

수초에 의한 교각주변 흐름의 변화와 세굴심 감소

Flow variation and reduction of scour depth around a pier due to vegetation upstream

윤태훈¹⁾, 신용진²⁾, 정경자³⁾, 김태수⁴⁾

1. 서론

세굴은 홍수시 하상의 입자의 이탈로 인해 교량의 안전을 위협하는 흐름 특성으로서 그 동안 세굴에 대한 실험 및 이론적인 연구가 되고 있다. 그러나 세굴은 그 현상이 3차원적이므로 해석이 어려울 뿐만 아니라 자연적인 현상으로서 복잡한 난류 형상의 흐름으로 세굴심의 예측은 물론 그 대책의 마련도 어렵다. 본 연구는 그 동안의 세굴에 대한 연구들을 바탕으로 세굴 보호공으로 최근 관심이 되고 있는 세굴 유발인자의 감소방안에 대한 연구를 행하고자 한다. 세굴 유발인자로 말굽형와와 하강류를 가장 주목하여 왔다. 그래서 하강류의 차단을 목적으로하는 원환의 설치와 교각의 구멍을 내는 방법들이 연구되어진 바 있고, 말굽형와는 그 영향이 세굴에 미치는 영향이 큰 것임에는 틀림이 없으나 생성과 발달이 너무나 복잡하고 해석이 불가능하므로 직접적인 제어가 불가능하다.

본 연구는 그 동안의 이러한 연구와 비교를 통하여 새로운 방법인 인공의 수초를 이용한 세굴 방지방법의 가능성을 알아보았다. 인공의 수초를 이용하여 교각의 접근유속의 감소를 꾀하고 흐름의 방향을 교란하여 세굴의 유발인자 중 가장 영향이 큰 유속의 제어를 시도하였다. 본 연구는 최근의 관심사인 환경문제와 하천의 생태계파괴 등의 문제를 해결해 줄 수 있는 방법이다. 그 동안의 대체적인 세굴 방지방법은 하상에 돌방대, 콘크리트블럭, 사석채움등 하상 장갑화하는 방법들이었다. 그러나 이러한 연구 역시 그 연구되어져 온 기간이 짧고 정확한 공식의 제시가 미비하여 시공에 문제점이 대두되어지고 또한 하천의 생태계가 파괴되어지는 단점 등이 있다.

최근 외국에서는 하천의 복원사업이 활발히 진행되어져 왔고 우리나라에서도 이러한 자연형 하천이 관심을 모으고 있다. 따라서, 본 연구는 이러한 연구 동향에 비추어 자연친화적이며 세굴 방지에 큰 효과를 보인 인공 수초에 대한 실험적 연구가 이루어졌다.

본 연구에서는 세굴과 수초의 매설깊이와의 관계에 더불어 수초의 존재로 인한 교각 주위와 교각 후류부에서의 흐름의 변화, 교각과 수초매설위치와의 관계 등을 연구하였다. 각각의 실험은 한가지의 유량과 수심을 고정하여 같은 흐름 조건을 선정하였으며 실험시간은 4시간으로서 동일하게 설정하였다. 측정은 포인트 게이지를 이용하고 유속은 2차원 유속계를 사용하였다.

향후로는 수초에 의하여 일어날 수 있는 흐름의 교란에 대한 폭 넓은 실험이 요구되어지며, 유량과 수심의 변화와 더불어 수초의 키와 수초의 종류에 따른 조도계수의 변화, 수초의 강성을 나타낼 수 있는 지수의 개발, 수초의 밀도에 따른 영향과 교각의 형상에 대한 연구, 하상의 재료 및 이동상에서의 수초에 의한 퇴적 현상의 관찰, 하상 경사에 따른 수초의 영향 등 많은 연구가 수행되어져야 하며 본 연구가 앞으로 많이 행하여질 이러한 연구들의 기초자료로 활용되기를 바란다.

2. 본론

2.1 실험 개요

기존의 수초에 대한 연구는 대부분이 하천의 고수부지나 홍수터에서 수초에 의한 흐름의 변화를 연구한 것이다. 본 연구의 목적은 수초에 의한 흐름의 변화와 세굴방지공으로서의 수초의 효율성과 실용성을 판단하는 것이다. 그러나 직접적인 세굴실험을 행하기에 앞서 교각 또는 수초가 흐름에 어떠한 영향을 주는 가

- 1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
- 2) 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정
- 3) 한국도로공사 도로연구소 연구원
- 4) 한국도로공사 도로연구소 연구원

와 수초와 교각이 동시에 있을 경우 세굴공 범위에서의 흐름의 변화를 관찰하여 볼 필요가 있다. 따라서, 흐름의 변화를 관찰하기 위하여 2차원 유속계를 사용하여 교각과 수초 주위의 유속을 측정하였다. 이로써 수초가 세굴감소에 어떠한 영향을 끼치는 지에 대한 예측이 가능하였고 또한 세굴실험을 행함으로써 이를 비교하여 검토할 수 있었다.

실험 시 세굴심의 변수로는 수초의 키와 폭, 유속 및 교각과 수초와의 거리, 수초의 밀도와 수초의 매설 깊이가 등이다. 본 연구는 이러한 세굴의 인자들 중에서 수초의 매설깊이에 따른 세굴심의 감소효과와 수초와 교각 사이의 거리에 따른 세굴심 감소를 실험하였다. 적절한 매설깊이와 적절한 거리를 찾아 낸은 실용적인 수초의 매설이라는 면에서 큰 의의가 있다. 또한 실험을 통하여 세굴심의 감소율을 구함으로써 수초로 인한 세굴의 효율성을 알아 볼 수 있었다.

실제의 수초를 사용하여 실험할 수는 없는 관계로 인공으로 수초와 비슷한 역할을 기대할 수 있는 재료를 찾아서 실험하였다. 실험에 사용된 인공수초는 폴리에스테르로서 얇은 천과 같은 모형으로 독립적으로 임의의 길이에 대해서 곳곳히 서있을 수 있으며 물을 흡수하지 않는 재료이어야 하고 흐름에 대하여 유동적이어야 한다. 따라서, 유연한 재료가 선택되었다.

본 연구에서는 이러한 인공의 수초를 사용하여 세굴 실험을 행하였으며, 그 변수로는 수초의 매설깊이로서 최대 세굴심을 비교하였다. 실험 시간은 4시간으로 정하였으며, 이것은 남궁돈(1997)에 기초하여 4시간의 세굴이 장시간 세굴(12시간)과 비교하여 5%미만의 오차를 보인 것에 기초하여 결정하였다.

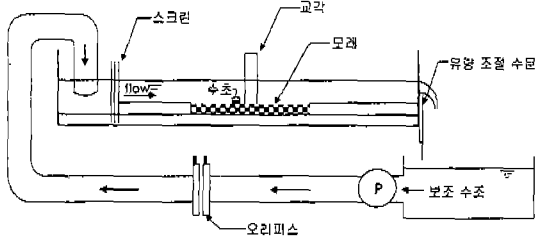


그림 1. 수로의 개략적 모형

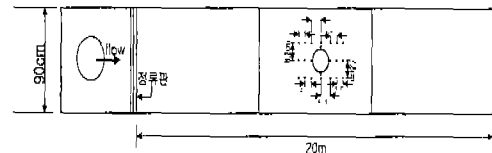


그림 2. 세굴심의 측정을 위한 측정점

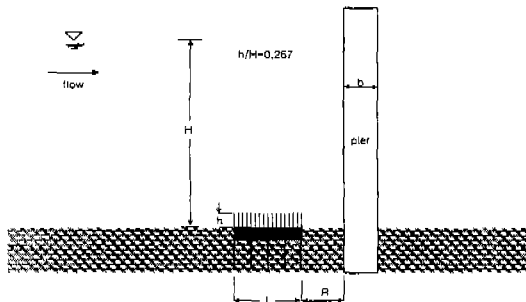


그림 3. 실험의 개략도

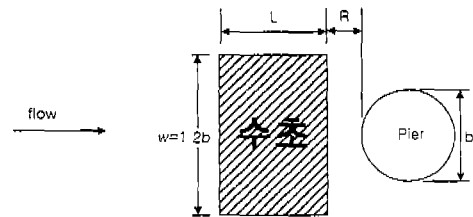


그림 4. 인공 수초의 매설모습

2.2 실험 결과

2.2.1 교각 주위의 흐름의 측정 실험

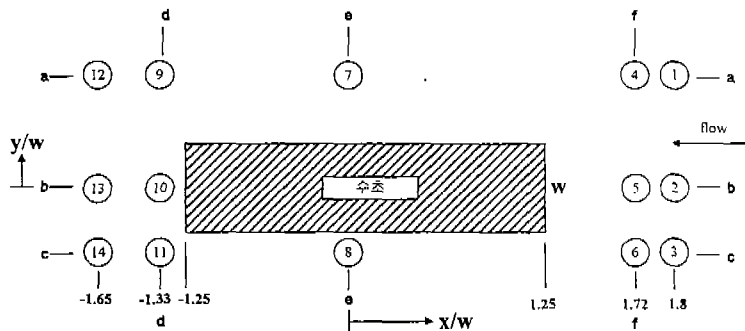


그림 5. 연직유속을 측정한 측정점들의 위치

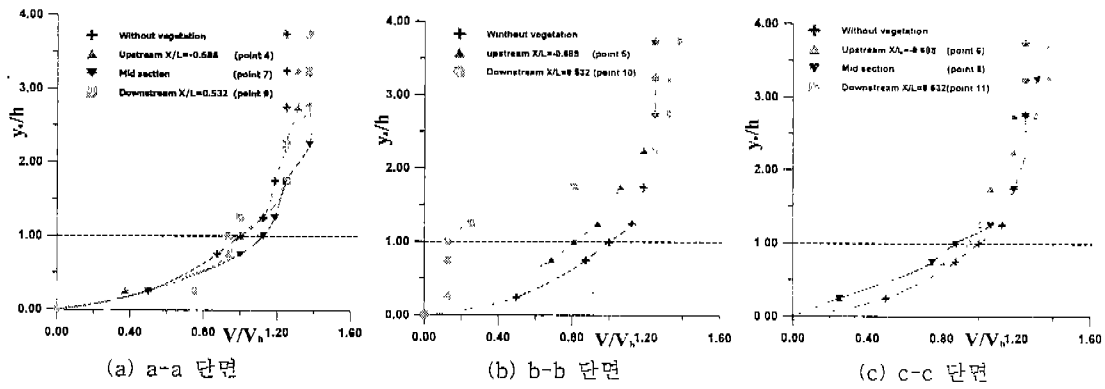


그림 6. 종단면 연직유속비 비교

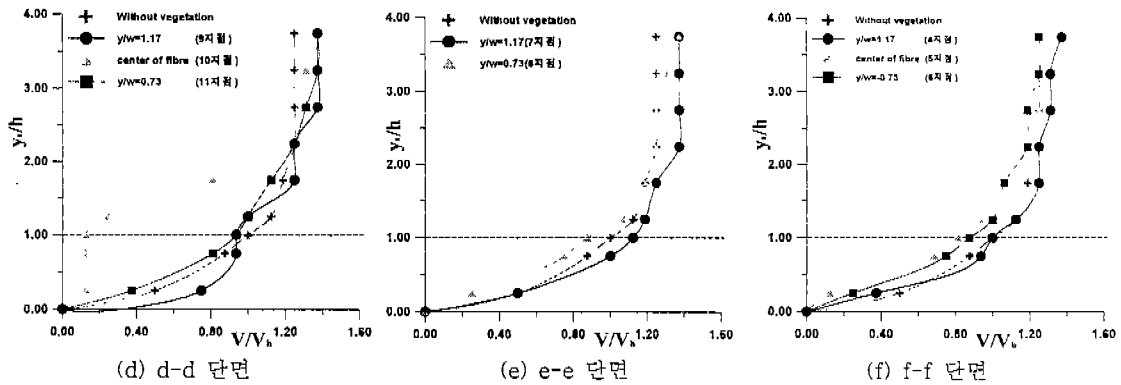


그림 7. 횡단면 연직유속비 비교

위의 그래프에서 보듯이 유속은 수초 주위에서 폭 넓게 분포하는 것이 아니라 수초에 의해 흐름이 변화하는 부분은 수초 중앙의 직 상류부에서 약간의 지체와 더불어 수초 후미에서의 유속변화가 눈에 띄게 나타났다. 이로써 수초를 통과한 흐름은 그 에너지를 많이 잃고 유속이 상당히 저하된 상태로 흐른다는 것을 알 수 있다. b-b 단면의 그래프를 보면 수초의 중앙을 따라 흐르는 흐름에서 서서히 유속이 지체되다가 수초를 지난 후에 급격히 감소하는 경향을 알 수 있었다. 또한 이러한 그래프는 후미의 측정점 9,10,11을 비교한 d-d 단면의 그래프에서도 수초의 중앙부분의 유속이 많이 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 그러나 수초의 양 끝단에서의 흐름의 변화는 거의 찾아 볼 수 없었으며 수초가 주는 영향범위는 극히 제한적이라는 것도 또한 알 수 있었다. 수초에 의한 흐름의 변화가 수초를 시작으로 넓게 방사선으로 퍼져나가지 않을 까하는 예상은 본 실험의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 그러하지 않다는 것이 증명되었다. 따라서, 본 실험의 결과 흐름을 변화시켜 세굴심을 감소시키는 방법으로서 수초의 효율성이 크다는 것을 알 수 있었다. 세굴의 가장 지배적인 인자인 유속의 급격한 감소를 일으키므로 수초에 의해 교각 전면부의 유속을 상당부분 낮출 수 있다고 할 수 있겠다.

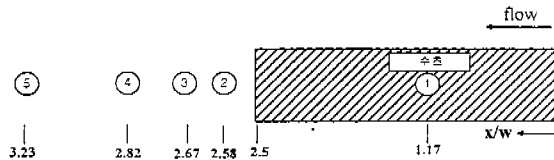


그림 8. 수초대 하류 유속 측정 지점

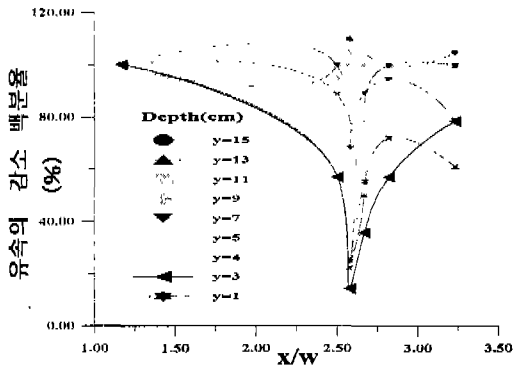


그림 9. 각 측정별 연직유속분포

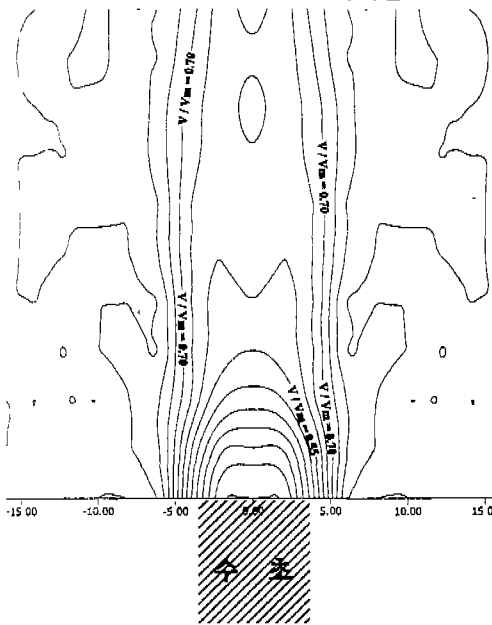


그림 10. 수초대 하류 유속분포

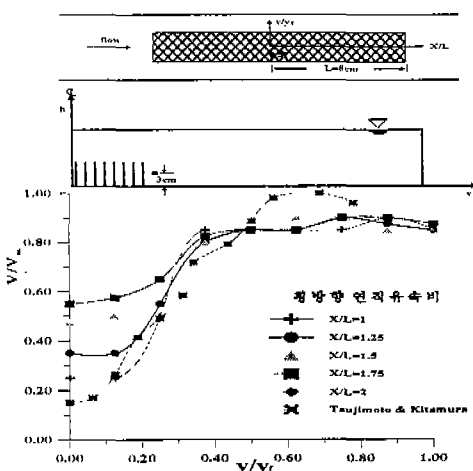


그림 11. 횡방향 유속분포

수초에 의한 영향이 수초의 말단부로부터 하류방향이고 좌·우 측면보다는 중앙 단면에서 흐름의 변화를 더욱 잘 관찰할 수 있었으므로 그 부분을 다시 실험하였다. 따라서, 관심이 되는 수초의 하류부분에서의 유속의 변화를 알아보기 위해서 좀 더 많은 측정점을 하류에 설정하여 측정별 유속을 다시 측정하여 보았다. 수초의 말단에서 유속의 저하는 뚜렷이 관찰되었으며, 외쪽의 그래프에서도 볼 수 있듯이 급격히 떨어지는 부분이 바로 수초의 말단이다. 또한 수심별로 비교하여 보면 수심이 수초의 키를 지난 4cm 이상 되는 부분에서의 유속의 감소는 미비하고 수초의 키 이하되는 지점에서 유속의 감소를 확실하게 관찰할 수 있었다. 또한 하류부 쪽으로 갈수록 점점 평균 유속을 회복하는 것을 볼 수 있었으나 완전한 회복은 기대하기가 어려웠다.

수초대 하류부의 유속의 분포는 왼쪽과 같으며, 수초의 후미에서 유속이 급감한 후 점차적으로 회복해 가는 것을 관찰할 수 있다. 그러나, 수초와 교각에 의해 교란된 흐름은 원 유속을 회복하는 데 상당한 거리와 시간이 요구되는 것으로 알려져 있듯이 본 실험에서도 수초에 의해 교란된 흐름이 원 유속을 회복하는 것까지는 관찰하지 못하였다. 상당한 거리라고 생각되는 거리에서의 측정에서도 본 유속을 회복하지는 못하였다. 또한, 관찰시 흐름이 일률적이지 못하고 수초가 유동적인 만큼 유속 또한 수초와 맞추어 유동적인 적을 관찰할 수 있었다. 따라서, 측정이 상당히 까다로웠으며 유속은 2차원 아날로그 유속계를 사용하여 유속 측정 바늘이 움직이는 범위의 평균값을 그 지점의 유속으로 선정하였다. 그러므로 본 실험에서의 유속은 상당한 변동성이 있으며 오차 또한 클 것이라고 생각된다. 그러나 적당한 유속의 측정방법을 알 수 없으므로 유속이 수초 후미에서 상당히 감소한다는 경향과 하류쪽으로 갈수록 유속의 회복이 일어난다는 경향의 파악만으로 만족해야 할 것 같다. 따라서, 수초를 이용한 세굴심감소 효과는 수초를 교각 전면부에 밀착시켜 설치하면 본래 예상했던 교각 전면부 유속의 감소로 인한 세굴심감소와 더불어 교각에 밀착시킨 경우 휘어진 수초와 수초지지판에 의해 교각의 하강류를 차단하여 세굴심을 감소하는 두 가지의 효과를 기대할 수 있겠다.

기존의 Tadjimoto & Kitamura의 본문과 비교하여 횡방향 유속을 검증하도록 하였다. 이 실험은 횡방향으로 수초의 영향이 얼마나 미치는가를 알아보기 위하여 행하여 졌다. 본 실험과 Tadjimoto & Kitamura의 결과는 약간 차이가 보이는 데 이러한 결과의 차이는 실험방법이 서로 달라서 발생한 오차라고 볼 수 있다. 말하자면, 수초를 벽면에 붙여 실험한 경우와 수로의 가운데 벽면의 영향을 배제한 실험에서 오는 벽면에 의한 마찰의 차이로 Tadjimoto & Kitamura의 실험은 수초를 벽면에 붙여 실험하였으므로 벽면의 영향을 고려하여야 한다. 본 실험에서는 수초를 수로의 중앙에 위치시켰으므로 벽면에 의한 영향은 무시될 수 있다. 또한 수초의 크기와 수심과의 비가 다르므로 위 실험에서 알 수 있듯이 흐름은 수초의 키를 지나면서 급격히 원 유속을 회복하게 된다. 다시말해서 수초의 키보다 위 부분에서는 수초에 의한 흐름의 변화가 없다는 결론이다. 이밖에도 유속의 차이, 수초의 강성의 차이 등이 그 원인이라 할 수 있겠다.

그래프에서 알 수 있듯이 수초의 영향을 수초의 양끝단으

로 가면서 점점 회복하다가 수초를 벗어나면서는 원 유속에 빠르게 접근하는 것을 알 수 있다. 다시말해 수초를 벗어나면 유속의 감소는 미비하다는 것이다. 따라서 수초에 의한 횡방향의 범위는 수초의 폭을 기준으로 정하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

2.2.2 세굴심의 실험 결과 비교

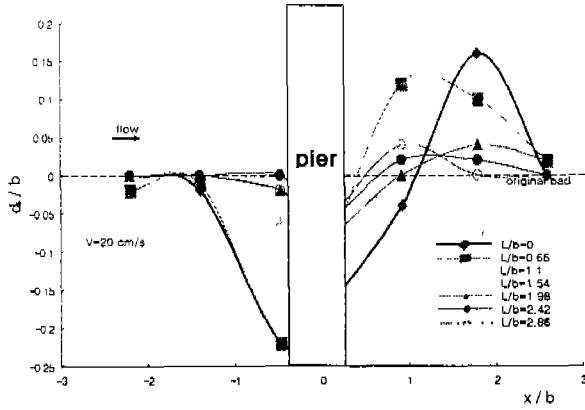


그림 12. 수초방석길이에 따른 세굴심

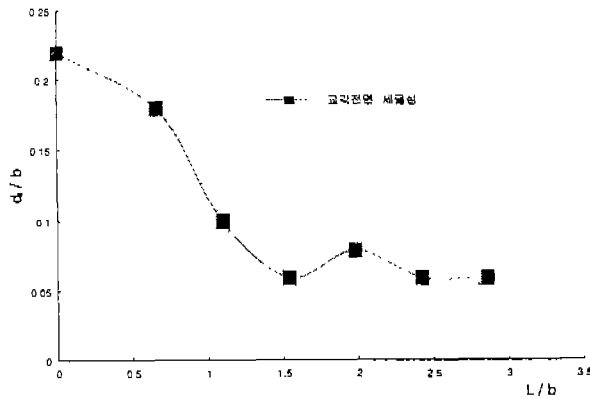


그림 13. 수초방석길이에 따른 최대 세굴심

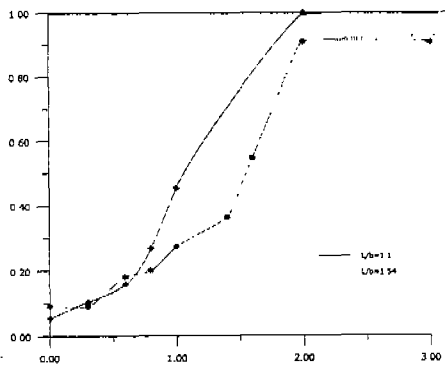


그림. R의 변화에 따른 세굴심의 변화

실험은 교각만을 설치한 경우의 세굴심과 비교하여 4시간 후의 최대 세굴심을 비교하였으며, 각각의 유량은 0.027cms로 동일하게 하였으며, 유속 또한 20cm/s로 일정하게 유지하였다. 모래의 평균입경(d_{50})은 입경가적곡선에서 0.58mm로 채택되었으며, 기하표준편차(σ_g)는 $d_{84}/d_{50}=1.72 > 1.25$ 로써 불균등분포를 갖는다. 실험시간은 4시간을 기준으로 하였으며, 수심은 15cm를 유지하도록 하였다. 이번의 실험에서는 직경 5cm의 하나의 원형 교각을 사용하였으며, 수초의 폭 또한 6cm로 결정한 후에 실험하였다. 우선 한 가지의 교각과 수초 간격에 대하여 적절한 매설길이를 찾아내었다. 그림 13.에서 보듯이 수초의 길이를 늘려 나갈수록 전면부 세굴심이 감소하는 경향을 알 수 있다. 그러나 일정한 길이 이상, 구체적으로 말해서 본 실험에서는 $L/b=1.54$ 인 지점 이상부터는 매설길이의 증가에 따른 세굴심의 감소효과가 미비하거나 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 본 실험에서는 적절한 수초의 매설길이를 1.54b로서 결정되어졌고 그 길이에 따른 수초와 교각과의 간격을 변화하면서 그에 따른 세굴심의 감소현상을 관찰하였다. $L=1.54b$ 는 본 실험조건에서 찾아낸 특정한 매설길이이므로 보다 많은 연구를 통하여 매설길이 결정식의 도출이 필요하다고 할 수 있겠다.

매설길이가 $L=1.54b$ 로 선정된 수초에 대하여 교각과 수초와의 간격을 변화시켜가면서 교각 직경의 몇 배 전·후에서 효과의 변화가 있는지 실험하였다. 이는 특정한 수초의 매설길이를 결정하여 매설길이를 고정시키고 수초와 교각과의 거리만을 변화시켜가면서 교각과의 거리가 어느 정도 떨어져 있을 경우에 효과적이고 어느 정도 떨어지면 수초의 효과가 미비해지는지를 알아보기 위하여 실험하였다. 결과적으로 교각 직경의 1.54배의 매설길이가 교각과 수초와의 간격이 0b에서 1.4b까지 그 효과가 있었다. 이는 교각에 밀착시킨 경우 그 효과가 가장 컸고 그 이후로는 0.5b정도까지는 효과가 탁월하다는 것을 관찰할 수 있었다.

3. 결론 및 향후 과제

본 실험을 통하여 수초가 흐름에 상당한 영향을 줄 수 있으며 이로 인한 교각 전면부의 유속의 감소효과를 상당부분 기대할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이는 기존까지의 바닥보호공으로서의 세굴방지대책이 아니라 흐름의 특성을 변화시켜 세굴을 방지하는 방법으로 국내에서는 아직까지 그 연구가 초보적인 단계에 있다. 외국의 경우는 이 수초에 의한 세굴방지에 대한 연구와 더불어 수초의 밀도와 매설방향, 부설범위와 수초에 의한 조도계수의 변화 등 연구가 활발하고 실제 현장에 매설하여 모니터링하고 있는 경우도 있다.

수초에 의한 세굴 방지 대책은 실제 수초가 홍수 전·후에도 하상에서 수초가 이탈하는 경우는 극히 적으므로 수초의 매설을 실제와 같이 하거나 고정할 수 있는 방법이 개발된다면 현재의 보호공들이 홍수 후 유실되는 문제점들을 보완할 수 있는 방법이 되리라 기대된다. 또한 수초는 유속을 저하시키므로 기존의 교량에 부설하는 경우 세굴공 내에 퇴적현상을 기대할 수 있다. 이밖에도 홍수시 수초가 완전히 날면 유속을 감소시킬 수는 없으나 하상에 밀착하여 보호공과 같은 하상보호를 제공할 수도 있고, 흐름의 급격한 변화로 인한 Surge나 배수, Hydraulic Jump 등을 일으키지 않고 흐름을 변화시키면서 통수에는 아무런 무리를 주지 않는 등 여러 이점을 가지고 있다. 따라서, 인공 수초에 의한 세굴방지방법은 앞으로도 연구할 가치가 높은 세굴방지 및 흐름 제어공법이라 생각된다.

본 연구의 결과 수초의 매설길이의 변화에 따라 세굴심의 변화를 관찰 할 수 있었으며 이로서 수초의 매설길이가 세굴심과 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 수초와 교각과의 거리를 변화시켜가면서 실험한 실험에서도 교각에서부터 수초가 떨어질수록 세굴심은 깊어짐을 알 수 있다. 따라서 수초와 교각과의 거리도 세굴심과 관계있는 변수이다. 유속이 세굴심과 상당한 관계가 있음은 기존의 연구들로서 많이 알려져 있고, 수초에 의한 유속의 감소를 기대할 수 있으므로 수초와 유속도 일련의 상관관계에 있다고 할 수 있다. 따라서 세굴방지공법으로서의 수초를 사용할 경우 수초의 매설범위를 결정할 변수 중에서 수초의 매설길이와 교각과의 거리는 중요한 인자가 됨을 알 수 있었다.

앞으로는 이러한 수초에 의한 흐름을 통제할 수 있는 연구가 활발히 진행되어져야 하고 또 수초 자체에 대한 연구가 보다 전문적인 지식의 연구자들과 함께 진행되어져야 하겠다. 이밖에도 세굴방지공법으로서의 수초에 대한 연구는 수초의 매설 폭에 대하여 매설길이가 얼마나 감소 할 수 있는 가 또, 그에 따라 유속이 어떻게 달라지는지에 대한 연구와 수초의 키에 대하여 수초의 키와 수심과의 관계를 규명하기 위한 연구, 수초의 강성을 표현할 수 있는 방법의 개발, 수초의 밀도에 대한 폭과 길이의 결정, 교각의 직경에 대한 수초의 매설범위, 수초의 효율적인 매설모양에 대한 연구, 수초의 매설방법에 대한 연구 등이 이루어져야 한다고 판단된다.

참고문헌

1. 서울특별시, 1998, 한강교량기초 수리모형실험 보고서
2. 윤태훈, 윤성범, 윤광석, 1996, 교각세굴 사석보호공의 기존 설계식의 비교해석, 대한토목학회 논문집, 16권 II-5호
3. 윤태훈, 윤성범, 오철승, 1998, 원형교각 세굴방지공의 사석결정식, 대한토목학회 논문집, 18권 II-1호
4. 세굴방지 시설물에 관한 교각의 국부세굴방지 실험, 1998, 한국수자원학회 학술발표회 논문집
5. 남궁 돈, 1997, "불균일단면교각이 교량세굴에 미치는 영향"
6. Chow, V.T., 1959, *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill Inc.
7. Simons, D.B. and Fuat Senturk, 1977, *Sediment Transport Technology*, Water Resources Publications Fort Collins.
8. River and Harbour Laboratory at the Norwegian of Technology, ICI Scour Prevention System "Hydraulic Flume study"
9. 건설기술연구소, 1999, 하천식생에 의한 수리특성 예측모형개발
10. Pennsylvania Department of Transportation, Final Report Research Project 91-02, "Bridge Scour Protection System Using Toskanes - Phase I"
11. Federal Highway Administration, Third Edition, "Evaluating Scour at Bridge"
12. Tadanori Kitamura, Yafei Jia, Tetsuro Tsujimoto, Sam S.Y.Wang (1998) "Sediment Transport Capacity in Channels with Vegetation Zone".