

河川 구조물 設置에 따른 洗掘發生과 最近 研究動向

최 계 운*

1. 序 論

河川에서 일어나는 洗掘현상은 크게 장기적인 變化에 의하여 발생하는 세굴과 단기적으로 발생하는 세굴로 구별될 수 있으며 이 중에서 장기적으로 발생하는 세굴로는 하상의 상승작용(aggradation)과 하강작용(degradation)이 있으며 단기적인 변화에 의하여 발생하는 洗掘로는 수축세굴(contraction scour)과 국부세굴(local scour)이 있다.

河床上昇 및 下降作用은 여러 수리학자들에 의하여 설명되어 왔던바와 같이 하천에 새로운 구조물 설치에 의한다고보다는 오래전부터 생성되어 유지되어온 충적하천의 역학적인 거동특성에 기인하여 發生한다. 즉, 강우에 의하여 발생하는 직접유출에 의한 영향으로 유역내 또는 제방으로부터 침식된 토사가 지류나 본류를 통하여 퇴적 및 침식을 되풀이하면서 하류로 이동하게 된다. 이 과정에서 하상이 상승하거나 하강하게 된다. 이와같은 하상상승이나 하상하강은 하천 구조물 설치보다는 유역내 토지이용의 변화등 인간의 활동이나 자연현상에 크게 좌우된다.

수축세굴은 河川의 흐름단면이 자연 또는 인공적인 수축에 의하여 유속, 수심등 하천내 수리학적 인자들이 변화하므로써 수축된 부분의 하상입자가

움직이므로써 발생하는 현상으로 교량, 얼음 또는 jam의 형성, 교량 설치시 유사의 침식에 의하여 형성된 섬이나 사주, 제방을 따라 형성된 물매턱, 수로나 홍수터등에서의 식물의 성장등에 의하여 발생된다.

局部洗掘은 교대, 교각등의 구조물 설치에 따른 흐름의 간섭 때문에 일어나며 이는 설치된 구조물들이 흐름을 加速化시키게 되고 이 加速化된 흐름이 渦流(vortex)를 發生시켜 이 渦流에 의하여 河床의 局部的인 變化가 일어난다. 이와 같은 局部的인 변화는 흐름의 자체의 특성뿐만 아니라 河床材料들의 특성의 상호작용에 의하여 일어나게 되어 상당히 복잡한 양상을 띄우고 있다.

세굴에 대한 연구는 주로 하상에 구조물 설치와 관련하여 주로 실시되고 있는바 위에서의 세굴현상에 비추어 단기적인 하상변화를 나타내는 수축세굴이나 국부세굴 위주로 研究가 진행되고 있다. 또한, 세굴 자체가 갖는 복잡성 때문에 주로 실험실내 模型實驗이 주종을 이루고 있으며 이를 통하여 公式를 導出하거나 거동특성을 파악하였다.

2. 1990년대 이전의 세굴연구 동향

1990년대 以前의 세굴연구는 實驗研究가 주종을 이루고 있으며 여러 실험조건에 따라 매우 다른 실

* 인천대학교 공과대학 토목공학과

험결과를 보이고 있기도 하다. 또한, 많은 실험들이 개별 하천이나 강의 특수한 상황을 감안한 상황에서 실험이 실시되어 다른 하천이나 강의 구조물 설치에 따른 세굴계산에는 적합하지 않은 경우가 많다. 구조물 설치에 따른 세굴실험의 시작은 1873년 Durand-Claye에 의해 수행된 것으로 알려지고 있다. 그는 사각형, 원형, 삼각형의 세가지 형태의 교각형상을 이용하여 실험을 실시하여 最大洗掘深度를 比較한 結果, 사각형 교각에서 최대세굴심도가 발생하고, 삼각형 橋脚에서 최소세굴심도가 發生한다고 보고한 바 있다.

이후 1900년대 중반부터 Ishhara(1945), Laursen 등(1953), Tanaka 등(1967), Shen 등(1969)에 의하여 세굴에 대한 이론적인 기초를 세우려는 노력이 시도되었다. 이의 결과로 세굴이 와류에 의하여 발생되며 특히, 구조물 전면에서는 마세형 와류에 의하여, 구조물 후면부에서는 반류형 와류에 의하여, 구조물이 완전히 물에 잠긴 경우에는 Trailing 와류영향이 있고 이들에 의하여 세굴이 생성된다는 이론적인 기초가 확립되었다. 이와 같은 세굴에 대한 이론적인 정립과 아울러 세굴심도를 계산하는 실험식을 제안하는 여러 연구가 이루어졌다. 이와같은 연구는 Arizona 주립대의 Laursen을 제외하고는 거의 국부세굴에 대한 연구에 치중하고 있고 국부세굴중에서도 교각주위에서의 세굴에 관한 연구가 주종을 이루고 있다. 표 1은 이 시기에 제안된 교각주위에서의 최대 세굴심도를 산정하는 공식을 나타내고 있으며 각각의 group은 공식형태가 유사한 것을 단순하게 표현한 것에 지나지 않는다. 이 시기에 최대세굴심도에 대한 연구와 병행하여 각각의 세굴영향인자가 최대세굴심도 및 세굴폭에 대하여 미치는 영향과 실제 하천에서의 세굴심도 산정을 위한 노력이 아울러 경주되었다. 그러나, 현장에서의 세굴측정은 현장에서의 세굴량 측정 자체로 구조물의 안정성 자체의 문제 해결 시도보다는 실험연구에서 얻어진 결과를 검증하는 수준을 크게 벗어나지 못하였다. 세굴발생에 대한 원인으로 와류에 대한 연구뿐만 아니라 소유력과 한계 소유력을 사용하여 그 원인을 구명

하려는 노력도 이 시기에 여러 연구자들에 의하여 시도되었다. Arizona 주립대의 Laursen은 限界掃流力과 底面掃流力이 같게 되는 상태를 이론적으로 고찰하였으며, Jain과 Fisher는 流速에 따른 Froude數와 洗掘깊이뿐만 아니라 소유력에 따른 유사이동에 관하여 연구하였다. 1980년 후반에 이르러서는 Jain, 鈴木幸一, 高橋 晃, Raudkivi and Ettma, Raja-ratnam Newachukwu, Melville 등이 그동안의 연구결과를 좀 더 넓게 적용할수 있도록 이론적인 보완과 새로운 공식을 제안하였다.

한편, 우리나라의 경우 1980년대 이전까지는 洗掘에 대한 연구는 거의 없었으며 1980년대들어 석사학위 논문형태로 연구가 주로 진행되었다. 그동안의 세굴에 대한 연구를 살펴보면, 李洪萊(1984)는 橋梁橋脚周邊의 局部洗掘에 관한 實驗的 研究에서 橋脚 Reynolds數와 亂流強度와 平均流速의 比가 橋脚의 洗掘深度와 洗掘幅의 豫測에 지배적인 因子임을 밝혔으며, 金鎭洪(1985)은 圓形 橋脚周圍에서의 最大洗掘深度에 관한 實驗的 研究에서 洗掘深에 影響을 미치는 Vortex mechanism의 特性 및 運動方向에 대하여 究明하였고, 金孝燮(1985)은 橋脚周圍에서의 洗掘現象에 관한 研究를 통하여 既存 洗掘公式를 基準으로 구조도와 모래를 河床材料로 하여 實驗結果를 發表하였다.

3. 1990년대 이후의 洗掘研究 動向

1980년대까지와 달리 1990년대 들어서는 세굴에 대한 다양성 있는 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 본격적으로 이루어진 시기라 할수 있다. 이 시기에서는 수자원, 특히 하천내 수리현상 연구에서 세굴에 대한 비중이 늘어나면서 이에 대한 관심이 부쩍 증가하였다. 미국내에서는 1987년 뉴욕에서 교량붕괴의 주요원인이 세굴로 밝혀짐에 따라 이에 대비하려는 연구와 아울러 기존 연구의 문제점 도출, 새로운

특집 : 하천세굴과 교량의 안전

표 1. 국부 세굴 심도 산정 공식

Group	Proposer	Proposed Equations
Group 1	Blench Arunachalam Sarma-Krishnamurthy Jain-Fischer Froehlich	$\frac{y+d_s}{y_r} = 1.8 \left(\frac{b}{y_r} \right)^{1/4}$ $\frac{y+d_s}{y_r} = 1.95 \left(\frac{b}{y_r} \right)^{1/6}$ $d_s = F_r \left(1 + A_1 \frac{b^{1/3}}{y} \right) - 0.952 \frac{D^{1/3}}{y}$ $\frac{d_s}{b} = 2.0 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.5} (F_r - F_{rc})^{0.25}$ $\frac{d_s}{b} = 1.84 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.3} (F_{rc})^{0.25}$ $\frac{d_s}{b} = 0.32 k_1 \left(\frac{b'}{b} \right)^{0.62} \left(\frac{y}{b} \right)^{0.46}$ $F_r^{0.20} \left(\frac{b}{D_{50}} \right)^{0.08} + 1$
Group 2	Inglis-Pooma Ahmad Coleman C.S.U Varzeliotis	$\frac{d_s}{b} = 1.70 \left(\frac{q^{2/3}}{b} \right)^{0.78}$ $\frac{d_s}{b} = \frac{y}{b} (4.77 F_r^{2/3} - 1)$ $\frac{d_s}{y} = 1.39 (F_r)^{0.2} \left(\frac{b}{y} \right)^{0.9}$ $\frac{d_s}{b} = 2.0 k_1 k_2 \left(\frac{b}{y} \right)^{0.65} F_r^{0.43}$ $\frac{y+d_s}{b} = 1.43 (q^{0.67}/b)^{0.72}$
Group 3	Laursen I Laursen II Larras Neill Melville	$ds = 1.5kb^{0.7}y^{0.3}$ $\frac{b}{y} = 5.5 \frac{d_s}{y} \left[\left(\frac{d_s}{11.5y} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right]$ $\frac{d_s}{y} = \frac{1.05k}{b^{0.25}} \left(\frac{b}{y} \right)$ $\frac{d_s}{b} = 1.5 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.3}$ $11.5y = \frac{d_s}{\left(1 + \frac{0.182}{d_s/b} \right)^{0.589} - 1}$
Group 4	Inglis-Lacey Bata	$d_s = 0.946 \left(\frac{Q}{f} \right)^{1/3-y}$ $\frac{d_s}{y} = 10 \left(F_r^2 - \frac{3D}{y} \right)$
Group 5	Chitale Venkatadri	$\frac{d_s}{y} = 6.65 F_r - 0.51 - 5.49 F_r^2$ $\frac{d_s}{y} = C \times F_r^2$
Group 6	Basil-Basamily-Ergun U.S.G.S Shen I Shen-Karaki II Shen-Karaki III	$d_s = 0.588b^{0.586}$ $d_s = 1.2b^{0.8}$ $d_s = 0.000223 (R_{ep})^{0.619}$ $\frac{d_s}{b} = 11.0 (F_{rp})^2$ $\frac{d_s}{b} = 3.4 (F_{rp})^{0.67}$

.....河川 구조물 設置에 따른 洗掘發生과 最近 研究動向

시각에서 세굴문제를 접근하려는 시도가 이루어지기 시작하여 미연방 도로국을 중심으로 각종 위원회를 구성하여 문제해결을 시도하였으며 HEC 18 및 HEC 20이 이 시기에 일반에 공개적으로 적용되기 시작하면서 관심을 더욱 불러 일으키는 계기가 되었다. 1993년 미국토목학회 수리분과 학술발표회나 1995년 수자원 학술발표회에서 발표된 400여 논문중에서 60여편이 세굴에 관한 것이라는 사실만을 보더라도 세굴에 관한 중요성과 연구가 어느 정도인가를 미루어 짐작할수 있다.

수치모델을 이용한 연구에는 1차원 또는 2차원 모델이 적용되었는데 Muller(USGS), Molinas(Colorado 주립대), Froehlich(Kentucky 주립대), Chang(San Diego 주립대)등이 주축이 되어 연구를 선도하여 왔으며 이들은 주로 실험실에서 도출된 수축세굴이나 국부세굴 공식과 이동하상에 대한 개념을 함께 고려하므로써 국부적이거나 단기적인 하상변화 문제 해결을 시도하였다.

潮汐의 影響을 받는 지역에서의 세굴현상은 Florida 대학 또는 South Florida 대학을 중심으로 활발하게 이루어 지고 있으며 아울러 Richardson(Colorado 주립대), Neill, Maroney, Maryland도로국 등도 이에 대한 연구를 수행하였다.

현장에서의 세굴측정은 이 시기에 이르러 보다 정확한 장비를 이용하여 현장에서의 세굴측정을 시도하였으며 이는 교량의 안전진단이나 향후 안전에 측정과 직접적인 관계를 갖거나 실험실내 실험내용과의 검증이나 실험과의 보다 정확한 연계를 위하여 시도되었다. 이와같은 현장 측정은 대학보다는 USGS, 미연방 및 주정부내 도로국등의 실무기관을 중심으로 이루어지고 있으며 Fischer(USGS), Butch(USGS), Johnson(펜실베니아 주립대)등이 이와같은 연구를 수행하였다.

압력흐름은 最近에 미국내에서 교량파괴에 대한 調査 結果, 자유수면을 가진 흐름보다는 壓力흐름일 경우에 교각내 세굴에 의한 위험성이 더욱 크다는 것이 밝혀진 이후 이에 관한 관심이 크게 증가하였다. 압력흐름은 水路內에 橋梁과 같은 수리구조물, 또는 터널, 암거등을 통과할때 自由水面이

없이 흐르는 경우에 發生하며, 이때에는 흐름내 난류현상이 심하고 流速의 增加 및 渦流現象의 增加를 가져오게 된다. 이와 같이 開水路를 흐르는 물이 압력흐름으로 변할때에 대한 연구는 1990년대 이전에 세굴에 관한 연구는 거의 없다시피하며 물의 흐름자체에 관한 연구도 Wang(1970), Wiggert(1972)등에 지나지 않는다. Wang은 橋脚 상판이 물에 잠겼을때 상판 밑면에서 發生하는 誘導壓力에 대하여 연구하였는바, 상판 밑면에서 정수압의 2배 크기의 荷重이 상판에 작용하는 것과 동일한 압력이 작용하는 것을 발견하였다. 또한, Wiggert는 컴퓨터 해석을 이용하여 자유수면을 가진 흐름과 압력흐름 상호간의 천이 현상을 해석하였다. 압력흐름하의 洗掘現象에 대한 연구는 最近에 시작되어 1991年 Abed가 壓力흐름下에서 橋脚周圍內 局部洗掘에 관한 研究를 시초로 Richardson, Jones 등에 의하여 연구가 수행되었다. Abed는 매우 제한적인 모델 실험을 통하여 Fr 數가 0.5以上일때는 압력흐름에서는 自由水面을 가진 흐름에 비하여 洗掘深度가 2~3배, $0.35 < Fr < 0.5$ 일 경우에는 2~4배, Fr 數가 0.35以下일때는 10배까지 이르는 것을 발견하였으며 동일한 流速과 水深을 가진 경우에는 開度比가 減少함에 따라 세굴 깊이가 增加한다고 결론지었다. Richardson(1993)등은 自由水面을 가진 흐름과 압력흐름에 있어서의 橋脚 洗掘幅의 크기에 대하여 實驗하였으며, Jones(1993)등은 壓力흐름을 가진 橋脚周圍에서의 洗掘深度는 橋脚周圍內 局部洗掘과 收縮洗掘과의 合計로 나타내질 수 있다고 하였다. 이와 같은 研究 結果들은 아직도 定型화 되었다기 보다는 아직 제한적인 상태에서의 연구에 지나지 않고 광범위한 適用까지는 더 많은 研究가 필요한 실정이다.

이와함께 1990년대 들어서는 안전문제로서의 세굴현상이 아니라 하천내 오염물질의 이동과 연관하여 세굴현상에 대한 관심도 제기되었다. 이에 대한 대표적인 연구로써 미공병단의 Heath(WES)등은 Erie 호수에 위치하고 있는 항로의 퇴적된 유사에 중금속, PCB등이 함께 포함되어 있으며 부득이

특집 : 하천세굴과 교량의 안전

항로 준설이 필요하게 됨에 따른 퇴적된 유사속의 오염물질의 이동과 구조물 설치에 따른 세굴폭 및 세굴깊이 변화와 아울러 오염물질 확산에 관한 구체적인 연구를 수행하였으며 이와같은 연구는 하천 내 오염물질 이동량이 증가하고 이에 대한 관심이 증가할수록 더욱 증가할 것이다. 특히, 우리나라에도 몇년전 팔당댐 및 상류부 준설에 대한 문제제기가 있었던바 이 분야에 관심을 기울여 볼 만하다.

국내의 경우 최근 안전에 대한 관심의 고조와 성수대교 사고이후 교량의 안전자체에 대한 문제로서 세굴현상의 중요성이 부각된 이후 안상진(충북대), 여운광(명지대), 윤용남(고려대), 윤태훈(한양대), 이정규(한양대), 최계운(인천대) 등에 의하여 세굴에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

4. 맺음말

앞에서 살펴본 바와 같이 세굴에 관한 연구는 1990년 이전에는 주로 실험연구를 위주로 수행되어 왔으나 1990년대 이후 지금까지와 같은 실험 위주 연구를 지양하고 구조물이 설치된 지점에서 직접적인 세굴측정과 실험을 병행한 연구가 진행되고 있으며 최근들어 안전에 대한 관심이 고조됨에 따라 과거 단순한 세굴심도 계산에서 벗어나 향후 안전예측을 위한 여러 시도가 이루어지고 있다. 또한, 환경에 대한 중요성의 부각과 아울러 세굴로 인한 유사이동에 오염물질의 이동 등에 대한 연구가 점차 증가하고 있으며 국내의 경우도 교량에서의 안전문제에 세굴이 차지하고 있는 비중이 증가함에 따라 이에 대한 연구가 점차 활발하여지고 있다. 아울러, 선진국에서의 연구동향을 살펴볼 때 향후 국내에서 이에 대한 연구는 더욱 활발하여 질 것이다.

참 고 문 헌

- Abed L. M., Local Scour around Bridge Piers in Pressure Flow, Ph. D. Dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, Co., 1991.
- Altinblek, H. D., Localized Scour in a Horizontal Sand Bed Under Vertical Jet, I.H.A.R., Vol. 1, pp.99-106, 1973.
- Cornelism, A. Von der Guten, Discussion of Scour around Bridge Piers at High Flow Velocities, Proc. of ASCE, HY2, 1982.
- Hughes, W.C., Scour Velocities in Ephemeral Channels, Jour. of Hydraulics Division, ASCE, No. HY9, Sept., pp.1435-1441, 1980.
- Ishihara, T., Experimental Study of Scour at Bridge Piers, Trans. Jap. Soc. of Civ. Eng., 28(11), 1945.
- Jain, S. C., E.F. Fisher, Scour around Bridge Piers at High Flow Velocities, Jour. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 104, pp. 1872-1842, 1980.
- Jain, S. C., Maximum Clear-Water Scour Around Circular Piers, Jour. of the Hydraulics division, ASCE, Vol. 107, pp.611-626, 1981.
- Jones, J. S., Bertoldi, D. A., Umbrell, E. R., Preliminary Studies of Pressure Flow Scour, Hydraulic Eng. '93, Vol.1, Proceedings of the 1993 Conference, ASCE, pp.916-921, 1993.
- Kim, Jin Hong, The Experimental Study for the Maximum Scour Depth Around Bridge Piers, M.S.Thesis, Seoul National University, 1985 (in Korean).
- Kim, Hyo Seup, Study on the Scour Around Bridge Piers, M.S.Thesis, Seoul National University, 1985(in Korean).
- Laursen, E. M. and A. Toch A., A Generalized Model Study of Scour Around Bridge Piers and Abutments, Proc. IAHR, 1953.
- Laursen, E. M. and Toch, A., "Scour around Bridge Piers and Abutments", Ihowa Highway Research Board, Bulletin No. 4. 1956.
- Laursen, E.M., Scour at Bridge Crossings, Transaction, ASCE, Vol.127, pp.166-209, 1962
- Lee, Hong Rae, The Experimental Study for the Local Scour at Bridge Piers M.S.Thesis, Yen Sei University, 1984(in Korean).

- Lee, Jong Kyu, The Experimental Study for Methods Resisting the Scour at Pier, Han Yang University, 1992(in Korean).
- Melville, B. W., Live Bed Scour at Bridge Piers, Jour. Of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, pp.1234-1247, 1984.
- Melville, B. W. and Sutherland, A. J., "Design Method for Local Scour at Bridge Piers", J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 10, pp.1210-1226, 1988.
- Raudkivi, A.J. and R.Ettema, Effect of Sediment Gradation on Clear-Water Scour, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 103, 1977.
- Rajaratnam, N. and B. A. Nwachuwu, B. A., Erosion Near Groynelike Structures, Proc. IAHR No. 4, 1983.
- Richardson, E.V, et al., "Highways in the River Environment", First ed., U. S. Dept. of Transportation, FHWA, Ft. Collins, Co. 1975.
- Richardson, et al., "Scour at Bridges", FHWA, U.S. Dept. of Transportation. 1988.
- Richardson, E.V., Abed, L., Top Width of Pier Scour Holes in Free and Pressure Flow, Hydraulic Eng. '93, Vol.1, Proceedings of the 1993 Conference, ASCE, pp.916-921, 1993.
- Shen, H.W., V.R. Schneider, S. Karaki, Local Scour around Bridge Piers, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE, pp. 1919-1940. 1969.
- Tanaka shigeru and Yano Motoaki, Local Scour around Circular Cylinders, Proc. IAHR, 1967.
- Wang, T. M. and Triweco R. W., "Maximum Depth of Scour around Bridge Piers", Proc. of 5th Congress, ADP-IAHR. 1986.
- Wang, H., Water Wave Pressure on Horizontal Plate, Vol.96, HY10, ASCE, pp.1997-2017, 1970.
- Wiggert, D. C., Transient Flow in Free-Surface, Pressurized Systems, Vol.98, HY1, ASCE, pp.11-27, 1972.