

자연하천에서 횡혼합에 관한 추적자 실험 Tracer Test on Transverse Mixing in Natural Streams

Baek, KyongOh¹⁾/Seo, IlWon²⁾/Jeon, TaeMyoung³⁾

요지

자연하천에서의 횡혼합 특성을 분석하고 횡분산계수를 산정하기 위해서 추적자 실험을 실시하였다. 추적자 실험은 섬강에서 세번, 홍천강에서 두번, 청미천에서 한번, 총 여섯 군데에서 실행되었다. 각각의 실험에서 속도, 수심, 유속과 같은 수리량이 측정되었다. 추적자로서는 미량으로도 관측이 용이하며 병원에서 진찰용으로 사용할 만큼 인체에 해롭지 않은 방사성 동위원소 (I-131)를 사용하였다. 추적자 실험을 통해 얻어진 농도데이터와 수리량 데이터를 이용하여 횡분산계수를 산정하였으며 이때 모멘트 방법과 수정모멘트 방법 그리고 유관모형 추적법이 사용되었다. 세가지 방법을 이용하여 산정된 횡분산계수를 토대로 각각의 방법이 자연하천에서의 횡분산계수를 산정하는데 합당한지를 비교 분석하였다. 또한 여섯 경우의 지형이 다른 자연하천에서 구한 횡분산계수를 토대로 하천의 형상에 의해 하천에서의 횡분산 거동이 어떻게 달라지는가를 분석하였다.

핵심용어: 횡분산, 추적자 실험, 횡혼합계수, 모멘트법, 수정모멘트법, 유관모형 추적법

1. 서론

오염원과 취수장이 공존하는 국내하천 특성상 오염물질의 하천 평면내의 거동을 보다 정확히 파악하기 위해서 2차원 해석이 필요한 실정이다. 자연하천에서의 점오염원의 횡혼합 특성을 파악하기 위해서 2차원 추적자실험을 실시하였다. 본 연구에서는 추적자실험을 통해 얻은 기본수리량과 농도자료를 바탕으로 자연하천에서의 오염물 확산거동을 파악하는데 그 목적이 있다.

2. 이론적 배경

횡분산계수를 산정하기 위해서 Sayre 와 Chang (1968)이 제안한 단순모멘트법과 Beltaos (1980)가 제안한 수정모멘트법을 이용하였다. 또한 본 연구에서는 유관모형과 추적법을 결합시킨 또 다른 추적법의 하나인 유관 모형 추적법을 개발하였다. 농도장이 정상상태일때 유관모형의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{D_y}{Q^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \eta^2} \quad (1)$$

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

Beltaos (1975)의 제안을 따라 S를 무차원 주입량, θ 를 총주입량으로 정의하면 무차원 주입량 (dosage)은 다음과 같이 정의된다.

$$S \equiv \frac{\theta}{\Theta} \quad (2)$$

여기서 θ 는 추적자의 주입량이다.

식 (2)를 C 대신 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial S}{\partial x} = B_C \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} \quad (3)$$

1) 정희원, 박사후과정, 서울대학교 지구환경시스템공학부(kopaek1@snu.ac.kr)

2) 정희원, 정교수, 서울대학교 지구환경시스템공학부(seoilwon@plaza.snu.ac.kr)

3) 정희원, 석사과정, 서울대학교 지구환경시스템공학부(jtm333@snu.ac.kr)

여기서 $B_C = \frac{E_y}{Q}$ 이며 E_y 는 확산인자 (diffusion factor)이다.

선 오염원이 순간적으로 $x=0, \eta=w$ 에 주입되면 식 (3)의 해는 다음과 같다.

$$S(x, \eta) = \frac{\Theta}{\sqrt{4\pi B_C x}} \exp\left(-\frac{(n-w)^2}{4B_C x}\right) \quad (4)$$

Fischer (1968)가 제안한 2차원 추적법을 토대로 유관 추적 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$S(x_2, \eta) = \int_0^1 \frac{S(x_1, w)}{\sqrt{4\pi B_C (x_2 - x_1)}} \exp\left(-\frac{(n-w)^2}{4B_C (x_2 - x_1)}\right) dw \quad (5)$$

여기서 $S(x_1, \eta)$ 는 상류지점에서 관측한 무차원 주입량 분포이고, $S(x_2, \eta)$ 는 하류지점에서 계산된 무차원 주입량 분포이다. 식 (5)를 통해 계산된 주입량 분포와 관측된 주입량 분포의 비교를 통해 B_C 를 산정하고 다음의 식을 통해 최종적으로 횡분산계수(D_T)를 산정해낸다.

$$D_T = \frac{B_C Q^2}{\psi H^2 U} \quad (6)$$

여기서 U 는 단면 평균유속이며 H 는 단면 평균수심이고 ψ 는 무차원 유속형상계수(dimensionless "shape-velocity" factor)이다.

3. 현장 추적자 실험

3.1 실험개요

우리나라의 중규모 이상의 자연하천에서의 2차원 농도분포자료를 취득하고 횡분산계수를 산정하기 위해 현장추적자실험을 실시하였다. 하천현장 실험을 위한 대상 하천 선정기준은 중규모 이상의 자연하천이며 인공적인 구조물이 없는 자연 상태의 하천을 그 대상으로 하였다. 소규모 하천의 경우는 수심 방향과 하폭 방향으로 혼합이 빠르게 완료되므로 본 실험에서는 횡혼합 특성을 파악하기 위해 하폭이 비교적 큰 하천을 선정하였다. 추적자실험은 섬강과 청미천 그리고 홍천강에서 실시하였으며 총 6번의 추적자 실험을 각각 다른 지점에서 실시하였다. 표 1에 추적자실험의 간략한 개요를 나타내었으며 그리고 그림 1~3에 6차에 걸친 실험 구간을 살펴볼 수 있다.

3.2 실험방법

실험을 위해서 먼저 하천의 흐름방향과 직각으로 양안에 말뚝을 박고 로프를 이용하여 측선을 설치하였다. 각 측선간의 거리는 약 200~400 m 이며 총 6개의 측선을 설치하였다. 대상 하천에서의 평균 실험 구간은 약 2km이다. 설치된 각 측선에서 수심 및 유속 추적자의 농도를 측정하였다. 먼저 각 단면별로 수심 및 유속을 측정하였다. 수심 및 유속은 현장용 유속계의 하나인 초음파 유속계(Acoustic Doppler Current Profiler; ADCP)를 사용하여 측정하였다. 그러나 ADCP는 수심 30cm 이하의 영역에서는 자료취득이 어려워 수심이 낮은 지역에서는 전자기 유속계(Electro-Magnetic Flowmeter)를 사용하여 유속을 측정하였다. 그림 4에 단면에서 측선을 이용한 실험방법을 도시하였다.

수심과 유속 측정을 완료한 후에 동일한 측선에서 추적자실험이 수행되었다. 추적자는 방사성 동위원소 중에 하나인 I-131을 사용하였다. 주입방법으로는 연직방향으로 농도가 일정한 선원, 횡방향으로는 점원의 형태로 하폭의 중앙에 순간 주입하였다. 추적자의 농도는 그림 4에 도시된 바와 같이 측선당 평균 10개의 측정점을 선정하여 각 측정점에 감지기(detector)를 고정시켜 1점법(0.6h)으로 초당 10개의 농도자료를 독취하였다. 주입 전 5분 동안은 기저농도(base concentration)를 측정하였으며, 주입 후 최대농도가 통과한 후 기저농도로 감소될 때까지 측정을 계속하였다.

4. 실험결과

4.1 기본수리량

현장실험을 통하여 기본적인 수리량을 취득할 수 있다. 그 결과들 중에서 홍천강 첫 번째 실험의 경우를 표 2에 정리하였다. 또한 그림 5에 홍천강 첫 번째 실험의 측선에서 취득된 유속과 수심, 추적자 디텍터의 위치와 말뚝의 위치를 도시하였다. 섬강에서의 첫 번째 실험(S-Expt 1)에서는 곡률반경의 중심이 흐름방향을 기준으로 우측에 위치하고 있어 최심선이 좌안쪽으로 발달하였다. 이 실험에서 만곡의 정점에 위치한 두 번째 측선에서는 수심이 깊은 곳에 유속도 빨랐으며 좌안쪽으로 사수역이 발달하였다. S자형인 두 번째 섬강에서의 실험(S-Expt 2)은 최심선이 처음에는 좌안을 따라 형성되고 다음으로는 우안을 따라 형성된다. 이는 첫 번째 만곡과 두 번째 만곡의 영향을 받아 유속이 변화하였기 때문이다. 이러한 현장실험에서의 횡방향 유속분포를 취득함으로써 횡방향 유속이 최심선을 따라서 높게 분포함을 알 수 있다. 직선형 자연하천에

서의 실험을 위해 섬강에서 세 번째 실험(S-Expt 3)을 수행하였다. 이 실험에서 유속과 수심분포는 좌우 대칭의 형태를 보이고 있다. 청미천과 홍천강에서 현장 실험을 한 결과도 유속의 최심선이 만곡의 바깥쪽으로 치우쳐서 발달하였다.

4.2 추적자실험결과

유속과 수심 측정 이후에 동일한 측선에서 추적자실험을 수행하였다. 여섯 경우의 추적자실험 결과 일반적으로 횡방향으로 높은 농도값이 유량이 많은 지역에 분포함을 알 수 있었다.

추적자 운의 이동을 시각적으로 쉽게 알아볼 수 있도록 홍천강 첫 번째 실험에 대해 시간과 농도값에 대한 그래프를 2차원적으로 그림 6에 도시하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 추적자의 중심이 만곡의 바깥쪽으로 치우쳐 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 추적자의 농도가 유량이 많은 곳으로 치우침을 보여주는 것이다.

4.3 횡분산계수 결정

모멘트방법과 수정모멘트법이 현장실험을 수행한 자연하천의 횡분산계수를 결정하는데 사용되었다. 위의 두가지 방법은 중방향 거리에 대한 분산(variance)을 통해서 횡분산계수를 결정하였다. 수정모멘트법에 의해 도출된 횡분산계수가 전반적으로 단순모멘트방법에 의해 계산된 결과보다 높게 나왔다. 이는 수정모멘트 방법이 하천의 불균일성을 고려하였기 때문이다.

또한 새로 개발된 유관모형 추적방법을 이용하여 현장에서의 횡분산계수를 결정하였다. 그림 7에 유관모형 추적방법을 적용한 결과를 도시하였다.

다양한 산정방법을 통해 취득된 횡분산계수를 표 3에 정리하였다. 그 결과 유관모형 추적방법의 결과는 모멘트 방법을 이용한 결과값들과 유사함을 알 수 있다. 섬강에서의 두 번째 실험(S-Expt2)과 홍천강에서의 첫 번째 실험(H-Expt1)의 결과값이 다른 실험들의 결과값보다 높게 나왔다. 이는 만곡의 영향으로 인해 만곡이 심한 사행하천에서 횡분산계수가 크게 나옴을 보여주고 있다.

5. 결론

하천현장실험을 통해 대상하천에서의 유속, 수심과 같은 기본수리량 자료를 획득하였다. 또한 추적자 실험을 통해서 추적자 운이 최대유속선을 따라서 퍼져나감을 알 수 있었다.

이 연구에서 새롭게 제안된 유관모형 추적방법에 의해 분산계수를 구한 결과 기존의 방법들(단순모멘트법, 수정모멘트법)과 잘 일치하였다. 각 실험구간별로 분산계수를 구한 결과 만곡이 심한 하천의 경우에 만곡이 심하지 않은 하천보다 분산계수가 컸다. 이는 하천에 형성된 만곡에 의해서 오염물이 횡방향으로 빨리 혼합됨을 나타낸다.

참고문헌

Beltaso, S. (1975). "Evaluation of transverse mixing coefficients from slug tests." *J. of Hydr. Res.*, IAHR, 13(4), 351-360.
 Beltaso, S. (1980). "Transverse mixing tests in natural streams." *J. of Hydr. Div.*, ASCE, 106(HY10), 1607-1625.
 Fischer, H. B. (1968). "Dispersion predictions in natural streams." *J. Sanit. Engrg. Div.*, ASCE, 94(SA5), 927-943.
 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.

표 1 현장 추적자 실험 개요

Case	River	Type of Reach	실험기간
S-Expt 1	섬강	Sharp curved	2002. 5. 27 ~ 5. 31
S-Expt 2	섬강	S-Curved	2003. 4. 22 ~ 4. 26
S-Expt 3	섬강	Straight	2003. 6. 17 ~ 6. 21
C-Expt 1	청미천	Mild Curved	2002. 10. 15 ~ 10. 19
H-Expt 1	홍천강	Sharp Curved	2003. 10. 6 ~ 10. 10
H-Expt 2	홍천강	Mild Curved	2003. 10. 27 ~ 10. 31

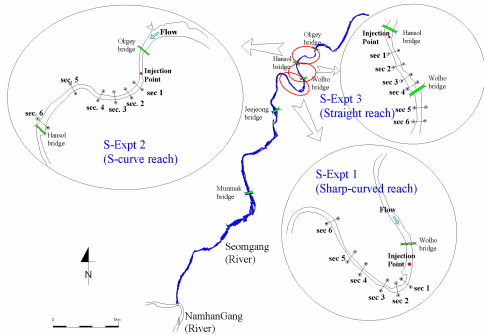


그림 1 섬강 현장 실험 위치도

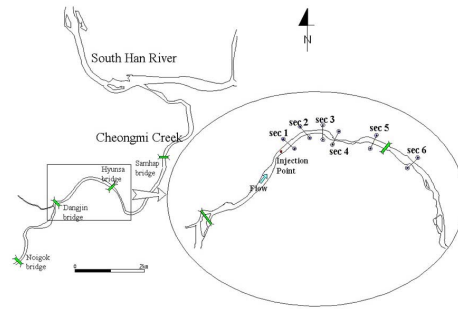


그림 2 청미천 현장 실험 위치도

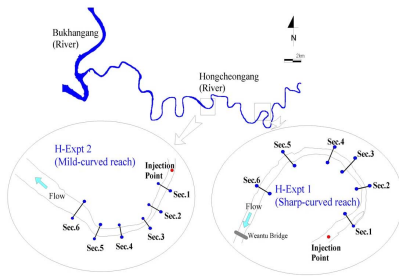


그림 3 홍천강 현장 실험 위치도

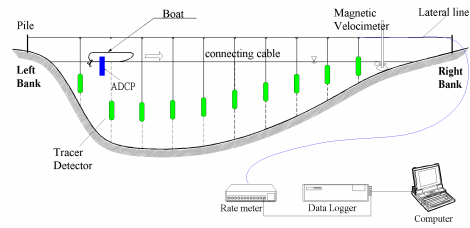


그림 4 측선에서의 실험 방법

표 2 홍천강에서 취득된 기본 수리량

실험	측선번호	H (m)	U (m/s)	W (m)	S_0	R_c (m)
H-Expt 1	1	0.31	0.50	102	0.0003	437.5
	2	0.44	0.71	50.2	0.0003	437.5
	3	0.37	0.58	51.2	0.0003	437.5
	4	0.42	0.56	47.7	0.0003	437.5
	5	0.33	0.70	46.2	0.0003	437.5
	6	1.42	0.21	54.1	0.0003	437.5
	average	0.55	0.54	58.6	0.0003	437.5

* S_0 는 하상경사이며 R_c 는 곡률반경

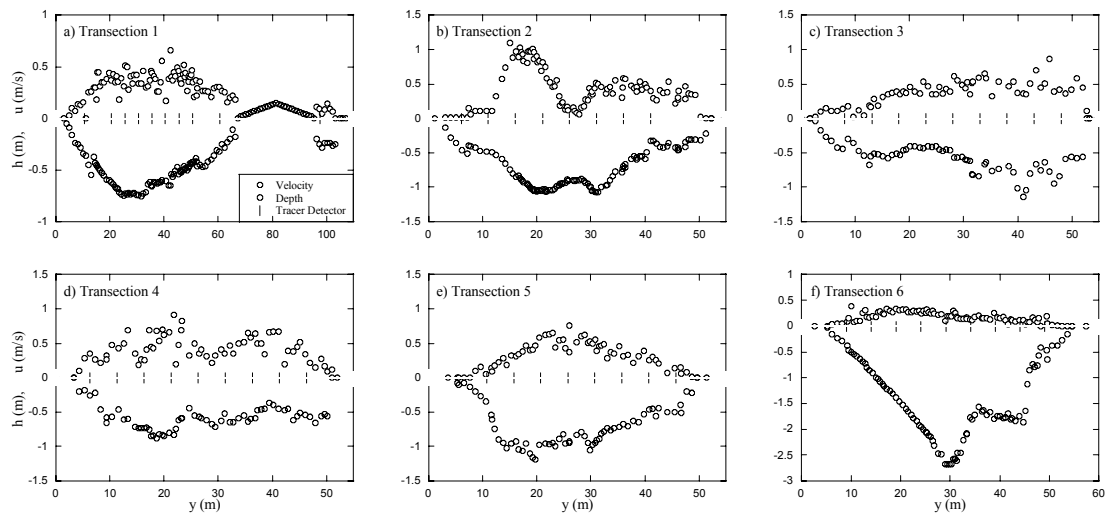


그림 5 H-Expt 1 유속, 수심분포

표 3 현장실험에서의 산정 방법에 의한 횡분산계수 비교

실험	D_T/HU_*			
	단순모멘트법	수정모멘트법	유관모형 라우팅방법	
S-Expt 1	0.45	0.43	0.46	Sec. 3 - 6
S-Expt 2	0.76	0.85	1.21	Sec. 2 - 4
S-Expt 3	0.27	0.32	0.30	Sec. 1 - 5
C-Expt 1	0.24	0.34	0.27	Sec. 2 - 5
H-Expt 1	0.47	0.85	0.64	Sec. 2 - 6
H-Expt 2	0.24	0.24	0.23	Sec. 2 - 6

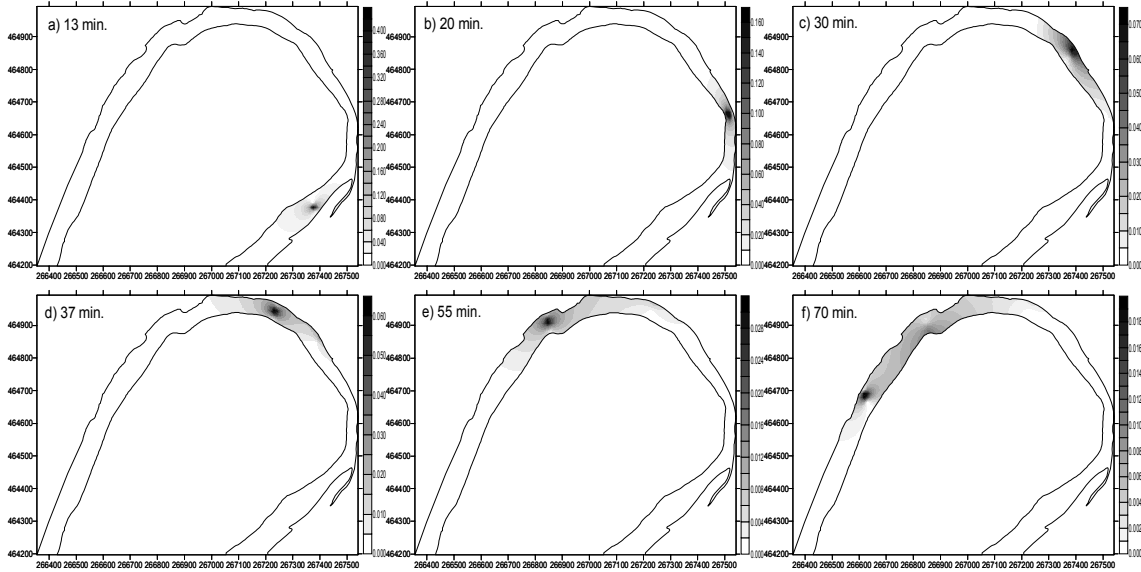


그림 6 H-Expt 1 추적자 오염물 이동 그래프

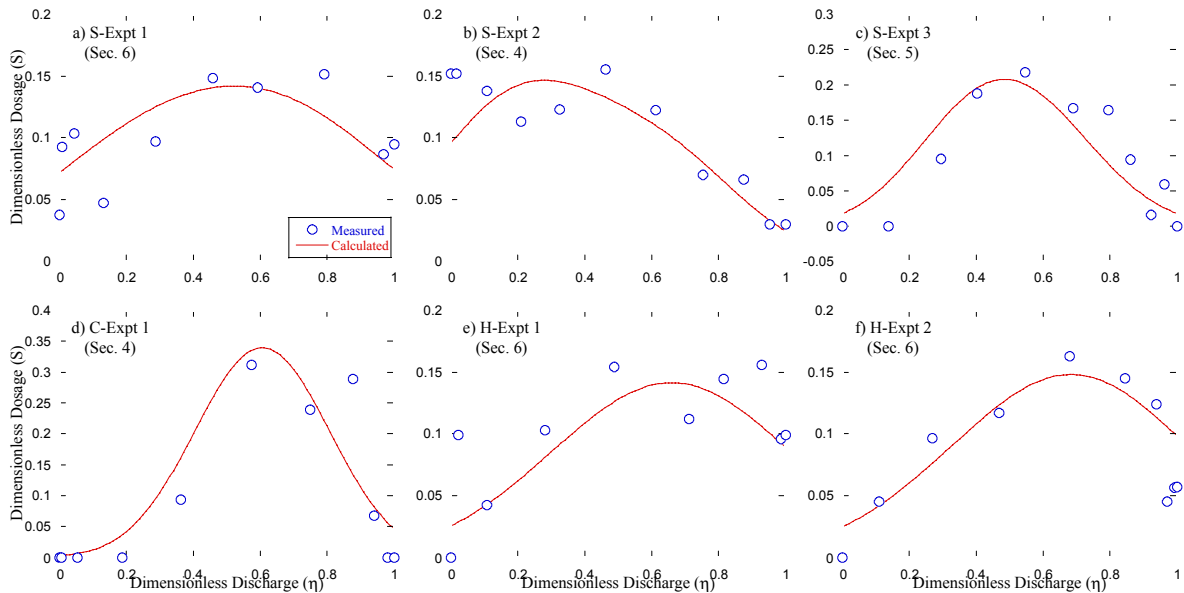


그림 7 유관모형 추적방법의 적용