

## 하천에 순간 유입된 오염물질의 거동 특성 분석

### Analysis of Behavior Characteristics of Instantaneous Input of Pollutant in River

윤 세 의\* / 고 재 형\*\* / 김 수 열\*\*\*

Yoon, Sei Eui / Ko, Jae Hyung / Kim, Soo Youl

---

#### Abstract

In case of continuous input of a pollutant, dispersion characteristics do not change much with changing dispersion coefficient, but that of an instantaneous input is very sensitive to the changes of dispersion coefficient. The characteristics of behavior of instantaneous input of a pollutant at the downstream of Han river were analyzed in this paper. Field measurement of hydraulic and water quality factors at the downstream of Han river were conducted at low flow condition. The hydraulic factors were used to estimate the longitudinal dispersion coefficient, and the reasonable empirical equations for longitudinal dispersion coefficient at the downstream of Han river were suggested. The measured concentrations of *BOD* were closely matched with the calculated ones from RMA-4 model. In case of instantaneous input, range of dispersion, transport pathway and the traveltimes of the first and maximum concentration with variation of the longitudinal dispersion coefficients and water levels of downstream boundary were evaluated in this paper.

**Keyword** : dispersion coefficient, traveltime, instantaneous input, dispersion scale, RMA-4

---

#### 요 지

하천에 오염물질이 순간적으로 유입된 경우에는 연속적인 유입의 경우와 다르게 분산계수의 변화에 따라 오염물질의 거동 특성이 민감하게 변한다. 하천에 순간적으로 유입된 오염물질의 거동특성을 분석하기 위하여 한강하류부에서 수리인자 및 수질인자를 실측하였다. 분산계수 추정에 사용되는 경험식에 실측된 수리인자를 적용하여 갈수시 한강하류부의 분산계수의 규모를 분석하고, 적용 가능성이 큰 경험식을 제시하였다. 또한, 실측된 수질인자를 RMA-4 모형의 계산치와 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 한강하류부에 순간적으로 유입된 오염물질의 분산계수, 하류단 수위 등의 변화에 따라 오염물질의 분산범위, 분산경로, 최초 및 최대농도 도달시간 등을 파악하였다.

**핵심용어** : 분산계수, 순간유입, 도달시간, 분산범위, RMA-4

---

\* 경기대학교 토목·환경공학부 토목공학전공 교수

Prof., Division of Civil and Environmental Engrg., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi 94 6, Korea  
(e-mail : syoon@kuic.kyonggi.ac.kr)

\*\* 삼안건설기술공사(주) 사원

Engineer, Saman Engineering Consultants Co., #981 4, Kwanyang dong, Dongan gu, Anyang-city, Kyonggi-do, Korea

\*\*\* 경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정

Graduate Student, Division of Civil and Environmental Engrg., Kyonggi Univ., Suwon, Kyonggi 94-6, Korea

## 1. 서론

하천으로 유입되는 오염물질의 유형은 일정한 농도를 가진 오염물질이 일정한 비율로 연속적으로 유입되는 경우와, 순간적으로 특정한 농도를 가진 오염물질이 하천으로 유입되는 경우로 나눌 수 있다. 독성이 강한 오염물질이 순간적으로 하천에 유입된 경우에는 하천생태계와 인간에게 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 특히, 하천에서 유류 혹은 독극물에 의한 수질사고는 오염물질의 순간적인 유입으로 일어나는 경우가 대부분이고, 이러한 사고는 산업의 발달로 인하여 날로 증가하는 추세이다. 국내에서는 하천에 연속적으로 유입되는 오염물질에 관한 연구는 활발하게 이루어지고 있으나, 순간적으로 유입된 오염물질에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 또한, 연속 유입의 경우에는 오염물질의 거동특성이 분산계수에 큰 영향을 받지 않고 있으나, 순간 유입된 오염물질 해석에는 분산계수의 영향이 크다(Fischer, 1979). 따라서, 순간적으로 유입된 오염물질의 거동특성 분석에는 하천실정에 맞는 합리적인 분산계수의 산정이 필수적이며, 분산계수의 변동에 따라 오염물질의 분산범위, 분산경로, 최초 및 최대농도 도달시간 등에 관한 분석은 하천 환경관리에 기초 자료를 제공할 수 있으며, 하천 방재에도 필요한 자료라고 판단된다.

분산계수에 대한 최초의 연구는 Taylor(1954)에 의해 발표되었으며, 그 후 Elder(1959)는 Taylor의 식을 무한평면을 흐르는 개수로의 2차원 흐름에 적용하여 합리적이며 간편한 식을 제시하였다. 그러나, 이들 식은 횡방향의 속도 변화를 고려하지 못했으며, 실측된 종분산계수보다 대부분 과소 추정되고 있는 것으로 파악되었다.(Fischer, 1979). Parker(1961)는 Taylor의 식을 개수로에 사용할 수 있도록 관의 반경 대신 동수반경을 도입하였으며, McQuivey와 Keefer(1974)는 이론적 배경과 현장에서 실측한 수심, 유속, 경사 등의 인자를 사용하여 회귀 분석을 실시하고 종분산 경험식을 발표하였다. Fischer(1975)는 자연하천에서 쉽게 얻을 수 있는 단면자료의 평균치를 이용하여 간단한 경험식을 발표하였다. Liu(1977)는 자연하천에서 단면의 변화에 따른 확산특성을 고려하기 위해 단면 형상계수와 속도분포를 고려하여 경험식을 발표하였다. Magazine 등(1988)은 하상조도, 폐색효과 등을 고려한 새로운 경험식을 제시하고 실험실 자료와 현장 자료를 이용하여 경험식의 특성을 분석하였다. Iwasa와 Aya(1991)는 실험실 자료와 현장자료를 이용하여 경험식을 제안한

바 있다. Seo와 Cheong(1998)은 분산계수 추정에 사용되고 있는 기존의 경험식들을 정리, 분석하고 새로운 경험식을 제시하였다. Deng 등(2001)은 수로의 불규칙성과 횡방향 확산계수의 경험식을 사용하여 새로운 경험식을 발표하였으며, 최근에 Kashefipour 등(2002)은 81개의 현장 자료를 이용하여 차원해석과 다중회귀분석을 실시하여 경험식을 발표하였다.

한편, 오염물질의 이동시간에 관한 연구로 Kilpatrick 등(1982)은 자연하천에서 확산과정과 이동시간을 측정할 때 적절한 추적자 선택과 최대농도 도달시간을 추정하는 경험식을 발표하였다. Jobson(1996)은 지형학적 형태, 경사, 크기가 비슷한 60여 개의 하천에 대하여 오염물질의 이동시간에 따른 오염물질의 농도분포, 하천에서 임의의 한 지점에서 오염지속 시간을 계산하였다. Kratzer 등(1997)과 Gurdak 등(2002)은 실제 자연하천에서 추적자를 이용하여 오염물질의 최초도달시간, 최종경과시간, 최대농도, 최대농도 도달시간을 실측하고, 이 결과를 회귀분석 하였다.

국내 하천에서 오염물질의 분산에 관한 연구는 강주복 등(1990)에 의해 불규칙한 자연하천 단면에서 누적 유량 모델을 이용하여 횡확산 현상에 대한 연구를 발표하였다. 서일원과 정태성(1994, 1995, 1997)은 현재까지 제안된 종분산계수 추정 경험식들을 비교·분석하였고, 미국 전역의 26개 하천에서 실측된 자료를 이용하여 선정된 경험식들의 특성을 분석하여 새로운 경험식을 발표하였다. 수치모형을 이용한 이송-분산에 관한 연구로는 박무중 등(1994)의 준 3차원 분산모형과 김형일 등(1998)이 RMA-4모형을 이용하여 한강하류부에 적용하였으며, 한건연 등(1999, 2000, 2002)은 2차원 수질예측모형을 개발하여 적용하였다. 윤세의 등(1999, 2000, 2001)과 한정석(2001)은 자연하천에서 종분산계수를 추정하기 위하여 수리 실험을 하였으며, 실내실험을 통하여 180°만곡수로에서의 종분산계수 및 횡확산계수를 측정하였다. 또한, 한강하류부에서의 분산계수 추정에 관한 연구는 최철권 등(2000)이 있으나, 하천에 순간적으로 유입된 오염물질의 거동 특성에 관한 연구는 미흡한 것으로 조사되었다.

## 2. 기본이론

RMA-4 모형의 지배방정식은 비압축성 난류 전단 흐름에서 보존물질에 대하여 수심방향으로 적분한 2차원 이송-확산방정식으로서 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \sigma + kC = 0 \quad (1)$$

여기서,  $C$ 는 수심 적분 된 오염물질의 농도,  $x$ 와  $y$ 는 각각 흐름방향과 횡방향의 거리,  $t$ 는 시간,  $E_x$ ,  $E_y$ 는 각각  $x$ ,  $y$ 방향의 분산 및 확산계수,  $\sigma$ 는 오염물질의 생성 또는 소멸항,  $k$ 는 오염물질의 감소계수를 나타낸다.

그림 1은 일반적으로 추적자가 순간 유입되었을 때 추적자의 공간 농도분포의 변화를 나타낸다. 추적자가 유입된 지점과 가까운 단면 I에서는 연직 확산은 완전

히 이루어 졌다고 볼 수 있으며, 단면 II는 횡방향 확산은 계속 이루어지고 있으며, 단면 III에서는 분산과 확산의 두가지 과정이 모두 진행되고 있는 단면이라 할 수 있다. 단면 III의 하류부에서는 종분산이 두드러지며, 추적자의 농도는 일반적으로 일정하다고 가정할 수 있다. 단면 IV는 완전 분산이 이루어진 상태를 나타내고 있다.

### 3. 연구 대상 구간의 분산계수 추정

현재 국내에서는 기존의 수질예측 모형을 사용하여 하천의 수질을 예측할 때 모형에 사용되는 인자들은 수계의 유로특성에 따라 결정되어야 함에도 불구하고 몇 인자 외에는 외국의 하천을 대상으로 만들어진 경험식

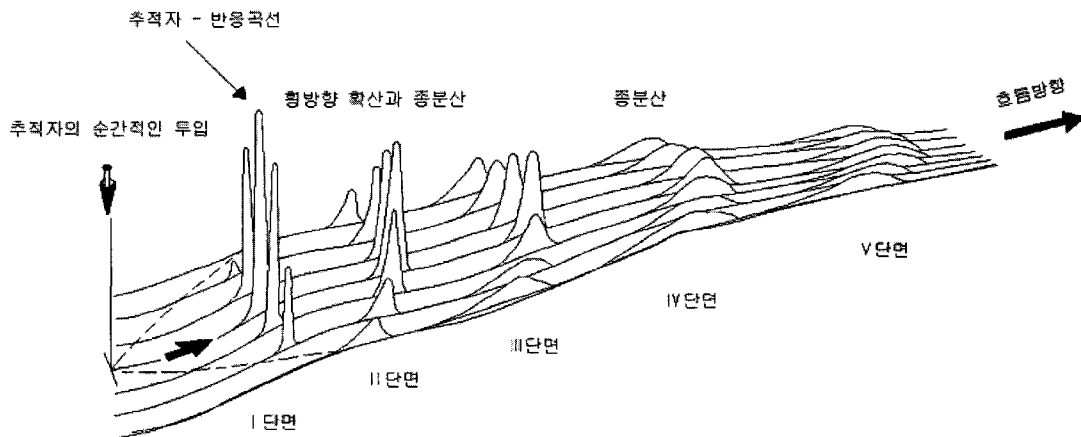


그림 1. 순간 유입된 오염물질의 공간 농도 분포

표 1. 수리 및 수질인자 측정 결과

	$B$ (m)	$h$ (m)	$U$ (m/s)	온도 ( $^{\circ}C$ )	탁도 (mg/l)	전도도 (ms/m)	DO (mg/l)	PH	BOD (mg/l)	SS (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)
왕 속 천 합 류 부	547.6	6.01	0.105	14.3	136.1	0.012	5.2	8.2	1.2	3.0	0.44	0.07
위 커 힐 단 면	739.7	4.77	0.079	13.9	139.4	0.012	5.6	8.0	3.3	7.5	2.45	0.26
탄 합 류 부	802.4	3.95	0.067	15.1	143.8	0.027	4.7	7.5	4.8	12.5	3.49	0.90
중 량 천 합 류 부	785.8	3.95	0.067	15.1	143.8	0.027	4.7	7.5	4.8	12.5	3.49	0.90
반포대교 상 류	693.6	4.57	0.0815	14.6	140.3	0.021	4.9	7.5	3.8	8.5	2.13	0.55

( $B$  : 하폭,  $h$  : 수심,  $U$  : 평균유속)

으로부터 산정된 계수값이 사용되고 있으며, 특히 국내에서 분산계수에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 하천에서 순간적으로 유입된 오염물질의 거동 특성을 파악하는데 있어서 중요한 요소는 합리적인 분산계수의 산정이다. 일반적으로 갈수기에 하천으로 유입되는 오염물질의 상태를 연속 유입조건으로 본다면, 갈수시의 오염물질의 거동에 대한 분산계수의 영향이 미비하다. 그러나, 하천에 오염물질이 순간적으로 유입되었을 경우에는 분산계수의 규모에 따라 오염물질의 혼합특성은 크게 달라진다. 그림 2는 한강하류부에서 수리 및 수질인자를 측정하는 모습이다. 1998년의 11월 2일 수리 및 수질인자의 실측결과는 표 1과 같다.

표 2는 일반적으로 타당성이 인정되고 있는 종분산계수 산정에 이용되는 경험식이다. 본 연구에서는 1998년 11월, 2000년 11월, 그리고 2001년 4월에 한강하류부에서 실측한 수리인자를 이용하여 표 2에서 제시된 종분산계수 경험식을 바탕으로 분산계수의 범위를 산정하였다. 표 2에서 제시된 경험식 중 자연하천에 적용성이 크다고 발표된 경험식들을 한강하류부에 적용하였다.

그림 3에서와 같이 Fischer(1975), McQuivey와 Keefer(1974), Magazine 등(1988)의 식은 단면별로 분산계수의 값이 크게 차이가 발생하고 있으며, 최철관 등(2001)과 한건연 등(2002)의 연구결과에서도 서일원과 정태성의 식이 한강하류부에서 종분산계수 추정

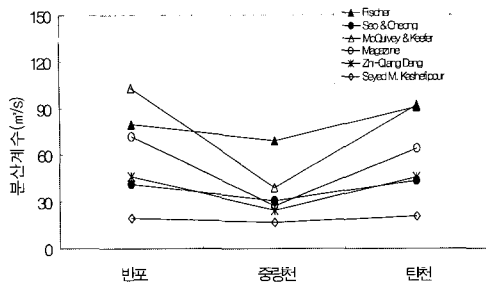


그림 2. 수리 및 수질인자 실측사진

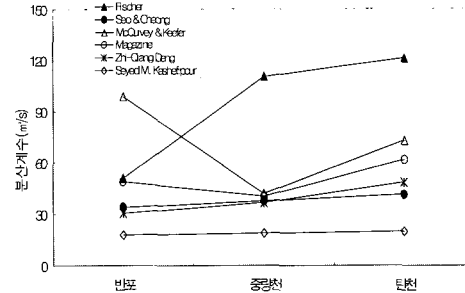
표 3. 종분산계수 추정에 사용되는 경험식

연구자	경험식	수로조건
Elder(1959)	$E_x = 5.93 h U^*$	실험수로
Parker(1961)	$E_x = 14.28 R^{3/2} \sqrt{2gS}$	실험수로
McQuivey와 Keefer(1974)	$E_x = 0.058 h U / S$	자연하천
Fischer(1975)	$E_x = 0.011 U^2 B^2 / (h U^*)$	자연하천
Liu(1977)	$E_x = 0.18 (U^* / U)^{1.5} U^2 B^2 / (h U^*)$	자연하천
Magazine 등(1988)	$E_x / RU = 75.86 P^{-1.632}$	자연하천
Iwasa와 Aya(1991)	$E_x / h U^* = 2.0 (B/h)^{1.5}$	실험수로 자연하천
서일원과 정태성(1998)	$E_x / h U^* = 5.915 (B/h)^{0.62} (U/U^*)^{1.428}$	자연하천
Deng 등(2001)	$E_x / h U^* = (0.15/8\epsilon_h)(B/h)^{5/3} (U/U^*)^2$	자연하천
Kashefipour 등(2002)	$E_x = 7.428 + 1.775 (B/h)^{0.620} (U/U^*)^{0.572} h U (U/U^*)$	자연하천

( $h$  : 수심,  $B$  : 하폭,  $U^*$  : 마찰속도,  $R$  : 동수반경,  $S$  : 수면경사,  $U$  : 평균유속,  $P$  : 일반화된 조도계수( $0.4U^*/U$ ),  $\epsilon_h$  : 횡방향 분산계수)



(A) 1998년



(B) 2000년

그림 3. 단면별, 경험식별 종분산계수

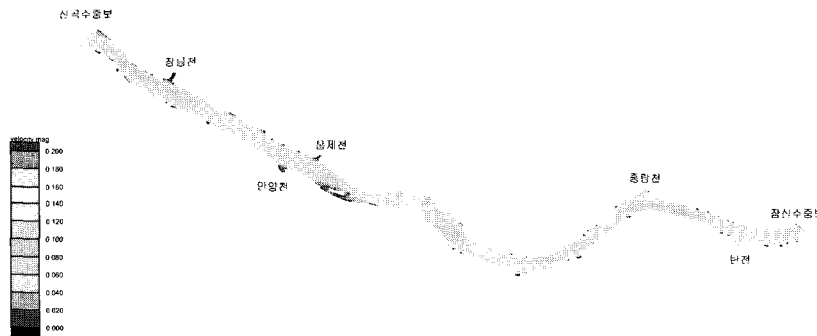


그림 4. 한강하류부의 유속분포(유량 200 cms)

추천되고 있어서, 서일원과 정태성(1998), Deng 등 (2001), Kashefipour 등(2002)의 식이 비교적 합리적이라고 판단된다. 그러나 Deng 등(2001)식은 분산계수 추정식에 횡방향확산계수가 포함되어 있어서 어려움이 있으므로 한강하류부의 갈수량을 대상으로 분산계수 추정에는 서일원과 정태성(1998)식과 Kashefipour 등 (2002)의 식이 합리적이라고 판단된다

#### 4. 오염물질의 거동 특성 분석

##### 4.1 경계조건 및 흐름특성 분석

연구 대상 하천 구간은 한강하류부의 잠실 수중보로부터 신곡 수중보 상류단까지의 약 40 km 구간을 선정 하였으며 갈수시를 대상으로 하였다. 이 구간에는 3개의 섬과 3개의 만곡부가 위치하고 있으며, 평균 저수로 폭

이 850m, 평균 수심이 약 4.6m이다. 하상자료는 한강 수로조사 용역보고서(한강관리사업소, 2001)를 기본으로 하였고, 1/25,000의 수치지도를 이용하였다. 지천에서 한강 본류로 유입하는 유입유량은 물수지 분석도 (200cms)에 따른 갈수시의 유량을 적용하였다.(서울시 정개발연구원, 1999) 잠실 수중보로부터 신곡 수중보 구간의 유한 요소망은 16796개의 격점과 553개의 삼각형 요소와 4920개의 사각형 유한 요소망으로 구성하였다.

RMA-2 모형의 하류 경계조건으로 행주대교 수위를 적용하였으며, 상류 경계조건으로는 팔당댐 방류량 200cms를 적용하였다. 대상구간의 조도계수는 유량 200cms일 때 조도계수 0.085를 적용하였다(김원 등, 1995). RMA-2의 안정적인 해를 얻기 위하여 난류교환계수는 서울시정개발연구원(1994)에서 제시한  $7000N \cdot \text{sec}/m^2$ 을 사용하였다.

오염물질의 확산 특성을 파악하기 위해 먼저, 대상구간에서의 흐름 특성을 분석하였다. 그림 4는 적용 구간 내의 팔당댐 방류량 200cms일 때 행주대교의 평균수위를 적용한 유속분포로서 지형적인 특성과 지류 합류부 지점에서 유속의 변화가 나타났으며, 한강하류부에서의 평균 유속은 0.06~0.12m/s의 유속분포를 나타내었다.

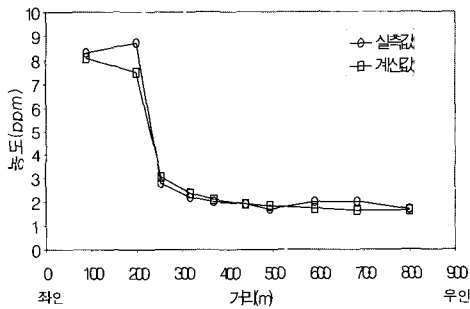
#### 4.2 갈수기 한강하류부의 오염물질 농도분포 예측

그림 5는 탄천 합류부 단면, 중랑천 합류부 단면, 반포대교 직상류 단면에서 RMA-4의 계산값과 1998년 11월 2일에 실측한 BOD값을 비교하였다. 오염물질은 탄천과 중랑천에서 각각 BOD 16.1 ppm, 20.5 ppm이 유입되며 본류 구간내의 BOD 농도는 무시하였다(환경부). 그림 5(A)와 (B)에서와 같이 탄천이 유입되는 좌안과 중랑천이 유입되는 우안에서 BOD농도는 높으며, 본류 중앙 단면에서 BOD 농도분포는 탄천단면에서 1~2 ppm, 중랑천단면에서 3~4 ppm을 나타내고 있었다. 따라서, 실측치와 계산치는 비교적 잘 일치하고

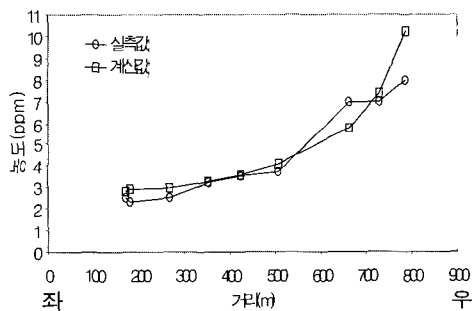
있었다. 그림 5(C)에서 반포대교 직상류 단면의 BOD 농도분포는 실측값과 계산치가 모두 3~5 ppm으로서 중랑천 오염물질의 유입에 의한 결과로 판단된다. 한강 하류부에서와 같이 지류의 유입영향을 받는 하천에서 2차원 모형을 적용함으로써 단면의 횡방향 농도분포를 알 수 있었다.

#### 4.3 분산계수의 변동에 따른 오염물질의 확산

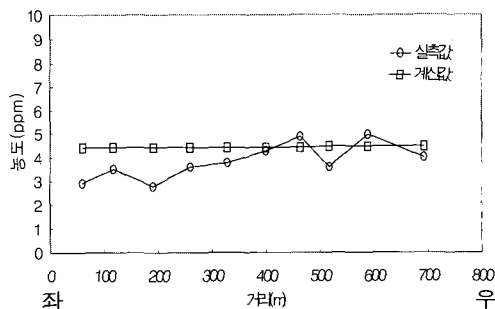
오염물질이 순간유입된 경우 분산계수의 변동에 따라 오염물질의 거동 특성을 파악하였다. 계산에 사용된 종분산계수값은 50 m<sup>2</sup>/s, 100 m<sup>2</sup>/s, 150 m<sup>2</sup>/s이며, Elder의 종분산식의 계수가 5.93( $E_x=5.93hU^*$ )과 Lau의 횡확산식의 계수가 0.3~0.9( $E_y=(0.3\sim0.9)hU^*$ )를 감안하고(우효섭, 2001), 180° 만곡부에서의 횡확산계수에 대한 종분산계수의 계산치가 1/20 규모가 되어서(윤세의, 2001), 횡확산계수는 종분산계수의 1/20으로 선택하였다. 오염물질의 유입지점은 잠실수중보 단면 중앙에서 BOD 3000 ppm을 가진 오염물질이 1분 동안 유입되며, 지류에서는 오염물질의 유입은 없다고 가정



(A) 탄천 합류부단면

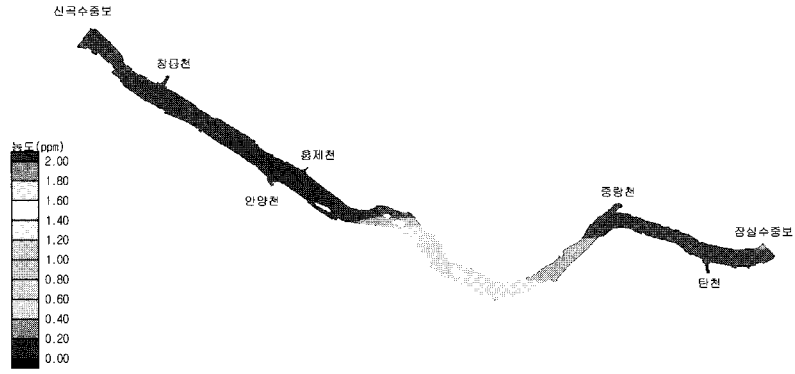


(B) 중랑천 합류부단면

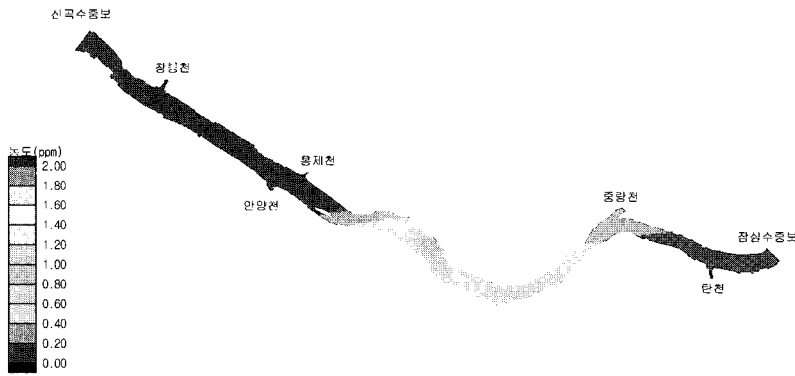


(C) 반포대교 직상류단면

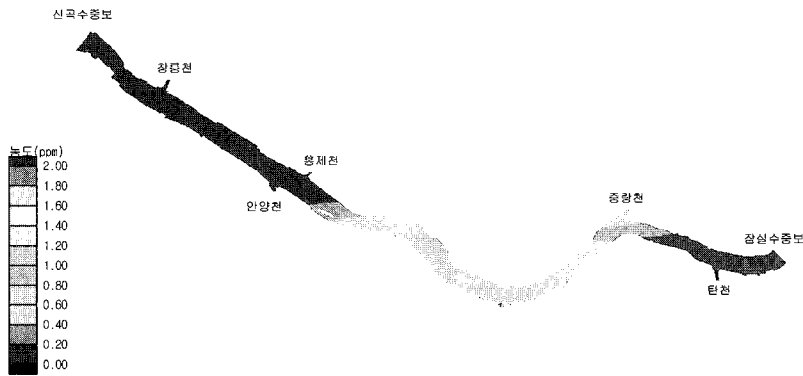
그림 5. 한강하류부에서 BOD 농도의 실측치와 계산치 비교



(A) 분산계수  $50 \text{ m}^2/\text{s}$

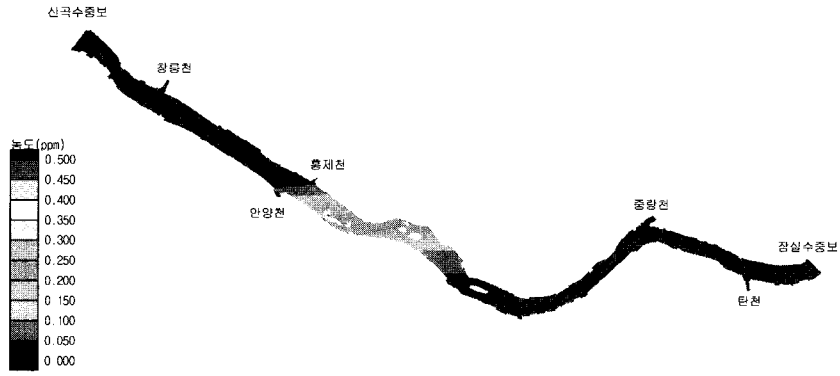


(B) 분산계수  $100 \text{ m}^2/\text{s}$

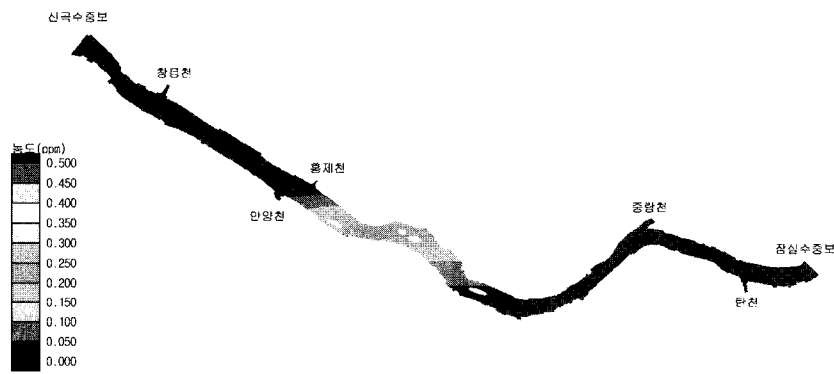


(C) 분산계수  $150 \text{ m}^2/\text{s}$

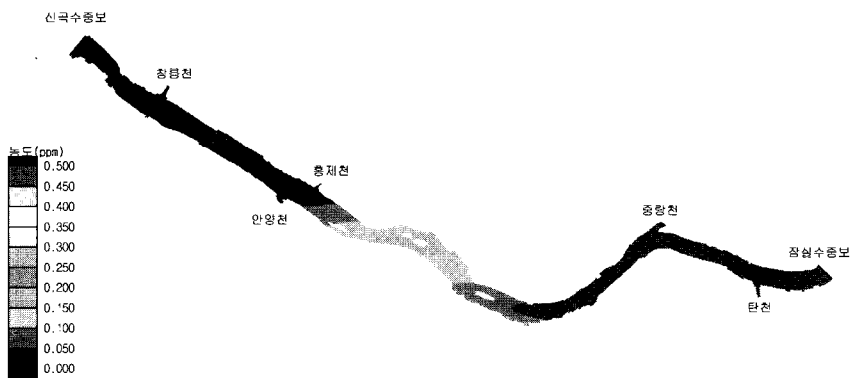
그림 6. 종분산계수 변동에 따른 오염물질의 농도분포(48시간후)



(A) 하류단 수위 2.8 m



(B) 하류단 수위 3.0 m



(C) 하류단 수위 3.5 m

그림 7. 하류단 수위변화에 따른 오염물질의 농도분포(48시간후)



하였다. 그림 6은 종분산계수의 변동에 따른 한강하류 부에서 오염물질이 유입된 후 48시간의 오염물질의 농도분포를 나타내고 있다. 종분산계수 값이 커짐에 따라 오염물질의 이동거리가 증가하고, 농도분포의 공간분산 규모가 더 커지는 것을 알 수 있으며, 48시간 후에는 제이중지도 부근까지 영향이 미치는 것으로 판단된다.

순간 유입된 오염물질은 분산계수가 클수록 장기간에 걸쳐 하천에 분포되고 있다. 즉, 하천에 오염물질의 체류시간이 증가하며, 분산계수 값이 클수록 오염물질의 최초도달시간이 빨라지고 있었다. 따라서, 분산계수의 영향에 따른 오염물질의 분산규모, 분산경로를 파악할 수 있었다. 오염물질의 이송-분산 과정은 하도의 지형적인 특성에 영향을 받고 있으며, 특히 지류의 유입과 만곡부의 영향을 받고 있었다.

#### 4.4 하류단 수위변화에 따른 오염물질 농도분포

하류단 수위 변화에 따른 오염물질의 농도분포를 파악하기 위해 2000년 11월 2일에서 11월 3일까지의 행

주대교의 최대수위 3.5 m, 평균수위 3 m, 최저수위 2.8 m를 하류단 경계조건으로 선택하고, BOD 2000 ppm을 가진 오염물질이 1분 동안 중랑천 지류에서 한강 본류로 유입하는 것으로 가정하였다. 이때, 팔당댐의 방류량은 200 cms이며, 분산계수는  $50 m^2/s$ 이다.

그림 7은 오염물질 유입 후 48시간의 농도분포를 나타내며 하류단 수위가 낮을수록 유속의 증가로 인하여 임의 지점까지 오염물질의 도달시간이 빨라지며, 최대농도값이 증가하는 것을 알 수 있었다.

### 5. 비교 및 고찰

#### 5.1 하류단 수위 변화에 따른 오염물질 농도분포 및 도달시간비교

오염물질이 순간 유입되었을 때 하류단 수위 변동에 따른 오염물질의 분산특성을 파악하기 위해 중랑천 유입부에서 BOD 1000 ppm을 가진 오염물질이 1분간 유입되었을 때 하류부에 도달하는 시간 및 농도분포를

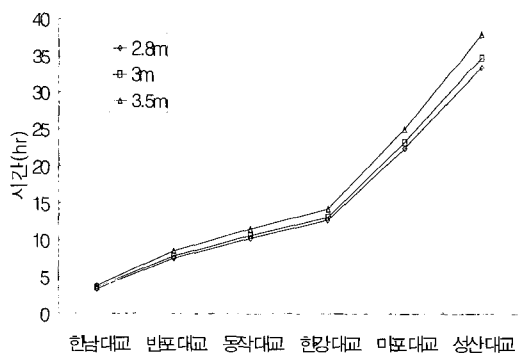


그림 8. 단면별 최초도달시간

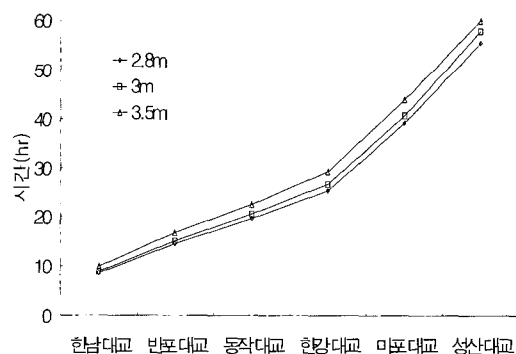


그림 9. 단면별 최대농도도달시간

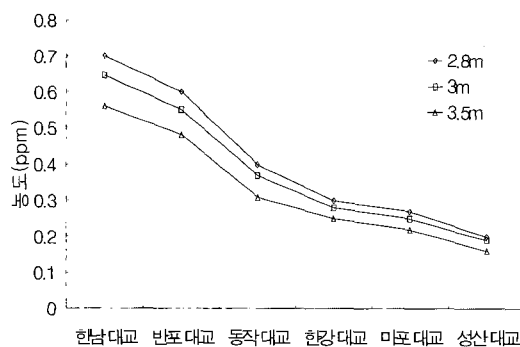


그림 10. 단면별 최대농도

파악하였다. 그림 8~10은 각 단면별 오염물질의 최초 도달시간, 최대농도 도달시간, 최대농도를 나타내고 있다. 하류단 수위가 낮아질수록 유속의 증가로 인하여 오염물질의 도달시간이 빨라지는 것을 알 수 있으며, 최대농도값은 증가하게 된다. 오염물질이 유입된 지점으로부터 하류부로 갈수록 하류단 수위 변화에 따른 최대농도값의 차이는 감소하는 것을 알 수 있었다.

그림 8 ~10에서 하류단 평균수위 3 m를 적용하였을 때 최대농도 속도와 오염물질의 이동속도와 비교해보면 한남대교지점에서 성산대교지점까지 최대농도 속도는 0.06 m/s~0.09 m/s로 이 구간의 평균유속과 비슷한 것으로 판단되며, 오염물질의 최초도달속도는 0.08 m/s~0.21 m/s로서 평균유속 보다 빨리 도달함을 알 수 있었다. 또한, 한강대교에서 마포대교에 이르는 구간과 마포대교에서 성산대교 구간에서는 만곡부 등 지형적인 영향으로 다른 지점에서 보다 최대농도 도달속도와 오염물질의 최초도달속도가 느린 것을 알 수 있었다.

## 5.2 오염물질의 도달시간 추정

취수장과 같이 순간 유입으로 인한 피해가 예상되는 지점에서 오염물질의 이동시간을 예측하는 일은 수자원 관리에 있어서 매우 중요한 일이다. 또한, 실제 대하천에서 실험을 통하여 이동시간에 대한 자료를 얻기는 여러 제약 사항이 많다.

Kilpatrick(1982)은 오염물질의 이동시간을 추정하는 경험식으로 식(2)를 제시하였다.

$$T_p = 1.47 (L / v_p) \quad (2)$$

식(2)에서 최대농도유속( $v_p$ )는 식(3a)과 식(3b)과

같이 2개의 식으로 계산할 수 있다.(Borning, 1974) 식(3a)는 여울과 소를 가지고 있으며, 경사가 비교적 높은 하천 구간에서 사용하며, 식(3b)는 흐름이 하도 통계를 받는 하천에서 주로 사용된다.

$$v_p = 0.38 Q^{0.40} S^{0.20} \quad (S: 0.00012 \sim 0.0057) \quad (3a)$$

$$v_p = 2.69 Q^{0.26} S^{0.28} \quad (S: 0.00016 \sim 0.0023) \quad (3b)$$

오염물질의 도달시간을 예측하기 위하여 오염물질의 이동시간에 관한 경험식을 한강하류부에 적용하여 사용가능성을 검토하였다.

표 3은 한강하류부에 유입된 오염물질의 최대농도 도달시간을 예측하는 경험식(2)와 RMA-4에 의한 계산치를 비교한 표이다. 이때, 한강의 유량은 200 cms이며, 경사는 0.000006으로 잠실수중보에서 신곡수중보 구간의 평균치를 사용하였다. RMA-4에 의한 계산값보다 Kilpatrick의 경험식이 최대농도 도달시간이 전체적으로 길게 계산되었으며, 하류부로 내려갈수록 그 차이는 크게 나타나고 있었다. 경험식과 비교하였을 때, 수치모의결과가 경험식에 의한 결과보다 약간 과소 추정되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 한강하류부에서 오염물질의 분산특성을 분석하기 위하여 수리 및 수질인자를 실측하여 분산계수를 추정하였다. 한강하류부에서 산정된 분산계수와 하류단 수위 변동에 따른 오염물질의 거동 특성과 오염물질의 최초도달시간, 최대농도, 최대농도 도달시간을

표 3. 오염물질의 최대농도도달시간 비교

하천명	거리( km )	RMA-4	Kilpatrick의 경험식
한강하류부	3.4	12	14
	5.5	19	22
	6.5	23	26
	7	24	28
	8.3	29	33
	10.4	36	42
	12	42	48
	14	49	56
	17	59	68

파악하기 위하여 RMA-4 모형을 적용하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 갈수시 한강하류부에서 종분산계수 예측에는 자연하천의 실측자료로부터 유도되었으며, 단면별로 분산계수의 편차가 크지 않으며, 국내 하천자료 사용의 수월성을 고려하여 서일원과 정태성(1988)식과 Kashefipour등(2002)식을 사용할 수 있다고 판단되며, 갈수시 한강하류부의 종분산계수값은  $50 m^2/s$  내외로 판단된다.

2. 하천에 순간적으로 유입된 오염물질은 분산계수가 클수록 하류부에서 오염물질의 최초도달시간, 최대농도 도달시간은 빨라지며, 체류시간이 증가한다.

3. 갈수시 한강하류부에서 오염물질의 최대농도 도달시간을 예측 할 경우, 최대농도의 이동 속도와 단면평균유속이 비슷하므로 단면평균유속을 이용하거나, Kilpatrick의 경험식을 사용 할 수 있다고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2002년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 지원에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

강주복, 박상길, 김원규, 김종화 (1990). "불규칙한 자연 하천에서 오염물질의 횡확산." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제23권, 제2호, pp. 213-225.

김원, 김양수, 우효섭 (1995). "부정류모형을 이용한 한강하류부 하도의 조도계수 산정." **한국수 자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 28-6, pp. 133-146.

김형일, 이종설, 허준행, 조원철 (1998). "한강하류부에서의 오염물질의 거동 특성 연구." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제1호, pp. 85-93.

박무중, 김중훈, 윤용남 (1994). "RMA-4에 의한 한강하류부에서의 오염물 확산 이송 특성연구." **대한토목학회 학술발표회 논문집(II)**, 대한토목학회, pp. 89-92.

서일원, 정태성 (1994). "자연하천에서의 종확산계수 추정식 개발." **대한토목학회 학술발표회 논문집(II)**, 대한토목학회, pp. 101-104.

서일원, 정태성 (1995). "종확산계수에 관한 연구: I. 현존 종확산계수 추정식 비교." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제28권, 제3호, pp. 205-216.

서일원, 유대영 (1997). "오염물질의 이동역학 및 확산 거동해석." **한국수자원학회지**, 한국수자원 학회, 제30권, 제4호, pp. 21-27.

서울시정개발연구원 (1994). **한강 수질관리 효율화 방안 연구**.

서울시정개발연구원 (1999). **잠실 상수원의 유입오염 물질 조사 및 관리 연구**.

우효섭 (2001). **하천수리학**. 청문각.

윤세의, 이재광, 박성민 (1999). "확산계수 특성분석을 위한 RMA-4 모형의 적용." **대한토목학회 학술발표회 논문집(III)**, 대한토목학회, pp. 585-588.

윤세의, 한건연, 한정석, 김정수 (2000). "수리모형을 이용한 자연하천에서 종확산계수 추정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제4호, pp. 407-417.

윤세의, 한건연, 한정석, 김정수 (2001). "180°만곡수로에서의 확산계수 특성분석." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, pp. 371-380.

최철권, 배덕효, 한건연, 윤세의 (2000). "GIS를 이용한 종확산계수 산정에 관한 연구." **대한토목학회 학술발표회 논문집(III)**, 대한토목학회, pp. 157-160

한강관리사업소(2001). **수심평면도**.

한강홍수통제소, <http://211.114.42.220>.

한건연, 김상호, 박재홍 (1999). "Petrov-Galerkin 기법에 의한 오염물의 2차원 이송-확산해석." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 547-552.

한건연, 김상호 (1999). "하천에서의 오염된 지류유입에 의한 2차원 수질 모의." **대한토목학회 학술발표회 논문집(III)**, 대한토목학회, pp. 207-210.

한건연, 이을래 (2002). "한강하류부에서의 2차원 수질 모형의 개발 및 적용." **한국수자원학회 논문집**, 제35권, 제3호, pp. 261-274

한정석, 이준호, 김정수, 윤세의 (2001). "한강하류부 확산계수 추정." **대한토목학회 학술발표회 논문집**. DD1333752.pdf.

환경부, <http://www.me.go.kr/>

Boning, C. W. (1974). "Generalization of stream travel rates and dispersion characteristics from time-of-travel measurements." *U. S. G. S Journal of Research*, Vol. 2, No. 4, pp. 495-499.

Deng, Z. Q., Vijay P. Sing, Lars Bengtsson (2001). "Longitudinal dispersion coefficient in stream

- river." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, pp. 919-927.
- 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. (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.
- Gurdak, J. J., Spahr, N. E. and Szmajter, R. J. (2002). "Traveltime characteristics of Fore Creek and Black Gore Creek, Upper Colorado River basin, Colorado." USGS, *WRI Report 02-4037*.
- 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.
- Jobson, H. E. (1996). "Prediction of traveltime and longitudinal dispersion in rivers and streams." *WRI*, 96-4013, pp. 69
- Kashifipour, S. M., Roger A. Falconer (2002). "Longitudinal dispersion coefficients in natural channels." *WRI* 36, pp. 1596-1608.
- Kilpatrick, F. A. and Wilson, J. F. Jr (1982). "Measurement of time of travel in streams by dye tracing." *TWT-03-A9*, pp. 27, (Revision.).
- King, I. P. (1994). *RMA2 /RMA4 Primer*, Brighamyoung university - engineering computer graphics laboratory.
- Kratzer, C. R. and Biagtan, R. N. (1997). "Determination of traveltimes in the lower San Joaquin River basin, California, from dye-tracer studies during 1994-1995." *WRI*, 97-4018, pp. 20.
- 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.
- Seo, I. W. and Cheong, T. S. (1998). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural stream." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE Vol. 124, No. 1, pp. 25-32
- Taylor, G. I. (1954). "Dispersion of matter in turbulent flow through a pipe." *Journal of Proceedings of the Royal Society*, London, England, Series A., Vol. 223, pp. 446-468.

(논문번호:03-05/접수:2002.11.21/심사완료:2003.06.14)