

젖에 의한 세굴깊이의 실험적 예측에 대한 고찰 Examination on the Experimental Prediction of Scour Depths Caused by Jets

손 광 익* / 윤 세 의**

Son, Kwang Ik / Yoon, Sei Eui

Abstract

A thorough literatural review of researches on the experimental prediction of scour depths caused by jets was carried out to find out a measure of scour prediction. A new experimental equation for predicting scour depths due to a vertical or an inclined jet was developed from five hundreds of experimental data which were carefully reviewed and adopted from the previous researches. The developed equation shows 0.941 statistical correlation coefficient. It was found that the parameters governing the scour depth were the size of bed material, flow rate through unit width of spillway, and head drop across structure. The predicted scour depth could be expressed as the deepest scouring depth below tail water surface with correlation coefficient $r = 0.941$.

Keywords: scour depth, scour governing parameters, scour by inclined jet, tailwater depth

요 지

본 연구에서는 수직 또는 경사젖에 의한 세굴에 대한 과거 연구결과의 종합적인 분석 및 재검토를 통하여 현재까지의 실험에 대한 문제점 파악 및 앞으로의 연구방향을 모색하며 과거 여러 연구자들의 실험적 연구중 약 500개의 실험자료를 이용하여 범용성있는 실험적 예측공식을 제시하였다. 예측세굴깊이는 하류수심 H_1 와 평형하상으로부터의 세굴깊이 H_2 의 합으로 표현할 수 있었으며 세굴지배인자는 하상입자의 크기, 단위폭당 유량, 그리고 상하류수면 차로 단순화 시킬수 있었으며 $r = 0.941$ 란 높은 상관관계를 보이는 경험적 세굴예측공식을 유도하였다.

핵심용어: 세굴깊이, 세굴지배인자, 경사젖에 의한 세굴, 하류수심

* 영남대학교 토목공학과 조교수

** 경기대학교 토목공학과 교수

1. 서론

댐과 같은 대규모 저수시설부터 culvert와 같은 소규모 방류수로 및 수중보의 건설에 따른 여수로나 발전수로, 수직단락 또는 수문 등의 건설은 토목 및 농토목분야에 중요한 일부분을 차지하고 있다. 이와 같은 수공구조물들을 통한 방류는 필요불가결한 사실이며 이러한 수공시설로부터의 방류는 수직 또는 수평젼을 발생시키게 된다 (그림 1 참조). 이들 젼은 수공구조물에 인접한 하류부의 하상토 및 유사를 하류로 이동시켜 수공구조물 하류부에 자연적으로 에너지 감세지를 발생시킬뿐 아니라 심할 경우 수공구조물 기초부의 세굴을 유발시켜 수공구조물의 안정성까지 위협하게 된다. 이 같은 세굴은 수공구조물의 안전에 절대적인 영향을 미치므로 세굴방지를 위하여 1930년대 이후 오랜기간에 걸쳐 많은 실험적, 이론적 연구가 진행되어 왔다. 이와 같은 노력의 결과로 젼의 수중분산 및 에너지감소 역학에 대한 많은 이해와 이론적 발전을 이루어 왔으며 하상토와 젼

의 상호작용에 의한 세굴예측을 위하여 많은 연구자들이 에너지 방정식 또는 운동량 방정식 등을 이용하여 최대 세굴깊이를 예측하는 이론을 제시하였으나 현재까지 공기를 연행한 젼의 수중 확산뿐만 아니라 하상입자의 운동까지 연계된 多相흐름(multiphase flow)을 완전히 이해하고 해석하지 못하고 있기 때문에 지금도 최대 세굴깊이나 세굴형태 예측은 실험적 연구결과에 의존하고 있으나 모든 연구자나 실무자들이 인정할만한 예측공식이 없는 실정이다. 현재까지의 연구결과를 종합해 보면 수평젼은 2차흐름이 하상토의 이송을 유발하고 있으며 수직 또는 경사젼은 젼의 직접적인 흐름에 의하여 하상토가 이송되는 서로 다른 역학적 특성을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 수직 또는 경사젼에 의한 세굴깊이 예측을 위한 공식을 제시하고자 한다.

2. 연구 동향

동일 현상을 연구하기 위한 연구진행 방법 및 세굴깊이 예측공식의 기본형태는 연구자마다 각기 다른 형태

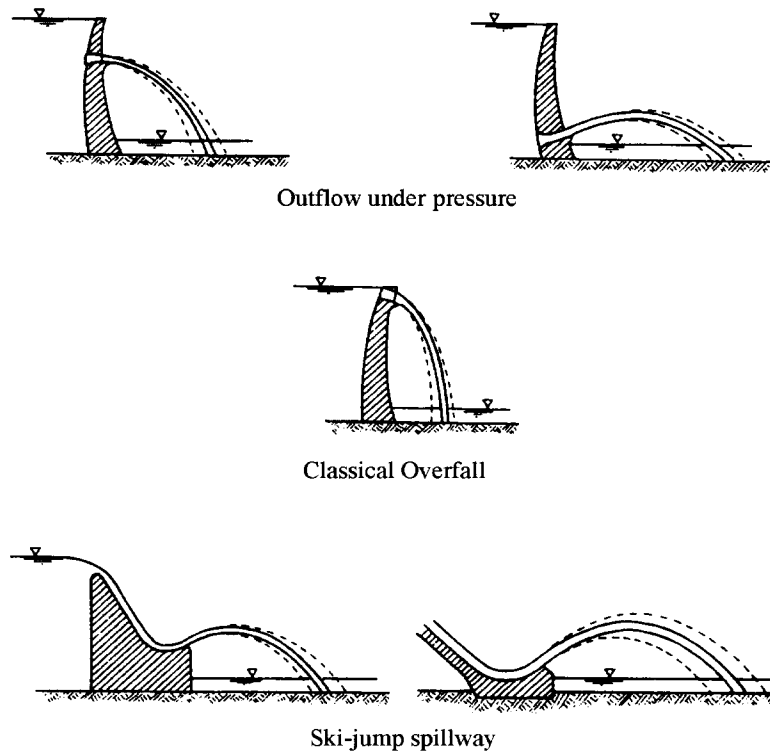


그림 1. 댐 하류부에서 발생하는 젼의 종류

표 1. 모형 또는 원형 여수로를 이용하여 유도한 세굴예측공식

연구자	년도	공식	비고
Schoklitch	1932	$H_t + H_s = 0.521 h^{0.2} q^{0.57} / D_{90}^{0.32}$	
Veronese	1937	$H_t + H_s = 0.202 h^{0.225} q^{0.54} / D_s^{0.42}$	for $D_s > 5 \text{ mm}$
		$H_t + H_s = 1.9 h^{0.225} q^{0.54}$	for $D_s < 5 \text{ mm}$
Jaeger	1939	$H_t + H_s = 0.614 h^{0.25} q^{0.5} / (H/D_{90})^{0.33}$	
Eggenberger	1944	$H_t + H_s = 1.444 h^{0.5} q^{0.6} / D_{90}^{0.4}$	
Müller	1944	$H_t + H_s = 0.972 h^{0.5} q^{0.6} / D_{50}^{0.4}$	
Doddiah 등	1953	$H_s / H_t = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{q}{h \cdot \omega}} (h / H_t)^{3 \cdot (\frac{q}{h \cdot \omega})^{0.33}}$	for narrow size range material
		$H_s / H_t = \frac{2}{3} (\frac{q}{h \cdot \omega})^{2/3} (h / H_t)^{2 \cdot (\frac{q}{h \cdot \omega})^{1/6}}$	for wider size range material
Hartung	1957	$H_t + H_s = 1.36 h^{0.36} q^{0.64} / D_{85}^{0.32}$	
Damle 등	1966	$H_t + H_s = 0.652 h^{0.5} q^{0.5}$	
Kotoulas	1967	$H_t + H_s = 0.78 h^{0.35} q^{0.7} / D_{90}^{0.4}$	
Mirtskhulava	1967	$H_t + H_s = \frac{(2.4 \eta q / \omega - 6q / U_v) \cdot \sin \alpha}{1 - 0.175 \cot \alpha} + 0.25 H_t$	$\eta = U_{\max} / U_{\text{avg}}$ $\omega =$ 침강속도
Chee와 Padiyar	1969	$H_t + H_s = 2.126 h^{0.18} q^{0.67} / D_s^{0.63}$	
Chee와 Kung	1969	$\frac{H_t + H_s}{H_v} = 3.3 (\frac{q^2}{g \cdot H_v^3})^{0.3} (\frac{H_v}{D_s})^{0.1} \beta^{0.1}$	
Wu	1973	$H_t + H_s = 1.18 h^{0.235} q^{0.51}$	
Martins	1973	$H_s / H_t = 0.14N + 0.7H_t - \frac{0.73H_t^2}{N}$	*
Martins	1975	$H_t + H_s = 1.5 z^{0.1} q^{0.6}$	
USBR	1977	$H_t + H_s = 1.9 h^{0.225} q^{0.54}$	
Taraimovich	1978	$H_t + H_s = H_{cr} h^{1/4} \frac{\beta}{\alpha_{uh}} \phi \frac{\eta}{K_r \omega}$	**
Mason과 Mice	1984	$H_t + H_s = \frac{3.27 h^{0.5} q^{0.6} H_t^{0.15}}{g^{0.3} \cdot D_s^{0.1}}$	for model
		$H_t + H_s = \frac{(6.42 - 3.1 h^{0.1}) h^{0.05 + H_t/200} q^{0.6 - H_t/300} H_t^{0.15}}{g^{0.3} \cdot D_s^{0.1}}$	for prototype
Barfuss	1988	$H_t + H_s = \frac{2.432 q^{0.66} E_f^{0.33}}{g^{0.33} \cdot D_{90}^{0.32}}$	

* 이 식에서 $N = \left(\frac{Q^3 H_t^{3/2}}{a^2} \right)^{1/7}$

** β 는 여수로와 sky jump의 접선과의 각도, α_{uh} 는 plunge pool 상류하상과 수평면과의 각도, ϕ 는 속도 계수, K_r 은 암반의 강도계수를 나타낸다.

를 나타내므로 본 연구에서는 현재까지 수행되었던 많은 연구들을 분석하여 보편적으로 인정되고 있는 지배인자들을 선정, 과거 연구결과를 통한 모든 인자들에 대한 정성적 검토와 수집 가능한 과거 연구자들의 실험 및 현장실측 결과를 토대로 통계학적 정량적 검토를 거쳐 세굴 지배인자 및 세굴깊이 예측공식의 기본형태를 결정하고 단순하며 신뢰도가 높은 범용성있는 예측공식을 제시하고자 한다.

문헌조사에 따르면 세굴예측을 위하여 모형이나 원형의 여수로로부터 발생하는 켈에 의한 세굴을 통한 세굴 예측공식과 켈의 특성을 보다 쉽게 변화시키기 위하여 노즐(nozzle)을 이용한 세굴예측공식을 유도한 연구로 크게 분류할 수 있음을 알 수 있다. 예측공식의 형태와 실험범위는 각기 다를 뿐만 아니라 광범위하여 본 연구에서는 실제의 상황과 유사한 모형이나 원형의 여수로로부터 발생하는 켈에 대한 실험으로 연구범위를 한정시켰으며 인용된 식들은 표 1에 정리 기술하였다.

본 연구에서는 가능성 있는 세굴지배인자를 아래와 같이 선정하였으며 각 인자에 대한 도해적 정의는 그림 2과 같다.

$$H_s = f(D_n, D_s, q, U, \rho, H_s, H_t, h, z, H_b, \Delta\rho_g, \mu, \theta) \quad (1)$$

여기서, D_n =켈의 두께; D_s =하상입자의 크기; q =단위폭당 유량; U =켈의 평균 충돌유속; ρ =유체밀도; H_s =평형세굴심; H_t =하류수심; h =상하류 수면의 차; z =여수로의 경우 상류저수지로부터 여수로 하단부까지의 높이차; H_b =단락부에서의 수심; $\Delta\rho_g$ =하상재료와 유체단위 중량의 차; μ =점성계수; θ =낙하수맥의 충돌각이다.

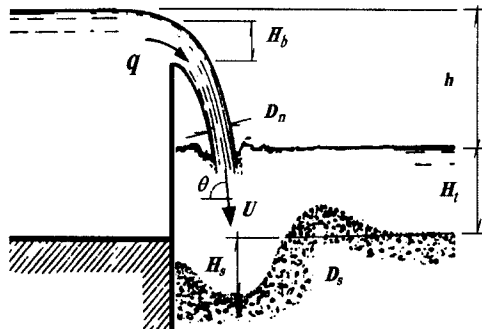


그림 2. 단락수맥에 의한 세굴지배 가능인자

연구자에 따라 예측공식에서 나타나는 세굴깊이를 하류수심(H_t)과 평형하상으로부터의 세굴깊이(H_s)를 더한 값으로 정의하기도 하고 평형하상으로부터의 세굴깊이(H_s) 자체로 표기한 경우도 있어 본 연구에서는 연구자들이 세굴깊이에 대한 정의를 불분명하게 명시한 경우에는 H 로 표기하였다.

Doddiah 등(1953)은 원형 켈에 의한 세굴에 대한 연구에서 침강속도를 주요지배인자로 취하여 켈의 평균 속도(U), 켈의 지속시간(T) 그리고 하상입자의 침강 속도(ω)와의 관계식 유도를 시도하였으며 Neill과 Giessen(1966)은 차원해석을 통하여 2차원 개수로에 대한 최종적 세굴예측공식을 다음 형태의 식으로 유도하였다.

$$\frac{\rho U^2}{g(\rho_s - \rho) D_s} = f\left(\frac{D_s}{H_t}, \frac{\rho_s}{\rho}\right) \quad (2)$$

좌변항은 밀도 프루이드수 (densimetric Froude number; F_{rd}) 를 나타내며 일반적으로 하상토 입자의 밀도가 크게 변하지 않는 사실을 감안하면 윗식은 F_{rd} 와 D_s/H_t 와의 함수로 압축시킬 수 있으며 Neill과 Giessen(1966)의 실험결과는 실제로 이들 F_{rd} 와 D_s/H_t 간에 높은 상관관계가 있음을 나타낸다. 따라서 윗식은 다음과 같은 형태의 식으로 요약할 수 있다.

$$F_{rd} = f\left(\frac{D_s}{H_t}\right) \quad (3)$$

Maynard(1988)는 10편 이상의 논문을 인용하여 다음과 같은 형태의 기본식을 채택하였으며 이 식은 윗식과 그 형태가 일치함을 쉽게 알 수 있다.

$$\frac{D_s}{H_t} = C \cdot F_{rd}^x \quad (4)$$

Thimarkon 등(1976)은 여수로의 플립버킷(Flip Bucket)에 의한 자유수맥과 세굴깊이에 관한 연구에서 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{D_s}{H_s} = f\left(\frac{Q^2}{g H_s^5}, \frac{H_t}{H_s}\right) \quad (5)$$

이상의 식들은 지배인자를 최소화시키기 위하여 차원 해석을 실시한 결과 얻은 식들이나 또 다른 많은 연구자들은 차원을 가진 변수들을 이용하여 세굴깊이를 예측하는 경험식들을 제시하였다.

Schoklitch(1932)를 시작으로하여 Kotoulas(1967),

Chee와 Padiyar(1969)가 식 (6)과 같은 형태의 식을 제시하였으며 특히 Chee와 Padiyar(1969)는 세굴깊이 뿐만 아니라 세굴공의 각종 기하학적 크기도 동일한 형태의 식을 이용하여 예측하였다.

$$H = \frac{K_1 q^{x_1} h^{y_1}}{D_s^z} \quad (6)$$

Tallis와 Cronin(1970)은 윗식과 유사한 공식을 유도하였을 뿐만 아니라 모델은 다르나 플립버켈의 각도가 동일한 모델에 적용한 결과 잘 일치하지 않음을 알아내었다. 이와 같은 연구결과는 윗식에 나타난 지배인자 이외에도 다른 인자가 존재한다는 사실을 암시하고 있다고 할 수 있다. Damle 등(1966)과 USBR(1977) 그리고 Wu(1973)는 윗 식보다 단순한 식 (7)의 형태를 제시하였다.

$$H = K_2 q^{x_2} h^{y_2} \quad (7)$$

Martins(1975)은 h 대신 상류저수지 수면으로부터 플립버켈 끝단까지의 높이차(z_1)를 이용한 예측공식을 제시하였다.

$$H = K_3 q^{x_3} z_1^{y_3} \quad (8)$$

특히 Damle 등(1966)은 x 와 y 가 같다고 하였으며 Wu(1973)는 하상입자의 크기를 지배인자에서 제외시킨 이유를 입자들의 계속적인 마모에 의해서 입자의 크기가 작아지기 때문이라고 설명하고 있다.

Mason과 Mice(1984)는 26개의 모델과 원형을 조사 분석하여 식 9와 같은 형태의 식을 제시하였다.

$$H = \frac{K_4 q^{x_4} h^{y_4} H_i^{0.15}}{g^{0.3} D_s^w} \quad (9)$$

여수로의 경우 여수로 끝단의 유속은 상류저수지 수면으로부터 플립버켈 끝단까지의 높이차(z_1) 및 그 사이에 발생하는 에너지 손실과 연관이 있으므로 z_1 대신 플립버켈 끝단에서의 쥘 에너지(E_j)를 이용한 예측공식의 형태가 Barfuss(1988)에 의해 제시되기도 하였다. 윤 등(1995)은 세굴공의 하류부에 둔덕의 유무에 따라 세굴깊이가 달라진다는 것을 알아내고 차원해석을 실시한 결과 다음과 같은 지배인자를 유도하였다.

$$H_s = f(F_{rd}, H_t, H_f, H_b) \quad (10)$$

여기서 H_f , H_b 는 자유단락 하상면과 하류수면까지의 높이차와 단락부 끝단에서의 수심을 나타낸다.

윗식의 H_f 와 H_b 는 Martins(1975)의 지배인자 z 를 의미하며 따라서 윗식은 다시 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$H_s = f(F_{rd}, H_T, z) \quad (11)$$

3. 세굴깊이 예측인자 선정

차원해석결과 유도된 무차원 세굴깊이 예측공식은 독립변수 갯수를 줄이는 효과가 있으나 결과식을 지수형태로 표현할 경우 독립변수 값의 지수치를 이용하여 유도된 선형 경험공식과 차이가 없다. 따라서 변수의 무차원화 실시 여부는 식 (1)에 나타난 변수의 유효성을 검토한 후 결정하기로 한다.

앞에서 인용된 관련문헌의 실험자료를 검토한 결과 모든 실험자료들은 상하류 수면차 h 또는 쥘의 입수유속 U 중 한가지를 지배인자로 선정하였음을 알 수 있었다. 이들 실험자료들을 동시에 이용하기 위해서는 수면차 h 로부터 입수유속 U 를 산정하거나 반대로 유속 U 로부터 수면차 h 를 산정하여야 한다. 많은 실험들이 수면차 h 를 측정하였으며 원형이나 모형에서도 공기가 연행된 쥘의 경우 유속측정에 많은 오차가 발생할 가능성이 높을 뿐만 아니라 정확한 쥘의 입수유속 예측에는 많은 어려움이 따른다. 또한 h 대신 상류저수지 수면으로부터 플립버켈 끝단까지의 높이차 z 를 이용한 예측공식은 Martins(1975)이 제시하였으나 입수 쥘의 특성 규명을 위해서는 플립버켈 끝단과 하류수면과의 높이차가 새로운 변수로 정의되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 상하류 수면차 h 를 변수로 사용하기로 하였으며 단락부에서의 수심 H_b 는 단위폭당 유량 q 로부터 유도가 가능하므로 독립변수에서 제외시키기로 하였다. 즉, U , z , H_b 는 독립변수에서 제외시켰다. 그러나 일부 연구자들이 차원해석을 통해 밀도 프루이드수 F_{rd} 를 무차원 변수로 채택한 경우가 있어 상하류 수면차 h 를 변수로 이용할 경우 입수유속 U 가 제외되어 밀도 프루이드수 F_{rd} 가 변수로서 채택될 수 있는 가능성을 근본적으로 제거하는 결과가 발생할 수 있다. 그러나 하상입자와 물과의 밀도차 $\Delta\rho$ 는 거의 일정하며 에너지 손실은 다소 있으나 상하류 수면차 h 로부터 입수유속 U 를 유도할 수 있어 변수에 하상입자의 크기 D_s 를 독립변수에 포함시킨다면 비록 예측공식에 밀도 프루이드수 F_{rd} 가 변수로 나타나지 않는다 하더라도 실제로는 밀도 프루이드수 F_{rd} 와 관련된 모든 변수는 반영된 예측공식이 된다.

Rajaratnam(1982)과 Stein 등(1993)의 경우 하류 수심을 기술하지 않았으나 이들의 실험이 하류수심 0.01-0.02m 범위에서 수행되었으며 세굴깊이는 최소한 하류수심의 7배 이상으로 하류수심이 세굴에 미치는 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

Kotoulas(1967)에 의하면 하류수심은 식 (12)와 같이 계산이 가능하며 실제로 본 연구의 자료를 이용하여 q 와 H_t 의 상관관계를 도식적으로 분석한 결과 아래 그림과 같이 대단히 밀접한 관계가 있음을 확인하였으며 그림 3에서 실선으로 표현된 Kotoulas(1967)의 식과도 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Rajaratnam (1982)과 Stein 등(1993)의 연구에 대한 하류수심의 결핍은 식 (12)를 이용하여 보완하였다.

$$H_t = \left(\frac{q}{C_f} \right)^{2/3} \quad (12)$$

여기서 $C_f = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g}$ 이며 Weir Coefficient $\mu = 0.7$ 이다.

공기연행이나 공기중 분산이 이루어질 경우 여수로 끝단의 형태에 따라 입수 켈의 두께 D_n 이 달라진다. 이에 대한 연구는 아직 찾아보기 힘든 실정이나 켈의 분산여부는 공중낙하 거리와 밀접한 연관이 있다는 연구결과가 발표된 바 있다. 또한 공기연행이나 켈의 공기중 분산이 이루어지지 않을 경우에는 에너지 방정식과 단위폭당 유량 q 및 상하류의 수면차 h 에 따라 산

정 가능하다. 따라서 q 와 h 가 독립변수에 포함이 된다면 입수 켈의 두께 D_n 은 독립변수에서 제외시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

Schoklitsch(1932), Hartung(1957), Kotouls(1967) 그리고 Doddiah 등(1953)은 켈의 입수경사각에 대해서는 기술하지 않았다. 이러한 경사각은 수리학적인 계산, 실험사진 등을 통하여 추정할 수 있으나 이들 연구들이 자유낙하 또는 입수경사각이 1.1 부터 1.5 라디안 (Radian) 범위에서 실시되었고 Beltaos(1974)는 경사켈이 평평한 수로의 운반을 따라 유발하는 전단응력과 켈의 입수각과의 관계에 대한 연구를 수행하여 그 결과 켈의 입수각이 1.047 라디안 (60°) 이상인 경우 최대전단응력의 변화는 거의 없는 것을 밝혀 내었다. Rajaratnam(1982)의 실험은 수직 켈에 의한 실험이므로 입수각 θ 는 1.57 라디안이다. 이와 같이 입수각이 세굴에 미치는 영향은 수직켈에 의한 세굴과 비교하여 큰 차이를 보이지 않으므로 무리한 입수각의 추정에 따른 오류를 피하고자 추정을 실시하지 않았을 뿐만 아니라 많은 켈의 입수각 θ 는 이 범위에 해당하므로 본 연구에서는 입수각 θ 를 독립변수에서 제외시키기로 하였다.

이상의 검토 결과 식 (1)은 식 (13)과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$H = f(D_s, q, H_t, h) \quad (13)$$

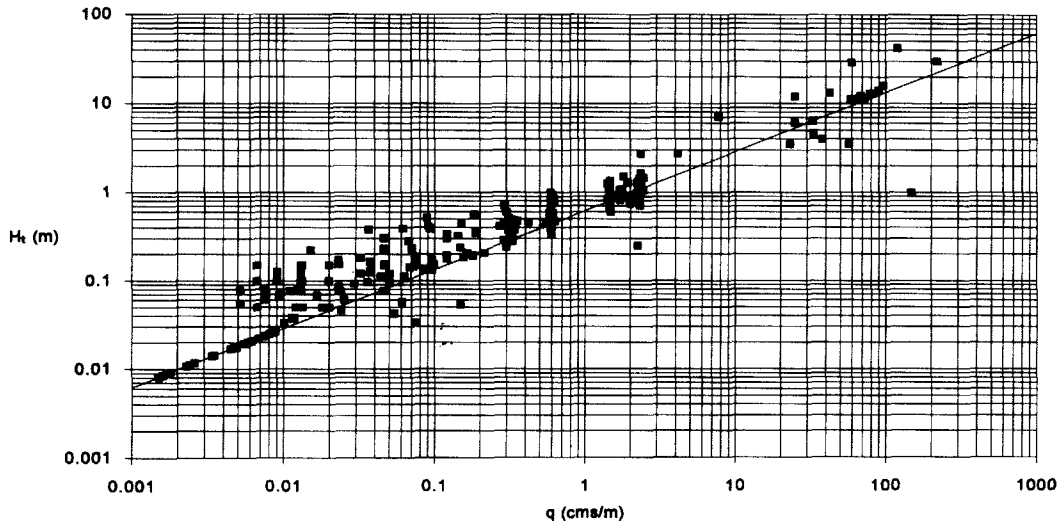


그림 3. q - H_t 관계도

4. 세굴예측공식 유도 및 비교검토

4.1 세굴예측공식 유도

현재까지의 세굴깊이 예측관련 문헌들을 검토한 결과 각 연구마다 각종 지배인자의 영향을 분석하기 위하여 실험을 단순화 시키거나 실험 범위가 국한된 문제점을 안고 있음을 알 수 있었으며 따라서 본 연구에서는 경사진 절에 의한 세굴에 대한 모형실험 또는 현장실측을 통하여 연구한 Schoklitsch (1932), Doddiah 등(1953), Hartung(1957), Kotulas (1967), Rajaratnam(1982), Chividine 등(1982), Mason(1983), Bormann 등(1991), Stein 등(1993) 그리고 윤 등(1995)의 실험 및 현장실측자료 500 여개를 기본자료로 이용하였으며 최대세굴깊이는 모형실험에서 발생된 수 센티미터부터 원형에서 관측된 약 2.5 미터까지 그 범위는 다양하다.

선정된 영향인자에 대한 검증은 독립변수의 일차항 및 2차항과 종속변수의 1차항, 독립변수의 일차항 및 2차항과 종속변수의 제곱항, 독립변수의 대수항과 종속변수의 대수항에 대하여 각각 다중회귀분석을 유의수준 5 퍼센트로 하는 표준축차법을 이용하여 실시하였으며 본 통계처리 과정에서 다중회귀식의 독립변수로 채택할 수 없다는 가설을 기각할 수 없는 항은 독립변수에서 제외시킴으로써 영향인자를 선정하였다.

종속변수 H 에 대하여 연구자에 따라 세굴깊이(H_s)만을 예측공식의 종립변수로 채택하는 경우와 하류수심(H_t)과 세굴깊이(H_s)의 합(H_t+H_s)을 하나의 종속변수로 택하는 경우가 있어 이에 대한 검증이 요구된다 하겠다. Thimakorn 등(1976)의 연구결과를 이용하여 하류수심(H_t)만을 변화시켜가며 세굴깊이(H_s)를 산정한 결과 (H_t+H_s)는 거의 일정한 값을 나타내어 최소한 Thimakorn 등(1976)의 연구결과로 미루어 볼때 하류수심(H_t)과 세굴깊이(H_s)는 (H_t+H_s)라는 하나의 종속변수로 단순화시킬 수 있는 가능성을 배제할 수 없음을 알 수 있었다. 따라서 독립변수중 하류수심(H_t)과 세굴깊이(H_s)를 (H_t+H_s)와 같은 하나의 변수로의 변환가능성을 검토하기 위하여 종속변수를 H_s 로 하였을 경우와 종속변수를 (H_t+H_s)로 하였을 경우에 대해서도 통계학적 다중회귀분석을 실시하였다. 그 결과, H_s 만을 종속변수로 택하였을 때 보다 (H_t+H_s)를 종속변수로 할 경우 훨씬 우수한 상관관계를 나타내었으며 이 경우 H_t 는 독립변수에서 제외시키는 것이 타당하다. 따라서 식 (13)은 식 (14)와 같이 다시 정

리할 수 있으며 이 경우 독립변수가 3개에 불과하여 차원해석을 실시하는 장점이 별로 없어 차원해석을 실시치 않고 경험식을 유도하기로 하였다.

$$H_t+H_s=f(D_s, q, h) \quad (14)$$

식 (14)에 대한 통계분석 결과 독립변수의 대수항과 종속변수의 대수항에 대한 다중회귀식이 $r=0.941$ 이란 가장 높은 상관관계를 보이는 식 (15)를 유도할 수 있었다.

$$H_t+H_s=0.802-\frac{q^{0.403} h^{0.067}}{D_{50}^{0.086}} \quad (15)$$

여기서 (H_t+H_s), h 및 D_{50} 의 단위는 미터이며 q 의 단위는 m^2/sec 이다.

4.2 유도 세굴예측공식의 비교검토

본 연구에서 유도된 세굴깊이 예측공식 식 (15)에 대한 검증은 본 연구과정에서 이용된 모든 기본 실험 및 실측자료와 여러 연구자들의 세굴깊이 예측공식을 이용한 예측치를 도해적으로 비교하여 실시하였다. 그림 4의 횡축은 여러 연구자들의 실험결과 실측치를 나타내며 종축은 각 연구자들이 제안한 예측공식을 이용하여 산정된 예측치이다. 각 연구별 실험범위는 다르나 실험범위의 확대 적용 가능성을 검토하기 위하여 타 연구의 실험조건도 적용하여 세굴깊이를 예측하였다. 만일 일반적으로 모든 실험범위에 대하여 적용 가능한 예측공식이 있다면 그 식에 의한 예측 세굴깊이는 실측치와 계산치가 동일한 즉, 그림 4에 나타나는 기울기가 일일이 되는 일직선과 일치되어야 할 것이다. 본 연구결과를 검토하기 위하여 일반적으로 널리 알려져 있는 절에 의한 세굴예측공식 다섯개와 본 연구의 예측공식을 여섯 연구의 합집합에 해당하는 실험조건에 대하여 적용하였다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 일부 공식은 실험범위를 벗어날 경우 타 연구자의 실험 또는 실측깊이와 큰 차이를 보이고 있어 공식을 이용한 세굴예측에 대한 낮은 신뢰도를 나타내고 있는 반면 본 연구결과는 기울기가 일일이 되는 일직선과 잘 일치하는 뛰어난 신뢰도를 보이고 있다. 본 연구이외에 USBR(1977)의 예측공식이 비교적 높은 신뢰도를 나타내나 세굴깊이가 작은 경우 실측치보다 작고 세굴깊이가 클수록 실측치보다 다소 커지는 경향을 보이고 있다. 또한 USBR(1977)의 예측공식은 그 형태면에서는 본 연구의 결과와 유사하나 지배인자로서 하상입자가 제외되어 있다는 것이 큰 차이점이다. USBR(1977)의 예측공식에서 하상입자의

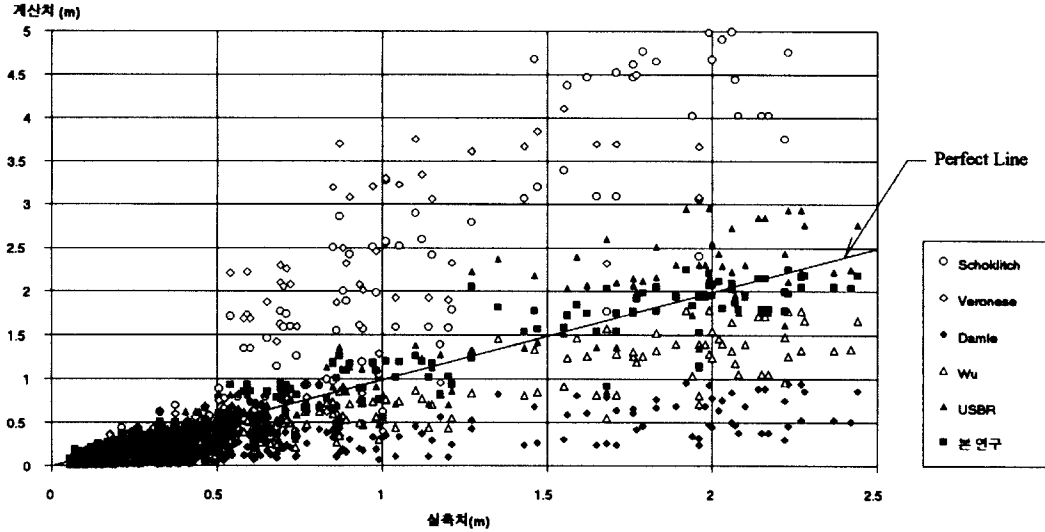


그림 4. 실측 세굴깊이와 각 연구자들에 의한 예측 세굴깊이의 비교

영향을 무시한 결과 세굴깊이가 커질수록 실측치보다 예측치가 커지는 경향은 수공구조물이 클수록 발생하는 세굴깊이가 커지며 이 경우 에너지 감세지에 설치하는 하상의 입자 또한 일반적으로 커지기 때문으로 설명할 수 있어 이와 관련된 보다 깊이있는 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 수직 또는 경사철헤에 의한 세굴에 대한 과거 10개 이상의 발표논문에서 사용한 실험 및 현장실측자료 500 여개를 기본자료로 이용하여 종합적인 분석 및 재검토를 통하여 현재까지의 실험에 대한 문제점 파악 및 앞으로의 연구방향을 모색하며 과거의 실험범위 및 결과를 이용하여 범용성있는 실험적 예측공식을 제시하였으며 연구수행중 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 하류수심(H_t)은 하류하상의 직윤기에 관계없이 단위폭당 유량(q)과 대단히 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

(2) 세굴깊이는 하류의 수심과 대단히 밀접한 관계를 가지고 있으며 하류수심(H_t)과 세굴깊이(H_s)를 ($H_t + H_s$)라는 하나의 종속변수로 단순화시킬 수 있음을 확인하였다.

(3) 세굴 지배인자는 단위폭당 유량, 상하류 수면의 차, 그리고 하상입자의 크기로 나타났으며 이상의 인자를 독립변수로 한 세굴깊이 예측공식은 $r = 0.941$ 이란

높은 상관관계를 나타내었다. 그러나 세굴심이 2 m 이상에 대해서는 실측치보다 다소 적은 예측치를 나타내고 있으므로 사용에 주의를 요한다.

(4) 하상입자는 세굴지배인자로서 포함되어야 하며 이에 대한 보다 깊이있는 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

(5) 모형을 통하여 유도된 세굴깊이 예측공식의 실험 범위를 벗어나는 원형에 대한 인용에 세심한 주의가 필요한 것으로 확인되었으며 실험 규모의 영향에 대한 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 1997년도 영남대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 윤 세의, 이 종태, 손 광익, 김 준현 (1995). "자유낙하 수맥 하류부에서의 세굴에 관한 실험적 연구." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권, 제4호, pp.147-154.
- Barfuss, S. L. (1988). *Pre-excitation of riprapped scour holes below flip bucket spillway*. Thesis of Utah State Univ., Dept. of Civil eng.
- Beltaos, S., and Rajaratnam, N. (1974).

- "Impinging circular turbulent jets." *J. of Hydraulics*, ASCE, Vol. 100, No. 10, pp. 1313-1328.
- Bormann, N. E., Julien, and Pierre, Y. (1991). "Scour Downstream of grade-control structures." *J. of Hydraulics*, ASCE, Vol. 117, No. HY5, pp. 579-594.
- Chee, S. P., and Padiyar, P.V. (1969). "Erosion at the base of flip bucket." *Engineering Journal*, Nov., pp.22-24.
- Chividine, M.F., Lopardo, R.A., Vernet, G.F., and C.M. Angelaccio (1982). "Evaluation de la socavation maxima aguas abajo de aliviaderos en salto de esqui." *Secretaria de Recursos Naturales y Ambiente Humano*. Instituto Nacional de Cienciay Technica Hidricas, Argentina
- Damle, P. M., Venkatraman, C.P., and Desai, S.C. (1966). "Evaluation of scour below ski-jump buckets of spillways." *Golden Jubilee symposium*, Government of India, Ministry of Irrigation and Power, Central Water and Power Commission Vol.1, Model and Prototype conformity, pp. 154-163.
- Doddiah, D., Albertson, M.L., and Thomas, R. (1953). "Scour from jets." *IAHR 5th Congress*, Minneapolis, Minn. Vol.1, pp. 161-169.
- Hartung, W. (1957). *Die Gesetzmäßigkeit der Kolkbildung hinter überströmten Wehren*. Dissertation, Technischen Hochschule Braunschweig.
- Kotoulas, V. D. (1967). *Das kolkproblem unter besonderer berücksichtigung der faktoren zeit und geschiebemischung im rahmen der wildbachverbauung*. Dissertation, Prom. Nr. 3983, Technischen Hochschule Zürich
- Martins, B. F. (1975). "Scouring of rocky riverbeds by freejet spillways." *Water power and dam construction*, Apr., pp 152-153.
- Mason, P. J., and Mice (1984). "Erosion of plunge pools downstream of dams due to the action of free-trajectory jets." *Proceedings Institution of Civil Engineers*, Part 1, 76, May., pp.523-537.
- Maynard, S. T. (1988). *Stable riprap size for open channel flows*. Technical Report HL-88-4, Waterways Experiment Station, COE, Dept. of the Army, Vicksburg, Mississippi.
- Neill, C. R., and Giessen, V.D. (1966). "Discussion on 'Sediment transportation Mechanics : Initiation of motion'." *J. of Hydraulics div.*, ASCE, Vol. 92, No. HY5, pp. 281-287.
- Rajaratnam, N. (1982). "Erosion by unmerged plane water jets." *Applying Research to Hydraulic Practise*, Jackson, ASCE, NewYork, pp. 262-267.
- Schoklitsch, A. (1932). "Kolkbildung unter Ueberfallstrahlen." *Die Wasserwirtschaft*, Nr. 24, pp. 341-343
- Stein, O.R., Julien, P.Y. and C.V. Alonso (1993). "Mechanics of jet scour downstream of a headcut." *J. of Hydraulic Research*, Vol. 31, No. 6, pp. 723-738
- Tallis, J. A., and Cronin, D.L.R. (1970). "Discussion on 'Erosion at the base of flip buckets'." (Engineering Journal, Nov., pp 22-24, 1969). *Engineering Journal*, Mar.
- Thimakorn, P., Arbhahirama, A., and Chaturapitophol, S. (1976). "Model of spillway - A case study." *Diamond Jubilee Symposium*, Central Water and Power Research Station, Khadakwasla, Pune, India Vol. 1, Paper A2.
- USBR (1977). *Design of Small Dams*. A Water Resources Technical Publication, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Wu, C. M. (1973). "Scour at downstream end of dams in Taiwan." *International symposium on river mechanics*, Vol. 1, IAHR, Bangkok, Thailand, Jan., pp. A13.1-A13.6.

〈최종본 접수일 : 1997년 11월 19일〉