

GIS를 이용한 하천에서의 최적수질관리모형의 개발

○이을래¹, 한건연², 김원³

1. 서론

현재 도시지역에서 인구가 증가하고 산업이 더욱 발달하면서 도시하수 및 공업용수가 지속적으로 하천으로 유입이 되어서 하천의 유지관리를 위해 오염물질을 규제할 필요성이 절실히 요구되고 있다. 또한 이상기후에 의한 장기간의 가뭄으로 인해서 하천 유지용수의 확보가 상당히 어려워지고 있기 때문에 하천수질의 지속적인 관리가 필요하게 된다. 특히 한강하류부에서는 인구가 밀집되어 있기 때문에 어느 유역보다도 수질관리가 절실히 요구되어지고 있으며 서울, 경기권 지역의 취수장이 위치한 수역으로 오염수가 유입이 된다면 상당한 피해가 발생할 수 있는 지역이다.

본 연구에서는 이러한 수질관리를 위한 수치모형으로서 2차원 유한요소모형을 적용하였다. 지금까지는 하천수질해석을 위하여 1차원 모형을 이용한 제한적인 정량적/정성적 판단에 의존하였으나, 실제적으로 지류의 유입이 존재하는 경우와 다양한 수공구조물이 하천에 설치되어 있는 경우에는 국부적인 하천의 흐름 및 수질변화를 검토할 필요가 있으며 이를 위해서는 2차원적인 수질관리모형이 필요하게 된다. 또한 전처리, 후처리 과정을 위해서 GIS와 2차원 수치모형을 연계하여 구동함으로써 최적수질관리 모형을 개발하였다. 본 연구에 적용한 모형은 해석적으로 안정되고 합리적인 결과값을 도출하는 Petrov-Galerkin 유한요소기법을 사용하였으며, 제시된 기법을 2차원 이송-확산방정식의 해석에 적용하였다. 해석의 결과는 실제 측정자료와 비교하여 정성적-정량적으로 일치하고 있는 것을 확인할 수가 있었으며 해석결과를 GIS 상에 도시하였다.

2. 기본방정식

오염물질이 연직으로 잘 혼합된 것으로 가정하면, 수심방향으로 평균된 2차원 이송-확산방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(pC)}{\partial x} + \frac{\partial(qC)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(E_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + E_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(E_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + E_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + S = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

1 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

2 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

3 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

여기서 t =시간, x, y =직교좌표의 공간성분, h =수심, $p, q=x, y$ 방향의 단위유량, E_{xx}, E_{xy}, E_{yx} 그리고 E_{yy} =확산계수, S =오염물질의 생성/소멸항이다.

식 (1)의 수치해석을 구하기 위해서 2차원 유한요소방정식을 적용하였다. 본 연구에서는 이송-확산방정식의 해를 구하기 위해 Petrov-Galerkin 기법을 적용하였다. 정리된 이송-확산 방정식의 형태는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{\Omega} N_*^T \left\{ \frac{\partial(h\hat{C})}{\partial t} + \frac{\partial(p\hat{C})}{\partial x} + \frac{\partial(q\hat{C})}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(E_{xx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{xy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(E_{yx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{yy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) \right] + S \right\} d\Omega = 0 \quad (2)$$

여기서 T 는 전치행렬을 나타내며, $\hat{C} = N_a U_a$ 로서 N 은 bilinear 형상함수, a 는 요소의 각 절점, Ω 는 대상구간의 면적을 나타낸다. 이 식에서의 가중함수, N_* 는 다음과 같다(Piasecki, 1999).

$$N_* = N + \frac{|p|\Delta x + |q|\Delta y}{Q\sqrt{15}} \left(p \frac{\partial N}{\partial x} + q \frac{\partial N}{\partial y} \right) \quad (3)$$

여기서 $\Delta x = 2 \left[\left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \right)^2 \right]^{1/2}$, $\Delta y = 2 \left[\left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \right)^2 \right]^{1/2}$, ξ, η = 기존좌표계에서 전환한 x, y 방향으로의 국지좌표계이다. 임의의 요소에 대한 이송-확산 방정식에 대해서 부분적분을 수행하면 식 (4)과 같이 기술할 수 있다.

$$\int_A N_*^T \left[\alpha(h\hat{C}) - \beta + \frac{\partial(p\hat{C})}{\partial x} + \frac{\partial(q\hat{C})}{\partial y} + S \right] dA + \int_A N^T h \left(E_{xx} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{xy} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} + E_{yx} \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + E_{yy} \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) dA = 0 \quad (4)$$

여기서 $\alpha = \frac{1}{\lambda \Delta t}$, $\beta = \alpha(h\hat{C})^n + \frac{1-\lambda}{\lambda} \left(\frac{\partial(h\hat{C})}{\partial t} \right)^n$ 을 나타내며, 이는 시간함수에 대해서 차분화 시킨 결과로서 λ 는 시간가중치이다. 일반적으로 생성/소멸항인 S 는 수심 h 와 유출입항 R 의 관계로 표현할 수 있다. 본 모형에서 적용되어지는 수질항목에 대한 동역학적 반응을 고려하기 위해 생성/소멸항을 나타내는 식 (2)의 S 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = -hGC - hR \quad (5)$$

여기서 G =해당되는 수질항목만의 성장/감쇠율이고, R =전체 수질항목간의 상호 동역학적 반응에 의한 생성/소멸율이다.

3. GIS와 연계한 지형자료의 구축

지형과 관련된 모든 형태의 정보를 효율적으로 획득, 저장, 갱신, 수정, 분석 및 도시할 수 있는 지형정보시스템은 컴퓨터 하드웨어, 소프트웨어, 지형 자료 및 인력의 집합이라 할 수 있으며, 하천의 흐름 및 수질관리에 매우 유용하게 응용될 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 GIS 프로그램 가운데 현재 국내에서 가장 범용성이 좋은 Arc/Info를 이용하여 적용대상 구간인 팔당댐 하류에서 인도교 구간의 한강 본류구간에서 하도자료를 구축하기 위해 지형정보시스템을 사용하였다. 본 연구에서는 건설교통부령 제 17호 수치지도작성작업규칙에서 정하고 있는 규정에 따라 지형자료를 구축하였다. 본 연구모형은 모형의 전처리, 계산과정 그리고 후처리과정이 하나의 일관된 통합시스템으로 구축되어 있다.

본 연구에 사용된 기초자료는 1/5,000 지형도와 하천정비기본계획상 횡단도 등이며, 사용된 도곽 및 도엽번호는 그림 1과 같다. 벡터화 작업은 하천흐름 및 수질해석 프로그램의 입력자료 작성과 가시적인 출력에 필요한 하천, 등고선 등에 대해 수행하였으며, 그림 2~5는 ArcPlot에 의한 각각의 coverage를 나타낸 그림이다. 그림 6은 위에 나타난 각각의 coverage를 합성하여 ArcPlot을 이용한 TIN을 구축하였으며 그림 7은 요소망을 구성하기 위한 전 단계로서 실측횡단도의 지점들을 실제 2차원 하도상에 표시한 그림이다. 그림 8은 이와 같은 절차를 모두 수행한 후의 대상구간에 대한 최종적인 유한요소망을 나타내고 있다.

| 서울 [37608***.dxf] | | | | | | | | | | 성동 [37705***.dxf] | | | | | | | | | | 양수 [37706***.dxf] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 21 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 |

그림 1. 한강하류부에 대한 도곽 및 도엽번호

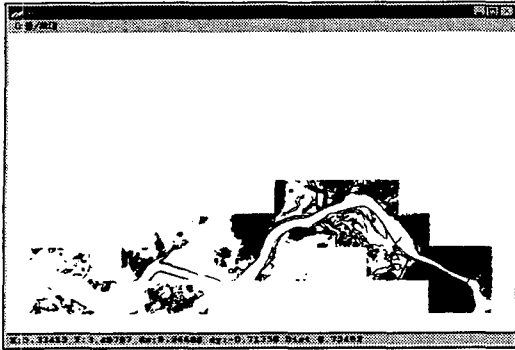


그림 2. 등고 coverage



그림 3. 하천 coverage



그림 4. 표고 coverage

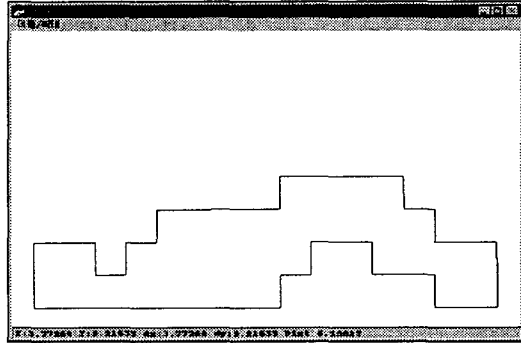


그림 5. 경계선 coverage

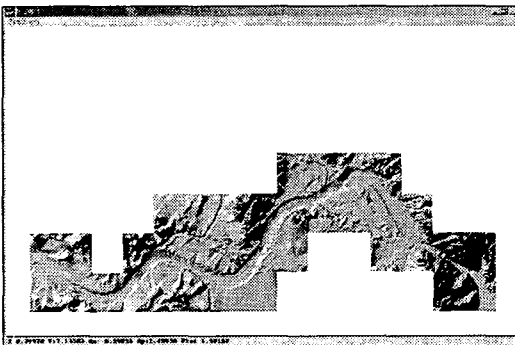


그림 6. ArcPlot을 이용한 TIN

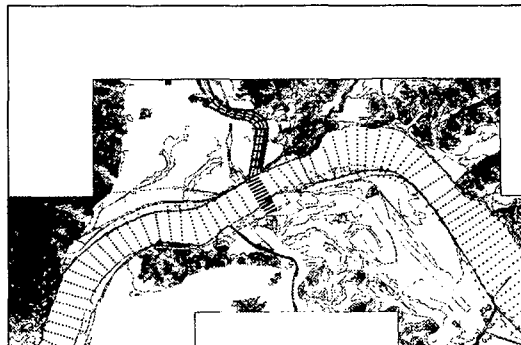


그림 7. 횡단면 자료입력(왕숙천합류부)

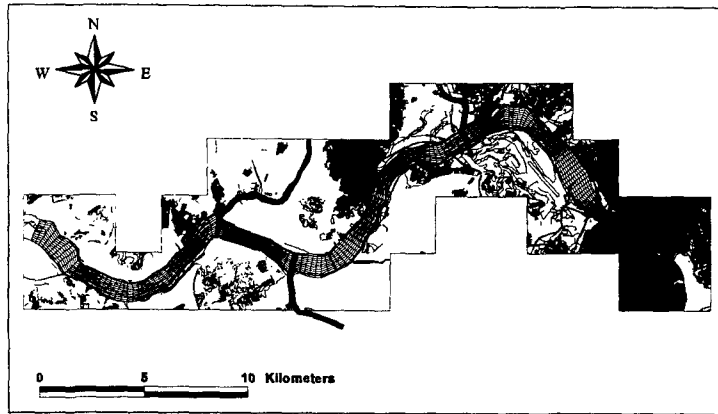


그림 8. ArcView를 이용한 합성 coverage 에서의 유한요소망

4. 2차원 수질해석

적용대상 구간의 오염물질 확산모형에 대한 수행을 위해 실제측량자료를 경계조건으로 하여 본 모형을 수행하였다. 흐름해석모형에서 얻은 유속분포 및 수위자료를 이용하여 2차원 오염물질 확산해석을 실시하였다. 본 모형을 이용한 한강유역의 오염도를 계산하기 위해 환경부(1999)자료를 이용하였고, 측정시기는 갈수기인 4월의 자료를 사용하였으며, 각각의 지천에 대한 경계조건값은 이 시기의 실제 측정값을 이용하여 한강의 주요지류인 하도흐름의 우안에 위치한 왕숙천과 중 및 경계조건은 당시의 환경부(1999)에서 측정한 수질측정자료를 이용하였다.

적용구간의 종확산계수는 $70 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였고, 횡확산계수는 $7.0\text{m}^2/\text{s}$ 를 사용하였으며, 오염물질의 확산형태는 유량과 각 방향으로의 확산계수에 의해 많은 영향을 받게 된다. 본 모형의 수행 결과 48 시간이 경과 후 농도의 변화가 시간에 따라 변화가 발생하지 않는 정상상태에 도달하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 운동량의 영향을 받아서 각 지천에서의 오염원의 유입과 하도의 흐름방향에 의해 하도의 경계면을 따라서 농도의 분포가 형성된 후, 시간이 경과하면서 하류부에서는 많은 유역에 오염원의 분포가 진행되었다. 특히 본 유역은 왕숙천의 오염도가 상당히 크며 하도의 흐름이 만곡부를 따라 하도의 우측으로 편향되기 때문에 강북지역의 오염원에 대한 영향이 심각하며 적정수질확보를 위한 합리적이고 적절한 조치가 수반되어야 할 것으로 판단되었다. 그림 5.21은 ArcPlot을 이용하여 합성된 지형 Grid를 나타내고 있으며, 그림 9는 지형 Grid상에서 BOD의 오염도를 합성한 그림이다. 실제로 강북지역의 경계면을 따라 오염도가 전파되고 있는 것을 알 수가 있었으며 GIS와 연계한 도시는 운영자에게 좀 더 합리적이고 과학적인 판단이 가능하도록 구현하였다.

5. 결론

본 연구에서는 하천수계에서 발생하는 흐름과 수질해석을 실시하였으며, 실제적인 수계오염에 대한 통합적인 최적관리방안을 제시하는데 목적이 있다. 본 연구에서 2차원 동수역학적 흐름 및 수질해석을 위해 유한요소법으로서 Petrov-Galerkin 기법을 개발하였다.

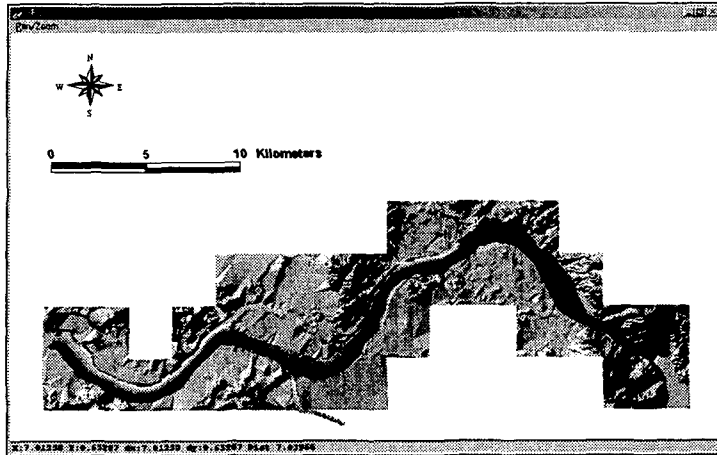


그림 9. Grid상의 농도분포도(BOD)

모형의 계산에 필요한 전처리 과정인 지형자료의 입력을 위해 GIS를 이용하였고, 지형도와 하천정비기본계획의 횡단도 등을 이용하여 하천자료 및 등고선 자료에 대한 coverage를 구성하였으며 실제횡단도의 지점을 TM 좌표계로 변환하여 수치지도와 일치되도록 구성하였다. 해석을 위한 입력자료를 구축하고 수치적으로 안정되고 정확한 해석을 실시하는 Petrov- Galerkin 유한요소모형을 적용하였으며, 모의결과에 대한 정량, 정성적인 특성을 파악하였다. 모형의 계산결과값을 후처리 과정으로서 GIS와 연계하여 결과를 제시함으로써 결과를 통한 합리적인 방지대책을 수립할 수 있는 관리모형시스템을 구축하였다. Arc/Info, ArcPlot, 및 ArcView를 사용하여 해석결과의 합리적이고 과학적인 판단을 제시하게 되며, 전·후처리 과정을 일관되게 수행함으로써 다른 하천유역에 대해서도 적용이 가능한 최적관리모형을 구축하였다.

6. 참고문헌

- 건설교통부 (1999). 한국수문조사연보.
- 경기도 (1984). 왕숙천 하천정비기본계획.
- 경기도 (1987). 탄천 하천정비기본계획.
- 의정부시 (1996). 중랑천수계 하천정비기본계획
- 환경부 (1998, 1999). 수질측정망 운영계획
- Piasecki, M. and Katopodes, N.D. (1999). "Identification of stream dispersion coefficient by adjoint sensitivity method." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 714-724.