

# Y形 橋脚 周圍에서의 局部洗掘深度 및 背後 河上變化

安慶洙\* 崔桂漂\* 吳正熙\*\*

## 1. 서론

하천에서의 세굴현상은 장기적으로 발생하는 하상상승이나 하상하강과 아울러 수축세굴, 국부세굴등으로 크게 나눌 수 있는데 하천교량의 붕괴에 대하여는 장기간 동안의 교각세굴현상 보다는 단기적 하상변화인 교각국부세굴현상이 더욱 직접적인 원인으로 알려지고 있으며 최근까지의 교각 주위에서의 세굴연구도 국부세굴에 관한 것이 주류를 이루고 있다. 교각 주위에서 국부세굴의 주요원인은 교각주위에서 발생하는 渦流(vortex)의 영향인데, 그 변화는 흐름자체의 특성뿐만 아니라 하상재료들의 상호작용에 의해 복잡한 樣相을 띠게 된다. 그러므로 세굴에 대한 연구는 주로 하상에 설치된 교량의 교각이나 교대를 대상으로 한 모형실험이 대부분이다. 특히 이러한 모형 실험들은 거의가 수중구조물의 최대세굴심도 산정에 主目的이 있었고 몇몇 실험들은 이러한 세굴에 대한 방지 측면에서 수행되어져 왔다. 그러나, 이와같은 국부세굴 발생시 구조물 주위에서 발생하는 주변하상이나 배후하상의 변화 및 거동특성은 하상안정이나 평형하상 생성에 큰 영향을 줄 수 있다. 그러나 이에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 또한, 교각 주위에서의 국부세굴 실험도 대상교각의 형상이 반원형 또는 원형인 교각에 국한되어 있었지만 최근에 설치되는 교량의 경우 신공법의 개발로 인해 다양한 교각의 모양을 지니고 있다. 따라서, 국부세굴 실험도 이와같은 추세에 맞추어 새로운 모양의 교각들에 대한 실험이 수행되어야 하며 이때 주변 및 배후하상의 변화에 대한 실험이 병행되는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 실제 한강의 경우, 시공중인 교량을 포함하여 현재 23여개의 교량과 각종 수중구조물등이 설치되거나 계획중에 있고 앞으로 더 많은 수중구조물들이 설치될 전망이다. 이와같이 구조물이 늘어나면 늘어날수록 하천통수단면이 적어지고 이로인한 국부세굴현상의 중첩, 상쇄 또는 예상치 못한 하상변동에 의해서 새로운 교량 붕괴 피해 가능성이 있을 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 실험을 통하여 현재 건설중인 김포대교 교각 형상인 Y형 교각 주위에서의 국부세굴의 크기와 세굴발생시 교각 주변하상의 세굴폭 및 배후 하상에 대한 변화에 대하여 연구하였다.

---

\* 인천대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 인천대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

## 2. 국부세굴 및 배후하상변화에 대한 이론적 배경

교각국부세굴을 지배하는 힘으로서는 일반적으로 3가지의 형태의 渦流(horseshoe, wake, trailing vortex)가 존재하는데, 교각 전면 하상 근처에서 주로 horseshoe vortex, 교각 배후 부분에서는 주로 wake vortex가 발생되며 trailing vortex는 교각의 침두부분과 측면의 서로 다른 압력차에 기인한 역류구간내에서 형성된다. 이 현상은 예연돌출부의 가장자리가 만나는 相異한 압력을 가진 두 표면에서는 어디서나 발생되며 교각의 폭이 압력차를 일으킬 만큼 충분하지 않으면 trailing vortex는 교각의 정면으로 수직강하되는 흐름과 관련이 있으며 이에 대한 洗掘孔이 형성된 후, 점과 세굴공을 擴張시키게 된다. wake vortex는 교각 자체에 의하여 발생되며 교각 표면에서 일어나는 불안정한 전단층의 유체가 미끄러지고 회전하면서 형성된다. sand bed channel에서의 하상구성 형태는 일반적으로 plane bed, ripples, dunes, ripple과 dune의 혼합형태로 알려져 있으며 이러한 하상변동은 stream power에 기인한다. 하상변동을 일으키는 要因으로서서는 수심, 경사, 유사의 점성과 밀도, 하상입자크기, 유사의 침강속도, 하상단면형상등이 있으나 그 특성에 관한 체계적인 이론이 드문 실정이다.

교각국부세굴이 발생하면 그 영향으로 인해 교각배후 하상에 단일 dune이 발생하고 그 이후 하상에 또다른 dune이나 ripple과 같은 하상변동을 가져오게 된다. 그러나 이러한 연구는 아직까지 활발히 연구된 바 없으며 그 현상 자체가 매우 불규칙하고 복잡한 性向을 가지므로 본 연구에서는 형태학적인 측정자료만을 이용하여 교각세굴과 함께 교각 배후 하상변화를 관찰하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

모의수로의 크기는 0.4m(B)×0.4m(H)×12m(L)이고 point gage, 경사조절장치(0%~2%), 수문장치 및 순환장치가 설치되어 있다. 모형교각은 아크릴 봉을 가공하여 제작하였으며 포설재료로서는 김포대교 현장 준설사를 이용하였으며 이때의  $d_{50}$ 은 0.67mm이었으며 이를 전장 6.5m, 높이 0.15m, 폭 0.4m의 규모로 포설하였다. 또한 실험중 포설구간 시점의 유량유입으로 인한 급격한 하상재료의 교란과 유실을 방지하기 위해 포설구간 양쪽 끝단에 완만한 경사를 가진 시멘트 지지단을 제작하였다. 유속은 digital current meter를 이용하여 측정하였으며 유량의 측정은 수로 상단의 직각삼각위어를 통하여 측정하였다. 그림 1은 실험에 사용된 모형교각을, 그림 2는 설치된 실험수로를 보여주고 있다.

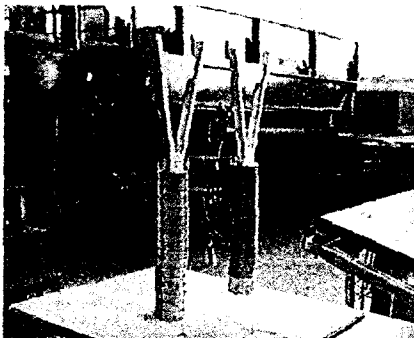


그림 1 모형교각

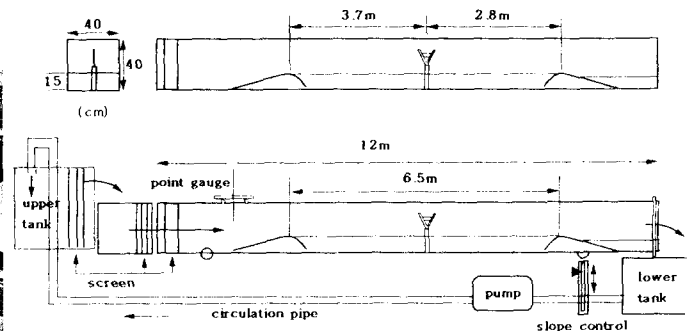


그림 2 실험수로

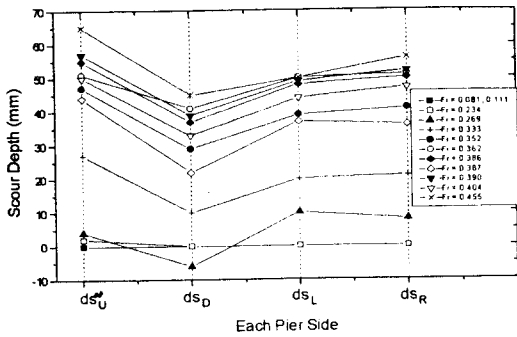


그림 4 교각 각 위치간 세굴심도

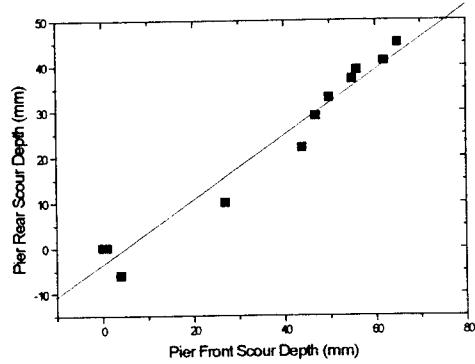


그림 5 교각정면과 후면부의 세굴심도

橋脚最大洗掘深度와 그로인하여 형성된 洗掘孔과의 關係는 그림 6에서 보는 바와 같이  $W_{Smax}=4.241d_{Smax}$ 로 나타났으며 세굴공의 形態는 좌우폭을 최대 지름으로 갖는 타원형이다.

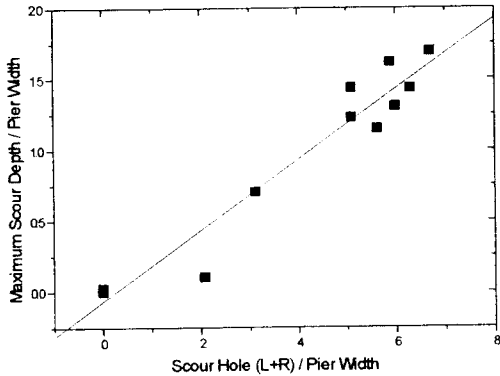


그림 6 교각최대 세굴심도와 세굴공의 최대 폭

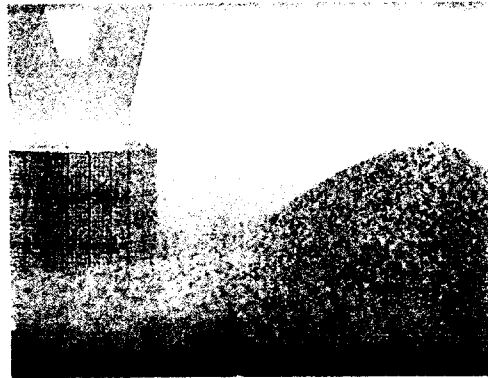


그림 7 교각배후에 생성된 dune

교각주위내 洗掘 發生時 교각 배후에 생성된 하상의 크기와 형성된 dune의 규칙적 형상은 표2와 같고 그림 7은 교각직후에 생성된 단일 dune의 모습이다.

표 2 교각 중심으로부터 배후 하상에 생성된 단일 dune의 위치와 높이

| Fr      | 0.03 | 0.081 | 0.234 | 0.333 | 0.352 | 0.362 | 0.386 | 0.387 | 0.390 | 0.405 | 0.455 |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D.D(mm) | 0    | 0     | 47    | 186   | 225   | 250   | 244   | 282   | 302   | 302   | 340   |
| D.H(mm) | 0    | 0     | 5.5   | 27    | 29.5  | 30    | 28.5  | 31    | 31    | 33    | 33    |

(D.D:distance from Pier center to dune, D.H: Height from bed to dune's crest)

$0 < Fr < 0.455$  범위에서 배후 하상의 변화양상은 표 3 및 그림 8, 그림 9과 같이 다소 불규칙하게 나타났으나 ripple간 거리주기 평균치( $R_{DC}$ )를 비교하면  $Fr=0.455$ 일 때 현저한 차이를 보이고 있어  $Fr$ 수가 커짐에 따라 작은 ripple들이 중복되어 다소 발생 거리주기가 큰 dune을 생성함을 알 수 있다.

표 3  $0 < Fr < 0.455$  범위에서의 교각 배후 하상 변화

| Fr    | $R_{DC}(mm)$   | $R_{MI}(mm)$   | $R_{TD}(mm)$ |
|-------|--|--|--------------|
| 0-0.3 |  |  |              |
| 0.352 | 17, 43, 30, 35.6, 25.4<br>Mean=30.2                                | ⊕ 17.5, 13, 19, 7, 11.5, 16.5, 10, 9, 8<br>⊖ 35.5, 34.5, 21, 21.5, 29.5, 27.5, 9, 26.5, 19.5, 13.5, 15   | 1760         |
| 0.362 | 17.6, 29.6, 28.4, 30.4, 26.6, 32.6<br>Mean=27.53                   | ⊕ 30, 31.5, 28.5, 32.5, 28.5, 26, 24.5, 25.5, 27.5, 24, 23.5, 26.5<br>⊖ 37, 19, 33.5, 25.5, 26.7, 0.5, 24.8, 35.5, 34.2, 30.2, 25.4, 22.4, 24.5            | 2144         |
| 0.386 | 12.9, 25.4, 36, 30, 26.6, 26.9<br>Mean=26.3                        | ⊕ 6.5, 6, 29.5, 12.5, 6, 19, 27.5, 13, 19.5, 11.5, 21, 21.5<br>⊖ 34.5, 33, 29.5, 34.5, 32, 45, 26, 18, 23, 12, 15.5  | 1822         |
| 0.387 | 55.8, 24, 15.5<br>Mean=31.77                                       | ⊕ 23, 15.5, 18, 17, 8, 23, 9, 12, 8<br>⊖ 18.5, 24, 36.5, 8, 10.5, 9.5, 7.5, 3  | 1235         |
| 0.390 | 20.4, 32.7, 25.2, 29.5, 39.5, 29.4, 24.5, 15.1, 16.3<br>Mean=25.84 | ⊕ 26, 2.5, 5.5, 13.5, 15, 19.5, 13.5, 15.5, 25, 23.5, 31, 30.5, 27, 18.5, 20.5, 19, 17<br>⊖ 34.5, 28.5, 25.5, 34, 38.5, 28.5, 37, 17.5, 23.5, 4, 17, 13, 7 | 2618         |
| 0.404 | 20.4, 33.4, 21.4, 17.3<br>Mean=23.13                               | ⊕ 6, 17, 17, 14, 15<br>⊖ 22.5, 38, 17, 12, 9.5   | 1227         |
| 0.455 | 148.5, 74, 27, 15<br>Mean=66.125                                   |  | 2760         |

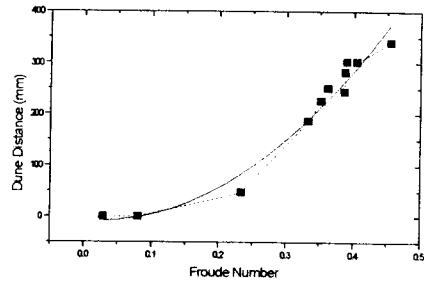
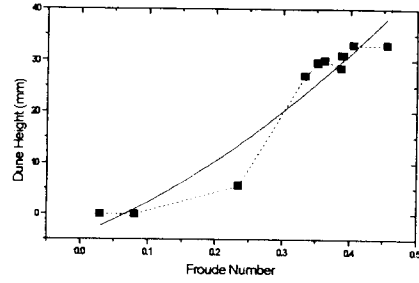


그림 8 단일 dune의 위치와 높이

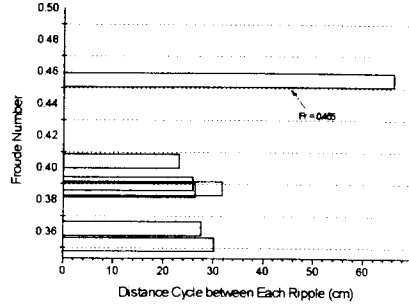


그림 9 배후하상 ripple간 평균거리 비교

본 실험과 별도로 傾斜影響 실험과 時間經過에 따른 세굴심도 변화 실험은 그림 10 및 그림 11과 같이 각각 교각세굴심도에 敏感함과 靜的, 動的 세굴 특성을 확인할 수 있었다.

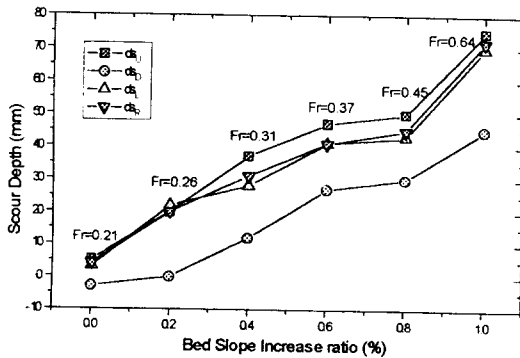


그림 10 경사영향에 의한 교각 각 위치 세굴심도

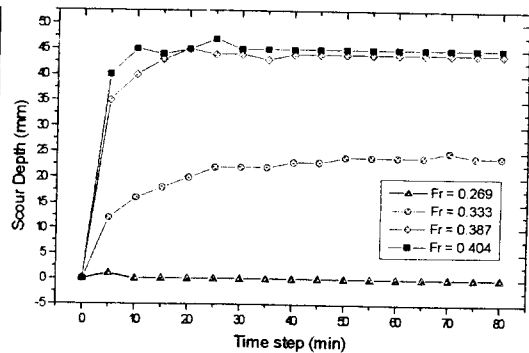


그림 11 시간경과에 따른 세굴심도변화

實驗條件은 크게  $0 < Fr < 0.455$ 의 範圍와  $0.455 < Fr < 1.102$ 의 두 가지 範圍로 구분하였는데  $Fr=0 \sim 0.455$ 까지는 주로 교각국부세굴의 거동특성과 그로인한 세굴공 및 배후하상 변동을 실험하였고  $Fr=0.455 \sim 1.102$ 까지는 평형세굴심도(equilibrium scour depth)와 사류 영역의 세굴현상을 실험하였다. 또한 본 실험과 별도로 경사영향 실험과 시간 경과에 따른 정적, 동적세굴특성 실험을 통하여 교각세굴 특성을 확인하였다.

#### 4. 실험결과

실험결과 Froude수 각 구간별 교각 최대 국부세굴심도는 대체로 3단계로 나눌 수 있는데  $Fr=0 \sim 0.5$ 까지는 Fr수에 따라 비교적 큰 폭으로 증가하는 1次 函數的 變化인 반면  $Fr=0.5 \sim 0.8$ 에서는 점증가 하는 2次 函數的인 性向을 보이며  $Fr=0.8$  이상의 구간에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 표 1과 그림 3은 Froude수에 따른 최대세굴심도를 보여주고 있다.

표 1 Froude수에 따른 교각주위내 최대세굴심( $ds_{max}/b$ )

|      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    |
| Fr   | 0.081 | 0.111 | 0.197 | 0.234 | 0.255 | 0.269 | 0.306 | 0.333 | 0.352 | 0.362 | 0.367 | 0.386 | 0.387 | 0.390 | 0.404 |
| ds/b | 0     | 0     | 0.13  | 0.104 | 0.521 | 0.052 | 0.964 | 0.703 | 1.224 | 1.328 | 1.224 | 1.432 | 1.146 | 1.484 | 1.302 |

|      |       |       |       |       |       |       |       |              |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|      | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23           | 24    | 25    |
| Fr   | 0.451 | 0.456 | 0.554 | 0.570 | 0.635 | 0.728 | 0.815 | <b>0.871</b> | 0.957 | 1.102 |
| ds/b | 1.302 | 1.693 | 1.745 | 1.172 | 1.953 | 1.563 | 1.927 | <b>2.031</b> | 1.979 | 1.667 |

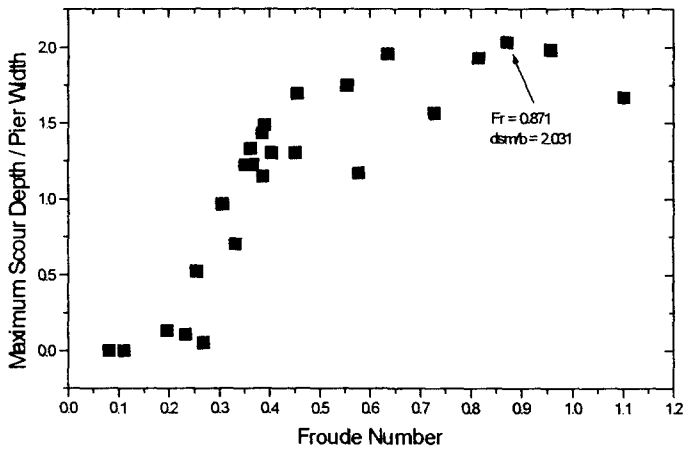


그림 3 Froude수에 따른 교각주위내 최대세굴심도

교각 각 위치(전, 후, 좌, 우측면 : 상류측 기준)에서의 세굴심도는 그림 4 및 그림 5에서 보는 바와 같이 교각정면>교각좌, 우측면>교각후면의 순으로 나타났으며 교각 정면의 세굴심도가 後面部の 약 1.7배 정도인 것으로 나타났다

기존 국내의 교각세굴 실험중 교각세굴 자체 特性을 주로 考慮한 실험으로서 金鎮洪(1985)-원형교각, 安昌鎭(1995)-반원형교각의 수로경사 0.01%, 0.03% 결과 및 Shabert(원형교각)의 경우를 비교한 결과, 그림 12에서 보는 바와 같이 여타 실험치보다 안정적인 分布를 나타냈으며 원형교각 및 반원형교각에서의 최대세굴심보다 Y-형 교각에서의 세굴심도가 더 크게 나타났다.

## 5. 결론

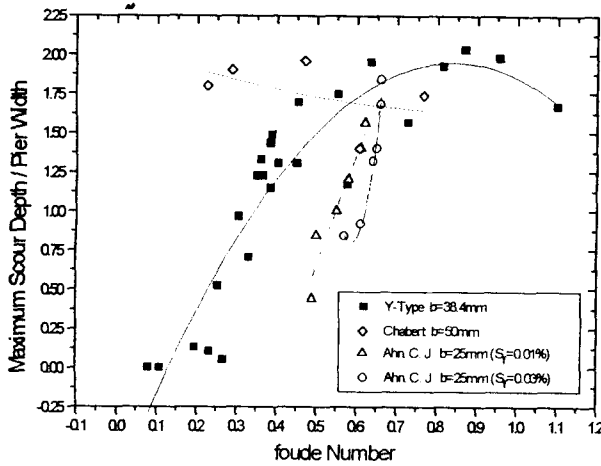


그림 12 기존 실험들과의 비교

최근에 이용되고 있는 Y형 교각주위에서의 洗掘深度 및 隣接, 背後河上의 變化에 대하여 실험한 결과, 3장에서와 같이 교각 최대 세굴심도, 세굴심도와 제갈공의 관계, 배후하상변화관계등을 분석하였고 기존의 실험결과와도 비교하여 Y형 교각에서의 전반적인 세굴현상과 그로인한 배후하상 변화를 조사하였다. 이 실험연구의 결과로 실제 현장에서의 교각세굴 현상과 橋脚背後河上豫測이나 河川整備計劃 등에 參考가 될 수 있으며 앞으로 국내 교각세굴 실험의 比較資料로서 活用될 수 있을 것으로 예상된다.

## 6. 참고문헌

1. Ettema, R., Scour at Bridge piers, Report No. 216, Dept of Civil Engineering, Univ., of Auckland, New Zealand, 1980.
2. Evaluating Scour at Bridges Second Edition, US Dept. of Transportation Federal Highway Administration Hydraulic Engineering Circula No. 18, pp. 5~70, 1993.
3. Melville, B. W., Local Scour at Bridge Sites, Report No. 117, School of Engineering, Univ. of Auckland, New Zealand, 1975.
4. 金鎮洪, 圓形橋脚 周圍에서의 最大洗掘深度에 관한 實驗的 研究, 서울大學校, 1985.
5. 金宗燮, 橋脚周圍의 局部洗掘에 관한 實驗的 研究, 忠北大學校, 1994. 2
6. 安相鎭, 崔桂湊, 金宗燮, 安昌鎭, 橋脚周圍에서 洗掘深度 影響因子的 敏感度에 대한 實驗的 研究, 韓國水文學會, 제35회 水工學研究發表會 論文集, 1993, pp. 81~88.
7. 安昌鎭, 半圓形橋脚에서 局部洗掘에 대한 接近角度的 影響, 忠北大學校, 1994. 8.