

## 침강지내 비점성하상의 세굴 지배인자에 대한 실험적 해석

Experimental Analysis of the Parameters Governing Scour  
in Plunge Pool with Cohesionless Bed Material

손광익\* · 이원환\*\* · 조원철\*\*\*

Son, Kwang Ik · Lee, Won Hwan · Cho, Won Cheol

## Abstract

Because the existing scour prediction formulas for plunge pools of pipe culverts and spillways give a wide range of predicted scour depths, it is difficult to estimate actual scour depths. A review of literature showed that wide range of predicted values was caused mostly by lack of thorough analysis of the scour mechanism. In this study, the effects of the parameters governing scour were examined, and the scour potentials were measured. The major variables governing scour were the velocity and size of jet impinging into the plunge pool, the submerged weight of bed material, the ratio of jet size to bed material size, the tail water depth of the plunge pool, and the angle of jet impact on water surface. The ratio of jet size to bed material size to bed material size was found to be another significant parameter affecting scour for larger bed materials. A densimetric Froude number of the bed material in incipient motion was formulated. This number represented the scour potential of the jet at the point where the bed material was tested.

## 요 지

기연구 발표된 수많은 세굴 예측공식들은 여수로나 관암거 하류의 침강지내에서 발생하는 실제 세굴 깊이나 세굴 방지에 필요한 최소 침강지수심을 예측하기가 불가능할 정도로 광범위한 예측치를 나타내고 있다. 이같은 광범위한 예측 세굴 깊이는 대부분 세굴 지배인자에 대한 심도깊은 연구의 부족에 따른 인자들의 지나친 단순화에 기인하고 있다는 것을 문헌조사를 통하여 알 수 있었다. 따라서 본 연구는 실험을 통하여 세굴을 지배하는 주요 지배인자들의 영향을 검토하였다. 문헌조사로부터 찾을 수 있었던 세굴 지배인자는 침강지수심, 쉘의 크기와 폭기정도, 하상입자의 입도분포 및 노출도 등이었으며 본 연구에서는 쉘의 수리학적 특성 및 침강지 수면에서의 입사각, 침강지의 기하학적 특성, 그리고 쉘의 크기 및 하상입자 크기의 영향을 중점적으로 검토하였다. 그 결과 침강지 수심과 쉘의 수리학적 특성 및 기하학적 특성, 그리고 하상입자의 크기 등이 세굴을 지배하는 주요인자임을 알 수 있었다. 특히 기존 실험연구들의 광범위한 세굴 예측치는 쉘의 크기와 하상입자의 크기에 대한 기하학적 상사법칙을 무시함에 기인하였음을 발견하였다.

\* 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

\*\* 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\*\* 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수

## 1. 序 論

여수로(spillway)나 관암거(pipe culvert)의 유출부 하류에 에너지 감세공으로서 침강지(plunge pool)가 종종 사용되고 있으며 이들 수공 구조물로부터 방사되는 켈(jet)은 때때로 침강지내의 세굴(scouring)을 유발할 뿐만 아니라 심할 경우에는 여수로(spillway)나 댐구조물의 기초하단부를 침식하여 구조물의 안정성을 위협하기도 한다. 또한 충분한 침강지의 수심을 제공하지 못함으로써 발생하는 세굴에 의한 유송토사의 하류부 퇴적은 하도 단면적을 감소시켜 홍수범람까지 유발하기도 한다.

따라서 많은 학자와 기술자들이 여수로나 관암거로부터 방류되는 켈에 의한 세굴 방지를 위하여 최소의 침강지 수심을 산정하는 경험공식들을 제시하였다. 이들 공식들은 연구가 실시된 모델이나 원형(prototype)에서는 세굴 깊이나 세굴 방지를 위한 침강지수심을 비교적 잘 예측하고 있으나 타모델이나 타원형에의 적용에 있어서는 만족할만한 예측치를 제시해주지 못하고 있는 실정이다. 다시말해 기 연구 발표된 수많은 세굴 예측공식들은 실제 세굴 깊이나 세굴 방지에 필요한 최소 침강지수심을 예측하기가 불가능할 정도로 광범위한 예측치를 나타내고 있다. 이같은 광범위한 예측 세굴 깊이는 대부분 세굴 인자에 대한 심도깊은 연구의 부족에 따른 세굴 지배인자들의 지나친 단순화에 기인하고 있다는 것을 문헌조사를 통하여 알 수 있었다. 따라서 본 연구는 실험을 통하여 잠재세굴능(scour potential)을 예측하기 위하여 세굴을 지배하는 주요 지배인자들의 영향을 문헌과 실험을 통하여 검토코자 한다.

## 2. 理論的 考察

세굴을 지배하는 무차원인자를 추출하기 위하여 세굴 지배가능인자들을 조사 열거하고 이들에 대한 차원해석을 실시하였다. 세굴 지배가능인자로는 문헌조사에서 나타나는 인자들과 함께 기존의 각종 연구논문에서는 다루지 않았으나 지배인자로 추정되는 인자들을 모두 포함시켰다. 침강지내의 하상 물질의 이동한계조건(removal critical condition)은

일반적으로 하상입자의 發端運動(incipient motion)으로 나타낸다. 일관성있는 한계조건을 측정하기 위하여 하상입자의 한계조건은 발단운동으로 나타내고, 發端運動이란 입자주위의 흐름이 충분히 발달한 상태에서 입자가 원위치에서 10초 이내에 이동되는 조건으로 정의하였다. 이와 같은 서술적인 한계조건은 입자에 미치는 켈의 특성(켈의 속도, 켈의 크기)과 하상물질의 특성(입자의 크기와 비중)을 이용하여 수치적으로 표현할 수 있다.

하상입자의 입도분포에 따른 대표입자의 크기(representative particle size)에 대한 정의는 연구자마다 다르나(Breusers and Raudikivi<sup>(1)</sup>) 입자의 균등성(Whittler and Abt<sup>(2)</sup>)과 입자가 평균하상면 위로 노출되는 정도에 따른 입자의 노출도(protrusion ratio)가 세굴에 미치는 영향에 대한 연구(Fenton and Abbott<sup>(3)</sup>)는 많은 진척이 있었다고 판단되어 균일한 크기의 求로 이루어진 평하상(flat bed)으로 하상을 모의하였다.

Mason<sup>(4)</sup>, Chee<sup>(5)</sup>, Taraimovich<sup>(6)</sup>, Mirskhulava et al.<sup>(7)</sup> 등의 연구에 따르면 켈이 침강지 수면에 입사하는 각도에 따라 세굴의 깊이와 잠재세굴능이 달라진다는 것을 알 수 있었다. 켈의 폭기(aeration) 정도에 따라서 침강지내에서의 켈흐름 및 켈의 水中이동거리에 따른 에너지 감소비가 달라지므로 폭기현상을 세굴현상 연구를 더욱 복잡하게 만들고 있다. 실제로 세굴에 대한 켈의 폭기에 대해서는 아직 정립된 이론이 없으므로(Mason<sup>(4)</sup>, Johansen<sup>(8)</sup>) 본 연구에서는 수중켈(submerged jet)을 사용하여 폭기에 의한 영향을 최소화 시켰다. 기존의 세굴 예측공식들은 원형에서 자료를 측정할 것도 있지만 일반적으로 모형실험에서 모래를 하상입자로 사용하여 세굴 깊이를 측정하였다. 그러나 이러한 모형에서의 하상입자의 크기와 켈크기의 比는 원형에서의 比보다 훨씬 작아 기하학적 상사법칙에 어긋나므로 간과해서는 안될 인자라고 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 켈크기와 하상입자의 크기를 지배인자에 포함시켰다. 켈의 여수로 플립버켈(flip bucket)을 떠나 침강지에 떨어지는 사이에 켈의 단면 형상은 변화되며 켈의 단면 형상에 따라 잠재세굴능이 변할 것은 명백한 일이나 이에 대한 연구는 찾아볼 수가 없으므로 변수의 최소화를 위하여 원형노즐을 이용

하여 켈을 모의하였다.

비점착성 하상의 세굴에 의하여 발생된 유송토사는 세굴 발생부위의 하류에 퇴적되어 둔덕(berm)을 형성하며 이 둔덕의 유무에 따라 최대 세굴 깊이가 크게 달라진다는 것을 모형실험을 통하여 확인할 수 있었으나 아직 둔덕의 영향을 수식적으로 규명한 연구는 찾을 수가 없었다. 따라서 원형에서 발생하는 실제 현상을 그림 1과 같이 이상화 시킴으로써 세굴에 영향이 있다는 것은 문헌조사를 통하여 확인 하였으나 아직 규명되지 않은 각 지배인자들의 최소화 및 단순화를 꾀하였다.

최종적으로 켈의 크기인 노즐의 직경( $D_n$ ), 노즐의 평균유속( $U_o$ ), 켈의 침강지 수면입사각( $\theta$ ), 침강지의 폭( $B$ ), 침강지의 수심( $H$ ), 물의 밀도( $\rho$ ), 물의 동점성계수( $\nu$ ), 하상입자의 직경( $D_s$ ) 그리고 하상물질의 수중중량( $W_s$ )을 가상지배인자로 선택하였다. 하상물질의 밀도( $\rho_s$ )는 별도의 독립변수로 표시되지는 않았지만 하상입자의 수중중량 인자속에 포함되어 있다. 흐름방향의 침강지 중심선을 X-축으로 하고, X-축의 영점은 노즐의 중심선을 연장하여 하상면과 만나는 점으로 하고 하류방향을 양의 방향으로 정하였다. 특정 하상지점의 잠재세굴능은 한계조건에 도달하는 하상입자의 수중중량으로 표현될 수 있다. 따라서 종속변수를 수중중량( $W_s$ )으로 하면, 하상입자의 한계조건은 다음식과 같이 표현된다.

$$W_s = f_1(D_n, D_s, U_o, H, B, X, \rho, \nu, \theta) \quad (1)$$

반복변수(repeating variable)를  $D_n$ ,  $\rho$ 와  $U_o$ 로 선

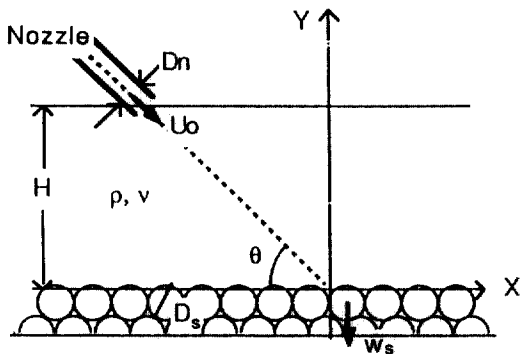


그림 1. 원형(prototype)의 이상화와 주요독립변수의 정의.

택하여 차원해석을 실시하면 다음과 같은 무차원 변수로 표현할 수 있다.

$$\left[ \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right] \frac{g \cdot D_n^3}{U_o^2 D_n^2} = f_3(D_s/D_n, H/D_n, B/D_n, X/D_n, \frac{\nu}{U_o D_n}, \theta) \quad (2)$$

$$\text{또는 } \pi_1 = f_1(\pi_2, \dots, \pi_7) \quad (3)$$

식(2), (3)을 세밀히 검토하여 보면  $\pi_1$ 은 하상입자의 수중중량( $W_s = (\rho_s - \rho)g\pi D_n^3/6$ )과 노즐유출부에서의 켈 모멘텀( $M_o = \rho\pi D_n^2 U_o^2/4$ )의 비임을 알 수 있다. 즉,  $\pi_1 = W_s/M_o$ 로써 단위 켈 모멘텀에 저항할 수 있는 하상입자의 수중중량으로 해석할 수 있다. 또  $\pi_1$ 의 역함수를 취하면 단위 수중중량의 하상입자를 한계조건에 도달시킬 수 있는 켈 모멘텀으로도 해석이 가능하다. 다시말해  $\pi_1$ 항은 잠재세굴능의 척도이며,  $\pi_6$ 항은 켈의 레이놀즈수(Reynolds no. =  $U_o D_n/\nu$ )의 역수이다. 하상입자의 크기와 단위면적당의 켈 모멘텀을 일정하게 유지하면 한계조건에 도달하는 하상입자의 비중은 노즐의 크기에 비례하나 특정치에 접근함을 실험을 통하여 알 수 있었다. 즉, 켈의 총 모멘텀 보다 단위면적당의 켈 모멘텀을 사용하는 것이 세굴 특성을 쉽게 정의할 수 있음을 알 수 있었으므로  $\pi_1$ 항을  $(D_n/D_s)^2$ 으로 곱해줌으로써 켈의 총 모멘텀을 켈의 흐름에 직각되는 하상입자의 단면적에 작용하는 켈 모멘텀( $M_{os}$ )으로 변환시켰다. 그리고 하상입자의 수중중량과 변환된 켈 모멘텀의 비를 변환잠재세굴능(transformed scour potential)이라 부르기도 하고  $W_s/M_{os}$ 로 표현하였다. 식(4)에서 보는 바와 같이 변환잠재세굴능은 밀도 후루이드수(densimetric Froude number)의 자승의 역함수임을 알 수 있었으며 밀도 후루이드수는 앞에서 언급한 바와 같이 켈이 하상입자에 미치는 잠재세굴능으로 정의할 수 있다.

$$W_s/M_{os} = \frac{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot D_n}{\rho \cdot U_o^2} = \frac{1}{Fr_d^2} \quad (4)$$

이 밀도 후루이드수는 Blaisdell and Anderson<sup>(9)</sup>, Maynard et al.<sup>(10)</sup>, Rajaratnam<sup>(11)</sup>과 Rajaratnam and Beltaos<sup>(12)</sup> 등이 세굴을 예측하기 위하여 사용하였던

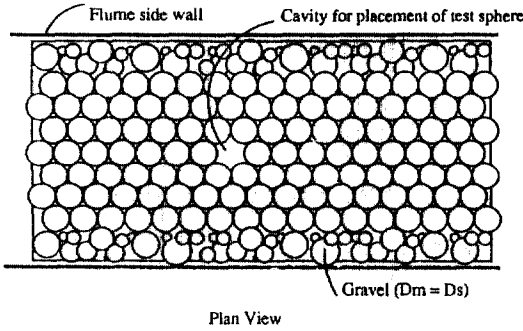


그림 2. 모의 하상입자의 배치도.

무차원 변수이다. 또한 잠재세굴능 공식중  $U_0$ 를 전단속도  $U_*$ 로 치환시키면 Shields<sup>(13)</sup>의 전단응력( $\tau^*$ )의 역함수임을 알 수 있다. 이 변환잠재세굴능을 종속무차원변수로 놓고 실험결과와 상대비교를 쉽게 하기 위하여  $H/D_n$ 을  $H/D_s$ 로 치환시켜 주면 식(5)와 같이 표현된다.

$$\left[ \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right] \frac{g \cdot D_s}{U_n^2} = f_4(D_s/D_n, H/D_s, B/D_n, X/D_n, \frac{v}{U_n D_n}, \theta) \quad (5)$$

### 3. 實驗裝置 및 模型實驗

폭 0.9 m, 깊이 0.6 m, 그리고 길이 7 m이고 옆면이 유리로 된 직사각형 Flume에서 실험을 수행하였다. Flume 상류에는 높이 3 m의 수조가 부착되어 있으며 물은 실험실 북쪽에 있는 저수지로부터 공급하여 흐름의 맥동(Pulsation)을 최소화할 수 있는 조건에서 실험을 수행하였다. 비점착성 균일 하상입자를 모의하기 위하여 직경 6.55 cm의 球와 半球를 사용하여 모의 하상의 공극이 최소가 될 수 있도록 먼저 반구들을 바닥에 밀착시키고 그 위에 球들을 동일한 방법으로 배열, 고정시켰다.(그림 2 참조) 하상입자의 크기와 켈의 크기에 대한 영향을 조사하기 위하여 노출의 직경을 5 cm부터 10 cm까지 변화시켰다. 켈의 침강수지면에 대한 입사각은 28.5°와 45°, 그리고 켈의 레이놀즈 수를 80,000에서 222,000까지 변화시켜 가며 침강지대의 흐름방향 즉 x-축을 따라 잠재세굴능을 측정하였다. 잠재세굴능의

표 1. 본 연구의 실험조건 및 실험범위

실험조건	실험범위
켈의 레이놀즈수	80,000-222,000
켈의 침강수지면에 대한 입사각	28.5°-45°
켈크기와 하상입자의 크기 比	0.8-1.6
켈크기와 침강지폭의 比	4.5-18
켈크기와 침강지수심의 比	1.2-6.5
實驗球의 비중	1.15-3.61

산정을 위하여 한계조건에 도달하는 하상입자의 수중중량을 측정하고자 모의하상입자의 크기가 동일하고 비중은 1.145부터 3.614까지 변화시킬 수 있는 實驗球를 준비하였다. 모의하상 가운데 實驗球가 놓일 수 있도록 공간을 확보하고, 그 공간에 實驗球를 넣고 實驗球의 비중을 변화시켜 가며 주어진 켈의 수리학적 특성에 대한 하상입자의 한계조건을 측정하였다.

이와 같은 방법으로 켈의 특성과 기하학적 실험조건을 변화시켜 가면서 무차원 변수들의 세굴에 대한 영향을 실험을 통하여 측정하였다. 본 연구의 실험조건의 변화범위를 요약하면 표와 같다.

### 4. 實驗結果

실험결과 X-축을 따라 측정된 잠재세굴능은 그림 3이나 그림 4에서 보는 바와 같이 레이놀즈수의 영향을 받지 않았으며, 이는 점성력(viscous force)이 세굴에 미치는 영향은 무시할 수 있을 만큼 적다는 것을 의미한다. Baines<sup>(14)</sup>는 레이놀즈수가 약 100,000 이상이면 켈의 확산계수가 특정치에 접근하여 레이놀즈수를 무시할 수 있다 하였고 Coleman<sup>(15)</sup>은 레이놀즈수가 약 10,000 이하인 경우는 레이놀즈수를 무시할 수 없다고 하였다. 따라서 최소한 본 연구의 실험범위 또는 그 이상의 레이놀즈수에 대해서 레이놀즈수는 잠재세굴능의 지배인자가 아님을 알 수 있었다.

그림 3 등의 실험결과로부터  $X/D_n$ 이 약 -1부근에서 변환잠재세굴능이 감소하는, 평하상에 미치는 켈의 세굴능 형태의 특징을 찾을 수 있었다. 이와 같은 현상은 켈이 평하상에 분사될 때 停滯點(stag-

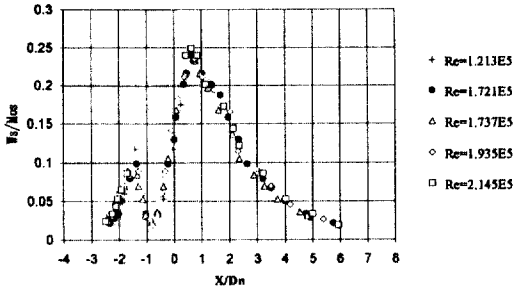


그림 3.  $W_s/M_{os}$ 와  $X/D_n$ 의 상관관계(직경 10 cm, 입사각  $45^\circ$ ,  $H/D_s=2.32$ ).

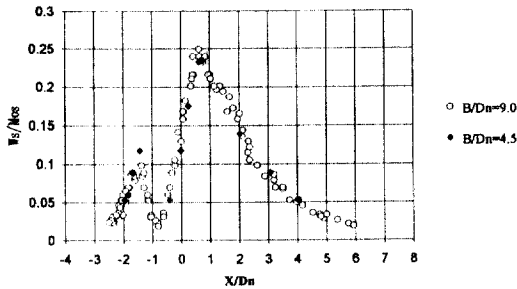


그림 4. 잠재세굴능에 대한 침강지 폭의 효과( $B/D_n=4.5$ ,  $B/D_n=9$ , 직경 10 cm, 입사각  $45^\circ$ ).

nation point)이 이 부근에서 발생되고 하상입자에 작용하는 힘의 압력이 중력방향으로 작용하기 때문인 것으로 사려된다.

침강지의 폭이 세굴에 미치는 영향을 조사하기 위하여 모든 조건을 고정시키고 침강지의 폭만 켈크기의 4.5배부터 18배까지 변화시켜가며 실험해 본 결과, 침강지 수심이 얕아질수록 세굴에 영향을 미치지 않는 최소 침강지폭은 작아지고 침강지 수심이 깊어질수록 요구되는 최소 침강지폭은 커진다는 것을 알 수 있었다. 그림 4는  $B/D_n$ 이 4.5와 9이고 침강지 수심이 켈크기의 6.5배일 때 침강지폭의 변화가 변환잠재세굴능에 미치는 영향을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이  $B/D_n$ 이 4.5일 때와 9일 때의 변환잠재세굴능은 크기와 분포형태에 있어 거의 동일하므로 실험한 침강지수심 이하에서는 침강지폭(B)의 영향을 무시할 수 있음을 알았다.

주 관심대상이 침강지의 하상에 미치는 켈의 최대 변환세굴능일 경우 X변수 또한 독립변수에서 제외시킬 수 있으므로 세굴을 표시하는 무차원 하수는

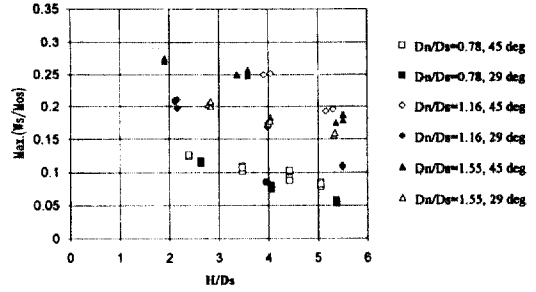


그림 5.  $D_n/D_s$ 에 따른 최대 변환잠재세굴능( $W_s/M_{os}$ )과  $H/D_s$ 의 상관관계.

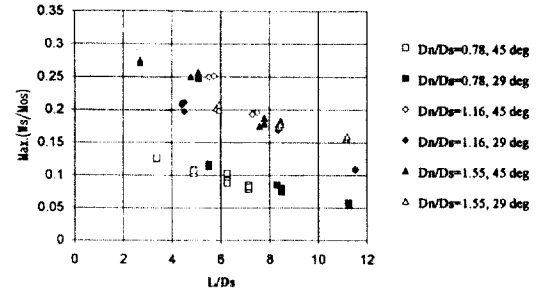


그림 6.  $D_n/D_s$ 에 따른 최대 변환잠재세굴능( $W_s/M_{os}$ )과  $L/D_s$ 의 상관관계.

식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\left[ \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right] \frac{g \cdot D_s}{U_n^2} = f_5(D_n/D_s, H/D_s, \theta) \quad (6)$$

그림 5는 여러  $D_n/D_s$ 에 대하여 켈의 입사각이  $28.5^\circ$ 와  $45^\circ$ 일 때의 침강지 깊이에 따른 최대 변환잠재세굴능을 나타내고 있으며 각각의 입사각에 대한 최대 변환잠재세굴능과  $H/D_s$ 의 상관관계를 비교해보면 켈의 입사각이 변환잠재세굴능에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 5는 켈과 하상입자 크기의 비( $D_n/D_s$ )와 침강지수심도 세굴능의 주요 지배인자임을 보이고 있다. 켈의 입사각이 동일한 경우  $D_n/D_s$ 가 1.16일 때와 1.55일 때 작은  $H/D_s$ 에 대한 변환세굴능은 거의 같은 값을 나타내고 있다. 이는  $D_n/D_s$ 가 약 1.6이상이고 켈의 평균유속이 동일할 경우 켈 분사점 가까이에서의 변환잠재세굴능은 켈의 크기에 영향을 받지 않고, 마치 등유속을 가진 무한한 흐름속에서 물체가 받는 항력계수가 동일한 것과 같이, 동일하다. 켈 분사점으로부터의

거리가 멀어질 수록  $D_n/D_s$ 가 1.6이상이라도 켈의 변환잠재세굴능이  $D_n/D_s$ 에 영향을 받는 이유는 켈의 유소분포 영향보다는 켈 중심부의 유속감소가 켈 크기의 함수이기 때문으로 사려된다.

켈의 입사각은 켈이 침강지 수면으로부터 하상에 도달하는 水中침투거리(L)를 결정하므로 각각의 입사각에 대한 최대 변환세굴능과  $L/D_s$ 의 상관관계를 비교하므로써 켈의 입사각과 침강지수심 각각이 변환잠재세굴능에 영향을 미치는 因子인지 또는 켈의 입사각에 따른 침투거리만이 지배因子인지를 확인할 수 있다. 그림 6은 각각의 입사각에 대한 최대 변환잠재세굴능과  $L/D_s$ 의 상관관계를 나타내고 있으며 이 그림으로부터 켈의 水中침투거리(L)와 켈의 입사각( $\theta$ ) 모두가 변환잠재세굴능의 지배인자인 것을 알 수 있으며 이는 침강지수심과 켈의 입사각 모두가 세굴능의 지배인자임을 의미한다. 또한  $D_n/D_s$ 는 같으나 켈 입사각이 다른 변환잠재세굴능의 편차를 그림 5와 그림 6에서 비교해 보면 변환잠재세굴능을  $L/D_s$ 에 대하여 표시하였을 경우  $H/D_s$ 에 대하여 표시하였을 경우보다 그 편차가 작아짐을 알 수 있다. 이는 L이  $\theta$ 에 비해 세굴능에 대한 영향이 더 크다는 것을 의미한다.

## 5. 結 論

연구결과 기존의 일부 세굴 예측공식들은 세굴에 미치는 일부인자들을 포함시키지 않고 단순화 시켰음을 알 수 있었고 앞에서 나열하였던 세굴 지배인자의 영향은 다음과 같다.

1. 본 연구는 현재까지 논쟁의 대상이 되고 있는 세굴에 미치는 레이놀즈수의 영향을 규명할 수 있었다. 실험범위와 그 이상의 레이놀즈수에 대하여 켈의 레이놀즈수가 세굴에 미치는 영향은 무시할 수 있었으며 따라서 켈에 의한 세굴은 점성력에 의한 영향이 적음을 확인할 수 있었다.

2. 과거에는 무시되어 왔던 켈과 하상입자의 크기의 비( $D_n/D_s$ )가 세굴능에 영향이 미치고 있는 중요한 인자란 것을 새로이 발견하였다. 그러나  $D_n/D_s$ 가 약 1.6이상이고 켈의 평균유속이 동일한 경우 켈 분사점 가까이에서의 변환세굴능은 켈의 크기에 영향을 받지 않는다는 사실도 확인하였다.

3. 침강지 수심이 얕아질수록 세굴에 영향을 미치지 않는 최소 침강지폭은 작아지고 침강지 수심이 깊어질수록 요구되는 최소 침강지폭은 커진다는 것을 알 수 있었다. 침강지 깊이가 켈크기의 약 6.5배 이하이고 침강지폭이 켈의 4.5배 이상일 때는 침강지폭은 세굴에 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

4. 켈의 침강지 수면입사각( $\theta$ )과 침강지 수심(H)은 세굴에 영향을 미치며, 켈의 에너지손실을 유발하는 켈의 水中 침투거리(L)는 입사각 이상으로 세굴능에 미치는 영향이 크다는 것을 실험결과와 분석을 통하여 알 수 있었다.

5. 많은 학자들이 세굴을 예측하는데 사용했던 밀도 후루이드수는 세굴을 지배하는 중요한 무차원 인자임을 재확인 하였을 뿐만 아니라 밀도 후루이드수 자체가 단위 켈 모델에 저항할 수 있는 하상입자의 水中중량인 변환잠재세굴능이란 새로운 역학적 정의를 내릴 수 있었다.

## 감사의 말

이 연구는 미국 유타주립대학의 Utah Water Research Laboratory(UWRL)의 실험설비와 재정적 도움을 받아 2년여에 걸쳐 수행된 세굴 역학에 대한 연구의 일부를 재정리 분석한 것으로 관계기관과 특히 Dr. J. P. Tullis에게 감사를 드린다.

## 참 고 문 헌

1. Breuser, H.N.C. and Raudikivi, A.J., *IAHR Hydraulic structure design manual 2*, A.A. Balkema Publisher, Rotterdam, Netherlands, 1991.
2. Wittler, R.J. and Abt, S.R., "The influence of uniformity on riprap stability," *Hydraulic Engineering, Proceedings of 1990 National Conference 1*, pp. 251-256, 1990.
3. Fenton, J.D. and Abott, J.R., "Initial movement of grains on a stream bed: the effect of relative protrusion," *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 352, pp. 523-537, 1977.
4. Mason, P.J., "Effects of air entrainment on plunge pool scour," *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 115(HY7), 385-399, 1989.
5. Chee, S.P., "Riverbed degradation due to plu-

- nging streams," In *symposium on erosion and sedimentation*, Bookcrafters Inc., Chelsea, Michigan, pp. 2.2-2.12, 1983.
6. Taraimovich, I.I., "Deformations of channels below high-head spillway", *Hydrotechnical Construction*, No. 10, pp. 917-923, 1978.
  7. Mirtskhulava, T.E., Dolidze, I.V. and Magomedova, A.V., "Mechanism and computation of local and general scour in non-cohesive, cohesive soils and rock beds," *IAHR, Proceedings of 12th Congress*, Vol. 3, pp. C20.1-C20.8, 1989.
  8. Johansen, M., "The effects of aeration on scour from vertical jets," *Unpublished MS thesis*, Utah State University Library, Logan, Utah, p. 84, 1988.
  9. Blaisdell, F.W. and Anderson, C.L., "Pipe plunge pool energy dissipator", *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(HY3), pp. 303-323, 1991.
  10. Maynard, S.T., Ruff, J.F. and Abt, S.R., "Riprap design," *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 115 (HY7), pp. 937-949, 1989.
  11. Rajaratnam, N., "Erosion by submerged circular jets," *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 108(HY2), pp. 262-267, 1982.
  12. Rajaratnam, N. and Beltaos, S., "Erosion by impinging circular turbulent jets," *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 103(HY10), pp. 1191-1205, 1977.
  13. Shields, I.A., *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*, Translated by Ott, W.P. and Uchelen, J.C., California Institute of Technology, Pasadena, California, 1936.
  14. Baines, W.D., "Discussion of diffusion of submerged jets," *Transaction*, ASCE(115), pp. 677684, 1950.
  15. Coleman, N.L., "A theoretical and experimental study of drag and lift forces acting on a sphere resting on a hypothetical stream bed," *Proceeding of 12th Congress of IAHR*, Fort Collins, Colorado, Vol. 3, pp. c22.1-c22.8, 1967.

(接受：1993. 6.19)