

## 세립토의 침식율 측정

### Measurements of Erosion Rate in Fine-Grained Soils

곽기석<sup>1)</sup>, Kiseok Kwak, 정문경<sup>2)</sup>, Moon-Kyung Chung, 정하익<sup>2)</sup>, Ha-Ik Chung, 우제윤<sup>2)</sup>, Je-Yoon Woo, 조삼덕<sup>2)</sup>, Sam-Deok Cho

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Civil Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS** : A new apparatus called the EFA (Erosion Function Apparatus) has been built and tested to measure the erodibility of fine-grained soils. The EFA is a simple test to predict the erosion rate of fine-grained soils along with the corresponding velocity and shear stress. In addition, it is advantageous in predicting the scour rate for actual soil samples from bridge sites. The plot of erosion rate versus shear stress is the result of an EFA test. It indicates the critical shear stress at which erosion starts and the rate of erosion beyond that shear stress. In order to measure the erodibilities of various soils, 14 Shelby Tube soil samples are collected from the actual bridge sites and tested using the EFA. The results of the EFA tests which are the relationships between erosion rates and shear stresses are presented in this paper and research continues to develop the correlation between the erosion function and the soil properties.

**Key Words** : fine-grained soil, erosion rate, scour, shear stress, erodibility

## 1. 서 론

세굴 현상은 흐르는 물의 침식유발능력과 이에 대응하는 흙의 침식저항능력에 관련되어 발생하게 된다. 흙의 침식저항능력은 세굴되는 흙의 종류에 따라 크게 달라질 수 있으며, 이에 따라 세굴의 양상 또한 크게 달라지게 된다. 일반적으로 조립토 세굴은 중력과 마찰력의 법칙이 지배하는 반면, 세립토 세굴은 중력과 마찰력 뿐만 아니라 흙입자의 물리 화학적 성질에도 의존한다. 교량 주위의 세굴에 대한 연구는 대략 1950년대 후반부터 현재까지 계속되어왔으나, 대부분의 기존 연구들은 조립토의 세굴현상에 집중되어왔다. 현재 주로 사용되고 있는 방법으로는 조립토에서 수행한 실험에 기초한 HEC-18 (Richardson과 Davis, 1995)이 있다. 이 방법은 주로 모래지반상에 위치한 56개의 교량주위의 현장 세굴관측치에 대해 검증되었다 (Landers와 Mueller, 1996). 하지만 이 HEC-18은 하상토의 입자크기만을 고려할 뿐, 그 외의 다른 흙의 성질을 고려하지 않는다. 세립토의 세굴은 조립토의 세굴에 비해 아주 느리고, 또한 흙의 성질에 보다 더 의존한다. 조립토를 위해 개발된 세굴공식을 세립토에 적용한다면 세굴깊이가 과대하게 평가된다. 따라서 세립토에 대한 세굴해석방법은 수리학적 매개변수 뿐만 아니라

시간효과와 흙의 성질을 동시에 고려할 수 있어야 한다.

모래지반상의 세굴과 비교한다면, 세립토의 세굴현상은 거의 알려진 바가 없다. 본 연구는 세립토지반에 위치한 교각 주위의 시간에 따른 세굴깊이 변화곡선을 예측하기 위해 개발된 SRICOS 방법(Briaud 등, 1999; Kwak, 2000)에 기초한다. SRICOS 방법에서는 세굴과정이 흐르는 물에 의해 하상과 물의 경계면에 발생하는 전단응력에 주로 의존한다는 개념을 제안하였다. 이 모델의 일부로서, 침식율 시험기(Erosion Function Apparatus : EFA)가 세립토의 침식율을 정량화하기 위해 개발되었다. EFA 시험의 목적은 흐르는 물에 의해 하상표면에 야기되는 전단응력과 흙의 침식율과의 관계를 보여주는 곡선을 얻는 것이다. 이 침식율-전단응력 곡선이 EFA 시험의 결과이며, 이는 세굴이 시작될 때의 전단응력인 한계전단응력  $\tau_c$ 와 그 이후의 침식율을 전단응력의 증가에 따라 나타내준다.

본 연구에서는 세립토의 세굴현상에 대한 침식율의 영향을 조사하기 위해 10개의 교량현장으로부터 총 14개의 Shelby Tube 시료를 채취하여 EFA 시험을 실시하여, 그 경향을 분석하였다.

## 2. 침식율 시험기 (Erosion Function Apparatus : EFA)

EFA (그림 1)는 세립토의 침식율을 정량화하기 위해 개발되었다. EFA 시험에 사용되는 흙시료는 외경이 76.2 mm인 표준 Shelby Tube를 이용하여 불교란상태로 채취하며, 이 Shelby Tube의 한 쪽 끝이 구형관(101.6 mm x 50.0 mm)의 바닥에 연결된다. Shelby Tube 내의 흙은 피스톤을 통해 1 mm 씩 구형관 속으로 삽입되며, 이 돌출된 1mm의 흙이 관 속을 흐르는 물에 의해 침식되어진다. 관속을 흐르는 물의 유속은 최소 0.1 m/s에서 최대 6m/s 까지 재현할 수 있다. EFA 시험의 세부절차는 다음과 같다.

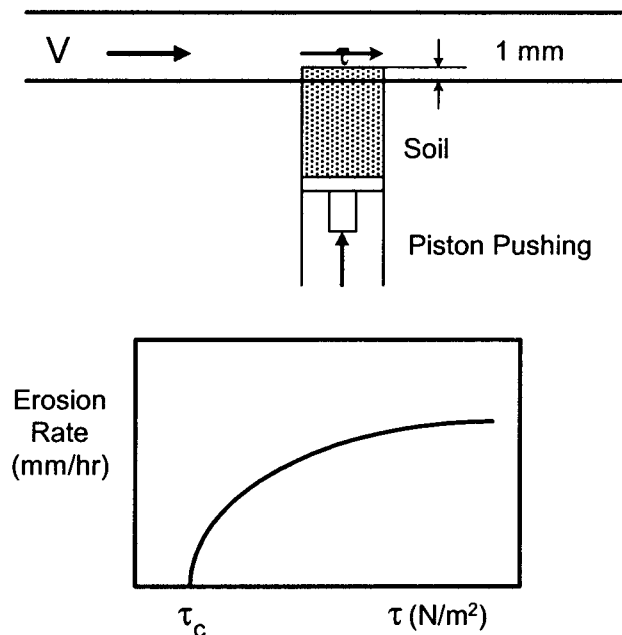


그림 1 침식율 시험기

1. 흙시료를 EFA에 장착한 후 구형관을 물로 채워 1시간 이상 기다린다.
2. 유속을 0.3 m/s로 맞춘 후 흙시료를 1mm 밀어 올린다.
3. 1mm의 흙이 침식되는데 걸리는 시간을 기록한다. 만일 1시간동안 침식이 전혀 이루어지지 않는다면 속도를 다음 단계로 높인다.

4. 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.5, 6.0 m/s의 유속에 대해 시험을 반복한다.

시험결과는 전단응력  $\tau$ 에 대한 침식율 변화곡선으로 구성되며, 각각의 유속에 대해 침식율  $\dot{z}$  (mm/hr)는 침식된 시료의 길이를 시간으로 나눔으로써 간단히 구해진다.

관속을 흐르는 물로 인해 흙시료 상부에 야기되는 평균전단응력은 Moody 도표 (Moody, 1944)를 이용하여 구하며 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho V^2 \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 Moody 도표로부터 얻어지는 마찰계수,  $\rho$ 는 물의 밀도 ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $V$ 는 관내의 평균유속 (m/s)이다. 마찰계수  $f$ 는 관의 레이놀즈수  $Re (= VD/\nu)$ 와 관의 상대조도  $\epsilon/D$ 의 함수이며,  $D$ 는 관의 직경,  $\nu$ 는 물의 동점성계수 ( $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $20^\circ\text{C}$ )이다. 일반적으로 원형단면인 경우 직경  $D$ 는 동수반경의 4배이다. EFA의 단면은 구형이므로 구형에 대한 동수반경을 구한 후 4배를 하여 그 직경으로 한다.

### 3. 침식율-전단응력 관계곡선

본 연구에서는 세립토의 세굴현상에 대한 침식율의 영향을 조사하기 위해 10개의 교량현장으로부터 총 18개의 Shelby Tube 시료를 채취하여 EFA 시험을 실시하였다. 시험에 사용된 시료는 대부분 세립토로 구성되었으며, 비교를 위해 실트질 모래와 같은 조립토도 포함되었다.

전형적인 EFA 시험의 결과들을 그림 2, 3, 4에 나타내었다. 대부분의 경우 침식율-전단응력 관계곡선의 형상은 그림 2와 같이 포물선 증가형상을 보였다. 하지만 그림 3과 같이 소성지수가 낮거나 조립토가 많은 부분을 차지하고 있는 흙에 대해서는 거의 직선 형상을, 그리고 미세한 균열이 많은 점토인 경우에는 급격히 증가하는 양상을 보였다(그림 4). 이는 실험중 확인된 바와 같이 개개의 입자가 침식된 것이 아니라 점토내의 균열에 의해 분리된 작은 덩어리째 침식되는 경향에 기인한다.

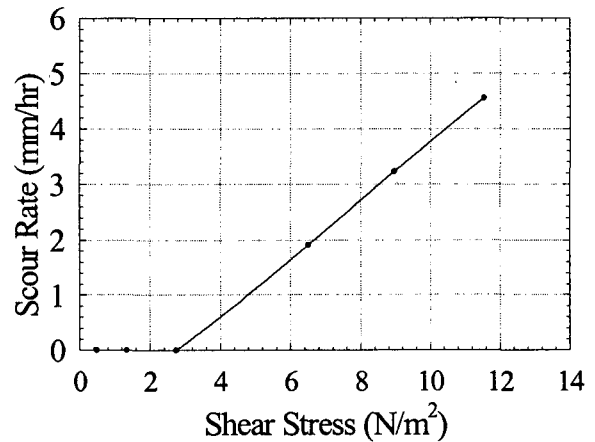
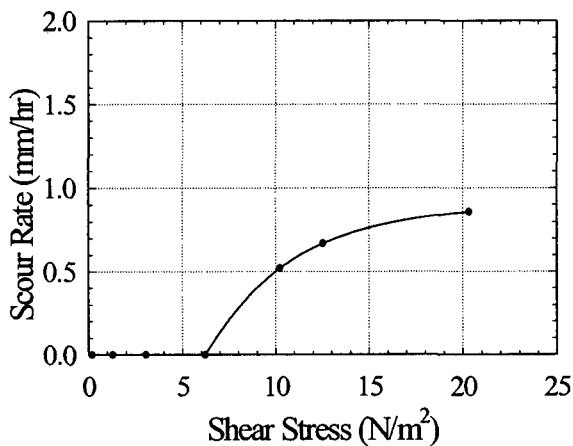


그림 2 침식율-전단응력 관계곡선 (세립토 : CH)      그림 3 침식율-전단응력 관계곡선 (세립토 : CL)

그림 5에는 #200체 통과율이 50%가 넘는 세립토에 대한 EFA 실험결과를 모두 도시하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이 침식함수는 평균입경  $D_{50}$ 의 크기에 따라서 확연히 2개의 곡선으로 구분되는 경향

을 보였다. 본 연구에 적용된 최소 평균입경  $D_{50, \min}$ 은 0.0012mm이며 최대 평균입경  $D_{50, \max}$ 는 6.0mm이다. 또한 같은 세립토라 하더라도 소성지수가 낮거나 모래질 점토인 경우에는 전단응력에 대한 침식속도의 증가가 아주 크게 나타난 반면, 소성지수가 큰 경우에는 상대적으로 작은 증가율을 보였다. 이는 소성지수와 #200체 통과율, 그리고 평균입경 등의 토성치가 침식능에 아주 큰 영향을 미치는 증거로 판단된다. 토성치와 세굴속도와의 관계는 향후 계속되는 실험을 통해 연구해야 할 과제이며, 이를 통해 토성치만으로 세굴속도를 구할 수 있는 관계를 정립하는 바탕이 될 것으로 판단된다.

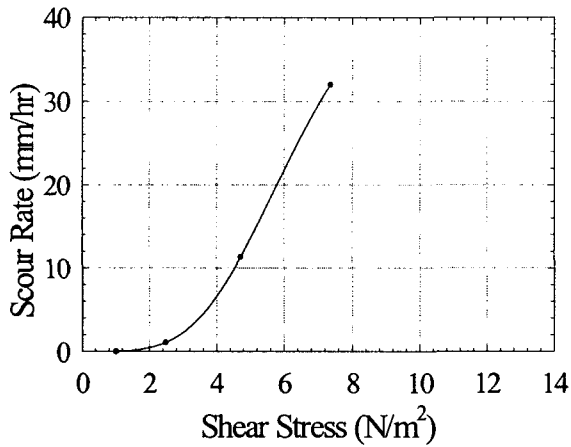


그림 4 침식율-전단응력 관계곡선  
(균열이 많은 세립토 : CH)

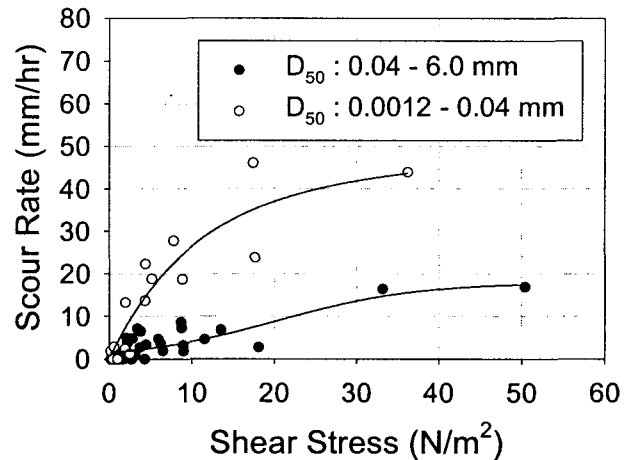


그림 5 평균입경에 따른 침식함수의 변화  
(#200 통과율 50% 이상)

#### 4. 최대전단응력과 침식율의 적용

교각 주변의 하상에서 발생하는 최대전단응력  $\tau_{\max}$ 는 세굴깊이를 예측하는데 있어 아주 중요한 매개 변수중의 하나이다. 실제 하천의 유속은 대략 0.1 m/s에서 3.0 m/s의 범위에 있으며, 이에 따라 하상에 발생하는 최대전단응력은 1 N/m<sup>2</sup>에서 50 N/m<sup>2</sup> 정도이다 (Briaud 등, 1999). 흐르는 물에 의해 하상에 야기되는 전단응력을 평가하는 데에는 여러 가지 방법들이 제안되어 있다. Munson 등 (1990)은 평형방정식에 기초하여 장애물이 없는 개수로와 관수로에 대한 식을 다음과 같이 각각 제안하였다.

$$\tau = r_h S_{EGL} \gamma_w \quad (2)$$

$$\tau = \frac{R}{2} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (3)$$

여기서  $r_h$ 는 동수반경,  $S_{EGL}$ 은 에너지경사,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량,  $R$ 은 관의 반경, 그리고  $\Delta p/l$ 은 관 길이  $l$ 에 대한 압력강하량이다. 하상에 장애물이 있는 경우, 그 장애물 주위에 발생하는 전단응력은 장애물이 없는 경우보다 아주 크다. Briaud 등 (1999)은 수치해석에 기초하여 하상이 평탄한 개수로에서 원통형 교각 주위에 발생하는 최대전단응력에 대한 식을 다음과 같이 개발하였다.

$$\tau_{\max} = 0.094 \rho V^2 \left( \frac{1}{\log Re} - \frac{1}{10} \right) \quad (4)$$

여기서,  $Re$ 는 교각 Reynolds수이며  $VD/\nu$ 로 표현된다.  $V$ 는 평균유속,  $D$ 는 교각직경,  $\nu$ 는 동점성계수 ( $10^{-6} m^2/s$ ,  $20^\circ C$ 인 경우), 그리고  $\rho$ 는 물의 밀도이다. 이 최대전단응력이 흙이 저항할 수 있는 한계전단응력보다 클 때, 세굴이 시작된다. 식(4)로부터 구해진 전단응력과 EFA 시험결과인 침식율-전단응력 관계곡선으로부터 지반의 침식저항능력인 침식율을 구하게 된다.

EFA 시험을 통해 정량적으로 구해진 침식율은 모든 종류의 세굴해석에 적용될 수 있으며, 특히 세립토 지반상의 교각세굴해석모델인 SRICOS 방법에서는 최대세굴깊이  $z_{max}$ 와 함께 다음과 같은 쌍곡선함수의 매개변수로 사용된다.

$$z(t) = \frac{t}{\frac{1}{\dot{z}_i} + \frac{t}{z_{max}}} \quad (5)$$

여기서  $z(t)$ 는 시간에 따른 세굴깊이,  $\dot{z}_i$ 는 세굴깊이-시간 변화곡선의 초기 기울기이며,  $z_{max}$ 는 시간  $t = \infty$ 일 때의 최대세굴깊이를 나타낸다 (그림 6).

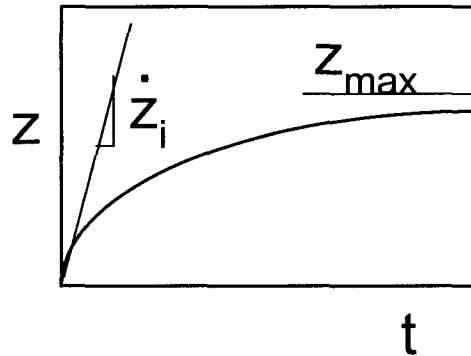


그림 6 시간에 따른 세굴깊이의 변화

## 5. 결 론

본 연구에서는 세립토의 세굴현상에 대한 침식율의 영향을 조사하기 위해 10개의 교량현장으로부터 총 14개의 Shelby Tube 시료를 채취하여 EFA 시험을 실시하여, 그 경향을 분석하였다. EFA 시험을 통해 대상지반의 침식율은 정량화될 수 있으며, 그 결과는 침식율-전단응력 관계곡선으로 나타내어진다. 이러한 정량화된 침식율은 장기하상변동, 단면축소세굴, 국부세굴 등 모든 종류의 세굴해석에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

세립토의 경우에는 대부분 침식율-전단응력 관계곡선의 형상은 포물선 형태를 보였으나 소성지수가 낮거나 조립토가 상당한 부분을 차지하고 있는 흙에 대해서는 거의 직선 형상을, 그리고 미세한 균열이 많은 점토인 경우에는 급격히 증가하는 양상을 보였다. 또한 같은 세립토라 하더라도 소성지수가 낮거나 모래질 점토인 경우에는 전단응력에 대한 침식속도의 증가가 아주 크게 나타난 반면, 소성지수가 큰 경우에는 상대적으로 작은 증가율을 보였다. 이는 소성지수와 #200체 통과율, 그리고 평균입경 등의 토성치가 침식능에 아주 큰 영향을 미치는 증거로 판단된다. 토성치와 세굴속도와의 관계는 향후 계속되는 실험을 통해 연구해야 할 과제이며, 이를 통해 토성치만으로 세굴속도를 구할 수 있는 관계를 정립하는 바탕이 될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Briaud, J.-L., Ting, F., Chen, H. C., Gudavalli, S. R., Perugu, S., and Wei, G. (1999), "SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 4, ASCE, Reston, Virginia, USA, pp.237-246.
2. Kwak, K. (2000), "Prediction of scour depth versus time for bridge piers in cohesive soils in the case of multi-flood and multi-layer soil systems", Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
3. Landers, M. N. and Mueller, D. S. (1996), "Channel scour at bridges in the United States", *Rep. No. FHWA-RD-95-184*, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
4. Moody, L.F. (1944), "Friction factors for pipe flow", *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 66.
5. Munson, B. R., Young, D. F., and Okiishi, T. H. (1990), *Fundamentals of fluid mechanics*, Wiley, New York, USA.
6. Richardson, E. V. and Davis, S. M. (1995), "Evaluating scour at bridges", *Pub. No. FHWA-IP-90-017, HEC No.18*, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA.