

사행수로에서의 흐름 및 오염물질 혼합에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Flow and Pollutant Dispersion in Meandering Channel

박성원*, 서일원**, 이규환***
Sung Won Park, Il Won Seo, Kyu Hwan Lee

요지

일반적인 하천의 흐름방향으로 발생하는 주흐름(primary flow)에 중첩하여 주흐름 방향의 수직단면에 이차류(secondary flow)가 발생하게 되며 이러한 이차류의 발달은 투입된 오염물질의 횡혼합을 증대시킨다. 오염물질의 혼합은 이송(advection)과 확산(diffusion) 또는 분산(dispersion)의 과정으로 설명되며 본 연구에서는 수로전체의 혼합과정을 설명하기 위해서 이송·확산 방정식을 적용하였다.

본 연구에서는 실험수조를 150° 의 중심각을 갖는 S자 형태의 만곡수로를 제작하여 유량조건은 15, 30, 60 l/sec의 세 가지 경우로, 수심은 15, 20, 30, 40 cm의 경우로 총 12 케이스의 실험을 수행하였다.

유속장의 측정은 Sontek사의 3차원 micro-ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하였다. 오염물질 확산실험은 소금물 용액에 주변수와의 밀도차를 없애기 위해서 메탄올 용액을 첨가하여 추적자로 이용하여 농도장의 분석을 일본 KENEK사의 전기전도도계(conductivity meter)와 Gartner사의 DAS(data acquisition system)를 이용하여 횡방향 유속장의 분포와 오염운의 거동을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

주 흐름은 직선구간에서는 중앙에서 최대 유속을 나타내며, 좌우대칭적인 유속분포의 모습을 보이고, 만곡부에서는 수로안쪽을 따라 최대유속이 발생하였다. 수로의 직선구간에서는 최대유속이 발생하는 즉, 중앙에서의 오염물질의 분산이 가장 활발하게 이뤄졌으며 농도의 페짐형상인 오염운 역시 만곡부에서는 수로만곡부의 안쪽을 따라 확산 · 이동함을 알 수 있었다. 만곡부 외측에서는 오염물질의 정체현상이 일시적으로 발생하며, 유속구조의 횡방향 비대칭구조로 인한 종 · 횡방향의 분리현상이 발생하고, 오염운의 중첩현상이 종방향으로 연속되게 나타난다. 향후 수심방향 거동을 포함한 3차원적 분석이 요구되며 이 연구결과는 2차원적 수치해석의 적용 및 분석 자료로써 이용이 가능하다.

핵심용어 : 사행수로, 만곡부, 추적자, 이송, 분산, 유속장, 농도장, 횡분산계수, 오염운

1. 서 론

최근에는 하천의 흐름특성을 바탕으로 하는 전반적인 거동을 다양한 차원의 수치해석모형을 통해서 모의 · 발전시켜 왔다. 하지만 실제 하천에서의 경우, 사행성이나 웅덩이, 여울 구조 등으로 인한 영향으로 인하여, 수치 해석 모델링을 통한 연구와 동시에 실험적 특성연구가 꼭 필요하다. 이에 국내 하천의 주된 특성중 하나인 만곡부에서의 오염물질의 혼합거동과 이송과정에 대한 연구가 가장 중요하게 고려되고 있다. 본 연구에서는 150° 의 중심각을 갖는 두 개의 만곡부로 이루어진 모형수로에서의 사행성이 유속구조와 오염물 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 · E-mail : billy@snu.ac.kr
** 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · 공학박사 · E-mail : seoilwon@snu.ac.kr
*** 현대중공업 해양사업본부 해양기본설계부 · E-mail : kh323@hhci.co.kr

2. 이론적 연구

2.1 사행수로에서의 분산 특성

하천으로 유입된 오염물의 확산과 이송 및 분산과정은 흐름이나 지형의 특성에 주로 의존하며 사행에 따른 유속의 불규칙성 등으로 매우 복잡한 양상을 보인다. 만곡부가 연속적으로 나타나는 사행하천에서는 회전방향이 교호적으로 바뀌는 나선형 흐름의 3차원적 발생한다고 알려져 있다. 즉, 하천의 흐름방향으로 발생하는 주흐름(primary flow)에 중첩하여 주흐름 방향의 수직단면에 이차류(secondary flow)가 발생하게 되며 이러한 이차류의 발달은 투입된 오염물질의 횡혼합을 증대시킨다. 이런 이차류의 발생에는 두 가지 형태가 있다. 첫 번째는 난류의 비등방성과 경계전단력의 불규칙한 분포로 인하여 발생하는 것으로 직선수로와 곡선수로 모두에서 발생하는 것이 있고, 곡선수로에서 원심력에 의해 발생하는 것이 있는데, 본 연구에서는 두 번째의 이차류를 중점적으로 다루었다.

사행수로에서 발생하는 이차류에 대한 연구는 Thomson(1876)에 의해 최초로 시작된 후, 많은 연구자들에 의해 활발하게 진행되어 왔다. 이후 이차류의 정량적 분석을 위해 다양한 이차류 강도식들이 제안되었다. Shukry(1950)는 만곡부에서 흐름의 전체 운동 에너지와 잊 이차류의 운동에너지의 비로 정의된 식을 제안하였고, 이후 Blanckaert(2002)는 주 흐름방향 유속과 횡방향 유속을 이용하여 회전 운동의 강도를 제안하였다.

Fischer(1969)는 하나의 만곡부를 갖는 수로에서 확산실험을 실시하여 이론적으로 도출한 횡분산 계수식을 검증하였으나 만곡부에서의 유속분포와 이차류를 직접 측정하지는 않았다. 최근에 Boxall과 Guymer(2003), Boxall 등(2003)은 자연형 단면을 갖는 S형 사행수로에서 추적자 실험을 실시하여 구간별로 횡분산계수를 산정한 결과 이차류가 크게 발생하는 구간에서 횡분산계수가 커짐을 확인하였다. 국내에서는 정성진(2005)이 120°의 중심각을 갖는 두 개의 만곡부로 구성된 모형수로에서의 수리학적 거동을 연구하였고 김지영(2005)은 만곡부를 포함한 모형수로에서의 흐름 구조를 CFD 프로그램인 FLOW-3D의 LES를 이용하여 결과와 비교·검증하였다.

본 연구에서는 기존연구에서 제안된 이차류가 일방향의 흐름을 나타낼 때 보다 회전하는 흐름을 나타낼 때 값이 크게 나타나는 강도식을 채택하였다. 오염물의 횡확산에 있어서 이차류가 셀의 형태를 이루며 활발히 회전할 때 훨씬 오염물이 효과적으로 회석되는 제안식은 다음과 같다(이규환, 2006).

$$SCI = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\sqrt{(\bar{v}_n')^2}}{v_s} \quad (1)$$

$$\bar{v}_n' = v_n - \overline{v_n} \quad (2)$$

여기서, v_n 은 중심선에서의 횡방향 유속이고, \bar{v}_n 은 v_n 의 수심평균유속, v_s 는 중심선에서의 흐름방향유속, $\overline{v_n}$ 은 흐름방향 단면평균유속이며, m 은 단면에서의 측점수이다.

2.2 2차원 이송·확산 방정식

오염물질의 혼합은 이송(advection)과 확산(diffusion) 또는 분산(dispersion)의 과정으로 설명된다. 확산은 분자운동과 난류의 영향으로 인한 오염물의 퍼짐현상을 말하는 반면, 분산은 전단흐름에 의한 오염물의 분리 및 분리된 오염물의 확산에 의한 혼합현상으로 정의한다. 본 연구에서는 수로전체의 혼합과정을 설명하기 위해서 이송·확산 방정식을 적용하여 접근하였다. 여기서 혼합계수는 흐름의 특성에 의한 난류확산(turbulent diffusion)계수와 수심방향 전단 유속에 의한 분산계수로 분리 가능하다. 자연하천에서의 이 두 가지를 분리하는 것은 실제로 불가능하고 분산에 의한 혼합이 난류에 의한 혼합에 비해 매우 크므로 혼합계수를 분산계수로 대표하여 사용하기도 한다.(Fischer, 1979). 분산계수는 3차원 확산방정식을 수심방향으로 적분하여 유도할 수 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left[h D_L \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left[h D_T \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (3)$$

실제로 오염물질이 투입되는 초기구간에서는 이송·확산 방정식으로 설명할 수 없다는 연구가 수행되었다(김호중 2006). 본 연구에서는 오염물질 투입지점으로부터 50 cm 거리에서 초기 측정을 시작하여 수로 전체에 걸쳐서 수행하여 이송·확산 방정식을 채택하였다.

2. 실험 소개 및 방법

실험수로는 S자 형태의 만곡수로로서 강재로 제작되었다(그림 1~2). 사행수로의 폭은 1 m이고 총 연장은 각각 직선길이 15 m와 10 m이며 만곡부는 150°의 중심각을 갖는 2개의 원호형태로 구성되며 연결부는 직선구간으로 하였다. 수로의 양안에는 레일을 부착하여 이송장치를 설치하도록 하였고, 이송장치는 만곡구간을 따라갈 수 있도록 특수바퀴로 설계·제작 되었다. 실험용수는 실수로의 하부에 위치한 직경 300 mm의 강재 파이프를 통하여 공급된다. 또한 실험유량은 측정 범위가 0.53 ~ 117 l/sec인 전자기 유량계를 이용하여 유지하고, 수심을 정확하게 유지하기 위해 기계적으로 작동 가능한 테일게이트(tail gate)를 수로의 끝부분에 설치하였다. 마지막으로 수위 측정을 위한 포인트 게이지를 테일게이트 전방 2 m 지점에 설치하였다.

유량은 15, 30, 60 l/sec의 세 가지 경우로 하였고, 수심은 15, 20, 30, 40 cm의 네 가지 경우로 하여 총 12 케이스로 하였다(표 1).

유속장의 측정은 Sontek사의 3차원 micro-ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하였다. 오염물질 확산실험은 소금물 용액을 주제자로 이용하였고, 주변수와의 밀도차를 없애기 위해서 메탄올 용액을 첨가하였다. 농도장의 분석은 일본 KENEK사의 전기전도도계(conductivity meter)를 사용하여, 시간에 변화에 따른 농도의 변화를 측정하고, Gartner사의 DAS(data acquisition system)를 이용하여 보다 정밀한 농도장의 분포를 그래프로 나타낼 수 있도록 하였으며 이후 유속장과 농도장의 비교를 통해 상관관계를 분석하였다.

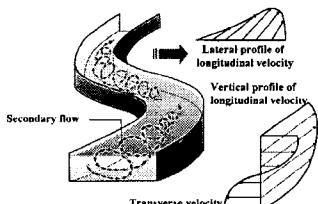


그림 1. 이차류의 생성과 소멸

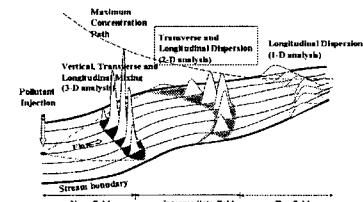


그림 2. 오염물질 농도의 차원해석

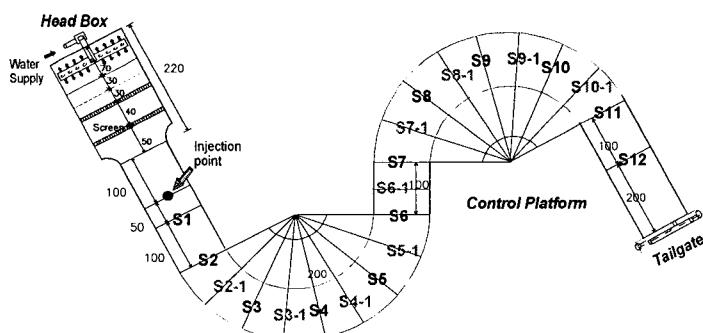


그림 3. 실험수로의 평면 개략도

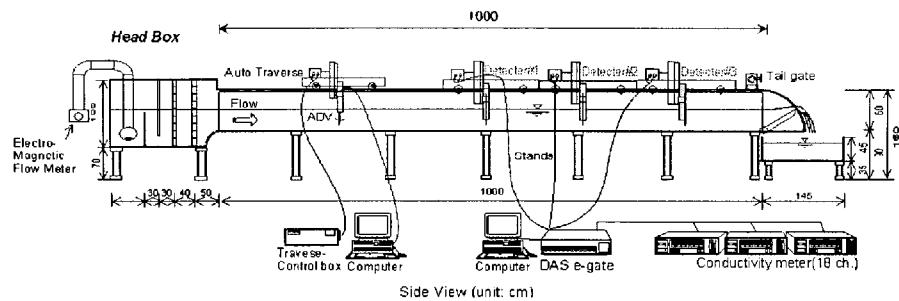


그림 4. 실험수로의 측면 개략도

그림 3에는 측정한 유속을 수심방향으로 평균하여 x-y 평면에 도시하였다. 유속은 화살표의 길이로 총 12개 단면에 표현하였다. 이를 통해서 만곡부에서의 수로 왼쪽 벽으로 갈수록 유속이 높아지는 것을 알 수 있었고, 직선부에서는 다시 균일한 유속구조를 구명하였다. 최대유속이 나타나는 위치를 선으로 연결한 뒤 농도 분포를 등고선으로 나타낸 그림 4를 그림 3과 비교하여 최대유속선을 따라서 농도장도 함께 거동하는 것을 확인하였다.

표 1. 실험 케이스별 수리량

Case	H(cm)	D(mm)	U(cm/sec)	Fr
B151	15		20.0	0.16
B152			40.0	0.33
B153			60.0	0.48
B201	20		20.0	0.14
B202			40.0	0.29
B203			60.0	0.42
B301	30		20.0	0.12
B302			40.0	0.23
B303			60.0	0.36
B401	40		20.0	0.10
B402			40.0	0.20
B403			60.0	0.30

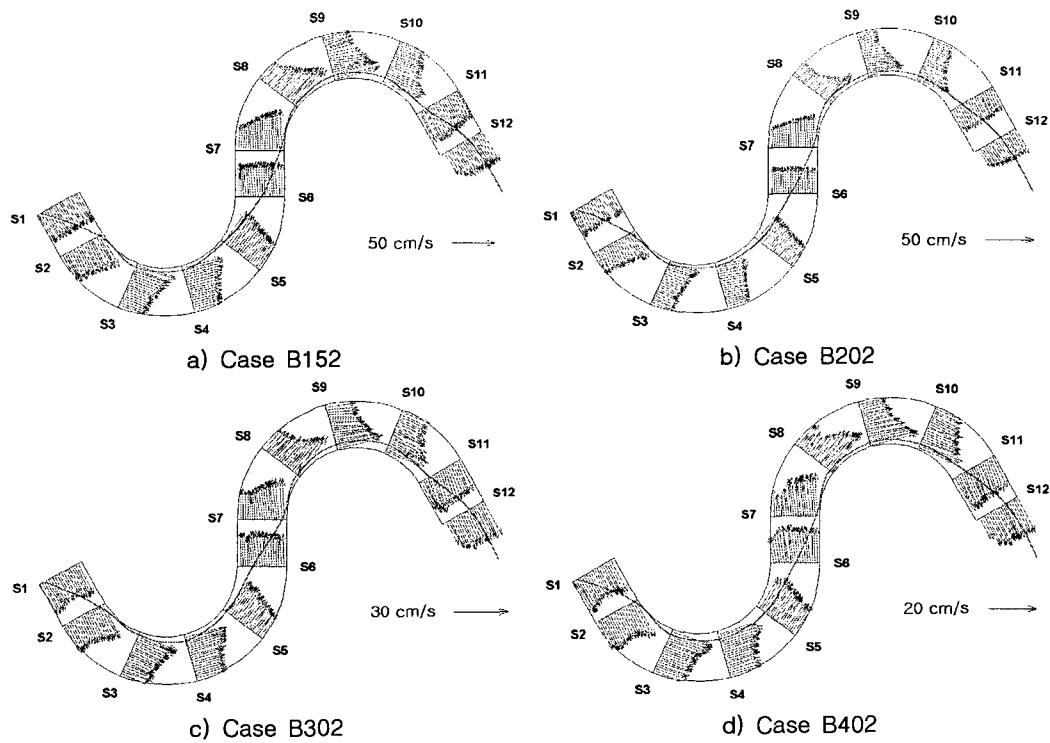


그림 5. 케이스별 x-y 방향 유속구조 분석

또한 유속구조의 변화 양상에 따르는 오염물의 거동에 대한 분포도 그림 4에 도시하였다.

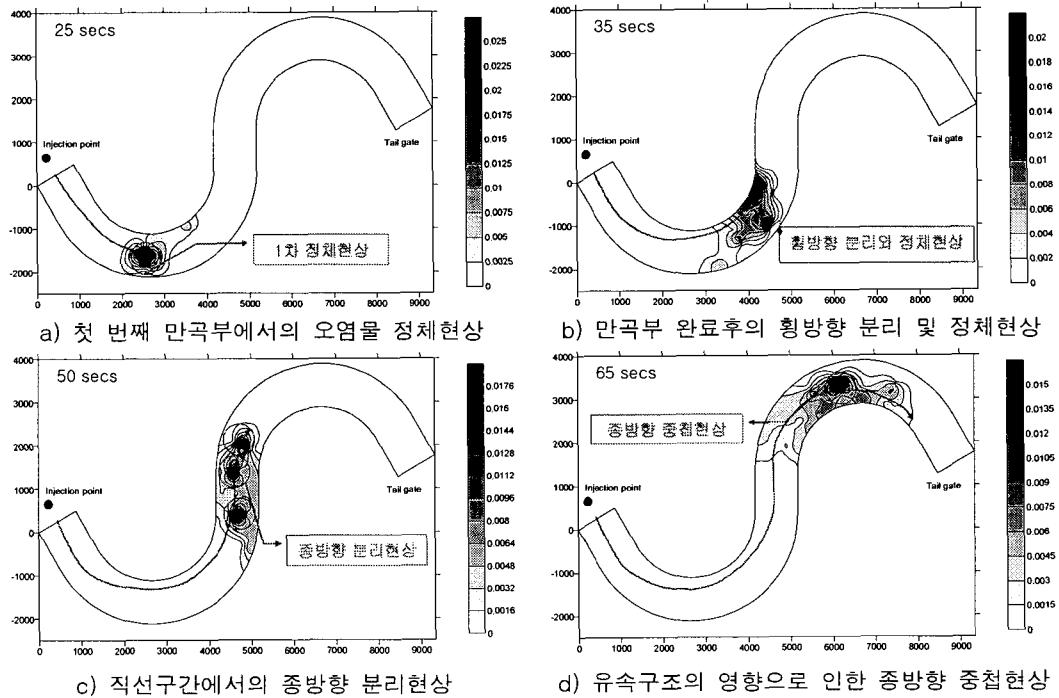


그림 6. 시간 경과에 따른 오염물질의 거동 분석과 주 오염운의 이동경로

(Case B202의 25, 35, 50, 65 초 경과 후)

4. 실험결과 분석

만곡부에서의 수로 안쪽 벽으로 갈수록 유속이 높아지는 것을 알 수 있고, 직선부에서는 다시 균일한 유속구조를 표현하게 된다. 최대유속이 나타나는 위치를 선으로 연결한 뒤 놓도 분포를 등고선으로 나타내어 비교하면 결국 최대 유속선을 따라서 놓도장도 함께 거동하는 것을 확인 할 수가 있으며 오염운의 국부적인 정체와 분리, 그리고 복합적인 중첩현상을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 사행수로에서의 유속구조의 변화에 대한 분석 자료를 바탕으로 하여 오염물질의 확산에 대한 연구를 위해 모형수로에서의 실험을 수행하였고, 이를 통해서 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

주 흐름은 직선구간에서 중앙에서 최대 유속을 나타내며, 좌우대칭적인 유속분포의 모습을 보였고, 만곡부에서는 수로안쪽을 따라 최대유속이 발생 하였다. 즉 수로의 좌안과 우안에 걸친 유동적인 2차원적 유속구조를 나타내었다. 수로의 직선구간에서는 최대유속이 발생하여 중앙에서의 놓도분산이 가장 활발하게 이뤄졌고, 유속구조의 변화에 따라 놓도의 평점형상인 오염운 역시 만곡부에서는 수로만곡부의 안쪽을 따라 확산 · 이동한다. 초기에는 완만한 C-t 곡선을 통해 균일한 놓도분산현상을 확인하였고, 만곡부의 발생이 연속적으로 나타나면서 놓도장은 비균일한 형태로 확장되어 흐름방향으로 진행한다. 만곡부의 영향으로 인해 유속이 외측에서는 추적자 물질의 정체현상이 나타났고, 이를 통해 오염운의 분리현상을 확인할 수 있었다. 분리와 정체의 연속적인 발생으로 인하여 다봉구조의 오염운이 발생하였고, 이를 통해 만곡부를 지나는 오염물질의 진행에 대한 수심방향에 대한 연구가 필요하다 사료된다. 또한 국내 외로 연구 개발된 수치해석모델의 적용 및 검토에 대한 검증자료로서의 이용도 가능하다.

참 고 문 헌

1. 김호중 (2006). 하천에 유입된 오염물질의 초기혼합 거동에 관한 연구, 석사 학위 논문, 서울대학교.
2. 이규환 (2006). 사행수로의 흐름특성에 관한 실험적 연구, 석사 학위 논문, 서울대학교.
3. 정성진 (2005). 사행수로에서 오염물의 횡혼합에 관한 실험적 연구, 석사 학위 논문, 서울대학교.
4. Boxall, J. B., and Guymer, I. (2003). Transverse mixing in sinuous natural open channel flows. *J. Hydr. Res.*, IAHR, 41(2), pp. 153-165.
5. Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H.(1979). Mixing in inland and coastal waters, Academic Press, New York.
6. Shukry, A. (1950). Flow around bends in a open flume, ASCE Trans., ASCE, pp. 115, 751-779.
7. Thomson, W. (1876). On the origin of windings of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes, Proc. Royal Soc. London, Vol 25, pp. 5-8.