

낙동강에서 수질해석을 위한 2차원 유한요소모형의 개발

○김상호*·한건연**

1. 서론

하천에서의 흐름해석 및 오염물질의 이송-확산 해석을 위해서 현재까지 널리 사용되고 있는 1차원 유한차분모형은 비교적 합리적인 계산결과를 제공하고 있다. 그러나 경계조건이 복잡하고 흐름 및 오염물질의 거동양상이 다양하게 변화하는 구간에서는 1차원 해석만으로 수리현상 및 오염물질의 거동을 모의하기에는 제약이 있다.

더욱이 갈수시나 저수시에 지류 등을 통해서 하천으로 유입되는 오염물질로 인한 수질오염 예측에 있어서도 1차원 해석만으로는 오염물질 방류구 주위에서 발생하는 확산현상 등을 해석하는데 있어 어려움이 존재하고 있다. 또한 하천 수질해석의 영향인자인 유속분포 양상과 혼합과정 등의 실제적인 문제를 해결할 수 있는 효율적인 수치해석기법의 도입이 절실히 요구되고 있다. 따라서 오염물질의 이송-확산 거동을 파악하기 위해서 정교한 해석기법의 도입이 요구되고 있으며 이를 통해서 오염물의 이송-확산 과정이 명확히 규명되어야 할 것이다. 그래서, 본 연구에서는 하천에서의 2차원 이송-확산방정식에 대한 수치해석을 위해 Petrov-Galerkin 유한요소모형을 개발하여 이를 낙동강 유역에 적용하여 흐름 및 주요 오염물질에 대한 동역학적 거동을 2차원적으로 모의하고자 한다.

2. 2차원 유한요소모형

오염물질이 연직으로 잘 혼합된 것으로 가정하면, Petrov-Galerkin 기법을 적용한 2차원 이송-확산 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Heinz, 1989; Martin과 McCutcheon, 1999).

$$\int_{\Omega} N^T \left\{ \frac{\partial(h\hat{C})}{\partial t} + \frac{\partial(p\hat{C})}{\partial x} + \frac{\partial(q\hat{C})}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[h(D_{xx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y}) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[h(D_{yx} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y}) + R \right] \right\} d\Omega = 0 \quad (1)$$

* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

여기서 \hat{C} 는 계산되는 오염물질의 농도, R 은 오염물질의 생성 및 소멸항을 나타내며, D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} 및 D_{yy} 는 확산계수이다. 이 식에서의 가중함수는 식 (2)와 같다.

$$N_* = N + \frac{p\Delta x + q\Delta y}{\sqrt{15(p^2 + q^2)}} \left(p \frac{\partial N}{\partial x} + q \frac{\partial N}{\partial y} \right) \quad (2)$$

식 (1)에서 시간에 대한 항을 음해성 유한차분형으로 나타내고, 확산항의 미분차수를 줄이기 위해 부분적분을 적용하면 임의의 요소에 대한 이송-확산 방정식은 식 (3)과 같이 기술될 수 있다.

$$\int_A N_*^T \left[\alpha(h\hat{C}) - \beta + \frac{\partial(p\hat{C})}{\partial x} + \frac{\partial(q\hat{C})}{\partial y} + R \right] dA + \int_A N^T h \left(D_{xx} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} + D_{yx} \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) dA = 0 \quad (3)$$

이 식을 통하여 하천에서의 점원 또는 비점원 오염물질 유입으로 인한 시간별 수질변화를 모의할 수 있으며, 각 오염물질의 특성에 따른 반응동역학을 추가하기 위해 생성/소멸항에 대한 고려가 필요하다. 이를 위한 여러 가지 수질항목에 대한 일반화된 동역학적 반응을 고려하기 위해 식 (3)의 R 항은 식 (4)와 같이 각 구성요소에 대한 오염물질 자체의 성장/감쇠 및 다른 오염물질과의 상호작용에 의한 생성/소멸항으로 도입될 수 있다.

$$R = -hGC - hS \quad (4)$$

여기서 h 는 수심[L], C 는 수질농도[ML^{-3}], G 는 해당되는 수질항목의 성장/감쇠율[T^{-1}]을 의미하며, S 는 전체 수질항목간의 동역학적 상호반응에 의한 생성/소멸율[$ML^{-3}T^{-1}$]을 나타낸다. 표 1은 본 연구모형에서 다룰 수 있는 수질항목들을 나타내고 있으며, 이러한 수질항목들을 모의하기 위해 질소, 인과 같은 영양물의 순환, 조류의 성장, 퇴적물의 산소요구량, 대기 중의 재포기 그리고 용존산소의 거동에 따른 영향 등을 고려하였다.

표 1. 모의가능한 수질항목

Temperature	DO	BOD
Org-N	NH ₃ -N	NO ₂ -N
NO ₃ -N	Org-P	PO ₄ -P
Algae	Coliform	보존성 물질 (I ~ VI)

3. 낙동강 유역에 대한 적용

낙동강 유역은 대도시와 공업단지의 오폐수가 지류를 통하여 본류로 유입되면서 오염도가 크게 상승하고 있으며 하류부에서는 다량의 하천수가 상수원수로 사용되고 있는 실정이다. 특히, 최근에는 위천공업단지 조성계획에 따른 낙동강의 수질 문제는 지역간에 큰 논란을 불러일으키고 있다. 이러한 관심지역에 대한 2차원적 수질모의를 위하여 낙동강의 주요 오염원의 하나인 금호강을 중심으로 성주에서 현풍까지 35 km 구간을 모의 대상구간으로 설정하였다.

3.1 지형자료의 구축

본 연구에서는 수치지도작성작업규칙(건설교통부령 제 17호, 1995. 5. 29)에서 정하고 있는 규정에 따라 기본도의 벡터화를 실시하였고, 대상유역에 대한 3차원 지형자료를 구축하였다. 대상구간에 대한 기하학적 양상의 구성에 사용한 기초자료는 기존의 1/5,000 지형도 35매와 하천정비기본계획상 횡단도 등의 지형도를 사용하였다. 기본지형도에 대한 벡터화 작업을 완료한 후 생성된 coverage를 병합하여 대상유역에 대한 수치기본도를 완성하였다. 또한, 대상구간의 하도에 대한 실측자료의 구축을 위해 하천정비기본계획상의 횡단도를 낙동강 본류의 경우 67개 단면, 금호강의 경우 9개 단면을 지형자료에 반영하였다. 이 수치기본도와 횡단도의 관측자료를 기본도면으로 고려하여 대상구간에 대한 TIN(Triangulated Irregular Network)을 형성하였으며, 이를 통하여 대상구간에 대해서 구성된 유한요소망의 각 절점에 대한 X, Y 좌표값을 텍스트 파일로 변환하여 본 연구모형에 적용가능한 형식으로 구축하였다.

3.2 흐름 및 수질해석

낙동강 유역에 오염물질의 유입으로 인한 유동현상을 모의하기 위해 먼저 대상구간에 대한 흐름모의를 수행하여야 한다. 대상구간의 하도에 대해 구축된 지형자료는 전체 7627개의 절점, 6782개의 요소 및 1686개의 경계노드로 구성되어 있다. 해석구간 내의 하도는 홍수터가 넓게 존재하는 복합단면의 양상을 띠고 있으나, 본 연구에서는 오염도 해석을 주목적으로 하였기 때문에 평수기의 주수로부를 대상으로 하였다.

모의를 위한 계산시간 간격은 1.0시간으로 수행하였으며, 대상구간에 대한 조도계수는 낙동강 본류에 대해서는 0.025, 금호강에 대해서는 0.030을 각각 사용하였다(건설부, 1992, 1993). 초기유속은 정적 계산조건으로부터 시작하였으며, 상류단 경계조건은 낙동강과 금호강의 상류단인 두 경계에서 평수기 유량에 대한 x , y 방향의 유량 경계조건을 사용하였고, 하류단 경계조건은 현풍지점에서 관측된 평균 유속자료로부터 도출된 수위를 이용한 수위 경계조건을 사용하였다. 대상구간에 존재하는 지류인 대명천은 점 오염원으로 간주하여 모형에 고려하였다. 모의결과 15시간 이후에 하도 전체구간의 흐름은 정상상태에 도달하였으며, 흐름에 대한 유속의 모의결과를 지리정보시스템인 Arc/Info 상의 수치지도상에 나타내기 위해 DXF 파일로 변환하여 수치지도와 유한요소해석 결과와의 결합을 시도하였다. 그림 1은 대상구역의 모의결과 중 유속자료를 GIS의 ArcView 상에서 지형자료와 함께 도시한 것으로써 좀 더 가시적인 효과

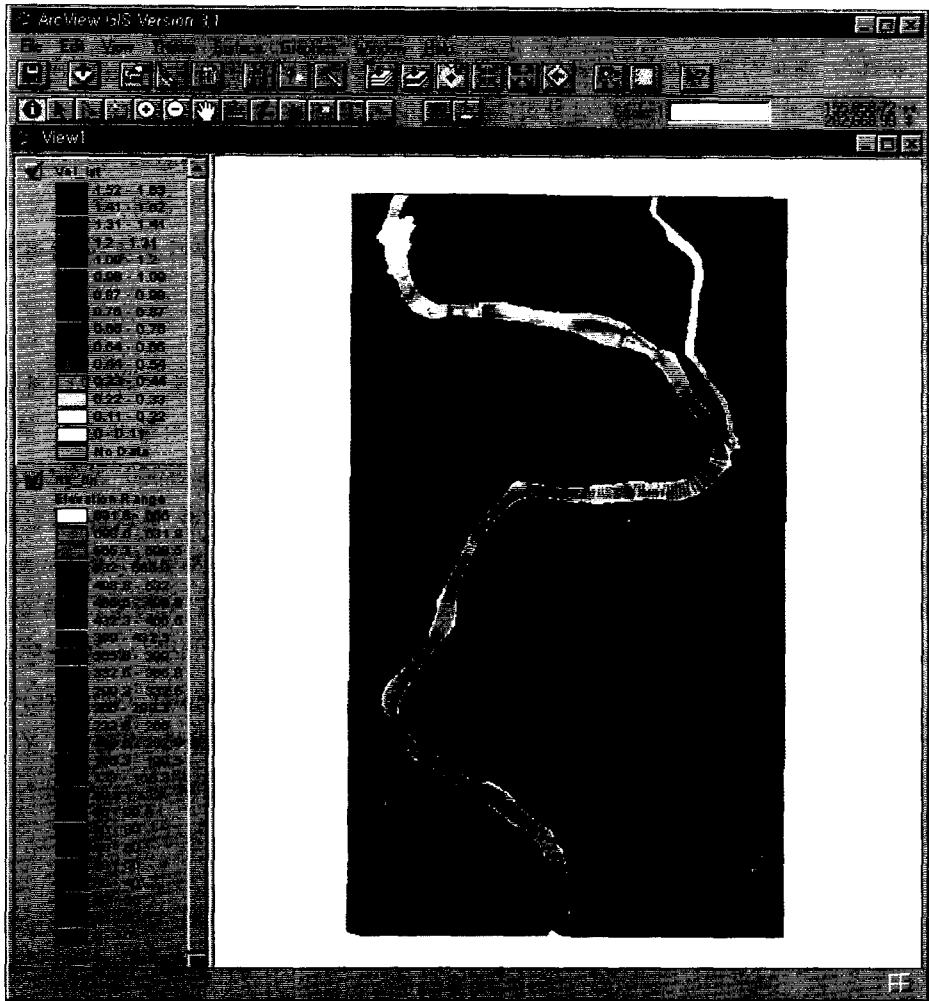


그림 1. ArcView를 이용한 유속분포에 대한 3차원 Grid

를 얻을 수 있었다.

흐름해석으로부터 구한 대상유역의 유속자료 및 수심자료를 사용하여 하천에서의 오염물질에 대한 2차원적 이송 - 확산 현상을 모의하였다. 낙동강의 평수기 유량에 대한 흐름결과를 이용하여 수질모의를 수행하기 위해 사용된 수질항목으로는 일반적으로 하천수의 오염정도를 언급할 경우 가장 많이 사용되는 DO와 BOD에 대하여 수행하였으며, 이 외에도 수온, 유기 질소, 암모니아성 질소, 질산성 질소, 아질산성 질소와 같은 질소계열과 유기 인, 용존성 인과 같은 인 계열에 대해 모의하였다.

이를 위해 사용된 수질자료는 '96년 1월부터 12월에 이르는 환경부의 월별 수질측정자료를 이용하여 낙동강과 금호강에 대해 적용하였으며, 이들 자료 중에서 평수기 유량과 가까운 6월의 수질자료를 이용하였으며, 오염정도가 상당히 높은 대명천은 점오염원으로 고려하였다.

낙동강 본류의 초기 수질농도는 달성 수질측점의 값을 사용하였으며, 금호강의 경우 강창교 지점의 측정값을 사용하였다. 본 연구의 대상구간에 사용된 확산계수는 기존문헌으로부터 하도 구간을 흐르는 유속과 수심의 관계를 고려하여 종방향 확산계수는 $60 \sim 80 \text{ m}^2/\text{s}$, 횡방향 확산계수는 $0.8 \sim 1.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 의 값을 사용하였다(Rutherford, 1994). 이러한 흐름조건과 수질조건들을 이용하여 1.0시간의 시간간격에 대해 모의하였다. 모의결과 약 24시간이 경과한 후 거의 정상상태에 도달하였으며, 이 때 전체 하도구간에 대한 BOD와 $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도분포를 그림 2와 그림 3에 도시하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 하천에서 오염물질의 2차원 동수역학적 이송 - 확산해석을 위해서 2차원 천수 방정식을 Petrov - Galerkin 기법에 의해 해석하는 동수역학적 모형의 수행을 통하여 오염물의 거동을 해석하는 2차원 유한요소모형을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 모형은 하천에서의 유동현상과 오염물질의 이송 특성의 예측을 위해 수온, DO, BOD, 질소와 인, 조류, 대장균과 비보존성 물질 등 12가지 수질항목들에 대하여 모의 수행할 수 있도록 구성하였다.

이에 대한 실제의 적용을 위하여 본 연구에서는 낙동강의 성주에서 현풍까지 35 km 구간에 대하여 실제 지형자료와 하도자료를 이용한 지리정보시스템(GIS)을 구축함으로써 각종 유역자료 및 수질관련 자료에 대한 데이터베이스 체계를 갖추게 되며, 이를 토대로 본 연구에서 개발된 모형의 모의결과를 GIS의 ArcView 상에서 구현하였다. 이와 같이 실제 하천유역에 대한 지리정보시스템(GIS)의 구축을 통하여 하천의 2차원 유속분포, 수심분포 및 오염물질의 농도분포 등과 같은 모의결과를 GIS의 ArcView 상에서 구현함으로써 주요 지류 및 처리장에서의 오염물질을 규제하는 방안을 제시하여 적정 수질을 유지하기 위한 과학적인 수질관리 체계를 수립하는데 기여할 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- 건설부 (1992). 낙동강 하천정비 기본계획(보완조사 II).
건설부 (1993). 낙동강 하천정비 기본계획(보완조사 III).
Fisher H.B. et al. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press.
Heinz, S.C. (1989). "Modeling residual chlorine in Potomac Estuary." in *Estuarine and Coastal Modeling*, Spaulding, M.L. (ed.), ASCE, pp. 229-238
Hicks, F.E., and Steffler, P.M. (1992). "Characteristic dissipative Galerkin scheme for open channel flow." *J. of Hyd. Eng., ASCE*, Vol. 118, No. 2, pp. 337-352.
Katopodes, N.D. (1984). "Two-Dimensional Surge and Shocks in Open Channels", *J. of Hyd. Eng., ASCE*, Vol.110, No.HY6, pp. 794-812.

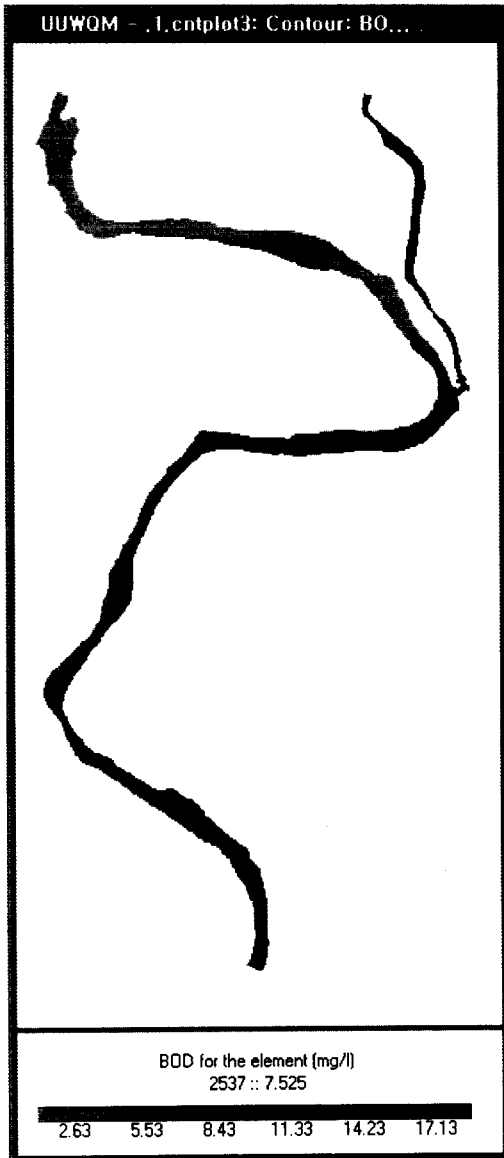


그림 2. 24시간 후의 BOD 농도분포도

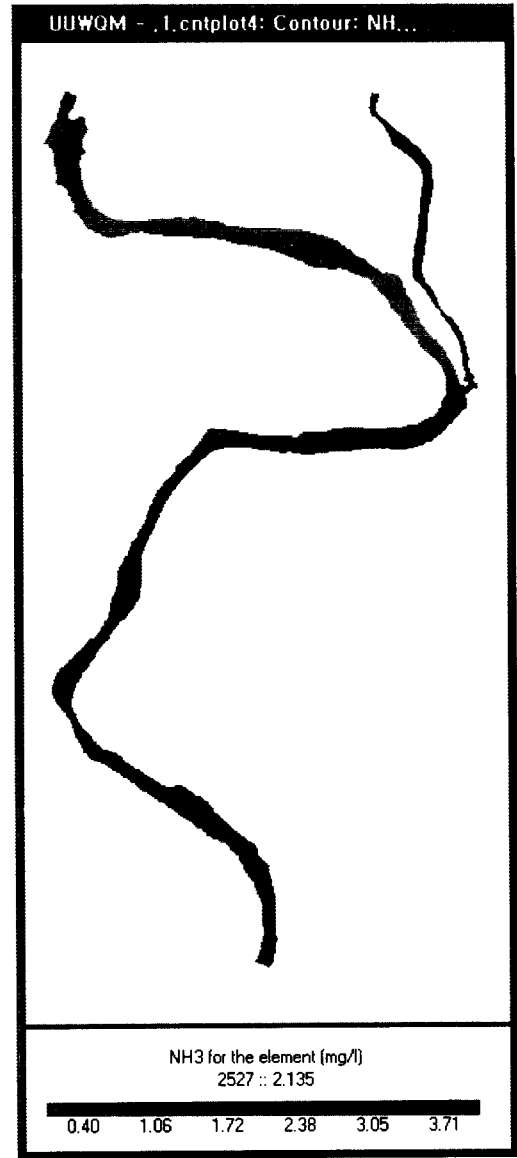


그림 3. 24시간 후의 NH₃-N 농도분포도

Katopodes, N.D. (1987). "Analysis of transient flow through broken levees.", *Turbulence Measurements and Flow Modeling*, C. J. Chen, L. D. Chen, and F. M. Holly, Jr., eds., Hemisphere Publishing Corp., Washington, D. C., pp. 301-310.

Martin, J.L. and McCutcheon, S.C. (1999). *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, Lewis Publishers, pp. 678-689.

Rutherford, J.C. (1994). *River mixing*. John Wiley & Son.