

추적자를 이용한 오염물질 거동분석

김기철, 이종석*, 이재철**, 김윤호*, 연기흠*
한국원자력연구원, 한밭대학교*, 청양대학**

요약

본 연구에서는 하천에 유입된 오염물질의 거동 및 확산 특성을 파악하기 위하여 실제 하천에서 RI(Radioactive Isotope) 추적자를 이용하여 오염물 확산을 실측하고 그 결과를 수치모형과 비교분석하였다. 연구대상 수로구간은 금강 상류지역의 용담댐 부근 남대천 합류지점으로부터 하류로 약 2km구간에서 실험을 하였으며, 수치모형으로는 RMA-2(Resource Modeling Associates), RMA-4를 사용하였다. RI를 이용한 현장실험은 모델링을 적용한 지역과 동일 지역에서 실험을 실시하였고, 각 구간간의 간격은 1km로 정하되 현장 사정에 따라 차이를 조금 두어 RI계측기를 통한 1초간격의 농도 데이터를 계측하였다. 계측결과는 수치모형의 결과와 실제 하천에서의 확산범위 및 확산에 큰 영향을 미치는 확산계수 변화에 따른 농도 분포를 비교 분석하였다. 본 연구를 통해 확산계수가 하천의 오염진화에 미치는 영향과 실측된 농도 데이터를 통해 최초 및 최대농도 도달시간을 파악할 수 있었고, 이것으로 인하여 확산계수를 산정할 수 있는 기초자료를 마련하였다.

Abstract

In this study, in order to find out the movement of polluted substance that is flown into the river and the characteristics of dispersion, the experiment that used the RI (Radio Isotope) tracer in the river was undertaken, and by using the experiment result, the figure modelling was undertaken to analyze the general type of pollutant dispersion. In addition, in order to calculate more accurate dispersion range and moving time, the experiment was done in about 2km from the measuring points of Namdaecheon around the Yongdam Dam of the upper Geum River to the lower stream, and modeling was undertaken for the 20km zone from the measuring points to the lower stream. In order to find out the flow of river and dispersion of polluted substance, RMA (Resource Modeling Associates)-2 and RMA-4 program are used in study. The site experiment using the RI was implemented for the experiment in the applied area and the same area, and the distance between each zone was set for 1km with the slight difference for site situation and measured the density data of one second distance through the NaI apparatus to measure the density data of one second interval. On the basis of this measured data, it is compared and analyzed with the result of figure copy of RMA-2 and RMA-4 models to make the comparison and analysis of density distribution following the change in expansion coefficient that makes great influence on expansion range and dispersion in natural rivers. The influence of expansion coefficient on river can be researched and the measured density data, the maximum and minimum density time, and the basic data to calculate the expansion coefficient was prepared in this study.

I. 서론

수자원은 사람을 비롯한 모든 생명체의 생존에 필수적인 요소이며, 농업, 제조업 등 모든 산업의 가장 기초적인 생산요소로서의 기능을 하는 중요한 자원이다. 그러나 이러한 생명수의 근원인 하천들이 급속한 산업화와 도시화로 인한 개발 등으로

오염이 되기 시작하여 국가적인 생존 문제로까지 확대될 우려를 낳고 있다. 특히, 1960년대 이후 개발위주의 산업화 정책 추진으로 환경오염문제에 대한 관심을 기울이지 못해 환경문제가 더욱 악화되는 현상이 발생하였다.

더구나, 수자원의 경우 한번 오염된 하천은 다시 복원하는

데 상당한 시간이 소모되며 막대한 예산까지 필요로 한다. 이와 같이 한번 오염된 하천의 피해를 줄이는 방법으로는 수자원 환경의 체계적 평가 및 오염된 수자원에 대한 신속한 처리가 중요하다. 본 연구에서는 이러한 수자원의 오염을 최소화하고자 하천의 흐름 및 오염물질의 거동을 파악하는데 중점을 두었다.

유해한 오염물질이 하천에 유입된 경우에는 하천의 생태계와 인간에게 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 이러한 사고로 인한 피해규모를 예측하고, 오염물질의 거동을 파악하는 것은 매우 중요하다. 그러나 국내의 기초자료 대부분이 자연에 존재하는 추적자를 사용하고 있으며 추적자의 분포를 파악하는 장비 또한 미비한 실정이다. 이러한 현실을 감안할 때, 본 연구는 자연에 존재하지 않는 RI추적자(방사선 동위원소)를 사용하였는데, 큰 의미를 부여할 수 있다. 본 연구를 통하여 얻은 자료는 하천에 유입된 오염물질의 거동 및 특성을 파악에 기여함은 물론이고, 오염물질 확산의 정확한 역추적 모의를 위한 기초자료로 활용할 수 있는 유용한 정보를 제공하고자 한다.

II. 본 론

본 연구에서는 보다 정확한 확산 범위와 이동시간을 산출하기 위해서 금강 상류 지역의 용담댐 부근 남대천 합류지점으로부터 하류로 약 2km구간에서 실험을 하였으며, 모델링은 합류점부터 하류로 20km구간에 대해 모델링을 실시하였다.

본 실험에서는 하천의 흐름과 오염물질의 확산을 파악하기 위하여 RMA2, RMA4 프로그램을 사용하였으며, 이 프로그램을 연동하기 위하여 SMS모델링 프로그램을 사용하였다. 본 모델링에 사용된 RMA2, RMA4 프로그램은 2차원 수리모형 프로그램으로 하천이나 해양, 호수등 국내·외에서 많이 적용하고 있으며, 모델링의 결과치 역시 높아 이 모델을 선정하게 되었다.

RMA2에 이용되는 유한요소망은 격점과 요소로 구성되는데 하나의 유한요소망은 여러개의 삼각형 또는 사각형 요소로 대표되는 대상지역의 평면으로 생각할 수 있다. 여기서 격점들은 망의 지형학적 형태를 정의하는 x, y, z 좌표 값을 가지며 요소는 이러한 격점들은 연결함으로써 망의 평면적인 형태를 정의하게 된다. 실제로 망의 구성은 수리계산 전체에 있어서 시간이 가장 많이 소모되는 부분이지만, 구성된 망의 질은 계산결과의 수렴문제 또는 신뢰도에 미치는 영향이 지대하기 때문에 상당히 세심한 배려가 요구된다. 이번 실험구간의 모델에 적용한 입력 자료 및 경계조건은 용담댐 하류 남대천 합류지점으로부터 3km구간으로 구간의 평균 폭은 60~80m 내외이며 평균하상 경사는 1/650~1/1,000 정도이고, 단면자료는

1/25,000의 수치지도를 이용 하였으며 Scatter자료는 『2004 하천정비기본계획서』를 참고하여 25,900개의 수심값을 적용하였다. 조도계수는 하상재료 또는 지형조건을 고려하여 Manning에 의해 제안되는 것으로 0.035값을 이용하였다. 그림 1은 수치모델의 적용을 위한 유한 요소망으로 1,077개의 Element와 절점 3,540개의 요소로 구성하였다.



▶▶ 그림 1. 실험구간의 유한 요소망

하천의 흐름 특성 및 오염물 이동 확산은 연속, 운동량 방정식 및 이송·확산 방정식으로 표현되는 데, 그 지배 방정식은 다음과 같다[1, 2, 3, 4].

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \\ & + gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{gum^2}{(1.486h^{1/6})^2} (u^2 + v^2)^{1/2} \\ & \zeta V_a^2 \cos \psi - 2hvw \sin \psi = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \\ & + gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{gvm^2}{(1.486h^{1/6})^2} (u^2 + v^2)^{1/2} \\ & \zeta V_a^2 \sin \psi - 2hvw \sin \psi = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

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

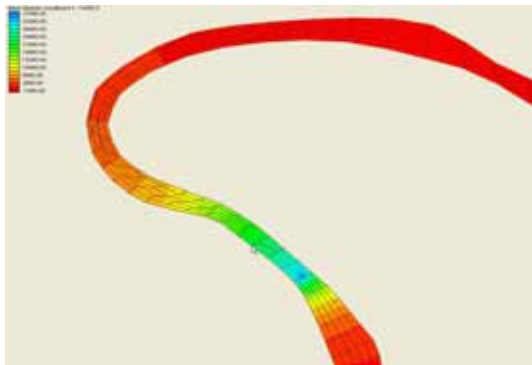
식(1)~(4)의 지배방정식은 현장실험과 수치모의 결과를 비교 분석하는 데 이용하였다.

경계조건은 용담유량관측소의 유량과 수통유량관측소의 수위 값을 2007년 6월24일 0시부터 6월26일 0시까지 3시간 간격의 데이터로 데이터 값은 표 1과 같다.

표 1. 3시간간격 용담유량 및 수통수위

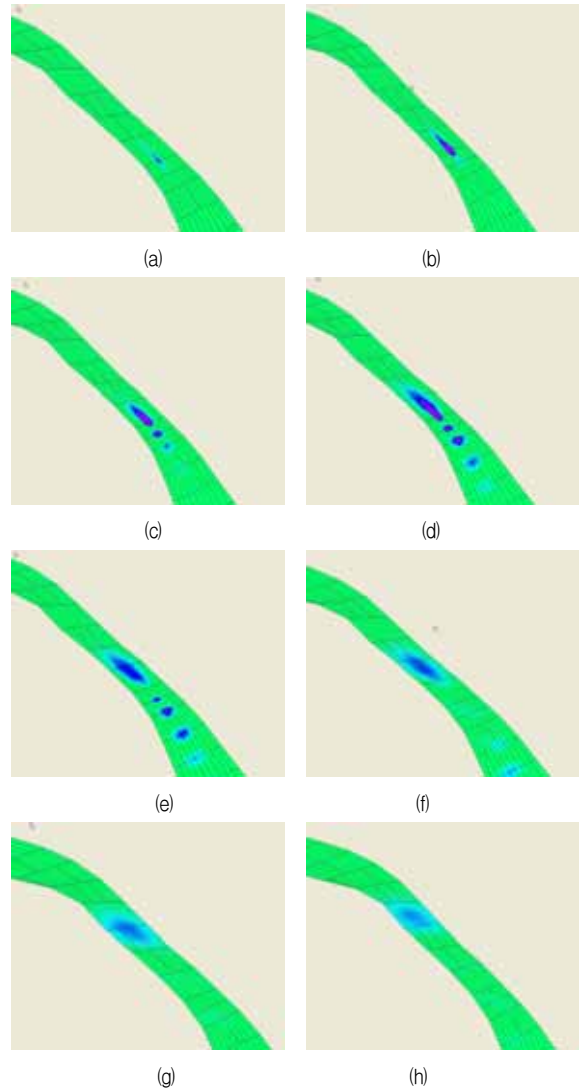
| 일시 | 용담유량 | 남대전 유량 | 수통 수위 | 합류유량 |
|------------------|-------|--------|-------|-------|
| 2007-06-24 00:00 | 7.14 | 2.55 | 0.44 | 9.69 |
| 2007-06-24 03:00 | 7.14 | 2.55 | 0.46 | 9.69 |
| 2007-06-24 06:00 | 13.36 | 4.77 | 0.54 | 18.13 |
| 2007-06-24 09:00 | 34.73 | 12.40 | 0.75 | 47.13 |
| 2007-06-24 12:00 | 19.03 | 6.79 | 1.11 | 25.82 |
| 2007-06-24 15:00 | 16.03 | 5.72 | 1.20 | 21.75 |
| 2007-06-24 18:00 | 13.36 | 4.77 | 1.08 | 18.13 |
| 2007-06-24 21:00 | 11.00 | 3.92 | 0.97 | 14.92 |
| 2007-06-25 00:00 | 11.00 | 3.92 | 0.87 | 14.92 |
| 2007-06-25 03:00 | 11.00 | 3.92 | 0.80 | 14.92 |
| 2007-06-25 06:00 | 11.00 | 3.92 | 0.74 | 14.92 |
| 2007-06-25 09:00 | 8.93 | 3.19 | 0.68 | 12.12 |
| 2007-06-25 12:00 | 8.93 | 3.19 | 0.58 | 12.12 |
| 2007-06-25 15:00 | 8.93 | 3.19 | 0.70 | 12.12 |
| 2007-06-25 18:00 | 8.93 | 3.19 | 0.59 | 12.12 |
| 2007-06-25 21:00 | 8.93 | 3.19 | 0.56 | 12.12 |
| 2007-06-26 00:00 | 8.93 | 3.19 | 0.54 | 12.12 |
| 2007-06-26 03:00 | 8.93 | 3.19 | 0.52 | 12.12 |
| 2007-06-26 06:00 | 8.93 | 3.19 | 0.50 | 12.12 |
| 2007-06-26 09:00 | 8.93 | 3.19 | 0.49 | 12.12 |
| 2007-06-26 12:00 | 8.93 | 3.19 | 0.48 | 12.12 |
| 2007-06-26 15:00 | 8.93 | 3.19 | 0.47 | 12.12 |
| 2007-06-26 18:00 | 8.93 | 3.19 | 0.46 | 12.12 |
| 2007-06-26 21:00 | 8.93 | 3.19 | 0.45 | 12.12 |
| 2007-06-27 00:00 | 8.93 | 3.19 | 0.44 | 12.12 |

표 1.의 입력 자료와 경계조건을 구성하여 RMA2를 실행시킨 유속분포결과 최대유속 0.66%이며, 실험구간 평균유속은 0.4%나타났다. 이 같은 유속 및 오염물질의 확산을 검증하기 위해 2007년 6월 25일 현장실험을 실시하였으며, 현장실험에서의 유속측정은 1차원 유속계 AEM-1D와 2차원 유속계인 COMPACT-EM으로 측정하였고, RI물질의 농도분포는 원자력연구원의 RI계측장비를 이용하여 1개 측선에 10개의 디텍터를 사용하여 총 3개구간에서 30개를 1초 단위로 측정하였다.



▶▶ 그림 2. 오염물질 거동

각 구간의 간격은 1km로 정해져 현장 사정에 따라 차이를 조금 두어 각 구간의 농도를 계속하였다. 또한 오염물질의 거동을 분석하기위하여 SMS 프로그램을 이용하여 1초간격의 오염물질거동을 모델링하여 그림 2, 그림 3.에 나타내었다.

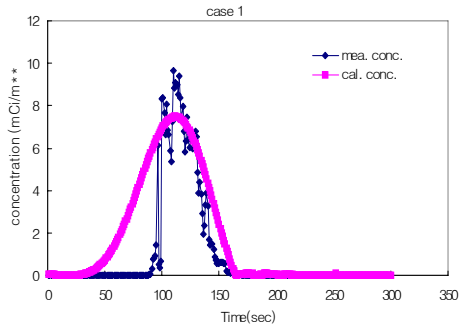


▶▶ 그림 3. 10초간격의 오염물질 거동

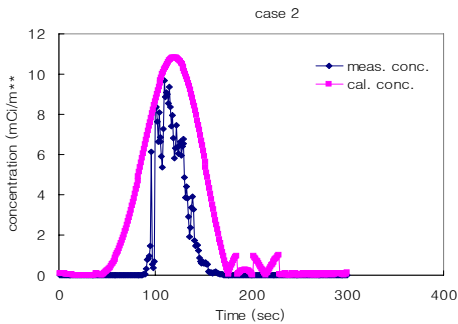
III. 결 론

RI농도의 계측 실험결과를 바탕으로 정확한 실험구간의 종·횡 확산계수를 구하기 위하여 종확산계수의 기본 값을 2006하천정비기본계획서에 따른 $D_x=0.5$, $D_y=0.014$ (case1)를 기본 값으로 정하고 종확산계수 값을 $D_x=0.5$, $D_x=5$ (case2), $D_x=50$ (case3)으로 변화를 주어 시간-농도 그래프를 작성하여 그림 4와 같이 나타내었으며 횡확산계수 값은 $D_y=0.014$ (case1)에서 $D_y=0.14$ (case4), $D_y=0.0014$ (case5)로 변화를 주어 RI동위원소의 농도 그래프와 비교분석하여 그림

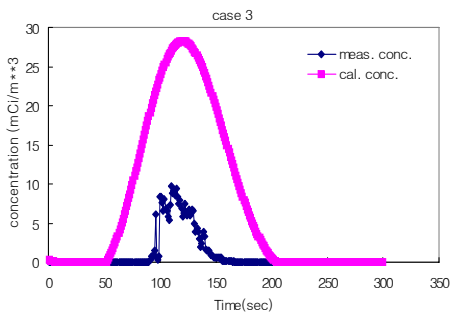
5와 같이 나타내었다.



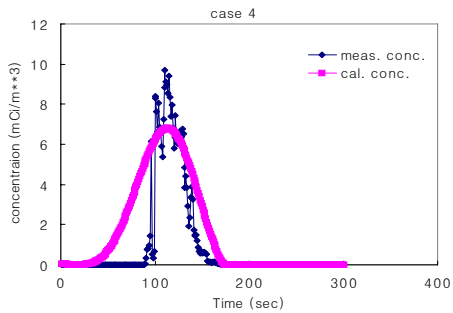
(a)



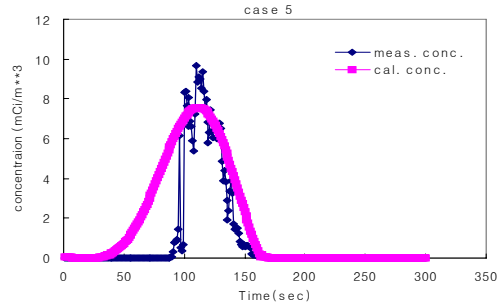
(b)



(c)

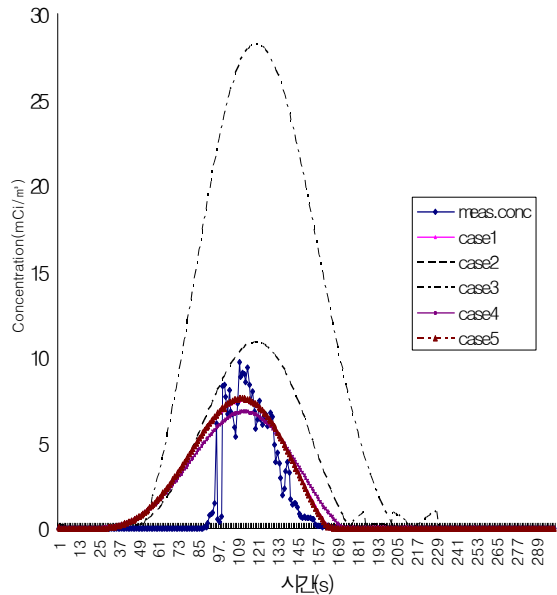


(d)



(e)

▶▶ 그림 4. 확산계수 변화에 따른 농도분포



▶▶ 그림 5. RI농도 관측 값과 확산계수의 실험값 비교

이 연구를 통해 확산계수에 따른 농도 분포가 각각 다르다는 것을 이번 연구를 통해서 알 수 있었으며, 종확산계수 값은 최대농도의 도달시간 및 최대농도값 그리고 오염물질의 지속 시간에 영향을 주는 것으로 본 실험을 통해 나타났다. 또한 횡 확산계수의 경우 최대농도의 값과 최대농도 도달시간에는 크게 영향을 미치지 않으나 농도의 지속시간에는 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

또한 자연하천에서의 실측 농도분포와 모델링에서 농도분포를 살펴보면 최대농도 도달시간은 어느 정도 일치하나 최대농도값은 일치 하지 않았다. 또한 농도의 지속시간은 자연하천의 경우 오염물질 투여시간으로부터 약 90초~160초 사이로 약 70초 사이에 오염물질이 빠져나갔으나 모델링의 오염물질 지속시간은 약 45초~180초로 약 135로 2배정도 지속시간이 길어지는 걸 알 수 있었으며, 수치 해와 RI를 이용한 현장실측 결과를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 금강 상류 수로구간에서 하천으로의 오염물질 유입시 확산분포는 하천유량이 평수위에 해당할 때에 수치해 결과와 RI 실측치간의 농도분포 비교결과가 확산계수를 정확하게 결정할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 본 연구는 금강 상류 수로구간의 확산계수 결정을 위해 시간경과에 따른 RI농도 변화를 현장실측을 통해 얻고, 이를 수치모형에 적용하여 종방향 및 횡방향 확산계수를 비교분석한 결과 각각 $Dx=0.5$, $Dy=0.014$ 에서 두 결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다.
3. 본 연구는 RI를 이용하여 오염물질의 확산분포를 현장실측 함으로써 그 거동해석은 물론 확산분포에 지대한 영향을 미치는 확산계수의 중요성을 확인하였으며, 이 결과는 앞으로 유사한 연구수행에 확산계수 방정식 산정의 기초자료로 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

■ 참고 문헌 ■

- [1] Bansal, M. K.(1971), "Dispersion in natural streams", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol .97 No. 11, pp. 493-498.
- [2] Chang, Y. C.(1971), "Lateral mixing in meandering channels. UMI Dissertaion", Service, pp. 1-49.
- [3] Elder, J. W.(1959), "The dispersion of a marked fluid in turbulent shear flow", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 5, pp. 544-560.
- [4] Fischer, H. B, (1968) "Dispersion predictions in natural streams", Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 94. No. HY6, pp. 544-560
- [5] Fischer, H. B., (1975) "Discussion of simple method for predicting dispersion in streams by McQuivey, R.S., and Keefer, T.N.", Journal of Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No.EE3, pp.453-455.
- [6] Glover, R. E. (1964) "Dispersion of dissolved and suspended materials in flowing streams", United State Geological Survey Professional Paper 433-B, Washington, D. C.
- [7] Godfrey, R.G. and Frederick, B.J., Stream dispersion at selected sites, United State Geol. Sur. prof. Pap. 433-k, (1970).
- [8] US Army, Eng. Res. and Dev. Center, RMA2 WES V 4.5, (2003).
- [9] US Army, Eng. Res. and Dev. Center, RMA4 WES V 4.5, (2003).
- [10] 한정석, "하천에서 오염물질이 순간유입으로 인한 확산 특성분석", (2002).
- [11] 서일원, 정태성, "자연하천에서의 종확산계수 추정식 개발", 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), (1994).
- [12] 고재형, 류택희, 한정석, 윤세의, "한강하류부에서의 확산계수에 따른 오염물질 거동 특성 분석", 한국수자원학회 (2002).
- [13] 건설교통부, "2006하천정비기본계획서", (2006)