

# V형 여울의 세굴 특성에 관한 실험적 연구

○유대영<sup>1)</sup>, 박정환<sup>2)</sup>, 우효섭<sup>3)</sup>

## 1. 서론

V형 여울(V-shaped notch)은 양안에서 하도 중앙에 일정한 폭만을 남기고 사석 등을 쌓아 설치하여 여울의 가운데로 물의 흐름을 집중시켜 하도 중앙에 세굴로 인한 소를 형성하는 역할을 하는 인공 여울의 한 형태이다. V형 여울의 설치 목적은 여울로 인해 소를 형성시켜 갈수시에 어류의 서식처 또는 피난처를 제공하고 홍수시에는 여울로 인해 양안의 상하류에 와류가 형성되어 유속이 약한 구간을 발생시켜 어류의 피난처를 제공하는데 있다(그림 1).

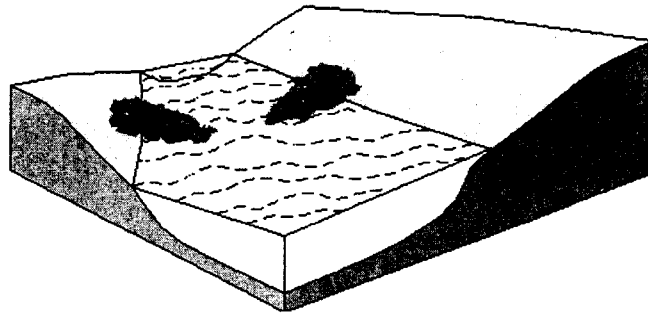


그림 1. V형 여울의 모식도

한국건설기술연구원(2002)에서는 양재천 서초구 구간에 1998년과 2000년에 각각 V형 여울을 1개소씩 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 중심부분에 어류의 피난처 기능을 하는 세굴심 약 70 cm의 소가 형성되었다.

본 연구의 목적은 환경부 G-7연구 과제인 '국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발' 연구 사업에서 시험 구간인 양재천 서초구 구간에 시험 적용한 V형 여울의 세굴 특성을 모형 실험을 통해 정량적으로 구명하는 것이다. 즉 V형 여울의 형상과 수리량에 따른 세굴심과 세굴부피, 세굴 형상의 관계를 수리 모형 실험을 통해 도출한다.

1) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원, daeyoung@kict.re.kr

2) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원

3) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 부장, 연구위원, hswoo@kict.re.kr

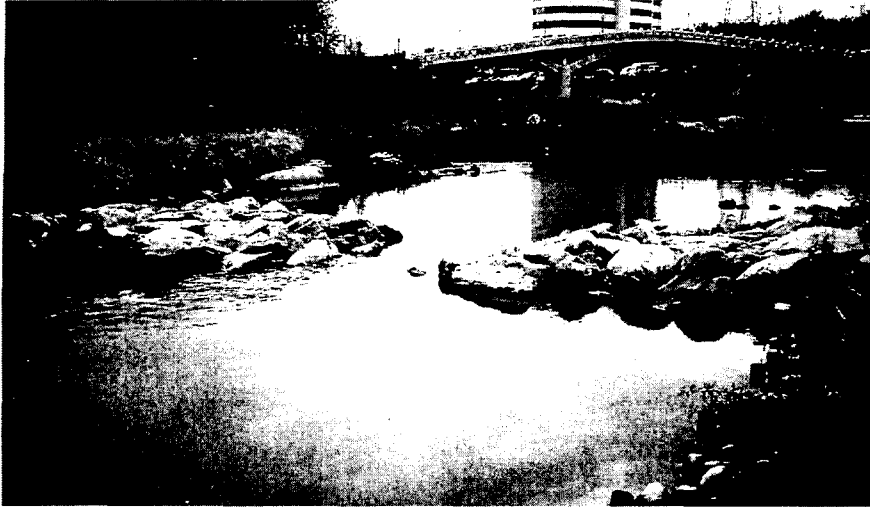


그림 2. 양재천에 시험 적용된 V형 여울(한국건설기술연구원, 2002)

## 2. 이론적 배경

세굴심, 세굴부피와 유속, 유량, 수심, 여울의 형상 등의 관계는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$H_s, V_s = f(W, W_n, \theta, H_u, H_d, Q, V_n, D_s, \mu) \quad (1)$$

여기서  $H_s$  = 세굴심,  $V_s$  = 세굴부피,  $W$  = 수로 폭,  $W_n$  = V형 여울의 열린 폭,  $\theta$  = 여울각도,  $H_u$  = 상류 수심,  $H_d$  = 하류 수심,  $Q$  = 유량,  $V_n$  = 여울에서의 유속,  $D_s$  = 하상재료 입경,  $\mu$  = 점성계수이다. 위 식에서 점성계수는 모형과 원형의 흐름 조건이 모두 난류인 경우 고려하지 않을 수 있다. 위 식을 세굴심에 관한 무차원화 된 식으로 나타내면

$$\frac{H_s}{H_d} = f\left(\theta, \frac{W_n}{H_d}, Fr_n\right) \quad (2)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $Fr_n$  = 여울 중심에서의 프루드 수로

$$Fr_n = \frac{V_n}{\sqrt{gH_d}} \quad (3)$$

로서 정의되며  $V_n$ 은 여울에서의 유속이다.

모형 실험에서는 프루드 상사를 사용하여 시험 적용된 V형 여울의 약 1/60 모형을 이루도록 하였다. 모형의 수직 및 수평 상사 및 하상재료의 크기 및 밀도의 상사를 모두 동시에 만족시키는 것은 매우 어렵기 때문에 수직 및 수평 상사는 만족시키면서 하상재료의 상사는 고려하지 않고 단일한 하상재료를 사용하여 실험을 수행하였다.

## 3. 모형 실험

총 9 종류의 여울 형태(각도, 높이 및 여울 폭 변화)에 대해 실험이 수행되었다. 실험에서 사용된  $W_n/W$ 의 값은 0.15, 0.25 두 종류이며 V형 여울의 각도는 양안이 대칭으로 50, 70, 90, 110, 130°에 대해서 실험을 수행하였다. 유량의 범위는 시험 적용 구간과의 상사비를 고려하여 0.43~7.79 l/s로 설정되었다. 또한 홍수 시 V형 여울 위로 월류되는 조건을 재현하기 위하여 물이 월류하는 경우에 대해서도 실험을 수행하였다. 하상 재료는 직경 0.09 mm, 비중 2.01의 규조토를 사용하였다. 실험은 길이 20 m, 폭 0.59 m의 실험용 수로에서 진행되었다. 실험에서는 하상 재료를 30 cm 두께로 설치하였는데 전체 실험에서 충분한 두께로 판명되었다. 세굴심은 KENEK사의 사면측정기 WH-201C, WHT-40을 이용하여 측정하였다. 실험은 총 45회 각기 다른 조건에서 수행되었다. 실험에서 사용된 V형 여울의 평면도를 그림 3에 제시하였다. 실험은 약 1.5~2.5 시간동안 동일한 유량과 수위 조건을 유지하며 진행되었고 세굴 양상이 안정된 이후에 실험을 마치고 세굴량을 측정하였다. 실험 시간은 실험 과정 동안 최대 세굴심을 측정하여 최대 세굴심이 상당시간 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). 자세한 실험 조건은 한국건설기술연구원(2002) 자료에 제시되어 있다.

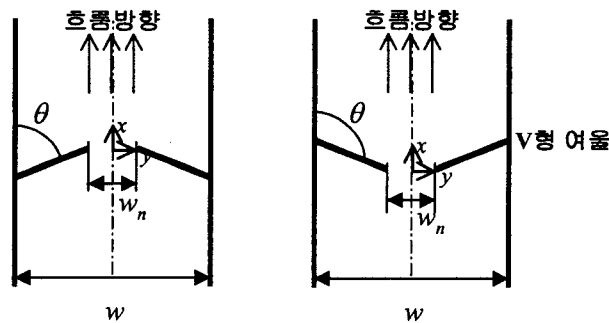


그림 3. V형 여울 모형도

#### 4. 실험 결과

실험 결과의 측정은 세굴심은 세굴 범위 내에서 사면 측정기를 이용하여 종, 횡방향으로 4 cm의 간격의 격자에서 측정하였다. 측정된 세굴 자료로부터 최대 세굴심, 세굴부피, 종방향 세굴 길이, 횡방향 세굴길이 등을 계산하여 각 조건의 V형 여울 특성 및 수리량과 관계를 분석하였다.

최대 세굴심이 발생하는 위치는 여울에서 여울 열린 폭 길이 이내의 하류이었다. 이 지점에서 세굴이 발생하는 과정은 여울의 각 날개 끝에서 국부적인 세굴이 독립적으로 발생하기 시작하여 그 두 개의 세굴이 점차로 커지면서 결국은 합쳐져 소 형태의 세굴이 형성된다. 그림 4에 수리량 조건은 동일하고 여울의 각도만 70° 와 110° 로 상이한 경우의 등세굴심도를 제시하였다. 이 두 등세굴심도에서 모두 최대 세굴심은 여울 중심부의 바로 하류에 나타나는 점을 확인할 수 있다.

실험 결과로부터 구한 최대 세굴심과 세굴부피의 관계를 도시한 그래프에서 세굴부피는 최

대 세굴심에 제곱에 비례하는 뚜렷한 관계를 나타낸다(그림 5). 이 결과로부터 수리량과 세굴부피와의 관계는 수리량과 최대 세굴심과의 관계로부터 유추할 수 있음을 알 수 있다.

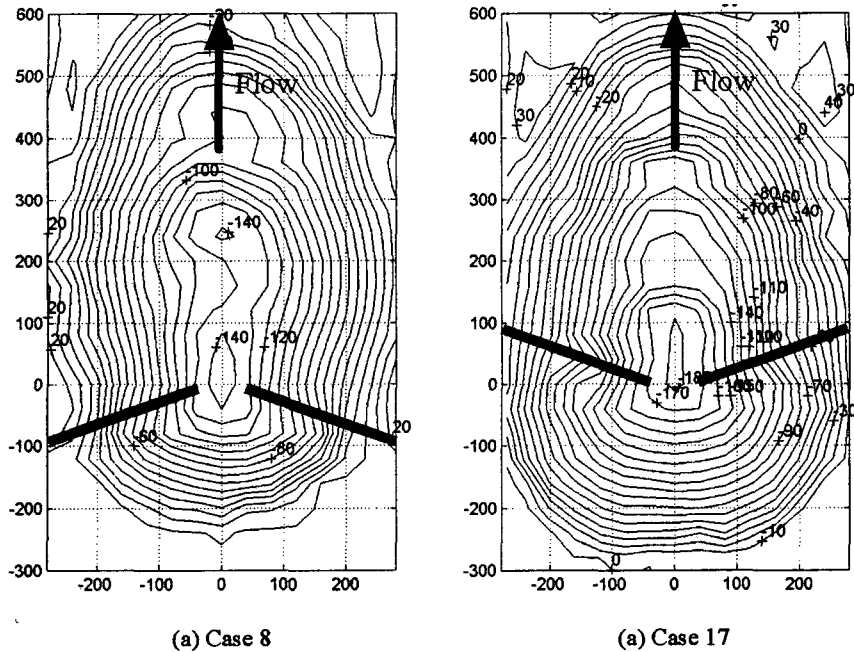


그림 4. V형 여울에 의한 등세굴심도  
 $(W_n/W = 0.15, H = 0.10 \text{ m}, V_n = 0.33 \text{ m/s})$

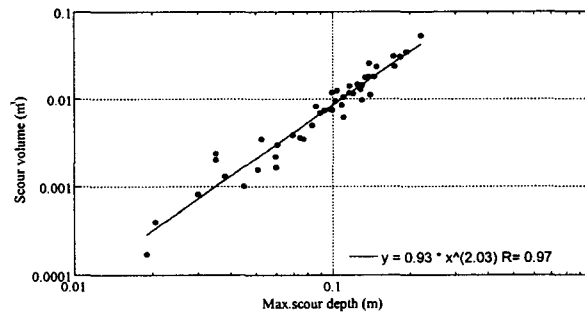


그림 5. 최대 세굴심과 세굴 부피와의 관계

세굴심과 수리량의 관계를 알아보기 위해 수심으로 무차원화된 최대 세굴심과 여울 프루드 수와 관계를 그림 6에 나타내었다. 무차원 최대 세굴심과 여울에서의 프루드 수의 관계는 선형관계에 가까운 형태로 나타난다. 프루드 수가 1.0 보다 작은 범위에서는 선형관계가 뚜렷하게 나타나며 본 실험에서 프루드 수의 가장 큰 경우인 1.74 인 경우에는 선형관계 가정이 실험 결과에 비해 과대평가하는 경향을 보인다. 이 결과로부터 프루드 수가 1 보다 작은 경우에는 유량의 증가에

따른 세굴심의 증가량이 선형적인 관계이지만 유량이 증가하여 프루드 수가 1 보다 커지는 경우에는 프루드 수의 증가에 따른 세굴량의 증가가 프루드 수가 1 보다 작은 경우에 비해 작다는 점을 나타낸다. 또한 이 결과와 최대 세굴심과 세굴부피와의 관계로부터 프루드 수의 증가에 따른 세굴부피의 증가는 프루드 수의 제곱에 비례한다는 점을 유추할 수 있다.

여울 형태에 따른 세굴심의 변화를 보기 위하여 무차원 세굴심과 프루드 수의 관계 그래프에서 여울의 각도를 고려하여 비교한 결과 전체적으로 실험 경우의 수가 작은 이유도 있지만 뚜렷한 각도에 의한 세굴심 변화 양상이 확인되지 않았다. 그래프에서 여울 각이 110° 인 경우가 다른 경우에 비해 다소 큰 세굴심을 나타내었지만 그 차이는 크지 않아 실험 오차 범위 내에 든다고 할 수 있다. 따라서 여울에 각도에 따른 세굴심의 변화는 거의 없으며 이 결과로부터 세굴 부피 역시 여울 각도에 큰 영향을 받지 않는다는 점을 확인할 수 있었다.

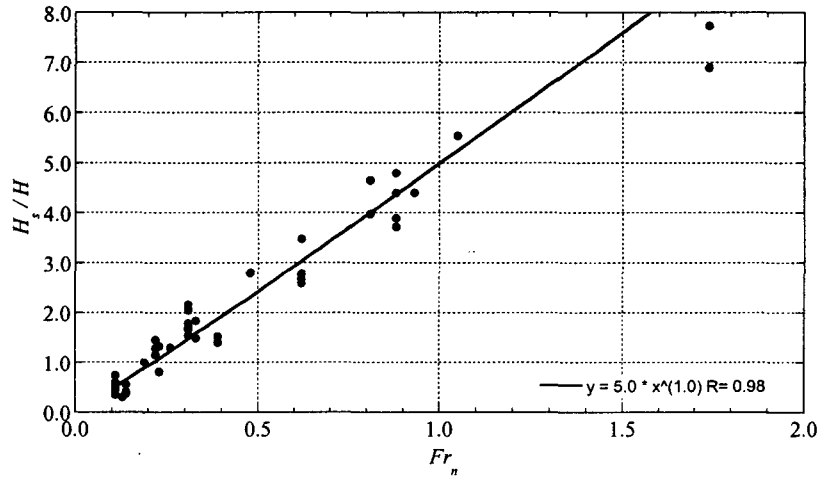


그림 6. 최대 세굴심과 여울 프루드 수와의 관계

그러나 세굴의 형태는 여울의 각도에 따라 변화가 있다. 그림 7과 8은 각각 여울 각도에 따른 중·횡방향 세굴 길이의 비와 여울 시작점을 기준으로 상·하류방향 세굴 길이의 비를 나타낸다. 중·횡방향 세굴 길이의 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 가까워진다는 뜻이 된다. 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.

그림 8에 제시된 여울 시작점을 기준으로 상·하류방향 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. 따라서 여울의 각도에 따른 세굴의 형

상은 각도가 작을수록 종횡길이비가 커지고 여울의 하류방향으로 상대적으로 더 길게 형성되며 각도가 커짐에 따라 종횡길이비는 작아진다고 판단된다.

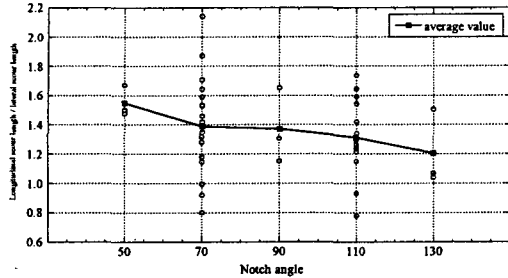


그림 7. 여울각도에 따른 종·횡방향 세굴 길이 비

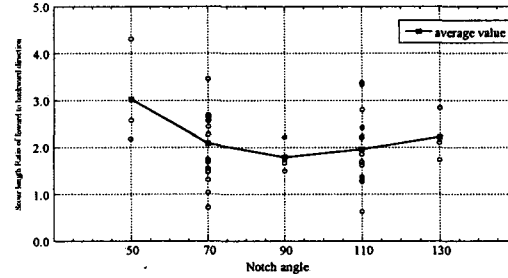


그림 8. 여울 각도에 따른 상·하류방향 세굴 길이 비

수위가 높아져 물의 흐름이 V형 여울 위로 월류하는 경우를 재현하기 위하여 모형 V형 여울의 높이를 중앙부에서 5 cm, 호안에서 9.4 cm, 경사 10° 로 설치하여 실험을 수행하였다. 월류 경우는 중심각 70과 110° 두 경우에 대해서 실시되었다. 월류 실험에서는 흐름 단면적이 여울 사이로만 흐름이 있는 경우에 비해 커지기 때문에 동일한 유량 조건에서 여울에서의 유속이 감소하며 따라서 같은 유량의 여울 사이의 흐름 경우에 비해 세굴심이 상당히 작게 나타나는 점을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 V형 여울의 실험 연구를 통해 여울로 인한 하천 중심에서의 세굴은 여울에서의 프루드 수와 직접적인 관련이 있음을 확인하였다. 여울의 각도에 따른 최대 세굴심과 세굴량의 뚜렷한 변화는 확인되지 않았으나 여울 각도에 따라 종·횡방향 세굴 길이 비와 여울 입구를 중심으로한 상·하류방향 세굴 길이 비는 변화를 보이는 것으로 나타났다. 또한 홍수 시 여울을 월류하는 흐름이 발생하는 경우에는 통수 단면적의 증가로 인해 예상보다 작은 세굴만이 발생하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- 한국건설기술연구원(2002), 국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발.
- Ting, F. C. K., Briaud, J., Chen, H. C., Gudavalli, R., Perugu, S., and Wei, Gensheng(2001), "Flume Tests for Scour in Clay at Circular Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 11, pp. 969-978.