

90° 합류부를 지닌 수로에서 교각 위치에 따른 하상변동

The Variation of Channel Bed by Location of Pier near 90° Channel Junction

최 계 운* / 김 영 규** / 김 기 형***

Choi, Gye Woon / Kim, Young Kyu / Kim, Gee Hyoung

Abstract

The variation of channel bed which shows the complex hydraulic characteristics at channel junction was investigated by variation of discharge ratio and location of pier. As discharge ratio increase, the depth and width of erosion region become bigger to point of 63% of channel width in case of 1:0.5 discharge ratio. It was observed that the maximum scour depth at the point of 0.5 times of the channel width in the channel junction as 2.5 times bigger than straight channel. It means that the maximum scour depth at the channel junction is 2 times greater than by experimental formulas which are widely used in practical engineering, location of pier should be determined when it is installed in channel junction.

Keywords : channel junction, variation of channel bed, pier scour, maximum scour depth, discharge ratio

요 지

합류수로에서의 하상변동에 대하여 90°합류부가 있는 수로를 이용하여 유량비 및 교각 위치를 변화시키면서 하상변동을 조사하였다. 유량비가 증가함에 따라 침식 깊이 및 침식 폭이 증가하는 경향이 나타났다. 유량비가 1:0.5에서 전체수로폭의 63%까지 침식되는 것으로 나타났으며, 최대 세굴심은 지류의 영향으로 인하여 가속유로에서는 합류점으로부터 수로 폭의 0.5배 되는 지점에서 직선 수로에서의 세굴심보다 2.5배 이상 큰 것으로 나타났다. 이것은 가속유로에서 나타난 최대 세굴심이 기존의 세굴공식에 의한 결과보다 2배 정도 크게 나타났다. 따라서, 합류부에 교각을 설치 할 경우 위치선정에 상당한 주의가 필요하다고 판단된다.

핵심용어 : 합류부, 하상변화, 교각세굴, 최대세굴심, 유량비

1. 서 론

인간은 편안한 생활을 하기 위해 하천에 교량을 설치하고 있다. 그러나 교량을 설치함에 있어 지형적인

조건을 크게 고려하지 못하고 있다. 특히 하천과 하천이 만나는 합류부의 경우 유량비나 합류각에 따라 수리학적 현상이 매우 복잡함에도 불구하고, 교각의 위치를 중요한 설계인자로 고려하지 않고 있다. 그러나,

* 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수
Professor, Dept. of Civil & Environmental system Eng., Univ. of Incheon, Incheon 402-748, Korea
(E-mail : gyewoon@incheon.ac.kr)

** 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 박사과정
Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental system Eng., Univ. of Incheon, Incheon 402-748, Korea
(E-mail : youngkyu@incheon.ac.kr)

*** 인천발전연구원 환경생태연구실 책임연구원
Research Fellow, Incheon Development Institute, Incheon, 406-130, Korea
(E-mail : water@idi.re.kr)

실제 하천흐름을 살펴보면 교각을 설치하면 하천의 흐름에 큰 영향을 미친다. 교각은 하천 내 퇴적을 유발시켜 홍수 시 하천 범람을 초래하기도 하고, 설치된 수공구조물이 흐름에 따라 발생하는 국부세굴에 의해 붕괴되기도 한다. 최근 들어 합류부 흐름 해석에 대한 몇몇 연구가 진행되고 있으나, 대부분이 유속 및 수위 등 흐름에 대한 일반적인 해석일 뿐, 하상 등에 대한 세부적이고 직접적인 연구는 미진한 상태이다. 또한, 합류부에서의 흐름은 지류 유입으로 인하여 흐름이 직선하천의 흐름과 상당히 다름에도 불구하고 교각에서의 안전성을 판단하는 국부세굴의 산정은 기존 직선 하천에서 연구된 국부세굴공식을 따르고 있는 실정이다.

본 연구에서는 하천의 합류부에서 발생할 수 있는 하상변화를 예측하기 위하여 본류와 지류의 유량비를 변화시키면서 실험 하였다. 합류부에 교각 설치 시 나타나는 하상변화를 합류부 흐름현상에서 나타나는 가속유로구간과 정체구간으로 나누어 분석하였다. 또한, 기존 세굴공식 적용의 적합성 검토를 위해 실측치를 공식에 적용한 결과와 비교하였다. 이를 바탕으로 합류부에 설치된 수공구조물의 세굴현상을 규명하였다.

2. 연구동향

Taylor(1944)는 동일 폭의 두 수로가 45° 및 135°로 합류하는 경우에 대하여 수심 변화를 관찰한 바 있으며, 이를 모멘트 방정식 이론을 이용하여 적용하여 해석한 바 있다. 이후 Modi 등(1981)과 Best와 Reid(1984) 등이 실험을 통하여 정체구간(zone of stagnant), 분리지역(separation zone) 등이 발생하는 것을 확인한 바 있다.

국내에서는 최근에 와서 합류부에 대한 연구가 시작되었다. 심기오(1996)는 실험을 통하여 소하천 합류부에서 장애물에 의한 수위 및 유속변화를 하상경사 및 합류각에 대하여 영향을 규명한 바 있다. 최계운(2002)과 박용섭(2003)은 본류-지류 폭의 비가 0.8인 모형 수로를

이용하여 합류부에서의 유량비별 접근각도별 수리학적 특성을 분석한 바 있다.

Hauger(1987)는 기존의 Best와 Reid(1984)가 실험한 결과를 이용하여 유량에 따른 본류와 지류의 에너지손실에 관한 관계를 해석한 바 있다. Schulte와 Chaudhry(1987)은 Newton-Raphon 방법과 Jacobiabn 행렬을 이용하여 합류 및 분류가 있는 하천망에서의 흐름의 변화를 예측할 수 있는 일반화된 모델을 제시한 바 있으며, Huang 등(2002)은 Navier-Stokes 방정식을 3차원 CFD 모델로 해석함으로써 유속 및 수위를 예측한 바 있다. 국내에서는 최계운과 강관원(1993)이 하천 합류부에서 부정류를 이용한 모멘트 방정식의 수치해석으로 해석한 바 있다. 한건연 등(1998)은 합류부에서 발생하는 수리현상을 수치적으로 해석하여 본류 흐름에 미치는 영향을 저장할 수 있는 방안을 제안한 바 있다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험장치

하상변화를 측정하기 위해 90°합류부가 있는 수로를 이용 하였다. 수로의 재원으로 본류의 폭은 40cm, 지류의 폭은 32cm로 본류-지류 폭의 비는 1:0.8이다. 또한, 수로의 길이는 본류가 400cm, 지류가 100cm이며, 지류는 본류 시작점에서 120cm 떨어진 곳에 합류한다. 유량 공급은 그림 1에 보는 바와 같다. 고수조에 물을 끌어 올려 수두를 일정하게 유지시켰다. 고수조에서 자연유하되는 물이 밸브 및 유량계를 통하여 본류와 지류로 유입되도록 하였으며, 본류와 지류 유입부에 정류판을 설치하여 물의 흐름을 안정시켰다. 수로에 설치된 받침대의 나사를 조정하여 수로바닥의 높이를 일정하게 유지시킴으로써 수평이 되도록 하였다.

본류 및 지류 유입구에 유량의 유입으로 인한 급격한 하상변화 방지와 및 일정높이의 하상 유지를 위해 하상의 높이를 동일하게 갖는 보를 설치하였다. 보의 폭은 수로의 폭과 동일하게 하여 실리콘으로 마감함으

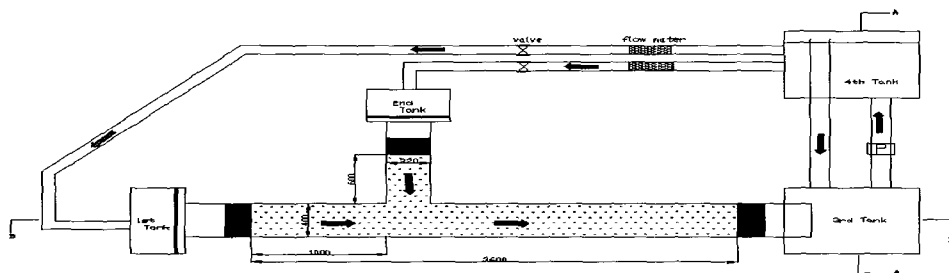


그림 1. 모형수로 개략도

로써 물이 수로와 보 사이로 들어오지 않도록 하였다. 수조 말단에 유사받이를 설치하여 침식 및 세굴로 인해 발생하는 유사를 포집하여 유사가 펌프를 통해 다시 순환하는 것을 방지하였다. 또한, 유사받이 말단부에 위어를 설치하여 수위를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다.

3.2. 실험 조건

본 실험은 원형이 존재하는 수리모형실험이 아니라 합류부의 하상변화를 예측하기 위하여 수리현상을 규명하는 수리실험이다.

3.2.1 하상조건

본 실험에는 직경 1mm인 균일 입도의 모래를 이용하였다. 본 실험은 합류에 의해 발생하는 하상변동을 확인하기 위해 균일 입경으로 사용하였다. 이를 위해 상수도 여과용 주문진사를 표준체 No. 140(0.88mm)과 No. 170(1.05mm)로 걸러서 사용하였다. 침식에 의한 수로바닥이 노출되지 않도록 모래를 15cm 두께로 일정하게 포설하였다.

3.2.2 유량조건

본 실험에서는 직선수로에서 동일한 모래 및 동일 하류 위어를 이용하여 하상 입자가 이동하기 시작하는 유량으로 한계유량을 결정하였으며, 본류와 지류의 합류 후에 한계유량이 흐를 수 있도록 지류와 본류의 유량을 조절하였다. 이때 위의 하상조건을 만족시키는 한계유량은 0.01789CMS (64.4m³/hr)이다.

길제 하천에서의 본류와 지류의 유량비는 매우 다양하다. 본 실험에서는 한강 1차 지류에서 본류와 지류의 유량비를 확인하였다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 한강 1차 지류에서 유량비는 1:0.003-0.710로 대부분의 경우가 0.5이하로 나타났다. 본 실험에서는 본류와 지류의 유량비의 최대값을 0.5이하로 설정하여, 1:0.2,

1:0.35, 1:0.5 등 3가지에 대하여 실험을 실시하였다.

3.2.3 교각조건

교각 세굴은 교각의 형상이나 각도에 따라 크게 달라지는 것이 일반적이다. 그러나, 합류부의 경우에는 교각설치위치에 따라 흐름방향이 불규칙적으로 변하기 때문에 교각의 형상계수 및 접근각도 등을 적용하기 어렵다. 이러한 문제점을 제거하기 위하여 본 실험에서는 형상계수나 접근각도 등에 큰 영향을 받지 않는 원형교각을 사용하였다. 또한, 도로설계요령(한국도로공사, 2002)에서 제시하는 하천폭 감소율(교각폭의 합계/하천의 폭)이 5%를 초과하지 않도록 하였다. 본 실험에서는 본류 수로 폭의 5%인 직경 2cm의 교각을 사용하였다.

3.3 실험 방법

본 실험에서는 측정지점은 합류에 의한 하상변화가 급격히 일어나는 합류부 구간에 대하여 5cm간격으로 측정하였으며, 그 외 구간에 대해서는 10cm간격으로 측정하여 결과를 비교 분석하였으며, 본 연구에서 실험한 실험순서는 다음과 같다.

본 실험에서는 동일한 조건이 형성될 수 있도록 매 실험마다 초기 하상 높이를 15cm로 일정하게 하였다. 초기 하상변화를 최소화 하기 위해 가능한 서서히 밸브를 조절하여 유량을 공급하였다. 유량을 계획유량에 맞추고 오차범위를 초과하지 않도록 밸브를 미세 조절하였다. 시간 경과에 따른 하상변화를 지속적으로 측정하였으며, 상류부터 하류까지 유속계와 포인트게이지를 이용하여 일정간격으로 유속과 수심을 측정하였다.

하상변동이 거의 멈춘 시점(약 5시간)에 펌프 가동을 중단하고 급격한 배수에 의해 하상이 변형되는 것을 방지하기 위해 수로의 물을 서서히 제거하였다. 수로에서 물이 완전히 배수한 후 포인트게이지를 이용하여 최초.

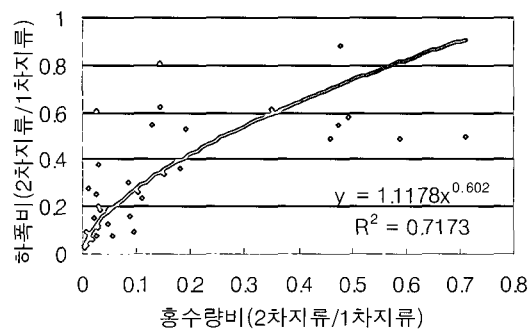


그림 2. 한강 1차 지류 합류부에서의 설계홍수량비-하폭비 관계 (건설교통부, 2002)

하상의 높이로부터 침식 또는 퇴적된 높이를 측정하였다. 교량을 설치한 경우에는 교량을 지정된 위치에 위치시키고 모래를 이용하여 고정시켰다. 이후 실험방법은 교량이 없는 경우의 실험과 동일하게 실시하였다.

4. 실험 결과

4.1 교각 설치 이전의 합류부 변화

교각을 설치하기 전 합류부에서의 하상변화를 살펴보기 위해 본류와 지류의 유량비를 변화시키면서 실험을 하였다. 유량비는 본류의 유량을 1로 했을 때 지류의 유량으로 하였으며, 모든 경우에서 합류부 이후의 유량은 예비실험에서 나타난 한계유량과 동일하게 설정하였다.

표 1은 각 유량비에 따른 실험유량을 나타낸 것이다.

실험이 끝난 후 하상의 변화는 그림 3과 같으며, 유량비가 증가함에 따라 합류점에서의 침식깊이는 68 mm부터 115 mm으로 점차 증가하는 것으로 나타났으며, 침식깊이 또한 65 mm부터 155 mm까지 증가하는 것으로 나타나고 있다. 두 개의 관계를 그래프로 나타내면 그림 4에 보는 바와 같다. 즉 유량비가 증가할수록 침식사면의 경사는 감소하는 것을 알 수 있다.

합류 후 침식부의 폭은 수로 좌측에서 측정했을 때 197 mm부터 250 mm까지 확장되는 것으로 나타났다. 이는 유량비가 증가할수록 점차 증가하여 수로 폭의 63%까지 증가하는 것으로 나타났다. 그림 5는 유량비에 따른 침식부의 폭과 수로 폭의 비율을 나타낸 것이다.

표 1. 유량비에 따른 본류와 지류 유량

(단위:CMS)

유량비	1:0.2	1:0.35	1:0.5	합류 후
본류유량	0.0149	0.0133	0.0119	0.0179
지류유량	0.0030	0.0046	0.0060	

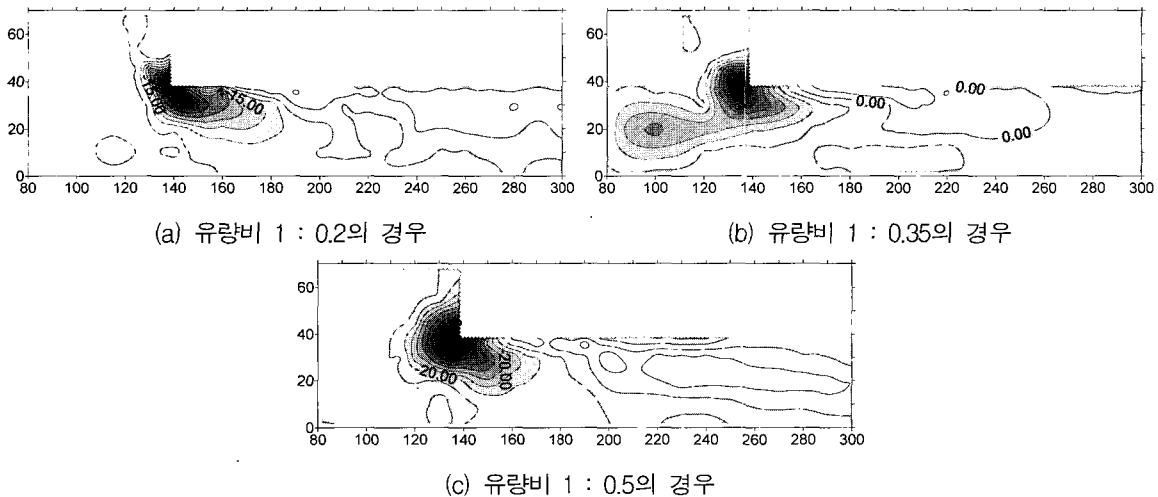


그림 3. 유량비에 따른 하상변화

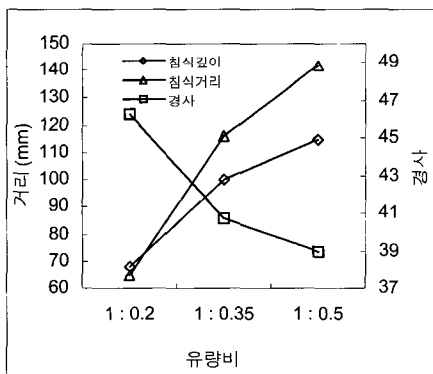


그림 4. 유량비에 따른 침식각

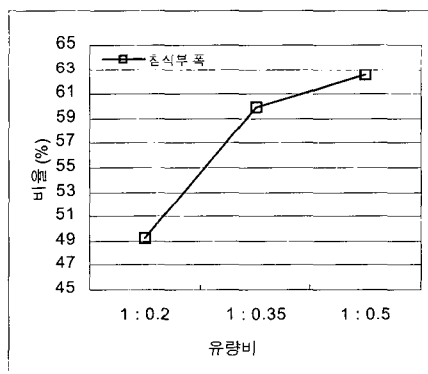


그림 5. 유량비에 따른 침식폭

4.2 교각 설치 이후의 합류부 변화

가속유로구간은 박용섭(2003)의 실험을 통해 정의된 바와 같다. 가속유로구간은 단면평균유속보다 빠른 유속이 발생하는 구간으로 정의되고 있으며, 실험을 통해 규명된 위치는 합류부의 맞은 편으로 약간 치우쳐 발생하는 것으로 나타내고 있다. 가속유로구간을 분석하여 가속유로구간 중 유속이 가장 빠른 위치를 결정하였으며, 이 위치는 수로 좌측으로부터 약 65% 되는 위치에 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수로 폭의 65%되는 지점에 교각을 설치하였으며, 합류 지점부터 수로 폭만큼 떨어진 지점까지 교각을 이동시키면서 세굴심 및 하상변화를 측정하였다. 그림 6은 본 실험에서 교각을 설치한 위치를 나타낼 것이다.

그림 7은 교각 위치변경에 따른 하상변화를 등심선으로 표시한 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 합류점에서의 침식깊이는 교각을 A_0 지점인 경우 106 mm, $A_{0.5}$ 지점인 경우 106 mm, $A_{1.0}$ 지점인 경우 107 mm로 나타났다. 즉 침식깊이는 교각의 설치 유·무 및 위치에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

그러나 교각에 의한 최대세굴심은 A_0 지점에서 70

mm, $A_{0.5}$ 지점에서 115 mm, $A_{1.0}$ 지점에서 60 mm로 나타났다. 이로부터 최대세굴심은 합류점의 침식깊이보다 작으며, $A_{0.5}$ 지점에서 가장 큰 값을 알 수 있다. 지류 유입이 없는 직선수로에서 동일한 위치에 교각을 설치하여 동일 유량을 흘렸을 경우 나타나는 최대세굴심 49 mm를 기준으로 분석하였으며 그 결과는 그림 8에 보는 바와 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 직선수로에 비해 $A_{0.5}$ 지점에서 최대 2.35배, A_0 , $A_{1.0}$ 지점에서 각각 1.43배, 1.22배의 세굴심을 나타내고 있다.

교각측면에서 흐름박리가 발생하며 그 결과 소용돌이 현상이 하상의 유사를 빨아들이는 후류와가 발생한다. 흐름이 진행되면서 후류와가 와가 줄어들고 유속이 감소하면서 세굴된 하상은 교각의 하류에 퇴적되게 되는데 이를 통하여 방향은 흐름 방향을 추적할 수 있다.(Les Hamill, 1999)이를 바탕으로 분석한 결과 A_0 지점에서 흐름방향을 기준으로 13.5° , $A_{0.5}$ 지점에서 1.4° , $A_{1.0}$ 지점에서 1.4° 로 나타났다. 위의 두 결과에서 보듯이 $A_{0.5}$ 지점 부근에서부터 흐름이 지류에 의한 영향에서 벗어나 직선 흐름으로 전환되는 것으로 나타났다. 그림 9는 교각 설치 위치에 따른 퇴적구간의 방향을 나타낸 것이다.

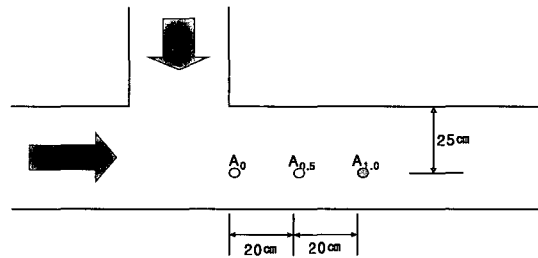


그림 6. 교각 설치 위치

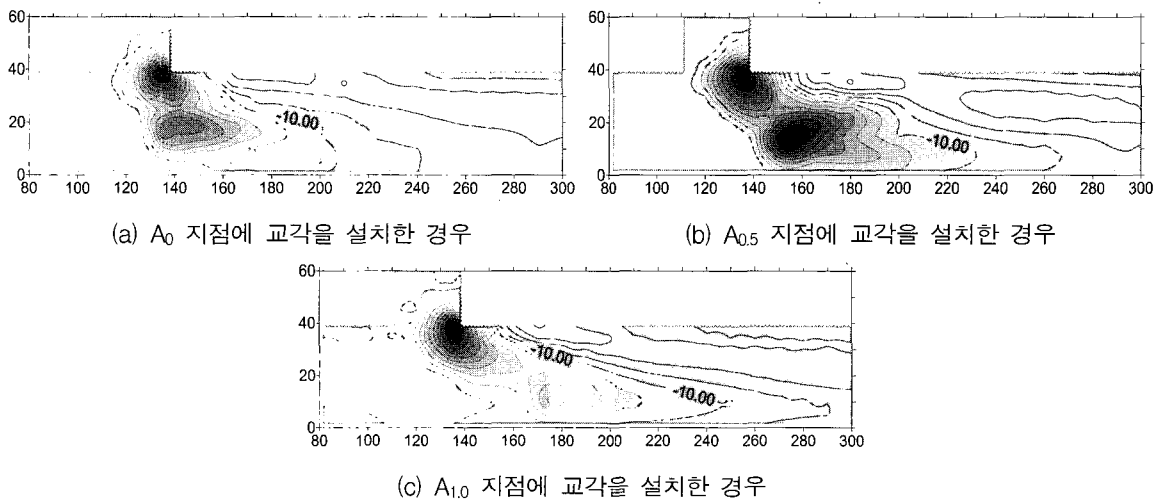


그림 7. 교각 위치에 따른 하상변화

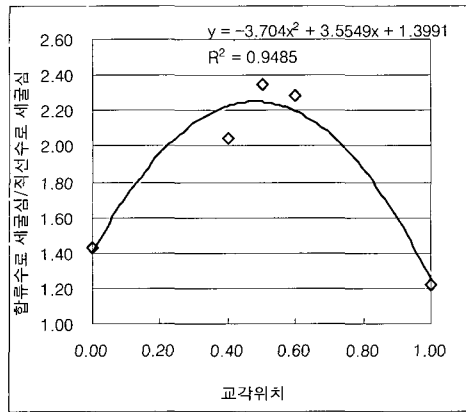


그림 8. 교각위치에 따른 세굴심 변화

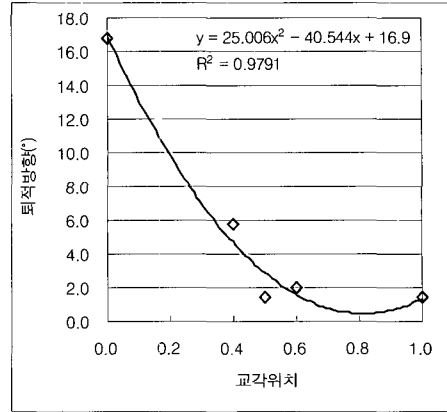


그림 9. 교각 위치에 따른 교각 퇴적방향

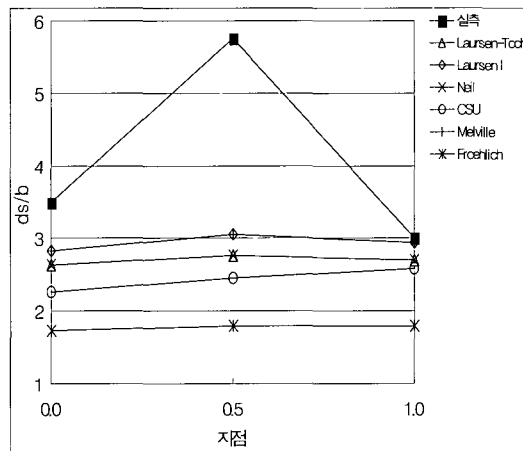


그림 10. 위치에 따른 세굴심 변화

4.3 기존 세굴공식과의 비교

본 실험에서 측정된 세굴심과 기존의 세굴공식에 의한 세굴심을 비교해 보았다. 기존 세굴공식의 입력 자료는 흐름 방향, 유속 및 수위 등이다. 본 연구에서는 실험을 통해 측정된 1차원 유속과 수위를 공식에 대입하여 세굴심을 측정하였다. 기존 세굴공식으로 자주 사용되고 있는 Laursen-Toch, Laursen I, Neil, C.S.U., Melville, Froehlich 공식 등(건설교통부, 1997)에 적용하였다. 그림 10은 각 위치별 세굴공식에서 구한 세굴심과 측정값과의 차이를 나타낸 것이다.

각 공식들의 경우 서로 약간의 차이를 나타내고 있으며, Froehlich 공식이 가장 작은 세굴심을 추정하고 있으며, Laursen I 공식과 Melville 공식이 가장 큰 세굴심을 추정하고 있다. 또한, CSU, Froehlich 공식을 제외한 Laursen-Toch, Laursen I, Neil, Melville 공식은 실제로 측정된 세굴된 세굴깊이의 변화와 비슷한 양상을 나타내고 있다. A_{1.0} 지점의 경

우 Laursen I, Melville 공식과 측정된 값이 거의 일치 하는 것으로 나타났으나, A_{0.5} 지점에서 측정된 세굴심은 기존세굴공식에 의해 계산된 세굴심의 2배 정도인 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 수리 실험을 통하여 합류부의 하상 변동을 검토하였으며, 수리 실험은 교각 설치 전·후에 대하여 실시하여 비교하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 교각을 합류부 가속유로구간에 설치할 경우 수로폭의 0.5배 되는 지점의 교각에 의한 최대세굴심이 가장 크게 나타나고 있으며, 이는 기존 세굴공식에 의한 추정된 세굴심보다 약 2배 정도 큰 것으로 나타났다.

둘째, 합류에 의해 발생하는 침식부의 폭은 본류와 지류의 유량비가 증가할수록 점차 증가하여 유량비 1:0.5에서는 수로폭의 약 63%까지 증가하는 것으로 나

타났다.

셋째, 가속유로구간에서 교각 설치 위치를 변화시키면서 합류부의 흐름 살펴본 결과, 합류부의 흐름은 지류의 유입 때문에 흐름이 수로방향으로 평행하지 않으나, 합류 후 수로 폭의 0.5배 되는 지점에서 유사의 퇴적 방향이 약 1.4°를 나타내 거의 수로에 평행한 흐름으로 변환되는 것으로 나타났다.

본 연구는 본류와 지류를 동일한 하상으로 만들어 하상변동을 실험한 것으로 실제 하천에서의 하상변동 현상과 다소 차이가 있을 수 있으나, 합류점 부근 교각의 설치 위치 결정에 있어서 참고할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

건설교통부 (1997). **하천횡단 구조물의 세굴안전진단 시스템의 개발**. 건설교통부, pp. 14-36.

건설교통부 (2002). 한국하천일람. pp. 44-95.

박용섭 (2003). 합류부에서 유량 및 접근각도 변화에 따른 수리학적 특성분석. 박사학위논문, 인천대학교

송재우 (2002). 교량수리학. 구미서관. pp. 276-278

심기오 (1996). 도심 소하천의 합류 및 구조물로 인한 흐름특성의 변화. 박사학위논문, 단국대학교

최계운, 강관원 (1993). "합류점에서 합류각도에 따른 흐름해석". **1993년도 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 127-130.

최계운, 박용섭, 한만신 (2002). "합류점의 수리특성에 관한 연구". **2002년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 494-496.

한건연, 이종태, 이을래, 이재영 (1998). "도시하천 합류부에서의 수리해석". **2002년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 309-314.

한국도로공사 (2002). 도로설계요령 제 3권 교량. pp. 13-15.

Best, J. L., Reid, I. (1984). "Seperation zone at open-channel junctions", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110 No. 11, pp. 1588-1594.

Hauger, W. H. (1987). "Discussion of seperation zone at open-channel junctions", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 113 No. 4, pp. 539-545.

Huang, J., Weber, L. J., Lai, Y. G. (2002). "Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128 No. 3, pp. 268-280.

Modi, P. N., Ariel, P. D., Dandekar, M. M. (1981). "Conformal mapping for channel junction flow", *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 107 No. HY12, pp. 1713-1733.

Schulte, A. M., Chaudhry, M. H. (1987). "Gradually-varied flow in open channel networks", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 25 No. 3, pp. 357-371.

Taylor, E. H. (1944). "Flow characteristics at rectangular open-channel junctions", *Proceeding of the American Society of Civil Engineerings*, ASCE, Transaction No. 109, pp. 893-912.

(논문번호:04-21/접수:2004.02.28/심사완료:2004.08.30)