

사행수로에서의 유속 및 분산특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study of Flow and Dispersion Characteristics in Meandering Channel

박성원* · 서일원**

Park, Sung Won · Seo Il Won

Abstract

General behaviors based on hydraulic characteristics of natural streams and channels have been recently analyzed and developed via various numerical models. However in the states of natural hydraulics, an experimental research must be performed simultaneously with the mathematical analysis due to effects of hydraulic properties such as meander, sediment, and so on.

In this study based on 2-D advection-dispersion equation, flow and tracer experiments were performed in the S-curved meandering laboratory channel with a rectangular cross-section. The channel was equipped with instrument carriages which was equipped with an auto-traversing system to be used with velocity measuring sensors throughout the depth and breadth of the flow field. To measure concentration distribution of the salt solution was adjusted to that of the flume water by adding methanol and a red dye (KMnO₄) was added to aid the visualization of the tracer cloud, the tracer was instantaneously injected into the flow as a full-depth vertical line source by the instantaneous injector and the initial concentration of the tracer was 100,000 mg/l.

The secondary current as well as the primary flow pattern was analyzed to investigate the flow distribution in the meandering channels. The velocity distribution of the primary flow for all cases skewed toward the inner bank at the first bend, and was almost symmetric at the crossovers, and then shifted toward the inner bank again at the next alternating bend. Thus, one can clearly notice that the maximum velocity occurs taking the shortest course along the channel, irrespective of the flow conditions. The result of the tracer tests shows that pollutant clouds are spreading following the maximum velocity lines in each cases with various mixing patterns like superposition, separation, and stagnation of pollutant clouds. Flow characteristics in each cases performed in this study can be compared with tracer dispersion characteristics with using evaluation of longitudinal and transverse dispersion coefficients(LDC, TDC). As expected, LDC and TDC in meandering parts have been evaluated with increasing distribution and straight parts have effected to evaluate minimum of LDC and TDC due to symmetric flow patterns and attenuations of secondary flow

key words : 2D advection-dispersion equation, meandering, secondary flow, LDC, TDC

1. 서 론

실제 하천에 대한 수리학적 특성을 분석하기 위해서는 최근 각광받는 수치해석을 이용한 연구와 동시에 모형실험을 통한 검증은 필요로 한다. 하천의 일반적인 특성 중 만곡부에서의 오염물질의 혼합거동과 이송과정에 대한 연구는 Fischer(1969)가 수행한 하나의 만곡부를 갖는 수로에서의 확산실험을 통한 이론적 횡분산

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 · E-mail : billy@snu.ac.kr

** 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · 공학박사 · E-mail : seoilwon@snu.ac.kr

계수식의 도출과 함께 최근 Boxall과 Guymer(2003), Boxall 등(2003)이 자연형 단면을 갖는 S형 사행수로에서 추적자 실험을 실시하여 구간별 횡분산계수의 산정 후 이차류의 확대와 횡분산계수의 관계분석 등이 수행되어 왔다.

본 연구에서는 2차원 유속분포를 통해 밝혀진 흐름 양상을 분석하고 연직선원 형태로 주입된 소금물 추적자 물질의 거동양상과 비교하여 그 관계를 밝혀내었다. 또한 분산의 특성을 정량적으로 분석하기 위해서 종방향 및 횡방향분산계수를 각 수리학적 조건에 대하여 산정하고 이를 통해 무차원화된 수리조건에 대한 흐름특성과 분산특성을 비교하였다.

2. 이론적 연구

2.1 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 가능 하다. 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.

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

2.2 2차원 추적법

Fischer (1968)가 1차원 확산모형에서 종분산계수를 산정하기 위해 추적법을 개발한 이래로 Baek (2004)은 Fischer의 1차원 추적법을 토대로 종분산계수 및 횡분산계수를 동시에 산정할 수 있는 2차원 추적법을 개발하였다. 2차원 확산방정식으로부터 중첩의 원리, 동결가정 등을 이용하고, 상류부와 하류부의 농도 취득값의 차이 및 시간의 변화량 등을 고려하여 다음과 같은 식을 채택하였다.

$$C(x, y, t) = \int_{y_i}^{y_r} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C(x_1, \psi, \tau) U}{4\pi(\bar{t}_2 - \bar{t}_1) \sqrt{D_L D_T}} \cdot \exp\left(-\frac{U^2(\bar{t}_2 - \bar{t}_1 - t - \tau)^2}{4D_L(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}\right) \exp\left(-\frac{(y - \psi)^2}{4D_T(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}\right) d\tau d\psi \quad (2)$$

여기에서 $C(x, y, t)$, $C(x_1, \psi, \tau)$ 는 각각 상류 및 하류부의 농도값이고, D_L , D_T 는 종방향 및 횡방향 분산계수이다.

3. 실험개요 및 방법

실험수조는 S자 형태의 만곡수로로서 강재로 제작되었다. 사행수로의 폭은 1 m, 총연장은 각각 직선길이 15 m 와 10 m 이며 만곡부는 150°의 중심각을 갖는 2 개의 원호형태로 구성되며 연결부는 직선구간으로 하였다. 수로의 양안에는 레일을 부착하여 이송장치를 설치하도록 하였고, 이송장치는 만곡구간을 따라갈 수 있도록 특수바퀴로 설계·제작 되었다. 실험용수는 실험수로의 하부에 위치한 직경 300 mm 의 강재 파이프를 통하여 공급된다. 또한 유량은 전자기 유량계를 이용하여 유지하고, 수심을 정확하게 유지하기 위해서 기계적으로 작동 가능한 테일게이트(tail gate)를 수로의 끝부분에 설치하였다. 마지막으로 수위 측정을 위한 포

인트 게이지를 테일게이트 전방 2 m 지점에 설치하였다. 유량은 15, 30, 60 ℓ/sec 의 세 가지 경우로 하였고, 수심은 15, 20, 30, 40 cm의 네 가지 경우로 하여 총 12 케이스로 하였다(그림 1).

유속장의 측정은 Sontek사의 3차원 micro-ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하였다. 오염물질 확산실험은 소금물 용액을 추적자로 이용하였고, 주변수와의 밀도차를 없애기 위해서 메탄올 용액을 첨가하였다. 농도장의 분석은 일본 KENEK사의 전기전도도계(conductivity meter)를 사용하여, 시간에 변화에 따르는 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.

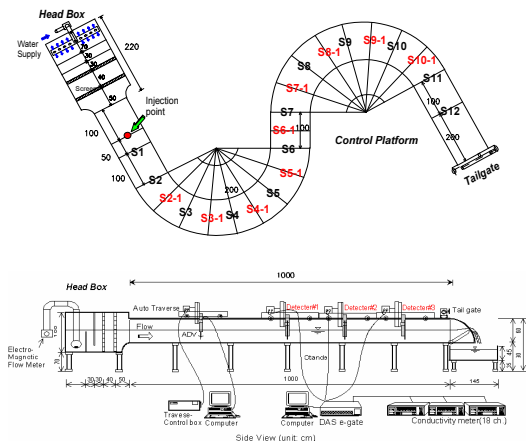


그림 1 실험수로의 개략도 (상: 평면도, 하: 측면도)

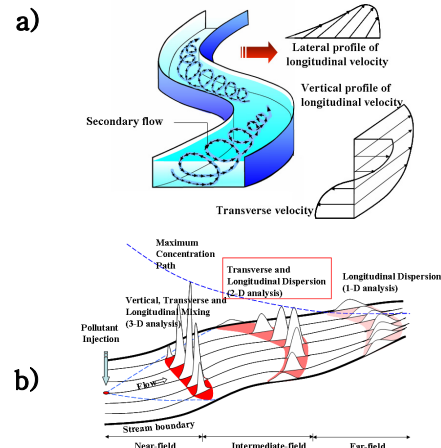


그림 2 이차류의 거동양상(a) 및 오염물질 농도의 구간별 차원해석 구분(b)

4. 실험결과 및 분석

만곡부에서의 수로 안쪽 벽으로 갈수록 유속이 높아지는 것을 알 수 있고, 직선부에서는 다시 균일한 유속 구조를 표현하게 된다. 최대유속이 나타나는 위치를 선으로 연결한 뒤 농도 분포를 등고선으로 나타내어 비교하면 결국 최대 유속선을 따라서 농도장도 함께 거동하는 것을 확인 할 수가 있으며 오염운의 국부적인 정체와 분리, 그리고 복합적인 중첩현상을 확인할 수 있었다(그림 3). 그림 4에는 수로의 종방향거리에 대한 종분산계수 및 횡분산계수의 변동 양상을 도시하였다. 이 그림에서 직선구간보다 만곡구간에서의 횡분산계수가 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 수심이 작을수록 (하폭 대 수심비가 클수록) 종분산계수 및 횡분산계수가 큰 것을 알 수 있다.

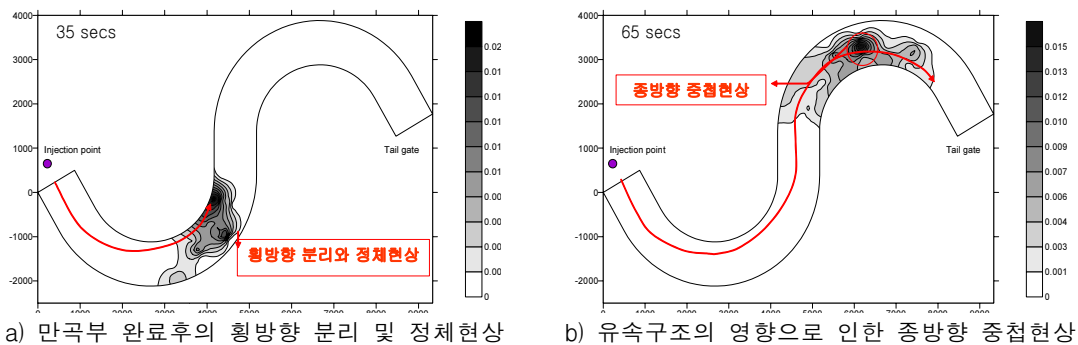


그림 3. 시간 경과에 따른 오염물질의 거동 분석과 주 오염운의 이동경로 (Case B202의 35, 65 초 경과 후)

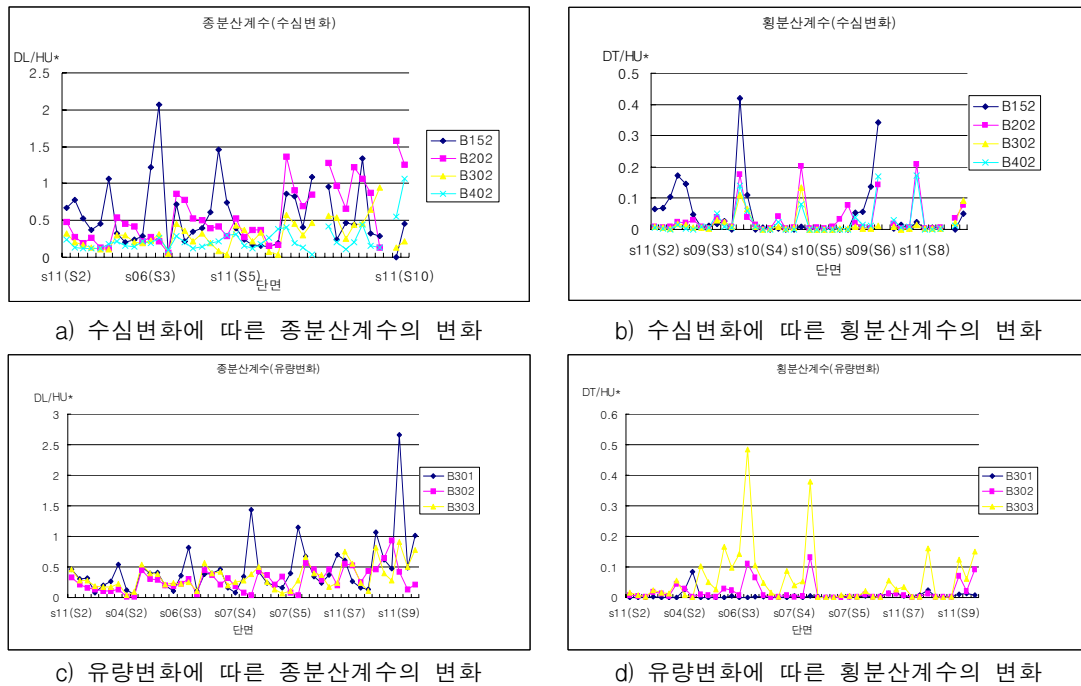


그림 4. 수심 및 유량변화에 따른 중·횡분산계수의 변동

5. 결론

본 연구 결과, 주 흐름은 직선구간에서 중앙에서 최대 유속을 나타내며, 좌우대칭적인 유속분포의 모습을 보였다. 만곡부에서는 수로안쪽을 따라 최대유속이 발생 하였다. 즉 수로의 좌안과 우안에 걸친 유동적인 2차원적 유속구조를 가지는 것으로 나타났다. 수로의 직선구간에서는 최대유속이 발생하여 중앙에서의 농도분산이 가장 활발하게 이뤄졌고, 유속구조의 변화에 따라 농도의 퍼짐형상인 오염은 역시 만곡부에서는 수로만곡부의 안쪽을 따라 확산·이동한다. 초기에는 완만한 C-t 곡선을 통해 균일한 농도분산현상을 확인하였고, 만곡부의 발생이 연속적으로 나타나면서 농도장은 비균일한 형태로 확장되어 흐름방향으로 진행된다. 만곡부의 영향으로 인해 유속이 외측에서는 추적자 물질의 정체현상이 나타났고, 이를 통해 오염원의 분리현상을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부 BK21사업(서울대학교 사회기반건설 사업단)과 과학기술부 특정기초 연구비 지원(과제번호: R01-2006-000-11027-0; 과제명: 연안수질환경 개선을 위한 하천-해양 통합 해석기술 개발)으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이규환 (2006). 사행수로의 흐름특성에 관한 실험적 연구, 석사 학위 논문, 서울대학교.
2. 정성진 (2005). 사행수로에서 오염물의 횡혼합에 관한 실험적 연구, 석사 학위 논문, 서울대학교.
3. Boxall, J. B., and Guymer, I. (2003). Transverse mixing in sinuous natural open channel flows. J. Hydr. Res., IAHR, 41(2), pp. 153-165.
4. 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.
5. 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.