

하천에서 추적자를 이용한 오염물질 거동분석

Analysis of a Pollutant Flow Tracer Test in River using Radioactive Isotope

김기철*, 이종석**

한국원자력연구원*, 한밭대학교**

Ki-Chul Kim(ki-chul@kaeri.re.kr)*, Jong-Seok Lee(ljs96@hanbat.ac.kr)**

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 합류지점으로부터 하류로 약 2km구간에서 실험을 하였으며, 수치모형으로는 RMA-2(Resource Modeling Associates-2), RMA-4를 사용하였다. RI를 이용한 현장실험은 모델링을 적용한 지역과 동일 지역에서 실험을 실시하였고, 각 구간의 간격은 1km로 정하되 현장 사정에 따라 차이를 조금 두어 RI계측기인 NaI계측기를 통한 1초 간격의 농도 데이터를 계측하였다. 계측결과는 수치모형의 결과와 실제 하천에서의 확산범위 및 확산에 큰 영향을 미치는 확산계수 변화에 따른 농도 분포를 비교 분석하였다.

■ 중심어 : | 추적자 | 확산계수 | RMA-2 | RMA-4 |

Abstract

In this study, in order to find the movement of polluted substance that is flown into the river and the characteristics of dispersion, the experiment that used the RI (Radioactive 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 Namdae Stream around the Yongdam Dam of the upper Geum River 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 the 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.

■ keyword : | Tracer | Dispersion Coefficient | RMA-2 | RMA-4 |

I. 서론

수자원은 사람을 비롯한 모든 생명체의 생존에 필수적인 요소이며 농업, 제조업 등 모든 산업의 가장 기초적인 생산요소로서의 기능을 하는 중요한 자원이다. 유해한 오염물질이 하천에 유입된 경우에는 하천의 생태계와 인간에게 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 이러한 사고로 인한 피해규모를 예측하고, 오염물질의 거동을 파악하는 것은 매우 중요하다.

하천내 오염물의 이동·확산은 흐름에 의한 이류와 난류에 의한 확산이 지배한다. 이류에 의한 흐름 형태는 하천의 형상, 수심, 조도계수, 와점성계수 등에 의하여 변화된다. 하천 오염물의 확산에 중요한 영향을 주는 요소 중의 하나인 확산계수는 현장실험, 실내실험, 이론식 등에 의하여 여러 식들이 제시되고 있다[7].

Elder[3]는 무한평면을 흐르는 2차원 흐름에 적용하여 간편한 경험식을 제안하였고, Glover[6]과 Fischer[4][5]는 횡방향 유속분포 등을 고려하여 새로운 경험식을 제안하기도 하였다. 또한 Bansal[1]과 Chang[2]은 입증된 종확산계수를 추정하는 경험식들을 정리, 분석하여 확산계수는 하폭에 대한 동수반경의 비와 비례한다고 발표하였다. 이처럼 확산계수가 오염물질에 미치는 영향은 국내·외적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 국내의 기초자료는 대부분 자연에 존재되는 추적자를 사용하고 있으며 추적자의 분포를 파악하는 장비 또한 미비한 실정이다.

본 연구는 자연에 존재하지 않는 RI추적자(방사선 동위원소)를 사용하였다는 의미를 부여할 수 있다. 본 연구를 통하여 얻은 자료는 하천에 유입된 오염물질의 거동 및 특성을 파악에 기여하는데 있다. 오염물질 확산의 정확한 역추적 모의를 위한 기초자료로 활용할 수 있는 유용한 정보를 제공하고자 한다.

II. 이론적 배경

본 연구에서는 보다 정확한 확산 범위와 이동시간을 산출하기 위해서 금강 상류 지역의 용담댐 부근 남대천 합류지점으로부터 하류로 약 2km구간에서 실험을 하였

으며, 모델링은 합류점부터 하류로 20km 구간에 대해 실시하였다.

본 실험에서는 하천의 흐름과 오염물질의 확산을 파악하기 위하여 RMA-2, RMA-4 프로그램을 사용하였으며, 이 프로그램을 연동하기 위하여 SMS모델링 프로그램을 사용하였다. 본 모델링에 사용된 RMA-2, RMA-4 프로그램은 2차원 수리모형 프로그램으로 하천이나 해양, 호수 등 국내·외에서 많이 적용하고 있으며, 모델링의 결과치 역시 높아 이 모델을 선정하게 되었다.

RMA-2에 이용되는 유한요소망은 격점과 요소로 구성되는데 하나의 유한요소망은 여러 개의 삼각형 또는 사각형 요소로 대표되는 대상지역의 평면으로 생각할 수 있다. 여기서 격점들은 땅의 지형학적 형태를 정의하는 x, y, z 좌표 값을 가지며 요소는 이러한 격점들은 연결함으로써 땅의 평면적인 형태를 정의하게 된다[12]. 실제로 땅의 구성은 수리계산 전체에 있어서 시간이 가장 많이 소모되는 부분이지만, 구성된 땅의 질은 계산결과와 수렴문제 또는 신뢰도에 미치는 영향이 지대하기 때문에 상당히 세심한 배려가 요구된다[11]. 이번 실험구간의 모델에 적용한 입력 자료 및 경계조건은 용담댐 하류 남대천 합류지점으로부터 3km 구간으로 구간의 평균 폭은 60~80m 내외이며, 평균하상 경사는 1/650~1/1,000, 단면자료는 1/25,000의 수치지도를 이용 하였으며, Scatter자료는 『금강상류 2006하천정비 기본계획서』를 바탕으로 참고하여 25,900개의 수심값을 적용하였다[13]. 조도계수는 하상재료 또는 지형조건을 고려하여 Manning에 의해 제안되는 것으로 0.035 값을 이용하였다. [그림 1]은 수치모델 적용을 위한 유한 요소망으로 1,077개의 격자와 절점 3,540개로 구성하였다. 하천의 흐름 특성 및 오염물 이동 확산은 연속, 운동량 방정식 및 이송·확산 방정식으로 표현되는 데, 그 지배 방정식은 식(1)~(4)와 같다[9][10].

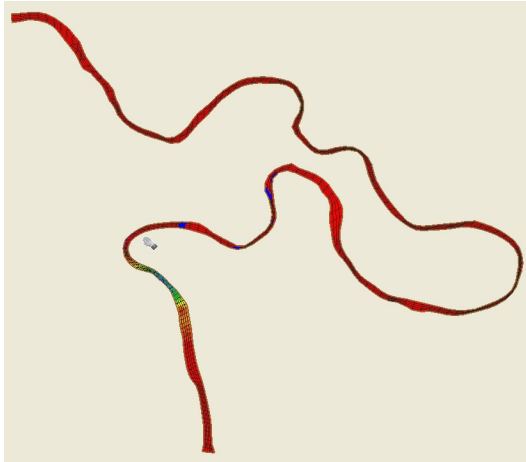


그림 1. 실험구간의 유한 요소망

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

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

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

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

여기서, u, v는 직교 좌표계에서의 수심 적분한 수평 흐름 속도, x, y, t는 직교 좌표계 및 시간, ρ는 유체의 밀도, E는 와점성계수, a는 하상고, h는 수심, g는 중력 가속도, n은 Manning 조도계수, ζ는 바람에 의한 전단

계수, V_a 는 풍속, ψ는 풍향, φ는 위도, ω는 지구의 회전 각속도를 나타낸다.

하천현장 실험의 경계조건은 용담유량관측소의 유량과 수통유량관측소의 수위 값을 사용하였는데 2007년 6월24일 0시부터 6월26일 0시까지 3시간 간격의 데이터로 [표 1]과 같다.

표 1. 3시간간격 용담유량 및 수통수위

일 시	용담유량 (CMS)	수통수위 (M)	합류유량 (CMS)
2007-06-24 00:00	7.14	0.44	9.69
2007-06-24 03:00	7.14	0.46	9.69
2007-06-24 06:00	13.36	0.54	18.13
2007-06-24 09:00	34.73	0.75	47.13
2007-06-24 12:00	19.03	1.11	25.82
2007-06-24 15:00	16.03	1.20	21.75
2007-06-24 18:00	13.36	1.08	18.13
2007-06-24 21:00	11.00	0.97	14.92
2007-06-25 00:00	11.00	0.87	14.92
2007-06-25 03:00	11.00	0.80	14.92
2007-06-25 06:00	11.00	0.74	14.92
2007-06-25 09:00	8.93	0.68	12.12
2007-06-25 12:00	8.93	0.58	12.12
2007-06-25 15:00	8.93	0.70	12.12
2007-06-25 18:00	8.93	0.59	12.12
2007-06-25 21:00	8.93	0.56	12.12
2007-06-26 00:00	8.93	0.54	12.12
2007-06-26 03:00	8.93	0.52	12.12
2007-06-26 06:00	8.93	0.50	12.12
2007-06-26 09:00	8.93	0.49	12.12
2007-06-26 12:00	8.93	0.48	12.12
2007-06-26 15:00	8.93	0.47	12.12
2007-06-26 18:00	8.93	0.46	12.12
2007-06-26 21:00	8.93	0.45	12.12
2007-06-27 00:00	8.93	0.44	12.12

[표 1]의 값을 사용하여 경계조건을 구성하여 RMA-2를 실행시킨 결과 유속분포는 최대유속 0.66m/s이며, 실험구간 평균유속은 0.4m/s나타났다. 이 같은 유속 및 오염물질의 확산을 검증하기 위해 2007년 6월 25일 현장실험을 실시하였으며, 현장실험에서의 유속측정은 1차원 유속계 AEM-1D와 2차원 유속계인 COMPACT-EM으로 측정하였고, 본 실험에 사용한 방사성동위원소는 반감기가 약 35.5 시간인 감마선 방출 82Br를 방출점에서 40 mCi의 양으로 방출하여 실험을 하였다.

RI물질의 농도분포는 원자력연구원의 RI계측장비인 NaI계측기를 이용하여 1개 측선에 10개의 디텍터를 사용하여 총 3개 구간에서 30개를 1초 단위로 측정하였다. 각 구간의 간격은 1km로 정하되 현장 사정에 따라 차이를 조금 두어 각 구간의 농도를 계측하였다. 계측된 데이터는 시간에 따른 추적자 농도의 변화량으로 계수값이 Count Per Second로 나타난다. 이를 실험결과 분석에 활용하기 위하여 농도와와의 환산인자를 구한다. 1ℓ에 희석된 10mCi의 82Br에 대하여 NaI(Tl) 섬광계수기(Eberline, SPA-3)에서 4.57×10^7 cps (counts/second) 계측되어, 이로부터 $2.2 \times 10^{-4} \mu\text{Ci l}^{-1} \cdot \text{cps}^{-1}$ 의 환산계수를 구할 수 있다. 계측하여 환산한 농도값은 [그림 2]와 같다.

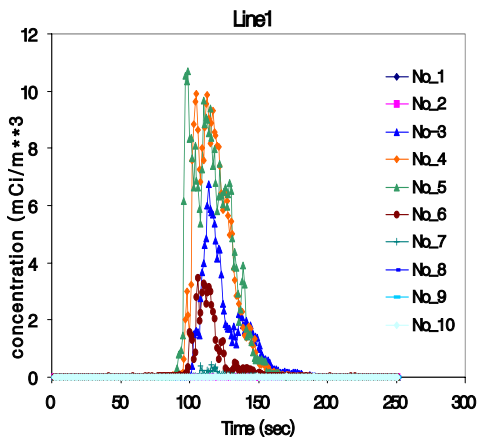


그림 2. 실험에서 관측된 동위원소 농도 그래프

이렇게 산정된 농도의 계측데이터와 수리측량을 바탕으로 실험구간의 중·횡 확산계수를 구하기 위하여 2차원 이류·확산방정식의 해석해를 이용하여 최소 자승법에 의하여 계수의 값을 산정하였다[8]. 해석해를 이용하여 산정한 확산계수 값은 $D_x=0.5$, $D_y=0.014$ 로 이 확산계수 값의 검증을 위하여 SMS 프로그램을 이용하여 10초 간격의 오염물질거동을 모델링하여 [그림 3]과 [그림 4]와 같이 나타내었다.

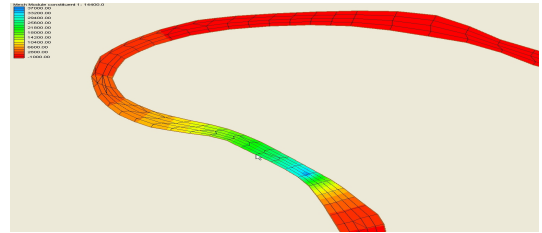


그림 3. 오염물질 거동

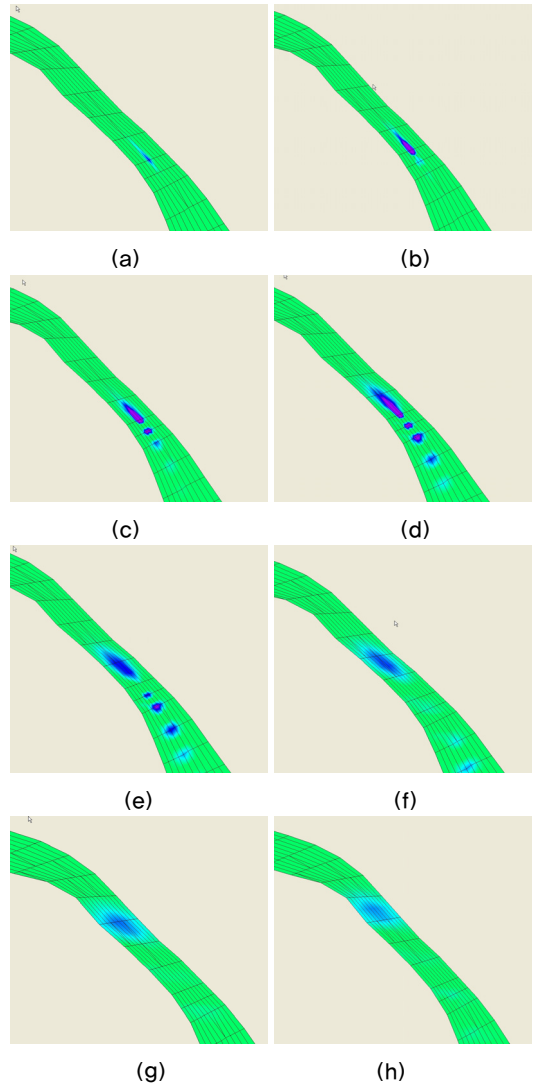


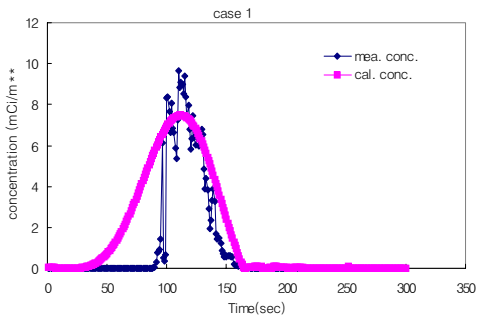
그림 4. 10초 간격의 오염물질 거동

III. 분석 및 고찰

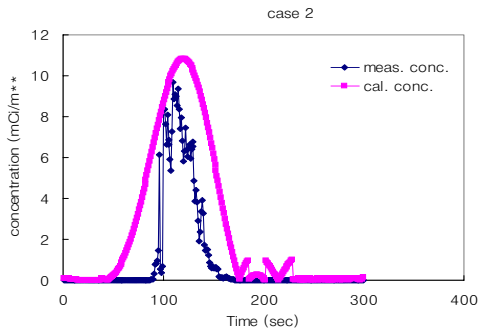
해석해를 이용하여 산정한 확산계수의 값의 민감도 분석을 위하여 [표 2]와같이 민감도 분석을 하였으며, 민감도 분석을 통해 얻은 농도값과 관측값을 비교 분석하여, [그림 5]와 [그림 6]과 같이 나타내었다.

표 2. 민감도 분석표

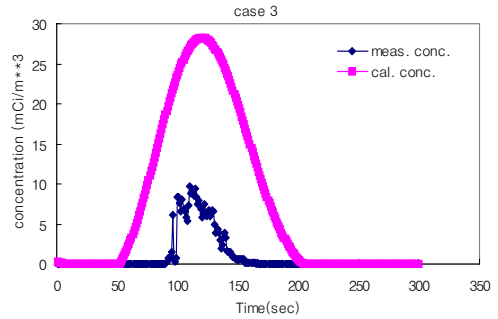
Run number	Dispersion coefficient	
	$Dx(m^2 \cdot s^{-1})$	$Dy(m^2 \cdot s^{-1})$
case1	0.27	0.042
case2	0.27	0.42
case3	2.7	0.042
case4	27	0.042



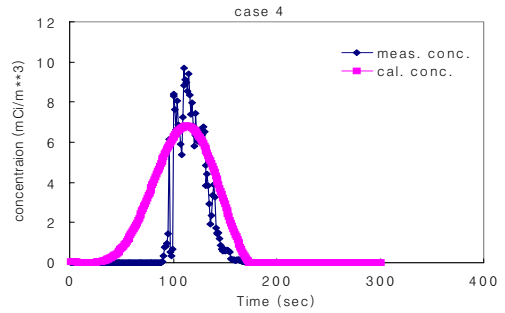
(a)



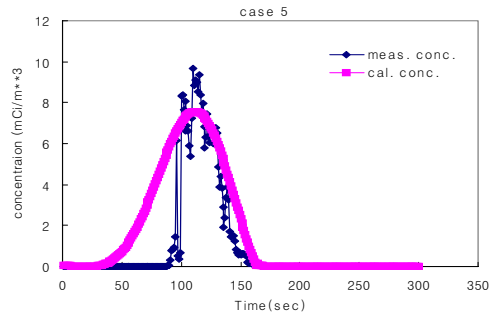
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 5. 확산계수 변화에 따른 농도분포

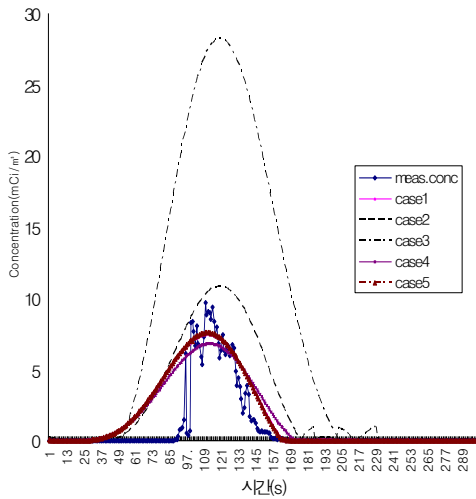


그림 6. RI농도 관측 값과 확산계수의 실험값 비교

민감도 분석결과 종 방향 확산계수의 값이 증가할수록 농도 값은 커지나, 최대 농도 도달시간에는 큰 변화가 없었다. 이는 종 방향 확산계수가 증가함에 따라 수평 혼합이 빠르게 일어나 전체적인 농도 값은 증가하지만 최대 농도 도달시간은 확산보다는 이류에 의한 영향이 크기 때문이다. 그러나 횡방향 확산계수의 변화에 대해서는 상대적으로 종 방향 확산계수의 변화에 비해 큰 차이를 보이지 않았다. 전체적으로는 관측한 RI 농도 값을 이용하여 직접 확산계수를 산정한 case 1의 결과가 관측 값과 가장 잘 일치하였다.

[그림 4](a)의 경우 최대농도의 값은 조금 적게 나왔으나 최대농도의 도달시간이 거의 비슷하게 나타는 것을 통해 수치모사가 비교적 잘 적용된 것을 알 수 있다. [그림 4](b),(c)의 경우 최대농도의 값이 실험값 보다 더 크게 나왔으며 최대농도의 도달시간 역시 약 10초정도 늦은 분포를 보이고 있다. 이는 종확산계수가 커짐에 따라 농도의 도달시간은 약간 늦어 지며 농도의 값이 더 커지는 것을 알 수 있다. [그림 4](d),(e)의 경우 횡확산계수 값의 변화를 주었으나 최대농도와 최대농도의 도달시간에는 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

오염물질의 지속시간을 살펴보면 자연하천의 경우 오염물질 투여시간으로부터 약 90초~160초 사이로 약 70초 사이에 오염물질이 빠져나갔으나 모델링에서의

오염물질 지속시간은 약 45초~180초로 약 135초 정도 지속시간이 길어지는 걸 알 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 금강상류 지역의 하천에서의 RI추적자를 이용한 확산실험을 통해 취득된 자료를 이용하여 종확산계수와 횡확산계수의 값을 산정하였다. 또한 이 값을 이용하여 민감도분석을 한 결과 확산계수가 오염물질의 거동에 미치는 영향을 다음과 같이 할 수 있었다.

1. 본 연구의 실험으로 인하여 종확산계수가 오염물질의 도달시간에 영향을 주며, 횡확산계수가 오염물질의 도달시간에는 많은 영향을 주지 않는 것을 수 있었다.
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 $D_x=0.5$, $D_y=0.014$ 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] M. K. Bansal, "Dispersion in natural streams," Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.97, No.11, pp.493-498, 1971.
- [2] Y. C. Chang, "Lateral mixing in meandering channels. UMI Dissertaion," Service, pp.1-49, 1971.

- [3] J. W. Elder, "The dispersion of a marked fluid in turbulent shear flow," Journal of Fluid Mechanics, Vol.5, pp.544-560, 1959.
- [4] H. B. Fischer, "Dispersion predictions in natural streams," Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 94, No. HY6, pp.544-560, 1968.
- [5] H. B. Fischer, "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, 1975.
- [6] R. E. Glover, "Dispersion of dissolved and suspended materials in flowing streams," United State Geological Survey Professional Paper 433-B, Washington, D. C., 1964.
- [7] R. G. Godfrey and B. J. Frederick, Stream dispersion at selected sites, United State Geol. Sur. prof. Pap. 433-k, 1970.
- [8] K. S. Suh, K. C. Kim, I. Y. Chun, S. H. Jung, and J. Y. Lee, "Determination of dispersion coefficients using radioisotope data in river environment," Applied Radiation and Isotopes(Submitted), 2008.
- [9] U. S. Army, Eng. Res. and Dev. Center, RMA2 WES V 4.5, 2003.
- [10] U. S. Army, Eng. Res. and Dev. Center, RMA4 WES V 4.5, 2003.
- [11] 한정석, 하천에서 오염물질이 순간유입으로 인한 확산 특성분석, 경기대학교 대학원, 2002.
- [12] 서일원, 정태성, "자연하천에서의 종확산계수 추정식 개발", 대한토목학회 학술발표회 논문집 (II), 1994.
- [13] 건설교통부, 금강상류 2006하천정비기본계획서, 2006.

저 자 소 개

김 기 철(Ki-Chul Kim)

정회원



- 2006년 2월 : 한밭대학교 토목공학과(공학사)
- 2008년 2월 : 한국대학교 토목공학과(공학석사)
- 2007년 4월 ~ 현재 : 한국원자력 연구원

<관심분야> : 하천공학, 해양공학, 환경공학

이 중 석(Jong-Seok Lee)

정회원



- 1987년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학사)
- 1989년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학석사)
- 1995년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학박사)

• 1996년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 토목공학과 교수

<관심분야> : 수리·수문, 하천·생태환경