〈論　文〉

洛東江 流域에서의 毒性汚染物 排出에 따른 水質解析 模型의 開發
Water Quality Model for the Toxic Pollutant Transport Analysis in the Nakdong River

韓 健 淵*, 金 光 涉**
HAN Kun Yeun and KIM Gwang Seob

Abstract□ A water quality model RIV-LAG1 for the toxic pollutant transport analysis is developed based on varied flow analysis and one-dimensional Lagrangian method. Applying to the prismatic channel, it shows accurate results compared with the analytical solutions. The model is applied to the Nakdong River to analyze the phenol spill accident, which occurred on March, 1991. The computed results have good agreements with the observed data. The travel times in the reach of Gumi to Mulkeum based on the monthly average and minimum flow are computed. The suggested model can be used to study the impact of the chemical spills and clean-up plans in the Nakdong River.

요　지 : 낙동강 유역에서의 독성오염물 배출에 따른 수질해석을 위하여 부등류해석과 1차원 Lagrangian 해석기법을 이용한 RIV-LAG1 모형을 개발하였다. 균일하도에 대한 적용결과는 해석해와 잘 일치되고 있었다. 1991년 3월 낙동강 페놀오염시에 대하여 본 RIV-LAG1 모형을 적용한 결과 계산치는 당시의 실측치와 비교하여 일치되고 있었다. 낙동강 유역의 구미-물금 구간에 대한 월별 평균 및 최소유량자료를 기초로 하여 구미공단에서의 독성오염물 방류사고에 따른 하류부 주요 취수장에서의 오염물 유하시간을 계산하여 제시하였다. 본 연구 모형은 낙동강 유역에서의 독성오염물 배출에 따른 수질관리에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

1. 서　론

낙동강 연안에서는 각종 산업시설의 확충과 인구의 증가에 따라 각종 폐수가 방류되고 있으며 이에 따라 적정수질 기준을 갖춘 각종 용수의 확보가 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 특히, 1991년 낙동강 유역에서의 페놀방류로 인한 대구 및 부산등 영남 지역에서의 수돗물 파동사건은 각종 산업시설에서의 독성오염물 방류에 따른 수질해석의 필요성을 증대시키고 있다. 낙동강 유역에서는 대구, 부산, 마산, 창원등 영남권 대도시의 상수원이 낙동강의 본류에서 취수되고 있는 점을 감안하면, 유역의 상류부인 구미, 김천, 왜관, 대구 등의 각종 산업시설에서 예기치 못한 방류나 사고로 인한 누출에 따른 독성오염물의 유동특성 해석을 위한 수질모형의 개발이 시급히 연구되어야 할 것으로 사료되었다.

본 연구에서는 낙동강 유역으로 유입된 독성오염물의 해석을 위하여 Lagrangian 기법을 기초로 한 수치모형 RIV-LAG1을 개발하고 이를 이용하여 하천에서 오염물의 유동특성을 파악하고자 하는 것을 그 목적으로 하고 있다. RIV-LAG1 모형은 1991년 3월 페놀오염시의 낙동강 유역에 적용되었으며 상류 및 중류지역에서의 독성오염물 유입에 따른 유동특성이 파악되어 이 유역에서 독성오염물

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 부교수
** 경북대학교 대학원 토목공학과

관리를 위한 새로운 수질예측 기법을 제시하였다.

하천 및 저수지에서의 독성오염물 유입에 따른 수질해석을 위하여 많은 동수역학적, 지질학적, 화학적, 생물학적 연구가 수행되어 왔다. (Ambrose 외, 1983; Dickson 외, 1982; Neely and Blau, 1984; Popa, 1986; Thomann and Mueller, 1987; Christensen, 1987; Ibrahim and McCorquodale, 1987; Reichart and Wanner, 1987)

특별히 Lagrangian 해석기법을 이용한 수질해석은 Fischer(1972), Jobson(1980, 1987)등에 의하여 개발되었으며, Schoellhamer와 Jobson (1986), McBride와 Rutherford(1984)는 각각 Chattahoochee강과 Waipa강에 대한 수질해석을 위하여 이 기법을 적용하였다. Schoellhamer (1988)는 Lagrangian 기법을 QUAL-II모델과 통합시켰으며 2차원의 부유침전물 해석을 위하여 확장 발전시켰고, Shen과 Yapa(1988), Shen 외 (1993), Yapa 외(1994)는 하천에서의 유류오염에 따른 수질해석을 실시하였다.

국내에서 하천수질해석 분야에 대한 연구는 DO-BOD 해석을 위하여 Eulerian 해석법에 기초한 Streeter-Phelps식을 이용한 해석과 미국 환경청의 QUAL2E 모형의 국내 하천 유역에 대한 적용이 주로 이루어지고 있다.(이길성외,1987; 전경수외, 1993 ; 한건연외,1994,1995)

아직까지 국내에서 독성오염물 유입에 따른 수질해석 모형을 Lagrangian기법에 의하여 개발하고, 하천의 혼합, 세척, 감쇠능력을 계산함으로써 오염물 유하시간의 산정등에 관점을 두고 해석한 연구는 전무한 상태이다. 본 연구를 통하여 독성물질의 오염원과 상수취수장이 공존하는 낙동강 유역에서 효율적으로 적용될 수 있는 수질예측기법이 제시될 수 있겠다.

2. 하천으로의 독성오염물의 유입

하천에서의 대규모의 독성오염물의 유입은 산업폐수나 도시하수에서의 연속적인 배출, 농업용수등에 의한 유출수, 사고등에 의한 우발적인 배출 등의 경로로 이루어진다. 미국에서는 1973년 Mississippi강에 800,000kg에 달하는 Chloroform이 불과 수시간 동안 일시에 방류된 사고가 있었고 1951-1976년에는 Hudson강에 수십년에 걸쳐 270,000kg의 PCB가 배출되어 뉴욕시의 용수취수에 큰 문제를 발생시킨 바 있다. 독일에서는 1986

표 1 독성오염물 배출사고

장 소	일 시	오 염 물	오염 범위	복구 기간	주 오염 사항	복구 대책
낙동강(한국)	1991. 3	phenol	200km	> 7days	식수공급중단	(-)
Alaska(Prince Wm. Sound)	1989. 3	oil spill	650km	1yr	동물 죽음, 300,000마리의 새가 죽음	연안 청소
Rhine Rive (Basil)	1986.11	disulfoton thiometon, Hg, Pesticides	740km	12days	어류 죽음	(준설하지 않았음)
Great Lakes (U.S.)	1957-	PCBs	1700km	> 35yrs	수중 상태계 파괴	PCB금지령
Iowa River (U.S.)	1965-1976	aldrin / dieldrin pesticides	285km	15 yrs	수중 상태계 대규모 살상	Dieldrin금지령
Hudson River (U.S.)	1951-	PCBs	70km	> 25yrs	용수취수제한 및 수중 생태계 파괴	PCB금지령

표 2 독성오염물의 하천 유입형태

유 입 형 태	유 동 특 성
연속적인 유입	– 용질의 운송 및 휘발 – 부유고형물 및 하상 토사이동과 함께 흡수되어 이동 – 하상의 움직이지 않는 침전물로의 흡수 – 흡착 및 퇴적에 의하여 묻혀짐
연속적인 유입의 차단	– 하상의 움직이지 않는 침전물로 부터의 탈착 – 용질의 이동 및 휘발 – 부유침전물로의 재흡착 – 재부유 침전물의 오염 – 부분적으로는 묻혀짐
지표면으로부터의 비점원유입	– 오염물의 주된 이동은 초기호우에 의하여 지배됨 – 용질 및 흡수된 물질의 유입 및 하상에 묻혀짐 – 연속적 재부유
침 출	– 하천으로의 투기에 의한 용질의 느리게 이동됨 – 투기된 오염물의 정화 후에도 수년간 계속됨

표 3 사고로 인한 독성오염물의 유입

유 입 형 태	유 동 특 성
비중 > 1	– 오염물은 하상바닥에 침전됨 – 휘발은 비교적 중요하지 않음 – 흐름속으로 다시 부유이송 되거나 부유 고형물로의 흡수됨 – 하상을 따른 오염물의 느린 이동됨 – 층상침전물로의 확산됨
비중 < 1	– 수표면상 위에 남아있거나 수표면의 속도로 이동됨 – 이 경우에는 휘발이 중요할 수 있음 – 점진적으로 용해되거나 흡착됨 – 확산은 첨두농도를 감쇠시킴 – 풍속과 풍향에 영향을 받음

년 Rhine강으로 대규모의 독성오염물이 유입되어 740㎞ 구간에 걸친 오염피해가 있었고, 미국 Alaska지역에서는 1989년 대규모의 유류 누출사고로 인한 큰 피해를 겪은 바 있다.

국내에서는 1991년 구미공단에서 phenol 배출에 따라 대구시 및 부산시 등의 영남지역에 공급되던 상수원의 오염은 사회적으로 큰 문제를 야기한 바 있다.표 1은 사고로 인하여 발생한 오염물 배출사고 사례를 요약한 것이다.

하천에서 독성오염물의 유입에 따른 오염물의 유동특성은 오염물의 종류에 따라 물리, 화학, 생물학적 작용이 매우 다양하게 나타나는데, 일반적으로 유기독성 화합물의 경우에는 유체이동, 휘발 및 흡착 등의 영향이 크게 된다. 표 2는 독성오염물의 하천으로의 유입형태와 그에 따라 나타나는 영향을 요약한 것이다. 오염물 유입의 일반적인 형태는 도시하수 또는 산업폐수에 의한 연속적인 배출이다. 오염물이 하천수와 혼합될 때 다양한 분리현상이 시작된다. 오염물의 일부는 수체내에 흡수되어 부유물과 같이 이동되기도 하고 일부는 하상의 움직이지 않는 침전물에 흡수되어 상호작용을 일으키게 된다.

흡수된 물질의 일부는 점진적으로 층상의 침전물에 쌓이게 되는데 이는 흡수된 층상 침전물의 교환

비와 침전물의 퇴적률에 따라 변화하게 된다. 연속적인 유입이 중단되면 수주는 초기에는 자정되며 상류의 오염되지 않은 상류수의 유입으로 오염된 폐수를 하류로 내보내어 교환하게 된다. 그러나 오염된 하상 침전물로부터의 오염원은 낮은 농도의 수주로 다시 탈착될 것이며, 이 경우에 하천바닥은 오염물의 내부발생원이 된다. 탈착기간은 경우에 따라 오랜시간 계속될 수 있으며 이는 하상침전물에 포함된 오염물의 양에 의존된다.

우발적인 독성 오염물의 배출은 자주 있는 사건들이 아니나, 이것이 하천수질에 미치는 영향을 고려하면 매우 중요하다. 이 경우에는 대부분 높은 농도의 오염물이 배출될 수 있으며 매우 짧은 기간내에 배출된 총량은 장기간에 걸쳐 계속 배출된 오염물의 양과 동등한 경우가 많아 하천수질 관리면에서 큰 어려움을 겪게 된다. 표 3은 사고로 인한 독성오염물의 우발적인 배출에 따른 특성을 요약한 것이다.

단순한 해석방법의 하나로서 독성물질을 보존성으로 가정하는 경우가 있는데, 이 경우에는 기준에 위배되었는지를 파악하기 위한 첫단계의 해석을 수행할 수 있다. 만약 기준농도에 대한 위배가 예상되면 하천에서 독성물질에 영향을 주는 여러가지 진행과정의 고려에 의해 주요지점에 대한 더욱 구체적인 해석이 수행되어야 한다. 이러한 접근법은 많은 작업량이 필요하나 가용한 기법을 적절하게 적용함으로서 해석이 수행될 수 있다.

독성물질의 농도를 예측하는 것보다 직접 측정하는 것이 더욱 정확하지만 이 경우에는 비용이 많이 든다. 또한, 독성물질이 하상의 임의 지역에 존재하고 유동하고 있기 때문에 독성물의 위치를 찾는 것도 시간을 필요로 한다. 배출의 용해시간을 추정함으로써 시료 채취계획을 수립하고 실행하는 것이 타당한 것인지를 결정할 수 있다.

유동되고 있는 독성물의 종류, 하천의 수리, 수문학적 특성에 근거하여 배출 결과에 관련된 가상상황하에 대한 해결책을 구하기 위해 다양한 기법들이 적용될 수 있다. 누출이 발생하기 전에 그 영향을 예견하기 위해 가능한 가상방류 상황도 계산할 수가 있다. 독성물의 누출이 심각한 결과를 낳는 상황에서 이러한 사전준비는 반드시 필요한 절차로 사료된다. 독성물의 종류, 유입형태, 하천으로 유입된 독성물질의 물리적, 화학적, 생물학적 및 지질학적 특성은 각 독성물질에 대하여 다양한 고유의 특성을 가지기 때문에 개별적인 해석을 필요로 한다.

수치모형에서 각각의 오염물에 대하여 모든 특성을 고려한다는 것은 현실적으로 매우 어려운 작업으로 판단되어 본 연구에서는 우선 첫 단계로 보존성물질과 비보존성 물질로 구분하였고, 독성물질의 종류에 따라 상이한 감쇠계수를 가지는 것으로 고려하여 해석하였다.

3. RIV-LAG1 모형의 개발

3.1 흐름특성 해석

하천에서 주어진 유량에 대한 수심을 결정하기 위하여 부등류의 에너지방정식을 표준축차계산법에 의하여 해석하였다.

하도내의 임의의 지점 1, 2에 대하여 에너지 방정식을 적용하면 기지점의 수심과 총수두를 y_1, H_1으로 놓으면 미지점에서의 수심 y_2에 관한 (1)식을 얻게된다.

$$y_2+\frac{\alpha_2 Q^2}{2gA_2^2}-\frac{1}{2}S_{f_2}(x_2-x_1)+z_2-H_1-\frac{1}{2}S_{f_2}(x_2-x_1)=0 \qquad (1)$$

여기서, H;총 수두 z;하상고 y;수심 x;거리

α;에너지 보정계수 S_f;마찰손실경사

(1)식은 (2)식과 같은 y_2에 대한 비선형식 F로 놓고 dF/dy_2를 (3)식과 같이기술하면 Newton-Raphson 방법에 의하여 그 해를 구할 수 있다.

$$F(y_2)=y_2+\frac{\alpha_2 Q^2}{2gA_2^2}-\frac{1}{2}S_{f_1}(x_2-x_1)+z_2-H_1-\frac{1}{2}S_{f_1}(x_2-x_1)=0 \qquad (2)$$

$$\frac{dF}{dy_2}=1-\frac{\alpha_2 Q^2 B_2}{gA_2^3}+(x_2-x_1)$$

$$\left(S_{f_2}\frac{B_2}{A_2}+\frac{2}{3}\frac{S_{f_2}}{R_2}\frac{dR_2}{dy_2}\right) \quad (3)$$

3.2 Lagrangian 해석이론

Lagrangian 해석기법에 있어서는 난류확산의 해석을 위하여 어떤 물질의 농도를 변화시키는데 작용하는 모든 요소를 고려하여 개개의 입자를 추적하여 나간다. 그림 1에서와 같이 하천에서의 임의의 유체구간을 고려하고, 이것이 하류로 움직이는 평균유속을 U라 하고 구간내 한 요소의 단면적을 Δa, 거리를 Δx라고 하면 질량보존의 법칙에 의하여 (4)식과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial(c\,\Delta a\,\Delta x)}{\partial t}=\Delta a\,\Delta x\,\frac{\partial(u'c')}{\partial \eta}+\omega\,\Delta a\,\Delta x \quad (4)$$

여기서, c ; 운송되는 물질의 농도
u′ ; 유속의 시간변동치 (u-U)
η ; Lagrangian 거리좌표
U ; 하천의 평균유속
u ; 유체입자의 이동속도
ω ; 단위체적, 단위시간당 운송되는 source/sink항

(4)식에서 Lagrangian 거리좌표 η는 (5)식과 같이 주어진다.

$$\eta=x-x_0-\int_{t_0}^{t} U\,d\tau \quad (5)$$

여기서, x_0;시간 t_0에서의 요소의 위치

(4)식은 임의의 구간 요소에 대해서는 (6)식과 같이 나타낼 수 있고, 이것을 전체면적에 대하여 적분하면 (7)식과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial t}-=\frac{\partial u'c'}{\partial \eta}=\omega \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}-=\frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial \eta}=\Omega \quad (7)$$

여기서, C ; 주어진 단면에서의 농도의 평균치
c′ ; 농도의 시간변동치(c′=C-c)
Ω ; 주어진 단면에서의 source/sink 항의 평균치

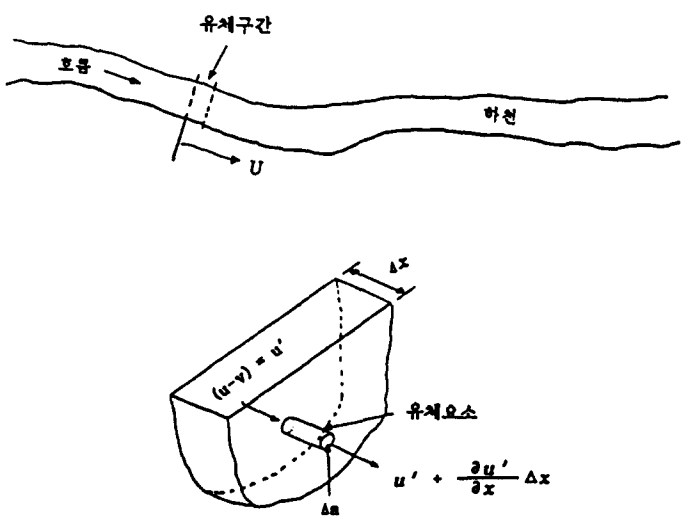


그림 1 Lagrangian해석을 위한 유체구간

여기서, Ω는 하천의 지류에서 발생하는 점 오염원의 유입이나 구간과 대기의 경계면에서의 열에너지 이송양상등을 나타낸다. (7)식에서의 두번째항은 확산이동항이므로 종확산계수 E_x를 이용하여 나타내면 (8)식과 같다.

$$\overline{u'c'} = -E_x \frac{\partial C}{\partial \eta} \tag{8}$$

(8)식을 (7)식에 대입하면 (9)식과 같이 기술된다.

$$\frac{\partial C}{\partial \eta} + \frac{\partial\left(E_x \frac{\partial C}{\partial \eta}\right)}{\partial \eta} = \Omega \tag{9}$$

(9)식을 적분하여 정리하면 (10)식과 같다.

$$C = C_0 - \int_0^t \frac{\partial\left(E_x \frac{\partial C}{\partial \eta}\right)}{\partial \eta}\, dt' + \int_0^t \Omega\, dt' \tag{10}$$

여기서, C_0; 구간에서의 초기농도
C; t시간 경과후의 농도

(10)식은 적분형이기 때문에 수치해석상 훨씬 용이하게 계산될 수 있다. 구간의 거리는 기지값이고, 확산거리항은 각 거리간격에 대하여 양해의 유한차분법으로 구할 수 있어 (11)식과 같이 표시된다.

$$\int_0^{\Delta t} \frac{\partial\left(E_x \frac{\partial C}{\partial \eta}\right)}{\partial \eta}\, dt' = \frac{E_{xi}}{U^2 \Delta t}(C_{i+1}^0 - C_i^0) - \frac{E_{xi-1}}{U^2 \Delta t}(C_i^0 - C_{i-1}^0) \tag{11}$$

여기서, C_{i-1}^0 C_i^0 C_{i+1}^0; 단면 i−1, i, i+1에서의 초기농도 E_{xi}; 단면 i와 i+1의 중간지점에서의 확산계수

그림 2와 같이 각 구간내에서의 농도는 잘 혼합되어 있고 유체구간 K (단면 i-1과 i 사이)로 부터 K+1 (단면 i와 i+1 사이)로의 유량을 EQ(K) 라 하면 각 경계면을 통한 물질의 유동은 연속의 법칙에 의해서 (11)식은 (12)식과 같이 기술될 수 있다.

$$\int_0^{\Delta t} \frac{\partial\left(E_x \frac{\partial C}{\partial \eta}\right)}{\partial \eta}\, dt' = \frac{EQ(K-1)\Delta t(C_{k-1}^0 - C_k^0) + EQ(K)\Delta t(C_{k+1}^0 - C_k^0)}{V} \tag{12}$$

여기서, V; 구간 K의 체적

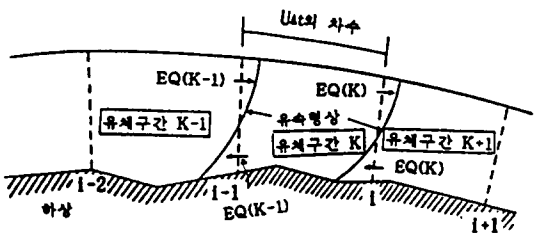


그림 2 유체구간에서의 확산과정

본 연구에서는 독성오염물의 방류에 따른 수질해석을 위하여 하천에서의 흐름해석 결과를 기초로 하고, Lagrangian 해석기법에 의하여 오염물의 유동상황을 추적하는 RIV-LAG1 모형을 개발하였다.

3.3 균일하도에 대한 적용

본 연구모형의 적용성을 검토하기 위하여 균일하도에서 임의의 시간간격 τ 동안에 유입된 오염물의 영향에 대하여 수치실험을 실시하였다. (13)식은 이 경우에 대한 해석해를 나타내고 있다.[18]

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2}\exp\left(\frac{-kx}{U}\right) \cdot \left[\mathrm{erf}\frac{x - U(t-\tau)(1-\nu)}{\sqrt{4E_x t}} - \mathrm{erf}\frac{x - Ut(1+\nu)}{\sqrt{4E_x t}}\right] \tag{13}$$

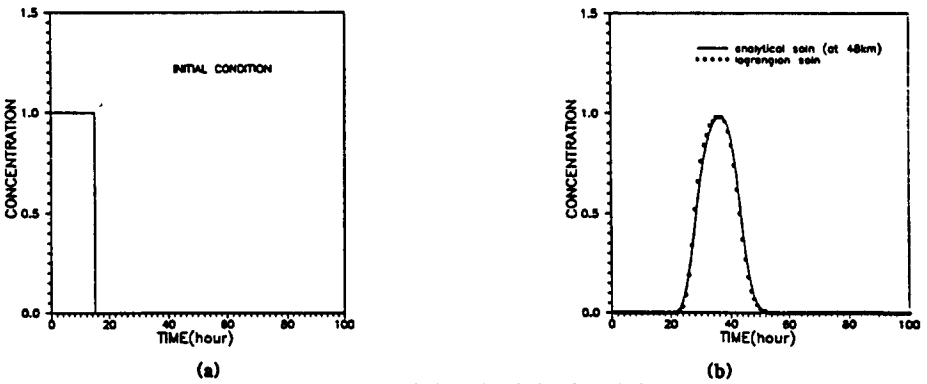


그림 3 균일하도에 대한 적용결과

(a) 상류단의 초기조건 (b) 48km지점

여기서, $\nu = \frac{kE_x}{U^2}$ $\quad erf(p) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^p e^{-\eta^2} d\eta$

하도의 선정은 50km 구간에 대하여 하폭 200m의 직사각형 수로를 구성하고 조도계수 n=0.03, 수로경사 0.0002로 설정하였다. 확산계수는 McQuivey & Keefer의 식을 사용하였는데 (14)식은 18개의 하도에 대하여 40회의 현장실험을 실시하여 유량은 35 cfs에서 33000 cfs까지의 범위와 하상경사는 0.00015에서 0.0098사이의 범위에서 광범위하게 적용하도록 제안된 식이다.(Singh et al., 1987)

$$E_x = 1.8 \times 10^{-4} \frac{Q}{S_0 B} \qquad (14)$$

여기서, E_x; 확산계수(mi^2/day) Q; 유량 (cfs)
S_0; 하상경사 B; 평균하폭 (ft)

그림 3에서와 같이 15시간 동안 1ppm의 농도로 급격히 하도구간내에 유입된 경우에 대하여 Lagrangian 기법에 의한 계산결과는 그림에서 보는 바와 같이 해석해와 잘 일치됨을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구모형은 하천으로 유입된 각종 오염물의 유동해석에 적용성이 있는 것으로 사료되었다.

4. 낙동강 유역에 대한 적용

4.1 '91 페놀 방류사고에 대한 해석

본 연구의 모형을 1991년 3월에 낙동강 수계에서 발생한 페놀 방류사고에 적용하였다. 대상구간은 구미를 상류단으로 하고 물금을 하류단으로 하는 유로연장 181.49km를 선정하여 177개의 하도단면자료를 사용하였으며[20] 주요지류 7개 즉, 백천, 금호강, 회천, 황강, 신반천, 남강, 밀양강등을 고려하여 유량을 산정하였다. 그림 4는 낙동강 중류부에서의 수질해석 모형을 도식화한 것이다.

페놀 방류사고 당시에 대한 유량산정은 사고 기간(1991년 3월 12일에서 3월 25일)에 대하여 수문조사년보[21]에서 일 평균수위를 유량으로 환산하여 사용하였다. 자료분석 결과 자료의 신뢰도가 높다고 판단되는 왜관, 적포교, 진동, 삼랑진지점의 수위자료를 수위-유량 관계에 의하여 유량자료로 환산하였다. 각 합류점별 유량은 유역면적에 대하여 회귀분석하여 산정하였다. 그림 5는 이 기간동안 구미, 금호강 합류점, 진동, 물금등의 주요지점에 대한 유량변동 상황을 나타내고 있다.

유입된 페놀량은 주요 일간지들과 관련기관에서 수집된 자료를 사용하였다. 수집된 자료를 기초로 하여 사고 발생 당시의 상황을 분석하여 정리하면 다음과 같다.[24),25),28)]

"이 유역에는 사고발생 이전부터 예상되는 페놀의 총방류량은 327톤으로 추정되며 일처리 한계를 넘는 1.7톤의 페놀이 상당기간 동안 매일 낙동강으로 유입된 것으로 추정된다. 이러한 양은 휘발 및 여러가지 감쇠요인에 의하여 상수원수를 취수하는 지역에 도달해서는 특별한 영향을 미치지 못하던

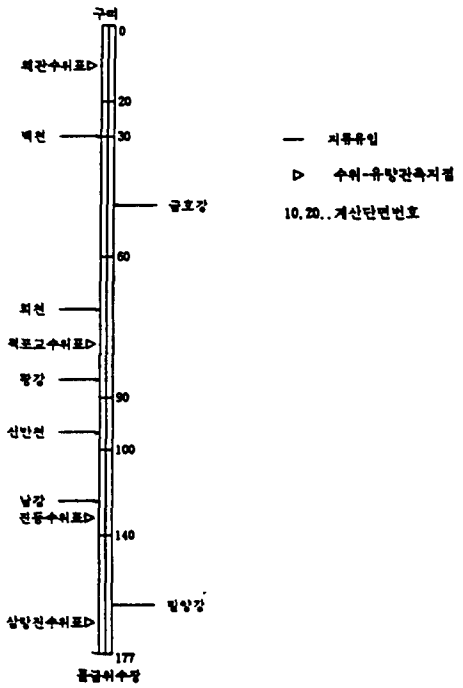


그림 4 낙동강 유역의 수질해석 모형도

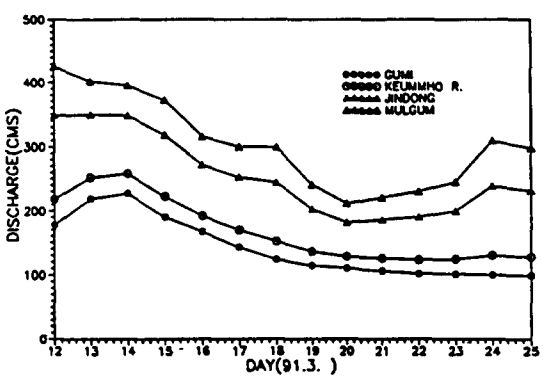


그림 5 주요지점별 유량변동 양상

중, 1991년 3월 11일 갈수기 해제로 낙동강의 수위가 50cm불어나고 난 후, 3월 14일 22시에서 3월 15일 06시에 걸쳐 일시에 방류된 30톤의 페놀이 상수원수에 심각한 영향을 주어 3월 16일 14시경 대구에서 주민신고가 발생하였다. 3월 17일 22시경 수질조사반이 구성되어 3월 26일경까지 낙동강 수계에 대한 수질을 측정하였다. 구미에서 방류된 오염물이 해석구간인 구미-물금 사이를 통과하는데는 이 유량 조건하에서 6-7일 정도 소요되는 바 사고 인지의 원인이 되었던 30톤의 방류된 페놀은 3월 20일경 이미 해석구간을 지나간 것으로 추정된다. 3월 23일을 전후에 집중적으로 조사된 낙동강 수계의 페놀 관측치는 처리용량을 초과해서 매일 방류되던 1.7톤의 페놀로 인한 것으로 추정된다."

그림 6은 일간 1.7톤의 페놀 방류에 따른 해석구간에 있어서의 실측치와 계산치를 비교하여 나타내는 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구모형에 의한 계산치는 (14)식의 McQuivey와 Keefer의 확산계수식을 적용하고 k=0.9/day의 감쇠계수(decay coefficient)를 사용하여 검정한 결과 실측치와 비교하여 합리적인 범위내에 들고 있음을 확인할 수 있었다.

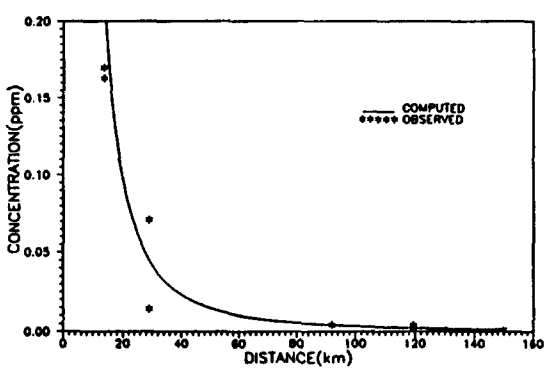


그림 6 관측치-계산치 농도비교

그림 7은 사고인식의 원인이 된것으로 추정되는 1991년 3월 14일 22시에서 3월 15일 06시에 걸쳐 방류된 30톤에 달하는 페놀이 해석구간에 미친 농도 형상의 예측치이다. 오염물 농도에 영향을 미치는 인자를 검토하기 위하여 확산계수를 변화시켜 계산한 결과치를 그림 8에 제시하였다. 그림에서와 같이 확산계수의 증대에 따른 농도형상은 그 형상에 있어 차이를 나타내고 있으므로, 앞으로 유량조

건에 따른 적절한 확산계수의 추정도 계속적으로 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

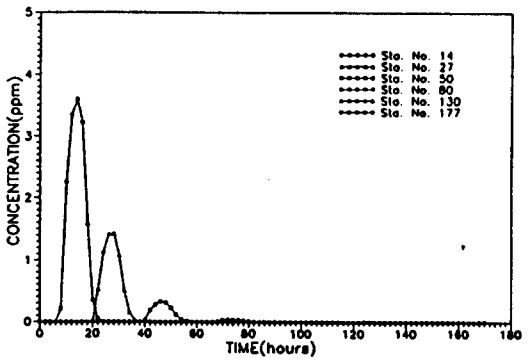
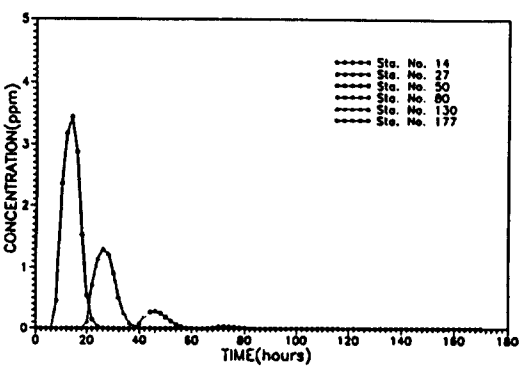
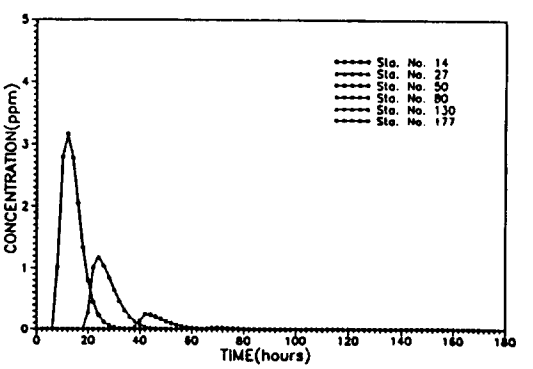


그림 7 각 지점별 시간에 따른 농도형상



(a) $2E_x$조건



(b) $10E_x$조건

그림 8 확산계수에 따른 농도형상

4.2 독성오염물의 이동특성 해석

낙동강 유역에 유입된 독성오염물의 이동 특성을 파악하기 위해서 이 유역에서의 월 평균유량과 최소유량을 산정하고 이를 기초로 수질해석을 실시하였다. 월별 평균 및 최소유량의 산정은 수문조사연보[21]에서 최근 13년간의 월 평균 및 최저수위를 주요지점에 대하여 수집하고 이를 수위-유량 관계식에 의하여 유량으로 환산하였다. 자료의 분석결과 자료의 신뢰도가 높다고 판단된 왜관, 적포교, 진동, 삼랑진 지점의 유량자료를 유역면적에 대하여 회귀분석하여 각 합류점별 유량을 산정하였다. 계산된 각 합류점별 유량-유역면적별 회귀분석 결과 상관계수는 모두 0.97이상으로 높게 나타났다.

각 합류점 유량자료를 기초로 표준축차계산법에 의하여 흐름특성을 해석하였다. 이 구간에서는 177개의 하도단면을 사용하였는데 평균하도 경사는 0.0002 였고, 조도계수는 0.035를 이용하였다.[21),22),23)]

구미공단에서 예기치 못한 사고로 독성오염물이 방류되었을때 하류부에서의 오염물의 유동상황을 분석하였다. 월 평균유량의 최소와 최대를 나타내고 있는 1월과 7월의 조건에 대하여 동일한 0.53t의 오염물이 18시간에 걸쳐 유입되었을때 오염물의 감쇠계수를 '0'으로 하고 오염물의 유동상황을 그림 9,10에 도시하였다.

구미공단에서의 1월과 7월의 평균유량이 각각 81.6 CMS 와 382.5CMS인 조건에 대하여 동일한 양의 오염물이 유입되었을때 최초 혼합이 발생하는 상류단 지점에서의 오염도가 각각 0.10ppm , 0.022ppm으로 차이를 보였고, 이것이 하류부로 전파됨에 따라 첨두오염치 및 그 도달시간 등에 있어 커다란 유동특성의 차이를 나타내고 있다. 이는 독성오염물의 수질해석 및 오염관리에 있어 정확한 수리특성치에 관한 해석의 필요성이 큰 것을 알 수 있었다.

구미에서 방류된 독성오염물에 의한 첨두농도의 도달시간은 1월 및 7월의 평균 및 최소유량에 대하여 그림 11,12에 도시하였으며 주요 취수장인 다사, 칠서, 물금 취수장등에 대한 월별 평균 및 최소유량에 대한 유하시간을 표 4에 요약하였다. 표에서 보는 바와 같이 유하시간은 월별로 큰 차이를 보이고 있으나, 전반적으로 보면 다사 취수장의 경우 약 2일 이내, 칠서취수장의 경우 약 6일 내

외, 물금취수장의 경우 8일 내외로 나타나 있다. 표 4의 자료는 예기치 못한 독성오염물의 방류사고가 발생했을 경우, 하류부 주요지점에서의 수질조사시기, 취수중단시기등을 제시함으로써 이 유역의 수질관리에 크게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

독성오염물의 종류에 따른 감쇠계수의 영향은 그림 13에서와 같이 감쇠계수의 변화에 따라 하류부 주요 지점에서의 농도분포 양상이 큰 차이를 보이고 있었다. 독성오염물에 따른 감쇠계수의 산정은 화학물의 종류에 따라 매우 다양한 특성을 나타내

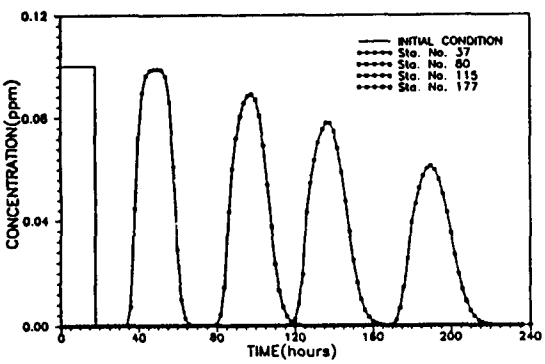


그림 9 오염물 가상유입에 따른 수질해석(1월 평균유량)

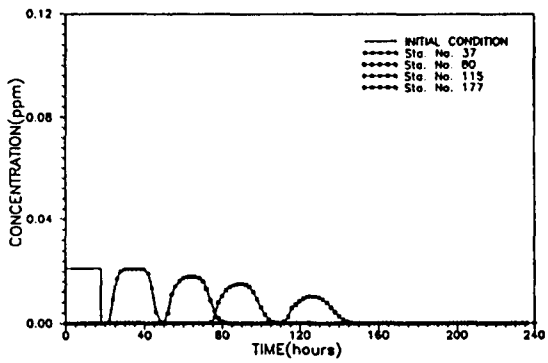


그림 10 오염물 가상유입에 따른 수질해석(7월 평균유량)

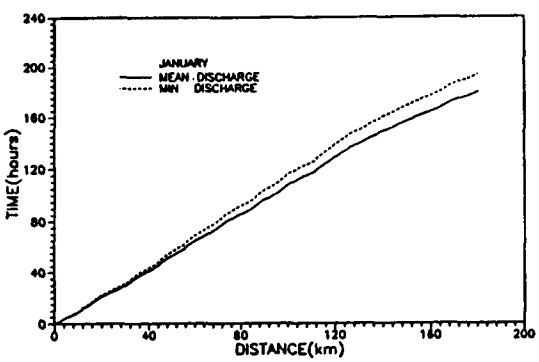


그림 11 독성 오염물의 유하시간 특성(1월)

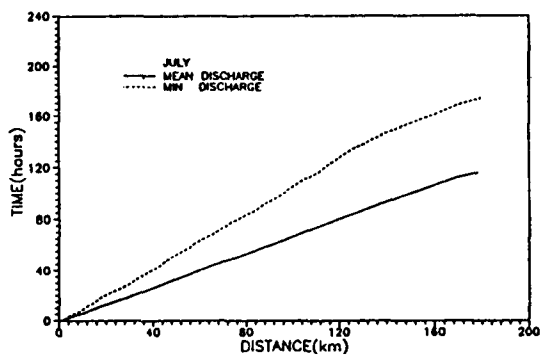


그림 12 독성 오염물의 유하시간 특성(7월)

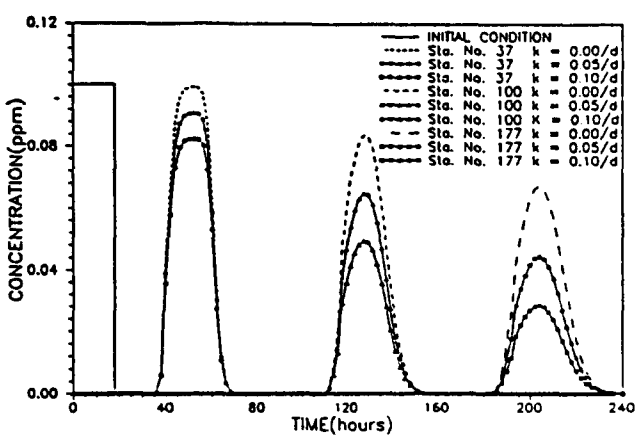


그림 13 오염물의 감쇠계수에 따른 수질해석

표 4 주요지점별 유하시간 자료

지 명		대구 취수장		칠서(남지)취수장		물금 취수장	
Sta. No.		37		115		177	
거 리 (구미로 부터의)		38.68km		119.34km		181.04km	
유 량 조 건		mean	min.	mean	min.	mean	min.
월 별 첨두농도 도달시간	1	1d 16hr	1d 18hr	5d 8hr	5d 18hr	7d 12hr	8d 3hr
	2	1d 17hr	1d 20hr	5d 11hr	6d 1hr	7d 13hr	8d 10hr
	3	1d 15hr	1d 20hr	5d 5hr	5d 23hr	7d 6hr	8d 4hr
	4	1d 16hr	1d 21hr	5d 6hr	6d 4hr	7d 7hr	8d 9hr
	5	1d 17hr	2d	5d 10hr	6d 11hr	7d 10hr	8d 22hr
	6	1d 14hr	1d 22hr	4d 23hr	6d 6hr	6d 22hr	8d 17hr
	7	1d 2hr	1d 16hr	3d 8hr	5d 7hr	4d 21hr	7d 7hr
	8	1d 6hr	1d 17hr	3d 20hr	5d 11hr	5d 11hr	7d 22hr
	9	1d 4hr	1d 14hr	3d 16hr	5d 1hr	5d 1hr	7d 1hr
	10	1d 14hr	1d 17hr	5d	5d 12hr	6d 23hr	7d 15hr
	11	1d 16hr	1d 18hr	5d 7hr	5d 18hr	7d 7hr	7d 22hr
	12	1d 16hr	1d 18hr	5d 10hr	5d 19hr	7d 12hr	8d 4hr

기 때문에 앞으로 이 유역에서의 주요 독성오염물의 하천에서의 반응특성을 고려한 감쇠계수등의 특성치의 산정은 계속 연구되어져야 할 것으로 사료되었다 (Shahalam and Burke, 1984).

앞으로 개개의 독성오염물에 대한 감쇠계수등의 영향인자들에 대한 기초조사를 실시하고, 본 연구에서 제안된 수질해석 모형 RIV-LAG1을 활용한다면 독성오염물의 방류사고가 예상되는 주요하천 유역에 있어 수자원 수질관리에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 하천에서의 흐름해석과 Lagrangian 기법을 기초로 한 수질해석 모형 RIV-LAG1을 개발하고, 독성 오염물 방류사고로 인한 유동해석을 위하여 낙동강 유역에 적용하였다.

(1) 하천으로 유입되는 독성오염물의 다양한 거동특성을 제시하였다. 본 연구 모형은 표준축차계산법과 Lagrangian 기법에 의한 오염물의 유동해석을 실시할 수 있도록 구성하였다.

(2) 낙동강 유역의 구미-물금간의 구간에 '91년 3월 페놀 오염시에 대하여 본 RIV-LAG1 모형을 적용하였다. 계산된 결과는 당시의 실측치와 비교하여 일치하고 있었다. 월별 평균유량과 최소유량 자료를 기초로 하여 구미공단에서의 독성오염물 방류사고에 따른 하류부 다사, 칠서, 물금취수장에서의 오염물 유동특성을 분석하였다.

(3) 본 연구모형은 다양한 상,하류부의 유량조건에 따라 오염물의 농도변화 및 유하시간등을 계산할 수 있도록 구성하였으므로 구미, 왜관, 대구등의 각종 산업시설로 부터 독성오염물의 배출에 따라 하류부 주요 취수장등에서의 위험도를 크게 경감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

〈감사의 글〉

본 연구는 1993년도 두산그룹 재단법인 연강재단의 지원에 의한 연구결과로서 지원기관에 깊이 감사를 드립니다.

〈참 고 문 헌〉

1. Armbrose, R.B., Hill, S.I. and Mulkey, L.A. (1983), "Users manual for the chemical trans-

port and fate model, TOXIWASP", Env. Res. Lab., EPA.

2. Bowie, G.L. et al.(1985), "Rates, constants, and kinetics formulation in surface water quality modeling", 2nd. ed., EPA/600-3-85/040.
3. Christensen, B.A.(1987), "Transport of pollutants in very rough channels", Proc. of IAHR 22th Congress, 245-249.
4. Dickson, K.L. and Maki, A.W., and Cairns, J.(1982), "Modeling fate of chemical in the aquatic environment", Ann Arbor Science, Michigan.
5. Fischer, H.B.(1972), "A Lagrangian method for predicting pollutant dispersion in Bolinas Lagoon", USGS Prof. Paper 582-B.
6. Ibrahim, K. and McCorquodale, J.A.(1987), "Transport of toxic organics in rivers", Proc. of IAHR 22th Congress, 258-262.
7. Jobson, H.E.(1980), "Temperature and solution-transport simulation in flow using a Lagrangian reference frame", USGS, WRI 81-2.
8. Jobson, H.E.(1987), "Lagrangian model of nitrogen kinetics in Chattahooche River", J. of Env. Eng., ASCE 113(2), 223-242.
8. McBride, G.B., and Rutherford, J.C.(1984), "Accurate modeling of river pollutant transport",J. of Env. Eng., ASCE, 110(4), 808-827.
9. Neely, W.B., and Blau, G.E.(1984), "Environmental exposure from chemical" Vol. I and II, CRC Press.
10. Reichart, P. and Wanner, D.(1987), "Simulation of a severe case of pollution of the Rhine River", Proc. of IAHR 22th Congress, 239-244.
11. Popa, R.(1986), "Mathematical modeling of stream pollution under nuclear accident conditions", VI Int. Conf. on Finite Element in Water Resources, 449-458.
12. Schoellhamer,D.H. and Jobson, H.E.(1986), "Programmers manual for a one dimensional Lagrangian transport model", USGS WRI 86-4144, 1-25.
12. Schoellhamer, D.H.(1988), "Lagrangian transport modeling with QUAL II kinetics", J. of Env. Eng., ASCE, 114(2), 368-381.
13. Schoellhamer, D.H.(1988), "Two-dimensional Lagrangian simulation of suspended sediment", J. of Hyd. Eng., 114(10), 1192-1209.
14. Shahalam, A. and Burke, D.A.(1984), "Stream modeling of nonconservative water quality parameters; phenol, cyanide, ammonia, oil and grease", Water Science and Technology, 117, 953-966.
15. Shen, H.T. and Yapa, P.D.(1988), "Oil slick transport in rivers" J. of Hyd. Eng., ASCE, 114(5), 529-543.
16. Shen, H.T., Yapa, P.D. and Zhang, B.(1993), "A simulation model for chemical spill in rivers" Proc. of IAHR 25th Congress, Technical Session D, 219-226.
17. Singh, U.P., Ranga Raju, K.G. and Garde, R. J.,(1987) "Longitudinal dispersion coefficient in open channels", Proc. of IAHR 22th Congress, 251-257.
18. Thomann, R.V., and Mueller, J.A.(1987), "Principles of surface water quality modeling and control", Harper & Row.
19. Yapa, P.D., and Shen, H.T.(1994), "Modeling river oil spills : a review", J. of IAHR, Vol. 32, 765-782.
20. 건설부(1981-1983), "낙동강 하천정비 기본계획(보완조사 I, II)"
21. 건설부(1977-1989), "한국수문조사년보"
22. 건설부(1986-1993), "낙동강 유량측정 조사보고서"
23. 건설부 낙동강홍수통제소(1990-1993), "낙동강 홍수예경보".
24. 대구시 및 대구지방 환경청자료 (1991.3.)
25. 부산시 및 부산지방 환경청자료 (1991.3.)
26. 이길성, 최홍식(1987), "QUAL2모형의 금강수계에의 적용", 대한상하수도학회지,1(2), 20-33.
27. 전경수, 이길성(1993), "영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정", 대한토목학회논

문집, 13(4), 163-176.
28. 조선일보, 동아일보, 한국일보, 경향신문, 서울신문, 매일신문, 영남일보, 부산일보 자료 (1991.3.)
29. 한건연, 이정식, 김상현, 김홍태(1994), "낙동강 중류부에서의 확정론적 수질해석", 한국수문학회논문집, 27(1), 53-67
30. 한건연, 김상현, 박재홍(1995), "하천수질변동의 예측을 위한 추계학적 수질해석 모형의 개발" 한국수문학회논문집, (게재예정)

〈접수 : 7월 5일〉