

만곡수로에서의 연속교각 세굴특성에 관한 연구

○박성식*, 송재우**

1. 서론

교각주위의 세굴은 교량의 안정성 문제와 관련되어 관심이 집중되고 있으나, 이에 관한 연구는 대부분 하천의 직유로부에서 단일교각에 대해 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 실제하천은 만곡부의 흐름특성을 가진 사행하천이기 때문에 직유로부에 대한 기존의 연구결과를 만곡부에 적용하기에는 많은 문제점이 있다. 만곡부에 설치된 교각은 만곡부의 흐름특성으로 인한 횡방향 하상경사, 양안의 수면차, 이차흐름 등의 발생으로 국부세굴 뿐만 아니라 수축세굴의 영향을 받게되며 직유로부와는 상당히 다른 세굴특성을 나타내게 된다. 그리고 최근 인구밀집 지역의 도심부를 관통하는 하천의 경우, 증가하는 교통량을 해결하기 위하여 하천변을 따라 도로교가 건설되고 있으며, 이러한 경우 하천의 흐름방향으로 설치된 연속교각은 단일교각의 세굴특성과는 다른 양상을 보이게 된다.

본 연구에서는 180° 만곡부 수리모형 실험을 통하여 직유로부와 만곡부에서 흐름방향으로 설치된 단일교각과 연속교각의 세굴특성을 분석하였다. 또한 만곡부의 흐름특성을 고려한 연속교각의 세굴 영향 범위를 제시하고, 최대세굴심의 변화 및 세굴특성 등을 단일교각과 비교·분석함으로써, 교량, 도로교 등의 수공구조물 설계, 안정성 검토 및 유지관리에 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 연속교각의 세굴특성

단일교각의 세굴특성에서는 나타나지 않지만 연속교각의 세굴특성에 영향을 미치는 4가지 mechanism은 다음과 같다.¹⁾

- (1) 중첩효과 (Reinforcing)
- (2) 방호효과 (Sheltering)
- (3) 발산 와류 (Shed Vortex)
- (4) 결합된 마제형와 (Compressed Horseshoe Vortex)

3. 수리모형실험

3.1 수리모형 실험장치

그림 1은 본 연구에서 수행된 만곡부 흐름특성 실험, 단일교각 및 연속교각 세굴특성 실험을 위한 수리모형 실험장치와 관측지점을 나타내고 있다.

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 위촉연구원

** 홍익대학교 토목공학과 교수

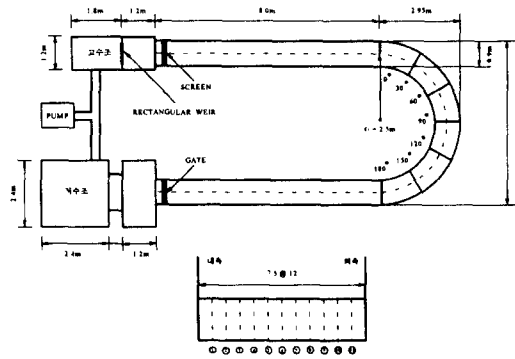


그림 1 수리모형 실험장치 및 관측지점

3.2 만곡부 흐름특성 실험 및 결과

만곡부 흐름특성 실험은 중앙입경(d_{50})이 0.53mm, 기하학적 표준편차(σ_g)가 1.82인 불균등 모래를 18cm로 평행하게 포설한 후 실시하였다. 이때 유량조건은 41(ℓ /sec)였으며, 실험시간은 1시간 20분이었다.

(1) 유속분포

최대유속은 만곡부로 진입하면서 내측에서 발생되다가 90°를 지나면서 외측으로 편기되었으며, 150° 단면 외측에서 발생하였다. 또한 만곡부 정점을 지나면서 내, 외측의 유속 변화폭이 증가하였다.

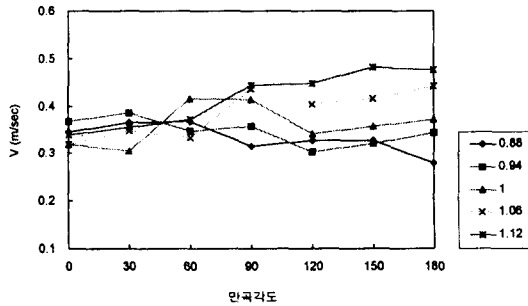


그림 2 흐름방향 유속분포

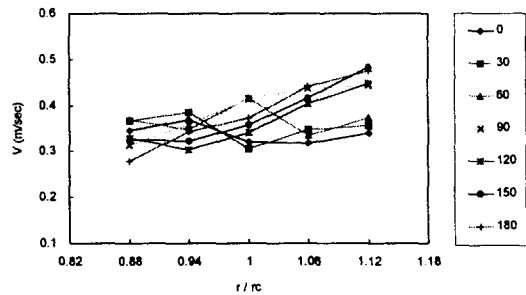


그림 3 각 단면의 유속분포

(2) 횡방향 하상경사

최대 횡방향 하상경사는 150° 단면에서 발생하였으며, 내측은 퇴적되고 외측은 침식되는 경향이 만곡부 정점부를 지나면서 점차적으로 증가하였다.

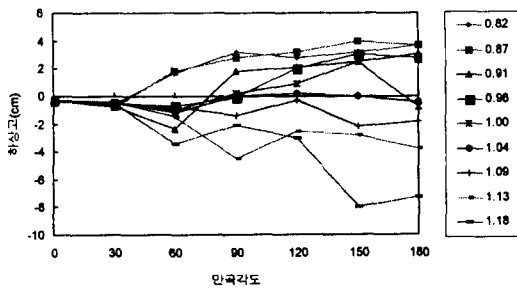


그림 4 흐름방향 하상경사 변화

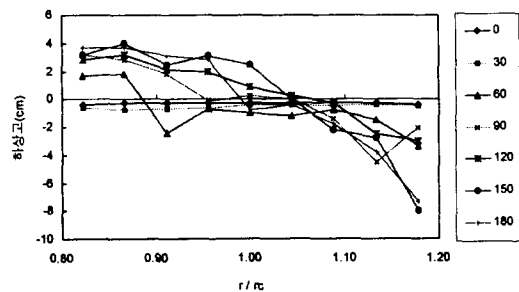


그림 5 횡방향 하상경사 변화

3.3 단일교각 및 연속교각의 세굴특성 실험

단일교각의 세굴특성 실험은 직경이 3.75cm인 원형교각에 대해 직유로부에서는 유로중심선, 만곡부에서는 만곡부 흐름 특성실험 결과 최대 횡방향 하상경사가 발생한 150° 단면의 외측에서 수행되었다. 이때 만곡부의 교각 설치 위치는 벽면효과를 고려하여 벽면으로부터 15cm를 띄어 설치되었다. 또한 연속교각의 세굴특성 실험은 단일교각의 세굴특성 실험과 동일한 지점에 3개의 교각을 교각직경의 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21배 간격으로 연속적으로 설치하여 실시하였다. 그림 6은 연속교각의 설치 위치를 나타내고 있다.

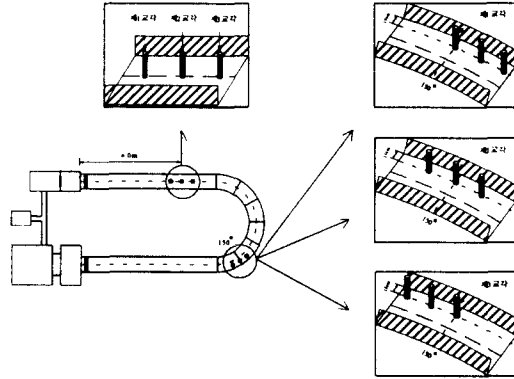


그림 6 연속교각 설치도

4. 단일교각과 연속교각의 세굴특성

4.1 단일교각

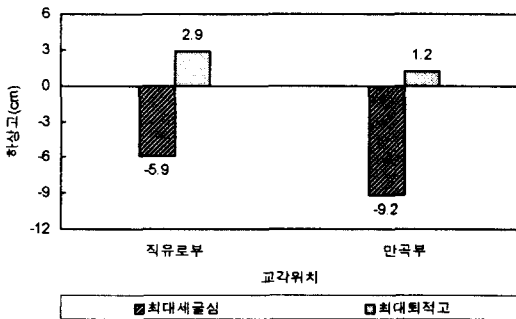


그림 7은 직유로부와 만곡부 150° 단면의 외측에 설치된 단일교각의 최대세굴심과 최대퇴적고를 나타내고 있다. 단일교각 설치시 만곡부의 최대세굴심은 만곡부의 흐름특성으로 인한 수축세굴의 영향으로 직유로부에 비해 1.6배 정도 크게 발생하였지만, 최대퇴적고는 직유로부에서 2.4배 정도 크게 발생하였다.

그림 7 교각위치에 따른 단일교각의 최대세굴심과 최대퇴적고

4.2 직유로부 연속교각

(1) 최대세굴심 변화

그림 8은 직유로부에 설치된 연속교각의 교각간격에 따른 최대세굴심 변화를 단일교각과 비교하여 나타내고 있다.

제 1교각은 교각간격이 교각직경의 3배일 때 세굴심의 증가가 가장 크게 나타났으며 단일교각에 비해 21% 정도 세굴심이 증가하였다. 교각간격이 가까울 때 제 1교각에서 세굴심이 증가된 원인은 제 1교각과 제 2교각의 세굴공이 중첩되어 제 2교각에서 발생한 와류가 제 1교각에 영향을 미친 것으로 사료된다.

그러나, 제 2교각과 제 3교각은 교각간격이 교각직경의 6배일 때 세굴심이 각각 28%와 40% 정도 감소하였으며, 연속교각으로 인한 영향이 가장 크게 발생하였다. 제 2교각에서 세굴심이 감소된 원인은 제 1교각에

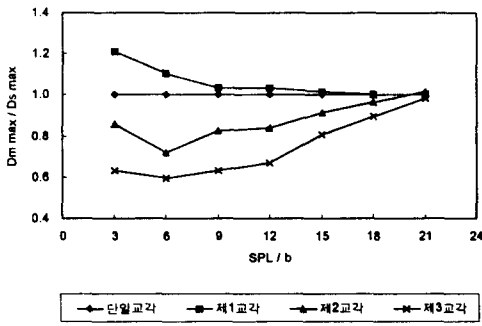


그림 8 교각간격에 따른 최대세굴심 변화(직유로부)

(2) 최대퇴적고 변화

그림 9는 연속교각 설치시 교각의 배후 하상에 생성된 최대퇴적고의 변화를 단일교각과 비교하여 나타내고 있다.

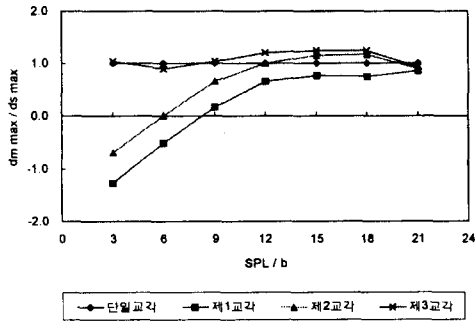


그림 9 교각간격에 따른 최대퇴적고 변화(직유로부)

의해 접근유속이 감소하였으며, 제 1교각에서 세굴된 유사가 세굴공으로 유입된 것으로 사료된다. 또한 제 3교각은 제 1교각과 제 2교각의 영향으로 제 2교각 보다 세굴심의 감소가 더욱 크게 발생하였다.

그러나, 교각간격이 교각직경의 21배일 때 제 1, 2, 3 교각 모두 단일교각의 최대세굴심과 거의 동일하게 발생하였으며 연속교각의 영향은 발생하지 않았다.

교각간격이 교각직경의 3배일 때 제 1교각의 최대퇴적고는 단일교각에 비해 3.3배 정도 감소하였으며, 제 2교각은 2.7배 정도 감소하였다. 특히 제 1교각에서 최대퇴적고가 가장 작은 이유는 교각주위에서 세굴된 하상재료가 퇴적되지 못하고 제 2교각의 세굴공으로 유입된 것으로 사료된다. 교각간격이 교각직경의 21배일 때 제 1, 2, 3교각의 최대퇴적고는 단일교각의 최대퇴적고와 거의 동일하게 발생하였으며, 최대세굴심의 변화와 마찬가지로 연속교각으로 인한 영향이 없음을 알 수 있었다.

(3) Froude 수 변화

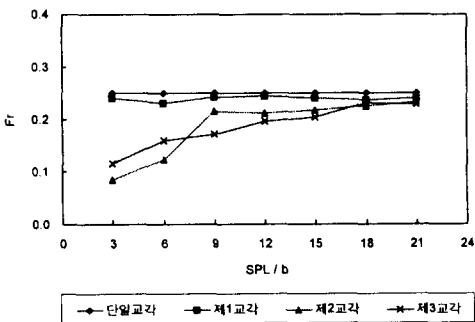


그림 10 교각간격에 따른 Froude 수 변화(직유로부)

그림 10은 연속교각 설치시 교각별 Froude 수의 변화를 단일교각과 비교하여 나타내고 있다.

제 1교각의 Froude 수는 단일교각의 Froude 수와 거의 같았다. 그러나 제 2교각은 제 1교각에 의해 접근유속이 감소되어 Froude 수는 단일교각에 비해 감소하였으며, 제 3교각은 교각간격이 가까울 때를 제외하고 제 1, 2교각의 영향을 받아 더욱 감소하였다. 교각간격이 증가함에 따라 각 교각의 접근유속이 증가하여, Froude 수는 단일교각의 Froude 수에 가까워졌다.

4.3 만곡부 연속교각

(1) 최대세굴심 변화

그림 11은 만곡부 150° 단면 외측에 설치된 연속교각의 교각간격에 따른 최대세굴심 변화를 단일교각과 비교하여 나타내고 있다.

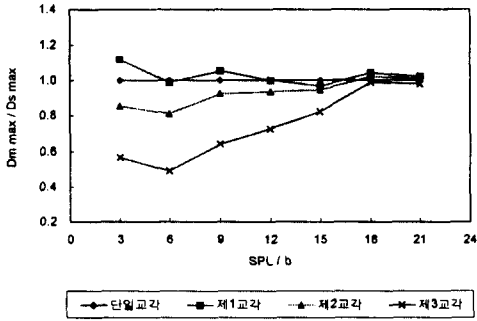


그림 11 교각간격에 따른 최대세굴심 변화(만곡부)

(2) 최대퇴적고 변화

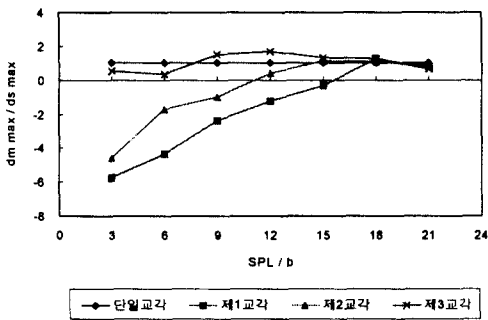


그림 12 교각간격에 따른 최대퇴적고 변화(만곡부)

(3) Froude 수 변화

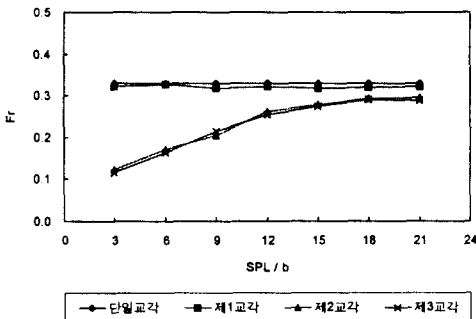


그림 13 교각간격에 따른 Froude 수 변화(만곡부)

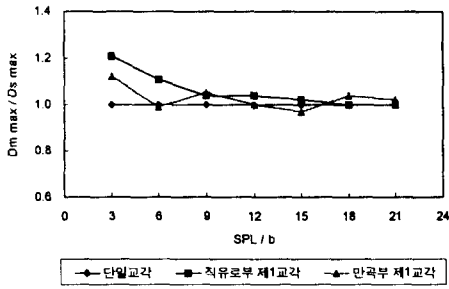
4.4 최대세굴심 변화 비교

그림 14(a)에서 보는 바와 같이 제 1교각은 직유로부와 만곡부 모두 교각간격이 교각직경의 3배일 때 연속교각의 영향이 가장 컸으며, 만곡부 보다 직유로부에서 9% 정도 증가하였다. 또한, 그림 14(b)와 그림 15, 16에서 보는 바와 같이 연속교각으로 인한 만곡부의 최대세굴심은 만곡부의 흐름특성으로 인한 수축세굴의 영향으로 직유로부에 비해 1.3배에서 1.8배 정도 증가하였으며, 단일교각일 때 1.6배와 비슷한 경향을 보였다.

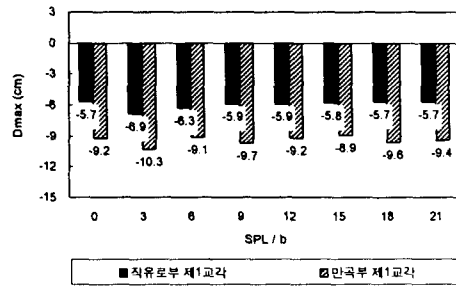
만곡부에 설치된 연속교각의 최대세굴심 변화는 직유로부와 비슷한 경향을 보였다. 제 1교각은 교각간격이 교각직경의 3배일 때 단일교각에 비해 12% 정도 세굴심이 증가하였다. 제 2교각과 제 3교각은 교각간격이 교각직경의 6배일 때 단일교각에 비해 최대세굴심이 각각 18%와 51% 정도 감소하였으며, 연속교각으로 인한 영향이 가장 크게 나타났다. 그러나 교각간격이 증가함에 따라 제 1, 2, 3교각 모두 단일교각의 최대세굴심과 거의 동일하게 발생하였으며 교각간격이 교각직경의 18배 부터는 연속교각의 영향이 없었다.

만곡부 연속교각의 최대퇴적고의 변화는 직유로부와 비슷한 경향을 보였다. 교각간격이 교각직경의 3배일 때 제 1교각과 제 2교각의 최대퇴적고는 단일교각에 비해 각각 7.8배, 6.6배 정도 감소하였으며, 직유로부의 3.3배와 2.7배에 비해 2.4배 정도 더 작게 발생하였다. 그러나 제 3교각은 교각간격이 변화해도 단일교각의 최대퇴적고와 비슷하였으며, 교각간격이 교각직경의 18배일 때 제 1, 2, 3교각 모두 단일교각의 최대퇴적고와 거의 동일하였다.

제 1교각의 Froude 수는 단일교각의 Froude 수와 거의 같았지만, 제 2교각과 제 3교각은 제 1교각에 의해 접근유속이 감소되었기 때문에 단일교각에 비해 감소하였다. 그러나 제 3교각은 직유로부와는 달리 제 2교각과 비슷하게 나타났으며, 이는 만곡부 흐름특성으로 인한 교각의 접근유향 때문에 제 1교각의 영향을 적게 받은 것으로 사료된다.



(a)



(b)

그림 14 제 1교각의 최대세굴심 변화 비교

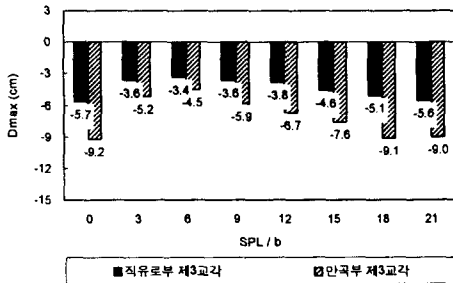


그림 15 제 2교각의 최대세굴심 변화 비교

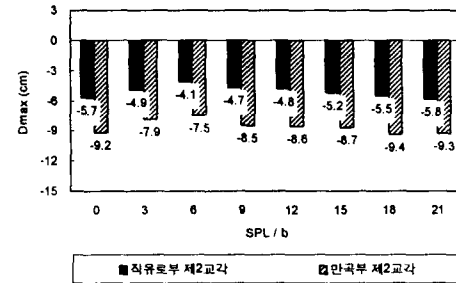


그림 16 제 3교각의 최대세굴심 변화 비교

5. 결론

1. 단일교각 설치시 최대세굴심은 만곡부 150° 단면 외측에서 만곡부 흐름특성으로 인한 수축세굴의 영향으로 직유로부 보다 1.6배 정도 크게 발생하였지만, 최대퇴적고는 직유로부에서 2.4배 정도 크게 발생하였다.
2. 교각간격을 변화시킨 연속교각의 경우 직유로부는 교각간격이 교각직경의 21배일 때, 만곡부는 교각직경의 18배일 때 연속교각의 영향이 발생하지 않았다.
3. 연속교각의 최대세굴심 변화를 단일교각과 비교한 결과 제 1교각은 직유로부와 만곡부 모두 교각간격이 교각직경의 3배일 때 연속교각의 영향이 가장 컸으며, 직유로부에서는 약 21%, 만곡부에서는 약 12% 최대세굴심이 증가하였다. 그러나, 제 2교각과 제 3교각은 직유로부와 만곡부 모두 교각간격이 교각직경의 6배일 때 연속교각의 영향이 가장 컸으며, 직유로부에서는 최대세굴심이 각각 28%, 40% 정도, 만곡부에서는 각각 18%, 51% 정도 감소하였다.
4. 연속교각 설치시 최대세굴심의 변화는 만곡부 보다 직유로부에서 크게 발생하였으며, 이는 만곡부 흐름특성으로 인한 교각의 접근유향 때문에 접근유속의 감소가 작았으며, 최대퇴적고가 외측으로 편기되었기 때문으로 사료된다.
5. 만곡부 150° 단면 외측에 설치된 연속교각의 최대세굴심은 만곡부 흐름특성으로 인한 수축세굴의 영향으로 직유로부에 비해 1.3배에서 1.8배 정도 증가하였으며 단일교각일 때 1.6배와 비슷한 경향을 보였다.

6. 참고문헌

- 1) Breusers, H. N. C., and Raudkivi, A. J., "Scouring", Balkema, 1991.
- 2) Richardson, E. V., et al., "Evaluating Scour at Bridges", Hydraulic Engineering Circular No. 18, FHWA-IP-90-017, FHWA, February, 1993.
- 3) 최계운 외 2인, "하천내 연속교량 설치에 따른 세굴심도 변화", 대한토목학회 학술발표회, 1996, pp. 107~110.