

## 한강 하류부에서의 오염물질의 거동특성 연구

### A Study on the Contaminant Transport Characteristics in Han River

김 형 일\* / 이 종 설\*\* / 허 준 행\*\*\* / 조 원 철\*\*\*\*

Kim, Hyung Il / Lee, Jong Seol / Heo, Jun Haeng / Cho, Won Cheol

#### Abstract

This study is to analyze and predict the contaminant transport based on the hydraulic characteristics using 2-dimensional finite element model. The dynamic water quality model, RMA-4, is used to predict the contaminant transport using the hydraulic characteristics obtained from RMA-2V model. The study region is from downstream of Cham-Sil weir to upstream of Shin-Kok weir. From the results of contaminant transport analysis, it is shown that the variations of discharge and velocity give quite large effect to the transport and dispersion of contaminant material, and that the water qualities of Joong-Rang and Tan streams play an important role to the downstream. Also, when the incidental contaminant accident occurs and contaminant material moves to the downstream, it is resulted the decreasing of the maximum COD and the increasing of the duration time to be affected by contaminant. Finally, 2-dimensional analysis is required in the case of large river like Han River, since the large difference of contaminant concentration has been investigated in the left and right banks.

*Keywords:* finite element model, dynamic water quality, RMA-4V, COD

#### 요 지

본 연구는 도시하천인 한강 하류부에 2차원 유한요소모형을 적용하여 하천의 수리학적 특성에 따른 오염물질의 거동특성을 모의하고 예측하기 위한 것으로서 흐름상태를 분석할 수 있는 RMA-2V모형과 동적 수질예측이 가능한 RMA-4모형을 이용하였다. 2차원 유한요소모형을 사용하여 수질의 거동특성을 모의하여 본 결과 유량 및 유속의 변화는 오염물질의 이송 확산에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 탄천 및 중랑천은 대상구역 내의 수질오염에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 불시의 오염사고가 발생했을 때 오염물질이 하류부로 이동함에 따라 최대 COD 값은 감소하고, 오염물질이 영향을 미치는 지속기간은 커지는 것을 알 수 있었고, 전체적으로 좌·우안의 오염물질의 농도차가 크게 나타났으며, 이로써 한강과 같은 대하천의 경우 실시간 예측시 2차원 해석이 필요한 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 유한요소법, 동적 수질, RMA-4V, COD

- \* 동아건설산업(주) 기술연구소 연구원
- \*\* 국립방재연구소 연구관
- \*\*\* 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 부교수
- \*\*\*\* 국립방재연구소 소장

## 1. 서 론

하천은 생활용수 및 산업용수 등의 중요한 용수공급원으로 활용되고 있으며 수요를 충족시키기 위한 수량 뿐 아니라 수질에 대한 관리가 매우 중요하다. 경제성장과 급속한 도시화, 인구의 급증 등으로 인하여 하천의 중요도는 증가하고 있는 반면 하천의 수질문제에 대한 인식은 부족하고, 다양한 환경문제의 근원적인 문제가 물에 있음을 자각하지 못하고 있는 현실을 제외하고라도, 현재의 크고 작은 대부분의 하천은 하천수의 오염정도가 심각한 지경에 이르러 있음은 주지의 사실이다. 하천의 오염은 용수공급원으로서의 문제 뿐만 아니라 자연생태계에 심각한 악영향을 미치며 위락기능면에서도 문제를 발생시킨다. 이러한 하천의 오염을 방지하기 위해서는 하천으로의 오염원 유입을 억제하는 것이 가장 바람직하나, 불가피하게 유입될 수 밖에 없는 가정생활하수 및 공장폐수 등으로 인한 오염원이 수질에 미치는 영향을 정확하게 파악함으로써 취수구, 오염원 배출구의 적절한 위치선정 등의 수질관리 계획에 도움을 얻을 수 있다. 이러한 계획을 수립함에 있어서 필수적인 요소가 하천에서의 오염물의 거동을 해석하는 것이다. 오염물 거동해석에 관한 기존의 연구로는 이길성과 강주환(1987)의 이송확산방정식에 관한 유한차분법의 비교연구 등이 있었으며, 한건연 등(1995)은 QUAL2E 모형을 이용하여 한강하류부의 수질을 모의하였고, 박무중 등(1995)이 RMA-4모형을 이용하여 한강하류부에 적용, 2차원 모형의 적용성을 고찰한 바 있다.

본 연구에서는 잠실수중보 하류단으로부터 신곡수중보 상류단까지의 한강 하류부에 RMA-2V모형을 적용하여, 우선 이러한 오염물의 거동을 해석하기 위한 기본적인 과제인 하천의 흐름상태를 분석하고, RMA-4모형을 이용하여 하천의 흐름에 따른 이송확산 등을 모의하여 하천으로 유입되는 오염원의 변화에 따른 수질을 구성하는 기본적인 인자들의 이동 및 상태를 예측하고, 하천수의 오염방지 및 예방을 위한 기본자료를 제공하고자 한다.

## 2. 2차원 유한요소모형

### 2.1 지배방정식

#### 2.1.1 RMA-2V모형

Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 수심방향으로 적분한 천수방정식을 지배방정식으로 사용하며, 이는 다음 식 (1), (2), (3)과 같다(King, 1994).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 g u}{h^{3/4}} \sqrt{(u^2 + v^2)} \\ - \frac{\eta}{h} V_a^2 \cos \phi - 2\omega v \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ + g \frac{\partial a}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{n^2 g v}{h^{3/4}} \sqrt{(u^2 + v^2)} \\ - \frac{\eta}{h} V_a^2 \sin \phi + 2\omega u \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $u$ ,  $v$ 는 직교좌표계에서의 깊이방향으로 적분한 수평흐름속도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ 는  $x$ ,  $y$  방향으로의 난류교환계수,  $a$ 는 하상고,  $h$ 는 수심,  $g$ 는 중력가속도,  $\eta$ 는 바람에 의한 전단계수,  $V_a$ 는 풍속,  $\phi$ 는 풍향,  $\psi$ 는 국지 위도,  $\omega$ 는 지구의 회전 각속도를 나타낸다.

#### 2.1.2 RMA-4모형

비압축성 난류 전단 흐름에서 보존물질에 대하여 3차원 이송확산방정식을 수심방향으로 적분한 2차원 이송확산방정식을 지배방정식으로 사용하며 이는 다음 식 (4)와 같다.

$$h \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \sigma + kc \right) = 0 \quad (4)$$

여기서,  $c$ 는 오염물질의 농도,  $\sigma$ 는 어떤 물질의 질량에 대한 국부적인 공급원,  $k$ 는 제어체적으로부터의 물질의 소멸율,  $D_x$ ,  $D_y$ 는  $x$ ,  $y$  방향으로의 확산계수를 나타낸다.

### 2.2 가정 및 제한사항

본 연구는 2차원 유한요소모형을 이용하여 하천수질을 모의하는 것으로서, 다음과 같은 가정 및 제한사항을 가진다. 흐름은 2차원이며(깊이방향으로의 흐름은 고려하지 않음), 오염물질의 이송 및 확산은 2차원이다(깊이방향으로의 이송확산은 고려하지 않음), 그리고 확산물질의 변화로 인한 밀도변화는 무시하며, 주어진 경계조건 외에 오염물질은 유입되지 않는다고 가정하였으며, 조석에 의한 밀물시 한강 하류부로 유입되는 조류의 COD 농도는 고려하지 않았다.

### 3. 모형의 적용 및 검증

#### 3.1 모형의 적용

본 모형의 적용구간은 한강하류부 잠실수중보 하류단으로부터 신곡수중보 상류단까지 약 40km구간으로 이 구간은 3개의 섬과 만곡부가 존재하고 평균저수로 폭이 850m, 평균수심이 약 4.6m이다. 그림 1은 대상구간을 나타낸 그림이며, 대상구간 양단에 위치하는 두 개의 수중보는 일정한 수심과 수위를 유지하기 위한 것으로 각각 고정보와 가동보의 복합보로 되어있다. 하상자료는 한강관리사업소에서 실시한 수심평면도(1993년)를 이용하였으며, 축척이 1:5000이고 약 30m, 50m간격으로 중횡단 측량된 자료이다(한강관리사업소, 1993). RMA-2V모형에 사용된 상류단 경계조건으로의 팔당댐 방류량은 평상시 방류량이 일정하므로 상류부분의 취수를 고려한 일별 팔당댐 평균 방류량을 사용하였으며, 하류단 경계조건으로는 시간별 신곡수중보 수위를 사용하였다. 또한 탄천, 중량천, 홍제천, 안양천, 창릉천의 5개 지천이 본류로 유입되는 것을 고려하였으며(그림 2), 서울시정개발연구원에서 1994년 6월 14일 실측한 신곡수중보 수위자료와 원효대교의 유속자료를 이용하였다.

RMA-4모형의 경계조건으로의 수질자료는 탄천, 중량

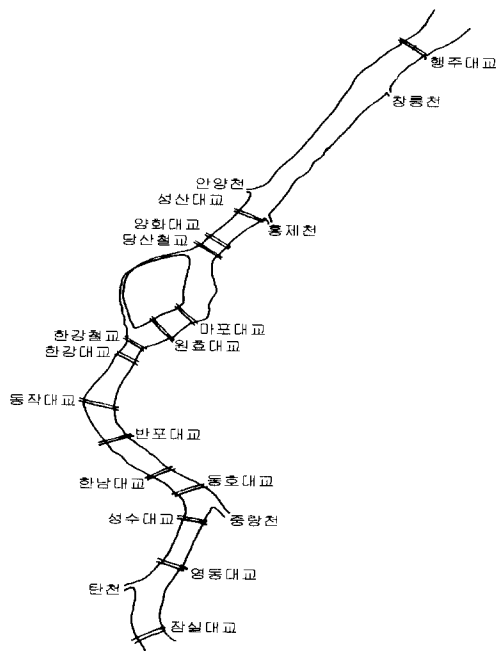


그림 1. 적용대상구간

천의 경우, 서울시정개발연구원에서 1994년 5월 10일부터 5월 11일까지 실측한 시간별 COD 값을 사용하였고 나머지는 합류부의 평균 COD값을 사용하였으며, 이를 표 1에 나타내었다(유명진, 1994).

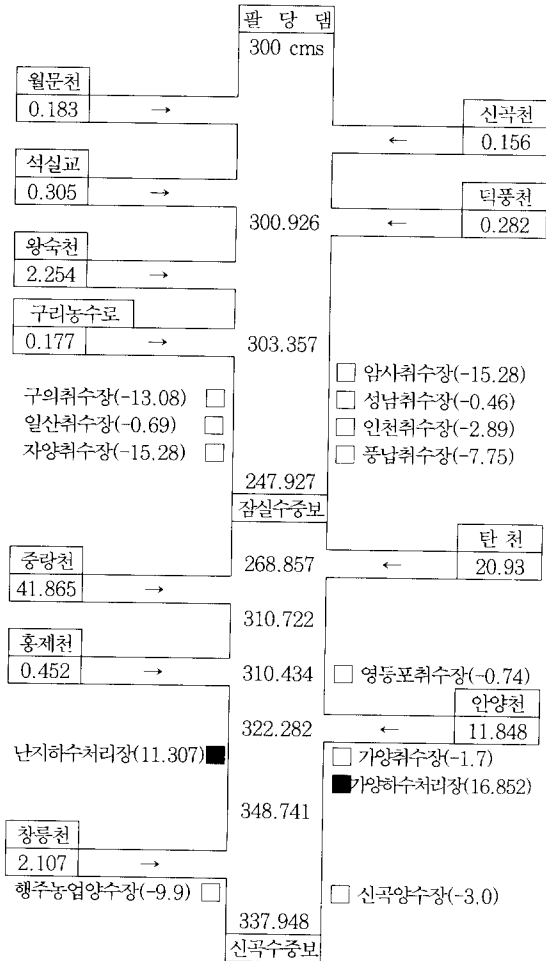


그림 2. 한강 본류의 물수지분석도

표 1. 주요 지천의 시간별 COD 농도

시 간	탄 천		중량천		홍제천	안양천	창릉천
	시 간	COD (mg/ℓ)	시 간	COD (mg/ℓ)	COD (mg/ℓ)	COD (mg/ℓ)	COD (mg/ℓ)
02:50		86	00:12	76			
08:45		84	02:16	66			
10:40		108	06:20	64			
11:25		90	10:03	66			
14:35		78	12:50	84	12.25	12.25	15.25
18:35		88	14:05	92			
21:00		90	17:05	70			
24:00		91	20:30	82			

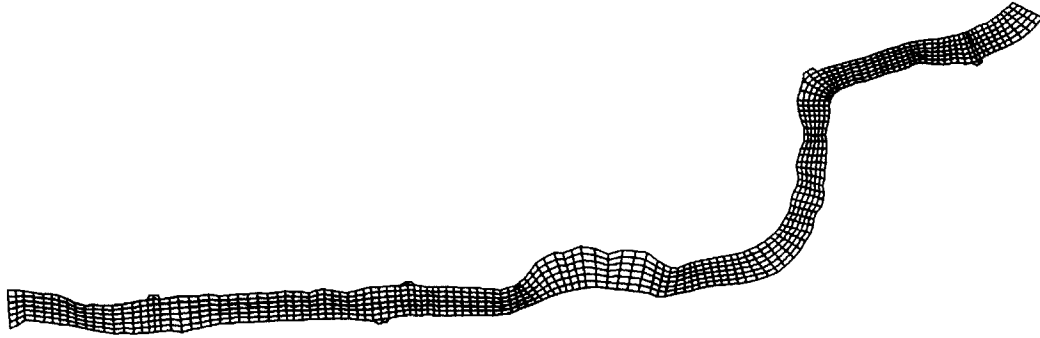


그림 3. 대상구간의 격자망

표 2. 대표적인 Turbulent Exchange Coefficients

Condition	$\epsilon$ Value [ Nsec/m <sup>2</sup> ]
Shallow River (Slow Current)	240 ~ 1200
Shallow River (Fast Current)	1200 ~ 2400
Deep Estuary (Small Elements)	2400 ~ 4800
Deep Estuary (Large Elements)	9500 ~ 14400
Wetland with Tidal wetting and drying	4800 ~ 9500
Flow Separation around Structures	50 ~ 240

RMA-2V모형은 사각형 1차요소를 사용하여 958개의 요소와 1128개의 격점으로 격자망을 구성하였으며, 바람에 의한 마찰항은 그 당시 풍속자료가 없는 관계로 무시하였다. Coriolis force는 본 한강이 거의 같은 위도에 위치함으로 인해 그 영향이 거의 없었으며, eddy viscosity는 모형의 해를 수렴시키거나 안정한 해를 얻기 위하여 이용하였고 서울시정개발연구원에서 제시한 값을 참고하여 5000~7000 Nsec/m<sup>2</sup>의 값을 사용하였다(표 2). 모형에 사용된 격자망은 그림 3과 같다. RMA-4모형은 RMA-2V모형에서 구한 출력자료를 입력자료로 하여 모형을 구성하였다.

### 3.2 모형의 검증

#### 3.2.1 RMA-2V모형의 검증

그림 4는 1994년 6월 14일 원효대교 부근에서 실측한 유속자료를 이용하여 RMA-2V모형을 검증한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 검증결과 실측치와 유사한 양상을 나타내고 있었으며, 실측치에 비해 모형의 계산값의 폭이 크지 않음을 알 수 있다.

그림 5와 6은 대상구간의 1994년 6월 14일 6시와 10시에서의 유속을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이

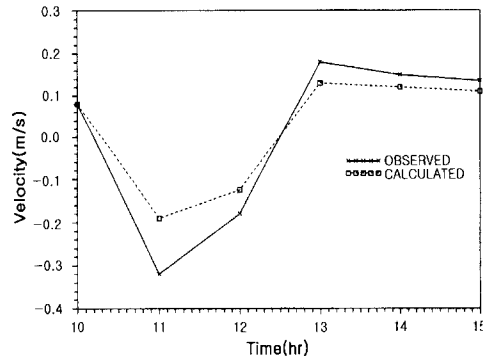


그림 4. RMA-2V모형의 검증결과 (1994년 6월 14일, 원효대교)

시간이 지남에 따라 조석에 의해 하류단 수위가 증가하여 하류단부터 흐름이 역류하는 현상을 볼 수 있으며, 감소하천의 특성을 잘 나타내고 있다.

#### 3.2.2 RMA-4모형의 검증

그림 7은 1994년 5월 10일부터 5월 11일까지 한남대교에서 실측한 자료를 이용하여 모형을 검증한 것이다. 검증결과 확산계수는  $x, y$  방향으로 0.75, 0.75(m<sup>2</sup>/s)로 나타났으며, 수질항목의 자정계수로서 COD 제거계수는 0.02로 나타났다. 그림 7에서 나타난 바와 같이 COD의 경우, 좌안에서는 실측치와 비교하여 과대산정하는 경향을 볼 수 있으며, 16시 부근에서는 오히려 과소산정하는 것을 볼 수 있다. 중앙부분의 경우에는 8~16시 부분에서는 마찬가지로 과소산정하는 경향이 두드러지고 나머지 부분에서는 비교적 실측치와 일치하고 있다. 우안에서는 5시까지는 실측치와 비교적 잘 일치하나 8시 부분에서는 과소산정을 하고 있고, 나머지



그림 5. 한강 하류부 유속벡터도(1994년 6월 14일, 6시, 썰물시)

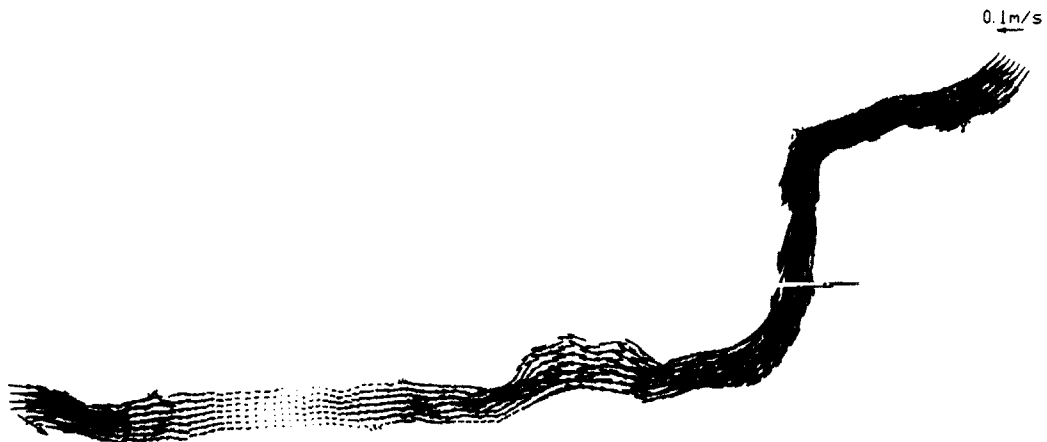


그림 6. 한강 하류부 유속벡터도(1994년 6월 14일, 10시, 밀물시)

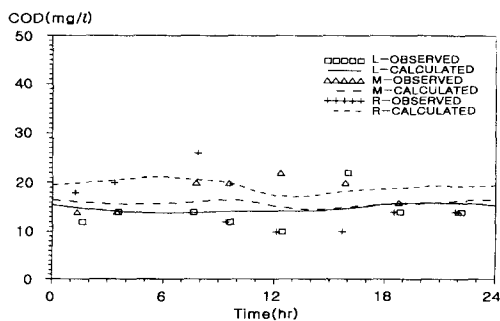


그림 7. RMA-4모형의 검정결과(한남대교, COD)

부분에서는 전체적으로 과대산정하고 있다. 실측치에 비해 계산값의 변화폭이 적게 나타났으며, 전체적으로 우안의 COD 값이 크게 나타나고 있는데, 이는 중량천의 직접적인 영향에 의해 나타난 결과라고 생각된다.

#### 4. 동적 수질오염도 예측

본 절에서는 검정된 모형을 이용하여 여러가지 경우에 대한 오염물질의 거동특성을 모의하였으며, 팔당댐 방류량이 증가되었을 경우와 대상구간내에서 유입량이 비교적 큰 탄천과 중량천의 수질이 개선될 경우와 악화될 경우, 유해물질 사고시 수질확산 영향 등을 살펴보았다.

#### 4.1 팔당댐 방류량이 300cms인 경우 동적 수질예측

그림 8은 팔당댐 방류량을 300cms로 하였을 때 한남대교 부근에서 COD를 모의한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, COD의 경우 전체적으로 팔당댐 방류량이 증가했을 때 수질이 개선됨을 볼 수 있으며, 좌우안의 COD의 농도차가 줄어들음을 볼 수 있고 1~8시에서는 유속의 증가로 인해 COD의 시간별 분포양상이 변화된 것을 볼 수 있다. 표 3은 한남대교 부근의 유량별 유속을 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 유량별 유속차가 크게 나타나며, 유량이 커질 수록 유속이 커짐으로 인하여 잠실수중보와 신곡수중보 사이에서의 흐름의 정체가 줄어들어 예상된다.

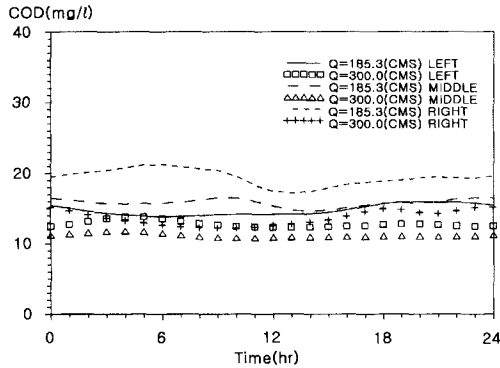


그림 8. 팔당댐 방류량이 300cms인 경우 동적 수질예측(한남대교, COD)

표 3. 유량별 유속비교  
(한남대교, 1994년 5월 10일, 단위 : m/s)

시간	Q=185.3 (cms)	Q=300 (cms)	시간	Q=185.3 (cms)	Q=300 (cms)
1	.133	.219	13	.145	.220
2	.133	.219	14	.148	.223
3	.133	.219	15	.149	.225
4	.133	.219	16	.150	.227
5	.133	.219	17	.148	.227
6	.133	.219	18	.146	.226
7	.122	.215	19	.148	.228
8	.080	.203	20	.142	.227
9	.076	.195	21	.102	.212
10	.116	.201	22	.077	.195
11	.134	.210	23	.113	.199
12	.140	.216	24	.138	.212

#### 4.2 탄천 및 중랑천의 수질이 개선될 경우

그림 9는 탄천 및 중랑천의 수질이 개선되었을 경우 한남대교 부근에서 COD를 모의한 것으로 탄천 및 중랑천의 COD 값이 20mg/ℓ로 수질이 개선되었을 경우, 한남대교 부근의 COD 분포를 나타낸 것이다. 수질 개선 후 COD 값이 현저하게 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 좌우안의 값의 격차가 줄어들음을 볼 수 있는데, 이는 탄천 및 중랑천의 수질 개선으로 측면에서의 COD 값의 영향이 반영되지 않았기 때문이라 생각된다.

#### 4.3 탄천 및 중랑천의 수질이 악화될 경우

그림 10은 탄천 및 중랑천의 수질이 악화되었을 경우를 나타낸 것으로 탄천 및 중랑천의 COD값이 200mg/ℓ로 수질이 악화되었을 때, 한남대교 부근의

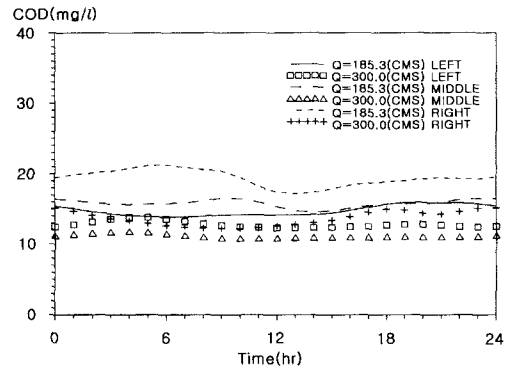


그림 9. 탄천 및 중랑천의 수질이 개선되었을 경우(한남대교, COD)

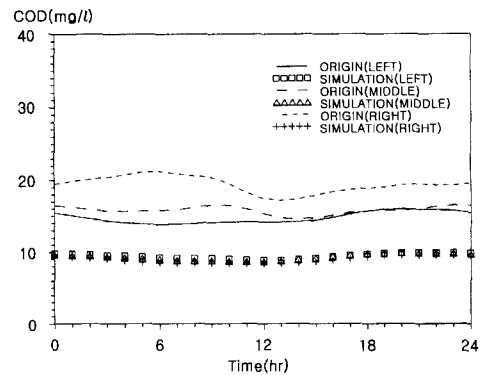


그림 10. 탄천 및 중랑천의 수질이 악화되었을 경우(한남대교, COD)

COD 분포를 나타낸 것이다. 수질이 악화된 후 COD 값이 현저하게 높아지며, 좌우안의 값의 격차가 커짐을 볼 수 있다. 특히, 우안쪽의 COD 값이 급격하게 상승하는 것을 볼 수 있으며, 이는 중랑천의 직접적인 영향 때문인 것으로 생각된다.

#### 4.4 유해물질 사고시 수질확산 영향

본 절에서는 잠실수중보 직하류부에서 불시에 발생한 유해물질 사고시 수질확산 영향을 살펴보고자 한다. 팔당댐 방류량이 300(cms)일 때, 잠실수중보 직하류부에서 COD 값을 측정된 결과(200mg/ℓ)인 유해물질이 2시간 동안 유출되어 강을 오염시킬 경우 하류부의 영향을 살펴보았다. 그림 11~14는 유해물질이 발생한 후

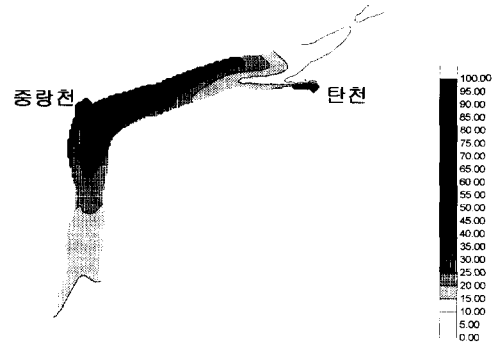


그림 13. 잠실수중보 직하류부에서 오염물질 사고시 유해물질의 확산(6시간후)

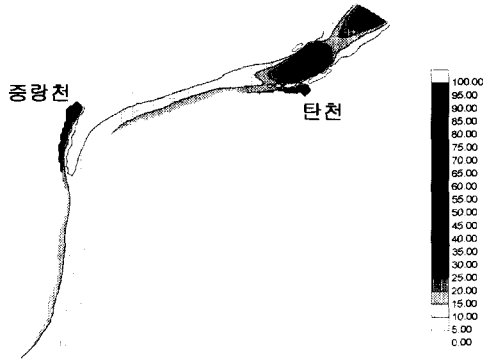


그림 11. 잠실수중보 직하류부에서 오염물질 사고시 유해물질의 확산(발생직후)



그림 14. 잠실수중보 직하류부에서 오염물질 사고시 유해물질의 확산(12시간후)

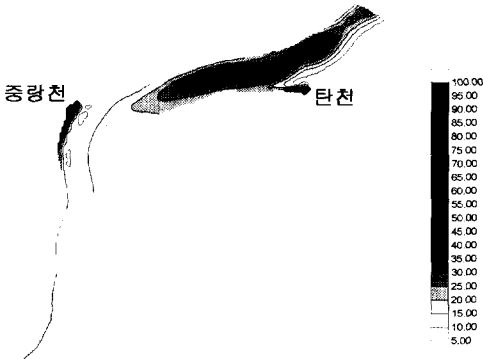


그림 12. 잠실수중보 직하류부에서 오염물질 사고시 유해물질의 확산(3시간후)

시간별 확산현상을 모의한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 3시간이 경과된 후 오염물질이 중랑천 부근까지 영향을 미치고 있으며, 횡방향으로의 확산에 비해 종방향으로의 확산이 두드러짐을 볼 수 있다. 이는 종방향으로의 유속이 횡방향으로의 유속에 비해 매우 크므로 인하여 발생한 결과라고 생각된다. 12시간이 경과된 후에는 거의 모든 오염물질이 중랑천 이하의 하류부 쪽으로 빠져나감을 볼 수 있으며, 횡확산이 거의 이루어져 좌우안의 농도차가 줄어들음을 볼 수 있다.

그림 15~17은 유해물질 사고가 있기 전과 유해물질 사고가 발생한 후의 각 지점별 시간에 따른 COD 값을 비교한 것이다. 성수대교 부근에서는 오염물질 발생 직후 오염물질의 영향이 나타나고 있으며, 오염물질의

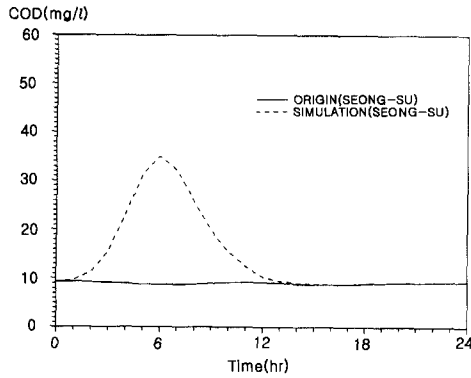


그림 15. 잠실수중보 직하류부에서 오염물질 사고시 지점별 시간에 따른 COD 값의 변화(성수대교)

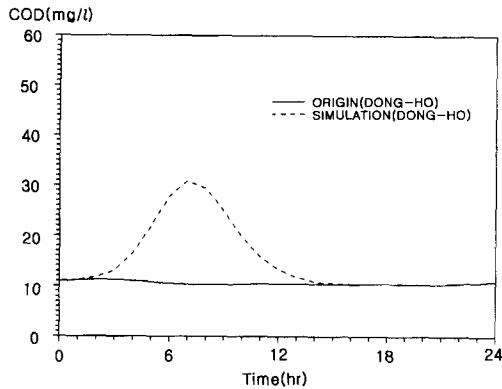


그림 16. 잠실수중보 직하류부에서 오염물질 사고시 지점별 시간에 따른 COD 값의 변화(동호대교)

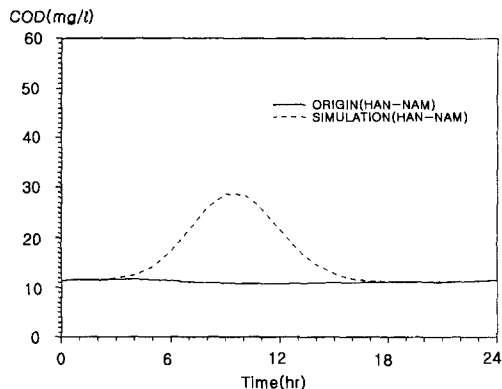


그림 17. 잠실수중보 직하류부에서 오염물질 사고시 지점별 시간에 따른 COD 값의 변화(한남대교)

표 4. 거리, 최초도달시간, 지속기간별 오염물질이 미치는 영향

지점	오염물질로 부터의거리	최초 도달시간	지속 기간	최대COD 값(mg/l)	최대COD 도달시간
성수대교	5.4km	1시	12시간	34.973	6시
동호대교	6.9km	2시	12시간	30.897	7시
한남대교	8.5km	3시30분	13시간	28.698	9시
반포대교	11.4km	5시	13시간	28.644	11시
동작대교	13.4km	6시30분	14시간	27.911	14시

영향이 미치는 기간은 12시간 정도인 것으로 나타나고 있다. 동작대교 부근까지는 오염물질의 영향이 6시간 후에 발생하는 것으로 나타났으며, 하류부로 갈수록 오염물질의 농도는 작아지나 영향을 미치는 기간은 커지는 것으로 나타났다.

표 4는 오염물질이 미치는 영향을 거리별로 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 한 지점에서 오염물질이 영향을 미치는 기간은 상류부에서 약 12시간 정도이며, 하류부로 갈수록 그 기간이 커짐을 볼 수 있다. 오염물질이 2km 이동하는데 걸리는 시간은 약 1시간 30분 정도가 소요됨을 알 수 있었으며, 최대 COD 값이 거리가 증가함에 따라 조금씩 줄어드는 것을 볼 수 있다. 최대 COD 값의 도달시간은 하류부로 갈수록 최초 도달시간과 차이를 볼 수 있으며, 이는 오염물질의 이송 확산에 의해 발생한 결과라고 생각된다.

## 5. 결 론

2차원 유한요소모형인 RMA-4모형을 한강 하류부에 적용해 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 좌우안의 오염물질의 농도차가 크게 나타났으며, 이로써 한강과 같은 대하천의 실시간 예측시 2차원 해석이 필요한 것으로 판단된다.

(2) 유량이 증가함에 따라 COD 값은 적게 나타났으며, 좌우안의 유속분포가 달라짐에 따라 시간에 따른 COD 농도의 분포양상이 변화하는 것으로 나타났으며, 유량 및 유속의 변화는 오염물질의 이송확산에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(3) 탄천 및 중랑천의 COD 값이 20mg/l로 개선되었을 경우, 한강 하류부의 수질이 상당히 개선됨을 볼 수 있었고, 또한 탄천 및 중랑천의 COD 값이 200mg/l로 악화되었을 경우 역현상을 볼 수 있었으며, 이를 통해 잠실수중보 하류부의 수질의 영향은 탄천 및 중랑천이 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.



(4) 불시의 오염사고가 발생했을 때를 모의해 보았으며, 오염물질이 하류부로 이동함에 따라 최대 COD 값은 감소하고, 지속기간은 커지는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

박무중, 김중훈, 윤용남 (1995). "준 3차원 확산모형을 이용한 감조하천내 오염물질의 거동특성 연구." 1995년 토목학회 학술발표회 논문집, pp. 248-251.  
유명진 (1994). 한강 수질관리 효율화 방안연구, 서울시 정개발연구원

이길성, 강주환(1987). "대류분산 모형에 관한 유한차분근사의 특성." 대한토목학회논문집, 제7권, 제4호, pp.147-157.

한강관리사업소 (1993). 수심평면도

한건연, 송재우, 김상호, 백경원 (1995). "한강 하류부에서의 총질산과 총인에 대한 수질모의." 한국수자원학회지, 제28권, 제4호, pp.137-146.

King, I.P.(1994). *RMA2/RMA4 Primer*. Brigham Young University-Engineering Computer Graphics Laboratory

〈최종본 접수일 : 1997년 12월 27일〉