

V형 여울에서 발생하는 세굴에 관한 실험 연구 An Experimental Study on Scour at V-shaped Riffle

유 대 영* / 박 정 환** / 우 효 섭***

Yu, Daeyoung / Park, Jung Hwan / Woo, Hyoseop

Abstract

A V-shaped riffle is an artificial hydraulic structure having two wings from the streamside with a narrow opening in between. It is usually made of crushed stones or large boulders. It limits channel width and accelerates the flow through the constricted section causing a local scour just downstream. The V-shaped riffle provides with a unique aquatic habitat by forming a pool and sandbars around the pool edge, increasing local morphologic, hydraulic and sedimentological diversity. This study investigates experimentally the scour characteristics of the V-shaped riffle in the sandbed stream and proposes a predictive equation for the scour. Total 45 cases of experiments were conducted to examine the effect of hydraulic factors and configuration of V-shaped riffle on the geometry of scour holes. From the comparison of the experimental results of this study with the predictive equation of spur dike by Breusers and Raudkivi(1991), it is found that their predictive equation of spur dike underestimates the maximum scour depth downstream of the V-shaped riffle. A new predictive equation for the maximum scour depth was developed using the non-dimensional hydraulic and geometrical variables. The parameters used in the proposed equations were determined using the experimental data. The analysis reveals that the scour depth is dependent dominantly on the Froude number at the opening of the V-shaped riffle, while the angle of riffle and the opening width also affect the scour depth. The proposed equation for the scour of V-shaped riffle well agrees with the experimental data. It can be used for estimating the scour of the V-shaped riffle in sandbed streams.

Keywords : scour, V-shaped riffle, spur dike, aquatic habitat, scour experiment

요 지

V형 여울은 하천 양안에 설치하여 여울의 가운데로 물의 흐름을 집중시켜 하도 중앙 직하류에 세굴로 인한 소(pool)를 형성하는 역할을 하는 인공 여울이다. V형 여울의 설치 목적은 평탄화된 하도에 소를 형성시켜 갈수시

* 정희원 · Post-doctoral Fellow, Dept. of Civil Engineering, The University of Hong Kong
(E-mail : daeyoung@hku.hk)

** 도화종합기술개발공사
(E-mail : bamtory13@hotmail.com)

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 연구위원
(E-mail : hswoo@kict.re.kr)

어류의 서식처 또는 피난처를 제공하고, 홍수시에는 유속이 약한 구간을 발생시켜 어류의 피난처를 제공하는 것이다. 본 연구에서는 V형 여울의 수리 모형 실험을 실시하여 각 조건에 따른 세굴심을 측정하여 세굴 특성을 분석하였고, 나아가 수리량 조건 및 V형 여울 형태와 세굴 간의 정량적인 관계를 실험 결과로부터 도출하였다. 또한 V형 여울과 형태가 유사한 수제에서의 세굴심에 대한 기존의 연구 결과와 V형 여울의 경우를 비교하였다. 그 결과 Breusers와 Raudkivi(1991)가 제안한 수제에서의 세굴심 예측식은 V형 여울에서의 세굴심을 과소평가하지만 V형 여울에서의 세굴 특성을 일부 반영하는 것으로 나타났다. V형 여울의 세굴에 영향을 주는 인자들의 무차원화를 통해 V형 여울에서의 세굴심 예측식을 제안하였고 제안된 예측식은 V형 여울의 적용에 있어서 세굴심을 추정하는데 사용될 수 있고 판단된다. V형 여울의 세굴에 지배적인 영향을 주는 인자는 여울 중앙에서의 프루드 수이고, 그밖에 여울과 흐름의 각도와 여울 개구부의 폭도 부분적으로 영향을 준다.

핵심용어 : 세굴, V형 여울, 수제, 수생 서식처, 세굴 실험

1. 서 론

현재까지 상당수의 하천 정비는 치수와 이수를 위주로 진행되어 하천의 직강화와 하상의 평탄화를 수반하였다. 하천의 선형을 되도록 직선화하고 유수의 흐름에 방해가 된다고 판단되는 하상의 구조와 재료를 제거하여 하상은 단면 전체가 일정한 수심을 갖도록 정비하는 것이 일반적인 관행이었다고 할 수 있다. 이러한 하천 정비는 사행을 하며 여울과 소의 자연적인 구조를 형성하는 자연 하천과는 상이한 조건을 만들게 되며 따라서 하천 생태 서식처 조건을 악화시켜 하천 생태가 자연에 가까운 모습을 나타내기 어려운 조건을 형성한다. 우리나라 하천의 상류와 중류에 서식하는 어류는 주로 여울과 소의 구조를 서식처로 하며 하도 내에 있는 돌이나 바위틈을 피난처와 산란 장소로 삼기 때문에 하상의 평탄화는 특히 어류의 서식조건을 크게 훼손하는 결과를 가져온다(이승휘, 2000).

V형 여울(V-shaped riffle)은 양안에서 하도 중앙에 일정한 폭만 남기고 사석 등을 쌓아 설치하여 여울의 가운데로 물의 흐름을 집중시켜 여울의 하류부에서는 하도 중앙에 세굴로 인한 소를 형성하는 역할을 하는 인공 여울의 한 형태이다. V형 여울에 비해 더 일반적인 인공 구조물인 수제는 호안의 세굴 방지를 위해 설치되며 양 날개가 아닌 한 개의 날개가 연속적으로 설치된다는 점에서 V형 여울과 상이점이 있다. V형 여울의 설치 목적은 평탄화된 하도에 여울로 인해 자연적인 소를 형성시켜 갈수시 어류의 서식처 또는 피난처를 제공하고 홍수시에는 여울로 인해 양안의 상하류에 와류가 형성되어 유속이 약한 구간을 발생시켜 어류의 피난처를 제공하는 데 있다. 또한 사석을 쌓아 만들어진 V형 여울은 자연적인 바위틈을 제공하여 어류의 산란지 역할을 하게된다

(그림 1). 하천 생태 서식처의 물리적 조건을 복원하는 하천 복원의 기본적인 요구사항은 주어진 하천의 자연 조건에서 국부 지형적, 수리적 유사이동적 변화성을 증가시키는 것이며, 이상적으로 복원된 생태 서식처는 생태계 스스로가 계속적으로 번식할 수 있도록 산란장부터 성체가 살아갈 수 있는 모든 단계의 공간까지를 제공해야 한다(Petts와 Calow, 1996). 이러한 하천 복원 공법의 조건을 고려할 때, 물의 흐름에 의해 자연적인 소를 형성하며 생태계와 유사의 이동에 방해가 적으며 여울 주위에 어류의 산란과 서식 공간을 제공할 수 있는 V형 여울은 하천복원사업에 이용될 수 있는 이상적인 공법의 하나라고 할 수 있다.

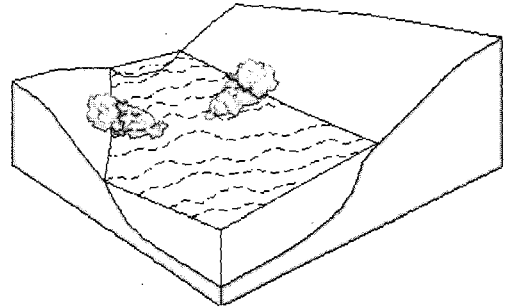


그림 1. V형 여울의 모식도

한국건설기술연구원(2001)에서는 양재천의 서울특별시 서초구 구간에 1998년과 2000년에 각각 V형 여울을 1개소 씩 설치하여 그 영향을 조사하였다(그림 2). V형 여울이 시험 적용된 양재천 서초구 구간의 하상 재료는 대부분 모래로 이루어져 있으며, V형 여울 설치 이후 여울로 인해 흐름이 집중되는 여울 하류 중심 부분에 어류의 서식처 기능을 하는 세굴심 약 0.7 m, 직

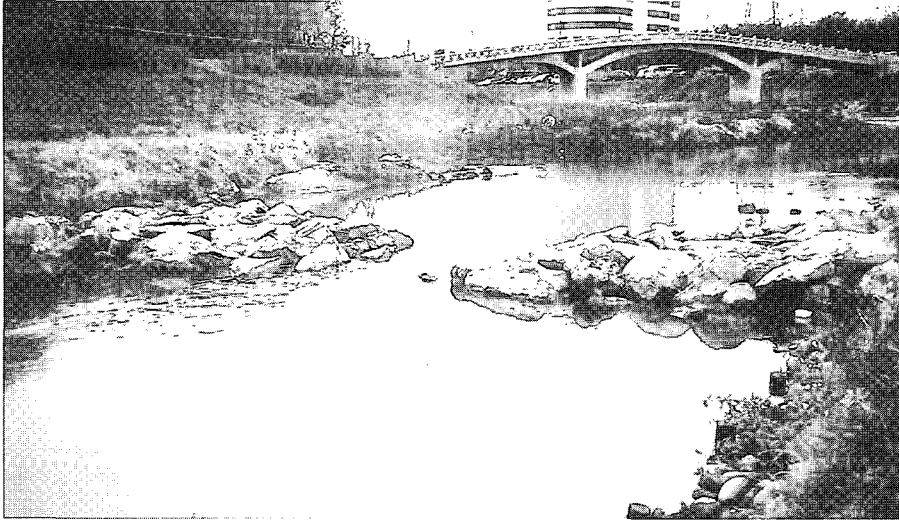


그림 2. 양재천에 시험 적용된 V형 여울(한국건설기술연구원, 2001)

경 2 m의 소가 형성되는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 V형 여울의 형태 및 수리량에 따른 세굴 특성을 구명하는 것을 목표로 한다. V형 여울의 세굴 특성 분석을 위하여 수리 모형 실험을 실시하여 각 조건에 따른 세굴심을 측정하여 그 결과를 분석하였고 수리량 조건 및 V형 여울 형태와 세굴 간의 정량적인 관계를 실험 결과로부터 도출하였다. 또한 V형 여울과 형태가 유사한 수제 등에서의 세굴심에 대한 기존의 연구 결과와 V형 여울의 경우를 비교하여 그 차이를 비교하였다. 본 연구의 결과인 V형 여울의 세굴 특성과 수리량 조건 및 V형 여울의 형태와의 관계는 V형 여울의 설계에 있어 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

2. 이론적 배경

2.1 수제에서의 세굴

수제는 돌제(groin), 돌출 수제(spur, spur dike), 유도제(vane dike), 변류제(deflector) 등으로 다양한 명칭을 가지고 있으나, 사실상 같은 하도 내 구조물을 지칭한다(Melville과 Coleman, 1999). 수제의 본래 설치 목적은 호안의 세굴을 방지하여 호안을 보호하는 것이다. 수제는 일반적으로 호안에서 흐름과 일정한 각도를 가지고 돌출된 형태를 가지고 있으며 2개 이상 연속적으로 설치된다. 수제가 주로 설치되는 장소는 유속이 증가하여 세굴의 위험이 큰 만곡부 외측이다. 일반적인 수제의 개요도를 그림 3에 도시하였다.

수제의 설치 목적이 호안 세굴을 방지하는 것이기 때문에 수제에 대한 연구는 주로 호안 보호의 효과에 대해 집중되었다(Johnson 등, 2001). 따라서 수제에서 발생하는 세굴에 대해서는 발표된 연구 결과가 많지 않으나 Breusers와 Raudkivi(1991)에 의해 수리 조건, 수제의 형태 그리고 유사의 종류에 따른 세굴 예측에 관한 연구 결과가 정리된 바 있다.

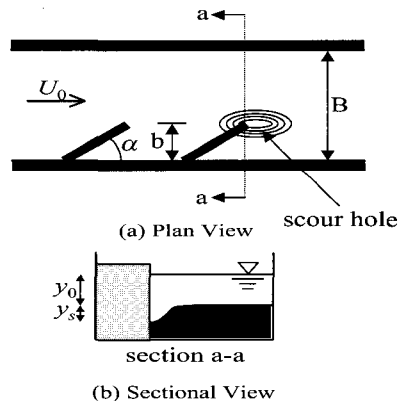


그림 3. 수제의 개요도(Breusers와 Raudkivi, 1991)

Inglis(1949)는 인도와 파키스탄의 수제 주위의 세굴 조사 결과로부터 최대 세굴심에 대한 예측식을 제안하였다. 그는 총세굴심과 3차원 Lacey 영역 깊이(three-dimensional Lacey regime depth)를 비교하

여 총세굴심을 예측하였는데, 3차원 Lacey 영역 깊이는 다음과 같이 정의된다.

$$y_{3r} = 0.47 \left(\frac{Q}{f} \right)^{1/3} \quad (1)$$

여기서 y_{3r} 은 3차원 Lacey 영역 깊이, Q 는 유량(m^3/s)이고 f 는 실트 계수(silt factor)로서 식 (2)와 같이 정의된다.

$$f = 1.76 \sqrt{d} \quad (2)$$

여기서 d 는 하상 재료의 입경(mm)이다.

Inglis(1949)는 식 (1)로 정의된 Lacey 영역 깊이와 수심과 세굴심의 합으로 정의되는 총세굴심과의 비는 식 (3)의 범위라고 보고하였다.

$$\frac{y_0 + y_s}{y_{3r}} = 1.6 \sim 3.9 \quad (3)$$

또한 Inglis는 수제의 특징에 따라 가파른 끝(1.5V:1H)을 가지고 상류 방향을 향한($\alpha > 90^\circ$) 직선 수제에서는 3.8의 값을 가지며, 같은 조건에서 완만한 끝을 가진 수제의 경우 2.25의 값을 갖는다고 발표하였다. 식 (3)에서 y_0 는 세굴 전 수심(m), y_s 는 세굴심(m)이며 α 는 그림 3에 제시된 흐름과 수제가 이루는 각이다. 그리고 Inglis(1949)는 수로에서 실험을 통하여 수제에서의 세굴 연구를 수행하였는데, 벽이 고정된 수로의 경우 식 (4)로 정의되는 2차원 Lacey 영역 깊이 y_{2r} 이 총세굴심을 예측하는데 사용된다.

$$y_{2r} = 1.34 \left(\frac{q^2}{f} \right) \quad (4)$$

여기서 q 는 단위폭 당 유량(m^3/s)이다.

Inglis의 연구는 현장 측정 자료를 바탕으로 이루어진 것이기 때문에 측정하기에 용이한 자료만을 가지고 세굴심을 추정할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 수제의 각도와 세굴심의 관계를 제시하지는 못하였다.

Ahmad(1953)는 그의 연구 결과를 다음 식으로 제시하였다.

$$y_0 + y_s = K q^{2/3} \quad (5)$$

여기서 K 는 상수이다.

Liu 등(1961)은 폭이 4.2m와 2.4m인 두 종류의 수로에서 수직 수제를 사용하여 실험 연구를 수행하였다. 그들의 실험에서 사용된 하상 재료의 중앙 입경, d_{50} 은 0.56mm와 0.65mm 두 종류이었고 무시할 수 있는 두께의 얇은 재료로 수제를 제작하였다. 그들의 실험 결과는 식 (5)에서 K 의 값은 $2.0 \pm 10\%$ 이며 다른 조건에 의한 총세굴심의 변화 양상은 관찰할 수 없었다는 점으로 요약될 수 있다.

기타 수제에서의 세굴심에 영향을 주는 인자로는 수로 단면에서 유속의 비대칭, 하상 재료의 크기, 그리고 수제 끝부분의 형상이 있다. Ahmad(1953)는 만곡 등으로 인한 유속의 비대칭이 수제에서의 세굴에 미치는 영향은 약 10%라고 발표하였으며, 또한 입경이 0.35mm와 0.70mm 두 종류의 하상 재료를 사용한 실험에서 수제에서의 세굴심의 차이는 발견할 수 없었다고 보고하였다. 수제 끝부분 형상에 대해서 Liu 등(1961)은 완만한 끝부분(1V:1.5H)의 수제는 수직 끝부분의 수제에 비해 50 ~ 60%의 세굴 밖에 발생하지 않는다고 보고하였다.

비교적 최근에, Breusers와 Raudkivi(1991)는 식 (5)와 수제의 형상에 따른 상수를 적용하여 수제에서의 총세굴심 추정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$y_0 + y_s = (K K_1 K_2 K_3) q^{2/3} \quad (6)$$

여기서 K_1 , K_2 , K_3 는 각각 수제의 각도, 형상, 위치에 따른 특성을 나타내는 상수로서 표 1과 같은 값을 갖는다.

표 1에 제시된 상수에 의하면 다른 조건이 동일한 경우, 수제의 각도가 클수록, 수제 벽이 가파를수록 그리고 수제가 급한 만곡의 요부에 있는 경우 세굴심이 커지는 것으로 판단할 수 있다.

2.2 V형 여울에서의 세굴

V형 여울은 양쪽 호안에서 수제가 대칭적으로 설치된 형태이다. 사각형 수로에 설치된 V형 여울의 개요를 그림 4에 도시하였다. V형 여울 상류에서 유속 U_0 인 흐름은 V형 여울에서는 단면의 축소로 인해 유속이 v_r 로 증가하게 된다. V형 여울에서의 최대 세굴심 y_s 는 수리적 변수, 여울의 형상, 하상 재료 등에 의해 결정되

표 1. 총세굴심 예측식 상수 (Breusers와 Raudkivi, 1991)

상수의 값															
영향을 주는 인자	$K = 2.0 \pm 15 \%$														
수제 각도(α)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>α</th> <th>30°</th> <th>15°</th> <th>60°</th> <th>90°</th> <th>120°</th> <th>150°</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K_1</td> <td>0.8</td> <td>0.9</td> <td>0.95</td> <td>1.0</td> <td>1.05</td> <td>1.1</td> </tr> </tbody> </table>	α	30°	15°	60°	90°	120°	150°	K_1	0.8	0.9	0.95	1.0	1.05	1.1
	α	30°	15°	60°	90°	120°	150°								
K_1	0.8	0.9	0.95	1.0	1.05	1.1									
수제의 형상	<table border="1"> <thead> <tr> <th>수제 형상</th> <th>K_2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>넓은 수직 수제</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>얇은 수직 수제</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>벽면이 45°인 수제</td> <td>0.85</td> </tr> </tbody> </table>	수제 형상	K_2	넓은 수직 수제	1.0	얇은 수직 수제	1.0	벽면이 45°인 수제	0.85						
	수제 형상	K_2													
	넓은 수직 수제	1.0													
	얇은 수직 수제	1.0													
벽면이 45°인 수제	0.85														
수제의 위치	<table border="1"> <thead> <tr> <th>수제의 위치</th> <th>K_3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>직선 수로</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>만곡의 요면(concave)</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>만곡의 볼록면(convex)</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>급한 만곡 하류의 요면</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>완만한 만곡 하류의 요면</td> <td>1.1</td> </tr> </tbody> </table>	수제의 위치	K_3	직선 수로	1.0	만곡의 요면(concave)	1.1	만곡의 볼록면(convex)	0.8	급한 만곡 하류의 요면	1.4	완만한 만곡 하류의 요면	1.1		
	수제의 위치	K_3													
	직선 수로	1.0													
	만곡의 요면(concave)	1.1													
	만곡의 볼록면(convex)	0.8													
	급한 만곡 하류의 요면	1.4													
완만한 만곡 하류의 요면	1.1														

며 이는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_s = f(B, o, \alpha, Q, v_r, y_0, S_0, d_s, \nu) \quad (7)$$

여기서 B 는 수로의 폭(m), o 는 V형 여울의 열린 폭(m), α 는 V형 여울이 흐름과 이루는 각도, Q 는 유량(m^3/s), v_r 은 V형 여울 중심부에서 유속(m/s), y_0 는 수심(m), S_0 는 하상 경사, d_s 는 하상 재료 입경(mm), ν 는 동점성계수(m^2/s)이다.

식 (7)을 차원 해석을 통해 최대 세굴심에 대한 무차원화된 식으로 변환하였다. 이 과정에서 Reynolds 수의 영향은 Reynolds 수가 큰 난류의 경우를 가정하여 무시되었고 하상 재료 입경과 하상 경사 역시 본 연구에서 고려되지 않았다. 차원 해석의 결과는 식 (8)과 같다.

$$\frac{y_s}{y_0} = f\left(\alpha, \frac{o}{y_0}, Fr_r\right) \quad (8)$$

여기서 Fr_r 은 V형 여울에서의 프루드 수로서 식 (9)로 정의 된다.

$$Fr_r = \frac{v_r}{\sqrt{g y_0}} \quad (9)$$

여기서 g 는 중력가속도(m/s^2)이다.

식 (8)로부터 무차원화된 최대 세굴심은 V형 여울의 각도, 열린 폭 그리고 V형 여울에서 프루드 수에 의해 결정된다고 추정할 수 있다. 표 1에 제시한 Breusers와 Raudkivi(1991)의 수제에 대한 연구 결과인 흐름과 이루는 각이 커질수록 세굴이 증가하는 경향으로부터 유추할 때, V형 여울의 세굴은 흐름과 이루는 각이

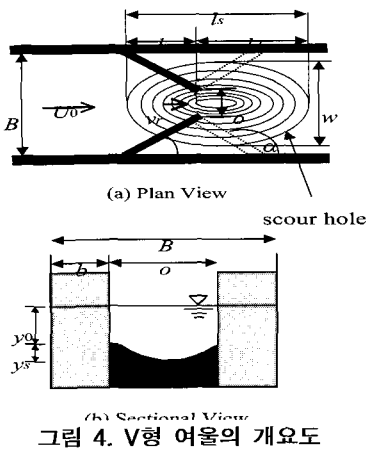


그림 4. V형 여울의 개요도

표 2. V형 여울 세굴 실험 조건

Case No.	α (°)	Q (m^3/s)	y_0 (m)	o (m)	U_0 (m/s)	v_r (m/s)	Fr_r	비고
1	70	9.62E-04	0.050	0.089	0.033	0.217	0.31	
2	70	1.91E-03	0.050	0.089	0.065	0.431	0.62	
3	70	4.30E-04	0.050	0.089	0.015	0.097	0.14	
4	70	2.87E-03	0.050	0.089	0.097	0.649	0.93	
5	70	1.48E-03	0.050	0.089	0.050	0.334	0.48	
6	70	9.62E-04	0.100	0.089	0.016	0.109	0.11	
7	70	1.91E-03	0.100	0.089	0.032	0.216	0.22	
8	70	2.87E-03	0.100	0.089	0.049	0.325	0.33	
9	70	9.62E-04	0.025	0.089	0.065	0.435	0.88	
10	70	1.91E-03	0.025	0.089	0.129	0.863	1.74	
11	70	4.30E-04	0.025	0.089	0.029	0.194	0.39	
12	110	9.62E-04	0.050	0.089	0.033	0.217	0.31	
13	110	4.30E-04	0.050	0.089	0.015	0.097	0.14	
14	110	1.91E-03	0.050	0.089	0.065	0.431	0.62	
15	110	9.62E-04	0.100	0.089	0.016	0.109	0.11	
16	110	1.91E-03	0.100	0.089	0.032	0.216	0.22	
17	110	2.87E-03	0.100	0.089	0.049	0.325	0.33	
18	110	9.62E-04	0.025	0.089	0.065	0.435	0.88	
19	110	4.30E-04	0.025	0.089	0.029	0.194	0.39	
20	110	1.91E-03	0.025	0.089	0.129	0.863	1.74	
21	70	1.62E-03	0.050	0.148	0.055	0.219	0.31	
22	70	3.22E-03	0.050	0.148	0.109	0.437	0.62	
23	70	1.62E-03	0.100	0.148	0.027	0.110	0.11	
24	70	3.22E-03	0.100	0.148	0.055	0.218	0.22	
25	70	1.48E-03	0.025	0.148	0.100	0.401	0.81	
26	70	1.91E-03	0.025	0.148	0.129	0.518	1.05	
27	110	1.62E-03	0.050	0.148	0.055	0.219	0.31	
28	110	1.48E-03	0.025	0.148	0.100	0.401	0.81	
29	110	1.62E-03	0.100	0.148	0.027	0.110	0.11	
30	50	9.62E-04	0.050	0.089	0.033	0.217	0.31	
31	50	9.62E-04	0.025	0.089	0.065	0.435	0.88	
32	50	9.62E-04	0.100	0.089	0.016	0.109	0.11	
33	130	9.62E-04	0.050	0.089	0.033	0.217	0.31	
34	130	9.62E-04	0.025	0.089	0.065	0.435	0.88	
35	130	9.62E-04	0.100	0.089	0.016	0.109	0.11	
36	70	1.91E-03	0.075	0.089	0.043	0.201	0.23	월류 조건
37	70	2.87E-03	0.100	0.089	0.049	0.130	0.13	월류 조건
38	70	5.77E-03	0.125	0.089	0.078	0.157	0.14	월류 조건
39	110	1.91E-03	0.075	0.089	0.043	0.201	0.23	월류 조건
40	110	5.77E-03	0.100	0.089	0.098	0.261	0.26	월류 조건
41	110	7.79E-03	0.125	0.089	0.106	0.212	0.19	월류 조건
42	90	9.62E-04	0.050	0.089	0.033	0.217	0.31	
43	90	1.91E-03	0.050	0.089	0.065	0.431	0.62	
44	90	9.62E-04	0.100	0.089	0.016	0.109	0.11	
45	90	9.62E-04	0.025	0.089	0.065	0.435	0.88	

90° 를 중심으로 값이 커질수록 증가하고 작을수록 감소하는 경향을 나타낸다고 예측할 수 있다. 따라서 여울의 각도, 열린 폭 그리고 프루드 수가 각각 세굴심에 영향을 미친다고 가정할 때 V형 여울의 최대 세굴심은 식 (10)으로 제안할 수 있다.

$$\frac{y_s}{y_0} = a (1 - \cos a)^b \left(\frac{o}{y_0} \right)^c (Fr_r)^d \quad (10)$$

여기서 a, b, c, d 는 각각 측정 자료로부터 구해지는 상수이다.

3. V형 여울의 세굴 실험

3.1 실험 장치

V형 여울의 세굴 실험은 한국건설기술연구원(2001)에서 서울특별시 서초구 양재천에 시험 적용한 V형 여울을 원형으로 하여 약 1/24 규모로 이루어졌다. 모형의 수직 및 수평 상사 및 하상 재료의 크기 및 밀도의 상사를 모두 동시에 만족시키기는 매우 어렵기 때문에 수직 및 수평 상사는 만족시키면서 하상재료의 상사는 고려하지 않고 단일한 하상 재료를 사용하여 실험을 수행하였다.

실험은 길이 20 m, 폭 0.59 m의 실험용 수로에서 진행되었다. 실험은 상류로부터의 유사공급을 고려하지 않은 정적세굴실험으로 수행되었다. 각도, 높이 및 여울의 열린 폭을 변화시켜 9 종류의 여울 형태에 대해 실험이 수행되었다. 하천에 시험 적용된 V형 여울의 o/B 값은 0.12~0.2이며 실험에서는 0.15와 0.25 두 종류의 o/B 값이 사용되었다. 시험 적용된 V형 여울의 각도는 80~50° 의 범위로 비대칭이나 실험에서는 여울의 각도를 양안에서 대칭으로 50, 70, 90, 110, 130° 로 설정하였다. 유량의 범위는 시험 적용 구간에서의 홍수 및 평수시의 유량에 상사비를 고려하여 0.43~7.79 l/s로 설정되었다.

모형 여울은 두께 1.7 cm의 아크릴로 제작되었다. 단순한 흐름에 대한 실험을 위하여 모형 여울의 높이는 수로 높이와 동일하게 제작되어 월류 조건 실험을 제외하고는 모든 유량이 여울의 열린 부분으로만 흐르게 하였다. 홍수 시 V형 여울 위로 월류되는 조건을 재현하기 위하여 여울의 높이가 수심보다 낮게 제작하여 월류하는 경우에 대해서도 실험을 수행하였다.

하상 재료는 모든 경우에서 직경 0.09 mm, 비중 2.01의 규조토를 사용하였다. 일반적으로 국부세굴의

문제에서 하상 재료의 크기는 모래의 경우 기본적으로 세굴심에 영향을 주지 않으므로 (우효섭, 2001) 규조토를 이용한 실험 결과는 모래하천에서의 V형 여울의 세굴 특성을 반영한다고 할 수 있다. 실험에서는 하상 재료를 수로의 바닥부터 30 cm 두께로 설치하였는데 전체 실험에서 충분한 두께로 판명되었다.

실험에서 유량은 실험 수조와 연결된 고수조의 사각 위어에서 측정되었고 수위는 포인트 게이지로 측정되었다. 세굴심은 KENEK사의 사면측정기 WH-201C, WHT-40을 이용하여 측정하였는데 최대 세굴심 뿐만 아니라 세굴 부피를 측정하기 위하여 V형 여울 주위 세굴이 발생한 지점 전체에 걸쳐 4cm×4cm 간격으로 세굴심을 측정하였다. 실험은 총 45회 각기 다른 조건에서 수행되었다. 실험 조건은 표 2에 제시하였다.

3.2 실험 방법 및 조건

실험은 약 1.5~2.5 시간동안 동일한 유량과 수위 조건을 유지하며 지속되었고 세굴 양상이 안정된 이후에 실험을 마치고 세굴심을 측정하였다. 실험 시간은 실험 과정 동안 최대 세굴심을 측정하여 최대 세굴심이 상당 시간 변하지 않을 때까지로 결정되었다. 일반적으로 모래를 사용하는 세굴 실험의 경우 실험 시간이 비교적 짧게 필요하여 3시간 이내에 안정된 세굴 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있다(Ting 등, 2001). 실험 시간에 따른 세굴심의 일반적인 관계를 나타내기 위해 20번 실험의 시간에 따른 최대 세굴심 변화를 그림 5에 제시하였다.

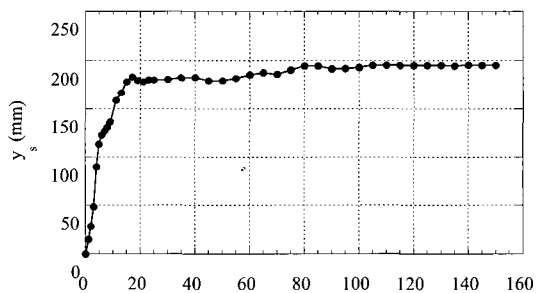


그림 5. 세굴 깊이와 실험 시간 관계 (Case no. 20)

4. 실험 분석

4.1 V형 여울 세굴 특성

측정된 세굴심 자료로부터 최대 세굴심 (y_s), 세굴

표 3. V형 여울 세굴 실험 결과

Case No.	y_s (m)	V_s (m^3)	l_s (m)	w (m)	l_d (+, m)	l_u (-, m)	$\frac{y_s}{y_0}$	$\frac{l_s}{w}$	$\frac{l_d}{l_u}$
1	0.086	0.008	0.573	0.448	0.417	0.156	1.72	1.28	2.67
2	0.134	0.018	0.920	0.492	0.640	0.280	2.68	1.87	2.29
3	0.019	0.000	0.113	0.347	0.047	0.066	0.38	0.33	0.72
4	0.220	0.053	0.989	0.580	0.602	0.388	4.40	1.71	1.55
5	0.140	0.011	0.519	0.520	0.360	0.159	2.80	1.00	2.27
6	0.045	0.001	0.359	0.234	0.259	0.100	0.45	1.54	2.59
7	0.116	0.012	0.689	0.433	0.502	0.186	1.16	1.59	2.69
8	0.149	0.023	0.887	0.540	0.630	0.258	1.49	1.64	2.44
9	0.110	0.010	0.575	0.394	0.343	0.232	4.40	1.46	1.48
10	0.173	0.031	1.242	0.580	0.704	0.538	6.90	2.14	1.31
11	0.035	0.002	0.258	0.219	0.131	0.127	1.40	1.18	1.04
12	0.109	0.009	0.549	0.452	0.356	0.193	2.17	1.22	1.85
13	0.021	0.000	0.249	0.320	0.193	0.057	0.41	0.78	3.37
14	0.174	0.024	0.733	0.580	0.454	0.279	3.48	1.26	1.63
15	0.074	0.004	0.457	0.296	0.297	0.160	0.74	1.54	1.85
16	0.129	0.013	0.653	0.460	0.451	0.202	1.29	1.42	2.23
17	0.184	0.031	1.007	0.580	0.567	0.440	1.84	1.74	1.29
18	0.120	0.011	0.554	0.439	0.315	0.239	4.80	1.26	1.32
19	0.038	0.001	0.262	0.280	0.102	0.160	1.52	0.93	0.63
20	0.194	0.035	0.750	0.580	0.434	0.317	7.74	1.29	1.37
21	0.103	0.010	0.574	0.435	0.416	0.157	2.05	1.32	2.65
22	0.139	0.026	0.887	0.580	0.647	0.240	2.78	1.53	2.70
23	0.035	0.002	0.357	0.359	0.277	0.080	0.35	0.99	3.46
24	0.145	0.018	0.664	0.580	0.478	0.186	1.45	1.14	2.56
25	0.117	0.014	0.496	0.540	0.313	0.184	4.66	0.92	1.70
26	0.139	0.018	0.753	0.530	0.473	0.280	5.54	1.42	1.69
27	0.104	0.012	0.561	0.453	0.352	0.209	2.08	1.24	1.69
28	0.100	0.012	0.628	0.483	0.351	0.276	3.98	1.30	1.27
29	0.053	0.003	0.509	0.380	0.391	0.118	0.53	1.34	3.33
30	0.083	0.005	0.531	0.318	0.382	0.149	1.66	1.67	2.57
31	0.098	0.008	0.541	0.360	0.371	0.170	3.90	1.50	2.18
32	0.060	0.002	0.387	0.262	0.314	0.073	0.60	1.48	4.31
33	0.090	0.007	0.551	0.366	0.373	0.178	1.79	1.50	2.10
34	0.093	0.007	0.517	0.497	0.327	0.189	3.72	1.04	1.73
35	0.060	0.002	0.433	0.404	0.320	0.113	0.60	1.07	2.84
36	0.100	0.008	0.649	0.424	0.389	0.260	1.33	1.53	1.50
37	0.030	0.001	0.257	0.321	0.186	0.070	0.30	0.80	2.65
38	0.070	0.004	0.439	0.326	0.279	0.160	0.56	1.35	1.74
39	0.061	0.003	0.385	0.335	0.272	0.112	0.81	1.15	2.42
40	0.130	0.014	0.869	0.528	0.640	0.229	1.30	1.65	2.80
41	0.125	0.015	0.732	0.459	0.503	0.229	1.00	1.59	2.20
42	0.077	0.003	0.504	0.305	0.348	0.157	1.54	1.65	2.22
43	0.130	0.010	0.620	0.473	0.395	0.225	2.60	1.31	1.76
44	0.051	0.002	0.640	0.507	0.400	0.240	0.51	1.26	1.67
45	0.110	0.006	0.478	0.415	0.287	0.191	4.40	1.15	1.50

부피(V_s), 종방향 세굴 길이(l_s), 횡방향 세굴(w) 길 이 등을 계산하여 정리하였다. 각 실험의 결과를 표 3 에 제시하였다. 표 3에서는 여울의 시작점을 기준으로 흐름방향의 세굴 길이(l_d)와 흐름 반대 방향의 세굴 길 이(l_u)를 각각 제시하였고 최대 세굴심과 여울의 열린 폭을 각각 수심으로 무차원화 시킨 값을 제시하였다. 그리고 세굴 형상을 나타내기 위하여 종방향과 횡방향 세굴 길이의 비(l_s/w), 흐름방향과 흐름 반대 방향 세 굴 길이의 비(l_d/l_u)를 제시하였다.

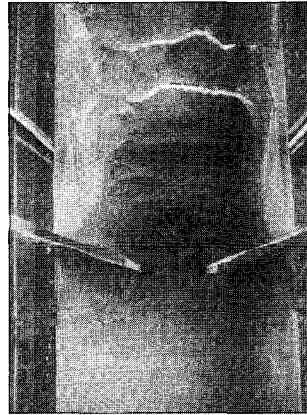
최대 세굴심이 발생하는 위치는 여울에서 여울 폭 길 이 이내의 하류이었다. 이 지점에서 세굴이 발생하는 과정은 여울의 각 날개 끝에서 국부적인 세굴이 각각

발생하기 시작하여 그 두 개의 세굴이 점차로 커지면서 결국은 합쳐져 소 형태의 세굴이 형성된다. 그림 6은 V 형 여울의 세굴 실험을 보여주는 사진이다. 그림 7(a) 와 7(b)는 8번과 17번 실험의 결과의 등세굴심도를 비 교한 것이다. 8번과 17번 실험은 수리 조건은 동일하고 여울의 각도만 70° 와 110° 로 상이한 경우이다. 이 두 등세굴심도에서 모두 최대 세굴심은 여울의 바로 하류 에 나타나는 점을 확인할 수 있다.

실험 결과로부터 구한 최대 세굴심과 세굴 부피의 관계를 그림 8에 도시하였다. 실험 결과를 도시한 그림 8에서 세굴부피는 최대 세굴심의 제곱에 비례하는 뚜렷 한 관계를 나타낸다. 이 결과로부터 수리량과 세굴부피 와의 관계는 수리량과 최대 세굴심과의 관계로부터 유

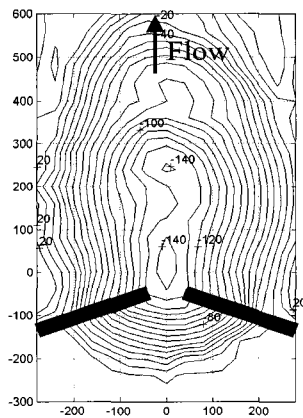


(a) Case no. 8

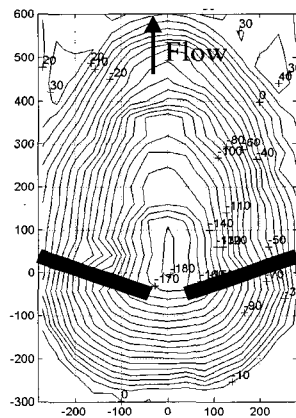


(a) Case no. 17

그림 6. V형 여울 세굴 실험 결과 사진



(a) Case no. 8



(a) Case no. 17

그림 7. V형 여울 세굴 실험 결과의 등세굴심도 (단위: mm)

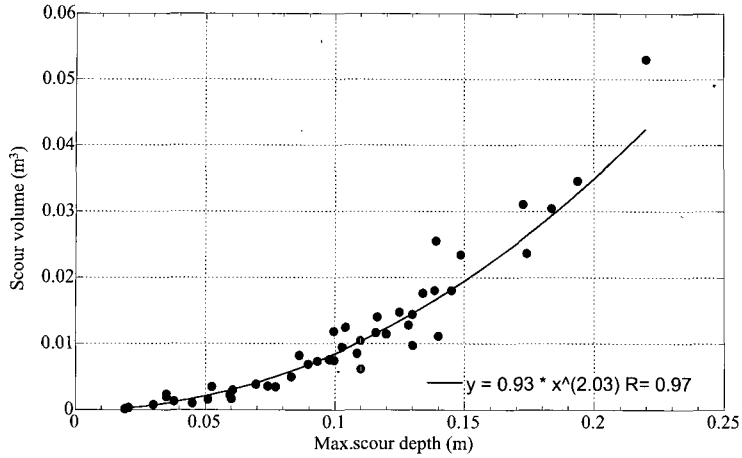
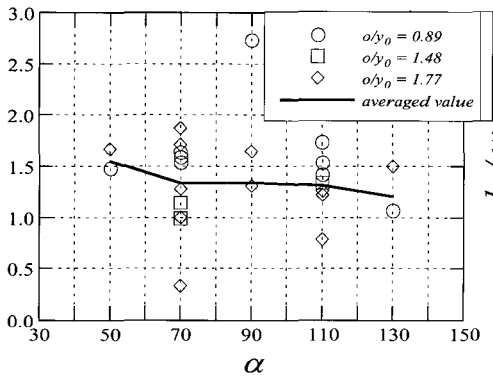
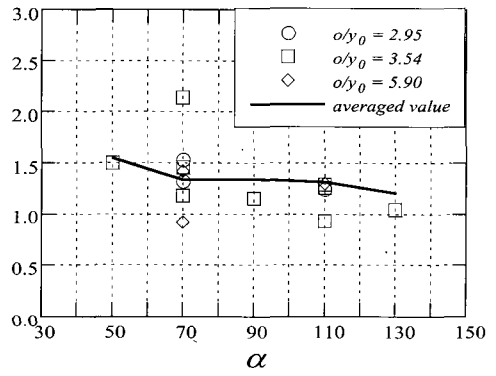


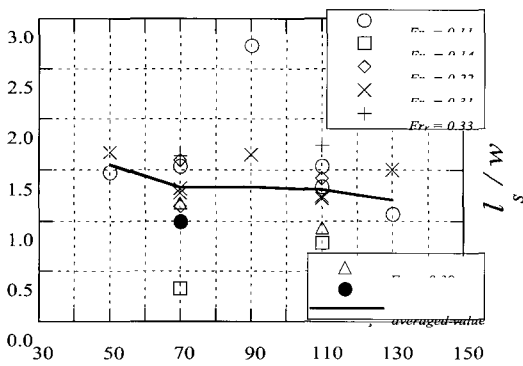
그림 8. 최대 세굴심과 세굴 부피와의 관계



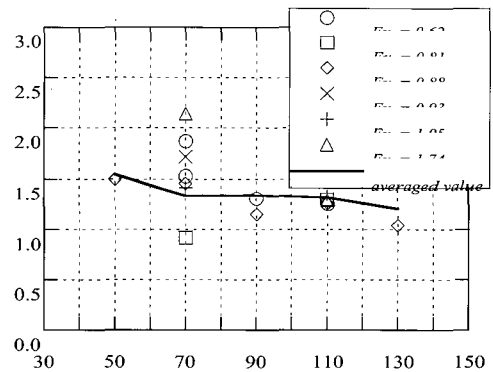
(a) Small o/y_0 ($o/y_0 = 0.89-1.77$)



(b) Large o/y_0 ($o/y_0 = 2.95-5.90$)

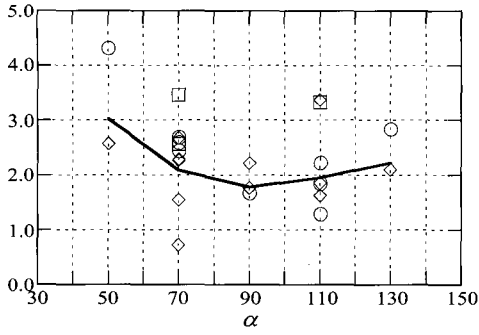


(c) Small Fr_r ($Fr_r = 0.11-0.48$)

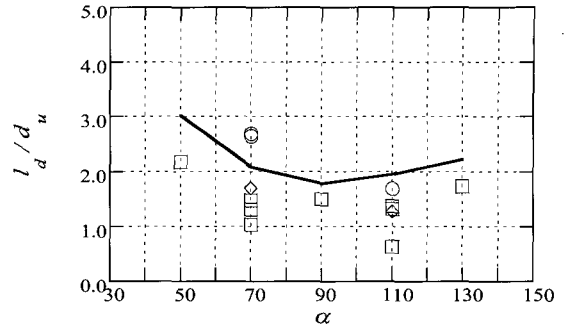


(d) Large Fr_r ($Fr_r = 0.62-1.74$)

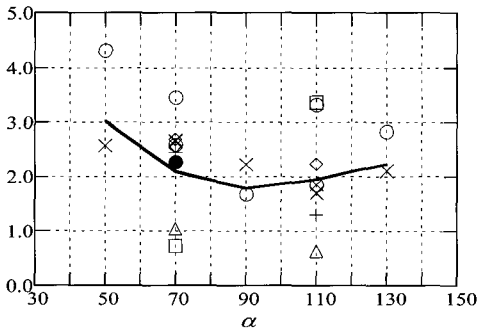
그림 9. V형 여울 각도에 따른 종방향과 횡방향 세굴 길이 비



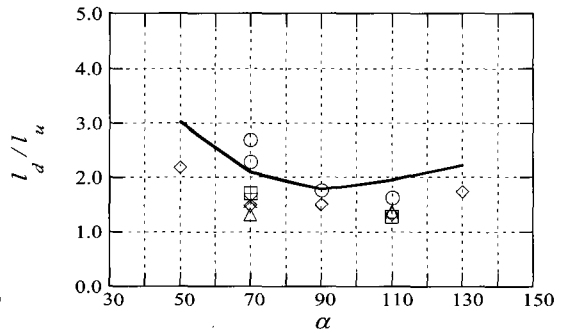
(a) Small o/y_0 ($o/y_0 = 0.89-1.77$)



(b) Large o/y_0 ($o/y_0 = 2.95-5.90$)



(c) Small Fr_r ($Fr_r = 0.11-0.48$)



(d) Large Fr_r ($Fr_r = 0.62-1.74$)

그림 10. V형 여울 각도에 따른 흐름 방향과 흐름 반대방향 세굴 길이 비 (기호와 선은 그림 9의 정의와 동일함)

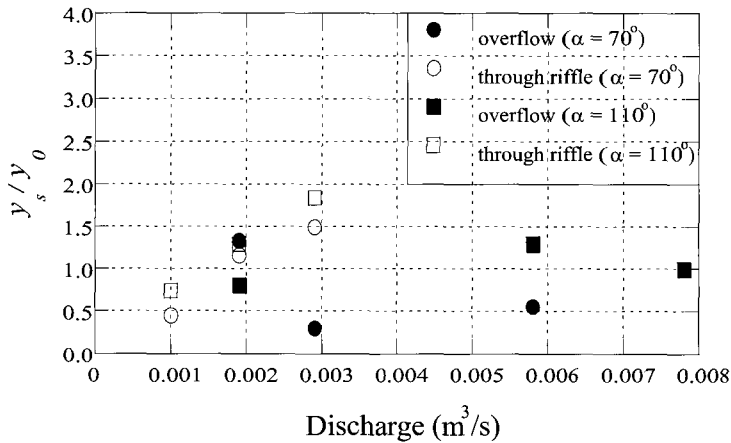


그림 11. 월류와 비월류 경우의 유량에 따른 최대 세굴심 비교

추할 수 있음을 알 수 있으며 또한 세굴 부피는 수리량 조건과 V형 여울의 형상에 따라서 큰 차이를 나타내지 않는다는 점을 확인할 수 있다.

세굴의 형태는 여울의 각도에 따라 변화가 있다. 그림 9와 그림 10은 각각 여울 각도에 따른 종·횡방향 세굴 길이의 비(l_s/w)와 여울 시작점을 기준으로 흐름 방향과 흐름 반대방향 세굴 길이의 비(l_d/l_u)를 나타낸다. 그림 9와 10에서 여울의 열린 폭과 여울 프루드 수의 영향을 확인하기 위하여 결과를 수심으로 무차원화된 여울의 폭이 작은 경우(0.89 ~ 1.77)와 큰 경우(2.95 ~ 5.9)와 프루드 수가 비교적 작은 경우(0.11 ~ 0.48)와 큰 경우(0.62 ~ 1.74)로 나누어 도시하였다. 또한 각각의 경우의 무차원화된 여울의 폭과 프루드 수를 구분하였다. 각 그림에는 전체 실험 자료로부터 구한 각도에 따른 종·횡방향 세굴 길이의 비와 흐름방향과 흐름 반대방향 세굴 길이의 비의 평균값을 표기하였다.

그림 9에서 종·횡방향 세굴 길이 비는 각 각도의 경우마다 상당한 편차를 나타내고 있지만 평균적으로 여울 각도가 커짐에 따라 감소하는 경향이 나타난다. 즉 여울 각도가 커질수록 즉 여울이 흐름 반대 방향으로 향해있을수록 세굴의 형상은 정방형에 가까워진다. 여울이 흐름 반대 방향을 향해있는 경우, 물의 흐름은 여울에 의해 그렇지 않은 경우에 비해 더 큰 저항을 받게 되고 따라서 세굴은 흐름방향으로 상대적으로 덜 발달하게 된다. 그러나 여울에 의한 저항이 커질수록 여울 주변에 더 크거나 더 깊은 세굴이 생기게 되어 세굴의 종방향 길이와는 달리 세굴 부피는 여울 각도에 관계없이 큰 차이가 생기지 않는다고 추정할 수 있다. 이러한 경향은 여울 폭이 클수록 그리고 프루드 수가 클수록 더 뚜렷하게 나타난다.

그림 10에 제시된 여울 시작점을 기준으로 흐름방향과 흐름 반대방향 세굴 길이의 비는 여울을 중심으로 세굴이 발달한 방향의 상대적인 크기를 나타낸다. 실험 결과에 의하면 각 각도의 경우에 따라 길이 비는 큰 편차를 보이지만 평균값은 50° 인 경우가 가장 크고 여울 각도가 커짐에 따라 점차 감소하다가 90° 이후로는 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 즉 여울 각도가 50° 인 경우 평균적으로 흐름방향으로의 세굴 길이가 여울 상류쪽을 발생한 세굴 길이에 비해 길다는 뜻이 된다. 이러한 종방향 세굴 길이 비 경향은 여울 폭과 프루드 수가 작은 경우에 비교적 더 잘 확인된다.

따라서 여울의 각도에 따른 세굴의 형상은 각도가

작을수록 종·횡방향 세굴 길이 비가 커지고 여울의 하류방향으로 상대적으로 더 길게 형성되며 각도가 커짐에 따라 종·횡방향 세굴 길이 비는 작아진다고 판단된다. 여울의 폭과 프루드 수에 의한 세굴 형상에 대한 영향은 크지는 않으나 대체로 여울 폭과 프루드 수가 증가할수록 여울 각도에 따른 종·횡방향 세굴 길이 비 변화가 뚜렷하게 나타나며 여울 폭과 프루드 수가 작은 경우에 흐름방향과 흐름 반대방향 세굴 길이의 비와 여울 각도와 관계를 용이하게 확인할 수 있다.

수위가 높아져 물의 흐름이 V형 여울 위로 월류하는 경우를 재현하기 위하여 모형 V형 여울의 높이를 중앙부에서 5 cm, 양안에서 9.4 cm, 경사 10° 로 설치하여 실험을 수행하였다. 월류 실험은 36 ~ 41번 실험에 해당된다. 월류 실험에서는 흐름 단면적이 여울 사이로만 흐름이 있는 경우에 비해 커지기 때문에 동일한 유량 조건에서 여울에서의 유속이 감소하며 따라서 여울에서의 프루드 수 역시 감소하게된다. 이러한 프루드 수의 감소를 감안하여 세굴심을 비교하기 위하여 유량에 따른 무차원 최대 세굴심을 여울 사이의 흐름만 있는 경우와 월류하는 경우에 대해 그림 11에 비교하였다. 그림 11에서는 월류 실험인 36 ~ 41번 실험 결과와 월류 실험과 유사한 조건의 비월류 실험인 6 ~ 8, 15 ~ 17번 실험 결과를 비교하였다. 이 비교로부터 월류 조건인 경우 유량의 증가에도 불구하고 세굴심은 증가하지 않는 현상을 확인할 수 있는데 이는 월류로 인해 여울 프루드 수의 증가는 없었기 때문으로 확인된다. 세굴심은 유량이 아닌 여울 프루드 수에 의해 지배적으로 결정되며 따라서 유량과 수위가 동시에 증가하여 프루드 수의 증가가 없는 경우 V형 여울의 높이 보다 높아진 이후에는 세굴심 더 이상 증가하지 않는다고 판단할 수 있다.

4.2 수제에서의 세굴 추정식과 비교

실험을 통해 구한 V형 여울에서의 최대 세굴심을 Breusers와 Raudkivi(1991)이 제안한 수제에서의 세굴심 예측식과 비교하였다. V형 여울의 세굴심과 수제의 세굴심 예측식과의 비교를 한 이유는 V형 여울의 세굴심 예측식은 발표된 바가 없기 때문에 V형 여울과 형태가 유사한 수제의 세굴에 관한 연구 결과와 비교를 통해 실험 결과를 검증하기 위해서이다. 또한 수제와 V형 여울의 세굴 특성을 분석하여 유사점을 찾는 데도 비교의 목적이 있다.

수제 세굴심 예측값은 식 (6)에서 실험 조건에 적합한 상수를 결정하여 계산하였는데 사용된 상수

K_1 , K_2 , K_3 의 값은 각각 2.0, 1.0, 1.0이며 K_1 의 값은 표 1에 주어진 각도에 따른 값을 보간하여 실험에 사용된 V형 여울의 각도에 해당하는 값을 사용하였다. 최대 세굴심의 비교 결과를 그림 12에 제시하였다. 식 (6)으로 예측된 세굴심은 실험 결과와 비교할 때 전반적으로 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 수제와 V형 여울의 세굴 과정의 차이로부터 기인한다고 판단할 수 있다. 즉 양쪽 날개의 끝부분에서 발달한 세굴공이 합쳐져 V형 여울의 세굴 과정이 단일한 세굴공이 수제의 끝에서 발생하는 수제의 세굴 과정에 비해 같은 조건에서 더 깊은 세굴공을 만든다. 비록 세굴심 예측식은 측정된 세굴심을 과소평가하지만 상관도가 높은 결과를 보이며 이는 수제와 V형 여울 세굴의 유사성을 반영한다고 판단된다.

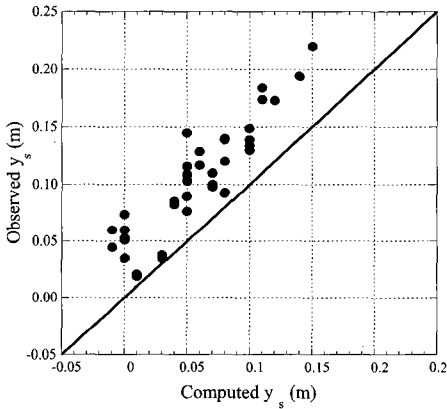


그림 12. 수제에서의 세굴심 예측식과 V형 여울의 최대 세굴심 비교

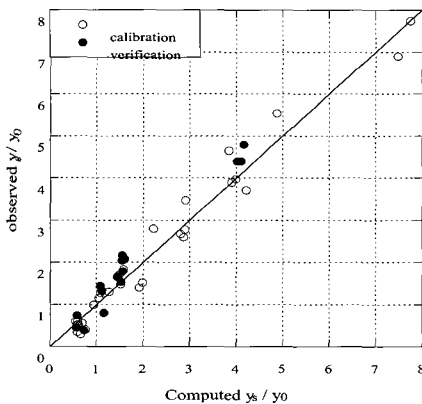


그림 13. 제안된 예측식과 실험에서 측정된 최대 세굴심 비교

4.3 V형 여울의 세굴 예측식

차원 해석에 의해 유도된 식 (10)의 상수를 전체 실험 자료의 2/3을 사용하여 구하였다. 구하여진 상수를 사용하여 제안된 V형 여울의 세굴 예측식은 다음과 같다.

$$\frac{y_s}{y_0} = 4.27 (1 - \cos \alpha)^{0.05} \left(\frac{\sigma}{y_0} \right)^{0.06} Fr_r^{0.91} \quad (11)$$

식 (11)에 의하면 수심으로 무차원화된 세굴심은 여울에서 프루드 수에 지배적인 영향을 받으며 여울의 각도와 여울의 열린 폭에 의해서는 비교적 영향을 덜 받는다는 점을 확인할 수 있다.

예측식 상수 추정에 사용되지 않는 실험 자료를 사용하여 제안된 예측식을 검증하였다. 추정과 검증에 사용된 자료를 구분하여 식 (11)과 그림 13에 비교하였다. 제안된 예측식과 실험 결과는 전구간에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 예측식의 유도과정에서 V형 여울의 세굴에 영향을 주는 인자를 적절히 선택했기 때문이라고 판단된다. 비록 제안된 예측식은 현장 자료를 이용한 추가적인 검증이 필요하지만 하천복원 공법의 한 종류인 V형 여울의 적용에 있어서 세굴심을 추정하는데 사용될 수 있다고 사료된다.

5. 결 론

하천 생태 서식처를 제공하는 공법 중 하나인 V형 여울의 세굴에 대한 실험 연구를 통하여 세굴 특성을 규명하였고, V형 여울의 형태 및 수리 자료를 이용한 세굴심 예측식을 제안하였다.

실험 결과로부터 여울의 각도에 따른 세굴의 형상은 각도가 작을수록 중횡길이 비가 커지고 여울의 하류방향으로 상대적으로 더 길게 형성되며 각도가 커짐에 따라 중횡길이 비는 작아진다는 점을 확인하였다. 그리고 V형 여울을 월류하는 흐름에 대한 실험을 통해 유량과 수위가 동시에 증가하는 경우 수위가 V형 여울의 높이보다 높아진 이후에는 세굴심이 더 이상 증가하지 않는다는 결론을 얻었다.

Breusers와 Raudkivi(1991)가 제안한 수제에서의 세굴심 예측식과 V형 여울의 실험 결과를 비교한 결과 수제에서 세굴심 예측식은 측정된 세굴심을 과소평가하지만, V형 여울에서의 세굴 경향을 일부 반영한다고 판단할 수 있었다. 따라서 더 많은 자료를 이용한 수정을 통하면 V형 여울의 세굴 예측식으로 사용이 가능할 것

이라고 판단된다.

V형 여울의 세굴에 영향을 주는 인자들의 무차원화를 통해 본 연구에서 제안된 예측식은 하천복원 공법의 한 종류인 V형 여울의 적용에 있어서 세굴심을 추정하는데 사용될 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 선도기술개발사업(G-7)의 ‘국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발’ 연구 과제의 일부로 수행되었다. 본 연구 중 실험을 수행하는데 도움을 준 하천 실험실 김규호 그룹장, 운병모 팀장 및 직원들께 사의를 표하며, 현장 관측을 도와준 한국건설기술연구원 권보애씨에게 감사의 뜻을 전한다. 또한 실험 장비인 사면측정기를 대여하여 실험에 도움을 준 서울대학교 수공학연구소 서일원 교수께 감사 드린다.

참 고 문 헌

이승희 (2000). “자원이 되는 물고기가 살 수 있는 하천.” **한국수자원학회지 특집기사**, 제33권, 제 6호, pp. 41-55.

우효섭 (2001). **하천수리학**, 청문각

한국건설기술연구원 (2001). **국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발 최종보고서**.

Ahmad, M. (1953). “*Experiments on design and behaviour of spur dikes*”. *Proc. IAHR Conf.*, Minnesota, pp. 145-159.

Breusers, H. N. C., and Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring*, Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Inglis, C. C. (1949). “*The behaviour and control of rivers and canals*”, Res. Publ. no. 13, C.W.I.N.R.S. Poona.

Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M., and Rosgen, D. L. (2001). “Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 9, pp. 772-778.

Liu, H. K., Chang, F. M., and Skinner, M. M. (1961). *Effect of bridge construction on scour and backwater*, CER 60 HKL 22, Colorado State University, Civil Engineering Section, Ft. Collins, Colorado.

Melville, B. W., and Coleman, S. E. (1999). *Bridge Scour*, Water Resources Publication, LLC, Highlands Ranch, Colorado.

Petts, G., and Calow, P. (1996). *River Restoration*, Blackwell Science Ltd.

Ting, F. C. K., Briaud, J.-L., Chen, H. C., Gudavalli, R., Perugu, S., and Wei, G. (2001). “Flume Tests For Scour in Clay at Circular Piers.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 11, pp. 969-978.

(논문번호:02-87/접수:2002.11.07/심사완료:2003.05.21)