

# 낙하수맥 하류부에서의 세굴특성

이종태\* 윤세의\* 손광익\*\* ◦김준현\*

## 1 서론

강우로 인한 유출수를 배제하기 위하여 고속도로를 횡단하여 설치되는 암거, 소규모 댐의 방수로, 하도내 보 등의 하류부에서는 낙하수맥에 의한 세굴로 인하여 하도의 안정뿐만 아니라 주변 구조물에 치명적인 피해가 발생하기도 한다. 이러한 단락부 하류부에서의 세굴방지대책으로는 감세지(stilling basin), 침강지(plunge pool), 사석이나, 돌망태 등이 이용되며, 특히 사석을 이용하는 것은 경제적 및 환경공학적인 측면에서도 유리하며, 나아가 설계규모 이상의 홍수량에 의한 사석의 파괴시 유지보수가 용이하다. 대부분의 연구는 세굴과정의 복잡성으로 인해 실험적인 연구가 행하여져 왔으며, 수리학적 인자에서부터 하상재료의 특성인자, 단락수로의 기하학적인자 등으로 인하여 세굴특성은 변화된다. 단락부를 원형단면으로 가정하여 세굴특성을 분석한 경우가 대부분이지만 현재 설치되어 운영되고 있는 단락부의 단면은 직사각형인 형태가 대부분이다. 비점착성 하상의 세굴로 인하여 발생된 하상유사는 세굴공 발생부위 주위에 퇴적되어 사구를 형성하며, 대부분의 연구는 이러한 사구가 있는 조건에서 실험을 하였으며, 사구의 유무에 따라 최대세굴형태의 변화에 관한 실험적인 연구는 아직 발견할 수가 없었다. 단락부 하류에서 세굴방지대책을 수립할 때 사구를 제거시킬 경우의 평형세굴침의 특성분석은 단락부 세굴방지대책 수립시 필요하다.

본 연구에서는 직사각형 단면의 단락부에서 자유낙하하는 수맥의 특성을 분석하고, 유량과 하류수위를 변화시키면서 낙하부 하류부의 세굴공의 형태와 규모의 특성을 분석하였다. 또한 세굴공 주위에 발생하는 사구를 제거시 세굴특성을 분석하였다.

## 2 실험배경

### 2-1 단락부에서의 흐름특성

단락부에서의 흐름특성은 복잡하기 때문에 여러가지 조건에 의한 경험식들이 제안되고 있으며, 흐름이 완전낙하 영역에 있을때 단락부의 수심은 한계수심 이하로 되며, 이때 단락수로의 조건과 단락부의 형상에 따라 낙하수맥의 궤적이 변화한다. Rouse(1936)는 직사각형 단면일 경우 낙하구수심은 한계수심의  $0.715h_c$  ( $h_b=0.715h_c$ )이며, 한계수심까지의 거리는 대략 낙하구로부터 상류쪽으로  $3-4h_c$ 의 거리에 위치한다고 발표하였다. 완전낙하상태로서 직사각형 수로의 단락부에 아무것도 설치하지 않았을 경우의 낙하수맥의 특성은 다음과 같다.

$$\text{낙하거리: } X/H_e = 1.477(Y/H_e + 0.242)^{0.567} \quad (1)$$

$$\text{낙하수맥이 수중에 돌입하는 경사각: } \tan\theta = 0.886(X/H_e)^{0.763} \quad (2)$$

$$\text{낙하수맥의 중심유속: } V = \sqrt{2g(Y+H_e)} \quad (3)$$

\* 경기대학교 토목공학과

\*\* 한국수자원공사 수자원연구소

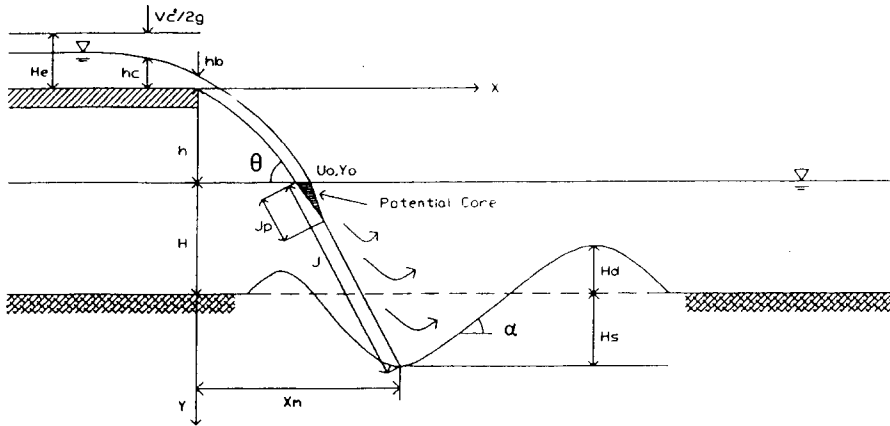


그림1 단락수로 종단면도

낙하수맥의 두께  $d$ (중앙부를 고려 근사적으로):  $d = q/V$

(4)

그림1과 같이  $X, Y$ 는 각각 단락부로부터 하류방향 수평거리 및 연직거리이며,  $H_e$ 는 상류수로의 한계수심이 생기는 위치에서의 비에너지,  $q$ 는 단위폭당 유량( $Q/b$ )이다. 하류수표면에 도달직전의 낙하수맥은 자유낙하궤도를 따르지만 수중에 돌입한 낙하수맥은 확산 및 마찰작용에 의해 그 속도가 감소되면서 하류수위 돌입각도의 연직선상으로 진행한다. 또한 수맥의 하상도달거리는 하류부 수위에 따라서 변화하며, 단락부에서 하류수까지의 낙차가 크다면 돌입수맥의 경사는 가파르고 낙차가 작아지면 돌입수맥의 경사는 완만해진다.

## 2-2 단락부 하류의 세굴

세굴이 더 이상 진행되지 않는 실질적인 평형상태의 도달시기는 세굴이 완전히 멈추었을 때 라는 표현은 적절하지 못하며, 난류파열(eddy bursts)의 불규칙한 특성으로 세굴은 결코 완전하게 멈출 수 없기 때문이다. 본 실험에서뿐만 아니라 대부분의 연구자들이 표현하는 평형세굴크기는 실질적인 세굴크기가 아닌, 다소 주관적인 상태에서의 세굴크기를 의미한다. Blaisdall et al(1981)은 쌍곡선 함수법을 사용하여 평형세굴깊이를 모의하였으며, 평형세굴깊이는 30,644년의 시간이 지난후에 도달한다고 발표하였다. Rajaratnam(1988)은 jet가 진행 중 일때의 최대세굴깊이(동적 세굴깊이)는 jet가 멈추었을 때의 최대세굴깊이(정적 세굴깊이)의 1.4배 정도에 해당된다고 하였으며, 그 이유는 흐름이 중단되면 부유사가 세굴공내에 쌓이기 때문이라고 설명했다. Stein et al(1993)는 평형세굴깊이의 95%이내의 세굴깊이에서는 세굴율이 매우 빠르게 진행된다고 보고하였으며, 세굴깊이와 시간사이의 대수곡선이 선형적으로 증가하지 않음을 보였다. 낙하수맥이 수중으로 돌입하면 평균유속이 감소되면서 주변으로 확산된다. 수맥의 중심부 유속이 돌입시 유속과 같은 지역인 potential core(그림1)는 확산계수( $C_d$ )와 낙하수맥의 두께( $y_o$ )의 함수로 구할 수 있으며, 충돌지역에서의 전단응력( $\tau$ )은 그 지역에서의 속도( $U_o$ )와 마찰계수( $C_f$ )로 표시된다. 하상이 potential core내에 위치하면 전단응력은 크고, potential core보다 깊은곳에 위치하면 돌입길이( $J$ )에 반비례하여 감소하며 전단응력이 하상토사의 한계전단응력  $\tau_c$ 에 접근하게 된다. 상기의 가정으로부터 평형세굴심( $H_s$ )은 식(5)와 같다. (Stein, 1993)

$$H_t = H_s + H = \frac{C_d^2 C_f \rho U_o^2 y_o}{\tau_c} \sin \alpha \quad (5)$$

식(5)에서  $\tau_c$ 는 입경의 함수이므로 결국 최대세굴심은 낙하수맥의 속도, 낙하수맥의 두께에 비례하고 입경에 반비례 함을 알 수 있다.

### 3 수리실험

#### 3-1 수리실험장치

실험수조 상류측에 위치한 직사각형 단면수로의 크기는 실험실바닥으로부터 50cm위에 240cm(길이)\*15cm(폭)\*30cm(높이)이며, 수로로 흐르는 유량이 정류상태를 유지하기 위하여 수로 유입부에 정류판을 설치하였다. 실험수조는 시각적인 관측을 위해서 180cm(길이)\*110cm(폭)\*45cm(높이)의 크기를 갖는 아크릴판으로 제작하였으며, 실험수조 하류부분에 모래의 유실을 막으면서 배수가 용이하게 구멍을 뚫은 아크릴판에 스테인레스망을 부착하였고, 여기서 나온 유량은 실험수조 끝에 설치한 수문에 의해 조절되어 저수조로 유입된다. 저수조의 물은 다시 펌프를 이용하여 고수조로 이동되며, 고수조로부터 일정한 유량이 방류되며, 삼각웨어를 통하여 원하는 유량을 수로로 흘려보낸다.

#### 3-2 수리실험방법

유량을 1 l, 2 l, 3 l 로 하류수위를 5cm, 10cm, 15cm로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 그리고 하상모래를 10cm 제거후 유량이 0.5 l 일때 하류수위 5cm, 15cm, 29cm 각각에 대하여 실험을 수행하였으며, 0.5 l 인 경우 5cm와 15cm, 1 l 인 경우 5cm와 25cm에 대하여 세굴공저부와 사구주위의 입경크기 분포를 측정하였다. 평형상태에 도달하였을 때에 유량공급은 중단되며, 물을 완전히 배수시킨 상태에서 point gauge 및 철제자를 사용하여 세굴크기를 측정하였다. 최대 세굴깊이는 수맥의 중심부에서 발생하기 때문에 수맥의 중심부를 기준으로 하여 횡방향, 종방향으로의 세굴깊이를 측정하였으며, 세굴평면상의 임의점의 깊이를 측정하였으며, 세굴형태를 사진으로 담아두었다. 사구제거시 세굴형태를 예측하기 위하여 실험초기부터 사구가 발생하면 그것을 제거하면서 상기와 같은 조건으로 실험을 실시하였으며, 사구제거시 하상의 모래가 제거되지 않도록 주의하였다.

### 4 수리실험결과

#### 4-1 세굴 진행과정

세굴의 시작은 낙하수맥이 하류수면으로 돌입한 후 하상에 충돌함으로써 시작된다. 실험초기에는 세굴공의 종방향(흐름방향) 크기가 횡방향보다 빠르게 확장되며, 이 기간에는 소류사 형태로 운송된다. 그 후 사구의 측면경사가 토사의 안식각에 도달하면 소류사가 아 니고 부유사 형태로 운송된다. 가장 깊은 세굴지점은 수맥이 떨어지는 지점이고, 와류현상이 발생한다. 세굴공과 사구가 안정되면 부유사에 대한 운송이 없고 평형상태에 도달하게 된다. 또한 하류수위가 증가함에 따라서 세굴공내의 입자의 상하운동이 현저히 감소하였으며, 수맥의 불규칙적인 확산현상과 와류현상으로 인하여 세굴공의 평면적 형태가 불규칙적인 모양을 나타냈다.

#### 4-2 결과 및 분석

하상재료로 사용된 모래의 평균입경은 0.84mm이며, 평형세굴상태에서의 세굴공저부, 사구주위에 대한 체분석 결과, 하류수위가 증가함에 따라서 세굴공저부 및 사구에서의 평균 입경의 크기는 증가하였다. 세굴공저부에서는 하상재료 평균입경의 2배 이상, 사구에서는 평균입경 이하의 크기가 측정되었다. 그림2와 같이 하류수위가 일정할 때 유량이 증가하면

최대세굴심과 세굴규모가 증가한다. 그림3과 같이 유량이 일정할 때 하류수위가 증가하면 최대세굴심이 감소하는 현상이 예측되었지만 본 연구 실측치에서는 그 반대의 결과치를 얻었다. 이는 하류수위가 클수록 충돌지역에서 운동량은 감소하지만 하류로 이동되는 부유사량이 증가될 수 있기 때문으로 생각된다. 그러나 유량 0.5 l, 하류수위 29cm에서는 하류수위 15cm의 경우보다 최대세굴심( $H_b$ )이 감소하였다. 그림3에서 사구를 제거하였을 경우 최대세굴심은 유량 1 l 와 2 l 에서 하류수위 10cm에서 보다 15cm인 경우에 감소하였다. 즉 유량이 일정할때, 하류수위의 증가에 따라서 평형세굴심의 증가 혹은 감소하는 경계치가 있음을 확인하였다.

그림4에서는 식(5)의 계산치와 실측치를 비교하였다. 식(5)에서 돌입각  $\theta$ 는 식(2)을 이용하였다. 식(1)을 이용하여 계산한 수맥의 낙하궤적과 식(2)를 사용하여 계산한  $\theta$ 값은 실측치와 잘 일치하였다.  $C_f$ ,  $C_d$ ,  $\tau_c$ 는 Stein(1993)과 Bormann(1991)이 제시한 방법으로 계산하였다. 하류수위가 5cm이고 유량이 3 l 인 경우에는 potential core의 길이가 거의 하류부 하상에 도달하고 있어서 비교대상에서 제외시켰다. 그림4로부터 계산치와 실측치 오차가 발생되고 있으나 개략적인 경향분석이 가능하였다. 더우기 potential core의 길이가 하류부 수심의 약 20%에 해당되는 경우에는 실측치와 계산치가 비교적 잘 일치되고 있다. 낮은 하류수위에서 계산치와 실측치가 차이를 보이는 것은 부유사량과 활발한 armoring현상 때문이라 생각되며, 이론식에 사용되고 있는 확산계수, 마찰계수, 전단응력에 관한 더욱 깊은 연구가 요구된다. 그림5와 같이 유량강도( $D.I=Q/g^{0.5}y_0^{2.5}$ )가 증가할 수록 세굴공의 길이에 대한 평형세굴심의 비는 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉 유량강도가 증가하면 세굴공의 길이가 세굴깊이에 비해 증가함을 알 수 있다. 그림6은 무차원으로 나타낸 세굴공내의 기하학적 형태이다. 여기서  $X_m$ 은 최대세굴깊이까지의 거리이며,  $H_b$ 는 임의점에서 세굴깊이,  $H_{ms}$ 는 최대세굴깊이이다. 그림6과 같이 유량과 하류수위에 관계없이 세굴공내의 형태가 2차 포물선 형태를 나타내고 있으며, 사구를 제거한 경우에는 세굴공 하류부분에서 위로 볼록한 형태의 분포를 나타내고 있으나 개략적인 세굴공의 기하학적 형태는 유사하였다.

그림2와 그림3으로부터 사구를 제거하지 않았을 경우에 비해서 제거한 경우의 최대세굴깊이는 1.4~2.5배, 길이방향으로는 1.5~2.0배, 폭방향으로는 1.35~1.6배가 증가하였다. 평형상태로 도달되는 시간은 사구를 제거하지 않았을때 보다 1.15배 이상의 시간이 소요되었다.

## 5 결론

낙하수맥 하류부에서의 세굴특성을 분석하기 위하여 유량과 하류수위를 변화시키면서 21개의 조건으로 실험을 실시하였다. 실험에서 얻은  $H_b$ 의 실측치와 식(1), 식(2), 식(3), 식(4) 및 식(5)를 이용한 계산치로부터 평형세굴깊이를 개략적으로 예측할 수 있는 가능성을 확인하였다. 유량강도가 증가할 수록 평형세굴깊이에 비해 세굴공의 길이가 증가된다. 하류수위가 일정할때 유량을 증가시키면 평형세굴깊이와 세굴규모가 증가되었으며, 유량이 일정할때 하류수위의 증가에 따라 평형세굴깊이가 증가, 감소하는 경계치가 있음을 확인하였다. 사구의 유무로 인한 세굴공의 기하학적 형태는 유사하며, 사구가 존재할 때 보다 제거시킨 경우의 평형세굴깊이는 1.4~2.5배, 길이는 1.5~2.0배, 폭은 1.35~1.6배가 증가되었으며, 평형상태로 도달되는 시간은 1.15배 이상이 소요되었다. 앞으로 평균입경이 세굴에 미치는 영향에 관한 연구와 식(5)에 포함되어 있는 계수들에 관한 연구가 요구된다.

그림 2  
유량변화와  
세굴특성

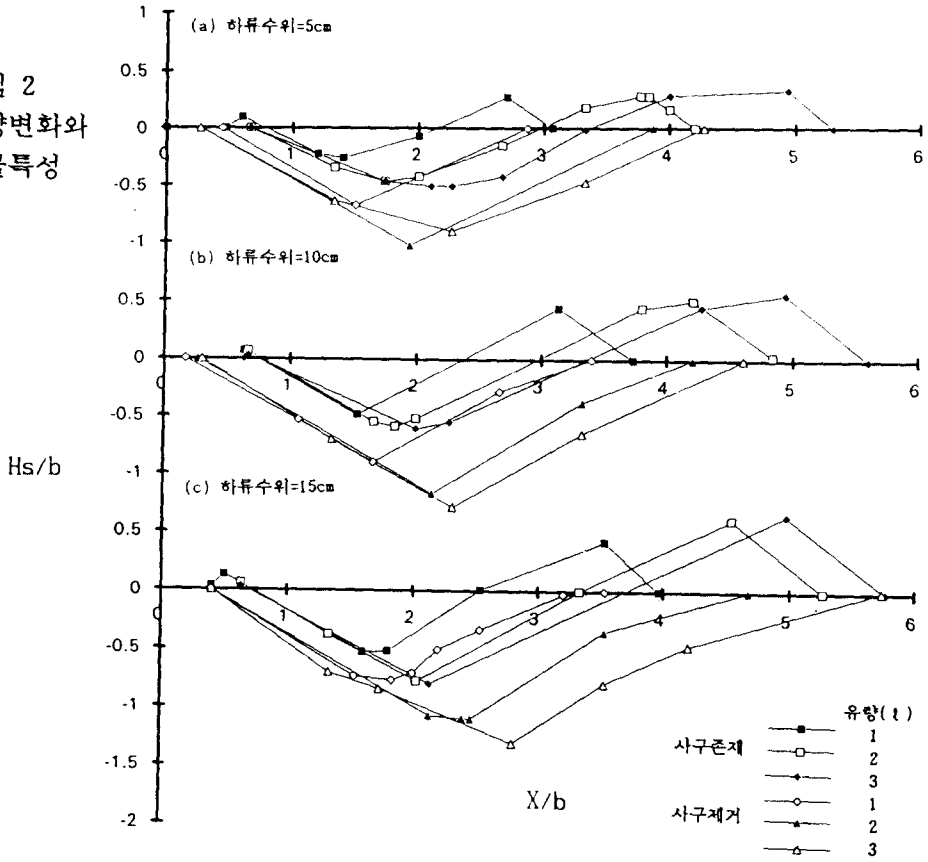
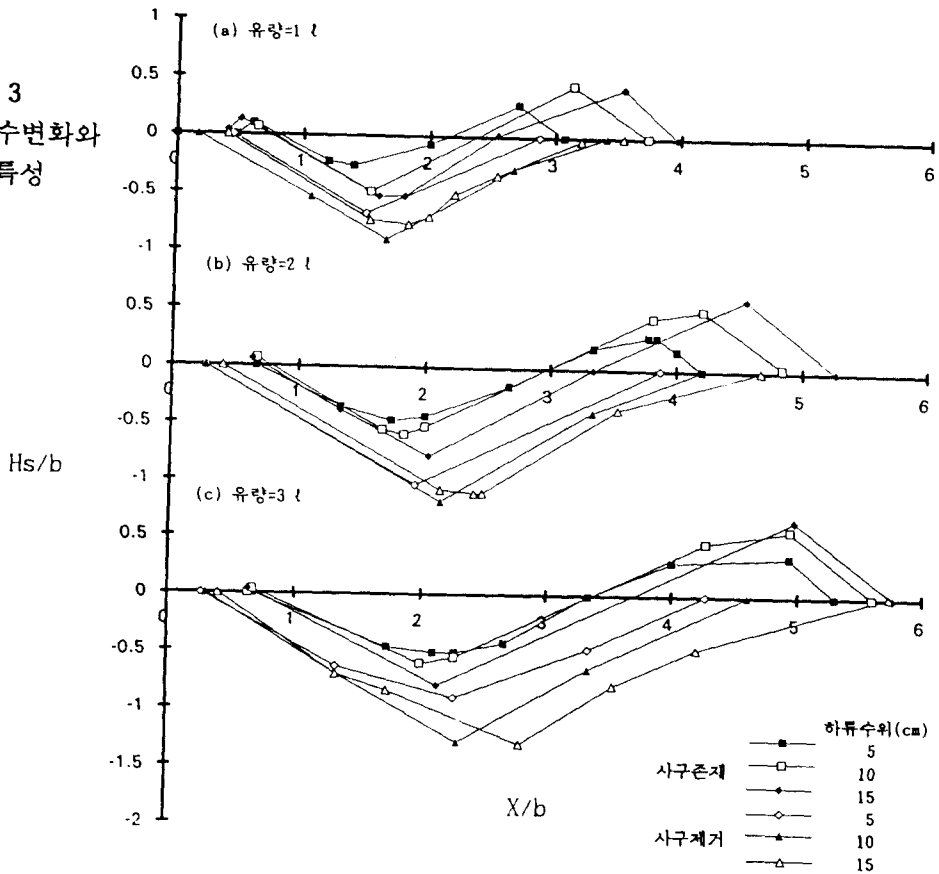


그림 3  
하류수변화와  
세굴특성



## 6 참고문헌

1. Beltaos, S., and Rajaratnam, N., (1974), "Impinging Turbulent Jets," J. Hydr. Div., ASCE, Vol. 100, pp. 1313-1328
2. Blaisdell, F. W., and Anderson, C. L., (1989), "A Comprehensive Generalized Study of Scour at Cantilevered Pipe Outlet," J. Hydr. Res., 26(4), 26(5)
3. Doddiah, D., Albertson, M. L., and Thomas, R., (1953), "Scour from Jets," IAHR, pp. 161-169
4. Kwang Ik Son, (1992), "Scour Mechanism of Large Cohesionless Bed Materials Under Inclined Submerged Circular Jet," Ph.D. Dissertation, Uath State University
5. Mahmood, S. B., and Maurice, L. A., (1993), "Riprap Criteria Below Pipe Outlets," J. Hydr. Engr., ASCE, 119(2), pp. 181-200
6. Stein, O. R., Julien, P. Y., and Alonso, C. V., (1993), "Mechanics of Jet Scour Downstream of a Headcuts," J. Hydr. Res., Vol. 31, pp. 723-737
7. Stephen, T. M., James, F. R., and Steven, R. A., (1989), "Riprap Design," J. Hydr. Eng., ASCE, 115(7), pp. 937-949
8. 石野捷治, 井筒勝彦, (1967), 中小落差工の水理現象に 關する 實驗的 研究(1), 農土試報5, pp. 99-119

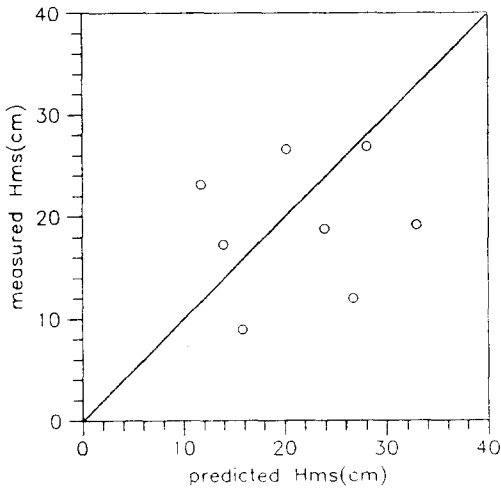


그림4 Ht의 이론치와 실측치 비교

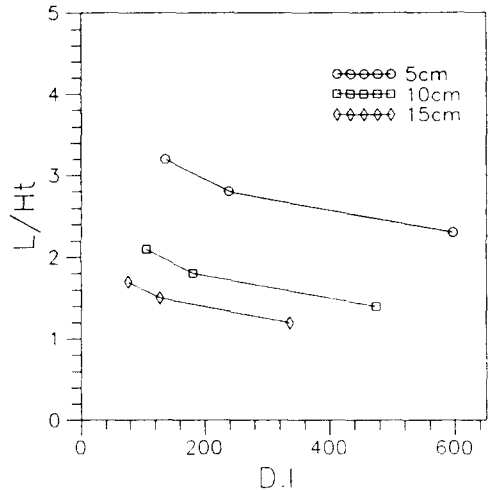


그림5 D.I와 L/Ht의 관계

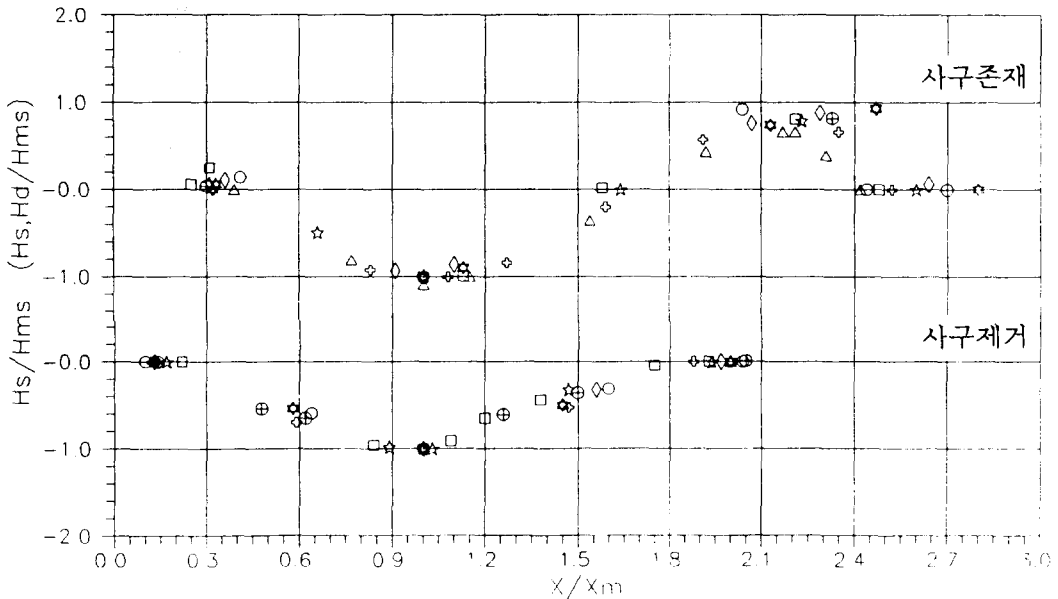


그림6 사구의 유무에 따른 무차원 세굴형태