

만곡수로의 횡확산계수 측정

박성민*, 이재광**, 한건연***, 윤세의****

1. 서론

하천으로 유입된 오염물질은 이송-확산과정을 통하여 종방향, 횡방향, 연직방향으로 이동된다. 하천에서 오염물질의 거동을 예측할 때 가장먼저 부딪치는 문제는 합리적인 확산계수의 산정인데 하천의 실측자료로부터 확산계수가 계산되어 이를 직접 사용할 수 있는 국내 하천은 거의 없는 실정이다. 확산계수는 유속분포, 조도, 하상 형태, 하도 형태등 여러 가지 인자들에 의해 그 특성이 변화하므로 확산계수선정의 가장 확실한 방법은 현장실측이나 이는 경비, 시간, 하천오염 등의 문제로 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이송-확산 해석을 위하여 이론적인 기법이 많이 개발되고 있으나 이들의 결과를 검증하기 위해서는 현장실측이나 수리모형을 이용한 확산실험 등이 병행되어야 한다.

하천에서 오염물질의 거동을 해석하기 위해서는 일반적으로 하폭과 수심비(b/h)가 커 수심방향의 농도변화를 무시할 수 있기 때문에 수심방향으로 평균된 2차원 이송-확산 방정식을 사용한다. 이때 종방향 확산계수는 실험이나 경험식으로부터 추정하여 사용할 수 있으나, 만곡수로에서 횡방향 확산계수를 결정하기 위한 실험결과나 경험식에 관한 연구는 Fischer(1969), Chang(1971), Lau 등(1981), 강주복 등(1990)이 있으나 만곡부에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 만곡효과가 크고 만곡현상이 뚜렷하게 파악될 수 있는 180° 만곡수로에서의 하폭에 대한 수심비를 변화시키면서 횡확산계수를 측정하였으며, 측정된 값과 기존의 실험실에서 측정된 횡확산계수를 비교·분석하였다.

2. 기본이론

오염물질의 이동은 이송(advection)과 확산(diffusion) 또는 분산(dispersion)등의 제과정으로 설명된다. 이송은 물의 흐름에 의한 오염물질의 운송이며, 확산은 분자확산(molecular diffusion)과 난류확산(turbulent diffusion)으로 구분되며, 난류확산이 분자확산에 비하여 매우 크기 때문에 하천에서 확산계수를 추정할 경우 분자확산을 무시한다. 전단흐름에 의한 확산은 하천에서 매우 중요하며, 확산계수의 규모는 주로 이의 영향을 받는다.

일반적으로 비압축성 난류전단흐름에서 보존성 물질에 대한 2차원 이송-확산방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (1)$$

여기서, C 는 오염물질의 농도, x, y 는 각각 종방향과 횡방향 좌표, E_x, E_y 는 x, y 방향의 확산계수, u, v

* 경기대학교 대학원 석사과정
** 두산엔지니어링 사원
*** 경북대학교 토목공학과 교수
**** 경기대학교 토목·환경 공학부 토목공학 전공 교수

는 x, y 방향의 유속을 나타낸다

횡방향 확산계수를 측정하기 위해서 Sayre와 Chang(1968)은 개수로에서 하폭이 넓으며 등류 흐름일 경우 식 (2)에 의해서 구할 수 있다고 발표하였다.

$$E_y = \frac{\bar{U}}{2} \frac{d\sigma_y^2}{dx} \quad (2)$$

여기서, E_y 는 횡방향 확산계수이고, σ_y^2 는 추적자의 횡방향 분산이고, x는 염료투여지점으로부터의 거리, \bar{U} 는 평균유속이다. 분산 σ_y^2 는 식 (3)에 의해서 구할 수 있다.

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_i c_i u_i d_i y_i^2 \Delta y_i}{\sum_i c_i u_i d_i \Delta y_i} - \left[\frac{\sum_i c_i u_i d_i y_i \Delta y_i}{\sum_i c_i u_i d_i \Delta y_i} \right]^2 \quad (3)$$

여기서, i지점에서의 농도는 c_i , 유속은 u_i , 수심은 d_i 로 표시되며, y_i 는 임의의 지점으로부터의 거리, Δy_i 는 횡구간의 폭이다.

3. 횡확산 실험

본 연구에서는 만곡부에서의 횡확산계수를 측정하기 위하여 실험실내의 180° 만곡수로에서 실험을 실시하였으며, 수로의 제원은 표 1과 같다. 그림 1은 실험수로의 평면도이고, 그림 2는 실험수로의 전경이다.

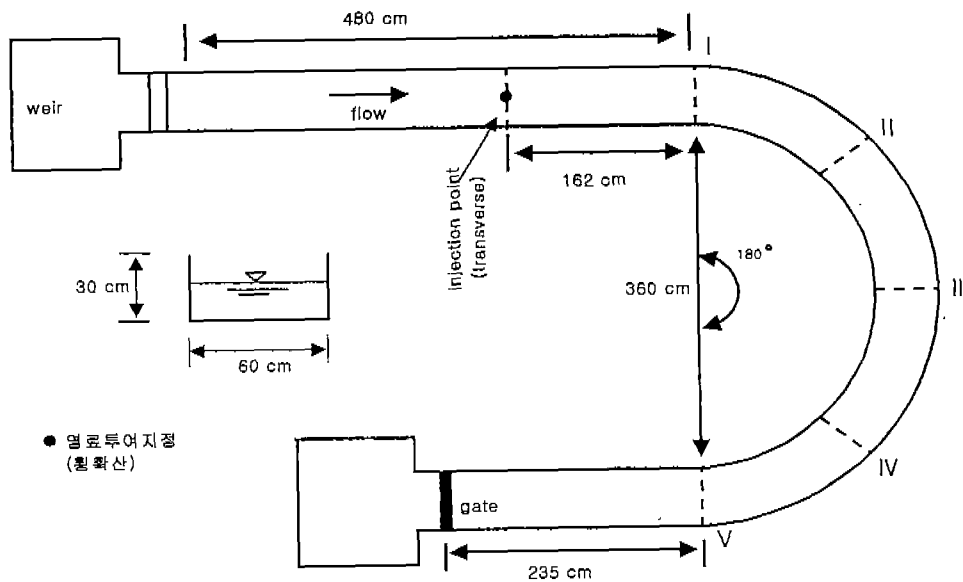


그림 1. 실험수로 평면도

본 연구에 사용된 실험수로는 그림 1과 2와 같이 펌프를 이용하여 저수조의 물은 실험실 내의 고수조로 양정되며, 직선수로의 끝에 설치된 삼각웨어를 이용하여 유량을 측정한다. 만곡수로 상류에서 정류시킨 물은

표 1. 실험수로의 제원

CASE	길이 (cm)	수로폭 (cm)	수심 (cm)	B/H	경사	유량 (ℓ/s)
1	13.75	60	7.5	8.0	0.0003	1.3
2			8.0	7.5		2.1

중심각 180° 인 만곡부로 이동할 수 있도록 제작되었으며, 만곡수로 하류단의 직선부에 수위 조절 장치가 부착되었다. 삼각웨어의 유량과 월류수심의 관계곡선은 그림 3과 같다. 실험수로의 유속과 수심을 측정하기 위하여 만곡부를 만곡각 45° 씩 5개의 단면으로 구분하였으며, 그 위치는 그림 1에 표시하였다. 각 단면마다 CASE 1은 횡방향으로 5개의 관측점으로 설정하였으며, 측정점의 간격은 10cm 이다. CASE 2는 횡방향으로 9개의 관측점을 설정하였으며, 측정점의 간격은 6cm 이며, 측정 단면간의 간격은 1.65m 이다.

실험수로의 유속측정에는 1차원 유속계인 Mini water 2와 2차원 유속계인 KENEK VM-201을 이용하였으며, 1차원 유속과 2차원 유속을 실측하였다. 유속은 1점법으로 측정하였고, 2차원 유속을 측정함으로써 유량을 측정할 수 있었다. 수심 측정에 사용된 계기는 포인트 게이지(point gage)이며 수심은 3회를 측정하여 평균하였다.

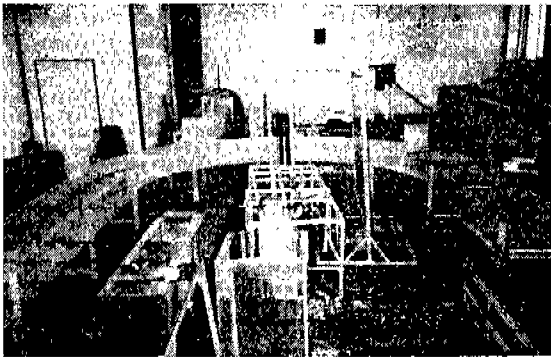


그림 2. 실험수로 전경

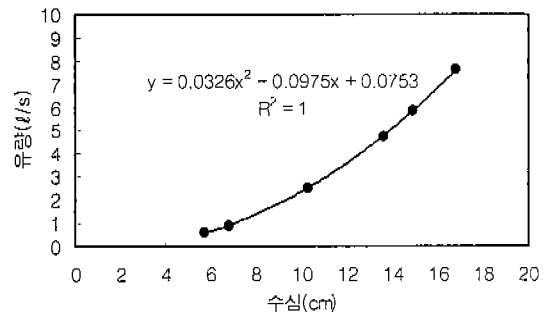


그림 3. 월류수심-유량 곡선

본 연구에서 황색산계수를 측정하기 위하여 사용된 추적자(tracer)로는 기존의 황산계수 측정 실험 연구에서 많이 사용되고 있는 Rhodamine B를 사용하였으며, 중앙점에서 연속 투여하였고, 추적자의 농도는 10,000 mg/ℓ 이었다. 추적자의 농도를 측정하기 위하여 전도도계(Temp Meter Model 41C(Isteck Co.))를 사용하였다. 이는 온도와 전도도를 동시에 측정할 수 있는 기기이며, 자동기록장치가 부착되어 있다.

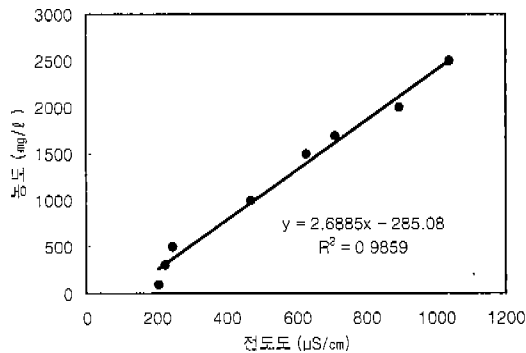


그림 4. 전도도-농도 관계 곡선



그림 5. 황색산 실험의 전도도 측정

전도도는 온도에 따라 그 값이 변하므로 실험수로내의 물의 온도와 기계의 온도를 고려하여 실험을 실시하였다. 전도도계 간의 오차를 건정하여 서로 0.1%의 오차범위 내에서 측정을 할 수 있도록 조정하였다. 전도도의 측정 시간 간격은 1-3초 정도이었으며, 물의 온도는 21℃이었다. 전도도로부터 농도를 예측하기 위하여 전도도와 농도 관계의 실험을 실시하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다.

황화산계수 측정시 전도도의 측정지점은 유속과 수심을 측정한 지점과 동일한 지점으로 추적자의 투여지점으로부터 1.62m, 3.27m, 4.92m, 6.57m, 8.22m 하류로 떨어진 지점에 위치하며, 그 지점을 I ~ V로 표시하였고, 일정한 연속투여(0.096 l/s)를 위하여 투여 용액의 수두가 일정하게 유지되도록 염료 주입 장치를 제작하였다. 염료 투여 후 염료가 이동되는 현상을 관찰하면서 염료의 혼합과정이 측정기구에 영향을 적게 받도록 각 단면의 측정에서 주사기를 이용하여 염료를 채취하여 전도도를 측정하고 이를 농도로 환산하였다. 그림 5는 전도도의 측정 장면을 나타내고 있다.

4. 실험 결과

본 연구에서는 180° 만곡수로에서 황화산계수를 구하기 위해서 수심을 측정하였으며, 180° 만곡수로의 수심비(b/h)는 7.5~8.0이다. 이러한 수심비는 실제 대규모 하천이 아닌 중·소규모의 하천의 수심비와 유사하다. 만곡부의 일반적인 편수위 특성과 동일하게 내측에 비해 외측의 수위가 크게 측정되었으며, 유속의 분포는 반곡 시작부분 단면 I에서 단면 II를 지나면서 내측의 유속이 빠르고, 단면 III을 지나 단면 IV, 단면 V로 갈수록 외측의 유속이 빨라지는 결과를 얻었다. 즉, 그림 6에서와 같이 최대유속선의 이동 경로는 반곡부 입구에서 내측으로 편의되었다가 흐름이 하류부로 진행되면 외측으로 이동되는 결과를 확인할 수 있었다. 이는 반곡 유입부에서는 2차류가 발달하는 과정에서 하상부근의 횡방향 유속이 내측으로 편의되고 운농량의 손실이 발생하며, 손실된 운동량을 회복하기 위해서 수면부근의 횡방향 유속은 외측으로 편의되기 때문에 나타나는 현상이다.

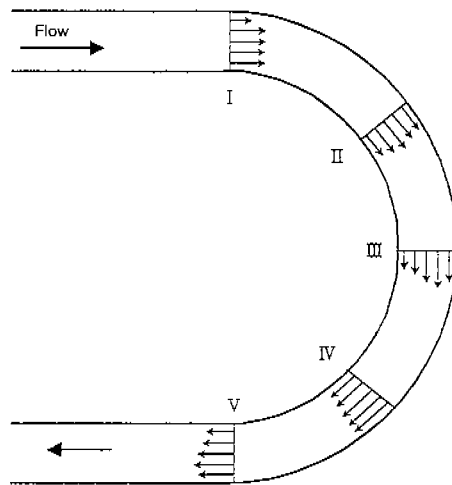


그림 6. 각 단면에서의 유속 분포

추적자를 투여한 후 혼합과정은 황화산계수 측정시와 거의 비슷한 경향을 보이고 있었으며, 단면 I에서 단면 II를 지나면서 농도분포의 중심이 중앙으로 치우치다가 단면 III을 지나면서 외측으로 확산이 증가되었으며, 단면 V에서는 횡방향으로 거의 혼합되었다.

황화산계수 실험시 전도도를 측정하고, 그림 4의 결과를 이용하여 농도로 환산하였다. 동일 조건하에서 2회 실험을 실시하였으며, 그 중 실험 3의 단면별 횡방향 농도분포를 그림 7에 나타내었다. 각각의 실험 조건을 이용하여 식 (2)와 식 (3)로부터 황화산계수를 구하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 그림 8은 추적

자의 투여지점으로부터 하류 방향으로 횡방향의 농도분포에 대한 분산을 나타낸 것이며, 하류로 갈수록 분산이 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

표 2. 증방향 및 횡방향 확산계수 실험 결과

	실험	평균수심 (m)	평균유속 (m/s)	수면경사	전단유속 (m/s)	분산	횡확산계수 (cm ² /s)	무차원 횡확산계수 (E _z /du ²)
CASE 1	실험 1	0.075	0.04	0.0134	1.65	0.016	1.8	0.18
	실험 2					0.014	1.6	0.16
CASE 2	실험 1	0.079	0.06	0.0137		0.014	2.4	0.22
	실험 2					0.016	2.8	0.25

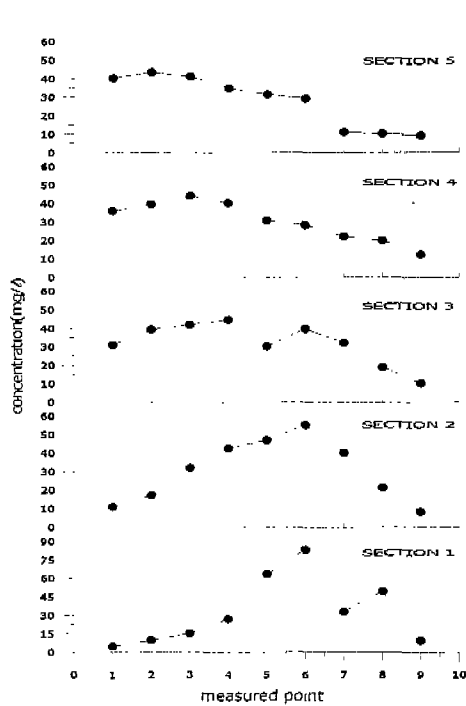
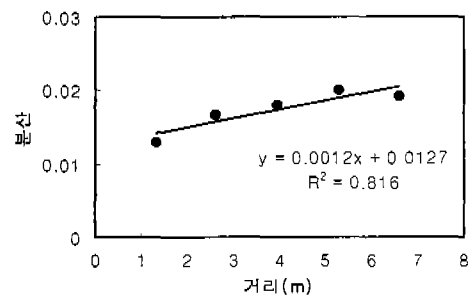
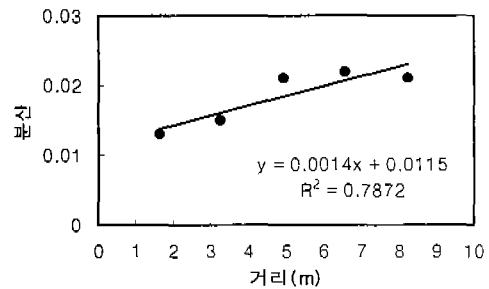


그림 7. 각 단면의 시간-농도 분포



CASE 1



CASE 2

그림 8. 거리에 따른 횡방향 농도분포의 분산

5. 비교 및 고찰

직선수로에서 횡확산 거동에 영향을 미치는 수리인자를 구명하고자 많은 실험적 연구가 이루어졌다. Lau와 Krishnappan(1977)의 연구의 결과를 하폭에 대한 수심비(b/h) 변화에 따른 무차원 횡확산계수(E_z/du^2)의 관계로 정리한 결과 무차원 횡확산계수의 값들은 0.10 ~ 0.26의 정도의 범위에 속해 있음을 알 수 있었다. 무차원 횡확산계수는 하폭에 대한 수심비에 비례함을 보이고, 그 결과로 하폭에 대한 수심비가 커지면 난류 규모 또한 커지게 되어서 난류확산에 의한 횡확산이 증가한다고 설명하였다(Lau와 Krishnappan 1977). 본 연구의 실험 결과 값인 0.18 ~ 0.26과 비교하면, 본 연구의 횡확산계수가 크게 측정되었으며, 이는 만곡수로에서 횡확산계수가 직선수로보다 크다는 것을 확인할 수 있었다.

Fischer(1969)는 사행하천에서는 이차류의 발달로 인해 횡혼합이 크게 증가하는데 실험수로의 사행정도에 따라 무차원 횡확산계수는 약 0.2 ~ 2.4 사이의 값을 갖는다고 발표하였으며, 만곡구간내의 횡확산계수는 평

관 유속의 제곱, 수심의 세제곱에 비례하며, 전단유속, 곡률반경의 제곱에 반비례한다고 발표하였다.

본 연구의 결과치는 Fischer의 실험치에 비해 적게 측정되었으며, 이는 Fischer의 실험에서 유속, 마찰계수가 상대적으로 크기 때문에 발생하는 결과라고 판단된다. 즉, 유속과 하상의 조도계수가 작을수록 횡확산계수도 감소하기 때문에 본 연구의 횡확산계수 실험치가 작게 측정된다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 180° 만곡수로에서 하폭에 대한 수심비(b/h)를 변화시키면서 횡확산계수를 측정하였다. 180° 만곡수로에서 추적자의 수표면 확산형태는 유속분포의 형태와 거의 일치하여 만곡입구에서는 내측으로 출구부분에서는 외측으로 편이 되고 있었으며, 무차원 횡확산계수 값은 0.16~0.25 정도로 측정되었다. 이는 직사각형 직선수로에서의 무차원 횡확산계수의 평균값보다 크며, 하폭에 대한 수심비(b/h)가 감소할수록 즉, 유량이 증가할수록 이차순환에 의한 이송이 증가하여 무차원 횡확산계수는 증가하는 것으로 나타났다.

앞으로 실제 하천 및 실험실에서 종확산 및 횡확산의 거동에 영향을 미치는 수리인자에 대한 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

7. 참고문헌

- 강주복, 박상길, 김원규, 김종화(1990). "불규칙한 자연하천에서 오염물질의 횡확산." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제23권, 제2호, pp. 213-225
- 윤세의, 한건연, 한정석, 김정수(2000). "수리모형을 이용한 자연하천에서의 종확산계수 추정." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제4호, pp. 407-417.
- 윤세의, 한정석, 김정수(2000). "180° 만곡수로에서의 종확산계수 측정." 대한토목학회 학술발표회 논문집 (III), 대한토목학회, pp. 589-592.
- Chang, Yung-Chi. (1971). "Lateral Mixing In Meandering Channels." UMI Dissertaion Service, pp.1-49
- Fischer, H.B. (1969). "The effect of bends on dispersion in streams." *Water Resources Research*, Vol.5, No.2, pp. 496-506.
- Lau, Y.L., and Krishnappan, B.G. (1977). "Transverse dispersion in rectangular channels." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol.103, No. HY10, pp. 1173-1189.
- Lau, Y.L., and Krishnappan, B.G. (1981). "Modeling transverse mixing in natural streams." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol.107, No. HY2, pp. 209-226.
- Sayre, W.W., and Chang, F.M. (1968). "A Laboratory investigation of open-channel dispersion processes for dissolved, suspended, and floating dispersants." *United State Geological Survey Professional Paper 433-E*, Washington, D.C.