

만곡수로에서의 흐름 및 하상변동에 관한 실험적 연구

○정재욱*, 백창식**, 윤세의***, 이종태***

1. 서론

만곡하천에서의 하상은 흐름특성, 만곡도, 단면의 형태, 하상재료의 특성 등이 조금만 변하여도 직선수로 구간보다 예민하게 변동된다. 아직까지 이와 같은 하상변동상황을 일괄적으로 분석하는 이론이 확립되지 않고 있어서 만곡하천 구간을 설계 시공할 때에는 이론적인 근거보다도 설계자의 경험, 유사한 인접 하천의 예, 모형실험 결과 등에 의존하고 있다. 따라서 만곡하천에서의 하상변동 특성을 분석하여 취수, 관개, 준설, 주운, 하천수질, 홍수소통, 홍수터 이용, 친수(親水) 등의 하천설계 및 시공에 필요한 기본자료를 제공해야 할 필요성은 매우 크다.

본 연구에서는 고정상 만곡수로를 기준으로 여기에다 하상재료를 포설하여 고정상 및 이동상 간의 흐름특성을 분석하였다. 또한 이동상 만곡하천에서의 dune, ripple, pool 등의 생성 유, 무를 확인하고, 총유사량 측정치와 경험공식을 비교해 봄으로써 만곡하천을 설계, 시공할때 필요한 하상변동 자료를 제공하고, 하천의 치수 및 이수 기능을 향상시키는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험 내용 및 방법

본 실험은 하상에 따라 고정상 실험과 이동상 실험을 통해 현장시공시 적정 설계 자료 및 그 기준을 도출하는데 있으므로, 실제 하천을 수리학적으로 모형화한 것이 아니라, 보편적인 하천실물을 임의로 가정, 모형화하여 수리실험을 하고 설계자료를 검토, 제시하려고 한다. 기초실험을 통한 고정상 실험은 이동상 실험을 위주로 실시한 본 실험과 서로의 수리특성을 비교, 분석하는 자료로 이용하였다.

수리실험은 만곡현상이 뚜렷이 파악될 수 있으며, 실무에서 비교적 안전 측면에서 검토할 수 있는 만곡각 180° 인 만곡수로를 선택하였고, 유입유량은 80 l/sec, 하상경사는 1/750 를 적용하였다.

* 경기대학교 대학원 박사과정

** 안양전문대학 토목과 교수

*** 경기대학교 토목공학과 교수

유입유량은 직사각형 웨어로 측정하였으며, 웨어를 통과한 유량은 정류설비를 이용하여 정류시킨 후 하류로 이동하도록 구성하였다. 유량공급 방법은 실험수로내에 시료를 완전히 포설한 후 수로 하류단 gate 를 닫고, 미소유량을 수로내에 공급하면서 하상재료의 공극을 물로 채운 다음, 하상표면 위로 물이 다소 올라 오게 되면 유입유량을 증가시켜 실험유량이 유하되도록 조절하였다. 하상재료는 자연하천에서 쉽게 구할 수 있는 평균입경(D_{50}) 0.67mm, 기하표준편차(σ) 1.74 인 모래를 사용하였다.

실험에서 관측된 수리량은 수위, 유속, 유향 등이며, 본류 만곡부를 만곡각 15° 씩 13 개 단면으로 구분하고, 만곡부 입구로부터 상류로, 출구로부터 하류로 하폭의 4 배 정도까지 측정선을 분할하였으며(그림 1.), 격점번호 No. 3 에서 만곡이 시작되어 No. 15 에서 끝나게 된다. 각 측정선마다 5 개의 관측점을 설정하였으며, 벽면의 효과를 고려하여 벽면에 가까운 측정점은 벽면으로부터 평균수심 정도를 이격시켰으며, 격점간의 간격은 30cm 이다. 수심은 3 회를 측정하여 평균하였으며, 유속은 이동상 만곡수로에서의 2 차류 흐름특성을 파악하기 위하여, 각 관측점마다 상대수심 구간을 설정하고, 연직유속 분포를 관측하였다. 유속 측정에 사용된 계기는 2차원 유속계(Model 명 : VM-201)와 3차원 유속계(Model 명 : ACM-300)를 동시에 사용하였으며, 이로부터 흐름방향의 유속과 횡방향 및 연직방향의 유속을 관측할 수 있었고, 유향도 비교적 정확히 측정할 수 있었다.

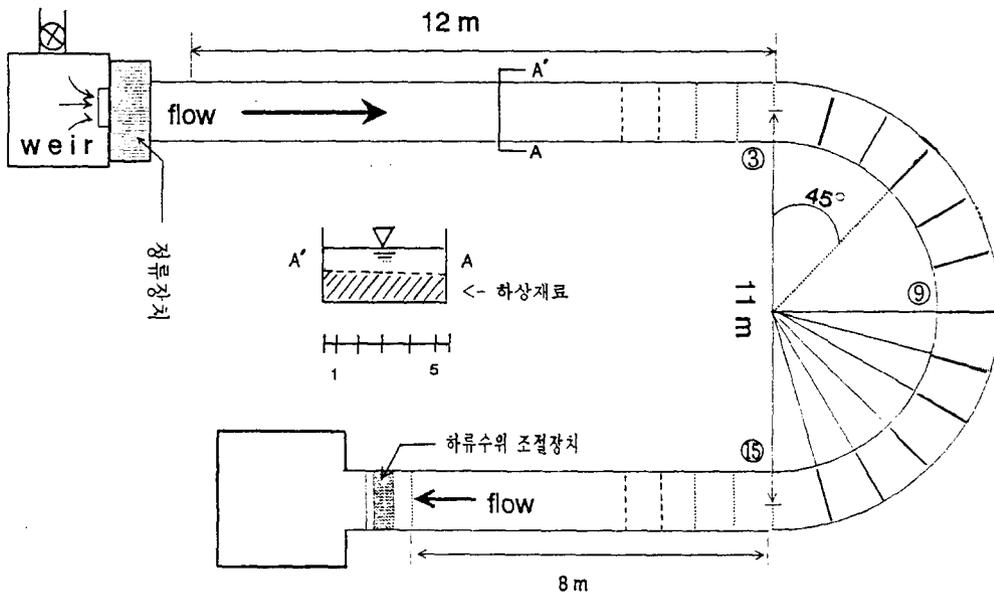


그림 1. 실험수로의 제원 및 관측점 위치도

유향을 육안으로 확인하기 위하여 과산화칼륨(KMnO₄)을 사용하였으며, 각 관측점에 실을 설치하였다.

유사량은 실험수로 하류단 밑에 150cm × 50cm × 60cm 크기의 상자 2 개를 제작하여 놓고 내부에 가는 체를 간 다음, 등류수심과 하상에서의 사련이 충분히 발생하였을 때에 일정시간 간격으로 유사를 받아 유사량을 측정하였다.

기초실험을 위한 고정상 수로에서 사용한 하류수위 조절장치와는 별도로 이동상 실험에서는 유사량 채취를 위해 별도의 하류수위 조절장치를 제작하여 수위를 조절함과 동시에 유사를 채취할 수 있었다.

3. 결과 및 분석

실험 결과, 흐름의 유속이 점차적으로 증가함(Froude 수가 커짐)에 따라 하상의 형상은 단계적으로 변하고 있는데, 수평을 유지하던 하상은 유속이 커짐에 따라 내측부에서는 하상과의 모양이 톱날 같은 사련(ripple)이 형성되고, 외측부에서는 유속이 더욱 증가하면서 하상 표면과장이 사련에 비해 커지는 사구(dune)가 발생하고 있었다. 이는 외측에서 수심이 내측보다 크기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다.

두드러진 특징은 외측제방을 따라서는 세굴공이, 내측제방부에서는 사주(point bar)가 형성되고 있는 것을 볼 수 있었다. 이러한 현상은 특히 만곡부 정점부에 도달하기 전에 대부분 나타나고 있는데, 최대 수심은 외측 제방부를 따라서 만곡각 30°~60° 구간에서 평균수심의 2 배에 해당하는 가장 큰 값이 나타났으며, 만곡각 160°~180° 외측 제방 부근에서도 비교적 큰 세굴이 발생되었다. 따라서, 만곡각 30°~60° 와 160°~180° 구간에 수공구조물 설치시 세굴특성을 고려해야 한다.

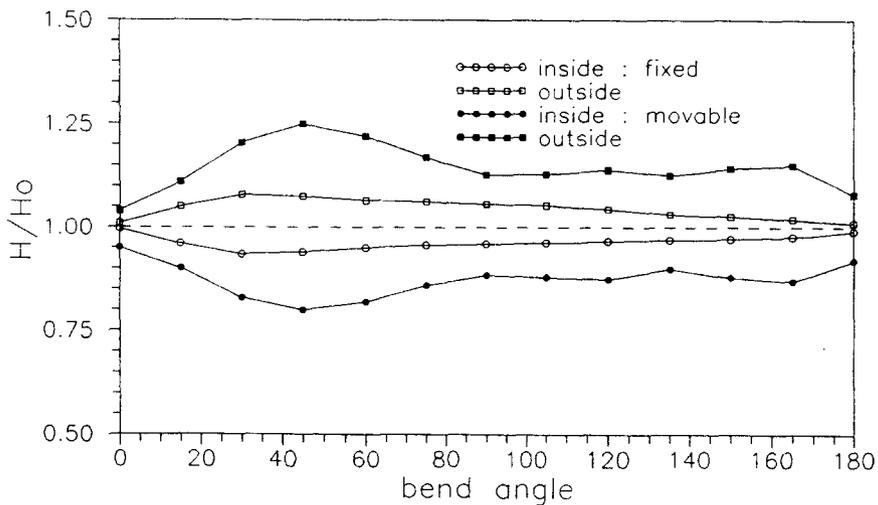


그림 2. 종단면 수위분포도

그림 2. 는 이동상 만곡수로에서의 종단면 수위분포도를 동일 조건하의 고정상 만곡수로에서의 결과치와 비교한 것이다. 이때의 H/Ho 는 횡단면 중심부에서의 평균수심에 대한 내, 외측지점의 수심을 나타내었다. 고정상 만곡수로와는 다르게 이동상 만곡수로에서의 H/Ho 값은 증가하고 있다. 고정상 만곡수로에서는 만곡각 15° ~ 30° 부근에서 최대 횡방향 수면차가 발생하고 있었지만 동일 조건하에서 하상재료를 포설한 후 실험을 진행시킨 결과, 만곡각 30° ~ 50° 부근의 외측에서 최대 수심을 보이고 있었다. 이는 이동상 수로가 고정상 수로에서 보다 하상전단력이 커져서 흐름의 발달 시작구간이 하류로 지체되고 있음을 알 수 있다. 즉, 2 차 흐름의 생성이 이동상인 경우, 고정상에서 보다 하류부로 지체되기 때문으로 판단된다. 이러한 흐름은 하류로 진행되면서 다소 안정을 보이다가 만곡각 165° 부근에서 수심이 약간 증가하고 있다.

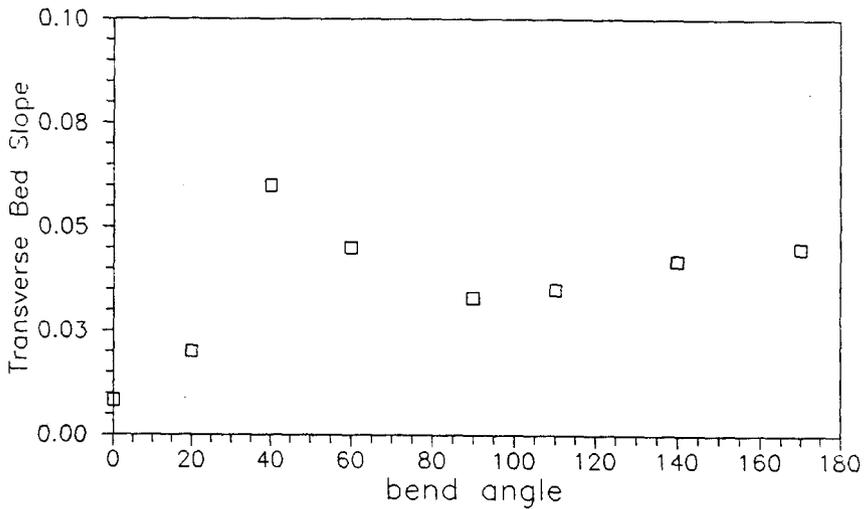


그림 3. 종단면 횡방향 하상경사

그림 3. 은 이동상 만곡수로에서의 흐름방향으로 표시한 횡방향 하상경사도이다. 만곡각 30° ~ 45° 부근에서는 횡방향 하상경사가 0.06 으로 최대치가 관측되었고, 이 구간에서의 횡방향 하상경사는 90° 에서 보다 거의 2 배의 차이를 보이고 있음이 관측되었다. 만곡각 170° 부근에서는 0.04 정도의 횡방향 하상경사를 나타내었다. 90° 부근에서 횡방향 하상경사가 작게 나타나는 것은 흐름이 직선구간과 비슷하기 때문이다. 또한, 만곡부 하류구간에서의 유속증가로 횡방향 하상경사는 이 부근에서도 상당히 커질 것으로 예상되었으나, 본 실험 조건하에서는 만곡부 상류구간에서 발생한 전체적인 침식의 정도가 만곡부 하류구간에 영향을 미쳤기 때문에 상대적인 횡방향 하상경사는 만곡부 상류구간에서 크게 발생하였다.

그림 4~5 는 만곡각 30° 와 135° 에서의 횡단면 수위분포도를 나타낸 것이다.

이때 사용된 D_c 는 횡단면별 중심부에서의 수위이며, 이를 기준으로 내측, 중심, 외측의 관측점을 비교하였다.

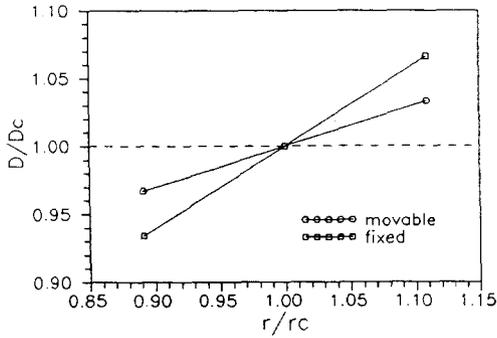


그림 4. 횡단면 수위분포도(만곡각 30°)

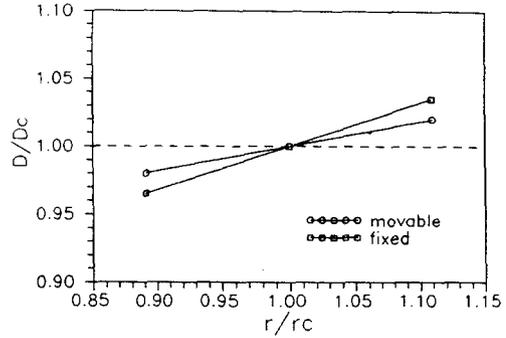


그림 5. 횡단면 수위분포도(만곡각 135°)

만곡각 30° 및 135°의 두 단면에서 고정상 수면경사가 이동상 수면경사보다 더 큰 값을 보이고 있다. 이는 수로바닥의 거칠기가 이동상의 경우에서 더 크기 때문에(Chezy 계수는 더 작아짐) 연직속도분포상의 평균계수가 이동상 만곡수로에서는 작아지는 반면에 주방향 흐름의 평균유속은 고정상수로에서 크게 나타나기 때문이다. 따라서 고정상 수로에서 계산된 횡방향 수면경사를 고려하여 하천제방의 여유고를 설정한다면 방재 공학적인 면에서 안전하다고 판단된다. 또한, 하상재료의 특성별로 최대 세굴심과 최대 횡방향 하상경사의 발생위치가 변화되고 있음을 추정할 수 있다. 즉, 동일 흐름조건에서도 하상재료의 한계소류력의 크기에 따라서 최대 세굴심의 위치는 변화된다.

표 1. 은 만곡부 하류구간에 설치된 유사채취기로 부터 얻어진 실측 유사량을 2가지 공식의 계산치와 비교한 것이다. 먼저, 한강하류부 이동상 실험결과(1983, 건교부)에서 합리적이라고 발표된 Brown 공식을 이용하였으며, 일반적으로 지명도가 높고 널리 이용되는 공식중에 하나인 Engelund-Hansen(E-H) 식을 사용하였다.

표 1. 총유사량 비교

유사량 / 하상재료	Brown	E-H	실측치
모래 (g/cm/min)	11.92	10.61	9.65

하상재료가 모래인 경우에는 80 l/s 에서 Brown 공식의 계산치와는 23%, E-H 식과는 10.1% 정도로 실측치에 비해서 크게 계산되어 Brown 공식보다 E-H 식이 실측치에 접근하고 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

일반적으로 자연하천에서는 직선수로가 매우 드물고 만곡수로의 형태를 취하며, 이러한 만곡현상은 유량, 지형조건, 하상재료, 제방의 종류, 단면의 형태 등에 따라서 그 규모가 달라진다. 하천의 만곡부에서는 흐름의 방향전환으로 인한 홍수 소통 능력의 저하가 항상 문제가 되고 있으며, 취수, 관개, 준설 및 주운 계획 수립에 있어서도 직선구간에 비하여 어려움이 큰 구간이다.

본 실험 결과, 이동상 만곡수로에서는 외측 제방을 따라서는 세굴공과 사구가, 내측 제방부에서는 사주가 형성되었다.

최대 세굴심은 만곡부 외측 제방 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 구간에서 평균수심의 약 2 배로 가장 크게 나타났으며, 횡방향 하상경사는 이동상 만곡수로의 경우, 만곡각 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 부근에서 약 0.06 으로 최대치가 발생하였다. 횡방향 수면경사는 고정상 수로의 경우, 이동상 수로에 비해서 더 크게 나타났다. 또한, 만곡수로에서도 Engelund-Hansen 식의 사용 가능성을 확인하였다.

앞에서 서술한 결과는 하폭에 대한 수심비, 곡률반경에 대한 하폭의 비, 수공구조물의 종류, 유량비 등에 따라서 크게 변화될 수 있다고 판단된다. 더 나아가 흐름특성을 3 차원적으로 분석할 수 있는 수치모형 개발에 관한 연구가 필요하다고 생각된다.

5. 참 고 문 헌

- (1) 국립 건설 시험소, 도시 소유역 강우 처리법 조사 연구(만곡하천에 수공 구조물 설치시 하상변동에 관한 연구), 1995
- (2) 윤세의, 이종태, “만곡수로에서의 곡률반경 변화에 따른 흐름특성”, 한국수문학 회, 제 23 권 제 3 호, 1990
- (3) 최종인, 고재웅, “만곡부 혼합입경 하상횡경사 모형의 개발”, 한국수자원학회지, 제 29 권 제 4 호, 1996
- (4) Bergs, M. A, Flow Processes in a Curved Alluvial Channel, The University Iowa, 1990
- (5) De, Vriend, Waterloopkundig Laboratorium Delft Hydraulics Laboratory, Tow, 1982
- (6) Falcon, A. M, Kennedy, J. F, “Flow in Alluvial River Curves”, Journal of Mechanics, 1983