大韓環境工學會誌 · 論文 - Original Paper - pp. 1168～1179. 2006.

비정상상태 하천흐름에서 오염물질 혼합 수치모형의 신뢰성 평가

문 형 부

전남대학교 건설환경공학부

(2006년 8월 14일 접수, 2006년 11월 16일 채택)

Validation of an Unsteady Two-dimensional Hydrodynamic and Transport Model with Experiments

Hyoung-Bu Moon

Department of Civil and Environmental System Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT : The validity of an unsteady two-dimensional(2-D) numerical hydrodynamic and pollutant dispersion model(2DNHPDM) was evaluated using the data obtained from I-sa streams in Soocheon, Chonnam, during rain-fall run-off. Field observations was conducted for 35 hours during the 10 hours rainfall event on 7th May 2005. The water level, 2-D velocity, flow field, and COD at seven points selected along the river were measured at intervals of one hour. The model was applied to describe two-dimensional movement of dissolved pollutants in meandering non-uniform river. Major physical processes affecting the lateral and horizontal mixing of the river flow were simulated. The model was proved effective in describing the hydrodynamics and dispersion of the river pollutants from its major tributaries as well as non-point sources.

Key Words : *Unsteady Flow, Validity, Non-Point Sources, 2DNHPDM, Lateral and Horizontal Dispersion Coefficient*

요약 : 비정상상태인 하천의 흐름에 대한 물질 분산의 수치모형(2DNHPDM)을 실제의 강우유출시, 전남 순천 이사천에서 관측된 자료를 적용하여 해석의 신뢰성을 검토했다. 2005년 5월 7일 10시간 지속된 강우사상에 대하여 관측은 35시간 이루어졌다. 하천 내의 일곱 지점을 선정하여, 수위, 유속, 유량, COD를 1시간 간격으로 측정하였다. 제작된 모형을 자연 하천에 적용하여 비정상상태의 흐름을 재현할 수 있었으며, 하천 흐름의 종횡방향 혼합에 영향을 미치는 물리적 과정이 모의되었다. 지천에서의 유입부하 및 비점오염원의 유입부하에 대한 하천의 오염물질 혼합에 대해서도 모형을 적용한 결과, 양호한 재현성을 확인할 수 있었다.

주제어 : 비정상 하천흐름, 신뢰성, 비점원, 2DNHPDM, 종횡방향 분산계수

1. 서 론

강우 유출에 의한 하천에서 오염물질의 이동에 대한 해석은 흐름의 종방향 혼합과 하천의 측방향 유입으로 인한 횡방향 혼합을 동시에 고려하여야 한다. 특히 비점오염원으로부터 유출하는 오염물질의 이동 및 혼합에 관한 해석에서는 강우시의 하천유출, 즉 비정상상태의 하천 흐름을 해석해야만 한다.

문과 야마다[1]은 강우시 비점오염원으로부터 하천에 유입하는 오염물질의 부하를 계산할 수 있는 이차원 하천 수질모형의 필요성을 설명하고, 비정상상태의 하천 흐름을 재현할 수 있는 수치 모형(2DNHPDM)을 개발했다. 본 연구의 목적은 2DNHPDM이 다수의 비점오염원으로부터 비정상적으로 유입하는 하천에서 오염물질의 시간 및 공간적 농도분포, 그리고 유속과 수위의 변화를 어느 정도 수준으로 모의할 수 있는지, 그 신뢰성을 검토하는 것이다. 또한 비정상상태의 하천 흐름에서 이차원 분산계수의 산정에 대한 새로운 계산방법을 제시하고자 한다.

† Corresponding author
E-mail: moonhb@yosu.ac.kr
Tel: 061-659-3261 Fax: 061-653-8655

2. 물질분산의 이차원 유한차분모형

2.1. 지배방정식

본 연구에서는 문과 야마다[1]가 개발한 수치모형을 사용했다. 모형의 지배방정식[2]은 Fig. 2와 같이 직교좌표계를 채용하고 수심방향으로 적분된 다음과 같은 운동량방정식 식 (1)과 식 (2), 연속방정식 식 (3), 질량평형방정식 식 (4)이다.

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}+g\frac{\partial \xi}{\partial x}+g\frac{U(U^2+V^2)^{1/2}}{C^2H}=0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}+g\frac{\partial \xi}{\partial y}+g\frac{V(U^2+V^2)^{1/2}}{C^2H}=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t}+\frac{\partial (HU)}{\partial x}+\frac{\partial (HV)}{\partial y}=0 \quad (3)$$

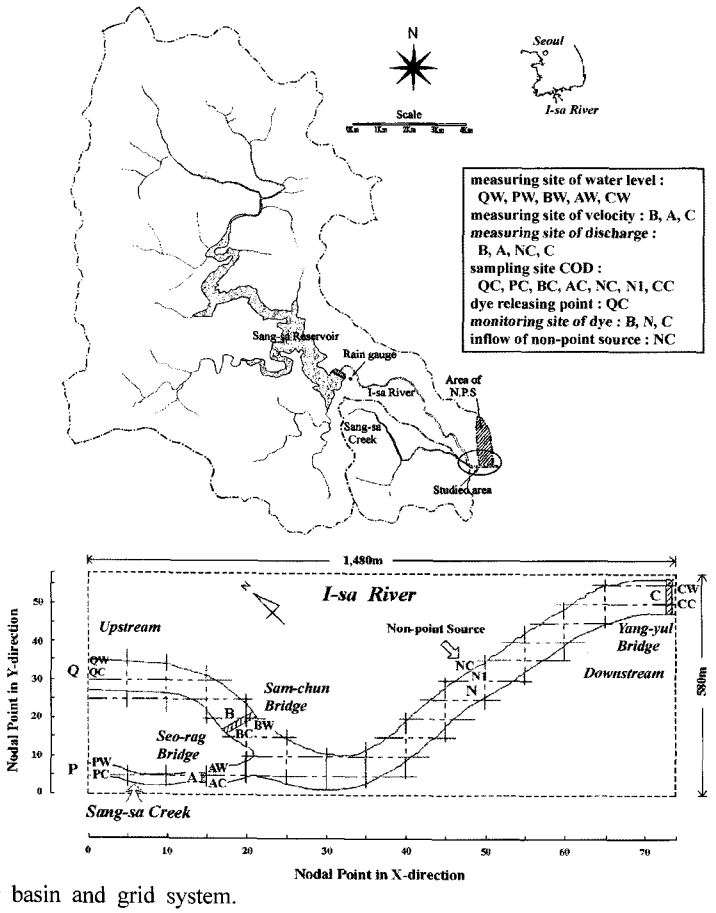

Fig. 1. Layout of I-sa River basin and grid system.

$$\frac{\partial(HP)}{\partial t}+\frac{\partial(HUP)}{\partial x}+\frac{\partial(HVP)}{\partial y}+HS=$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(HD_x\frac{\partial P}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(HD_y\frac{\partial P}{\partial y}\right) \quad (4)$$

여기서 U = x방향 유속
V = y방향 유속
C = Chezy 계수
H = h + ξ
P = 오염물질의 농도
D_x, D_y = x, y방향 분산계수
S = Source항

하천의 측방에서 유입하는 점원 및 비점오염원에서의 부하는 이 source항에 주어진다.

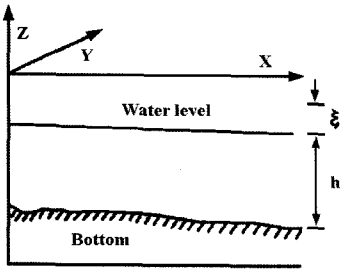

Fig. 2. Coordinate system.

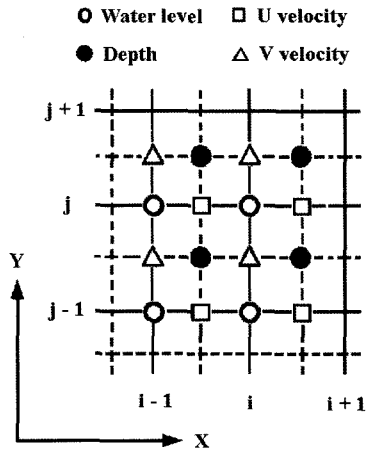

Fig. 3. Space-staggered scheme.

2.2. 수치해석

2.2.1. 공간 및 시간적 계산

지배방정식의 수치해석은 유한차분을 이용하였으며 프로그램 언어는 FORTRAN을 사용하였다. Peaceman과 Rachford[3]는 임의의 큰 시간 증분을 수용할 수 있으며, 방물형 방정식에 대해 효과적인 ADI법을 제시했다. 이 ADI법은 비압축성 흐름의 해석에 이용되는 여러 방법 들 중에서 가장 일반적인 방법이라고 생각된다. 본 연구에서도 지배방정식의 이산화에는 ADI법 중, 실제 많은 적용을 통해 해의 안정성이 검증된

Crank-Nicolson法[4]를 활용하였다. 공간 좌표에서의 변수인 유속, 수위, 농도는 Platzman[5]에 의해 처음 사용되었던 Fig. 3과 같은 격자를 이용해서 계산되었다. 본 계산에서의 농도는 수위와 같은 위치이며, (i, j)의 정수 격자점에서 계산하고, 유속 u는 (i)의 반정수 격자점과 (j)의 정수 격자점에서, 유속 v는 (i)의 정수 격자점과 (j)의 반정수 격자점에서 계산하였다.

Liu와 Leendertse[2]는 시간의 증분인 Δt를 두 단계로 나누어 차분화하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서도 시간 step의 증분, Δt를 2등분해서 차분식으로 표현하였다.

격자점(i, j), 시간(n)에서의 계산변수 F를 다음과 같이 정의한다.

$$F = F(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t)$$

여기서 $(x,y,t)=(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t)$ 및 $i,j,t = 0,\pm1/2,\pm1,\pm3/2 \cdots$ 이다.

계산변수 F에 대한 공간적인 평균과 차 및 시간적인 평균과 차를 다음과 같이 쓴다.

$$\overline{F}^{x} = 1/2\{F[(i+1/2)\Delta x, j\Delta y, n\Delta t] + F[(i-1/2)\Delta x, j\Delta y, n\Delta t]\} \quad (5)$$

$$\delta_x F = 1/\Delta x\{F[(i+1/2)\Delta x, j\Delta y, n\Delta t] - F[(i-1/2)\Delta x, j\Delta y, n\Delta t]\} \quad (6)$$

$$\overline{F}^{xy} = 1/4\{F[(i+1/2)\Delta x,(j+1/2)\Delta y,n\Delta t] + F[(i+1/2)\Delta x,(j-1/2)\Delta y,n\Delta t] + F[(i-1/2)\Delta x,(j+1/2)\Delta y,n\Delta t] - F[(i-1/2)\Delta x,(j-1/2)\Delta y,n\Delta t]\} \quad (7)$$

$$\delta_{(1/2)t} F = 2/\Delta t\{F[i\Delta x, j\Delta y,(n+1/2)\Delta t] - F[i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t]\} \quad (8)$$

$$F_+ = F[i\Delta x, j\Delta y,(n+1/2)\Delta t] \quad (9)$$

$$F_- = F[i\Delta x, j\Delta y,(n-1/2)\Delta t] \quad (10)$$

여기서는 x만 표기하였으나, y와 t에 대해서도 x와 같은 방법으로 표기할 수 있다. 위 식들을 이용해서 운동량방정식, 연속방정식 및 질량평형방정식을 다음과 같이 1단계와 2단계로 나누어 표기하였다.

1단계 :

격자점(i+1/2, j), 시간(n)에서 운동량방정식 :

$$\delta_t U + U_+ \overline{\delta_x U_-}^{x} + V \overline{\delta_y U_-}^{y} + g\,\overline{\delta_x \xi}^{t} + g\frac{\overline{U}^{t}\left[(U_-)^2 + (\overline{V}^{xy})^2\right]^{1/2}}{(\overline{h}^{y} + \overline{\xi}^{x})(\overline{C}^{x})^2} = 0 \quad (11)$$

격자점(i, j), 시간(n)에서 연속방정식 :

$$\delta_{(1/2)t}\xi + \delta_x\left[(\overline{h}^{y} + \overline{\xi}^{x})U_+\right] + \delta_y\left[(\overline{h}^{x} + \overline{\xi}^{y})V\right] = 0 \quad (12)$$

격자점(i, j), 시간(n)에서 질량평형방정식 :

$$\delta_{(1/2)t}[P(\overline{h}^{xy} + \xi)] + \delta_x[(\overline{h}^{y} + \overline{\xi}^{x})U_+ \overline{P_+}^{x}] + \delta_y[(\overline{h}^{x} + \overline{\xi}^{y})V\,\overline{P}^{y}] - \delta_x[(\overline{h}^{y} + \overline{\xi_+}^{x})D_x\delta_x P_+] - \delta_y[(\overline{h}^{x} + \overline{\xi}^{y})D_y\delta_y P] + (\overline{h}^{xy} + \xi)S = 0 \quad (13)$$

2단계 :

격자점(i+1/2, j), 시간(n+1/2)에서 운동량방정식 :

$$\delta_t V + U\,\overline{\delta_x V_-}^{x} + V_+ \overline{\delta_y V_-}^{y} + g\,\overline{\delta_y \xi}^{t} + g\frac{\overline{V}^{t}\left[(\overline{U}^{xy})^2 + (V_-)^2\right]^{1/2}}{(\overline{h}^{x} + \overline{\xi}^{y})(\overline{C}^{y})^2} = 0 \quad (14)$$

격자점(i, j), 시간(n+1/2)에서 연속방정식 :

$$\delta_{(1/2)t}\xi + \delta_x[(\overline{h}^{y} + \overline{\xi}^{x})U] + \delta_y[(\overline{h}^{x} + \overline{\xi}^{y})V_+] = 0 \quad (15)$$

격자점(i, j), 시간(n+1/2)에서 질량평형방정식 :

$$\delta_{(1/2)t}[P(\overline{h}^{xy} + \xi)] + \delta_x[(\overline{h}^{y} + \overline{\xi}^{x})U\,\overline{P}^{x}] + \delta_y[(\overline{h}^{x} + \overline{\xi}^{y})V_+ \overline{P_+}^{y}] - \delta_x[(\overline{h}^{y} + \overline{\xi}^{x})D_x\delta_x P] - \delta_y[(\overline{h}^{x} + \overline{\xi_+}^{y})D_y\delta_y P_+] + (\overline{h}^{xy} + \xi)S = 0 \quad (16)$$

식 (11)과 (12)에는 격자좌표의 j선(y축 방향 j번째의 격자점을 통한 x축과 평행한 선)에 2단계의 변수 3개가 포함되어 있다. 따라서 식 (11)과 (12)를 연립방정식으로 다시 쓰고, matrix형으로 표현하면 다음 식과 같이 된다.

$$[A]\{F\} = \{B\} \quad (17)$$

여기서 벡타 {F}에는 2단계에서 계산될 x방향 유속 U와 수위 ξ, 벡타 {B}에는 1단계 및 1단계의 전단계에서의 계산값 등이 포함되어 있다. 식 (11)과 (12)에는 2단계에서 계산될 3개의 미지수가 포함되어 3차 대각행렬이 된다. 따라서, 각 단계마다 경계조건으로 수위와 유속값을 벡타 {F}의 성분으로 주게 되면, j선 상의 유속 U, V와 수위 ξ는 미지수의 소거에 의해 구할 수 있게 된다.

먼저, 1단계[시간 t에서 t+(1/2)Δt로 진행]에서 운동량방정식 식 (11)과 연속방정식 식 (12)에 의해 얻어진 각 격자점의 x방향 유속 U와 수위 ξ를 질량평형방정식 식 (13)에 대입해서 물질의 농도 P를 구한다. 경계조건으로 상류로부터의 부하량 및 점오염원, 비점오염원으로부터의 유입부하량을 부여한다. 다음, 각 격자점에서 반응 matrix항은 각 격자점 전후의 유속, 수위 및 농도를 번갈아 이용함으로서 계산이 진행된다. 이와 같은 과정에 의해 구한 값은 다음 2단계에서의 미지수를 구하는데 활용된다.

다음, 2단계[시간 t+(1/2)Δt에서 t+Δt로 진행]에서는 1단계와 같은 방법으로 운동량방정식 식 (14) 및 연속방정식 식 (15)에 의해 얻어진 각 격자점의 y방향 유속 V와 수위 ξ를

질량평형방정식 식 (16)에 대입하여, 물질의 농도 P를 구한다. 여기서는 수위 ξ와 농도 P는 한 시간 step, 즉 한번의 Δt에 있어서 1단계와 2단계, 두 번 계산된다. 이것은 강우시 급변하는 수위를 짧은 시간 step으로 계산하는 것이 되지만, computer의 계산시간은 증가한다. 반면, 수위를 계산하는 시간 간격은 작게 되어 양호한 계산 정도를 얻을 수 있다. 이와 같은 과정을 전시간에 걸쳐 반복 진행한다.

2.2.2. 운동량 및 연속방정식의 차분식

1단계에서의 운동량방정식

격자점(i+1/2, j)에서

$$\frac{1}{\Delta t}\left(U_{i+1/2,j}^{n+1/2}-U_{i+1/2,j}^{n-1/2}\right)+\left(U_{i+1/2,j}^{n-1/2}-U_{i-1/2,j}^{n-1/2}\right)U_{i+1/2,j}^{n+1/2}\frac{1}{2\Delta t}+$$

$$\left(U_{i+1/2,j+1}^{n-1/2}-U_{i+1/2,j-1}^{n-1/2}\right)\frac{\overline{V^{xy}}}{2\Delta y}+\left(\xi_{i+1,j}^{n+1/2}-\xi_{i,j}^{n+1/2}+\xi_{i+1,j}^{n-1/2}-\xi_{i,j}^{n-1/2}\right)$$

$$\frac{g}{2\Delta x}+\frac{\frac{g}{2}\left(U_{i+1/2,j}^{n+1/2}+U_{i+1/2,j}^{n-1/2}\right)\left[\left(U_{i+1/2,j}^{n-1/2}\right)^2+\left(\overline{V^{xy}}\right)^2\right]^{1/2}}{\left(\overline{h^y}+\overline{\xi^x}\right)\left(\overline{C^x}\right)^2}=0 \quad (18)$$

1단계에서의 연속방정식

격자점(i, j)에서

$$\frac{2}{\triangle t}\left(\xi_{i,j}^{n+1/2}-\xi_{i,j}^{n}\right)+\left[\left(h_{i-1/2,j+1/2}+h_{i-1/2,j-1/2}+\xi_{i-1,j}^{n}+\xi_{i,j}^{n}\right)U_{i+1/2,j}^{n+1/2}\right.$$

$$\left.-\left(h_{i-1/2,j+1/2}+h_{i-1/2,j-1/2}+\xi_{i-1,j}^{n}+\xi_{i,j}^{n}\right)U_{i-1/2,j}^{n+1/2}\right]\frac{1}{2\Delta x}$$

$$+\left[\left(h_{i+1/2,j+1/2}+h_{i-1/2,j+1/2}+\xi_{i,j+1}^{n}+\xi_{i,j}^{n}\right)V_{i,j+1/2}^{n}\right.$$

$$\left.-\left(h_{i+1/2,j-1/2}+h_{i-1/2,j-1/2}+\xi_{i,j}^{n}+\xi_{i,j-1/2}^{n}\right)V_{i-1/2,j}^{n}\right]\frac{1}{2\Delta y}=0 \quad (19)$$

2단계도 위와 같이 표기할 수 있다.

2.2.3. 질량평형방정식의 차분식

1단계에서의 질량평형방정식

격자점(i+1/2, j))에서

$$\left[P_{i,j}^{n+1/2}\left(h_{i-1/2,j-1/2}+h_{i-1/2,j+1/2}+h_{i+1/2,j-1/2}+h_{i+1/2,j+1/2}+4\xi_{i,j}^{n+1/2}\right)\right.$$

$$\left.-P_{i,j}^{n}\left(h_{i-1/2,j-1/2}+h_{i-1/2,j+1/2}+h_{i+1/2,j-1/2}+h_{i+1/2,j+1/2}+4\xi_{i,j}^{n}\right)\right](1/2)\Delta t$$

$$-\left[\left(\xi_{i-1,j}^{n}+\xi_{i,j}^{n}+h_{i-1/2,j-1/2}+h_{i-1/2,j+1/2}\right)U_{i-1/2,j}^{n+1/2}\left(P_{i-1,j}^{n+1/2}+P_{i,j}^{n+1/2}\right)\right.$$

$$\left.-\left(\xi_{i,j}^{n}+\xi_{i+1,j}^{n}+h_{i+1/2,j-1/2}+h_{i+1/2,j+1/2}\right)U_{i+1/2,j}^{n+1/2}\left(P_{i,j}^{n+1/2}+P_{i+1,j}^{n+1/2}\right)\right](1/4)\Delta x$$

$$-\left[\left(\xi_{i,j-1}^{n}+\xi_{i,j}^{n}+h_{i-1/2,j-1/2}+h_{i+1/2,j-1/2}\right)V_{i,j-1/2}^{n}\left(P_{i,j-1}^{n}+P_{i,j}^{n}\right)\right.$$

$$\left.-\left(\xi_{i,j}^{n}+\xi_{i,j+1}^{n}+h_{i-1/2,j+1/2}+h_{i+1/2,j+1/2}\right)V_{i,j+1/2}^{n}\left(P_{i,j+1}^{n}+P_{i,j}^{n}\right)\right](1/4)\Delta x$$

$$+\left[\left(\xi_{i-1,j}^{n+1/2}+\xi_{i,j}^{n+1/2}+h_{i-1/2,j-1/2}+h_{i-1/2,j+1/2}\right)\left(D_x\right)_{i-1/2,j}^{n+1/2}\left(P_{i,j}^{n+1/2}-P_{i-1,j}^{n+1/2}\right)\right.$$

$$\left.-\left(\xi_{i,j}^{n+1/2}+\xi_{i+1,j}^{n+1/2}+h_{i+1/2,j-1/2}+h_{i+1/2,j+1/2}\right)\left(D_x\right)_{i+1/2,j}^{n+1/2}\left(P_{i+1,j}^{n+1/2}-P_{i,j}^{n+1/2}\right)\right][(1/2)(\Delta x)^2]$$

$$+\left[\left(\xi_{i,j-1}^{n}+\xi_{i,j}^{n}+h_{i-1/2,j-1/2}+h_{i+1/2,j-1/2}\right)\left(D_y\right)_{i,j-1/2}^{n}\left(P_{i,j}^{n}-P_{i,j-1}^{n}\right)\right.$$

$$\left.-\left(\xi_{i,j}^{n}+\xi_{i,j+1}^{n}+h_{i-1/2,j+1/2}+h_{i+1/2,j+1/2}\right)\left(D_y\right)_{i,j+1/2}^{n}\left(P_{i,j+1}^{n}-P_{i,j}^{n}\right)\right][(1/2)(\Delta y)^2]$$

$$+\left(h_{i+1/2,j+1}+h_{i+1/2,j-1/2}+h_{i-1/2,j+1/2}+h_{i-1/2,j-1/2}+4\xi_{i,j}^{n}\right)\left(S_{i,j}^{n}/4\right)=0 \quad (20)$$

2단계도 위와 같이 표기할 수 있다. 위 式에서 $P_{j,j}^{n+1/2}$는 시간 n+1/2에서, 격자점(i, j)에서의 농도이다. 분산계수 D_x, D_y와 물질 발생원 S는 공간과 시간에 대한 함수이며, 식 (20)에서 미지의 값은 3개로서, $P_{i,j}^{n+1/2}$, $P_{i-1,j}^{n+1/2}$ 및 $P_{i+1,j}^{n+1/2}$이다.

3. 분산계수의 산정 및 현장관측실험

본 연구에서는 아직 개발되지 않고, 농지와 산림이 대다수인 이사천 유역을 대상으로 했다(Fig. 1 참조). 현장관측 지역에는 상사천이 이사천에 유입하는 합류부가 있으며, 상류와 하류에 교량이 있어 간이표척을 설치하기가 용이했다. 또한 Fig. 1의 NC로 표시된 농업용수로에 의해, 비점오염원의 유입을 측정할 수 있었다.

Table 1. Experimental Measurements of Hydraulics Conditions at Site A, B, N, C(2005. 5. 6. base flow, dry weather)

Site	Section	Depth (m)	Mean Depth (m)	Point Velocity (m/sec)			Mean+ Velocity (m/sec)	Area++ (m^2)	Discharge (m^3/sec)
				$d_{0.2}$*	$d_{0.8}$**	Mean			
A	A1	0.80	0.80	0.166	0.145	0.157	0.157	16.00	2.51
	A2	0.80		0.166	0.145	0.157			
B	B1	0.67	0.94	0.153	0.153	0.153	0.191	56.40	10.77
	B2	0.87		0.203	0.201	0.202			
	B3	0.94		0.233	0.204	0.219			
	B4	0.97		0.234	0.184	0.209			
	B5	1.12		0.213	0.178	0.196			
	B6	1.07		0.175	0.154	0.165			
N	NC	0.34	1.31	0.089	0.089	0.089	0.122	111.71	13.63
	N2	1.48		0.111	0.021	0.066			
	N3	1.11		0.142	0.121	0.132			
	N4	1.45		0.210	0.097	0.154			
	N5	1.82		0.148	0.110	0.129			
	N6	1.80		0.152	0.111	0.132			
	N7	1.90		0.160	0.126	0.143			
	N8	1.58		0.154	0.114	0.134			
C	C1	0.35	1.32	0.087	0.087	0.087	0.110	119.70	13.17
	C2	0.45		0.091	0.091	0.091			
	C3	1.10		0.136	0.115	0.126			
	C4	1.40		0.091	0.067	0.079			
	C5	1.80		0.136	0.078	0.107			
	C6	1.80		0.123	0.089	0.106			
	C7	1.90		0.153	0.104	0.129			
	C8	1.70		0.156	0.121	0.139			
	C9	1.40		0.154	0.092	0.123			

* $d_{0.2}$: Current velocity measured at 0.2 m bellow of water surface

** $d_{0.8}$: Current velocity measured at 0.8 m bellow of water surface

+ Mean : Mean of section's mean velocity

++ Area : Cross sectional area of the stream at each site

3.1. 염료실험

본 실험에서는 염료를 하천에 투입하고 하류방향으로 염료분산곡선을 작성해서 기저유출 상태에서의 분산계수를 산정했다. 염료를 하천의 흐름에 투입하는 방법은 염료를 추적자로 사용하므로, 하천의 어떤 구간에서의 평균 유송시간을 알 수 있다는 것과 실제 하천의 현장 실험이므로 대상 하천의 물질 이송을 대표할 수 있는 값을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

분산계수를 산정하기 위해 하천의 수심, 단면적, 유속 및 유량이 2005년 5월 6일에 관측되었다. 측정 지점은 Fig. 1에 표시한 A, B, N, C이고, 각 지점에서 관측된 하천의 횡단면은 Fig. 4와 같다. 유속과 유량의 측정결과를 Table 1과 같다. 염료의 방류위치는 QC, 시료 채취점은 B, N, C이다.

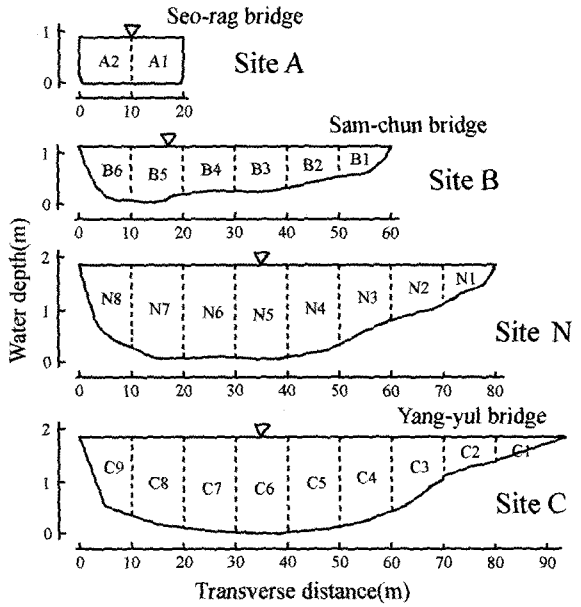

Fig. 4. Cross-section of site A, B, N and C.

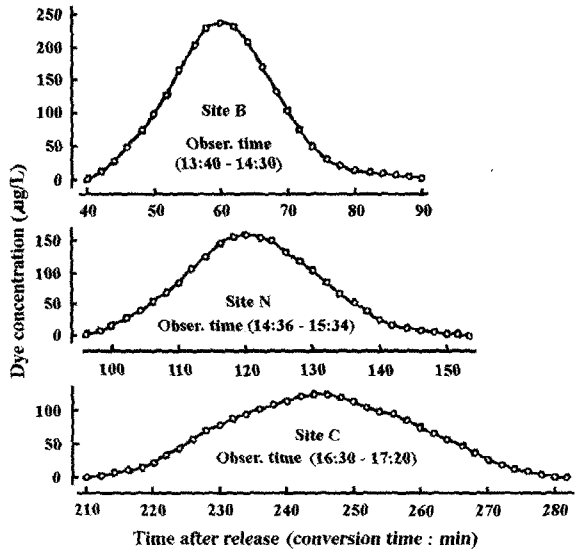

Fig. 5. Relative dye concentration of time after release.

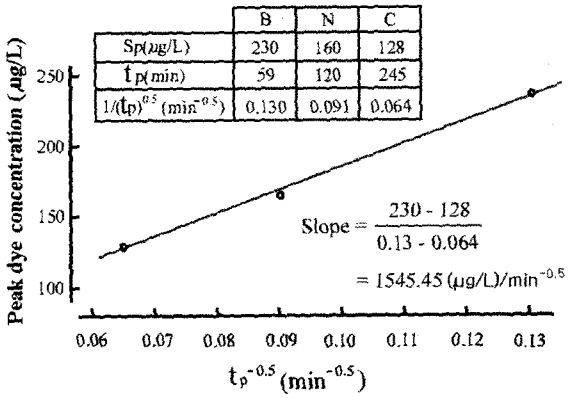

Fig. 6. Relative travel time of peak concentration.

QC부터 B점까지는 428.4 m, N점까지는 1,152.8 m, C점까지는 1,713.7 m이었다. QC에서 염료의 방류 시각은 13시 00분, 염료의 첨두농도의 발현시각은 B점에서 13시 59분, N점에서 15시 00분, C점에서 17시 05분이었다. 한편, QC부터 B점까지의 유송속도는 0.12 m/sec, N점까지는 0.16 m/sec, C점까지는 0.12 m/sec이었다.

시료를 채취한 시간간격과 염료의 농도변화를 Fig. 5에, 각각의 위치에서의 염료의 첨두농도와 시간과의 관계를 Fig. 6에 표시하였다. 이 그림에서 경사는 11,971.04(μg/L)/sec$^{-0.5}$이 얻어졌다. QC점에서 초기염료 투입량은 9.0 kg이었다.

3.2. 분산계수

초기의 분산계수의 실험적 연구는 Elder,[8] Sayre와 Chang,[9] Okoye[10] 등에 의하여 실험실 내에서 직선적인 수로를 이용하여 이루어졌다. 이들의 연구 결과를 토대로 다음 식 (21)과 같은 분산계수의 산정식이 제안되었다.[2]

$$D_y = \beta du^* \qquad D_x = \alpha du^* \tag{21}$$

여기서 D_y는 횡분산계수, D_x는 종분산계수, d는 수심, u^*는 전단속도이며, β와 α는 경험계수이다.

Fisher[11]는 기존의 연구 결과를 수집, 정리하고 식 (21)을 기본형으로하여, 자연 하천에 대해 다음과 같은 식 (22)을 제안하였다.

$$D_y/du^* = 0.6 \pm 50\% \tag{22}$$

본 연구에서는 β값으로 0.6을, u^*는 Table 1의 값을 이용해서 계산된 0.054 m^2/sec을 사용했다.

한편, Fischer[6]는 종분산계수의 실험적 산정방법으로 moment 법을 제안했고, Thomann과 Mueller[7]는 순간적으로 투입된 염료에 대하여 최대농도를 다음 식 (23)과 같이 정리했다.

$$S_p = \frac{M}{2A\sqrt{\pi D_x t_p}} \tag{23}$$

여기서 S_p는 염료의 첨두농도, M은 염료의 초기투입량, A

는 흐름의 횡단면적, D_x는 종분산계수, t_p(=x/U)는 유송시간이다. 식 (23)에 의해 산정한 D_x는 5.013 m^2/sec이였으며, 모형의 수질 계산에 이 값을 적용하였다.

3.3. 강우-유출시의 수위, 유속 및 유량관측

모형의 계산결과와 비교하기 위해 수위, 유속, 유량을 현장 측정하였다. 관측 시기는 5월 7일 07시부터 5월 8일 17시까지이다. 또한 계산구간 내에 상사천 유입부의 서락교(Seo-rag Bridge; Fig. 1의 A), 삼천교(Sam-chun Bridge; Fig. 1의 B), 계산구간의 하류부에 양율교(Yang-yul Bridge; Fig. 1의 C)등 3개의 교량에서 강우시 수위와 유속을 관측했다. 특히, Fig. 1에 사선으로 표시한 면적에서의 강우시 유출을 비점오염원으로 취급하였으며, Fig. 1의 사선으로 표시한 N.P.S의 면적은 0.7 Km^2이다.

수위관측은 Fig. 1에서 삼천교의 상류(QW), 삼천교(BW), 서락교의 상류(PW), 서락교(AW), 양율교(CW) 등 5곳이었다. PW과 QW은 교량이 없는 위치이므로 수위 표척을 설치하고, AW, BW, CW에서는 교각에 수위 표척을 부착해서, 1시간 간격으로 35회의 수위를 측정했다.

한편, 유속관측은 Fig. 1에 표시한 것과 같이 교량이 있는 A, B 및 C였다. 이 위치에서의 하천 횡단면을 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4와 같이 기저유출시에서도 수심이 충분히 유지되고 있었으므로 유속계에 의한 측정 결과로부터 평균유속을 산정했다. 또한 Fig. 4와 같이 하천의 횡단면을 소구간으로 나누고, 교량 위에서 유속계를 침수시켜 소구간별 유속을 1시간 간격으로 측정했다.

비점오염원에서의 부하량을 산정하기 위하여 Fig. 1의 NC (비점오염원의 유입점)에 파샬-푸름(Parshall-flume)를 설치하여 1시간 간격으로 유량을 측정하였다.

3.4. COD

강우유출 전단계에서 하천수의 COD농도 측정을 위해, 교량 위에서 하천의 횡단 방향으로 시료를 채취했다. 위치 A에서는 5 m 간격으로 2개, 위치 B에서 15 m 간격으로 3개, 위치 C에서는 15 m 간격으로 4개의 시료를 채취했다. 9개 시료의 평균치 1.2 mg/L를 모의실험에서 강우유출 전단계의 하천 초기 COD농도로 하였다.

강우유출 기간 중 하천수의 시료 채취점은 Fig. 1에 표시한 PC, QC, AC, BC, NC, N1, CC이다. 각 관측점에서 시료를 1시간 간격으로 35회 채취했다.

COD는 시료를 GF/C 필터로 거른 다음 Hach vial, Hach reactor, DR4000 spectrophotometer를 이용하여 분석하였다.

4. 모형의 변수 및 경계조건

4.1. 계산변수

이사천에의 모형 적용 영역은 Fig. 1과 같이 종방향(x방향) 1,480 m, 횡방향(y방향) 580 m이다. x방향으로 74개(Δx = 20.0 m), y방향으로 58개(Δy = 10.0 m)의 격자(grid)로 나누어 각 격자점에서 하천의 수심값(h)을 입력했다. 연산과정 중, 수심이 0(zero)으로 입력된 곳은 육지로 인식하도록 하였다.

계산의 시간간격은 CFL(Courant, Friedrichs and Lewy)조건[4]에 충족하는 값, Δt = 1 sec를 택했다. 계산 시간은 34시간이였으며, 이 시간은 Δt의 증분으로 122,400회에 해당한다. 계산의 진행 중 3,600회 증분마다 수위와 유속 및 농도를 출력하였다.

4.2. 상류에서의 경계조건

비점오염원의 오염부하 및 하천 측방에 위치한 점오염원의 오염부하에 의한 하천 수질 현황과 그 영향을 평가하기 위한 수질 모형에서는 하천의 흐름을 정상상태로 분류할 수 있는 기저유출 뿐만 아니라 비점오염원 오염물질의 유출이 강우의 유출에 동반되기 때문에 하천 흐름이 비정상상태인 직접유출에 대한 해석이 필요하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 하천의 기저유출 상태에서 시작해서 직접유출을 경과하고, 다시 기저유출 상태가 될 때까지 계산했다.

수위의 관측 결과 중, PW과 QW을 계산영역의 개경계에서의 수리학적 조건 즉, 하천 상류에서 모형 계산의 경계조건으로 발생시켜, 강우 유출시 하천의 이차원적 유속분포를 계산했다.

4.3. 비점오염원 및 하천 상류에서의 오염 부하량

계산영역에서 상류에 해당하는 Fig. 1의 위치 P와 Q에서는 유속을 측정할 수 없었으므로, 유량도 계산할 수 없었다. 그러나 A에서 P까지, B에서 C까지의 거리가 짧고, 그 사이에 유량의 유입이 없으므로, 위치 A의 유량과 위치 P의 유량, 위치 B의 유량과 위치 Q의 유량이 같다고 판단했다.

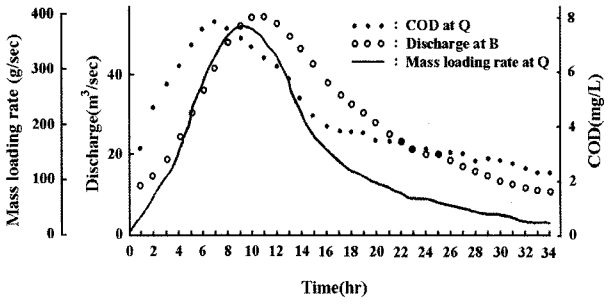

Fig. 7. Mass-discharge curve at site Q.

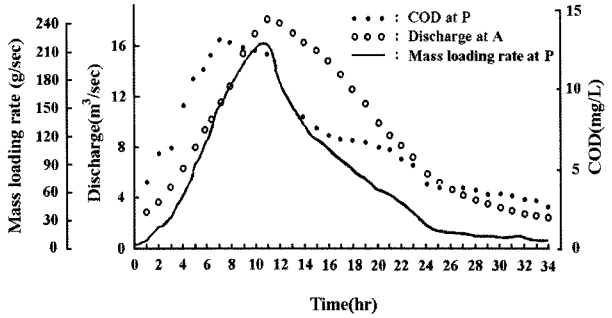

Fig. 8. Mass-discharge curve at site P.

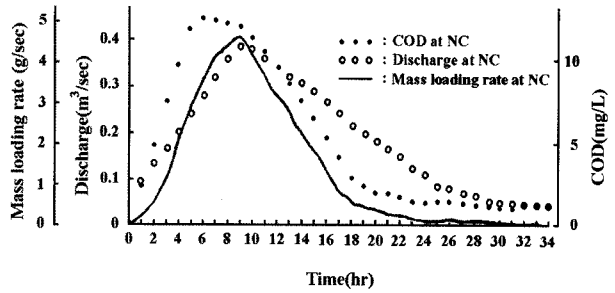

Fig. 9. Mass-discharge curve at site NC.

하천 상류에서의 오염 부하량은 Fig. 1의 B에서 관측한 유량과 Q에서 관측한 COD에 의해 산정했다. 그 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 상사천이 이사천에 유입되는 곳, 서락교를 지천의 유입점으로 취급했다. 지천의 오염 부하량은 Fig. 1의 A에서 관측한 유량과 P에서 관측한 COD에 의해 계산했다. 그 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 비점오염원의 오염 부하량은 Fig. 1의 NC에서 관측한 유량과 COD를 이용해서 산정했다. 그 결과를 Fig. 9에 나타냈다.

5. 계산과 관측결과의 비교

기저유출 상태의 하천 흐름에서 계산을 시작하여, 강우유출 상태를 거쳐서, 다시 기저유출로 되돌아오는 시간까지의 하천 흐름과 COD 농도를 계산했다.

AW, BW, CW지점에서 계산수위와 관측수위를 비교하였으며 그 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. 모형의 계산시각 11 hr 후(5월 7일 18시)에 CW에서 최대 4.81 cm의 차가 있었으나, 관측값과 계산값이 잘 일치되었다. 계산 모형의 수위 값은 높은 정도를 갖고 있다고 생각된다.

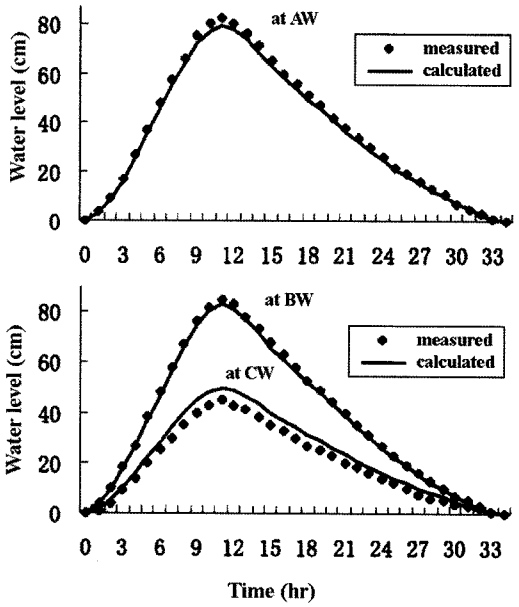

Fig. 10. Water levels measured and calculated at site AW, BW and CW.

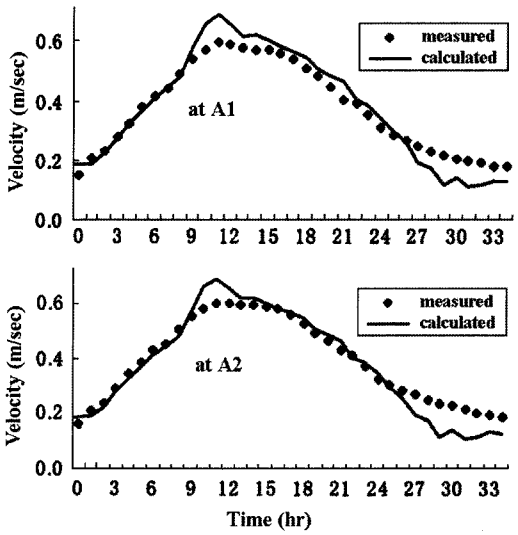

Fig. 11. Velocity measured and calculated at site A.

A, B, C지점에서 관측유속과 계산유속을 비교하였으며 그 결과가 Fig. 11, 12, 13에 나타나 있다. 11 hr 후에 B의 단면 B6에서 최대 0.18 m/sec의 차가 있었으며, 전반적으로 계산치가 관측치에 비해 작은 값을 나타났다. 전 계산 시간 동안, 유속의 변화는 잘 일치되었다.

A, B, C지점에서의 관측유량과 계산유량을 비교해서, Fig. 14에 나타냈다. 11 hr 후에 A지점에서 최대 5.848 m^3/sec의 차가 있었다. 전반적으로 계산유량이 관측유량에 비해 작은 값을 나타냈으나, 시간에 따른 변화 양상은 잘 일치되었다.

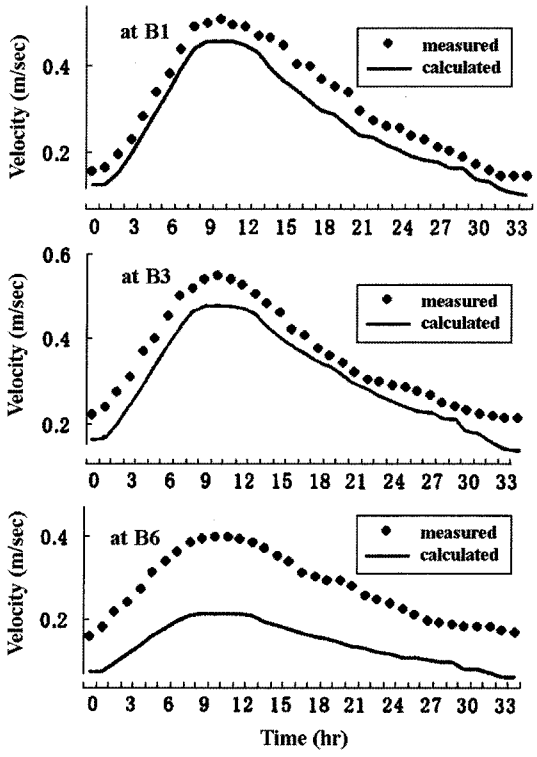

Fig. 12. Velocity measured and calculated at site B.

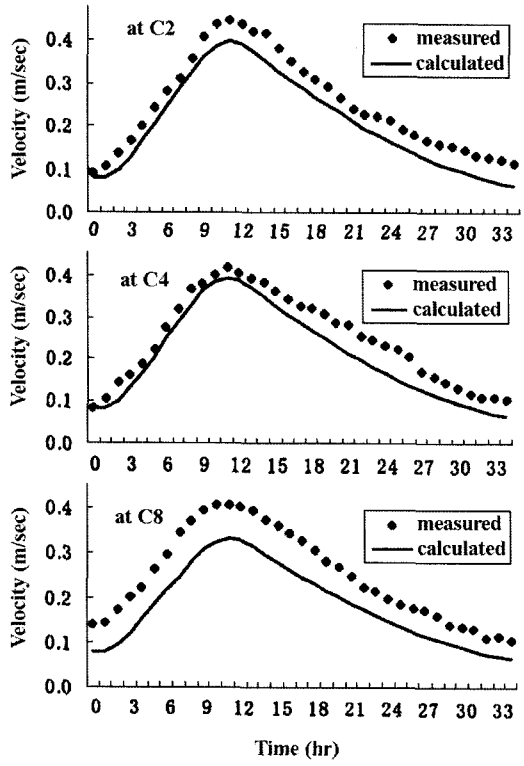

Fig. 13. Velocity measured and calculated at site C.

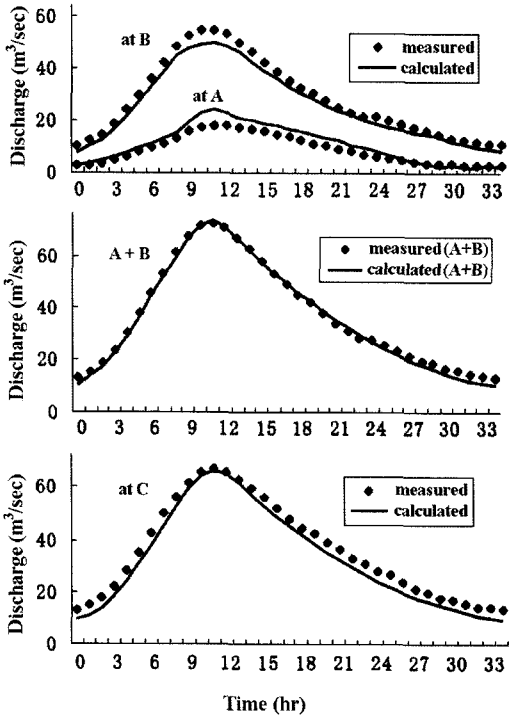

Fig. 14. Discharge measured and calculated in I-sa River.

BC, AC, NC, CC에서의 관측 COD와 계산 COD을 Fig. 15에 나타냈다. 계산값과 관측값은 큰 차를 보였을 뿐만 아니라 계산값은 첨두값의 전후에 불안정성을 보였다. 이 결과는 분산계수에 원인이 있는 것으로 판단된다. 계산에 사

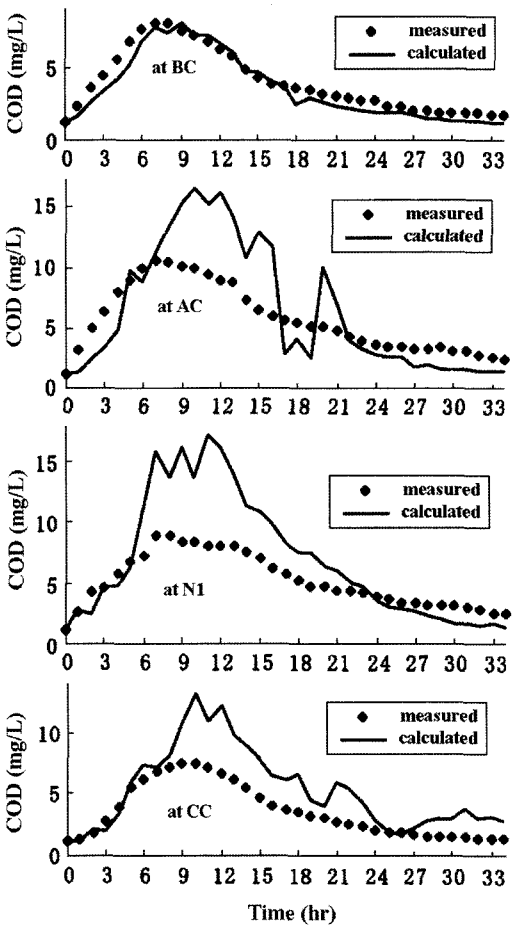

Fig. 15. COD measured and calculated in I-sa River. ($D_x = 5.013$ m^2/sec, $D_y = 0.054$ m^2/sec)

용한 분산계수는 천체 계산과정 중 일정한 값, 즉 변동이 없는 하나의 값으로 사용되었다. 즉, 청천시 하천이 기저유출 상태에 있는 흐름에서 염료의 방류에 의해 관측한 분산계수는 하천의 흐름이 정상상태인 흐름에서 관측한 값이다. 따라서 본 계산모형에서는 강우 유출에 의한 비정상 상태의 하천 흐름에 대한 분산계수를 산정하고, 새로운 방법으로 산정된 분산계수를 이용하여 모의 계산을 다시 실행하였다.

6. 분산의 2차원적 계산

6.1. 횡종분산계수

하천의 수심이 폭에 비해 아주 작기 때문에, 물 입자의 수직방향 운동은 하천에서의 물질 혼합에 크게 영향을 주지 않는 요인이므로 일반적으로 수직방향 분산계수는 무시된다. 그러나 하천의 흐름에서 물질의 이송과 혼합을 설명하기 위해서는 종 및 횡분산계수를 구하는 것이 중요하다. 하천의 분산계수에 대한 이론적 접근은 Taylor의 해석에 기초를 둔 Elder[8]의 식 (21)이 가장 일반화된 표현이다.

분산계수에 대한 연구에서는 식 (21)에 근거를 두고, 횡분산계수는 α값을, 종분산계수는 β값을 산정하여 발표하고 있

다.[11] 횡분산계수의 실험적 연구는 실험실 내에서, 정방형이며 일정한 형태의 수로에 관한 Elder,[8] Sayre와 Chang,[9] Okoye[10] 등의 연구가 있다. 그들은 횡분산계수의 계산에 식 (21)을 적용했다.

흐름 방향으로 굴곡이 있고, 측면이 불규칙적인 자연 하천의 초기 혼합에서는 횡방향 혼합이 주된 역할을 맡게 될 것이다. Holley와 Abraham[12]에 의한 IJssel강의 모형과 원형에서 α값의 관측, Jackman과 Yotsukura[13]에 의한 Potomac강에서의 관측, Yotsukura 등[14]에 의한 Missour江강에서의 관측, Mackay[15]에 의한 Mackenzie에서의 관측 등 모두 0.4~0.8의 범위에 있는 값이다. 이들의 관측 위치는 모두 직선에 가깝거나, 완만히 사행하는 하천들이다. 비교적 급격하게 사행하는 하천에서는 α의 값이 모두 높게 관측 되었다. Fischer[16]는 Rozovskii[17]의 속도분포를 이용하여, 횡방향 전단속도에 기초하여 횡방향 분산계수의 산정에 하천의 곡율을 반영할 수 있는 공식을 제안했다. 또한 일정한 곡율을 갖는 실험실의 수로에서 자신의 실험 결과를 검증하였다. Yotsukura와 Cobb[18]은 α값으로 0.23을 이용했으며, Sayre와 Yeh[19]는 3.3를, Harden과 Shen[20]은 0.5를 이용하였다.

연구결과 들을 정리하면, 단면형이 일정하고 균등한 수로에서의 α값은 0.1~0.2의 범위에 있다. 하천과 같이 곡율이 있고, 불규칙한 수로에서 α는 0.4로 증가한다. 또한 흐름이 완만하게 사행하고, 측방향 불규칙성이 작다면 α값은 0.4-0.8의 범위에 있다. 그러나 완만하게 사행한다는 것과 급하게 사행한다는 것의 의미를 실제로 구분하는 데는 아직 충분한 자료가 없다. 상기한 횡분산계수의 산정에 관한 연구들은 모두, 정상상태의 하천에서 흐름의 주축방향으로 측정된 유속에 의해 횡분산계수를 산정하는 방법들이다.

한편, 종분산계수의 실험적 연구들도 많이 진행되었다. Sayre와 Chang[9]은 물 표면에서 포리에틸렌 조각들의 흐트러짐에 의해 종방향 분산은 횡방향 분산의 대략 3배가 된다는 것을 발견하였다. Godfrey와 Frederick[21]의 관측에 의하면 하천에서의 종방향 분산은 Elder의 식으로 해석될 수 없음을 보였다. 그러나 지금까지의 대부분의 연구 결과, 종분산계수도 Elder의 식으로 검토되고 있다. Godfrey와 Frederick는 방사능 추적자 Gold-198을 방류한 후, 주입점으로부터의 유하거리 및 시간에 따른 추적자의 농도를 관측하고 비교하였다. 그들의 실험은 전체 10가지 조건 하에 4개의 흐름에서 수행되었고, β값은 140에서 500까지의 범위에 있었다. 최근의 실험을 보면 β의 값이 폭 넓게 변화하며, Elder의 결과보다 크게 나타나고 있다. 지금까지 보고된 값 중에서 가장 큰 것은 Yotsukura 등[14]이 Missouri강에서 관측한 7,500이며, 가장 적은 값은 Arizona의 Yuma Mesa수로에서 Schuster[22]가 관측한 8.6이다.

분산을 더 완벽하게 해석하기 위해서는 "dead zones" 및 측방향 "pockets"의 효과를 포함시켜야 한다는 연구 결과도 있다. Valentine과 Wood[23] 및 Valentine[24]은 하상이나 측벽의 정체구역을 연결된 구간으로 나누어 해석하는 방법을 설명했다. 이 해석에서 "dead zone"은 종분산계수와 초기혼합 구간을 증가시킨다는 것을 보였다. 그러나 실제 흐름에 적용할 수 있을 정도로 정량화하기에는 불가능한 것 같다.

한편 종분산계수에 대한 연구에서도 하천 사행에 의한 효과의 정량화가 시도되고 있다. 하천의 흐름이 정상상태일 경우에도 종분산계수를 높은 정도로 예측하는데는 아직 충분한 근거를 가지고 있지 않다.

6.2. 분산계수의 산정방법

분산계수를 식 (24)와 같이 수심과 유속의 함수로 산정하는 방법을 이용하였다. 그러나 하천에서 강우 유출은 시시각각 변동되므로, 전 계산 과정에서 하나의 분산계수를 사용하여 계산한 결과는 그림 에 보이듯이 안정적인 농도계산이 될 수 없었다. 분산의 이차원적 계산에서, 횡단면은 흐름방향에 대해 반드시 수직을 이루어야 할 필요는 없다. 각 계산 단계마다 변화하는 수위와 횡 및 종방향 유속을 계산한다면, 곡율에 의한 흐름 방향의 변화가 계산되므로, 사행에 대한 별도의 계산이 필요가 없게 된다. 또한, 정상상태에서 흐름의 주축 방향으로만 측정한 일차원적 유속에 의해 횡분산계수을 산정하는 문제점도 해결할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서, 이 연구에서는 분산계수를 계산 영역의 모든 격자점에서 각 계산 증분 단계마다, 전단속도 및 수심의 함수로 계산할 수 있도록 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$D_x = \alpha H u_x^*, \; D_y = \beta H u_y^* \tag{24}$$

여기서 D_x는 x방향 분산계수, D_y는 y방향 분산계수, $H(= h + \xi)$는 지배방정식과 같이 기저유출시의 수심(h) + 강우유출시 변화하는 수심(ξ)이며, u_x^*과 u_y^*는 각각 x와 y방향 유속으로 계산한 전단속도이다. α와 β는 식 (21)과 같이 경험계수이다. 기본형은 식 (21)과 같으나, 식 (21)과의 차이점은 분산계수를 계산영역의 모든 격자점 및 전 계산증분마다 각각 다른 값을 사용하게 된다. 더욱이, α와 β를 같은 값으로 이용하더라도, 각각 다른 전단속도와 변화된 수위에 의해 계산되므로 D_x와 D_y는 다른 값으로 계산된다. 또한 x방향과 y방향 분산의 효과를 구분해서 계산하였으므로, 이 모형에서는 분산의 비등방성를 고려하는 것이 된다.

본 모형에서는 α와 β값(1.0에서 15.0까지)을 변동시켜, 15회 반복 계산하고, COD의 계산값과 관측값과의 상관성을 검토했다. Table 2와 같이 관측값과 계산값의 상관계수를 비교하여, α와 β값을 8.0으로 결정하고, 이 값을 최종계산에 사용하였다.

최종 계산결과의 COD를 비교하기 위하여 BC, AC, N1, CC에서 관측 COD값과 계산 COD값을 Fig. 16에 나타냈다. 모형의 모든 계산조건은 동일하였으며 분산계수의 산정방법만 변화시킨 결과가 Fig. 16이다. 계산 COD값이 Fig. 13보다 안정된 결과를 보였다. 관측값과 계산값이 정확하게 일치되지는 않았으나, 시간 변화에 대한 관측값과 계산값의 변동 양상은 잘 일치하였다.

Table 2. COD measured and calculated in I-sa River

		Measured COD				Calculated COD(α,β = 6.0)				Calculated COD(α,β = 7.0)				Calculated COD(α,β = 8.0)				Calculated COD(α,β = 9.0)			
d/hr	hr*	BC	AC	N1	CC	BC	AC	N1	CC	BC	AC	N1	CC	BC	AC	N1	CC	BC	AC	N1	CC
7/07	0	1.20	1.20	1.20	1.20	1.51	1.25	2.02	1.20	1.52	1.25	1.97	1.20	1.52	1.25	1.92	1.20	1.52	1.24	1.87	1.20
7/08	1	3.30	3.20	2.60	1.30	1.51	1.25	2.02	1.20	1.52	1.25	1.97	1.20	1.52	1.25	1.92	1.20	1.52	1.24	1.87	1.20
7/09	2	4.80	4.95	4.20	1.80	2.57	2.46	1.83	1.41	2.56	2.44	1.79	1.36	2.55	242	1.75	1.31	2.54	2.40	1.71	1.29
7/10	3	5.40	6.20	4.60	2.70	3.13	3.19	2.74	1.37	3.13	3.16	2.56	1.32	3.12	3.13	2.40	1.29	3.11	3.10	2.25	1.28
7/11	4	5.70	7.90	5.80	3.90	4.19	4.93	3.38	2.43	4.19	4.89	3.20	2.28	4.17	4.85	3.02	2.08	4.16	4.81	2.84	1.87
7/12	5	6.90	8.90	6.70	5.50	5.43	7.72	4.85	4.39	5.42	7.61	4.58	3.83	5.40	7.52	4.31	3.63	5.37	7.43	4.05	3.30
7/13	6	7.80	9.90	7.20	6.10	6.55	9.01	7.07	6.08	6.52	8.89	6.63	5.75	6.50	8.78	6.19	5.29	6.46	8.68	5.78	4.69
7/14	7	8.40	10.60	8.90	6.80	7.21	11.11	8.43	7.24	7.18	10.95	7.87	6.47	7.14	10.81	7.32	6.05	7.10	10.67	6.80	5.47
7/15	8	8.10	10.40	8.80	7.20	7.41	12.16	8.65	7.93	7.38	11.98	8.09	7.50	7.34	11.81	7.54	6.78	7.29	11.65	7.00	5.74
7/16	9	7.60	10.10	8.40	7.40	7.31	12.96	8.49	8.15	7.27	12.76	7.95	7.30	7.22	12.57	7.40	6.48	7.17	12.39	6.86	5.95
7/17	10	7.30	10.00	8.40	7.50	7.01	13.28	8.16	7.98	6.97	13.06	7.63	7.25	6.92	12.86	7.09	6.60	6.87	12.68	6.57	6.23
7/18	11	6.90	9.50	8.10	7.20	6.55	13.44	7.71	7.55	6.52	13.22	7.21	7.09	6.47	13.02	6.71	6.28	6.42	12.82	6.21	5.54
7/19	12	6.40	9.00	8.10	6.70	6.13	11.79	7.10	7.26	6.10	11.60	6.62	6.98	6.06	11.42	6.14	5.71	6.01	11.25	5.68	5.26
7/20	13	5.90	8.70	8.10	6.10	5.19	10.20	6.11	6.54	5.16	10.04	5.71	5.68	5.13	9.89	5.31	5.17	5.09	9.74	4.92	4.57
7/21	14	4.80	7.30	7.50	5.60	4.36	8.76	5.21	5.86	4.34	8.62	4.89	5.05	4.31	8.50	4.56	4.62	4.27	8.38	4.24	4.19
7/22	15	4.60	6.50	7.10	4.70	3.79	8.10	4.69	5.54	3.77	7.98	4.39	4.64	3.75	7.86	4.11	4.06	3.72	7.76	3.83	3.62
7/23	16	4.30	5.90	6.30	4.10	3.23	7.40	4.22	4.84	3.21	7.29	3.97	4.22	3.19	7.18	3.72	3.87	3.17	7.09	3.49	3.35
8/00	17	4.10	5.70	5.70	3.70	3.01	6.90	4.01	4.22	3.00	6.80	3.78	3.78	2.98	6.71	3.55	3.29	2.96	6.62	3.33	3.03
8/01	18	3.90	5.50	5.20	3.50	2.78	6.39	3.84	3.98	2.77	6.30	3.63	3.52	2.75	6.22	3.41	3.21	2.74	6.14	3.21	2.88
8/02	19	3.80	5.20	4.80	3.20	2.68	5.89	3.68	3.68	2.67	5.81	3.48	3.32	2.65	5.73	3.28	2.97	2.64	5.66	3.09	2.75
8/03	20	3.60	5.10	4.80	3.10	2.34	5.24	3.44	3.44	2.32	5.18	3.27	3.25	2.31	5.11	3.09	2.83	2.30	5.05	2.92	2.65
8/04	21	3.40	4.80	4.40	2.80	2.25	4.68	3.25	3.11	2.24	4.63	3.08	2.79	2.23	4.57	2.92	2.57	2.22	4.52	2.76	2.36
8/05	22	3.30	4.30	4.40	2.60	1.99	4.03	3.16	2.92	1.98	3.98	2.99	2.62	1.97	3.94	2.83	2.36	1.96	3.89	2.68	2.23
8/06	23	3.10	4.00	4.20	2.40	1.76	3.41	2.93	2.55	1.75	3.37	2.78	2.28	1.74	3.33	2.63	2.13	1.74	3.29	2.49	1.93
8/07	24	3.10	3.70	3.90	2.10	1.84	2.30	2.66	2.23	1.83	2.28	2.52	2.06	1.83	2.26	2.39	1.90	1.80	2.24	2.28	1.74
8/08	25	2.70	3.50	3.70	2.00	1.74	2.11	2.60	2.00	1.73	2.09	2.44	1.87	1.73	2.06	2.29	1.73	1.73	2.04	2.16	1.62
8/09	26	2.70	3.40	3.50	1.90	1.67	1.96	2.49	1.89	1.67	1.93	2.34	1.70	1.66	1.91	2.21	1.59	1.66	1.89	2.09	1.50
8/10	27	2.60	3.30	3.50	1.80	1.57	1.79	2.40	1.73	1.57	1.78	2.26	1.61	1.57	1.76	2.14	1.50	1.57	1.74	2.03	1.43
8/11	28	2.40	3.30	3.20	1.70	1.36	1.67	2.28	1.64	1.36	1.65	2.16	1.54	1.36	1.63	2.05	1.46	1.36	1.61	1.96	1.39
8/12	29	2.30	3.50	3.20	1.60	1.32	1.41	2.07	1.53	1.32	1.40	2.00	1.46	1.32	1.38	1.95	1..39	1.32	1.37	1.89	1.34
8/13	30	2.30	3.20	3.30	1.60	1.25	1.43	2.06	1.43	1.25	1.41	2.00	1.37	1.26	1.38	1.95	1.33	1.26	1.36	1.89	1.30
8/14	31	2.20	3.10	3.10	1.60	1.23	1.32	2..07	1.40	1.24	1.31	2.01	1.35	1.24	1.30	1.96	1.32	1.24	1.30	1.90	1.29
8/15	32	2.20	2.80	2.90	1.50	1.20	1.27	2.07	1.40	1.20	1.26	2.01	1.36	1.20	1.25	1.96	1.32	1.20	1.24	1.91	1.29
8/16	33	2.20	2.70	2.70	1.50	1.20	1.21	2.07	1.42	1.20	1.20	2.02	1.36	1.20	1.20	1.97	1.32	1.20	1.20	1.91	1.30
8/17	34	2.20	2.50	2.60	1.50	1.20	1.20	2.08	1.43	1.20	1.20	2.02	1.37	1.20	1.20	1.97	1.32	1.20	1.20	1.92	1.30
correlate cofficient (measured & calculated)						0.971	0.937	0.941	0.978	0.971	0.937	0.940	0.978	0.971	0.937	0.938	0.980	0.972	0.938	0.936	0.980
mean						0.95680				0.95648				0.95687				0.95641			

hr*: Conversion time calculated in the model, BC: at site in Fig.1, AC: at site in Fig.1, N2: at site in Fig.1, CC: at site in Fig.1.

7. 모형의 계산결과

결과에서 강수유출 전단계, 즉 기저유출 상태인 계산시각 0 hr, B와 N 및 C에서 최대농도가 나타나는 계산시각 8 hr, A와 B에서 최대유속이 형성되고, A에서 최대농도가 나타나는 계산시각 11 hr, C에서 최대유속이 형성되는 계산시각 12 hr, 다시 기저유출로 되돌아오는 계산시각 34 hr에 대한 유속을 이차원 유속분포로, COD 계산결과를 이차원 등농도분포로 정리했다. 유속분포를 Fig. 17, 농도분포를 Fig. 18에 나타냈다.

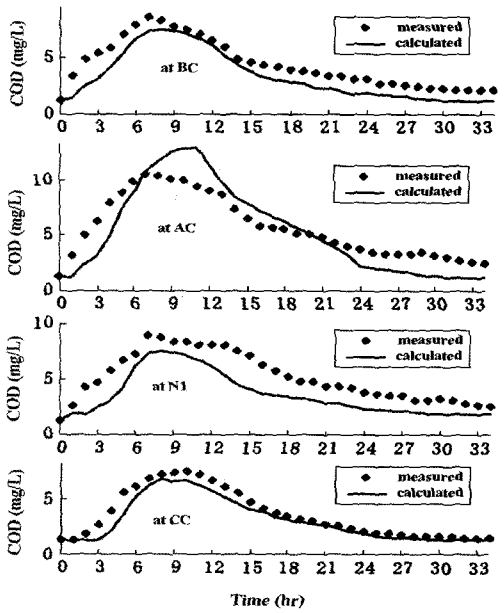

Fig. 16. COD merasured and calculated in I-sa River. (D_x, D_y = Variable on the time step and the nodal points)

8. 결 론

비정상상태의 하천 흐름에 대한 오염물질 혼합 계산모형을 강우시 이사천 유역의 유출에 적용하여 모형의 신뢰성을 검토했다. 2005년 5월 7일 08시부터 10시간 지속된 강우사상에 대한 오염물질의 시간 및 공간적 분포를 계산할 수 있었다. 비정상상태에서 지천의 유입 및 비점오염원의 유입부하에 대한 하천의 오염물질 혼합에 모형을 적용한 결과, 양호한 재현성을 확인할 수 있었다. 그러나 분산계수를 일정한 값으로 입력한 강우시 하천의 비정상 상태인 흐름에서는 COD의 계산결과가 불안정한 값을 보였다. 이것은 분산계수에 원인이 있는 것으로 사료된다. 즉 정상상태의 하천 흐름에서 염료관측에 의해 산정한 분산계수를 비정상상태의 하천 흐름에 적용한 것이 원인이라고 생각된다. 따라서 분산계수의 산정방법을 변화시켜 시간 및 공간적으로 변화하는 수심 및 x, y 방향 전단속도의 함수로 계산했다. 또한 계수 α와 β를 여러 가지 값으로 변화시켜 계산한 결과, 안정된 COD의 계산 결과를 얻을 수 있었으며 관측 COD농도와 가장 근접하는 분산계수를 구할 수 있었다.

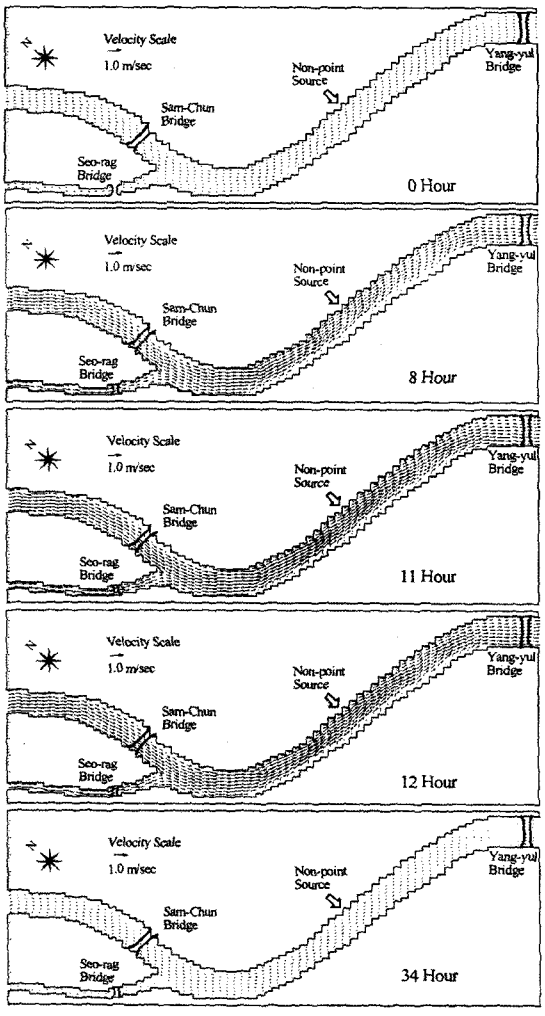

Fig. 17. Velocity vector computed b the hydrodynamic program in the River.

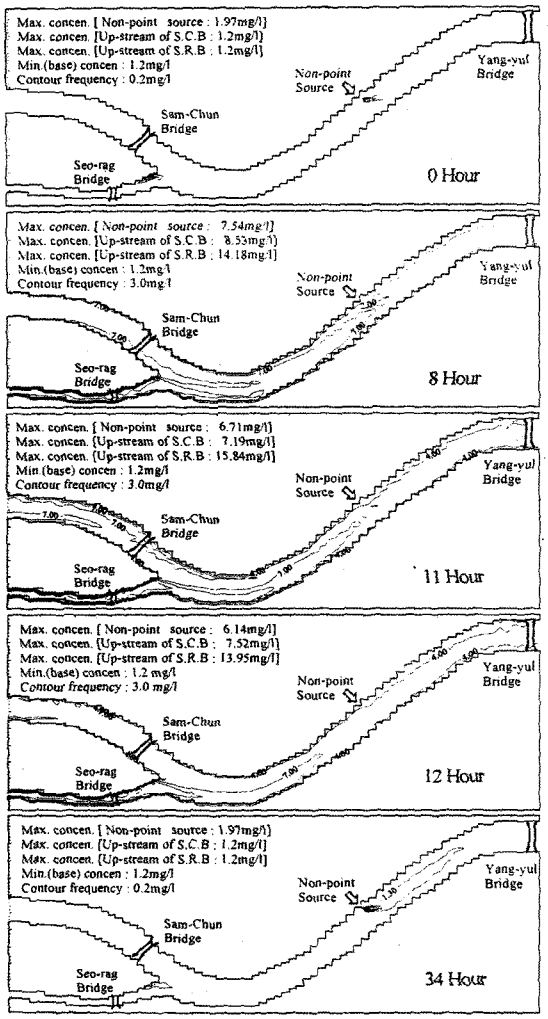

Fig. 18. COD concentration computed by the dispersion program in the River.

참고문헌

1. 文亨夫, 山田 淳 "非定常河川水質混合の數値計算Model の開發," 水環境學會誌, **22**(4), 260～268(1997).
2. Liu, S. K. and Leendertse, J. J., Multidimensional Numerical Modeling of Estuaries and Coastal Seas. Advances in Hydroscience, **11**, Academic Press, Inc., New York (1978).
3. Peaceman, D. W. and Rachford, H. H., "The numerical solution of parabolic and elliptic differential equation," *J. Soc. Industrial Appl. Math.*, **3**, March, pp. 28(1955).
4. Roache, P. J., Computational Fluid Dynamics, 2nd Ed, pp. 446, Hermora Publishers, Albuquerque, New Mexico (1976).
5. Platzman, G. W., "A Numerical Computation of the Surge of 26 June 1954 on Lake Michigan," *Geophysics*, **6**, 407～438(1959).
6. Fisher, H. B., "Dispersion predictions in natural streams," *J. Sanit. Eng. Div., ASCE*, **94**, 927～944(1968).
7. Thomann, R. V. and Mueller, J. A., "Principles of Surface Water Quality Modeling and Control," Harper & Row, Publisher, Inc. New York(1987).
8. Elder, J. W., "The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow," *J. Fluid Mechanics*, **5**, 544～560(1959).
9. Sayre, W. W. and Chang, F. M., "A laboratory investigation of the open channel dispersion process for dissolved, suspended, and floating dispersion," U.S. Geological Survey Professional Paper, **433-E**, Department of the Interior, Washington, D.C.(1968).
10. Okoye, J. K., "Characteristics of transverse mixing in open-channel flows," **KH-R-23**, California Institute of Technology, Pasadena, California(1970).
11. Fisher, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H., "Mixing in Inland and Coastal Water," pp. 483, Academiz Press, Inc. San Diego(1979).
12. Holley, E. R. and Abraham, G., "Laboratory studies on transverse mixing in rivers," *J. Hydraul. Res.*, **11**, 219～253(1973).
13. Jackman, A. P. and Yotsukura, N., "Thermal loading of natural streams," U.S. Geological Survey Professional Paper, 991, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C.(1977).
14. Yotsukura, N., Fischer, H. B., and Sayre, W. W., "Measurement of mixing characteristics of the missouri river between Sioux City, Iowa and Plattsmouth, Nebraska," U.S. Geological Survey Professional Paper, **1899-G**, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C.(1970).
15. Mackay, J. R., "Lateral mixing of the Liard and Mackenzie River downstream from their confluence," *Can. J. Earth Sci.*, **7**, 111～124(1970).
16. Fisher, H. B., "The effect of bend on dispersion in streams," Am. Geophysical Union, Water Resource Research, **5**, 496～506(1969).
17. Rozovskii, I. L., "Flow of water in bends of open channels," Academy of Science of the Ukranian SSR, Kiev(Translation No. OTs 60-51133), Office of Technical Services, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.(1957).
18. Yotsukura, N. and Cobb, E. D., "Transverse diffusion of solutes in natural streams," U.S. Geological Survey Professional Paper, **582-C**, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C.(1972).
19. Sayre, W. W. and Yeh, T. P., "Transverse mixing characteristics of the Missouri river downstream form the Cooper nuclear station," IIHR Report 145, Iowa Institute of Hydraulics Research, University of Iowa, Iowa City, Iowa, 46(1973).
20. Harden, T. O. and Shen, H. T., "Numerical simulation of mixing in natural rivers," *J. Hydr. Div., ASCE*, **110**, 393～408(1979).
21. Godfrey, R. G. and Frederrick, B. J., "Dispersion in natural streams," U.S. Geological Survey Professional Paper, **433-K**, U.S. Department of the Interior, Washington D.C. (1970).
22. Schuster, J. C., "Canal discharge measurements with radioisotops," *J. Hydraul. Div. ASCE*, **91**, 101～124(1965).
23. Valentine, E. M. and Wood, I. R., "Longitudinal dispersion with dead zones," *J. Hydraul. ASCE*, **103**, 975～990(1977).
24. Valentine, E. M., "Dispersion in Turbulent Flow," Ph. D. thesis, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand (1978).