

사행수로에서 유속구조가 추적물질의 혼합에 미치는 영향

Effects of Velocity Structures on Tracer Mixing in a Meandering Channel

서일원* · 박성원**

Seo, Il Won · Park, Sung Won

Abstract

In this study, a laboratory experiment has been performed on a S-curved channel with two curved sections. In the experiments, effects of 3-D velocity structures on mixing characteristics of tracer material were investigated. As a result, it was clearly noticed that the primary flow travels taking the shortest course of the meandering channel and has a very ununiform distribution at the bends. The secondary cell which was developing at the first bend disappears at the crossover, and then, at the next bend, secondary cell is re-developing in the opposite direction. The experimental results show that mixing of tracer is significantly affected by the combined action of ununiform primary flow and secondary cell. The ununiform primary flow separates the tracer cloud in the longitudinal direction, and the secondary cell further separates the retarding tracer cloud mainly in the transverse direction. As a result, these complex flow structures cause separation and spreading of tracer cloud both in the longitudinal and in the transverse directions. The measured dimensionless transverse dispersion coefficients calculated using 2-D routing procedure ranges 0.012-0.875, and is generally proportional to width to depth ratio (W/h). The predicted values calculated by the theoretical equation overestimate slightly the measured transverse dispersion coefficients.

Keywords : *meandering channel, primary flow, secondary cell, tracer cloud, 2-D routing procedure, transverse dispersion coefficients*

요 지

본 연구에서는 사행수로에서 유속구조가 추적물질의 혼합에 미치는 영향을 분석하기 위하여 2개의 만곡부를 갖는 S자형 실험수로를 제작하여 순간 주입된 추적자물질에 대한 분산실험을 수행하였다. 실험자료를 분석한 결과, 주 흐름은 사행수로의 최단경로를 따라 이동하며 만곡부에서 불균일한 분포를 갖는 것으로 밝혀졌다. 이차류의 경우, 만곡부에서 강력한 셀이 발달하나 직선부에서는 소멸하다가 다시 다음 만곡부에 반대 방향의 셀로 재생성됨이 확인되었다. 오염운의 거동은 주흐름의 불균일한 분포와 이차류셀에 의해 매우 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 주흐름의 불균일한 분포는 오염운을 종방향으로 분리시키고, 이차류 셀은 만곡부 외측의 처진 오염운을 횡방향으로 더욱 분리시키는 역할을 하게 되어, 결과적으로 만곡부의 복잡한 유속구조가 오염운을 종·횡방향으로 모두 분리시키고 나아가서 많이 퍼지게 하는 작용을 하는 것으로 밝혀졌다. 2차원 추적법의 적용을 통해서 각 케이스별 종·횡분산계수 실측치를 산정한 결과, 사행수로 전체구간에 대한 무차원 횡분산계수는 0.012~0.875의 범위를 갖는 것으로 밝혀졌다. 횡분산계수는 하폭 대 수심비에 대체적으로 비례하는 것으로 나타났다. 횡분산계수 이론식에 의한 추정치와 비교한 결과, 이론치가 실측치와 비교하여 다소 과대 산정하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 사행수로, 주흐름, 이차류 셀, 추적자 오염운, 2차원 추적법, 횡분산계수

1. 서 론

최근 들어 낙동강을 비롯한 국내 주요 상수원이 위치한 하천에 사고나 누출로 인해 유류나 유해 오염물질이 유입되어 큰 피해를 입히고 있다. 이와 같은 하천에서의 수질사고는 우리의 생활은 물론이고 하천생태계에도 심각한 악영향을 미치게 된다. 우리나라의 경우, 대도시를 통과하는 대부분의 하천에 상수원수 취수장과 오폐수 배출시설이 인접한

구간에 밀집되어 있기 때문에 다양한 수질사고에 대비한 수질예측 및 예보시스템 구축이 매우 중요한 과제로 부각되고 있다.

자연하천에 보존성 오염물질이 유입되는 경우에 주로 이송(advection)과 분산(dispersion)에 의해 주변수와의 혼합이 발생한다. 분산과정은 하천 내 여러 지점에서의 유속 편차로 인해 발생되는데, 일반적인 자연하천의 경우에는 불규칙한 단면형상과 연속적인 사행으로 인하여 큰 종·횡방향 유속

*정회원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : seoilwon@snu.ac.kr)

**서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (E-mail : billy@snu.ac.kr)

표 1. 실험수로에서의 분산 실험 연구

연구자	수로형태	제안내용	제안식
Elder (1959)	직선수로	Taylor의 분석에 대한 반박과 개수로에서의 종분산계수의 산정	$e_y/hu_* = 0.23$
Fischer (1969)	만곡수로	이론식의 유도	$e_y = 0.067du_*$
Miler & Richardson (1974)	직선수로	종분산의 크기에 대한 난류확산 제안	$D_L/e_y > 100$
Krishnappan & Lau (1977)	만곡수로	D_T/hu_* 대신 D_T/Wu_* 사용	$0.222 < D_T/Wu_* < 0.416$
Lau & Krishnappan (1977)	직선수로	하폭 대 수심비 (W/h)와 횡분산계수의 비교 분석	$e_y/hu_* \approx 0.5$
Webel & Schatzmann (1984)	직선수로	Lau & Krishnappan (1977)에 반박	$e_y/hu_* = 0.13$
Noke & Wood (1988)	직선수로	마찰계수가 횡분산계수에 미치는 영향분석	$e_y/u_*d = 0.134$
Boxall & Guymer (2003)	만곡수로	횡단면형상, 종방향곡률, 총유량 등의 영향으로 인한 횡분산계수의 산정	$e_y = 0.024 \sim 0.114 m^2/s$
Boxall <i>et al.</i> (2003)	만곡수로	새로운 마찰계수의 산정법 제안	$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z+c}{z_0}\right)$
Baek <i>et al.</i> (2006)	만곡수로	2차원 유관추적법을 이용한 분산계수의 산정	$D_T = \frac{B_c Q^2}{\Psi H^2 U}$
Baek & Seo (2007)	만곡수로	전단류에 의한 2차원 분산 검토 및 유속자료를 이용한 횡분산계수 산정	$\frac{D_T}{hu_*} = \frac{1}{6\kappa} \left(\frac{v_s}{u_*}\right)^2$

B_c bulk dispersion coefficient
 $D_{L,T}$ longitudinal-transverse dispersion coefficients
 h water depth
 u_* shear velocity
 e_y transverse turbulent-mixing coefficient
 v_s surface velocity
 Ψ dimensionless shape-velocity factor
 κ von Karman constant

편차를 갖게 되고 이로 인한 이차류의 생성과 소멸과정이 오염물질의 혼합 및 거동에 지대한 영향을 미치게 된다. 사행하천의 유속구조가 오염물질의 혼합거동에 미치는 영향에 대한 연구는 실험 및 수치모형을 이용하여 활발하게 수행되어 왔다. 실험수로를 이용한 기존 연구는 크게 직선수로와 곡선수로로 분류할 수 있다(표 1). 직선수로에서의 연구로서는 Miller와 Richardson(1974), Lau와 Krishnappan(1977), Webel과 Schatzmann(1984), Nokes와 Wood(1988) 등의 연구가 있다. 이들은 하폭 대 수심비, 이차류, 그리고 난류 등의 인자들이 횡분산에 주요한 영향을 미치는 것으로 주장하였고, 실험결과를 이용하여 종·횡분산계수의 경험식을 제안한 바 있다. 곡선실험수로에서의 2차원 확산실험은 Fischer (1969)를 시작으로 Chang(1971), Krishnappan과 Lau(1977), Almquist와 Holley(1985), Boxall과 Guymer(2003) 등이 연구를 수행해왔다. 이들은 곡선수로의 다양한 만곡형상, 곡률반경과 파장 등에 대하여 실험을 수행하여 횡분산계수에 대한 경험식을 제안하였다.

곡선실험수로 연구에서는 주로 고정상 직사각형 단면수로 형태를 채택하여 실험을 수행하였는데, 이 경우 만곡부에서의 주흐름의 분포가 자연하천과 반대의 경우로 나타나는 것으로 보고되고 있다(Rozovskii, 1961; 서일원 등, 2004; 김지영, 2005).

Rozovskii(1961)는 180° U자형 만곡수로에서 실험을 수행

하였는데, 만곡부의 내측의 유속이 외측에 비해서 빠르게 나타나고 있으며 만곡부를 지나서 직선부에서는 수로의 외측의 유속이 빠르게 나타난다고 보고하고 있다. 김지영(2005)은 3차원 CFD 모델인 FLOW-3D를 서일원 등(2004)이 실험한 사행수로에 적용하여 주흐름과 이차류 거동을 해석한 결과, 주흐름의 경우 만곡부의 내측에서 최대유속이 발생하는 것으로 보고하였다. 그러나 Boxall과 Guymer(2003)는 이동상 곡선수로 실험을 수행한 결과, 주흐름의 유속분포가 고정상 곡선수로의 결과와는 다르게 자연하천의 유속분포와 유사하게 나타남을 밝힌 바 있다.

본 연구의 목적은 자연하천의 대표적인 수리학적 특성인 사행구조가 오염물질의 혼합거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것이다. 이를 위해 직사각형 단면을 갖는 사행수로에서 추적자 실험을 수행하여 농도장을 분석하였다. 본 연구에서는 사행수로에서 주흐름 및 이차류 거동이 오염물질의 분산특성에 미치는 영향을 보다 정확하게 분석하기 위하여 기존의 사행수로 분산실험연구(백경오 등, 2005a, b; 서일원 등, 2006)보다 유속 및 농도측정 측선수를 증가시켜 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 관측법 중 하나인 2차원 추적법을 이용하여 다양한 수리조건에서의 종·횡분산계수를 산정하고, 횡분산계수와 하폭 대 수심비와의 관계를 파악하였다. 또한 전단류를 포함한 횡분산계수 이론식(백경오와 서일원, 2007)을 적용하여 계산한 횡분산계수 추정값과 실측값을 비교하였다.

2. 이론적 연구

2.1 2차원 추적법

자연 상태의 수체에 유입된 오염물질의 혼합은 이송과 확산, 분산 등의 과정으로 설명할 수 있다. 하천에 점원형태로 유입된 오염물질은 근역혼합단계에서는 3차원적인 혼합과정을 겪게 되는데, 하천의 수심이 하폭이나 흐름방향의 길이 규모에 비하여 작기 때문에 수심방향의 혼합이 비교적 신속하게 완료된다. 수심방향의 혼합이 완료된 이후인 원역혼합 단계에서는 수평방향 및 흐름방향의 퍼짐이 주요한 혼합과정이 된다. 이에 따라 원역에서는 수심적분된 2차원 이송-분산방정식을 이용하여 오염물질의 중·횡방향 혼합거동을 해석하는 것이 일반적이다. 3차원 이송-확산방정식을 수심방향으로 적분하면 식 (1)과 같이 정리할 수 있다(Fischer 등, 1979).

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

여기서 C 는 오염물질의 농도, u 와 v 는 각각 x , y 방향의 수심평균된 유속, h 는 수심, D_L , D_T 는 각각 종분산계수와 횡분산계수이다.

2차원 이송·분산방정식을 적용하여 하천에 유입된 오염물질의 흐름방향 및 수평방향의 혼합거동을 해석하기 위해서는 방정식의 매개변수인 종분산계수와 횡분산계수를 입력하여야 한다. 일반적으로 분산계수의 실측값은 하천이나 실험수로에서 측정된 농도자료의 분석을 통해 결정된다. 이러한 실측값의 결정방법에는 모멘트법과 추적법이 제안되어 사용되어 왔다. 모멘트법은 오염물질이 Fick의 법칙(Fischer 등, 1979)을 따라 확산된다는 가정 하에 통계적인 특성(평균, 분산)을 이용하여 구간별 분산계수를 결정하는 방법으로서 단순모멘트법, 일반화된 모멘트법, 수정모멘트법 등이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 모멘트법은 벽면 반사 등의 영향으로 인한 농도곡선의 왜곡현상 때문에 비교적 큰 오차를 나타내는 단점이 있다. 또한 모멘트법의 경우, 대부분의 기존 연구자들은 연속주입조건하에서 측정된 농도자료에 적용하여 횡분산계수를 산정하여 왔는데, 비정상상태의 실험에서 취득한 자료의 경우 Beltaos(1980)의 전환식을 이용하여야 하는 단점이 있으므로 이러한 점들을 보완하기 위해 추적법이 개발되었다(Baek 등, 2006).

추적법(routing procedure)은 홍수추적과 유사한 개념으로 상류의 오염물질 농도분포를 추적하여 계산한 하류의 농도분포를 실측값과 비교하여 분산계수를 결정하는 방법이다. 현재까지 2차원 이송·분산방정식의 분산계수를 결정하는 추적법으로는 2차원 추적법과 2차원 유관추적법이 제안되었다(Baek 등, 2006). Baek 등(2006)은 Fischer의 1차원 추적법을 토대로 종분산계수 및 횡분산계수를 동시에 산정할 수 있는 2차원 추적법을 개발하였는데 이에 대한 식은 다음의 2차원 확산방정식으로부터 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2)$$

초기조건으로 질량 M 이 임의의 지점인 $x=\xi$, $y=\psi$ 에 순간적으로 투입되는 경우, 식 (2)의 해는 다음과 같이 유도된

다(Carlslaw와 Jaeger, 1959).

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4\pi\sqrt{D_L D_T}} \exp\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4D_L t}\right) \exp\left(-\frac{(y-\psi)^2}{4D_T t}\right) \quad (3)$$

초기투입량을 M 대신 임의의 함수 $C(x, y, 0)=f(x, y)$ 로 가정하면 중첩의 원리에 의해 식 (3)은 식 (4)와 같이 변형된다(Fischer 등, 1979).

$$C(x, y, t) = \int_{y_1}^{y_r} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi, \psi)}{4\pi\sqrt{D_L D_T}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4D_L t}\right) \exp\left(-\frac{(y-\psi)^2}{4D_T t}\right) d\xi d\psi \quad (4)$$

식 (4)에 대신 상류에 위치한 횡단측선의 관측농도를 대입하면 하류횡단측선의 농도를 계산할 수 있다.

$$C(x, y, t_2) = \int_{y_1}^{y_r} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C(\xi, \psi, t_1)}{4\pi(t_2-t_1)\sqrt{D_L D_T}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4D_L(t_2-t_1)}\right) \exp\left(-\frac{(y-\psi)^2}{4D_T(t_2-t_1)}\right) d\xi d\psi \quad (5)$$

여기서 $C(\xi, y, t_1)$ 는 상류측선의 관측농도이고, $C(x, y, t_2)$ 는 하류측선에서의 계산농도이다. 일반적으로 식 (5)를 사용하려면 고정된 시간에 측정된 농도의 공간적인 분포가 필요하다. 하지만 일반적으로 농도자료를 취득할 때 탐침을 일정한 지점에 고정시키고 시간에 따른 농도분포를 취득하게 된다. 따라서 동결가정(Fischer 등, 1979; Rutherford, 1994)을 이용하여 식 (5)를 시간적 추적식으로 변형하면 다음과 같다.

$$C(x, y, t) = \int_{y_1}^{y_r} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C(x_1, \psi, \tau)U}{4\pi(\bar{t}_2-\bar{t}_1)\sqrt{D_L D_T}} \cdot \exp\left(-\frac{U^2(\bar{t}_2-\bar{t}_1-\tau)^2}{4D_L(\bar{t}_2-\bar{t}_1)}\right) \exp\left(-\frac{(y-\psi)^2}{4D_T(\bar{t}_2-\bar{t}_1)}\right) d\tau d\psi \quad (6)$$

여기서 \bar{t}_1 과 \bar{t}_2 는 각각 오염물질이 각각 상류 및 하류측선을 지나는 평균시간이고, U 는 평균유속이다. 식 (6)을 이용하여 하류측선에서의 농도분포를 계산할 수 있고, 이렇게 계산된 농도분포를 하류측선에서 관측된 실측 농도분포와 비교하여 두 값이 가장 근사하게 만드는 분산계수값을 선정하면 그 값이 분산계수의 실측치가 되는 것이다. 2차원 추적법의 장점은 첫째로 비정상상태에서의 농도장에서 취득된 농도자료를 이용하여 그에 대한 어떤 가공 및 변환 없이 분산계수를 산정할 수 있다는 점이고, 둘째로 횡분산계수 뿐만 아니라 모멘트법으로는 취득할 수 없는 종분산계수도 결정할 수 있다는 점이다.

2.2 유속구조를 이용한 횡분산계수 이론식

하천에서 수심방향의 혼합이 완료된 이후 수심적분된 2차원 이송-분산방정식을 이용하여 오염물질의 중·횡방향 혼합거동을 해석하는 경우, 횡분산계수는 하폭방향 유속의 연직방향에 대한 불균일성에 의한 전단흐름효과(이차류 효과)를 포함하여야 한다. 백경오와 서일원(2007)은 이러한 이차류의 유속구조를 포함하는 횡분산계수 이론식을 제안하였다. 그들은 식 (7)에 제시된 바와 같이 이차류의 유속 편차(velocity deviation)를 삼중적분하여 횡분산계수를 유도하였다.

$$D_T = \frac{1}{h} \int_0^h v' \int_0^z \int_0^z v' dz dz dz \quad (7)$$

여기서 v' 는 수심평균된 횡방향 유속의 연직방향에 대한 유속편차로서 다음과 같이 정의된다.

$$v' = v - \bar{v} = v - \frac{1}{h} \int_0^h v dz \quad (8)$$

ε_z 는 난류확산계수로서 레이놀즈 상수에 의해 외점성계수와 동일하게 취급하며 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon_z = \kappa u_* z (1 - z/h) \quad (9)$$

여기서 κ 는 von Karman의 상수이며 u_* 는 전단유속이며 z 는 연직방향좌표이다. 백경오와 서일원(2007)은 식 (8)의 v' 을 구하기 위하여, Odgaard(1986)가 제안한 다음의 유속분포식을 적용하였다.

$$v = v_s \left(2 \frac{z}{h} - 1 \right) \quad (10)$$

여기서 v_s 는 수표면에서의 횡방향 유속이다. 따라서 식 (8)~(10)을 식 (7)에 대입하여 적분을 수행하면 다음과 같은 무차원화된 횡분산계수의 산정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{D_T}{h u_*} = \frac{1}{6 \kappa} \left(\frac{v_s}{u_*} \right)^2 \quad (11)$$

식 (11)에서 보듯이 횡분산계수는 수표면 횡방향 유속 (v_s)과 마찰 유속 (u_*)과의 비에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 만일 관측에 의한 v_s 가 없을 경우, v_s 를 추정해야 하는데 백경오와 서일원(2007)은 하폭의 중심부에서 v_s 를 흐름방향의 합수로 다음과 같이 제안하였다.

$$v_s(S) = \frac{A_1}{A_2} [1 - \exp(-A_2 S)] + v_s^i \exp(-A_2 S) \quad (12)$$

v_s^i 는 초기에 존재하는 수표면 횡방향 유속이고, A_1 과 A_2 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$A_1 = \frac{2m+1}{m(m+1)} \frac{\bar{u}}{r_c} \quad (13a)$$

$$A_2 = \frac{2\kappa^2}{m+1} \frac{1}{h} \quad (13b)$$

$$m = \kappa \frac{\bar{u}}{u_*} \quad (14)$$

식 (12)는 유속의 증가와 감소를 한 지점에서 동시에 고려하는 장점이 있다. 결국 식 (12)를 식 (11)에 대입하면 횡방향 유속자료가 없더라도 비교적 손쉽게 기본 수리량 (평균유속, 마찰유속, 사행반경, 수심)만을 가지고 횡분산계수를 흐름방향에 따라 산정할 수 있다(백경오와 서일원, 2007). 식 (13)에서의 m 은 마찰과 관련된 항 (식 14)이고, r_c 는 사행반경을 나타낸다.

3. 실험적 연구

3.1 실험 수로 및 장치

본 연구에서 이용한 실험수로로는 그림 1~2에 도시한 바와 같이 S자 형태의 사행수로로서 강제로 제작되었다. 폭은 1 m, 총연장은 직선길이 12 m를 갖는 직사각형단면의 수로로서 150°의 중심각을 갖는 2 개의 원호형태 만곡부를 1 m의 직선부로 연결시켜 제작하였으며 수로의 양끝은 다시 2.5, 3 m의 직선부로 연결하였다. 수로의 바닥 및 벽면의 재질은 페인트칠된 강재로 제작되어 약 0.010~0.017의 조도를 갖게 된다. 실험수로 상부의 헤드박스(head box)에는 2 개의 위어 및 2개의 다공정류판을 설치하여 용수관로를 통하여 유입된 실험용수가 안정된 수면상태를 유지하면서 수로로 유입될 수 있도록 하였다. 이에 따라 실험수로내로 균

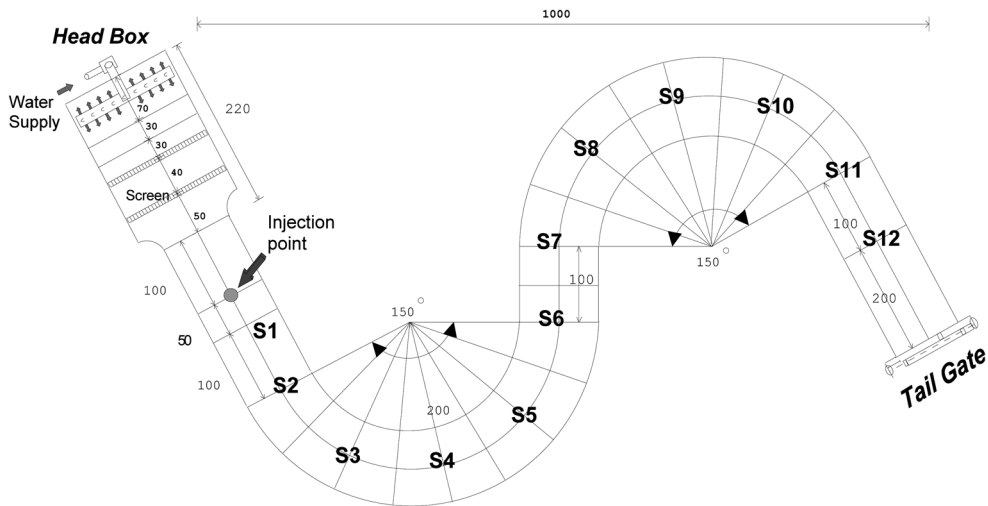


그림 1. 실험수로의 평면도 (단위: cm)

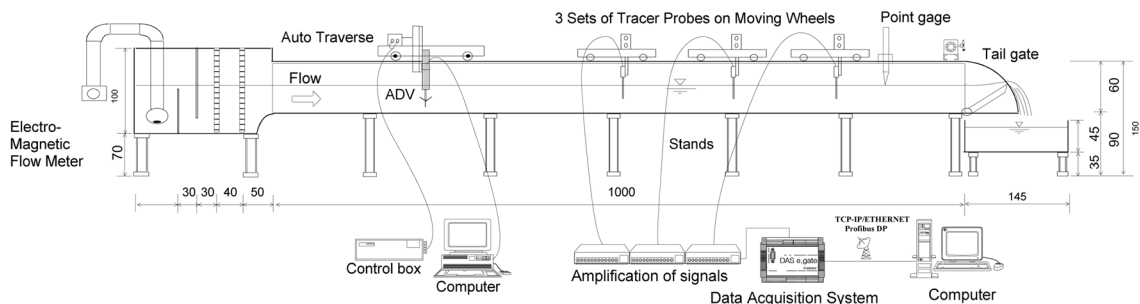


그림 2. 실험수로 및 측정장치 측면도 (단위: cm)

일한 유속분포를 가지는 흐름이 유도되도록 하였고, 이는 선행 연구자에 의하여 검증된 바 있다(김호중, 2006).

실험용수는 저수조에 저장된 물을 펌프로 고수조에 올려주어, 정수도를 유지하며 유통하는 상태에서 용수관로로 공급되도록 하였다. 설치된 펌프(10, 30, 50 마력은 최대 0.5 m³/sec의 용수를 공급할 수 있으며, 이 펌프는 실험수로 하부에 위치한 직경 300 mm의 파이프를 통해서 실험수로로 용수를 공급한다. 실험용수의 유량은 관로삽입형 전자기 유량계(측정범위: 0.53~350 l/sec)를 이용하여 측정하였다. 실험수로내의 수위는 말단부로부터 상류방향 1 m에 설치된 포인트 게이지를 이용하여 측정하였으며 테일게이트(tail-gate)를 이용하여 조절하였다.

3.2 계측기기 및 실험 방법

오염물질의 분산거동 규명을 위하여 투입하는 추적자물질은 소금물 용액을 사용하였다. 추적자물질과 주변수와의 밀도차를 없애기 위해 메탄올 용액을 첨가하였고, 또한 과망간산칼륨(KMnO₄)을 첨가하여 추적자의 2차원적 거동을 가시적으로 분석할 수 있도록 하였다. 추적자의 농도측정은 일본 KENEK사에서 제작한 전기전도도계(conductivity meter)를 사용하였는데 이의 측정 범위는 0~30,000 ppm이고 선형도는±1.5%이다. 전기전도도계의 탐침은 지름이 4 mm인 것을 사용함으로써 10~15 cm 간격으로 6 개의 탐침을 설치한 상태에서도 탐침이 주 흐름에 큰 영향을 미치지 않도록 하였다.

농도의 전기적 신호는 증폭장치를 거쳐 증폭된 뒤에 Gantner사에서 제작한 자료수집장치(DAS: data acquisition system)를 통하여 전기전압에 대한 신호로 변환시켜 취득하였다. 본 연구에서 활용한 DAS장치는 MS-DOS 운영체제가 아닌 Windows 운영체제 상에서 데이터 처리가 가능하기 때문에 농도데이터를 보다 정밀하고 신속하게 취득할 수 있었다. 추적자(소금물 용액)의 초기주입농도는 100,000 ppm이며, 추적자의 주입은 순간주입기를 이용하여 전 수심에 대해 선원으로, 횡 방향으로는 점원으로 순간 주입하였다. 주입기는 고정판과 지름 9.0 cm의 실린더로 구성되어 있으며, 실험수로 바닥에 설치된 고정판에서의 분리 후 주입이 되도록 설계되었다.

본 실험에서는 과거 실험연구(백경오 등, 2005a, b; 서일원 등, 2006)에 비교하여 유속 및 농도측정 축선수를 증가시켜 흐름 및 오염물질의 거동을 보다 세부적으로 분석할 수 있도록 하였다(그림 1 참조). 각 축선에서의 횡방향 농도측정 지점은 수로중앙 10 cm를 제외하고 15 cm의 등 간격으로 설치하였다. 추적자의 농도는 수심이 비교적 얇은 경우(=15, 20 cm)는 수면으로부터 수심 60% 지점에서 1점법으로 측정하였고, 수심이 비교적 깊은 경우(=30, 40 cm)는 수심 20%와 80%지점에서 2점법으로 측정하여 두 값을 평균하였다. 실험수행을 위한 수심조건은 15, 20, 30, 40 cm로, 유량조건은 15, 30, 60 l/sec로 총 9가지 케이스를 수행하였다. 흐름조건을 포함한 수리인자들은 표 2에 나타내었다.

4. 실험결과 분석

4.1 유속장의 분석

본 연구에서 추적자 혼합거동 실험을 수행한 사행수로에서

표 2. 실험 케이스별 수리량

Case	h (cm)	\bar{U} (cm/sec.)	W/h
B151	15	10.0	6.67
B152		20.0	
B153		40.0	
B201	20	7.5	5.0
B202		15.0	
B203		30.0	
B301	30	5.0	3.33
B302		10.0	
B303		20.0	
B401	40	3.75	2.5
B402		7.5	
B403		15.0	

의 유속구조에 대한 연구는 서일원 등(2006)에 의해 수행된 바 있다. 본 연구에서는 추적자의 횡분산거동에 영향을 미치는 수평방향(x-y 방향)의 유속장과 횡단면별 이차류 분포를 분석하였다. 대표적인 실험조건에 대한 수평방향의 2차원 유속장을 그림 3에 도시하였다. 그림 3에서 주흐름이 만곡부의 내측으로 치우쳐서 발달함을 알 수 있다. 이는 주흐름이 사행수로의 최단경로를 택하여 이동함을 의미하는 것이다. 이러한 현상은 자연하천의 만곡부에서 주흐름이 만곡부의 외측으로 치우치는 것과는 상반된 현상으로서 본 실험에서 사용한 사행수로의 단면이 직사각형이고 수로의 조도가 자연

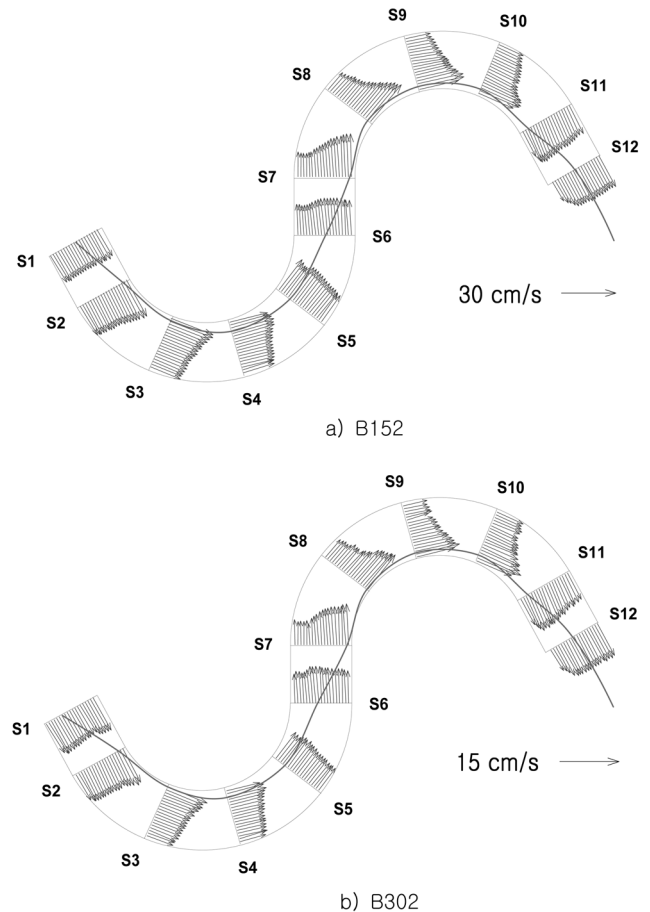


그림 3. 주 흐름방향 유속 벡터도 (Case B152, B302)

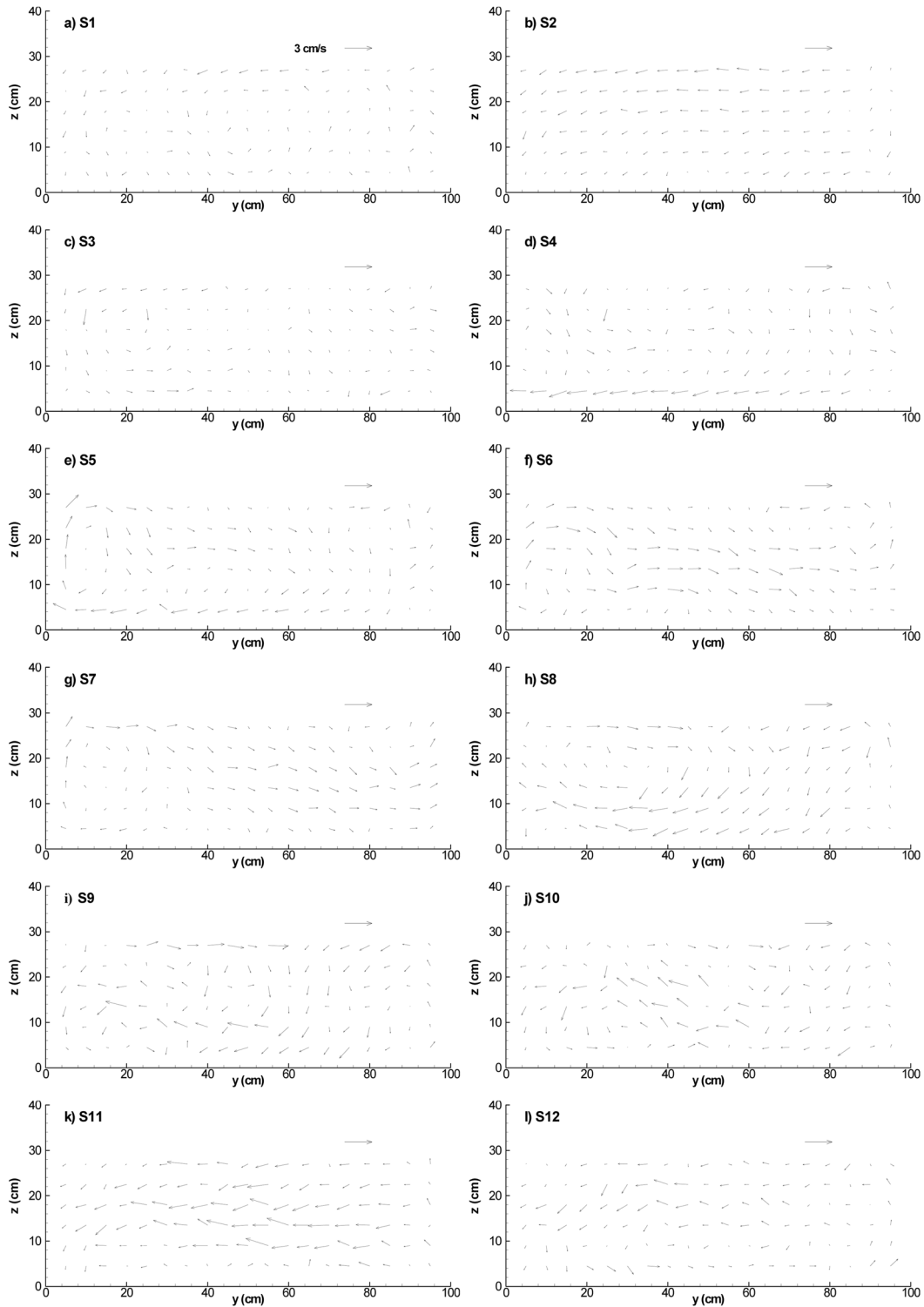


그림 4. 단면별 이차류 벡터도 (Case B302)

하천과는 상이하기 때문에 판단된다(서일원 등, 2006). 이러한 고정상 사행수로의 만곡부에서의 주흐름의 분포가 자연 하천과 반대의 경우로 나타나는 현상은 여러 연구자(Rozovskii, 1961; 서일원 등, 2004; 김지영, 2005)가 실험 및 수치모의를 통하여 밝힌 바 있다. 따라서 본 실험에서와 같은 고정상 사행수로의 실험결과를 이동상 자연하천에 그대로 적용하는 것은 오류를 발생시킬 소지가 있다고 판단된다.

주흐름 유속장을 도시한 동일한 실험조건에 대한 횡단면별 이차류에 대한 벡터도를 그림 4에 도시하였다. 이 그림들은 사행수로의 진행경로(제 1 직선부→제 1 만곡부→제 2 직선부→제 2 만곡부)를 쫓아가면서 이차류가 생성과 소멸을 받

복하는 것을 명확하게 보여주고 있다. 제 1 직선부에서는 이차류가 일방향 분포를 가지고 있으나 제 1 만곡부로 진입함에 따라 시계방향의 이차류 셀이 발달하여 만곡부의 정점에서 최대가 된다. 만곡부를 빠져나오면서 셀의 크기가 감소하여 제 2 직선부에서는 셀이 소멸되어 다시 일방향 분포로 전환됨을 알 수 있다. 제 2 만곡부에서는 반시계방향의 셀이 발달하며 제 2 직선부에 이르러서 다시 소멸되는 현상을 보여 주고 있다. 이차류의 강도는 직선부보다 만곡부에서 더 크게 나타나는 것으로 밝혀졌다(서일원 등, 2006). 이와 같은 이차류의 거동은 4.2에서 상술한 바와 같이 추적자의 혼합에 큰 영향을 미치게 된다. 특히 추적자 오염원의 횡방향

퍼짐현상을 야기하며 이러한 퍼짐현상이 황분산계수의 증가로 나타나는 것으로 밝혀졌다.

4.2 농도장의 분석

추적자 분산실험에서 농도는 21개 단면에서 횡방향으로 6개의 탐침을 설치하여 시간적으로 연속 측정하였다. 농도 측정빈도수는 초당 10개이며 측정 시 발생하는 기계적 잡음(white noise)은 이동평균법(moving average)을 이용하여 제거하였다. 측정된 농도값을 주입농도($C_0=100,000$ ppm)로 나누어 무차원화한 값을 시간 및 무차원 횡방향거리(y/w)에 대하여 그림 5에 도시하였다. 수로의 직선부(S1~S2)에서는 추적자의 농도분포가 좌우 대칭으로 나타나 제 1 만곡부에 들어서면서 최대농도값의 발생지점이 좌안으로 이동하는 것으로 밝혀졌다. 그러나 제 2 직선부(S6~S7)에서 다시 좌우 대칭형으로 전환되며 제 2 만곡부에서는 최대농도값의 발생지점이 다시 수로의 우안으로 치우치는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 추적자의 중심부가 주흐름의 최대유속선을 쫓아서 이동하기 때문에 발생하는 것으로 백경오 등(2005)의 연구에서도 동일한 현상이 나타나는 것으로 밝혀진 바 있다.

시간-농도데이터를 시간의 변화에 따라 공간-농도데이터로 전환하여 오염원 등농도선 형태로 도시한 것이 그림 6이다.

본 연구에서 수행한 12개의 실험조건 중 B302 케이스에 대하여 오염원의 거동을 도시한 것으로서 등농도선은 대체로 모든 케이스에 대하여 유사한 양상을 보이는 것으로 나타났다. S1 단면 상류에 주입된 추적자는 제 1 직선부에서는 비교적 작은 크기의 종방향 및 횡방향 분산거동을 보이고 있으며 오염원의 형태 또한 전형적인 타원형을 보여주고 있다. 오염원의 중심부는 수로의 중앙을 통과하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 제 1 만곡부를 진입하는 순간부터 오염원은 수평방향 흐름의 불균일한 분포와 연직단면상의 이차류의 영향을 동시에 받게 된다. 수평방향 주흐름의 불균일한 분포는 오염원의 중심부를 만곡의 내측(좌안)으로 치우치게 만드는 한편, 오염원의 꼬리가 만곡부의 외측(우안)으로 길게 발달시키는 것으로 나타났다. 또한 연직단면상에 발달한 이차류 셀은 수평방향 흐름의 불균일한 분포로 인해 만곡부의 외측으로 길게 발달한 오염원의 꼬리를 횡방향으로 더욱 퍼지게 만드는 작용을 하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 주흐름과 이차류의 연합된 작용은 오염원의 종·횡방향분산을 증가시키는 한편, 나아가서 오염원의 분리현상을 야기시키는 것으로 나타나고 있다.

제 2 직선부에서는 4.1에서 전술한 바와 같이 주흐름의 분포도 균일해지고 이차류 셀도 소멸되기 때문에 오염원도

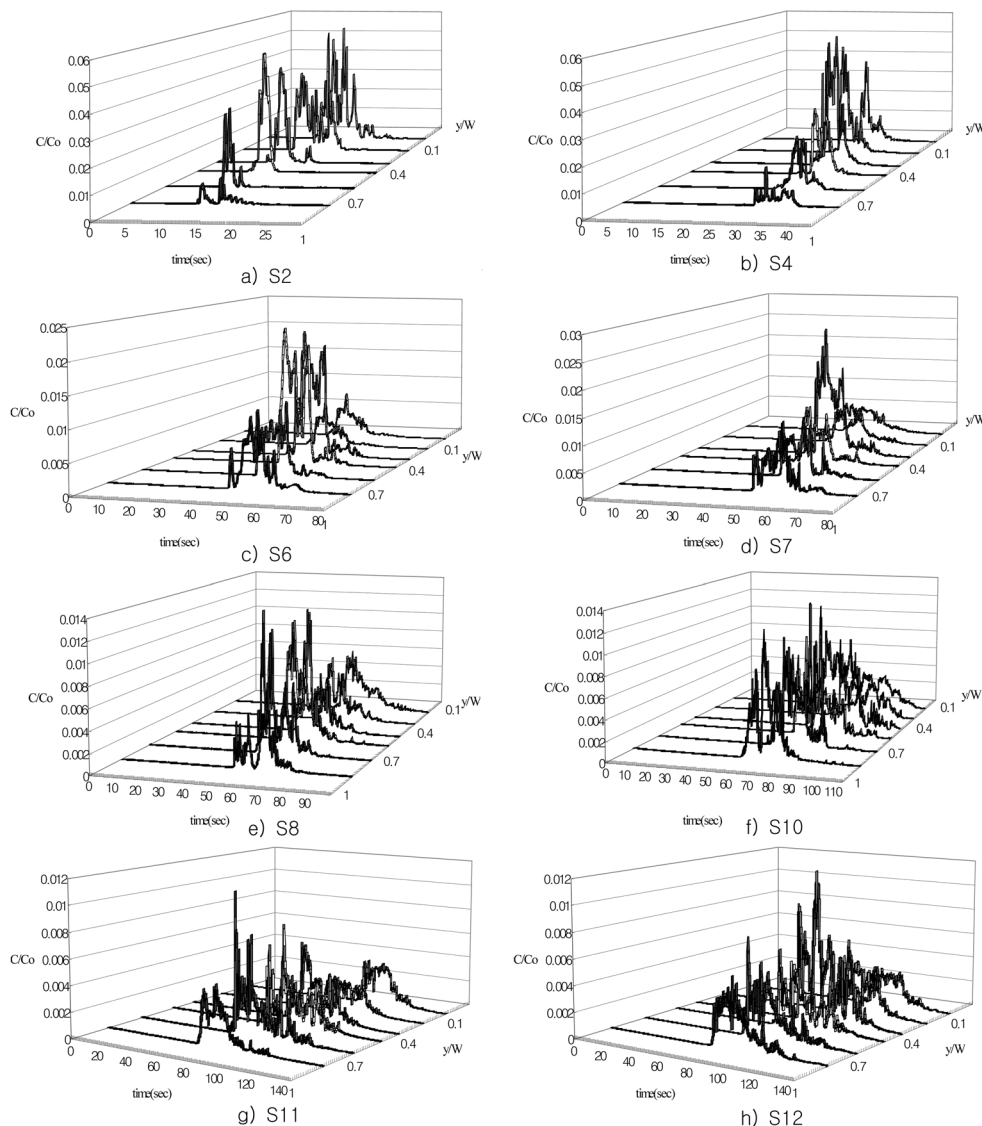


그림 5. 농도 대 시간 그래프 (Case B202)

이들의 영향을 받지 않게 된다. 따라서 오염운의 거동은 제 1 직선부와 유사하게 전형적인 중방향 및 횡방향 분산거동을 따르게 된다. 제 2 만곡부에서는 오염운이 다시 주흐름의 불균일한 분포와 이차류 셀의 영향을 받는 것으로 나타났다. 오염운의 중심부는 만곡부의 내측 (우안)으로 치우쳐서 이동하는 한편, 오염운의 꼬리는 만곡부의 외측 (좌안)으로 길게 발달하는 것으로 나타난다. 또한 이차류 셀의 영향으로 오염운의 꼬리가 횡방향으로 더욱 퍼져서 오염운의 선단부와 분리되는 현상이 나타나고 있다. 이러한 메카니즘은 제 2 만곡부에서 오염운의 형태가 전형적인 타원형이 아닌 다봉형 구조로 발달하게 하는 주된 원인으로 작용하는 것으로 사료된다.

상술한 오염운의 거동은 모든 실험조건에서 유사하게 나타나고 있으며 이러한 오염운의 분산거동을 개념적으로 도시한 것이 그림 7이다. 그림 7a)는 수평방향 흐름의 불균일한 분포와 연직단면상의 이차류의 영향이 존재하지 않는 경우에 대한 중·횡방향 분산과정을 개념화하여 나타낸 것으로 오염운의 중방향 분산이 사행수로의 흐름을 따라서 일어나며 횡방향 분산은 주흐름의 직각인 방향으로 발생하는 것을 보여주고 있다(서일원과 이명은, 2006). 그림 7b)는 주흐름의

불균일한 분포와 이차류 셀의 영향에 의해 오염운이 왜곡, 분리, 분산 되는 거동을 개념화하여 도시한 것이다.

사행수로의 각 단면별 오염운의 도달시간을 그림 8에 도시하였다. 그림 8a)에서 각 실험조건별 도달시간은 평균유속에 반비례하는 것으로 나타났으며, 그림 8b)에서 오염운의 각 단면별 도달시간은 각각의 실험조건에 대해 일관성 있게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.3 횡분산계수의 산정 및 비교

본 연구에서는 2차원 추적법을 이용하여 실측 농도곡선으로부터 중·횡분산계수를 산정하였다. 각 실험조건에 대해 산정된 중·횡분산계수를 무차원화하여 표 3에 수록하였다. 표 3에 수록한 중·횡분산계수는 사행수로의 전 구간 (S1단면~S12단면) 및 제 1 만곡부 구간 (S1단면~S6단면)에 2차원 추적법을 적용하여 산정한 값으로서 각각 해당구간의 평균적인 분산크기를 나타낸다고 할 수 있다. 두 구간의 중·횡분산계수를 하폭 대 수심비 (W/h)에 대하여 도시한 것이 그림 9~10이다.

전체구간의 무차원 중분산계수의 경우 약 4.30~21.5의 범

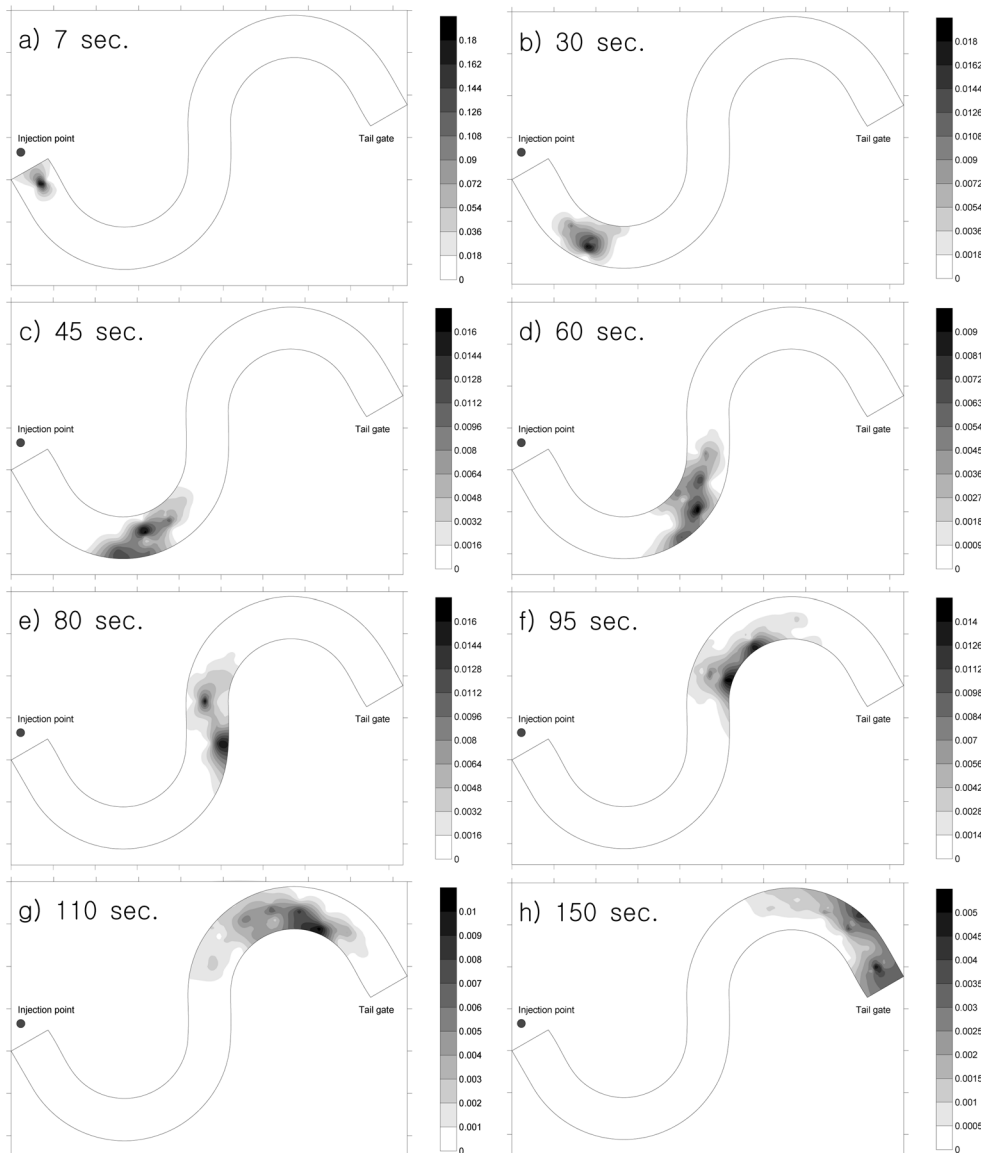
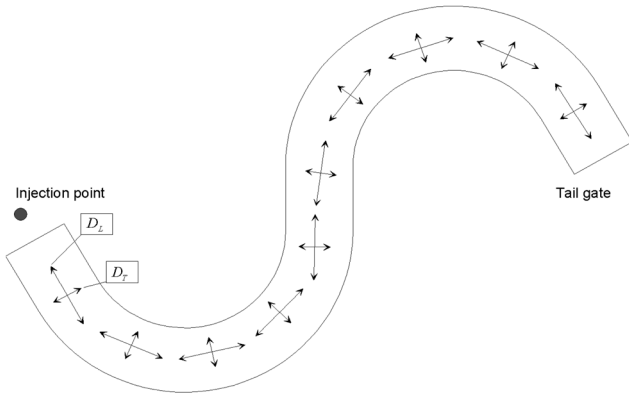
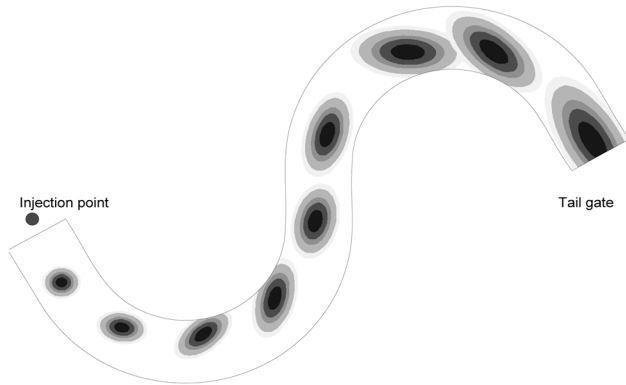


그림 6. 2차원 오염운의 거동 (Case B302)



a) 주 흐름 분포 및 이차류 영향 불포함



b) 주 흐름 분포 및 이차류 영향 포함

그림 7. 사행수로에서 오염원의 분산과정 개념도

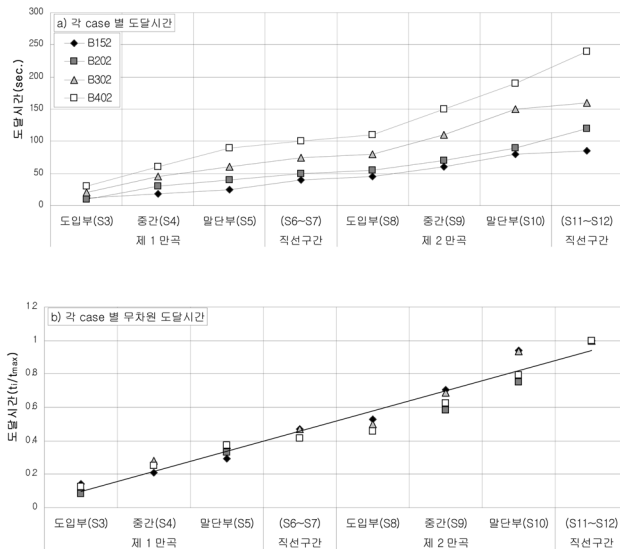
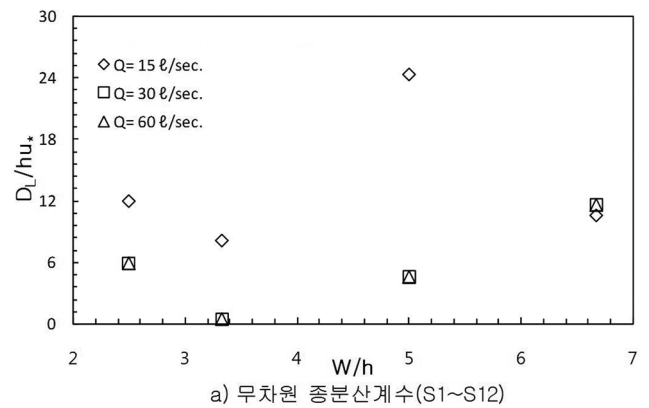


그림 8. 각 케이스별 오염원의 구간 도달시간

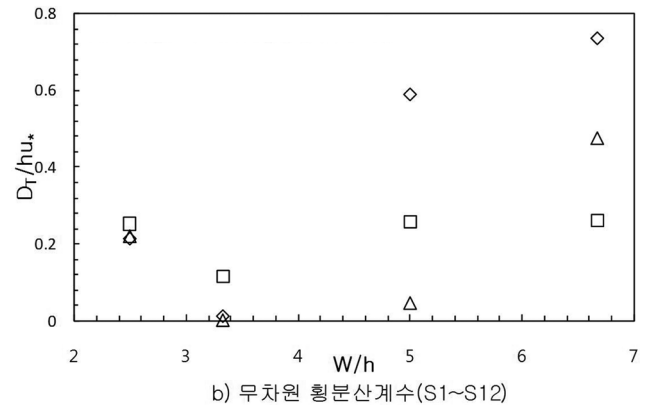
위로 나타나고 있는데, 이는 Elder(1959)의 이론치인 5.93보다 매우 큰 것으로서 사행수로의 주흐름 유속분포와 이차류의 영향에 기인한 것이다. 무차원 횡분산계수는 0.012~0.875의 범위로 나타나고 있는데, 이는 서일원 등(2005)이 기존연구에서 취득한 횡분산계수 (0.17~0.7)와 비슷한 범위를 갖는 것으로 확인되었다. 그림 9에서 전체구간에 대한 종·횡분산계수는 하폭 대 수심비에 대체적으로 비례하는 것으로 나타나고 있다. 제 1 만곡부 구간의 무차원 종분산계수의 경우 약 3.15~12.9의 범위로 나타나고 있고, 무차원 횡분산계수는 0.116~1.041의 범위로 나타나고 있다. 그림 10에서 제 1 만곡부 구간에 대한 종·횡분산계수도 하폭 대 수심비에

표 3. 2차원 추적법에 의해 결정된 무차원 종·횡분산계수

구간	전체구간 (S1~S12)			제 1 만곡부 (S1~S6)		
	RMS	D_L/hu_*	D_T/hu_*	RMS	D_L/hu_*	D_T/hu_*
B151	0.0864	10.5	0.734	0.252	7.68	1.015
B152	0.0821	17.7	0.259	0.389	12.9	0.330
B153	0.0104	11.5	0.473	0.0785	10.6	0.997
B201	0.0071	21.5	0.589	0.0249	6.37	1.041
B202	0.0075	18.8	0.256	0.0210	4.43	0.477
B203	0.0081	4.30	0.044	0.0168	4.62	0.594
B301	0.0381	11.5	0.012	0.109	3.19	0.157
B302	0.0124	9.78	0.116	0.0124	9.77	0.116
B303	0.0014	11.5	0.875	0.0028	11.5	0.875
B401	0.0240	10.3	0.214	0.121	3.15	0.149
B402	0.0088	8.58	0.251	0.0576	4.39	0.174
B403	0.0065	5.27	0.218	0.0239	5.81	0.291



a) 무차원 종분산계수(S1~S12)

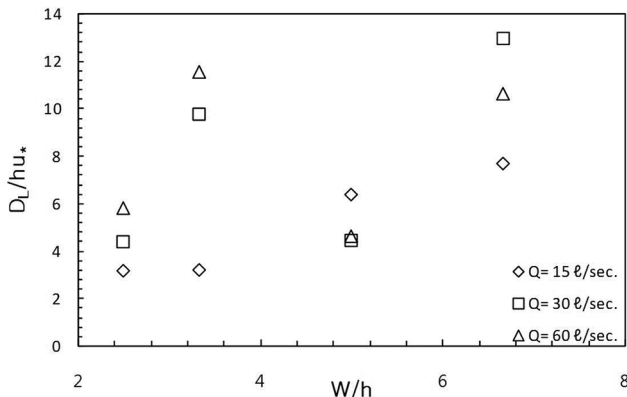


b) 무차원 횡분산계수(S1~S12)

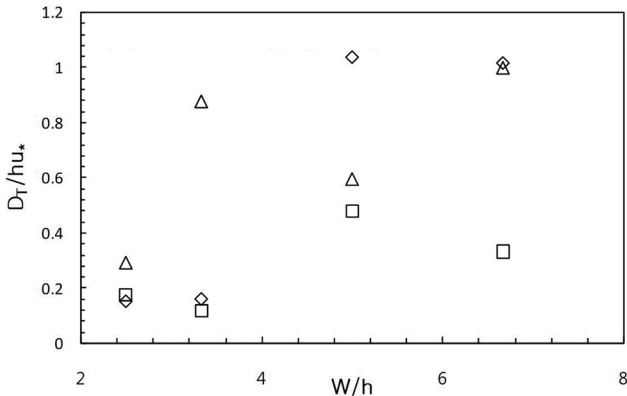
그림 9. 전체구간 (S1~S12)에서 무차원 분산계수와 하폭 대 수심비의 관계

대체적으로 비례하는 것으로 나타나고 있다.

본 연구에서는 백경오와 서일원(2007)이 제시한 횡분산계수 이론식을 단면에서의 이차류 유속분포에 적용하여 횡분산계수를 추정하였다. 대표적인 실험조건에 대한 이론식에 의한 추정치를 표 4에 수록하였고, 이론치와 실측치를 비교하여 그림 11에 도시하였다. 그림 11에서 이론치는 실측치와 비교하여 다소 과대 산정하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 실측치는 전체구간 또는 제 1 만곡부 구간의 평균적 분산계수임에 비하여 이론치는 해당단면에서의 유속구조 만을 반영하는 값이기 때문에 오차가 발생하는 것으로 판단된다.



a) 무차원 종분산계수(S1~S6)



b) 무차원 횡분산계수(S1~S6)

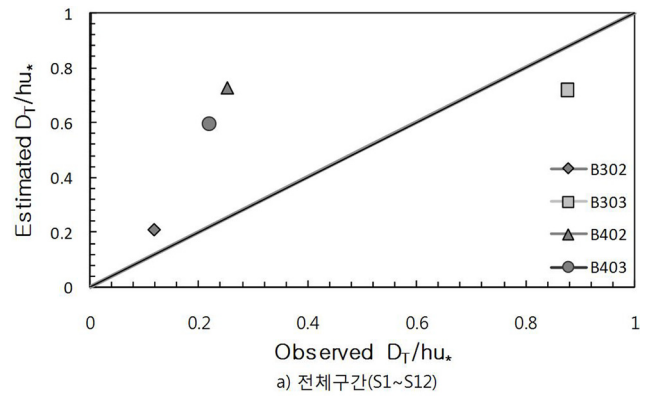
그림 10. 제 1 만곡부 (S1~S6)에서 무차원 분산계수와 하폭 대 수심비와의 관계

표 4. 구간별 무차원 횡분산계수의 비교 (D_T/hu_*)

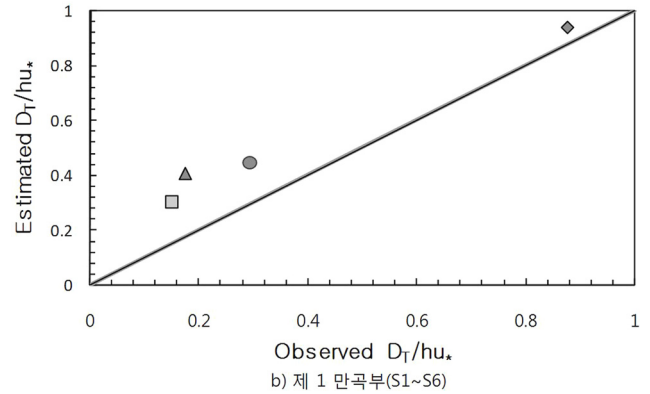
Case		실측값	이론값
전체구간 (S1~S12)	B302	0.116	0.211
	B303	0.875	0.720
	B402	0.251	0.727
	B403	0.218	0.597
제 1 만곡부 (S1~S6)	B302	0.875	0.936
	B303	0.149	0.303
	B402	0.174	0.405
	B403	0.292	0.446

5. 결 론

본 연구에서는 사행수로에서 유속구조가 추적물질의 혼합에 미치는 영향을 분석하기 위하여 2 개의 만곡부를 갖는 S자형 실험수로를 제작하여 순간 주입된 추적자물질에 대한 분산실험을 수행하였다. 농도장에 영향을 미치는 주흐름과 이차류의 거동을 밝히기 위하여 선행연구(서일원 등, 2006)에서 측정된 유속자료를 분석한 결과, 주 흐름은 사행수로의 최단경로를 따라 이동하는 것을 확인하였다. 이에 따라 주흐름은 만곡부에서는 내측에 최대유속이 발달하고 외측에 작은 유속이 발생하여 불균일한 분포를 가지게 되나, 직선부에서는 비교적 균일한 분포로 회복하는 경향을 보이고 있다. 이차류의 거동도 매우 복잡하게 나타나는 것으로 밝혀졌는데, 제 1 만곡부에서는 시계방향의 셀이 발달하나 이러한 이차류 셀이 직선부에서는 소멸하다가 다시 제 2만곡부에



a) 전체구간(S1~S12)



b) 제 1 만곡부(S1~S6)

그림 11. 구간별 무차원 횡분산계수의 비교 (이론치 vs. 실측치)

진입하면서 반시계방향의 셀로 재생성됨이 확인되었다. 이러한 주흐름의 불균일한 분포와 이차류의 반복적인 생성-소멸 과정은 추적자 오염원의 종·횡방향으로의 분리, 퍼짐에 지대한 영향을 미치게 되며 나아가서 종·횡 분산계수의 대폭적 증대를 야기시키는 것으로 확인되었다.

측정된 추적자 물질의 시간 및 공간변화에 대한 농도데이터를 이용하여 오염원의 거동을 분석한 결과, 추적지는 수로 도입부(직선부)에서는 비교적 전형적인 종·횡 분산 현상을 보이고 있으나 제 1만곡부로 진입하는 순간부터 주흐름의 불균일한 분포와 이차류 셀의 영향을 동시에 받게 되는 것으로 나타났다. 즉 만곡부 내측에서는 빠른 유속에 의해 오염원의 선단부가 빨리 이동하게 되나 외측부에서는 느린 유속에 의해 오염원이 처지게 되어 오염원이 종방향으로 분리되는 현상을 보이게 된다. 이차류 셀은 외측의 처진 오염원을 횡방향으로 더욱 분리시키는 역할을 하게 되어, 결과적으로 만곡부의 복잡한 유속구조가 오염원을 종·횡방향으로 모두 분리시키고 나아가서 많이 퍼지게 하는 작용을 하는 것으로 밝혀졌다. 제 1만곡부에 다음에 있는 직선부에서는 이러한 주흐름의 불균일한 분포와 이차류의 영향이 나타나지 않으나, 오염원이 제 2만곡부에 이르면 다시 분리 및 퍼짐 현상이 현저하게 발생하여 오염원이 다방향 구조로 발달하는 현상을 보이고 있다. 각 단면별 오염원의 도달시간을 분석한 결과, 각 실험조건별 도달시간은 평균유속에 반비례하는 것으로 나타났으며, 각 단면별 도달시간은 각각의 실험조건에 대해 일관성 있게 나타나는 것으로 밝혀졌다.

2차원 추적법의 적용을 통해서 각 케이스별 종·횡분산계수 실측치를 산정한 결과, 사행수로 전체구간에 대한 무차원 종분산계수는 4.30~21.5의 범위를 갖는 것으로 나왔고, 무차

원 횡분산계수는 0.012~0.875의 범위를 갖는 것으로 밝혀졌다. 이러한 횡분산계수의 범위는 서일원 등(2005) 등 사행수로에 대한 기존 실험연구에서 취득한 값과 유사한 범위를 갖는 것으로 확인되었다. 또한 전체구간에 대한 종·횡분산계수는 하폭 대 수십비에 대체적으로 비례하는 것으로 나타났다. 횡분산계수 이론식(백경오와 서일원, 2007)을 단면에 의해 계산한 횡분산계수 추정치와 실측치를 비교한 결과, 이론치가 실측치와 비교하여 다소 과대 산정하는 경향을 보여 주고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 특정기초 연구(과제번호: R01-2006-000-11027-0; 과제명: 연안수질환경 개선을 위한 하천-해양 통합 해석기술 개발)와 21세기 프론티어연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 지원(과제명: RAMS 적용) 및 서울대학교 공학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

김지영(2005) LES를 이용한 복단면 사행 수로에서의 흐름 특성 분석. 석사학위논문, 서울대학교.

김호중(2006) 하천에 유입된 오염물질의 초기혼합 거동에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교.

백경오, 서일원(2007) 전단류에 의한 횡분산계수의 산정. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제1B호, pp. 21-28.

백경오, 서일원, 이규환(2006) 만곡수로에서 흐름방향에 따른 2차류의 변화량 산정식. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제4B호, pp. 371-378.

백경오, 서일원, 정성진(2005) 사행 수로에서 순간 주입된 오염물질의 2차원혼합: I. 실험 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제6B호, pp. 451-461.

백경오, 서일원, 정성진(2005) 사행 수로에서 순간 주입된 오염물질의 2차원혼합: II. 분산계수의 산정 및 분석. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제6B호, pp. 463-471.

서일원, 성기훈, 백경오, 정성진(2004) 사행수로에서 흐름 특성에 관한 실험적 연구. **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제7호, pp. 527-540.

서일원, 이규환, 백경오(2006) 사행수로의 흐름구조 및 난류특성. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 469-479.

서일원, 이명은(2006) 유속장을 고려한 분산텐서를 포함한 2차원 이송-분산모형의 개발. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제2B호, pp. 171-178.

서일원, 전태명, 백경오(2005) 자연하천에서 2차원 오염확산 예측을 위한 횡분산계수 추정식 개발. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제4B호, pp. 247-255.

Almquist, C.W. and Holley, E.R. (1985) Transverse mixing in meandering laboratory channels with rectangular and naturally varying cross sections. *Technical Report CRWR-205*, Univ. of

Texas, Austin, Texas.

Baek, K.O. (2004) *Transverse mixing in meandering channels with unsteady pollutant source*. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Korea.

Baek, K.O., Seo, I.W. and Jung, S.J. (2006) Evaluation of dispersion coefficients in meandering channels from transient tracer tests, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 132, No. 10, pp. 1021-1032.

Beltaos, S. (1980) Transverse mixing tests in natural streams. *J. Hydr. Div., ASCE*, Vol. 106(HY10), pp. 1607-1625.

Boxall, J.B. and Guymier, I. (2003) Analysis and prediction of transverse mixing coefficients in natural channels. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 129, No. 2, pp. 129-139.

Carlsaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1959) *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press, New York.

Chang, Y. (1971) *Lateral mixing in meandering channels*. PhD thesis, Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa.

Elder, J.W., (1959) The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. *J. Fluid Mech.*, Vol. 5, No. 4, pp. 554-560.

Fischer, H.B. (1968) Dispersion predictions in natural streams. *J. Sanit. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 94(SA5), pp. 927-943.

Fischer, H.B. (1969) The effect of bends on dispersion in streams. *Water Resour. Res.*, Vol. 5, No. 2, pp. 496-506.

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.

Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*, Macmillan Publishing Co., New York.

Krishnappan, B.G. and Lau, Y.L. (1977) Transverse mixing in meandering channels with varying bottom topography. *J. Hydr. Res.*, IAHR, Vol. 15, No. 4, pp. 351-371.

Lau, Y.L. and Krishnappan, B.G. (1977) Transverse dispersion in rectangular channel. *J. Hydr. Div., ASCE*, Vol. 103(HY10), pp. 1173-1189.

Leopold, L.B. and Wolman, M.G. (1960) River meanders. *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 71, pp. 769-794.

Miller, A.C. and Richardson, E.V. (1974) Diffusion and dispersion in open channel flow. *J. Hydr. Div., ASCE*, 100(HY1), pp. 835-847.

Nokes, R.I. and Wood, I.R. (1988) Vertical and lateral turbulent dispersion: Some experimental results. *J. Fluid Mech.*, Vol. 187, pp. 373-394.

Odgaard, A.J. (1986) Meander-flow model I: development. *J. of Hydr. Engrg.* ASCE, Vol. 112, No. 12, pp. 1117-1136.

Rozovskii, I.L. (1961). *Flow of water in bends of open channels*. Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem (in Russian, 1957).

Rutherford, J.C. (1994) *River mixing*, John Wiley and Sons, Chichester, U.K.

Shiono, K. and Muto, Y. (1988) Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow. *J. Fluid Mech.*, Vol. 376, pp. 221-261.

Webel, G. and Schatzmann, M. (1984) Transverse mixing in open channel flow. *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 423-435.

(접수일: 2008.8.28/심사일: 2008.9.28/심사완료일: 2008.12.18)