비점착성 하상물질의 세굴 지배인자에 대한 실험적 해석

손 광 익[1] 이 원 환[2]

1. 서 론

여수로(Spillway)나 관암거(Pipe Culvert)의 유출부하류에 에너지 감세공으로 침강지(Plunge Pool)가 종종 사용되고 있으며 이들 수공 구조물로 부터 방사되는 젯(Jet)은 때때로 침강지내의 세굴(Scouring)을 유발할 뿐만아니라 심할 경우에는 여수로(Spillway)나 댐 구조물의 기초하단부를 침식하여 구조물의 안정성을 위협하기도 한다. 또한 충분한 침강지의 수심을 제공하지 못함으로써 발생되는 세굴에 의한 유송토사의 하류부 퇴적은 하도 단면적을 감소시켜 홍수범람까지 유발하기도 한다.

따라서 많은 학자와 기술자들이 여수로나 관암거로부터 방류되는 젯에 의한 세굴방지를 위하여 최소의 침강지 수심을 산정하는 경험공식들을 제시하였다. 이들 공식들은 연구가 실시된 모델이나 원형(Prototype)에서는 세굴깊이나 세굴방지를 위한 침강지 수심를 비교적 잘 예측하고 있으나 타모델이나 타원형에의 적용에 있어서는 만족할만한 예측치를 제시해주지 못하고 있는 실정이다. 다시말해 기연구 발표된 수많은 세굴예측공식들은 실제 세굴깊이나 세굴방지에 필요한 최소 침강지수심을 예측하기가 불가능할 정도로 광범위한 예측치를 나타내고 있다. 이같은 광범위한 예측 세굴깊이는 대부분 세굴인자에 대한 심도깊은 연구의 부족에 따른 세굴 지배인자들의 지나친 단순화에 기인하고 있다는 것을 문헌조사를 통하여 알수 있었다. 따라서 본 연구는 실험을 통하여 잠재세굴능(Scour Potential)을 예측하기 위하여 세굴을 지배하는 주요 지배인자들의 영향을 문헌과 실험을 통하여 검토코자 한다.

2. 본 론

세굴을 지배하는 무차원인자를 추출하기 위하여 세굴 지배가능인자들을 조사 열거하고

1) 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원
2) 연세대학교 토목공학과 교수

이들에 대한 차원해석을 실시하였다. 세굴 지배가능인자로는 문헌조사에서나타나는 인자들과 함께 기존의 각종 연구논문에서는 다루지 않았으나 지배인자로 추정되는 인자들을 모두 포함시켰다. 침강지내의 하상물질의 이동한계조건(Removal Critical Condition)은 일반적으로 하상물질의 발단운동(Incipient Motion)으로 나타낸다. 일관성있는 한계조건의 측정을 위하여 하상물질 입자의 한계조건은 발단운동으로 나타내고, 발단운동이란 입자주위의 흐름이 충분히 발달한 상태에서 입자가 원위치에서 10초이내에 이동되는 조건으로 정의하였다.

이와같은 서술적인 한계조건은 입자에 미치는 젯의 특성(젯의 속도, 젯의크기)과 하상물질의 특성(입자의 크기와 비중)을 이용하여 수치적으로 표현할 수 있다. 하상물질의 입도분포에 따른 대표 입자크기(Representative Particle Size)의 정의가 연구자마다 다르고 (Breusers and Raudikivi ; 1991, Fenton and Abott ; 1977) 입자형태가 평균하상면 위로의 노출정도에 따른 입자의 노출도(Protrusion Ratio)가 세굴에 미치는 영향에 대한 연구 (Whittler and Abt ; 1990, ; 1978)는 많은 진척이 있었다고 판단되어 하상물질은 균일한 크기의 구로 모의 (Simulation) 하였다.

Mason(1989), Chee(1983), Taraimovich(1978), Mirtskhulava et al.(1967)등의 연구에 따르면 젯가 침강지 수면에 입사하는 각도에 따라 세굴의 깊이와 잠재세굴능이 달라진다는 것을 알수 있었다 . 젯의 폭기(Aeration) 정도에 따라서 침강지내에서의 젯 흐름및 젯의 이동거리에 따른 에너지 감소비가 달라지므로 폭기는 세굴현상 연구를 더욱 복잡하게 만들고 있다. 실제로 세굴에 대한 젯의 폭기에 대해서는 아직 의견이 분분하다. (Mason ; 1989, Johansen ; 1988) 따라서 수중젯(Submerged Jet)을 사용하여 폭기에 의한 영향을 최소화 시켰다. 기존의 세굴예측공식들은 원형에서 자료를 측정한것도 있지만 일반적으로 모형실험에서 모래를 하상입자로 사용하여 세굴깊이를 측정하였다. 그러나 이러한 모형에서의 하상물질의 크기와 젯크기의 비는 원형에서의 비보다 훨씬 작아 기하학적 상사법칙에 어긋나므로 간과해서는 안될 인자라고 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 젯 크기와 하상물질의 크기를 지배인자에 포함시켰다. 젯가 여수로 플립버켓(Flip bucket)을 떠나 침강지에 떨어지는 사이에 젯의 단면 형상은 변화되며 젯의 단면 형상에 따라 잠재세굴능이 변할것은 명백한 일이나 이에 대한 연구는 찾아볼수가 없었으므로 변수의 최소화를 위하여 원형노즐을 이용하여 젯을 모의키로 결정하였다. 비점착성 하상의 세굴에 의하여 발생된 유송토사는 세굴발생부위의 하류에 퇴적되어 둔덕(Berm)을 형성하며 이 둔덕의 유무에 따라 최대 세굴깊이가 크게 달라진다는 것을 모형실험을 통하여 확인할 수 있었으나 아직 둔덕의 영향을 수식적으로 규명한 연구는 찾을수가 없었다. 따라서 원형에서 발생되는 실제 현상을 그림 1과 같이 이상화 시킴으로써 세굴에 영향이 있다는것은 문헌조사를 통하여 확인하였으나 아직 규명되지 않은 각 지배인자들의 최소화 및 단순화를 꾀하였다.

최종적으로 젯의 크기인 노즐의 직경(D_n), 노즐의 평균유속(U_o), 젯의 침강지 수면입사각(θ), 침강지의 폭(B), 침강지의 수심(H), 물의 밀도(ρ), 물의 동점성계수(ν), 하상물

질의 직경(D_s) 그리고 하상물질의 수중중량(W_s)을 가상지배인자로 선택하였다. 하상물질의 밀도(ρ_s)는 양해독립변수(explicit independent variable)로 표시되지는 않았지만 하상물질의 수중중량 인자속에 음해독립변수(implicit independent variable)로 나타나 있다. 흐름방향의 침강지 중심선을 X-축으로 하고, X-축의 영점은 노즐의 중심선을 연장하여 하상면과 만나는 점으로 하고 하류방향을 양의 방향으로 정하였다.

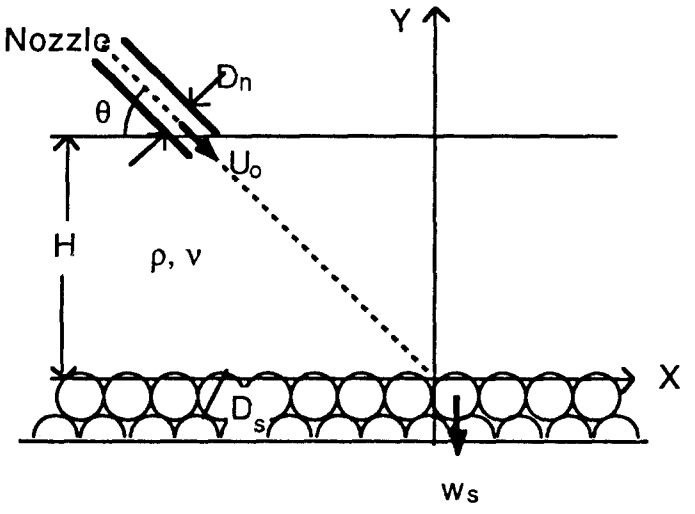

그림 1. 원형(Prototype)의 이상화와 주요독립변수의 정의

특정하상지점의 잠재세굴능은 한계조건에 도달하는 하상물질의 수중중량으로 표현될수 있다. 따라서 종속변수를 수중중량(W_s)으로 하면 하상물질의 한계조건은 다음식과 같이 표현된다.

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

반복변수(repeating variable)를 D_n, ρ와 U_o로 선택하여 차원해석을 실시하면 다음과 같은 무차원 변수로 표현할 수 있다.

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

또는 $\pi_1 = f_1(\pi_2, \cdots\cdots, \pi_7)$ ③

식②, ③을 세밀히 검토하여보면 π_1은 하상물질의 수중중량(W_s)과 노즐유출부에서의 젯 모멘텀(M_o)의 비임을 알수있다. 즉, $\pi_1 = W_s/M_o$로써 단위 젯 모멘텀에 저항할 수 있는 하상물질의 수중중량으로 해석할 수 있다. 또 π_1의 역함수를 취하면 단위 수중중량의 하상물질을 한계조건에 도달시킬 수 있는 젯 모멘텀으로도 해석이 가능하다. 다시말해 π_1 항은 잠재 세굴능의 척도이며, π_6항은 레이놀즈수(Reynolds Number)의 역수이다. 하상물질의

크기와 단위면적당의 젯 모멘텀을 일정하게 유지하면 한계조건에 도달하는 하상물질의 비중은 노즐의 크기에 비례하나 특정치에 점근함을 실험을 통하여 알수 있었다. 즉, 젯의 총 모멘텀 보다 단위 면적당의 젯 모멘텀을 사용하는것이 세굴 특성을 쉽게 정의할수 있음을 알수 있었으므로 π_1항을$(D_n/D_s)^2$으로 곱해줌으로써 젯의 총 모멘텀을 젯의 흐름에 직각되는 하상물질의 단면적에 작용하는 젯 모멘텀(M_{os})으로 변환시켰다. 그리고 하상입자의 수중중량과 변환된 젯 모멘텀비를 변환세굴능(Transformed Scour Potential)이라 부르기로 하고 W_s/M_{os} 로 표현하였다. 식④에서 보는바와 같이 변환세굴능은 밀도 후루이드수(densimetric Froude Number)의 자승의 역함수임을 알수 있었으며 밀도 후루이드수는 앞에서 언급한바와 같이 잠재 세굴능으로 정의 할수 있다.

$$W_s/M_{os} = \frac{(\rho_s - \rho)\cdot g \cdot D_s}{\rho \cdot U_o^2} = \frac{1}{F_{rd}^2} \qquad ④$$

이 밀도후루이드수는 Blaisdell and Anderson (1991), Maynord et al (1989), Rajaratnam (1982)과 Rajaratnam and Beltaos (1977) 등이 세굴을 예측하기 위하여 사용하였던 무차원 변수이다. 또한 잠재세굴능 공식중 U_o를 전단속도 U_*로 치환시키면 Shields' (1936)의 전단응력(τ_*)의 역함수임을 우리는 알수있다. 이 변환세굴능을 종속 무차원변수로 놓고 실험결과의 상대비교를 쉽게하기 위하여 H/D_n 을 H/D_s로 치환시켜주면 식 ⑤와 같이 표현된다.

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

⑤식의 인자별 세굴에 미치는 영향과 f_4 함수를 찾기위하여 직경 5, 7.5, 10 cm의 노즐과 노즐의 침강지수면 입사각 28.5° 와 45° , 그리고 레이놀즈수를 90,000에서 222,000까지 변화시켜가며 직사각형 Flume에서 실험을 수행하였다.

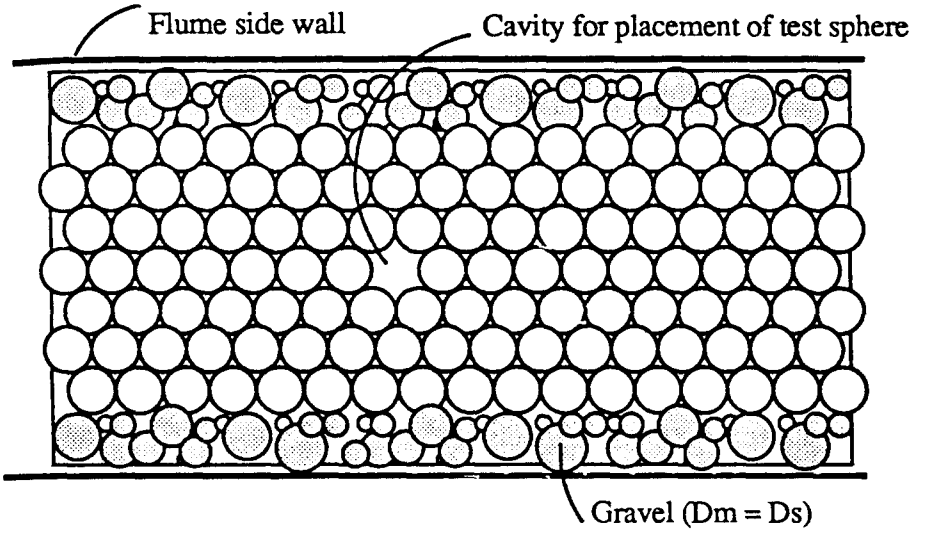

그림 2. 모의 하상입자의 배치도

비점착성 균일 하상물질을 모의하기 위하여 직경 6.55 cm의 구와 반구를 사용하여 모의 하상의 공극이 최소가 될수있도록 먼저 반구들을 바닥에 밀착시키고 그위에 구들을 동일한 방법으로 배열, 고정시켰다. (그림 2 참조) 잠재세굴능은 침강지내의 흐름방향 즉 X-축을 따라 측정하였다. 크기는 모의입자와 동일하고 비중은 1.145부터 3.614까지 변화시킬 수 있는 실험구가 놓일 수 있도록 원하는 위치에 공간을 만들어 놓고 실험구의 비중을 변화시켜가며 한계조건을 측정하여 ⑤식의 무차원 변수들의 영향을 실험을 통하여 조사하였다. 같은 방법으로 젯의 특성과 기하학적 실험조건을 변화시켜가며 무차원 변수들의 세굴에 대한 영향을 실험을 통하여 반복 측정하였다.

실험결과

실험결과 x-축을 따라 측정한 잠재세굴능은 그림 3에서 보는바와 같이 레이놀즈수에 영향을 받지 않았으며, 침강지내의 하상입자에 미치는 점성력(viscous force)은 난류 전단력(turbulent shear force)에 비해 세굴에 미치는 영향이 적었다. 따라서 레이놀즈수는 잠재세굴능의 지배인자가 아님을 알수있었다.

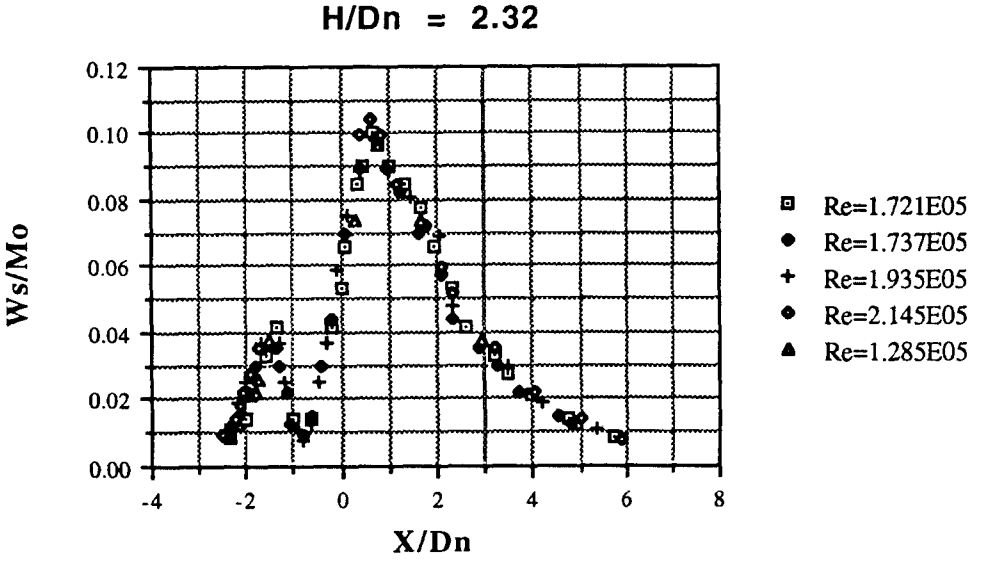

그림 3. W_s/M_o 와 X/D_n의 상관 관계 (직경 10cm, 입사각 45° , H/D_n = 2.32)

침강지의 폭이 세굴에 미치는 영향을 조사하기위하여 모든 조건을 고정시키고 침강지의 폭만 노즐크기의 18배 부터 4.5배 까지 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.

주 관심대상이 침강지의 하상에 미치는 젯의 최대 잠재세굴능일 경우 X-축 또한 독립변

수에서 제외 시킬수 있으므로 세굴을 표시하는 무차원 함수는 식 ⑥과 같이 표현할수 있다.

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

그림 4는 B/D_n 이 4.5 와 9 일때 침강지폭의 변화가 세굴능에 미치는 영향을 보여주고 있다.

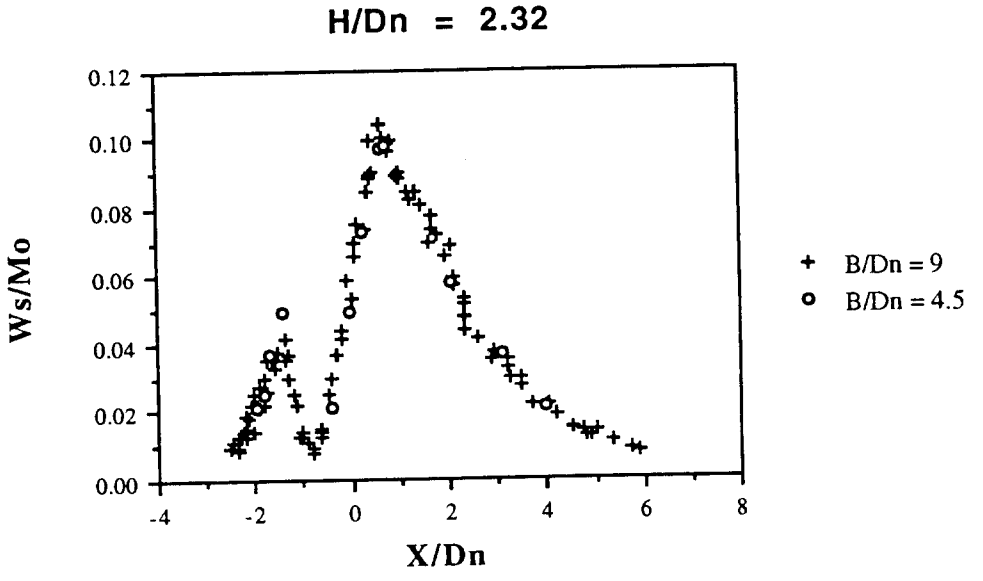

그림 4. 잠재세굴능에 대한 침강지 폭의 효과 (B/D_n=4.5,B/D_n=9, 직경 10cm,입사각 45°)

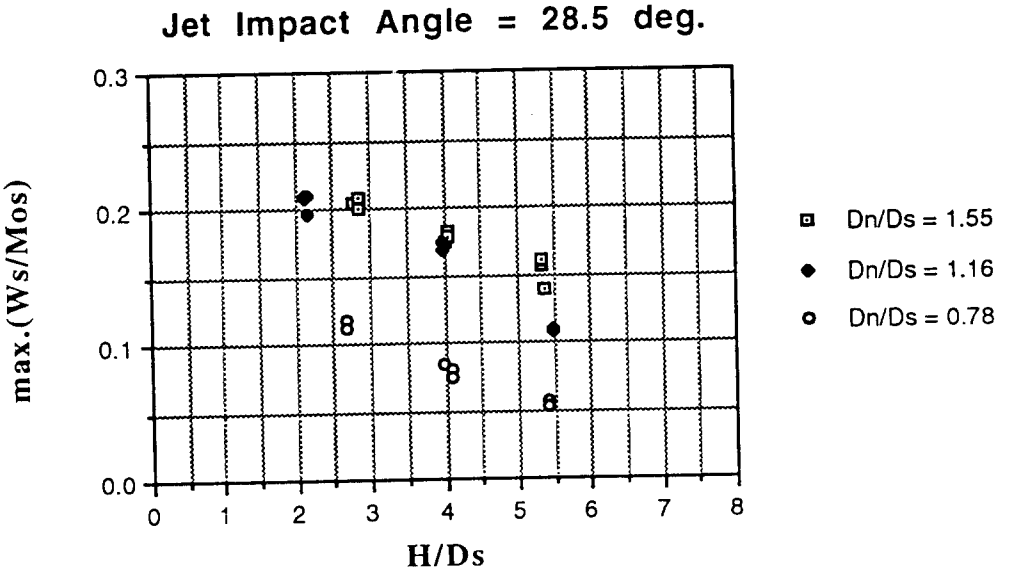

그림 5. D_n/D_s에 따른 최대 세굴능 (W_s/M_{os})과 H/D_n 의 상관관계

그림 5에서 보는바와 같이 최대 잠재세굴능은 ⑥식에서와 같이 젯의 입사각, 젯과 하상물질의 크기의 비(D_n/D_s)와 침강지수심에 밀접한 상관관계를 보이고 있다.

결론

연구결과 기존의 일부 세굴 예측공식들은 세굴에 미치는 일부인자들을 포함시키지않고 단순화 시켰음을 알수 있었고 앞에서 나열하였던 세굴 지배인자의 영향은 다음과 같다.

1. 본 연구는 현재까지 논쟁의 대상이 되고 있는 세굴에 미치는 레이놀즈수의 영향을 규명할수 있었다. 젯의 레이놀즈수가 세굴에 미치는 영향은 무시할 수 있었으며 따라서 젯에 의한 세굴은 난류전단력이 지배함을 확인할 수 있었다.

2. 과거에는 무시되어왔던 젯과 하상물질의 크기의 비(D_n/D_s)가 세굴에 영향을 미치고 있는 중요한 인자란 것을 새로이 발견하였다. 그러나 D_n/D_s 가 약 1.6이상이되면 무차원 변수 D_n/D_s는 세굴에 영향을 미치지 못한다는 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 젯크기의 7배 이하이고 침강지폭이 젯의 4.5배 이상일 때에는 침강지폭은 세굴에 영향을 미치지 못함을 알수 있었다.

4. 젯의 침강지 수면 입사각(θ)은 세굴에 영향을 미치며 젯의 에너지 손실을 유발하는 젯의 수중 이동거리는 입사각 이상으로 세굴능에 미치는 영향이 크다는 것을 실험결과의 분석을 통하여 알수 있었다.

5. 많은 학자들이 세굴을 예측하는데 사용했던 밀도 후루이드수는 세굴을 지배하는 중요한 무차원 인자임을 재확인 하였을 뿐만 아니라 밀도 후루이드수에 대한 새로운 역학적 정의를 내릴수 있었다.

6. 문헌조사를 통해 확인한 비점착성 하상물질의 세굴을 지배하는 인자로는 젯의 단면 형상, 젯의 폭기정도, 하상입자의 입도분포 그리고 입자가 평균하상위로 노출되는 노출정도 등을 들수있다. 또한 세굴구멍(scour hole) 하류부에 쌓이는 퇴적물에의한 둔덕 또한 최대 세굴깊이를 지배하는 인자로 나타나고 있다.

참고문헌

Blaisdell,F.W., and Anderson, C.L. (1991) "Pipe plunge pool energy dissipator," J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(HY3), p.303-323.

Breuser, H.N.C., and Raudikivi, A.J. (1991) IAHR Hydraulic structures design manual 2, A.A. Balkema Publisher, Rotterdam, Netherlands.

Chee, S.P. (1983) "Riverbed degradation due to plunging streams," In symposium on erosion and sedimentation, Bookcrfters Inc., Chelsa, Michigan, p.2.2-2.12.

Fenton,J.D.,and Abott, J.E.(1977). "Initial movement of grains on a stream bed: the effect of relative protrusion," Proceedings of the Royal Society, Series A, (352) : p.523-537.

Johansen, M.(1988). "The effects of aeration on scour fromvertical jets," Unpublished MS thesis, Utah State universityLibrary, Logan, Utah. 84p.

Mason, P.J. (1989). " Effects of air entrainment on plunge pool scour," J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(HY7), p.385-399.

Maynord, S.T., Ruff, J.F., and Abt, S.R. (1989) "Riprap design," J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(HY7), p.937-949.

Mirtskhulava, T.E., Dolidze, I.V., and Magomedova, A.V. (1989). "Mechanism and computation of localand general scour in non-cohesive, cohesive soils and rock beds," IAHR, Proceedings of 12th Congress, Vol.3, p.C20.1-C20.8

Rajaratnam, N., and Beltaos, S. (1977). "Erosion by impinging circular turbulent jets," J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 103(HY10), p.1191-1205.

Rajaratnam, N. (1982). " Erosion by submerged circular jets," J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 108(HY2), p.262-267.

Shields, I.A. (1936). "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

Taraimovich, I.I. (1978). "Deformations of channels below high-head spillways," Hydrotechnical Construction, No.0, p.917-923.

Wittler, R.J.,and Abt, S.R. (1990)." The influence of uniformity on riprap stability," Hydraulic Engineering, Proceedings of 1990 National Conference (1): p.251-256.