

자유낙하수맥 하류부에서의 세굴에 관한 실험적 연구 Experimental Study on Downstream Local Scour of Free-Falling Jet

윤 세 의* · 이 종 태** · 손 광 익*** · 김 준 현****
Yoon, Sei Eui · Lee, Jong Tae · Son, Kwang Ik · Kim, Jun Hyun

Abstract

Scour characteristics of noncohesive bed materials at the downstream of free-falling jet were analyzed through hydraulic experiments. It was assumed that the downstream had no special energy dissipators. Flow characteristics of free falling jet from rectangular section were studied, and scour characteristics with and without mounds, which were generated at the downstream of the scour hole, were comparatively analyzed for various bed materials, discharges and tailwater depths. Not only the equilibrium scour depth but also the height of mound could be expressed as a function of densimetric Froude number. Densimetric Froude number had closer relationship with the equilibrium dimensionless scour depth than other dimensionless parameters. It was suggested that the mound effects should be considered at the design stage of bed protection works.

요 지

본 연구에서는 특별한 에너지 감세를 위한 수공구조물이 설치되지 않은 중 소규모 단락부 하류부에서 자유낙하하는 수맥으로 인하여 발생되는 비점착성 하상재료의 세굴특성을 수리 모형실험을 통하여 분석하였다. 단락수맥 하류부에서의 세굴특성을 분석하기 위하여 먼저 직사각형 단락수맥의 흐름특성을 조사하였으며, 하상재료, 유량, 하류수심을 변화시키면서 세굴공의 직하류부에 생성되는 둔덕(mound)의 유무로 인한 세굴특성을 비교 분석하였다. 평형세굴심 뿐만 아니라 둔덕의 높이도 밀도 후르드수의 함수로 표시되며, 밀도 후르드수는 다른 무차원량 보다 평형세굴심과 비교적 깊은 관계가 있는 것을 확인하였다. 단락부 하류부 하상보호공의 설계시 둔덕의 영향을 고려해야 한다는 결론을 얻었다.

* 경기대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 영남대학교 공과대학 토목공학과 조교수
*** 농어촌진흥공사 경기지사 조사설계부

1. 서 론

수로내의 흐름을 완만한 상류 상태로 유지하기 위하여서는 수로 내에 적당한 간격으로 낙차공을 두어 수로의 안정을 도모해야 함과 동시에 단락수로 하류부의 세굴에도 대비하여야 한다. 고속도로를 횡단하여 설치되는 암거, 소규모 댐, 농업·공업용수의 취수를 위한 보 등의 하류부에서는 구조물로부터 분리되어 떨어지는 단락수맥으로 인하여 하상세굴이 발생할 수 있으며, 이는 하도의 불안정요인이 될뿐만 아니라 주변 구조물에 치명적인 피해를 주기도 한다. 이러한 단락 하류부에서의 세굴방지대책으로는 콘크리트 보호공으로서 감세지(stilling basin)를 설치한다거나, 침강지(plunge pool)로서 하류수심을 충분히 유지시켜 주거나, 세굴의 규모를 예측하고, 사석이나 돌망태 등을 포설함으로써 세굴에 대비하고 있다.

세굴현상에 관한 연구는 Rouse(1940)의 조사 이후, 많은 연구자들의 주된 관심사였으며, 지금까지 최대 세굴크기를 산정하는 합리적 방법의 개발을 위해 활발한 연구가 진행되어 오고 있다. 이에 대한 최근의 연구 성과로서는 Blaisdell과 Anderson(1988, 1991)은 파이프 방류구 하류에서의 세굴특성에 관한 조사와 실험을 통하여 최대 세굴깊이와 밀도 후르드수(Densimetric Froude Number)의 상관성을 규명한 바 있다. 국내에서는 손광익과 이원환(1993)이 잠재세굴능(scour potential)을 예측하기 위하여 세굴을 지배하는 주요 지배인자들의 영향을 문헌과 실험을 통하여 조사하였으며, 이종태 등(1994)은 낙하수맥 하류부에서의 세굴특성을 분석한 바 있다. 이상에서와 같이 세굴에 관한 다수의 연구에도 불구하고 아직 평형세굴깊이를 정확히 예측하는 신뢰성이 충분한 일반식이 없는 실정이다.

하상세굴로 인하여 발생된 하상유사는 세굴공 직 하류부에 퇴적되어 둔덕을 형성하며, 이러한 둔덕의 존재 유무는 세굴규모에 상당한 영향을 줄 것으로 예상되나 사석이나 돌망태를 이용하여 단락 하류부에 세굴대책을 수립시, 둔덕을 제거시키지 않은 상태에서 세굴공의 규모를 예측하고 실제 시공

시에는 둔덕을 설치하지 않고 있는 실정이다. 더욱이 둔덕의 존재 여부에 따른 세굴규모의 변화에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 단락부 하류부에서의 둔덕의 유무에 따른 세굴공의 특성을 실험을 통하여 분석하여 하상의 세굴방지대책 수립시 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 및 차원해석

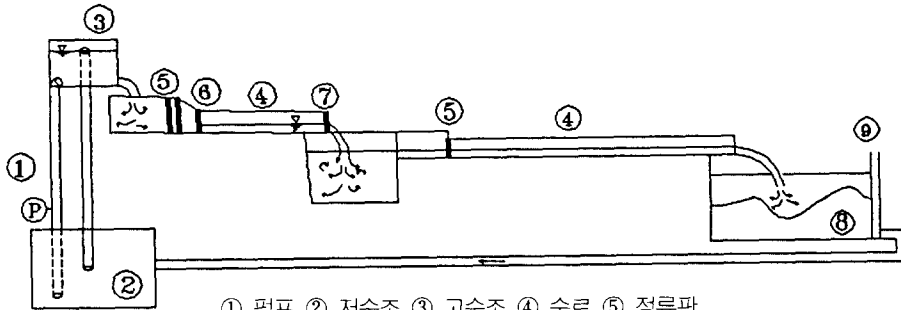
2.1 수리실험장치 및 실험방법

세굴을 지배하는 인자들로서는 수리학적인자, 하상재료의 특성인자, 단락수로의 기하학적인자 등으로 나눌 수 있으며, 이러한 세굴관련 변수들을 사용하여 세굴깊이를 이론적으로 유도한다는 것은 실제적으로 매우 어려운 일이다. 단락부에서의 흐름은 단락부 상류쪽 수심, 유량, 하류수위 등에 따라서 완전낙하, 불완전낙하, 잠수상태의 세 경우로 구분된다.

낙하수맥 하류부에서의 세굴특성을 이해하기 위하여 그림 1과 같은 완전낙하 실험 장치를 이용하였으며, 평형상태에 도달한 세굴공의 기하학적 특성을 측정하였다.

그림 1의 ④번 수로의 크기는 15cm(폭)×30cm(높이)×240cm(길이)이며, 수로로 흐르는 유량이 정류상태를 유지하기 위하여 수로 유입부에 정류판을 설치하였다. 하상 실험수조는 110cm(폭)×45cm(높이)×180cm(길이)의 크기를 갖는 아크릴판으로 제작하였으며, 하상재료를 24cm의 두께로 포설하였다. 실험수조 하류부분에는 모래의 유실을 막으면서 배수를 용이하게 하기 위하여 구멍을 뚫은 아크릴판에 스테인레스망을 부착하였다. 여기서 나온 유량은 수조끝에 설치한 수문에 의해 조절되어 저수조로 유입된다. 저수조의 물은 펌프에 의해서 고수조로 이동되어 고수조로부터 일정한 유량이 방류되며, 이 흐름은 최초 정류과정을 거친 후 수로 끝에 설치한 삼각웨어를 통하여 원하는 유량을 수로로 흘려보낸다. 유량은 그림 1의 ⑦번에 위치한 삼각웨어를 이용하여 측정하였다.

본 실험에서는 1ℓ/sec, 2ℓ/sec, 3ℓ/sec의 세 가지 유량이 사용되었다. 입경변화에 따른 세굴특



① 펌프 ② 저수조 ③ 고수조 ④ 수로 ⑤ 정류판
⑥ 수문 ⑦ 삼각웨어 ⑧ 실험수조 ⑨ 스테인레스망 및 수문

그림 1. 수리실험장치

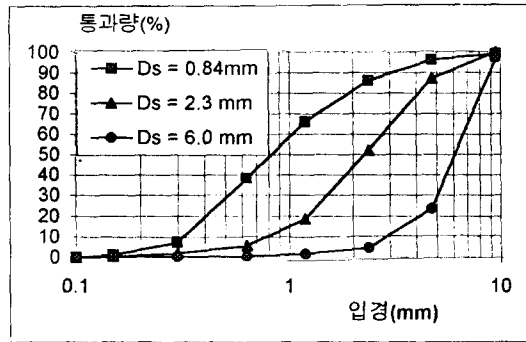


그림 2. 입도분포곡선

성을 살펴보기 위하여 크기가 각각 다른 3가지의 하상재료가 실험에 사용되었으며 입도분포곡선은 그림 2와 같다.

그림 2로부터 평균입경(D50)의 크기는 각각 0.84mm, 2.3mm, 6.0mm이며 입도분포를 나타내는 D50/D15.9는 2.28, 2.0, 1.69로 1.35보다 커서 균일 입자가 아닌 어느 정도의 조립율을 갖고 있다고 볼 수 있다(Wittle와 Abt, 1990). 하류수심은 세굴크기에 커다란 영향을 미치는 수리학적 인자이므로 하류수심변화에 따른 세굴크기를 예측하기 위하여 5cm, 10cm, 15cm로 하류수심을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한 둔덕이 존재하는 경우에 있어서 하류수심이 증가함에 따라서 최대 세굴크기가 감소하는 경향을 확인하기 위하여 0.84mm인, 하상 모래 층을 약 10cm 제거한 후 유량 0.5 l/sec, 하류수심 5cm, 15cm, 29cm의 각각 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 한편, 둔덕제거시 세굴형태를 예

측하기 위하여서는 실험 초기부터 둔덕을 제거하면서 상기와 같은 조건으로 실험을 실시하였다. 둔덕 제거시에는 초기 하상의 모래가 제거되지 않도록 주의하였다. 둔덕제거시 흐름에 영향을 최소화시키기 위하여 철사로 만든 붓을 사용하였다.

세굴이 진행되기 시작하여 하상이 평형상태로 도달하는 시간은 유량, 하류수심 및 하상재료에 따라 변화하였으며, 본 연구 조건에서는 유량의 규모에 따라서 1-3 시간이 소요되었다. 평형상태란 세굴이 더 이상 진행되지 않는 상태를 뜻하나, 엄밀한 의미에서의 평형상태는 존재하지 않는다(Rouse, 1940). 본 연구에서는 실험진행 중에 세굴공내의 입자가 하류로 이동되지 않고 세굴규모가 더 이상 변화되지 않는 상태를 평형상태로 판단하고, 이 상태에 도달하였다고 판단한 후에도 10-20 분 정도 물을 계속 실험 수조에 공급하였다. 수맥 및 침강지의 기하학적 경계조건이 흐름방향의 중심선을 따

라 대칭을 이룰때 최대 세굴깊이는 수맥의 중심부에서 발생하기 때문에 수맥의 중심부를 기준으로 하여 길이 방향으로의 세굴깊이와 최대세굴깊이가 측정된 점을 통과하는 쪽 방향으로의 세굴깊이를 침강지내의 물을 완전히 배수시킨 상태에서 포인트 게이지(point gauge) 및 철제자를 사용하여 측정하였으며, 세굴형태를 사진으로 담아두었다.

2.2 차원해석

낙하수맥 하류부 세굴에 영향을 미치는 인자들은 유체의 성질, 흐름특성, 하상재료의 특성, 단락부의 기하학적 특성 등으로 크게 구분된다. 평형세굴심은 각 특성치를 고려하여 식 (1)과 같이 표시될 수 있고 각 독립변수에 대한 도해적 정의는 그림 3에 있다.

$$H_s = f(U_0, h_b, \rho, g\Delta\rho, D_s, \nu, H, \alpha) \quad (1)$$

여기서, U_0 = 낙하수맥의 충돌유속; h_b = 단락부에서의 낙하수맥 두께; ρ = 유체밀도; g = 중력가속도; D_s = 하상재료의 평균입경; ν = 동점성계수; H = 하류수심; α = 낙하수맥의 충돌각, H_s = 평형세굴심; $\Delta\rho$ = 하상재료의 밀도와 유체밀도의 차이.

그림 3에서 H_a 는 둔덕의 높이, h 는 낙하고, h_c

는 한계수심, J_p 는 원류핵(potential core)의 길이, X_m 은 단락부로부터 평형세굴심까지의 수평거리, J 는 수면으로부터 평형하상까지의 거리, y_0 는 수맥이 수면에 충돌시 두께이다.

D_s, ρ, U_0 를 대표인자로 선택하여 Buckingham의 정리로부터 식 (2)와 같은 무차원량을 도출하였다.

$$H_s/D_s = f'(F_d, R_e, \frac{h_b}{D_s}, \frac{H}{D_s}, \alpha) \quad (2)$$

국소세굴과정에서 점성의 영향은 미소하며, 충돌각의 차이에 따른 영향을 무시하면 식 (2)는 식 (3)과 같이 간략하게 표시된다. R_e 는 $U_0 D_s / \nu$ 이다.

$$H_s/D_s = f''(F_d, \frac{h_b}{D_s}, \frac{H}{D_s}) \quad (3)$$

여기서 F_d 는 식 (4)와 같다.

$$F_d = U_0 / \sqrt{\frac{\Delta\rho g}{\rho} D_s} \quad (4)$$

F_d 는 입자 밀도 후르드수이며, h_b/D_s 는 수맥두께, H/D_s 는 하류수심의 특성을 나타내는 무차원 변수들이다.

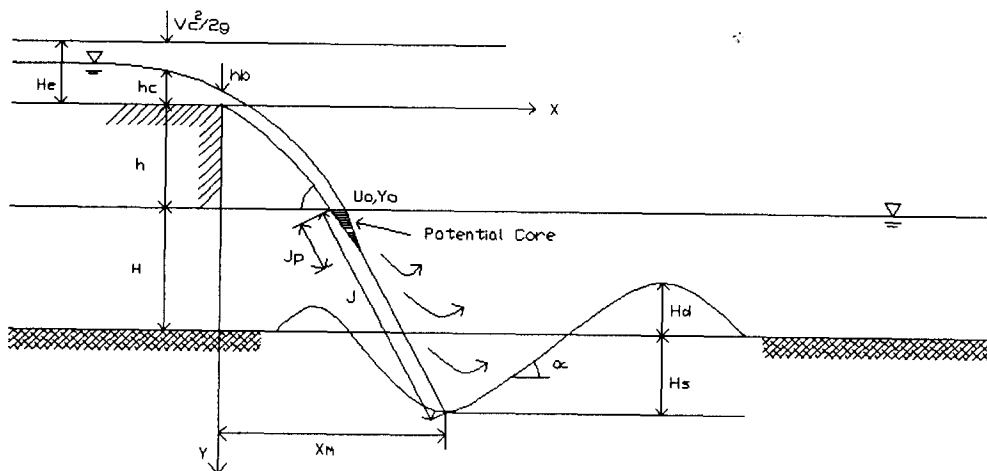


그림 3. 독립변수의 도해적 정의

3. 실험결과의 고찰

3.1 세굴의 진행과정

세굴공은 자유낙하 수맥이 수면 충돌 유입 후 발생하는 반사흐름의 유향 및 유속에 큰 영향을 받으면서 발달된다. 반사흐름의 주방향은 종방향이므로 세굴도 종방향으로 먼저 발달된다. 한편 횡방향 반사흐름이 약하기 때문에 세굴공 측면에서는 종방향 세굴공이 깊어짐에 따라 세굴공 측면의 하상입자가 세굴공의 중심으로 흘러내려 세굴공의 측면경사는 토사의 수중 안식각에 도달하게 된다. 흘러내린 측면하상입자는 다시 낙하수맥의 영향을 받아 종방향으로 운송되면서 측면 세굴이 확대 진행된다. 세굴이 평형상태에 도달하기 전까지는 세굴공의 중심부에 자유낙하 수맥의 에너지 크기와 세굴공 규모에 따라 세굴공을 벗어날 수 있을 만큼 작은 입경의 하상입자의 일부는 세굴공 하류부에 퇴적되어 둔덕을 형성한다. 한편, 그 보다 큰 하상입자는 수류에 따라 세굴공내에서 상하 회전 운동을 하기 때문에 실험 진행 중의 최대세굴깊이와 물을 완전히 배수시킨 후의 최대세굴깊이와는 차이가 발생한다. 하류수심이 작은 경우에는 그 오차가 더 큰 것으로 관측되었다. 이상과 같은 세굴진행과정은 세굴공 중심부에서의 입자가 둔덕이나 세굴공 측면에서의 입자보다 크다는 입도분석 결과로 증명되었다. 세굴공 중심은 하상입자의 평균입경보다 2배 이상되는 유사입자들로 구성되어 있었으며 수리학적으로 균등한 분포를 나타내고 세굴경사면에서 둔덕으로 진행될수록 평균입경 이하의 크기와 함께 양호한 입도분포를 나타내었다. 또한 하류수심이 증가함에 따라서 세굴공내의 입자의 상하운동이 현저히 감소하였고, 수맥의 불규칙적인 확산현상과 와류현상으로 인하여 세굴공의 평면적 형태가 다소 불규칙적인 모양을 형성하였으며, 하상재료의 입경이 커질수록 불규칙 정도는 감소하였다.

3.2 세굴 영향인자 분석

밀도 후르드수와 H_s/D_s 와의 관계를 둔덕존재시

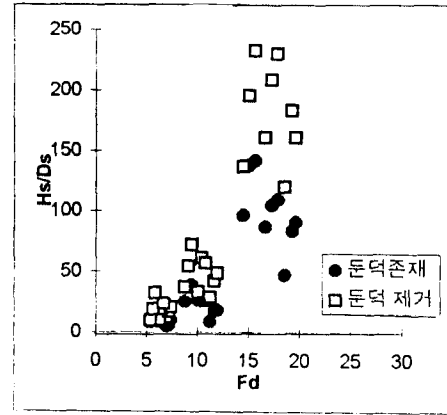


그림 4. 밀도 후르드수와 H_s/D_s 의 관계

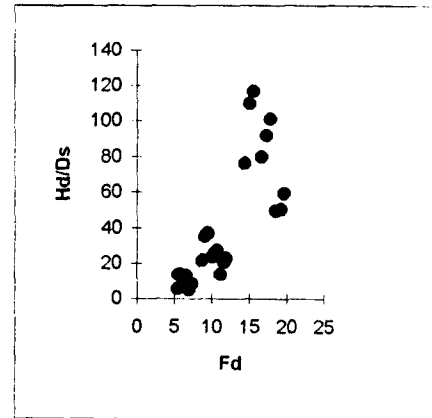


그림 5. F_d 와 둔덕의 높이

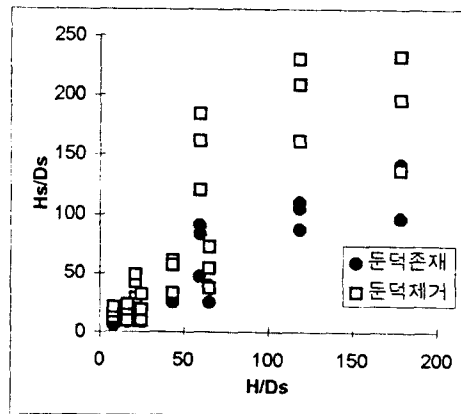


그림 6. H/D_s 와 H_s/D_s 의 관계

와 둔덕제거시로 구분하여 그림 4에 표시하였다. 밀도 후르드수가 증가하면서 최대세굴심이 증가하고 있는 현상은 다른 연구와 유사하다(Blaisdell, 1988). 둔덕 제거시는 둔덕 존재시에 비해 동일한 밀도 후르드수에서 H_s/D_s 의 값이 더 크게 나타나고 있다. 또한 둔덕의 유무에 관계없이 밀도 후르드수는 세굴심의 주요한 영향 인자임을 알 수 있다. 본 실험의 범위(유량:1-3 l/sec, 하류수심:5-15cm, 하상재료의 평균입경:0.84-6.0mm)내에서는 둔덕 제거시에는 둔덕 존재시보다도 평형세굴깊이가 2배 이상 증가되는 결과치도 얻었다.

그림 5는 F_a 와 둔덕 높이의 관계를 표시한 것이다. 여기서 최대세굴심 뿐만 아니라 둔덕의 높이도 F_a 와 선형관계를 보여주고 있다.

세굴깊이와 하류수심과의 상관관계를 규명하기 위하여 기존의 실험장치에서 가능한 최소유량과 최대하류수심 조건하에서 실험을 실시한 결과 수심이 증가할 수록 최대세굴깊이가 감소하는 현상을 확인하였다. 하상재료와 유량 조건이 일정하다면 하류수심이 증가함에 따라서 최대세굴깊이가 감소하는 현상이 일반적으로 예측되지만 본 연구에서는 그 반대의 결과도 관측되었다. 그림 6에서 동일한 H/D_s 의 값에 대해서 H_s/D_s 의 값은 유량의 크기가 클수록 비례하여 크므로, 둔덕 유무의 각각의 경우에 대해 H_s/D_s 값이 큰 것이 유량이 3 l/sec의 경우이고, 가장 작은 것이 1 l/sec에 해당된다. 즉 그림 6에서와 같이 하류수심 H 가 증가하면 최대세굴깊이 H_s 도 증가하는 결과를 얻었다. 이러한 현상은 Doddiah(1953), Simons(1971) 등의 실험에서도 유사한 결과를 발견할 수 있었다. 이 결과를 종합하여 고찰하면 유량이 일정할 때, 하류수심이 증가함에 따라서 평형세굴심의 증가 혹은 감소하는 한계영역이 있음을 확인하였으나 실험 여건상 그 한계치를 찾는 실험은 수행하지 못하였다.

그림 7은 둔덕의 유무로 인한 종방향의 세굴형태를 나타내었다. 여기서 X 는 종방향 임의점에서의 길이, X_m 은 최대세굴깊이까지의 수평거리이며, H_{ss} 는 임의점에서의 세굴깊이, H_s 는 최대세굴깊이다. 세굴공내의 기하학적인 형태는 유사하지만 둔덕 제거시 세굴공의 규모가 증가하였으며 둔덕의 유무가 세굴규모를 변화시키는 중요한 변수임을 확

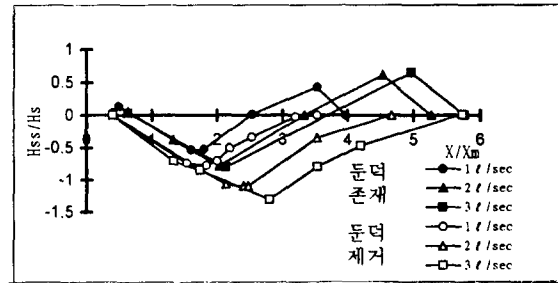


그림 7. 둔덕의 유무로 인한 종방향 세굴형태 비교
 $D_s=0.84mm, H=15cm$

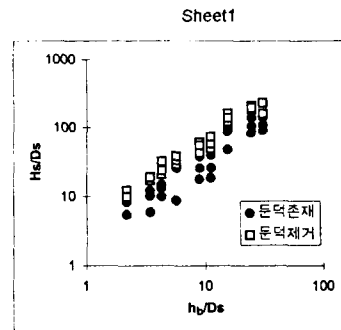


그림 8. h_b/D_s 와 H_s/D_s 의 관계

인할 수 있었다.

둔덕 제거시에 유량, 하상재료, 하류수심에 관계없이 일률적으로 세굴깊이, 세굴폭, 최대세굴깊이가 상당히 증가하였다. 하상재료의 입경이 커짐에 따라서 최대세굴깊이와 둔덕의 높이는 감소하며, 유량과 하류수심 조건이 일정하다면 하상재료의 평균입경이 커짐에 따라서 세굴공의 길이도 감소하였다.

그림 8은 h_b/D_s 와 H_s/D_s 의 관계를 표시한 것이다. 여기서 수맥의 두께가 증가할 수록 최대세굴깊이가 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 수맥의 두께는 유량에 비례하고 하상이 받는 총운동량은 유량규모에 비례하기 때문이라고 판단된다.

그림 9와 그림 10은 세 가지 하상재료를 가지고 둔덕존재시와 제거시의 경우에 대한 실험결과로 나타난 세굴공의 기하학적 형태를 무차원으로 표시한

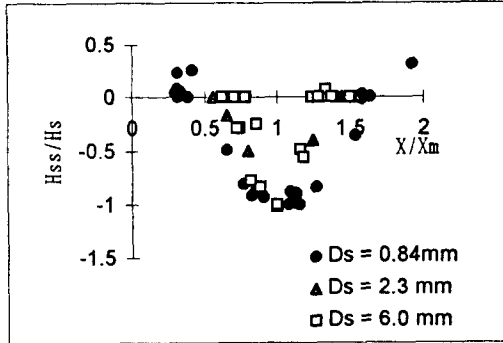


그림 9. 둔덕존재시 무차원 세굴공의 형태

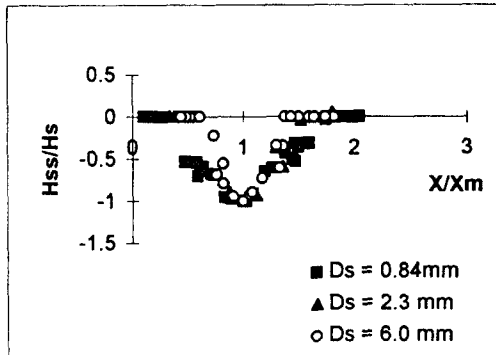


그림 10. 둔덕제거시 무차원 세굴공의 형태

것이다. 둔덕존재시나 둔덕제거시 모두 평균입경이 증가할수록 세굴공의 종방향 규모는 감소하였으며, 이것은 평균입경이 클수록 세굴로 인한 종방향의 유사이동량이 적다는 것을 의미한다. 특히 평균입경이 작을수록 세굴공 바닥 주변의 형태는 오목한 포물선형에 가깝고, 평균입경이 클수록 삼각형분포에 가깝다.

4. 결 론

단락수맥 하류부에서의 세굴특성을 분석하기 위하여 유량(1 l/sec, 2 l/sec, 3 l/sec), 하류수심(5cm, 10cm, 15cm) 및 하상재료(0.84mm, 2.3mm, 6mm)를 각각 변화시키면서 30회의 수리실험을 실시하였고, 상기의 조건과 동일한 경우에 둔덕을 제거하면서 30회의 수리실험을 실시하여 총 60회의 수리실험을 행하였다.

본 연구에서는 입자 밀도 후르드수, 하류수심,

세굴공의 형태 등을 둔덕의 존재 여부에 따라 그 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 밀도 후르드수가 증가하면 평형세굴심 뿐만 아니라 둔덕의 높이도 비례하여 증가한다.

2) 하류수심과 평형세굴심은 항상 반비례 하는 관계가 아니라 하류수심이 변화되면서 평형세굴심이 증가 혹은 감소하는 한계영역이 있음을 확인하였다.

3) 둔덕의 유무에 따라 세굴규모가 크게 변화되므로 단락부 하류부 하상보호공의 설계시 이를 고려해야 한다고 판단된다.

4) 앞으로 유량, 하류수심, 하상재료, 낙하고 등의 조건을 변화시키면서 낙하수맥 하류부에서 세굴규모의 예측에 관한 실험적, 이론적 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 경기대학교 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 손광익, 이원환 (1993). "침강지내 비점성하상의 세굴 지배인자에 대한 실험적 해석." 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 123-129.
- 이종태, 윤세의, 손광익, 김준현 (1994). "낙하수맥 하류부에서의 세굴특성." 제36회 수공학연구발표회 논문집, 한국수문학회, pp. 21-26.
- Blaisdell, F.W., and Anderson, C.L. (1988). "A comprehensive generalized study of scour at cantilevered pipe outlet." *J. Hydr. Res.*, Vol. 26, No. 4, pp. 357-376.
- Blaisdell, F.W., and Anderson, C.L. (1991). "Pipe plunge pool energy dissipator." *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 303-323.
- Doddiah, D., Albertson, M.L., and Thomas, R. (1953). "Scour from jets." *Proceedings of 5th Congress of IAHR*, Minneapolis, Minnesota, Vol. 1, pp. 161-169.

Rouse, H. (1940). "Criteria for similarity in the transportation of sediment." *Proc. 1st Hydraulic Conf.*, State Univeristy of Iowa, Iowa City, Iowa, pp. 33-49.

Simons, D.B., and Stevens, M.A. (1971). "Scour control in rock basins at culvert outlets."

Sediment Transport Technology, W.R.P.

Wittler, R.J., and Abt, S.R. (1990). "The influence of uniformity on riprap stability." *Hydraulic Engineering, Proc. of 1990 National Conference*, Vol. 1, pp. 251-256.

〈집수 : 1995년 3월 29일〉