

사행하천에서 횡혼합에 관한 추적자 실험 Tracer Tests on Transverse Mixing in Meandering Streams

서 일 원* / 백 경 오** / 전 태 명*** / 진 준 하****

Seo, Il Won / Baek, Kyoung Oh / Jeon, Tae Myoung / Jin, Joon Ha

Abstract

Field tests were conducted to investigate characteristics of the transverse mixing and to evaluate the dispersion coefficients in the meandering natural streams. The Sum River and the Cheong-mi Creek, tributaries of Han River, were selected as the test site, and measurements of the hydraulic and dispersion data were performed. In the tracer tests, the radioisotope was used as a tracer and injected into a flow on the instantaneous point source. Using the measured data, the longitudinal and transverse dispersion coefficients were evaluated and compared with the previous studies. The longitudinal dispersion coefficients, which were evaluated by application of the analytical solution, were about 0.5 m²/s at the Sum River and 0.2 m²/s at the Cheong-mi Creek. The transverse dispersion coefficients, which were evaluated by the analytical solution and the moment method, were ranging from 0.01 to 0.06 m²/s for the Sum River and from 0.01 to 0.05 m²/s for the Cheong-mi Creek.

Keyword : transverse mixing, meandering stream, tracer test, dispersion coefficient, moment method

요 지

사행이 있는 자연하천에서 횡혼합 특성을 분석하고 종·횡분산계수를 산정하기 위해 현장실험을 실시하였다. 이를 위해 남한강 지류인 섬강 및 청미천에서 사행구간을 선정하여 유속과 수심 측정 및 추적자실험을 수행하였다. 추적자로서는 미량으로도 관측이 용이한 방사성 동위원소를 사용하였으며 주입은 순간, 점주입 조건을 따랐다. 이를 통해 취득된 수리량 및 농도 자료를 이용하여 종·횡분산계수를 산정하였고, 이들을 기존의 추정식에 의한 결과

- * 정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수
Prof., School of Civil, Urban, Geosystem Engrg., Seoul National Univ., San 56-1, Shinlim-dong, Gwanak-Gu, Seoul, 151-742, Korea
(E-mail: seoilwon@plaza.snu.ac.kr)
- ** 정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사과정
Doctor's Course, School of Civil, Urban, Geosystem Engrg., Seoul National Univ., San 56-1, Shinlim-dong, Gwanak-Gu, Seoul, 151-742, Korea
(E-mail: kopaek1@snu.ac.kr)
- *** 정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 석사과정
Master's Course, School of Civil, Urban, Geosystem Engrg., Seoul National Univ., San 56-1, Shinlim-dong, Gwanak-Gu, Seoul, 151-742, Korea
(E-mail: jtm333@snu.ac.kr)
- **** 한국원자력연구소 책임연구원
(E-mail: jhjin@kaeri.re.kr)

와 비교, 분석하였다. 종분산계수는 해석해를 통해 산정하였는데 섬강은 약 0.5 m²/s, 청미천은 0.2 m²/s 로 산정되었다. 횡분산계수는 해석해 및 모멘트방법을 이용하여 산정하였는데, 섬강은 약 0.01~0.06 m²/s의 범위를 가지며 청미천은 약 0.01~0.05 m²/s의 범위를 갖는 것으로 산정되었다.

핵심용어 : 횡혼합, 사행하천, 추적자 실험, 분산계수, 모멘트법

1. 서 론

실제 자연하천의 경우, 사행에 따른 유속구조의 불균일성 및 2차류의 발달, 하안에 발달하는 사수역, 하상의 불규칙성, 웅덩이와 여울구조 등으로 인하여 오염물질의 이송 및 분산과정이 매우 복잡하다. 이러한 자연하천의 분산과정을 해석하기 위해서는 정교한 3차원 해석모형을 적용하는 것이 바람직하지만 이는 상당한 노력과 시간이 요구된다. 하천에서 수심방향의 혼합은 종·횡방향의 혼합에 비해 매우 신속히 이루어지므로, 3차원 이송-확산모형을 수심적분을 통해 얻어지는 2차원 모형을 이용함으로써 오염물의 분산현상을 충분히 해석할 수 있다. 대부분의 세장한 하천의 경우, 하폭방향의 혼합이 완료된 이후에는 Taylor (1954)가 제안한 1차원 종분산모형을 적용하고 있다. 하지만 오염원과 취수장이 공존하는 국내하천의 특성상 오염물질의 하천평면내의 거동을 보다 정확하게 해석하기 위해서 2차원 모형을 적용하는 것이 필요한 실정이다.

하천에서 오염물질의 2차원적 거동을 해석함에 있어서 가장 유의해야 할 인자는 혼합계수(mixing coefficient)의 처리이다. 2차원 이송-분산 모형에서의 혼합계수는 흐름의 난류특성에 의한 난류확산(turbulent diffusion)과 수심방향 전단유속에 의한 분산(dispersion)과정을 포괄하는 계수이다. 실제 자연현상에서 이 둘을 엄밀히 분리하는 것은 사실상 불가능하고, 분산에 의한 혼합이 난류에 의한 혼합에 비해 매우 크므로 혼합계수를 분산계수로 대표하여 사용되곤 한다(Fischer, 1979). 또한 만곡이 심한 자연하천에서 분산과정은 사행도, 저장대, 2차류 등의 요소에 따라 복잡한 양상을 나타내어 이를 고려한 적절한 분산계수의 산정은 혼합과정 해석에 필수불가결한 요소이다.

지금껏 많은 연구자들이 적절한 분산계수를 찾아내기 위해 실험실실험과 현장실험을 수행하였다. 하지만 자연하천에서 2차원 해석을 목적으로 실행된 현장실험의 경우, 국내는 전무하다시피하고 국외에서도 사례가 많지 않다. 하천에서 최초의 횡혼합 연구사례로는 Glover (1964)가 Columbia강에 위치한 발전소에서 방

류되는 온배수 분포를 분석한 것이 있다. Sayre와 Yeh (1973)는 Missouri 강의 S자형 사행구간을 선택하여 추적자 실험을 실시하고 이를 통해 횡분산계수를 모멘트방법을 이용하여 계산하였다. 그 결과 산정된 무차원 횡분산계수치가 기존의 실험실 실험을 통해 취득한 값에 비해 매우 큼을 주장한 바 있다. Holley와 Abraham (1973)은 IJssel 강과 Waal 강에서 색소의 주입위치를 횡적으로 변경해 가며 실험을 수행하여 주입위치에 따른 횡방향유속이 혼합에 미치는 영향을 검토하였다. Lau와 Krishnappan (1981)은 Grand 강의 사행 구간에서 실험을 수행하여 실험구간의 불균일 또는 불규칙한 단면은 횡혼합에 영향을 주지 못한다는 결론을 내렸다. Demetracopoulos 와 Stefan (1983)은 Mississippi 강 상류의 Monticello 원자력발전소에서 방류되는 온배수 분포를 측정하여 수치모의 한 결과와 비교하였고 이를 통해 횡분산계수를 추정한 바 있다.

전술한 연구들은 추적자의 주입이 연속인 상황, 즉 농도장이 정상상태에서 실험이 이루어졌다. 이러한 경우 2차원 이송-확산 방정식에서 시간항이 소멸되고, 종방향 확산항을 무시할 수 있어 모멘트방법(moment method), 일반화된 모멘트방법(generalized moment method) 등을 통해 비교적 손쉽게 횡분산계수를 취득할 수 있다. 하지만 영역이 넓은 자연하천에서 추적자를 일정한 유량으로 장기간 투입하는 작업이 기술적으로나 환경적으로 그다지 타당하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 순간주입을 선택하였는데, 이 경우 장점은 먼저, 연속주입에 비해 투입되는 추적자의 양이 매우 적으므로 경제적으로 실험을 수행할 수 있다. 또한 연속주입시 추적자의 등수두를 유지하기 위해 특별한 주입장치의 개발이 필요한 반면 순간주입은 비교적 손쉽게 추적자를 투입할 수 있다. 그리고 연속 주입시 횡분산에 관한 정보만 취득할 수 있지만 순간주입인 경우 횡분산 뿐 아니라 종분산에 관한 정보도 취득할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 환경적인 측면에서도 수질과 생태계에 영향을 주지 않는 소량을 주입하는 순간주입법이 유리하다. 순간주입 조건으로 2차원 확산 현장실험을 수행한 기존 연구들은 아주 부족하는데, 그 중

Beltaos (1975)의 연구는 주목할 만한 결과를 보인다. 그는 이송-분산방정식을 시간에 대해 적분하여 농도변수를 투여량변수로 대신하면 연속주입과 같은 효과를 갖는다고 주장하였다. 또한 Beltaos (1980)는 이 개념과 유관(stream tube)모형을 결합하여 횡분산계수를 산정하는 새로운 모멘트방법을 개발하였다. Mc-Quivey 와 Keefer (1976)는 Mississippi 강에서 추적자를 순간주입하고 근역(near field)에서 혼합특성을 항공 촬영하여 분석하였다. 그리고 원역(far field)에서는 시간-농도 곡선을 취득하여 종분산계수를 산정한다.

본 연구에서는 남한강 지류인 섬강 및 청미천에서 사행구간을 선정하여 유속 측정 및 2차원 추적자실험을 수행하였다. 추적자로서는 미량으로도 관측이 용이한 방사성 동위원소를 사용하였으며 주입은 순간, 점주입 조건을 따랐다. 이를 통해 취득된 수리량 및 농도 자료를 이용하여 종·횡분산계수를 산정하였고, 이들을 기존의 추정식에 의한 결과와 비교, 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 지배방정식 및 해석해

3차원 이송-확산방정식(advection-diffusion equation)을 수직적분하면 다음과 같은 2차원 이송-분산방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left[h(e_x + D_x) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left[h(e_y + D_y) \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] \quad (1)$$

여기서 C 는 수심평균된 농도, u 와 v 는 각각 수심평균된 종·횡 방향유속, x 는 추적자 투입지점부터 종방향거리, y 는 좌안부터 우안까지 횡방향거리, h 는 수심, e_x 와 e_y 는 각각 종·횡 확산계수(diffusion coefficient), D_x 와 D_y 는 종·횡 분산계수(dispersion coefficient)이다. 식 (1)에서 혼합계수는 확산계수와 분산계수의 합인데, 분산에 의한 혼합이 난류에 의한 혼합에 비해 매우 크므로 혼합계수를 분산계수로 대표할 수 있다. 또한 수심이 일정하고, 횡방향 유속은 무시할 정도로 작다고 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2)$$

추적자의 주입을 연직 선원(well-mixed vertically line source)형태로 하폭의 중앙에 순간 점 주입(instantaneous point injection)으로 가정하면 초기 조건과 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$C(x, y, 0) = M\delta(x)\delta(y) \quad (3a)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=0, W} = 0 \quad (3b)$$

여기서 M 은 추적자의 질량, $\delta(\cdot)$ 는 Dirac delta 함수, W 는 하폭이다. 식 (3b)의 하천양안 경계조건은 양안에서 오염물 추적자가 반사한다는 불투과성 경계조건이다. 이에 대한 해석하는 다음과 같이 유도된다(서일원 등, 2002).

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4\pi t \sqrt{D_x D_y}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4D_x t}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left\{-\frac{[y+(2n-1)\frac{W}{2}]^2}{4D_y t}\right\}\right] \quad (4)$$

정확한 수리량 및 추적자의 질량이 주어진다면, 식 (4)를 측정된 농도자료와 비교함으로써 종분산계수 및 횡분산계수를 산정할 수 있다.

2.2 횡분산계수 산정법

횡분산계수를 산정하기 위해서는 일반적으로 추적자의 주입이 연속인 상황, 즉 농도장이 정상상태에서의 실험을 실시한다. 이러한 경우 식 (1)에서 시간항이 소멸되고, 종방향 확산항을 무시할 수 있어 모멘트방법 및 일반화된 모멘트방법 등을 통해 비교적 손쉽게 횡분산계수를 산정할 수 있다. 반면, 순간주입 추적자 조건인 경우, 횡분산계수를 산정하는데 어려움이 많다. Beltaos(1975)는 이를 해결하기 위해 다음과 같이 순간주입으로 취득된 자료를 연속주입조건처럼 변환시켰다. 식 (1)을 시간에 대해 적분하면 식 (5)와 같다.

$$C|_{\infty} - C|_0 + \int_0^{\infty} u \frac{\partial C}{\partial x} dt + \int_0^{\infty} v \frac{\partial C}{\partial y} dt = \int_0^{\infty} \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left[h D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right] dt + \int_0^{\infty} \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left[h D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] dt \quad (5)$$

여기서 순간주입이므로 $C_\infty = C_0 = 0$ 가 성립된다. 그리고 추적자의 주입량(dosage)을 다음과 같이 정의하면,

$$\theta \equiv \int_0^\infty C dt \quad (6)$$

식 (5)는 다음과 같이 표현된다.

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left[h D_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left[h D_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right] \quad (7)$$

식 (7)은 농도(C)가 단위면적당 주입량(θ)로 바뀌는 것 이외에는 농도장이 정상상태, 즉 연속주입시의 이송-확산 방정식과 동일하다. 또한 추적자의 총 주입량을 비교하면 다음과 같다.

$$\int \int \int u C dA dt = \int \int \int u \theta dA = M \quad (\text{순간주입시}) \quad (8a)$$

$$\int \int \int u C dA = C_0 q_0 \quad (\text{연속주입시}) \quad (8b)$$

여기서, M은 순간주입질량, C_0 는 초기농도, q_0 는 추적자의 유량, A는 단면적을 각각 나타낸다. 총 주입량을 등치시키고 C를 θ 로 치환하면 식 (8a)와 (8b)에 의해 주입조건과 무관하게 확산현상을 해석할 수 있다. 결론적으로 횡분산계수의 산정에 있어서 연속주입조건인 경우에 사용되는 모멘트법을 순간주입조건에서도 이용할 수 있다.

횡분산계수를 산정하는 기법으로서 모멘트방법을 Sayre와 Chang (1968)은 다음과 같이 제안하였다.

$$D_y = \frac{U}{2} \frac{d\sigma_y^2}{dx} \quad (9)$$

여기서, U는 평균유속, σ_y^2 은 추적자의 C-y 분포곡선의 분산(variance)이다. 식 (9)에서 σ_y^2 을 Beltaos (1975)의 제안을 따라 변형시키면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_i \theta_i u_i h_i y_i^2 \Delta y_i}{\sum_i \theta_i u_i h_i \Delta y_i} - \left(\frac{\sum_i \theta_i u_i h_i y_i \Delta y_i}{\sum_i \theta_i u_i h_i \Delta y_i} \right)^2 \quad (10)$$

여기서 i 는 횡방향 구간의 지표, Δy_i 는 단위 구간의 폭이다.

Beltaos (1980)는 전술한 이론을 바탕으로 유관모형을 결합시킨 새로운 모멘트방법을 제안하였다. 농도장이 정상상태일때 유관모형의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial x} = E_y \frac{\partial^2 C}{\partial q^2} \quad (11)$$

여기서 q 는 좌안에서 횡방향으로 임의의 지점까지의 누적유량으로서 다음과 같이 표현된다.

$$q(y) = \int_0^y h u dy \quad (12)$$

또한 E_y 는 확산인자(diffusion factor)로서 다음과 같이 표현된다.

$$E_y = \phi D_y V H^2 \quad (13)$$

여기서 D_y 는 횡분산계수, V는 단면평균유속, H는 단면평균수심이다. 그리고 ϕ 는 무차원 유속형상계수(dimensionless "shape-velocity" factor)로 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{1}{Q} \int_0^Q h^2 u dq \quad (14)$$

식 (11)을 무차원화시키면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{D_y}{Q^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \eta^2} \quad (15)$$

여기서 $\eta \equiv \frac{q}{Q}$, $C \equiv \frac{C}{C_\infty}$, $C_\infty = \int_0^1 C d\eta$ 이다.

식 (15)에 2차 모멘트를 취하여 정리하면 다음과 같

다.

$$\frac{d\sigma_y^2}{dx} = \frac{2E_y}{Q^2} [1 - (1 - \eta_0)C_1' - \eta_0 C_0'] \quad (16)$$

여기서 σ_y^2 은 $C-\eta$ 분포의 분산, η_0 는 평균이다. 또한 C_0' 과 C_1' 는 각각 좌안과 우안에서의 무차원 농도이다. 식 (16)에서 $f(x) = 1 - (1 - \eta_0)C_1' - \eta_0 C_0'$ 로 정의하고 종방향에 대해 적분을 취하면 다음과 같은 최종 모멘트식이 도출된다.

$$\sigma_y^2 = \frac{2E_y}{Q^2} \int_0^x f(x) dx \quad (17)$$

식 (17)에서 σ_y^2 과 $\int_0^x f(x)$ 는 1차함수관계이고 각 축선의 값을 도시한 그래프에서 기울기가 $\frac{2E_y}{Q^2}$ 이므로 여기서 E_y 를 구할 수 있다. 그리고 식 (13)을 통해 횡분산계수 (D_y)를 산정해 낼 수 있다. 이상의 과정을 전개함에 있어서 정상상태의 농도장을 가정하였지만 전술한 Beltaos (1975)의 변환결과, 식 (7)을 도입하면 식 (17)을 순간주입조건에서도 이용할 수 있다.

3. 현장 추적자 실험

3.1 실험개요

하천현장 실험을 위한 대상 하천 선정기준은 중소규모의 하천이며, 사행 등 자연상태를 유지하고 있는 곳

표 1. 현장실험의 개요

구분	대상하천	대상구간	실험기간	비고
1차실험	섬강	강원도 원주시 지정면 월송리 (월호교 하류구간)	'02. 5. 27 ~ '02. 5. 31	말굽형 만곡부
2차실험	청미천	경기도 여주시 점동면 현수리 (당진교 하류구간)	'02. 10. 15 ~ '02. 10. 19	원호형 만곡부

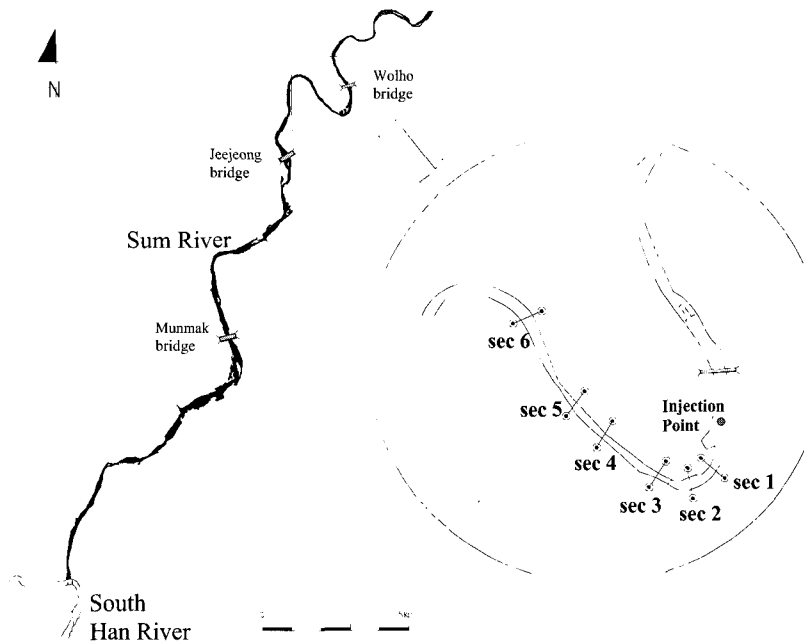


그림 1. 1차 현장실험 구간 (섬강)

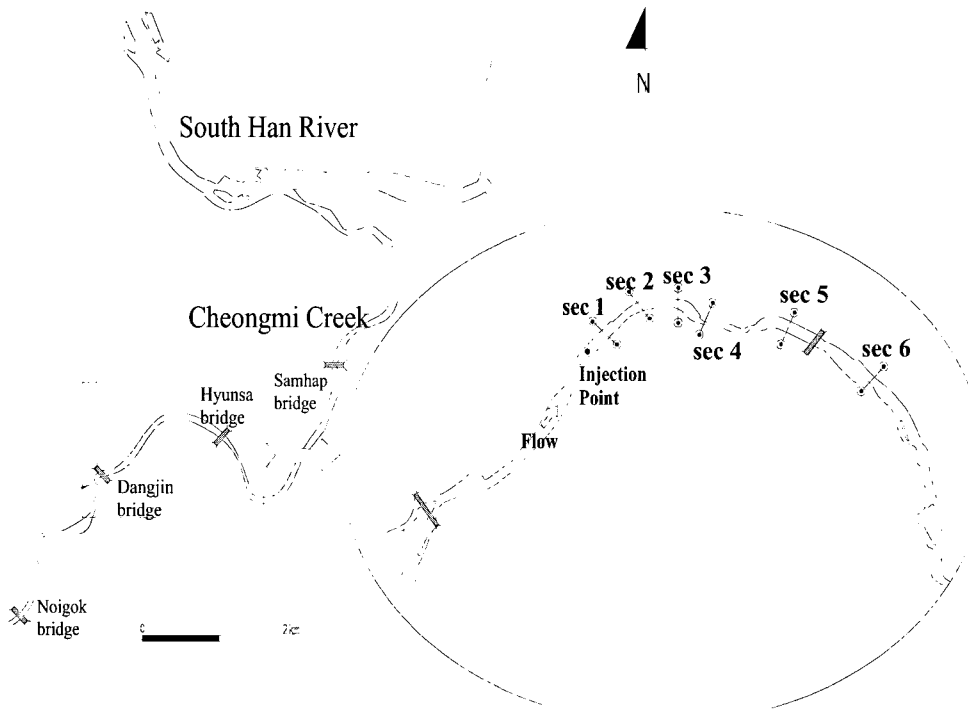


그림 2. 2차 현장실험 구간 (청미천)

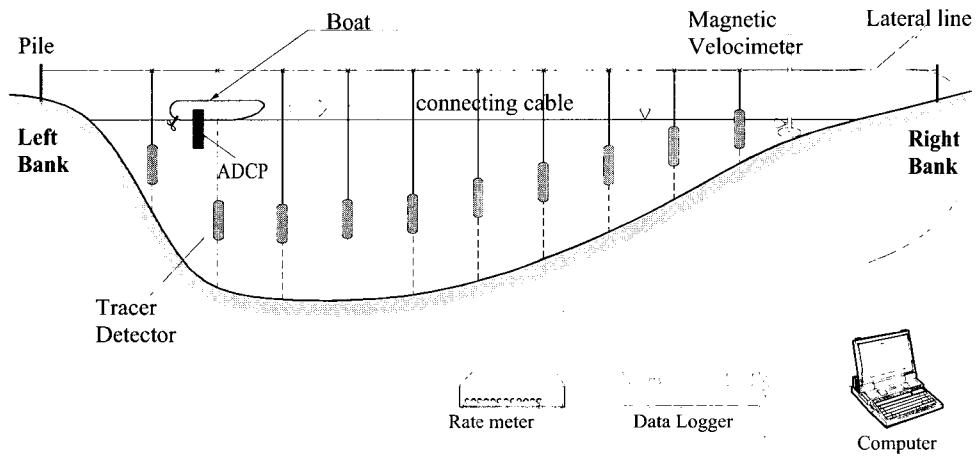


그림 3. 측선에서 실험방법

으로 설정하였다. 이러한 조건을 만족하는 하천으로서 남한강 지류 중 섬강 및 청미천 두 곳을 선정하여 1, 2차에 걸친 실험을 수행하였다. 현장실험의 개요를 표 1에 나타내었고, 그림 1~2에 실험구간의 지도를 간략히 도시하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이 1차 실험은 전체적으로 말굽형의 사행이 심한 구간에서 수행하였다. 2차 실험은 전체적으로는 완만하나 국부적으로 사행이 심한 구간을 택하여 실험을 수행하였다. 실험방법은 흐름방향과 직각으로 양안에 말뚝을 박고 양쪽을 로프로 연결하여 측선을 설치하였다. 측선별 간격은 약 200 ~ 400m이며 대상 구간에 모두 6개의 측선을 설치하였다(그림 1, 2 참조). 이를 기준으로 각 측선별로 수심, 유속, 추적자의 농도를 측정하였다.

3.2 측정방법

확산실험 전에 각 단면별 수심 및 유속을 현장용 유속계의 하나인 초음파 유속계 (Acoustic Doppler Current Profiler; ADCP)를 사용하여 측정하였다. ADCP는 음파를 발생시켜 흐르는 물의 속도를 도플러(Doppler)효과를 이용하여 측정하는 장치이다. ADCP의 단점은 수심이 30cm 이상 보장되지 않는 영역에서 자료취득이 어렵다. 이런 구간은 전자기 유속계(electro-magnetic flowmeter)를 사용하여 유속을 측정하였다. 단면에서 측선을 이용한 실험방법을 그림 3에 간략히 도시하였다.

수심 및 유속측정이 완료된 후에 동일한 측선에 대해 추적자실험이 수행되었다. 추적자는 방사성 동위원소 중에 하나인 I-131을 사용하였다. 추적자로서 방사성 동위원소를 사용했을 때의 장점은 미량의 주입으로도 감지가 용이하고, 감지할 수 있는 범위 또한 매우

넓다. 그리고 물과의 비중차이가 무시할 만큼 작고, 하상에 흡·탈착되는 추적자의 양이 비교적 적다. 동위원소를 선택할 때 유의할 점은 감마선을 방사하는 원소로서 반감기가 비교적 길수록 감지에 유리하다 (Godfrey 와 Frederick, 1970). 본 연구에서 사용된 I-131은 반감기가 8.03일이며 감마선을 방사하므로 하천실험에 추적자로 사용하기에 적합한 동위원소이다. 주입방법은 2차원 해석을 위해 연직방향으로 농도가 일정한 선원, 횡방향으로는 점원형태로 하폭의 중앙에 순간 주입하였다. 추적자의 농도는 그림 3에 도시한 바와 같이 단면 당 평균 10개의 측정점을 선정하여, 각 측정점에 감지기(detector)를 고정시켜 1점법(0.6h)으로 초당 10개의 자료를 독취하였다. 주입전 5분 동안은 기저농도(base concentration)를 측정하였으며, 주입 후 최대농도가 통과한 후 기저농도로 감소될 때까지 측정을 계속하였다. 추적자 실험에 사용된 측정시스템 및 추적자 주입방법을 촬영한 사진을 그림 4에 나타내었다.

4. 실험결과

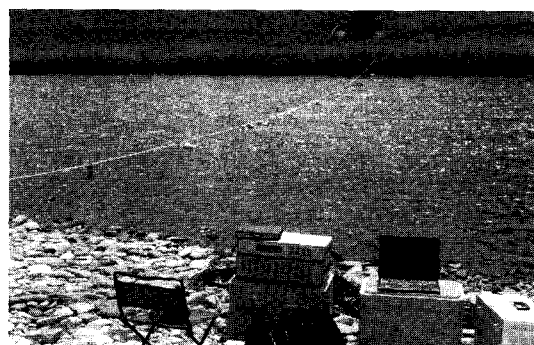
4.1 수심 및 유속

1, 2차 현장실험 결과를 통해 각 측선별 평균 수리량을 계산하여 나타내면 표 2와 같다. 여기서 S는 하상경사이고, Rc는 사행의 곡률반경이다.

또한 현장실험 결과 중 수심 평균된 흐름방향 유속 및 수심분포를 측선별로 그림 5~6에 도시하였다. 1, 2차 실험구간 모두 만곡의 중심이 우안쪽에 있는 사행구간이므로 전체적으로 수심은 좌측이 깊고 우측이 낮은 형상을 보여주고 있다. 최심선(thalweg) 또한 좌안쪽으로 치우쳐 나타나고 있다. 1차 실험구간에서 측선 2지점은 만곡의 정점이므로 가장 깊은 수심이 발생하고



a) 추적자의 주입



b) 추적자의 감지

그림 4. 추적자 실험 전경

표 2. 실험구간의 평균수리량

구분	측선번호	H (m)	U (m/s)	W (m)	S	Rc (m)
1차 (삼강)	1	0.43	0.78	30.8	0.00032	381
	2	1.32	0.15	30.0	0.00032	381
	3	0.73	0.23	63.4	0.00032	381
	4	0.64	0.29	58.5	0.00032	381
	5	0.63	0.23	77.3	0.00032	381
	6	0.42	0.38	63.9	0.00032	381
	평균	0.69	0.34	54.0	0.00032	381
2차 (청미천)	1	0.49	0.38	38.8	0.00078	397
	2	0.42	0.42	45.2	0.00078	397
	3	0.54	0.28	40.3	0.00078	397
	4	0.51	0.24	54.9	0.00078	397
	5	0.44	0.32	54.9	0.00098	766
	6	0.49	0.39	33.0	0.00098	766
	평균	0.48	0.34	44.5	0.00085	520

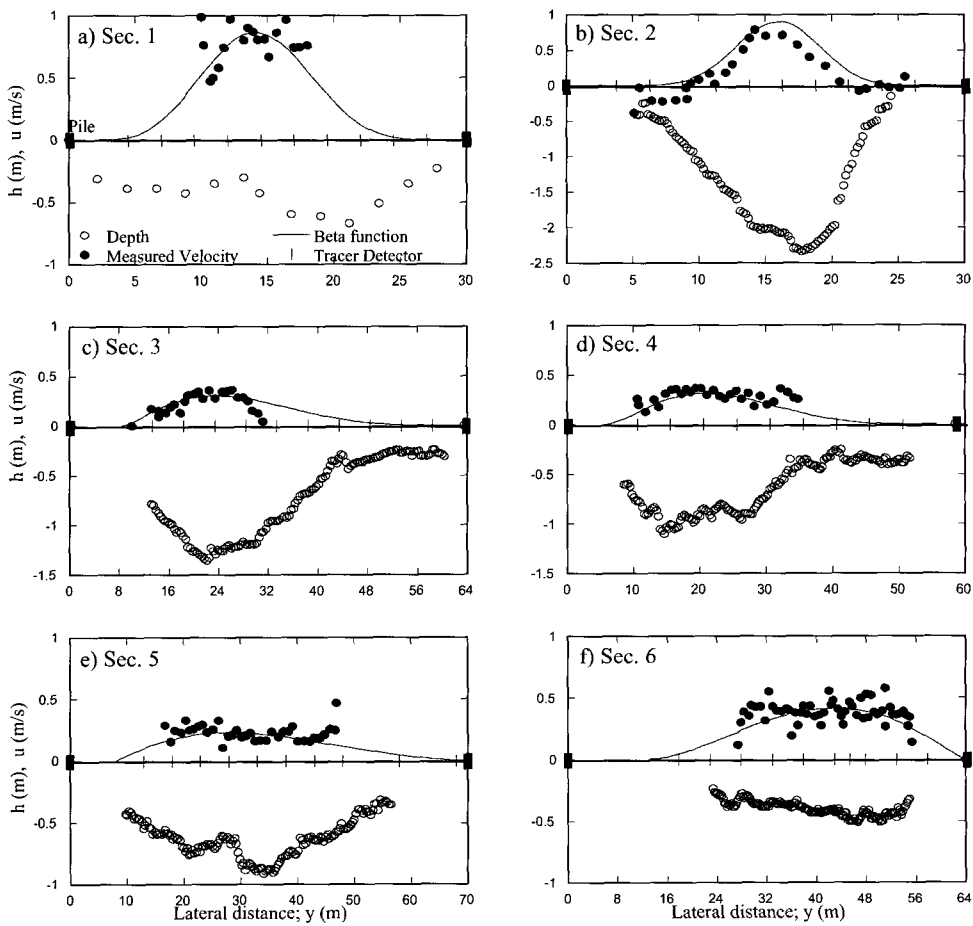


그림 5. 1차 현장실험구간(삼강)의 수심 및 유속분포

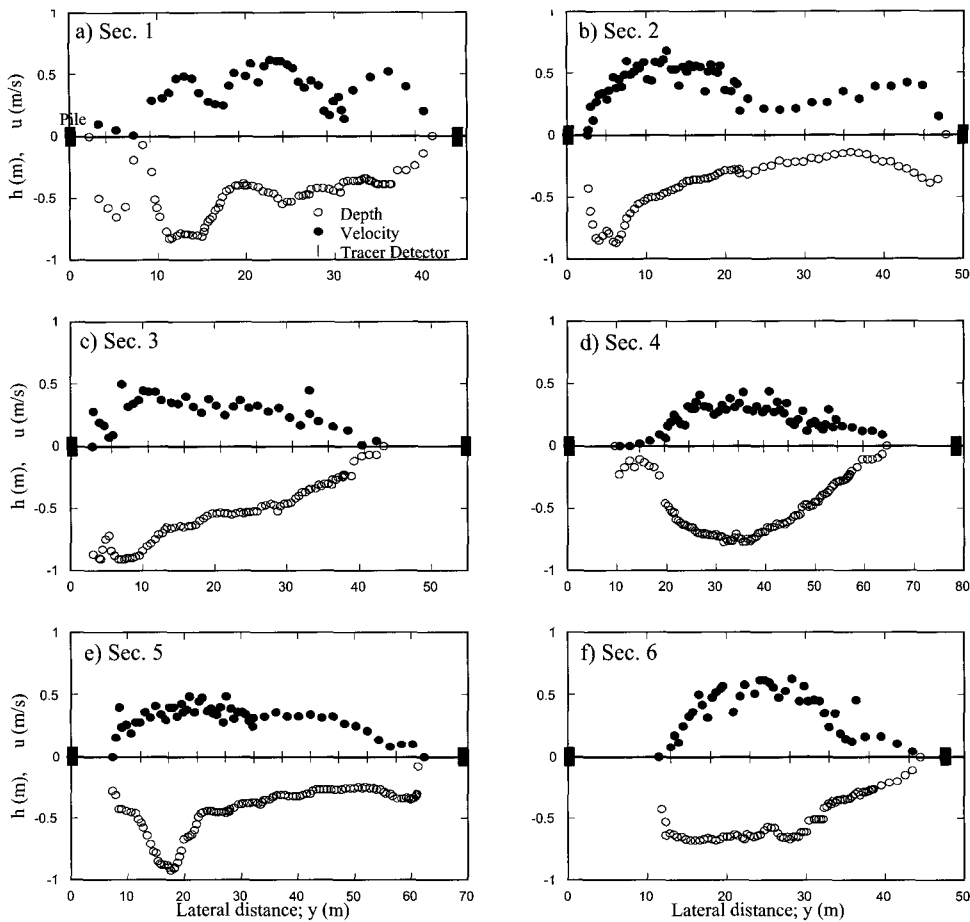


그림 6. 2차 현장실험구간(청미천)의 수심 및 유속 분포

있으며, 이를 따라 큰 유속이 발생하고 있다. 그리고 우안쪽에 시수역이 존재하여 음의 방향 유속도 나타나고 있다. 반면 만곡부를 벗어난 하류부인 측선 5와 측선 6지점의 수심은 대칭적인 형태를 띠고 있으며, 유속 분포 또한 편평한(flat) 형태이다. 2차 실험구간은 모든 측선에 대해 유속 및 수심이 좌안으로 편기된 분포를 나타내고 있다. 그리고 측선 1과 2지점의 유속은 수심의 불규칙성을 따라 발생하여 다봉(多峰)형태의 분포가 나타난다.

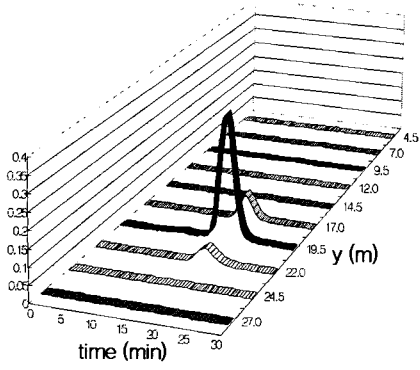
그림 5~6에 도시된 유속 및 수심자료는 횡분산계수 산정시 기초자료로 식 (10)과 식 (12) 등에 사용되었다. 하지만 1차 실험의 경우, 그림 5에서 보는 바와 같이 수심이 낮은 영역에서 전자기 유속계를 사용하지 않아 유속을 취득하지 못했다. 모멘트법을 이용하여 보다 정확한 횡분산계수를 산정기 위해서는 전체 하폭에 걸

쳐서 유속자료가 존재해야 한다. 이를 위해 Seo 와 Baek (2000)이 제안한 유속 횡분포식을 적용하여 유속을 실측하지 못한 영역의 유속자료를 보정하였다. Seo 와 Baek (2000)은 자연하천에서 수심평균된 흐름 방향 유속의 횡분포를 다음과 같은 베타함수(beta function)로 표현한 바 있다.

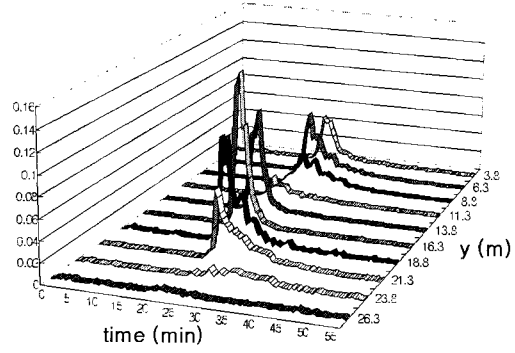
$$u = U \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{y}{W}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{y}{W}\right)^{\beta-1},$$

$$0 < \frac{y}{W} < 1 \quad (18)$$

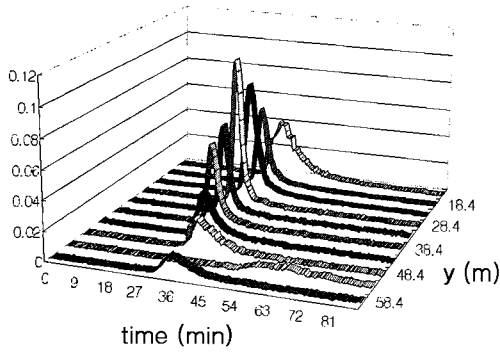
여기서, U 는 단면평균유속, α 와 β 는 매개변수, $\Gamma(\cdot)$ 는 감마함수로 다음과 같이 표현된다.



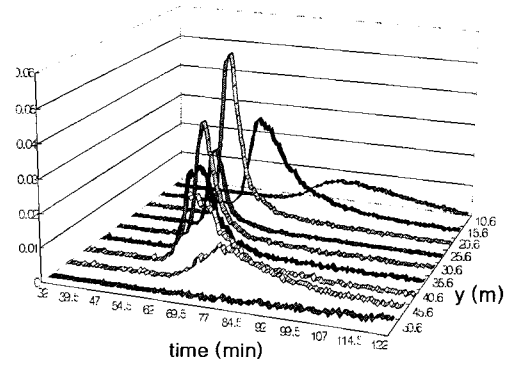
a) Sec. 1



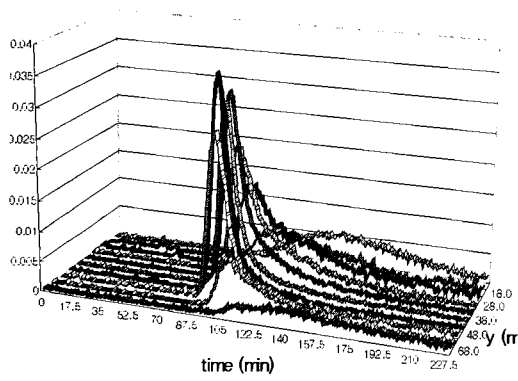
b) Sec. 2



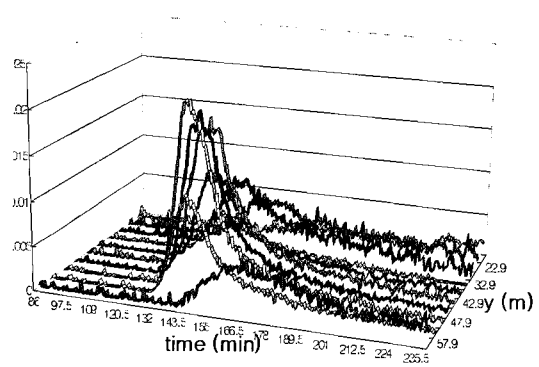
c) Sec. 3



d) Sec. 4

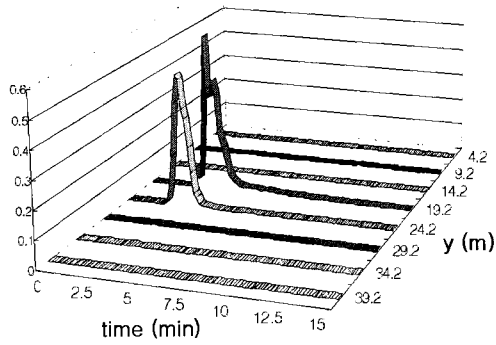


e) Sec. 5

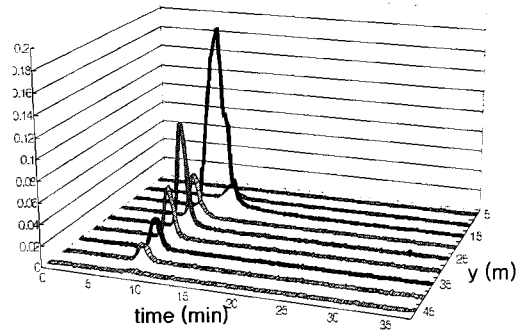


f) Sec. 6

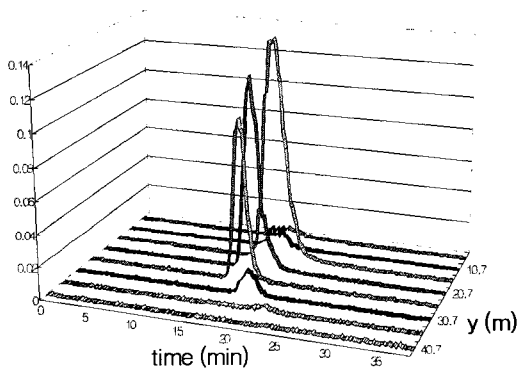
그림 7. 1차 추적자 실험(섬강) 결과 농도분포



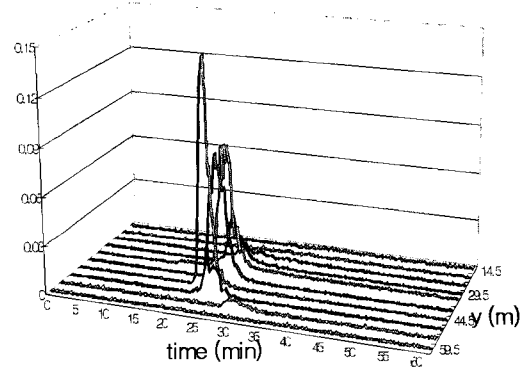
a) Sec. 1



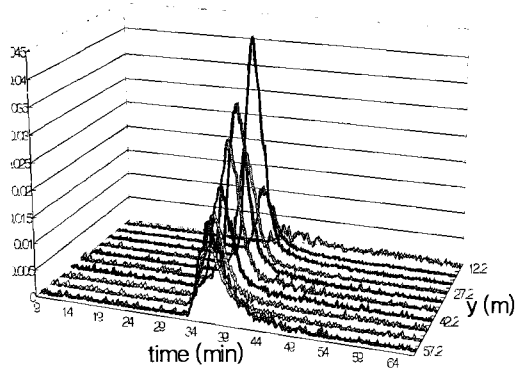
b) Sec. 2



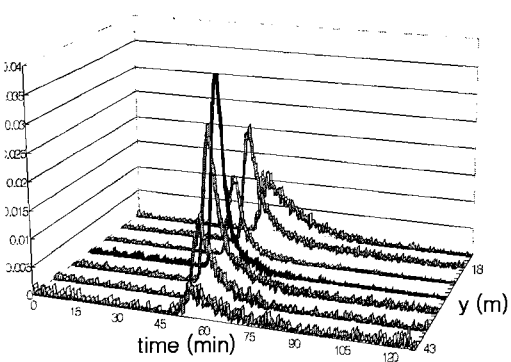
c) Sec. 3



d) Sec. 4



e) Sec. 5



f) Sec. 6

그림 8. 1차 추적자 실험(칭미천) 결과 농도분포

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx \quad a > 0 \quad (19)$$

4.2 농도분포

수심 및 유속측정이 완료된 후에 동일한 측선에 대해 추적자실험을 수행하였다. 각 측선별 추적자 감지기의 위치는 그림 5~6에 도시한 바와 같으며, 1, 2차 확산실험 결과를 3차원적으로 그림 7~8에 각각 도시하였다. 그림 7~8에서 농도값은 방사성 동위원소의 반감기와 기저농도를 고려하여 환산한 값을 도시한 것이다. 반감기를 고려하는 과정은 다음과 같다. 초기 방사능이 R_0 일 때 일정시간이 경과한 후에 방사능은 다음 식과 같이 지수 함수적으로 줄어든다.

$$R(t) = R_0 e^{-\lambda t} \quad (20)$$

여기서 λ 는 붕괴상수로서 반감기($T_{0.5}$)와는 다음의 관계가 있다.

$$T_{0.5} = \ln 2 / \lambda \quad (21)$$

본 연구에서는 보존성 오염물을 가정하였으므로 붕괴된 방사성 물질(R)을 식(20)과 식(21)을 이용하여 초기치(R_0)로 환산하였다.

전체적으로 측선 1에서는 주입지점과의 거리가 가까워 중앙부에서 농도가 나타나는 반면 나머지 측선에서

는 횡방향으로 고루 농도가 감지되었다. 1차 추적자 실험 결과 측선 1,2지점은 하폭의 중앙부에 큰 농도가 감지되고, 하류로 갈수록 좌안으로 치우쳐 농도가 크게 나타나고 있다. 2차 추적자 실험에서도 측선 5를 제외하고 유량이 많은 좌안쪽에 큰 농도가 발생한다.

5. 결과분석

5.1 실측치와 해석해를 이용한 분산계수 결정

실측된 농도자료를 해석해, 식 (4)와 비교하여 종분산계수 및 횡분산계수를 산정하였다. 해석해의 적용시, 하도내 여러 지점의 농도분포를 계산함에 있어서 단면 평균 유속을 입력하게 되는데, 이럴 경우 실측된 농도 분포곡선과 비교하여 침두농도(C_p) 도달시간 및 농도 분포 곡선의 형태간에 위상(phase)차가 발생하게 된다. 이는 실제 자연하천에서 하안 및 하도내에 형성된 3차원적인 불규칙성(웅덩이와 여울, 사수역 등)으로 인하여 국부적인 유속이 단면평균유속과 매우 상이하기 때문이다. 위상차를 고려하지 않고 실측치와 계산치간에 단순비교를 통해 분산계수를 산정한다면 부정확한 값을 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 침두농도 및 횡방향 지점별 농도의 합(θ), 이 두개를 기준으로 분산계수를 산정하였다. 먼저 실측치와 계산치의 침두농도를 비교하여 두 값간의 차이를 최소화하는 종분산계수를 계산한 후, 이를 기준으로 횡방향 지점별 농도의 합을 비교하여 횡분산계수를 계산하였다. 계산된 횡분산계수를 고정하고 다시 종분산계수를 산정하는 반복법으로

표 3. 해석해로 산정한 분산계수

구분	측선번호	D_x (m ² /s)	D_y (m ² /s)	D_x/HU_*	D_y/HU_*
1차 실험 (섬강)	1	1.136	0.004	59	0.19
	2	0.543	0.026	6.9	0.33
	3	0.051	0.020	0.8	0.32
	4	0.524	0.015	4.2	0.40
	5	0.145	0.007	4.6	0.23
	6	0.610	0.011	48	0.87
	평균	0.501	0.014	20.6	0.39
2차 실험 (청미천)	1	0.078	0.009	2.6	0.30
	2	0.148	0.070	6.3	2.67
	3	0.111	0.019	3.2	0.54
	4	0.127	0.013	4.0	0.41
	5	0.197	0.045	6.9	1.56
	6	0.423	0.013	13.7	0.42
	평균	0.181	0.028	6.1	0.98

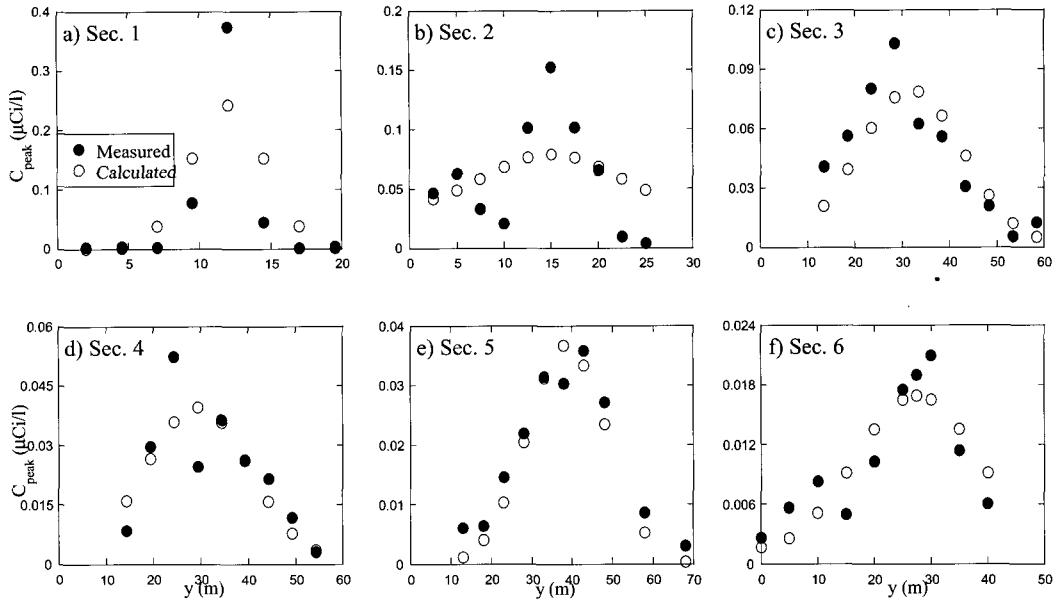


그림 9. 1차 추적자 실험결과와 해석해의 비교 [첨두농도(C_p)]

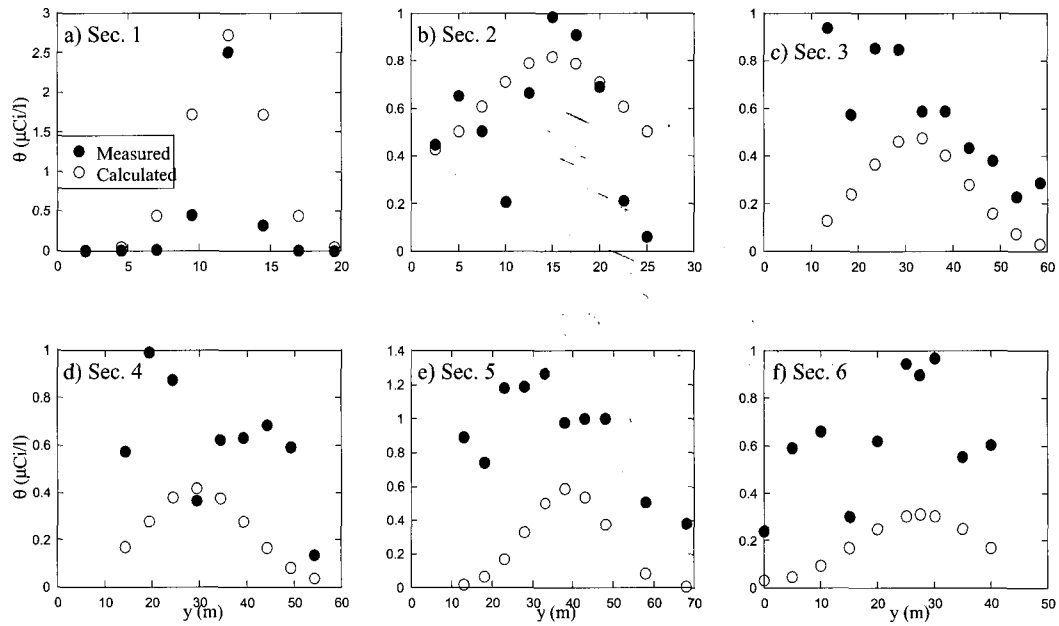


그림 10. 1차 추적자 실험결과와 해석해의 비교 [횡방향 지점별 농도합(θ)]

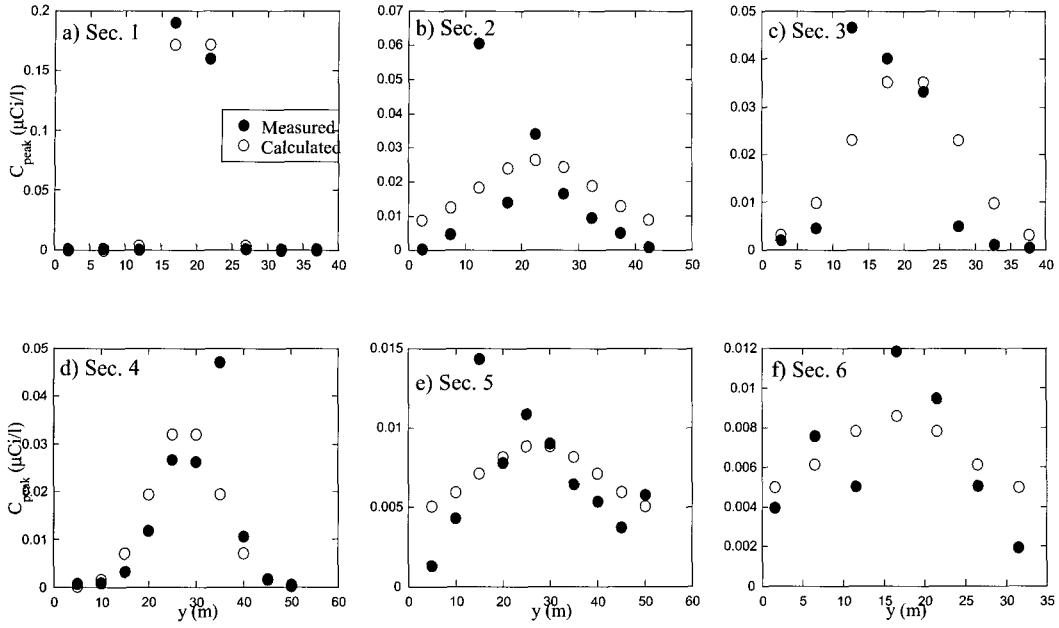


그림 11. 2차 추적자 실험결과와 해석해의 비교 [첨두농도 (C_p)]

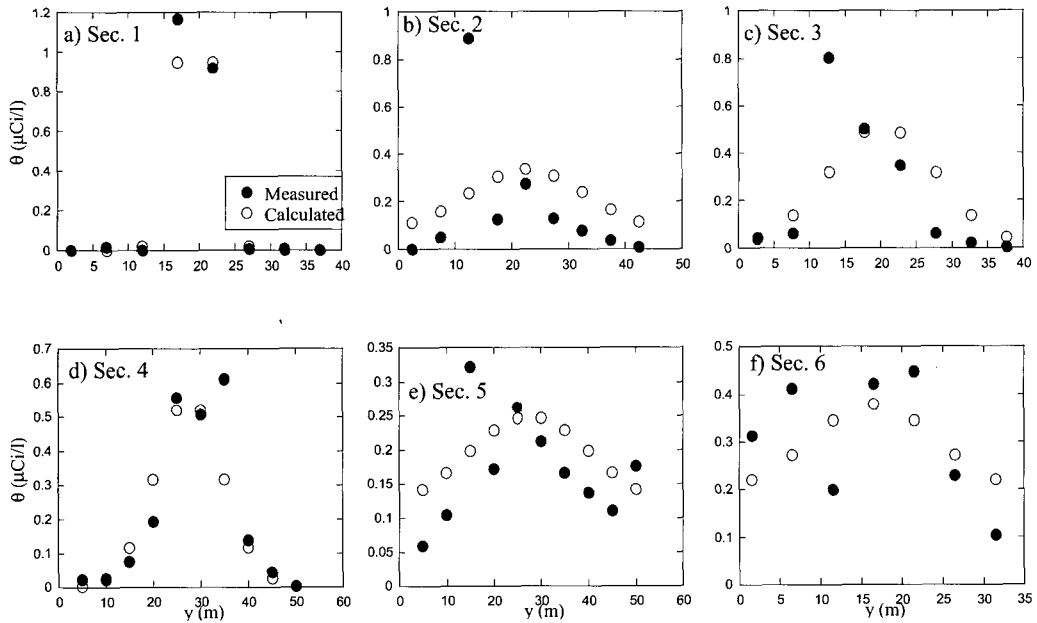


그림 12. 2차 추적자 실험결과와 해석해의 비교 [횡방향 지점별 농도합 (θ)]

최적화된 종분산 및 횡분산계수를 각각 산정하였다. 산정된 분산계수들을 표 3에 나타내었다. 여기서 무차원 분산계수는 일반적으로 분산계수를 전단유속과 단면 평균수심의 곱으로 나누면 취득할 수 있는데, 전단유속 (U_*)은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$U_* = \sqrt{gHS} \quad (22)$$

여기서, g 는 중력가속도, S 는 하상경사이다. 산정된 분산계수들에 의한 해석치를 C_p 와 θ 를 기준으로 실측치와 비교하면 그림 9~12와 같다. 1차 실험에서 농도함의 경우 하류로 갈수록 해석치가 실측치에 비해 과소 산정되는 경향이 있으나(그림 10 참조), 이를 제외하면 대체적으로 해석치가 실측치를 잘 따라가고 있다.

Elder (1959)는 하폭이 매우 넓은 수로에서 횡방향 확산이 완료됐다고 가정하고, 유속의 연직분포를 로그 함수로 가정하여 종분산계수를 다음과 같이 제시한 바 있다.

$$D_x/HU_* = 5.93 \quad (23)$$

본 연구에서 산정된 무차원 종분산계수(표 3 참조)를 식 (23)과 비교해 보면 1차실험결과는 과대산정하고 있는 반면 2차실험결과는 거의 일치하고 있다. 1차 실험의 경우, 측선 1과 6의 무차원 종분산계수치가 매우 크게 산정되었고, 측선 3에서는 작게 산정되었다. 이 세 가지 경우를 제외하고 평균치를 산정하면 식 (23)과 일치하는 결과를 보인다.

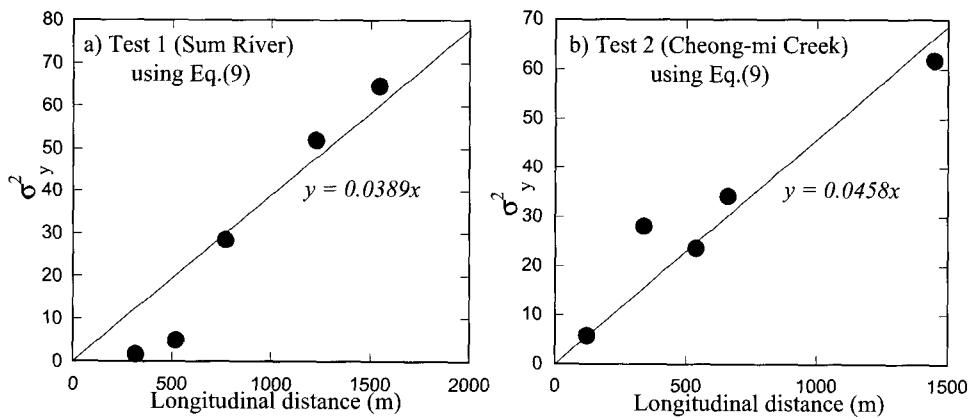


그림 13. 모멘트법의 적용

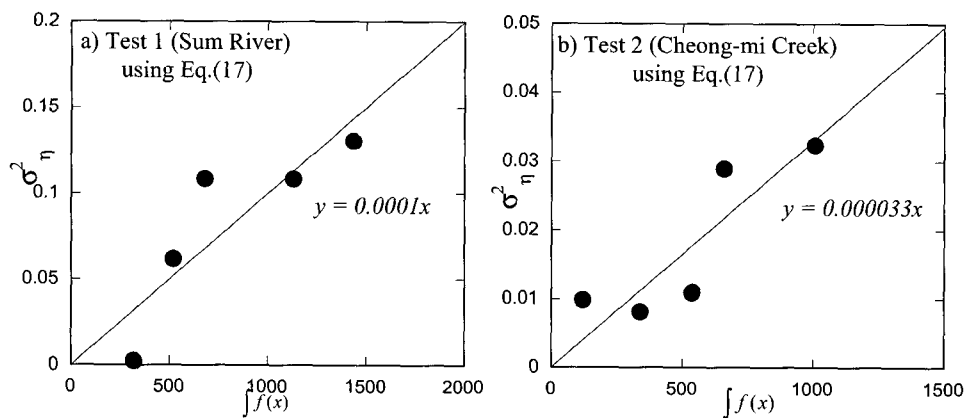


그림 14. 수정 모멘트법의 적용

5.2 모멘트법을 이용한 횡분산계수 결정

본 연구에서는 일반적인 모멘트법 [식(9)]과 유관모형을 결합시킨 수정 모멘트법 [식(17)]을 이용하여 횡분산계수를 산정하였다. 이를 위해 각 측선별 종방향 거리 및 분산을 구하고, 선형회귀분석을 통해 기울기를 취득하였다. 그 결과를 그림 13~14에 각각 도시하였다.

취득된 기울기와 식 (9)와 식 (13)을 통해 횡분산계수를 산정하였고, 이를 정리하여 표 4에 수록하였다. 계산된 횡분산계수를 살펴보면 각각의 산정방식에 따라 편차가 발생하고 있다. 특히 Beltaos (1980)가 제안한 수정 모멘트방법, 식 (17)은 횡분산계수를 여타방법에 비해 과대 산정하는 경향이 있다. 하지만 본 연구는 만곡부에서 실시된 실험으로, 유량의 횡방향 편차가 심해 유관모형을 결합시킨 Beltaos (1980)의 수정 모멘트법으로 산정된 횡분산계수치가 오히려 타당하다고 사료된다. 특히 해석해의 경우, 직선수로의 가정하에 도출된 해를 사행하천에 적용시켜 횡분산계수를 결정하였기 때문에 과소 산정될 여지가 충분하다.

이상의 취득된 결과를 기존의 추정식들과 비교하였다. Fischer (1979)는 자연하천에서 무차원 횡분산계수가 $0.6 \pm 50\%$ 정도임을 주장하였고, Sayre (1979)는 사행반경이 포함된 수리량들의 관계식을 무차원 횡분산계수 추정식으로 제시한 바 있다. 이들 추정식에 의한 결과를 정리하면 표 5와 같다.

본 연구에서 산정한 무차원 횡분산계수의 경우 1차 실험은 약 0.4~1.6의 범위를, 2차 실험은 약 0.3~1.7

의 범위를 갖는다. 이는 추정식의 범위를 넘어서고 있지만 큰 차이를 보이지는 않는다. 일반적으로 만곡부에서 추적자 실험을 통해 결정된 무차원 횡분산 계수는 2차류, 하도의 불규칙성 등의 영향으로 큰 값을 갖는다. Sayre 와 Yeh (1973)는 사행 하천에서 무차원 횡분산계수를 3.3으로 산정한 사례도 있다. 따라서 본 연구에서 결정한 횡분산계수는 타당한 값이라 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 자연 상태가 유지된 섬강, 청미천 두 하천의 사행구간을 선정하여 유속과 수심 측정 및 2차원 추적자실험을 수행하였다. 추적자로서는 미량으로도 관측이 용이한 방사성 동위원소를 사용하였으며, 추적자를 순간적으로 점주입하였다. 유속 및 수심자료를 분석한 결과, 말굽형 만곡부로 이루어진 섬강(1차 실험)은 만곡의 정점(측선 2)에서 가장 깊은 수심이 발생하고 이를 따라 큰 유속이 발생하였다. 또한 만곡부를 벗어난 직선부(측선 5~6)의 수심은 대칭적인 형태를 띠고 있으며, 유속분포 또한 편평한 형태를 유지하였다. 원호형 만곡부로 이루어진 청미천(2차 실험)은 모든 측선에 대해 유속 및 수심이 좌안으로 편기된 분포를 나타내었다. 현장실험을 통해 취득한 수리량 및 농도 자료를 분석하여 분산계수를 산정하였다. 종분산계수는 해석해를 통해 산정하였는데 섬강은 약 0.5 m²/s, 청미천은 0.2 m²/s 로 산정되었다. 이는 Elder (1959)의 이론식과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았다. 횡분산계수는 해석해 및 모멘트방법을 이용하여 산정하였는데, 섬강은 약 0.01~0.06 m²/s의 범위를 가지며 청미

표 4. 해석해와 모멘트법으로 산정한 횡분산계수

산정법	분산계수	1차 실험 (섬강)		2차 실험 (청미천)	
		D_y (m ² /s)	D_y/HU_*	D_y (m ² /s)	D_y/HU_*
해석해	식 (4)	0.014	0.39	0.028	0.98
모멘트법	식 (9)	0.015	0.41	0.008	0.27
수정 모멘트법	식 (17)	0.062	1.63	0.051	1.66

표 5. 기존의 추정식으로 계산한 무차원 횡분산계수

연구자	추정식	1차 실험	2차실험
Fischer (1979)	$D_y/HU_* = 0.6 \pm 50\%$	0.3~0.9	0.3~0.9
Sayre (1979)	$D_y/HU_* = (0.3 \sim 0.9) \left(\frac{UW}{U_* R_c} \right)^2$	0.29~0.87	0.09~0.33

천은 약 0.01~0.05 m²/s의 범위를 갖는 것으로 결정되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업단과 서울대학교 공학연구소의 지원으로 수행되었습니다. 유속 및 수심측정에 도움을 주신 건설기술연구원과 지오글로버스에 감사드립니다.

참고 문헌

- 서일원, 백경오, 이두한, 진준하 (2002). "자연하천에서 횡 혼합에 관한 실험적 연구." **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, CD-ROM(수공), pp. * 554-557.
- Beltaos, S. (1975). "Evaluation of transverse mixing coefficients from slug tests." *J. of Hydr. res.*, IAHR, Vol. 13, No. 4, pp. 351-360.
- Beltaos, S. (1980). "Transverse mixing tests in natural streams." *J. of Hydr. Div.* ASCE, Vol. 106, No. 10, pp. 1607-1625.
- Demetropoulos, A. C., and Stefan, H. G. (1983). "Transverse mixing in wide and shallow River: case study." *J. of Envir. Engrg.*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 685-699.
- Elder, J. W. (1959). "The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow." *J. Fluid Mech.* Vol. 5, No. 4, pp. 544-560.
- 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.
- Glover, R. E. (1964). *Dispersion of dissolved or suspended materials in flowing streams*. Professional Paper No. 433-B, U. S. Geological Survey, Washington.
- Godfrey, R. G., and Fredrick, B. J. (1970). *Stream dispersion at selected sites*. Professional Paper No. 433-K, U. S. Geological Survey, Washington.
- Holley, E. R., and Abraham, G. (1973b). "Field tests on transverse mixing in rivers." *J. of Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 99, No. HY12, pp. 2313-2331.
- Lau, Y. L., and Krishnappan B. G. (1981). "Modeling transverse mixing in natural streams." *J. of Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 107, No. HY2, pp. 209-226.
- McQuivey, R. S. and Keefer, T. N. (1976). "Dispersion-Mississippi River below Baton Rouge, LA." *J. of Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 102, No. HY10, pp. 1425-143.
- Sayre, W. W., and Chang, F. M. (1968). *A laboratory investigation of open channel dispersion processes for dissolved, suspended, and floating dispersants*. Professional Paper No. 433-E, U.S. Geological Survey, Washington.
- Sayre, W. W., and Yeh, T. (1973). *Transverse mixing characteristics of the Missouri River downstream from the Cooper nuclear station*. IHR Report No. 145, Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Sayre, W. W. (1979). "Shore-attached thermal plumes in rivers." *Modelling in Rivers*, Edited by Shen, H. W., Wiley-Interscience, London.

(논문번호:03-31/접수:2002.03.31/심사완료:2003.07.16)