.000000, 10027.000000	101.660000			
10000.000000, 10028.000000	101.620000			
10000.000000, 10029.000000	101.620000			
10000.000000, 10030.000000	101.600000			
10000.000000, 10031.000000	101.600000			
10000.000000, 10032.000000	101.560000			
10000.000000, 10033.000000	101.560000			
10000.000000, 10034.000000	101.520000			
10000.000000, 10035.000000	101.520000			

그림 6 3차원 좌표파일 추출 화면

추출된 좌표를 SMS 화면상에 불러 들어와 2차

원수치해석을 위한 그림 7과 같이 Mash를 구성한다. 교각의 형상에 따라 Element를 삭제하여 그림 8과 같이 교각의 Mash를 구성 한 후 경계조건으로 상류에 홍수량, 하류에 홍수위를 입력하고 와점성계수 조도계수를 입력하게 된다. 지형자료와 경계조건에 대한 이상 유무를 확인하여 이상이 없는 경우 그림 9와 같이 RMA2 해석과정을 수행하게 된다.

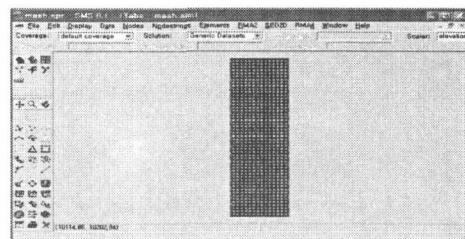


그림 7 Mash 구성화면

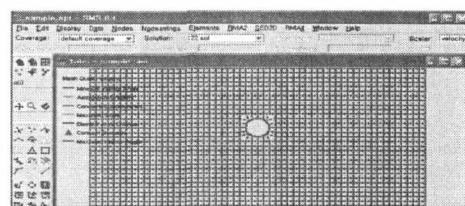


그림 8 교각구성 화면

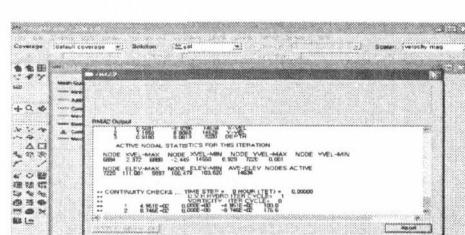


그림 9 RMA2에 의한 수치해석 수행화면

이상과 같은 작업 과정에 의하여 2차원 수치해석이 수행된다. 수치해석 결과를 영상으로 표현하면 그림 10과 그림 11과 같다.

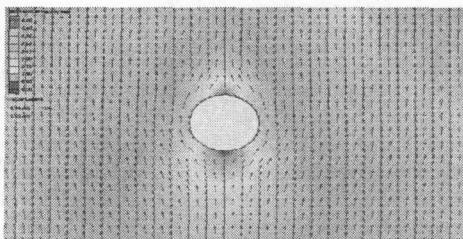


그림 10 교각 주변의 유속분포

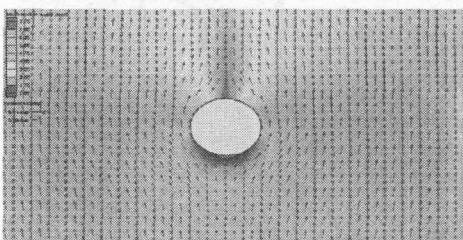


그림 11 교각 주변의 수심분포

3. 분석 및 고찰

3.1 1차원 수치해석 결과

1차원 수치해석에 대하여 다음과 같은 결과를 확인하였다. 본 결과는 흥수량 500CMS에 대한 값으로 전체 해석 결과는 표 1과 같고 1차원 수치해석상에서는 교각의 형상에 따른 후류부의 유속과 수심의 변화는 없었다.

표 1 1차원 수치해석 결과

구분	유속(m/s)		수심(m)	
	상류부	하류부	상류부	하류부
case1	4.53	5.60	3.94	3.19
case2	4.34	5.60	4.12	3.19
case3	4.18	5.60	4.28	3.19
case4	4.39	5.60	4.07	3.19
case5	4.21	5.60	4.25	3.19
case6	4.05	5.60	4.41	3.19
case7	4.51	5.60	3.96	3.19
case8	4.31	5.60	4.15	3.19
case9	4.15	5.60	4.31	3.19

3.2 2차원 수치해석 결과

2차원 수치해석 결과는 1차원 수치해석 결과와는 다르게 삼각망 구성에 의한 Mesh의 각 Node 별로 해석값이 도출되어 진다. 전체 해석 결과는 표 2와 같다.

표 2 2차원 수치해석 결과

구분	유속(m/s)		수심(m)	
	상류부	하류부	상류부	하류부
case1	2.17	3.15	5.40	1.46
case2	1.81	2.75	5.77	1.39
case3	1.42	2.30	6.14	1.40
case4	2.06	2.85	5.37	1.75
case5	1.75	2.81	5.46	1.89
case6	2.28	2.97	5.46	2.22
case7	2.78	3.67	5.04	1.95
case8	2.75	3.45	4.99	2.21
case9	2.46	3.37	5.34	2.06

3.3 세굴심 산정 적용공식

하천설계기준(2005, 한국수자원학회)에 제시된 C.S.U , Froehlich , Laursen , Neill 공식을 사용하였다.

1) C.S.U방정식

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \left[\frac{a}{y_1} \right]^{0.65} \cdot Fr^{0.43}$$

여기서, y_s : 세굴심도(m), a : pier

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 Froude수

2) Froehlich 공식

$$\frac{y_s}{b} = 0.32 \cdot \phi \cdot \left(\frac{b'}{b} \right)^{0.62} \cdot \left(\frac{V}{b} \right)^{0.46} \cdot F^{0.2} \cdot \left(\frac{b}{D_{50}} \right)^{0.08} + 1r$$

여기서, b = 교각폭(m)

b' = 투영교각 폭(m)

ϕ = 교각 형상계수

(사각형:1.3, 원형:1.0, 예각:0.7)

y = 수심(m)

D_{50} = 하상입자의 평균입경(m)

Fr = Froude수

3) Laursen 공식

$$\frac{b}{y} = 5.5 \cdot \frac{y_s}{y} \left[\left(\frac{y_s}{11.5 \cdot y} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right]$$

여기서, y_s = 세굴심(m), b = 교각폭(m),

y = 수심(m)

4) Neill 공식

$$\frac{y_s}{b} = K_s \cdot \left(\frac{V}{b} \right)^{0.3}$$

1. 2 차원 수치해석에 따른 기존 세굴심 산정식 편차 산정

여기서, $y_s =$ 세굴심(m)

$$K_s = 1.5$$

$$y =$$
 구조물 설치 직상류부 수심(m)

3.4 세굴심 산정결과

case별로 산정된 세굴심의 값은 표 3, 표 4과 그림 12, 그림 13과 같다. 1차원 수치해석으로 산정된 수심과 유속을 가지고 산정한 세굴심에서는 C.S.U 산정식에서 큰 세굴심이 발생하는 경향을 보였고 2차원 수치해석으로 산정된 수심과 유속을 가지고 산정한 세굴심에서는 Neill 산정식에서 큰 세굴심이 발생하는 경향을 보였다.

전체적으로 교각의 형상 조건 중 교각의 직경이 가장 큰 case3, case6, case9에서 세굴심이 가장 크게 산정되는 것으로 분석되었다.

표 3 1차원 수치해석을 이용한 세굴심(m)

구분	C.S.U	Froehlich	Laursen	Neill
case1	2.97	1.60	2.18	2.26
case2	3.87	2.27	2.72	3.05
case3	4.67	2.98	3.20	3.77
case4	2.97	1.60	2.21	2.29
case5	3.87	2.28	2.77	3.08
case6	4.67	2.98	3.25	3.80
case7	2.97	1.60	2.18	2.27
case8	3.87	2.27	2.73	3.05
case9	4.67	2.93	3.21	3.78

표 4 2차원 수치해석을 이용한 세굴심(m)

구분	C.S.U	Froehlich	Laursen	Neill
case1	2.12	1.58	2.55	2.49
case2	2.58	2.23	3.23	3.37
case3	2.85	2.85	3.98	4.20
case4	2.08	1.57	2.55	2.48
case5	2.68	2.21	3.14	3.32
case6	3.41	2.90	3.62	4.05
case7	2.34	1.59	2.47	2.44
case8	3.03	2.26	3.00	3.23
case9	3.54	2.91	3.58	4.03

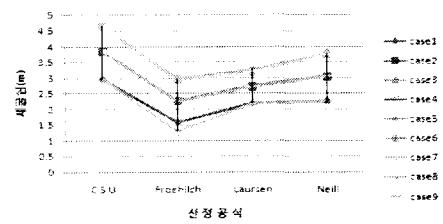


그림 12 1차원 수치해석을 이용한 세굴심(m)

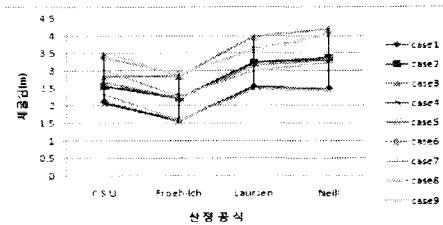


그림 13 2차원 수치해석을 이용한 세굴심(m)

3.5 세굴심의 편차

3.5.1 1,2차원 수치해석을 이용한 세굴심의 편차

세굴심의 편차를 확인한 결과 표 5 와 그림 14와 같이 1차원 수치해석으로 산정한 세굴심이 C.S.U 공식에서는 0.63m ~ 1.82m Froehlich 공식에서는 편차가 거의 없고 Laursen 공식에서는 -0.78m ~ -0.27m Neill 공식에서는 -0.43m ~ 0.17m 작게 산정되었다.

(1차원 수치해석을 이용한 세굴심 - 2차원 수치해석을 이용한 세굴심)

표 5 수치해석에 따른 세굴심의 편차

구분	C.S.U	Froehlich	Laursen	Neill
case1	0.85	0.02	-0.37	-0.23
case2	1.29	0.04	-0.51	-0.32
case3	1.82	0.13	-0.78	-0.43
case4	0.89	0.03	-0.34	-0.19
case5	1.19	0.07	-0.37	-0.24
case6	1.26	0.08	-0.37	-0.25
case7	0.63	-0.29	-0.29	-0.17
case8	0.84	0.01	-0.27	-0.18
case9	1.13	0.02	-0.37	-0.25

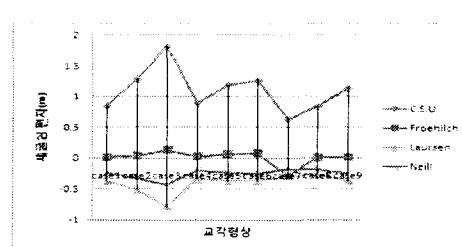


그림 14 수치해석에 따른 세굴심의 편차

3.5.2 산정 공식에 따른 세굴심의 편차

편차 확인결과 교각의 형상에 따라 표 6과 그림 15와 같이 1차원 수치해석으로 산정한 세굴심의 편차는 1.37m ~ 1.78m 발생 하였고, 2차원 수치해석으로 산정한 세굴심의 편차는 0.88m ~ 1.35m 의 편차가 발생 하였다. 이러한 결과 2차원 수치해석을 이용한 공식별 세굴심의 편차가 적게 발생하는 것을 알 수 있었다.

표 6 산정 공식에 따른 세굴심의 편차

구분	세굴심의 최대값 - 최소값(m)	
	1차원 수치해석 이용	2차원 수치해석 이용
case1	1.37	0.97
case2	1.60	1.14
case3	1.69	1.35
case4	1.37	0.98
case5	1.59	1.11
case6	1.69	1.15
case7	1.67	0.88
case8	1.60	0.97
case9	1.74	1.12

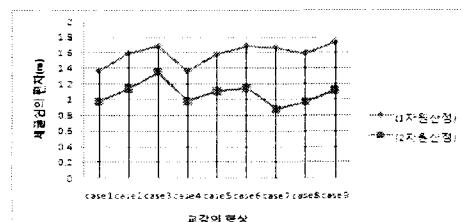


그림 15 산정 공식에 따른 세굴심의 편차

3.5.3 세굴심의 평균값에 따른 편차

최종 세굴심을 결정할 때는 세굴심 산정식에 따라 세굴심이 다르게 산정됨으로 평균값을 이용하게 된다. 따라서 본 연구에서 수치해석 방법에 따라 산정된 세굴심의 평균값을 분석해본 결과 표 7, 그림 16 와 같이 각 교각의 형상에 따른 전체 평균 세굴심은 1차원 수치해석을 이용한 세굴심이 2차원 수치해석을 이용한 세굴심 보다 평균적으로 0.11m 더 크게 산정되었다.

표 7 교각의 형상에 따른 평균 세굴심

구분	평균 세굴심(m)	
	1차원 수치해석 이용	2차원 수치해석 이용
case1	2.25	2.19
case2	2.98	2.85
case3	3.66	3.47
case4	2.27	2.17
case5	3.00	2.84
case6	3.68	3.50
case7	2.18	2.21
case8	2.98	2.88
case9	3.65	3.52

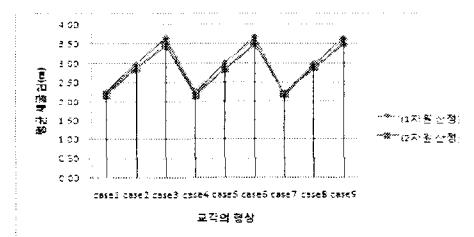


그림 16 교각의 형상에 따른 평균 세굴심

4. 결론

교각의 형상에 따른 국부 세굴심을 산정하기 위해 임의의 하천단면과 홍수량을 적용하여 세굴심 산정의 매개변수인 수심과 유속을 각각 1차원 수치해석과 2차원 수치해석을 통하여 해석 하였고 해석 되어진 수심과 유속 값을 이용하여 국부 세굴심을 산정하였다. 국부 세굴심을 산정한 결과 1,2차원 수치해석에 따른 세굴심 산정에 대하여 다음과 같이 결론을 정리할 수 있었다.

1. 세굴심의 편차는 1차원 수치해석으로 산정한 세굴심이 C.S.U 공식에서는 0.63m ~ 1.82m 크게 산정됨을 확인 하였고, Froehlich 공식에서는 세굴심의 편차가 거의 없는 것으로 확인 되었다. 또한 Laursen 공식에서는 -0.78m ~ -0.27m 작게 산정되었고, Neill 공식에서는 -0.43m ~ -0.17m 작게 산정됨을 확인 할 수 있었다.

2. 각 세굴심 산정공식에 대한 편차를 산정한 결과 1차원 수치해석을 이용하는 경우 세굴심의 편차는 1.37m ~ 1.78m 발생 하였고, 2차원 수치해석을 이용하는 경우 세굴심의 편차는 0.88m ~ 1.35m 의 편차가 발생하여 2차원 수치해석을 이용하는 경우 각 세굴심 산정공식에 대한 세굴심 편차를 최소로 할 수 있음을 확인 하였다.

3. 일반적으로 설계 적용시 각 세굴심 산정공식의 평균값을 적용함으로 이에 대하여 검토한 결과 1 차원 수치해석을 이용한 세굴심이 2차원 수치해석을 이용한 세굴심 보다 0.11m크게 산정이 되었다. 따라서 1차원 수치해석을 이용한 세굴심을 산정하여도 세굴 안정성 문제는 크지 않을 것으로 검토 되었다.

참 고 문 헌

- [1] 한건연, “수공학웍샵교재(2차원 지표수흐름 해석, SMS를 중심으로)”, 한국수자원학회, 2002.
- [2] 연찬흡, 한형근 “HEC-RAS모형을 이용한 하천교량의 세굴평가” 한국수자원학회지, 제48권, 제3호, pp 27-37, 2000.
- [3] 한국건설교통기술평가원, “교량세굴 평가 및 유지관리 시스템”, 2005.
- [4] 정창동, “기존 세굴심 산정공식 적용을 위한 모형실험과의 비교연구”, 강원대학교 대학원, 2004.
- [5] 한건연, “수공학 웍샵 교재(HEC-RAS의 이론과 실무 적용)”, 한국수자원학회, 2004.
- [6] 한국도로공사 도로교통기술원, “교량 예방적 유지관리 방안 연구”, 2005.
- [7] 원창희, “교각 국부세굴의 축척 효과에 대한 수치 모의”, 동의대학교 대학원, 2007.
- [8] “하천설계기준”, 한국수자원학회, 2005.
- [9] 시설안전기술공단, “교량에서의 흐름 안정성과 세굴”, 1997.
- [10] 건설교통부 국립건설시험소, “교량 기초부 세굴방지를 위한 수리측성 조사실험 보고서”, 1998.