

수위변화에 따른 교각주위에서의 세굴현상연구

Scour around Bridge Piers in the Stage Hydrograph

안 상 진* · 연 기 석** · 김 종 섭*** · 김 응 용****

Ahn, Sang Jin · Yon, Kee Seuk · Kim, Jong Sub · Kim, Ung Yong

Abstract

This study aims at examining closely the scour around a pier due to irregular water stage changes during flood. At the Sangye bridge is located lowermost downstream of the Bocheong stream in the Kum River, the IHP experimental watershed. For this purpose, we have analyzed the change of scour depths due to stage hydrographs of experimental basin by a simulation. To examine the scour phenomenon around a pier due to irregular stage change in flood, we have analyzed the change of scour depth corresponding to stage hydrograph of field watershed after verification of model channel. From this study, the following conclusions are made: First, in case of predicting the maximum scour depth around a pier with stage hydrograph in the state of steady flow, we should choose the highest stage. Second, after increasing the stage, the equilibrium scour depth became smaller than the maximum scour depth. Therefore, in case of estimating the maximum scour depth in rivers, it is recommended that we should consider additional scour depth which is reduced by infilling the sediments.

요 지

본 연구는 실제하천에서의 불규칙한 수위변화에 따라 교각주위에서 발생하는 세굴현상에 대하여 규명하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 IHP 대표유역인 금강수계내 보청천 최하류 지점에 설치되어 있는 산계교를 중심으로 최근 15년 동안에 발생된 6개 홍수사상에 대한 수위수문곡선을 선택하여 모형실험을 실시하였다. 모형수로는 실제하천과 모형수로에서의 조도계수 실측, 모형수로 경사변화에 따른 최대세굴심도의 변화, 실제하천과 모형내 하상재료의 침강속도와 마찰속도의 비를 검토하여 하상경사를 결정하고 실제하천에서의 세굴심도를 직접 측정하여 모형수로 실험결과와 비교함으로써 모형수로를 검증하였다. 실험 결과, 정류상태에서 모형실험을 실시하여 실제하천에 대한 최대세굴심을 예측할 경우에는 최고수위를 택하여 실시해야 하는 것으로 판단되며, 수위수문곡선 하강시 평형세굴심도는 최대세굴심보다 작으므로 실제하천에서 세굴심을 실측할 경우에는 퇴매우기에 의해 감소된 만큼의 세굴심을 고려해야 할 것으로 판단된다.

Keywords : maximum scour depth, scour, scour depth, sediment, stage hydrograph

* 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 대전산업대학교 도시공학과 교수

*** 대전산업대학교 도시공학과 조교수

**** 충북대학교 대학원 박사과정 수료

1. 서론

1.1 연구의 필요성 및 목적

교각 주위에서의 세굴현상은 유수의 흐름에 의하여 수로를 구성하고 있는 하상재료가 이동 또는 제거됨에 따라 수로 단면이 확장되는 현상으로 정의할 수 있다. 이 현상은 흐르는 물에 의한 침식활동, 수로내 하상 굴착현상 및 하천의 수로단면으로부터 침식된 재료의 운반작용들을 포함한다. 따라서, 서로 다른 하상재료로 구성된 하천은 세굴비율에 차이가 있다. 비점착성 토양은 하상에 작용하는 유체의 힘에 의해서 빠르게 침식되는 반면에 점착성 토양은 세굴에 저항하는 힘이 비점착성 토양에 비해 크다. 일반적인 세굴예측에 대한 방법은 아직 없으므로 최대세굴심도와 평형세굴심도의 정확한 예측은 많은 학자들의 중요한 관심사이고 홍수시 교량 또는 교각이 붕괴 또는 훼손되었을 때 인명 또는 재산상의 피해를 생각하여 우리 실정에 적합한 세굴공식을 도출하여 기존 교각의 안전점검을 실시하고 또한 새로운 교량을 건설할 때 세굴량을 산정할 세굴공식 도출이 시급한 실정이다.

또한, 교각 주위에서의 국부 세굴은 구조물 설치에 따라 흐름의 간섭현상 때문에 일어난다. 다시 말하면 설치된 구조물들이 흐름을 가속화시키고 이 가속화된 흐름은 와류(Vortex)를 발생시키며 이 와류에 의하여 하상의 변화가 일어난다. 따라서 국부 세굴을 해석적으로 취급하는 이론적인 접근방법은 주로 와류계에 기초하고 있으며 세굴에 영향을 주는 와류계를 크게 나누면 마제형 와류, 반류형 와류 및 Trailing형 와류로 알려져 있다. 그러나 이러한 와류계로부터 세굴 현상의 역학적인 거동을 적절하게 기술하기가 쉽지 않으며 또한 이론적 정립도 현재까지 확실하게 이루어지지 않은 상태이기 때문에 실제하천에 적용하기에는 큰 어려움이 있어 앞으로 더 많은 연구가 필요하다. 실제적으로 하천내 흐름의 특성이나 하상재료들에 의한 상호작용이 상당히 복잡하게 연결되어 있어 어느 일정한 인자에 의한 영향만을 고려하여 세굴심도를 파악하는 것은 매우 어렵다. 또한 실제하천에서의 현상을 완벽하게 실험수로서 구현할 수 없으므로 가능한 한 여러가지 상사인자들을 검토하여 가장 적합한 실험수로를 설치하고 모형실험을 행할 때 바람직한 결과를 얻을 수 있다.

따라서 본 연구는 금강수계내 충북 보은군 보청천 최하류 지점에 설치되어 있는 산계교를 중심으로 홍수시 불규칙한 수위변화에 따라 교각주위에서 발생하는

세굴현상에 대하여 규명하는 것을 목적으로 하며 이를 위하여 실제하천의 수문곡선에 대한 세굴심도의 변화를 모형실험을 통하여 분석하였다.

1.2 연구동향

교각 주위에서의 세굴에 대한 흐름의 형태와 전단력을 현장에서 측정하는 것은 매우 어려우므로 대부분 모형실험에 의하여 세굴심도를 측정하여 왔다. 최초의 실험은 1873년 Durand-Claye에 의해 행해졌다.

Cornelism(1982)는 Durand-Claye의 실험에서 교각의 형상을 사각형, 원형, 삼각형으로 나누어 실험을 행하고 사각형 교각에서 최대세굴심도, 삼각형 교각에서 최소세굴심도가 발생한다고 보고한 바 있다. 그 후 Ishihara(1945), Laursen과 Toch(1956), Tanaka와 Yano(1967)에 이어 Shen 등(1969)은 지금까지의 세굴이론을 요약, 정리하는 한편, 세굴에 영향을 미치는 마제형 와류계를 이론적으로 구명하였고, 또한 국부세굴의 특성에 대하여 연구하였으며, 교각 레이놀즈수로 세굴심도를 나타내는 실험식을 제안하였다.

Laursen(1952)은 한계소류력과 저면소류력이 같게 되는 상태를 이론적으로 고찰하였으며, 단면축소에 의한 세굴에 대해 연구하였다. Jain과 Fisher(1981)는 유속에 따른 Froude수와 세굴깊이와의 관계를 연구하였으며, Hughes(1980)는 세굴속도를 여러가지 하상재료를 이용하여 실험을 행하였고, Altinblek(1973)는 수직 jet류에 의한 하상세굴에 대하여 고찰하였다.

이후 많은 학자들에 의해 실험이 행하여졌으며 최근에 이르러서는 Jain과 Fisher(1981), 鈴木幸一(1981), 高橋晃(1982), Raudkivi와 Ettema(1977), Rajaratnam과 MacDougall(1983) 등의 연구가 있다. 1980년대 후반에 Melville과 Sutherland(1988)이 그 동안의 연구결과를 좀 더 넓게 적용할 수 있도록 이론적인 보완과 새로운 공식을 제안하였으며, 1990년대에 들어서는 세굴에 대한 다양성있는 연구와 더불어 수치모델을 이용한 세굴심도 파악이나 압력흐름에 의한 세굴특성에 관한 연구, 조류의 영향을 받는 지역에서의 세굴연구, 현장에서의 실제 세굴현상 측정을 통한 연구, 안정성 평가를 위한 체계적인 접근이 이루어지고 있다 (Abed, 1991; Jones 등, 1993, Richardson과 Richardson, 1990; Richardson과 Abed, 1993).

한편 국내에서는 1980년대 이전까지는 세굴에 대한 연구는 거의 없었으며, 1980년대에 들어 석사 논문형태로 주로 연구가 진행되었다. 1990년대 이후 이정규

(1992)는 상대세굴심에 미치는 영향인자를 평가하고 세굴방지장치에 따르는 세굴감소 효과를 분석하였으며, 김종섭(1994)은 금강수계내 보청천에 적용가능한 공식을 제안하였고, 안창진(1994)은 접근각도계수 K_a 와 Froude 수에 따른 표현식을 제안하였다. 또한 안창진 등(1993)은 기존에 사용되는 세굴공식을 종합정리하는 한편 현장실측된 자료와 비교를 통하여 기존 공식을 비교분석하였으며, 안창진 등(1995)은 세굴심에 영향을 미치는 인자들인 수심, Froude 수, 개도비 및 접근각 등의 영향을 실험을 통해 분석하였고, 안창진 등(1994)은 압력변화 전후의 세굴심도를 비교하였으며 Froude 수의 변화, 개도비 변화에 따른 최대세굴심도를 도표화하여 설계에 참고하도록 하였다.

2. 실험장치 및 모형교각의 설치

2.1 실험수로 및 실험장치

본 연구를 위한 실험장치는 길이 12m, 폭 0.4m, 높이 0.4m의 개수로를 이용하였다. 설치된 실험수로는 양측 벽면이 유리로 되어 있어 흐름을 관찰할 수 있고, 하상경사를 0.0~0.4% 범위까지 변화시킬 수 있도록 되어 있다. 세굴현상을 파악하기 위한 하상재료는 수로의 중앙으로부터 수로바닥에 깊이 10cm, 길이 6m로 깔았으며, 이때 사용된 하상재료는 보청천내 산계지점에서 채취된 평균입경이 0.8mm인 모래를 이용하였다. 유량은 밸브에 의해서 조절이 가능하고, 수로의 상류부에 설치된 보조수조에는 삼각위어가 설치되어 있어 유량을 측정할 수 있으며, 수로하류단에는 수직 수문이 설치되어 있어 흐름상태를 조절할 수 있다. 또한 수로 상단부의 보조수조와 수로 사이에 screen이 설치되어 있어 흐름상태를 일정하게 유지하도록 할 수 있다. 유속계는 프로펠러형으로 회전수를 측정하고 이를 유속환산 공식에 대입하여 유속을 계산하도록 되어 있다. 접근유속의 측정은 유속계를 이용하여 모형교각으로부터 상류 약 1m

지점에서 수면으로부터 수심(y)의 0.6 y 에 해당하는 1점 유속을 3회 측정하여 평균하여 사용하였다. 수심의 측정장치는 vernier형의 point gage를 이용하였으며 유속계와 마찬가지로 수로의 전구간을 이동시켜 수심의 측정이 가능하다. 설치된 실험장치의 개략도는 Fig.1과 같다.

2.2 모형교각의 설치

교각의 모형은 실험대상 하천인 보청천 산계교 교각의 형상과 동일하게 시멘트 모르타르를 사용하여 축척 1/40으로 반원형교각을 제작하였으며, 교각의 폭(b)은 2.5cm이고, 교각의 길이(L)는 6.75cm로서 교각형상비 (L/b)는 2.7을 사용하였다. 이 축척은 교량의 1개지간의 폭 15 m와 실험수로의 폭 40 cm와 1:40의 비율로 일치되는 축척이며, 이를 모형교각에도 적용하였다. 또한 교각의 표면은 조도를 무시할 수 있도록 Film으로 포장하였으며, 실험에 사용된 교각의 모형은 Fig. 2와 같다.

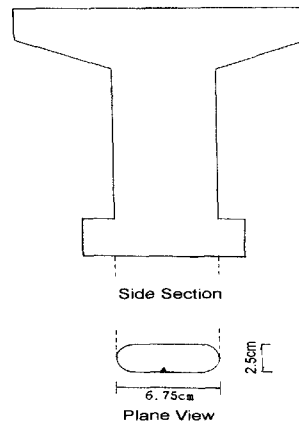


Fig. 2 Model of Pier Used for Experiment

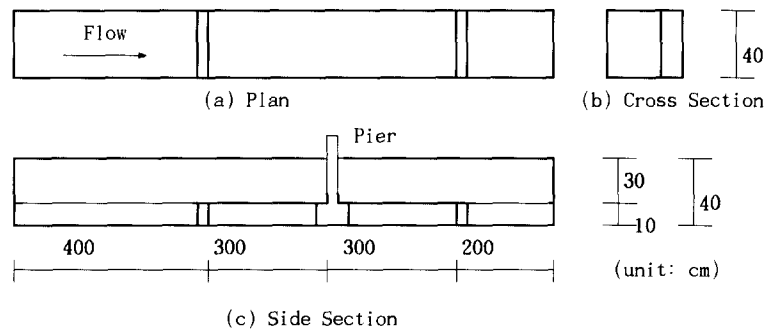


Fig. 1 Open Channel Apparatus for the Experiment of Local Scour

3. 모형수로의 검증

3.1 적용 상사법칙의 선정 및 실험수로의 조도 계수 산정

유체에 작용하는 주요 외부적 힘은 중력, 점성력, 압력, 표면장력 및 탄성력인데, 이들 각각의 힘 성분 크기의 비가 실제하천과 모형에서 전부 동일하여야만 완전한 동역학적 상사가 성립된다. 이 외부적 힘들과 관성력(inertial force)과의 비를 각각 무차원량으로 식 (1)과 같이 표시할 수 있다. (1)

$$f \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}, \frac{\rho VL}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{\Delta p/\rho}}, \frac{\rho V^2 L}{\sigma}, \frac{\rho V^2}{E} \right) = 0$$

여기서, $\frac{V}{\sqrt{gL}}$ 는 Froude수, $\frac{\rho VL}{\mu}$ 는 Reynolds수,

$\frac{V}{\sqrt{\Delta p/\rho}}$ 는 Euler수, $\frac{\rho V^2 L}{\sigma}$ 는 Weber수 및

$\frac{\rho V^2}{E}$ 는 Cauchy수이며, 이 5개의 무차원량의 비가

동일할 때 완전한 유체에 대한 동역학적 상사가 이루어진다. 실제적으로 5개의 무차원량의 비를 일정하게 하는 것은 불가능하므로 실험 목적에 따라서 유체의 흐름을 지배하는 주요한 힘의 요소, 또는 요소들만을 주로 고려하여 축척을 결정하는 것이 보통이다. 따라서 개수로에서의 흐름은 주로 중력에 의한 영향이 다른 힘에 비하여 크므로 본 연구에서는 이 중 Froude 상사법칙을 실험수로 설치할 위한 기본 상사법칙으로 채택하였다.

교각주위에서의 세굴현상에 대한 모형실험을 실시하기 위해서는 적용하천에서의 특성을 파악하는 것이 필요하며, 이중에서 특히 하천내 흐름을 좌우하는 하상의 조도계수를 파악하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 적용하천인 보청천내 산계교가 위치한 하상에서의 조도계수를 그 동안 IHP 조사(건설부, 1982~1995)를 통하여 관측되어온 수위 및 유량자료를 이용하여 산정하였다. 조도계수의 산정 결과는 Fig. 3과 같으며, 그림에 나타난 바와 같이 조도계수는 수위에 따라 조금씩 상이하나 전반적으로 0.027 ~ 0.048의 범위에 있다.

그동안 발표된 토사의 세굴, 유송등에 관한 실험결과를 살펴보면 유사이동의 실험을 위한 이동상 모형수로는 정확한 정량적인 상사성을 유지하는 것이 어려운 것으로 보고되어 있으며, 주로 정성적인 상사성을 얻어 수리현상을 예측하는 것으로 알려져 있다(Jain과 Fisher, 1981; Richardson과 Richardson, 1990).

이동상 모형에서는 정량적인 상사성을 얻을 수 없으므로 실제하천에서 여러 수리현상을 예측하기에 앞서

현장실험에서 얻은 이미 알고 있는 실제조건하의 하상형상을 모형에서 재연시킴으로써 실제하천과 모형의 수리학적 상사를 확인해야 되며 따라서, 지금까지 모형실험에 사용된 예를 검토해 보면 실제하천에서의 하상재료를 상사법칙에 의거하여 축소하여 사용하는 방법, 하상재료를 그대로 사용하고 다른 하천특성을 변화시키는 방법이 이용되고 있으며, 상사법칙에 의거하여 하상재료의 크기를 축소하는 방법을 이용할 때 특히 주의할 부분은 평균입경(d_{50})이 0.8mm 이하인 경우에는 실제하천과 유사한 이동 특성을 갖지 못한다는 점이다.

따라서 본 연구에서는 하천특성을 변화시키는 한 방법으로 모형수로의 하상경사를 변화시켜 가면서 각각의 하상경사에서 수위변화에 따른 조도계수를 산정하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다.

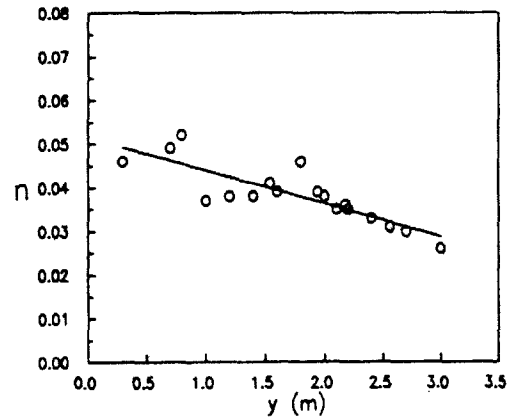


Fig. 3 Manning's Roughness Coefficient

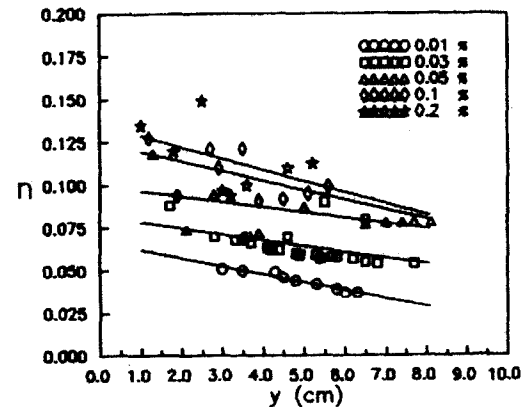


Fig. 4 Manning's Roughness Coefficient at Sangye Bridge in the Model Channel

3.2 모형수로내 하상경사의 산정

실제하천에서의 하상재료를 채취하여 체가름 분석한 결과 평균입경(d_{50})은 5.0mm이었으며 #4체를 통과한 시료만의 d_{50} 은 0.8mm이었다. 그동안의 여러 실험결과에 의하면 상사법칙에 의하여 크기를 축소할 때 d_{50} 이 0.8mm 이하인 경우에는 실제하천과 유사한 이동특성을 나타내기가 어렵다고 알려져 왔다. 따라서 본 연구에서는 d_{50} 이 0.8mm인 현장재료를 그대로 모형수로에 사용하기로 결정하였으며, 실험수로에 사용한 하상재료의 체분석 결과와 실제하천의 하상재료의 체분석 결과는 Fig. 5와 같다.

자연하천에서의 흐름은 일반적으로 난류상태이며 흐름에 따른 저항력은 마찰력보다도 형상항력(form drag)으로 인한 것이므로 Manning공식과 같은 경험공식이 적용될 수 있으며 상사법칙에 따라 쓰면 식 (2)와 같이 된다.

$$V_r = \frac{1}{n_r} R_r^{2/3} S_r^{1/2} \quad (2)$$

개수로에 있어서 수평방향의 유속(V)은 수심(Y)의 자승근에 비례하므로 모형에서의 유속비 V_r 과 시간비 T_r 은 Froude모형법칙에 따라 각각 식 (3) 및 (4)가 된다.

$$V_r = \sqrt{Y_r} \quad (3)$$

$$T_r = \frac{L_r}{V_r} = \frac{X_r}{Y_r^{1/2}} \quad (4)$$

여기서 X_r 및 Y_r 은 각각 수평방향 축척비 및 연직방향 축척비이다.

식 (3)에 식 (4) 및 $S_r = Y_r/X_r$ 을 대입하고 정리

하면 식 (5)가 된다.

$$n_r = \frac{n_p}{n_m} = \frac{R_r^{2/3}}{X_r^{1/2}} \quad (5)$$

본 연구에서는 앞에서 산정된 실제하천의 조도계수 및 실험수로에서의 조도계수를 이용하여 모형에서의 하상경사를 선정하였다. 즉 실제하천과 모형의 조도계수비(n_r)가 산정되었을 때 경사비는 식 (2)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

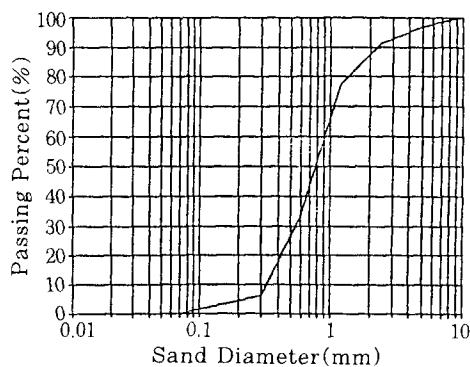
$$S_r = \frac{n_r^2 V_r^2}{R_r^{4/3}} = \frac{n_r^2 Y_r}{R_r^{4/3}} \quad (6)$$

이때 실제하천에서의 하상경사는 현장실측을 통하여 0.25%로 결정되었으며, 3.1절에서 산정된 조도계수중 홍수발생빈도가 높은 수심 2m의 조도계수인 0.04를 사용하고 산정된 모형수로의 조도계수를 적용한 결과 모형수로에서의 하상경사는 0.013%~0.065%의 범위를 나타냈다.

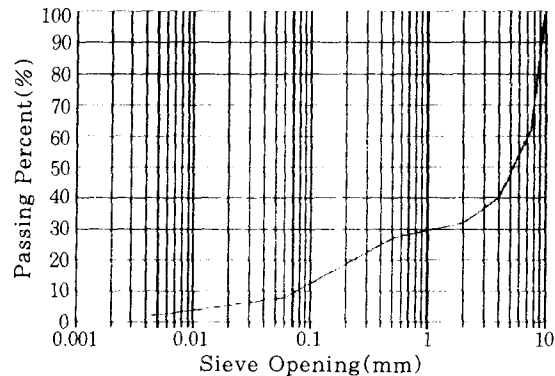
3.3 모형수로의 검증

3.3.1 부유사 이동 및 침강성 검토

교각 주위에서의 국부세굴은 교각 주위에 있는 모래가 부유사 또는 소유사의 형태로 이동하는 것인데, 흐름의 주요 특성인 유속에 따라 부유사 또는 소유사가 된다. 본 실험에서는 부유사를 감안한 실험을 수행하도록 계획하였다. 그동안 실시된 부유사 이동에 관한 많은 실험에서 유사의 침강속도(fall velocity, w)와 마찰속도(friction velocity, u_*)와의 비가 실제하천과 모형에서 동일하도록 하여 이동의 상사성을 유지하였는



(a) Experimental Channel



(b) Field Channel

Fig. 5 The Result of Sieve Analysis at Experimental Channel and Field Channel

Table 1. The Comparison with w/u_* for Prototype and Model Channel

	d_{50} (mm)	C_D	W_s	w (cm/s)	u_* (cm/s)	w/u_*	Remarks
Prototype	5.0	1.4	6.5×10^{-3}	1.92	0.20	9.60	
Model	0.8	1.5	2.5×10^{-8}	10.48	1.084	9.67	*
	0.9	1.1	3.5×10^{-8}	13.14	1.084	12.08	
	1.0	0.9	4.9×10^{-8}	15.27	1.084	14.09	

바, 본 연구에서도 부유사 이동의 상사성을 유지하고자 하였다.

하상경사 θ 인 하천에 물이 등류상태로 흐를 때, 단면적을 A , 구간거리를 L , 윤편을 P 라 면, 윤편에 작용하는 마찰력과 물무게 W 의 흐름방향의 성분에 대한 힘의 평형관계식은 다음 식과 같다.

$$\tau_o = W \sin \theta = \rho g L A \sin \theta = w L A \sin \theta \quad (7)$$

여기서 $\sin \theta = i$, $A/P = R$ 로 놓으면

$$\tau_o = w R i = w y i \quad (8)$$

여기서 y 는 수심이며, τ_o 는 유수가 수로의 윤편에 작용하는 단위면적당의 마찰력이고, 이것을 소류력이라 한다. 이 식에 마찰속도로 정의되는 식 $u_* = \sqrt{\tau_o / \rho}$ 을 고려하면 다음의 관계가 성립된다.

$$u_* = \sqrt{g R i} \quad (9)$$

침강속도는 무한대의 정지 유체에 토사입자를 강하시킬 때 갖게 되는 종말침전속도(terminal velocity)를 말하며 토사의 유송 및 침전해석에 있어서 토사입자의 중요한 성질중의 하나로 사용된다. 토사입자가 정수중으로 강하할 경우 침강속도(w)는 수중에서의 입자무게(W_s)와 입자의 하강에 저항하는 항력(F_D)이 평형을 이룰 때 얻어진다. 즉 $W_s = F_D$. 그런데, 수중에서의 입자무게, 항력 침강속도는 식 (10), (11), (12)와 같다.

$$W_s = \frac{1}{6} \pi d_s^3 (\gamma_s - \gamma) \quad (10)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D w^2 \frac{\pi d_s^2}{4} \quad (11)$$

$$w^2 = \frac{4}{3} \frac{g d_s}{C_D} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (12)$$

여기서 d_s 는 침전직경이며, γ_s , γ 는 각각 토사입자 및 물의 단위중량이고 ρ 는 물의 밀도, C_D 는 항력계수(drag coefficient)이다.

Table 1은 위의 식 (10), (11) 및 (12)를 이용하여 산정된 것으로 표에서 보는 바와 같이 실제하천에서의 d_{50} 인 5.0 mm를 이용한 w/u_* 는 9.6으로 나타났으며, 이때 모형수로에 사용한 하상재료의 d_{50} 인 0.8 mm를 이용한 w/u_* 의 비가 실제하천과 동일한 비를 나타내는 하상경사는 0.03 %로 선정되었다.

3.3.2 실제하천에서의 세굴심도 측정

모형수로와 실제하천과의 검증을 위하여 1995년 및 1996년 여름 홍수기를 통하여 실제하천에서의 세굴심도를 측정하였다. 측정대상 교각은 하천의 좌안에서 두 번째 교각부터 다섯번째 교각까지를 선정하였으며, 보청천 산계지점의 교각설치도는 Fig. 6과 같다. 그림에서 No.1, No.2, No.3의 교각은 유수방향으로 보아 좌안에 위치하여 평상시 항상 유수가 흐르고 있으며, No. 4, No.5의 교각은 고수부지에 있는 교각이다. 따라서 No.4와 No.5의 교각을 현장실험을 위한 교각으로 선정하였다. 세굴심을 판단하기위해 교각 부근의 세굴된 부분에 체인고리를 매설하고 중장비를 이용하여 퇴메우기를 한 다음, 홍수가 지나간 후 쓰러진 체인고리의 길이를 측정하는 방법으로 세굴심을 반복측정하였으며, 측정교각중 No.2 및 No.3 교각에 대하여는 현장의 조건

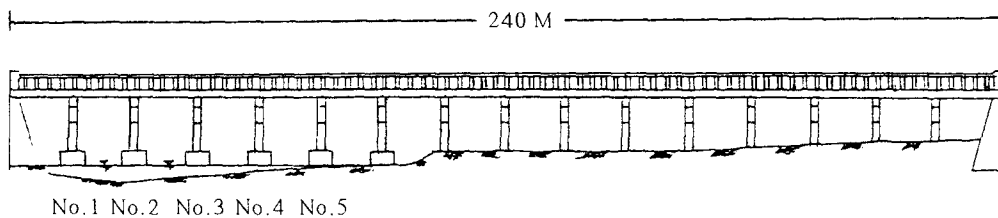


Fig. 6 The Pier Position at the Sangye Station, Bocheong Stream

Table 2. The Measurements of Maximum Scour Depth for Each Bridge Pier (unit : m)

No. of pier	1st measurement		2nd measurement		3rd measurement		4th measurement	
	water depth	scour depth	water depth	scour depth	water depth	scour depth	water depth	scour depth
No.2	3.55	1.64	2.60	1.42	-	-	-	-
No.3	3.40	1.59	2.48	1.37	-	-	-	-
No.4	1.96	0.76	0.48	0.17	1.88	0.75	1.83	0.70
No.5	1.96	0.80	-	-	1.88	0.75	-	-

이 되매우기를 할 수 없는 상황이므로 기왕의 홍수에 의해 현재까지 형성된 최대세굴심도로 간주하여 세굴심을 선상에서 측정된 자료를 이용하였다. 측정 결과는 Table 2와 같다.

3.3.3 모형수로에서의 최대세굴심도와 비교

앞절에서 측정된 실제하천의 세굴심도와 모형수로에서의 세굴심도를 비교하기 위하여 실험수로에서의 각각의

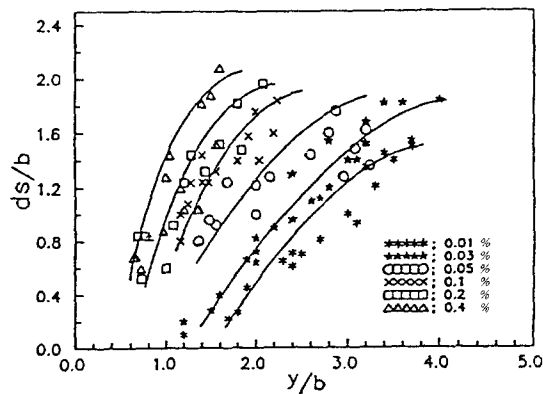


Fig.7 The Maximum Scour Depth in Model Channel

Table 3. The Comparison with Maximum Scour Depths for Model and Prototype Channel

Depth (prototype)		Maximum scour depth(proto.)		Maximum scour depth of each bed slope for model channel, (d_s/b)					
y (m)	y/b	d_s (m)	d_s/b	0.01%	0.03%	0.05%	0.1%	0.2%	0.4%
0.48	0.48	0.17	0.17	-	-	-	-	-	-
1.88	1.88	0.75	0.75	0.30	0.70	1.20	1.45	1.80	2.10
1.88	1.88	0.75	0.75	0.30	0.70	1.20	1.45	1.80	2.10
1.96	1.96	0.78	0.78	0.39	0.78	1.25	1.60	1.90	2.15
1.96	1.96	0.80	0.80	0.39	0.78	1.25	1.60	1.90	2.15
3.40	3.40	1.59	1.59	1.40	1.60	1.80	1.90	-	-
3.55	3.55	1.64	1.64	1.50	1.70	1.80	-	-	-

주 : 1. 실제하천의 수심(y)과 최대세굴심도(d_s)는 무차원화하기 위하여 교각폭($b=1m$)으로 나눈 수치임.
2. 실험수로는 축척 1/40임으로 $b=2.5$ cm로 나누어 무차원화함.

경사에 따른 수위와 세굴심도에 대한 실험을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타내었으며, 또한 Table 3에 정리하였다. 그림에서 보는 바와 같이 하상경사가 급해질수록 세굴심도 증가되며, 각각 경사별로는 수심이 증가할수록 세굴심의 증가율은 둔화되는 경향을 보이고 있다. Table 3에서 실제하천에서의 최대세굴심도(d_s/b)는 모형수로의 경사가 0.03%일 때의 모형수로에서의 최대세굴심도(d_s/b)와 거의 같음을 알 수 있다.

4. 정류 및 부정류상태에서 세굴현상 실험

4.1 수문자료의 선정

보청천 홍수시의 흐름에 대한 최대세굴심을 측정하기 위한 수문자료로써 보청천내 산계지점의 자기수위 기록 장치에 의한 기록지를 이용하였다. 수위기록은 1982년부터 1996년까지 최근 15년간의 자료중 최고수위기록 순으로 Table 4과 같이 1985, 1987, 1988, 1989, 1995, 1996년의 6년치를 선정하였다.

4.2 정류상태에서의 세굴심도

적용하천에서 정류상태의 세굴심을 측정하기 위하여 지속시간 200시간에 상사율을 적용하면 32시간이므로 이는 각 연도별 호우에 대한 실험수로에 있어서 실험지속시간이 된다.

Table 4. The River Stage Data at Sangye Station, Bocheong Stream

year	selection date	duration
1985	7. 6. 11:00 ~ 7. 14. 18:00	200 hr.
1987	7. 11. 05:00 ~ 7. 19. 12:00	200 hr.
1988	8. 13. 09:00 ~ 8. 22. 22:00	200 hr.
1989	7. 24. 17:00 ~ 8. 1. 24:00	200 hr.
1995	8. 19. 08:00 ~ 8. 27. 16:00	200 hr.
1996	6. 13. 12:00 ~ 6. 21. 20:00	200 hr.

Table 5. The Maximum Scour Depth by Average Stage and Maximum Stage at Sangye Station

Year	Avg. y/b	d_s/b	Max. y/b	d_s/b
1985	1.48	0.72	3.68	1.92
1987	1.12	0.20	2.48	1.24
1988	1.39	0.60	2.56	1.32
1989	1.40	0.64	3.00	1.72
1995	1.78	0.85	3.53	2.04
1996	1.35	0.45	2.50	1.30

또한 축척1/40에 해당하는 개도비는 93.8 %이 되어 이를 적용하였다. 따라서 대상 호우에 대한 평균 및 최대 수위로 32시간 실험한 결과는 Table 5와 같으며 시간에 따른 평균 및 최대세굴심도의 변화를 나타내고 있다.

Table 5로부터 평균수위와 최고수위에 의한 최대세굴심을 비교해 보면 '85, '88, '89, '95, '96년의 경우는 2배 이상의 차이가 있음을 알 수 있으며, '87년은 무려 6배의 차이를 보이고 있다. 따라서 정류상태에 의한 적용하천에 대한 최대세굴심의 예측실험을 할 경우에는 최고수위를 택하여 실시해야 할 것으로 판단되었다.

4.3 부정류상태에서의 세굴심도

실제 하천에서의 흐름상태는 부정류이다. 따라서 부정류 상태의 흐름을 실험수로에 재연시킴으로써 세굴심에 대한 정확한 변화를 알 수 있다. 이를 위한 지속시간은 정류경우와 마찬가지로 32시간으로 하였으며, 개도비 93.8 %를 적용하였다. 실제 수위곡선을 위한 실험수로의 수위변화는 유량조절밸브를 조작하므로써 일치시킬 수 있었다. Fig. 8은 유량조절밸브의 회전각에 대한 수위변화곡선을 나타낸 것이다. 실제 수위곡선에 대한 실험수로의 수위조절은 완만한 상승의 경우에는 1시간평균수위로, 급격한 상승의 경우는 15~30분 간격의 평균수위로 각 시간별 조작을 실시하였다.

Fig. 9(a)~(f)는 실험결과로써 각 시간별 수위의 변화에 따른 세굴심도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 수위의 변동과 지속시간에 따라 세굴심의 변화

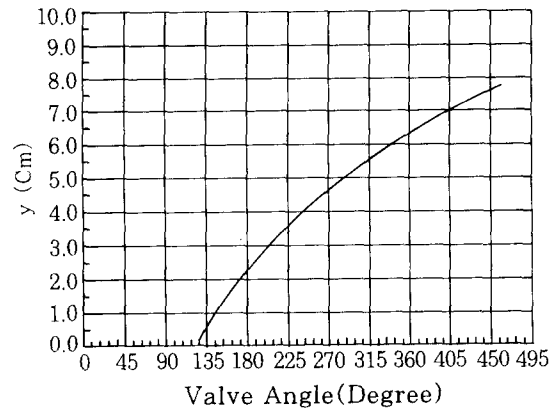
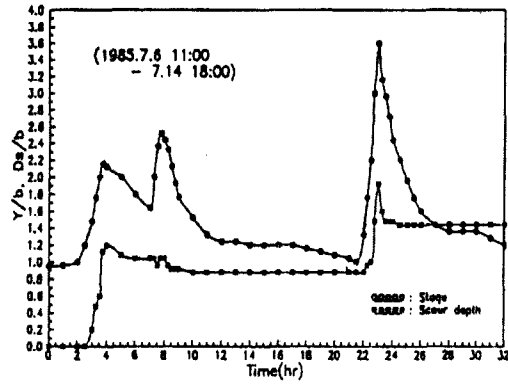
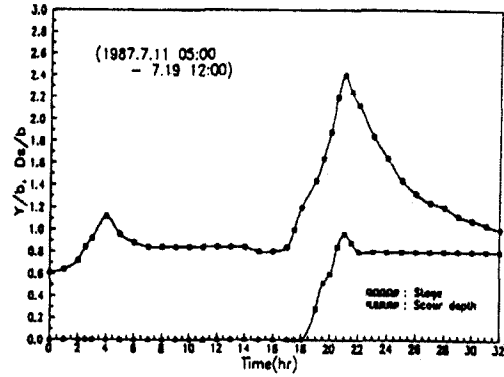


Fig. 8 Water Depth in Model Channel vs Rotary Angle of Discharge Control Valve

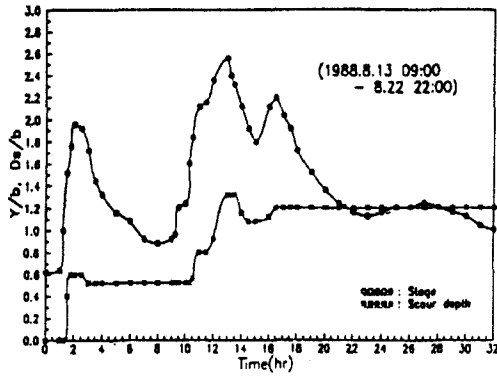
를 나타낸 것으로 수위가 급상승함에 따라 세굴심도 급격히 증가하는 경향이다. 21시간 후에 발생된 세굴은 초기발생 세굴보다 더욱 급격히 상승하여 그 결과로 최대세굴심에 이르렀고, 수위의 하강으로 최대세굴심도는 감소되어 평형세굴심으로 변화됨을 나타내고 있다. 따라서 수위곡선의 상승률과 지속시간은 세굴심에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었고, 또한 이러한 현상은 정류에서는 나타나지 않았던 것으로 세굴심의 예측시에 반드시 주의 깊게 고려해야할 점이라 생각되며, Fig. 9(b)~(f)에서도 같은 경향을 볼 수 있었다.



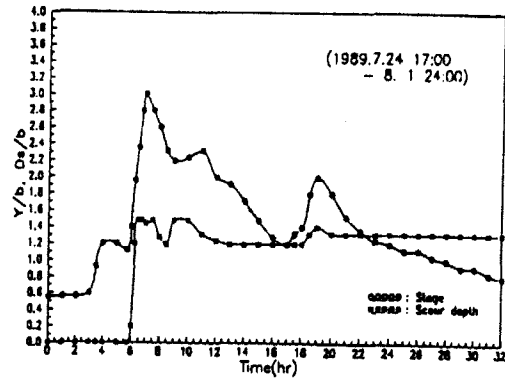
(a) 1985



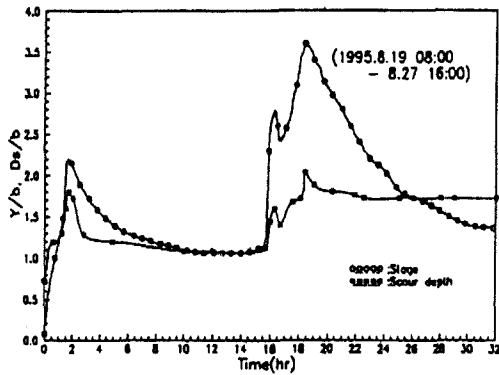
(b) 1987



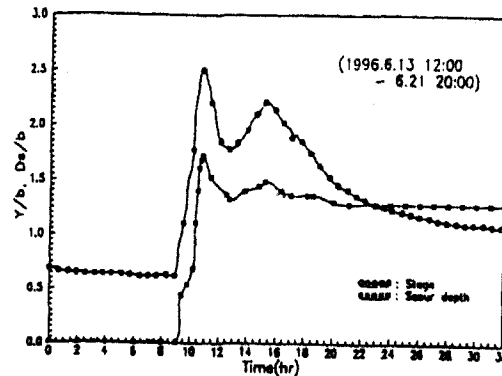
(c) 1988



(d) 1989



(e) 1995



(f) 1996

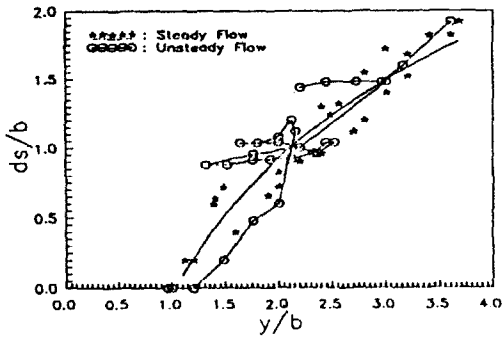
Fig. 9 The Variation of Scour Depth for Unsteady Flow in Each Year

Table 6은 적용하천인 보청천의 최대세굴심도와 평형세굴심도와의 변화를 비교한 것으로 평형세굴심도에 비하여 최대세굴심도가 평균 22% 더 크게 나타났다. 따

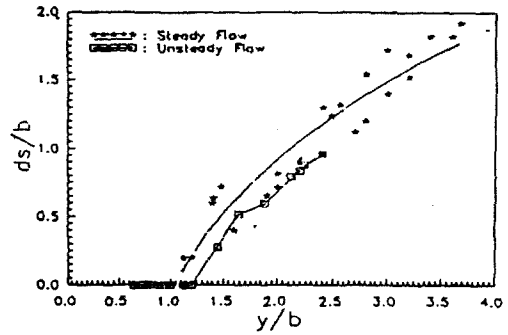
라서 강우종료후의 평형세굴심도는 최대세굴심도보다 작아지므로 실제하천에서 세굴심을 실측할 경우에는 감소된 만큼의 세굴심을 고려하여야만 할 것이다.

Table 6. Comparison of Maximum Scour Depth and Equilibrium Scour depth

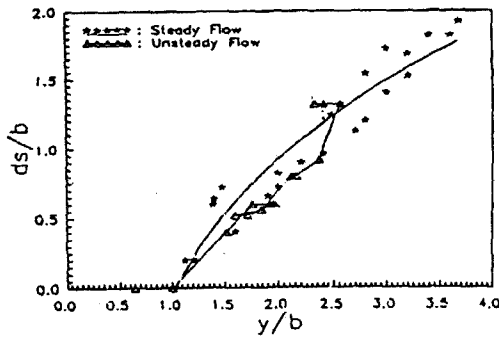
year	y/b	max. scour $d_s/b(A)$	equilib. scour $d_s/b(B)$	A-B	%
1985	3.68	1.98	1.40	0.58	29.3
1987	2.48	1.00	0.80	0.20	20.0
1988	2.56	1.34	1.20	0.14	10.5
1989	3.00	1.50	1.30	0.20	13.3
1995	3.53	2.10	1.80	0.30	14.3
1996	2.50	1.75	1.30	0.45	25.7
average					22.0



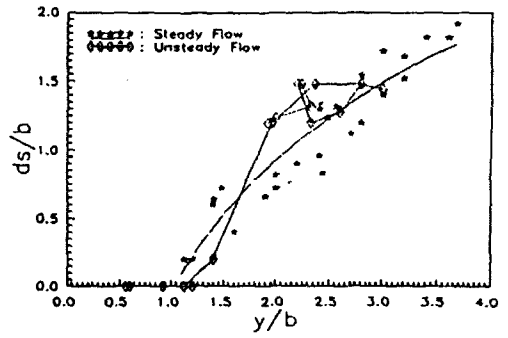
(a) 1985



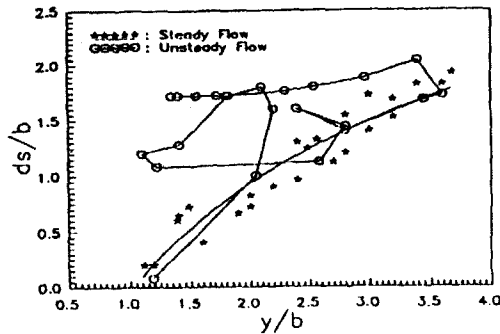
(b) 1987



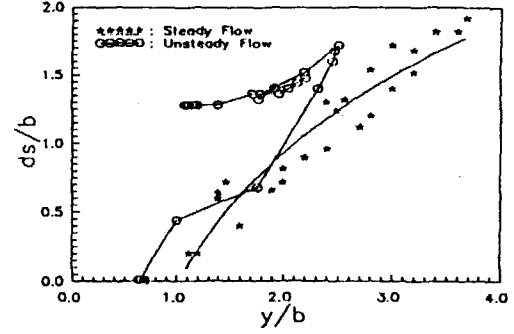
(c) 1988



(d) 1989



(e) 1995



(f) 1996

Fig.10 Comparison of Maximum Scour Depths of Steady and Unsteady Flow

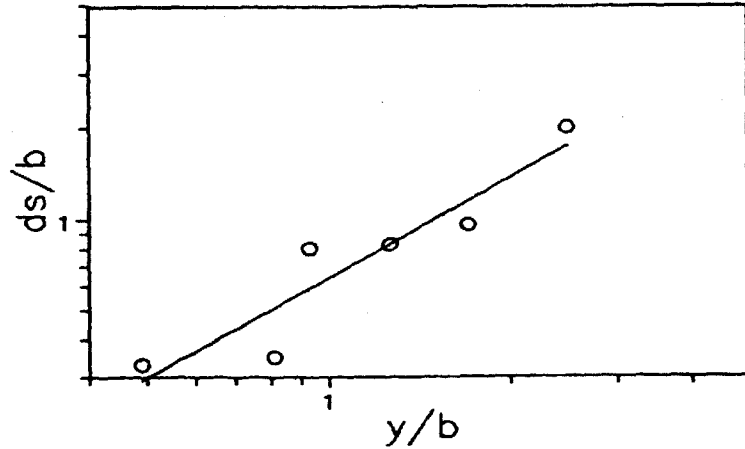


Fig. 11 The State of Scour Depth for Stage Variation by 1 Hour.

4.4 정류와 부정류상태에서의 비교 분석

부정류에 의한 세굴심에 대하여 수위의 변동과 지속 시간에 따라 변화되는 정도를 파악하기 위하여 정류의 경우와 비교, 분석하여 보았다. 따라서 이를 위하여 정류에 의한 최대세굴심도 자료로써는 수로 검증을 거쳐 보청천에 대하여 재연한 개도비 93.8%, 하상경사 0.03%에서 실험한 실험 결과를 사용하였으며, Fig. 10(a)~(f)는 이를 비교하여 나타낸 것이다.

위의 Fig.10(a)~(f)는 수심과 세굴심의 관계를 정류와 부정류에 의한 세굴심의 변화에 대하여 비교한 것이다. Fig.10(b)와 (c)에 있어서 부정류에 의한 세굴심의 변화는 비교적 정류상태의 최대세굴심과 잘 일치하고 있다. 그러나 Fig.10(a), (d), (e), (f)의 경우는 같은 수위에 있어서 정류상태의 최대세굴심보다 큰 값으로 변화되었다. 이는 짧은 시간에 강우강도가 큰 호우가 발생할 때 급격한 수위상승으로 일어나는 세굴현상으로 볼 수 있으며, 또한 지속시간이 길어질 경우의 세굴심은 더 증가될 수 있음을 시사한다. 이와 같이 급격한 수위의 상승에 따른 세굴심의 변화는 정류에 의한 최대세굴심보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 수위의 급상승으로 인한 stream power의 증가가 세굴심에 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. Fig. 11은 1985~1996년의 각각의 수위곡선(Fig. 9)으로부터 최고 수위일 때의 1시간당 수위변화에 따른 세굴심의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 같은 수위일지라도 단위시간내 수위변화폭이 큰 세굴심이 더 커지는 경향을 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구는 홍수시 불규칙한 수위변화에 따라 교각주위에서 발생하는 세굴현상을 규명하기 위하여 금강수계 보청천 최하류 산계교 지점의 수위수문곡선에 의한 세굴심도의 변화를 모형수로의 검증후 실험을 통한 분석에 의하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정류상태에서 모형실험을 실시하여 적용하천에 대한 최대 세굴심의 예측을 할 경우에는 최고수위를 택하여 실시해야 하는 것으로 판단된다.
- (2) 보청천 산계교 지점에 있어서 수위상승 종료후의 평형세굴심도는 최대세굴심도 보다 약 22% 작아졌다. 따라서 실제하천에서 세굴심을 실측할 경우에는 되메우기에 의해 감소된 만큼을 고려해야 할 것으로 판단된다.
- (3) 짧은 시간내에 수위변화가 클수록 세굴심도의 변화폭은 커지는 경향을 보였다. 따라서 강우강도가 큰 경우에 있어서 급격한 수위상승으로 일어나는 세굴현상의 변화폭은 더 증가될 수 있음을 나타낸다. 향후 수위의 급상승으로 인한 세굴현상의 관계에 대한 정량적 분석이 추후 반드시 연구되어야 한다고 사료된다.

참 고 문 헌

- 건설부 (1982~1995). 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.
- 김종섭(1994). 교각주위의 국부세굴에 관한 실험적 연구. 박사학위논문, 충북대학교.
- 안상진, 김종섭, 이재경, 김용용 (1995). "교각의 크기와 접근각도에 따른 국부세굴심의 실험적 연구."

- '95년 한국수자원학회 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 54~58.
- 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진 (1993). "보청천내 교각설치에 따른 국부세굴심도의 산정." *대한토목학회논문집*, 제13권, 제3호, pp. 81~88.
- 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진 (1994). "압력변화를 고려한 교각주위에서의 세굴현상연구." *한국수문학회지*, 한국수문학회, 제27권, 1호.
- 안창진 (1994). *반원형교각에서 국부세굴에 대한 접근각도의 영향*. 석사학위논문, 충북대학교.
- 이정규 (1992). *하천교각의 세굴방지대책에 대한 실험적 연구*. 한양대학교.
- 高橋晃 (1982). "교각 국소세굴에 관한 실험적 고찰." *수리강연회 논문집*.
- 鈴木辛一 (1981). "원주교각주변의 정적세굴에 관한 연구." *토목학회 논문보고집*, 제313호.
- Abed L.M.(1991). *Local scour around bridge piers in pressure flow*. Ph.D. Dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- Altinblek, H.D. (1973). "Localized scour in a horizontal sand bed under vertical jet." *J. of Hydraulic Research*, IHAR, Vol. 1, pp. 99-106.
- Cornelism A. Von der Guten (1982). "Discussion of scour around bridge piers at high flow velocities." *Proc. of ASCE*, HY2.
- Hughes, W.C. (1980). "Scour velocities in Ephemeral channels." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, No. HY9, Sept. pp. 1435-1441.
- Ishihara, T. (1945). "Experimental study of scour at bridge piers." *Trans. Japan Soc. of Civ. Eng.*, Vol. 28, No. 11.
- Jain, S.C., Fisher, E.F. (1981). "Scour around bridge piers at high flow velocities.", *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.104, pp. 1827~1842.
- Jones, J.S., Bertoldi, D.A., Umbrell, E.R. (1993). "Preliminary studies of pressure flow scour." *Proceedings of the 1993 Conference*, Hydraulic Eng. '93, Vol. 1, ASCE, pp. 916~921.
- Laursen, E.M. (1952). "Observations on the nature of scour." *Proceedings 5th Hydraulics Conference*, State University of Iowa, pp. 179~197.
- Laursen, E.M. and Toch A. (1956). *Scour around bridge piers and abutments*. Bull. No. 5, Iowa Highways Research Board, Ames, Iowa.
- Melville, B.W. and Sutherland, A.J. (1988). "Design method for local scour at bridge piers." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 10, pp. 1234-1247.
- Rajaratnam, N. and MacDougall, R.K. (1983). "Erosion by plane wall jets with minimum tailwater." *J. of Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 109, No. 7, pp. 1061~1064.
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1977). "Effect of sediment gradation on clear-water scour." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 103.
- Richardson, E.V. and Richardson, J.R. (1990). *Bridge scour*. Draft, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Richardson, E.V. and Abed, L.M. (1993). "Top width of pier scour holes in free and pressure flow." *Proceedings of the 1993 Conference*, Hydraulic Eng. '93, Vol. 1, ASCE, pp. 916~921.
- Shen, H.W. Schneider, V.R. and Karaki S. (1969). "Local scour around bridge piers." *J. of the Hydraulic Division*, ASCE, pp. 1919-1940.
- Tanaka, S. and Yano, M. (1967). "Local scour around circular cylinder." *Proc. IAHR*.
<최종본 도착일 : 1997년 7월 10일>