

만곡수로에서의 하상변동 예측모형

정재욱* · 백창식** · 윤세의***

1. 서론

홍수시 만곡부 하천에서는 흐름의 소동이 문제가 되어 홍수피해가 빈번히 발생하고 있으며, 취수, 관개, 준설 및 주운 계획 수립시에 만곡부에서의 하상변동을 예측하고, 그에 대한 적절한 대책이 필요하다. 만곡부의 흐름 및 하상변동은 3차원적인 현상으로 매우 복잡한 구조를 가지고 있어서 아직까지 완벽한 수리학적 해석이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 만곡부에서의 하천설계 및 관리를 함에 있어서 모형실험을 통하여 얻은 자료들이 이용되고 있으나, 모형실험에 소요되는 시간과 경비, 축척의 영향, 마찰저항, 만곡형태의 다양성 등에 따라서 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 최근에 만곡부 흐름 및 하상변동 예측을 위한 수치모형이 개발되고 있으나 (Odgaard, 1988 ; Vriend, 1982), 지배방정식과 경계조건에 따라 계산의 결과치가 크게 차이나고 있다.

본 연구에서는 만곡수로에서의 하상변동 예측모형을 조사, 분석하고 연속방정식과 운동량방정식을 정리하여 2차흐름의 연직분포, 횡방향 하상경사 등의 경험적인 식을 이용하여 수치모형을 구성하였다. 수치모형의 적용성을 분석하기 위하여 180° 만곡수로에서 고정상 실험을 실시하였고, 그 자료를 기초로 하여 이동상실험을 실시하였다.

2. 기본이론

만곡부에서의 2차흐름은 곡률변화 때문에 하류방향으로 흐름이 발달되고, 상류부의 흐름조건에 따라 그 크기도 결정된다. 본 연구에서 사용한 지배방정식은 다음과 같다.

Streamwise Momentum

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial s} U^2 + \frac{k^2}{m^2 d} U^2 = g \frac{S_c r_c}{r} \quad (1)$$

* 경기대학교 대학원 박사과정

** 안양전문대학 토목과 교수

*** 경기대학교 토목공학과 교수

Transverse Momentum

$$\frac{\partial(S_i/a)}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{A}{a} S_i = F \quad (2)$$

Water Continuity

$$\frac{\partial(Ud)}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(Vrd)}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

Slope-Depth Relation

$$S_i = \frac{\partial d}{\partial n} \quad (4)$$

상류부에서 횡방향 단면(n축)의 초기치와 중심부에서의 경계조건을 적용하면 유한차분화시킨 식(1)~식(4)를 이용하여 수심(d)과, 흐름방향유속(U), 2차흐름유속(V), 횡방향 하상경사율(S_i)을 차례로 구할 수 있으며, 계산에 사용된 유한차분도는 그림 1과 같다.

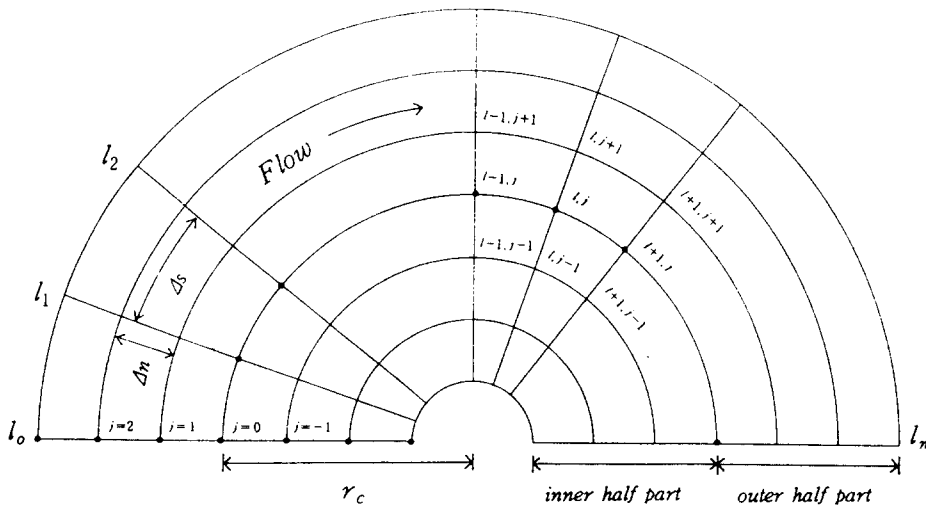


그림 1. 유한차분도

곡률반경이 일정하고 흐름방향으로 완전발달된 구간에서의 흐름변수들은 흐름방향(s)에 대해서 독립적으로 계산할 수 있다. 본 연구에서는 식(1)~식(4)를 이용한 모형(JCM)과 흐름이 완전 발달되었다고 가정한 모형(JFD)으로 구분하였다.

3. 수리실험

본 실험에서는 기초실험으로서 만곡부 고정상 실험을 먼저 실시하고 그 자료를 바탕으로 이동상 실험을 실시하였으며, 실험수로의 제원은 표 1과 같다.

직선하천과는 달리 만곡하천에서는 단면의 횡방향을 따라 유속의 크기가 다르기 때문에 조도계수를 정확히 맞추기가 어렵다. 따라서 실험의 단순화를 위하여 본류구간의 조도가 일정하다고 가정하였다. 즉, 본류 유입유량을 서서히 증가시켜 계획된 유량에 도달시키면서 수로 하류단 수문을 서서히 열어 수로내 흐름이 등류수심에 되도록 하고, 사면이 충분히 발달될 때까지 수심의 변동 상태를 계속 관찰하였다.

표 1. 실험수로 제원

제 원 하상재료	길이 (m)	수로폭 (m)	유량 (l/sec)	중심각 (θ)	곡률반경 (m)	경사	하상재료		
							D_{50} (mm)	비중	σ
모 래	34	1.5	80, 112	180°	5.5	1/750	0.56	2.65	1.65
안트라사이트	모래하상과 동일						0.26	1.54	2.73

유량공급 방법은 실험수로 내에 시료를 20cm의 두께로 포설한 후 수로 하류단 수문을 닫고, 미소유량을 수로 내에 공급하면서 하상재료의 공극을 물로 채운 다음, 하상표면 위로 물이 올라 오기 시작하면 유입유량을 증가시켜 실험유량에 도달하도록 조절하였다.

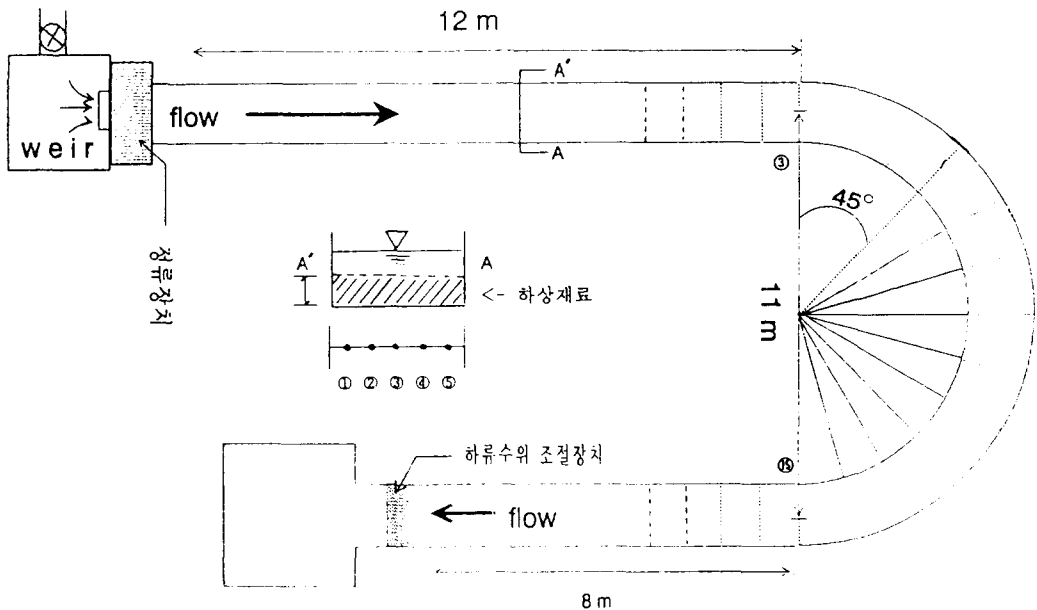


그림 2. 실험수로의 제원 및 관측점 위치도

하상재료는 수리모형 실험시 상사법칙에 모래보다 적합하며, 모래보다 비중도 작은 안트라사이트와 하천에서 쉽게 구할 수 있는 자연사를 선택하였다.

체분석 결과 얻어진 모래의 평균입경(D_{50})은 0.56mm, 안트라사이트는 0.26mm 정도이며, 모래와 안트라사이트의 기하표준 편차(σ)는 각각 1.65와 2.73이다. 실험에서 관측된 수리량은 수위, 유속, 유향 등이며, 본류 만곡부를 만곡각 15° 씩 13개 단면으로 구분하고, 만곡부 입구로부터 상류로, 출구로부터 하류로 하폭의 4 배 정도까지 측정선을 분할하였으며(그림 2), 격점번호 No. 3에서 만곡이 시작되어 No. 15에서 끝나게 된다. 각 측정선마다 5개의 관측점을 설정하였으며, 벽면의 효과를 고려하여 벽면에 가까운 측점은 벽면으로부터 평균수심 정도를 이격시켰으며, 격점간의 간격은 30cm이다.

각 관측점에서 수심은 3회를 측정하여 평균하였으며, 유속은 이동상 만곡수로에서의 2차흐름의 특성을 파악하기 위하여, 각 관측점마다 상대수심 구간을 설정하고, 연직유속 분포를 관측하였다. 유속측정에 사용된 계기는 2차원 유속계(Model 명 : VM-201)와 3차원 유속계(Model 명 : ACM-300)를 사용하였으며, 이로부터 흐름방향의 유속과 횡방향 및 연직방향의 유속을 관측할 수 있었고, 유향도 비교적 정확히 측정할 수 있었다.

유향을 육안으로 확인하기 위하여 과망간산칼륨($KMnO_4$)을 사용하였으며, 관측점에 실을 설치하였다. 유사량은 실험수로 하류단 밑에 150cm × 50cm × 60cm 크기의 상자 2개를 제작하고 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.

4. 비교 및 고찰

그림 3~4 는 흐름방향의 유속비(U/U_c)를 횡단면별로 나타낸 것이다. 계산치는 식(1)~식(4)의 만곡부 흐름에 대한 결과치(JCM 모형)와 이로부터 $\partial/\partial s$ 의 항을 제거한 완전 발달된 흐름에서의 계산치(JFD 모형)를 나타낸 것이며, 이를 중심각 120° 구간에서의 실측치와 비교하였다.

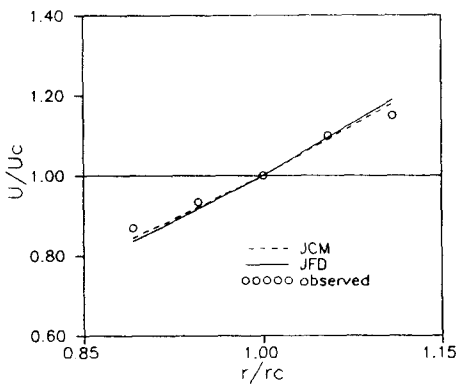


그림 3. 모래(중심각 120°)

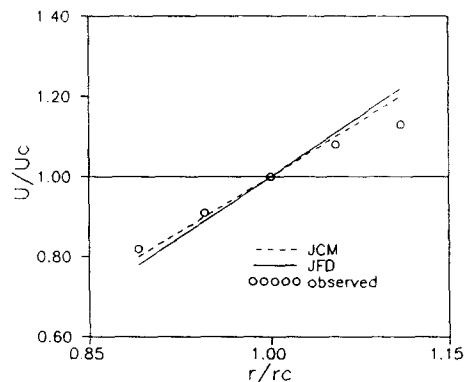


그림 4. 안트라사이트(중심각 120°)

전반적으로, 만곡유입부로 흐름이 진행되면서 내측에는 수류의 가속작용이 외측에는 감속작용이 점점 증가하다가 하류부에서는 운동량의 이송으로 외측으로 향한 변화속도 성분이 발생됨으로 외측유속이 커지고 있는 것을 볼 수 있다. 안트라사이트의 경우 외측 벽면 부근에서 오차가 발생하고 있는데, 이는 벽면의 효과를 수치모형에서 고려하지 못한 결과로 판단된다. 또한, 수치모형에서 사용된 경험식들이 모래하상을 기준으로 유도된 식이기 때문이며, 따라서, 수치모형의 검증을 위하여 실험을 실시할 때도 하상재료의 선택이 중요하다.

그림 5~8 은 만곡각 30° 와 120° 구간에서 수로중심선에서의 수심(h_c)을 기준으로 횡단면 임의점에서의 상대수심(h/h_c)을 나타낸 것이다.

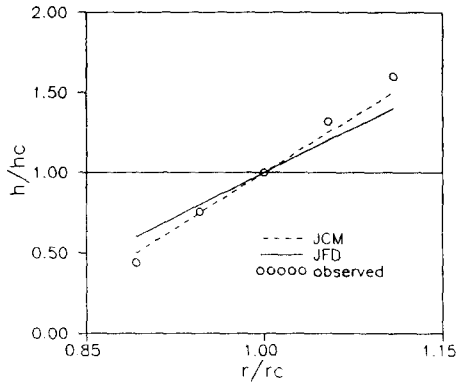


그림 5. 모래(중심각 30°)

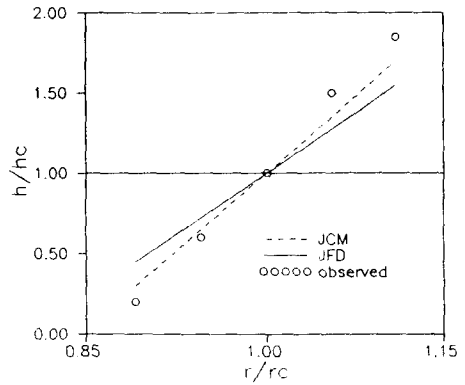


그림 6. 안트라사이트(중심각 30°)

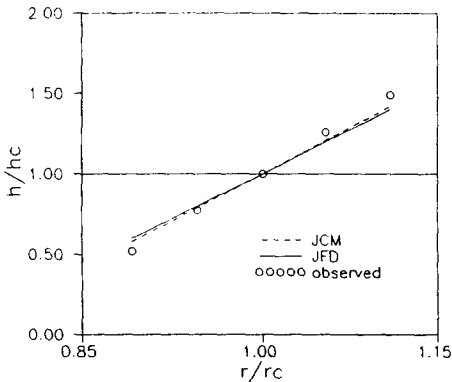


그림 7. 모래(중심각 120°)

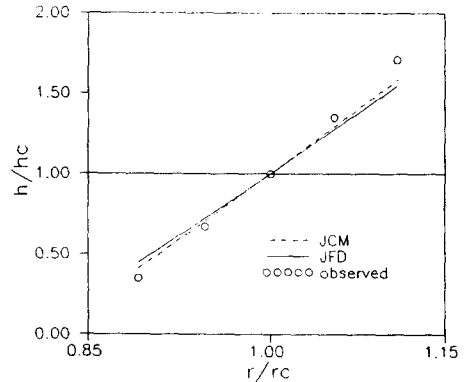


그림 8. 안트라사이트(중심각 120°)

중심각 30° 인 경우, JCM의 계산치가 JFD보다 내, 외측 모두 크게 나타났고, 실측치는 JCM의 결과에 근사하고 있으며, 만곡각 120° 구간에서는 계산치와 실측치가 거의 일치하였다. 모래와 안트라사이트의 경우, 모두 외측에서는 세굴이, 내측에서는 퇴적이 발생하는 현상을 비교적 잘 모의하고 있다.

횡방향 하상경사는 모래가 안트라사이트보다 작게 나타났는데, 이는 횡방향 전단응력

이 모래에서 크기 때문이다. 중심각 30° 구간에서의 계산치는 JCM이 더욱 잘 일치하고 있다. 전반적으로 내측에서는 실측치보다 수심이 크게, 외측에서는 작게 계산되었다.

5. 결 론

만곡수로에서의 하상변동 특성을 분석하기 위하여 연속방정식과 운동량방정식을 이용한 수치모형을 구성하였고, 흐름이 완전히 발달된 구간에서만 간략하게 사용할 수 있는 단순 수치모형을 별도로 구성하였다.

모형의 적용성을 검증하기 위하여 180° 만곡부에서 이동상 수리실험을 실시하여 수치모형의 결과치와 비교하였으며, 그 결과는 비교적 일치하고 있었다. 180° 만곡부 입구부분으로부터 중심각 30° 까지를 제외하면 완전 발달된 모형의 결과치와 실측치는 일치하고 있었다. 하상재료에 따라 흐름의 발달구간이 변화되고 있는 것을 실험적으로 확인할 수 있었으며, 간략모형 사용시는 평면적 만곡형태 뿐만 아니라 하상재료에 대한 검토가 있어야 한다.

6. 참고문헌

- (1) 송재우, 최인호, 김지호 (1994). "유로만곡부의 횡방향 하상경사 산정모형에 관한 연구." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제14권, 제6호, pp. 1395-1404.
- (2) 윤세의, 이종태 (1990). "만곡수로에서의 곡률반경 변화에 따른 흐름특성." **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제23권, 제3호, pp. 435-444.
- (3) 정용태, 최인호, 송재우 (1994). "유로 만곡부의 횡방향 하상경사에 관한 연구." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제14권, 제1호, pp. 143-150.
- (4) 정재욱, 백창식, 윤세의, 이종태 (1997), "만곡수로에서의 흐름 및 하상변동에 관한 실험적 연구." **1997년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 15-20.
- (5) Bergs, M. A. (1990). *Flow processes in a curved alluvial channel*. Ph. D. Thesis, The University of Iowa.
- (6) De Vriend, H. J. (1982). *Waterloopkundig laboratorium Delft Hydraulics Laboratory*. Tow.
- (7) Odgaard, A. J. (1984). "Flow and bed topography in alluvial channel bend." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 110, No. 4, pp. 521-536.
- (8) Odgaard, A. J. and Bergs, M. A. (1988). "Flow processes in a curved alluvial channel." *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 45-56.