

## 단위오염도를 이용한 하천 오염물질의 이동시간과 종확산 예측

## Prediction of Travel Time and Longitudinal Dispersion for Water Pollutant by Using Unit Concentration Response Function

김수전\* / 김형수\*\* / 김병식\*\*\* / 서병하\*\*\*\*

Kim, Soo Jun / Kim, Hung Soo / Kim, Byung Sik / Seoh, Byung Ha

## Abstract

This study suggests the use of a simple method, called the unit concentration response function(UCRF) for predicting travel time and dispersion of pollutants with the minimum information of study area instead of numerical models which are widely used in the previous studies. However, the numerical models require time-consuming, tedious effort, and many data sets. So we derive the UCRF using some components such as travel time, peak concentration, and passage time of pollutant etc. We use the regression equation for the estimations of components which were developed from the investigations of many river basins in USA. This study used the regression equation for the UCRF to the accident of Dichloromethane leak into the Nakdong River occurred on June 30, 1994 and applied the UCRF for the predictions of travel time and dispersion. The predictions were compared with the results by QUAL2E model.

The results by the regression equation and QUAL2E model had a good agreement between observed and simulated concentrations. Therefore, the regression equation for the UCRF which can simply estimate travel time and concentration of pollutants showed its applicability for the ungauged basin.

**keywords** : unit concentration response function, travel time, longitudinal dispersion, QUAL2E

## 요 지

본 연구에서는 자료수집과 적용에 상당한 시간과 노력이 요구되는 기존의 수치모형들 대신에 최소한의 유역정보를 이용해 오염물질의 이동시간과 확산을 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 즉, 하천에서 오염물질의 이동 속도, 시간에 따른 오염물질의 침투농도, 오염물질이 하천의 한 점을 통과하는데 소요되는 시간장경 등의 요소들을 이용한 단위오염도의 개념을 도입하였으며, 이들 요소들의 추정을 위해서는 미국 내의 수많은 하천을 대상으로 개발된 회귀방정식을 이용하였다. 본 연구에서는 낙동강 본류 성서공단에서 1994년 6월 30일에 발생한 디클로로메탄 누출사고에 대해 회귀방정식으로 단위오염도의 요소들을 추정하고, 이를 적용하여 오염물질의 이동시간과 확산을 예측하였으며, QUAL2E 모형을 이용해 얻은 결과와 비교분석하였다.

\* 정희원 · 국립방재연구소 연구2팀 연구원

Researcher, Research Team 2, NIDP, Mapo-Gu, 121-719, Korea (E-mail: soojuny@nema.go.kr)

\*\* 정희원 · 인하대학교 토목공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea

\*\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 선임연구원

Senior Researcher, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-si, 2311, Korea

\*\*\*\* 정희원 · 인하대학교 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea

회귀방정식과 QUAL2E 모형으로 모의한 결과, 두 모형 모두 모의치가 관측치와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 따라서 간편하게 오염물질의 이동시간과 농도를 예측할 수 있는 회귀방정식에 의한 단위오염도는 유역정보가 부족한 유역에서 적용성이 뛰어날 것으로 사료된다.

**핵심용어 :** 단위오염도, 이동시간, 종적확산, QUAL2E

## 1. 서 론

산업화와 도시화로 각종 오염물질들이 하천으로 유입될 수 있는 가능성은 지속적으로 증가하고 있다. 따라서 오염물질의 이동시간이나 확산을 신속하게 추정하는 방법은 해당 유역에서의 오염통제나 경고 시스템을 위해 필요하며, 오늘날 이러한 문제를 해결하기 위해 컴퓨터를 이용하여 수치모형을 개발하고 또한 사용하고 있다. 하지만 수치모형을 이용할 경우 문제가 되는 특정 하천구간에서 모형의 보정과 검증이 거치지 않고서는 어느 누구도 결과값들을 확신하기가 어렵다. 그리고 모형에 필요한 방대하고 정확한 정보를 얻는다는 것은 그다지 쉬운 일이 아니다. 따라서 목표한 결과를 얻는데 필요 이상의 시간과 노력을 투자해야하기도 하고 방대한 자료로 인해 발생한 오차가 최종 결과값에 큰 영향을 미치기도 한다.

본 연구에서는 위와 같이 시간과 노력, 그리고 방대한 정보를 요구하는 모형들 대신에 최소한의 유역정보를 통해 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 이는 Kilpatrick(1993)이 제시한 개념으로 하천에서 오염물질의 이동속도, 시간에 따른 오염물질의 침투농도, 오염물질이 하천의 한 점을 통과하는데 소요되는 시간장경 등을 이용한 단위오염도의 개념을 도입한 것이다. 본 연구에서는 단위오염도를 이용하여 시간-농도 곡선을 추정하고 이를 적용하여 QUAL2E 모형과 비교하고자 한다.

Taylor(1954)가 종확산 연구에서 1차원 Fickian 확산 방정식(diffusion equation)을 처음 소개한 이후 Day(1975)는 자연수로에서의 유체입자의 종확산(longitudinal dispersion)에 관한 연구를 소하천에 대해서 여러 실측을 통해 수행하였다. Kilpatrick(1993)은 오

염물의 이송·확산과정을 설명하기 위해 단위오염도 개념을 최초로 사용하였으며, Jobson(1996)은 미국내의 수많은 하천을 대상으로 관측된 자료를 바탕으로 오염물질의 이송·확산에 관련된 회귀방정식을 제시하였다.

국내의 수질문제에 대한 연구는 1980년대 이후부터 외국에서 개발된 모형을 국내에 들여와 적용하기 시작한 QUAL2E 모형이나 WASP 모형과 같은 수질모형에 대한 연구가 대부분이고 이에 비하여 오염물질 자체의 거동에 대한 국내의 연구는 상대적으로 미흡하였다. 이에 대한 연구로 서일원과 유대영(1995)은 저류대의 영향을 고려하여 대상지점의 시간-농도 분포곡선을 모의하였고 김정환(2000)은 저류대의 영향뿐만 아니라 비보존성 물질의 손실을 고려하여 오염물질의 이송·확산에 대한 연구를 수행하였다. 윤세의 등(2003)은 하천에 순간 유입된 오염물질의 거동 특성에 대해 연구한 사례가 있으며, 감상단과 송미영(2004)은 오염물질의 거동을 프랙탈 이송확산방정식에 의하여 해석적으로 유도하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 오염물질의 시간-농도 곡선

하천에서 오염물질이 어떻게 혼합되고 확산되는지를 이해하는 한 방법으로 추적자(보존성 물질)를 이용할 수 있다. 하천에서 추적자의 확산과 혼합은 하도의 세 방향으로 발생한다. 수직방향의 혼합은 다소 신속하게 진행되고, 측방향 혼합은 훨씬 느리지만 수 킬로미터의 범위내에서 진행되며, 경계가 없는 종방향 확산은 무한히 지속된다. 따라서 흐름에서의 지배적인 혼합과정은 종방향 확산이며 추적자의 농도는 횡단면에 따라서 균등하다고 가정한다.

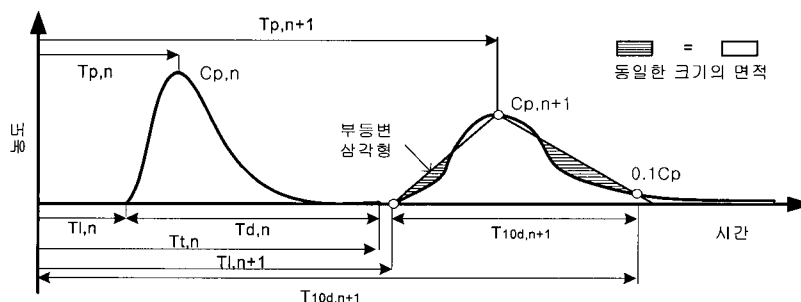


Fig. 1. Tracer-Response Curves(Kilpatrick & Wilson, 1989)

추적자의 주입에 따른 추적-반응 곡선을 표시하는 방법은 Fig 1에서 묘사한 바와 같이 2개 이상의 횡단면 적에서 시간에 따른 농도변화를 도시하는 것이다. 추적자-반응 곡선은 하천에서의 이동시간과 확산에 관련된 특성인자를 결정하는데 기본이 된다.

횡단면에서 완전혼합이 이루어진 후에 단면적을 통과하는 추적자의 질량  $M_r$ 은 Eq.(1)과 같다.

$$M_r = \int_{T_i}^{T_r} C \times Q \times dt \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 추적자의 수직 농도(균등)[mg/L],  $Q$ 는 유량[L/s]이다.

Eq.(1)을 통하여 하류 임의의 지점에서 추적자의 질량  $M_r$ 과 미리 계측된 주입 추적자의 질량이  $M_i$ 를 통해, 추적자 회복율  $R_r$ 은 Eq.(2)와 같이 표현된다.

$$R_r = \frac{M_r}{M_i} \quad (2)$$

추적자-반응 곡선의 크기에 영향을 미치는 요소는 유량임을 고려하고 위의 내용들을 종합하여 단위농도  $C_u$ 는 Eq.(3)과 같이 표현된다.

$$C_u = 1 \times 10^6 \times \frac{C}{R_r} \times \frac{Q}{M_i} = 1 \times 10^6 \times \frac{C}{M_r} \times Q \quad (3)$$

여기서  $C_u$ 는 단위농도[ $s^{-1}$ ],  $C$ 는 주입농도[mg/L]이다.

Fischer(1967)는 강의 혼합에 대해서 종적확산계수를 정의하기 위해 이 이론을 사용했다. Fischer의 확산 모형에 의하면 침투농도는 시간에 따라 Eq.(4)와 같은 관계에 있다.

$$C_{up} \propto t^{-\beta} \quad (4)$$

여기서  $C_{up}$ 는 단위침투농도[ $s^{-1}$ ],  $t$ 는 주입이후 시간[hour],  $\beta$ 는 계수이다.

Jobson(1996)은 미국의 60개 이상의 강으로부터 획득한 422개의 단면 자료를 이용해 단위침투농도를 계산하였는데, 이들 자료로부터 이동시간에 대해 Eq.(5)와 같은 회귀방정식을 얻었다.

$$C_{up} = 857 \times T_p^{-0.760} \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{-0.079} \quad (5)$$

여기서  $T_p$ 는 침투농도의 이동시간[hour],  $Q$ 는 측정된 시점의 유량[ $m^3/s$ ],  $Q_a$ 는 연평균 유량[ $m^3/s$ ]이다.

무차원 침투속도( $V_p'$ ), 무차원 배수면적( $D_a'$ ), 상대 유량( $Q_a'$ )을 각각 정의하면 Eq.(6)과 같이 정의하고

$$V_p' = \frac{V_p D_a}{Q} \quad , \quad D_a' = \frac{D_a^{1.25} \times \sqrt{g}}{Q_a} \quad , \quad (6)$$

$$Q_a' = \frac{Q}{Q_a}$$

여기서  $V_p$ 는 침투농도의 이동속도[m/s],  $D_a$ 는 배수면적[ $m^2$ ]이다.

위의 이론들을 바탕으로 많은 데이터를 이용해 구해진 침투농도의 이동속도( $V_p$ )에 대한 회귀방정식은 Eq.(7)과 같다. (무차원 배수면적, 상대유량, 하상경사(S), 유량, 배수면적을 이용)

$$V_p = 0.094 + 0.0143 \times (D_a)^{0.919} \times (Q_a)^{-0.469} \times S^{0.159} \times \frac{Q}{D_a} \quad (7)$$

또한, 회귀식에 의해 침투농도의 이동시간( $T_p$ =거리/ $V_p$ )으로 부터 오염물질의 최초 도착시간( $T_i$ )과 침투농도의 10% 정도가 통과하는 시간( $T_{d10}$ )을 Eqs.(8) and (9)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$T_i = 0.890 \times T_p \quad (8)$$

$$T_{d10} = \frac{2 \times 10^6}{C_{up}} \quad (9)$$

비보존성 물질의 경우 손실율( $k$ )을 고려한 측정 지점의 실제 추적자 질량( $M_{ia}$ )은 Eq.(10)과 같다.

$$M_{ia} = M_i \times e^{-k T_p} \quad (10)$$

여기서  $M_i$ 는 주입지점에서의 질량(kg),  $k$ 는 손실율( $s^{-1}$ )이다.

## 2.2 단위오염도

단위오염도(unit concentration response function, Jobson(1996))의 개념은 단위유량도와 비슷하다. 일반적

으로 볼 때 한 하천의 물리적 특성은 변하지 않고 일정하므로 상류의 어느 한 지점에서 오염물질을 투입시켰을 때 하류 지점에서 관측되는 시간-농도 곡선의 모양은 비슷할 것으로 예상된다(서동일 등, 2002). 따라서, 단위오염도는 '어느 한 하도 구간의 상류 지점에서 순간적으로 투입된 오염물질로부터 발생하는 하류 지점의 시간-농도 곡선'이라고 정의할 수 있다. 여기서 전제조건은 오염물질이 하천의 횡방향과 수직방향으로 완전히 혼합되고 확산된 이후에 단위오염도를 적용해야 한다는 것이다. 따라서 하천방향에 따른 종적확산에 대한 1차원적 개념의 단위오염도라고 할 수 있다. 단위오염도도 단위유량도와 마찬가지로 다음과 같은 3가지 기본 가정을 가지고 있다.

1) 일정기저시간의 가정

동일한 하천구간의 상류에서 투입된 오염물질의 질량이 다를지라도 하류에서 관측되는 오염물질의 유하기간은 동일하다.

2) 비례의 가정

동일한 하천구간의 경우 하류에서 관측되는 시간-농도 곡선의 증거는 오염물질의 투입량에 비례한다. 다시 말하면 상류에서 n 배 만큼 큰 질량의 오염물질이 투입되면 그로인한 시간-농도 곡선의 증거는 n 배 만큼 커진다는 것을 의미한다.

3) 중첩의 가정

하천의 상류에서 임의의 시간에 투입된 각각의 오염물질로 인해 발생한 하류의 오염물질 농도는 각 오염물질에 의한 개개 오염물질 농도를 산술적으로 합한 것과 같다.

여기에서는 개략적인 정보에 의해 삼각단위오염도를 작성하고 이를 이용한다. 사실 단위오염도에서 가장 중요한 오염물질의 도착시간과 첨두농도의 도착시간, 첨두농도를 이용하여 삼각단위오염도를 작성하기 때문에 단위오염도의 형태는 크게 문제가 되지 않는다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 오염물질에 있어 삼각단위오염도와 단위오염도는 총량에 있어서 큰 차이를 나타내지 않는다.

2.3 가우스 분포

순간적으로 유입된 오염물질의 확산분포는 가우스분포로 고려할 수 있다. 농도  $C(x,t)$ 는 질량( $M$ ), 거리( $x$ ), 시간( $t$ ), 확산계수( $D$ )만의 함수로 1차원 흐름에서 농도의 단위는 단위면적을 통과하는 흐름을 생각하면[M/L]의 차원으로 표시된다. 따라서 농도  $C$ 는 Eq.(11)과 같이 질량[M]에 비례하고 어떤 특성길이(확산계수  $D$ 는

$[L^2/T]$  이므로 특성길이  $\sqrt{Dt}$  는 [L]에 반비례한다.

$$C(x,t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (11)$$

3. QUAL2E 모형

QUAL2E 모형은 횡방향과 연직방향으로 잘 혼합된 수지상 하천에서 15가지의 수질항목(DO, BOD, 수온, 조류, 유기 질소, 암모니아성 질소, 질산성 질소, 유기 인, 용존 인, 대장균, 임의 비보존성 물질, 보존성 물질 I · II · III)을 모의할 수 있다.

QUAL2E 모형은 각각 균질의 수문지형 특성을 가진 하천구간을 다룬다. 각 구간은 일련의 동일한 거리를 가진 계산요소 또는 검사체적으로 나누어진다. 질량평형방정식은 각각의 수질항목을 계산하기 위하여 이용되는데 Eq.(12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V \frac{\partial c}{\partial t} &= \frac{\partial(A_c E \frac{\partial c}{\partial x})}{\partial x} dx - \frac{\partial(A_c U c)}{\partial x} dx \\ &\text{축적} \qquad \qquad \qquad \text{확산} \qquad \qquad \qquad \text{이송} \qquad \qquad \qquad (12) \\ &+ V \frac{dc}{dt} + s \\ &\text{동역학 생성/소멸} \end{aligned}$$

여기서  $V$ 는 체적 $[L^3]$ ,  $c$ 는 오염물 농도 $[M/L^3]$ ,  $A_c$ 는 계산요소의 단면적 $[L^2]$ ,  $x$ 는 거리 $[L]$ ,  $E$ 는 종확산계수 $[L^2/T]$ ,  $U$ 는 평균유속 $[L/T]$ ,  $s$ 는 오염물의 외부적인 생성/소멸항  $[M/T]$ 이다.

3.1 유체이송

QUAL2E 모형은 물의 흐름을 정상 부등류로 가정한다. 이러한 특성에 대해서 요소  $i$ 에 관한 유량평형식은 Eq.(13)과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_{i-1} \pm Q_{x,i} - Q_i = 0 \quad (13)$$

여기서  $Q_{i-1}$ 는 계산요소의 상류부 유량,  $Q_i$ 는 계산요소의 하류부 유량,  $Q_{x,i}$ 는 계산요소로 유입(+) 또는 유출(-)되는 측방향 유량이다.

3.2 확산

QUAL2E 모형은 자연하천의 경우에 대한 식과는 상이하지만 수로에 관한 매개변수의 함수로서 확산값을

계산하는데 Eq.(14)의 관계를 이용하고 있다.

$$E = 3.11KnUH^{5/6} \quad (14)$$

여기서  $E$ 는 종확산계수[m<sup>2</sup>/sec],  $n$ 은 수로의 조도계수,  $U$ 는 평균유속[m/sec],  $H$ 는 평균수심[m]이고  $K$ 는 확산에 관한 매개변수로 전단속도  $U^*$ 를 이용하면 다음과 같다.

$$K = \frac{E}{HU^*} \quad (15)$$

## 4. 적용 및 결과

### 4.1 낙동강 수질사고

낙동강은 그동안 수많은 수질사고에 의해 오염되었다. 하지만 이러한 수질사고에 대한 가용자료는 극히 제한적이다. 따라서 여기서는 가용할 수 있는 자료를 최대한 활용하여 1994년에 발생한 디클로로메탄 누출사고에 대해서 적용하였다.

1994년 6월 30일 새벽, 대구시 달서구에 소재한 성서공단에서 디클로로메탄 누출사고가 발생했다. 정확히

얼마의 양이 누출되었는지는 보고된바 없으며 관측된 농도자료의 상호관계를 이용하면 7시간여 동안 약 1.52 ton 정도가 누출되었을 것이라고 추정된다. 수질사고시 달성취수장, 창녕밤숲, 합천적포교, 칠서남지교에서 관측한 농도자료를 확보하였고 각 지점에 대한 특성은 Fig 2와 같다.

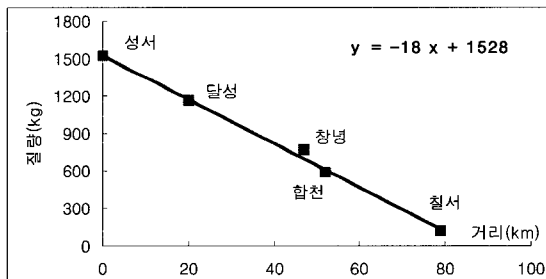
실제 적용을 위해 추정된 성서공단에서 누출된 오염물의 양 1.52ton은 달성 취수장의 관측된 오염물 분포를 참고하여 달성 취수장의 관측치를 가장 잘 표현할 수 있도록 Table 1과 같이 7시간 동안 시간단위로 유입된 것으로 가정하였다.

### 4.2 단위오염도 적용 및 결과분석

#### 4.2.1 회귀방정식과 단위오염도의 이용

오염물질의 질량, 지점간 거리, 유역면적, 유량, 연평균유량 등을 입력하면 회귀방정식에 의해 단위침투농도( $C_{up}$ ), 오염물질 도착시간( $T_1$ ), 침투농도 도착시간( $T_p$ ), 오염물질 통과시간( $T_{d10}$ ; 침투농도의 10%)를 계산하였으며 이러한 정보를 이용하여 삼각단위오염도를 유도할 수 있다(Fig. 3 참조: 삼각단위오염도에서 모든 지점에 대해서 최초도착시간은 '0'시간으로 간주하였다).

삼각단위오염도의 중첩 방법은 Table 1에서 가정한



지점	거리 (km)	유역면적 (km <sup>2</sup> )	연평균유량 (cms)	유량 (cms)	하천경사
성서공단	0	13,728	284.1	161.1	-
달성취수장	20	14,332	323.0	161.1	1/7,000
창녕밤숲	47	16,119	367.5	161.1	1/7,000
합천적포교	52	16,450	375.7	181.1	1/7,000
칠서남지교	79	20,187	757.7	203.6	1/10,900

Fig. 2. Distance Relation for Pollutant Loads and Stream Characters at Locations

Table 1. Loads of Water Pollutant, In Hours

누출시간 (hour)	0	1	2	3	4	5	6	7
누출량 (kg)	400	200	200	150	300	120	100	50

지점	$C_{up}(s^{-1})$	$T_1(hr)$	$T_p(hr)$	$T_{d10}(hr)$
달성취수장	112.997	11.24	12.63	16.15
창녕밤숲	55.44	26.88	30.2	36.9
합천적포교	50.845	29.83	33.52	40.76
칠서남지교	30.758	49.94	56.12	68.01

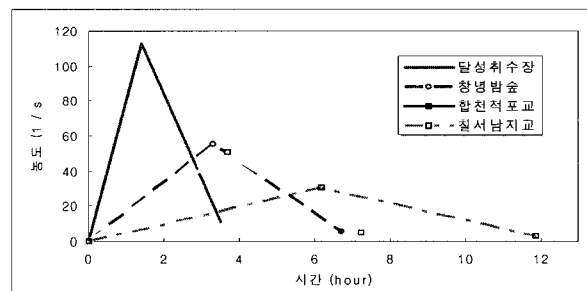


Fig. 3. Application Results of the Regression Equation and Triangle Unit Response Functions

Table 2. The Superposition of Response Function(example: Changnyung)

시간	0	1	2	3	4	5	6	7	농도( $\mu\text{g/L}$ )
27	15.1	-	-	-	-	-	-	-	15.05
28	30.1	7.5	-	-	-	-	-	-	37.63
29	45.2	15.1	7.5	-	-	-	-	-	67.73
30	45.4	22.6	15.1	5.6	-	-	-	-	88.68
31	38.7	22.7	22.6	11.3	11.3	-	-	-	106.55
32	32	19.3	22.7	16.9	22.6	4.5	-	-	118.05
33	25.3	16	19.3	17	33.9	9	3.8	-	124.29
34	18.6	12.6	16	14.5	34.1	13.5	7.5	1.9	118.7
35	11.8	9.3	12.6	12	29	13.6	11.3	3.8	103.44
36	5.1	5.9	9.3	9.5	24	11.6	11.4	5.6	82.4
37	-	2.6	5.9	7	19	9.6	9.7	5.7	59.34
38	-	-	2.6	4.4	13.9	7.6	8	4.8	41.34
39	-	-	-	1.9	8.9	5.6	6.3	4	26.69
40	-	-	-	-	3.8	3.6	4.6	3.2	15.2
41	-	-	-	-	-	1.5	3	2.3	6.82
42	-	-	-	-	-	-	1.3	1.5	2.76
43	-	-	-	-	-	-	-	0.6	0.64

시간에 따른 누출량에 대하여 시간별 삼각단위오염도를 산정한 후 Table 2와 같이 삼각단위오염도를 7시간 동안 1시간 간격으로 시간별로 분포시킨다. 그리고 시간별 오염농도를 중첩함으로써 모의 지점의 시간-농도 관계를 알 수 있다.

4.2.2 QUAL2E 모형과 가우스분포의 이용

본 연구에서는 낙동강 본류의 성서공단에서 칠서남

지교에 이르는 79km 구간에 대해서 수리학적 유사성을 고려하여 6개의 구간으로 구성하였다. 각 구간은 다시 모형의 수행을 위한 계산요소 구간으로 나누었으며, 계산요소 구간의 길이는 2km로 분할하였다. 모의 구간내에서 수질 사고 기간동안 취수장의 취수요소는 없으며 단지 지류의 유입(황강, 남강)만이 있다고 가정하였다. 하도구간에 대한 구간 분할의 모식도는 Fig. 4와 같다.

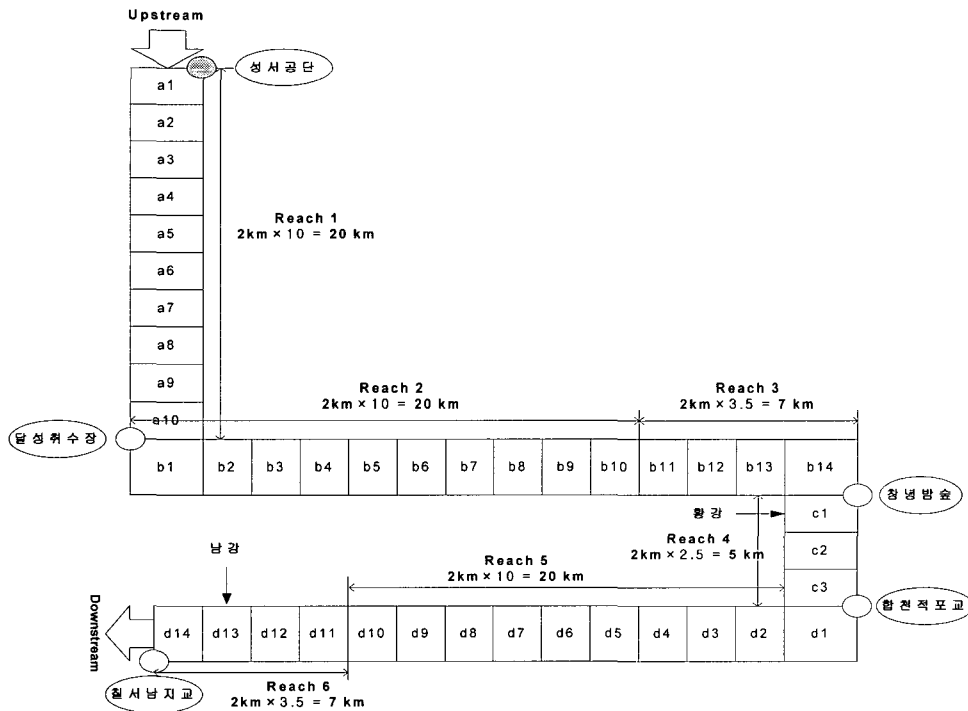


Fig. 4. Stream Network of Computational Reaches and Elements

구성된 모든 입력자료를 QUAL2E 모형에 입력하고 실행하면 각 구간별로 모의된 농도를 알 수 있다. 모의된 농도는 다시 관측지점의 유량을 이용해 Table 3과 같이 시간에 따라 지점별 디클로로메탄의 질량으로 나타낼 수 있다.

각 구간별로 계산된 농도를 1차원 Fickian 확산방정식을 이용하여 시간에 따라 분포시켰다. 그리고 시간에 따라 분포시킨 시간-농도 곡선을 Table 4와 같이 중첩하였다.

#### 4.2.3 민감도 분석

회귀방정식에서 하천의 농도에 영향을 미치는 매개변수는 손실계수(K1) 뿐이다. 그리고 QUAL2E 모형에서 하천의 농도에 영향을 미치는 매개변수는 확산계수(D), 손실계수(K2), 저류계수(a)이다. 따라서 지점별 매개변수에 대한 민감도 분석을 통하여 입력변수에 대한 출력변수의 변화를 평가하였다. 손실계수는  $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-5}(s^{-1})$ , 확산계수는  $20 \sim 100(m^2/s)$ , 저류계수는  $1.0 \times 10^{-7} \sim 3.0 \times 10^{-5}(s^{-1})$ 의 범위를 사용하여

지점별 최적 매개변수를 Table 5와 같이 산정하였다.

#### 4.2.4 회귀방정식과 QUAL2E 모형 결과의 비교·분석

농도관련 매개변수의 보정과 시간에 대한 보정을 통하여 회귀방정식과 QUAL2E 모형에 의해서 모의된 결과를 관측치와 비교하면 Figs. 5~8과 같다.

회귀방정식과 QUAL2E 모형에 의해서 모의된 결과는 비교적 관측치를 잘 모의하고 있다. 회귀방정식은 농도를 QUAL2E 모형은 이동시간의 시간장경을 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 하지만 칠서남지교의 경우 디클로로메탄의 총량에는 차이가 없지만 첨두농도 뿐만 아니라 농도의 시간분포가 큰 차이를 보였다. 이유는 칠서남지교의 상류 가까이 위치하고 있는 지류(남강) 유입에 의한 영향으로, 오염물질과 수체가 완전히 혼합되지 않은 상태에서의 관측자료를 획득하였기 때문에 그에 따른 오차로 인하여 모의치와 큰 차이를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

Table 3. Simulated Pollutant Loads at Locations(Unit, kg)

누출시간(hour)	0	1	2	3	4	5	6	7
달성	330	165	165	124	248	99	82	41
창녕	189	95	95	71	142	57	47	24
합천	155	78	78	58	117	47	39	19
칠서	36	18	18	14	27	11	9	5

Table 4. The Superposition of Gaussian Distribution(example: Changnyung)

시간	0	1	2	3	4	5	6	7	농도( $\mu g/L$ )
32	0.04	-	-	-	-	-	-	-	0.04
33	0.29	0.02	-	-	-	-	-	-	0.31
34	1.42	0.15	0.02	-	-	-	-	-	1.59
35	5.22	0.71	0.15	0.02	-	-	-	-	6.09
36	14.34	2.61	0.71	0.11	0.03	-	-	-	17.80
37	29.53	7.18	2.61	0.53	0.22	0.01	-	-	40.08
38	45.54	14.78	7.18	1.95	1.07	0.09	0.01	-	70.62
39	52.62	22.80	14.78	5.37	3.91	0.43	0.07	0.01	100.00
40	45.54	26.35	22.80	11.06	10.76	1.57	0.35	0.04	118.47
41	29.53	22.80	26.35	17.05	22.16	4.31	1.30	0.18	123.68
42	14.34	14.78	22.80	19.70	34.18	8.87	3.58	0.65	118.91
43	5.22	7.18	14.78	17.05	39.50	13.68	7.37	1.79	106.57
44	1.42	2.61	7.18	11.06	34.18	15.81	11.37	3.68	87.31
45	0.29	0.71	2.61	5.37	22.16	13.68	13.14	5.68	63.65
46	0.04	0.15	0.71	1.95	10.76	8.87	11.37	6.57	40.42
47	-	0.02	0.15	0.53	3.91	4.31	7.37	5.68	21.98
48	-	-	0.02	0.11	1.07	1.57	3.58	3.68	10.03
49	-	-	-	0.02	0.22	0.43	1.30	1.79	3.75
50	-	-	-	-	0.03	0.09	0.35	0.65	1.13
51	-	-	-	-	-	0.01	0.07	0.18	0.26
52	-	-	-	-	-	-	0.01	0.04	0.05
53	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01

Table 5. Parameter Values by Sensivity Analysis

지점	매개변수	계수값	침투시간(hr)	침투농도( $\mu\text{g/L}$ )
달성취수장	$K1(s^{-1})$	$5.0 \times 10^{-6}$	23	226.06
	$K2(s^{-1})$	$1.0 \times 10^{-6}$	22	238.15
	$D(m^2/s)$	60	22	225.92
	$\alpha(s^{-1})$	$1.0 \times 10^{-6}$	22	252.25
창녕밤숲	$K1(s^{-1})$	$5.0 \times 10^{-6}$	41	99.93
	$K2(s^{-1})$	$1.0 \times 10^{-6}$	41	123.67
	$D(m^2/s)$	40	41	117.88
	$\alpha(s^{-1})$	$1.0 \times 10^{-5}$	41	123.67
합천적포교	$K1(s^{-1})$	$1.0 \times 10^{-5}$	44	33.25
	$K2(s^{-1})$	$1.0 \times 10^{-7}$	44	80.90
	$D(m^2/s)$	20	44	84.77
	$\alpha(s^{-1})$	$1.0 \times 10^{-6}$	44	78.34
칠서남지교	$K1(s^{-1})$	$5.0 \times 10^{-7}$	59	13.46
	$K2(s^{-1})$	$5.0 \times 10^{-6}$	61	20.18
	$D(m^2/s)$	20	61	23.43
	$\alpha(s^{-1})$	$1.0 \times 10^{-5}$	61	23.17

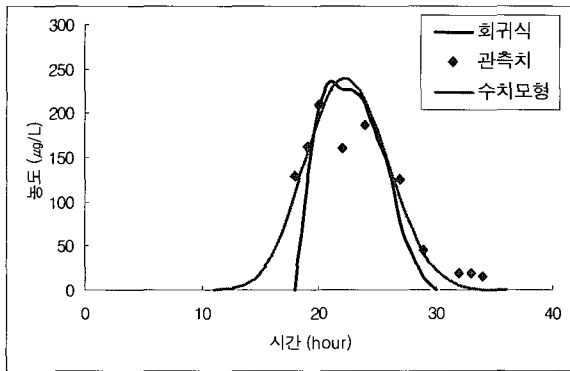


Fig. 5. The Concentration, In Hour(Dalsung)

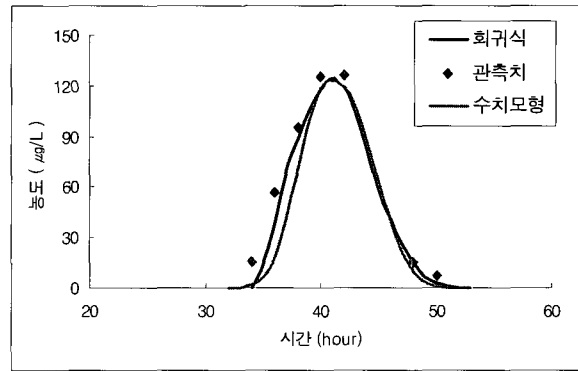


Fig. 6. The Concentration, In Hour(Changnyung)

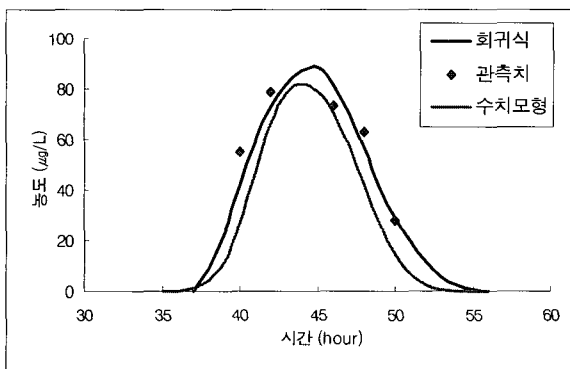


Fig. 7. The Concentration, In Hour(Hapchun)

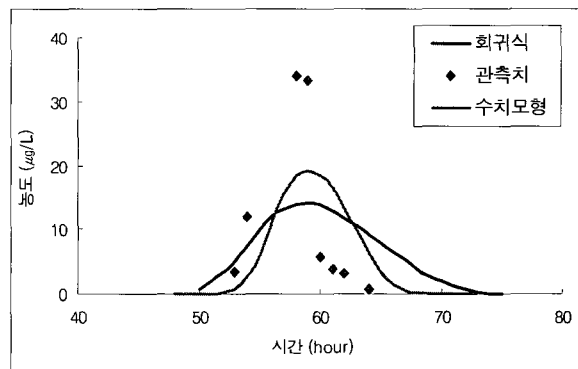


Fig. 8. The Concentration, In Hour(Chilseo)

## 5. 결 론

기존 연구들은 하천에 오염물질의 유입에 의한 수질을 예측하기 위해서 다양한 수치모형들을 이용하였다. 하지만 본 연구에서는 간편히 수질을 예측할 수 있는

방법을 제시하였고 그 적용성을 검토하였다. Kilpatrick (1993)이 제시한 단위오염도 개념과 Jobson(1996)에 의해 개발된 회귀방정식으로 침투농도, 침투농도의 이동 속도, 오염물질의 도착시간, 침투농도의 10%농도가 통과하는 시간을 알 수 있었다. 이러한 정보를 바탕으로



삼각단위오염도를 개발하고 각 단위오염도를 중첩함으로써 모의지점의 시간에 따른 농도를 예측할 수 있었다. 적용성을 검토하기 위해 1994년 6월 30일, 낙동강 중류에서 발생한 수질사고인 디클로로메탄 누출사고에 대해 실제 적용해 보았고, 이미 국내에 잘 알려진 수질 수치모형인 QUAL2E 모형에 의해 산정한 결과와 비교·분석하였으며 중요 매개변수에 대한 민감도분석도 실시하였다. 본 연구를 통한 수행결과의 요약과 결론은 다음과 같다.

- 1) 1994년 6월 30일, 낙동강 중류 성서공단에서 발생한 디클로로메탄의 누출사고에 대하여 회귀방정식에 의해 모의한 결과 모의치와 관측치가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.
- 2) 회귀방정식과 단위오염도를 이용할 경우 2~4개의 유역정보(하상경사, 실제유량, 연평균유량, 배수면적)만을 이용하여 간단히 모의지점에 대한 오염물질의 시간별 농도를 알 수 있었다. 그러나 QUAL2E 모형과 가우스분포를 이용할 경우 회귀방정식과 단위오염도를 이용하는 경우 보다 상대적으로 더 많은 자료가 요구가 되고 이에 따른 시간과 노력이 필요하였다.
- 3) 농도를 모의하기 위하여 1개의 매개변수(손실계수)에 대한 보정이 필요했지만 QUAL2E 모형의 경우 3개의 매개변수(확산계수, 손실계수, 저류계수)에 대한 보정이 필요하였다. 따라서 QUAL2E 모형 모형에 비하여 간단히 매개변수를 보정할 수 있었다.

따라서 최소한의 유역정보만을 이용하여 간편하게 오염물질의 이동시간과 농도를 예측할 수 있는 본 연구의 장점은 추후 유역정보가 부족한 유역에서 적용성이 뛰어날 것으로 판단된다. 또한 수질사고의 경우와 같이 짧은 시간 안에 오염물질의 이동시간과 농도를 판단하여야 할 경우 유용할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

김정환 (2000). 하천에서의 오염물질 이송·확산 예측, 박사학위 논문, 고려대학교.

김상단, 송미영 (2004). “하천오염물질의 모의를 위한 프랙탈 이송확산방정식 해석적 유도.” **한국수자원학회논문집**, 제37권 11호, pp. 889-896.

서동일, 박석순, 이영수, 김경섭, 황병기 (2002). 수질모델링, 동화기술, pp. 219-224.

서일원, 유대영 (1995). “자연하천에서 오염물질의 확산 및 저장에 관한 연구.” **한국수자원학회지**, 제28권, 제6호, pp. 107-118.

윤세의, 고재형, 김수열 (2003). “하천에 순간 유입된 오염물질의 거동 특성 분석.” **한국수자원학회논문집**, 제36권 제4호, pp. 575-586.

Day, T.J. (1975). “Longitudinal Dispersion in Natural Channels”, *Water Resources Research*, Vol. 11, pp. 909-918

Fischer, H.B. (1967). “The Mechanics of Dispersion in Natural Streams”, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE Vol. 93, No. HY6, pp. 187-216.

Jobson, H.E. (1996). Prediction of Traveltime and Longitudinal Dispersion in Rivers and Streams, *USGS WRIR* 96-4013.

Kilpatrick, F.A. (1993). Simulation of soluble waste transport and buildup in surface waters using tracers: U.S. *Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, book 3, chap. A20, p. 37.

Taylor, G.I. (1954). “The Dispersion of Matter in Tubulent Flow Though a Pipe.”, *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A, Vol. 223, pp. 446-468.

(논문번호:05-33/접수:2005.02.28/심사완료:2006.02.28)

