

수리모형을 이용한 자연하천에서 종확산계수 추정

An Estimation of Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Stream Using Hydraulic Model

윤 세 의* / 한 건 연* / 한 정 석** / 김 정 수***

Yoon, Sei Eui / Han, Kun Yeun / Han, Chyung Such / Kim, Jung Soo

Abstract

To estimate the longitudinal dispersion coefficient at the downstream of Jungrang-River, the undistorted 1/20 scale hydraulic model was used in this study. Experiments were conducted for dry season discharge, and Rhodamine B was used as a tracer. The relationship curve between concentration and conductivity of Rhodamine B was obtained by laboratory test, and the conductivity which was measured in hydraulic model was converted to concentration using this curve. The longitudinal dispersion coefficient was calculated using the relationship between the peak concentration and the time to peak concentration. The results of this study were compared with the calculated values by the empirical equations for the longitudinal dispersion coefficient and with the field data. The results of comparison show that Parker's equation underestimates, and Liu's equation and Iwasa and Aya's one overestimate, and McQuivey and Keefer's equations, Fischer's one, Magazine's one, and Seo and Cheong's one predict relatively well. The measured data sets were relatively close to the observed ones in natural river. The longitudinal dispersion coefficient at the downstream of Jungrang-River was estimated 10m²/s.

keyword : Longitudinal dispersion coefficient, Hydraulic model, Peak concentration

요 지

중랑천 하류부에서 종확산계수를 추정하기 위하여 중랑천 율령교 부근의 구간을 1/20로 축소한 정상 수리모형을 이용하였다. 중랑천의 길수시의 유량을 고려하여 실험을 실시하였으며, 염료는 Rhodamine B를 사용하였다. 염료의 농도-전도도 곡선을 구하였고, 수리모형에서의 전도도를 측정하여 이를 농도로 환산하였다. 종확산계수를 계산하기 위하여 최대농도와 최대농도의 도달시간 관계를 이용하였다. 수리모형 실험으로 측정된 종확산계수를 기존의 경험식들과 비교하였다. 중랑천과 비교적 유사한 수리량 조건을 갖는 하천에서 현장 실측한 종확산계수 값과 비교하였다. Parker(1961)의 식으로 산정된 값은 실측치에 비해 작게 산정되었고 Liu(1977) 및 Iwasa와 Aya(1991)의 식으로 산정된 값은 크게 산정되었으며, McQuivey와 Keefer(1974), Fischer(1975), Magazine 등(1988) 및 Seo와 Cheong(1998)의 식으로 산정된 값은 비교적 근사한 값을 보이고 있었다. 또한 실측치는 현장 실측값과도 비교적 근사한 값을 나타내고 있었다. 중랑천의 종확산계수는 10m²/s 정도로 추정된다.

핵심용어 : 종확산계수, 수리모형, 최대농도

- ~ 경기대학교 토목·환경공학부 토목공학전공 교수
Prof. Dept. of Civil Engng., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi 94-6, Korea
syyoon@kuc.kyonggi.ac.kr
- * 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof. Dept. of Civil Engng., Kyungpook National Univ., Taegu 702-701, Korea
- † 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정
Graduate Student, Dept. of Civil Engng., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi 94-6, Korea
- †† 경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Civil Engng., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi 94-6, Korea

1. 서 론

하천으로 유입된 오염물질은 이송-확산 과정을 통하여 증방향, 횡방향 및 연직방향으로 이동된다. 하천 전 단면에 걸쳐서 완전 혼합된 후에는 증방향 확산계수가 하류부 수질예측에 중요한 인자이다. 증확산계수는 유속 분포, 조도, 하상 형태, 하도 형태 등에 따라서 그 특성이 크게 변화되고 있어서 증확산계수 추정에 사용되는 경험식으로부터 정확한 값을 얻기는 거의 불가능하다. 가장 확실한 방법인 하천의 현장 실측에는 경비, 시간, 하천 오염 등의 문제로 어려움을 겪고 있는 실정이다.

확산모형을 이용하여 자연하천에서 오염물질의 농도를 예측할 때 가장 먼저 부딪히는 문제는 합리적인 확산계수의 선정이다. 하천의 실측자료로부터 구한 확산계수가 있어서 이를 직접 사용할 수 있는 국내 하천은 거의 없는 실정이다. 따라서 실측된 확산계수를 사용할 수 없기 때문에 확산계수에 관한 기존의 이론식 혹은 외국에서 개발된 경험공식에 의존하여 결정하여야 한다. 이송-확산 해석을 위하여 이론적인 기법이 많이 개발되고 있으나 이들의 결과를 검증하기 위하여서는 현장 실측이나 확산모형을 이용한 모형실험 등의 연구가 병행되어야 한다.

확산계수에 관한 최초의 연구는 Taylor(1954)에 의해 원형 직선관수로의 난류흐름을 대상으로 연구하였으며, Elder(1959)는 Taylor의 식을 무한평면을 흐르는 2차원 흐름에 적용하여 합리적이며 간편한 식을 제시하였다. Parker(1961)는 Taylor의 식에서 관의 반경 대신 동수반경을 도입하여 개수로에 사용할 수 있는 식을 발표하였다.

Glover(1964), Fischer(1967, 1968)는 Elder(1959)의 식을 기본으로 하고 횡방향 유속분포 등을 고려하여 경험식을 제안하였다. Sooky(1969)는 하천 단면형상과 하폭에 대한 수심비를 고려한 무차원 확산계수의 경험식을 제시하였다. Godfrey와 Frederick(1970)는 자연하천의 현장실험을 통하여 Taylor(1954)가 발표한 1차원 확산모형의 확산계수가 측정된 값과 많은 차이가 있음을 제시하였다. Bansal(1971)은 발표된 증확산계수를 추정하는 경험식들을 정리, 분석하였으며, 무차원 확산계수는 하폭에 대한 동수반경의 비와 비례한다고 발표하였다.

McQuivey와 Keefer(1974)는 이론적 배경과 현장 자료를 이용하여 수심, 유속, 경사의 인자를 사용하여

증확산 경험식을 발표하였다. Day(1975)는 자연하천에서 증확산계수를 실측한 자료를 이용하여 무차원 확산계수의 특성을 분석하고, Chatwin(1971)의 결과와 비교하였다. Abd Al-Hadi와 Daver(1976)는 무차원 확산계수는 상대조도의 함수로 표시할 수 있으며 조도가 증가할 수록 확산계수(E)와 dU^* 는 비선형관계를 나타내고 있다고 발표하였다. 여기서, d 는 수심이며, U^* 는 마찰속도이다. Liu(1977)는 하천단면형태와 속도분포를 고려한 새로운 경험식을 발표하였다.

Chatwin과 Sullivan(1982)의 식은 하폭에 대한 수심비(aspect ratio)가 증확산계수에 미치는 영향을 분석하였으나 하천단면과 속도분포의 상세한 자료가 필요하여 실무에 적용하기에 어려움이 있다. Magazine 등(1988)은 하상조도, 폐쇄효과 등을 고려한 변수를 도입하여 새로운 경험식을 제시하고 실험실 자료와 현장자료를 이용하여 경험식의 특성을 분석하였다. Asai 등(1991)은 $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 하폭에 대한 수심비가 20까지 증가할 때까지는 확산계수가 비례하여 증가하지만 그 후 더욱 증가하면 오히려 감소한다고 발표하였으며, Iwasa와 Aya(1991)는 실험실 자료와 현장자료를 이용하여 경험식을 제안한 바 있다. Seo와 Choeng(1998)은 확산계수 추정에 사용되고 있고 기존의 경험식들은 정리 분석하고, One-step Huber method를 이용하여 새로운 경험식을 제시하였다.

한편, 국내에서 하천을 대상으로 한 이송-확산에 관한 연구로 강주복 등(1990)은 불규칙한 단면을 가지면서 만곡을 이루는 하천에서 오염물질의 횡확산을 예측하기 위하여 수치모형을 제안하고 이를 검증하기 위해 부산시 서면의 동천 일부 구간을 대상으로 1:20의 축척인 수리모형을 이용하였다. 이 때, 염료로는 Rhodamine B를 사용하였으며 자외선 분석기를 이용하여 농도를 구하였다. 서일원과 정태성(1994, 1995)은 현재까지 제안된 증확산계수 추정 경험식들을 비교 분석하였고, 적용성이 우수하다고 판단되는 식을 선정하였다. 또한 미국 전역의 26개 하천에서 실측된 자료를 이용하여 선정된 경험식들의 특성을 분석하고 새로운 경험식을 발표하였다. 수치모형을 이용하여 이송-확산에 관한 연구로는 서일원과 정태성(1999), 한건연 등(1999), 김주영과 이정규(1999) 등이 있다. 윤세의 등(1999)은 자연하천에서 증확산계수를 추정하기 위하여 수리 실험을 한 바 있으나 국내에서는 확산계수에 관한 실험적인 연구는 극히 미흡한 것으로 조사되었으며 이에

관한 연구가 절실한 실정이다.

본 연구에서는 한강의 지류인 증랑천 하류부의 종확산계수를 추정하기 위하여 증랑천 율령교 구간을 대상으로 1:20의 정상 수리모형을 사용하였으며, 이 모형은 한국건설기술연구원 하천실험실에서 제작하였다(대한토목학회, 1999) 실험유량은 증랑천의 갈수시 유량을 고려하여 50m³/s로 결정하였으며, 사용된 염료는 Rhodamine B 용액이다. Rhodamine B 용액의 농도-전도도 곡선을 미리 결정하고 수리모형실험에서 측정된 전도도로부터 이 곡선을 이용하여 농도를 구하였다. 실험은 3회를 반복하였으며, 종확산계수 계산에는 최대농도와 최대농도에 도달하는 시간의 관계를 이용하였다. 계산결과는 기존에 발표된 종확산계수 추정 경험식들 중 우수하다고 판단되는 식들과 비교를 하였고, 증랑천의 하천 규모와 유사한 실제하천에서의 실측자료와 비교하였다.

2. 기본이론

2.1 1차원 확산방정식

Taylor(1954)에 의해 제안된 1차원 확산방정식은 식 (1)과 같다. 식 (1)은 흐름 단면적이 일정한 등류의 경우에는 해석적인 해를 용이하게 구할 수 있으나, 이송기간(convective period)이 충분히 경과하여 Taylor기간(Taylor period)에 도달한 경우에만 사용 가능한 제약성이 있다. 즉, 오염물질이 유입된 지점으로부터 충분한 거리가 떨어진 하류 단면에서 농도분포를 예측하는데 식 (1)을 사용할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서 C 는 단면 평균농도, U 는 단면평균유속, E_x 는 종확산계수, t 는 시간, x 는 종방향거리이다. 한 지점에서 순간적인 유입의 경우 초기조건과 경계조건은 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$C(x, t) = M \delta(x) \quad 0 < x < \infty, t = 0 \quad (2)$$

$$C(x, t) = 0 \quad x = \pm \infty, t \geq 0 \quad (3)$$

여기서 M 은 질량, δ 는 Diracdelta함수이다. 이 때, 식 (1)의 해석해는 다음과 같다

$$C(x, t) = \frac{M}{2A\sqrt{\pi E_x t}} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{4 E_x t}\right] \quad (4)$$

여기서 A 는 하천의 단면적이다. 식 (4)는 거리 x 를 따라서 평균 Ut 와 분산 $\sigma^2 = 4 E_x t$ 의 정규확률 밀도함수의 형태이다. 그러므로 이 곡선의 퍼짐정도로 부터 종확산계수 E_x 에 적합한 확산현상을 측정할 수 있다(서일원과 정태성, 1995 : 이시진 등, 1993).

염료가 순간적으로 투입된 경우에 최대농도(C_p)는 식 (5)와 같다.

$$C_p = \frac{M}{2A\sqrt{\pi E_x t_p}} \quad (5)$$

여기서 $t_p = x/U$ 이다. $1/\sqrt{t_p}$ 와 관측된 최고 농도를 도식화하여 종확산계수 E_x 를 구할 수 있다. 본 연구에서는 식 (5)를 이용하여 종확산계수를 구하였다.

2.2 Froude 상사법칙의 적용

모형상자에 있어서 자연하천의 흐름은 난류상태이며, 유체에 운동을 일으키는 중력, 압력, 점성력, 표면장력, 관성력 등의 여러 가지 힘 중에서 주로 중력이 흐름 현상을 지배한다.

본 연구에서는 개수로 실험이므로 관성력과 중력의 비인 Froude수가 모형과 원형에서 일치되도록 Froude 상사법칙을 적용하였다.

전단유속 축척비는 식 (6)과 같다.

$$U' = (g_r Y_r S_r)^{1/2} = Y_r L_r^{-1/2} \quad (6)$$

여기서 첨자 r 은 모형에서 원형으로의 축척비이고, L_r 은 수평길이의 축척비이고, Y_r 은 수직길이의 축척비이고, g_r 은 단위값이고, $S_r = Y_r/L_r$ 이다.

종확산계수는 농도-시간 곡선이 Gaussian분포 형태를 나타낼 때, 식 (7)과 같이 표시된다(Fischer, 1967, 1968).

$$E = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sigma^2 \quad (7)$$

여기서, σ^2 는 확산의 종분산이고, 종분산의 축척비는 식 (8)과 같다.

$$(\sigma_x)_r = L_r \quad (8)$$

그러므로, 왜곡 모형과 정상 모형으로 확산계수비(E_r)를 표현하면 각각 식 (9a), (9b)와 같다.

$$E_r = L_r^2 / T_r = L_r Y_r^{1/2} \quad (9a)$$

$$E_r = L_r^2 / T_r = L_r L_r^{1/2} = L_r^{3/2} \quad (9b)$$

식 (9a)와 식 (9b)는 모형에서 원형으로의 농도분포 변환과정에서 필요한 축척비이다.

수리모형을 이용하여 확산계수를 추정할 때 왜곡모형과 정상 모형의 사용 가능성을 검토하였다. 흐름이 정상류이고 확산과정에서 연직 유속경사가 중요하다고 가정할 Elder(1959)의 식은 (10)과 같다.

$$E_v = \epsilon_v = 5.9 d U^* \quad (10)$$

여기서 d 는 수심이고, E_v 는 연직 방향 확산계수이다. 값 5.9는 난류 분산과 연직 유속분포로부터 결정되어진 값이다. 식 (6)과 식 (10)을 이용하여 왜곡 모형과 정상 모형 확산계수 축척비를 나타내면 각각 식 (11a), (11b)와 같다.

$$(E_v)_r = (\epsilon_v)_r = Y_r^2 L_r^{-1/2} \quad (11a)$$

$$(E_v)_r = (\epsilon_v)_r = L_r^2 L_r^{-1/2} = L_r^{3/2} \quad (11b)$$

즉, 식 (7)로부터 계산된 E 값과 식 (11a)로부터 계산된 왜곡 모형 값과는 차이가 발생하므로 왜곡 모형에서는 정확한 확산계수 축척비를 사용할 수 없다. 그러나 식 (11b)로부터 계산된 정상 모형 값은 일치하므로 정상 모형에서는 확산계수 축척비를 사용할 수 있다(Fischer와 Holly 1971).

흐름이 정상류이고 확산과정에서 횡방향 유속 경사가 중요하다고 가정할 Fischer(1967) 식은 (12)와 같다.

$$E_t = \epsilon_t = 0.3 U'^2 b^2 / R U^* \quad (12)$$

여기서 E_t 는 횡방향 확산계수이고, b 는 최대유속선에

서 제방까지의 거리이고, R 은 동수반경이고, U' 는 단면 평균 유속과 지점 유속의 차이이다. 폭의 반을 b , 수심 d 를 동수반경 R , $U_r'^2 / U_r^2 = 1$ 이라고 가정하고 식 (12)을 이용하여 왜곡 모형과 정상 모형 확산계수 축척비를 나타내면 각각 식 (13a), (13b)와 같다.

$$(E_t)_r = (\epsilon_t)_r = Y_r^{-1} L_r^{5/2} \quad (13a)$$

$$(E_t)_r = (\epsilon_t)_r = L_r^{5/2} L_r^{-1} = L_r^{3/2} \quad (13b)$$

식 (11a), (11b)에서와 마찬가지로 식 (7)로부터 계산된 E 값과 식 (13a)로부터 계산된 왜곡 모형 값과는 차이가 발생하므로 왜곡 모형에서는 정확한 축척비를 사용할 수 없다. 따라서 확산계수 추정을 위한 수리모형 실험을 할 경우 왜곡모형은 사용될 수 없으며 정상모형을 사용하여야 정확한 확산계수를 구할 수 있다(Fischer와 Holly, 1971)

본 수리모형에서 사용된 축척비는 표 1과 같다.

3. 확산계수 측정 실험

3.1 수리모형

본 연구에서는 하천의 이송-확산 과정에서 가장 중요한 중방향 확산특성을 규명하기 위하여 중량천 월릉교 부근을 수평 및 수직 길이를 동일하게 1/20로 축소된 정상 수리모형에서 실험을 실시하였으며, 수리모형의 평면형태는 그림 1과 같고 수리모형의 전경은 그림 2와 같다. 실험 수로의 제원은 표 2와 같다.

3.1.1 수리모형의 수리량 측정

그림 2와 같이 수리모형의 상류에 설치된 사각웨이로부터 유입 유량을 측정하고, 1차원 유속계인 Mini water2와 2차원 유속계인 KENEK VM-201을 이용하여 1차원 유속과 2차원유속을 실측하였으며, Point gage를 이용하여 수심을 측정하였다. 측정위치는 그림 1에서와 같이 수중보 상류방향으로 270m 단면(No. 270)에서 5개 지점, No. 190에서 5개 지점, No. 90에서 10개 지점 및 No. 38.58에서 10개 지점을 측정하였다. 그림 1에서 중량천의 지천인 우이천과 목동천으로부터 중량천으로 유입되는 유량은 없다고 가정하

표 1. 모형수로 실험 수리량 환산표

수리량 환산비	축척 환산비	환산값
수평길이 (L_r)	L_n	20
수직길이 (Y_r)	L_n	20
면적비 (A_n)	L_n^2	400
속도비 (U_r)	$L_n^{1/2}$	4.472
유량비 (Q_r)	$L_n^{5/2}$	1788.854
조도계수비 (n_r)	$L_n^{1/6}$	1.648
진단유속비 (U'_r)	$L_n^{1/2}$	4.472
확산계수비 (E_r)	$L_n^{3/2}$	89.443

표 2. 실험수로의 제원

길이(m)	수로폭(m)	수심(cm)	경사	유량(l/sec)	상사법칙
52	5-6	10~16	1/950	137	Froude

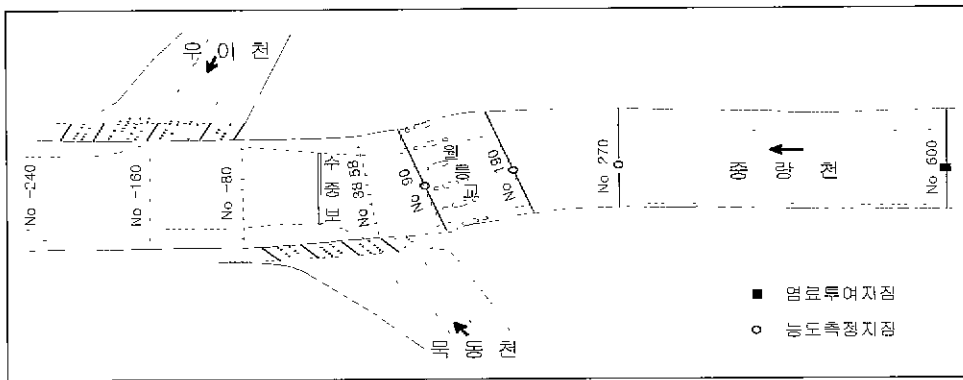


그림 1. 수리모형의 평면 형태

였다.

3.1.2 수치모형과 수리모형의 수리량 비교

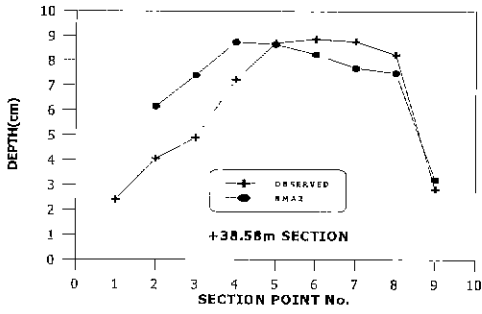
수리모형의 수리량을 검토하기 위하여 RMA-2 모형을 이용하였다. 그림 3과 그림 4는 2차원 수치모형인 RMA-2에 의한 계산치와 수리모형에서 측정치의 수리량을 각 단면별 측정별로 비교 한 것이다. 수중보 상류 방향으로 No. 90, 190, 및 270 단면에서는 실측 수리량과 수치모형에 의한 계산치가 대체적으로 비슷한 결과를 나타내고 있으나, No. 38.58 단면에서는 약간 차이가 나타남을 알 수 있는데, 이것은 수중보의 영향을 수치모형이 완벽하게 계산하지 못한 결과라고 사료된다.

3.2 확산계수 측정 실험

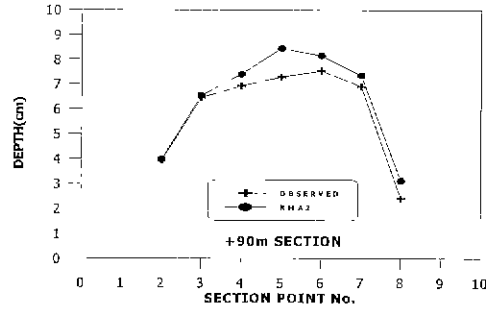
본 연구에서 사용된 염료는 Rhodamine B이며, 중앙점 투여법을 이용하였다. 그림 5와 같은 Trmp



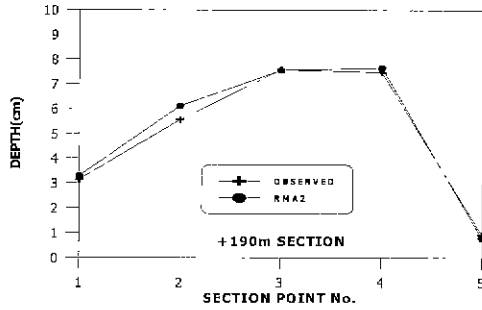
그림 2. 수리모형의 전경



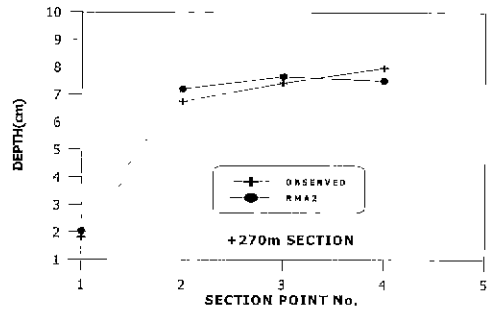
(a)



(b)

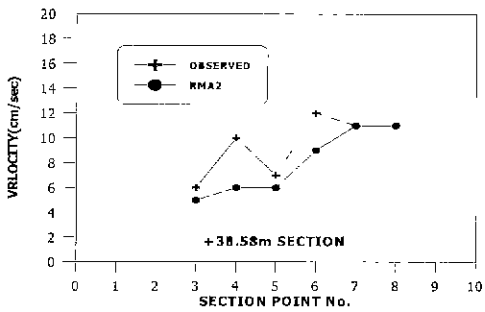


(c)

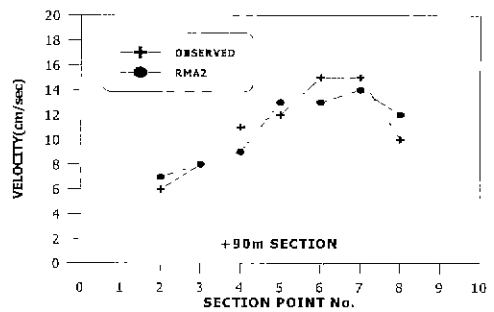


(d)

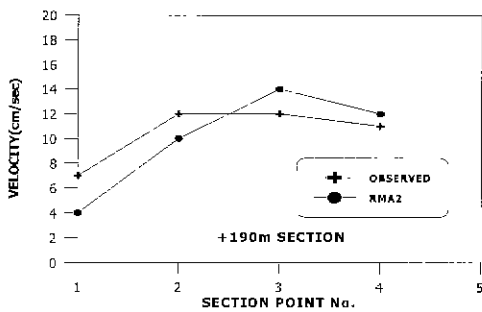
그림 3. 수리모형과 수치모형(RMA-2)의 단면 및 측정별 수심 비교



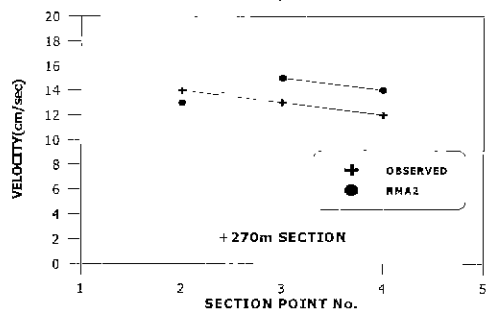
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. 수리모형과 수치모형(RMA-2)의 단면 및 측정별 유속 비교

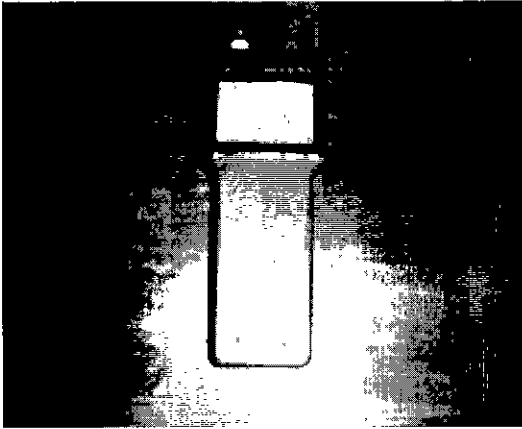


그림 5. 전도도계(Tmp Meter Model 41C)

Mcter Model 41C(Istek Co.) 전도도계를 사용하여 농도를 측정하였다. 이는 온도와 전도도를 동시에 측정할 수 있으며 자동기록장치가 부착되어있다. 전도도계는 5개 지점을 동시에 측정하기 위하여 5개를 준비하였고 중방향 확산계수를 측정하기 위해서 흐름방향으로 3개 지점에서 동시에 측정하였다. 또한 전도도는 온도에 따라서 그 값이 변화하므로 실험수로내의 물의 온도와 기계의 온도를 고려하여 실험을 실시하였다. 전도도계 기계간의 오차를 검정하여 각각 0.1% 오차범위 내에서 측정할 수 있도록 조정하였다.

본 연구에서 사용된 수리모형은 홍수시 흐름을 분석하기 위하여 제작된 수리모형으로 길이 52m, 폭이 5~6m에 해당한다. 그러나 갈수시를 대상으로 실험한 본 연구에서는 실제 흐름이 있는 난면 폭은 1.0~1.5m 정도이며, 좌·우안 부근의 유속은 극히 작은 상태이다. 전도도계의 민감도를 고려하여 Rhodamine B 용액의 농도를 5000mg/l, 10000mg/l, 20000mg/l로 변환시키고, 투입량을 1 l, 5 l, 10 l로 변화시키면서 예비실험을 실시하였다. Rhodamine B의 농도가 10000 mg/l이고, 투입량은 10 l를 선택하고 육안으로 수로 폭의 90% 정도가 분홍색으로 변화되면, 이를 완전혼합으로 가정하였다. 완벽한 완전 혼합 상태를 유지할 수는 없었으나 개략적인 확산계수의 추정에는 큰 무리가 없는 상태라고 판단되었다.

전도도의 측정위치는 그림 1과 같이 염료투여 지점으로부터 16.5m(X1 지점), 20.5m(X2 지점), 25.5m(X3 지점) 하류에 위치한다 측정 시간 간격은 전도도계의 민감도를 고려하고, 염료의 최대농도를 산

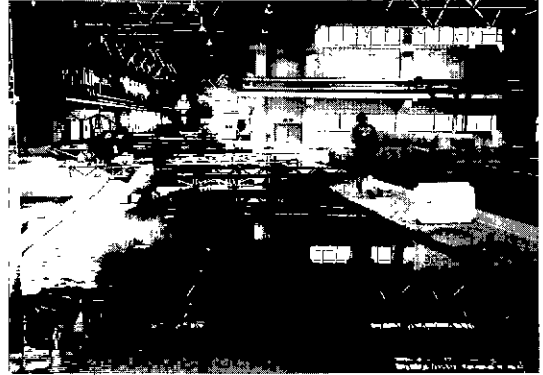


그림 6. 확산실험 전경

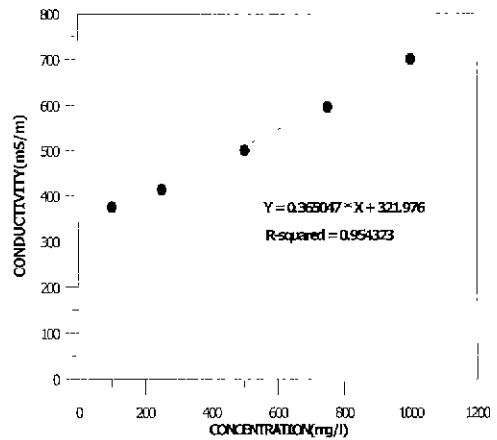


그림 7. Rhodamine B의 농도-전도도 상관관계 곡선

정하기 위하여 1~5초로 선택하였고, 실험시의 물의 온도는 평균적으로 19°C 정도였다.

그림 6은 확산실험 전경이며, 그림 7은 전도도로부터 농도를 예측하기 위하여 사용된 농도와 전도도 곡선이다

4. 실험결과

수리모형 실험으로부터 시간에 따른 Rodamine B의 전도도 변화를 측정하였고, 측정된 시간-전도도의 결과로부터 그림 7의 관계를 이용하여 농도를 계산하였으며, 시간-농도의 관계곡선은 그림 8과 같다. 그림 8의 시간-농도곡선의 실험결과와 식 (5)를 이용하여 $1/\sqrt{t_p}$ 와 관측된 최고 농도를 도식화하여 종확산계

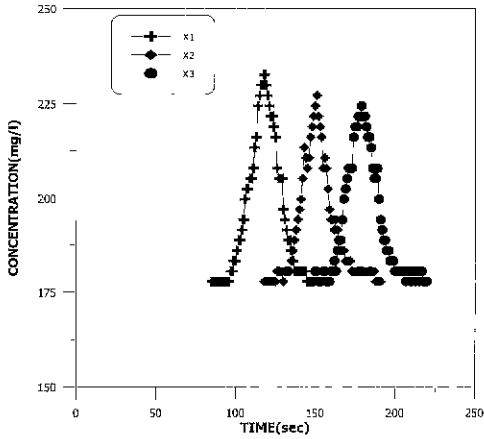


그림 8. 농도-시간 곡선

수 E_x 를 구한 값과 이를 실제 하천 조건으로 Frode 상사법칙을 이용하여 환산한 값을 표 3에 나타내었다

표 3. 수리모형 및 자연하천으로 환산된 종확산계수

수리모형		자연하천	
유량 (l/sec)	종확산계수 (m ² /sec)	유량 (m ³ /sec)	종확산계수 (m ² /sec)
28	0.114	50	10.2

표 4. 종확산계수의 실측치와 경험식의 비교

종확산계수 측정치	경험식	수리모형 실측치 (m ² /sec)	자연하천 환산치 (m ² /sec)	기본 자료
수리모형 실측치 (E_x) _m = 0.114 m ² /sec	Parker(1961) : $E_x = 14.28 R^{3/2} \sqrt{2gS}$	0.041	3.67	실험실
	McQuivey와 Keefer(1974) : $E_x = 0.058 d U / S$	0.441	39.45	자연하천
	Fisher(1975) : $E_x = 0.011 U^2 B^2 / (d U^*)$	0.725	64.85	자연하천
	Liu(1977) : $E_x = 0.18 (U^* / U)^{1.5} (U^2 B^2) / (d U^*)$	1.34	119.86	자연하천
자연하천 환산치 (E_x) _p = 10.2 m ² /sec	Magazine(1988) : $E_x = 75.86 (0.4U / U^*)^{-1.632} R U$	0.275	24.6	자연하천
	Iwasa와 Aya(1991) : $E_x = 2.0 (B/d)^{1.5} d U^*$	1.15	102.86	자연하천 실험실
	Seo와 Cheong(1998) : $E_x = 5.915 (B/d)^{0.62} (U / U^*)^{1.426} d U^*$	0.94	84.08	자연하천

5. 비교 및 고찰

종확산계수 E_x 를 이론적으로 결정하는 방법은 Taylor(1954)에 의해서 처음 제안되었으며, 그 이후에 자연하천에서의 종확산계수를 추정하기 위하여 많은 식이 제안되었다(서일원과 정태성, 1999). 종확산계수를 추정하는 많은 경험식중 비교적 사용빈도가 높고 적용이 용이하고 이론적인 배경이 확고한 공식들과 수리모형에서 측정된 종확산계수를 비교한 결과는 표 4와 같다. 표 4에서의 같이 실측치와 경험식들의 산정값과 비교한 결과 Parker(1961) 식에 의해 산정된 값은 실측값에 비해 작게, Liu(1977) 및 Iwasa와 Aya(1991) 식에 의해 산정된 값은 실측값보다 크게 산정되었으며, McQuivey와 Keefer(1974), Fischer(1975), Magazine 등(1988) 및 Seo와 Cheong(1998) 식에 의해 산정된 값은 비교적 실험치와 근사한 값을 나타내고 있다.

표 5. 현장 실측치와의 비교

하천 명	중랑천	Clinch River	Wind/Bighorn Rivers
유량(m ³ /sec)	50	50.94	57.87
폭(m)	62.56	53.34	59.41
수심(m)	1.44	2.1	1.1
평균유속(m/sec)	0.519	0.46	0.88
전단유속(m/sec)	0.125	0.11	0.119
경사	0.0011	0.0006	0.0013
확산계수(m ² /sec)	10.2	46.5	41.81

Liu 식 및 Iwasa와 Aya 식은 B/d에 큰 영향을 받고 있으므로 국내 하천과 같이 갈수시 B/d 값이 큰 경우에는 과대 산정될 가능성이 크다고 생각된다.

표 5는 국내에서는 확산계수의 현장 실험이 수행된 하천이 거의 없는 실정이어서 미국의 현장 실험 결과 중 중랑천의 유량조건과 수리량 조건이 비교적 유사한 하천이라 판단되는 Clinch River, Wind/Bighorn River의 실측치와 비교한 결과이다(Fischer, 1975). 수리모형의 값을 실제하천으로 환산한 값과 비교하면, Clinch River의 종확산계수 계산에는 추적방법(Routing method)을 사용하였기 때문에 직접비교 하기에는 어려움이 있으나, 비교적 근사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 윤용남 등(1994)은 한강하류부에서 종확산계수를 20.0m²/s를 사용하여 RMA-4 모형에 의한 계산치와 실측치가 비교적 일치한다고 발표한다. 그러나 실험시 양안에는 유속이 매우 느리기 때문에 완전혼합가정에 완전히 일치시키기 어려웠고, 전도도계들의 측정오차, 온도의 변화에 따른 농도의 변화, 모형 수로의 조도, 지류의 영향 무시 등에 관한 오차는 피하기가 어려웠으며 앞으로 이들에 관한 지속적인 보완방법이 연구되어야 한다.

6. 결 론

본 연구에서는 중랑천 하류부에서 종확산계수를 추정하기 위하여 축척 1:20인 정상 모형을 사용하였다. 수리모형에서 추정된 수리량은 RMA-2 모형에 의한 계산치와 비교적 잘 일치하고 있었다. 실험에 사용된 염료는 Rhodamine B 용액이며, 전도도를 측정하고 이를 농도로 환산하였다. 최대농도와 최대농도 도달시간의 관계로부터 종확산계수를 계산하였다. 수리모형에서 계산된 종확산계수는 Froude 상사법칙을 이용하여 자연하천으로 환산하였다.

중랑천 하류부에서 종확산계수는 10m²/s정도로 추정되었으며, Clinch강과 Wind/Bighorn강에서의 현장 실측치와 비교적 일치하고 있었다. Parker(1961)의 경험식으로 산정된 값은 실측치에 비해 작게 계산되었고, Liu(1977) 식 및 Iwasa와 Aya(1991)의 경험식에 의해 산정된 값은 10배 이상 크게 계산되었다. 하천특성의 변화, 실험의 오차 등을 감안한다면 McQuivey와 Keefer(1974), Fischer(1975), Magazine 등(1988) 및 Seo와 Cheong(1998)의 경험식은 실무에 사용되는데 큰 무리가 없다고 판단된다.

앞으로 우리나라의 자연하천에서 종확산계수에 관한 현장실측이 절실히 요구되며, 국내 하천 특성을 충분히 고려한 확산계수의 경험식이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 '98 특정기초 (2)세부과제(KOSEF 98-0601-04-01-3)의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 감사 드린다.

참 고 문 헌

- 강주복, 박상길, 김원규, 김종화 (1990). "불규칙한 자연하천에서 오염물질의 횡확산." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제23권, 제2호, pp 213~225.
- 김주영, 이정규 (1999). "수정특성곡선법을 이용한 2차원 이송-확산방정식의 수치모형" 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 대한토목학회, pp. 223~226.
- 대한토목학회 (1999). "서울지하철 6, 7호선 침수사고 원인분석연구 보고서." 대한토목학회
- 서일원, 정태성 (1994). "자연하천에서의 종확산계수 추정식 개발." 대한토목학회 학술발표회 논문집

- (II), 대한토목학회, pp. 101~104.
- 서일원, 정태성 (1995). "중확산계수에 관한 연구: I. 현존 중확산계수 추정식 비교" 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제28권, 제3호, pp. 205~216.
- 서일원, 정태성 (1999). "2차원 Random-Walk 모형을 이용한 자연하천에서의 횡확산 해석." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제1호, pp. 61~70.
- 윤세의, 이종태, 한정석, 김정수 (1999). "수리모형을 이용한 중확산계수 측정." 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 대한토목학회, pp. 235~238
- 윤용남, 김중훈, 박무중 (1994). "RMA-4에 의한 한강하류부에서의 오염물 확산이송 특성연구." 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, pp. 89~92.
- 이시진, 윤세의, 박석순 (1993) 수질모형과 관리. 등화기술.
- 한건연, 김상호, 박제홍 (1999). "Petrov-Galerkin 기법에 의한 오염물의 2차원 이송-확산 해석." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 547~552.
- 한건연, 김상호 (1999). "하천에서의 오염된 지류유입에 의한 2차원 수질모의." 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 대한토목학회, pp. 207~210.
- Abd El-Hadi, N.D., and Daver, K.S. (1976). "Longitudinal dispersion for over rough beds." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 102, No. HY4, pp. 483~498.
- Asai, K., Fujisaki, K., and Awaya, Y. (1991) "Effect of aspect ratio on longitudinal dispersion coefficient." *Proceeding of the International Symposium on Environmental Hydraulics*, pp 93~498.
- Bansal, M.K (1971). "Dispersion in natural streams." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 97, No. HY11, pp. 1867~1866
- Chatwin, P.C. (1971). "On the interpretation of some longitudinal dispersion experiments" *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 48, pp. 689~702
- Chatwin, P.C., and Sullivan, P.J. (1982). "The effect of ratio on longitudinal diffusivity in rectangular channels." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 120, pp. 347~358.
- Day, T.J. (1975) "Longitudinal dispersion in natural channels." *Water Resource Research*, Vol. 1, No. 6, pp 909~918
- Elder, J.W. (1959) "The dispersion of a marked fluid in turbulent shear flow." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 4, pp. 544~560.
- Fischer, H.B. (1967). "The mechanics of dispersion in natural streams." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 93, No. HY6, pp. 187~216.
- Fischer, H.B (1968) "Dispersion predictions in natural streams." *Journal of Sanitary Engineering Division*, ASCE, Vol. 94, No. SA5, pp. 927~943.
- Fischer, H.B., and Holly, E.R. (1971). "Analysis of the use of distorted hydraulics models for dispersion studies", *WRR*, Vol. 7, No. 1, pp. 45~51.
- Fischer, H.B. (1975) Discussion of "Simple method for predicting dispersion in streams." by McQuivey, R.S., and Keefer, T.N., *Journal of Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 101, EE3, pp. 453~455.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brook, N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, New York, N.Y
- Glover, R.E. (1964) *Dispersion of dissolved and suspended materials in flowing streams*. United State Geological Survey Professional Paper 433-B, Washington, D.C.
- Godfrey, R.G., and Frederck, B.J. (1970) *Stream dispersion at selected sites*. United State Geological Survey Professional Paper 433-K, Washington, D.C
- Iwasa, Y., and Aya, S. (1991). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows." *Proceeding of the International Symposium on Environmental*

Hydraulics, pp 505-510.

- Liu, H (1977). "Predicting dispersion coefficient of stream." *Journal of Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 100, No. EE4, pp. 997~1011.
- Magazine, M.K, Pathak, S.K., and Pande. P.K (1988). "Effect of bed and side roughness on dispersion in open channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. Vol. 114, No. 7, pp. 766~782.
- McQuivey, R.S., and Keefer, T.N. (1974). "Simple method for predicting dispersion in streams." *Journal of Environmental Engineering Division*, ASCE. Vol. 100, No. EE4, pp 997~1011.
- Parker, F.L. (1961) "Eddy diffusion in reservoirs and pipelines." *Journal of Hydraulics Division*. ASCE, Vol. 87, No. HY3, pp. 151~171.
- Sco, I.W. and Cheong, T.S. (1998). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol, 124, No. 1, pp. 25~32.
- Sooky. A.A. (1969). "Longitudinal dispersion in open channels." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 95, No. HY4, pp. 1327~1346.
- Taylor, G.I. (1954). "Dispersion of matter in turbulent flow through a pipe." *Journal of Proceedings of the Royal Society. Series A.*, London, England, Vol. 223, pp. 446~468

(논문번호 99-098/접수:1999.12.22/심사완료 2000 04 26)